



机床行业研究

买入（维持评级）

行业深度研究

证券研究报告

机械组

分析师：满在朋（执业 S1130522030002） 分析师：李嘉伦（执业 S1130522060003）

manzaipeng@gjzq.com.cn

lijialun@gjzq.com.cn

从“04专项”复盘展望 AI 时代的机床产业政策

投资逻辑：

复盘：“04专项”政策目标为核心技术国产化突破，奠定国产替代基础

什么是“04专项”：《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020年）》确定了16个国家科技重大专项，其中“高档数控机床与基础制造装备”是第四项，一般简称为“04专项”，通过“产、学、研、用”结合的方式以课题的形式加速机床核心技术国产化突破。同时推出了六项配套政策和措施，包括“应用示范工程”资金补贴、产品加入《政府采购自主创新产品目录》并与财政性资金支持挂钩、设备添置费部分抵扣所得税或加速折旧等鼓励措施，助力专项顺利落地。

“04专项”为机床行业的国产替代奠定基础：在“04专项”支持下，国内高档机床、高档数控系统、功能部件等多个领域实现突破，根据新华财经信息，“04专项”实施让高档数控机床平均无故障时间间隔（MTBF）实现了从600小时到2000小时的跨越，精度指标提升20%；国产高档数控系统在国产机床中市场占有率由专项实施前的不足1%提高到31.9%；五轴摆角铣头等功能部件的市场占有率由不足10%提升至30%以上。机床行业有较多上市公司参与了“04专项”课题，加速技术实力进步。

“04专项”与时俱进，已经出现了较多智能化相关内容：“04专项”2009年的第一批课题主要围绕机床与核心零部件相关产品开发展开，到了2018年的课题可以看到一方面课题的内容不再仅限于单个产品，而是围绕前期研制的机床、数控系统在专项重点领域（比如汽车行业）的实际应用场景展开；一方面数字化、智能化、大数据词频明显提高，开始要求在智能化相关技术上也实现突破。

展望：AI时代的机床产业政策目标有望过渡为在新技术领域实现突破，数控系统重点关注

机床行业AI技术怎么落地？数控系统有望成为AI技术落地核心场景：数控系统的运行涉及大量数据的获取和处理，我们目前看到遗传算法、人工神经网络、数字孪生等技术已经在数控系统插补、热误差补偿、路径规划等领域不断推进研发，目标是打造一个具有自主感知、自主学习、自主决策、自主执行能力的智能化数控系统。

国内外数控系统厂商加码布局，AI技术或成新的核心竞争点：目前西门子、发那科、海德汉等海外头部数控系统厂商均积极加大AI技术应用，例如西门子推出了以数字孪生技术为基础搭建的工业云平台，发那科推出了采用机器学习技术的AI伺服调整、AI热误差补偿。国内数控系统领军企业华中数控推出的华中9型数控系统，集成了AI芯片，融合了AI算法，将人工智能、物联网等新一代智能技术与先进制造技术深度融合，在自主感知、自主学习、自主决策、自主执行等方面实现了较大突破，AI技术目前快速发展或带来行业新一轮洗牌机会。

AI时代的机床产业政策目标有望过渡为在新技术领域实现突破：在CNC技术逐步走向成熟导致行业洗牌背景下，日本机床产业政策主要目标从实现核心技术国产化转换至在新方向关键核心技术实现突破，加速了日本数控技术发展，助力日本机床产业实现对欧美的追赶和反超。在当前AI技术快速发展背景下，我们认为国内政策支持也有望逐步向在新方向实现关键核心技术突破过渡，加速AI技术在机床行业的产业化落地。

投资建议与估值

在当前AI技术快速发展背景下，国内机床产业政策支持目标有望从核心技术国产化过渡至新方向关键核心技术突破，数控系统有望成为AI技术落地核心场景，建议重点关注数控系统领军企业华中数控，同时建议关注有望受益机床产业政策支持的科德数控、海天精工、纽威数控、豪迈科技。

风险提示

新技术推广应用不及预期、政策支持力度不及预期



内容目录

1. 复盘：“04 专项”政策支持目标为核心技术国产化突破.....	5
1.1 “04 专项”属于国家科技重大专项，向机床“自主可控”发力	5
1.2 “04 专项”支持下，高档机床、高档数控系统、功能部件等多个领域实现突破.....	8
1.3 “04 专项”课题与时俱进，已经出现了较多智能化相关内容.....	9
2. 展望：AI 时代的政策导向有望过渡为新技术领域实现突破，数控系统重点关注.....	10
2.1 从数控技术出现后，机床的技术升级就与电子、信息技术密切相关.....	10
2.2 机床行业 AI 技术怎么落地？数控系统有望成为 AI 技术落地核心场景.....	12
2.3 遗传算法、人工神经网络等技术已在数控系统插补、热误差补偿、加工路径优化等领域持续推进研发.....	15
2.3.1 人工神经网络与遗传算法：强化数控系统插补、热误差补偿能力.....	15
2.3.2 视觉模型：在工件尺寸测量与定位、机床回转轴误差检测等领域有较好应用前景.....	18
2.3.3 数字孪生模型：在可靠性分析、加工路径优化等领域进一步强化.....	19
2.4 全球数控系统厂商积极加码布局，华中数控推出“大模型”数控系统，AI 技术应用将成为新的竞争点.....	22
2.5 结合日本机床产业政策复盘看，在技术重大变革时期的产业政策核心目标为在新技术领域实现突破.....	27
3. 投资建议.....	28
4. 风险提示.....	28

图表目录

图表 1：“高端数控机床与基础制造装备”是重大科技专项第 4 项简称“04 专项”.....	5
图表 2：“04 专项”指导原则围绕“产学研用”展开.....	6
图表 3：总体发展目标主要关注产品开发/创新能力，实现高国产化率满足下游需求.....	6
图表 4：同步推出六条政策和措施助力专项实施.....	7
图表 5：“04 专项”课题采用申报的形式由企业自筹+地方配套资金+中央财政投入经费支持完成.....	7
图表 6：“04 专项”支持下，高档机床、高档数控系统、功能部件等多个领域实现突破.....	8
图表 7：科德数控参与多个“04 专项”项目.....	8
图表 8：2009 年第一批课题申报指南较少出现智能化、数字化、大数据等词.....	9
图表 9：到 2018 年度课题申报指南，数字化、智能化、大数据词频已经较高.....	10
图表 10：机床跟随工业革命技术迭代升级.....	11
图表 11：机床技术升级体现在机床结构、主轴、驱动、控制等方面.....	11
图表 12：数控技术的出现是带来了机床行业最大的技术迭代.....	12
图表 13：机床加工效率大幅提升.....	12
图表 14：机床加工精度大幅提升.....	12
图表 15：CNC 系统组成.....	13



图表 16:	数控系统软件构成	13
图表 17:	数控系统控制原理	14
图表 18:	数控系统在运行过程中实际上涉及大量数据的获取和处理	14
图表 19:	数控系统在 AI 技术加持下实现机床智能化	15
图表 20:	智能化数控系统软件架构	15
图表 21:	BP 神经网络模型	15
图表 22:	BP 神经网络算法流程	15
图表 23:	遗传算法流程	16
图表 24:	直线插补、圆弧插补为数控系统最常见的插补功能	16
图表 25:	基于神经网络的曲线插补加工流程	17
图表 26:	采用神经网络插补可降低误差	17
图表 27:	分段式丝杠热误差补偿技术路线	17
图表 28:	神经网络热误差建模流程图	18
图表 29:	加入视觉系统后的五轴机床关键部件固联坐标系	18
图表 30:	坐标系之间的转换关系	18
图表 31:	基于视觉模型实现机床自主感知和自动更新轨迹加工系统工作流程	19
图表 32:	数字孪生机床体系架构	20
图表 33:	基于数字孪生的数控机床可靠性分析信息物理融合系统框架	21
图表 34:	数字孪生模型可实现加工路径优化	22
图表 35:	具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行的数控系统为未来发展趋势	22
图表 36:	西门子基于数字孪生技术搭建的工业云平台	23
图表 37:	发那科采用机器学习的 AI 伺服调整功能	23
图表 38:	发那科采用机器学习的 AI 热误差补偿功能	23
图表 39:	海德汉 TNC7 可实现图形化编程	24
图表 40:	海德汉 TNC7 位置自适应控制技术	24
图表 41:	华中数控数控基于华中 9 型数控系统打造的智能体系架构	24
图表 42:	华中数控“指令域”大数据分析方法	25
图表 43:	华中数控基于融合建模的轮廓误差补偿技术	25
图表 44:	华中数控基于数字孪生虚拟加工预测结果实现自主决策	26
图表 45:	华中数控双码联控技术实现了“G-代码”和“i-代码”联动控制	26
图表 46:	华中 9 型数控系统包含了基于大模型技术的故障诊断功能	27
图表 47:	华中 9 型数控系统有望继续走进更多机床厂商	27
图表 48:	日本借助 CNC 技术实现了和欧美国家技术差距快速缩小	27
图表 49:	数控时代来临后日本的数控化率快速提升，后持续全球领先	27
图表 50:	在新技术出现导致行业洗牌背景下，日本机床产业支持政策导向也发生了变化	28



图表 51： 重点关注公司盈利预测 28



1. 复盘：“04 专项”政策支持目标为核心技术国产化突破

1.1 “04 专项”属于国家科技重大专项，向机床“自主可控”发力

《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006-2020 年）》提出“围绕国家目标，进一步突出重点，筛选出若干重大战略产品、关键共性技术或重大工程作为重大专项，充分发挥社会主义制度集中力量办大事的优势和市场机制的作用，力争取得突破，努力实现以科技发展的局部跃升带动生产力的跨越发展，并填补国家战略空白”。

《规划纲要》确定了 16 个国家科技重大专项，其中“高档数控机床与基础制造装备”是第四项，一般简称为“04 专项”。

图表1：“高档数控机床与基础制造装备”是重大科技专项第 4 项简称“04 专项”

序号	项目
1	核心电子器件、高端通用芯片及基础软件
2	极大规模集成电路制造技术及成套工艺
3	新一代宽带无线移动通信
4	高档数控机床与基础制造技术
5	大型油气田及煤层气开发
6	大型先进压水堆及高温气冷堆核电站
7	水体污染控制与治理
8	转基因生物新品种培育
9	重大新药创制
10	艾滋病和病毒性肝炎等重大传染病防治
11	大型飞机
12	高分辨率对地观测系统
13	载人航天与探月工程等 16 个重大专项
14	涉及信息、生物等战略产业领域
15	能源资源环境和人民健康等重大紧迫问题
16	军民两用技术和国防技术

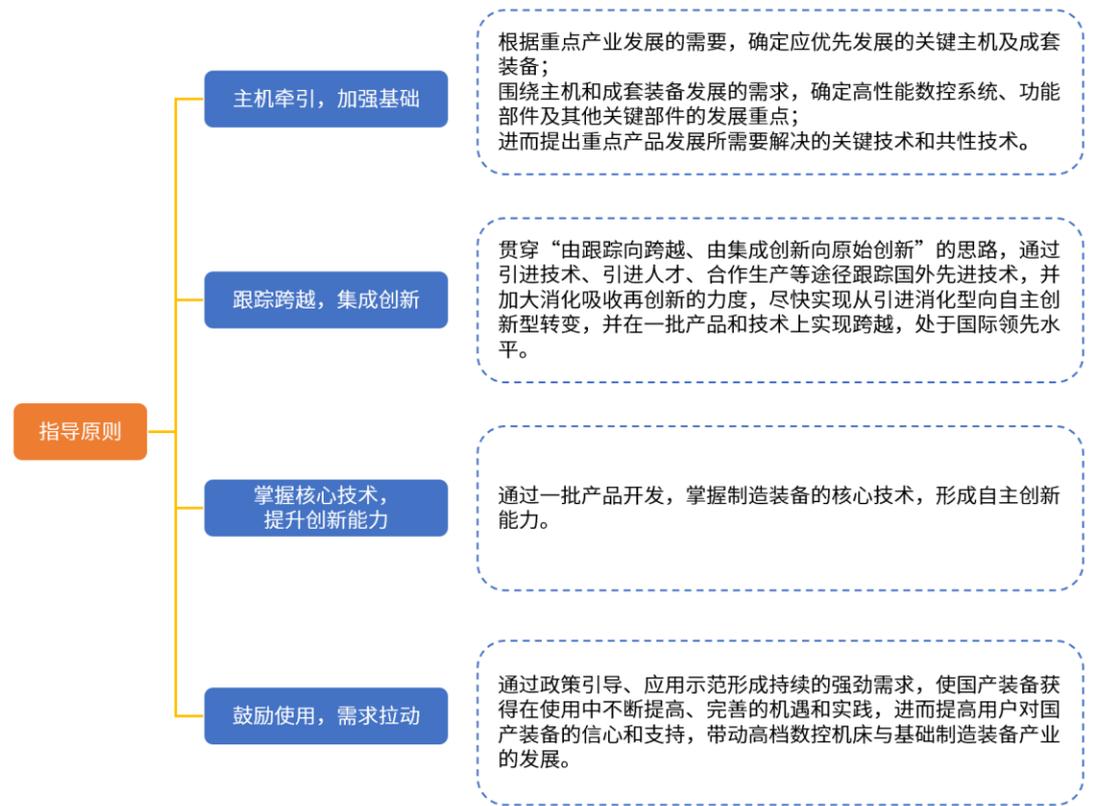
来源：中国政府网，国金证券研究所

根据《高档数控机床与基础制造装备重大专项——编写组专家对重大专项的解读》信息，“04 专项”采用了更加创新的支持方式，以满足需求为前提拉动自主创新可持续发展，在“产、学、研”的基础上增加了“用”，强化了产业链上下游合作加速研发落地，同时有六项围绕补贴、融资、招标等核心问题的政策和措施落地以促进专项成功实施：

