

全域热泵压缩机宽温域性能 与集成方案

站在系统发展对压缩机的需求角度 · 融合智己热管理技术路线

主机厂视角下的压缩机集成

01 行业背景与趋势
冷媒法规、市场格局与电动压缩机技术演进

02 智己热管理平台
ITMS3.0 / ITMS4.0 平台架构与全场景性能实测

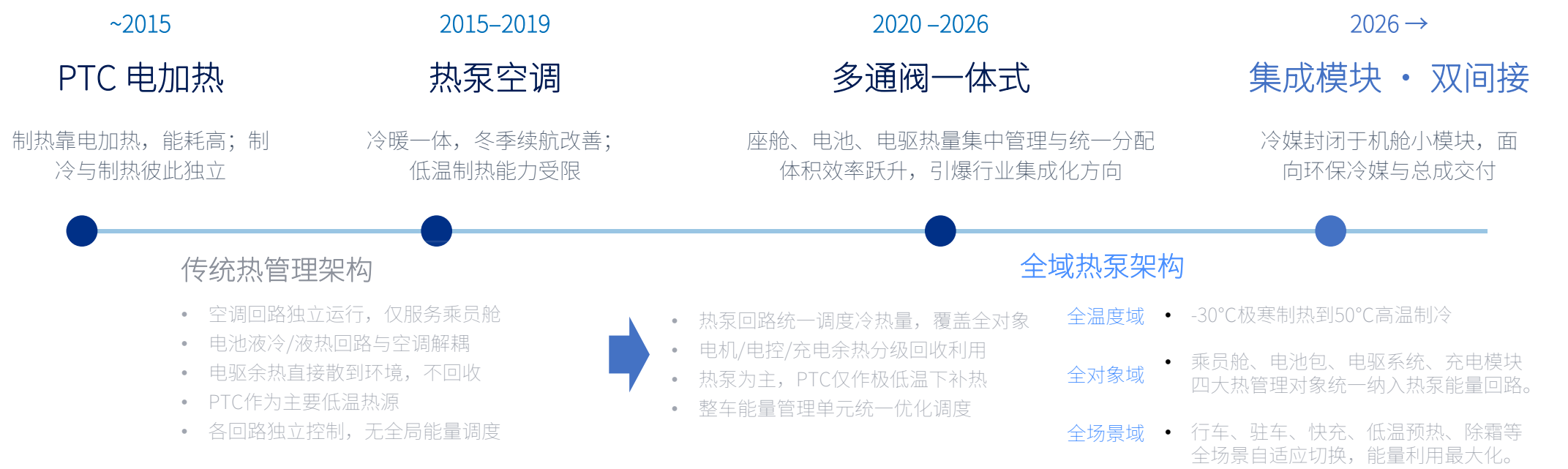
03 双间接系统与智能化
制冷剂封闭集成模块、环保冷媒落地与AI预测式热管理

04 集成视角下的压缩机
需求定义、多负载、电控、NVH、油路、冷媒侧六大命题

05 协同与展望
面向压缩机供应链的联合开发倡议与总结

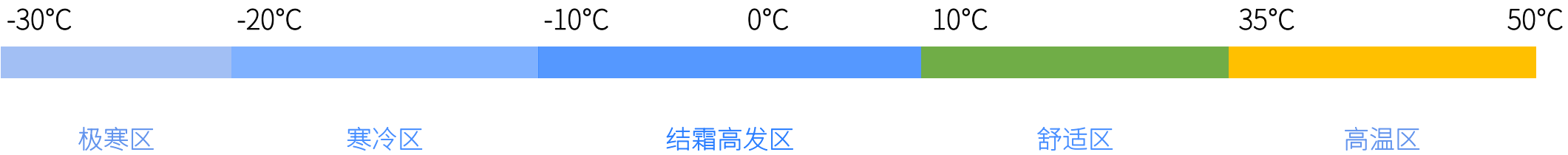
核心观点：压缩机已从单一空调部件升级为整车热管理的"心脏"，其排量、转速、COP与低温能力必须按整车全场景热负荷来定义。

