蓝皮书
BLUE BOOK

汽车先进动力系统
技术发展报告
（2026）

乘用车动力总成专业委员会，The Specialist Committee on Powertrain of Passenger Car,简称SCP,成立于2020年12月,围绕中国内燃机工业协会章程开展各项工作;汽车先进动力系统分会，Automotive Advanced Propulsion Systems,简称APS,成立于2021年10月,围绕中国汽车工程学会章程开展各项工作。两个专业分会由国内外主流主机厂、高等院校、科研机构及零部件供应商等共同发起并组建,在行业精英人士的带领下,围绕高效发动机、混动变速箱、零碳燃料、驱动电机、核心零部件,搭建政、产、学、研四位体发展平台,促进先进动力系统全产业链合作共赢、协同创新、与时俱进,推动行业技术进步,引领未来发展趋势,实现3060“双碳”目标。

中国汽车工程学会汽车先进动力系统分会（APS）
中国内燃机工业协会乘用车动力总成专业委员会（SCP）

2026
版

编 委 会

编委会主任 王瑞平

主编 许 敏

副主编 贡 俊 李理光 徐向阳

编委 韩志玉 孙旭东 张 彤 贾素芬
邓 伟 韩令海 宫艳峰 王立新
王 超 李儒龙 邱劲草 张文龙
帅石金 谢 辉 肖成伟 李金成 董 鹏

主要执笔人 许 敏 张亦嘉 邱劲草 陶鑫瑞
马志寅 邓怡然 孙胜鸿

序 言

《汽车先进动力系统技术发展报告（2026）》由中国汽车工程学会汽车先进动力系统分会（APS）与中国内燃机工业协会乘用车动力总成专业委员会（SCP）主编，自 2023 年起已连续四年编写发布。依托车用动力系统国际论坛，蓝皮书持续汇聚行业智慧、沉淀技术观点，并围绕汽车动力系统不同发展阶段面临的关键问题形成年度判断。从技术路线之争背景下提出动力多元化，到关注多元技术协同与差异化发展，这套蓝皮书始终力求不止记录行业变化，更通过系统梳理和理性研判回应行业关切、辨识发展方向。

2026 年，中国汽车动力技术发展进入新的阶段。经过多年快速追赶，一批先进技术正在加速普及，企业工程开发能力和系统集成水平显著提升。与此同时，当越来越多先进技术逐渐成为行业共同能力，如何进一步形成真正具有差异化价值的技术突破，推动中国汽车产业由技术追赶走向原创创新，已经成为下一阶段更值得关注的问题。

正是在这样的节点上，本年度蓝皮书以“全球视野、创新跃进 ”为主题，并对以往的编写方式作出了新的调整。相比对技术进展进行全面梳理，本书更加聚焦前沿先进技术与具有突破意义的创新实践，既关注已经形成产业竞争力的先进技术如何持续演进，也关注可能改变既有技术路径的新思路、新方法和新探索。这样的变化，使本书不仅是一份年度技术进展的总结，也成为观察汽车动力技术下一步可能向何处发展的一个重要窗口。

本书的另一个特点，是进一步加强了技术判断与一线实践之间的联系。各技术章节从第六届车用动力系统国际论坛的报告成果中选取具有代表性的先进技术应用案例与创新实践，使技术趋势能够通过具体工程成果得到印证。与此同时，继上一年度集中展示中国汽车企业先进动力总成方案后，今年进一步将视角深入到企业创新实践，呈现企业围绕实际技术问题形成的差异化方案和代表性探索，使读者能够更加直接地看到中国汽车动力技术正在发生的创新变化。

作为长期关注汽车动力发展的行业工作者，我愿意向广大读者推荐本书。它既延续了蓝皮书对行业趋势进行系统研判的传统，也更加突出技术前沿与创新实践，既有对当前技术发展的梳理，也有对未来方向的思考。相信本书能够为行业主管部门、企业决策者、工程技术人员和科研工作者提供有价值的参考，并为汽车动力系统未来的技术创新带来新的启发。

衷心感谢本书主编、副主编、编委会成员以及所有参与编写和提供成果的专家、学者与企业代表。期待本书继续发挥汇聚智慧、促进交流、启发创新的作用，为中国汽车动力系统技术进步和汽车产业高质量发展贡献力量。



2026 年 10 月

前 言

当前，全球汽车产业正处于能源转型、技术变革与产业竞争格局重塑相互交织的重要阶段。电动化持续深化，内燃机加快向高效低碳方向演进，电驱与混合动力技术不断融合，人工智能开始深度进入动力系统研发、控制与系统架构，汽车动力技术与低空飞行器等新兴领域之间也呈现出更加明显的双向融合趋势。与此同时，随着先进技术快速普及，汽车企业之间的技术差距不断缩小，如何突破技术同质化、形成真正具有差异化价值的创新能力，正成为产业由技术追赶迈向原创突破过程中需要重点关注的问题。

在此背景下，以“全球视野、创新跃进”为主题的第六届车用动力系统国际论坛于 2026 年 5 月 21 日至 23 日在宁波召开。论坛汇聚国内外汽车企业、科研机构、高校等领域专家，围绕全球动力技术路线与产业竞争、高效内燃机与低碳零碳燃料、电驱动与混合动力、动力电池、动力系统数智化以及低空飞行器动力等议题开展交流，共形成 50 余场主题报告。论坛所呈现的技术成果、工程实践和专家观点，为本年度蓝皮书的编写提供了重要基础。

自 2023 年以来，汽车先进动力系统蓝皮书持续依托车用动力系统国际论坛，将会议交流进一步转化为系统化、结构化的年度技术研究。随着论坛报告数量增加、涉及领域不断拓展，如果继续沿用以往较为“大而全”的编写方式，不仅篇幅持续增加，也容易削弱年度重点。因此，2026 年蓝皮书在延续系统性与专业性的基础上，对内容组织方式进行了进一步调整，由一般性的技术介绍转向突出关键技术与前沿方向，更加聚焦能够代表当前产业先进水平的技术以及具有潜在突破价值的创新实践。

本年度蓝皮书特别关注“先进”与“创新”两个不同维度。先进技术主要体现现有技术路线上的持续优化与提升，包括效率、性能、集成度、安全性及智能化水平等方面不断向更高水平演进；创新实践则更多关注新原理、新架构、新材料、新方法以及跨领域融合所形成的新技术路径。二者相互关联但侧重点不同。通过这样的观察框架，本报告力求既客观呈现当前已经形成产业竞争力的先进技术，也关注可能推动未来技术路线发生变化的新探索。

这种编写思路进一步落实到各技术章节之中。除系统梳理技术发展脉络和关键趋势外，各章节结合第六届车用动力系统国际论坛报告，设置先进技术应用案例与创新技术探索实践，以代表性的产业应用、科研成果和技术探索对相关判断进行补充和印证，使技术综述与实际案例形成对应关系。在企业实践部分，本年度蓝皮书也在上一年度先进动力总成方案展示的基础上进一步深化，不再仅关注企业已经具备哪些先进技术，而是更加关注企业围绕哪些问题进行了新的探索，重点呈现汽车企业的创新实践、差异化技术方案和代表性突破。

全书据此围绕汽车动力系统发展阶段、内燃机与低碳燃料、电驱动与混合动力、动力电池、人工智能赋能、汽车动力与低空动力协同发展、中国汽车企业动力系统创新实践以及未来发展展望展开。希望通过对行业趋势、先进技术和创新实践的系统梳理，帮助读者既理解当前汽车动力技术的发展基础，也辨识可能影响下一阶段产业演进的重要技术方向，为后续技术研发、企业决策与行业研究提供参考。

OCTOBER 2026

汽车先进动力系统技术发展报告

目录

CONTENTS

第一章 从技术追赶到创新突破：中国汽车动力系统发展的新阶段 1
1.1 汽车动力系统正经历深度变革 1
1.2 中国汽车动力行业从技术追赶迈向多元融合发展新阶段 3
1.3 创新引领：中国汽车动力行业的新使命 5
观点来源 8
第二章 内燃机与低碳燃料技术发展 9
2.1 内燃机与低碳燃料技术发展格局 9
2.2 先进内燃机技术 10
2.2.1 高效燃烧与热效率提升技术 10
2.2.2 高效进排气、EGR与增压技术 12
2.2.3 低摩擦与主动热管理技术 13
2.2.4 近零排放与后处理协同控制技术 14
2.2.5 混动与增程发动机专用化技术 15
2.2.6 先进内燃机技术应用案例 16
（1）奇瑞：鲲鹏天擎高膨胀比高效发动机 16
（2）长安：新蓝鲸500 bar超高压直喷混动专用发动机 18
2.3 低碳燃料技术 19
2.3.1 氢燃料技术 19
2.3.2 氨燃料技术 20
2.3.3 甲醇燃料技术 21
2.3.4 电合成汽柴油技术 22
2.3.5 生物基燃料技术 22
2.3.6 先进低碳燃料技术应用案例 23
（1）吉利：绿色甲醇生产—运输—加注—应用全链条布局 23
2.4 低碳燃料发动机适配与多燃料协同技术 24
2.4.1 氢燃料发动机适配技术 24
2.4.2 氨燃料发动机适配技术 26
2.4.3 甲醇燃料发动机适配技术 28
2.4.4 多燃料兼容与协同燃烧技术 29
2.4.5 先进低碳燃料发动机适配与多燃料协同技术应用案例 31
（1）吉利：M100 2.0TD甲醇发动机 31
2.5 内燃机与低碳燃料创新实践 32
（1）上海交通大学：无缸心距水平对置结构实现无感增程 32
（2）吉林大学：甲醇热化学能量闭环重构发动机余热利用路径 33
（3）清华大学：活化热氛围双区燃烧实现高比例氨燃料高效稳定燃烧 33
2.6 内燃机与低碳燃料技术趋势与关键挑战 34
观点来源 34
第三章 电驱动与混合动力技术演进 36
3.1 电驱动与混合动力技术发展格局 36
3.2 电驱核心部件与性能提升技术 36
3.2.1 高速高效电机技术 37
3.2.2 高压高效功率电子技术 38
3.2.3 高效传动、润滑与热管理技术 40
3.2.4 电驱核心部件与性能提升技术应用案例 41
（1）蔚来：900 V全域高压电驱系统 41
（2）长安：高磁通高功率混动电驱系统 42
3.3 电驱系统集成与融合技术 43
3.3.1 多合一结构集成与平台化技术 44
3.3.2 驱充一体化技术 45
3.3.3 分布式驱动与底盘协同控制技术 46
3.3.4 先进电驱系统集成与融合技术应用案例 47
（1）东风：第四代马赫E 12合1高集成电驱系统 47
（2）蔚来：电驱复用升压充电系统 47
（3）精进电动：平行轴背靠背双电机七合一电驱系统 48
3.4 先进混合动力系统技术 49
3.4.1 混动构型与机电耦合技术 49
3.4.2 多动力源能量管理与高效运行技术 51
3.4.3 动态协调与动力品质控制技术 52
3.4.4 先进混合动力系统技术应用案例 53
（1）理想：全新一代增程系统 53
（2）泛亚：真龙PHEV混动专用变速箱 54
3.5 电驱动与混合动力创新实践 55
（1）现代：SiC/Si双逆变器拓扑实现电驱效率与性能协同 55
（2）精进电动：直磁型磁路实现双稳态零保持损耗执行器 56
3.6 电驱动与混合动力技术趋势与关键挑战 57
观点来源 57
第四章 动力电池技术发展与全生命周期管理 59
4.1 动力电池技术发展格局 59
4.2 高比能与多体系电池技术 61
4.2.1 高镍高硅与固液混合电池协同设计 61
4.2.2 钠离子电池的产业化路径与适用边界 62
4.2.3 全固态电池由材料突破向工程制造跨越 63

4.2.4 多体系电池工程化应用案例 64
4.3 电芯结构、系统集成与高效管理技术 64
4.3.1 大圆柱、全极耳与电极制造技术 64
4.3.2 CTP、CTC/CTB与车身一体化集成 65
4.3.3 热管理、快充与智能BMS 65
4.4 动力电池全生命周期安全技术 66
4.4.1本征安全与制造缺陷预防 67
4.4.2 系统安全、故障隔离与热蔓延控制 68
4.4.3 多源感知与主动风险预警 68
4.4.4 热失控机理、燃烧抑制与应急处置 69
4.4.5 安全创新应用案例 69
4.5 低碳制造、碳足迹与循环利用 71
4.5.1 碳足迹核算与规则衔接 71
4.5.2 绿色制造与供应链协同 71
4.5.3 电池护照、追溯与第三方核证 72
4.5.4 回收、再生材料与供应链尽职调查 72
4.6 动力电池创新实践 73
4.6.1 温度响应材料把安全干预前移到失控前 73
4.6.2 力—化耦合感知拓展内部缺陷可观测性 73
4.6.3 超薄固态电解质膜推动全固态电池规模制造 74
4.7 动力电池技术趋势与关键挑战 75
观点来源 76
第五章 AI赋能动力系统智能化变革 77
5.1 AI赋能动力系统技术发展格局 77
5.2 动力系统智能化架构与算力基础 78
5.2.1 域集中与中央计算架构 78
5.2.2 车规异构算力与边缘AI部署 78
5.2.3 高速通信与车云数据底座 79
5.2.4 动力系统智能化架构与算力基础技术应用案例 79
（1）英飞凌：AURIX TC4x高性能控制平台集成实时控制与智能计算能力 79
5.3 AI赋能动力系统研发 80
5.3.1 物理—数据融合建模与代理模型技术 80
5.3.2 智能设计与构型—控制协同优化 81
5.3.3 AI辅助标定与研发智能体 81
5.3.4 自动测试、场景生成与虚实融合验证 82
5.3.5 AI赋能动力系统研发技术应用案例 83
（1）深蓝：AI智能体辅助电驱软件开发与持续测试 83
（2）极光湾科技：全流程智能体辅助软件开发与标定研发 83
5.4 AI赋能动力系统控制 84
5.4.1 智能状态估计与健康管理技术 84
5.4.2 动力系统学习增强控制技术 85
5.4.3 预测性能量与热管理技术 86
5.4.4 AI赋能动力系统控制技术应用案例 87
（1）极光湾科技：物理模型与AI融合构建动力系统虚拟传感器 87
（2）长城：惯用路线预测支撑预测性能量管理 87
5.5 AI赋能动力系统跨域协同优化 88
5.5.1 动力—底盘—热管理跨域协同控制 88
5.5.2 人—车—路—云信息融合与协同优化 89
5.5.3 AI赋能动力系统协同优化技术应用案例 89
（1）联合汽车电子：基于整车能量流的动力——热管理跨域协同优化 89
（2）极光湾科技：车云协同强化学习优化混动能量管理 90
5.6 AI赋能动力系统创新实践 91
（1）英飞凌：PPU并行处理单元实现智能算法与实时控制融合 91
（2）天津大学：物理信息随机配置网络实现轨压虚拟传感 93
（3）上海交通大学：深度强化学习实现增程发动机控制参数在线优化 93
（4）清华大学：领域自适应迁移学习降低跨燃油标定数据需求 94
5.7 AI赋能动力系统技术趋势与关键挑战 95
观点来源 95
第六章 汽车动力与低空动力协同发展 97
6.1 汽车动力与低空动力协同发展格局 97
6.2 航空电推进与动力电池技术 99
6.2.1 高比能、高功率航空动力电池 99
6.2.2 分布式电驱与功率电子 100
6.2.3 地空差异化热管理与智能电池管理系统（BMS） 101
6.2.4 载人eVTOL电池系统应用案例 101
6.3 混合动力与高效热机技术 103
6.3.1 串联、并联与分布式混合动力架构 103
6.3.2 飞行器—推进—能源综合设计与控制 103
6.3.3 高效热机、可持续航空燃料（SAF）与高空增压 104
6.3.4 高空环境与热机应用案例 105

6.4 氢能航空动力技术 106
6.4.1 航空燃料电池与辅助系统功重比 106
6.4.2 氢内燃机与氢涡轮燃烧控制 107
6.4.3 机载储氢、供氢与综合热管理 107
6.4.4 氢动力高空试验平台应用案例 108
6.5 适航安全与全生命周期验证 109
6.5.1 从功能危害分析到系统安全目标 109
6.5.2 冗余、故障隔离与安全着陆能力 110
6.5.3 电池和氢动力的专门安全要求 110
6.5.4 积木式试验与持续适航证据链 111
6.6 运行网络与系统经济性 112
6.6.1 任务剖面、航线高度与能源配置 112
6.6.2 补能体系、周转效率与年利用率 113
6.6.3 全生命周期成本与路线比较 114
6.7 汽车动力与低空动力创新实践 115
6.7.1 地空分离式热管理与任务化补能 115
6.7.2 飞推能源一体化优化与安全控制 115
6.7.3 高空动力设计制造一体化与数字证据链 116
6.8 汽车动力与低空动力技术趋势与关键挑战 116
观点来源 117
第七章 中国汽车企业动力系统创新实践 119
7.1 浩思动力 119
7.1.1 动力系统技术创新方向概览 119
7.1.2 代表性动力系统创新实践 119
（1）900 V高压混动架构实现高功率电驱与发动机直驱协同 119
（2）超紧凑混动平台创新解决纯电原生平台的空间与接口适配问题 120
7.1.3 未来动力系统技术展望 120
7.2 一汽红旗 122
7.2.1 动力系统技术创新方向概览 122
7.2.2 代表性动力系统创新实践 122
（1）P1+P3双电机两挡构型创新解决纵置前驱混动宽工况匹配问题 122
（2）电动VVT与停机位置协同创新降低混动发动机起动冲击 123
7.2.3 未来动力系统技术展望 124
7.3 长安汽车 124
7.3.1 动力系统技术创新方向概览 124
7.3.2 代表性动力系统创新实践 125
（1）精准定向喷淋创新解决高功率电驱局部冷却与润滑问题 125
（2）智能温控与冷却流量预请求创新解决混动电驱瞬态热管理滞后问题 126
7.3.3 未来动力系统技术展望 126
7.4 长城汽车 127
7.4.1 动力系统技术创新方向概览 127
7.4.2 代表性动力系统创新实践 127
（1）双喷射与低摩擦设计协同优化4.0T V8发动机综合性能 127
（2）柴油专用DHT与混动构型开发优化柴油动力系统能耗 128
7.4.3 未来动力系统技术展望 128
7.5 东风汽车 129
7.5.1 动力系统技术创新方向概览 129
7.5.2 代表性动力系统创新实践 129
（1）芯片级集成控制技术提升动力域协同控制能力 129
（2）云端预警与主动应急冷却技术提高动力电池主动安全能力 130
7.5.3 未来动力系统技术展望 130
7.6 上汽乘用车 131
7.6.1 动力系统技术创新方向概览 131
7.6.2 代表性动力系统创新实践 132
（1）DMH机电一体化架构实现混动系统协同优化 132
（2）PICU动力总成大脑实现动力域控制集成 133
7.6.3 未来动力系统技术展望 134
7.7 奇瑞汽车 134
7.7.1 动力系统技术创新方向概览 134
7.7.2 代表性动力系统创新实践 135
（1）双曲三联动机构实现压缩膨胀过程非对称优化 135
（2）机理融合数字模型与强化学习控制提升动力系统热管理开发效率 136
7.7.3 未来动力系统技术展望 136
第八章 全球视野、创新跃进：汽车动力系统未来发展展望 138

第一章 从技术追赶到创新突破：中国汽车动力系统发展的新阶段

全球汽车产业正处于能源体系、技术体系和产业格局深刻变革的关键阶段。能源体系低碳化推动汽车动力路线由单一向多元并行演进，智能化与跨域融合持续重塑动力系统的技术形态与开发范式，全球市场与产业链重构则推动汽车产业竞争加速由本土走向全球。在这一进程中，中国汽车动力产业已由早期的技术引进与追赶模仿，逐步迈向自主研发与多元融合，并依托市场规模、产业链体系和工程化能力形成显著的产业竞争优势。如何进一步将规模与产业优势转化为原创技术优势、品牌价值优势和全球竞争优势，成为中国汽车动力行业下一阶段发展的核心命题。

1.1 汽车动力系统正经历深度变革

当前汽车动力系统的变革已经超越单一技术路线的迭代，而是能源体系、技术体系与产业格局多重变化共同作用下的系统性演进。能源体系低碳化推动动力技术向多元路线发展，智能化与跨域融合持续重塑动力系统的技术形态和开发模式，全球汽车市场与产业链重构则推动产业竞争加速由本土走向全球。三重变革相互交织，共同构成汽车动力系统未来发展的基本时代背景。

（1）能源体系变革推动动力技术向低碳化、多元化发展

全球碳中和目标正在推动能源体系加速向低碳化转型。2025 年中国可再生能源装机占比已达到 60%，发电量占比达到 38%；到 2030 年可再生能源装机占比有望达到 75%、发电量占比达到 50%。随着能源供给结构持续清洁化，汽车使用能源也由单一依赖石油资源，逐步向电力及多种低碳、零碳燃料拓展，动力系统低碳发展的能源基础正在发生深刻变化。

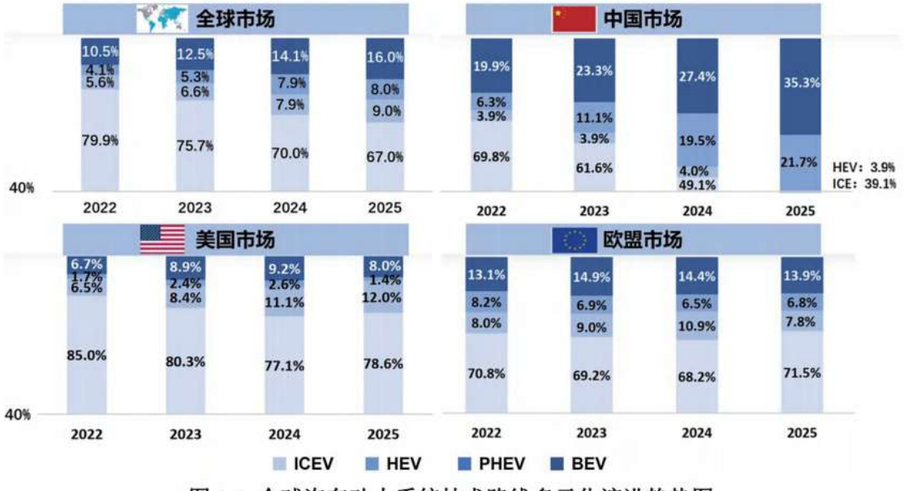


图 1-1 全球汽车动力系统技术路线多元化演进趋势图

在能源体系转型的驱动下，汽车动力技术正从单一内燃机路径向多元动力并行发展。如图 1-1 所示，全球主要汽车市场中，燃油汽车（ICEV）、混合动力汽车（HEV）、插电式混合动力汽车（PHEV）、增程式电动汽车（REEV）与纯电动汽车（BEV）等动力形式长期共存，不同技术路线的市场结构持续动态调整。2025 年中国市场新能源汽车渗透率已达到 57%，其中纯电与混合动力均已形成较大市场规模；与此同时，氢、甲醇等低碳和零碳能源的应用探索持续推进，进一步拓展了汽车动力系统低碳发展的技术路径。

从全球范围看，不同国家和地区在能源禀赋、基础设施、产业基础和政策环境等方面存在显著差异，对汽车动力技术形成不同需求。因此，汽车动力系统的低碳转型并非由一种技术对另一种技术的简单替代，而将长期呈现多种能源、多种动力路线并行发展并根据区域条件差异化配置的格局。

（2）技术体系变革推动动力系统向智能化、融合化演进

新一代信息技术与汽车产业加速融合，正在推动动力系统由传统的硬件主导向软件定义、数据驱动和智能优化方向演进。随着动力系统复杂度不断提升，其研发和控制对象已由单一发动机、电机等部件扩展至多动力源、多能量流和多运行场景，依靠固定规则和局部参数优化的传统开发方式逐步向模型、数据与人工智能协同驱动转变。人工智能与数字孪生等技术开始贯穿设计开发、控制优化和运行管理全过程，使动力系统具备更强的状态感知、预测分析、全局优化和持续迭代能力。

与智能化同步推进的是动力系统的融合化发展。一方面，发动机、电机、电控、电源等部件之间的硬件集成持续深化，系统小型化、轻量化和集成化程度不断提升；另一方面，控制边界由单一动力部件逐步拓展至整车能量管理、热管理和底盘运动控制等领域，通过跨系统信息共享与协同优化实现整车层面的性能提升。动力系统由相对独立的功能系统逐步演变为整车多系统协同的重要组成部分。

智能化与融合化的共同发展，正在改变汽车动力技术的竞争逻辑。未来动力系统的竞争将不再局限于单个部件或单项性能指标，而更多体现为软硬件协同、跨域控制以及面向整车和使用场景的系统级综合优化能力。

（3）产业格局变革推动全球汽车市场竞争格局重塑

全球汽车产业格局正在加速重构，中国汽车由国内市场竞争走向全球市场，成为这一轮产业变革的重要特征。随着全球汽车市场重心逐步向亚太等新兴市场转移，中国汽车产业规模和品牌影响力持续提升。2025 年，全球汽车销量约 9650 万辆，同比增长 1.3%；其中中国市场销量 3440 万辆，同比增长 9.4%，是全球汽车市场增长的主要牵引力量。从品牌格局看，如图 1-2 所示，2025 年中国品牌全球销量约 2690 万辆，其中在中国市场销售 2090 万辆、海外市场销售 600 万辆，占全球汽车销量的比重达到 27.9%，已十分接近欧系品牌的 28.3%，并高于日系品牌的 24.3%和美系品牌的 18.7%。

但中国品牌在海外市场仍具有较大的拓展空间。按品牌归属口径统计，中国品牌海外市场销量约为其国内市场销量的三分之一；而欧美品牌海外销量略高于本土市场，日韩品牌海外销量更是其本土市场的 4 至 5 倍。这意味着，中国汽车产业正在由依托超大规模国内市场发展的阶段，进一步迈向国内外市场协同发展的新阶段，全球市场将成为中国汽车下一阶段竞争和增长的重要空间。



图 1-2 分区域市场的品牌份额对比

全球竞争并不是国内竞争模式的简单复制。不同区域在品牌竞争格局、能源结构、政策法规、基础设施和消费需求等方面存在明显差异，对动力技术路线和产品能力提出了差异化要求。同时，随着中国车企加快海外布局，汽车产业全球化也正在从整车产品出口进一步向海外生产、本地供应链建设和属地化运营延伸，全球汽车供应链由单一的全球化分工逐步向全球统筹与区域协同并存的模式演进。因此，中国汽车产业进入全球市场，不仅意味着市场空间的扩大，也意味着竞争维度由产品竞争进一步扩展至技术、供应链和全球运营体系的综合竞争。如何适应不同区域市场需求并形成具有全球竞争力的技术与产业能力，将成为中国汽车由产业规模优势进一步迈向全球竞争优势的重要命题。

总体来看，能源体系低碳化推动动力路线多元发展，技术体系智能化与融合化重塑动力系统竞争方式，产业格局变化则推动汽车竞争全面走向全球。三重变革共同表明，汽车动力系统正在经历由单一技术迭代向多能源、多技术和全球化协同发展的系统性变革，也构成中国汽车动力产业重新审视自身发展阶段与未来方向的外部背景。

1.2 中国汽车动力行业从技术追赶迈向多元融合发展新阶段

经过数十年的技术积累与产业发展，中国汽车动力行业已经由早期以技术引进和消化吸收为主，逐步形成自主正向研发和系统集成能力。特别是新能源汽车产业快速发展以来，超大规模市场、完整产业链与快速工程迭代相互促进，推动中国动力系统由单项技术追赶进一步形成体系化竞争优势。在此基础上，中国汽车动力产业的发展目标和技术路线进一步拓展，进入多能源、多技术协同发展的新阶段。

（1）从技术引进到自主研发，中国动力产业实现阶段性突破

中国汽车动力产业的发展经历了由技术引进、消化吸收到自主开发和正向研发的长期积累过程。产业发展初期，发动机、变速器等核心动力总成较多依赖国外技术输入，通过合资合作、技术引进和工程应用逐步建立研发与制造基础。随着市场规模扩大、法规持续升级和产业技术积累不断深化，中国汽车企业逐步由跟随国外成熟方案转向自主研发，核心技术和系统开发能力持续提升。

目前，中国汽车动力产业已经形成覆盖核心零部件、动力总成和整车系统的较完整自主研发能力。传统内燃机、变速器以及电机、电控、动力电池等关键部件均已具备较强的自主开发基础，混合动力、电驱动等复杂动力系统的架构设计、系统集成与控制能力同步提升。中国企业不仅能够自主掌握和规模化应用先进动力技术，部分领域还逐步形成具有自身特点的技术路线和工程解决方案，技术发展由单项能力突破向系统化自主研发转变。

随着自主研发能力提升，中国与国际汽车产业之间的技术关系也在发生变化。过去以技术输入、消化吸收为主的单向学习模式，正在逐步转向更加双向的技术交流与相互借鉴，中国在新能源汽车、混合动力等领域形成的技术路线和应用经验开始对全球汽车产业产生影响。这表明中国汽车动力产业已经完成从技术追赶向自主发展的阶段性跨越，并具备进一步参与全球技术竞争的基础。

（2）产业体系能力提升推动中国形成动力系统竞争优势

自主研发能力的建立解决了动力技术从“依赖引进”向“自主掌握”的转变，而新能源汽车产业的快速发展，则进一步推动技术能力转化为产业竞争优势。中国已经形成全球规模最大的新能源汽车市场，为动力系统新技术提供了丰富的应用场景和规模化验证条件，使技术研发、产品应用和市场反馈之间形成更加快速的循环。

市场规模的扩大同时带动了新能源汽车产业链快速完善。从关键材料和核心零部件，到动力电池、电驱动、电控系统和整车集成，中国逐步形成覆盖动力系统主要环节的产业链体系（图 1-3）。完整的供应链不仅提高了关键环节的自主保障能力，也缩短了不同企业和技术环节之间的协同距离，使新技术能够更快完成开发、验证、产业化和成本优化。



图 1-3 中国汽车动力系统产业链全布局示意图

在此基础上，中国汽车产业进一步形成了快速工程迭代能力。大规模市场需求为技术方案提供持续验证机会，完整供应链和工程人才体系支撑产品快速开发，市场反馈又能够及时进入下一轮技术与产品迭代，由此形成“市场应用—技术验证—工程优化—规模推广”的高频循环。市场规模、产业链协同和研发迭代能力相互强化，使中国汽车动力产业的竞争优势由单项技术能力进一步扩展至体系化的工程与产业能力。

（3）动力系统进入多能源、多技术协同发展的新阶段

在自主研发能力和产业体系能力持续提升的基础上，中国汽车动力系统已由以单项技术追赶为主的发展阶段，进一步进入多能源、多技术协同演进的新阶段。其总体技术方向可概括为动力总成“新四化”，即动力高效化、驱动电气化、控制智能化和能源多样化（图 1-4）。

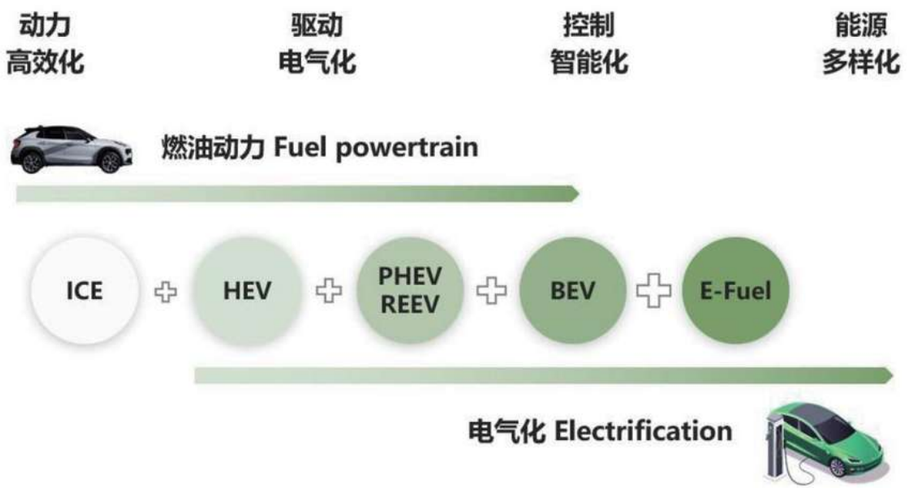


图 1-4 动力总成技术的新四化方向

动力高效化推动内燃机及动力系统持续提升综合能效，驱动电气化推动电机、电控与动力电池深度融入动力总成，控制智能化推动动力系统由部件控制向整车级协同优化和智能控制发展，能源多样化则使汽油、柴油、电力以及氢、甲醇等不同能源形式根据资源条件和应用场景形成多元配置。“新四化”并非四条彼此独立的技术路线，而是在汽车动力系统复杂度不断提升背景下相互融合、协同演进的整体趋势。随着电动化和智能化持续深入，内燃机、电驱动、动力电池及整车控制之间的技术边界不断弱化，不同动力源之间的协同程度持续提升；与此同时，纯电、混合动力、插电式混合动力、增程式电动、燃料电池及低碳燃料等多种动力路线根据不同市场、能源条件和使用场景形成互补。汽车动力系统的发展目标也由单一性能指标提升，进一步转向效率、成本、性能、低碳与使用体验等多维目标的综合优化。

总体来看，中国汽车动力行业已经完成从技术引进向自主研发的重要转变，并依托新能源汽车产业发展形成较强的产业体系与工程化能力。在此基础上，以“新四化”为主要方向、多能源和多技术路线协同发展的格局正在形成，中国汽车动力产业由技术追赶进入多元融合发展的新阶段。

1.3 创新引领：中国汽车动力行业的新使命

经过技术追赶与多元融合发展的长期积累，中国汽车产业规模、市场份额与全球影响力均达到新的高度，产业竞争优势已经较为显著。但产业领先并不等同于技术领先，市场规模优势也不会自然转化为汽车强国的长期竞争优势。随着国内汽车市场由增量扩张逐步进入存量竞争，全球汽车产业又处于技术路线、市场格局与产业链体系加速重构的关键时期，中国汽车产业既面临突破既有发展瓶颈的现实要求，也迎来由产业优势进一步迈向技术引领的重要机遇。如何以创新突破发展瓶颈、将产业优势转化为技术领先优势，成为中国汽车动力行业下一阶段的重要使命。

（1）从产业领先到技术领先，实现汽车强国跃迁

近年来，中国汽车产业实现了历史性跨越。自主品牌国内市场份额快速提升，新能源汽车市场形成明显优势；汽车出口规模持续扩大，中国品牌全球市场占比同步提升，海外市场正在成为中国汽车产业新的增长空间。从产业规模、市场份额和产品迭代速度看，中国汽车已经进入全球汽车产业第一梯队，“产业领先”的基础正在形成。

但汽车大国并不等同于汽车强国，销量和市场份额也不是衡量产业竞争力的唯一标准。真正可持续的产业领先，还需要体现为品牌价值、盈利能力和持续创新能力。2026 年全球最有价值汽车品牌排名前十位中尚无中国品牌，前 40 名中仅有 4 个中国品牌，表明中国品牌的全球影响力和价值创造能力与产业规模之间仍存在差距。中国汽车当前形成的规模优势和市场优势，尚未完全转化为与之相匹配的品牌溢价和长期价值优势。

这一差距背后，是盈利能力与创新投入之间尚未形成充分的正向循环。一方面，国内汽车市场持续的价格竞争压缩了行业利润空间，2023 年以来终端价格指数明显下降；另一方面，中国车企依靠快速开发和高频产品迭代形成了鲜明的市场响应优势，但产品迭代周期由传统的 5 年缩短至 2 年甚至 18 个月，也使单款产品的生命周期和规模效益积累受到影响。盈利空间持续承压，进一步增加了长期基础研发和原创技术投入的压力。

如图 1-5 所示，中国头部车企近年来研发投入快速增长，但与国际大型汽车集团相比，研发投入的绝对规模仍存在一定差距。这一差距并不能简单等同于技术能力差距，却反映出在快速产品开发之外，中国汽车产业仍需进一步加强面向基础研究、核心技术和长周期创新的持续投入。快速工程迭代是中国汽车产业现阶段的重要竞争优势，但要将这种“速度优势”转化为长期技术优势，还需要通过持续的技术积累形成难以复制的核心能力和技术壁垒。



图 1-5 国内外企业研发投入及比重

因此，中国汽车当前的领先更多体现为产业规模、产业体系和工程迭代能力形成的综合优势，而迈向汽车强国，还需要进一步将这些产业优势转化为持续的技术领先优势。对于汽车动力行业而言，下一阶段的发展重点需要从先进技术的自主掌握和快速工程化应用，进一步走向原创技术的持续创造，通过基础研究、核心技术与原始创新的长期积累，不断形成新的产品价值和技术竞争力，并在此基础上逐步提升品牌价值与全球技术影响力。

（2）以原始创新突破发展瓶颈、兑现产业机遇

从产业发展阶段看，中国汽车已经由技术追赶进入自主发展与多元融合阶段，下一阶段面临的问题也随之发生变化。向内，市场竞争由增量扩张逐步转向存量竞争，技术趋同、产品同质化与价格竞争成为制约产业高质量发展的突出问题；向外，中国汽车产业经过长期积累，又恰逢全球汽车格局深度重构的重要窗口，具备进一步实现全球突破的产业基础。突破内部发展瓶颈与兑现外部产业机遇，看似是两个不同的问题，其核心都指向更加具有原创性的技术创新。

向内看，同质化竞争的背后，是技术路线逐步成熟后创新空间收窄的结果。随着电动化和混合动力技术快速普及，行业大量采用经过市场验证的成熟技术路线和产品方案，在降低开发风险、促进规模化应用的同时，也使不同企业之间的技术和产品差异逐渐缩小。当性能、配置和技术路线不断趋同时，竞争容易进一步转向参数和价格，形成“产品趋同—价格竞争—利润压缩—创新投入受限—进一步依赖成熟方案”的循环。单纯依靠已有技术框架内的持续优化，虽然仍能够改善性能和成本，但随着技术成熟度提高，其边际提升空间将逐步收窄，难以从根本上形成新的竞争维度。

破解这一困局，需要从跟随式改进进一步走向原始创新。先进技术的持续应用能够推动现有产品不断提升，而原始创新则有可能通过新的技术原理、系统架构、结构方案和工程方法，重新构建成本、效率、性能与可靠性之间的平衡关系，从源头形成差异化产品能力。通过原创技术创造新的技术路径和价值空间，企业才能突破在成熟技术体系内部反复“卷参数、卷配置、卷价格”的竞争模式，使技术创新重新成为价值创造和盈利增长的来源。

向外看，中国汽车产业正处于由产业优势迈向全球技术引领的重要窗口期。经过数十年的自主研发和产业积累，中国已经建立较完整的新能源汽车及动力系统产业体系，在电动化、混合动力和多元动力路线等领域形成了具有自身特点的工程经验和产业能力，与国际汽车产业之间的技术关系也开始由过去以单向引进为主，逐步转向更加双向的交流与借鉴。与此同时，全球汽车产业正在经历低碳转型、技术路线重构和供应链调整，传统汽车产业竞争格局出现新的变化，为中国汽车进一步提升全球地位提供了难得的战略窗口。

然而，随着中国汽车出海由产品出口向全球化经营深入，不同市场在法规标准、能源基础设施、使用场景、本地化要求和产业规则等方面的差异更加突出，中国企业需要面对比国内市场更加复杂的竞争环境。过去依托完整产业链、快速工程迭代和成本控制形成的优势仍然重要，但如果主要依靠成熟技术和成本优势进行产品输出，其竞争优势容易被追赶，也难以支撑长期的品牌溢价和规则影响力。

因此，原始创新同样是将当前产业机遇转化为长期全球竞争优势的关键。只有形成具有自主性和不可替代性的核心技术，才能更好适应全球不同市场的复杂需求，并由产品竞争进一步走向技术竞争；只有在原创技术基础上形成持续领先能力，才能推动中国汽车由输出产品进一步走向输出技术、标准和产业能力，提升在全球汽车技术体系和产业规则中的影响力。

中国汽车动力行业已经站在由产业领先进一步迈向技术领先的新起点。面向国内，应以原始创新突破技术趋同和低水平价格竞争，以新的技术路径创造新的产品价值和竞争空间；面向全球，则应抓住汽车产业格局重构的重要窗口，将长期积累形成的市场、产业链和工程化优势进一步转化为原创技术优势和全球竞争优势。以创新驱动实现从规模领先向技术领先、从汽车大国向汽车强国跃迁，是中国汽车动力行业下一阶段需要承担的核心使命。

观点来源

[1] 王瑞平. 发挥混动技术优势 赋能行业全球发展[R]. 吉利汽车, 上海: 第五届车用动力系统国际论坛, 2025.

[2] 赵立金. 汽车融合创新与动力系统多元演进[R]. 中国汽车工程学会, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[3] 徐长明. 盈利、创新与可持续发展[R]. 国家信息中心, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[4] 曹彦飞. 英飞凌助力车用动力系统智能化[R]. 英飞凌科技, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[5] 赵福成. 技术引领全球 X-HEV 新时代[R]. 浩思动力, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[6] 王鹏. 先进动力电池系统轻量化低碳技术展望[R]. 宁德时代, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[7] 张志福. 高膨胀比高效发动机开发[R]. 奇瑞汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[8] 杨万里. 极光湾科技甲醇动力的长期实践[R]. 极光湾科技, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[9] 李理光. 主动预燃室汽油机超越 50%指示热效率的技术路径[R]. 同济大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[10] 石奕. 新能源动力域系统国产化现状及展望[R]. 武汉菱电电控系统股份有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[11] 周泉. 车用动力系统学习型控制关键技术[R]. 同济大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[12] 丁锋. 新能源汽车整车能量管理的能量流分析与优化控制[R]. 联合汽车电子, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[13] 宋扬. 双碳引领 智驱未来: 马赫动力高品质混动系统创新实践[R]. 东风研发总院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[14] 战金程. 全球化背景下的动力技术路线[R]. 长城汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[15] 王全任. 泛亚混动专用变速箱关键技术及工程创新[R]. 泛亚汽车技术中心, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[16] 张贵强. 理想全新一代增程系统[R]. 理想汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[17] 魏凡翼. 从功能实现到驾乘体验进阶: Deepal 科技新一代智能电驱软件平台[R]. Deepal 科技, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

第二章 内燃机与低碳燃料技术发展

2.1 内燃机与低碳燃料技术发展格局

交通能源低碳转型与动力系统电动化正在改变内燃机的应用边界和评价维度。内燃机仍将在长续驶、高功率密度、复杂环境适应以及多元燃料利用等场景中发挥作用，但其开发目标已由单纯追求峰值动力，转向效率、排放、全生命周期碳排放、成本、可靠性与运行品质等多目标平衡。当前技术演进主要沿三条主线展开：高效燃烧、增压、低摩擦、热管理和后处理等先进技术加快集成应用；混合动力与增程架构改变发动机运行区域和任务边界，推动专用化开发；低碳燃料则将减碳问题由发动机本体延伸至燃料制备、储运和终端利用，并提出新的发动机适配需求。

（1）先进技术集成应用提升内燃机综合性能

随着效率、排放和运行品质要求不断提高，内燃机性能提升已由单项技术优化逐步转向燃烧、换气、热管理、摩擦与排放控制等多环节协同。高压缩比与高膨胀比循环、稀薄与高稀释燃烧、高能点火、高压喷射、高效增压、低摩擦、主动热管理及高效后处理等先进技术加快产业化应用，并通过系统集成协调热效率、污染物排放、噪声、振动与声振粗糙度（NVH）、成本与可靠性之间的关系，使内燃机综合性能持续提升。

（2）多元动力架构改变发动机应用定位与开发目标

混合动力汽车（HEV）、插电式混合动力汽车（PHEV）和增程式电动汽车（REEV）等电动化架构的发展，使内燃机由传统汽车中的唯一动力源，转变为混合动力系统中的高效动力源或发电单元，其运行区域和动态任务随动力架构发生变化。需要发动机较多参与直接驱动的混联系统仍需兼顾宽工况效率、动力输出和动态响应；串联与增程系统中发动机更多承担发电任务，更强调高效区域运行、紧凑轻量、低 NVH 和成本控制。不同运行任务推动发动机由通用化设计转向与动力架构相匹配的差异化开发，并进一步与电机、电池和整车控制协同确定运行区域和动态过程。

（3）低碳燃料应用带来发动机专用适配需求

仅依靠提高发动机本体效率和降低燃料消耗，难以单独支撑交通能源全生命周期的深度降碳，氢、氨、绿色甲醇、生物燃料及可再生合成燃料等低碳、零碳燃料因此成为重要技术路径。不同燃料在能量密度、着火与燃烧特性、排放生成、材料兼容和储运条件等方面存在显著差异，其低碳属性也受到能源与原料来源、制备和储运过程影响。应用端需要围绕燃料特性重新匹配供给与喷射、点火、燃烧组织、材料润滑、热管理及后处理系统，并结合动力架构优化运行策略，开发对象由简单替换燃料转向燃料特性、发动机适配与动力系统运行的协同设计。

基于上述三条技术主线，后文分别围绕先进内燃机技术、低碳燃料技术以及低碳燃料发动机适配与多燃料协同技术展开，并结合代表性应用案例与创新实践介绍相关技术进展。

2.2 先进内燃机技术

内燃机效率、排放和运行品质的进一步提升，需要燃烧、换气、摩擦、热管理与后处理等多个环节协同优化；混合动力和增程架构又进一步改变了发动机的运行区域和动态任务。围绕提高热效率、降低机械与热损失、控制实际运行排放以及适应电动化运行特征，当前先进内燃机技术主要包括高效燃烧与热效率提升、高效进排气与废气再循环（EGR）及增压、低摩擦与主动热管理、近零排放与后处理协同控制，以及混动与增程发动机专用化五个方向。

2.2.1 高效燃烧与热效率提升技术

传统热效率提升首先依赖提高压缩比、改善燃烧室和优化喷射，但压缩比继续提高会受到爆震、最大缸压和传热损失约束，稀薄或高比例废气再循环又会引起燃速下降和循环波动。燃烧技术因此需要形成“热力循环重构—混合气组织强化—稳定快速点火燃烧—燃料精准控制”的协同体系（图 2-1）：高压缩比与高膨胀比循环提高理论做功能力，稀薄或高 EGR 率降低泵气与传热损失，高滚流和高湍流组织配合先进点火维持燃烧速度与稳定性，高压及多次喷射改善雾化、蒸发和混合气分布。



图 2-1 内燃机热效率提升技术演进路径

（1）高膨胀比热力循环与压缩比优化技术

提高发动机热效率的核心路径之一，是优化压缩过程与膨胀过程之间的关系，增强燃烧后高温高压工质的有效做功能力。传统发动机主要依靠提高几何压缩比改善循环效率，但压缩比继续提升会加剧爆震倾向，并受到最大缸压、热负荷和机械可靠性约束。现代高效发动机需要协同设计压缩比、膨胀比和燃烧过程，在提高膨胀做功比例的同时控制压缩终了温压。

高几何压缩比是提升循环效率的基础技术路径。紧凑燃烧室、高滚流进气、强化冷却和燃料抗爆性匹配，可缩短火焰传播距离并抑制末端混合气自燃，使发动机在可靠性边界内提高压缩终了压力。然而，随着

压缩比继续提高，循环效率增益逐步减弱，而爆震控制、传热损失和结构载荷持续增加，单纯提高几何压缩比的提效空间逐渐收窄。

米勒循环与阿特金森循环主要通过可变气门机构调节进气门关闭时刻，实现有效压缩比与几何膨胀比的解耦。进气门早关（EIVC）在进气行程结束前限制充量，进气门晚关（LIVC）则在压缩初期将部分气体推回进气道；两种方式均可降低实际压缩过程，同时保留较完整的膨胀行程，提高膨胀做功比例。米勒循环通常与增压系统结合，以补偿有效压缩过程缩短造成的充量损失，适用于需要兼顾比功率和热效率的发动机；阿特金森循环则更多用于以高热效率为主要目标、由电机补偿低速扭矩的混合动力专用发动机。

（2）高稀释与高湍流快速燃烧技术

高稀释燃烧通过引入过量空气或废气再循环，降低缸内燃烧温度和节流损失，是进一步提升发动机热效率的重要技术路径。但随着稀释程度提高，混合气反应活性下降、火焰传播速度减慢，容易引起燃烧持续期延长和循环波动增大，因此需要通过强化缸内流动和加快火焰传播维持燃烧稳定性。

先进发动机通常通过高滚流进气道、燃烧室和活塞顶形状优化，在压缩末期形成较强湍流，提高火焰传播速度；同时利用冷却 EGR 降低燃烧温度和爆震倾向，并在部分负荷扩大节气门开度、降低泵气损失。高稀释与高湍流需要协同匹配：前者降低泵气和传热损失，后者补偿稀释引起的燃速下降，使发动机能够在较高稀释率下保持稳定快速燃烧。进一步提高稀释率时，则需要控制失火边界以及过强湍流带来的传热损失。

（3）高能点火与稳定燃烧技术

随着稀薄燃烧、高 EGR 率和高压缩比等技术应用，混合气反应活性降低，点火时缸内压力和流动强度提高，传统火花点火的击穿能力和火核稳定性受到限制。点火系统因此由满足基本着火需求，进一步向提高击穿能力、增加有效放电能量和增强火核抗扰动能力发展。

高能点火可通过提高点火线圈储能和放电电压、延长放电持续时间、多次放电或高频放电等方式，提高高压和强流动条件下的可靠着火能力；细电极火花塞以及火花塞位置优化则可降低击穿需求，并使火核形成于混合气和流场条件更有利的区域。对于高稀释燃烧，还可结合缸内状态按工况调节点火能量和放电过程，在保证着火稳定性的同时控制电极侵蚀、系统能耗和电磁兼容压力。

（4）先进燃料喷射与雾化技术

燃料喷射直接影响燃料计量、雾化蒸发和混合气形成，是实现快速稳定燃烧和降低排放的重要基础。随着高压缩比、高稀释燃烧和严格排放控制等技术需求增加，喷射系统由满足基本燃料供给进一步向高压化、精细化和灵活控制发展，通过改善液滴尺度、喷雾空间分布及喷射时序，为不同工况下的混合气形成提供更高调节自由度。

汽油机高压缸内直喷通过提高喷射压力改善燃料雾化和蒸发，并利用充量冷却拓展高负荷抗爆边界；柴油机高压共轨系统则通过提高喷射压力和灵活组织多次喷射，强化油气混合，并调节着火过程和压力升高率。多孔喷嘴和喷雾靶向设计用于提高喷雾与燃烧室、缸内流动及点火位置的空间匹配，喷射压力按工况调节以及预喷、主喷、后喷等多次喷射策略则进一步提供时间维度上的燃烧组织能力。

进气道喷射（PFI）与缸内直喷（GDI）双喷射系统可根据工况选择不同燃料供给路径，在低负荷混合气均匀性、高负荷充量冷却以及颗粒物控制等方面发挥不同优势。随着喷射压力继续提高，喷雾贯穿、壁面润湿、最小稳定喷量和高压系统驱动功耗等约束更加突出，因此喷射系统需要结合燃烧室、气流组织和燃烧策略确定压力水平、喷雾形态及喷射时序。

2.2.2 高效进排气、EGR 与增压技术

进排气系统决定发动机充量、残余废气、泵气损失和有效压缩过程，是高膨胀比、高稀释燃烧与高比功率技术实现的基础。传统固定配气和单级涡轮增压需要在低速响应、高速流通能力和部分负荷效率之间折中，高比例 EGR 又增加了废气流量组织、各缸分配和瞬态控制难度。当前技术通过可变气门主动调节换气过程，以高效增压扩大空气供给和废气能量利用范围，并利用 EGR 系统提供可控稀释，三者需要随负荷和燃烧状态协同调节。

（1）可变气门与高效换气技术

可变气门技术通过调节气门开启时刻、关闭时刻和升程，改变气缸充量、残余废气与有效压缩过程。连续可变气门正时可调节进排气相位和重叠区间，用于控制内部 EGR、扫气及有效压缩比；分级或连续可变气门升程则可在部分负荷减小节流损失，在高负荷保证充量。采用进气门早关或晚关实现米勒/阿特金森循环时，还需结合增压补偿充量，并利用可变进气歧管和流动控制阀匹配不同转速下的充量与滚流。