1) 在“产学研”基础增加了“用”：围绕实际产业需求，以企业为主体，采用“产、学、研、用”结合方式统筹安排重点突破，实现自主创新，促进产业升级。



图表2：“04 专项”指导原则围绕“产学研用”展开



来源：《高档数控机床与基础制造装备重大专项——编写组专家对重大专项的解读》，国金证券研究所

2) 建立了围绕国产化率等的清晰目标：以 2010/2015/2020 三个时间点规划了清晰的发展目标，总体发展目标主要关注产品开发/创新能力，实现高国产化率满足下游需求。

图表3：总体发展目标主要关注产品开发/创新能力，实现高国产化率满足下游需求

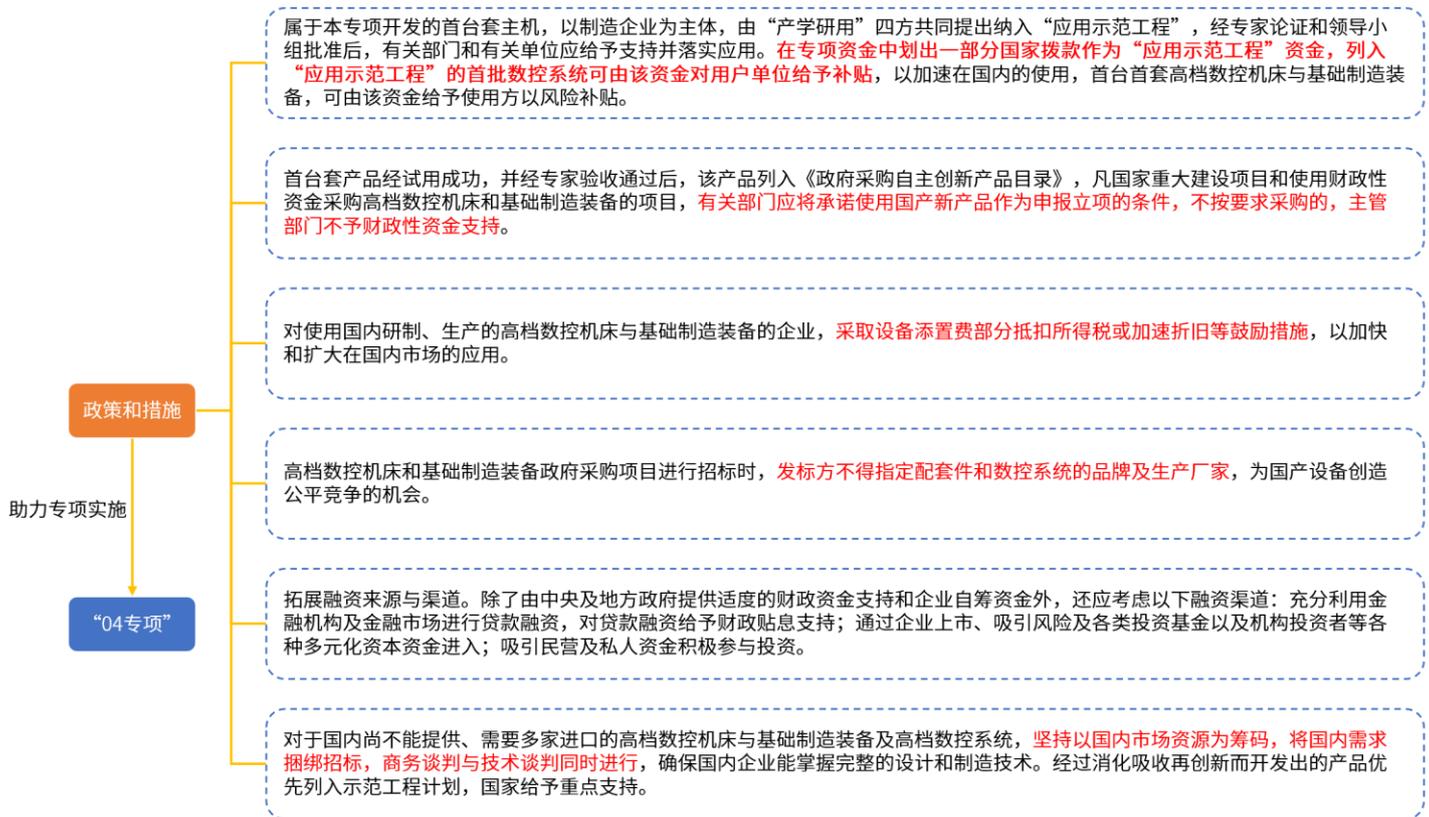


来源：《高档数控机床与基础制造装备重大专项——编写组专家对重大专项的解读》，国金证券研究所

3) 推出促进重大专项的 implements 与政策：以“应用示范工程”支持、产品加入《政府采购自主创新产品目录》、税收补贴等六项政策和措施促进专项成功实施。



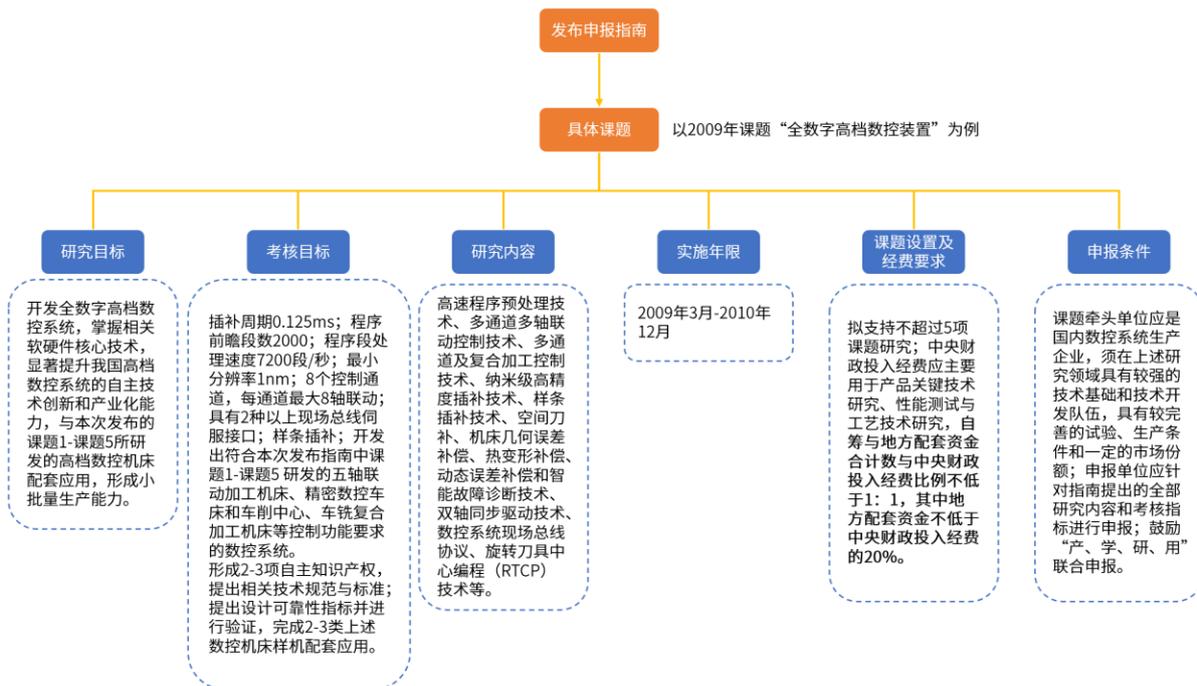
图表4：同步推出六条政策和措施助力专项实施



来源：《高档数控机床与基础制造装备重大专项——编写组专家对重大专项的解读》，国金证券研究所

“04 专项”课题采用申报的形式由企业自筹+地方配套资金+中央财政投入经费支持完成。

图表5：“04 专项”课题采用申报的形式由企业自筹+地方配套资金+中央财政投入经费支持完成



来源：《“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 2009 年度第一批课题申报指南》，国金证券研究所

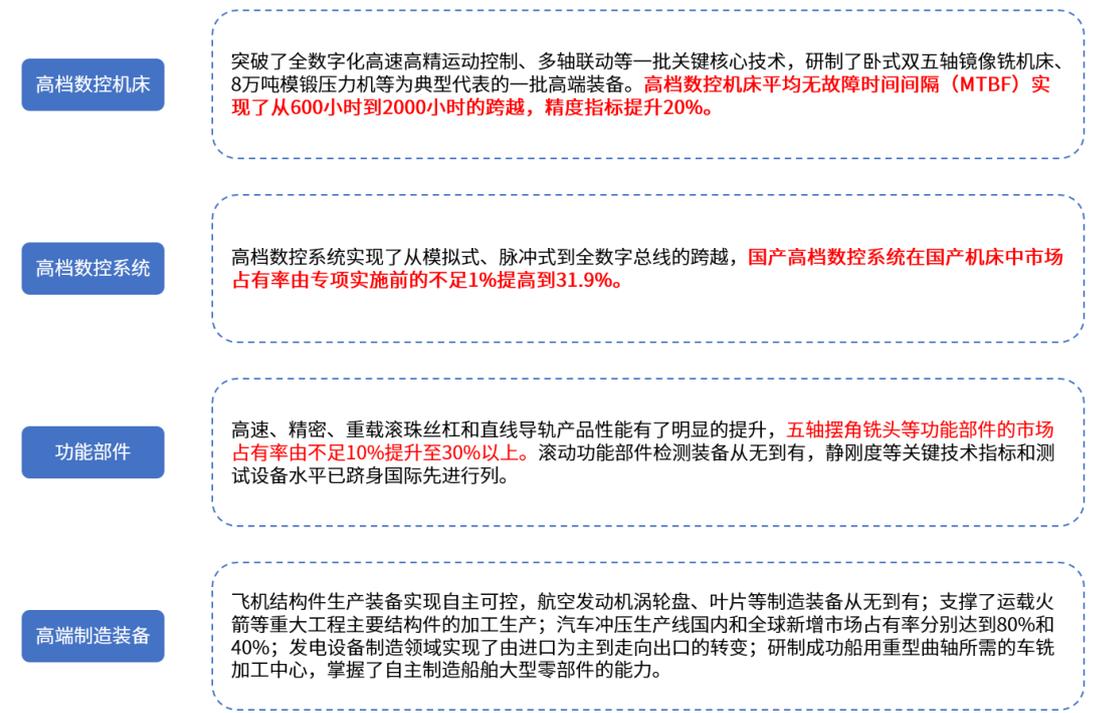
注：其中提到的课题 1-课题 5 主要是各类加工中心等



1.2 “04 专项”支持下，高档机床、高档数控系统、功能部件等多个领域实现突破

根据新华财经信息，在 22 年 9 月 6 日工业和信息化部举行的“新时代工业和信
息化发展”系列新闻发布会第五场，工业和信息化部装备工业一司司长王卫明表示，以“高档数控机床与基础制造装备”国家科技重大专项为抓手，高档数控机床平均无故障时间间隔 (MTBF) 实现了从 600 小时到 2000 小时的跨越，精度指标提升 20%；国产高档数控系统在国产机床中市场占有率由专项实施前的不足 1% 提高到 31.9%；五轴摆角铣头等功能部件的市场占有率由不足 10% 提升至 30% 以上

图表6: “04 专项”支持下，高档机床、高档数控系统、功能部件等多个领域实现突破



来源：新华财经，国金证券研究所

伴随“04 专项”的实施，海天精工、纽威数控、科德数控、华中数控、秦川机床、日发精机等企业均参与了相关课题，加速技术进步。

以科德数控为例，到 2021 年已承担及参加了 29 项课题，围绕高档机床、数控系统、功能部件实现技术升级突破。

图表7: 科德数控参与多个“04 专项”项目

年度	牵头单位	课题名称	科德数控参与情况	实施时间
2009	科德数控	14 轴 5 联动高速精密直驱摆角铣头卧式铣车 (车铣) 复合加工中心	牵头单位	2009.01-2010.12
2011	无锡透平	透平机械叶片制造应用国产高档数控机床示范工程	参研单位	2011.01-2012.12
2012	光洋科技	高可靠性光纤总线开放式高档数控系统, 精密测量系统, 伺服装置和电机技术及产品成套系统工程	参研单位 (公司董事、总经理陈虎任课题负责人)	2012.01-2014.12
2013	株洲钻石	磨削工艺、角度轴直驱、一体化大理石床体、高精度 7 轴 6 联动工具磨床、磨削工艺软件系统研制和应用示范工程	参研单位	2013.01-2015.12
2014	科德数控	面向航空发动机机匣的五轴立式铣车复合加工中心	牵头单位	2014.01-2017.12
2015	航发黎阳	国产高档数控系统、数控机床在航空发动机盘、机匣类零件制造中的示范应用	参研单位	2015.01-2019.12
2015	北京动力机械研究所	国产高档数控机床与技术在飞航导弹发动机制造领域的综合应用验证及工艺研究应用生产线	参研单位	2015.01-2018.6
2016	科德数控	面向航空典型零件制造的主要功能部件全国产的五轴数控机床产品提	牵头单位	2016.01-2019.12