行业演进：新能源整车热管理的四个阶段



一体化是行业发展方向——车企已普遍应用一体化热管理，竞争重心转向"集成深度"。压缩机作为系统中的心脏，其技术定义须从部件级上升到系统级。

宽温域工况：-30℃至50℃全气候覆盖的工程需求



低温制热需求

- 20℃以下：压缩机压比超16
- 10℃至0℃：室外换热器结霜，需除霜策略
- 电池低温预热：从-20℃升至10℃需18min

常温能效需求

- 10℃至30℃：热泵COP目标 ≥ 3.5
- 余热回收优先级：电驱>电池>环境
- 多回路协同，能量梯级利用

高温制冷需求

- 40℃以上：冷凝压力逼近上限，需高效散热
- 快充工况：电池冷却功率需求 $\geq 6\text{kW}$
- 座舱快速降温：出风温度 $\leq 12^\circ\text{C}$

设计目标：单一压缩机平台覆盖-30℃至50℃全工况，-20℃高压比制热COP ≥ 1.8 ，35℃制冷COP ≥ 2 ，全工况平均能效提升40%。

冷媒技术路线对比：宽温域性能与工程可行性的权衡

冷媒	类型	GWP	可燃性	70℃ “饱和压力”	标准沸点	系统特点与压缩机要求
R134a	HFC · 当前主流	~1430	A1 不可燃	21BarA	-26.1	GWP>150，面临限控；压缩机技术成熟
R1234yf	HFO · 当前出口主流	~4	A2L 微可燃	20.4BarA	-29.4	成本高；与R134a压缩机架构兼容
R454C R474A R457C	混合工质	1~146	A2L 微可燃	28.8~32.2BarA (R454C为例)	-37~-46	过度方案，可半间接/全间接，适配290压缩机
R744 (CO2)	自然工质	1	A1 不可燃	120-140bar	-78.6	制热强、跨临界高压（14-16MPa）；需耐高压压缩机结构+泄漏管控
R290 (丙烷)	自然工质	~3	A3 易燃	28.3BarA	-42	制冷制热均衡；需小充注量+封闭模组+泄漏安全管控

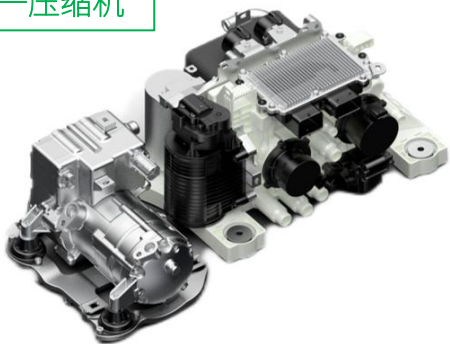
路线判断：《基加利修正案》下 R134a（GWP=1430）将加速淘汰；过渡期可采用R1234yf/混合工质，长期以 CO2/ R290 自然工质为深度脱碳终极选择。压缩机的耐压等级、密封技术与安全设计须提前布局。

智己热管理平台：ITMS3.0 与 ITMS4.0 双平台

ITMS3.0 · 纯电一体式平台

集成电子水泵、电子膨胀阀、多通水阀、换热器、压缩机集成加热器、智能执行器等50个关键子零件，实现所有高低压驱动子零件全部可通过OTA升级持续迭代功能。

三合一压缩机



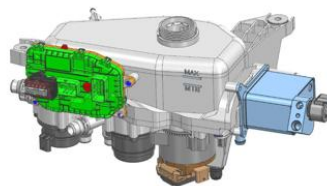
高度集成化：

设计开发采用AI寻优设计、内部流道与阀类集成运用超算求解，以数学之美重构热流轨迹

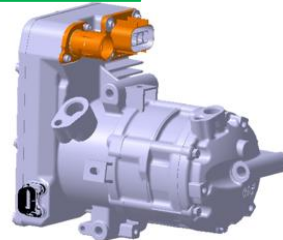
智能可进化：系统高、低压驱动部件可实现OTA升级、智能预测

- 实现剂侧流道板最精益设计：
- 挤压激光焊工艺、重量仅仅0.82kg、系统泄漏量6.4g/y
- 夏季50℃快速制冷+冬季-30℃热泵、膜加热、电机创热多热源制热，超宽温域热管理