（2）高效增压与电动辅助增压技术

废气涡轮增压利用排气能量提高进气密度，是发动机小型化、高比功率及米勒循环充量补偿的重要手段。传统单级涡轮增压器难以同时兼顾低速响应、高速流通能力和宽工况效率，技术重点因而由提高峰值增压压力转向拓宽高效工作范围并改善瞬态空气供给。

双涡管涡轮通过分隔不同气缸的排气脉冲减少相互干扰，可变截面涡轮通过调节有效流通面积兼顾低速驱动力和高速排气背压，两级增压则由不同尺寸增压器覆盖更宽的流量与压比范围。低惯量转子、滚珠轴承和高效气动设计用于降低转动惯量与机械损失，电子废气旁通阀提高增压压力调节精度。废气能量不足时，48 V 电动压气机可独立建立进气压力，电辅助涡轮则由电机直接加速转子，并可在废气能量富余时回收能量。

（3）废气再循环系统与高 EGR 率控制技术

提高 EGR 率可降低燃烧温度，并在汽油机中抑制爆震、降低部分负荷泵气损失，在柴油机中减少 NO_x 生成。随着 EGR 率提高，混合气反应活性下降，各缸废气分配误差和瞬态稀释率波动对燃烧稳定性的影响更加明显，因此高 EGR 率应用不仅需要提供足够流量，还需控制回流废气的温度、分配均匀性和动态响应。

高压 EGR 从涡轮前取气，压差较大、响应较快；低压 EGR 从涡轮后取气，流量覆盖范围较宽，废气与新鲜空气混合更充分，两类回路可根据转速、负荷和增压状态组合使用。EGR 冷却器通过降低回流废气温度提高充量密度和抗爆能力，但冷却过强可能引起水分及酸性组分冷凝，需要结合旁通、冷却液流量和温度

进行调节。EGR 混合结构与进气歧管设计用于减小各缸分配差异，基于进排气压力、氧浓度和模型估算的闭环控制则与增压器、节气门和可变气门协同调节空气量与废气比例。

2.2.3 低摩擦与主动热管理技术

随着发动机燃烧效率持续提高，机械摩擦、润滑系统与附件功耗以及冷机运行造成的能量损失在整机损失中的相对占比进一步上升。混合动力和增程发动机频繁起停、间歇运行，又使冷态摩擦和重复暖机问题更加突出。围绕上述问题，先进技术主要从摩擦副结构与表面减摩、低黏度润滑与附件按需驱动，以及快速暖机与主动热管理等方向持续发展。

（1）低摩擦结构、材料与表面工程技术

活塞—缸套、曲轴轴承和气门机构等摩擦副是发动机机械损失的重要来源，低温和低负荷工况下摩擦损失占比更为突出。现代减摩技术主要通过降低接触载荷、改善摩擦副表面状态和采用低摩擦耐磨材料，进一步降低机械损失。

低张力活塞环可降低环—缸套接触力，活塞裙型面优化、偏置曲轴和运动件轻量化有助于降低侧向载荷与惯性作用；平台珩磨和表面微织构可改善储油与油膜形成。类金刚石碳（DLC）和物理气相沉积（PVD）等低摩擦耐磨涂层已应用于挺柱、活塞销及部分气门机构摩擦副，缸孔热喷涂则可优化缸孔表面性能并降低摩擦。对于部分高损耗轴系，采用滚动轴承替代滑动轴承也可降低机械摩擦。

（2）低黏度润滑与附件低功耗技术

润滑油黏性剪切以及机油泵、水泵、发电机等附件功耗会持续消耗发动机输出，尤其在部分负荷工况下影响更为明显。降低润滑阻力并使附件由固定驱动转向按需工作，是减少寄生损失的重要方向。

SAE 0W-20、SAE 0W-16 等低黏度润滑油可降低流体剪切损失，但进一步低黏度化受到高温高负荷条件下油膜承载能力的约束；可变排量机油泵根据发动机转速、负荷和油温调节供油压力，分区油路和活塞冷却喷嘴按需起停，可减少非必要润滑流量。电动水泵能够使冷却流量与发动机转速解耦，并根据热状态独立调节；智能发电机和可控空调压缩机等附件则可根据整车工况调整工作状态，降低非必要附件功耗。

（3）快速暖机与主动热管理技术

冷机阶段燃烧效率、机械摩擦和后处理性能均处于较差状态；混合动力发动机间歇运行还会在停机期间持续散热，使再次起动时重复经历暖机过程。快速暖机与主动热管理通过调节冷却液、润滑油和排气热量流动，使发动机与后处理系统尽快进入适宜温区，并根据发动机起停状态控制冷却和保温。

分区冷却可根据缸盖、缸体等不同部件的热需求分别控制冷却强度；缸盖集成排气歧管能够缩短排气传热路径，并利用排气热量加快冷机升温。电子节温器、可控冷却液阀和电动水泵可根据温度和负荷调节冷却液流量。机油—冷却液换热器在冷机阶段促进机油升温，在高负荷时控制油温；蓄热器和余热利用技术则可减少发动机停机后的热量损失，为再次起动保留部分热状态。

2.2.4 近零排放与后处理协同控制技术

严格排放法规使发动机排放控制由稳态高温净化进一步拓展至冷起动、低温、瞬态和全寿命工况。当前先进技术主要围绕三个方向展开：通过催化器快速起燃与排气热管理缩短低温净化窗口，通过高效催化器与颗粒捕集器提高宽温域污染物转化能力，并通过燃烧、排气热状态与后处理状态联合控制改善瞬态和实际道路排放。

（1）冷起动催化器快速起燃与排气热管理技术

冷起动阶段催化器温度尚未达到有效转化区间，是汽油机和柴油机冷起动阶段污染物排放的重要来源；混动发动机频繁起停和间歇运行还会造成后处理反复降温。因此，排气热管理的重点是缩短催化器起燃时间，并在发动机间歇运行过程中维持适宜的后处理热状态。

紧耦合催化器、低热容排气歧管和排气隔热结构可减少发动机出口至催化器之间的热损失；延迟点火、分次喷射、气门相位调节和提高发动机负荷可增加排气焓，加快催化器升温。停缸技术通过提高工作缸负荷并减少低温空气流量，也可改善排气热状态。48 V 电加热催化器和独立燃烧加热装置则可在发动机排温不足时直接向后处理供热，进一步缩短低温净化窗口。主动升温措施会增加燃油或电能消耗，过高排温还可能增加涡轮和催化器热负荷，因此量产系统通常根据催化器温度和发动机运行状态按需启用不同升温方式。

（2）高效催化转化与颗粒捕集技术

近零排放要求后处理系统在低温、瞬态和老化条件下同时保持对气态污染物和颗粒物的高转化效率，后处理系统由单一催化单元逐步向多功能集成和紧凑化发展。

汽油机主要采用三元催化器（TWC）与汽油机颗粒捕集器（GPF），柴油机则通常由柴油机氧化催化器（DOC）、柴油机颗粒捕集器（DPF）、选择性催化还原装置（SCR）和氨逃逸催化器（ASC）组成。高孔隙率壁流式载体在保持颗粒捕集效率的同时降低排气背压，主动和被动再生技术用于控制颗粒物积累。

在系统集成方面，紧耦合 SCR 通过缩短与发动机之间的距离提高低温转化能力，SCR-on-filter 将 SCR 催化功能集成于颗粒捕集器，可减少系统体积并缩短热路径；分区涂覆则根据载体不同温度区域配置催化功能。高储氧材料、耐热老化贵金属配方及低温高活性催化材料进一步提高催化器在空燃比波动、低温和长期老化条件下的净化能力。

（3）燃烧—排气热管理—后处理协同控制技术

随着后处理系统功能增加，仅依靠固定标定难以同时满足不同工况下的排放和效率要求。量产发动机因此通过模型和状态估计实时判断催化器温度、储氧或储氨状态以及颗粒捕集器负载，并相应调节空燃比、EGR、喷油、点火、后喷和气门相位等发动机参数。

冷起动阶段可优先提高排气焓并加快催化器起燃，正常运行阶段恢复高效燃烧，再生阶段则根据颗粒负载提高排气温度；SCR 系统通过储氨模型调节尿素喷射，GPF 和 DPF 则根据压差、温度和模型估算确定再生时机。混动系统还可利用发动机起停和运行点选择调节后处理热状态，减少发动机停机期间催化器过度降温。车载诊断（OBD）、催化器状态估计和失效诊断进一步用于识别传感器、催化器和颗粒捕集器性能变化，并在部件老化后修正控制参数。

2.2.5 混动与增程发动机专用化技术

混合动力和增程架构改变了发动机的运行方式与任务边界：发动机可更多运行于高效率区域，但也会频繁起停、短时运行和快速改变功率，纯电阶段较低的背景噪声还会放大发动机介入时的振动与声品质问题。专用化开发因此重点处理低温起动与短时运行适应、宽高效区与功率输出匹配以及 NVH 控制。相较传统汽车，增程汽车对动力性、油耗、成本、尺寸布置和 NVH 的开发权重存在差异，如图 2-2 所示。

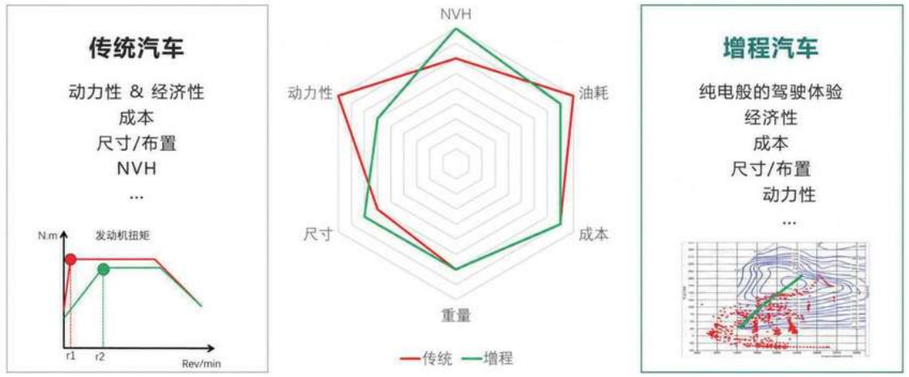


图 2-2 增程汽车与传统汽车开发需求对比

（1）低温起动与短时运行适应技术

混动与增程发动机频繁起停，并可能在冷态下短时运行，使首循环着火、油压建立、瞬态排放和起动振动反复出现。围绕快速、可靠和平顺起动，发动机起动过程逐步由传统低速拖动与怠速暖机，转向电机快速拖动、停机位置控制、首循环精确燃烧控制以及润滑和后处理预调节。

发电机或驱动电机可将发动机快速拖至较高转速，缩短低转速压缩不稳定阶段；停机位置控制可使活塞停留在有利于再次起动的位置，配合可变气门、节气门预置以及首循环精确喷油和点火，提高首次着火一致性。电动油泵可在起动前预先建立润滑油压力，催化器保温和热状态管理则有助于降低频繁起停造成的后处理温度波动。

在短时运行条件下，燃油和水分进入机油后可能缺少充分蒸发时间，因此混动发动机还需要通过油温管理和必要的连续运行过程控制机油稀释与水分积聚。

（2）宽高效区与功率输出协同优化技术

电机能够承担低速驱动和瞬态功率补偿，使混动与增程发动机不再需要覆盖传统发动机全部驱动工况，开发重点由峰值外特性进一步转向常用发电或直驱区域的高效率运行，并根据动力系统架构形成不同的高效区设计。

高压缩比、阿特金森/米勒循环、高 EGR 率和快速燃烧等技术可提高中高负荷热效率；自然吸气路线结构相对简单，增压路线则可通过较小排量实现更高功率输出。串联和增程系统可围绕若干高效发电转速与负荷区间进行优化，直驱或混联系统则需要兼顾更宽的转速—负荷范围。

发动机运行点还可根据电池荷电状态、驱动功率需求和后处理热状态进行选择，使发动机尽量运行于高效率区域。对于高速持续行驶等工况，则需要保证发动机具备足够的持续功率输出能力。

（3）发动机本体 NVH 优化技术

混动与增程车辆在纯电运行阶段背景噪声较低，发动机起动、停机以及进入稳定发电工况时的燃烧噪声、结构振动和阶次噪声更容易被乘员感知，因此 NVH 开发由单纯降低发动机稳态振动，进一步扩展至起停过程、固定转速运行和整车声品质控制。

在激励源控制方面，可通过优化燃烧压力升高率、曲柄连杆惯性力、缸体结构模态和平衡机构降低发动机振动与辐射噪声；双质量飞轮、扭振减振器和主动悬置可降低动力总成振动向车身的传递。齿轮、链传动以及发电机电磁力的阶次特征也需要在结构设计阶段进行避频与优化。

控制层可通过起动转速轨迹、发动机目标转速和发电扭矩调节减小起停冲击，并使发动机转速变化与车辆加速度及道路噪声变化保持较好的感知一致性。专用动力的 NVH 开发通常按照零部件—发动机—动力总成—整车逐级分解和验证目标，将燃烧激励、结构振动、悬置载荷与整车声品质对应至不同层级的开发指标，如图 2-3 所示。

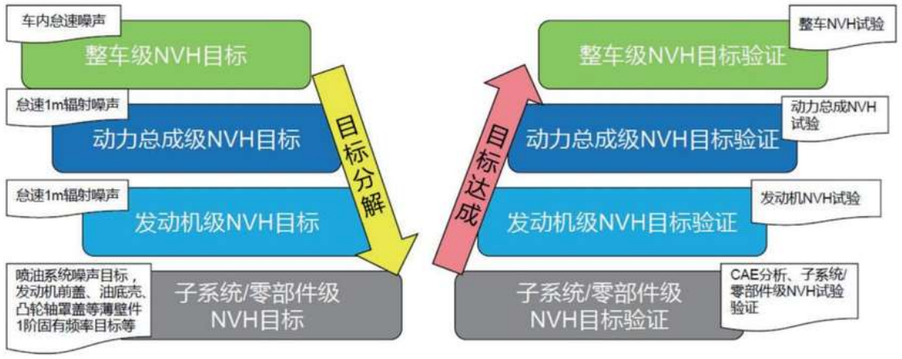


图 2-3 混动/增程发动机 NVH 目标分解与分级验证

2.2.6 先进内燃机技术应用案例

（1）奇瑞：鲲鹏天擎高膨胀比高效发动机

奇瑞鲲鹏天擎高膨胀比高效发动机以扩大膨胀做功和提高高效运行能力为主要目标，通过热力循环、稀释燃烧与进排气系统的组合设计兼顾效率和动力输出（图 2-4）。其热力循环同时采用米勒循环与机械式阿特金森循环：缸盖侧通过配气机构调节有效压缩过程，缸体侧采用双曲三联动机构改变活塞运动规律，使膨胀冲程长于压缩冲程，膨胀做功行程达到进气行程的 1.5 倍，发动机膨胀比达到 26:1。



属性	单位	值
缸径	mm	72
压缩比	mm	17.5
膨胀比	mm	26：1
进气包角	°CA	130
排气包角	°CA	190
喷射压力	bar	350
点火能量	mJ	200
最高EGR率	%	35

图 2-4 奇瑞鲲鹏天擎高膨胀比高效发动机及主要性能参数

随着稀释程度提高，燃烧速度和稳定性成为进一步提效的关键。鲲鹏天擎最高 EGR 率达到 35%，并通过大包角 Mask、大 DV 气门、长冲程、偏心式活塞顶部和多面挤气燃烧室等设计强化缸内滚流和湍流（图 2-5），以改善高 EGR 率条件下的火焰传播。350 bar 高压喷射进一步改善燃料雾化和混合气形成，配合 200 mJ 高能点火提高高稀释条件下的着火能力和循环稳定性。

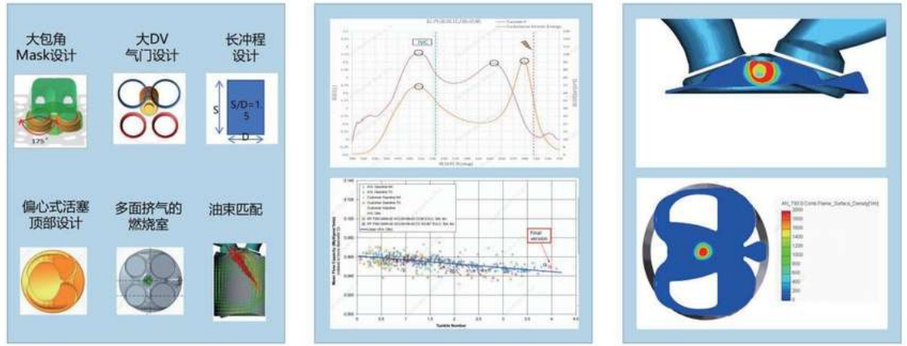


图 2-5 奇瑞鲲鹏天擎发动机快速燃烧技术方案

为扩大高 EGR 运行范围，发动机采用低压广域 EGR，通过催前取气、中冷器压损控制和 EGR 混合阀提高废气再循环能力，并利用冷凝水收集与分流处理冷凝问题（图 2-6）。高膨胀比会减少排气侧可利用能量，增压系统相应提高效率，并通过排气绝热降低热量损失，以维持充量和动力输出。发动机最大功率为 90 kW，最大扭矩为 220 N·m。

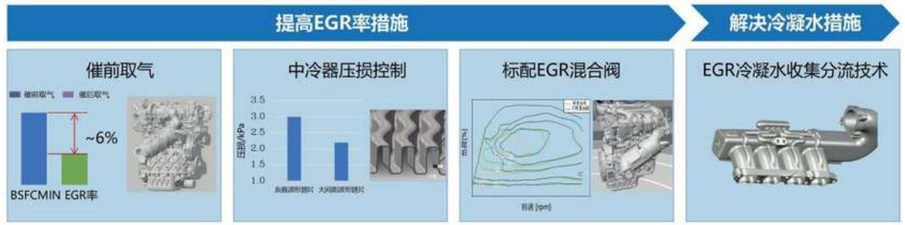


图 2-6 奇瑞鲲鹏天擎发动机高 EGR 率技术方案

（2）长安：新蓝鲸 500 bar 超高压直喷混动专用发动机

长安新蓝鲸混动专用发动机将高效超净燃烧作为效率提升的重要基础。如图 2-7 所示，燃烧系统采用 500 bar 缸内直喷，平均喷雾粒径 D32 达到 6.3 μm，较 350 bar 喷射进一步改善燃油雾化和混合气形成；较大的冲程缸径比和压缩比配合高滚流进气道强化缸内气流，为高稀释条件下的快速燃烧创造有利条件。



图 2-7 长安新蓝鲸发动机高效超净燃烧系统技术

在此基础上，发动机将 EGR 率提高至 28%，利用废气稀释降低爆震和热损失。稀释程度提高后，着火及循环稳定性成为新的约束，因此采用 150 mJ 高能点火强化初始火核，并与高滚流气流组织共同加快火焰传播。500 bar 喷射、高 EGR 率、高滚流和高能点火共同构成高稀释快速燃烧方案。

机械损失通过低黏度润滑、附件按需驱动和摩擦副优化共同控制。发动机采用 0W-16 低黏度机油、电控活塞冷却喷嘴、轻量化低惯量气门、低摩擦涂层活塞环、非对称减摩活塞、低摩擦轴瓦和镜面磨削曲轴，并将部分附件电动化。针对混动发动机频繁起停，活塞停机位置控制与起动缸压控制用于降低再次起动时的压缩压力和振动，改善发动机介入平顺性（图 2-8）。

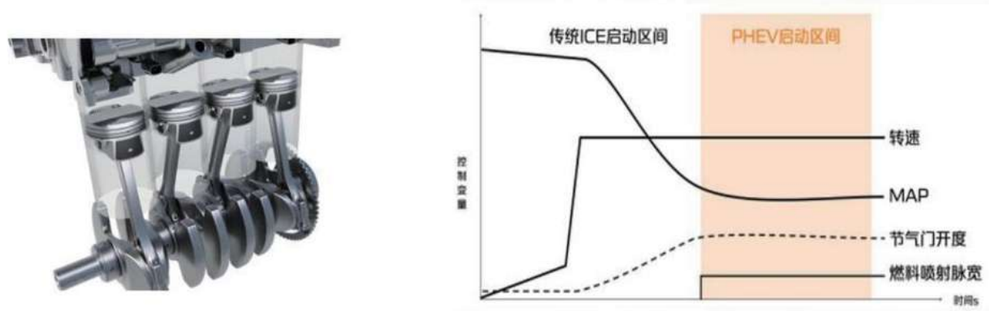


图 2-8 长安新蓝鲸发动机智慧起停控制技术

2.3 低碳燃料技术

低碳燃料通过可再生电力、可持续碳源和生物质等能源与原料路径，为内燃机提供不同于传统化石燃料的低碳能源供给（图 2-9）。当前主要技术路线包括以可再生电力制取氢和绿色氨，以绿氢和可持续碳源合成绿色甲醇及电合成汽柴油，以及利用生物质、废弃油脂和有机废物制取生物基燃料。不同燃料的低碳属性与原料来源、制备过程、储运方式和全生命周期排放密切相关，其上游技术特征也进一步影响后续发动机的供给、燃烧和排放适配方式。

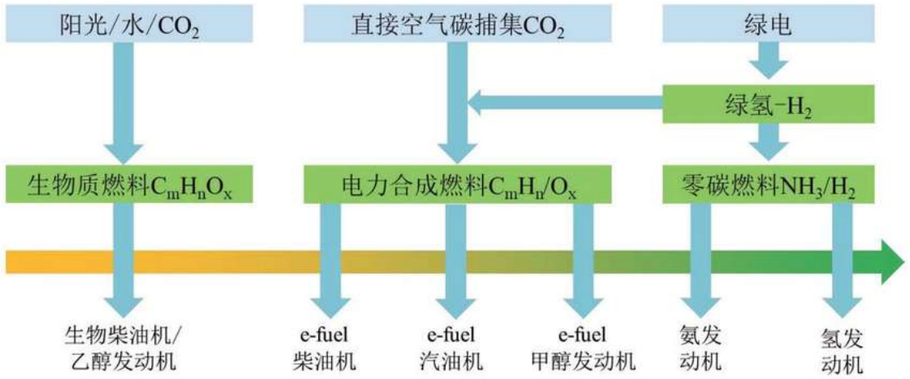


图 2-9 低碳与零碳燃料及其来源

2.3.1 氢燃料技术

氢燃料技术链主要包括低碳制氢、纯化与压缩、储存运输及终端供氢（图 2-10）。其重要作用之一，是将波动性的可再生电力转化为可储存、可运输的分子能源，实现能源在不同时间和区域之间的调配。氢的低碳属性则取决于制氢电力来源、原料以及纯化、压缩、储运等全链条能耗与损失。

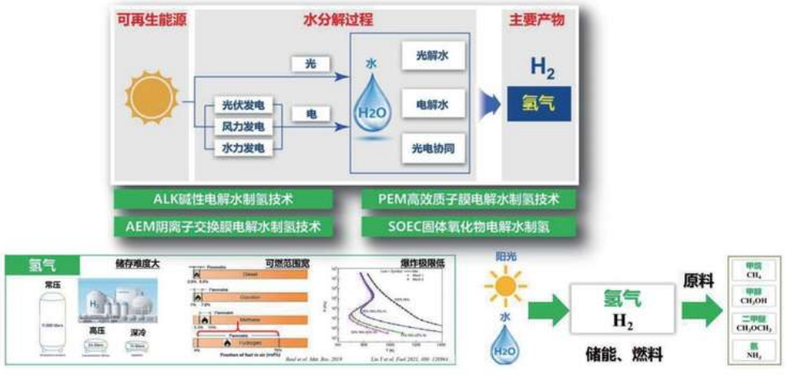


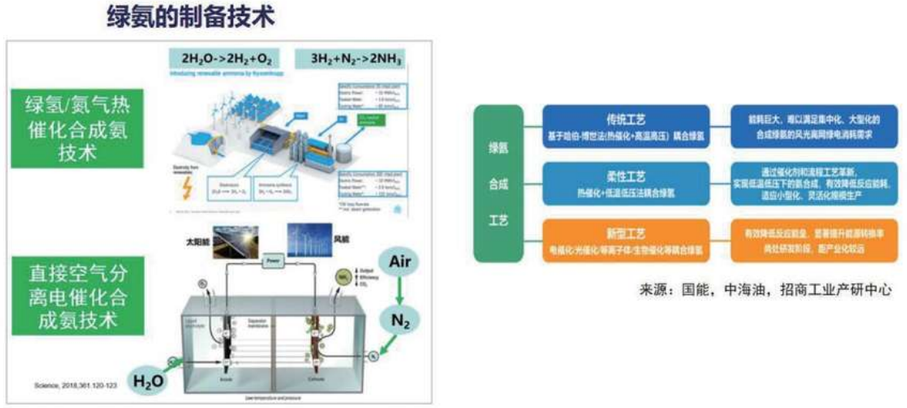
图 2-10 绿氢制备、储运及终端利用链

可再生电力电解水制氢是绿氢的主要技术路线。当前应用较成熟的技术主要包括碱性电解和质子交换膜（PEM）电解：碱性电解具有较好的规模化和成本基础，适合较稳定的大规模运行；PEM 电解动态响应更快、负荷调节范围更宽，更适合跟随风电、光伏等波动性电源。工程系统通常通过电解槽柔性运行、储氢缓冲或电网调节，降低可再生电力波动对制氢负荷和装置利用率的影响。制得的氢气还需经过纯化、干燥和压缩，以满足后续储运及终端使用对燃料品质和供氢压力的要求。

储运方式直接影响氢的应用范围。高压气态储氢技术成熟度较高，适用于较短距离和较高周转频率场景；液氢通过低温液化显著提高体积储氢密度，适用于更高储运密度需求，但需要承担液化能耗和低温绝热要求。液态有机储氢载体（LOHC）和氨载氢可利用液体储运体系进行长距离运输，但需要额外的加氢、脱氢或裂解过程。固体氧化物电解（SOEC）、阴离子交换膜电解等新型制氢技术，以及地下储氢等大规模储氢方式，也在持续发展，当前仍主要受材料寿命、系统成本和基础设施条件限制。

2.3.2 氨燃料技术

氨可由氢和氮合成，具有无碳分子属性和较高的体积储氢能力，既可直接作为燃料，也可作为氢的储运载体。低碳氨技术主要涉及低碳制氢、制氮、氨合成、液氨储运及必要的终端裂解等环节，其中绿色氨以可再生电力制取绿氢、空分制氮和 Haber–Bosch 合成为主要技术路线；蓝氨则在传统制氢和合成基础上结合碳捕集与封存，其低碳属性与碳捕集率、上游排放及封存效果有关。



来源：国能，中海油，招商工业产研中心

图 2-11 绿色氨制备、储运与终端利用技术链

绿色氨生产面临的主要技术变化来自可再生电力波动与传统合成氨连续运行之间的矛盾。传统合成氨装置通常依靠稳定的氢、氮供给和连续高负荷运行，而风电、光伏具有明显波动性，因此当前绿色氨系统更加重视电解槽柔性调节、氢气缓冲储存以及合成回路宽负荷稳定运行，使制氢侧的快速功率变化与合成系统的热惯性相匹配。如图 2-11 所示，绿色氨由可再生电力制取绿氢，并与空分制氮、氨合成、液化储运和终端利用环节相连接，形成从能源输入到燃料应用的完整技术链。

液氨在常温下经加压即可实现液态储运，体积储运性能优于高压气态氢，并已具有较成熟的化工品储运基础。由于氨具有毒性、刺激性和一定腐蚀性，其能源应用需要配置专用储罐、密封、泄漏检测、通风与应急处置系统。氨还可在终端经催化裂解重新制取氢气，用于构建“制氨—储运—裂解供氢”路线；低温低压

合成、电化学合成和模块化合成装置等新技术也在持续发展，但目前仍主要受到效率、催化剂耐久和成本等因素制约。

2.3.3 甲醇燃料技术

绿色甲醇兼具液体燃料易储运的特点和低碳能源属性，可利用现有液体燃料储存、运输和加注基础设施。按照原料来源不同，主要包括生物质与废弃物制绿色甲醇以及绿氢耦合可持续碳源制绿色甲醇两条技术路线：前者通过生物质或废弃物热化学转化获得合成气，再合成甲醇；后者利用可再生电力制取绿氢，并与生物源、工业捕集或直接空气捕集（DAC）的二氧化碳合成甲醇。如图 2-12 所示，两条路线分别由可再生生物质碳源和“绿氢+可持续 CO_2”构建绿色甲醇的低碳生产路径。

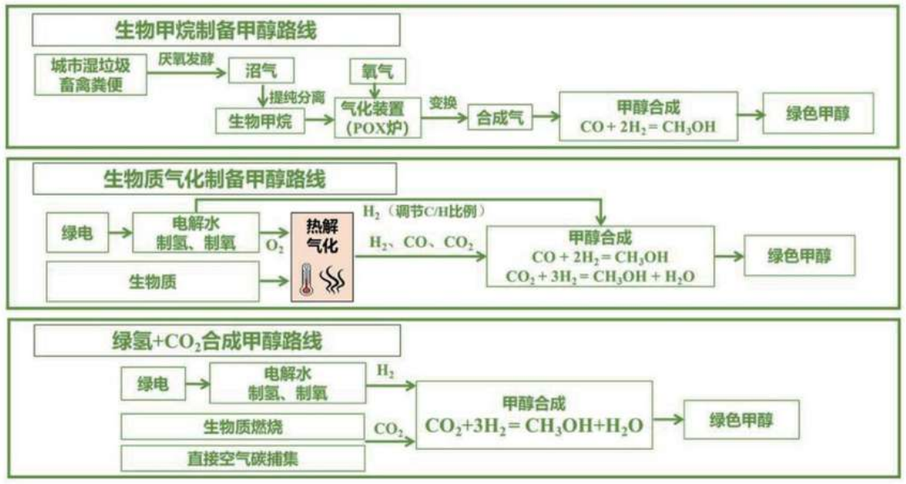


图 2-12 绿色甲醇主要制备技术路线

（1）生物质与废弃物制绿色甲醇技术

生物质与废弃物制绿色甲醇通常包括原料预处理、气化、合成气净化与调质以及甲醇合成等环节。生物质或废弃物首先经热化学转化生成以 CO、CO_2 和 H_2 为主的合成气，再通过除尘、脱焦油、脱硫以及变换或补氢等方式调整气体组成，最终进入催化甲醇合成系统。

与天然气等组成相对稳定的原料相比，生物质和废弃物的水分、灰分和组分波动较大，气化过程中更容易产生焦油、颗粒物和含硫杂质，这些组分会降低气化效率并影响后端催化剂性能，因此稳定气化和深度净化是该路线的重要技术环节。针对不同原料，超临界水气化可用于高含水生物质，等离子气化可强化难处理废弃物转化，模块化装置则可适应较分散的原料来源；余热回收与副产物利用可进一步改善系统能源利用水平。

（2）绿氢耦合可持续碳源制绿色甲醇技术

该路线利用可再生电力制取绿氢，并与生物源、工业捕集或直接空气捕集的 CO_2 进行催化合成，将可再生电力和可持续碳源转化为便于储运的液体燃料。主要技术环节包括电解水制氢、CO_2 捕集与纯化、CO_2 加氢制甲醇，以及循环气、冷凝分离和热量回收。

CO_2 加氢制甲醇过程中生成的水会影响催化剂活性和反应平衡，需通过循环气、冷凝分离和热管理维持稳定运行。可再生电力波动还会传递至制氢环节，工程系统通常通过储氢缓冲或提高甲醇合成回路的负荷调节能力，减小上游波动对反应温度和催化床稳定性的影响。

不同 CO_2 来源对应不同的生命周期碳属性。生物源 CO_2 和直接空气捕集 CO_2 可构成较清晰的短周期碳循环；工业点源 CO_2 再利用能够延缓碳排放并提高碳利用率，但仍与原始化石碳来源相关。DAC 可进一步拓展可持续碳源获取方式，但目前能耗和捕集成本较高。

2.3.4 电合成汽柴油技术

电合成汽柴油以可再生电力、绿氢和可持续碳源为主要原料，通过合成气制备、烃类合成和产品升级获得与现有汽柴油体系兼容的液体燃料。其燃料物性接近传统汽柴油，可利用现有车辆、储运和加注基础设施；汽油路线重点控制辛烷值、挥发性和馏程等性能，柴油路线则重点满足十六烷值、低温流动性和润滑性等要求。

电合成汽油主要包括甲醇制汽油（MTG）和费托（FT）合成两类技术路线。MTG 路线首先利用绿氢和可持续 CO_2 制取甲醇，再经脱水、低聚、环化等过程生成汽油组分；FT 路线则先将合成气转化为宽碳数烃类，再通过加氢裂化、异构化和调和获得满足汽油性能要求的产品。两类路线均需通过后续加氢处理、异构化、分馏和调和等工艺，对辛烷值、挥发性和馏程等关键燃料性能进行调控。

电合成柴油通常通过电解水制氢并结合逆水煤气变换反应，或利用固体氧化物电解池（SOEC）对二氧化碳和水蒸气进行共电解，制备以一氧化碳和氢气为主要成分的合成气，再经费托（FT）合成生成长链烃和蜡类产物，并通过加氢裂化、异构化和分馏等处理，调控燃料组成及性能，使其满足柴油发动机使用要求。

电合成汽柴油涉及制氢、碳源获取、合成气制备、烃类合成及后续燃料加工等多个能量转换环节，其制备能耗和成本与低碳电力、装置利用率及可持续碳源供应密切相关。

2.3.5 生物基燃料技术

生物基燃料利用生物质、废弃油脂和有机废物中的可再生碳，通过生化转化、热化学转化或加氢处理等方式制取液体和气体燃料。根据原料形态和转化方式不同，当前主要包括生物乙醇、生物柴油与可再生柴油，以及生物甲烷等技术路线；其生命周期碳排放还与原料来源、农业投入、土地利用、原料收运及甲烷泄漏等因素相关。

（1）生物乙醇

生物乙醇主要通过糖类发酵制取。一代乙醇以甘蔗、玉米等糖质或淀粉质原料为主，经糖化、发酵、蒸馏和脱水获得燃料乙醇，相关工艺已经较为成熟。高浓度发酵可提高发酵液乙醇浓度、降低后续蒸馏负荷，

热耦合蒸馏和分子筛脱水可进一步降低分离能耗，酒糟、发酵二氧化碳等副产物利用则提高原料综合利用水平。

纤维素乙醇进一步利用秸秆、木质残余物等非粮生物质，经预处理和酶水解将纤维素、半纤维素转化为可发酵糖。其关键技术主要包括提高预处理效率、减少抑制物生成、降低纤维素酶用量，以及提高五碳糖和六碳糖的协同发酵能力。整合生物加工尝试将酶制备、水解和发酵过程进一步集成，气体发酵则利用 CO 或合成气作为碳源，拓展乙醇生产的原料范围。

（2）生物柴油（FAME）与加氢处理植物油（HVO）/可再生柴油（RD）

脂肪酸甲酯（FAME）主要通过植物油、动物脂或废弃油脂与甲醇进行酯交换反应制取，工艺成熟、反应条件相对温和。由于产物保留含氧酯基，其低温流动性、吸水性和氧化稳定性与传统烃类柴油存在差异，因此实际应用通常采用一定比例掺混。

加氢处理植物油（HVO）或可再生柴油（RD）则通过加氢脱氧去除油脂中的氧，并经异构化改善低温性能，得到以烷烃为主、性质更接近传统柴油的燃料，可实现较高比例替代。随着原料由食用植物油逐步拓展至废弃油脂、动物脂和非食用油脂，原料预处理的重要性进一步提高，需要去除金属、磷、游离脂肪酸等可能影响酯交换或催化加氢过程的杂质。

藻油、微生物油脂等新型油脂原料可进一步拓展生物柴油和可再生柴油的资源来源，水热液化则可直接处理高含水生物质并获得生物原油，但相关路线在培养、采收、后续燃料加工和规模化成本方面仍处于持续开发阶段。

（3）生物甲烷及其他生物质燃料

生物甲烷主要通过畜禽粪污、餐厨垃圾和有机废水等原料厌氧消化制取。厌氧消化过程中，多阶段微生物反应将有机物转化为以 CH_4 和 CO_2 为主的沼气，再经脱硫、脱水和脱 CO_2 等净化提纯获得生物甲烷。提纯后的生物甲烷可接入天然气管网，也可进一步压缩或液化用于交通运输。

在传统厌氧消化基础上，绿氢生物甲烷化可利用沼气中的 CO_2 与绿氢进一步反应生成甲烷，提高碳利用率；对于较干燥的生物质原料，还可通过气化获得合成气，再经甲烷化制取合成甲烷。生物质能碳捕集与封存（BECCS）则在生物质能源利用过程中进一步捕集并封存生物源 CO_2，形成潜在负排放路径。

生物甲烷的生命周期减排效果对甲烷泄漏较为敏感，因此原料储存、厌氧消化、气体净化和储运过程中的泄漏控制是该路线的重要技术环节。

2.3.6 先进低碳燃料技术应用案例

（1）吉利：绿色甲醇生产—运输—加注—应用全链条布局

吉利在持续开展甲醇动力应用的基础上，将布局延伸至绿色甲醇生产、运输、加注和终端使用，形成覆盖燃料上游与多类应用场景的技术链（图 2-13）。

上游绿色甲醇生产与运输、加注体系衔接，为终端持续供应甲醇燃料；应用场景由乘用车、商用车扩展至非道路机械和发电。CO_2 捕集环节可与绿色甲醇生产端连接，但相关燃料的生命周期减碳效果仍取决于氢源、碳源、生产能耗及运输过程。



图 2-13 吉利绿色甲醇生产—运输—加注—应用全链条布局

2.4 低碳燃料发动机适配与多燃料协同技术

将低碳燃料应用于发动机，其理化特性差异会直接影响燃料供给、喷射与混合气形成、点火燃烧、材料润滑和排放控制。氢、氨和甲醇在相态、体积热值、着火反应性、汽化特性、材料相容性及排放组分等方面差异显著，需要围绕燃料特性进行专用化适配；在此基础上，多燃料系统还可利用不同燃料在反应活性、燃烧速度和碳属性等方面的互补特性，拓展高效清洁燃烧范围。以下分别围绕氢、氨、甲醇发动机适配以及多燃料兼容与协同燃烧技术展开。

2.4.1 氢燃料发动机适配技术

氢具有火焰传播速度快、稀燃极限宽和燃料分子不含碳等特点，适合采用稀薄燃烧提高效率并降低碳排放，但其较低点火能量和较强扩散能力也增加了回火、早燃等异常燃烧风险，高温富氧条件下仍会生成 NO_x。氢发动机适配主要涉及储供氢与喷射、稀薄燃烧及异常燃烧控制、材料与安全防护以及 NO_x 排放治理。如图 2-14 所示，燃料供给与混合气形成、异常燃烧控制、NO_x 排放治理和储供氢安全构成氢燃料发动机的主要适配技术链。

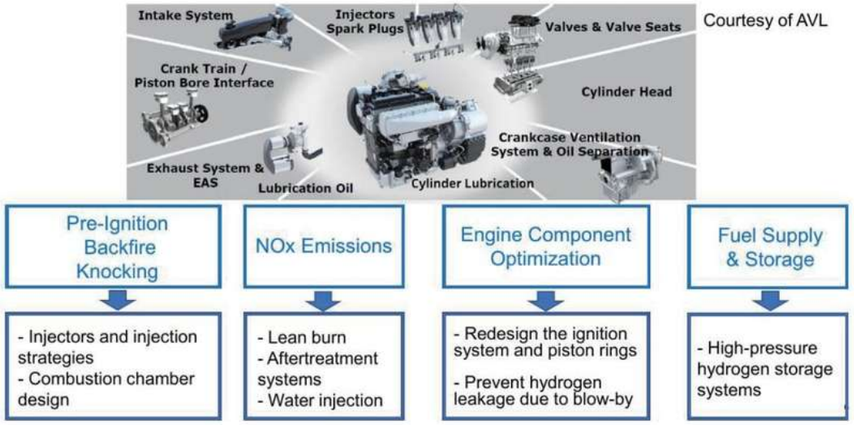


图 2-14 氢燃料发动机关键适配技术及主要挑战

（1）氢燃料供给、喷射与安全防护技术

氢发动机主要采用进气道喷射和缸内直喷两类供氢方式。进气道喷射系统压力较低、结构相对简单，可在进气过程中形成较均匀的预混合气，但氢气会占据部分进气体积，并使进气道内存在可燃混合气，从而限制高负荷充量并增加回火风险。缸内直喷可在进气门关闭后向气缸内喷射氢气，减少氢气对新鲜空气充量的置换，并降低进气道回火风险，适用于更高比功率需求，但喷射及混合气形成时间较短，对喷氢器流量、响应速度和高压密封性能提出更高要求。

氢射流的扩散和卷吸特性与液体燃料喷雾明显不同，喷射压力、喷孔方向、喷射时刻以及缸内滚流等共同影响混合气空间分布。高压直喷可进一步提高单位时间供氢能力和高负荷充量水平；低温氢喷射还可利用较高燃料密度改善充量，但对低温储供、喷射器密封和系统能耗提出更高要求。

储供氢系统通常包括储氢、减压稳压、流量控制和安全切断等环节。高压氢可能引起部分高强钢氢脆，小分子渗透也会对聚合物密封材料产生影响，因此燃料系统需采用氢相容金属和低渗透密封材料，并配置双壁管路、泄漏检测、主动通风、紧急切断和吹扫等安全措施。

（2）稀薄燃烧、异常燃烧抑制与燃烧过程控制技术

氢的宽可燃范围和较高火焰传播速度使发动机能够在较高过量空气系数下稳定燃烧。稀薄燃烧可降低燃烧温度和节流损失，并显著减少中低负荷工况下的 NO_x 排放；但随着负荷提高，混合气浓度和缸内温度上升，燃烧速度和压力升高率增加，早燃、回火、爆震和表面点火风险也随之提高。

缸内直喷通过缩短氢气与空气的预混时间降低回火风险，冷型火花塞、燃烧室热点控制和机油窜入控制可减少早燃和表面点火。冷却 EGR 可降低缸内温度并减缓过快燃烧，高能点火和强化湍流则用于保证高稀释条件下的着火与火焰传播稳定性。喷射时刻和混合气分层还可调节局部当量比，改善高负荷异常燃烧边界。

预燃室射流点火可在超稀薄混合气中形成多个高能火焰射流，进一步拓展稀薄燃烧范围；基于缸压信号的循环燃烧识别可实时监测燃烧相位、压力升高率和异常燃烧，并用于修正喷氢与点火参数。预燃室热管理及宽工况稳定运行仍是相关技术进一步应用需要解决的问题。

（3）NO_x 排放控制技术

氢燃料本身不含碳，但高温空气燃烧仍会生成热力型 NO_x。提高过量空气系数和采用冷却 EGR 可通过降低燃烧温度抑制 NO_x，中低负荷下能够形成较低 NO_x 的稀薄燃烧区域；高负荷下稀释程度降低后，NO_x 排放会明显增加，因此需要结合喷射、点火、EGR 和增压等缸内控制降低峰值温度。

稀薄排气中氧含量较高，不适用于传统三元催化的 NO_x 还原机理，选择性催化还原（SCR）因此成为重要后处理路线。紧耦合 SCR 可利用较高排温改善冷起动和低温转化，底盘 SCR 则提供更大的催化容量，两者可通过尿素喷射和储氨模型配合工作。针对氢发动机低负荷排温较低的问题，还可采用排气热管理维持 SCR 有效温度窗口。

被动 NO_x 吸附、低温高活性催化及 H_2-SCR 等技术可进一步拓展低温 NO_x 净化范围，但在催化选择性、耐久性和宽工况应用方面仍处于持续发展阶段。

2.4.2 氨燃料发动机适配技术

氨具有燃料分子不含碳、储运相对便利等特点，但其自燃温度高、火焰传播速度慢、汽化潜热大，同时还面临未燃氨、NO_x 和 N_2O 等含氮排放问题。氨发动机适配主要涉及燃料供给与喷射、点火与燃烧强化、材料与安全防护以及含氮排放控制。当前典型燃烧路线主要包括氨—柴油双燃料、氨—氢协同燃烧以及氨单燃料强化点火，其中前两类分别利用高反应性燃料或氢提高着火与燃烧稳定性，氨单燃料路线则更依赖高能点火、预燃室等强化方式。如图 2-15 所示，不同技术路线的主要区别在于着火方式和燃烧强化手段。

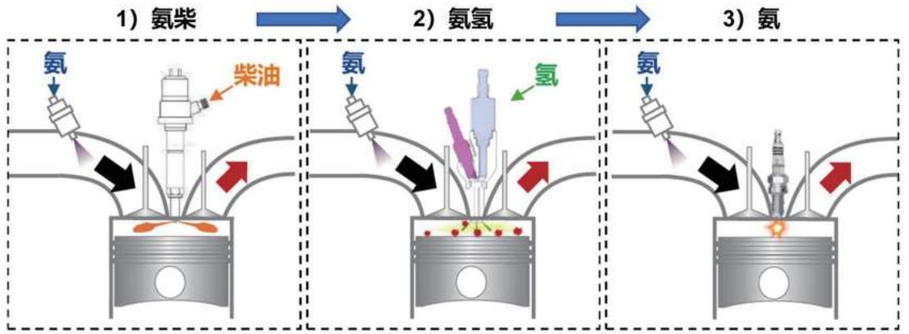


图 2-15 氨内燃机三种典型燃烧技术路线

（1）氨燃料供给、喷射与安全防护技术

氨发动机可采用气相进气供氨或液氨缸内直喷。气相供氨通常先将液氨减压、加热和汽化，再通过进气道喷射形成预混合气，系统结构相对成熟，但氨蒸气会占据部分进气体积，并可能在低温条件下产生混合气

分配差异。液氨缸内直喷可减少氨蒸气对进气充量的占用，并通过喷射时刻调节缸内混合气分布；液氨喷入缸内后发生闪急蒸发，其射流贯穿、蒸发过程和壁面润湿特性需要针对性设计。

供氨系统需要对液氨温度和压力进行稳定控制，避免两相流造成喷射计量波动。加热汽化、稳压、喷射控制以及燃料管路吹扫等技术共同保证稳定供氨；高压直喷则对喷射器流量、耐腐蚀材料和密封可靠性提出更高要求。在线氨裂解还可将部分氨转化为氢，用于改善后续着火和火焰传播，但会增加裂解反应、催化剂和热源等附加系统。

氨对部分铜、锌及其合金具有腐蚀作用，也可能引起部分橡胶材料溶胀或渗透性能变化。燃料管路、阀件、换热器、喷射器和密封件因此需要采用与氨相容的材料；安全系统通常配置双壁管路、夹层通风、惰性气体吹扫、泄漏检测和紧急隔离等措施。氨窜入润滑油及与水分形成的产物还可能影响润滑油性能，需要在发动机材料与润滑系统适配中加以考虑。

（2）点火强化、燃烧加速与稳定燃烧控制技术

氨自燃温度高、层流火焰速度低且可燃范围相对较窄，常规火花点火容易出现着火困难、燃烧持续期较长和循环波动。当前较具工程应用基础的技术主要包括柴油或其他高反应性燃料引燃、高能点火、预燃室射流、强化缸内湍流、进气加热以及氢助燃等。

柴油或生物燃料微量引燃可首先形成高温活性区，再点燃氨混合气，是氨—柴油双燃料发动机的重要技术路线；氢助燃或部分氨在线裂解产氢可提高混合气反应活性和火焰传播速度。对于以氨为主的火花点火路线，高能点火和预燃室射流能够增强初始火核形成并加快火焰传播，强化滚流和湍流则可进一步缩短燃烧持续期。

进气加热和增压可提高缸内反应温度，有利于改善低反应性氨燃料的燃烧完整性，但温度升高也会影响 NO_x 和 N_2O 生成。引燃燃料比例、氨替代率、喷射时刻和燃烧相位会共同影响燃烧效率及含氮排放。纯氨压燃、等离子体点火和催化辅助燃烧等路线也在持续研究，目前仍主要面临宽工况稳定性和系统复杂度等问题。

（3）NH_3、NO_x 与 N_2O 排放控制技术

氨发动机排放具有明显的多组分特征，主要包括未燃 NH_3、NO_x 和 N_2O。燃烧温度过低或混合不充分容易增加未燃氨；提高燃烧温度有利于氨燃尽，但会促进燃料型和热力型 NO_x 生成；部分中低温氧化过程还可能形成 N_2O。因此，喷射、引燃比例、当量比和燃烧相位都会影响三类含氮排放的生成水平。

排气中的 NH_3 可直接参与 SCR 反应，用于还原 NO_x；当氨含量超过 SCR 利用能力时，可通过氨氧化催化器（AMOX）控制氨逃逸。SCR 与 AMOX 的组合需要根据排气温度和氨浓度进行配置，其中 AMOX 的氧化选择性会直接影响其是否进一步生成 NO_x 或 N_2O。分级后处理和排气热管理可用于拓展不同工况下的有效净化温度范围。

低温 N_2O 分解催化、高选择性氨氧化催化以及 $NH_3/NO_x/N_2O$ 多组分传感等技术可进一步提高含氮排放控制能力，目前仍受到低温活性、耐水热老化和传感交叉敏感等因素限制。

2.4.3 甲醇燃料发动机适配技术

甲醇具有较高辛烷值和较大汽化潜热，有利于提高压缩比、增压水平并拓展稀薄燃烧范围，但其体积热值较低、低温蒸发性较差，同时具有较强极性和吸水性，还会产生未燃甲醇、甲醛等非常规排放。甲醇发动机适配因此主要涉及燃料供给与喷射、低温起动、材料与润滑、高效燃烧以及专用排放控制。如图 2-16 所示，甲醇的燃料特性一方面为高压缩比、高增压和高效燃烧提供条件，另一方面也带来低温起动、材料相容性和非常规排放等适配需求。

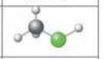
物性	汽油	甲醇
化学分子式	C5H12-C12H26	CH3OH
结构示意图		
摩尔质量 (g/mol)	72~156	32
密度(kg/L)	0.72-0.78	0.79
辛烷值（RON）	92-97	**107-110**
汽化潜热(MJ/kg)	0.31-0.34	1.11
理论空燃比	14.6	6.47
最小点火能量(mJ)	0.3	0.14
低热值(MJ/kg)	42.75	19.569
火焰传播速度 (cm/s)	41.5	**55**



图 2-16 甲醇燃料特性及发动机适配技术与挑战

（1）甲醇供给、喷射、冷起动与材料防护技术

甲醇体积热值低于汽油，在相同能量输入下需要更大的体积喷射量，因此燃油泵、油轨和喷油器需要具备更大的流量范围，同时保持低负荷小喷量工况下的计量精度。进气道喷射有利于形成较均匀的预混合气；缸内直喷则可利用甲醇较大的汽化潜热降低进气温度，提高充量和高负荷抗爆能力。喷射过晚、雾化不足或喷雾靶向不合理会增加壁面润湿，并可能造成燃烧不完全和机油稀释。

甲醇低温蒸气压较低，冷起动时燃料蒸发和可燃混合气形成更加困难。量产系统可采用燃料或进气加热、分次喷射、高能点火和提高起动转速等方式改善低温蒸发与着火，极低温条件下也可利用少量汽油辅助起动。无汽油冷起动技术则进一步依赖高效电加热、喷雾组织和点火强化；车载重整产氢可提高混合气反应活性，但会增加重整器升温、能量消耗和系统耐久要求。

甲醇具有较强极性和吸水性，可能引起部分橡胶材料溶胀、金属腐蚀以及润滑油稀释和酸化。燃料泵、管路、喷油器和密封件需要采用耐醇弹性体与相容金属材料，并通过表面处理和燃料品质控制提高长期耐腐蚀能力。

（2）高压缩比与高效燃烧优化技术

甲醇较高的辛烷值和较大的汽化潜热能够抑制末端混合气自燃，为提高几何压缩比和增压压力提供更大空间。高压缩比可提高循环效率，米勒循环可降低有效压缩温度，缸内直喷的充量冷却进一步拓展高负荷抗爆边界，是当前甲醇发动机提高热效率和比功率的重要技术组合。

稀薄燃烧或高 EGR 率可进一步降低泵气和传热损失，高滚流和高湍流用于提高火焰传播速度，高能点火则改善高稀释条件下的着火稳定性。甲醇含水量变化会改变燃料热值、汽化冷却和混合气热力状态，喷射量和点火参数需要相应修正。