年度	牵头单位	课题名称	科德数控参与情况	实施时间
		升工程		
2016	北京自动化控制设备研究所	国产高档数控机床在惯控产品精密结构件加工的验证应用示范线	参研单位	2016.01-2019.12
2016	上海航天控制技术研究所	航天光学伺服惯性器件精密与超精密制造装备示范线	参研单位	2016.01-2019.12
2017	北京星航机电装备有限公司	航天飞行领域复杂弹体及发动机制造国产数控系统换脑工程	参研单位	2017.04-2020.01
2017	航发动力	面向航空发动机典型零部件制造的国产数控系统换脑工程	参研单位	2017.04-2020.01
2017	航发黎阳	面向航空发动机精密结构件智能制造的国产高档数控系统换脑工程	参研单位	2017.04-2020.01
2017	成都飞机工业(集团)有限责任公司	用于钛合金壁板、复合材料等典型零件加工的高速立式五轴数控机床研制及自动化生产线示范应用	参研单位	2017.01-2019.12
2017	西安交通大学	航空航天制造领域高速、高效数控机床创新能力平台建设	参研单位	2017.04-2019.12
2018	株洲钻石	精密刀具五轴磨削柔性制造单元的研制与示范应用	参研单位	2018.01-2021.12
2018	长春奥普光电技术股份有限公司	超大口径光学元件超声磨抛加工技术及装备	参研单位	2018.01-2021.12
2018	广西玉柴	国六商用车发动机缸体缸盖高精度高柔性加工生产线示范工程	参研单位	2018.01-2021.12
2018	航发商发	大涵道比涡扇发动机关键零部件试制国产成套装备应用示范线	参研单位	2018.01-2021.12
2018	航发黎阳	航空发动机转动关键零件(叶片、轴)高效加工工艺与国产装备应用示范	参研单位	2018.01-2021.12
2018	北京动力机械研究所	高马赫数导弹发动机关键零件制造装备和核心工艺应用验证示范线	参研单位	2018.01-2021.12
2018	湖北三江航天红峰控制有限公司	航天惯导和伺服机构复杂精密结构件加工示范应用	参研单位	2018.01-2021.12
2018	航发东安	直升机发动机空间动力传动单元体高精高效智能化加工应用示范	参研单位	2018.01-2021.12
2018	沈阳高精数控智能技术股份有限公司	国产高档数控系统智能化技术研究开发及应用验证	参研单位	2018.01-2021.12
2019	北京星航机电装备有限公司	飞航导弹舱体等大型核心构件国产五轴数控加工机床示范应用	参研单位	2019.01-2021.12
2019	航发南方	航空涡轴/涡桨发动机关键零件(机匣、叶片)国产装备综合集成示范	参研单位	2019.01-2021.12
2019	上海航天控制技术研究所	防空导弹制导系统核心部件精密加工用国产高档数控机床应用验证	参研单位	2019.01-2021.12
2019	北京动力机械研究所	冲压发动机核心制造装备和关键工艺应用验证示范线	参研单位	2019.01-2021.12
2019	昊志机电	62-125kW 典型铣削电主轴开发与应用研究	参研单位	2019.01-2019.12

来源：科德数控招股说明书，国金证券研究所

1.3 “04 专项”课题与时俱进，已经出现了较多智能化相关内容

从“04 专项”2009 年第一批课题申报指南看，当时大多数课题围绕机床、核心零部件的产品开发展开，考核指标以机床精度、主轴转速、MTBF 等为主，智能化、数字化、大数据等词较少提到。

图8: 2009 年第一批课题申报指南较少出现智能化、数字化、大数据等词

关键词	出现次数	课题名称	相关内容
		数字化设计技术	开展机床整机与关键部件的数字化设计技术研究
数字化	10	高速、精密、大型数控滚齿机	开展大型数控滚齿机的数字化、模块化设计技术
		大扭矩力矩电机及驱动	全数字化位置、速度、电流控制技术



		装置	
		自动检测与无损检测技术	研发大型工件的高能射线和数字化超声波无损检测技术与设备
智能化	3	高速数控机床用新型工具系统	由刀柄、刀具、编码、检测装置组成的工具系统，具有智能化识别功能
		自动检测与无损检测技术	研究开发大批量生产用高效率、高精度、智能化的自动检测技术、系统平台、设备和生产线
大数据	0	无	无

来源：《“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 2009 年度第一批课题申报指南》，国金证券研究所

“04 专项”2009 年的第一批课题主要围绕机床与核心零部件相关产品开发展开，到了 2018 年的课题可以看到一方面课题的内容不再仅限于单个产品，而是围绕前期研制的机床、数控系统在专项重点领域（比如汽车行业）的实际应用场景展开；一方面数字化、智能化、大数据词频明显提高，开始要求在智能化相关技术上也实现突破。

图表9：到 2018 年度课题申报指南，数字化、智能化、大数据词频已经较高

关键词	词频	课题名称	相关内容
数字化	20	高档轿车覆盖件大型伺服冲压生产线智能技术国际领先提升及应用工程 多个课题	建立整线装备数字化模型库（模型数量不少于 300 个）；数字化（IT）与机械化深度融合技术研究 用于数字化设计、可靠性和精度保持性等共性技术的研究经费比例不低于 15% 部件数字化分析仿真模型开发
智能化	37	汽车复合材料车身模压成形技术与装备 高档轿车覆盖件大型伺服冲压生产线智能技术国际领先提升及应用工程 乘用车多材质车身高效柔性涂装生产线 重型商用车柴油机柔性自动化装试技术与装备	开展全伺服智能化冲压技术提升；要求生产线具有对应智能化功能 结合智能化及能源管理等技术；研究智能化、远程化涂装控制技术 开展研究智能化装配及测量技术；开发生产线配置智能化装配生产过程控制和 信息管理系统 开展智能化数控系统硬件平台的研究，开发智能化数控系统接入设备；开展智能化数控系统网络化平台研究，开发支持互联互通与大数据汇聚的网络化平台；开展智能化数控系统二次开发平台的研究，开发支持智能化应用的接口、开发环境及工具；开展智能化数控系统的创新性研究；开展智能化数控系统 Digital Twin（数字孪生）技术的研究；开展基于开放式智能化数控系统的智能装备协调控制研究等
大数据	10	高档轿车覆盖件大型伺服冲压生产线智能技术国际领先提升及应用工程 乘用车双离合变速器换挡高精度复合加工生产线示范工程 汽车发动机缸体缸盖高精度高柔性加工生产线示范工程	建立基于大型伺服冲压生产线多源大数据的全服役周期可靠性评估标准；基于大数据学习的大型伺服冲压生产线工艺参数智能设计技术研究。将冲压大数据学习与成形过程有限元分析结合；研究大功能部件智能寿命预警、轴承震动智能检测及运动部件智能故障等多源大数据采集、挖掘与集成分析技术。结合生产线运行精度可靠性技术研究，建立基于大数据驱动的大型伺服冲压生产线服役周期系统动态可靠性模型 五轴数控加工大数据的智能化技术应用研究 可靠性综合验证与工艺大数据管理能力

来源：《“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项 2018 年度课题申报指南》，国金证券研究所