ITMS4.0 · 增程热管理平台



二合一压缩机



□ 平台化：

- 满足热泵和非热泵系统架构；
- 满足多回路热量耦合利用需求；
- 满足增程和插电混动散热需求；

□ 集成度

- 集成关键子零件**九通比例阀**、低温水壶、电机水泵、电池水泵、WCAC水泵，**chiller**、水水换热器、EXV，温度传感器，ITMSA域控

□ 智能化

- 全链路OTA，减少整车域控资源需求；

共同底座

整车级通用软件架构：增程与纯电同平台统一部署 · 支持智能可进化，可对高压/低压部件 OTA 升级 · 智能健康管理及预测 · 压缩机作为统一执行器纳入域控协同

全场景性能实测：从极寒到超快充的全工况覆盖

10 min

车内快速达舒适

ITMS3.0 实测
38°C~50°C 环境全覆盖

40°C+

前端双级散热

智能切换串/并联散热
能效与降温速度双优

×2

低温快充效率

增程 ITMS4.0
海拉尔-20°C 实测

-15~-30°C

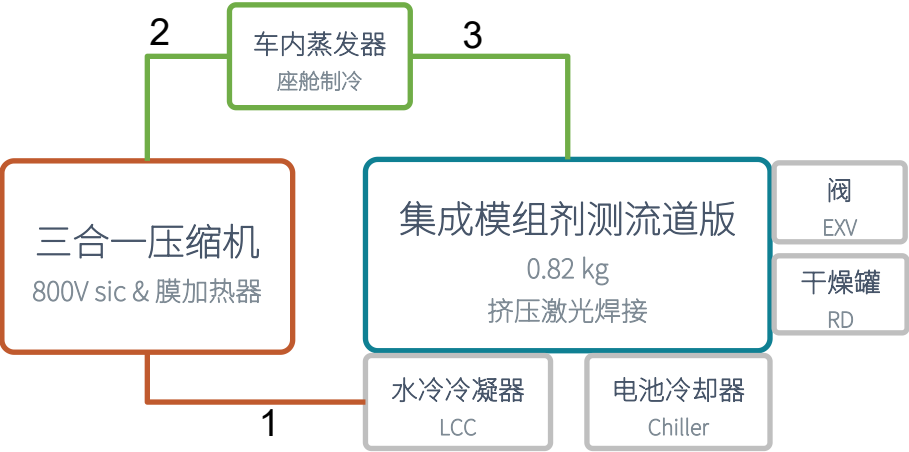
舱内与电池预热

发动机热源+电驱余热
+充电储热协同

压缩机视角：全工况性能的背后是压缩机宽转速范围（600-12000rpm）、大压比能力和全工况COP map的支撑。10分钟快速降温要求压缩机高转速大冷量；低温预热要求压缩机大压比热泵取热；快充冷却要求压缩机持续大功率输出。