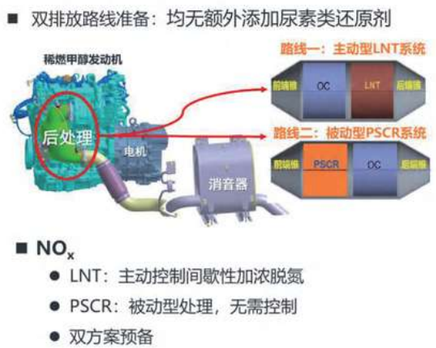
预燃室射流点火可进一步拓展超稀薄燃烧边界；甲醇压燃、反应活性控制压燃（RCCI）以及甲醇重整气（以氢气为主要可燃组分，并含有一氧化碳、二氧化碳等组分）辅助燃烧等技术也在持续研究，可利用燃料反应性或富氢气体改善着火与燃烧过程，目前仍面临燃烧稳定性、工况适应性和排放控制等问题。

（3）未燃甲醇与醛类排放控制技术

甲醇燃烧过程中可能产生未燃甲醇和甲醛等非常规排放。未燃甲醇主要来自低温火焰淬熄、壁面液膜和局部过稀区域，甲醛则是甲醇不完全氧化过程中的重要中间产物，冷起动阶段由于燃烧室和排气系统温度较低，两类排放更加集中。

喷雾靶向、分次喷射和点火时刻优化可减少壁面润湿和不完全燃烧；紧耦合氧化催化器通过缩短排气热损失路径提高低温转化能力，催化配方则需要兼顾甲醇和甲醛的低温氧化活性。低温吸附材料还可在催化器尚未达到有效温度时暂存部分污染物，待温度升高后再释放并转化。

在稀薄燃烧条件下，还需要进一步处理 NO_x 排放。如图 2-17 所示，甲醇稀燃后处理技术路线包括主动型稀燃氮氧化物捕集器和被动型选择性催化还原两类。甲醛专用传感、低温高活性催化以及稀燃 NO_x 后处理等技术仍在持续发展，其宽温域活性、耐久性和 OBD 诊断能力是进一步工程应用的重要技术问题。



	单位	国六b WHTC 限值	国七预测	劣化系数
CO	mg/kwh	4000	670	1.30
NMHC	mg/kwh	160	------	1.40
甲醇	mg/kwh	20	------	
NMOG	mg/kwh	------	80	
CH_4	mg/kwh	500	400	1.40
NO_x	mg/kwh	460	170	1.15
NH_3	ppm	10	------	1.00
	mg/kwh	------	65	
PM	mg/kwh	10	10	1.05
PN23	#/km	6E+11	------	1
PN10	#/km	------	6E+11	
甲醛	mg/kwh	20	20	
N_2O	mg/kwh	------	195	

图 2-17 甲醇稀燃发动机 NO_x 后处理技术路线

2.4.4 多燃料兼容与协同燃烧技术

多燃料发动机需要同时适应不同燃料在密度、黏度、体积热值、汽化特性、着火反应性和材料相容性等方面的差异，并在运行过程中实现燃料组合、比例变化和切换控制。相关技术主要包括多燃料兼容供给与喷射、多燃料引燃与协同燃烧、燃料识别与跨燃料自适应控制，以及面向多组分排放的后处理与控制技术。

（1）多燃料兼容供给与喷射系统技术

不同燃料的物性和安全等级差异较大，同一喷射脉宽对应的质量流量和能量输入也不相同，因此多燃料系统通常需要分别设计储存、增压、计量和喷射环节。双燃料系统可采用独立燃料回路、双轨和双喷射器，在发动机运行过程中按目标比例共同供给；燃料平台化方案则可保留缸体、曲轴等共用基础结构，并根据氢、天然气或液体燃料配置不同的缸盖、喷射器和后处理系统。

多燃料供给系统需要根据燃料温度、压力和密度变化修正质量流量，并在燃料切换过程中管理轨压、管路残余燃料和吹扫过程。共用喷射器可减少零部件数量，但需要同时满足不同介质下的最小喷量、润滑、腐蚀和密封要求；双喷射器或独立燃料回路则具有更高控制自由度，但会增加系统布置和零部件数量。

（2）多燃料引燃与协同燃烧技术

多燃料协同燃烧可利用不同燃料反应活性和燃烧速度的差异改善着火与燃烧过程。柴油或其他高反应性燃料可作为引燃燃料，先形成高温活性区域，再点燃天然气、甲醇或氨等低反应性主燃料；氢则可利用较高火焰传播速度，提高氨等慢燃燃料的着火与燃烧稳定性。

引燃量、主燃料比例、喷射时刻、喷射间隔以及空间分层共同影响着火位置和燃烧速率。双直喷可分别控制两种燃料的喷射时刻和空间分布，反应性分层则通过缸内不同区域燃料组成差异调节燃烧相位。反应活性控制压燃（RCCI）进一步利用缸内反应性梯度实现低温燃烧，可降低 NO_x 和烟粒生成，但负荷范围和燃烧相位控制要求较高。在线氨裂解还可产生助燃氢气，提高氨燃料反应活性，但会增加裂解装置、催化剂和热源等附加系统。

（3）燃料识别、切换与跨燃料自适应控制技术

乙醇、甲醇等混合燃料比例变化会同时改变化学计量空燃比、热值、抗爆性和汽化冷却特性，因此控制系统需要识别实际燃料组成并相应调整喷射、点火和增压参数。量产灵活燃料系统可采用燃料浓度传感器直接识别燃料比例，也可结合氧传感反馈、喷油修正量和爆震信息对燃料性质进行估算。

燃料切换过程中，新旧燃料会在管路和油轨中形成过渡混合，实际到缸燃料组成相对于切换指令存在延迟。控制器需要估计管路残余燃料和燃料比例变化，并连续调整喷射量、点火和扭矩控制，以减小切换过程中的扭矩波动、失火和排放峰值。

光谱、介电等燃料传感技术可进一步提高复杂混合燃料的组分识别能力，在线学习方法还可根据长期运行数据补偿燃料品质变化和部件老化。相关技术目前仍需要解决未知燃料条件下识别精度、控制边界和算法可验证性等问题。

（4）多燃料排放协同控制技术

多燃料发动机的排放组成会随燃料种类、掺混比例和燃烧模式发生变化。天然气燃烧需要关注未燃 CH_4，氨燃料会引入 NH_3 和 N_2O，甲醇燃烧则可能产生未燃甲醇和醛类，同时不同燃烧模式下仍可能存在 NO_x 等常规污染物。

针对多组分排放，后处理系统可采用氧化催化器、SCR、氨氧化催化器等不同功能单元的组合，并根据燃料类型和排气状态调节旁通、还原剂喷射及排气温度。燃料切换过程中，排气含氧量、温度以及催化器储

氧或储氨状态也会同步变化，因此控制系统需要根据燃料到缸过程提前调整燃烧和后处理参数，减少瞬态排放波动。

宽温域多功能催化材料和多组分传感器可进一步减少后处理单元数量并提高闭环控制能力，但目前仍主要受到催化选择性、传感交叉敏感和热老化等因素限制。

2.4.5 先进低碳燃料发动机适配与多燃料协同技术应用案例

（1）吉利：M100 2.0TD 甲醇发动机

吉利围绕甲醇动力开展了长期开发，发动机技术由早期气道喷射逐步向缸内直喷、灵活燃料和超稀薄燃烧演进（图 2-18）。第一阶段主要解决甲醇作为车用燃料带来的供给系统可靠性、材料腐蚀、润滑和低温起动等基础适配问题；在此基础上，后续开发进一步转向缸内直喷、单一油箱灵活燃料以及高效稀薄燃烧，以提高甲醇发动机的环境适应性和热效率水平。

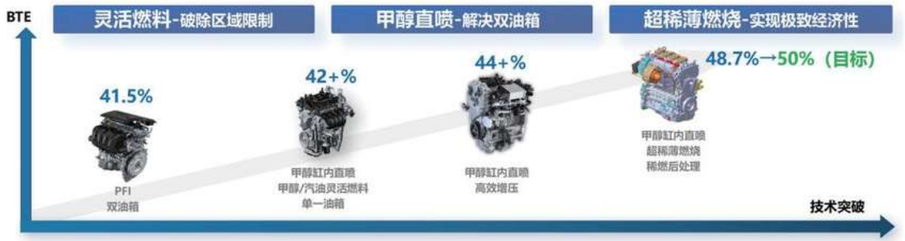
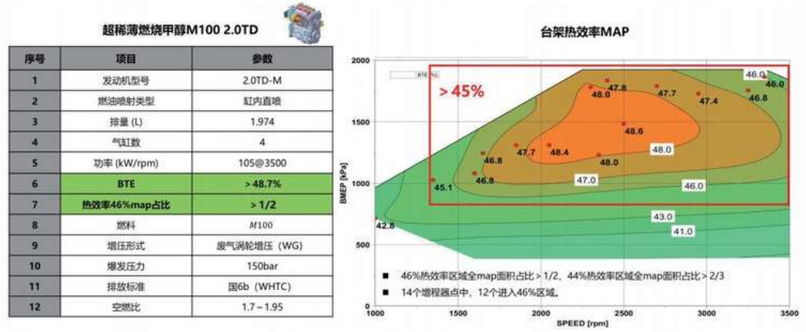


图 2-18 吉利 M100 2.0TD 甲醇发动机技术迭代路线

在早期气道喷射阶段，甲醇发动机开发重点集中在燃料系统和材料可靠性。针对甲醇的腐蚀、溶胀及对润滑系统的影响，吉利开发甲醇专用喷油器、甲醇专用润滑油、耐甲醇低摩擦合金材料和耐甲醇橡胶，并通过燃料添加剂改善车用甲醇燃料性能。甲醇在生产、储存及燃烧过程中还可能形成酸性产物，对金属表面和润滑油产生影响，因此关键零部件进一步通过材料选择、表面工艺以及燃油和机油添加剂配方提高长期耐久性。

随着技术由气道喷射向缸内直喷升级，甲醇供给和低温起动能力进一步改善。早期甲醇车型在低温条件下采用汽油辅助起动，发动机升温后再切换至甲醇运行；新一代缸内直喷系统则进一步开发甲醇单燃料低温起动能力，并实现最低约-40℃条件下使用甲醇直接起动。同时，甲醇/汽油灵活燃料技术由双油箱向单一油箱发展，可根据实际燃料组成调整发动机运行参数，提高不同地区燃料供应条件下的适应能力。

在高效燃烧方面，极光湾进一步开发 M100 2.0TD 甲醇缸内直喷超稀薄燃烧发动机（图 2-19），通过高流量进气道、高效燃烧室、高效增压器和 230 mJ 高能点火等技术拓展稀薄燃烧范围，并针对较高燃烧压力强化连杆、活塞销和轴瓦等关键承载部件。发动机空燃比运行范围达到 1.7～1.95，较高热效率区域覆盖较宽工况范围，体现出甲醇高抗爆性和稀薄燃烧潜力在专用发动机上的进一步利用。



序号	项目	参数
1	发动机型号	2.0TD-M
2	燃油喷射类型	缸内直喷
3	排量 (L)	1.974
4	气缸数	4
5	功率 (kW/rpm)	105@3500
6	BTE	＞48.7%
7	热效率46%map占比	＞1/2
8	燃料	M100
9	增压形式	废气涡轮增压（WG）
10	爆发压力	150bar
11	排放标准	国6b（WHTC）
12	空燃比	1.7－1.95

图 2-19 吉利 M100 2.0TD 甲醇发动机关键性能指标

针对稀薄燃烧带来的 NO_x 后处理需求，吉利同步开发主动型稀薄燃烧氮氧化物捕集器（LNT）和被动型选择性催化还原（PSCR）两条技术路线，均不额外采用尿素类还原剂。其中 LNT 通过周期性加浓实现 NO_x 脱除，相关方案已完成可行性验证；PSCR 采用被动处理方式，系统控制相对简化，目前仍在进一步研究。与此同时，后处理系统还需要兼顾未燃甲醇、甲醛等甲醇特征排放物的控制。

2.5 内燃机与低碳燃料创新实践

以下案例分别围绕小型增程器振动、甲醇发动机余热利用和高比例氨燃烧三个具体问题，介绍相关技术方案及验证进展。

（1）上海交通大学：无缸心距水平对置结构实现无感增程

增程器作为电驱系统的补充电源，其任务边界不同于直接驱动车轮的传统发动机。面向主流车型和小功率应用，发动机无需覆盖整车全部峰值动力，更需要在满足发电功率的同时控制成本、尺寸和振动。上海交通大学团队围绕小型化、低 NVH 和紧凑布置开发水平对置两缸增程器。

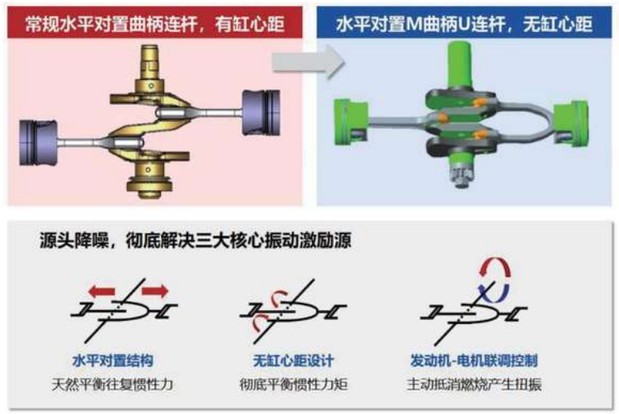


图 2-20 无缸心距水平对置技术方案及振动源消除原理

常规水平对置发动机的左右气缸沿曲轴轴向错位，两侧往复惯性力虽然方向相反，但作用线之间的缸心距会形成惯性力偶，造成两缸发动机的俯仰振动。团队开发无缸心距水平对置往复机构，通过直连杆与叉型

连杆配合，使相对气缸在曲轴轴向对齐；两侧活塞同步反向运动时，往复惯性力作用线重合，从结构上消除由缸心距产生的惯性力偶（图 2-20）。

在机械构型消除主要往复振动激励后，发动机与发电机通过联调控制，利用电机扭矩补偿燃烧产生的周期性扭矩波动。水平对置构型较低的整机高度还可适应前舱、后舱等紧凑空间布置。两缸基本构型可根据功率需求进一步扩展，用于不同功率等级的发电型电源。

（2）吉林大学：甲醇热化学能量闭环重构发动机余热利用路径

传统发动机余热回收通常利用朗肯循环等附加系统，将排气热量转换为机械功或电能，但低品位热量需要经过独立换热和膨胀过程，系统复杂且存在多级能量转换损失。吉林大学提出以甲醇为能量载体的能量闭式循环，将排气余热引回燃料侧，再随燃料和重整气进入气缸做功（图 2-21）。

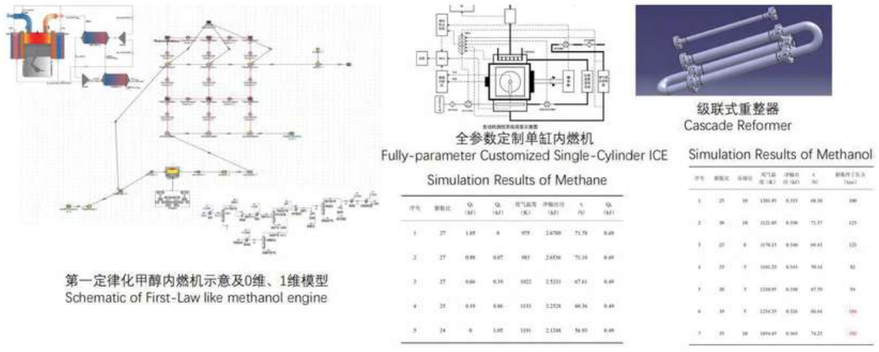


图 2-21 吉林大学甲醇热化学能量闭式循环技术方案

该方案利用甲醇在相对较低温度下吸热重整的特性，通过排气加热、燃料汽化和甲醇重整吸收废气能量，提高进入气缸的燃料及重整气能量；同时结合深度米勒循环以及燃料汽化、重整带来的工质增加效应，使回收能量在气缸内完成膨胀做功。余热利用路径由独立底循环调整为“排气余热—甲醇吸热与重整—气缸再利用”。

该技术正在通过零维/一维模型、全参数定制单缸机和级联式重整器进行验证，初步仿真显示出提高循环效率的潜力。

（3）清华大学：活化热氛围双区燃烧实现高比例氨燃料高效稳定燃烧

氨燃料反应活性低、火焰传播速度慢，提高氨替代率后容易出现着火困难、燃烧不完全和未燃氨排放增加。清华大学提出活化热氛围双区燃烧（ATTC）模式，通过分阶段喷射与燃烧组织，先形成有利于氨活化的高温反应区，再利用后续燃烧促进氨混合气着火和燃尽（图 2-22）。柴油引燃过程同时用于组织缸内反应活性及氨燃烧的时空演化。试验结果显示，该模式最高掺氨率达到 80%，有效热效率最高达到 48%，最大减碳量达到 73.6%；未燃 NH_3 与 NO_x 被控制在适合后处理匹配的比例范围，并结合双级 SCR 进行净化。

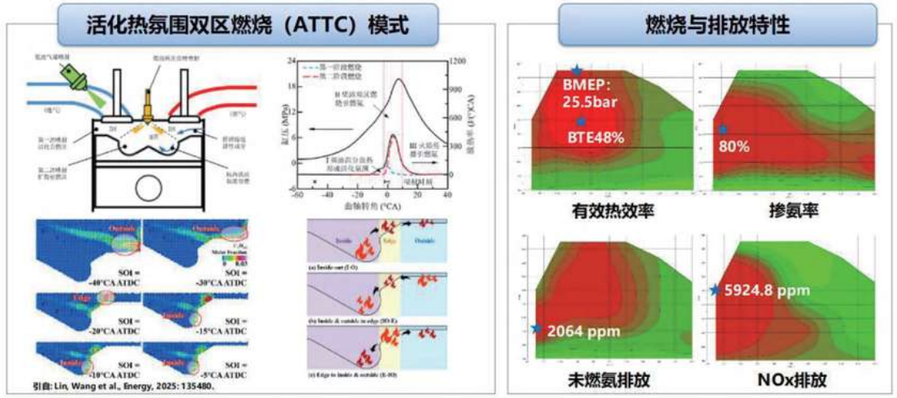


图 2-22 氨柴发动机活化热氛围双区燃烧（ATTC）技术及试验结果

2.6 内燃机与低碳燃料技术趋势与关键挑战

随着高膨胀比、高稀释燃烧、高压喷射、高能点火、增压和热管理等技术不断应用，内燃机进一步提效越来越依赖多项技术之间的协同匹配。压缩比、稀释率和增压水平继续提高，会同步增加燃烧稳定性、热负荷、排放和机械可靠性约束，因此技术评价将更多关注宽工况效率、冷起动与瞬态排放、运行品质以及成本，而非单一峰值热效率。混合动力和增程架构缩小了发动机常用运行区域，也使发动机能够围绕具体运行任务进行更有针对性的设计，但频繁起停、短时运行、NVH 和后处理热状态仍需与高效运行同时考虑。

低碳燃料预计仍将保持多路线并行。氢、氨、绿色甲醇、电合成燃料和生物基燃料在能源来源、制备效率、储运方式和基础设施条件方面差异明显，其应用范围更可能随区域能源条件和使用场景形成差异化。发动机端则需要围绕不同燃料的着火、燃烧、材料和排放特性进行专用适配，并通过引燃、助燃或多燃料协同改善低反应性燃料的燃烧稳定性和效率。

进一步应用仍受到成本和工程化条件约束。先进燃烧、增压、热管理和后处理技术增加系统复杂度后，需要在效率收益、零部件成本和长期可靠性之间重新平衡；低碳燃料还受到绿色能源供给、燃料成本以及储运和加注设施影响。氢的材料与泄漏安全、氨的毒性及 NH_3/N_2O 排放、甲醇的腐蚀与非常规排放，也对材料、燃料系统和后处理提出新的验证要求。

观点来源

[1] 中国内燃机工业协会乘用车动力总成专业委员会（SCP），中国汽车工程学会汽车先进动力系统分会（APS）．《车用动力系统技术发展蓝皮书（2025 年）》[R]. 2025.

[2] 张志福. 高膨胀比高效发动机开发[R]. 奇瑞集团芜湖埃科泰克动力总成有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[3] 杨万里. 极光湾科技甲醇动力的长期实践[R]. 极光湾科技有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

[4] 王志. 氢氨醇发动机关键技术研究现状及发展趋势[R]. 清华大学车辆与运载学院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[5] 黄震. 绿色燃料技术路径与发展展望[R]. 上海交通大学, 上海: 第五届车用动力系统国际论坛, 2025.
[6] 李理光. 高效稀燃发动机预燃室技术研究[R]. 同济大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[7] 韩永强. 循环评价及甲醇应用[R]. 吉林大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[8] 赵立金. 汽车融合创新与动力系统演进方向[R]. 中国汽车工程学会, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[9] Hwang J. Hydrogen and Ammonia Internal Combustion Engines[R]. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Ningbo: The 6th International Summit and Exhibition of Automotive Propulsion Systems, 2026.
[10] 石奕. 新能源动力域系统国产化现状及展望[R]. 武汉菱电汽车电控系统股份有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[11] Nishida K, et al. Spray Diffusion Combustion and Emission Formation Processes of Liquid Ammonia Ignited by Diesel Pilot Flame[R]. Hiroshima University, Ningbo: The 6th International Summit and Exhibition of Automotive Propulsion Systems, 2026.
[12] European Union. Regulation (EU) 2024/1257 (Euro 7)[Z]. 2024.
[13] U.S. Department of Energy. Parasitic Loss Reduction Research and Development[EB/OL]. https://www.energy.gov/cmei/vehicles/parasitic-loss-reduction-research-and-development.
[14] International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2025[R]. 2025.
[15] International Energy Agency. Ammonia Technology Roadmap[R]. 2021.
[16] International Renewable Energy Agency. Innovation Outlook: Renewable Methanol[R]. 2021.
[17] International Energy Agency. The Role of E-fuels in Decarbonising Transport[R]. 2023.
[18] U.S. Department of Energy Alternative Fuels Data Center. Ethanol Fuel Basics[EB/OL]. https://afdc.energy.gov/fuels/ethanol-fuel-basics.
[19] IEA Bioenergy. Implementation of Transport Biofuels Policies Supporting Low Carbon Intensity Biofuels[R]. 2024.
[20] IEA Bioenergy. Perspectives on Biomethane as Transport Fuel within a Circular Economy, Energy, and Environmental System[R]. 2021.

第三章 电驱动与混合动力技术演进

3.1 电驱动与混合动力技术发展格局

全球汽车动力电动化已进入规模化发展阶段，纯电动、混合动力和增程等多种技术路线并行演进。2025年，全球 HEV、PHEV 与 REEV 合计市场占比约 17%，与纯电动约 16%的市场份额基本相当，中国市场新能源汽车占比已超过 50%。随着电动化渗透率持续提高，技术竞争重点也由单一部件性能和峰值指标，逐步转向效率、功率密度、集成度、可靠性与运行品质的综合提升。电驱动与混合动力技术演进主要体现为核心部件性能持续突破、系统集成与功能融合不断深化，以及多动力源协同优化能力持续增强三个方面。

（1）核心部件性能持续提升，电驱系统向高压化、高速化、高效率与高功率密度发展

电机、功率电子和传动系统性能持续提升，为电驱系统提高效率和功率密度提供基础。电机向更高转速、更高功率密度和更宽高效区发展，功率电子通过高压平台和宽禁带功率器件降低能量转换损失，传动、润滑与热管理进一步减少机械与热损失。随着核心部件能力提升，电驱系统开发更加关注宽工况效率、持续输出和热稳定性。

（2）系统集成与功能融合深化，电驱系统向高集成、平台化与功能协同发展

随着电驱核心部件性能提升，系统集成由电机、逆变器和减速器的结构集成，进一步向电源、充电、热管理及控制功能融合发展。多合一集成通过共壳体、共冷却和接口精简降低体积与质量，驱动与充电等功能复用进一步提高硬件利用率；同时，模块化和平台化设计使相近硬件能够通过不同配置覆盖不同车型与功率需求。电驱系统的技术边界由单一驱动功能逐步向能源变换、热管理和底盘协同等方向扩展。

（3）多动力源协同优化能力提升，混合动力系统更加关注全工况效率与运行品质

HEV、PHEV 和 REEV 等路线并行发展，形成串联增程、串并联和功率分流等不同混动构型。随着发动机、电机和电池性能持续提升，混合动力系统的技术重点逐步由构型本身转向多动力源之间的高效协同。能量管理由固定规则进一步向优化控制和预测控制发展，并与模式切换、发动机快速起动、扭矩协调、热管理及 NVH 控制相结合，使系统能够根据不同车速、负荷和环境条件动态优化能量流向，在更宽运行范围内兼顾效率、动力性与驾乘品质。

基于上述发展格局，本章将分别围绕电驱核心部件与性能提升、电驱系统集成与融合、先进混合动力系统三条技术主线展开，系统梳理各领域先进技术、应用案例与创新实践。

3.2 电驱核心部件与性能提升技术

整车电压、驱动功率和电机转速提高后，电磁损耗、功率变换损耗、传动损失与热负荷相互耦合，单一部件指标难以代表电驱系统的持续性能。电机需要同时优化绕组、电磁材料和转子结构，功率电子依靠宽禁带器件与低电感封装降低变换损失，传动、润滑与热管理则控制机械损失和局部温升。

3.2.1 高速高效电机技术

提高电机转速能够在相同功率输出下降低电磁转矩需求，减小电机体积和质量，是提升驱动电机功率密度的重要路径。但随着转速和电频率提高，绕组交流铜耗、铁芯损耗、转子离心应力和热负荷同步增加，高速化需要与电磁效率和机械可靠性协同提升。当前驱动电机主要通过高槽满率、低损耗绕组设计，高性能电磁材料应用，高强度高速转子设计，以及磁路与电机拓扑结构优化，在提升转速和功率密度的同时，拓宽高效率运行范围。

（1）高槽满率与低损耗绕组技术

提高槽内导体利用率能够在有限电机尺寸下增加有效铜面积，降低直流电阻并提高转矩密度。Hairpin等扁线绕组采用规则矩形导体（图 3-1），提高槽满率并缩短端部长度，同时增大绕组与铁芯之间的接触面积，有利于降低绕组电阻和改善热量传递，已经成为高功率密度驱动电机的重要绕组形式。

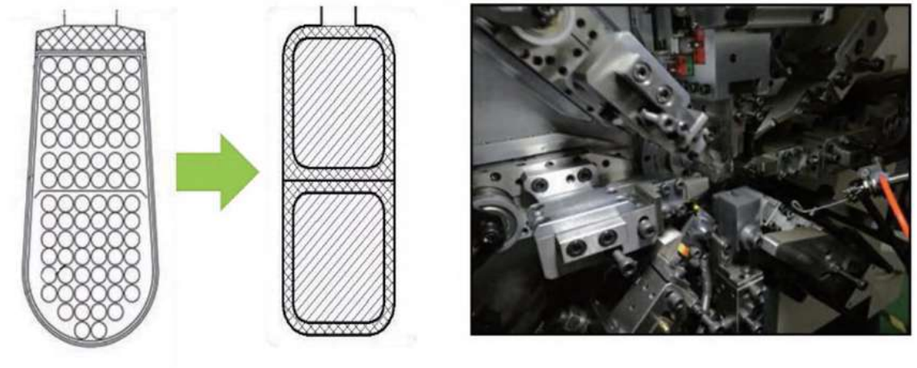


图 3-1 圆线与扁线电机绕组结构及制造工艺对比

电机高速化后，电频率提高会增强扁线导体的集肤效应和邻近效应，使交流铜耗明显增加。多层细分扁线通过减小单根导体截面尺寸改善高频电流分布，并结合并联支路、槽内导体位置和绕组节距优化降低附加损耗；连续波绕组、端部紧凑化等技术则进一步减少端部长度和连接损耗。随着 800 V 等高压平台应用，耐电晕漆包线、槽绝缘和浸渍材料同步提高绕组局部放电与长期耐压能力，使高槽满率绕组能够适应高电压、高频率运行环境。

（2）高性能电磁材料与低损耗铁芯技术

电机转速提高使定子、转子磁场交变频率增加，铁芯损耗在高速工况下的占比随之上升。薄规格低损耗无取向电工钢通过减小叠片厚度缩短涡流路径，可有效降低高频涡流损耗；同时通过材料成分和组织优化降低磁滞损耗，提高高速区域的电磁效率。高精度冲压、低损伤加工和叠片工艺进一步减少冲压残余应力和毛刺对材料磁性能的影响，使电工钢本征性能能够在电机铁芯中得到充分发挥。

永磁体性能直接影响永磁同步电机的转矩密度和高温运行能力。高性能钕铁硼磁体通过提高剩磁和矫顽力增强电机磁负荷，晶界扩散则将重稀土集中于磁体晶界，在提高高温抗退磁能力的同时减少重稀土使用量。

（3）高速转子与轻量化结构设计

电机高速化可以提高功率密度，但转子离心载荷随转速提高显著增加，永磁体固定、转子强度和轴系振动成为限制最高转速进一步提升的重要因素。高速永磁电机通常通过转子磁桥和隔磁结构优化、高强度磁钢固定结构以及高强度转轴，提高转子承受高速离心载荷的能力，并通过减小转子质量和旋转惯量降低高速旋转部件的机械负荷。

中空转轴可降低转子质量，并作为内部冷却通道将冷却介质引至转子和轴承附近，降低高速运行时永磁体与轴承温度。转子结构设计需要同时满足电磁性能、离心强度、轴系动力学和直接冷却要求。

（4）电机拓扑与磁路优化技术

内嵌式永磁同步电机（IPM）能够同时利用永磁转矩和磁阻转矩，兼具较高功率密度和较宽调速范围，是当前乘用车主驱电机的主要技术路线。多层 V 形磁钢通过优化转子磁路和直、交轴磁阻差，提高磁阻转矩利用率，并增强高速弱磁能力；磁钢分段、磁桥和隔磁结构优化则可进一步降低转子涡流损耗，并兼顾磁钢利用率与转子机械强度。

随着电驱系统对宽高效区和永磁材料使用量提出更高要求，部分产品进一步采用永磁辅助同步磁阻、电励磁同步和异步感应等电机方案。永磁辅助同步磁阻电机通过提高磁阻转矩占比减少永磁材料使用，电励磁同步电机利用励磁电流主动调节转子磁场，异步感应电机则无需永磁体，并具有较好的高速弱磁能力。这些技术路线可根据效率特性、功率需求及系统配置，用于主驱或辅驱等不同应用场景。

3.2.2 高压高效功率电子技术

随着整车由 400 V 级向 800 V 及更高电压平台发展，电驱系统能够在相同功率下降低工作电流和导电损耗，但功率器件同时需要适应更高耐压、更高开关速度和更高功率密度。传统硅基器件在高压、高频条件下的损耗约束更加突出，功率电子技术因此向宽禁带功率器件、低电感高散热封装、低损耗逆变拓扑和高精度控制发展，以降低电能变换损耗并提高持续输出能力。

（1）宽禁带功率器件与高压适配技术

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管（SiC MOSFET）具有较低的导通损耗和开关损耗，是当前 800 V 高压电驱系统中最具代表性的宽禁带功率器件。较低的器件损耗能够提高逆变效率，并为提高开关频率、减小滤波与无源器件尺寸提供条件；同时，高压平台在相同功率下降低工作电流，可进一步减少线束及导电回路损耗，使 SiC 与高压平台共同支撑电驱系统效率和功率密度提升。

SiC 器件更快的开关速度也会带来较高 dv/dt，通过寄生电容形成共模电流，并增加电机绝缘应力、轴承电蚀和电磁干扰。栅极电阻与驱动电压优化、低寄生参数母排、短路保护和多芯片并联均流等技术因此成为高压 SiC 逆变器的重要配套手段，并通过结温估计等方式控制器件热状态。GaN 器件具有更高开关速度，目前更多用于高频辅助功率变换等场景，在车用主驱系统中的应用仍相对有限。

（2）高功率密度模块与先进封装技术

功率器件性能提高后，芯片与外部电路之间的电气和热路径逐渐成为限制功率模块性能的重要因素。传统功率模块通常采用芯片焊接与铝线键合实现电气连接，较长的互连路径会增加寄生电感，单侧散热结构也限制了高功率密度条件下的热量传递。先进封装因此逐步通过连接材料、功率互连和散热结构优化，缩短电流与传热路径，提高模块功率密度和高温可靠性。

如图 3-2 所示，功率模块封装由传统引线键合逐步向铜夹片或平面互连、印制电路板（PCB）封装及双面冷却等方向发展。银烧结采用高导热、高耐温连接层替代传统焊料，可降低芯片至基板之间的热阻并提高温度循环可靠性；铜夹片和平面互连以大面积导体替代部分键合线，缩短功率回路并降低电阻和寄生电感。该封装则利用多层印制电路板的铜导体和层间互连实现功率器件与驱动、电气连接的紧凑集成，可进一步缩短连接路径，并有利于功率模块的小型化和低电感设计。



图 3-2 车用功率模块先进封装技术演进

模块功率密度提高后，散热结构由单面冷却向双面冷却发展，在芯片两侧建立传热路径，降低结到冷却介质之间的热阻。连接材料、低电感互连与散热结构需要围绕器件开关速度、热流密度和温度循环寿命共同设计。

（3）低损耗逆变拓扑与调制技术

两电平电压源逆变器结构成熟、功率密度较高，仍是当前车用主驱系统的主要拓扑。随着电驱系统向高速和高压发展，调制策略进一步用于提高直流母线利用率和降低开关损耗。空间矢量脉宽调制（SVPWM）通过优化开关矢量组合提高母线电压利用率，不连续脉宽调制（DPWM）在部分运行区间减少桥臂开关次数，从而降低开关损耗；高速工况下还可利用过调制进一步提高输出电压能力，拓展电机恒功率运行范围。

在更高电压平台下，三电平逆变拓扑通过增加输出电平降低单个功率器件承受的电压应力，并减小电压跃变和输出谐波，已在部分高压电驱系统中开始应用。相比两电平结构，其功率器件数量和控制复杂度增加，并需要解决直流中点电压平衡问题，因此目前仍主要根据电压等级、功率需求和系统架构选择应用。

（4）高精度电机控制与状态观测技术

磁场定向控制（FOC）、最大转矩电流比（MTPA）和弱磁控制构成当前驱动电机从低速大转矩到高速恒功率运行的基础控制体系。随着电机转速、母线电压和功率密度提高，电机参数随温度、磁饱和及运行状态发生变化，对电流控制、转矩精度和效率优化提出更高要求，控制目标也由基本转矩跟踪进一步扩展至效率、热状态和转矩波动控制。

反电动势观测、扩展卡尔曼滤波等状态观测方法可利用电压、电流及电机模型估计转速、转子位置和内部状态，减少对部分直接传感信号的依赖，并为高速运行和状态监测提供信息基础。实际应用中，低速可观测性、参数温漂和磁饱和会影响估计精度，因此状态观测需要与基础电机控制和参数特性相匹配，以保持宽工况下的控制精度和稳定性。

3.2.3 高效传动、润滑与热管理技术

随着驱动电机向高速化和高功率密度发展，减速器输入转速、轴承负荷和系统热流密度同步提高，传动损失、搅油损失和局部温升对电驱系统效率及持续输出能力的影响更加突出。当前电驱系统通过高速低损耗减速器、低阻润滑与按需供油以及电机和功率器件直接冷却，进一步降低机械与热损失，并保障高功率密度条件下的持续运行。

（1）高速高效减速器与低损耗传动技术

电机转速提高后，相同车轮转速需要更高的总减速比，同时齿轮啮合频率和轴承转速显著提高，齿面摩擦、轴承损失和传动噪声随之增加。高速减速器因此采用小模数、高精度齿轮提高结构紧凑性，并通过齿形和齿向修形改善载荷分布，降低高速啮合过程中的振动与附加损失；高精度加工与表面处理则进一步降低齿面粗糙度和摩擦，提高高速工况下的传动效率。

高速轴承通过内部结构和摩擦特性优化降低旋转损失，并与高刚度轴系及轻量化壳体设计配合，控制高速运行下的轴系变形和齿轮啮合偏差。部分电驱系统进一步采用两挡传动或辅驱断开机构，使电机能够在更适宜的效率区域运行，或在无需辅助驱动时减少空转损失，从系统层面拓展高效率运行范围。

（2）低阻润滑与润滑管理技术

高速齿轮和轴承需要充分润滑，但过高的润滑油黏度和油量会增加齿轮搅油、轴承拖曳和泵送损失。电驱专用低黏度润滑油通过降低流体剪切阻力减少机械损失，并配合低摩擦齿轮和轴承进一步提高传动效率。与传统机械变速器相比，电驱润滑油还可能直接参与电机冷却并接触绕组、绝缘材料及铜导体，因此除润滑性能外，还需要兼顾介电性能、材料相容性和热稳定性。

润滑系统也由固定供油逐步向按需供油发展。电动油泵可根据转速、负荷和温度调节供油量，定向喷油将润滑介质直接输送至齿轮啮合区和轴承等关键部位，在满足润滑和冷却需求的同时减少过量供油造成的搅油损失；油位控制则进一步降低高速旋转部件浸油阻力。根据电驱集成结构不同，润滑回路还可采用电机与减速器共油或分油设计，以适应不同的冷却和材料兼容需求。

（3）直接冷却与高效热管理技术

随着电机电流密度、转速和功率器件热流密度提高，传统壳体水冷的传热路径较长，局部热点逐渐成为限制持续输出的重要因素。直接冷却通过将冷却介质进一步靠近绕组、转子或功率器件发热区域，缩短热量由热源向冷却介质传递的路径，提高局部散热能力。

如图 3-3 所示，定子喷油冷却可将冷却油直接喷射至绕组端部等高热负荷区域，降低绕组温度并改善定子温度分布；浸油或其他直接油冷方式则进一步扩大冷却介质与绕组的接触面积。对于高速转子，可利用中空转轴形成轴内油路，将冷却介质引入转子内部，降低永磁体和轴承温度，从而提高高速连续运行能力。

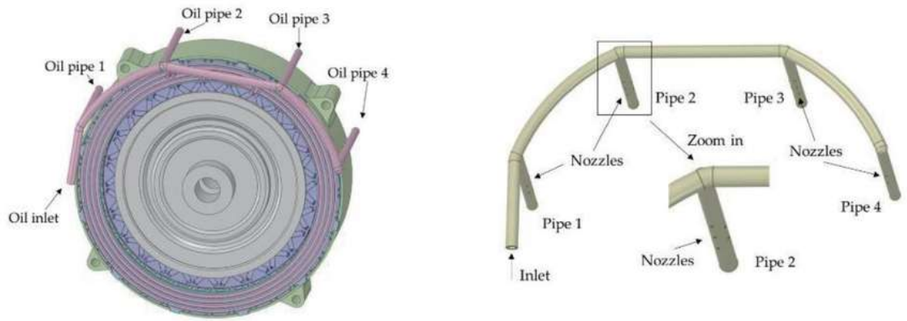


图 3-3 驱动电机定子绕组直接喷油冷却技术

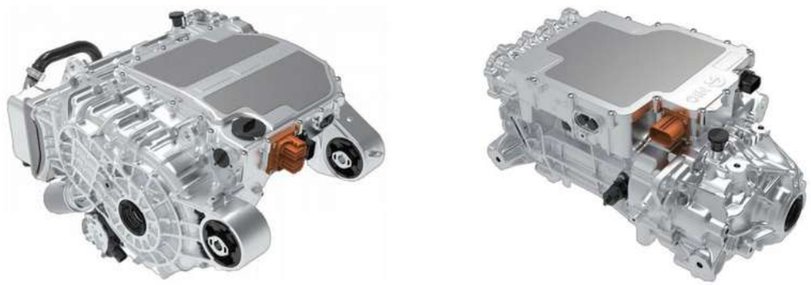
功率电子同样通过冷却结构优化降低器件结温，单面液冷逐步向更短热路径和双面冷却等高效散热方式发展。与此同时，变速电动泵和电控阀根据电机、逆变器及减速器的温度和负荷动态调节冷却流量，使冷却能力与实际热负荷匹配，在满足持续输出需求的同时降低泵送功耗。

3.2.4 电驱核心部件与性能提升技术应用案例

以下两个案例分别展示 900 V 高压电驱平台与高功率密度混动电驱的部件协同开发。

（1）蔚来：900 V 全域高压电驱系统

蔚来第四代电驱平台与整车 900 V 全域高压架构同步开发，通过提高系统电压等级，并对驱动电机、功率电子和高压绝缘等关键部件进行配套升级，提高电驱系统的功率密度和高压运行能力。如图 3-4 所示，900 V 平台配置 340 kW 永磁同步主驱和 180 kW 异步感应辅驱，其中主驱电驱总成功率密度达到 5.2 kW/kg、最高转速 20000 r/min，辅驱功率密度达到 2.6 kW/kg、最高转速 18000 r/min，并通过紧凑化设计进一步减小电驱系统布置空间。



(a) 永磁同步电驱（主驱）　　(b) 异步感应电驱（辅驱）

图 3-4 蔚来 900 V 主辅驱电驱系统

高电压和高转速进一步提高了电机的功率密度，同时也对绕组结构、电磁材料和绝缘可靠性提出更高要求。蔚来主驱电机采用 925 V 连续波绕组（WPin）方案，如图 3-5 所示，通过绕组一体成型和一体下线减少端部焊接，焊点数量减少 96%，制造工序减少 35%；同时采用 0.25 mm 超薄低损耗硅钢片、少重稀土高性能磁钢等技术，使电机本体功率密度达到 17.3 kW/kg，体积为 3.75 L、质量为 24 kg。针对 900 V 平台和 SiC 器件快速开关带来的更高绝缘应力，电机进一步采用耐电晕云母绝缘纸以及高局部放电起始电压（PDIV）、耐电晕漆包线，提高绕组在高电压条件下的绝缘可靠性。



图 3-5 蔚来 925 V 连续波绕组电机



图 3-6 蔚来自研 1200 V SiC 功率模块

与高压电机相配套，蔚来自研 1200 V SiC 功率模块，通过 SiC 芯片、银烧结、多芯片并联均流和直冷散热等技术提高功率密度、电流能力与热可靠性。如图 3-6 所示，模块功率密度达到 1315 kW/L，电阻降低 15%，同等体积下最大电流能力提升 30%以上，功率循环能力超过 30 万次。针对高压 SiC 系统可能引起的轴承电蚀问题，电驱系统采用双侧导电环疏导轴电流，并结合齿轮噪声优化和主动谐波控制等措施，降低高速、高功率密度运行条件下的电驱振动与噪声。

（2）长安：高磁通高功率混动电驱系统

长安汽车围绕混合动力电驱系统对高效率、高功率密度和紧凑布置的综合需求，对驱动电机、电控、传动和冷却系统进行协同开发。系统采用双电机同轴串行布局与三轴六齿紧凑传动结构，在缩短动力传递路径和减小总成尺寸的同时，通过高效扁线电机、低损耗电磁材料、直接油冷及高散热能力电控等技术降低电磁、机械与热损失。传动系统结合低拖曳轴承和低搅油设计，传动效率超过 98%，使电机效率提升能够进一步转化为电驱总成的系统效率提升。

电机采用 10 层 Hairpin 扁线绕组（图 3-7），通过增加每槽导体数，并结合交流时谐场分析优化导体排布，降低高速、高频条件下的交流铜耗。材料给出的对比结果显示，绕组优化使电机效率提高 0.5%、输出功率提高 10 kW，电机最大功率达到 158 kW；0.27 mm 低损耗硅钢片进一步降低高速区域铁芯涡流损耗，使电机效率提高 0.3%，最高效率达到 97.8%。

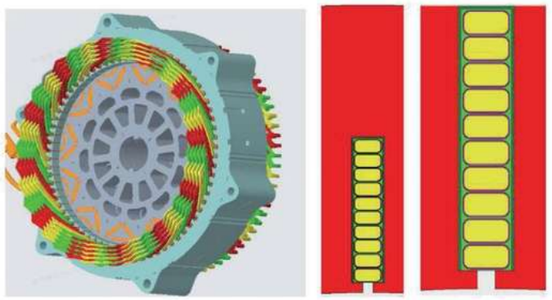


图 3-7 长安汽车 10 层 Hairpin 扁线绕组与低损耗电机技术

电机功率密度提高后，绕组局部温升成为持续输出的重要约束。长安采用随形喷管将冷却油直接输送至高热负荷区域，并通过喷淋位置与流量组织改善温度分布（图 3-8）。该方式使电机最高温度降低 40 ℃、温度场均匀性改善 10%，电机体积降低 5%、功率密度提高 10%至 7 kW/kg，质量较对标产品减轻 2.5 kg 以上。

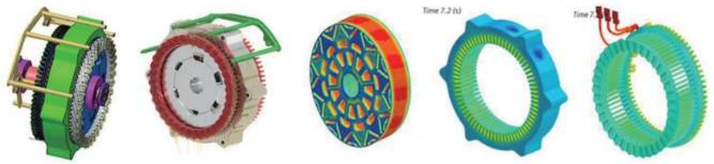


图 3-8 长安汽车混动电机精准喷淋油冷技术

电控侧通过功率模块冷却结构优化提高高功率工况下的散热与电流承载能力（图 3-9）。双电控采用椭圆 pinfin 散热结构，相比圆柱 pinfin 扩大有效换热面积，并利用更接近流线型的截面降低流动阻力和局部分离；在相同体积和质量边界下，电控电流能力提高 8%。



图 3-9 长安汽车双电控功率模块散热结构

3.3 电驱系统集成与融合技术

电驱系统集成已由电机、逆变器和减速器的结构组合，扩展至电源功能复用与整车运动控制融合。三合一及多合一电驱通过共壳体、共冷却和接口精简降低体积与质量；驱充一体化复用主驱功率器件和电机绕组承担充电或升压；多电机分布式驱动则利用轮端转矩控制自由度参与车辆纵向与横摆控制。

3.3.1 多合一结构集成与平台化技术

多合一电驱首先通过减少部件之间的机械、电气和冷却接口提高系统集成度，并逐步将车载充电机（OBC）、高压直流/直流（DC/DC）变换器、功率分配单元（PDU）等电源功能纳入统一硬件平台。在此基础上，模块化和系列化设计进一步通过标准机械、电气和软件接口，使核心硬件能够覆盖不同功率、电压等级及前后桥应用（图 3-10）。

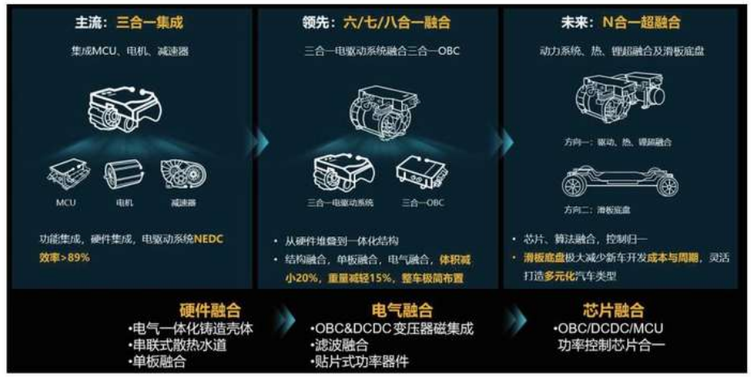


图 3-10 电驱系统由结构集成向功能与控制融合的演进路径

如图 3-10 所示，动力域集成由电机、逆变器和减速器的硬件融合，逐步扩展至高压电源功能和控制功能集成。随着融合层级提高，壳体、线束、连接器和冷却支路不断减少，硬件和控制资源的复用程度也进一步提高。

（1）电机—逆变器—减速器深度集成技术

传统分立式电驱中，电机、逆变器和减速器分别配置壳体、高压连接和冷却接口，占用空间较大，并增加线束、连接器和机械安装界面。三合一电驱通过共壳体和紧凑布置将三者集成，缩短电机与逆变器之间的高压连接，并使电机轴系、减速器齿轮和支撑结构能够统一设计，从而降低系统体积和质量。

进一步的深度集成还包括共用冷却与润滑回路、缩短直流母排以及将功率模块靠近电机布置。短功率回路有利于降低寄生电感，共用热管理系统则减少泵、管路和换热器数量。随着电机、逆变器和减速器空间距离缩短，其热、振动和电磁作用更加直接，因此壳体结构、热路、油路和电磁兼容设计也逐步由部件级转向系统级一体化设计。

（2）电驱与电源系统多合一集成技术

在三合一基础上，多合一系统进一步将车载充电机（OBC）、高压 DC/DC 变换器、功率分配单元（PDU）等高压电源部件纳入电驱总成，形成六合一、八合一等集成方案。通过共用壳体、高压母排和冷却回路，可进一步减少独立控制器、高压连接器和冷却支路，提高动力域空间利用率。

部分多合一方案还复用母线电容、控制电源及部分功率器件，使驱动、充电和电压变换功能共享高价值硬件；统一控制器集中管理驱动、高低压能量变换、热状态与故障诊断。多合一集成的重点因而由共壳体布置转向电气资源和控制资源共享。

（3）模块化平台与系列化开发技术

随着电驱产品覆盖车型和功率范围扩大，平台化开发通过统一机械、电气和软件接口提高核心部件复用能力。电驱平台可将定子外径、功率模块、电压等级、减速器中心距以及控制器接口等设计为相对稳定的基础模块，并通过绕组参数、功率器件并联数量和齿轮速比等配置形成不同功率等级产品。

统一安装边界、高低压接口和通信协议，使前驱、后驱及辅助驱动产品能够共享部分制造设备、零部件和验证体系，再通过绕组、功率器件、速比和软件参数覆盖不同车型需求。

3.3.2 驱充一体化技术

传统电驱与充电系统分别配置主驱逆变器和车载充电机等功率电子部件，存在功率器件、磁性元件和冷却系统重复配置。由于车辆驱动与充电通常处于不同运行时段，驱充一体化技术通过重构功率回路，使主驱逆变器、电机绕组等高价值硬件在驻车状态承担充电或电压变换功能，从而减少独立功率器件和磁性元件。当前主要形成交流充放电功能复用和电驱系统复用升压充电两类技术路径。

（1）交流充放电与电机绕组复用技术

交流充电需要完成交流整流、功率因数校正和电压变换，传统车载充电机通常配置独立功率开关和磁性元件。驱充一体化系统在驻车充电状态下重新配置主驱逆变器桥臂，并将电机绕组复用为滤波或储能电感，使驱动系统的功率器件和电感元件同时承担交流充电功能，从而减少独立车载充电机中的功率器件和大体积磁性元件。

电机绕组参与充电后，需要在有电流通过的同时避免产生有效驱动转矩。系统可通过绕组连接方式和相电流控制，使各相产生的电磁转矩相互抵消，并利用接触器等开关器件完成驱动与充电回路之间的可靠切换。多相绕组及可重构绕组还可进一步提高充电功率和硬件利用率，但绕组连接状态增加后，对模式切换、绝缘安全和绕组温升控制提出更高要求。

在交流充电硬件具备双向功率变换能力后，能量流还可由“电网向车辆”扩展为双向流动，实现车辆对外供电。V2L 可向外部用电设备供电，V2H 可用于家庭备用供电，V2G 则可实现车辆与电网之间的双向能量交换。相应功率回路需要具备双向整流和逆变能力，并配合并网同步、电气隔离及安全保护，以满足车辆对外放电要求。

（2）电驱系统复用升压充电技术

随着 800 V 高压平台应用，车辆在接入输出电压较低的直流充电设施时，充电桩电压可能低于动力电池所需充电电压，需要在桩端与电池之间进行升压变换。传统方案可配置独立大功率升压 DC/DC，而驱充一体化技术则利用已有电驱硬件完成这一功能，减少额外功率器件和磁性元件。

电驱系统复用升压充电通常将电机绕组作为 Boost 变换器的储能电感，并利用主驱逆变器桥臂进行高频开关控制，将较低的充电桩输出电压提升至动力电池所需电压，从而提高高压平台车辆对不同电压等级直流充电设施的兼容能力。复用电机绕组和逆变器还可减少独立升压模块带来的体积、质量和成本。

升压充电过程中，电机绕组持续流过充电电流但不需要输出机械转矩，因此需要通过相电流和转子位置控制抑制非期望转矩，并避免局部磁饱和和绕组过热。与此同时，主驱功率器件由行驶过程中的动态运行转为较长时间持续工作，其热负荷特征发生变化，需要通过冷却流量调节等方式维持逆变器和电机绕组的温度稳定。