2. 展望：AI 时代的政策导向有望过渡为新技术领域实现突破，数控系统重点关注

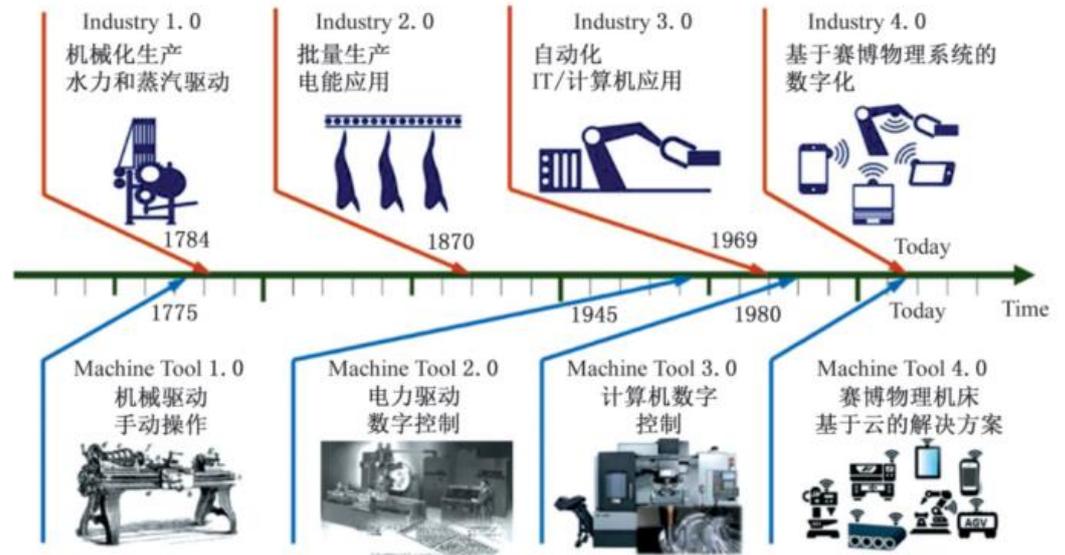
2.1 从数控技术出现后，机床的技术升级就与电子、信息技术密切相关

从 18 世纪工业革命开始，机床随着不同的工业时代展现出各个时代的技术特点，当前的



发展方向是数字化、智能化。

图表10: 机床跟随工业革命技术迭代升级



来源:《数控机床发展历程及未来趋势》, 国金证券研究所

机床的技术升级主要体现在机床结构、主轴、驱动、控制等方面, 持续迭代追求高精度、高刚度、热稳定性、长寿命和精度保持性。

图表11: 机床技术升级体现在机床结构、主轴、驱动、控制等方面

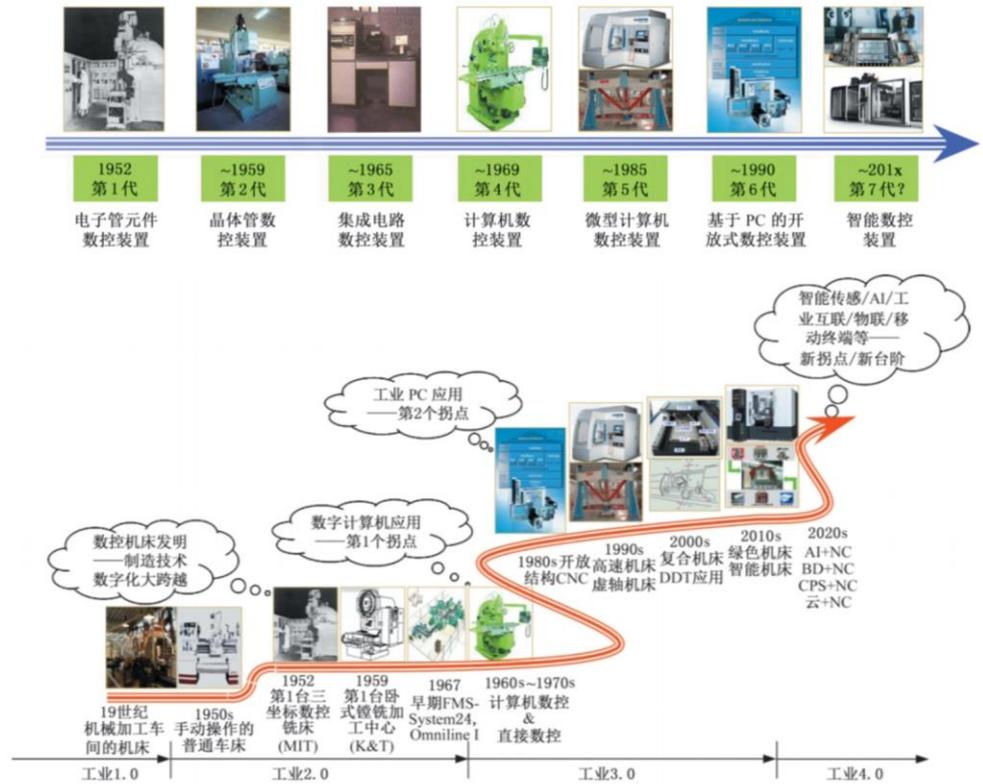


来源:《数控机床发展历程及未来趋势》, 国金证券研究所

机床行业过去出现的最大技术迭代为数字控制 (NC) 技术尤其是后来采用计算机的计算机数字控制 (CNC) 的出现和成熟, 让机床与电子、信息技术的发展直接关联。



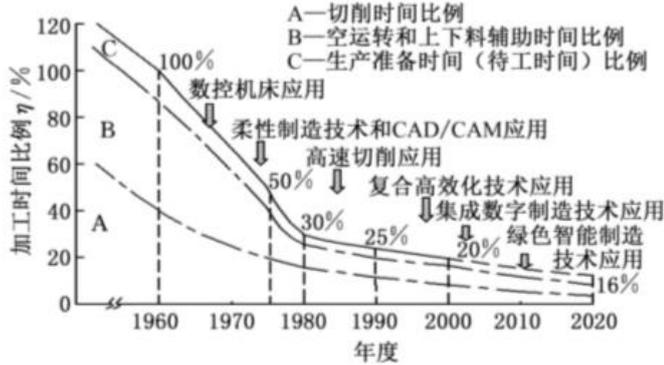
图表12: 数控技术的出现是带来了机床行业最大的技术迭代



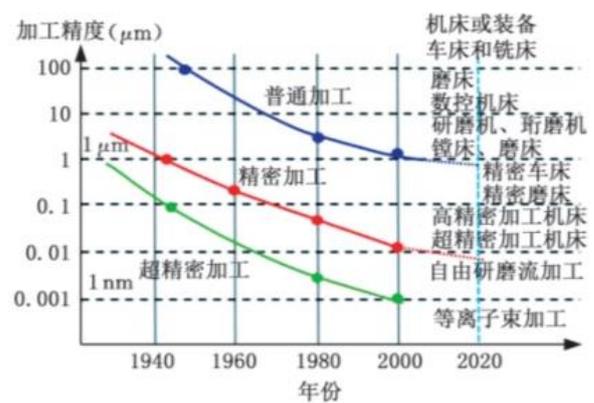
来源:《数控机床发展历程及未来趋势》, 国金证券研究所

在软件、硬件的持续迭代下, 机床的加工精度和加工效率出现大幅提升。

图表13: 机床加工效率大幅提升



图表14: 机床加工精度大幅提升



来源:《数控机床发展历程及未来趋势》, 国金证券研究所

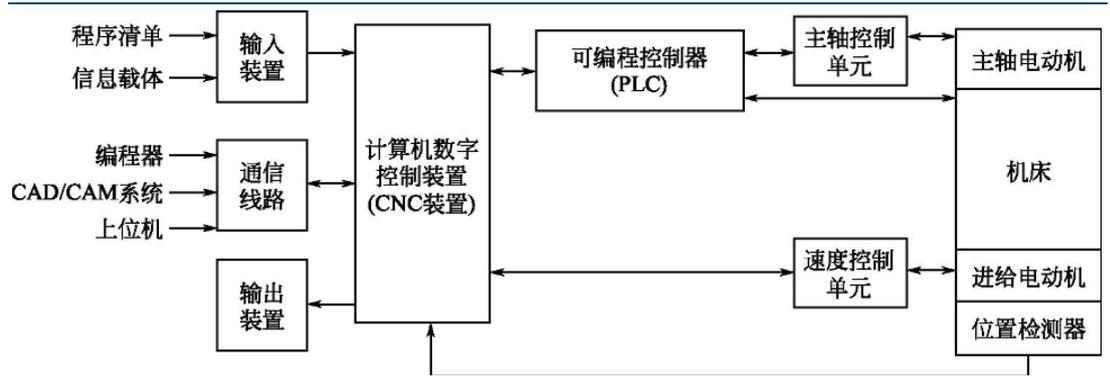
来源:《数控机床发展历程及未来趋势》, 国金证券研究所

2.2 机床行业 AI 技术怎么落地? 数控系统有望成为 AI 技术落地核心场景

数控系统由数控装置、伺服驱动、电机组成, 其中数控装置为数控系统的核心。



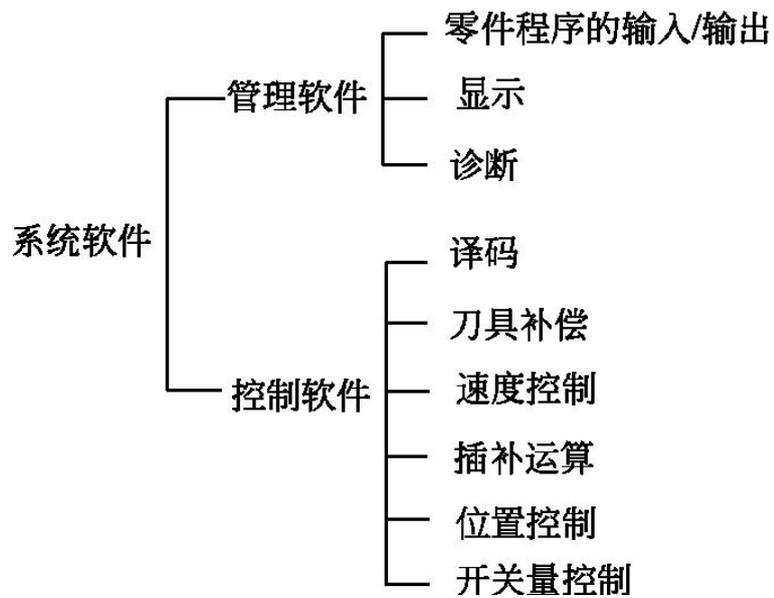
图表15: CNC 系统组成



来源:《现代数控机床及控制》, 国金证券研究所

数控系统的基础功能主要包括控制功能、主轴功能、准备功能 (G 代码)、辅助功能 (M 代码)、刀具功能等, 系统软件必须完成管理和控制两大任务, 系统的管理软件主要包括输入、I/O 处理、通信、显示和诊断等程序。系统的控制部分包括译码、刀具补偿、速度控制、插补和位置控制、开关量控制等软件。

图表16: 数控系统软件构成

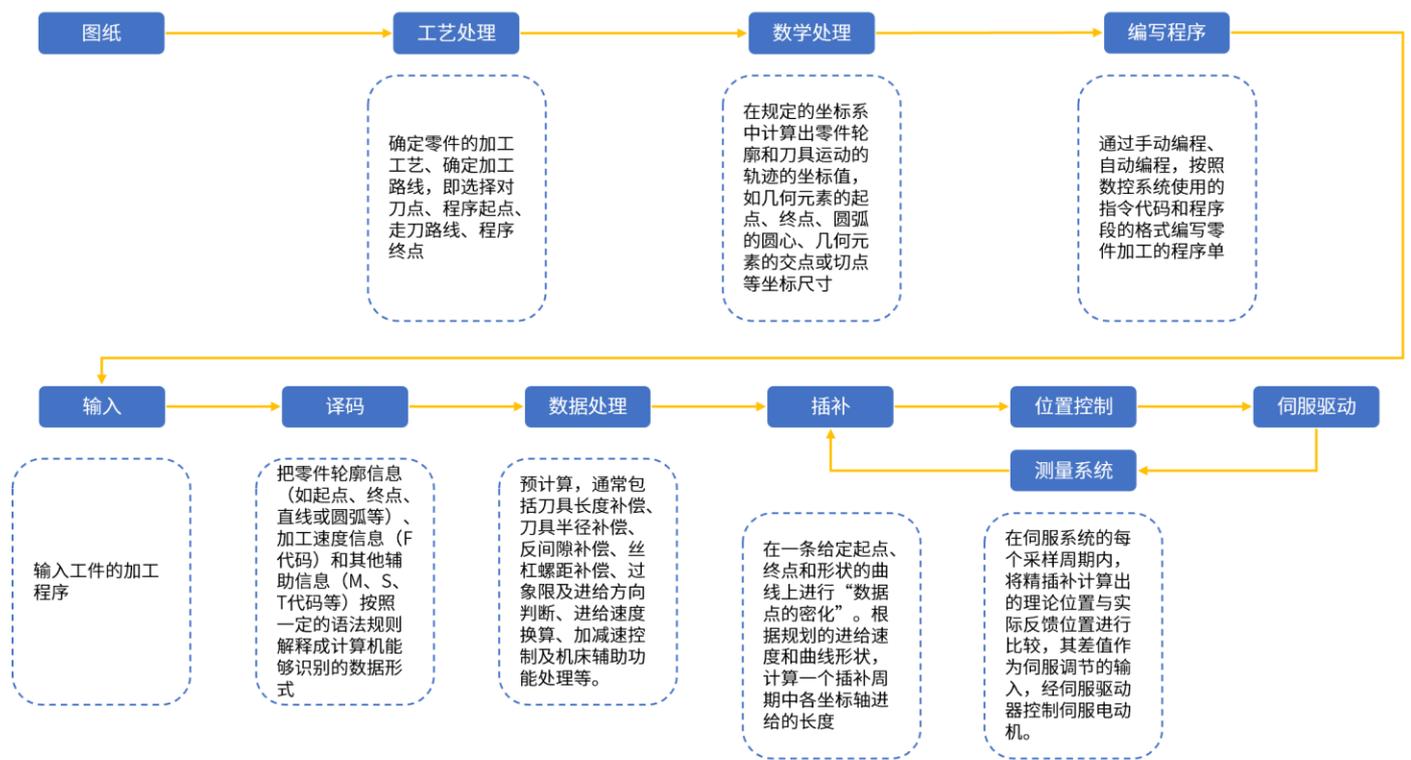


来源:《现代数控机床及控制》, 国金证券研究所

从具体运行流程来看, 可以简单总结为建模 (制造图纸)、路径规划 (确定走刀路径)、插补 (轮廓拟合/加工补偿)、完成驱动。



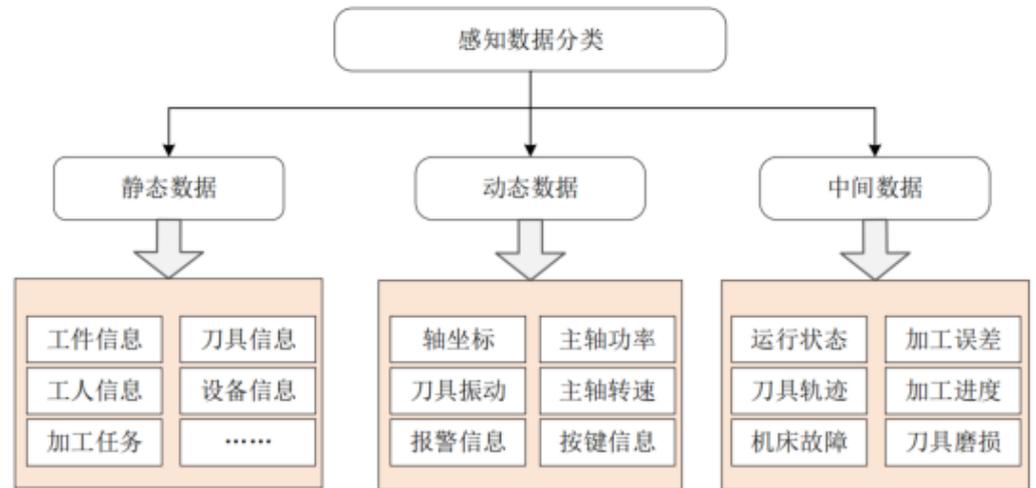
图表17: 数控系统控制原理



来源:《现代数控机床及控制》, 国金证券研究所

也就是数控系统在运行过程中实际上涉及大量数据的获取和处理。

图表18: 数控系统在运行过程中实际上涉及大量数据的获取和处理



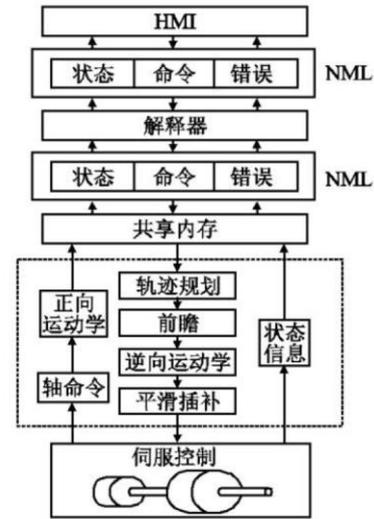
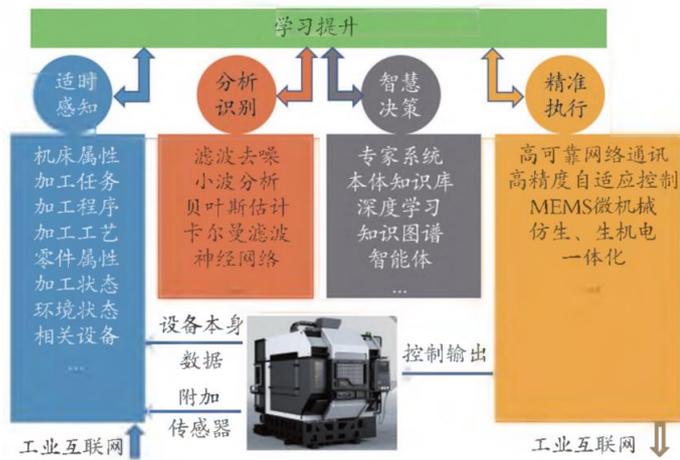
来源:《基于数字孪生的数控机床加工路径优化方法研究》, 国金证券研究所