一体化系统架构：极简剂侧回路与流道板集成

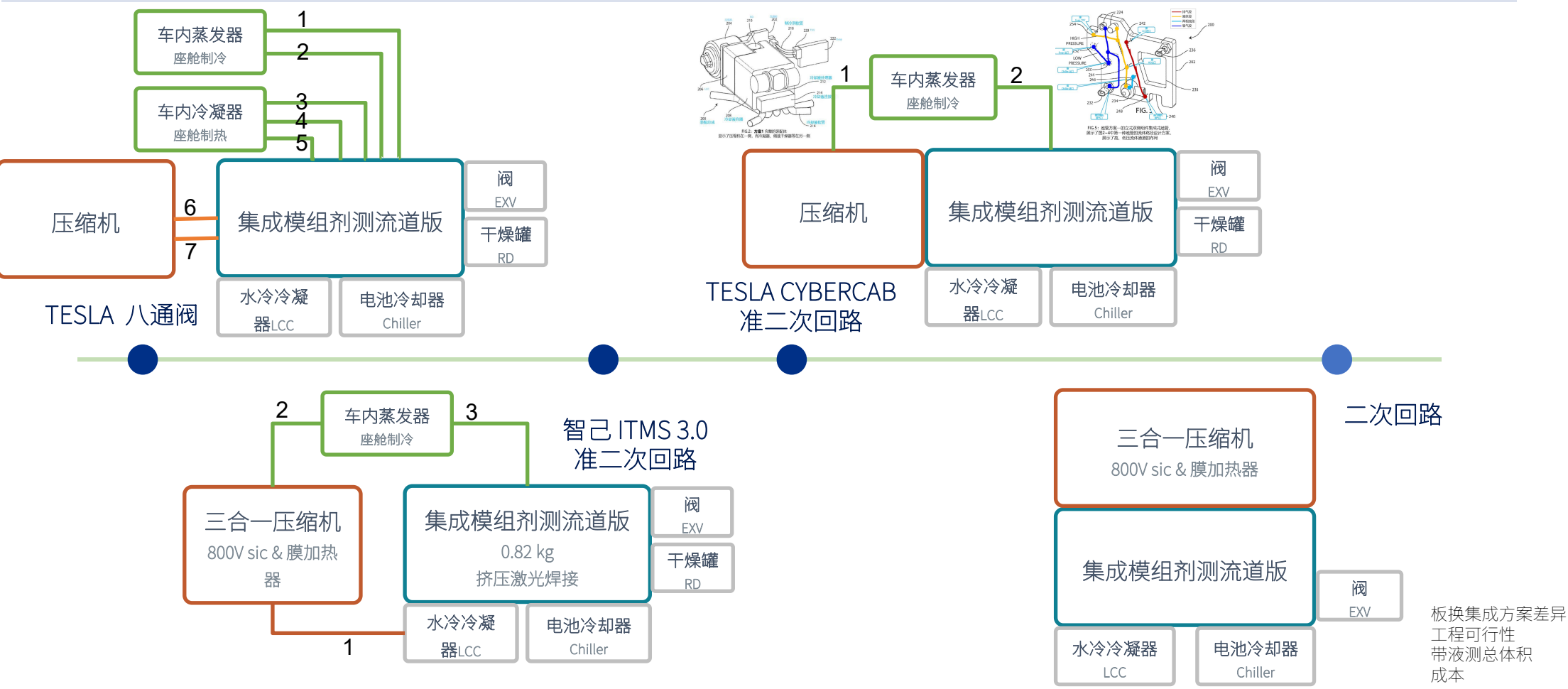
水侧采用间接循环结构；制冷剂侧经流道板分配至蒸发器、电池冷却器，全部集成于一体化热管理系统。



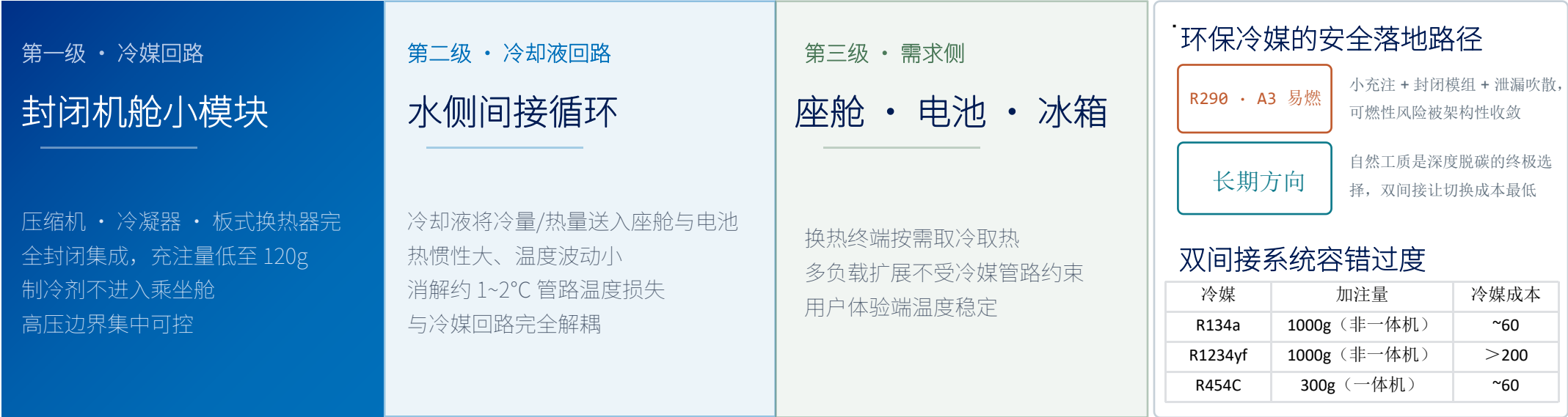
3 根
空调管路连接，极简回路带来极低
泄漏量
制冷准二次系统，适配R134A、
R1234YF、混合工质