3.3.3 分布式驱动与底盘协同控制技术

驱动执行器由集中式单电机向前后轴及左右轮独立驱动发展，使电驱系统获得更多轮端转矩控制自由度。多电机系统可根据效率、动力需求和附着条件分配驱动力，也可利用左右轮转矩差产生附加横摆力矩，并与再生制动、液压制动和转向系统协同。分布式驱动的技术重点由动力源配置转向轮端转矩主动控制和多执行器协调。

（1）多电机分布式驱动技术

前后双电机是当前多电机分布式驱动的主要形式之一。相比由单一动力源通过机械传动系统向前后桥分配动力，前后电机可分别控制两轴驱动转矩，并根据车辆负荷、附着状态和电机效率动态调整动力分配。低负荷巡航时，可由处于高效率区域的主驱电机承担主要驱动功率，另一驱动轴通过电机零转矩控制或机械断开降低空转损失；加速、爬坡及低附着工况下，则可由前后电机共同输出，提高动力性能和轮胎附着利用率。

当驱动执行器进一步扩展至左右轮独立驱动或四电机驱动，各驱动轮的正、负转矩均可独立控制。相比依靠机械差速器进行左右轮转矩分配，分布式电驱可根据各车轮附着状态和车辆运动需求直接调节轮端驱动力，并将驱动、再生制动和车辆姿态控制相结合，为更高自由度的轮端转矩控制提供执行基础。

（2）轮端转矩分配与底盘协同控制技术

多电机独立驱动使轮端转矩由机械被动分配进一步转向主动控制。前后轴转矩可根据车辆动力需求、电机效率和轮胎附着状态进行分配，使不同驱动电机尽可能运行于高效率区域，并避免单轴轮胎纵向力过早达到附着极限；再生制动过程中，还可结合前后轴载荷转移和电机回馈能力分配回收转矩，在提高能量回收率的同时保持制动稳定性。

左右轮独立转矩控制则可利用轮端转矩差产生附加横摆力矩，实现扭矩矢量控制。转弯过程中，通过调节内外侧车轮驱动或制动转矩，可主动改变车辆横摆响应，改善转向性能与弯道稳定性；在低附着路面下，则可根据不同车轮的附着能力限制打滑车轮输出，并将驱动力重新分配至具有更高附着能力的车轮。轮速、横摆角速度、车辆加速度和路面附着状态等信息共同构成轮端转矩分配的重要控制依据。

轮端驱动还可与再生制动、液压制动和主动转向等底盘执行器协同。整车控制器根据驾驶需求和车辆运动状态确定目标纵向力与横摆力矩，再按不同执行器的响应速度、控制能力和能量特性分配任务：电机优先承担快速转矩调节和部分再生制动，液压制动在回馈能力不足时补充制动力，主动转向或后轮转向用于调整轮胎侧向力。

3.3.4 先进电驱系统集成与融合技术应用案例

以下三个案例分别对应多合一集成、电驱复用升压充电，以及双电机分布式驱动与可切换机械连接三类技术路径。

（1）东风：第四代马赫 E 12 合 1 高集成电驱系统

东风汽车第四代马赫 E 电驱在传统三合一基础上，将车载充电机、DC/DC 变换器、交直流功率变换及功率分配等充配电功能，以及整车、电池、电机和充电相关控制单元纳入统一平台，形成 12 合 1 电驱系统，并预留向 14 合 1 扩展的能力。集成对象由驱动部件扩展至充配电和控制功能，减少独立部件与机械、电气和冷却接口。

高集成进一步要求电机、电控及热管理在有限空间内保持较高的功率与持续运行能力。第四代马赫电驱采用最高转速 21000 r/min 的向心式油冷高速电机，通过将冷却介质直接引入电机内部提高高转速、高负荷条件下的散热能力；电机控制器采用 HPD mini 封装模块进行紧凑化设计，并结合镁合金等轻量化技术降低总成质量。马赫纯电驱动系统同时向 800 V 高压平台发展，典型产品 iD4-160 可兼容 400 V 和 800 V 电压平台，并采用高效油冷扁线电机与 SiC 功率模块，使高速电机、高压功率电子与紧凑化集成形成配套。

统一硬件平台还承载三重防抖控制、高响应黏着控制和数字传感器安全冗余等功能，用于处理动力输出、轮胎附着和传感器故障。结构集成与控制集中需要同步设计，避免控制功能增加后由通信、故障传播和算力分配形成新的系统边界。

第四代马赫 E 12 合 1 电驱总成较上一代质量降低 25%、体积下降 30%，高效运行区域扩大，主阶次噪声得到控制，目前已实现量产车型搭载。

（2）蔚来：电驱复用升压充电系统

900 V 高压平台能够提高快充功率，但实际公共充电设施仍存在不同电压等级，需要解决高压电池与较低电压充电桩之间的适配问题。蔚来在 900 V 平台中开发电驱复用升压充电系统，利用驱动电机原有绕组电感参与升压过程，无需增加外置电感，并复用电驱功率电子完成能量变换。如图 3-11 所示，该系统最高升压充电功率达到 200 kW，最高充电电压达到 920 V，可兼容 500 V、750 V 等较低电压等级充电桩；通过电机损耗优化和油冷技术，在维持较高升压功率的同时控制电驱系统损耗与温升。

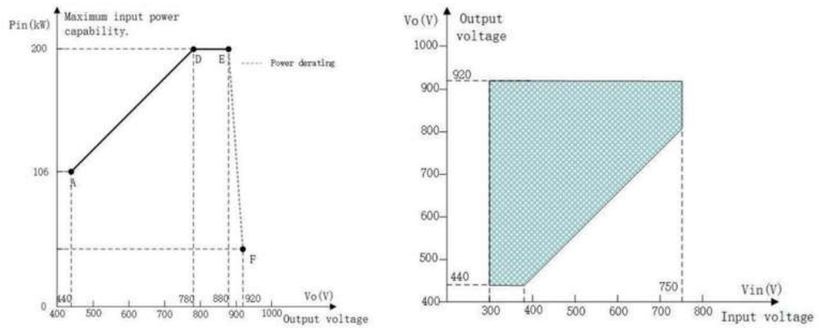


图 3-11 蔚来 900 V 平台电驱复用升压充电拓扑及主要性能

电机绕组在升压充电过程中持续参与能量变换，会带来非预期电磁转矩、齿轮敲击和转子温升等问题。蔚来通过转子位置调整与闭环控制，使升压充电时电驱输出扭矩保持为 0 N·m；两相交错控制用于降低电机损耗，将转子温升控制在 25 ℃以内（图 3-12）。

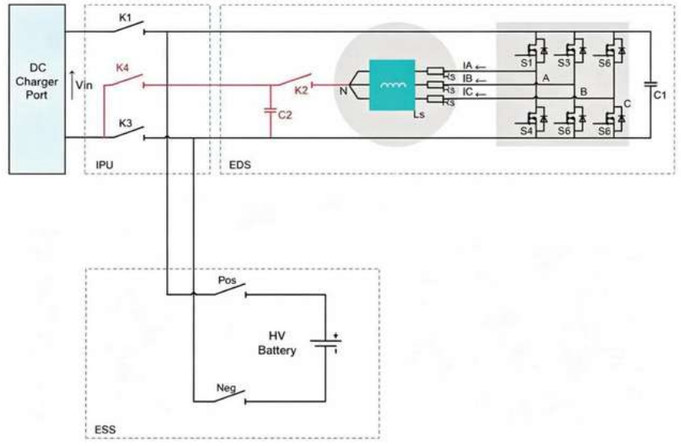


图 3-12 蔚来电驱复用升压充电系统控制

（3）精进电动：平行轴背靠背双电机七合一电驱系统

精进电动针对高端越野车型开发了平行轴背靠背双电机七合一电驱系统，将双电机分布式驱动与轴间锁集成于后驱电驱总成中，形成扭矩矢量双电驱架构。如图 3-13 所示，该系统基于 400 V 平台，驱动峰值功率达到 600 kW，轮端峰值扭矩达到 8000 N·m，其中单侧轮端峰值扭矩为 4000 N·m，并已应用于北汽越野车型。双电机分别对应左右轮驱动，在保持较高功率和扭矩输出的同时，为左右轮独立转矩控制和多种驱动模式提供硬件基础。

匹配车型	高端越野
构型	扭矩矢量双电驱
驱动型式	后驱
轮端峰值扭矩/Nm	8000（单边4000）
驱动峰值功率/kW	600
轮端最高转速/rpm	1325
电压平台	400V
轴间锁	二电机轴有轴间锁

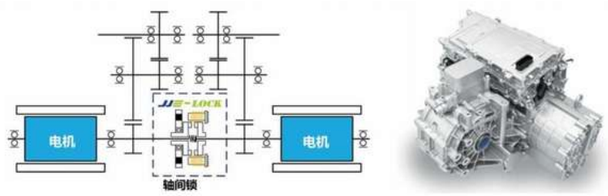


图 3-13 精进电动平行轴背靠背双电机七合一电驱系统及主要性能参数

轴间锁的接合与断开进一步拓展了双电机系统的动力分配能力。如图 3-14 所示，轴间锁断开时，两侧电机可独立调节输出扭矩，实现正常行驶、双电机智能差速和原地转向；当单侧电机发生故障时，可由另一侧维持低速跛行。极端低附着路面或单轮悬空时，轴间锁接合后可将两侧动力连接，使双电机动力向具有附着力的一侧输出，实现单轮脱困；在一侧电机失效时，也可通过轴间锁接合由单电机维持驱动。轴间锁接合响应时间小于 70 ms，且不受车速限制，使同一套双电机电驱系统能够根据正常行驶、故障运行和越野脱困等不同工况切换动力传递路径。

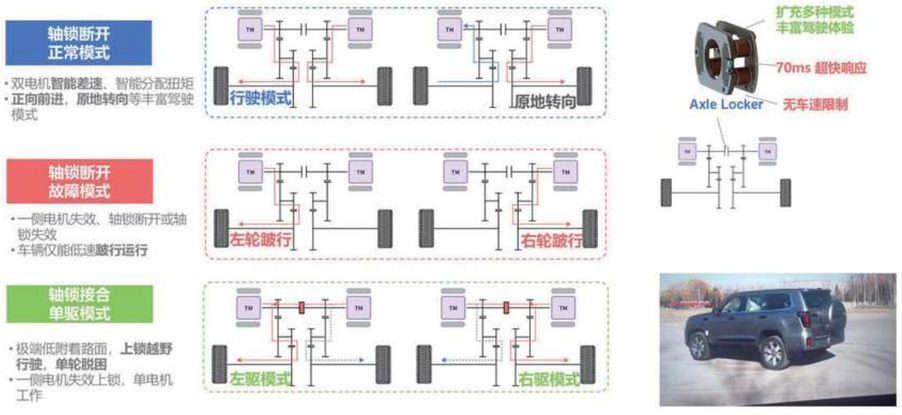


图 3-14 精进电动双电机七合一电驱系统典型工作模式

3.4 先进混合动力系统技术

混合动力系统通过发动机、电机和动力电池之间的功率分配，使不同动力源在各自高效运行区域发挥作用。随着混动系统复杂度提高，其技术重点逐步由基本动力源组合扩展至机电耦合、能量管理和动态协调：混动构型决定发动机、电机与车轮之间可用的功率传递路径，能量管理根据车辆需求和系统状态选择运行模式并分配功率，动态协调则通过发动机起动、离合器控制和电机转矩调节实现不同模式之间的平顺切换。以下分别从混动构型与机电耦合、多动力源能量管理以及动态协调与动力品质三个方面介绍先进混合动力系统技术。

3.4.1 混动构型与机电耦合技术

发动机、电机与车轮之间不同的机械和电气连接方式，形成了串联增程、多模式串并联和功率分流等典型混动构型。不同构型通过机械解耦、离合器切换或行星齿轮耦合改变功率传递路径，使发动机能够减少低效率工况运行，并利用电机承担起步、加速、能量回收和转矩补偿等功能。当前混动构型技术的发展重点，是通过机电耦合装置提高功率路径调节自由度，在城市、高速和持续大负荷等不同工况下减少不必要的机械或电能转换损失。

如图 3-15 所示，典型混动专用变速器（Dedicated Hybrid Transmission，DHT）将发动机、双电机、齿轮传动与离合器等部件集成，通过不同离合器状态和电机运行方式形成纯电、串联、并联及发动机直驱等多种功率路径，为不同工况下的动力源组合提供硬件基础。



图 3-15 典型混动专用变速器（DHT）系统组成及功率耦合结构

（1）串联增程与机电解耦技术

串联增程通过取消发动机与车轮之间的直接机械连接，实现发动机运行工况与车辆行驶工况的解耦。发动机驱动发电机产生电能，再由驱动电机向车轮输出转矩，动力电池则用于平衡发电功率与车辆瞬时功率需求。发动机转速和负荷因此不再直接随车速变化，可以更多运行于高效率区域；驱动侧则保持电机低速大转矩、快速响应和再生制动等电驱特性。

当动力电池电量较高或车辆需求功率较低时，发动机可停机并由动力电池直接供电；发动机运行时，则可通过工作点调节维持较高效率。持续高速或大负荷工况下，发动机输出需要经过发电机、功率电子和驱动电机等多级能量转换，电转换损失随之增加。因此，串联增程通常通过高效专用发动机、高效率发电机和驱动电机以及合理的动力源功率匹配，提高主要运行区域的系统效率和持续输出能力。

（2）多模式串并联与可切换机电耦合技术

多模式串并联系统在电气耦合基础上增加发动机与车轮之间的机械连接，并通过离合器、齿轮机构或挡位切换改变动力传递路径，使系统能够在纯电、串联、并联和发动机直驱等模式之间切换。低速或低负荷工况可优先采用电驱或串联运行，避开发动机低效率区域；在适合发动机高效运行的车速和负荷范围内，可建立机械直驱路径，减少发电和电驱过程中的能量转换损失；高功率需求下则由发动机与电机共同输出。

增加机械直驱路径能够减少部分工况下的电功率循环，多挡位或多离合器结构还可进一步扩大高效机械传动区域。模式切换过程中，发动机转速、离合器接合状态和电机转矩需要协调变化，电机可利用快速转矩响应完成转速同步和动力补偿，减小离合器接合引起的转矩波动。当前 DHT 技术因此主要通过紧凑的齿轮与离合器组合，在有限机械复杂度下形成覆盖主要运行工况的多种高效功率路径。

（3）功率分流与连续机电耦合技术

功率分流系统通常利用行星齿轮机构连接发动机、发电机和驱动电机，将发动机输出功率同时分配至机械传动路径和电功率路径。通过调节电机转速和转矩，可以连续改变发动机转速与车速之间的关系，使发动机在车辆速度变化时仍能够运行于较高效率区域，并实现类似电子无级变速（e-CVT）的连续速比调节。

在功率分流过程中，机械路径可直接向车轮传递部分发动机功率，电路径则通过发电机和驱动电机调节系统转速与转矩关系。不同运行工况下两条路径的功率比例发生变化，因此系统可在较宽车速范围内连续调整发动机工作点。输入分流、复合分流及多级功率分流等方案通过改变行星齿轮机构连接关系和工作模式，进一步扩大机械功率直接传递的运行区域，以降低部分工况下的内部电功率循环和电能转换损失。

3.4.2 多动力源能量管理与高效运行技术

混合动力构型为发动机、电机和动力电池提供多种功率传递路径，能量管理则根据驾驶需求、系统状态和运行环境实时选择运行模式并分配功率，使不同动力源尽可能工作于高效率区域。当前能量管理已由固定规则逐步发展为规则控制与实时优化相结合，并进一步利用导航、道路和交通信息进行前视规划；与此同时，电池温度、发动机及后处理热状态和部件寿命也逐步纳入控制约束，使能量优化由瞬时效率扩展至全程高效运行。

如图 3-16 所示，混合动力能量管理由基于当前工况的规则控制和瞬时优化，逐步向利用未来道路与车辆运行信息的前视优化发展，使荷电状态（SOC）和发动机运行能够在更长时间尺度上进行规划。

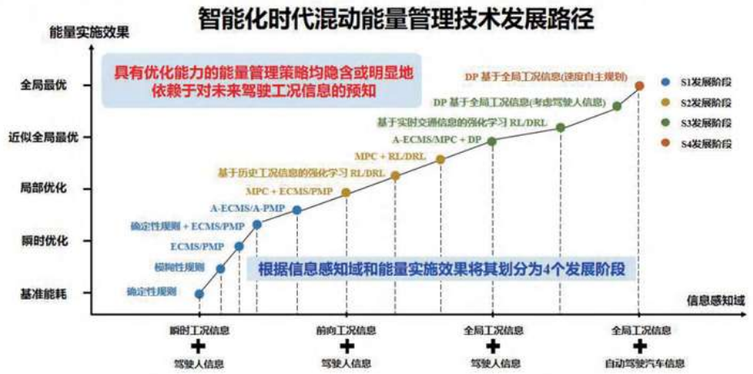


图 3-16 混合动力能量管理由实时控制向前视优化的演进路径

（1）模式决策、功率分配与 SOC 管理技术

模式决策和功率分配决定发动机何时起停，以及纯电、串联、并联或直驱等运行模式如何切换，并在发动机、电机和动力电池之间分配功率。传统规则控制主要根据车速、需求功率和荷电状态（SOC）设置模式切换阈值，具有响应直接和控制稳定的特点；随着混动系统功率路径增加，规则策略进一步与实时优化方法结合，在满足 SOC 边界和动力需求的同时提高发动机与电机的运行效率。

等效燃油消耗最小化策略（ECMS）将电能消耗折算为等效燃料消耗，在当前工况下比较不同动力源组合的能量成本，并通过等效因子调节发动机与电机功率分配。SOC 管理设置目标区间，为加速助力和再生制动保留充放电能力，避免电量过高限制回收或电量过低削弱电驱能力。

（2）前视预测与全程能量优化技术

仅依据当前工况进行能量分配，难以提前考虑后续道路条件。例如在即将进入长上坡、高速路段或城市低速工况前，不同的 SOC 储备和发动机介入策略会产生不同的全程能耗。前视预测技术利用导航提供的道路坡度、速度限制、行程距离及交通状态等信息，提前预测车辆功率需求，并据此规划 SOC 变化和发动机运行时机。

模型预测控制（MPC）在有限预测时域内滚动优化发动机、电机和电池功率，并随道路与交通信息更新控制结果。插电式混合动力系统还可根据剩余行程和预计用车工况分配纯电里程，避免在行程前段过早耗尽电量或到达终点时保留过多 SOC。

（3）能量—热—寿命协同管理技术

混合动力系统的能量效率还受到电池、发动机和后处理系统热状态的显著影响。低温条件下，动力电池内阻升高、充放电能力下降；高温和高 SOC 运行则会加快电池老化。发动机频繁停机虽然能够减少燃料消耗，但也可能造成冷却液和催化器温度下降，并影响再次起动后的效率和排放。因此，先进能量管理逐步将温度和部件状态与功率分配共同考虑。

量产系统主要通过电池充放电功率限制、预热与预冷、发动机工作点调整和热管理回路控制，使动力源运行状态与温度条件匹配。低温时可调整发动机运行与电池功率分配促进暖机；高热负荷时限制电池或电机持续功率；电池健康状态变化后，相应调整充放电能力和 SOC 使用范围。

3.4.3 动态协调与动力品质控制技术

混合动力系统在发动机起动、运行模式切换和换挡过程中，需要频繁改变发动机、电机、离合器和传动机构的运行状态，容易产生轮端转矩波动和扭振冲击。电机具有快速、精确的正负转矩调节能力，可在发动机扭矩建立、离合器接合和转速同步过程中进行转矩补偿，并进一步参与发动机阶次振动抑制。当前动态协调技术主要围绕发动机快速起动与平顺介入、模式切换与换挡过程机电协调以及扭振与 NVH 主动控制展开，以提高混动系统模式转换过程的动力连续性和驾乘品质。

（1）发动机快速起动与平顺介入控制技术

混动发动机由停机状态重新介入时，需要经历曲轴拖动、首循环燃烧和扭矩建立等过程，压缩阻力和首次燃烧扭矩容易引起转速及轮端转矩波动。P1 电机或起动发电一体机可通过较大拖动转矩快速提升发动机转速，使曲轴尽快越过低速压缩波动区域；停机位置控制则将曲轴停留在有利于再次起动的位置，缩短下一次起动过程。

喷油、点火和气门相位根据拖动状态提前匹配，提高首循环着火和燃烧扭矩建立的一致性。发动机扭矩尚未稳定时，驱动电机通过转矩补偿维持轮端需求；建立机械驱动路径时，再由电机调速与离合器压力控制完成发动机和传动系统的转速同步。

（2）模式切换与换挡过程机电扭矩协调控制技术

串联、并联、发动机直驱等模式之间切换，以及 DHT 挡位变化，会改变发动机、电机与车轮之间的功率传递路径。切换过程中，如果动力源卸载、离合器接合和转速同步时序不匹配，容易产生轮端转矩中断或突变。因此，多执行器协调通常将切换过程划分为扭矩传递和转速同步等阶段，并分别控制发动机、电机和离合器状态。

在扭矩交接过程中，待退出动力源逐步降低输出，电机利用快速转矩响应承担轮端转矩补偿，使目标动力源或离合器能够平顺接管动力；随后通过电机调节发动机或传动机构转速，缩小待接合元件两侧的转速差，再完成离合器接合。离合器压力控制与发动机、电机转矩前馈和反馈调节相结合，可适应摩擦状态和实际输出扭矩变化，降低换挡及模式切换过程中的冲击和动力中断。

（3）机电协同扭振与 NVH 主动控制技术

发动机周期性燃烧产生的转矩波动会沿飞轮、离合器、齿轮和悬置系统向车身传递，混动系统频繁起停和模式切换又会产生额外的低频瞬态激励。针对这些振动源，混动系统可从激励抑制、传递路径控制和乘员响应改善三个层面进行协同控制：通过燃烧与发动机转速控制降低激励，通过电机主动转矩和机械减振装置抑制轴系扭振，并利用主动悬置等技术降低振动向车身和座舱传递。

电机可根据曲轴相位输出正、负补偿转矩，抵消特定发动机阶次的周期性转矩波动，并抑制起停和模式切换时的瞬态扭振。双质量飞轮和扭振减振器承担宽工况基础减振，电机主动转矩针对特定阶次与瞬态过程补偿，主动悬置则调节动力总成向车身的振动传递。

3.4.4 先进混合动力系统技术应用案例

以下两个案例分别对应增程系统的发动机—发电机—驱动电机联合开发，以及 PHEV 混动专用变速箱的多模式机电耦合。

（1）理想：全新一代增程系统

理想全新一代增程系统以系统效率和 NVH 为主要开发目标，根据整车常用运行区域对增程器、发电机及驱动电机进行联合开发。系统通过拓展增程器高热效率运行区域和降低电机损耗提高部件效率，同时匹配增程器与发电机的高效运行区域，使发动机产生的机械能在常用工况下保持较高的发电转换效率。

增程器采用 HiTECS 高湍能快速燃烧系统和宽域 EGR 扩大高效率运行范围，实车最高 EGR 率达到 30%，并通过冷凝算法、热管理和抗结冰设计提高低温及高温高湿环境下的 EGR 可用性。发电机根据增程器运行区域进行电磁设计，通过匝数、极槽配合、转子谐波槽和磁钢参数寻优降低损耗。新一代发电机全球统一轻型车辆测试循环（WLTC）工况发电效率达到 94.8%，辅驱电机 WLTC 拖曳损耗由 1.02 kWh/100 km 降至 0.47 kWh/100 km；两者效率区域的匹配关系如图 3-17 所示。

除效率匹配外，增程系统还针对发动机起停、发电机转速波动以及振动噪声传递进行系统协同设计。增程器采用电动可变气门正时（VVT）调节起动过程，降低起动时的压缩冲击；发电机采用直联架构取消增速齿轮，从源头减少齿轮啮合噪声，并通过低谐波定转子设计改善典型阶次噪声。由于直联结构降低了发电机端转动惯量，系统进一步采用基于转矩前馈补偿的复合式转速控制和平稳转速标定，提高增程器与发电机之间的动态协调能力。同时，通过动力总成模态匹配、传递路径优化以及齿轴间隙控制等措施降低增程器起停和持续发电时的振动传递。实车测试中，新一代系统起动座椅振动明显降低，120 km/h 工况下增程模式与纯电模式车内噪声差异约为 0.3 dB。

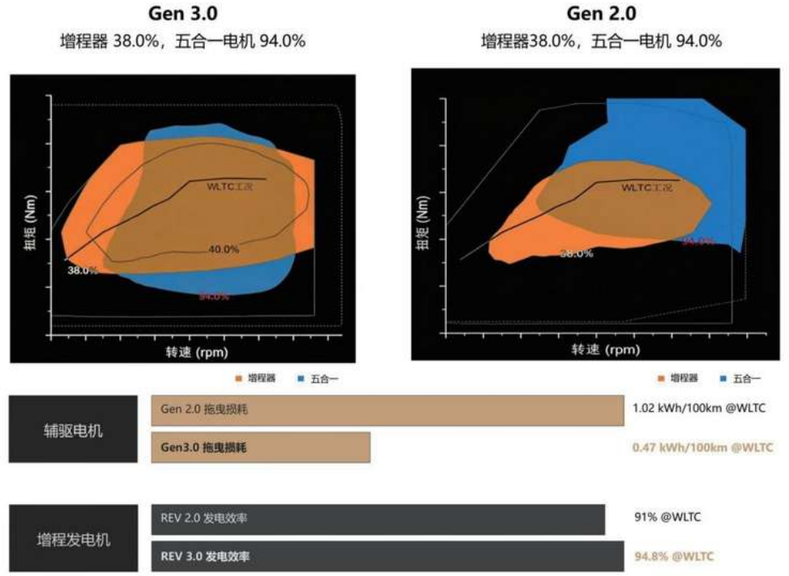


图 3-17 理想新一代增程系统增程器与电机效率匹配

（2）泛亚：真龙 PHEV 混动专用变速箱

泛亚汽车技术中心开发的“真龙”PHEV 采用 P1P3 双电机串并联架构，并以平行轴齿轴系统和高效湿式离合器作为机电耦合与模式切换核心。如图 3-18 所示，P1、P3 双电机及双电控系统在混动专用变速箱内进行深度集成，通过不同动力源之间的串联、并联及直驱路径切换，使电机能够在低速和日常工况下承担更多驱动任务，同时保留发动机高效直驱能力。双电机、电控、液压机电耦合机构与平行轴齿轴系统的集成，使整套混动单元在提高电驱能力的同时保持较紧凑的结构布置。



图 3-18 泛亚“真龙”PHEV 双电机串并联电驱架构

为了提高双电机系统的效率和持续输出能力，泛亚采用油冷扁线电机，并通过电子泵与机械泵组合改善不同工况下的冷却条件。机械泵可在发动机运行、热负荷较高时补充冷却流量，使发电机额定功率提高 60%，发电效率改善 0.5%；同时采用 0.25 mm 低损耗硅钢片，并进一步向 0.2 mm 硅钢片和分段式高标号磁钢升

级，以降低电机铁损。与电机配套的双电控系统采用双面水冷及高集成“三明治”结构，提高逆变器散热与功率密度，其中水冷结构功率密度进一步提升至 44 kW/L。

模式切换由平行轴机械传动与液压湿式离合器完成。齿轴系统在效率、NVH、耐久、尺寸和强度之间进行多目标寻优，并通过反向布置高重合度电动挡齿轴使总成尺寸缩小约 10%。湿式离合器采用液压控制维持动力路径切换的连续性，并在摩擦片与钢片之间设置分离结构，使非结合状态下的拖曳损失下降约 55%，同时减小安装尺寸（图 3-19）。“真龙”插混系统已应用于别克 GL8 插混及至境系列车型。

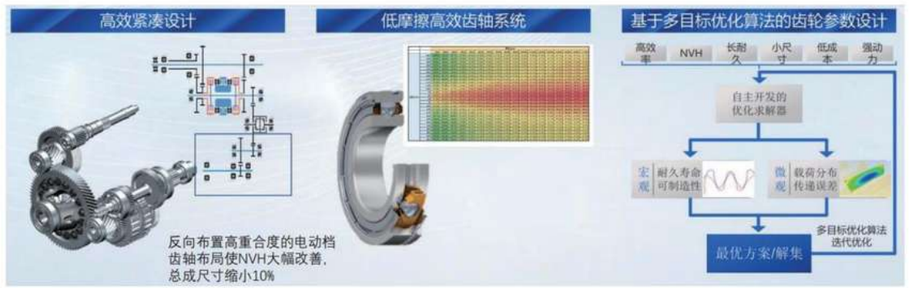


图 3-19 泛亚混动专用变速箱齿轴与湿式离合器技术

3.5 电驱动与混合动力创新实践

以下案例分别围绕电驱效率与高功率输出兼顾、低功耗电磁执行两个问题，介绍双逆变器拓扑和双稳态电磁执行机构的技术方案及验证进展。

（1）现代：SiC/Si 双逆变器拓扑实现电驱效率与性能协同

针对电驱系统在常用低功率区效率与高功率输出之间的不同需求，现代汽车正在面向下一代增程平台开发两级电驱拓扑。如图 3-20 所示，该方案配置 SiC 逆变器、Si 逆变器及模式开关，并根据电机运行区域切换不同工作模式，使功率电子和电机拓扑能够随效率与性能需求变化。

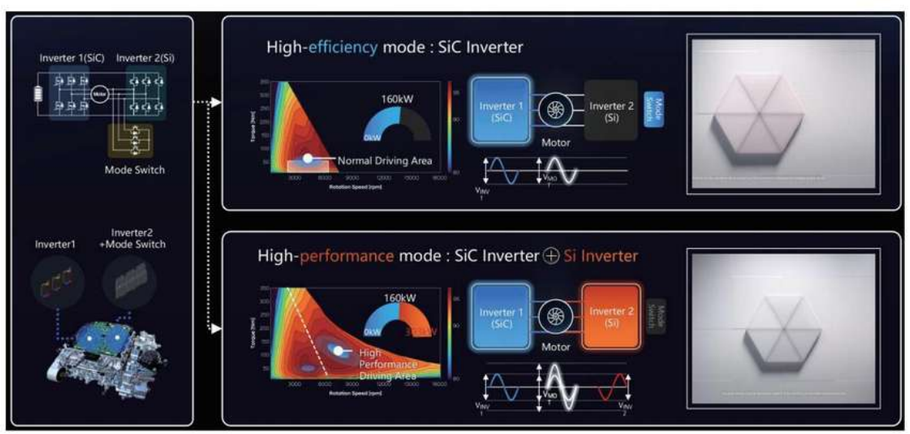


图 3-20 现代汽车两级电驱拓扑及高效/高性能工作模式

日常低功率运行时，系统仅启用 SiC 逆变器，利用 SiC 器件较低的开关损耗提高常用工况效率，此时电机输出能力约为 160 kW。进入高功率需求区域后，第二套 Si 逆变器投入工作，双逆变器共同参与电机驱动，并结合空间矢量控制扩大电机的电压和功率运行范围，图示最大输出能力提高至约 303 kW。Si 逆变器主要在高功率需求出现时参与工作，使系统无需在全部运行区域都依赖高成本 SiC 器件。

这一两级拓扑还与电机绕组连接方式协同设计。现代在报告中将其划分为闭端绕组（CEW）和开端绕组（OEW）两种运行模式，通过模式切换使电机在不同转速、转矩区域采用不同的电气连接和驱动方式，从而扩大高效率运行范围，并满足高功率输出需求。该方案目前作为现代下一代增程平台的开发技术，通过不同运行模式匹配效率、性能与功率电子成本需求（图 3-21）。



图 3-21 现代汽车两级电驱拓扑不同模式下的效率区域优化

（2）精进电动：直磁型磁路实现双稳态零保持损耗执行器

电驱系统中的差速锁、动力切分、轴间锁和换挡等功能，需要执行机构在有限空间内实现快速接合与分离，同时兼顾响应速度、保持能耗和失效安全。传统磁阻型电磁执行机构容易受到磁路漏磁、响应速度和双稳态实现能力等限制。针对这些问题，精进电动开发了 DirectFlux 直磁型电磁离合技术，通过重新设计电磁力传递路径，使磁通更加集中于工作磁路，减少周边结构漏磁，并提高有效电磁力。如图 3-22 所示，该磁路能够根据应用需求设计为单稳态或双稳态结构，线圈也可采用圆形、月牙形或离散式布置，以适应不同电驱总成的空间条件。

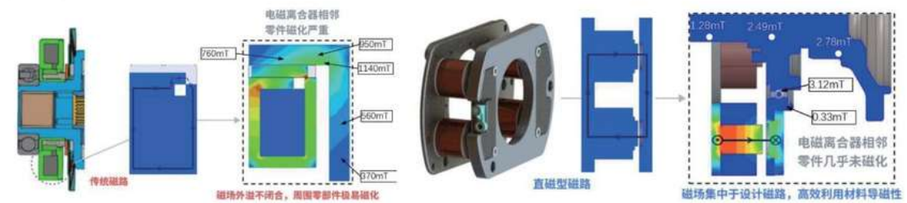


图 3-22 精进电动 DirectFlux 直磁型电磁离合技术及磁路特性

双稳态设计使离合器只在状态切换瞬间需要电流驱动，完成接合或分离后即可依靠磁路自身保持当前状态，无需持续通电，从而降低保持功耗。基于这一特性，DirectFlux 电磁离合器被应用于差速锁、动力切分、轴间锁和换挡机构等场景。如图 3-23 所示，其电磁差速锁锁止响应时间小于 70 ms，已实现 6100 N·m 级锁止扭矩；用于动力切分时，可在不同驱动模式之间快速连接或断开传动路径，并通过双稳态结构实现接合和分离状态下零保持电流。报告中给出的应用结果显示，切分功能可通过断开非工作电驱降低拖曳损失，并带来 7%～10%的续航提升。

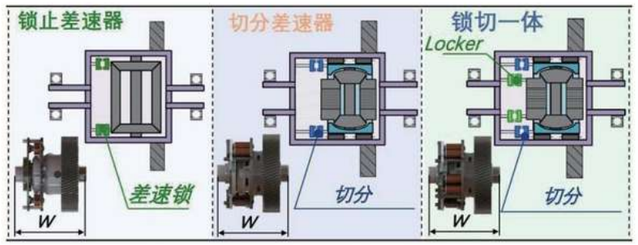


图 3-23 DirectFlux 电磁离合技术在差速锁、动力切分及组合机构中的应用

在差速锁和动力切分功能基础上，精进进一步开发锁切一体差速器，使同一机构既可完成驱动轴连接与断开，也可在越野工况下实现左右轮锁止。该方案于 2025 年应用于北汽 BJ40e 增程越野车型，轴向布置尺寸与单一差速锁或切分机构相近。

3.6 电驱动与混合动力技术趋势与关键挑战

电驱系统仍将提高电压、转速和功率密度，但随着相关指标提升，电磁、热、机械和绝缘问题间的耦合更加明显。更高电机转速会增加高频损耗、转子应力和轴承负荷，高压平台与高频功率器件则对封装、绝缘和热管理提出更高要求。因此，下一阶段电驱性能评价将更多关注宽工况效率、持续输出能力和长期可靠性，各核心部件也需要在系统边界内进行匹配。

系统集成和功能融合仍有进一步发展空间，但适宜的集成程度取决于整车架构和实际系统收益。多合一集成能够减少接口和体积，驱充复用可提高功率器件利用率，分布式驱动则增加轮端转矩控制自由度；与此同时，更高集成度也会增加热耦合、故障传播、功能隔离和维修适配难度。平台化设计、功能复用和控制协同之间需要结合车型、功率等级和使用场景进行取舍。

混合动力技术预计仍将保持多种构型并行，差异化重点更多体现在构型与使用任务的匹配以及多动力源协同控制。发动机、电机和电池的高效区域、持续功率和动态响应需要在整车层面协调，能量管理还需兼顾模式切换、热状态和 NVH。高压高速部件、新材料和高集成系统的成本与可靠性，以及复杂系统的耐久、功能安全和整车验证，仍是后续工程应用需要重点解决的问题。

观点来源

[1] 崔淑梅. 驱动电机系统多物理场数字孪生模型与特性预测[R]. 哈尔滨工业大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[2] 王军强. 新能源汽车用高速驱动电机高性能软磁新材料及其关键加工技术[R]. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[3] 李宵坷. 下一代新能源驱动系统核心部件：电磁离合器系列产品的开发与迭代[R]. 珠海华粤传动科技有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[4] 任传委. 蔚来 900 V 全域高压电驱系统开发与实践[R]. 蔚来汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[5] 李建文. 创新性电驱动和动力管理系统[R]. 精进电动, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[6] 战金程. 全球化背景下的动力技术路线[R]. 长城汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[7] 张贵强. 理想全新一代增程系统[R]. 理想汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[8] 王全任. 泛亚混动专用变速箱关键技术及工程创新[R]. 泛亚汽车技术中心, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[9] 徐世锋. 坤泰混动化技术研究及应用[R]. 坤泰车辆, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[10] 耿志荣. NVH Development for Hybrid Systems: Paradigm Shift from Noise Cleaning to Sound Design[R]. 浩思动力, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[11] 宋扬. 双碳引领·智驱未来：马赫动力高品质混动系统创新实践[R]. 东风研发总院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[12] 赵立金. 汽车融合创新与动力系统演进方向[R]. 中国汽车工程学会, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[13] 文相勋. Reinventing Powertrain of Hyundai[R]. 现代汽车, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[14] 中国内燃机工业协会乘用车动力总成专业委员会（SCP），中国汽车工程学会汽车先进动力系统分会（APS）.《车用动力系统技术发展蓝皮书（2025 年）》[R]. 2025.

第四章 动力电池技术发展与全生命周期管理

4.1 动力电池技术发展格局

动力电池产业已由规模扩张阶段进入质量、成本、安全与低碳协同提升阶段。新能源汽车渗透率持续提高，整车产品从单一续驶里程竞争转向补能效率、低温适应、性能保持、碰撞安全、残值和全生命周期成本竞争，电池在整车中的角色也由储能部件转变为决定产品能力边界的核心系统。与此同时，超快充、高集成、长寿命和高比能等目标相互牵制，制造一致性、极端事故和供应链碳约束对技术路线提出更严格要求。

在此背景下，动力电池技术路线正在从以能量密度为中心的线性演进，转变为面向车型、气候、补能和寿命要求的组合式配置。材料、电芯、系统、整车和循环端相互影响，行业评价口径需要同步从初始性能扩展到有效可用能量、全寿命安全、制造良率、碳排放和残值。

这一转变面临的核心挑战已不再是某一材料指标不足，而是多目标在批量制造条件下能否同时闭合。提高镍含量、硅含量或极片负载可以提升比能量，却可能放大界面副反应、体积变化和热稳定性问题；减少结构件能够提高成组效率，却会把碰撞、热蔓延、密封和维修责任上移到电池与车身联合设计；快充能力受到材料动力学、电芯温度均匀性、负极析锂边界和电网功率共同约束。任何单项突破只有转化为可制造、可验证、可追溯的系统能力，才具有持续产业价值。

相应地，新一轮机会来自材料体系、电芯形态、系统结构和数字化管理的协同演进。高镍高硅、固液混合、钠离子和全固态电池形成不同成熟度、不同场景的路线组合；大圆柱、方形和软包电芯围绕标准化、热管理和成组效率持续优化；电池管理系统由状态估计向机理—数据融合的风险预测扩展；碳足迹、电池护照、梯次利用与材料再生则把开发边界由车辆使用阶段延伸到原料和回收端。动力电池竞争由“电芯性能竞赛”转向“全生命周期系统价值竞赛”已成为清晰趋势。

基于上述判断，本章围绕动力电池技术发展格局、高比能与多体系电池、电芯结构与系统集成、全生命周期安全、低碳制造与循环利用、创新实践以及技术趋势与关键挑战展开。

（1）应用需求由单一比能量向多目标价值转变

续驶里程仍是重要需求，但其边际价值正在下降。对于城市通勤车型，补能便利性、低温可用能量、日历寿命和成本可能比极限续驶里程更重要；对于高性能和混合动力车型，瞬时功率、持续功率、热管理与高荷电状态下的安全边界更为关键；对于商用车、储能和低空飞行等新场景，循环寿命、快充、功重比和运行可靠性又形成不同权重。技术开发需要先定义任务剖面，再确定化学体系、电芯形态和系统架构。

如图 4-1 所示，能量密度、功率密度、寿命、安全和成本之间并非简单替代关系。提高材料活性比例、压缩非活性结构和提升极片负载，可以改善质量与体积利用率，却也会降低热扩散、制造容差和滥用条件下的安全裕度。

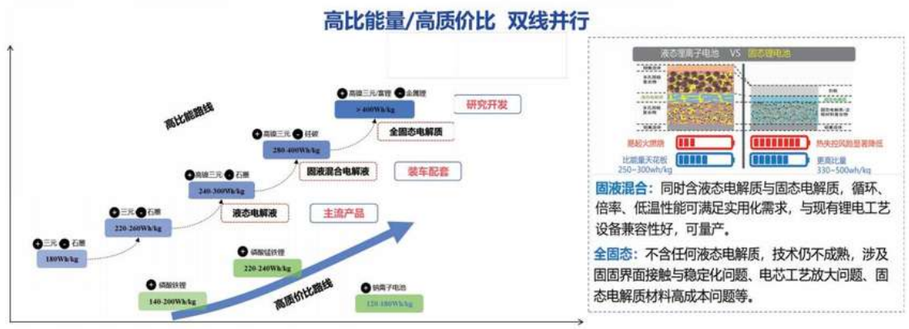


图 4-1 动力电池由单一高比能向多目标系统价值演进

（2）化学体系、电芯形态和系统结构多路线并行

如图 4-2 所示，磷酸铁锂依托安全、寿命和成本优势继续扩展，三元体系在高比能和低温领域保持价值，钠离子电池面向资源、安全和低温敏感场景建立差异化定位，固液混合与全固态电池则分别承担渐进提升和代际突破任务。电芯形态与化学体系并非一一对应，大圆柱、方形和软包均可根据热管理、结构、制造和维护要求形成组合。



图 4-2 标准化电芯平台向乘用车、储能与新型运载场景延伸

系统结构也从模组化向电池包无模组化（Cell to Pack，CTP）、电芯—底盘一体化（Cell to Chassis，CTC）/电芯—车身一体化（Cell to Body，CTB）等高集成方案演进。高集成能够提高空间利用率、减少零部件并降低结构质量，但并不意味着安全和成本自动改善。热传播路径、车身载荷、碰撞维修、密封耐久以及制造公差都随集成程度提高而重新分配，系统方案需要在车型平台、产线能力和服务体系中综合选择。

（3）安全、低碳和循环利用进入全生命周期开发边界

安全开发正在由法规合规向真实用户场景、全寿命衰减和极端滥用扩展。电芯材料稳定性只是第一道防线，制造缺陷识别、状态估计、故障隔离、热蔓延控制、碰撞防护和云端健康管理共同决定事故概率与后果。对于高集成、高比能和快充电池，安全设计必须前移到材料选择、结构布置和制造过程，不能依赖末端增加阻燃或隔热部件补偿。

碳足迹与供应链尽职调查正在形成新的市场约束。如图 4-3 所示，电池碳排放高度依赖原材料、能源结构、制造效率、物流和回收路径，企业需要建立跨层级数据采集、核算、审计和持续改进能力。循环利用也不再是报废端的单独业务，而将影响材料选择、可拆解设计、状态评估和再生材料导入。全生命周期管理由合规要求转化为产品定义和供应链竞争力的一部分。

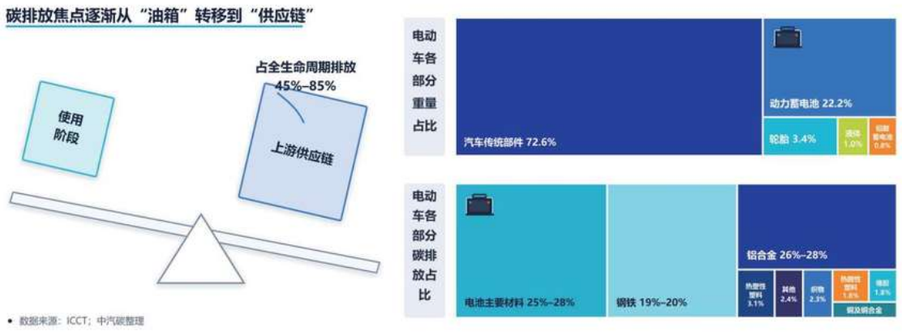


图 4-3 电动化条件下碳排放焦点由使用阶段向动力电池供应链转移

4.2 高比能与多体系电池技术

高比能仍是扩大车辆功能边界的重要方向，但技术路径正由单纯提高活性材料容量，转向材料、界面、电极、制造和结构的协同设计。液态锂离子电池将通过高镍、高硅、厚电极和轻量化继续渐进优化；钠离子电池依托资源与低温特性形成补充；全固态电池则需要跨越界面、薄膜、外压和大尺寸制造等工程门槛。

4.2.1 高镍高硅与固液混合电池协同设计

高镍正极能够提高可逆容量，但随着镍含量提升，材料热稳定性、表面残碱、微裂纹和高电压界面副反应更加突出。工程上需要通过掺杂、包覆、单晶或梯度结构、电解液添加剂以及更严格的水分和杂质控制共同改善。正极材料的容量提升只有与循环、储存、气体生成和安全边界同时评价，才可转化为整车可用能量。

硅基负极具有高理论容量，但充放电体积变化会引起颗粒破裂、导电网络失效和固体电解质界面膜反复生长。增加硅含量通常伴随首效下降。如图 4-4 所示，随着硅含量增加，循环寿命缩短、极片膨胀加剧、放电平台电压降低，而能量密度提升逐渐趋缓。因此，不能只比较材料克容量。粘结剂、导电剂、预锂化、孔隙结构、极片压实以及电芯预紧力需要同步设计，并在目标快充倍率和温度窗口下验证析锂风险。

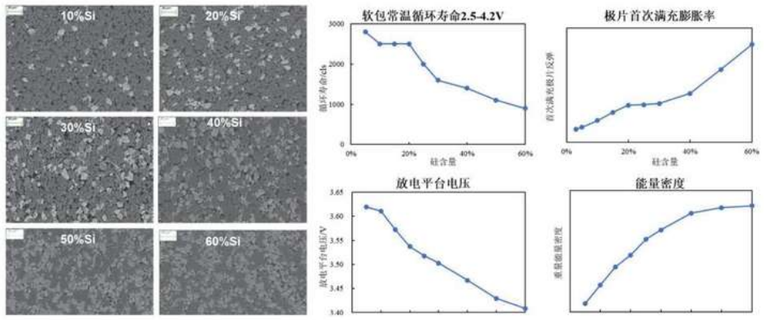


图 4-4 硅含量提升带来的容量收益与循环、膨胀及电压权衡

如图 4-5 所示，固液混合电池通过在传统液态体系中引入凝胶、固态电解质涂层或原位聚合界面，提高界面稳定性和热安全，同时尽量保留现有制造工艺。其价值不在于简单减少液体，而在于对高镍正极、高硅负极、隔膜涂覆、复合电解质和轻量化结构进行系统匹配。固液混合路线与现有锂离子产线兼容度相对较高，适合作为高比能电池的渐进演进路径，但凝胶均匀性、界面阻抗、气体生成和宽温寿命仍需在大尺寸电芯中闭环。



图 4-5 固液混合电池材料、界面、电芯工艺与测试验证协同平台

高比能开发还需要防止“初始样品最优”替代“全寿命可用”。对整车而言，初始比能量、容量保持率、快充次数、低温功率、热管理能耗和安全冗余共同决定实际续驶收益。若高比能方案需要更厚的防护、更高的冷却功率或更保守的荷电状态窗口，系统层面的净收益可能明显低于电芯指标增幅。

4.2.2 钠离子电池的产业化路径与适用边界

钠资源分布广、成本受锂资源价格波动影响较小，钠离子电池在低温、倍率和安全方面具备形成差异化产品的潜力。其工作原理与锂离子电池相近，可在部分既有设备和工艺基础上改造，有利于降低产业化门槛。正极可采用层状氧化物、聚阴离子或普鲁士蓝/白体系，负极以硬碳为主，不同材料组合在能量密度、循环、气体生成、成本和一致性方面各有边界。

钠离子电池的主要短板是质量和体积能量密度相对有限，硬碳首效、正极空气稳定性、电解液适配和产品一致性也会影响系统价值。因此其近期定位更适合低温性能、倍率、安全、成本或资源韧性权重较高的场

景，而不是简单替代所有锂离子电池。对乘用车而言，可通过小型车、混合动力、启停、低温区域或与锂电混用等方式逐步建立应用经验。

产业化关键在于从材料样品跨越到稳定产品。正极前驱体、硬碳孔结构、电解液配方、极片压实和化成制度需要形成可复制的工艺窗口；产品定义、制造能力和市场验证必须闭环，避免仅依据单体性能判断商业成熟度。钠离子电池与磷酸铁锂更可能长期形成场景互补，而非单向替代。

随着产能和供应链完善，钠离子路线的评价重点将由材料成本转向系统成本。电芯能量密度影响包体积、整车质量和热管理配置，低温性能可以减少加热能耗，安全特性可能降低部分防护负担，回收价值又与锂电不同。只有在统一车辆任务和寿命假设下比较全生命周期成本，才能识别其真实优势。

4.2.3 全固态电池由材料突破向工程制造跨越

全固态电池以固态电解质替代易燃液态电解液，并有望与锂金属或高硅负极结合，提升比能量和本征安全潜力。当前氧化物、硫化物、卤化物和聚合物等路线并行，离子电导率只是基础指标，空气稳定性、电化学窗口、界面接触、力学特性、原料成本和工艺兼容性共同决定技术可行性。

硫化物电解质离子电导率较高、成形性较好，但对水分敏感，制造环境和安全防护要求高；氧化物稳定性较好但界面接触与脆性加工困难；卤化物在高电压正极界面方面具有潜力，仍需平衡成本和负极稳定性。实际电芯往往需要复合电解质、界面缓冲层和压力管理，单一材料最优并不等于电芯最优。

如图 4-6 所示，工程化的核心之一是超薄、连续和低缺陷固态电解质膜。膜层过厚会损失能量密度，过薄则更易产生针孔、裂纹和局部短路；大面积转印、卷对卷制备和复合电极贴合还会受到浆料流变、干燥收缩、颗粒分散及环境水分影响。膜厚、面密度、力学强度和离子电导需要在长卷和批次尺度验证，而不能只依据小面积实验室样片。

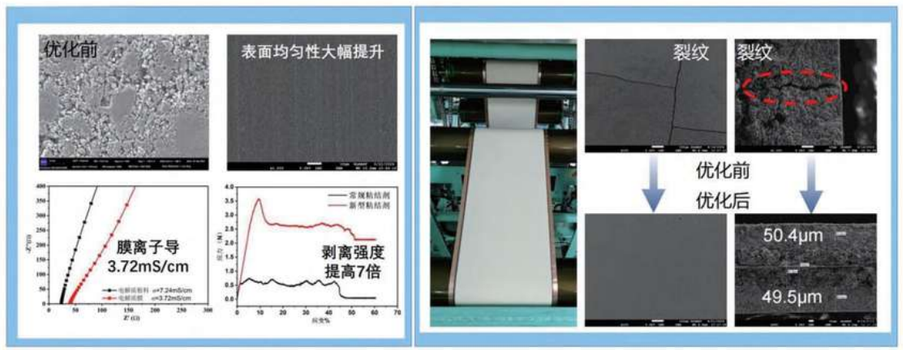


图 4-6 固态电解质膜连续制备、转印与缺陷控制

大尺寸电芯进一步放大界面压力不均、极片翘曲、堆叠偏差和局部缺陷。全固态电池若长期依赖较高外压维持接触，将增加结构质量和系统复杂度；若采用锂金属负极，还需控制枝晶、孔洞和界面副反应。产业化判断应关注安时级到车用尺寸电芯的循环、快充、温度范围、外压、良率与安全验证，而不是仅关注实验室能量密度目标。

4.2.4 多体系电池工程化应用案例

如图 4-7 所示，全固态电池的工程化制备已经从扣式、软包样件向车用尺寸电芯延伸。双向一体化成型、多层复合、连续转印和大尺寸堆叠可减少界面工序并改善一致性，但其能力需要用批量良率、长卷膜缺陷、极片尺寸偏差、压力分布和多批次寿命来验证。样件尺寸扩大本身并不代表制造问题已经解决。