通过采用 AI 技术, 数控系统的智能化程度可以进行大幅提升, 让机床具有动态规划、推理决策、环境感知、智能监控、预测性诊断能力等。



图表19: 数控系统在 AI 技术加持下实现机床智能化

图表20: 智能化数控系统软件架构



来源:《迈向智能数控系统的需求与展望》, 国金证券研究所

来源:《智能化数控系统轨迹规划方法的研究与应用》, 国金证券研究所

2.3 遗传算法、人工神经网络等技术已在数控系统插补、热误差补偿、加工路径优化等领域持续推进研发

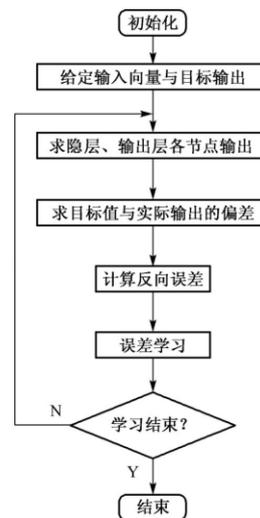
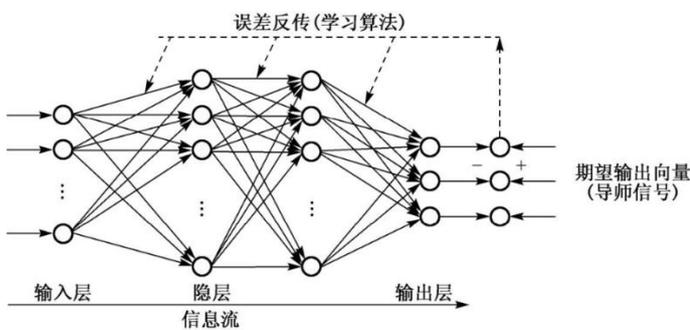
2.3.1 人工神经网络与遗传算法: 强化数控系统插补、热误差补偿能力

人工神经网络 (ANN) 是人工智能技术中应用最广泛的一种技术, 具有学习能力、并行处理能力、自适应能力和容错能力等。在复杂非线性的、难以用数学公式描述的系统建模和控制中成为一种重要的建模技术手段。人工神经网络是根据人的认识过程而开发的一种算法, 分为训练和工作两个阶段。在训练阶段, 以一组输入—输出模式用以训练网络, 使网络参数 (包括权值、阈值等) 调整到最佳; 在工作阶段, 网络参数不变, 给定新的输入得到相应的输出。

最广泛的 BP 神经网络是一种人工神经网络的误差反向传播训练算法, 由输入层、隐层、输出层组成。BP 算法是采用有导师的监督学习方式, 适合于多层前馈神经网络的一种学习方法, 其主要思想是利用期望值与网络输出值的误差函数沿负梯度方向下降, 不断地修正网络权值和阈值, 使网络输出层的误差平方和达到最小, 逐渐逼近目标值。

图表21: BP 神经网络模型

图表22: BP 神经网络算法流程



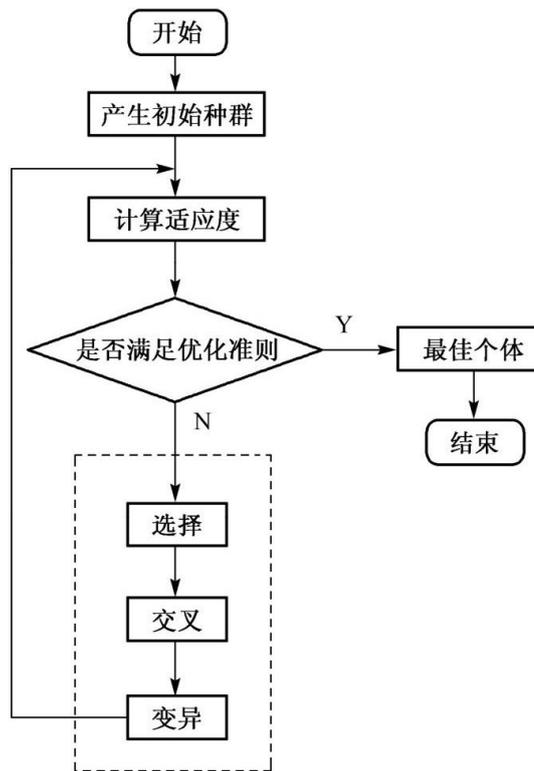
来源:《滚磨光整加工过程理论及计算机仿真》, 国金证券研究所

来源:《滚磨光整加工过程理论及计算机仿真》, 国金证券研究所

在实际使用中, 由于 BP 神经网络存在训练时间长、学习算法收敛速度慢等问题, 通常可采用遗传算法和 BP 算法相结合的方式优化。



图表23: 遗传算法流程



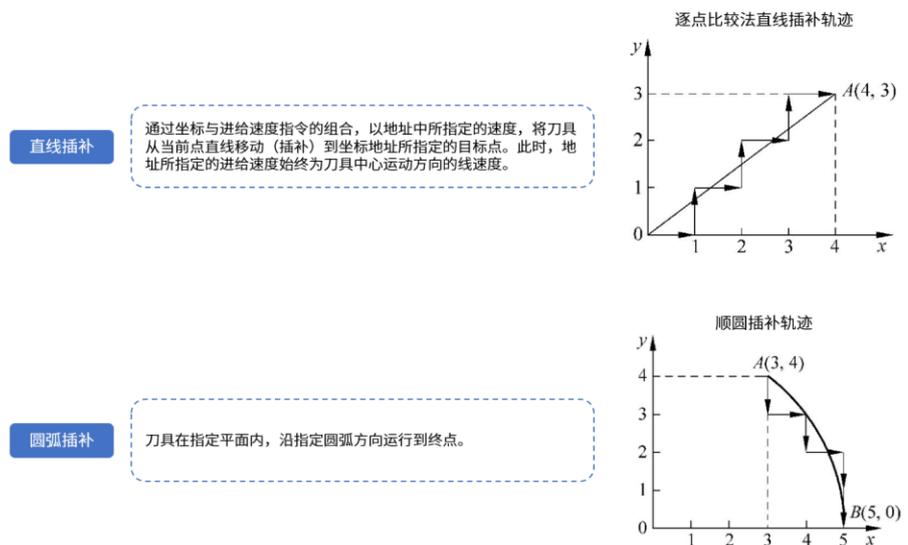
来源:《滚磨光整加工过程理论及计算机仿真》, 国金证券研究所

通过采用遗传算法和BP神经网络算法,对数控机床加工效率、加工精度影响较大的插补、热误差补偿等功能将得到显著强化:

1) 插补: 减少运算时间, 提高插补速度, 解决复杂型面加工难题

数控机床刀具的移动是一步步进行的,为了实现最优加工效果刀具轨迹应该和工件轮廓一致。对于复杂曲线,直接生成一条完全一致的轨迹算法会变得很复杂,实际应用中主要通过直线/圆弧逼近需要加工的曲线,插补就是指在这个过程中根据输入的基本数据(如直线终点坐标值、圆弧起点、圆心、终点坐标值等),按照一定的方法产生直线、圆弧等基本线型,并以此为基础完成所需要轮廓轨迹的拟合工作。

图表24: 直线插补、圆弧插补为数控系统最常见的插补功能

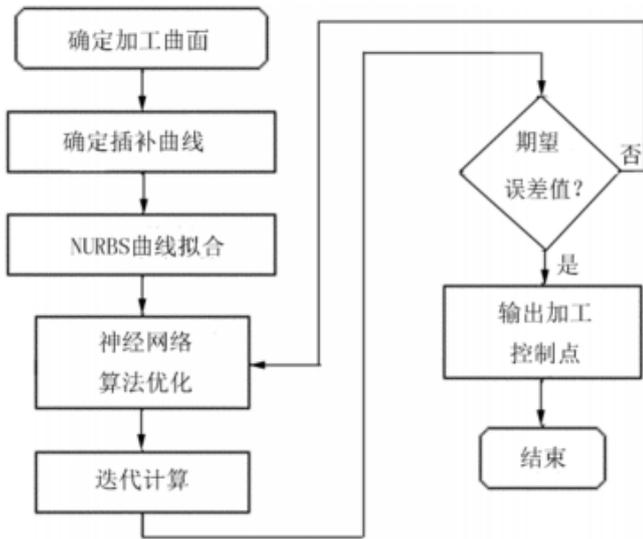


来源:《机床数控技术基础》,《华中8型数控系统编程说明书(V2.4)》, 国金证券研究所



通过采用遗传-神经网络对插补进行优化，可以简化计算过程提高插补效率，并且改善刀具路径精度和表面光顺性。

图表25：基于神经网络的曲线插补加工流程



图表26：采用神经网络插补可降低误差

误差采集表面编号	采用神经网络曲线插补误差/%	不采用神经网络曲线插补误差/%
1	0.25	0.45
2	0.13	0.18
3	0.26	0.37
4	0.18	0.29
5	0.35	0.46
6	0.21	0.35

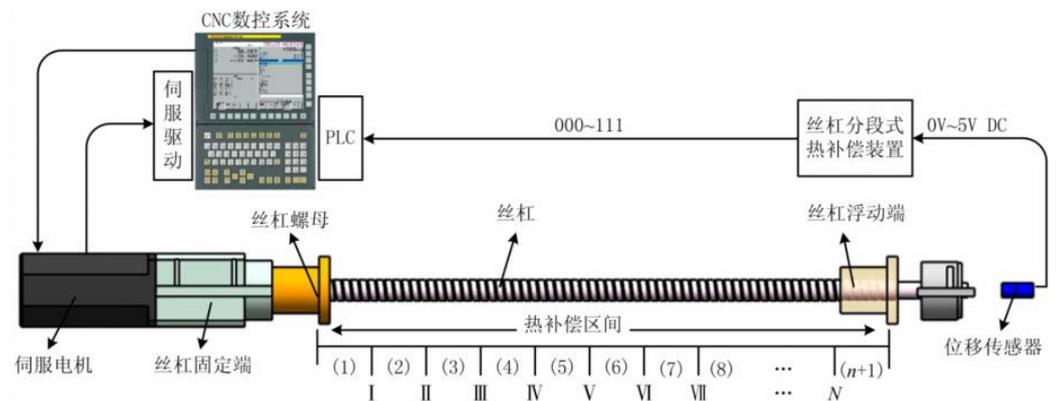
来源：《五轴加工中心农机零件加工仿真研究-基于曲线插补技术》，国金证券研究所

来源：《五轴加工中心农机零件加工仿真研究-基于曲线插补技术》，国金证券研究所

2) 热误差补偿：通过建模提高预测精度

根据《数控机床丝杠传动系统热误差实时补偿技术》数据，高精度数控机床的误差主要是热误差，可占总误差的50%-75%。以丝杠热误差补偿为例，目前的主要补偿方式是通过位移传感器测量丝杠总热形变量，或通过温度传感器检测温度变化量，通过软件生成一个认为误差来抵消热误差影响。

图表27：分段式丝杠热误差补偿技术路线

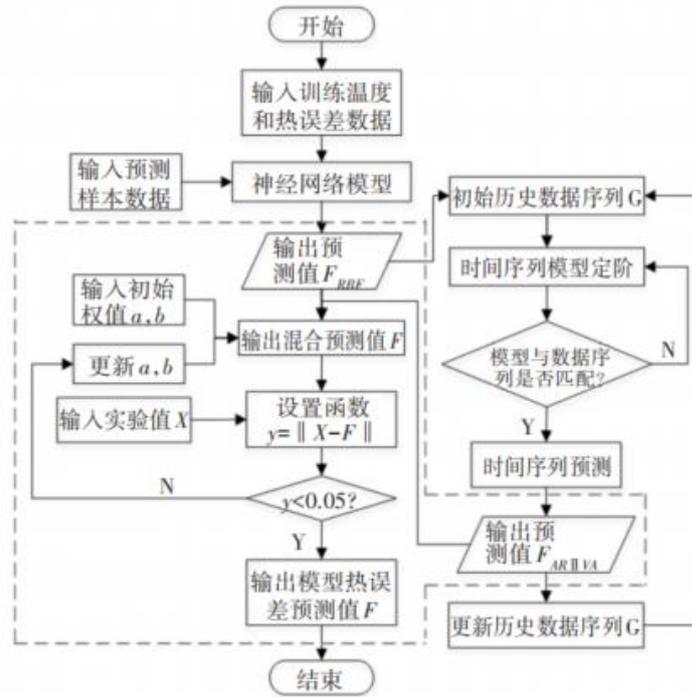


来源：《数控机床丝杠传动系统热误差实时补偿技术》，国金证券研究所

目前机器学习已经成为了热误差建模的主要方法，通过BP神经网络模型可以提高模型预测精度。



图表28: 神经网络热误差建模流程图



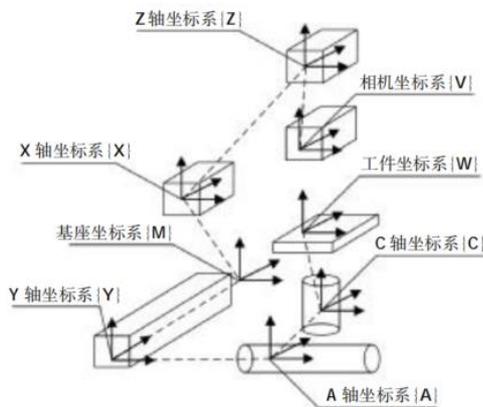
来源:《混合神经网络用于滚珠丝杠热误差预测》, 国金证券研究所

2.3.2 视觉模型: 在工件尺寸测量与定位、机床回转轴误差检测等领域有较好应用前景

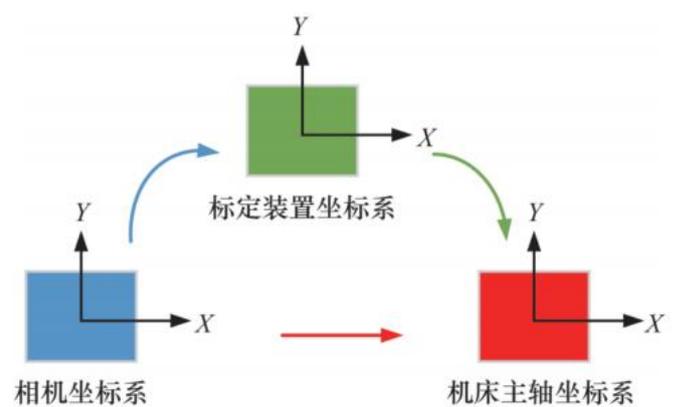
传统数控系统主要依靠机械定位或光学定位进行误差补偿,对于夹具要求较高,对小批量、高灵活性的生产任务适应性较弱。搭配了机器视觉系统的数控系统可以在保证加工精度的情况下对不同加工任务仅需进行特征点的采集即可,能够有效节约生产成本和提高生产效率。