ITMS3.0系统对混合工质的适应性：系统回路极简及低泄漏量，有利于混合工质长时使用组分的稳定，需压缩机适配混合工质做适应性开发，其次部件接口从"标准化"走向"定制化协同"可进一步提升集成度。

双间接系统：准二次回路和二次回路的演进



双间接系统：制冷剂封闭于机舱小模块的架构基座



"冷媒-冷却液-空气"双级换热——供应商完成系统充注后整体装配至车辆，整车装配复杂度下降；冷媒路线选择，正在从"部件约束"变成"架构红利"。

对压缩机的要求：封闭模组内的振动解耦、热管理协同、吸排气接口标准化与总成交付能力

AI 预测式热管理：从被动反应到主动预判



AI 预测式热管理：压缩机控制前移

被动反应（当前）

传感器触发 → 系统响应；温度波动大，压缩机频繁启停、工况点漂移

预测模式（演进方向）

- 整车算力 + 云数据，地图/导航预判工况
- 提前调度压缩机：预启动 · 渐进升速 · 避开高负荷点
- 车云融合远程大数据诊断与标定，策略持续迭代

演进方向：热管理趋向无感化与无形化——成为具备自我学习、自我优化能力的"人机环境保障系统引擎"，压缩机从执行器升级为智能协同节点。

热管理系统演进与压缩机技术方向

五大系统趋势共同驱动压缩机从"制冷部件"向"全域热管理核心引擎"演进



压缩机不再是独立选型的部件，而是由系统架构反向定义的核心子系统

六大技术要求：系统驱动力、技术内涵与整车收益

① 宽温域高效运行 驱动力：热泵化 · 全域热管理 内涵：-20℃高压比制热COP≥1.8，35℃制冷COP≥2，全工况平均能效提升40%，高压比热泵制热，全转速范围效率优化而非单点额定 收益：全球化气候适配，全季节能效最优，低温快充效率翻倍	② 高压化与800V适配 驱动力：800V平台 · 超充普及 内涵：SiC控制器效率≥98%，宽电压平台兼容，EMC达标，高压绝缘与安全防护 收益：超充兼容，线束减重，系统效率提升，支持下一代高压平台	③ 低NVH与声品质 驱动力：电动车无发动机噪声掩蔽 内涵：运行噪声≤52dB，三级模态避频，轴系动力学优化，压力脉动抑制 收益：座舱静谧性，用户体验差异化，满足日益严格的NVH国标
④ 环保冷媒兼容 驱动力：全球法规 · GWP归零趋势 内涵：R290架构就绪，低充注（120g）低泄漏（<1g/年），高压安全设计 收益：满足全球法规，合规先行，品牌环保形象，长期成本可控	⑤ 高集成度与轻量化 驱动力：一体化热管理 · 空间约束 内涵：电控集成，换热器集成，无管化，封闭模组总成交付 收益：布置空间释放，整车减重，装配简化，成本下降	⑥ 智能预测与自诊断 驱动力：智能化 · 软件定义汽车 内涵：工况预判预启动，健康监测与泄漏诊断，控制策略OTA迭代 收益：无感化体验，故障率下降，全生命周期能效优化