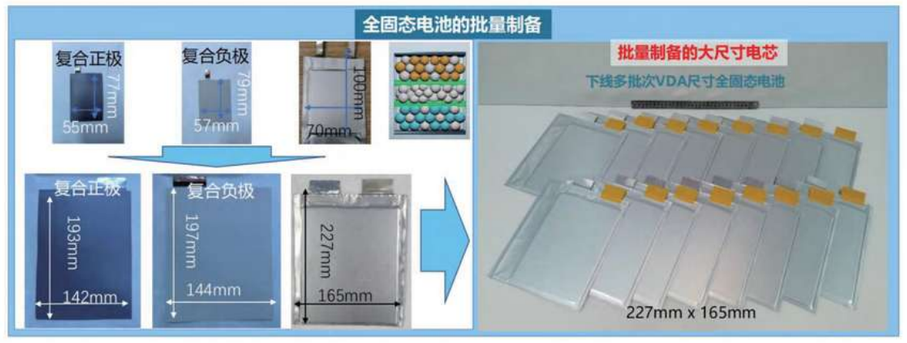


图 4-7 由复合极片向大尺寸全固态电芯扩展的工程化制备路径

固液混合电池案例表明，材料升级需要与隔膜、凝胶、结构和测试体系同步推进。高镍、高硅带来的能量收益，通过界面涂层、原位凝胶、轻量化与宽温验证形成组合，而不是依赖单一材料解决全部问题。这类路线的成熟度判断应重点关注量产工艺改造幅度、液体含量定义、滥用安全和全寿命气体管理。

钠离子产品案例则显示，产业化需要把材料路线与优先市场绑定。围绕低温、倍率、安全和资源特点形成明确产品规格，依托与锂电相近的工艺建立制造能力，再通过铅酸替代、储能或车辆示范获得运行数据，能够降低初期导入风险。其后续扩展仍取决于系统能量密度、循环一致性和规模成本是否同时达到目标场景要求。

4.3 电芯结构、系统集成与高效管理技术

化学体系决定电池性能上限，电芯结构与系统集成决定其中多少能力可以安全、稳定地用于整车。全极耳、干法电极、高集成成组、智能热管理和模型化电池管理系统（BMS）等技术正在共同提高有效可用能量，但也将制造、公差、安全和维修问题更紧密地耦合到整车平台。

4.3.1 大圆柱、全极耳与电极制造技术

如图 4-8 所示，大圆柱电芯依托标准化外形、全极耳导流和径向散热路径，在高功率、快充和自动化制造方面具有优势。全极耳能缩短电流路径、降低欧姆损耗并改善温度分布，但集流体切割、揉平、焊接和密封质量成为新的关键工序。电芯直径和高度增加后，卷绕对齐、极片张力、注液浸润和壳体应力更难控制。

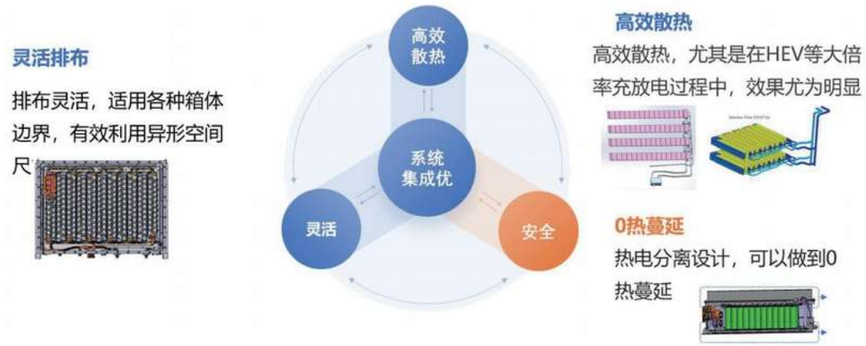


图 4-8 大圆柱电芯灵活排布、散热与安全集成特征

干法电极通过减少溶剂和干燥工序，有望降低能耗并支持厚电极，但粉体分散、纤维化粘结、连续成膜和辊压均匀性决定实际良率。厚电极可提高活性物质占比，却会增加离子传输距离并放大倍率、温升和浓差极化。电极工艺创新必须与目标倍率、颗粒体系、孔隙率和电芯热路径联合设计。

大圆柱不是独立于材料体系的替代路线，而是一种电芯平台。其可搭载磷酸铁锂、三元或其他材料，适用性取决于车型空间、功率需求、热管理、碰撞布置和产线投资。标准化带来的规模收益只有在跨车型需求稳定、供应链一致和维修策略清晰时才能充分体现。

4.3.2 CTP、CTC/CTB 与车身一体化集成

动力电池系统由 Cell-to-Module 向 Cell-to-Pack 演进，减少模组壳体、连接件和重复结构，提高体积利用率与零部件效率。进一步的 Cell-to-Chassis 或 Cell-to-Body 将电池包与车身载荷路径深度融合，可继续降低结构冗余并改善整车布置，但同时扩大设计责任边界。

高集成系统需要重新定义碰撞载荷、密封、绝缘、热扩散和结构疲劳。电芯更接近车身载荷路径后，底部冲击、侧柱碰和扭转变形可能直接影响电芯；维修时也难以像传统模组方案一样局部更换。可拆卸接口、分区隔离、碰撞后诊断和报废拆解应在平台设计阶段同步考虑。

系统集成收益还依赖制造一致性。结构胶、灌封材料、冷板、汇流排和壳体之间的尺寸链若控制不足，会造成接触热阻、局部应力和密封风险。高集成并非简单删除零部件，而是以更高的过程能力、在线检测和整车验证替代传统结构冗余。

4.3.3 热管理、快充与智能 BMS

如图 4-9 所示，快充的本质是在有限时间内控制电化学和热边界。提高充电倍率会增加欧姆热、极化和负极析锂风险，低温、高荷电状态和老化电芯更加敏感。热管理系统需要同时控制平均温度、单体温差、冷却均匀性和热泵能耗，并在充电前预热、充电中冷却和充电后均温之间协调。



图 4-9 面向整车、子系统、全生命周期和健康需求的电池管理场景

BMS 正在由电压、电流和温度监测扩展到荷电状态、健康状态、功率状态、析锂风险和内部短路概率的联合估计。等效电路模型易于车端实现，电化学模型具有更强机理解释能力，数据驱动模型可利用车队样本识别复杂模式。未来更可行的路径是机理模型约束下的数据融合，并通过不确定度和异常分布识别避免算法过度自信。

智能管理不能脱离传感与执行能力。单体电压精度、温度布点、绝缘检测、压力或应变信号决定可观测性；冷却回路、充电电流和接触器控制决定风险是否能够被主动抑制。算法输出还需转换为清晰的降功率、限制充电、维修检查或紧急处置策略，并验证误报、漏报和通信故障下的安全状态。

高集成电池平台实践表明，空间利用率、热管理和安全必须作为同一设计问题。灵活排布可以适应不同箱体边界，全极耳和定向热路径有利于高功率工况散热，分区和隔热设计则降低局部失效扩展风险。评价时应同时核对包级比能量、冷却功耗、快充温升、碰撞完整性和可维护性。

整车安全体系实践还显示，电池管理不能局限于包内。车辆碰撞信号、底盘状态、充电设施、云端健康数据和售后检查记录都可以成为风险识别输入。设计、验证和运行数据形成闭环后，企业能够更早发现批次差异和异常衰减，并把处置从事故后响应前移到维护与召回决策。

这类系统能力需要稳定的数据定义和构型管理。同一车型在电芯批次、软件版本、热管理零件和使用区域方面可能存在差异，模型训练和风险阈值必须与硬件状态对应。若缺少可追溯关系，车队数据规模越大，错误关联的风险也越高。

4.4 动力电池全生命周期安全技术

动力电池安全是由缺陷产生、风险积累、异常演化和后果扩展构成的连续过程。有效安全体系应同时降低故障发生概率、提高早期可探测性、阻止单体失效扩展，并在极端情况下保护乘员和救援人员。材料、电芯、系统、整车与云端的多道防线需要相互独立又能够协同。

4.4.1 本征安全与制造缺陷预防

本征安全首先取决于正负极、电解液、隔膜和界面的热稳定性。高荷电状态下正极释氧、负极与电解液反应、隔膜收缩和内短路可能形成放热正反馈。材料包覆、阻燃或高稳定电解液、耐热隔膜和电芯结构能够提高触发阈值，但任何材料改进都不能完全消除制造缺陷和机械滥用。

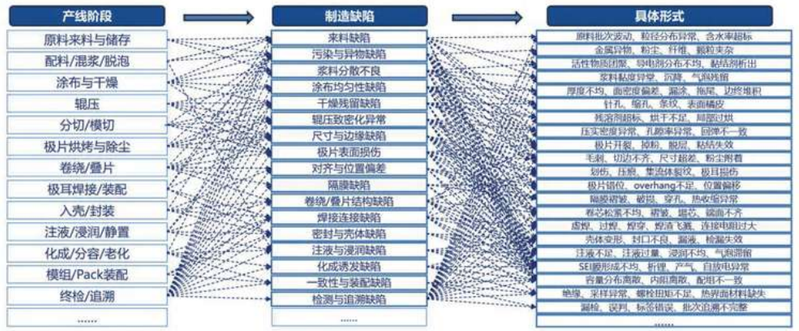


图 4-10 电池制造过程缺陷向一致性、寿命和安全风险传递

如图 4-10 所示，制造缺陷是低概率高后果事件的重要来源。金属异物、毛刺、极片折叠、涂布缺陷、颗粒团聚、焊接飞溅、隔膜损伤和装配偏差可能在出厂测试时不表现异常，却在循环、振动或挤压后演化为内部短路。缺陷控制需要把原材料、设备、环境、过程参数、在线检测和失效分析关联起来。

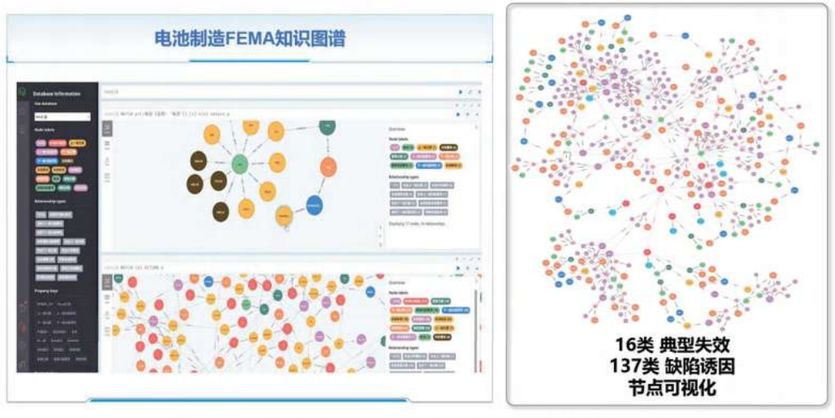


图 4-11 制造缺陷 FMEA 与失效知识图谱的关联方法

如图 4-11 所示，失效模式与影响分析（FMEA）与知识图谱可以将缺陷模式、工序原因、可观测信号和后果建立映射，帮助确定检测优先级。其价值不在于替代现场判断，而是把分散的失效经验转化为可更新的过程知识。量产中还需结合设备能力指数、检出率、误判率和破坏性抽检，验证质量防线是否真正覆盖关键风险。

4.4.2 系统安全、故障隔离与热蔓延控制

系统安全的第一目标是避免单点故障演化为整包或整车事故。电气保险、接触器、熔断器、绝缘监测和高压互锁用于切断异常能量；冷板、隔热材料、排气通道和防火结构用于限制热影响；包体、车身和底护板则承担碰撞、挤压和异物冲击防护。不同措施必须根据故障时间尺度匹配，毫秒级短路、秒级热失控和分钟级热蔓延需要不同响应。

热蔓延控制不仅是相邻电芯间增加隔热材料。电芯间距、热路径、汇流排连接、冷却板结构、排气方向和上盖强度共同影响火焰、热流和高温颗粒传播。高集成系统中，结构胶和灌封材料可能同时承担连接、传热和阻燃功能，其老化、吸湿和制造空隙需要纳入验证。

故障隔离还要考虑共因失效。多个模组或电池分区若共用冷却、线束、控制电源或排气空间，形式上的冗余可能被同一故障同时破坏。系统设计应通过物理隔离、功能独立、故障诊断和安全降级，确保局部故障后仍能保留必要的监测、断电和人员撤离时间。

4.4.3 多源感知与主动风险预警

传统 BMS 主要依靠电压、温度和电流识别异常，部分内部短路在早期信号幅值很小，且容易与传感噪声、使用波动混淆。压力、应变、气体、声学、阻抗和绝缘等信号可提供新的观测维度，但增加传感器也会引入成本、布置、耐久和标定问题。如图 4-12 所示，多源感知的关键是找到与失效机理有稳定关联、能够在车端长期工作的少量有效信号。



图 4-12 基于电信号、热信号、机理模型与人工智能的预警方法

主动预警需要区分状态估计、异常检测和风险判定。状态估计回答当前容量、功率和温度边界；异常检测识别相对自身历史或同批车队的偏离；风险判定则评估偏离是否可能演化为安全事件。三者应采用不同阈值和验证样本，避免把普通老化误判为紧急风险，也避免平均化模型掩盖单体异常。

云端车队数据可用于识别缓慢演化和批次相关问题，车端算法则需要在通信中断时独立完成基本保护。合理架构是车端执行确定性保护和实时诊断，云端进行长期趋势、同类比较和模型更新，再通过受控的软件和阈值管理回到车辆。模型更新必须保留版本、适用构型和回退机制。

4.4.4 热失控机理、燃烧抑制与应急处置

如图 4-13 所示，热失控通常经历局部发热、界面分解、隔膜失效、内部短路、快速放热、产气和燃烧等阶段，但不同化学体系、荷电状态和触发方式的路径并不完全相同。高比能电芯储存能量增加后，反应热、可燃气体和喷射颗粒对包体与乘员舱提出更高要求。机理研究需要同时关注触发阈值、放热速率、气体组成、火焰传播和复燃。

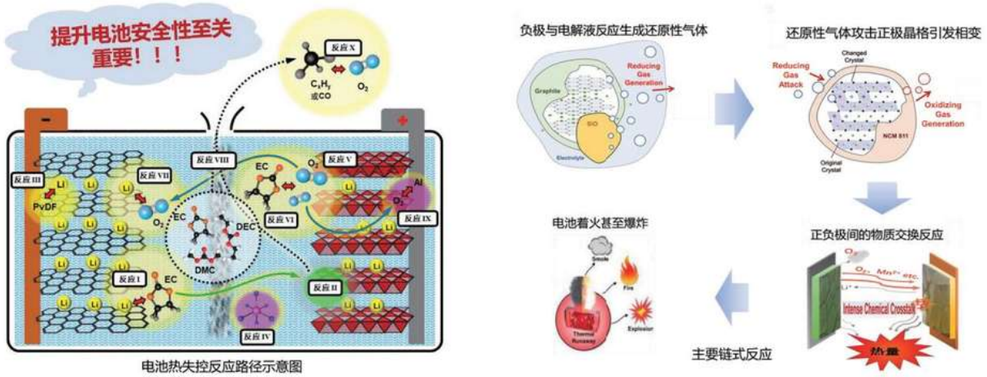


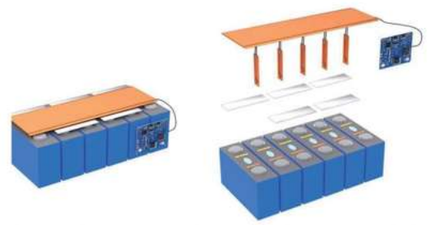
图 4-13 电池热失控放热、产气、燃烧及危害扩展链

抑制策略可分为事前降低反应活性、事中切断链式反应和事后控制传播。阻燃电解液、热稳定材料和功能隔膜提高触发阈值；温度响应添加剂或微胶囊可在局部升温时释放抑制组分；包级隔热、排气和灭火系统则用于降低后果。任何添加剂都需要评价对电导率、界面膜、循环和气体生成的副作用。

应急处置设计应基于事故演化时间。车辆需要快速识别风险、切断高压、发出明确警示并为乘员撤离创造时间；排气路径应避免高温气体直接进入乘员舱或冲击救援区域；碰撞后、涉水后和充电事故后的复燃风险需要纳入存放与拖移规范。事故数据还应反馈到设计和试验，形成闭环改进。

4.4.5 安全创新应用案例

如图 4-14 所示，力—化耦合方法利用电芯膨胀压力与电化学状态之间的关联，为内部异常识别增加新的观测维度。通过薄膜压力传感与电化学阻抗等信号融合，可在某些受控样品和试验条件下提前识别异常。其工程化仍需解决传感一致性、封装耐久、装配预紧力、温度补偿以及不同电芯体系间的迁移问题。



恩智浦1101BB

主要指标	参数
电压测量精度	±5 mV
温度传感器精度	±2K
电流检测精度	0.5A或 0.5%FSR
绝缘检测精度	≤15%或≤10K
EIS频率范围	0.01Hz 至 7800Hz

薄膜压力传感器

主要指标	参数
压敏面积	φ8mm
量程	0~1MPa
蠕变	≤0.003%F·S/s
温漂	≤0.2%F·S/℃
长期稳定性（漂移）	≤8%F·S/10000次

每个单体电池配置一组采集单元，解决电池系统内所有单体采样系统部署问题
通过将在线EIS采集单元焊接至电芯汇流排，采集线短、信号受干扰小，解决长距离信号传输受磁场干扰问题

图 4-14 压力与阻抗耦合的电芯异常在线检测方案（案例：恩智浦）

如图 4-15 所示，温度响应阻燃微胶囊案例展示了“正常工况低影响、异常温升主动释放”的安全材料思路。微胶囊在设定温度附近破裂，释放抑制组分以减少负极副反应热，为热失控前移干预提供可能。其有效性需要在目标电解液、极片和电芯尺寸中验证，并评价长期储存、循环、机械冲击和温度老化后的触发一致性。

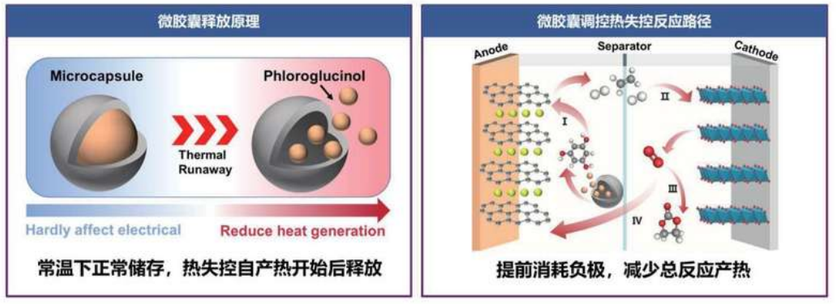


图 4-15 温度触发型阻燃微胶囊的释放与反应抑制机理

如图 4-16 所示，在特定单体和试验条件下，添加微胶囊后自发热起始温度和热失控触发温度出现变化，说明材料级干预可以影响热演化路径。但该结果不能直接外推到其他配方和整包系统，包级安全收益还取决于添加量、均匀性、循环副作用以及相邻电芯热传播。案例的更大意义是推动安全技术由事故后的隔离，进一步前移到失控反应发生前。

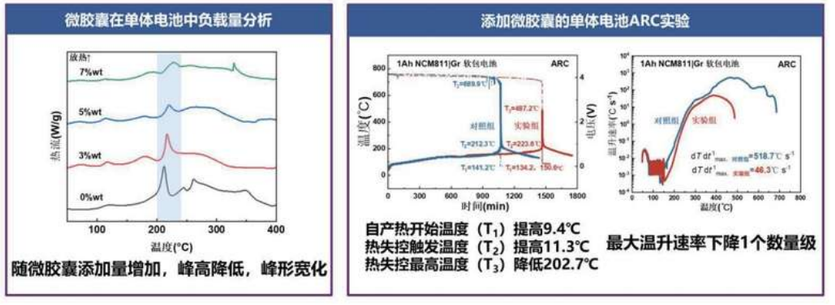


图 4-16 特定样品条件下阻燃微胶囊对热安全阈值的影响

4.5 低碳制造、碳足迹与循环利用

动力电池的环境影响主要分布在矿产与材料、能源密集型制造、车辆使用以及报废回收环节。随着产品碳足迹、尽职调查和信息披露要求增强，低碳能力将由单一工厂节能扩展为跨供应链的数据和工程体系。企业需要同时回答排放来自哪里、数据是否可信、改进措施是否有效以及材料能否回到生产体系。

4.5.1 碳足迹核算与规则衔接

如图 4-17 所示，动力电池碳足迹核算首先需要明确功能单位、系统边界、分配方法、用电因子和回收阶段处理方式。同一电池若采用不同电力结构、材料来源、产能利用率或寿命假设，结果可能存在显著差异。企业不应只追求一个较低数值，而应建立能够追溯到物料、工序、工厂和供应商的数据链。



图 4-17 动力电池碳足迹管理由核算向减排、披露和追溯延伸

国内外规则仍在持续演进，正式合规应以适用法规、标准和客户要求的最新文本为准。技术开发阶段可以先建立统一数据字典和核算底座，减少不同体系之间的重复采集；对关键排放因子和供应商数据设置质量等级，区分实测、供应商特定数据和行业平均数据；对边界变化和版本更新保留可审计记录。

碳足迹结果只有与产品决策关联才有价值。材料替代、工艺能耗、良率、运输距离、电池寿命和回收率均会改变单位服务量排放。对于高比能方案，还需考虑制造能耗上升是否被整车质量下降和使用阶段节能抵消，避免只在单一生命周期阶段优化。

4.5.2 绿色制造与供应链协同

如图 4-18 所示，电池制造的减排重点包括正负极材料制备、干燥、涂布、辊压、注液、化成分容以及厂房环境控制。绿色电力、设备效率、热能回收、溶剂回收、干法电极和良率提升可以降低单位电芯排放。对于固态和高镍体系，干燥环境与材料处理要求更高，新增能耗应与性能收益同时评价。



图 4-18 供应链碳数据开发、优化和持续治理流程

供应链协同难点在于数据颗粒度和可信度。上游矿产、前驱体、正负极材料和电解液往往跨区域生产，供应商层级多、能源结构差异大。企业需要明确数据字段、测量边界、更新频率和证据要求，并通过抽查、第三方核证和异常比对控制数据质量。仅以通用数据库替代供应商实测数据，难以支撑精细减排和产品差异化。

低碳制造不能以牺牲安全和耐久为代价。减少材料用量、提高再生料比例或缩短工序时，必须重新验证杂质、机械强度、界面稳定和批次一致性。最优方案应在碳、成本、性能、质量和供应安全之间形成可审计的权衡。

4.5.3 电池护照、追溯与第三方核证

电池护照的基础是贯穿原材料、电芯、系统、整车和回收环节的统一身份与数据关系。产品标识需要关联材料来源、制造工厂、批次、性能、安全测试、碳足迹、维修和退役状态，同时设置商业机密、个人数据和跨境传输边界。数据过多但定义不一致，反而会降低可用性。

第三方核证能够提高结果可信度，但核证范围、抽样方法、数据版本和利益独立性需要清晰。不同机构、数据库和认证体系之间的互认可以降低重复成本，前提是核心方法和证据可比较。企业还需保留原始数据、计算模型和变更记录，使同一产品在规则更新后能够重算，而不是重新建立一套孤立数据。

追溯系统应服务于质量和安全，而不只是碳披露。电芯批次与车辆运行异常、维修记录和回收去向关联后，可以支持精准召回、残值评估和材料闭环。数字化平台与实物标识之间还要防止错配、篡改和数据缺失，关键节点需要现场控制和审计机制支撑。

4.5.4 回收、再生材料与供应链尽职调查

退役电池应先进行安全检查、剩余容量和内部风险评估，再确定梯次利用、直接再生或材料回收路径。梯次利用只有在状态可识别、性能匹配、责任清晰和后续回收可追踪时才具有价值；对于安全历史不明、体系混杂或维修成本过高的电池，直接进入规范回收可能更合理。

材料回收需要在回收率、材料纯度、能耗、废水废气和经济性之间平衡。湿法、火法和直接再生各有适用边界，再生材料导入正极、负极或金属盐生产后，仍需验证杂质、批次稳定和电化学性能。可拆解结构、材料标识和连接方式将影响回收效率，因此循环设计应前移到产品开发阶段。

供应链尽职调查进一步覆盖环境、劳工、合规和地缘风险。企业需要建立供应链图谱，按材料、区域和供应商表现分级，制定纠正、替代和退出策略，并持续跟踪。尽职调查不等于一次性问卷，关键是形成风险证据、责任人、关闭时限和复核机制，与采购和产品决策真正联动。

4.6 动力电池创新实践

动力电池创新正由单点材料突破转向跨尺度验证。具有产业意义的创新通常能够说明作用机理、工程集成路径和失效边界，并通过样件、台架、系统和整车逐级验证。以下实践分别代表安全材料、主动感知和固态制造三个方向。

4.6.1 温度响应材料把安全干预前移到失控前

如图 4-19 所示，温度响应微胶囊利用正常工况稳定、异常升温释放的特征，在不持续消耗抑制剂的情况下介入热失控前反应。其创新点是将安全功能嵌入电芯材料体系，使安全防线由包级隔热和排气进一步前移。若触发温度、释放速率与关键副反应匹配，有望延缓温升并为系统保护争取时间。

该技术的工程化重点是长期可靠性而非一次性试验效果。微胶囊需要经受极片制造、注液、化成、循环、储存和振动冲击，不能在正常温度波动下提前破裂，也不能显著降低离子传输和循环寿命。不同化学体系的反应路径不同，触发温度和抑制组分需要重新匹配，不能用单一配方覆盖全部电池。

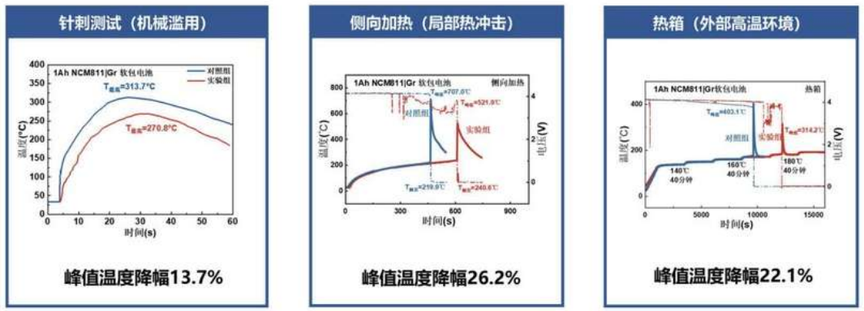


图 4-19 电池在针刺、侧向加热与热箱工况下的温度响应材料验证

4.6.2 力—化耦合感知拓展内部缺陷可观测性

如图 4-20 所示，压力和应变信号能够反映嵌脱锂、气体生成、局部膨胀和结构约束变化，与电压、温度、阻抗形成互补。力—化耦合方法通过建立压力演化与电化学状态的基线，识别偏离正常轨迹的内部异常，为缓慢内短路和局部副反应提供新的预警窗口。

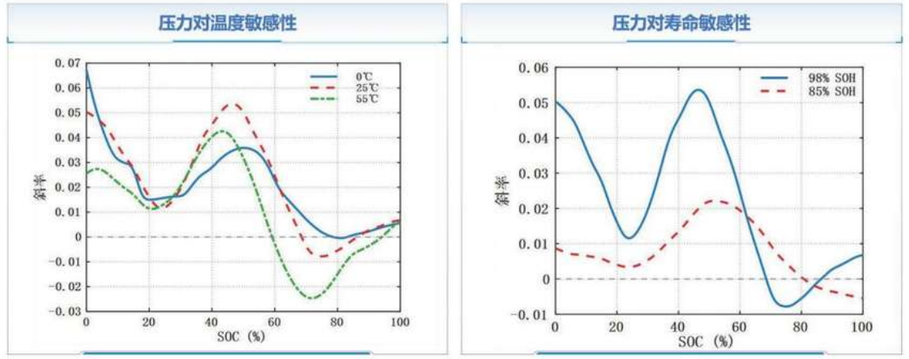


图 4-20 压力特征峰对温度、荷电状态与寿命变化的响应

创新价值在于把“不可见”的内部变化转化为可测信号，但实际应用仍需要解决装配预紧力、温度漂移、传感器零点、结构传递路径和个体差异。量产方案不一定要求每个电芯配置独立传感器，可通过关键位置布点、模组结构感知或与电化学模型融合降低成本。算法必须在多温区、多寿命和复杂载荷下验证误报与漏报。

4.6.3 超薄固态电解质膜推动全固态电池规模制造

如图 4-21 所示，全固态电池的核心创新正在从新材料发现转向材料与制造一体化。超薄固态电解质膜能够减少非活性质量、缩短离子路径，但需要同时满足机械完整、均匀致密、低缺陷和长卷连续制备。复合电极浆料、界面涂层、转印和层压工艺必须与膜材料协同设计。

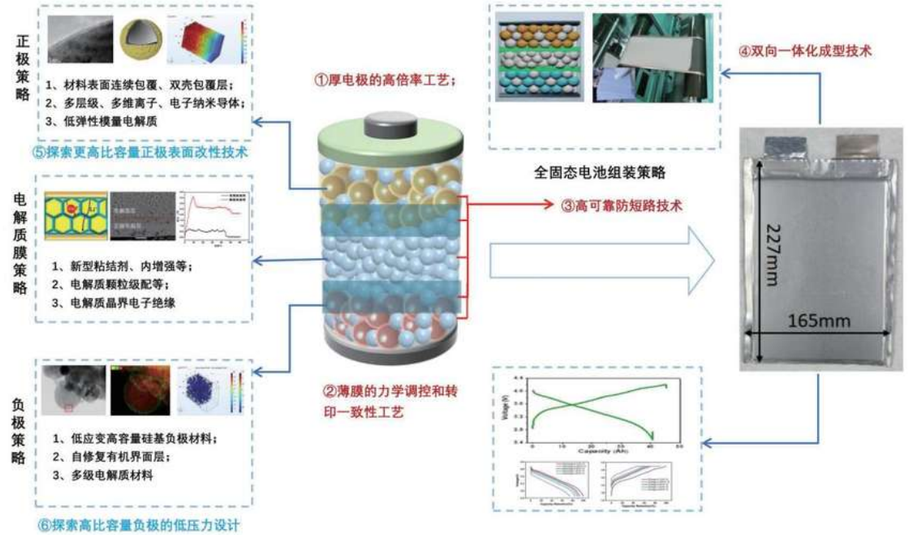


图 4-21 薄膜力学调控、转印一致性与一体化成型的全固态制造路径

这一路线的产业化标志不是单个样件达到高比能，而是大尺寸电芯在较低外压下获得稳定循环、快充和安全性能，并形成可接受的制造节拍与良率。装备、干燥环境、在线缺陷检测和回收返工能力将成为决定成本的重要部分。全固态电池预计经历较长的材料、工艺和系统共同收敛过程。

4.7 动力电池技术趋势与关键挑战

如图 4-22 所示，未来动力电池将长期保持多技术路线并行。磷酸铁锂、三元、高锰、钠离子、固液混合和全固态不会简单按照能量密度高低依次替代，而会围绕车型价格、补能条件、气候、功率和寿命形成分层。材料体系之外，电芯形态、极片工艺和系统结构的组合空间将继续扩大，平台化开发需要保留兼容不同化学体系和供应商的能力。

技术竞争将由初始峰值指标转向有效可用性能。高比能、超快充和高集成仍会推进，但评价重点会进一步转向全寿命可用能量、低温保持、快充衰减、热管理能耗、故障概率和维修成本。企业需要以统一任务剖面比较不同路线，清晰区分材料目标、实验室样品、电芯样件、系统验证和量产能力，减少脱离工况的指标宣传。



图 4-22 材料、形态、制造与工厂协同演进的技术路线

安全技术将由被动防护向本征安全、制造预防和主动预警前移。材料热稳定、缺陷在线检测、机理—数据融合算法、故障隔离和热蔓延控制将形成连续防线。其关键挑战是低概率事故难以依靠有限试验充分覆盖，需要把加速试验、故障注入、车队数据、失效分析和模型可信度结合，并建立软件、硬件和电芯构型之间的可追溯关系。

系统高集成将继续提高空间和零部件效率，但必须同步解决碰撞、热传播、制造容差、维修和回收。CTC/CTB 并非所有车型的唯一答案，平台设计需要根据产量、车型寿命、事故维修和材料路线选择集成层级。未来高集成系统的竞争力更取决于跨电芯—包体—车身的联合仿真、试验和质量控制，而不是结构件数量本身。

低碳与循环能力将从合规附加项转为产品开发输入。碳足迹数据、电池护照、再生材料和供应链尽职调查会影响材料采购、工厂能源、结构设计和报废路径。当前主要挑战是数据边界不统一、供应商特定数据不足、第三方核证成本较高以及循环材料质量波动。建立统一数据底座、可审计模型和跨企业互认机制，是把规则压力转化为产业效率的关键。

总体看，动力电池下一阶段的创新不再以某一个“终极体系”为中心，而以场景定义、跨尺度协同和全生命周期闭环为主线。能够同时把材料性能转化为量产一致性，把高集成转化为安全可维修性，把运行数据转化为主动管理，并把回收材料重新导入高质量生产的技术体系，将更可能形成持续竞争优势。

观点来源

[1] 侯敏. 高比能固液混合电池研发进展及应用[R]. 瑞浦兰钧能源股份有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[2] 袁定凯. 大圆柱电池技术发展及趋势[R]. 云山动力（宁波）有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[3] 李树军. 钠离子电池迈入商业化应用时代[R]. 中科海钠, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[4] 韩海滨. 新能源汽车安全技术体系探索与实践[R]. 吉利汽车集团, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[5] 王立业. 动力电池系统集成趋势及安全管理关键技术[R]. 中国科学院电工研究所, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[6] 王建涛. 硫卤化物基全固态电池及电解质技术进展[R]. 国家动力电池创新中心、国联汽车动力电池研究院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[7] 石红. 汽车动力电池低碳管理现状及展望[R]. 中国汽车技术研究中心有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[8] 刘杰. 锂离子电池热失控燃烧抑制技术研究[R]. 北京交通大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[9] 周思达. 锂离子电池内生缺陷诊断与力—化耦合安全预警研究[R]. 河北工业大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

第五章 AI 赋能动力系统智能化变革

5.1 AI 赋能动力系统技术发展格局

动力系统正在由电动化、低碳化向智能化延伸。混合动力、纯电驱动、增程和燃料电池等动力形式并存，发动机、电机、电池、功率电子、传动和热管理之间的耦合不断增强；道路坡度、交通状态、环境温度、车辆载荷和驾驶行为又持续改变系统运行条件。面对非线性、多变量和多时间尺度问题，固定规则、离线标定与单一机理模型难以覆盖全部场景。人工智能主要通过数据学习补偿复杂模型、估计难测状态并利用未来信息辅助优化决策，应用范围正由研发工具扩展至车端控制和跨域协同。

（1）动力系统智能化的架构、算力与数据基础持续完善

动力系统电子电气架构由分布式控制向域集中和中央计算发展，使分散在不同控制器的数据与计算任务能够在统一平台处理；车规微控制器（MCU）、并行计算单元及神经网络处理单元（NPU）/系统级芯片（SoC）等异构算力，为神经网络推理、复杂状态估计和优化算法提供不同层级的计算资源。高速车载通信、时间同步和车云数据闭环则用于关联研发、测试和车辆运行数据，并支持模型训练、部署与更新。

（2）AI 逐步进入动力系统研发流程

动力系统研发包含建模、构型设计、参数优化、标定和测试验证等高维搜索与反复迭代过程。物理—数据融合模型和代理模型可降低部分高保真仿真的计算成本，智能优化方法用于扩大构型与参数搜索范围，数据驱动的试验设计与标定方法可减少低价值重复试验；测试阶段还可利用 AI 生成场景、识别异常和分析数据。运行数据回流后，可进一步用于模型修正和测试场景补充。

（3）AI 从状态估计向预测与学习增强控制拓展

AI 在动力系统车端的应用首先集中于传统传感器难以直接获取或机理模型难以准确描述的状态估计、虚拟传感、健康管理和故障识别，并逐步扩展至模型补偿、参数自适应以及能量和热状态预测。利用道路、驾驶行为和历史运行数据预测未来功率需求和热负荷后，控制系统可提前调整动力源分配和热管理策略。考虑动力系统对实时性和功能安全的要求，现阶段 AI 主要用于状态估计、预测和上层策略增强，喷油、转矩、电流等快速安全关键闭环仍以确定性控制为主。

（4）优化边界向跨域和外部环境协同扩展

优化对象正由单个部件扩展至多个动力源和热管理系统，并逐步与制动、转向等车辆执行域协同。AI 可融合多域状态，预测不同控制动作对能耗、温度和车辆运动的影响；结合驾驶意图、道路坡度、交通状态、环境温度和云端信息后，动力系统还能按后续使用场景调整能量分配与运行策略。

AI 的工程价值需要以真实车辆条件下的效率、性能、安全或研发效率改善衡量。算法部署还受到车端算力、实时性、数据质量、模型泛化和功能安全约束。后文分别讨论智能化架构与算力基础、AI 赋能研发、车端感知与控制以及跨域协同优化。

5.2 动力系统智能化架构与算力基础

AI 在动力系统中的应用需要电子电气架构、车载算力、通信网络和数据闭环共同支撑。域集中与中央计算提高状态和计算资源的共享程度，异构计算满足硬实时控制与智能算法的不同计算需求，高速通信和车云数据链路则负责多源数据同步、模型训练、部署与更新。

5.2.1 域集中与中央计算架构

传统动力系统通常由发动机控制器、电机控制器、电池管理系统、变速器控制器和热管理控制器等分别完成局部控制，不同控制器之间主要通过通信网络交换状态和指令。随着混合动力、电驱和热管理系统耦合程度提高，能量管理、扭矩协调和热状态控制需要同时利用多个部件信息，分散式架构在数据共享、算力利用和跨系统功能协同方面的局限逐渐显现。动力系统控制架构因此由独立电子控制单元（ECU）逐步向动力域集中，并进一步向中央计算与边缘执行相结合的架构演进。

域集中首先将原本分散在多个控制器中的状态融合、能量管理、扭矩协调和热管理等上层功能整合至动力域控制器，共享车辆状态和计算资源；随着中央计算平台能力提高，跨动力域乃至跨车辆域的状态融合和优化决策可进一步集中执行。与此同时，电机电流控制、发动机喷油点火、电池保护及执行器驱动等高实时性、安全关键功能仍主要保留在边缘控制器，由中央或域控制器下发目标值和运行边界，形成“集中决策—边缘执行”的分层控制结构。

硬件集中也推动软件由面向独立控制器开发转向组件化和平台化。标准化接口将状态估计、能量管理、故障诊断和控制算法与具体硬件解耦，虚拟化、任务隔离和资源调度则允许不同实时等级与安全等级的软件共享计算平台。控制功能可按算力、实时性和安全需求部署在中央计算、域控制器或边缘控制器。

集中式架构扩大了单一节点的故障影响范围。中央或域控制器需要通过计算资源隔离、冗余运行和故障降级避免异常扩散；边缘控制器仍保留关键执行器保护与基础运行能力，使上层计算异常时能够维持必要控制。

5.2.2 车规异构算力与边缘 AI 部署

动力系统不同控制与智能任务对计算能力和实时性的需求差异显著。电流、转矩和安全监控等快速控制要求微秒至毫秒级确定性响应，状态估计和优化控制涉及较复杂的矩阵与迭代运算，神经网络推理则具有较高的并行计算需求。单一处理器难以同时兼顾硬实时控制与高计算量智能算法，车载计算平台因此逐步形成由实时 MCU、并行计算或 AI 加速单元以及 NPU/SoC 等组成的异构算力架构。

不同计算单元根据任务特性进行分工：实时 MCU 主要承担安全监控和高实时性控制任务，并行计算与 AI 加速单元用于矩阵运算、状态估计和优化求解，NPU 或 SoC 则为神经网络推理和复杂上层算法提供计算能力。异构架构使快速确定性控制与计算密集型 AI 任务能够在统一平台内协同运行，同时通过任务隔离、资源管理和安全监控避免复杂算法影响安全关键控制。对于 AI 输出，还可利用可信度判断、范围约束和基础策略回退等机制，在模型异常或计算失效时维持必要的确定性控制能力。

车端算力、存储、功耗和散热条件限制了 AI 模型规模。量化降低参数与计算精度，剪枝移除冗余连接，知识蒸馏则利用复杂模型训练规模更小的车端模型。温度、健康状态等慢变量可采用较低更新频率和相对复杂的模型，转矩、位置等快变量则优先保证时延和确定性。

5.2.3 高速通信与车云数据底座

AI 在动力系统中的实时应用依赖高频、同步和可追溯的数据。随着控制功能向域控制器和中央计算平台集中，电机、电池、发动机、热管理等不同系统之间的数据交互量持续增加，传统低带宽网络难以同时满足高频状态采集、模型推理和跨域信息共享需求。车载通信因此逐步形成分层高速网络：10Base-T1S 等技术用于边缘传感与执行节点接入，控制器局域网（CAN）XL 可承载更大数据帧和较高带宽通信，百兆至千兆车载以太网则承担域控制器与中央计算平台之间的大数据量传输，为动力系统状态集中处理和 AI 算法运行提供通信基础。

通信带宽提高后，不同控制器和传感器之间的时间一致性成为数据融合的重要基础。统一时钟和时间戳能够将不同采样频率、不同计算节点产生的数据对齐，使状态估计、故障诊断和模型训练获得一致的时序输入；同时，对信号定义、采样频率和数据质量进行统一管理，可提高不同车型和软件版本之间的数据可用性。对于 AI 算法，还需要关联模型输入、模型版本、置信度及执行结果，使异常判断能够还原为可分析的数据序列，从而提高模型调试、验证和持续优化能力。

车端负责实时数据采集、特征计算和低时延推理，并根据带宽与数据价值筛选上传内容；云端利用车队数据开展训练、统计分析和模型优化，再将经过验证的模型或参数部署至车辆。模型、输入数据、版本和执行结果需要保持关联，便于分析异常与评估更新效果。

模型更新还需明确适用条件，并保留训练数据、模型版本与验证结果。当新模型不满足预设运行条件或在线监测发现性能下降时，应停止更新或恢复至已验证版本。

5.2.4 动力系统智能化架构与算力基础技术应用案例

（1）英飞凌：AURIX TC4x 高性能控制平台集成实时控制与智能计算能力

动力系统电动化与控制集中，使车载控制器既要保持确定性实时控制和功能安全，又要承担复杂模型、状态估计与智能算法。英飞凌 AURIX TC4x 在实时控制核之外增加并行计算资源，并强化硬件隔离、高速通信和安全能力，以支持逆变器、电池管理、电力转换及多合一控制在统一平台部署。平台主要能力如图 5-1 所示。

AURIX TC4x 采用 TriCore 1.8 处理器，最高主频 500 MHz，可配置最多 6 个全锁步主核，并集成并行处理单元（PPU）等专用计算资源。TC4x 符合道路车辆功能安全标准 ISO 26262 的汽车安全完整性等级 D（ASIL-D）要求，硬件虚拟化支持不同软件任务和安全等级应用在同一芯片隔离运行；PCIe、车载以太网、CAN XL 及数据路由引擎用于提高集中控制后的数据交换能力。



图 5-1 英飞凌 AURIX TC4x 控制平台的主要能力

TC4x 可用于主驱逆变器、电池管理、车载电源和车辆运动控制。英飞凌的多合一演示平台利用单颗 TC4x 同时控制一个逆变器和两个 DC/DC 功率变换单元，以异构计算资源和统一总线运行多个实时关键任务，验证控制功能集中部署的可行性。

5.3 AI 赋能动力系统研发

动力系统研发涉及多物理场建模、构型设计、参数优化、标定和测试验证等多个环节，设计变量多、工况覆盖范围广，高保真仿真和台架试验又具有较高计算与试验成本。人工智能可利用仿真、试验和历史开发数据建立快速模型、辅助设计搜索、优化标定过程并生成测试场景。目前主要应用于物理—数据融合建模、智能设计优化、辅助标定与研发智能体，以及自动测试与虚实融合验证等方向。

5.3.1 物理—数据融合建模与代理模型技术

动力系统包含燃烧、电磁、电化学、传热和机械等复杂多物理过程，高保真模型能够较准确描述系统机理，但计算成本较高，难以直接用于大规模设计搜索和实时优化；纯数据模型具有较高计算效率，但在训练样本不足或超出已知工况范围时容易出现预测偏差。物理—数据融合建模通过将守恒方程、边界条件、单调关系及部件机理等先验信息引入数据模型，在保留数据学习能力的同时增强模型对物理规律的约束，提高有限样本条件下的预测能力和跨工况适应性。

物理信息神经网络（PINN）、混合机理—数据模型等技术已用于电池状态、燃油系统压力、热状态等动力系统对象建模。机理模型可描述系统主要物理关系，数据模型则用于补偿未建模动态、参数变化和复杂非线性，使模型能够在保持较高计算效率的同时改善对实际系统的描述能力。与完全依赖数据拟合相比，物理约束还可减少模型产生不符合能量守恒、状态边界等基本规律预测结果的概率。

在研发优化中，代理模型进一步利用有限数量的高保真仿真或试验样本，建立设计变量与性能指标之间的快速映射关系。神经网络、高斯过程等代理模型可替代部分高计算成本仿真，用于构型筛选、参数优化和敏感性分析，并与优化算法结合快速评估大量候选方案。对于复杂动力系统，可先利用代理模型扩大搜索范围，再对少量候选方案采用高保真多物理模型和试验复核，从而降低大规模设计探索的计算和试验成本。

物理—数据融合模型通过机理约束提高有限样本和跨工况条件下的可信度，代理模型则以较低评价成本支持大量方案搜索。两者均需由高保真模型或试验数据校核适用范围。

5.3.2 智能设计与构型—控制协同优化

传统动力系统开发通常先确定动力构型、部件容量和传动参数，再开展控制策略设计与标定。对于混合动力、电驱及复杂热管理系统，硬件参数与控制策略之间存在较强耦合，例如发动机和电机容量、传动速比、电池功率及冷却能力都会改变系统可用的运行模式和能量分配方式，后期仅通过控制优化难以弥补前期构型选择形成的性能边界。智能设计因此逐步由单一部件参数优化扩展至构型、部件参数与控制策略的协同优化。

代理模型与智能优化算法为高维设计空间搜索提供了新的技术手段。基于仿真和试验数据建立的快速代理模型，可近似描述部件容量、速比、热系统参数和控制参数与能耗、动力性、热负荷等性能指标之间的关系，并与贝叶斯优化、演化优化等方法结合，在较低计算成本下评估大量候选方案。对于离散的构型选择和连续的参数设计，还可采用分层或联合搜索方式，先筛选具有潜力的系统架构，再进一步优化关键部件与控制参数。

构型—控制协同优化还逐步由法规或单一典型工况扩展至代表性使用场景。基于实际道路和用户运行数据构建城市、高速、长坡、高低温等场景，可在硬件冻结前同步评价不同构型的能耗、动力、热状态及控制可实现性，使部件设计与后续运行策略面向相同的任务边界进行优化。对于混合动力和增程系统，这种方法能够避免硬件容量设计与能量管理策略相互割裂，使动力源配置、运行模式和控制参数形成更一致的系统方案。

大规模筛选后，候选方案仍需由高保真多物理场模型和关键试验复核，并将布置空间、制造边界、部件额定能力与法规要求纳入约束。

5.3.3 AI 辅助标定与研发智能体

动力系统标定涉及大量控制参数和运行工况，传统开发主要依赖工程师经验制定试验计划，并通过台架和实车反复迭代寻找满足性能、排放、热状态和驾驶性要求的参数组合。随着标定维度和工况数量增加，AI 开始用于试验设计、参数敏感性分析和标定参数优化，通过减少低价值重复试验提高标定效率。

AI 辅助标定通常利用历史标定数据和当前试验结果建立代理模型，并结合贝叶斯优化等方法评估不同参数组合的潜在收益和不确定性，自动推荐下一轮具有较高信息价值的试验点。对于多目标标定，可同时将油耗、排放、温度和动力性等指标及其约束纳入搜索过程，在减少试验次数的同时提高高维参数空间的探索效率。代理模型和优化结果仍需通过台架与实车试验进行验证，从而形成“试验—建模—优化—再试验”的迭代闭环。

在此基础上，大语言模型和知识检索技术进一步推动 AI 由单一标定算法向研发智能体发展。研发智能体可连接企业知识库、仿真模型、优化工具、代码仓库和试验设备，将工程师的自然语言需求解析为结构化任务，并按照预设流程调用相应工具完成资料检索、模型计算、参数优化、代码辅助生成或测试任务准备。大语言模型主要承担任务理解、知识组织和工具编排，数值优化器、仿真器及试验设备则负责产生可量化和可复现的工程结果。

研发智能体还可关联需求、模型、代码、标定数据和测试结果，使分散在文档与个人经验中的知识可检索、可复用。智能体生成的参数、代码或测试建议仍需通过规则检查、仿真、台架或实车验证，并保留模型、工具和数据版本。其作用是提高知识获取、工具调用和重复任务自动化程度，不替代物理模型、试验验证与工程决策。

5.3.4 自动测试、场景生成与虚实融合验证

动力系统智能控制需要覆盖复杂交通、极端温度、低附着、传感器退化和多故障组合等大量运行场景，仅依赖固定法规循环和有限实车里程，难以充分验证控制策略在边界工况和长尾场景下的性能。AI 可利用真实道路和车队运行数据识别典型工况与异常片段，并通过聚类、生成模型等方法形成具有代表性的测试场景，从而使验证对象由少量预设工况扩展至更丰富的场景空间。

场景生成技术可根据道路坡度、环境温度、车辆载荷、驾驶行为及故障状态等变量构建参数化场景，并进一步搜索容易引发高能耗、控制越界或状态失稳的临界工况。与随机增加测试数量相比，基于历史数据和模型反馈主动筛选高风险场景，可提高有限测试资源对边界条件和长尾风险的覆盖能力。对于动力系统，还可利用车队实际运行中的极端温度、长坡、拥堵、低附着和传感器异常等数据建立可重复使用的场景资产，并持续补充现有测试库。

生成的场景可贯穿模型在环（MiL）、软件在环（SiL）、硬件在环（HiL）及实车测试等不同验证层级。在早期开发阶段，可利用仿真快速筛查控制逻辑和参数边界；随着软件和硬件成熟度提高，再逐步进入实时仿真、台架和实车验证，使同一类场景在不同阶段持续复用。虚拟模型与实车数据之间的持续校正，还可提高仿真场景对真实车辆响应的代表性，形成由虚拟验证向实物验证逐步收敛的测试链路。

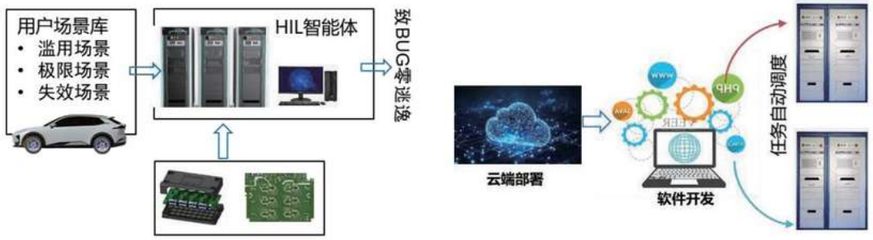
AI 还可生成测试用例、编排任务、识别异常和归纳失败原因。模型、参数、代码、场景与验证结果建立关联后，设计或软件变更可触发相应回归测试，车队中新发现的异常场景也可重新进入仿真和台架验证。

5.3.5 AI 赋能动力系统研发技术应用案例

（1）深蓝：AI 智能体辅助电驱软件开发与持续测试

深蓝汽车将 AI 智能体引入电驱软件研发流程，并与软件开发、仿真测试和硬件测试工具相结合，形成覆盖软件开发、测试验证和持续集成的自动化研发体系。AI 用于软件参数提取、标准代码生成、代码与模型缺陷识别以及测试用例自动生成，将部分重复性较高的软件开发和验证任务由人工处理转为自动执行。

该体系以云端持续集成/持续交付（CI/CD）和自动触发测试任务，将参数提取、MiL/SiL 流程以及云化 HiL 测试资源接入统一工具链；用户场景库与测试数据用于测试任务生成、冗余识别和问题定位，如图 5-2 所示。