通过确定相机坐标系和机床主轴坐标系之间的坐标变换关系,可以建立运动学模型,再结合工件定位特征点建立优化目标函数,求解特征点的工件坐标来完成定位。

图表29: 加入视觉系统后的五轴机床关键部件固联坐标系



图表30: 坐标系之间的转换关系



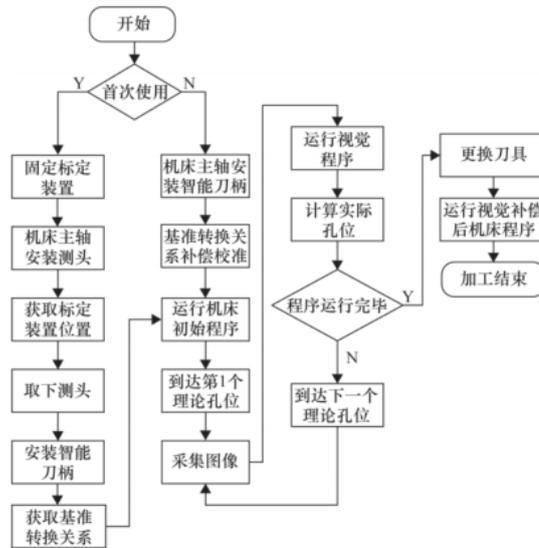
来源:《基于机器视觉的五轴点胶机工件定位算法研发》, 国金证券研究所

来源:《基于视觉定位的数控机床智能刀柄系统》, 国金证券研究所

未来机器视觉技术在工件尺寸测量与定位、机床回转轴误差检测、机床轨迹补偿、工件装夹误差视觉矫正等领域有较好应用前景。



图表31：基于视觉模型实现机床自主感知和自动更新轨迹加工系统工作流程



来源：《基于视觉定位的数控机床智能刀柄系统》，国金证券研究所

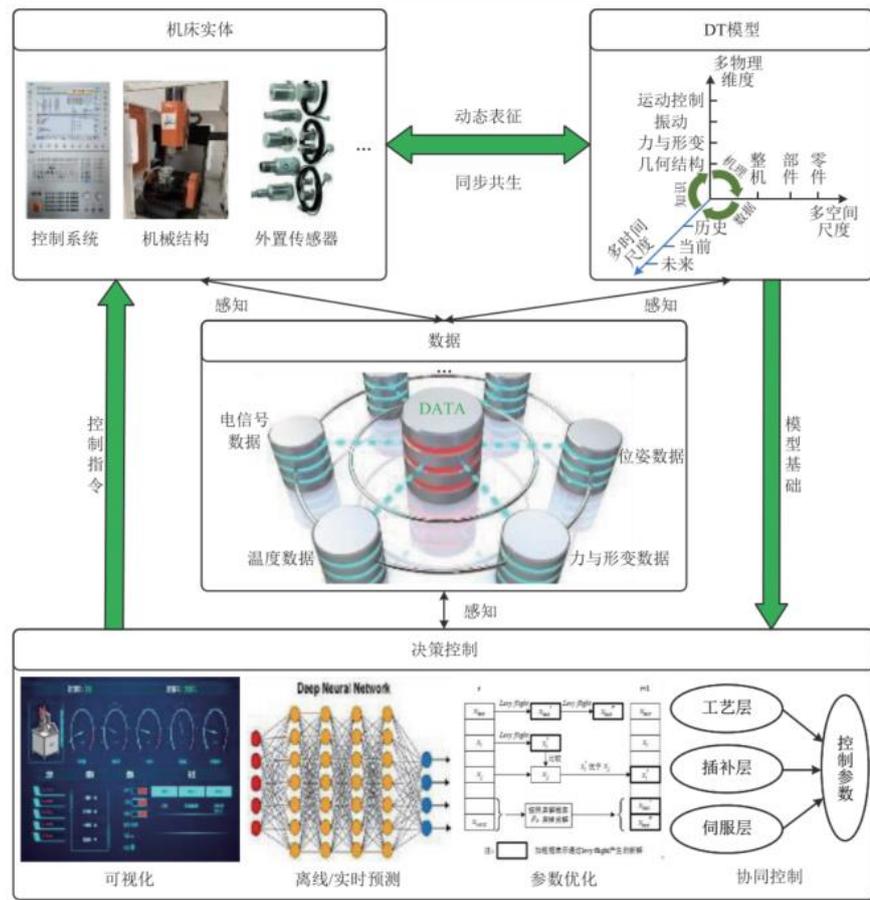
2.3.3 数字孪生模型：在可靠性分析、加工路径优化等领域进一步强化

数字孪生 (Digital Twin, DT) 主要指在数字空间构建物理实体或过程的数字模型, 保持数字模型与物理实体或过程同步共生, 进而完成对物理实体性能状态的动态预测, 最终对物理实体或过程进行主动干预。

对于机床来说, 数字孪生技术的应用主要是建立数字空间和物理空间的双向映射, 以数字模型为基础结合感知数据实现可视化监测、性能预测、参数优化、反馈控制等, 显著提升机床的智能化水平。



图表32: 数字孪生机床体系架构



来源:《数字孪生机床的内涵、体系架构及关键技术》, 国金证券研究所

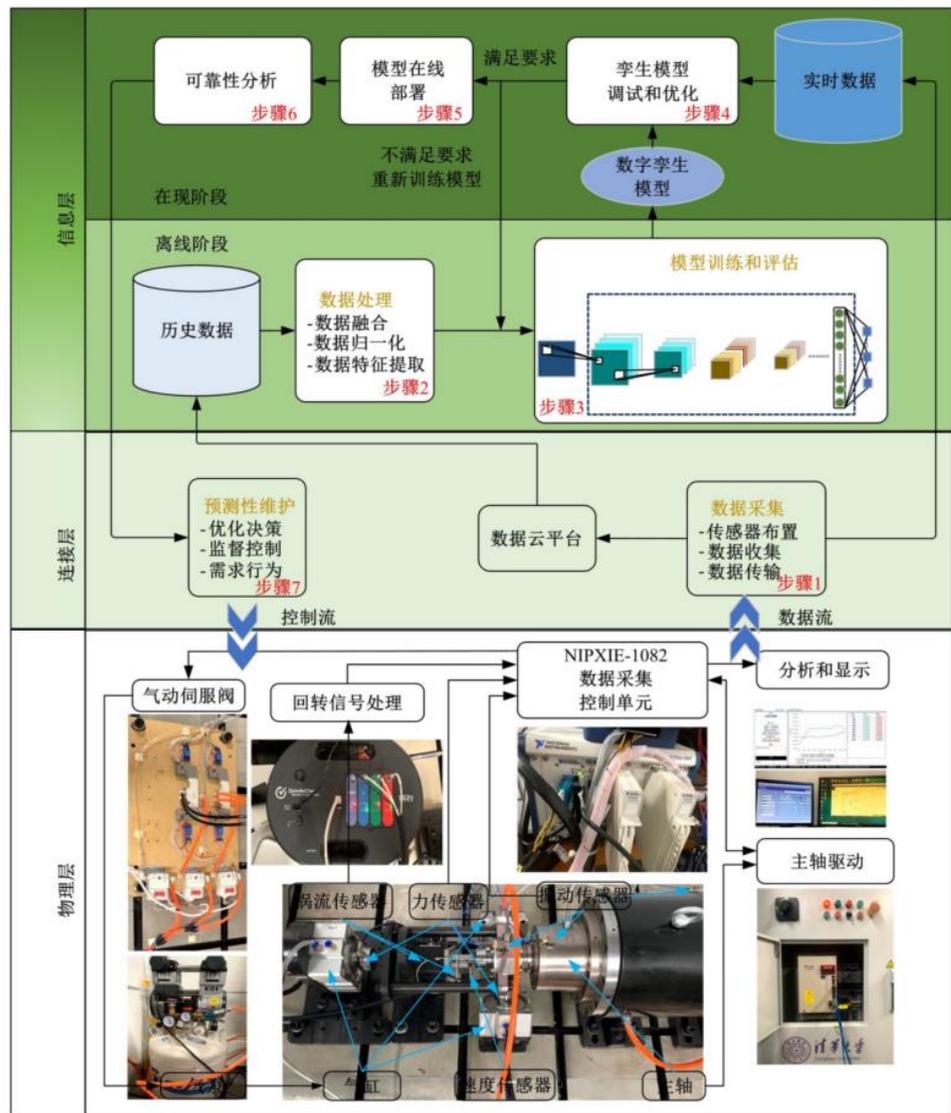
通过采用数字孪生技术,可以更高效的以数字驱动方式对机床进行可靠性分析监控、加工路径优化等:

1) 可靠性分析

基于历史数据进行数字孪生模型训练,基于事实数据用于数字孪生模型在线预测,从而建立机床监测信号和实际状态之间的映射关系,将状态监测数据和数字孪生模型预测结果进行展示,帮助可靠性分析、预测性维护过程中进行决策。



图33: 基于数字孪生的数控机床可靠性分析信息物理融合系统框架



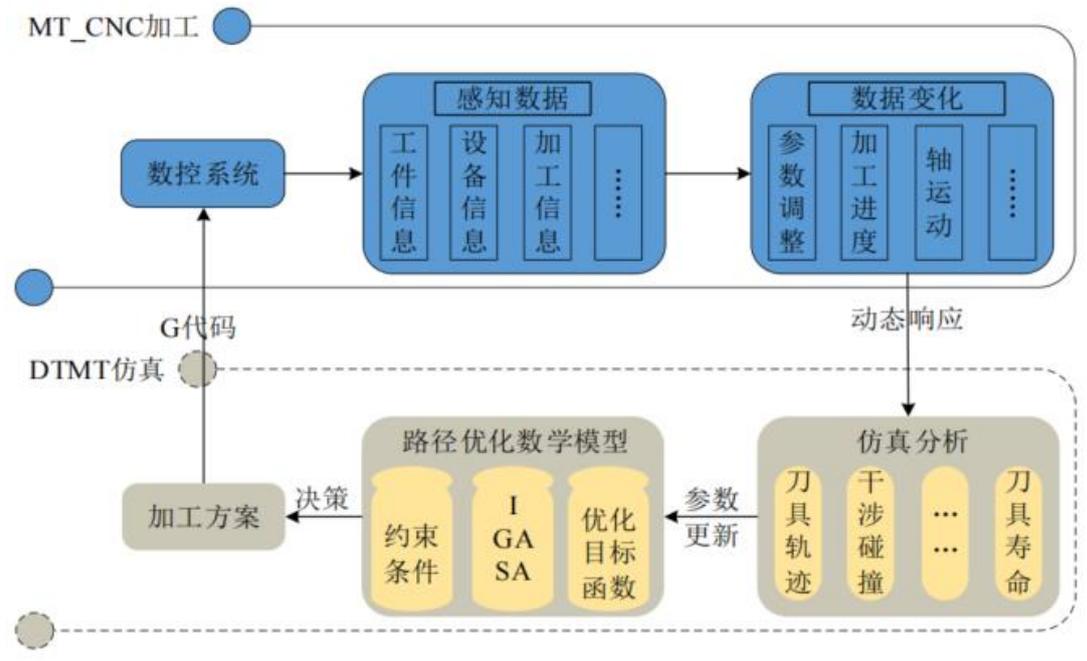
来源:《基于信息物理融合和数字孪生的可靠性分析》, 国金证券研究所

2) 加工路径优化

《基于数字孪生的数控机床加工路径优化方法研究》提出了一种数字孪生感知驱动的加工路径优化机制,在改进遗传退火算法(IGASA)路径优化算法基础上结合数字孪生机床(DTMT)模型对传统机床(MT_CNC)实际加工过程进行监控和仿真,除提供全程加工监控外,数字孪生机床在虚拟信息空间中的仿真为数控加工提供了一个低成本的试验验证平台,规避实际加工中的潜在问题,如刀具碰撞、干涉等情况,实现对加工路径与数控代码的检验,从而降低加工成本、提高工件质量与机床效率。一旦感知到数控机床加工工艺参数或数控机床相关运行参数与原先预期不符合情况的发生,即机床状态发生变化时,分析路径优化算法中的运动干涉约束、重复走刀约束、加工工艺约束及刀具寿命约束是否发生变化,一旦四个约束条件中的一个或几个约束条件发生改变,则需要更新算法参数,重新启动IGASA优化算法,进行路径优化。