-20℃高压比制热COP≥1.8，35℃制冷COP≥2

行业数据与智己实践

学术验证（西安交大2026）

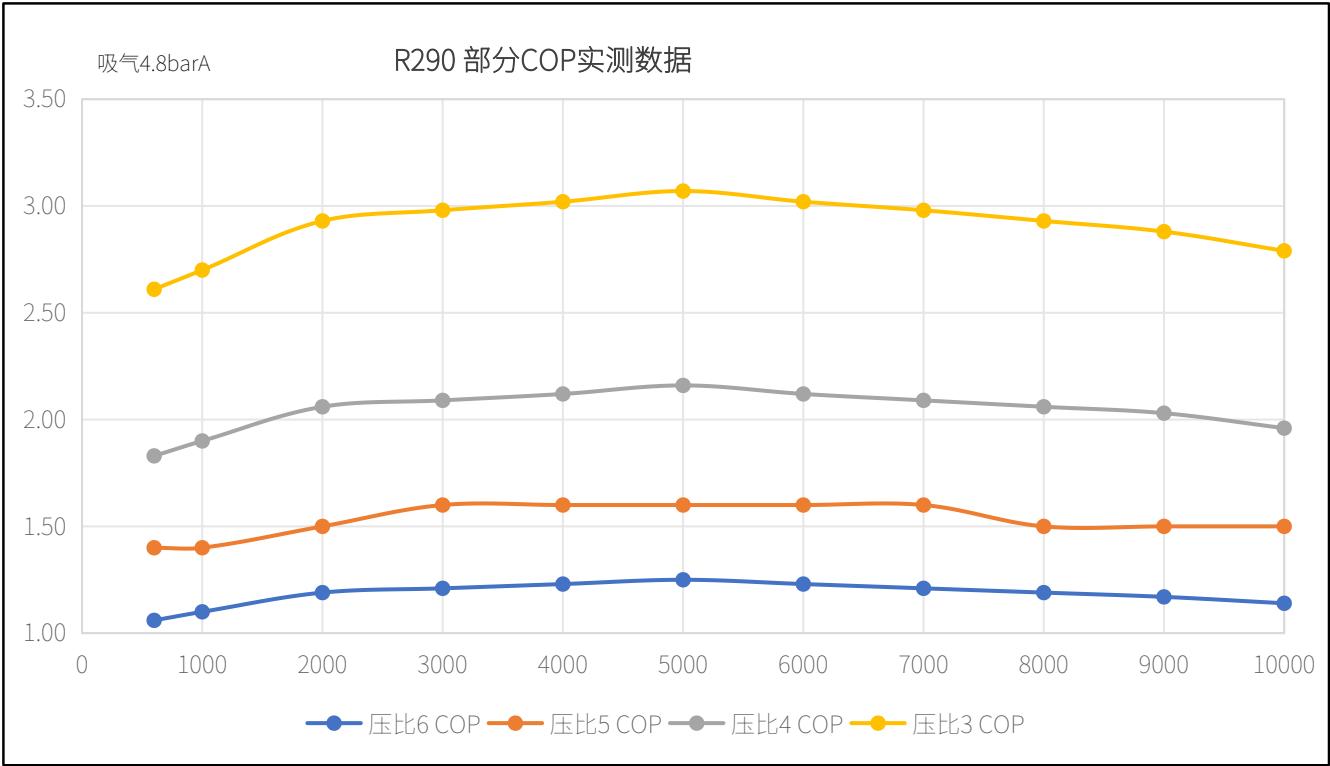
- R290回热-补气耦合：-30℃ COP 1.86
- 50℃制冷回热循环COP较补气+7.6%