(a) 车辆—仿真服务器—HIL 设备闭环　　(b) 智能体调用工具与测试台架

图 5-2 深蓝汽车 AI 赋能电驱软件开发与持续测试体系

结果显示，重复任务自动化率超过 60%，模型和测试用例冗余减少超过 30%，自动根因识别率超过 40%；AI 辅助代码和模型缺陷识别准确率超过 70%，自动测试用例生成准确率超过 90%，软件开发与测试整体效率提高 30%～40%。

（2）极光湾科技：全流程智能体辅助软件开发与标定研发

动力系统软件与标定研发涉及需求分析、架构设计、软件开发、测试验证以及大量试验数据处理，知识和数据分散在不同研发环节。极光湾科技围绕软件开发与标定研发构建智能体辅助开发体系，通过业务流程拆解、工程知识沉淀和研发工具连接，将 AI 逐步引入需求、代码、测试和标定等具体任务。

软件研发侧按照 V 模型各阶段配置相应智能体（图 5-3）。BaseTech 查询助手连接技术文档和问题调查报告知识库；需求与测试用例智能体生成结构化文档；底层软件开发助手连接接口检查、汽车开放系统架构（AUTOSAR）代码生成、编码规范检查、测试代码生成和覆盖度验证等工具；软件发布智能体辅助生成发布文档。

标定研发围绕输入确认、试验准备、数据采集、结果分析和输出确认等核心环节建立统一数据链路。自动化数据采集平台可自动发布试验任务、高频回传试验数据并实时识别异常，整体数据采集自动化率超过 50%；自动化结果分析工具集成 200 余项分析功能，可快速生成图表和多模态分析报告；标定数据管理系统对开发全过程数据进行关联，并利用智能体辅助识别易错数据。结合历史数据和专家经验，标定优化智能体可根据当前结果自动迭代寻找下一步标定优化方向。

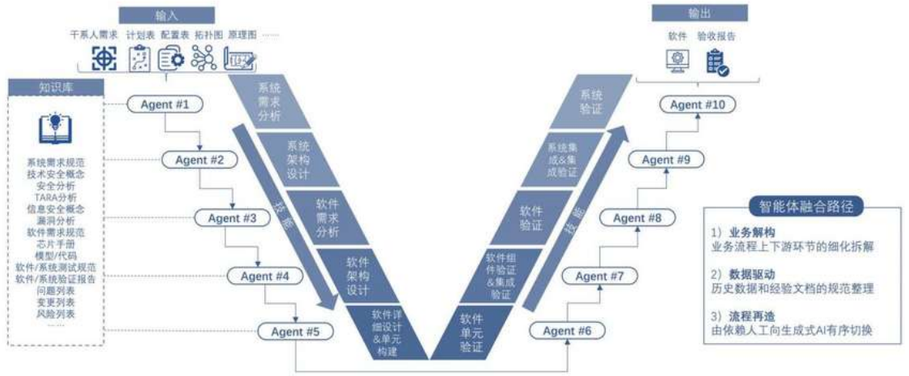


图 5-3 极光湾科技全流程研发智能体与软件开发流程

5.4 AI 赋能动力系统控制

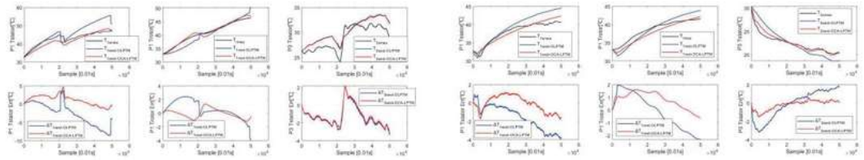
动力系统控制正由基于固定模型和规则标定，逐步向模型、数据与 AI 协同驱动发展。针对内部状态难以直接测量、模型参数随环境和老化变化以及未来工况难以提前判断等问题，AI 可用于增强状态估计、模型补偿和运行预测能力，并与传统控制方法结合，提高动力系统在复杂工况下的适应性和优化能力。考虑实时性与功能安全要求，现阶段 AI 主要应用于状态感知、模型修正、预测和上层策略优化，喷油、转矩、电流等快速安全关键闭环仍以确定性控制为主。

5.4.1 智能状态估计与健康管理技术

动力系统中存在大量难以直接测量或无法长期依赖物理传感器获取的内部状态，例如电池荷电状态与健康状态、电机转子和定子内部温度、发动机燃烧状态、燃油系统压力以及部件退化程度。传统观测器通常依赖确定的机理模型和参数，当系统受到温度变化、制造差异和老化影响时，估计精度容易下降。智能状态估计通过融合电压、电流、温度、压力、振动和历史运行数据，利用数据驱动模型或物理—数据融合模型建立可测信号与内部状态之间的映射，提高复杂工况下的状态可观测性。

虚拟传感是智能状态估计的重要应用形式。其利用已有传感器信号和系统运行数据估计难以直接布置传感器的位置或状态，可减少额外传感器配置，并获得部分无法直接实时测量的内部变量。例如，电机内部温度可利用电流、转速、转矩和冷却状态等信息进行估计，燃油系统则可结合发动机运行参数和压力动力学模型估计轨压及其动态变化。物理模型用于描述系统主要动态关系，学习模型补偿参数变化和未建模非线性，使估计结果能够更好适应实际运行状态。

基于运行数据建立的虚拟传感模型可跟踪电机定、转子温度变化，并以实车数据验证估计误差，为难以直接布置温度传感器的部位提供状态信息（图 5-4）。



(a) 动态工况温度与误差　　(b) 稳态及冷却工况温度与误差

图 5-4 电机定转子温度虚拟传感实车估计结果

在状态估计基础上，AI 进一步用于故障识别和健康状态评估。传统阈值诊断主要依据单一信号是否超限判断故障，而多源数据模型可综合温度、振动、电流谐波和历史工况识别异常模式，并利用长期运行数据判断性能退化趋势。对于电池、电机和发动机等部件，还可结合车队历史数据和单车近期运行状态估计健康状态及剩余性能变化，为功率限制、控制参数调整和维修决策提供依据。

部件老化和环境变化后，状态模型可利用近期运行数据修正参数，使 SOC、健康状态（SOH）、温度和故障风险估计适应车辆实际状态。

5.4.2 动力系统学习增强控制技术

传统动力系统控制主要基于机理模型和离线标定参数，在标定范围内具有较高确定性和实时性，但燃料性质、环境条件、部件温度和老化状态发生变化后，固定模型与实际系统之间的偏差会逐渐增大。学习增强控制利用历史和在线运行数据识别参数变化与未建模非线性，并对模型、控制参数或上层目标进行修正，使传统控制器能够更好适应宽工况和全生命周期状态变化。现阶段其主要应用集中于发动机燃烧与燃料适应控制、电驱参数补偿与全速域控制等方向。

发动机侧燃料品质、环境条件和部件老化会改变爆震边界、燃烧状态及执行器特性。爆震预测、燃料抗爆性识别和在线参数辨识可据此修正点火、喷油等控制参数；迁移学习可利用已有车型或燃料数据，减少新工况下的重新训练和标定。学习模型主要承担状态识别与模型偏差补偿，快速闭环仍由传统控制器执行。

电驱系统同样受到磁链、温度和电机参数变化影响。传统基于固定参数的电机模型在高速、高温或老化条件下容易产生转矩和位置估计偏差，学习模型可根据电流、电压、转速及温度等运行数据补偿参数漂移和模型误差。对于无位置传感控制，低速区域可利用高频注入获得转子位置信息，中高速区域采用反电动势或滑模观测，学习模型进一步补偿磁场、温度和参数变化对估计结果的影响，并辅助不同观测方法在全速域内平滑切换。

学习算法还可识别转矩波动、谐波和 NVH 误差特征，对传统控制器的目标值或补偿量进行调整。通常采用分层架构：学习层负责状态识别、参数修正或上层目标优化，执行层由经过验证的电流、转矩、喷油和点火控制器完成快速闭环，并通过输出限幅和基础策略回退约束学习模型。

5.4.3 预测性能量与热管理技术

传统能量与热管理主要依据当前动力需求、SOC 和部件温度进行调节，但这些状态具有明显的动态累积特征，当前决策会影响后续可用功率、效率和温度。预测控制利用未来功率需求与热负荷信息，提前配置能量和冷却资源。

预测性能量管理首先利用历史运行信息和未来行程特征建立短时或行程尺度的功率需求预测，并进一步预测发动机、电机和动力电池等部件的能量状态变化。控制系统在当前车辆状态基础上结合未来功率需求调整动力源运行方式和 SOC 目标。例如，在预计持续高负荷运行前预留电池功率，在可能出现较大再生制动需求前扩大 SOC 可用空间，或根据后续运行需求调整发动机与电机之间的功率承担关系，使能量状态在更长时间尺度上保持于合理区间。

热管理也由温度越界后的被动调节逐步向基于未来热负荷的预测控制发展。AI 模型可结合当前温度、功率需求、冷却系统状态及历史温升规律，预测电池、电机和功率电子等部件的温度变化趋势，并据此提前调整冷却、加热和允许功率。在持续高负荷工况到来前，可预先增强冷却或降低局部热负荷；在后续存在低温运行或充电需求时，则可提前调整部件热状态，减少温度偏离适宜工作区间后再进行补偿所带来的效率损失和功率受限（图 5-5）。

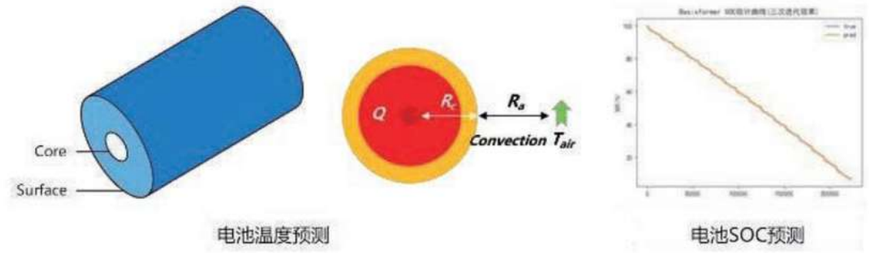


图 5-5 电池温度与 SOC 预测示意

能量状态与热状态间存在明显耦合。电池温度会影响充放电效率和可用功率，电机及功率电子的热状态决定持续输出能力，而不同动力源之间的功率分配又会进一步改变各部件热负荷。因此，预测性控制逐步由单独预测 SOC 或温度，发展为对功率需求、能量状态和热状态的联合预测，并据此协调动力分配与热管理策略。在满足当前驾驶需求的同时，系统能够提前分配电量、功率和热容量，使不同部件在后续运行过程中保持较合理的能量与热状态。

预测效果受路线变化、交通扰动、载荷和驾驶操作不确定性影响。车端通常采用滚动预测，根据最新状态持续修正未来功率和温度；当实际工况明显偏离预测时，重新规划策略，必要时回退至基于当前状态的基础控制。

5.4.4 AI 赋能动力系统控制技术应用案例

（1）极光湾科技：物理模型与 AI 融合构建动力系统虚拟传感器

动力系统中部分温度、压力等关键状态难以通过物理传感器准确或直接获取，传感器数量增加还会带来成本、可靠性和布置约束。极光湾科技将物理模型与 AI 算法结合，利用控制器已有信号建立虚拟传感器，对发动机进气、增压、排气以及动力系统关键温度状态进行实时估计，为控制和状态监测提供补充信息。

不同对象根据其物理机理和建模复杂度采用不同的模型形式。如图 5-6 所示，增压后压力通过管路及中冷器压降模型计算，增压后温度结合压气机功率平衡关系进行估计；针对进气歧管温度传感器容易受到缸内气体反流影响的问题，通过建立机舱温度和管壁传热模型修正进气温度，预测误差控制在±4 ℃以内，增压压力和温度模型误差控制在±5%以内。对于影响因素更多、非线性程度更高的排气温度，则进一步将物理模型与图神经网络（GNN）结合，在保留基本物理关系的同时利用 AI 提高复杂工况下的温度预测能力。

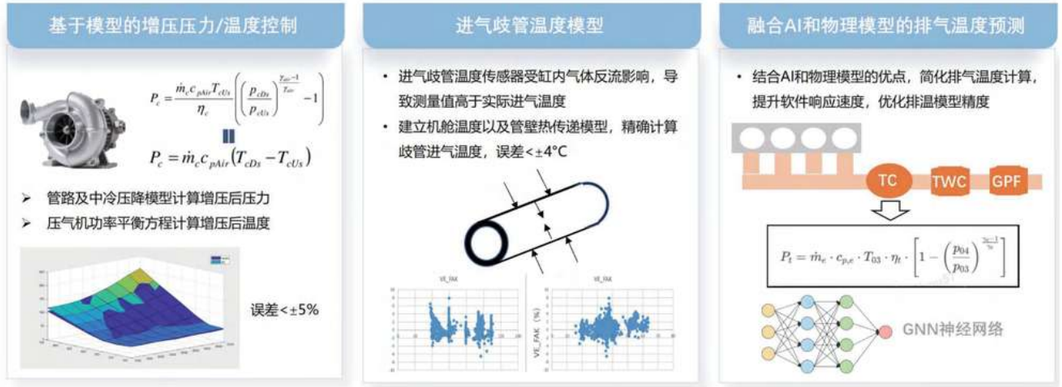


图 5-6 极光湾科技物理模型与 AI 融合虚拟传感器技术

虚拟传感还可用于难以布置温度传感器的动力系统部件，通过实测数据训练和修正模型，使内部温度随车辆运行过程更新。机理清晰的对象以物理模型为主，复杂非线性部分由 AI 补偿，以减少部分物理传感需求并提高状态估计连续性。

（2）长城：惯用路线预测支撑预测性能量管理

长城汽车将用户惯用路线预测引入混合动力能量管理，以减少预测控制对驾驶员主动输入导航信息的依赖。系统基于历史行驶数据建立惯用路线库，并综合出发时间、出发位置、路线相似度、工作日和节假日等特征，采用 K 近邻（KNN）、支持向量机（SVM）及规则算法等方法预测本次出行的目的地和行驶路线，并根据车辆实际行驶轨迹实时修正预测结果。如图 5-7 所示，路线预测结果可进一步与道路坡度、补能条件及历史行驶事件关联，为动力系统提供未来行程信息。

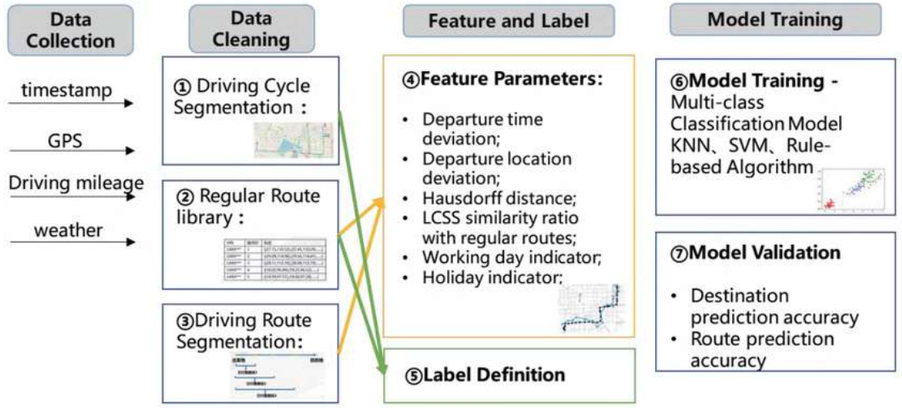


图 5-7 长城汽车惯用路线预测与实时修正方法

获得未来行程信息后，能量管理可提前规划 SOC 与热状态。预测目的地具备家庭充电条件时，可适当降低 SOC 平衡目标；面对连续长坡，提前预留电能和持续功率，并在下坡阶段扩大能量回收空间；预计高温长坡等高负荷场景时，提前调整热管理状态。

针对动态规划计算量较大、难以直接部署的问题，长城对动态规划（DP）状态空间进行剪枝，保留低代价核心状态和目标 SOC 附近的关键状态，使结果与理论最优值的性能偏差控制在 5%以内，并将算法部署至整车控制器 MCU。

5.5 AI 赋能动力系统跨域协同优化

随着动力系统智能化进一步发展，优化对象由发动机、电机、电池等单一部件和动力系统内部控制，逐步扩展至动力、底盘、热管理等多个功能域，并进一步引入驾驶者、道路、环境和云端信息。不同系统在性能、能耗、热状态和车辆稳定性等目标之间相互影响，各系统独立控制可能产生目标冲突。AI 可融合多域状态与外部场景信息，并根据整车目标协调不同系统和执行器。

5.5.1 动力—底盘—热管理跨域协同控制

传统动力、底盘和热管理系统通常围绕各自目标进行控制：动力系统关注能耗和动力输出，底盘系统关注车辆稳定与操纵性能，热管理则维持电池、电机及其他部件温度。随着车辆电动化和集中式控制发展，各系统之间的耦合更加明显。例如，轮端转矩分配会改变轮胎附着利用和再生制动能力，持续高功率输出会提高电池与电驱热负荷，而热状态变化又会限制可用驱动和回馈功率。跨域协同需要将车辆运动状态、动力能力和热状态纳入统一决策过程。

AI 可利用轮速、车辆加速度、附着状态、动力需求、电池可用功率以及电驱热裕度等多源信息，判断车辆当前状态及后续能力，并预测不同控制动作对能耗、稳定性和温度的影响。在低附着路面，需要同时协调车轮驱动转矩、再生制动与稳定控制，避免能量回收需求超过轮胎附着能力；在高温长坡等持续大负荷工

况下，则可根据未来功率需求和热状态提前调整动力输出、冷却能力和能量分配，减少温度达到限值后的突然降功率。

不同执行器的响应速度和作用范围也可用于跨域任务分配。电机能够快速调节轮端转矩，制动系统可在再生制动能力不足或稳定性需求提高时补充制动力，热管理系统通过调节冷却能力影响动力系统持续输出边界。AI 上层策略根据整车状态和未来任务确定各域目标与可用边界，再由动力、底盘和热管理控制器完成快速执行。

5.5.2 人—车—路—云信息融合与协同优化

车辆运行不仅取决于动力系统自身状态，也持续受到驾驶者需求、道路交通、环境条件和补能条件影响。随着车辆感知、通信和云端计算能力提升，动力系统可利用的信息由车内实时状态进一步扩展至驾驶行为、未来道路环境和长期运行数据，为不同使用场景下的能量、性能和热管理优化提供更完整的信息基础。

驾驶行为和出行特征能够反映不同用户及不同任务下的动力需求。系统可利用加速踏板操作、历史车速、出行规律、常用路线和补能行为等信息识别驾驶与使用特征，并在动力、安全和部件运行边界内调整动力响应、SOC 目标和热管理策略。例如，规律通勤场景可结合行程距离和目的地补能条件规划电量使用，长途或高速行驶可适当保留持续功率能力，预计后续存在快充需求时则可提前调节电池热状态，使动力系统控制更加适应实际使用任务。

道路与环境信息可提前反映后续功率需求和热负荷。导航路线、高精度地图、道路坡度、实时交通和环境温度等信息与 SOC、部件温度和可用功率共同参与决策，使车辆能在坡道、拥堵、低附着或高低温场景到来前调整动力源运行、能量储备和热管理状态，并在路线或交通条件变化后修正策略。

云端计算进一步拓展了动力系统对长期运行规律的利用能力。单车数据主要反映当前车辆和用户的运行特征，而车队长期运行数据能够覆盖更广泛的地区、季节、道路类型和使用工况。通过对大规模运行数据进行分析，可持续完善能耗、热状态和部件性能预测模型，并将更新后的模型或策略用于车辆运行优化；车端则结合本车实时状态对相关结果进行修正和执行，使云端长期数据积累与车端实时控制形成互补。

5.5.3 AI 赋能动力系统协同优化技术应用案例

以下两个案例分别体现动力—热管理跨域协同和车云协同能量管理的工程应用。

（1）联合汽车电子：基于整车能量流的动力—热管理跨域协同优化

新能源汽车的动力系统与热管理存在直接能量耦合：发动机、电机和电池决定驱动能量供给，电池加热、乘员舱空调及电驱冷却又持续改变整车能量分配。各子系统分别提出功率或冷却、加热需求时，容易形成局部最优。联合汽车电子将动力、热管理、电池和充电纳入统一能量流分析与协调框架。

联合汽车电子首先通过整车能量流测试识别不同场景下的主要能量去向。以−7 ℃低温行车场景为例，实车测试中驱动系统消耗约 57.5%的电能，压缩机约 16.6%，乘员舱和电池正温度系数加热器（PTC）约 19.8%，低压 DC/DC 系统约 6.1%。低温条件下，乘员舱和电池热管理占据较高的能量消耗比例，需要将驱动效率与热管理效率纳入整车能量分配进行联合考虑（图 5-8）。



图 5-8 联合汽车电子整车能量流测试及低温场景能量分布

联合汽车电子据此构建动力域与热管理协同寻优架构（图 5-9）。该架构从驱动、乘员舱和附件需求出发，同时考虑发动机、电机、电池及热管理系统的能力边界，并将高低温、充电和坡道等场景转化为 SOC 与电池温度约束。电能、化学能和热能的传递路径及转换效率在同一模型中描述。

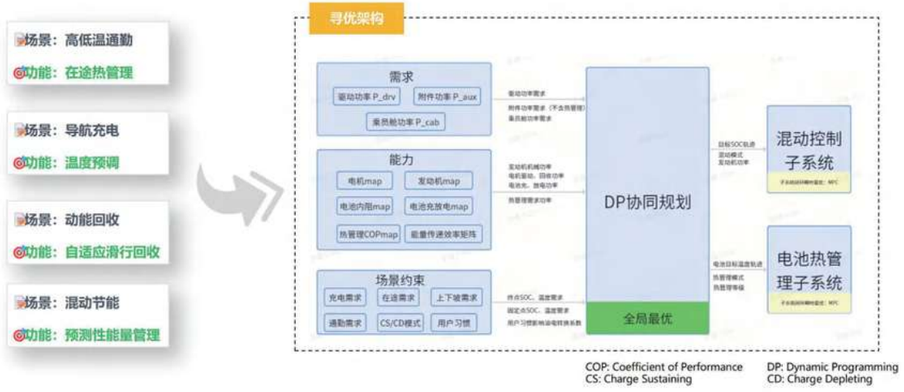


图 5-9 联合汽车电子动力域与热管理协同寻优架构

方案采用动态规划（DP）进行较长时间尺度的轨迹规划，并结合模型预测控制（MPC）滚动执行，对 SOC 目标、电池温度、混动模式和发动机功率进行联合规划。报告中的完整能量流协同优化仍处于仿真验证阶段，初步结果显示出降低整车能耗的潜力。

（2）极光湾科技：车云协同强化学习优化混动能量管理

混合动力能量管理若只利用当前动力需求、SOC 和发动机状态，难以处理后续道路与用车任务。极光湾科技在 X·System 控制平台中引入车云协同能量管理，综合导航、惯用路线、充电习惯、车辆状态、环境和补能信息，规划发动机运行与电量使用。

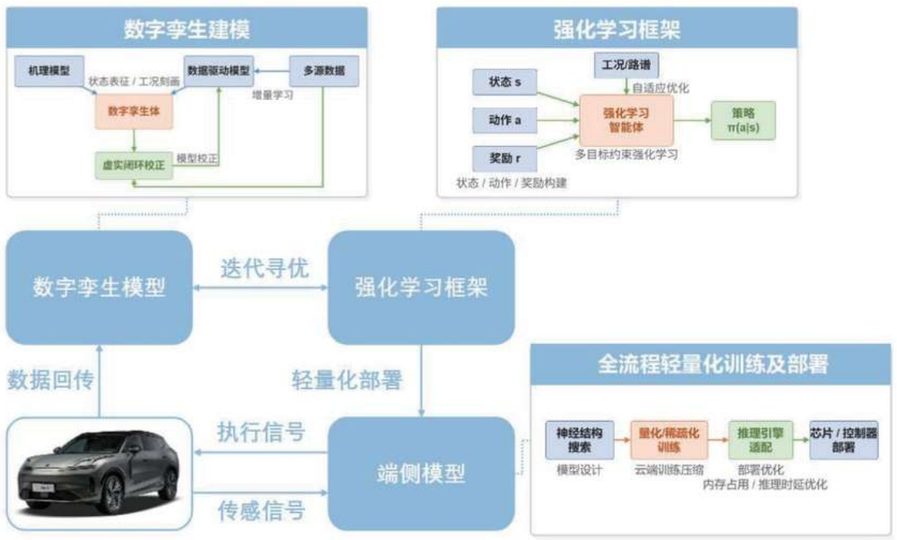


图 5-10 极光湾科技数字孪生—强化学习—端侧部署智慧能量管理技术

策略开发采用数字孪生、强化学习和端侧轻量化相结合的技术路径。如图 5-10 所示，云端首先利用实车运行数据建立数字孪生模型，模拟车辆在不同控制输入下的能耗和状态变化，并在此基础上构建强化学习环境。强化学习策略首先学习量产控制策略的运行特征，再在给定约束条件下通过持续迭代优化能量管理策略；完成训练后，根据车端控制器的算力和存储资源对模型进行轻量化处理，并部署至车端执行。

用户场景对比中，强化学习策略使发动机起停次数下降约 30%～40%，并减少高油耗区域运行；单独采用强化学习时，油耗改善约 2%～3%。加入导航等前瞻信息后，系统可按后续行程调整目标 SOC。当前采用“云端训练优化—车端实时执行”的方式，部分功能已用于量产产品的发动机起停和目标 SOC 调节，电机转矩等底层快速控制仍由原有算法完成。

5.6 AI 赋能动力系统创新实践

以下案例分别涉及车规控制器并行计算、轨压虚拟传感、增程发动机控制参数在线优化和跨燃油模型迁移，介绍各方法的技术机制、验证结果及当前工程化边界。

（1）英飞凌：PPU 并行处理单元实现智能算法与实时控制融合

虚拟传感、模型预测控制和机器学习等算法进入动力系统控制器后，需要进行大量矩阵、向量和信号处理计算，而传统车规中央处理器（CPU）主要面向顺序逻辑和确定性实时控制，直接承担高并行计算会占用较多实时控制资源；如果将复杂算法部署到独立高算力处理器，又需要增加芯片及数据交互链路。针对这一问题，英飞凌在 AURIX TC4x 中引入并行处理单元（Parallel Processing Unit，PPU），在传统 TriCore 实时控制核之外设置面向向量和并行运算的专用计算单元，使复杂模型和嵌入式 AI 算法能够直接运行于车规实时控制器内部。

PPU 由 32 位标量处理核心与 128～256 bit 单指令多数据（SIMD）向量数字信号处理器（DSP）组成，并配置独立向量存储器、集群共享存储器和流传输单元。标量核心处理控制逻辑和非规则运算，向量 DSP 集中执行矩阵、滤波、卷积及神经网络等高并行计算，TriCore 则继续承担 AUTOSAR、系统管理和安全相关任务。素材显示，PPU 计算能力最高可达到 26 GOPS（每秒十亿次运算），面向 AI 应用时相较 TriCore 可获得超过 12 倍的性能提升，可用于虚拟传感、模型预测控制以及电池 SoC、SoH 等复杂模型计算（图 5-11）。

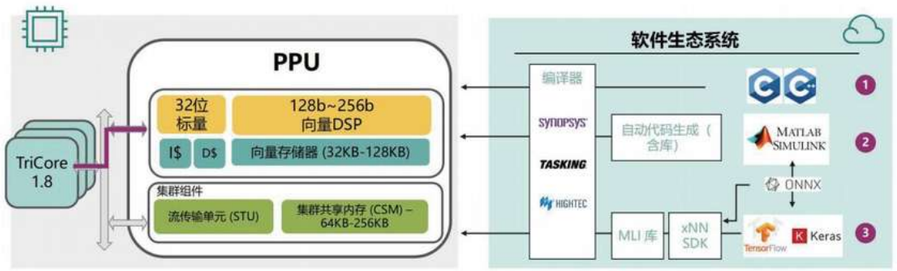


图 5-11 英飞凌 AURIX TC4x PPU 并行计算架构

PPU 通过低延迟接口与 Delta-Sigma 模数转换器（DS-ADC）、eGTM 和高分辨率脉宽调制（PWM）等实时外设连接，使传感采样、并行计算与控制输出形成较短的数据路径（图 5-12）。在逆变器应用中，TriCore 运行 AUTOSAR 和安全任务，PPU 可承担 FOC、空间矢量 PWM 和平均电流等计算，减少主核与加速单元之间的逐级数据转发。

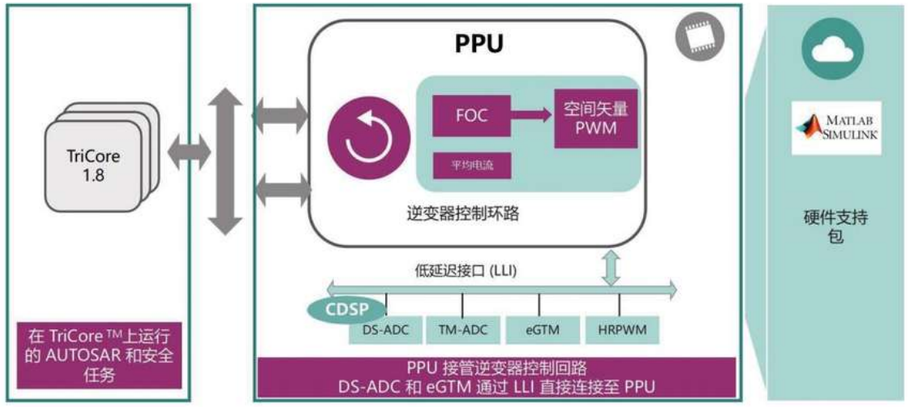


图 5-12 英飞凌 PPU 低时延逆变器控制闭环

该架构可将传统控制与智能算法部署在同一车规实时平台。电机位置、温度和健康状态估算可由 PPU 执行模型或机器学习计算，并将结果提供给逆变器控制；电池管理则可运行电化学模型、机器学习加速模型及 SOC/SOH 算法。TriCore 继续承担安全关键任务，PPU 处理适合并行计算的模型与算法。

（2）天津大学：物理信息随机配置网络实现轨压虚拟传感

共轨压力直接影响喷油精度、燃烧过程和闭环控制，而物理轨压传感器在噪声、故障或信号缺失情况下可能无法持续提供可靠反馈。传统机理模型具有较好的物理可解释性，但容易受到模型失配和参数变化影响；纯数据驱动模型虽然具有较强的非线性拟合能力，但缺少物理约束；物理信息神经网络则通常需要迭代优化，计算复杂度较高。

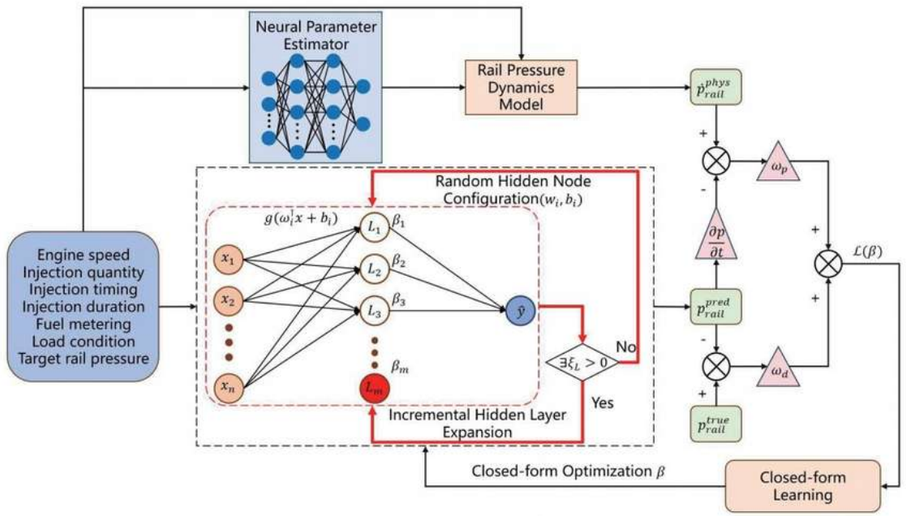


图 5-13 天津大学物理信息随机配置网络轨压虚拟传感方法

针对轨压虚拟传感同时面临预测精度、物理一致性和轻量化计算的需求，天津大学提出了物理信息随机配置网络（Physics-Informed Stochastic Configuration Network，PISCN）。PISCN 将轨压动力学模型与随机配置网络结合，并由神经网络在线辨识随工况变化的等效参数，以补偿燃油压缩性、供油与喷射过程中的模型失配（图 5-13）。数据预测误差与物理约束误差共同进入目标函数，随机配置网络逐步增加隐层节点并以闭式方法求解输出权重，避免反向传播的反复迭代。

实验中，等效参数修正物理模型的验证集决定系数 R^2为 0.89；引入 PISCN 后提高至 0.995。PISCN 采用 60 个网络节点，训练时间为 4.94 s，较无物理约束的随机配置网络（SCN）降低约 27%。

（3）上海交通大学：深度强化学习实现增程发动机控制参数在线优化

传统发动机控制通常依赖离线标定形成控制标定图（MAP），随着控制参数数量增加，标定试验和参数寻优成本快速上升；同时，零部件磨损、制造差异、老化和环境变化还会使发动机实际性能逐渐偏离初始标定状态。针对固定 MAP 难以持续适应性能变化的问题，上海交通大学提出基于深度强化学习的增程发动机控制参数在线自动优化方法，将功率需求、燃油消耗和爆震约束统一纳入控制参数寻优过程。

该方法首先建立经台架数据校核的一维发动机模型，并引入爆震预测模型描述高压缩比汽油机爆震约束。在此基础上构建 Actor-Critic 深度强化学习框架，以发动机转速、节气门开度、点火提前角、喷油结束时刻和 EGR 率等作为联合优化变量。Critic 网络根据发动机状态和控制参数预测功率、燃油消耗及爆震状态，Actor 网络则依据评价结果持续更新控制策略，使发动机在满足目标发电功率和爆震约束的条件下搜索更低燃油消耗的控制参数组合。

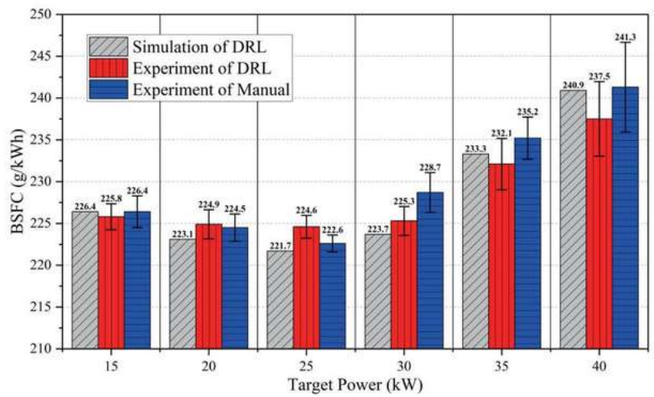


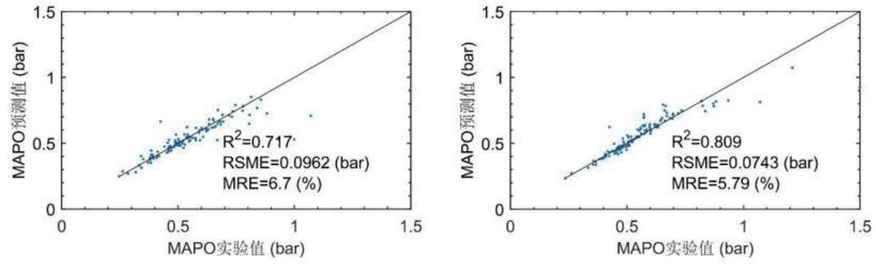
图 5-14 上海交通大学深度强化学习优化结果及台架验证

15～40 kW 目标发电功率优化结果显示，运行点主要分布在较低比油耗区域，实际输出功率能够跟随目标值。与人工标定相比，30、35 和 40 kW 工况的台架比油耗分别由 228.7、235.2 和 241.3 g/kWh 降至 225.3、232.1 和 237.5 g/kWh，优化过程同时约束爆震；不同功率点的对比结果如图 5-14 所示。

（4）清华大学：领域自适应迁移学习降低跨燃油标定数据需求

不同燃油的抗爆性变化会改变发动机爆震特性及最优控制参数，基于一种燃油完成标定的爆震预测模型直接应用于另一种燃油时，模型精度可能下降；若重新开展大规模参数扫描和标定试验，则需要投入较多台架时间和试验数据。针对燃油变化带来的模型迁移与重新标定问题，清华大学引入领域自适应神经网络（Domain-Adversarial Neural Network，DANN），利用已有燃油数据中的控制规律，并结合少量目标燃油试验数据完成模型适配。

DANN 在源燃油与目标燃油之间设置共享特征层和领域自适应层，同时约束爆震强度预测误差与两种燃油的隐层特征差异。以研究法辛烷值（RON）93.1 向 RON 98.0 燃油的数据迁移为例，隐层领域差异缩小至原来的约 1/5，最大压力振荡幅值（MAPO）预测的均方根误差较非迁移模型降低 22.8%（图 5-15）。



(a) 非迁移学习模型　　(b) DANN 模型

图 5-15 不同燃油域下非迁移学习与 DANN 模型的爆震强度预测对比

在模型迁移基础上，经验引导采样将有限试验点优先布置在对爆震边界和控制参数优化更有价值的区域。迁移学习与定向采样结合后，在相同预测误差下可减少 45.2%的试验数据需求；在相同数据量下用于控制参数优化，热效率提高 0.3%。上述结果对应指定燃油与试验条件，其他燃油组分及量产控制器上的适用性仍需验证。

5.7 AI 赋能动力系统技术趋势与关键挑战

AI 在动力系统中的应用预计将呈现分层推进特征。研发建模、数据分析、智能标定、虚拟传感、状态预测和故障识别等任务具备较明确的数据输入和评价指标，较适合率先扩大应用；涉及喷油、电流和转矩等安全关键快速闭环时，对实时性、确定性和功能安全的要求更高，短期内仍将以可验证的传统控制为基础，AI 主要用于状态估计、模型补偿和上层策略优化。

从当前应用看，物理模型、工程数据与 AI 结合更符合动力系统复杂对象的工程需求。物理模型能够提供基本约束和可解释边界，数据驱动方法则可补偿难以准确建模的非线性、参数变化和个体差异。在研发和控制过程中，AI 可用于提高模型计算、参数搜索和未来状态预测效率，但其输出仍需要通过仿真、台架和实车试验验证后进入工程流程。

规模化应用的主要约束将集中在数据、部署和验证环节。训练数据需要覆盖环境、工况、老化和故障等变化，模型还需处理车辆长期运行中的性能漂移；车端部署则受到算力、存储、功耗和实时通信条件限制。模型更新后如何重新验证适用范围、识别异常输出并在必要时安全回退，也需要纳入现有车规开发和验证体系。AI 应用效果应结合开发周期、控制效果、验证覆盖和额外计算成本进行评价。

观点来源

[1] 宋康. 动力系统智能：从自动到自主控制的范式演进与典型案例[R]. 天津大学先进内燃动力全国重点实验室，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[2] 王周钊. AI 赋能汽车动力系统设计与控制：方法、挑战与应用[R]. 长城汽车，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[3] 刘斌. 车用动力系统智能控制趋势[R]. 重庆长安汽车股份有限公司，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[4] 徐博. 新型运算与总线单元赋能动力系统数智化发展[R]. 兆易创新，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[5] 张立红. 英飞凌面向未来车辆动力系统需求的 AURIX™单片机产品路线图[R]. 英飞凌，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[6] 戴正兴. AI 赋能车用动力系统控制[R]. 极光湾科技，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[7] 周泉，张策腾飞. 车用动力系统学习型控制关键技术[R]. 同济大学汽车与能源学院，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[8] 丁锋. 新能源汽车整车能量管理的能量流分析与优化控制研究[R]. 联合汽车电子有限公司，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[9] 李雁飞. 耦合大规模数据和燃油自适应的动力总成智能控制[R]. 清华大学车辆与运载学院，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[10] 陈长庆. A Physics-Informed Stochastic Configuration Network for Engine Rail Pressure Virtual Sensing[R]. 天津大学，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[11] 唐鹏. An Intelligent Estimation Method for the Rotor and Stator Temperatures of Vehicle-Mounted PMSM Based on Adaptive Operation Conditions and Oil Pump Speed Compensation[R]. 同济大学，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[12] 魏凡翼. 新一代智能电驱软件平台演进与量产实践[R]. 深蓝汽车，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[13] 雷诺. 新能源汽车动力系统智能控制研究[R]. 清华大学车辆与运载学院，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[14] 张伟旋. Online Automatic Optimization Algorithm for Range-Extended Engine Control Based on Deep Reinforcement Learning[R]. 上海交通大学机械与动力工程学院，宁波：第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

第六章 汽车动力与低空动力协同发展

6.1 汽车动力与低空动力协同发展格局

低空飞行器正由单一用途航空装备向城市交通、物流运输、应急救援、农业作业和公共服务等多场景拓展。电动垂直起降飞行器（eVTOL）、无人机和新型通航平台扩大了动力系统的技术组合，也使汽车工业在电池、电机、电控、混合动力、氢能、智能制造和供应链管理方面的能力具备向航空领域延伸的机会。汽车动力与低空动力的协同，不是把车用部件直接装到飞行器上，而是以汽车规模化能力支撑航空级系统重新设计。

因此，低空飞行器的动力路线由任务而不是单一能源偏好决定。航空器构型、载荷、航程、起降方式、运行高度、噪声要求和场站条件共同形成任务剖面；动力系统再据此分配峰值功率、持续功率、能量、热管理和安全余度。汽车产业链的技术迁移需要围绕这一任务闭环重新评价。

这种任务导向带来的首要挑战，是飞行任务将功重比、比能量、持续功率和安全冗余同时推到更严格边界。垂直起降和悬停需要高峰值功率，巡航决定主要能量需求，复飞、备降和不利气象又要求保留安全储备；任何额外的电池、防护、冷却和冗余都会增加起飞质量，并进一步放大动力需求。与道路车辆可以减速停车不同，空中动力故障必须在有限时间内完成隔离、降级和安全着陆，因此系统可靠性和可验证性比单一效率指标更重要。

与此同时，新技术成熟度与适航、基础设施和运营经济性并不同步。高比能航空电池、混合动力、氢燃料电池、氢内燃机、可持续航空燃料和高效热机均具有潜力，但各自受到寿命、热管理、储能质量、噪声排放、地面保障和标准体系约束。样机能够飞行只说明功能可实现，距离可持续商业运营还需跨越设计保证、环境试验、批量制造、维修保障、航线网络和全生命周期成本等环节。

应对这些挑战的机会来自汽车与航空两类能力的互补。汽车工业可以提供高效率电驱、功率电子、低成本传感、软件平台、自动化制造和规模供应链；航空工业则提供功能危害分析、冗余与独立性设计、构型管理、环境符合性和持续适航方法。两者协同能够加快技术迭代并降低成本，但前提是保持航空安全目标和证据链，不以车规验证替代航空任务下的系统级符合性验证。

在此基础上，本章从协同发展格局、航空电推进与动力电池、混合动力与高效热机、氢能航空动力、适航安全与全生命周期验证、运行网络与系统经济性以及创新实践展开，重点识别不同技术路线的适用条件、工程边界和共性趋势。

（1）低空任务重塑动力系统性能边界

如表 6-1 所示，直升机、eVTOL 和无人机的飞行高度、载荷、速度和续航差异显著。多旋翼构型控制灵活、垂直起降能力强，但悬停效率与航程受限；复合翼以额外机构换取巡航效率；倾转旋翼兼顾垂直起降和高速巡航，却增加转换控制与机械复杂度。不同构型对应不同功率曲线和安全着陆方式，不能以统一电池容量或发动机功率评价。

表 6-1 低空飞行器类型、任务与主要参数分化

高度	飞行器类型	用途	续航	载重	飞行速度
1000–3000 米	直升机	应急救援等	600 km	3000 kg	70 m/s
300–1000 米	eVTOL	城市交通等	30 km	200 kg	30–40 m/s
120–300 米	无人机	快递物流用	15 km	10–20 kg	10–15 m/s
120 米以下	无人机	即时配送、城市管理等行业用	10 km	<10 kg	10–15 m/s
120 米以下	无人机	消费级	15–30 km	—	15–20 m/s

任务剖面应至少覆盖起飞、悬停、爬升、巡航、下降、着陆、复飞和备降。垂直起降阶段可能只占飞行时间的一小部分，却决定电机、逆变器和储能系统的峰值功率；巡航效率决定主要能量消耗；安全储备又必须在最不利温度、老化状态和风况下可用。动力系统设计因此需要同时考虑功率密度、能量密度、响应、效率和储备策略。

（2）系统质量形成自我放大的设计约束

动力系统质量会直接挤占有效载荷，并通过更高起飞质量增加升力和功率需求，形成质量滚增。提高电池能量虽能延长航程，但电池、结构、冷却和安全防护的同步增加可能使边际航程收益下降。混合动力和氢动力也存在类似问题：发动机、发电机、燃料电池辅助系统、储氢装置和管路的质量必须由任务收益抵消。

低空动力的核心不是追求最高单项指标，而是在质量预算内配置可用能量、持续散热和失效后的剩余能力。初始最大功率若只能短时维持，无法支撑连续爬升或复飞；电芯比能量若在包级被冷却、结构和冗余大幅抵消，对整机价值有限；效率提升若增加控制复杂度和单点故障，也可能削弱系统收益。

（3）汽车规模制造与航空安全保证形成互补

汽车产业链在电池、电驱、功率电子、传感器、通信、软件和批量制造方面具有成本与迭代优势，能够为低空动力提供成熟技术底座。整车平台化、供应商协同、自动化产线和车队数据管理也有助于提高一致性、降低开发成本并支持运行维护。

如表 6-2 所示，航空应用的失效后果、任务环境和寿命管理不同，不能直接用规模与成本替代安全保证。车规部件进入飞行系统后，需要重新确认载荷谱、温度、低气压、振动、冲击、电磁兼容、软件保证、批次追溯和故障独立性。对于飞行关键功能，还要通过系统安全评估把整机目标分配到部件，并形成可审查的分析和试验证据。

表 6-2 汽车规模供应与航空可靠性、追溯要求的差异

维度	航空工业	汽车工业	eVTOL
系统可靠性	10^{-9} 每小时	10^{-6} 每小时	10^{-9} 每小时
零件	适航验证，单件追溯	成本导向，批次追溯	/
成本	占营收 15–20%	占营收<10%	批量生产要求成本低
电机可靠性	10^{-6} 每小时	10^{-4} 每小时	/

协同发展的合理模式是分层使用能力：非安全关键或可充分冗余的部件更多吸收汽车规模制造优势，关键推进、能源和控制功能则按照航空设计保证重新开发或鉴定；整机层面再通过冗余、隔离、监测和安全着陆能力闭环。由此形成的不是“车规转航规”的简单标签转换，而是面向任务的系统再保证。

6.2 航空电推进与动力电池技术

纯电推进具有效率高、响应快、噪声低、部件少和分布式布置灵活等特点，是城市短途和高频起降场景的重要路线。其主要边界来自储能质量、循环与日历寿命、热管理、快充以及故障后的可用能量。航空电推进需要把电芯、电池包、功率电子、电机、螺旋桨和飞控作为一个能量—推力系统共同设计。

6.2.1 高比能、高功率航空动力电池

如图 6-1 所示，航空动力电池需要在高比能和高功率之间同时取得平衡。起飞与悬停要求短时高倍率，巡航要求高能量，复飞和备降要求在低荷电状态下仍保持功率。高比能电芯往往采用更高活性材料比例和更轻结构，其热稳定、功率和循环边界可能收窄；高功率设计则通过更多导电与散热结构改善响应，却增加质量。



图 6-1 航空动力电池能量、功率、寿命、安全和适航的复合约束

航空器不应只按电芯标称能量规划航程。如表 6-3 所示，包级结构、线束、接触器、冷却和防护会降低系统比能量，低温、老化、高倍率和安全储备又会减少任务可用能量。设计应采用保守且可验证的功率—能量地图，明确不同温度、荷电状态和健康状态下的持续功率、峰值功率与剩余能量。

公开样本中不同圆柱、软包和方形电芯呈现出明显的能量密度、容量、质量和温升差异。这类样本可以用于识别技术区间，但批次规模、测试温度、倍率、循环条件和安全设计不一致，不能据此直接排序供应商或推断量产系统水平。航空选型还需加入失效模式、热蔓延和一致性评价。

表 6-3 特定航空电芯样本的比能量、尺寸与系统边界

序号	类型	尺寸/mm	标称容量/Ah	重量/g	密度/(Wh/kg)
1	软包	7.8×67×104	9.8	107	320
2	圆柱	4695	36.5	425	310
3	圆柱	4695	32.7	430	280
4	圆柱	2170	5.45	68	293
5	圆柱	4695	37	433	307
6	圆柱	4670	26	295	317
7	软包	9.1×187×87	39	350	395
8	软包	130×132×8.1	40	380	410
9	软包	7.2×125×173	47	427	430
10	软包	118×13×122.5	30.5	377	293
11	软包	10.5×99.5×110	21	221	342
12	圆柱	4695	39	440	315
13	软包	10.3×74×172	25.5	295	312
14	圆柱	4695	37	400	330
15	圆柱	4695	33	415	300

面向更长航程的锂金属、固态和高硅负极电池具有潜力，但航空应用会更早暴露其寿命、外压、枝晶和安全问题。新体系进入载人飞行前，需要由材料、小电芯、大电芯、包级到整机逐级验证，并保留足够的制造和运行数据。短期内，高成熟液态锂离子电池仍将依靠材料改进、轻量化和系统优化扩大适用边界。

6.2.2 分布式电驱与功率电子

如图 6-2 所示，分布式电推进使推力单元可以沿机翼或机体灵活布置，为气动增升、控制冗余和构型创新提供空间。多个电机和螺旋桨能够通过差动推力辅助姿态控制，单个推力单元失效后也可能保留部分控制能力。但推进器数量增加会带来更多逆变器、线束、轴承、传感和软件通道，系统复杂度与共因风险同步上升。

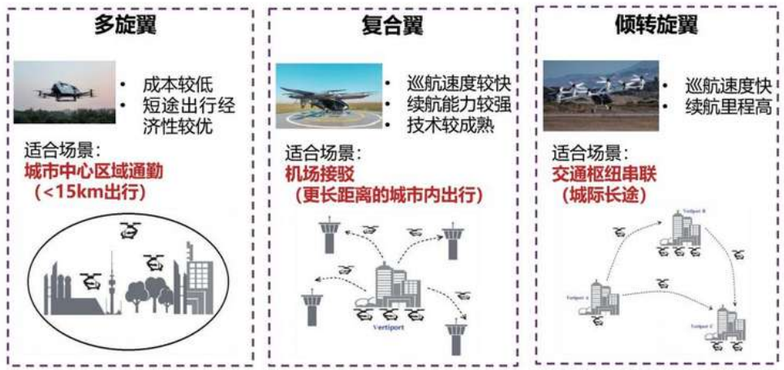


图 6-2 多旋翼、复合翼与倾转旋翼的构型及任务分层

航空电机既要高功率密度和高效率，也要在持续爬升、高温、低气压和故障状态下保持热裕度。绕组绝缘、永磁体退磁、轴承寿命、转子完整性和冷却介质泄漏都可能成为限制因素。逆变器则需要在高开关频率、高电压和轻量化之间权衡，宽禁带器件可以降低损耗，但封装、局部放电、电磁兼容和短路保护要求更高。

电推进系统设计应从螺旋桨所需推力反向分配电机转矩与转速，再确定逆变器、电压平台和电池功率。若只优化电机峰值效率，可能忽略螺旋桨、线束和功率电子在任务剖面中的损失。推进器、电机与控制律的联合设计还需考虑噪声、振动和失效后的气动影响。

6.2.3 地空差异化热管理与智能电池管理系统（BMS）

如图 6-3 所示，eVTOL 热管理具有明显的地空差异。地面快充和高温等待时，飞行器可使用场站冷源或大功率外接设备；起飞和悬停阶段热流密度高，但携带过大的冷却系统会持续增加飞行质量；巡航阶段迎风条件改善，散热能力又可能明显提高。合理方案是在地面强化换热、空中轻量化散热和任务前预调温之间分配能力。