图表34: 数字孪生模型可实现加工路径优化

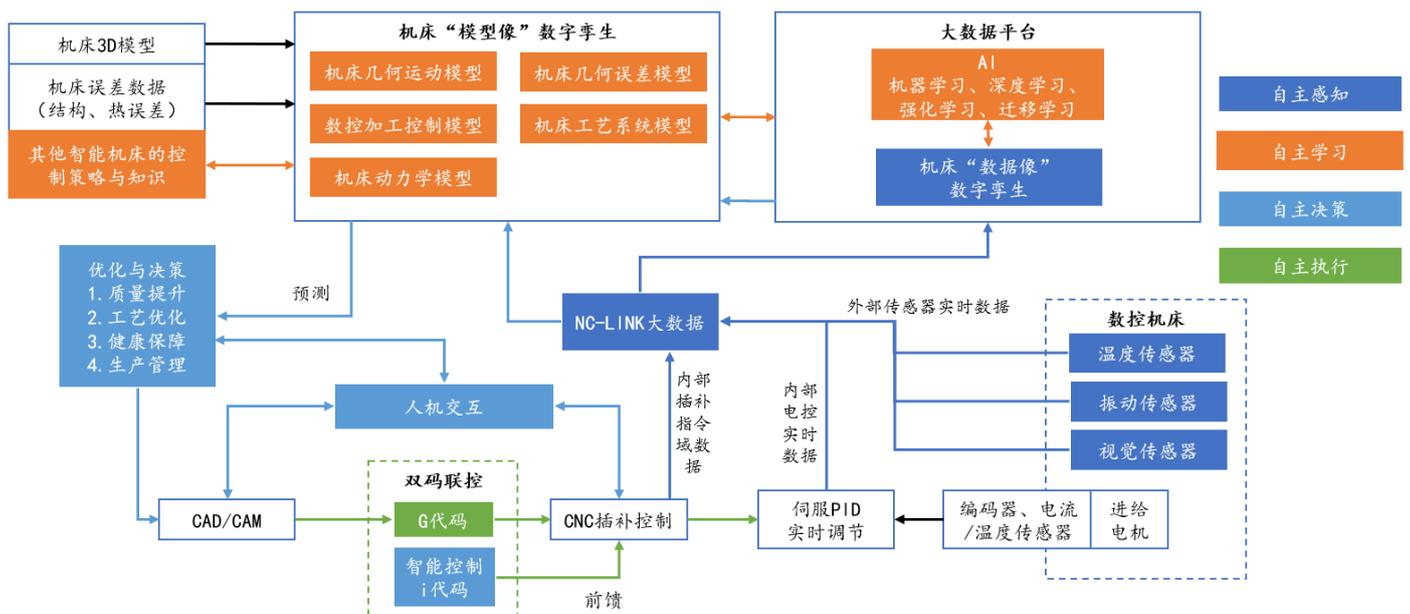


来源:《基于数字孪生的数控机床加工路径优化方法研究》, 国金证券研究所

2.4 全球数控系统厂商积极加码布局, 华中数控推出“大模型”数控系统, AI 技术应用将成为新的竞争点

从前文内容可以看出, 目前针对如何将数控机床中孤立、碎片化的大量数据转化成有效决策信息已有较多基于 AI 技术的应用尝试, 最终目标都是打造一个具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行的数控系统。

图表35: 具有自适应、自感知、自学习、自交互、自执行的数控系统为未来发展趋势



来源: 中国工程院, 国金证券研究所

海外主要数控系统厂商目前均在加码智能化布局:

- 1) 西门子



西门子推出了 SINUMERIK ONE 数控系统，是以西门子技术生态及其数字孪生工具链为依托的“数字化原生”数控系统，是西门子推动机床行业数字化转型的关键产品，具有创建相应数字化双胞胎的多功能软件，以实现机床制造和生产过程数字化孪生。其智能化功能包括：智能动态控制（IDC）、智能负载控制（ILC）、Top Speed plus 智能功能。

图表36：西门子基于数字孪生技术搭建的工业云平台



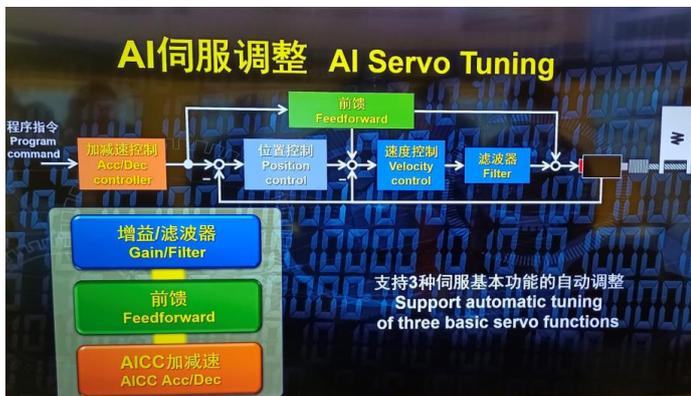
来源：《从 CIMT2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所

2) 发那科

发那科已经推出了采用机器学习技术的 AI 伺服调整、AI 热误差补偿、AI 分拣等功能。

图表37：发那科采用机器学习的 AI 伺服调整功能

图表38：发那科采用机器学习的 AI 热误差补偿功能



来源：《从 CIMT2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所



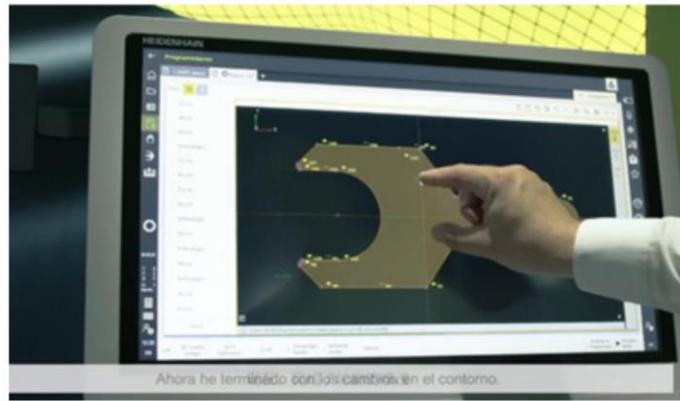
来源：发那科官网，国金证券研究所

3) 海德汉

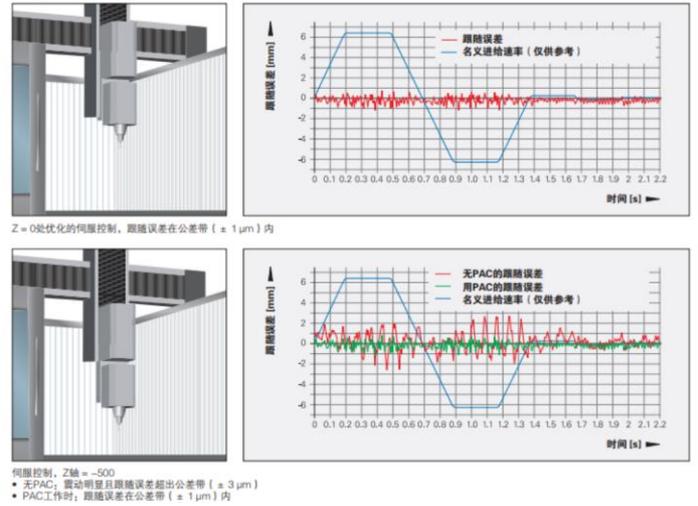


海德汉 TNC7 数控系统具有智能偏差测控、智能磨损检测、智能反向间隙补偿、智能机床前 endpoint 控制、智能图形化编程、智能函数、智能动态碰撞监测等智能化功能。

图表39：海德汉 TNC7 可实现图形化编程



图表40：海德汉 TNC7 位置自适应控制技术



来源：《从 CIMA2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所

来源：《从 CIMA2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所

国内数控系统领军企业华中数控推出了华中 9 型智能数控系统，集成了 AI 芯片，融合了 AI 算法，将人工智能、物联网等新一代智能技术与先进制造技术深度融合，遵循“自主感知-自主学习-自主决策-自主执行”新模式。

图表41：华中数控数控基于华中 9 型数控系统打造的智能体系架构



来源：卓尔智造，国金证券研究所

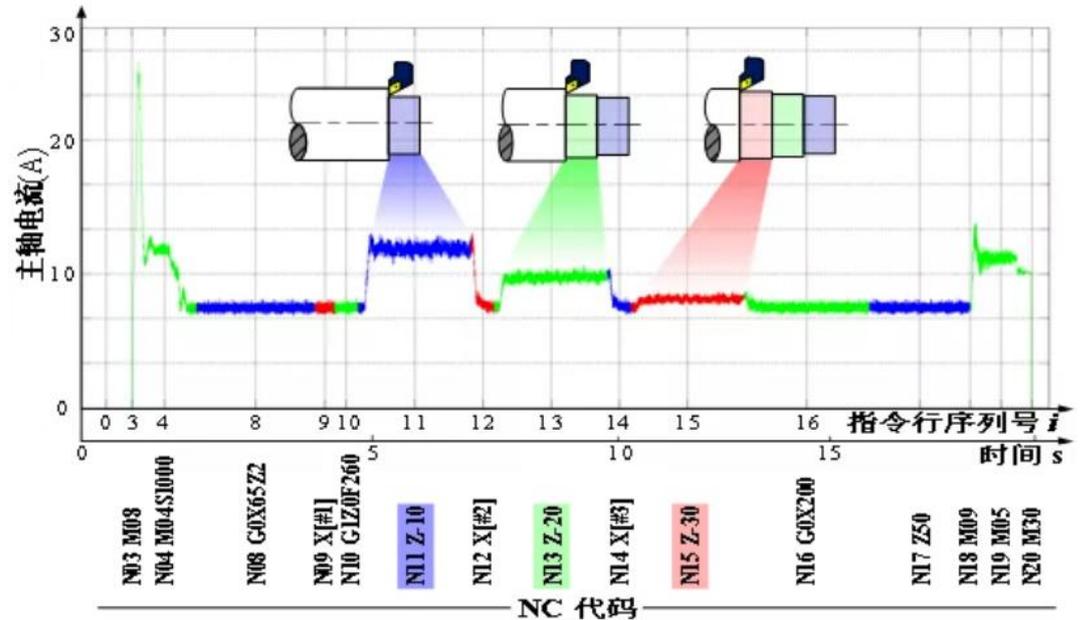
华中 9 型在自主感知、自主学习、自主决策、自主执行等方面实现了较大突破：

1) 自主感知：“指令域”大数据



通过独创的“指令域”大数据分析方法，采集、汇聚数控系统内部电控大数据和外部传感器数据，形成指令域“心电图”，实现大数据与加工工况的关联映射，构建由机床全生命周期大数据描述的数字孪生。

图表42：华中数控“指令域”大数据分析方法

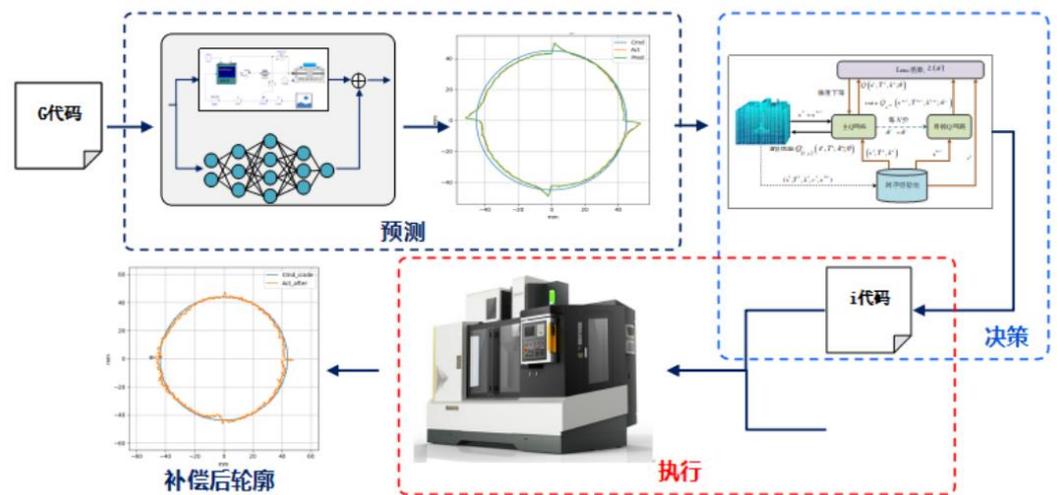


来源：卓尔智造，国金证券研究所

2) 自主学习：融合建模

借助具有“因果关系”的数理模型和具有“关联关系”的大数据模型，独创性地将数理模型与大数据模型进行融合建模，实现对机床动态行为的自学习和认知理解，构建由机床动态模型描述的数字孪生。