涡旋压缩机补气特性

- 38cc三维CFD模型，误差<9.5%
- 补气压力每升0.1MPa，制热量+3.2%

智己ITMS实践

- -30℃ R290补气增焓台架测试制热量最大↑38%



COP提升还有较大提升空间

无发动机掩蔽下的三级模态避频与声品质标定

工程机理：三类噪声源耦合

机械噪声

- 1阶振动：转子不平衡+涡旋切向力
- 2阶振动：轴系弯曲模态共振
- 典型轰鸣带：2400/3500rpm峰值

气动噪声

- 排气压力脉动（基频=转速×气缸数）
- 阀片敲击与气流再生噪声
- 中高频尖锐啸叫

电磁噪声

- 径向电磁力波（转子辅助槽）
- PWM开关频率及其谐波
- 纯电无掩蔽效应，感知阈值低

技术方案：三级模态避频体系

压缩机级（源头控制）

- 平衡块优化：动平衡G0.4级
- 转子辅助槽：削弱径向电磁力波
- 月牙槽通流面积优化，压力脉动↓

部件级（路径控制）

- 无管化后传递路径减少
- 双级减震支架

整车级（终点控制）

- 固定横梁刚体模态提升
- 声品质目标前置定义，声学包设计

行业数据与智己实践

学术案例（汽车工程2024）

- 压缩机1阶弯曲模态240.2Hz→车内轰鸣
- 安装点加强后共振带消失

优化效果

- 平衡块优化：振动改善率95.8%
- 声学包：中高频噪声↓3~5dB
- 端帽消声结构：整机≤75.2dBA

智己ITMS实践

- 运行噪声目标≤52dB(A)@1m
- 三级模态共测共评体系
- NVH目标前置到部件定义阶段

一体无管化后传递路径减少，模组质量提升和低温工况压比的降低，对整车NVH有利，但声速、密度带来的气动噪音增加，需针对性优化。

冷媒系统差异对压缩机的需求

对比维度	R290（丙烷 · 天然工质 · A3）	R454C（R32/R1234yf · A2L）
1. 安全等级	A3高度可燃，需防爆电机	A2L微燃，无防爆要求
2. 工作压力	极限工况压力25BarA提升至32BarA	极限工况压力25BarA提升至33BarA
3. 容积制冷量	比R134a高；可减排量，但电机能力提升。	排量与传统压缩机接近，电机能力提升。
4. 排气温度	低，约84℃，对润滑油友好；无需额外降温措施	含R32组分，比R134a高约10℃，极端工况可达130℃；
5. COP/能效	等熵压缩功小，压缩机效率可达63.8%	压缩机效率略低；需优化型线
6. 润滑油机回油	系统匹配研究	高低转速回油和油兼容性
7. 温度滑移	纯工质，无温度滑移，相变温度恒定；阀片和流道设计简单	近共沸混合，滑移部分工况达7-8K；需优化吸气缓冲腔防液击
8.密封性能	R290分子小、渗透性强→密封面精度要求提高 · 年泄漏量需<1g/年（充注量仅120g，容忍度极低）	差异不大

从被动反应到预测控制：LSTM车速预判驱动的分层热管理

范式转变：被动→预测

传统被动控制

- 传感器触发→温度到了才响应
- 压缩机频繁启停，工况点漂移
- 温度波动±1~2℃，体验生硬
- 故障发生后才报警，无法预判

预测式控制

- 导航/地图预判：爬坡/快充/天气
- 提前30s预启动+渐进升速
- 避开高负荷工况点，减少启停
- 健康趋势预判，提前预警

技术方案：数据+模型+OTA

LSTM-Attention预测

- 60s历史序列→预测未来10s车速
- 预测精度>92%（温度预测）
- Random Forest故障分类精度96%

分层控制架构

- 上层：MPC模型预测控制（工况预判）
- 中层：多热源调度（电池/电驱/座舱）
- 下层：压缩机转速闭环（±50rpm）

自诊断与OTA

- 振动/温度/电流趋势异常检测
- 无监督聚类识别未知故障模式
- UDS诊断+OTA策略迭代

行业数据与智己实践

学术进展（ACM 2026）

- LSTM-Attention车速预测驱动分层热泵控制
- 60s历史→10s预测，宽温域适用
- 峰值温度降低29.5%（2C快充工况）

预测性维护

- LSTM热预测精度>92%
- IoT+云分析，故障提前7天预警
- 自编码器识别未知异常模式

智己ITMS实践

- 域控CAN FD协同，转速响应<500ms
- 最低稳定转速800rpm，精度±50rpm
- 智能健康管理+预测性维护

面向压缩机供应链的协同倡议：从零件供货到系统总成伙伴

01

联合定义

- 以整车全场景热负荷共库定义排量/转速/COP map
- 共同定义双间接封闭模块的接口与边界
- NVH目标前置到部件定义阶段

02

联合验证

- 台架（-40℃~50℃环境舱）+ 整车极端环境联合测试
- 三级模态与NVH、回油可靠性的共测共评
- 覆盖吐鲁番45℃、中东等极端工况

03

总成交付

- 预充注封闭模块整体装配，简化整车产线工序
- 算法泄漏诊断与健康数据的主机厂-供应商协同
- 整车厂不再承担制冷剂充注工序

总结：热管理的四大核心价值与压缩机的角色定位



压缩机是四大价值的共同基石

宽温域性能决定能效上限，集成架构决定环保与安全边界，智能控制决定体验下限——压缩机技术定义了整车热管理的天花板

感谢聆听 · 欢迎交流与协同开发