相比于汽车动力电池，eVTOL电池包：

① 电芯多为圆柱或软包，极少用方壳(CATL)；
② 系统集成要求多包并联冗余，安全备份；
③ 热安全防护要求2个相邻电芯热失控出发不蔓延，其他包可使飞机正常降落；
④ 热管理分机上(自然冷却)和机下(风冷/水冷)；
⑤ BMS要满足DO-254和DO-178设计标准，比汽车更可靠和简单；
⑥ ……

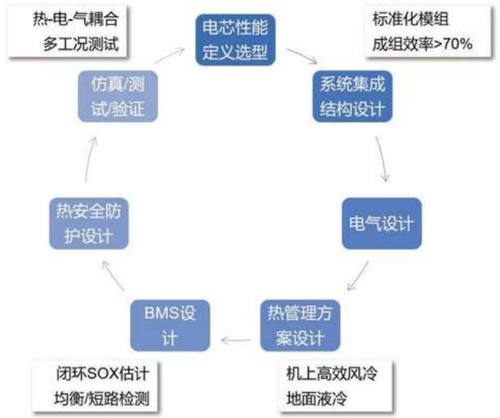


图 6-3 航空电池热管理、BMS、结构和系统验证的协同关系

航空 BMS 除荷电状态、健康状态和功率状态外，还要给出任务剩余能量、复飞功率和安全着陆余度。算法应结合电芯温度、老化、倍率和单体离散性，在不确定度较高时采用保守边界。多个电池包并联或分区供电时，还要实现故障包快速隔离、剩余功率重分配和飞控告警联动。

快充策略需要与日运行架次和寿命成本共同优化。提高充电功率可以缩短地面周转，却会增加温升、析锂和电网容量需求；过度保守则降低飞行器利用率。地面外接冷却、分段充电、换电和任务化荷电状态管理可以缓解矛盾，但每种方案都增加场站、库存或接口要求。

6.2.4 载人 eVTOL 电池系统应用案例

如表 6-4 所示，载人 eVTOL 电池系统通常采用多包或多支路设计，以避免单一故障导致全部推力丧失。电气上需要独立接触器、熔断与绝缘监测，热设计上需要限制相邻单体和相邻包传播，结构上要承受振动、冲击和坠撞载荷。冗余只有在热、电、结构和软件故障之间保持足够独立时才有效。

表 6-4 载人 eVTOL 电池在能量、功率、快充、寿命和可靠性方面的典型要求

主要指标	电芯目标要求	电池系统目标要求
能量密度	≥400 Wh/kg	≥300 Wh/kg
功率密度	≥2000 W/kg	≥1600 W/kg
充放电倍率	持续放电≥5C；峰值放电≥8C；快充＜1h	持续放电≥5C；峰值放电≥8C；快充＜1h
循环寿命	≥2000 次（理想）	≥1500 次（理想）
温度适应性	-30–55℃稳定运行；-20℃容量保持≥80%	-30–55℃稳定运行；-20℃容量保持≥80%
安全可靠性	灾难级故障率载人≤10^{-9}/飞行小时；无人≤10^{-7}/飞行小时	满足 RTCA DO-311A 等标准及坠撞安全要求

样机阶段常以高比能电芯和包级轻量化验证航程，但商业运营更关注循环、快充、安全和可维护性。如表 6-5 所示，若每天执行多架次任务，电池寿命、换包时间、健康评估和备件库存会直接影响成本。设计中应预留可检修接口和一致性诊断，避免高集成导致异常包无法快速定位或更换。

表 6-5 航空动力电池单体、模组与系统试验的标准和方法框架

序号	标准号	发布时间	标准名称	适用层级	备注
1	GB/T 31486	2024	电动汽车用动力蓄电池电性能要求及试验方法	电池单体 Cell	
2	GB 38031	2025	电动汽车用动力蓄电池安全要求	电池单体 Cell/电池模组 Battery	
3	GB/T 31467	2023	电动汽车用锂离子动力电池包和系统电性能试验方法	电池模组 Battery	
4	RTCA DO-311A	2017	可充电锂电池和电池系统的最低运行性能标准	电池模组 Battery	
5	CTSO 草案	/	航空动力锂电池和电池系统	电池单体 Cell/电池模组 Battery	未发布
6	RTCA DO-160G	2010	机载设备环境条件和试验程序	电池模组 Battery	
7	MOC VTOL.2325(a)(4)	2024	防火-储能系统适坠性	电池模组 Battery	

相关标准可为电芯、模组、环境和系统验证提供方法参考，但具体适用版本、审定基础和符合性方法应由航空器类别、功能危害和主管要求确定。汽车电池测试能够提供材料和部件数据，不能替代航空系统级的低气压、振动、故障注入、坠撞和安全着陆验证。

6.3 混合动力与高效热机技术

当纯电储能质量难以满足航程、载荷或持续功率要求时，混合动力可利用液体燃料的高质量能量密度扩展任务边界，保留电推进的布局与响应优势。其主要代价是系统部件增加、能量转换链复杂、噪声排放和适航工作量上升。混动价值必须以整机净质量、任务油耗和安全收益证明，而不是简单叠加发动机与电池。

6.3.1 串联、并联与分布式混合动力架构

如图 6-4 所示，串联混合动力由发动机带动发电机，电能经直流母线供给多个推进电机，发动机可在较稳定高效区工作，且便于分布式推进。其代价是机械能经过发电和电驱两次转换，发电机、逆变器和电机形成额外质量与损耗。并联或机械耦合方案可以减少部分能量转换，但轴系、传动和构型布局更加复杂。

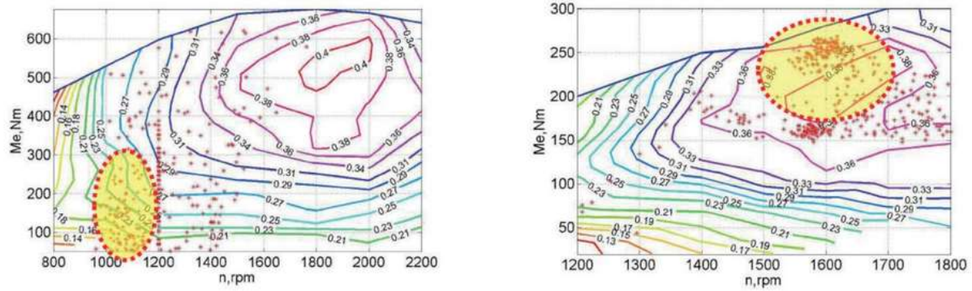


图 6-4 串联混合动力发动机高效区与电驱工作区匹配

架构选择取决于任务功率曲线。电池可以承担垂直起降和瞬态功率，发动机在巡航和充电阶段提供平均功率；也可以由发动机覆盖持续功率，电池仅用于峰值削减和故障备份。若发动机额定功率过小，长时间爬升或不利风况会耗尽电池；若额定功率过大，质量和低负荷效率又会削弱收益。

混动系统还要明确发动机失效、发电机失效、母线故障和电池故障后的剩余能力。双发电通道、多母线或分区供电可以提高容错，但也会增加质量。安全架构应与构型的滑翔、旋翼自转或动力着陆能力联合分析，不能只看部件冗余数量。

6.3.2 飞行器—推进—能源综合设计与控制

传统串行开发先确定飞行器和动力，再分别优化部件，容易在后期发现质量或能量不闭合。如图 6-5 所示，综合设计方法把飞行器构型、任务剖面、发动机、发电机、电池、电机和螺旋桨置于同一模型，围绕起飞质量、能耗、噪声、可靠性和成本联合优化。其关键是模型精度与计算效率的平衡。

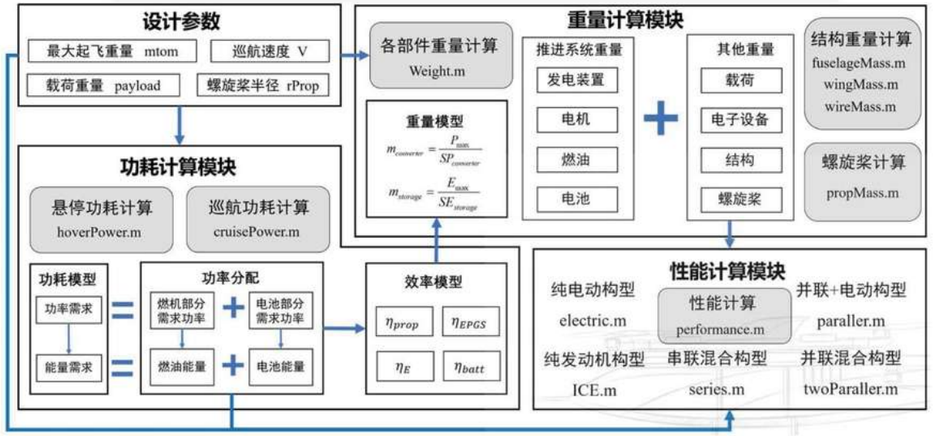
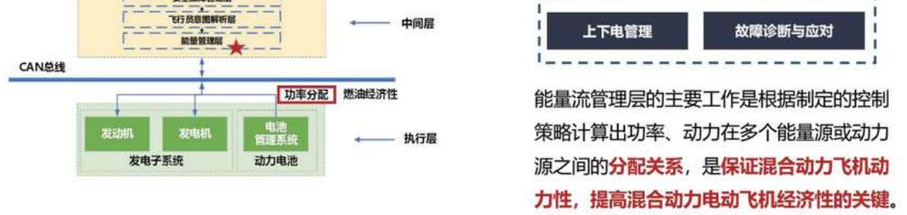


图 6-5 飞行器与混合动力系统性能、质量和功耗联合设计框架

如图 6-6 所示，能量管理需要在飞行阶段、部件效率和安全储备之间动态分配功率。规则控制易于验证，可按起飞、巡航和着陆设置确定策略；等效燃料最小化、模型预测或优化控制能够适应更多状态，但需可靠模型、实时计算和可解释约束。航空应用更强调控制在传感异常、通信故障和模型偏差下仍保持安全。



能量流管理层的主要工作是根据制定的控制策略计算出功率、动力在多个能量源或动力源之间的**分配关系**，是**保证混合动力飞机动力性，提高混合动力电动飞机经济性的关键**。

图 6-6 发动机、电池、飞行任务与故障诊断协同的能量管理单元（案例：追梦空天）

飞控与能量管理之间应交换推力需求、剩余能量、故障状态和着陆余度。若飞控只发出瞬时功率指令，能源系统可能在任务后段失去安全储备；若能源管理过度限制功率，又可能影响姿态控制。联合控制需要明确优先级：飞行安全优先，随后在可行域内优化能耗和寿命。

6.3.3 高效热机、可持续航空燃料（SAF）与高空增压

活塞发动机、转子发动机和小型燃气涡轮可作为直接推进或混动能量源。活塞发动机低中功率效率较高、供应链成熟，但振动和功重比需要优化；转子发动机结构紧凑、功率密度较高，密封、油耗和排放是主要挑战；燃气涡轮持续功率与燃料适应性较好，在小功率下效率和成本压力较大。

如表 6-6 所示，可持续航空燃料可在较少改变现有热机和储运体系的条件下降低全生命周期碳排放潜力。其原料包括废油脂、生物质和合成燃料路径，不同路线在产量、土地、水、氢源和碳源方面差异明显。SAF 的减排效果应基于全生命周期核算，燃料组成、材料相容、密封、燃烧和排放还需按照适用规范验证。

表 6-6 可持续航空燃料原料路线与既有动力系统衔接

SAF 种类	原料
费托合成石蜡煤油（FT-SPK）	固体废物、农业和森林废物、能源作物等
加氢酯和脂肪酸合成石蜡煤油（HEFA-SPK）	动植物脂肪、油和油脂
加氢发酵糖合成异构烷烃（HFS-SIP）	糖类
醇喷合成石蜡煤油（ATJ-SPK）	淀粉、糖、纤维素等生物质
加氢碳氢化合物、酯和脂肪酸合成石蜡煤油（HHC-SPK）	生物来源的碳氢化合物、脂肪酸酯和游离脂肪酸等
催化水热合成煤油（CH-SK）	动植物脂肪、油和油脂
可再生原料与原油中间馏分的共加工	可再生脂类（植物和动物脂肪）

飞行高度增加后，空气密度下降会降低发动机进气质量流量和散热能力。涡轮增压或机械增压可恢复功率，但压气机喘振、涡轮超速、排温、级间匹配和瞬态响应需要在宽高度范围内控制。多级增压可以扩展工作域，却增加转子、阀门和控制复杂度，设计制造一体化和高空环境试验十分关键。

6.3.4 高空环境与热机应用案例

多级增压系统实践表明，高空动力的核心不只是稳态增压比，还包括快速响应、转子稳定、热机械耐久和制造偏差。低惯量转子有利于瞬态，却提高应力和轴承要求；多级系统扩大压比范围，但级间阀门、控制逻辑和热管理会形成新的故障点。



图 6-7 航空发动机高空环境、增压部件与长时试验验证（案例：北京航空航天大学）

如图 6-7 所示，高空模拟台架可在可控压力、温度和流量条件下验证功率恢复、排温、增压器转速和控制稳定性。试验数据应覆盖稳态、加减速、阀门切换、极限工况和耐久，并与气—热—固耦合模型相互校准。单次达到目标高度或功率，不能替代全工作域和寿命验证。

混动热机进入低空飞行器后，还需验证螺旋桨负载突变、发电机电磁扰动、机体姿态变化和冷却气流差异。发动机、发电机与储能共同承担推力时，任何控制延迟都可能转换为母线电压或推力波动，因此系统级动态试验比传统定点性能测试更重要。

6.4 氢能航空动力技术

氢的质量低位热值较高，使用阶段可以避免二氧化碳排放，为中长航程和低碳航空提供潜在路线。氢燃料电池适合高效率电推进，氢内燃机和氢涡轮适合较高持续功率；但氢的体积能量密度低，储存、供给、泄漏和热管理会显著影响整机质量与安全。氢能价值必须从能源制取、储运、机载系统和运行基础设施全链条评价。

6.4.1 航空燃料电池与辅助系统功重比

如图 6-8 所示，质子交换膜燃料电池可连续输出电能，效率较高、噪声低，适合与电池组成混合电源。电池承担起飞和瞬态功率，燃料电池提供巡航平均功率，可以减少纯电储能质量并改善任务弹性。系统收益取决于电堆、空压机、氢循环、加湿、冷却、DC/DC 和储氢装置的总质量，而非电堆功率密度单项。

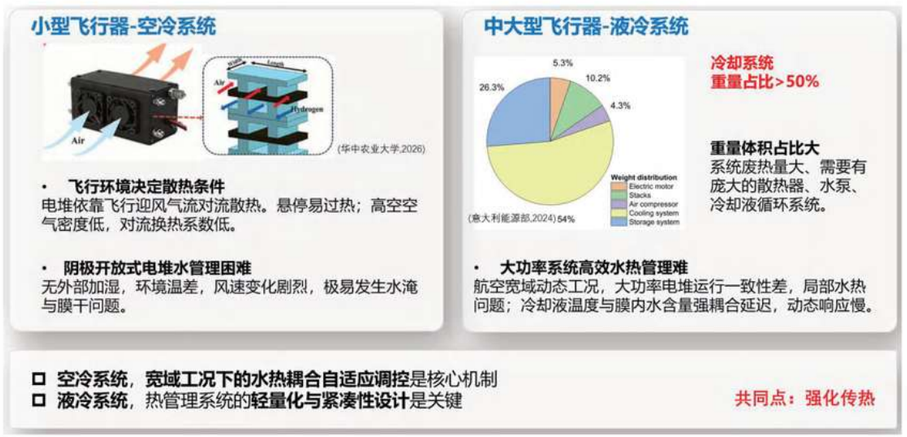


图 6-8 小型空冷与中大型液冷燃料电池系统的热管理差异

航空低气压会降低阴极氧分压，空压机功耗和尺寸上升；高电流密度下的水生成、膜含水和冷却需求又相互耦合。空冷方案结构简单，但持续功率和高温能力受限；液冷方案散热能力强，却增加泵、冷板和换热器质量。高温质子交换膜、薄型金属双极板、低铂催化和能量回收压气系统是提高系统功重比的重要方向。

燃料电池衰减与飞行任务的快速变载存在矛盾。频繁启停、高低电位循环和湿度波动会加速老化，合理的电池缓冲与能量管理可使电堆在较平稳区域运行。设计时应同时优化氢耗、耐久、热管理和故障后的剩余电能，避免只以额定效率评价。

6.4.2 氢内燃机与氢涡轮燃烧控制

氢内燃机能够利用部分成熟热机制造基础，并通过稀薄燃烧实现较低碳运行。氢点火能量低、火焰速度快、可燃范围宽，容易发生回火、早燃和异常燃烧。如图 6-9 所示，进气道喷射结构相对简单，但会占据进气体积并增加回火风险；缸内直喷可以减少进气置换、提高功率密度，却对喷嘴流量、耐久和密封提出更高要求。

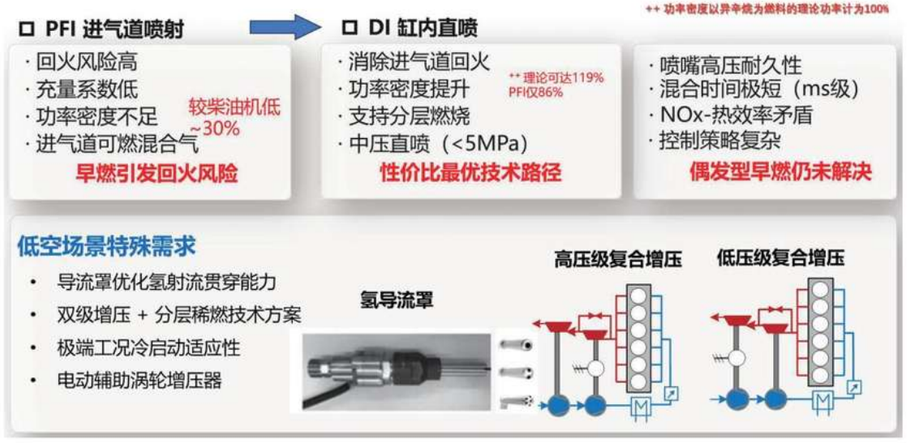


图 6-9 氢进气道喷射、缸内直喷及异常燃烧约束

氢燃烧不产生碳基二氧化碳，但高温条件下仍可能形成氮氧化物，需要通过稀薄燃烧、EGR、喷水、点火控制或后处理降低。润滑油消耗和少量碳氢排放也不能忽略。航空发动机还要在高度、温度和压力快速变化下保持稳定燃烧，并验证熄火、再点火和供氢波动。

氢燃气涡轮适合较大持续功率，但火焰速度、回火和高温部件热负荷同样突出。微混燃烧、多点喷注和稀释策略可降低局部高温，燃烧室与压气机、涡轮的匹配则决定整机效率和稳定裕度。氢涡轮的成熟度不仅取决于燃烧器，还取决于储氢、阀门、管路和热管理系统。

6.4.3 机载储氢、供氢与综合热管理

如图 6-10 所示，高压气氢系统温度范围较宽、加注技术相对成熟，但储罐质量和体积限制明显；液氢可提高体积储氢密度，却需要低温绝热、蒸发气管理和复杂地面保障；低温高压等组合路线试图平衡两者，系统复杂度进一步增加。储氢路线应根据航程、机体空间、周转时间和场站能力选择。

储罐、阀门、调压器、管路和接头必须考虑氢渗透、材料相容、疲劳与泄漏。机体内布置需要保证通风、泄漏探测、紧急切断和排放路径，避免氢在封闭空间积聚。液氢系统还要管理加注、停场和飞行过程中的热漏与蒸发气，长时间停放可能改变可用燃料和安全状态。

综合热管理可利用液氢冷能冷却电机、功率电子或进气，也可以用燃料电池余热维持储氢和座舱需求，但跨系统换热增加控制和隔离难度。冷能利用不能造成材料脆化、结霜或局部过冷，余热利用也必须保持安全系统独立性。热集成收益应通过整机质量与能耗闭合验证。



图 6-10 高压气氢、低温液氢与低温高压储氢的性能和系统边界

6.4.4 氢动力高空试验平台应用案例

如图 6-11 所示，氢动力试验平台需要同时覆盖气源、供氢、排气、冷却、测量和安防。高空模拟还要控制进排气压力、温度和流量，使被试发动机或燃料电池经历与目标高度一致的边界。氢气与旋转抽气设备直接接触会带来风险，采用引射或隔离方案可以降低部分设备接触，但仍需验证通风和紧急处置。

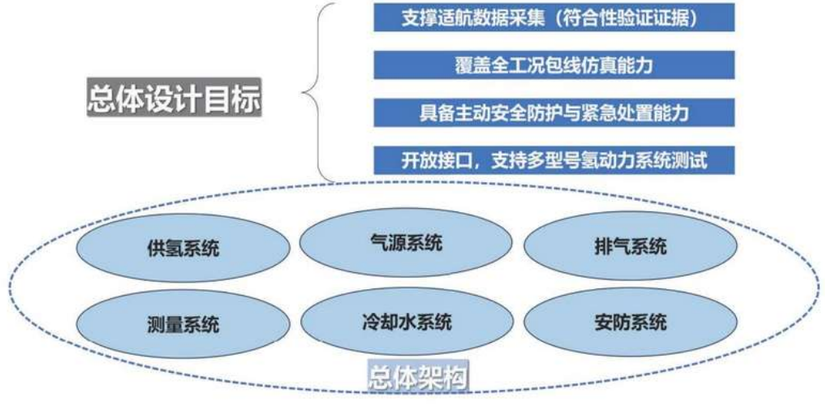


图 6-11 支撑适航数据采集的氢动力高空试验台架架构

台架不仅用于测量额定功率和氢耗，还要进行冷起动、快速变载、供氢波动、泄漏、故障注入和耐久试验。试验构型、传感器标定、软件版本和环境条件应全程可追溯，数据能够回到系统安全分析和符合性验证。对尚无成熟专用标准的氢动力，结构化试验数据也是形成专用条件和行业方法的重要基础。

氢动力进入商业运行还需要场站加注、运输、消防和人员培训。地面基础设施的压力等级、流量、储量和安全区会限制周转效率，机载技术最优不一定等于网络最优。示范项目应同步验证飞行器和补能系统，避免形成孤立样机。

6.5 适航安全与全生命周期验证

低空动力是安全关键系统，适航不是研制末端的行政检查，而是从概念设计开始建立安全目标、设计保证和符合性证据的工程过程。动力路线越新、分布式程度越高，越需要把分析、试验、制造与运行数据连续关联，证明产品在预期环境和失效条件下保持可接受安全水平。

6.5.1 从功能危害分析到系统安全目标

如图 6-12 所示，概念阶段通过功能危险性评估识别动力丧失、非指令推力、推力不对称、能源火灾和错误状态指示等后果，并按严重程度确定安全目标。随后通过故障树分析追溯顶层事件的故障组合，通过失效模式与影响分析逐项检查部件失效及其影响，再把整机目标分配到能源、推进、飞控、结构和人机界面。

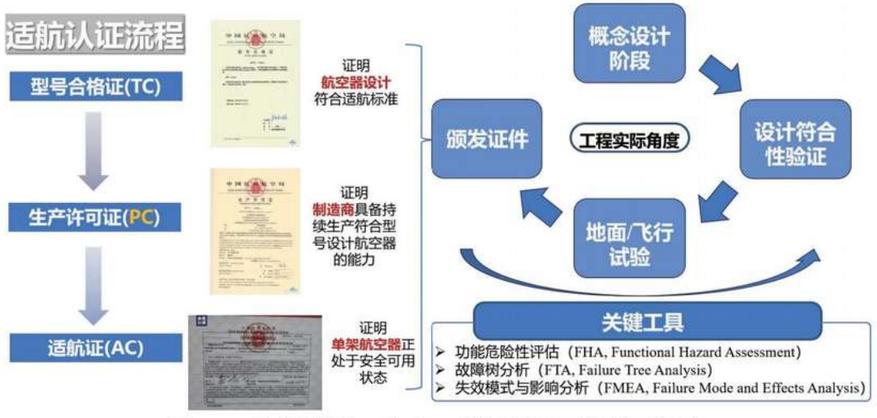


图 6-12 从型号设计、生产一致性到单机适航的证据链

安全目标不能仅以部件可靠度数字表达。系统还需证明故障检测、隔离、独立性、共因分析和人员处置时间满足要求。灾难性失效概率量级可用于说明航空安全的严格程度，但具体目标取决于航空器类别、功能危害等级和审定基础，不能机械套用于全部低空飞行器和零部件。

适航流程中的型号合格、生产一致性和单机状态相互衔接。设计符合并不自动证明每一架产品一致，批量制造需要受控工艺、供应商追溯和放行检验；单机适航也不是终点，运行中的故障、维修和改装必须持续反馈到构型与安全评估。

6.5.2 冗余、故障隔离与安全着陆能力

分布式推进为冗余设计提供空间，但推进器数量增加不等于可靠性单调提高。更多电机、逆变器和线束会增加故障点、质量和维护成本，且共同冷却、供电、软件或结构可能形成共因失效。如图 6-13 所示，合理冗余需要在单部件可靠度、失效覆盖、剩余控制力和全生命周期成本之间优化。

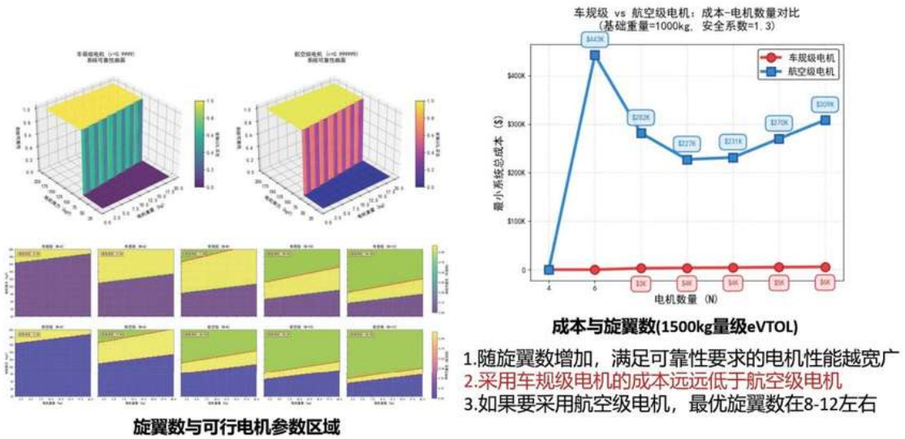


图 6-13 特定 eVTOL 模型下旋翼数量、部件可靠性与成本的联合权衡

故障发生后，系统需要及时判断失效推力单元，防止错误隔离健康通道，并重新分配剩余推力。多旋翼、复合翼和倾转构型的剩余控制能力不同，安全着陆策略也不同。验证应覆盖最不利质量重心、风况、飞行阶段和连续故障，不能只在理想悬停条件下证明单电机失效可控。

能源冗余同样需要防止跨包传播。多个电池包若位于同一热区、共用接触器控制或受同一碰撞载荷影响，可能同时失效。分区布置、独立热屏障、单向故障隔离和多母线架构应与飞控降级策略共同设计，使剩余系统能够支撑安全着陆而不是继续完整任务。

6.5.3 电池和氢动力的专门安全要求

如图 6-14 所示，航空动力电池需要覆盖过充、过放、内部短路、热失控、热蔓延、振动、冲击、低气压、温度循环、电磁环境和坠撞等风险。电芯、模组和系统试验承担不同目的：电芯试验识别材料和单体边界，模组试验验证传播与结构，系统试验则证明隔离、告警和整机接口。只通过单体滥用测试不足以证明整机安全。

氢动力增加泄漏、扩散、燃爆、低温绝热、材料相容和蒸发气等风险。传感器、通风和紧急切断需要保持独立，排放位置要考虑飞行气流和点火源。液氢系统还应验证低温材料、密封、结霜和停场热漏；氢内燃机与涡轮需要补充回火、早燃和燃烧室失效分析。

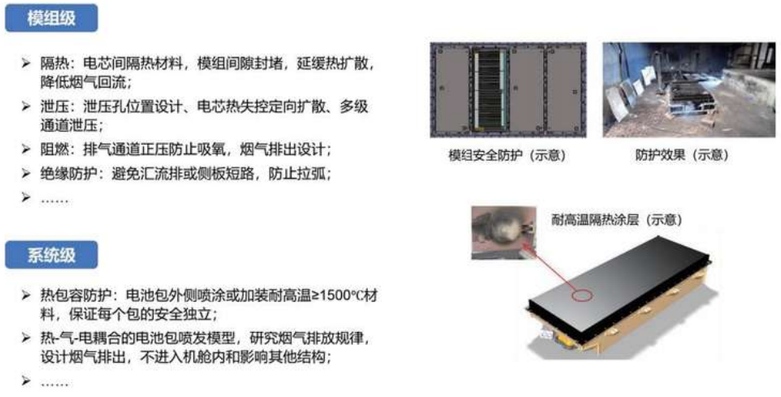


图 6-14 航空动力电池模组与系统级热包容、防护和隔离设计

电池和氢系统需把地面保障纳入安全边界。充电、换电或加氢期间，人员密集、设备连接和高能量传输可能形成不同于飞行中的风险。场站接口、操作联锁、消防、故障隔离和数据记录应与机载系统共同验证。

6.5.4 积木式试验与持续适航证据链

如图 6-15 所示，新型动力系统宜采用材料—部件—子系统—系统—地面整机—飞行试验的积木式验证。低层级试验便于扩大故障覆盖和定位机理，高层级试验证明接口与整机效应。仿真可扩展工况，但模型需要由试验校准，明确输入范围、不确定度和失效时的保守性。

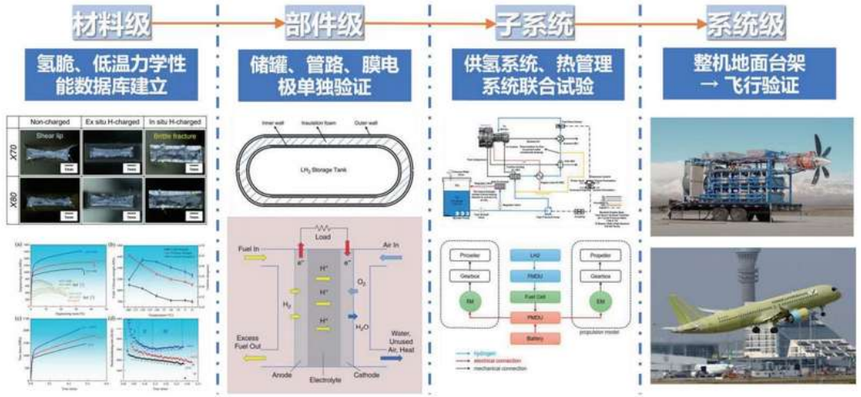


图 6-15 氢脆材料、储供氢、系统热管理到整机飞行的分层验证体系

证据链应把需求、分析、设计、软件、试验、制造状态和运行数据关联起来。每项安全要求都需要明确验证方法、判据、责任人和构型；试验数据应保留原始记录、标定和偏差处置。对于软件更新、供应商变更和维修替换，还要评估是否影响已批准证据。

投入运行后，故障率、性能衰退、维修发现和环境数据可以修正模型与检查间隔，形成持续适航闭环。数据闭环不意味着通过统计替代安全设计，而是用真实运行验证假设、识别未知失效并及时采取服务通告、软件更新或部件改进。

6.6 运行网络与系统经济性

低空动力的商业价值最终由有效载荷、可用率、任务完成率和单位服务成本体现。单机航程最长或峰值效率最高，并不代表在真实航线网络中最经济。动力系统、飞行器、场站、能源和调度之间存在强耦合，需要在相同安全目标和任务假设下比较不同路线。

6.6.1 任务剖面、航线高度与能源配置

起飞和悬停决定峰值功率，巡航决定主要能量，复飞与备降决定安全储备。若按极端最长任务配置全部电池，日常航班会长期携带多余质量；若按平均任务配置，又可能在风况、绕飞或老化状态下缺少余度。模块化储能、任务化装载和混动功率分配可以提高适配性，但会增加运行计划和构型控制要求。

如表 6-7 所示，飞行高度影响爬升、巡航和下降的能耗占比，飞行速度则与气动效率和航程共同变化。最低能耗轨迹未必满足建筑净空、空域、噪声和安全要求，动力优化需要与航线约束同步。特定模型中的最优高度和速度不能外推到其他构型，但可说明任务参数对能源配置具有一阶影响。

表 6-7 特定网络算例中直飞、中转、能耗与周转差异

指标	数值
最终盈利	10,775,567
车队规模	10,796
总服务人数（人）	702,687
站点数目	168
调度班次（班）	3187

指标	直达	中转
平均飞行时间（min）	10.7	15.1
平均全程时间（min）	17.8	20.8
服务人数	361,360	341,326
平均高度（m）	222.61	218.5
平均距离（km）	17.89	28.69
最大功率（kW）	843	841
最小功率（kW）	287	290
平均功率（kW）	445	760
平均能耗（kW·h/km）	4.14	6.41
平均飞行速度（km/h）	96.72	114

直飞减少起降次数和中转时间，中转可以集中客流、提高网络覆盖，却增加起降能耗和调度复杂度。站点布局、飞行器航程和动力路线应联合规划，避免单机最优与网络最优冲突。

6.6.2 补能体系、周转效率与年利用率

纯电路线可选择慢充、快充或换电。快充减少停场时间，但提高电池温升、衰减和电网容量需求；换电缩短周转，却要求包体接口标准化、库存、搬运和状态一致性管理。氢能和液体燃料补给时间较短，但设施投资、安全区和供应链要求更高。如图 6-16 所示，场站方案应由日架次、能源价格、土地和消防条件共同决定。

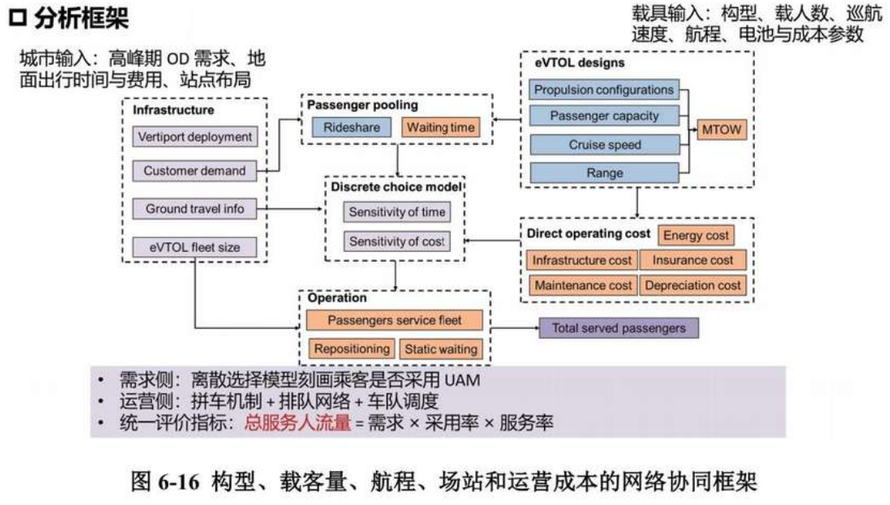


图 6-16 构型、载客量、航程、场站和运营成本的网络协同框架

如图 6-17 所示，年利用率是摊薄购置、适航和基础设施成本的关键。天气、空域、维修、充电排队和需求波动都会减少可飞时间；提高设备冗余和备件可以改善签派可靠度，也会增加资本占用。动力系统评价应加入平均无故障时间、维修工时、能源补给时间和非计划停场，而非仅比较能源单价。

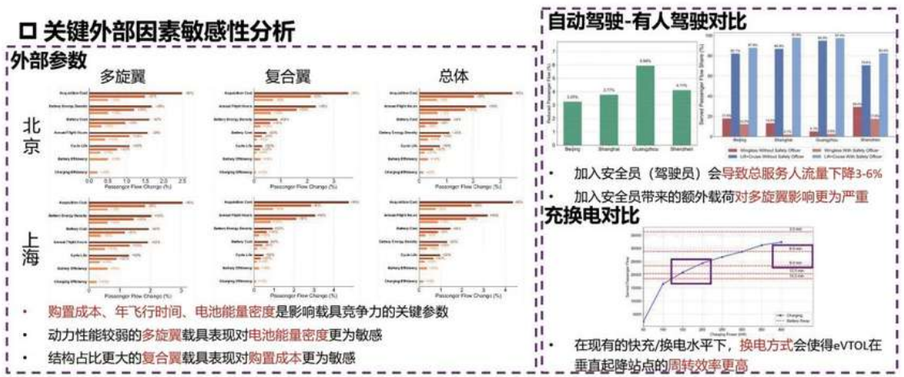


图 6-17 购置成本、年飞行时间、电池比能量与运营方式的敏感性

自动化飞行可能降低机组成本并释放有效载荷，但需要更高等级的感知、通信、飞控和运行保障，不能把驾驶员质量减少直接等同于净收益。有人与无人运行还会影响监管、保险、社会接受和地面管理，应分别建模。

6.6.3 全生命周期成本与路线比较

如表 6-8 所示，动力系统全生命周期成本包括购置、能源、维护、适航、备件、电池更换、基础设施、保险和停场损失。高可靠航空部件价格较高，直接采用低成本车规部件又需要通过冗余、筛选和验证补偿风险。不同路线必须在相同任务、载荷、安全目标、寿命和能源价格假设下比较（表 6-9）。

表 6-8 特定算例中纯电、混合动力与活塞动力成本构成

成本项目	纯电动	混合动力	活塞动力
有效载荷/ kg	24.96	403.09	337.02
购置成本/万元	31.45	59.21	33.33
运行成本/万元	12.5	20	32.5
维护成本/万元	5	12	9
电池更换成本/万元	11.01	4.32	2.16
残值回收/万元	-1.57	-20.73	-8.33
综合成本/（元/吨公里）	233.9	18.31	19.37

表 6-9 低空飞行器主要动力路线的场景定位与工程约束

技术路线	近期适用任务	主要系统优势	主要工程约束
纯电动力	城市短途、高频起降、小中型载荷	效率高、响应快、噪声低、分布式布置灵活	包级比能量、循环与快充、热安全、地面电力容量
油电混合动力	中程通勤、物流、任务弹性与持续功率要求较高场景	液体燃料能量密度高，可保留电推进布局与峰值缓冲	系统复杂、转换损失、噪声排放、维护与适航工作量
氢燃料电池混合动力	中长航程、低碳示范及固定走廊运行	效率较高、噪声低、连续供能能力强	系统功重比、高空供气、水热管理、储氢与基础设施
氢内燃机或氢涡轮	较高持续功率、较长航程及热机能力延伸	功率能力强，可利用部分发动机制造基础	储氢质量、回火早燃、氮氧化物、泄漏和材料相容
SAF 热机及混合化	长航程、较大载荷和既有航空动力低碳化	燃料质量能量密度高，与现有储运及热机体系衔接较好	燃料供给与成本、全生命周期减排、材料相容和认证

成本算例的数值高度依赖购置价格、能源价格、年利用率和维修假设，不能直接作为市场结论。更稳妥的用途是识别敏感参数：当年飞行时间较低时，购置和适航成本占比更高；当航程和载荷提高时，储能质量与能源成本更关键；当周转频繁时，电池寿命和补能效率成为主要变量。

6.7 汽车动力与低空动力创新实践

汽车与航空协同的创新价值集中体现在跨系统问题上。将成熟部件简单轻量化通常不足以形成可靠飞行系统，真正的技术进步来自地空热管理、飞推能源综合控制、设计制造一体化和环境验证等能力的结合。

6.7.1 地空分离式热管理与任务化补能

如图 6-18 所示，地空分离式热管理利用飞行器在地面和空中的边界差异：地面允许接入较重的冷源和电网，快速完成电池预调温、充电散热和健康检查；空中系统只保留满足峰值与持续任务的轻量化回路，并利用迎风换热。这样可以减少机载冷却质量，又避免快充热量带入飞行阶段。

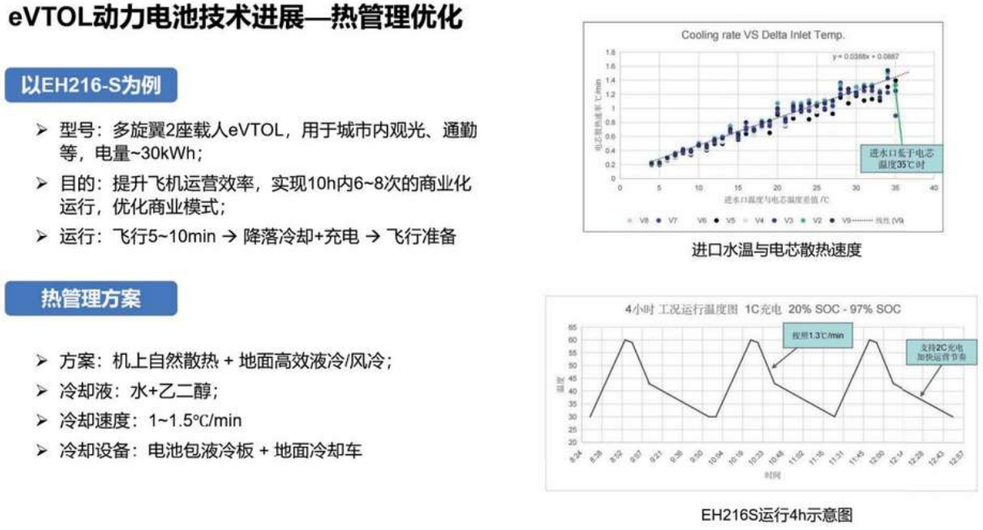


图 6-18 地面高效冷却、机上自然散热与运营周转的协同关系

该方案需要场站与机载系统共享温度、荷电状态、健康状态和任务计划。若地面冷却未达到目标，任务系统应自动调整可飞航程或推迟放行；若航班间隔变化，充电策略应平衡周转和寿命。创新点不是增加一套地面设备，而是把能源、热和运行计划形成闭环。

6.7.2 飞推能源一体化优化与安全控制

如图 6-19 所示，飞推能源一体化把气动构型、螺旋桨、电机、发动机或燃料电池、储能和控制共同优化。任务级模型可以识别峰值功率、平均功率和储备需求，避免各子系统分别留出过大裕量。控制层再根据飞行阶段、部件效率、温度和故障状态分配功率，实现安全优先下的能耗优化。

创新难点在于模型可信度和安全可解释性。优化模型可以探索大量构型，但适航需要证明边界、约束和异常工况。可行路径是以高保真模型建立设计空间，以降阶模型和确定性保护用于实时控制，并通过硬件在环、故障注入和飞行试验逐级验证。

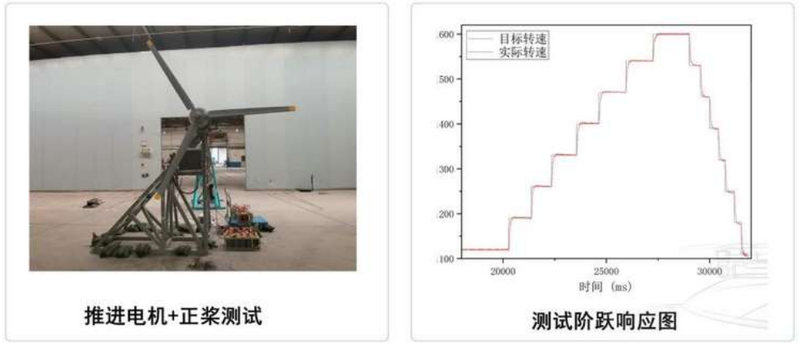


图 6-19 推进电机—螺旋桨系统高带宽动态响应与闭环控制验证

6.7.3 高空动力设计制造一体化与数字证据链

如表 6-10 所示，航空多级增压和氢动力高空试验表明，设计、制造与验证需要形成一体化闭环。转子动力学、热应力、气动匹配和控制策略在模型中相互耦合，材料、加工和装配偏差又会改变稳定裕度。把制造检测数据反馈到个体模型，可以更准确地评估高空性能和寿命。

表 6-10 高空动力起动、性能、安全与耐久试验科目体系

试验类别	核心科目	模拟高度范围
高空起动试验	低压冷起动特性	0～10 km
高空起动试验	高空再起动边界标定	3～10 km
高空起动试验	起动包线验证（T-P 矩阵）	全包线
高空性能试验	不同高度功率/推力特性衰减	0～10 km
高空性能试验	PEMFC 极化曲线高空演变规律	3～9 km
高空性能试验	高空效率图谱绘制	全包线
高空安全试验	低压氢泄漏扩散规律试验	0～10 km
高空安全试验	高空燃爆极限边界测试	6～10 km
高空安全试验	低压紧急关断响应验证	全包线
高空耐久试验	高度循环疲劳试验	（爬升-巡航-下降）
高空耐久试验	低温-低压-振动复合环境耐久	模拟典型航线剖面

数字证据链进一步把需求、模型、试验、构型和运行状态关联。每次软件更新、零件替换或工艺变更均可追溯到受影响的安全要求和验证结果，有利于缩短改型评估并支持持续适航。其前提是数据标准、模型版本和权限边界清晰，不能以数字化平台替代工程审查。

6.8 汽车动力与低空动力技术趋势与关键挑战

如图 6-20 所示，未来低空动力将保持纯电、混合动力、氢能和可持续液体燃料多路线并行。纯电路线优先在短途、高频、低噪声场景形成规模，混合动力以较高复杂度换取中程、载荷和任务弹性，氢能与 SAF

则面向更长航程、持续功率和低碳目标探索。路线边界会随电池、燃料、基础设施和适航成熟度变化，不宜设定固定航程分界。



图 6-20 燃烧、氢燃料、换热与轻量化等低空动力技术方向

汽车产业能力将更多进入低空领域，但迁移方式将由部件替代转向分层保证。电池、电机、功率电子和软件平台可以共享材料、工艺和规模供应链，飞行关键功能仍需按照航空安全目标重新设计、鉴定和追溯。能够同时控制成本和保持证据完整性的供应体系，将成为产业化关键基础。

动力系统创新将由单部件指标转向飞行器—推进—能源—运行网络协同。比能量、功重比和效率仍然重要，但最终评价会更多使用任务完成率、签派可靠度、维修间隔、年利用率和单位有效载荷成本。地面补能、空域、气象和场站布局将反向决定机载技术选择，单机最优不再足以支撑商业判断。

适航与验证能力将成为新技术扩展速度的决定因素。分布式电推进、高比能电池、氢能和高度自动化带来新的失效模式，现有方法需要通过专用条件、符合性方法、积木式试验和持续运行数据逐步完善。行业应优先建设高空环境、热失控、氢安全、硬件在环和故障注入等共性平台，提高模型与试验数据的可复用性。

基础设施和能源供给会加速或限制技术路线。高功率充电需要电网、储能和场站热管理，换电需要标准化与库存，加氢需要制储运和安全保障，SAF 需要稳定的低碳原料与认证供应。机载动力开发若脱离能源网络和场站规划，容易形成技术可行但无法高频运行的孤立示范。

总体看，汽车动力与低空动力协同的核心，不是用汽车工业降低航空安全标准，也不是用航空高成本模式复制汽车部件，而是在航空安全边界内吸收汽车规模化、数字化和快速迭代能力。未来具有竞争力的动力系统将满足可飞、可证、可造、可维护和可运营五个条件，并以全生命周期数据持续修正设计和运行边界。

观点来源

[1] 曲小波. 飞行汽车动力：从载具可靠性到系统经济性的耦合分析[R]. 清华大学车辆学院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[2] 邓甜. 航空适航体系对氢动力系统的启示及氢能发动机试验台架的建设与应用[R]. 中国民航大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[3] 曹俊. 新能源低空飞行器动力技术进展与展望[R]. 中国航发湖南动力机械研究所, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[4] 卢宇芳. 载人 eVTOL 动力电池技术进展[R]. 合肥低空经济电池研究院、亿航智能, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[5] 王向阳. 混合动力 eVTOL 飞推综合设计与控制[R]. 清华大学航空发动机研究院、追梦空天科技公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[6] 黄友. 低空飞行器动力系统性能和成本控制的探索与挑战[R]. 重庆宗申航空发动机制造股份有限公司, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[7] 周煜. 航空多级增压系统设计制造一体化[R]. 北京航空航天大学, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.
[8] 马骁. 低空氢能推进动力技术[R]. 清华大学车辆学院, 宁波: 第六届车用动力系统国际论坛, 2026.