图表43：华中数控基于融合建模的轮廓误差补偿技术



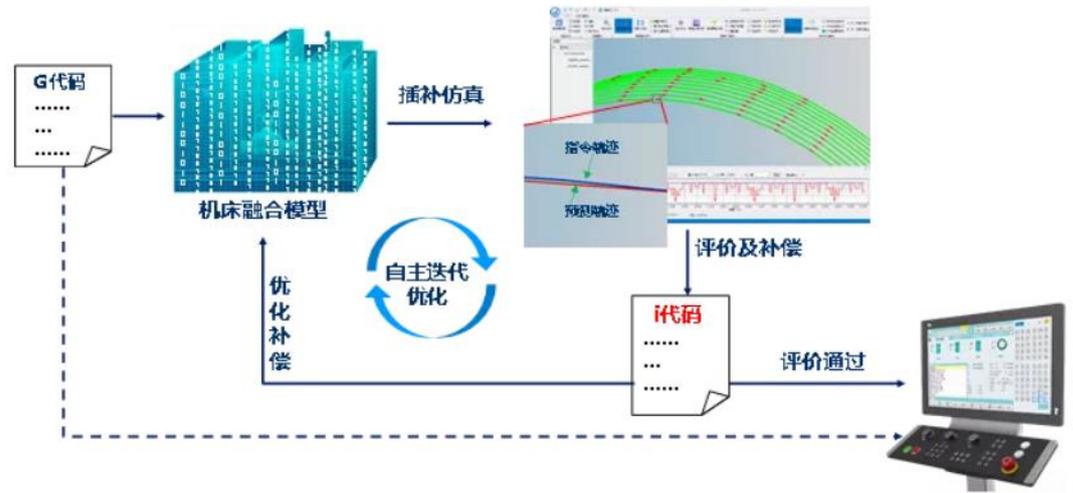
来源：《从 CIMT2023 看数控系统智能化发展》，国金证券研究所

3) 自主决策：i 代码

利用所获得的数字孪生，进行虚拟加工，并预测加工效果。根据预测结果，自动进行多轮优化迭代，最终生成多目标智能优化的“i 代码”，实现自主决策。



图表44：华中数控基于数字孪生虚拟加工预测结果实现自主决策

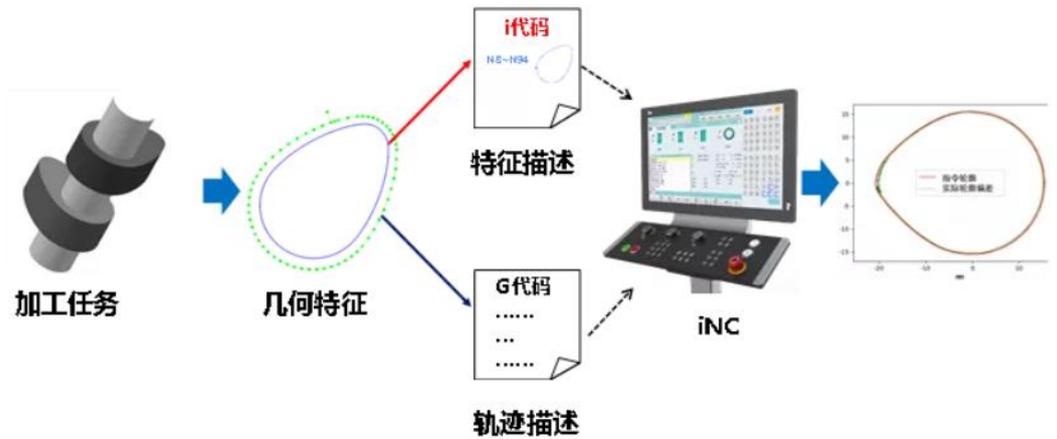


来源：卓尔智造，国金证券研究所

4) 自主执行：双码联控

华中数控独创的双码联控技术，让传统数控加工的“G-代码”（第一代代码）和多目标智能优化的“i-代码”（第二代代码）同步运行，实现优质、高效、可靠、安全的数控加工。

图表45：华中数控双码联控技术实现了“G-代码”和“i-代码”联动控制



来源：卓尔智造，国金证券研究所

根据公司微信公众号信息，最新的系统采用了基于大模型技术的故障诊断功能，能够理解用户对故障问题的语言描述，快速提供可能得故障原因及解决方案，并通过手机 APP 操作以实现更好的人机交互。截至 24 年 4 月，系统已达到 1 到 2 年工程师水平，未来将不断进化，提高诊断处理能力。



图表46: 华中9型数控系统包含了基于大模型技术的故障诊断功能



来源: 华中数控微信公众号, 国金证券研究所

在第十三届中国数控机床展览会 (CGMT2024) 上, 有 15 台来自各个机床厂不同型号的参展机床配套了华中 9 型智能数控系统, 后续有望继续走进更多机床厂商进行适配。

图表47: 华中9型数控系统有望继续走进更多机床厂商

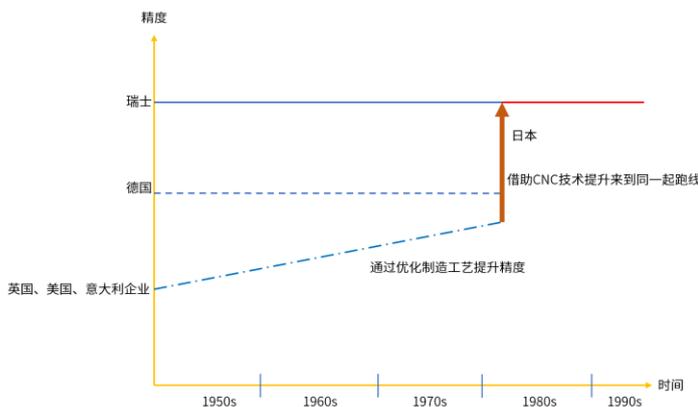


来源: 华中数控微信公众号, 国金证券研究所

2.5 结合日本机床产业政策复盘看, 在技术重大变革时期的产业政策核心目标为在新技术领域实现突破

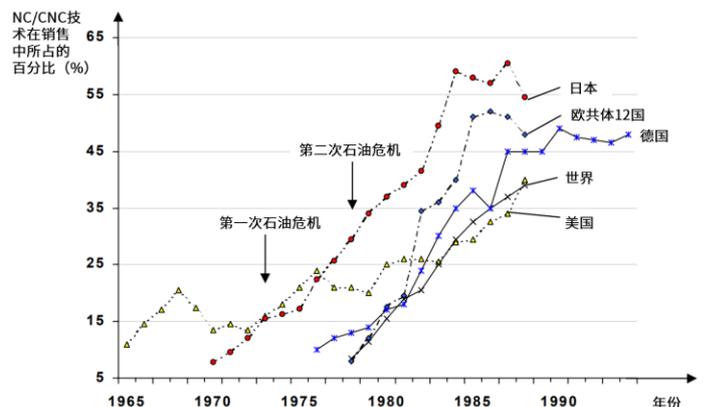
通过复盘日本机床产业我们看到 CNC 技术出现之后, 数控系统的探测 (可以通过传感器数据修正温度变化带来的热胀冷缩) 和自适应 (可以通过软件来修正硬件的几何缺陷) 能力可以认为重新让大多数生产商, 包括日本企业都到了同一起跑线, 许多领先企业积累的经验都变得不那么重要了。数控技术的出现成为了日本机床企业崛起的契机, 日本的数控化率持续全球领跑, 日本的龙头企业也借此机会逐步成长为全球龙头。

图表48: 日本借助 CNC 技术实现了和欧美国家技术差距快速缩小



来源: 《The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change》, 国金证券研究所

图表49: 数控时代来临后日本的数控化率快速提升, 后持续全球领先

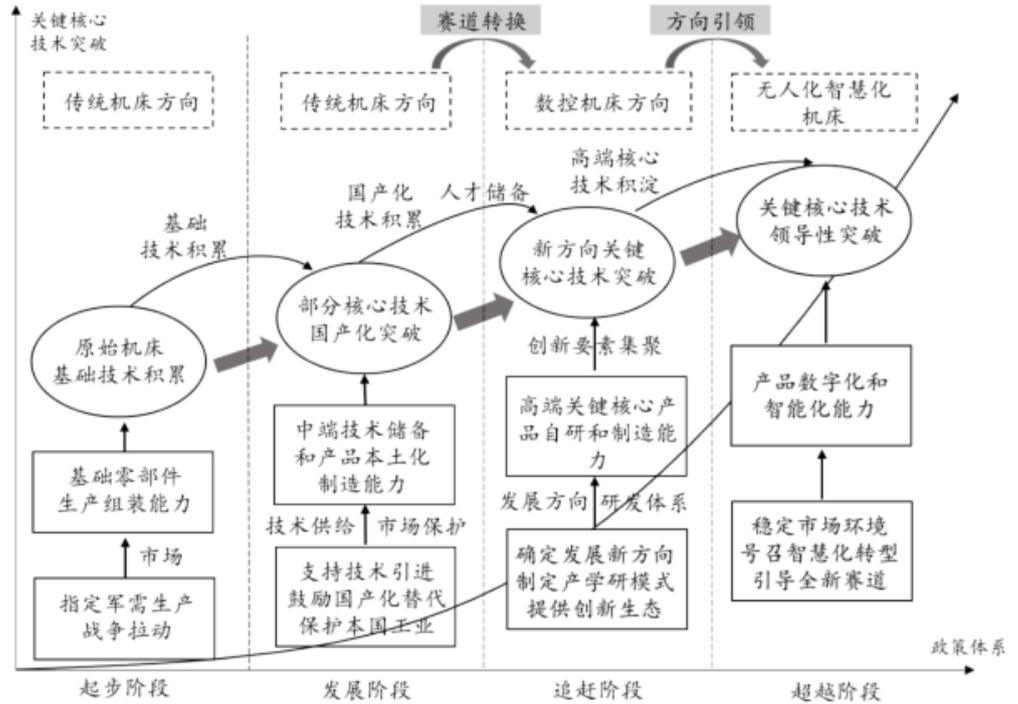


来源: 《The recent history of the machine tool industry and the effects of technological change》, 国金证券研究所



日本数控化率快速提升的背后我们认为政策支持方向的切换也带来了显著的积极影响。1971年日本推出“机电法”，确定了机械工业与电子工业相结合的目标，政策导向从技术引进与模仿开始向技术改革与创新过渡，主要目标从实现核心技术国产化转换至在新方向（CNC）关键核心技术实现突破。

图表50：在新技术出现导致行业洗牌背景下，日本机床产业支持政策导向也发生了变化



来源：《产业政策促进关键核心技术突破的路径研究——基于日本数控机床企业的纵向案例分析》，国金证券研究所

通过前文复盘可以看出，“04 专项”相关政策目标主要是实现核心技术的国产化，在当前 AI 技术快速发展背景下，我们认为国内政策支持也有望逐步向在新方向实现关键核心技术突破过渡，加速 AI 技术在机床行业的产业化落地。

3. 投资建议

通过对中国“04 专项”结合日本机床产业政策历史复盘，我们认为在当前 AI 技术快速发展背景下，国内机床产业政策支持目标有望从核心技术国产化过渡至新方向关键核心技术突破，数控系统有望成为 AI 技术落地核心场景，建议重点关注数控系统领军企业华中数控，同时建议关注有望受益机床产业政策支持的科德数控、海天精工、纽威数控、豪迈科技。

图表51：重点关注公司盈利预测

代码	公司简称	市值 (亿元)	归母净利润 (亿元)				利润增速			PE			
			2023A	2024E	2025E	2026E	2024E	2025E	2026E	2023A	2024E	2025E	2026E
300161.SZ	华中数控	57	0.27	1.07	1.61	2.17	295%	50%	35%	212	54	36	26
688305.SH	科德数控	73	1.02	1.59	2.16	2.77	56%	36%	28%	71	46	34	26
601882.SH	海天精工	153	6.09	7.33	8.83	10.59	20%	20%	20%	25	21	17	14
688697.SH	纽威数控	62	3.18	3.75	4.45	5.36	18%	19%	20%	20	17	14	12
002595.SZ	豪迈科技	329	16.12	18.34	20.78	23.67	14%	13%	14%	20	18	16	14

来源：IFIND, 国金证券研究所；注：豪迈科技取自 IFIND2024 年 5 月 9 日一致预期，其余为国金研究所预测数据，截至 2024 年 5 月 9 日

4. 风险提示

新技术推广应用不及预期：我们认为数字化、智能化、AI 等新技术的出现和应用是国内企业一次缩小技术差距的机会，若新技术的推广应用不及预期，将对行业成长造成一定影响。



政策支持力度不及预期：若后续推出的政策支持力度不及预期，将对行业成长造成一定影响。



行业投资评级的说明：

- 买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
- 增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
- 中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
- 减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级（含C3级）的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话：021-80234211	电话：010-85950438	电话：0755-86695353
邮箱：researchsh@gjzq.com.cn	邮箱：researchbj@gjzq.com.cn	邮箱：researchsz@gjzq.com.cn
邮编：201204	邮编：100005	邮编：518000
地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号 紫竹国际大厦 5 楼	地址：北京市东城区建内大街 26 号 新闻大厦 8 层南侧	地址：深圳市福田区金田路 2028 号皇岗商务中心 18 楼 1806



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究