第七章 中国汽车企业动力系统创新实践

7.1 浩思动力

7.1.1 动力系统技术创新方向概览

浩思动力围绕混合动力系统持续开展动力总成技术开发。其前身吉利动力自 2018 年起进入混动系统规模化开发阶段，2021 年发布雷神动力品牌，并逐步形成“动力高效化、驱动电气化、控制智能化、能源多样化”的技术布局。在此基础上，浩思动力相继开发 EMP 智能电混、EM-i 品质电混和浩瀚超级电混等动力系统，并进一步推进面向 HEV、PHEV 和 REEV 等不同动力形式的混动技术开发，以适应不同级别车型的动力需求。

在混动系统架构方面，浩思动力先后开发 7DCTH、3DHT100、3DHT160、DHT160 和 DHT290 等产品，并同步开发与之匹配的混动专用发动机，技术路线由早期多挡机电耦合逐步向高效率单挡、高压电驱和高集成平台拓展（图 7-1）。面向不同动力形式的平台化开发需求，新一代 X-HEV 技术进一步将混动系统与纯电原生整车平台相结合，通过紧凑化布置、400 V/800 V 电压兼容、多构型适配和接口通用化，提高不同动力形式之间的平台共用能力。



图 7-1 浩思动力混合动力系统技术布局

7.1.2 代表性动力系统创新实践

（1）900 V 高压混动架构实现高功率电驱与发动机直驱协同

高性能混动车型需要兼顾高功率电驱、低荷电状态（SOC）下的持续动力输出以及高速巡航经济性。随着电驱功率提高，混动系统对电压平台、功率电子器件和发电能力提出了更高要求；同时，在电池 SOC 降低时，如何维持电驱性能并合理利用发动机输出，是动力系统架构设计需要解决的问题。

针对上述需求，浩思动力开发了以 DHT290 混动专用变速器为核心的 900 V 高压混动系统。该系统采用 P1 发电电机和 P3 驱动电机的双电机构型，并通过 1200 V SiC 功率模块和 0.2 mm 超薄硅钢片提高电驱系统的功率密度与效率。其中，P3 电机最大功率 290 kW、最大扭矩 400 N·m，系统具备 145 kW 发电能力，为高功率电驱及低 SOC 状态下的持续动力输出提供支持。

在动力组织方面，系统保留 2.0T 发动机直驱能力，使发动机能够在适宜工况下直接参与车辆驱动，而 P3 电机承担电驱及动力补偿需求。通过高压电驱、大发电能力与发动机直驱的组合，系统能够在满足高功率输出需求的同时，改善低 SOC 状态下的动力保持能力，并兼顾高速巡航工况的运行效率。

（2）超紧凑混动平台创新解决纯电原生平台的空间与接口适配问题

随着整车平台向纯电原生架构发展，传统混动系统在增加发动机、变速器及相关辅助部件后，容易受到机舱空间、碰撞结构和接口布置等条件的约束。不同动力形式若分别采用独立的总成布置和接口设计，也会增加整车平台开发与适配的复杂度。因此，如何在有限空间内完成混动动力总成布置，并提高不同动力形式之间的零部件和平台共用程度，成为混动系统平台化开发需要解决的问题。

针对这一问题，浩思动力在新一代 X-HEV 技术中开发了 DHTS-X 电驱平台和 F15 超紧凑混动系统，通过细腰型与折叠式布置优化动力总成包络，以适应纯电原生平台的机舱空间与碰撞安全要求。其中，DHTS-X 采用 14 合 1 高度集成设计，将 P1/P3 电机、功率电子、电源转换、热管理及传动系统等功能集成于统一平台，并通过电机平台通用化和功率模块共享封装，实现 400 V 与 800 V 电压模块的兼容及互换，平台通用化率超过 80%。

F15 超紧凑混动系统进一步采用模块化设计，提供 P2 和 P1+P3 两种动力构型，可匹配 1.5 L 和 2.0 L 自然吸气或增压发动机，并支持不同电压平台及四驱应用。通过动力总成紧凑化布置、模块通用化和接口统一设计，降低混动系统与纯电原生整车平台之间的适配差异，使同一整车平台能够根据车型需求配置不同动力形式。

7.1.3 未来动力系统技术展望

面向未来，浩思动力将继续围绕动力高效化、驱动电气化、控制智能化和能源多样化推进动力系统技术发展，并结合全球不同区域的能源结构、法规要求和市场需求完善技术布局。

全球不同区域在电动化进程、能源条件和动力技术需求方面存在明显差异，多种动力路线仍将长期并行。针对不同市场，浩思动力已形成 Horse One 燃烧动力总成、Horse Fusion 混动动力总成和 Horse X-Range 增程动力总成等技术方案。未来将进一步加强不同法规、燃料品质、气候和运行工况下的适应性开发，持续推进冷起动催化、稀薄燃烧后处理等排放控制技术，并结合全球研发、制造和供应链布局，提高动力总成对不同市场的适配能力，同时关注供应链和制造环节的低碳化。

在动力高效化方面，浩思动力认为发动机热效率提升主要存在两条技术路径：一是在现有λ=1 均质燃烧路线基础上，继续优化高压缩比、Miller 循环、EGR 和高效燃烧系统；二是进一步向λ>1 稀薄燃烧发展。围

绕稀薄燃烧，浩思动力法国、中国和瑞典团队正开展超稀薄燃烧点火、主动预燃室、双 GDI 喷射等技术研究，并重点解决稀薄燃烧条件下的 NO_x 后处理问题，以进一步拓展发动机高效运行范围（图 7-2）。

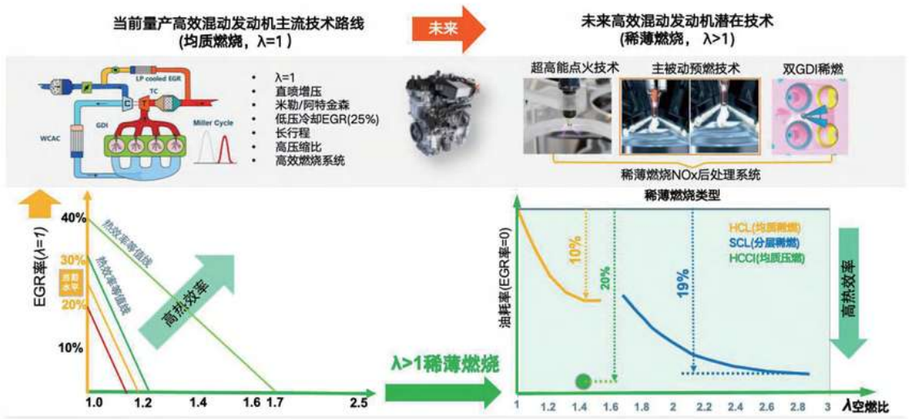


图 7-2 浩思动力高效发动机稀薄燃烧技术路线

在驱动电气化方面，电驱系统将继续向高压化、高速化、集成化和轻量化方向发展，同时需要兼顾混动动力总成紧凑化与整车碰撞安全要求。浩思动力已围绕高压混动、高速电机、超薄电工材料和高集成混动平台开展技术开发，未来将进一步通过电机、功率电子和传动系统的集成与平台化设计，提高电驱系统效率、功率密度和整车适配能力。

在控制智能化方面，动力系统控制架构将由分布式控制逐步向域控制、区域控制和中央控制平台演进，控制算法也将由规则策略和全局寻优进一步向车云协同与人工智能算法拓展。浩思动力以 X·Systeam 为控制平台，重点推进软硬件深度融合及车路云能量一体化控制，加强动力系统与整车其他系统之间的协同优化（图 7-3）。



图 7-3 浩思动力控制智能化技术架构

能源多样化方面，浩思动力认为未来动力技术的选择需要综合考虑能源生产、储存、运输和使用条件。在持续推进电气化的同时，浩思动力重点开展甲醇能源研发，并持续关注零碳能源和氢燃料技术。针对甲醇燃料的应用特点，浩思动力已围绕发动机可靠性、低温冷起动和灵活燃料适配开展技术开发，并进一步探索甲醇燃料与混合动力系统结合的技术路线。

7.2 一汽红旗

7.2.1 动力系统技术创新方向概览

一汽红旗依托鸿鹄、天工、九章三大技术平台，持续推进动力系统平台化、模块化开发，形成覆盖燃油、纯电、插混、增程等多种动力形式的技术布局。当前技术研发重点围绕高效化、集成化、智能化和高压快充等方向展开，在提升核心部件性能的同时，强化动力构型、平台适配和系统协同能力，以满足不同车型和使用场景的动力需求。

在发动机方面，一汽红旗重点围绕混动高效化和小型轻量化开展技术研发，兼顾现阶段高效低碳技术开发与长期零碳动力技术储备。高效化方向主要包括大冲程缸径比高滚流燃烧、动态油气混合、高精度 EGR、智能热管理和低摩擦等技术，通过燃烧、换气与损失控制协同提升发动机效率；小型轻量化方向则通过结构优化、尺寸链压缩和部件模块化集成，提高整机紧凑性和平台适配能力。

在混动电驱方面，一汽红旗围绕高度集成、平台兼容和横纵置多构型适配开展技术开发。横置电驱重点推进轴向高度集成、高效运行与 NVH 优化，并通过统一外形尺寸与接口实现 400 V/800 V 电压平台兼容；纵置电驱采用 P1+P3 双电机两挡混动构型，结合智能换挡、主动润滑和油冷热管理等技术，兼顾宽工况效率、动力性能与运行品质。面向越野车型进一步探索增程动力、多电机独立驱动和扭矩矢量控制等技术。

在动力电池方面，随着混动车型对纯电续航、快速补能和安全性能的要求提高，一汽红旗重点推进大电量、高电压和高倍率快充电池技术。通过电芯材料优化、电池包集成、高压平台匹配以及热管理与 BMS 协同，兼顾电量、充电性能、安全、寿命和成本，并重点改善大倍率充电条件下的析锂、温升及寿命衰减问题。

7.2.2 代表性动力系统创新实践

（1）P1+P3 双电机两挡构型创新解决纵置前驱混动宽工况匹配问题

纵置前驱混动系统需要兼顾低速动力、高速经济性、运行平顺性及系统集成度。单挡直驱方案的固定速比难以同时适应低速重载与高速巡航工况，传统燃油多挡变速器改造方案则可能存在挡位冗余、体积重量较大和控制复杂等问题。因此，需要针对混合动力系统的运行特点优化机械挡位配置与动力耦合方式。

针对上述问题，一汽红旗开发了纵置前驱 P1+P3 双电机两挡混动构型（图 7-4）。LDU45 将发动机两挡变速机构、P1/P3 双电机、双逆变器及驱动桥进行一体化集成，根据不同运行区间设置两个机械挡位。其中，1 挡采用较大速比，主要适应起步、爬坡和重载等工况，通过机械速比放大发动机输出扭矩；2 挡采用较小速比，主要适应高速巡航工况，使发动机能够以较低转速运行。换挡过程中，由布置在输出端的 P3 电机提供动态扭矩补偿，减少机械换挡造成的动力中断。



图 7-4 一汽红旗 LDU 纵置两挡混动变速器

在构型设计基础上，系统进一步采用 800 V 高压电驱和 SiC 功率器件，并结合智能换挡控制、环瀑式油冷热管理和全主动润滑等技术改善系统运行效率。其中，全主动润滑根据车速、转速和负荷动态分配润滑油量，在满足传动部件润滑需求的同时降低高速搅油和拖曳损失。测试结果显示，120 km/h 巡航时发动机转速降低 900 r/min 以上，换挡响应时间小于 0.3 s，在拓展发动机高效运行范围的同时改善换挡平顺性。

（2）电动 VVT 与停机位置协同创新降低混动发动机起动冲击

混合动力发动机需要根据整车功率需求频繁起停，其起动阶段的缸压建立、燃烧激励和机械振动容易影响整车 NVH。特别是在纯电运行形成较低背景噪声的情况下，发动机再次介入时的振动与噪声更容易被乘员感知，因此需要在保证快速起动的同时降低起动冲击。



图 7-5 一汽红旗 20TD 混动专用发动机

一汽红旗在 20TD 混动专用发动机上采用电动可变气门正时（VVT）与停机曲轴位置协同控制技术（图 7-5）。电动 VVT 以电机驱动替代传统液压控制，提高气门相位调节响应能力，并通过调整气门相位降低发动机起动阶段的缸压；停机位置控制则主动调节曲轴停止位置，为下一次起动提供适宜的初始条件。两项技术分别从起动过程的缸内压缩状态和初始机械位置入手，改善发动机起动瞬态的振动与冲击。

在此基础上，系统进一步结合多级自适应发动机噪声控制、燃烧噪声优化及双平衡轴等技术，改善发动机介入后的运行品质。测试结果显示，电动 VVT 响应速度较原有方案提高约 3 倍，发动机起动缸压降低约 47%；结合停机位置及相关 NVH 控制措施后，整机噪声平均下降 3 dB 以上。

7.2.3 未来动力系统技术展望

面向汽车动力系统电动化、低碳化和平台化发展，一汽红旗未来将继续围绕发动机、电驱和动力电池等核心领域推进技术研发，重点提升动力系统的效率、集成度、运行品质及安全性能。

在发动机方面，随着混合动力技术持续迭代，混动专用发动机将进一步向高效率、紧凑化和系统化 NVH 优化方向发展，如何兼顾三者将成为下一阶段的重要技术问题。围绕这一目标，一汽红旗将重点推进高效燃烧、整机高集成模块化、多源耦合 NVH 抑制以及油电协同全域精细化标定等技术。同时，面向低碳发展需求，将进一步关注醇类燃料、电合成燃料等低碳燃料在混动发动机中的应用，重点解决专用零部件开发、燃烧标定优化以及加注基础设施配套等问题，推动相关燃料技术的应用发展。

在电驱方面，随着整车对动力性能、底盘配置及大容量动力电池的需求持续提升，机舱布置空间进一步受到约束，混动电驱系统需要在轴向尺寸、集成度和跨车型平台兼容能力等方面持续优化。横置混动电驱将重点推进轴向尺寸压缩、深度集成和平台化兼容，在现有硬件多合一集成基础上进一步向芯片级集成发展，并通过平台化电驱架构对功率模块、电压平台、电机类型等关键维度进行解耦设计，提高不同车型之间的复用能力。纵置混动电驱则将通过新材料和新工艺进一步提升性能、降低成本，并拓展越野车型应用。LDU 系列将继续升级 SiC 功率模块，优化电机硅钢和磁钢材料，并采用镁合金壳体等轻量化技术；在核心零部件共用的基础上，通过调整壳体结构提高纵置混动平台对越野车型的适配能力。

在动力电池方面，未来技术发展将重点围绕安全防护和快速补能两个方向推进。在安全方面，将从热安全防护、结构防护和智能预警等维度完善技术体系，通过优化电池包内部导气路径、应用灭火材料降低热安全风险，并构建整车—电池一体化结构防护体系，提高极端工况下的安全能力；同时结合大数据与 AI 电池管理系统开展风险预判和主动安全管理。在快充方面，随着充电倍率持续提高，电池寿命衰减和热安全等问题将更加突出。电芯层面将通过优化电解液配方和负极材料抑制快充过程中的析锂，改善循环寿命；系统层面则进一步强化智能热管理、高精度电池管理系统和多重冗余防护，并结合动力电池安全标准要求，兼顾快充性能与全生命周期安全。

7.3 长安汽车

7.3.1 动力系统技术创新方向概览

长安汽车持续推进混合动力技术研发，动力系统由早期单一混动构型逐步向多技术路线协同和平台化开发演进。围绕插电混动、增程等不同动力形式，长安形成了由全新蓝鲸发动机平台、新蓝鲸增程/电驱平

台和 iEM 高阶智慧动力控制系统组成的新蓝鲸动力平台，重点推进混动专用发动机高效化、电驱系统高功率密度与高集成、智能控制和动力架构平台化适配等技术。

在动力系统架构方面，新蓝鲸动力采用 P1+P3 双电机串并联架构，并通过动力模块组合适配不同动力形式。发动机方面，重点推进高压燃油喷射、高能点火、高 EGR 率快速燃烧和低摩擦等技术；电驱方面，围绕双电机高度集成、高效扁线电机、功率电子和油冷热管理开展技术开发；控制方面，通过 A-ECMS 算法、动力源全域管理和全地形驾驶自适应控制等技术，优化不同工况下的能量分配和动力响应。

在此基础上，长安进一步开发蓝鲸超擎混动，形成由 500 bar 高压燃油喷射发动机、高磁通高功率电驱、高性能电池及 AI 云智控等组成的 i-DEH 深度电动化智能油混架构，强化发动机、电驱、电池与智能控制的系统协同。针对高功率密度电驱系统的局部冷却润滑和瞬态热管理需求，长安还开展精准定向喷淋冷却、智能温控和冷却流量预请求等技术开发，以改善电驱系统的冷却能力与运行效率。

7.3.2 代表性动力系统创新实践

（1）精准定向喷淋创新解决高功率电驱局部冷却与润滑问题

随着电驱系统向高速化和高功率密度方向发展，电机定子绕组和齿轮啮合区域的局部热负荷持续增加。传统“飞溅润滑+大面积喷淋”方式主要依靠齿轮旋转甩油和固定喷嘴扩大油液覆盖范围，容易出现局部冷却不均、无效供油和泵油功耗较高等问题，对于受多级齿轮遮挡的啮合区域，也较难实现直接、稳定的润滑和冷却。

针对上述问题，长安开发了面向关键热负荷区域的精准定向喷淋冷却与润滑技术（图 7-6）。该方案根据电机定子绕组端部、齿轮啮合面和轴承滚道等不同部位的需求，分别设计定向油路和喷嘴，实现润滑油的按需输送。对于受结构遮挡的齿轮啮合区域，通过优化喷嘴角度和异形导油通道，使油液绕开遮挡结构并到达目标区域；对于电机定子，则在定向喷淋基础上利用转子高速旋转产生的离心甩油作用，使油液进一步沿定子周向分布，形成定向喷淋与转子甩油协同的冷却方式。同时，根据不同部位的热负荷匹配喷油量和喷射压力，减少过量供油造成的搅油损失和泵油功耗。

应用该技术后，在极限热负荷工况下，电机定子温度场不均匀度可控制在 20 ℃以内，相较传统方案约 30～40 ℃的温差得到改善；与传统“飞溅+喷淋”方式相比，泵油功耗降低约 22%。同时，齿轮啮合区域能够获得更充分的润滑和冷却，有利于降低齿面接触温度，改善齿轮抗胶合能力和接触疲劳寿命。



图 7-6 打靶喷淋结构与喷淋甩油冷却

（2）智能温控与冷却流量预请求创新解决混动电驱瞬态热管理滞后问题

混合动力电驱系统在不同温度和负荷条件下具有差异化的热管理需求：低温阶段需要尽快提高油温、降低润滑油黏度，高负荷阶段则需要及时增强冷却能力。传统常通式冷却回路容易延长低温暖机时间，而基于油温反馈的被动冷却策略受到热惯性影响，在快速加速和持续爬坡等瞬态高负荷工况下，难以及时匹配快速增加的散热需求。

针对这一问题，长安开发了由智能温控阀、冷却流量预请求策略和电子油泵组成的主动热管理系统（图 7-7）。系统综合冷却油温、电机温度、转速、扭矩及车辆运行状态等信息，通过热负荷模型计算冷却需求，并动态调节电子油泵流量。低温运行时，温控阀关闭流经换热器的冷却回路，使润滑油较快达到适宜工作温度；达到设定温度后，再根据热负荷调节换热器回路的油液流量，以维持合理的运行温度。

针对快速加速、持续爬坡等高负荷工况，系统进一步引入冷却流量预请求控制，根据车辆运行模式和扭矩需求，在油温和电机温度尚未明显升高前提前增加冷却流量，使冷却控制由温度反馈进一步拓展至基于热负荷预测的前馈控制，降低瞬态热积累引起的过热和功率降额风险。

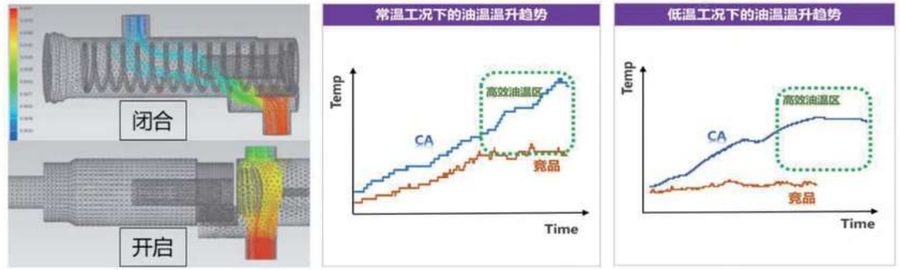


图 7-7 智能温控阀与温升曲线对比

应用上述技术后，智能温控阀与电子油泵能够根据运行状态动态匹配冷却需求，减少不必要的冷却和泵油损失。测试结果显示，常温工况下电驱系统综合效率提升超过 1%，低温阶段电驱效率提升约 3%；在持续高负荷工况下，提前增加冷却流量有助于控制电机及齿轮温升，改善持续功率输出能力。

7.3.3 未来动力系统技术展望

面向动力系统电动化、多元化和智能化的发展趋势，长安新蓝鲸动力将继续以高性能硬件和平台化、模块化开发为基础，强化发动机、电驱、电池与智能控制之间的协同优化，重点围绕内燃机高效化、多元能源与动力架构适配以及电驱系统与智能化融合三个方向开展技术研发。

在内燃机方面，热效率仍是混合动力和增程动力系统持续优化的重要方向。未来将进一步围绕稀薄燃烧、预燃室、三火花塞点火、复合增压和更高压缩比等技术开展探索，提高发动机本体效率，同时进一步降低低荷电状态下的整车燃油消耗。

在动力架构和能源适配方面，平台化与模块化将进一步提升动力系统对不同应用场景的适应能力。依托“积木式”动力模块开发方式，新蓝鲸动力可根据车型和使用需求灵活适配插电混动、增程等不同动力架构，并进一步拓展汽油、乙醇、氢等不同能源的适配能力。随着不同区域能源结构、法规要求和用户需求进一步分化，多动力架构和多能源兼容能力将成为动力平台拓展应用范围的重要基础。

在电驱与智能化方面，动力系统控制将由基于固定规则和实时状态的优化，进一步向融合驾驶行为、道路环境和预测信息的智能决策演进。长安 iEM 系统已引入目的地预测、充电习惯预测和驾驶风格识别等预测性能量管理功能，未来将进一步加强动力系统与智能驾驶、车端感知及云端数据的协同，通过对道路、交通环境和驾驶需求的预测，更精细地规划发动机、电机及电池之间的能量流。同时，结合电驱系统主动热管理技术，进一步加强能量管理、热管理与动力控制之间的协同优化。

7.4 长城汽车

7.4.1 动力系统技术创新方向概览

考虑全球不同区域在能源基础设施、法规要求和使用场景方面的差异，长城汽车认为燃油、混合动力、纯电动和燃料电池等多种动力路线仍将长期并行发展。围绕全尺寸运动型多用途车（SUV）、皮卡和越野等车型的动力需求，长城当前重点推进大排量发动机、柴油混动化以及动力系统构型创新等方向的技术开发。

在大排量发动机方面，针对越野、拖拽等场景对动力性能和持续输出能力的要求，长城汽车已形成 3.0T 柴油和汽油发动机产品，并进一步推进 4.0T V8 汽油发动机开发。围绕基础结构、增压与燃油喷射、低摩擦、NVH 及混动适配等技术开展系统优化，并同步开发混动版本，以适应不同混合动力架构和车型的应用需求。

在柴油混动方面，长城汽车利用柴油发动机低油耗和大扭矩的特点，推进柴油动力与混合动力系统的融合开发，重点开展柴油专用 DHT 以及功率分流、串并联等混动构型研究，并结合高效燃烧与排放后处理技术优化，提高柴油混动系统在不同运行工况下的效率和动力性能。

在动力系统构型方面，长城进一步围绕多挡 DHT、多电机四驱和高集成电驱等技术开展开发，通过不同动力源的组合与协同控制，兼顾动力输出、运行效率和复杂路况适应能力，并通过紧凑化和模块化设计提高动力平台对不同车型及动力形式的适配能力。

7.4.2 代表性动力系统创新实践

（1）双喷射与低摩擦设计协同优化 4.0T V8 发动机综合性能

面向全尺寸 SUV、皮卡及越野车型对动力性能和持续输出能力的需求，大排量汽油发动机需要在提高动力输出的同时兼顾燃油经济性、排放和运行品质。针对这一需求，长城汽车开发了 4.0T V8 汽油发动机（图 7-8），通过发动机结构、燃油喷射、摩擦控制及 NVH 等多方面的协同设计，提高大排量发动机的综合性能。



图 7-8 长城大排量 4.0T V8 汽油发动机

在结构与燃油喷射方面，该发动机采用 90° V8 布局，在 V 形夹角内布置双涡轮增压器，并配置前置水冷中冷器，以提高动力系统布置的紧凑性。燃油系统采用 350 bar 缸内直喷与 5.5 bar 气道喷射相结合的双喷射方案，根据不同运行工况选择喷射模式，以兼顾燃烧效率、冷起动性能和积碳控制。

在机械损失与运行品质方面，发动机采用缸孔喷涂技术，降低气缸摩擦阻力并减轻整机重量；同时采用全 MAP 可变供油机油泵，根据发动机转速和负荷调节机油压力，减少不必要的机械损失。针对大排量发动机的轴系扭振问题，采用硅油减振器改善振动特性，并通过曲轴型式、点火时序及排气系统参数的协同匹配优化发动机声品质。此外，该发动机同步开发混动版本，可与 Hi4-T 及 Hi4-Z 混动变速器匹配，以兼顾大排量发动机的动力性能与混动系统的能耗需求。

（2）柴油专用 DHT 与混动构型开发优化柴油动力系统能耗

柴油发动机具有燃油经济性好、低速扭矩大等特点，适合皮卡、越野等对动力性和能耗均有较高要求的应用场景。随着动力系统混动化发展，如何将柴油发动机的效率和扭矩特性与电驱动技术相结合，在满足复杂工况动力需求的同时进一步降低系统能耗，成为柴油混动技术开发的重要方向。

针对上述需求，长城汽车开展柴油专用混动变速器开发，并研究功率分流、串并联等混动构型，通过柴油发动机与电驱系统的组合应用，拓展不同运行工况下的动力配置与能量管理方式。同时，围绕柴油混动系统推进高效燃烧与排放后处理一体化技术开发，强化发动机、混动系统和排放控制之间的协同匹配，在发挥柴油发动机原有节油和大扭矩优势的基础上，进一步改善皮卡及越野车型的动力系统能耗。

7.4.3 未来动力系统技术展望

面向汽车电动化持续发展的趋势，长城汽车认为，内燃机在较长时期内仍将是汽车动力系统的重要组成部分，并将伴随混合动力和低碳燃料技术的发展，进一步向高效率、低排放和低碳化方向演进。由于不同区域的能源基础设施、法规要求和用户需求存在差异，多种动力技术路线仍将长期并行。

从全球市场应用条件看，对于缺乏固定充电条件、公共充电设施便利性有限的用户，纯电动车型的使用仍可能受到一定约束。混合动力能够兼顾燃油补能便利性与电动化带来的能耗改善，在不同区域和使用场

景中具有持续应用的空间。对于皮卡、全尺寸 SUV 及越野等车型，动力系统还需要兼顾低速扭矩、持续动力输出、燃油经济性和复杂工况适应能力，这也与长城汽车在大排量汽柴油发动机及柴油混动领域的技术开发方向相契合。

从法规与技术演进看，全球主要汽车市场的排放和油耗法规持续趋严，将推动内燃机进一步提高效率并降低污染物排放。未来可通过预燃室、稀薄燃烧等技术持续优化汽油机燃烧过程，并结合排放后处理技术满足更加严格的法规要求。同时，电合成燃料、生物柴油等低碳燃料的应用，为内燃机降低全生命周期碳排放提供了新的技术路径，其实际减排效果还需结合燃料原料来源和生产过程进行评价。

从产业基础看，内燃机已形成较为成熟的研发制造体系、供应链和配套基础设施。依托既有技术和产业基础，内燃机可进一步与混合动力、低碳燃料等技术结合，适应不同区域市场和使用场景的动力需求。

7.5 东风汽车

7.5.1 动力系统技术创新方向概览

东风汽车以马赫动力为核心载体，形成覆盖燃油、混动和纯电的动力系统技术体系，包括马赫 G、马赫 PHREV 和马赫 E 三大技术平台。面向汽车产业电动化、智能化和全球化发展，东风坚持混动与纯电双线并举的技术路线，围绕高效化、集成化、智能化和安全性等方向持续开展技术研发，强化动力系统的多技术协同与平台化适配能力。

在混合动力方面，东风围绕混动专用发动机、电驱系统和能量管理技术开展协同开发，已形成覆盖 1.5T、2.0T 的混动专用发动机产品体系，并持续推进发动机效率提升与动力系统高效运行。在智能控制方面，东风开发马赫 4.0 高集成度智能控制技术平台，推进发动机、双电机、换挡和能量管理等动力域控制功能集成；同时通过 AI-Control 智慧动力控制技术，结合驾驶风格识别、行程场景辨识和能耗预测等功能优化动力系统能量分配。

在电驱动方面，马赫纯电驱动系统已发展至 800 V 高压平台，第四代马赫电驱采用 12 合 1 高集成方案，并可进一步拓展至 14 合 1。典型产品 iD4-160 兼容 800 V 与 400 V 电压平台，采用油冷扁线电机和 SiC 功率模块。下一代产品将进一步向更高电压、高转速和高效率方向发展，推进千伏级高压电驱技术开发。

在动力电池方面，东风围绕高比能与安全防护持续推进技术开发，通过电芯及电池系统安全验证提高复杂工况下的安全适应能力，并开展固态电池技术研发。同时，围绕动力电池运行安全，探索云端风险预警与主动应急冷却技术，提高电池异常状态下的风险识别和处置能力。在此基础上，东风进一步推进动力系统智能化与跨域融合，探索动力域与底盘、智能驾驶等系统之间的协同控制。

7.5.2 代表性动力系统创新实践

（1）芯片级集成控制技术提升动力域协同控制能力

随着混合动力系统复杂度提高，发动机、双电机、变速器及能量管理系统之间的协同控制需求不断增加。传统分布式控制架构下，各控制器相对独立，控制器之间的通信与协调会影响系统动态响应和整体优化能力。因此，如何提高控制功能集成度、减少控制器间的信息交互约束，是复杂混合动力系统控制架构需要解决的问题。

针对这一问题，东风开发了马赫 4.0 高集成度智能控制技术平台，推进动力域各控制器软硬件的芯片级集成开发，将能量管理、双电机、发动机和换挡等控制功能进一步融合。平台围绕动力域核心控制，开展控制器本体、功能和控制策略的集成，并结合车辆运行工况，对进气、喷油、燃烧、发电等过程进行协调控制，支持动力系统高效运行和自适应控制策略。

通过芯片级软硬件集成，马赫 4.0 平台能够减少芯片数量，提高主控 MCU 算力及动力域控制功能之间的协同能力，改善高动态扭矩响应、控制精度、NVH 和实际运行能耗等性能。目前，该平台已具备量产应用条件。

（2）云端预警与主动应急冷却技术提高动力电池主动安全能力

随着动力电池向高比能、快充和轻量化方向发展，电池安全管理需要同时考虑运行过程中的潜在风险识别，以及热失控发生后的应急处置。传统以结构防护和热失控后被动隔离为主的安全措施，难以充分覆盖风险发展的不同阶段，因此需要进一步提高事前预警和异常状态下的主动干预能力。

针对上述问题，东风开发了由云端大数据预警与自适应主动应急冷却组成的动力电池安全技术。端云协同预警系统通过车辆运行数据开展风险识别，利用云端数据分析发现潜在异常并提供预警；自适应主动应急冷却系统则针对电池热失控后的温度上升问题，通过主动降温降低电池热负荷。两项技术分别面向风险发生前的识别预警和热失控后的应急处置，拓展了动力电池安全防护的技术手段。

端云协同预警系统已应用于多款车型，日均处理超过 30 万辆车的数据；自适应主动应急冷却系统重量为 9.2 kg，布置空间较原方案减少约 60%。通过风险预警与主动冷却技术的组合应用，动力电池安全管理能够进一步兼顾潜在风险识别与异常状态下的主动处置。

7.5.3 未来动力系统技术展望

从东风汽车的技术研发实践来看，未来动力系统将呈现多元技术路线长期并行、高压电驱持续发展、智能化能力不断提升以及跨域融合逐步深化等趋势。不同区域在能源基础设施和使用场景方面存在差异，混合动力与纯电动将继续面向不同需求发挥各自优势，混动技术也将由阶段性应用进一步向长期发展的动力路线延伸。

在电驱动方面，随着整车对充电效率和动力性能的要求提高，动力系统将继续向更高电压、高转速和高集成度方向发展。东风马赫 E 下一代产品正面向 1200 V 高压平台及 30000 r/min 电机转速开展技术规划，并推进千伏电驱与兆瓦级超充相关技术开发，以适应未来高功率电驱和快速补能需求。

在智能化方面，动力系统能量管理将由基于实时运行状态的优化，进一步向融合驾驶行为、道路环境和行程预测信息的智能控制发展。东风已通过马赫 4.0 平台开展动力域多控制功能融合，未来将进一步强化多源信息融合、预测性能量管理及跨域协同控制，推动动力系统与智能底盘、智能驾驶和车云平台协同。同时，

随着车能互动（V2G）技术发展，车辆动力电池及双向充放电系统有望进一步参与电网能量调节，拓展电动汽车与能源网络之间的交互能力。

面向多种动力路线并行发展，东风将继续推进动力系统平台化、模块化开发。依托马赫 G、马赫 PHREV 和马赫 E 三大技术平台，加强核心技术与供应链资源的共用，以降低多技术路线并行开发的复杂度。同时，东风坚持“开发一代、量产一代、预研一代”的滚动迭代模式，持续开展下一代动力技术研究。2025 年 12 月立项的《下一代高压纯电平台》课题，重点面向更高电压纯电平台的关键技术开发，推进千伏电驱和兆瓦级超充技术研究。

在自主开发方面，东风将继续加强关键材料、核心部件及系统集成技术研发，完善动力系统自主设计开发与制造能力，并围绕车规级 MCU 等关键部件提高自主保障能力，以适应动力技术快速迭代和供应链安全需求。

面向行业协同发展，东风建议进一步建立开放的跨企业技术验证与数据共享机制。在新能源动力和智能控制等领域，可由行业组织牵头建设脱敏后的行业级路谱、载荷谱和失效模式数据库，提高行业整体可靠性验证能力。同时，推动动力系统评价体系从单一性能参数向系统综合能力拓展，在热效率、功率密度等指标之外，更加关注真实使用场景下的综合能效、全生命周期可靠性和智能化体验，完善第三方评价标准。此外，还需要加强 V2G 相关标准与基础设施的协同建设，推动整车企业、电网公司和充电运营商共同完善通信协议、并网标准和计量结算体系。

7.6 上汽乘用车

7.6.1 动力系统技术创新方向概览

上汽乘用车自 2010 年起持续开展新能源汽车动力总成技术研发，围绕混合动力系统架构、机电耦合技术和智能控制技术不断推进技术演进，并形成以 DMH（Dual Mode Hybrid）超级混动系统为核心的混合动力技术体系。当前 DMH 系统覆盖插电式混合动力、增程式混合动力等不同动力形式，并面向轿车、SUV 和多用途车（MPV）等不同车型需求开展平台化应用。

在混动系统架构方面，上汽乘用车围绕混动专用变速箱开展平台化开发，形成以 P1+P3 双电机构型为代表的高集成混动系统方案。该架构通过发动机与 P1 电机同轴布置，结合 P3 驱动电机及单挡、多挡传动方案，实现纯电驱动、串联驱动、并联驱动和发动机直驱等多种运行模式，满足不同工况下动力输出与能量利用需求。

围绕混动系统高效运行需求，上汽乘用车同步开发混动专用发动机、动力电池和动力总成控制系统。其中，混动专用发动机围绕高效燃烧、深度阿特金森循环、智能热管理和外部 EGR 等技术持续优化；动力电池重点提升续航能力、快充性能和安全水平；动力总成控制方面，通过动力总成大脑集成控制单元（PICU）实现发动机、变速箱、整车及热管理等控制功能集成，推动动力系统由部件协同向系统级协同优化发展。

7.6.2 代表性动力系统创新实践

（1）DMH 机电一体化架构实现混动系统协同优化

混合动力系统需要在发动机、电机和传动系统之间实现高效动力耦合，以满足纯电驱动、发动机直驱和混联驱动等不同运行模式需求。传统动力总成中，发动机、电机和变速机构通常采用相对独立的设计方式，在系统集成度、动力响应和不同工况下的效率优化方面存在进一步提升空间。针对上述问题，上汽乘用车围绕 DMH 超级混动系统开展机电一体化设计，通过混动专用变速箱、混动专用发动机和控制策略协同优化，提高混合动力系统综合性能。

上汽 DMH 系统采用 P1+P3 双电机构型（图 7-9），其中发动机与 P1 电机采用同轴布置，并将同轴转子与组合分离式离合器模块化集成，实现动力连接与运行模式切换；P3 电机承担驱动辅助和纯电驱动功能。该结构缩短了发动机与发电电机之间的传动链，并支持纯电驱动、串联驱动、并联驱动、发动机直驱以及制动能量回收等多种工作模式，实现不同工况下动力源之间的协调切换。

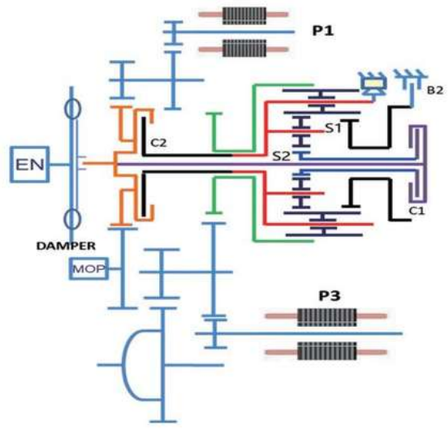


图 7-9 上汽乘用车 P1+P3 双电机混动专用变速箱传动方案简图

在动力模式切换方面，上汽开发了基于 P1+P3 双电机结构的综合协同换挡控制策略，利用电机快速响应能力对换挡过程中的扭矩变化进行补偿，降低换挡过程中的动力波动。同时，针对混动变速箱液压系统效率问题，采用电子油泵与机械油泵集成的双油泵方案：低速起步和高动力需求工况下由电子油泵快速建立油压，高速巡航工况下由机械油泵供油，在满足动力响应需求的同时降低液压系统能耗。

围绕混动系统高效运行需求，上汽同步开发混动专用发动机，通过高效快速燃烧、深度阿特金森循环、智能热管理和外部 EGR 等技术优化发动机高效运行范围，并结合动力系统控制策略实现发动机、电机和电池之间的协同匹配。通过单挡与多挡传动方案组合设计，该混动专用变速箱能够适配不同车型对动力性能和经济性的差异化需求，提高混动系统的平台应用能力。通过机电耦合结构、发动机和控制系统的协同设计，DMH 系统能够适应不同车型对动力性能、经济性和运行品质的需求。

（2）PICU 动力总成大脑实现动力域控制集成

随着混合动力系统复杂程度不断提高，发动机、变速箱、电机、整车控制和热管理系统之间需要进行更加紧密的信息交互与协同控制。传统分布式控制架构中，各控制器分别承担独立功能，控制策略之间的信息传递和协调优化会限制动力系统整体性能提升。因此，如何提高动力系统控制集成度，实现多源信息融合和系统级优化，是混合动力智能控制发展的重要方向。

针对上述问题，上汽乘用车开发了动力总成大脑 PICU（Powertrain Intelligent Control Unit），提出动力总成中央集成式控制架构（图 7-10）。该系统将发动机控制、变速箱控制、整车控制、空调控制和热管理控制等功能进行模块化集成，实现动力总成控制功能由多个独立控制器向集中式控制器演进。

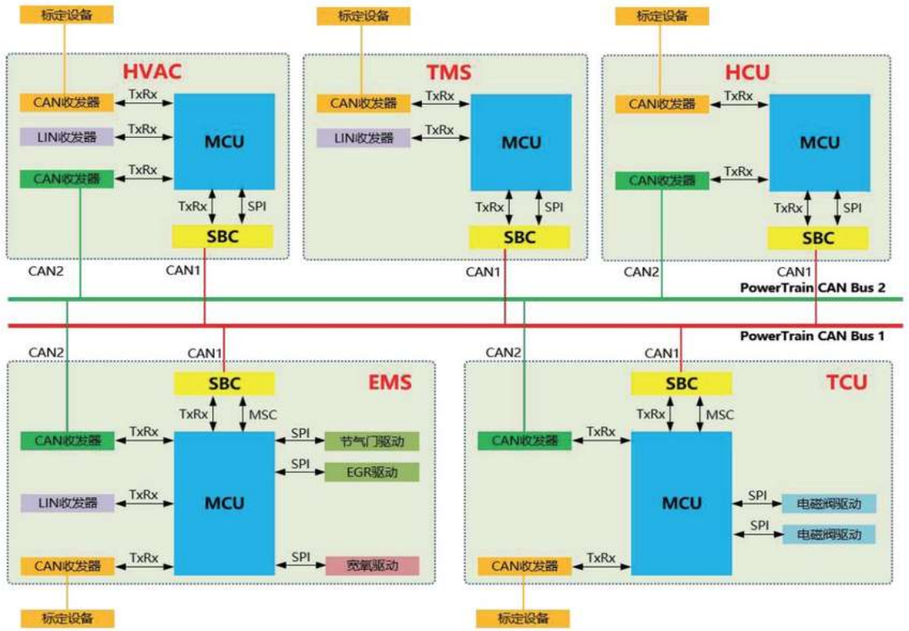


图 7-10 上汽乘用车 PICU 动力总成中央集成控制架构

PICU 硬件采用面向混合动力平台需求设计的主控芯片架构，软件层面基于 AUTOSAR 开发基础软件，并开展底层驱动、发动机喷油点火控制和变速箱控制算法等自主开发，实现从底层软件到应用层控制策略的协同开发。通过控制功能集成，PICU 能够实现动力系统能量、功率和扭矩的协同管理，提高不同动力源之间的协调能力。

在此基础上，上汽进一步推进动力系统与电驱、热管理等功能的协同控制，将智能能量调度和智能热管理策略融入动力系统控制过程。通过控制架构集成和软件算法优化，动力系统能够根据车辆运行状态协调发动机、电机及热管理系统工作，提高系统响应能力和运行效率。

7.6.3 未来动力系统技术展望

面向未来动力系统电动化、低碳化和智能化发展趋势，上汽乘用车将以“珠峰”机电一体化架构（图 7-11）为基础，持续推进混合动力技术演进，实现动力系统由传统油电混合向电驱动深度参与的混合动力体系发展，并覆盖 HEV、PHEV 和 REEV 等不同动力形式，满足不同区域市场和用户需求。



图 7-11 上汽乘用车“珠峰”机电一体化架构

在动力架构方面，上汽乘用车将持续完善混动专用变速箱产品体系，推动混动系统向平台化、多构型方向发展。横置方向将围绕同轴与平行轴系结构，形成单挡和多挡产品组合；纵置方向将进一步开发双电机纵置混动专用变速器，拓展混动系统在不同车型和应用场景中的适配能力。通过机电耦合结构优化和模块化设计，提高动力系统的通用化水平和整车适配能力。

在动力系统全球化应用方面，未来混动技术需要适应不同区域的排放法规、油耗标准、能源条件和用户需求。依托模块化架构设计，DMH 系统将进一步提升对不同市场环境和应用场景的适应能力，支持混合动力产品在全球市场的应用。

随着新一代混动专用发动机、机电耦合结构和动力控制技术持续演进，上汽乘用车将进一步围绕动力高效化、驱动电气化和控制智能化深化技术布局。通过发动机、电驱、动力电池和智能控制系统之间的协同优化，持续提升混动系统的效率、集成度和运行品质。同时，动力总成大脑 PICU 将在现有控制功能集成基础上进一步拓展，向更高集成度的中央控制架构演进，结合智能能量调度和智能热管理等软件功能，提高动力系统整体协同能力。

7.7 奇瑞汽车

7.7.1 动力系统技术创新方向概览

奇瑞汽车持续开展动力系统自主研发，逐步形成以鲲鹏动力为核心，覆盖燃油、混合动力和纯电驱动等多种动力形式的技术布局。围绕不同区域市场和车型的应用需求，当前重点推进混动专用发动机高效化、混动系统多构型适配以及能量管理与热管理协同优化，强化发动机、电驱和控制系统之间的匹配。

在混动系统架构方面，奇瑞以鲲鹏 C-DM 平台为基础，形成面向节能、高性能和复杂工况等不同需求的产品布局。通过单挡、三挡等混动专用变速箱方案，匹配不同车型对动力输出、运行效率和系统集成的要求。其中，多挡方案通过机械速比调整拓展发动机参与驱动的工况范围；单挡方案则侧重结构简化与高效电驱，并结合能量管理策略协调发动机和电机运行。

在发动机方面，奇瑞围绕高效燃烧、废气再循环、低摩擦和热管理等方向开展混动专用化开发。通过进气系统、燃烧室和点火喷射系统的协同设计，改善高稀释条件下的燃烧速度与稳定性，拓展发动机高效运行范围。在此基础上，鲲鹏天擎高膨胀比发动机进一步探索热力循环与机械结构协同优化，通过改变活塞运动规律扩大膨胀做功过程，并与燃烧、增压及热管理技术相结合。

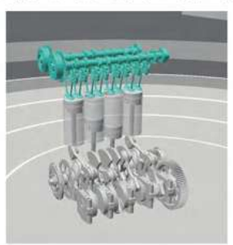
在控制与开发方法方面，奇瑞结合标准测试工况和典型用户工况开展动力系统匹配与控制策略优化，兼顾燃油经济性、动力性能以及振动与噪声表现。同时，围绕动力系统热管理中的多部件耦合问题，开展物理机理与数据驱动融合的模型开发及强化学习控制研究，利用模块化仿真和台架、整车试验支持热管理方案设计与控制策略验证。

7.7.2 代表性动力系统创新实践

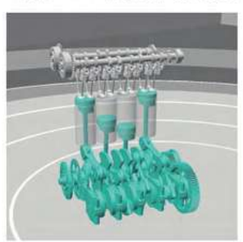
（1）双曲三联动机构实现压缩膨胀过程非对称优化

提高膨胀比是提升汽油机热效率的重要技术路径。传统发动机基于曲柄连杆机构，其压缩行程和膨胀行程由固定几何关系决定，通常通过进气门早关或晚关等方式缩短有效压缩过程，实现米勒循环，使有效膨胀比高于有效压缩比。但该方式主要改变气体交换过程，活塞实际运动规律仍受到传统曲柄连杆机构约束，难以进一步拓展实际膨胀做功行程。随着混合动力系统能够通过电机补偿部分动力需求，发动机无需始终兼顾全工况高功率输出，为突破传统曲柄连杆机构约束、探索新的热力循环实现方式提供了条件。

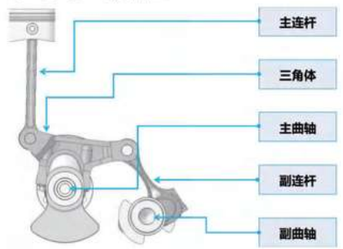
针对传统曲柄连杆机构压缩过程与膨胀过程难以独立优化的问题，奇瑞鲲鹏天擎混动专用发动机采用双曲三联动机构，从机械运动层面改变活塞位移规律，实现压缩过程与膨胀过程的非对称设计（图 7-12）。该机构在传统主连杆和主曲轴传动体系基础上，引入三角体、副连杆和副曲轴，通过主曲轴、副曲轴及多连杆机构之间的协同运动控制活塞运动轨迹，使膨胀做功行程长于进气压缩行程。



(a) 常规方案：通过配气机构实现米勒循环



(b) 奇瑞方案：通过双曲三联动机构实现阿特金森循环



(c) 双曲三联动机构关键构件

图 7-12 双曲三联动机构实现超高膨胀比技术示意图

与传统方案主要依靠配气机构调整有效压缩过程不同，双曲三联动机构直接改变活塞运动规律，使发动机能够从机械结构层面实现类似阿特金森循环的压缩膨胀过程。通过优化曲柄连杆运动关系，该机构可使膨胀做功行程达到压缩行程的约 1.5 倍，进一步拓展膨胀做功过程。在此基础上，发动机进一步结合缸盖侧米勒循环、高 EGR 率、高效燃烧、增压和热管理等技术，对燃烧过程、废气能量利用及系统运行进行协同优化。

通过延长膨胀做功过程，该方案能够进一步利用燃烧后期缸内气体的膨胀能力，减少排气阶段的能量损失。目前，该发动机已进入整车搭载验证阶段。

（2）机理融合数字模型与强化学习控制提升动力系统热管理开发效率

动力系统热管理涉及发动机、电机、变速箱及多个执行部件之间的多变量耦合过程，需要在复杂工况下同时满足能效、安全和性能需求。传统热管理研发主要依靠物理机理模型和试验标定，其中机理模型具有较好的物理可解释性，但计算速度较慢，难以满足快速迭代开发需求；纯数据驱动模型虽然计算效率较高，但缺少物理约束，在工程应用中存在稳定性和泛化能力不足的问题。因此，如何兼顾模型精度、计算效率和工程可靠性，是动力系统智能热管理开发中的重要问题。

针对传统热管理仿真与控制优化方法的局限，奇瑞提出机理融合数字模型与深度强化学习控制方法，构建融合物理机理模型和数据驱动算法的动力系统热管理仿真与优化平台。该方法以物理机理模型作为基础框架，引入深度强化学习算法动态修正关键表征参数，通过模型状态与实验数据之间的误差反馈优化模型参数，使仿真模型兼具物理可解释性和数据驱动模型的计算效率。

在仿真平台建设方面，针对动力系统热管理关键部件建立模块化模型体系，包括发动机热模型、变速箱热模型、电机温升与效率联合模型、换热器模型以及电子水泵、节温器、电子风扇等执行器模型。各模型可根据不同动力系统配置进行组合，支持发动机独立热管理、发动机与混动系统联合热管理以及电机热管理等多种系统级仿真分析。

在控制策略方面，基于高精度仿真环境构建强化学习智能体，通过与模型环境交互学习优化控制动作序列，以系统综合能耗最小为目标设计奖励机制，实现电子水泵转速、风扇启停和节温器开度等执行器的协同控制。该方法通过强化学习不断优化控制策略，提高复杂工况下动力系统热管理效率。

同时，奇瑞建立了低温、常温和高温环境下的台架及整车热管理试验验证体系，采集高精度动态数据用于模型训练和验证，并对优化后的热管理控制策略进行效果评估。在验证工况下，该方法相较传统规则控制实现系统功耗降低 5%以上；模型实现冷却液出口温度、机油温度平均误差≤3 ℃，代表性壁温误差≤5%。此外，仿真平台在 WLTC 工况下单次仿真时间由传统机理模型的 30 min 以上缩短至 5 min 以内，提高了热管理方案开发和优化效率。目前，该项目处于研发验证阶段。

7.7.3 未来动力系统技术展望

面向动力系统电动化、低碳化和智能化发展，奇瑞将继续围绕高效发动机、混动系统协同优化和智能控制推进技术研发，并结合全球不同区域的能源条件、法规要求和使用场景，完善多种动力路线并行的布局。

在发动机方面，混动专用化将为热力循环和燃烧系统优化提供更大的设计空间。奇瑞将继续围绕高膨胀比、高效燃烧、增压、热管理和低摩擦等技术开展研究，提高发动机效率并拓展高效运行范围。当前，高膨胀比发动机已开展整车搭载验证，其后续工程应用需要进一步协调膨胀做功、燃烧稳定性和排气能量利用之间的关系，同时兼顾新型机构的机械损失、可靠性及整车布置要求。

在混动系统方面，未来研发将进一步加强发动机、混动变速箱和电驱系统的协同匹配。针对轿车、SUV及越野等不同车型，需要结合纯电驱动、发动机直驱和持续动力输出需求，合理选择动力构型、机械挡位和电机配置。在提高电驱效率与功率密度的同时，通过平台化、模块化开发提高核心部件的共用程度，并优化模式切换和能量分配策略，兼顾不同工况下的能耗、动力响应与运行平顺性。

在智能控制与研发方法方面，动力系统优化将进一步加强能量管理、热管理和动力控制之间的协同。奇瑞已开展机理融合数字模型与强化学习热管理控制研究，后续工程应用需要在提高仿真效率和控制效果的同时，重点解决模型对不同环境、载荷及系统配置的适应性，以及控制算法的实时性和鲁棒性问题。通过完善仿真、台架与整车试验之间的数据反馈，提高模型和控制策略在实际运行条件下的可靠性。

在全球市场与能源适配方面，不同区域的燃料供给、充电设施、法规和用户需求存在差异，燃油、混合动力和纯电动等动力路线仍将具有不同的应用空间。奇瑞将结合区域需求推进动力平台适配，并关注氢等能源路线的应用条件。相关开发需要加强对燃料品质、气候环境、道路条件和使用工况的适应性验证，在保持平台共用能力的基础上，针对不同市场配置动力系统及控制策略。

第八章 全球视野、创新跃进：汽车动力系统未来发展展望

全球汽车产业仍处于能源转型、技术演进与产业格局调整相互交织的发展阶段。随着区域需求差异长期存在、先进技术加快普及，汽车动力系统正呈现多路线并行、创新深化和全球化发展的特征。结合本书的技术梳理与创新实践，未来可重点关注以下四个方面。

（1）全球需求多元化推动动力技术路线长期并行

全球不同区域在能源结构、法规政策、基础设施、产业基础和用户需求方面存在显著差异，动力技术转型难以沿单一路径同步推进。未来较长时期内，内燃机及低碳燃料、混合动力、纯电动等多种动力路线仍将并行发展，并继续沿动力高效化、驱动电气化、控制智能化和能源多样化方向演进。不同技术路线的应用范围和市场结构将随区域条件持续调整，企业需要根据具体市场和使用场景配置相应的动力技术，竞争重点也将更多体现为多种技术路线之间的组合应用、系统匹配和综合优化能力。

（2）从产业优势走向技术优势，原创创新的重要性进一步提升

中国汽车动力产业依托新能源汽车快速发展、完整产业链和较强的工程迭代能力，已经形成较为明显的产业竞争优势，但产业规模扩大和先进技术普及并不会自然转化为长期技术优势。随着高效发动机、电驱动、混合动力、动力电池和智能控制等成熟技术加快扩散，不同企业之间的技术路线和产品方案逐渐趋近，仅依靠成熟技术应用和参数提升能够形成的差异有所减小。下一阶段仍需持续提高效率、性能、可靠性和成本竞争力，同时加强机械结构、系统架构、材料、控制方法和研发工具等领域的原创技术积累，并通过基础研究、核心技术和长周期研发投入，使已有产业优势逐步沉淀为持续的技术优势。

（3）AI 赋能与跨域协同拓展动力系统创新边界

随着动力系统复杂度提高，发动机、电机、电池、功率电子、热管理和整车控制之间的联系不断增强，研发与控制需要处理更多变量和运行场景。AI 开始进入模型构建、设计寻优、标定测试、状态估计和预测控制等环节，用于提高复杂模型计算、参数搜索和多源信息处理效率，动力、底盘和热管理之间的信息共享与协调控制也不断增加。与此同时，汽车动力与低空动力在电机、电池、功率电子、混合动力和热管理等领域具有一定技术共通性，相关技术和工程经验可根据不同应用需求相互借鉴，但其应用仍需满足实时性、安全性、可靠性和工程验证要求。

（4）从产品出海走向体系全球化，全球适配能力更加重要

随着中国汽车企业持续扩大海外市场，全球化正在由整车和产品输出延伸至研发、生产、供应链和经营体系。不同国家和地区在法规标准、能源基础设施、气候道路条件、消费者需求和本地化政策等方面存在差异，动力系统及整车产品需要根据区域条件进行针对性适配。企业因此需要完善全球法规适配、区域化产品开发、本地研发验证、供应链建设、人才培养和售后服务等能力，在核心技术和平台保持一定共用基础的同时，根据不同市场配置纯电、混动、低碳燃料和热管理方案，并结合当地供应条件优化零部件体系，以提高产品可靠性、法规符合性、供应链稳定性和本地工程能力。