

全球数控系统演进简史与中国国产化之路

2023年03月26日

➤ **本周关注：宏华数科、铁建重工、中铁工业、科德数控、华中数控。**

➤ **数控机床集电子/计算机/控制/信息技术为一体。**数控机床采用数字编程、程序执行、伺服控制等技术，实现按照零件图样编制的数字化加工程序自动控制机床的轨迹运动和运行，从此 NC 技术就使得机床与电子、计算机、控制、信息技术的发展密不可分。随后，为了解决 NC 程序编制的自动化问题，采用计算机代替手工的自动编程工具（APT）和方法成为关键技术，计算机辅助设计 / 制造（CAD / CAM）技术也随之得到快速发展和普及应用。可以说，制造数字化肇始于数控机床及其核心数字控制技术的诞生。数控系统（CNC 系统）是数控机床的重要组成部分，有数控程序、输入输出设备、CNC 装备（核心）、可编程控制器（plc）、主轴驱动单元和给进驱动单元（包括检测装备）等组成。数控系统随着计算机技术的发展而进步。

➤ **数控系统在 AI 赋能下有望加快插补技术进步。**数控系统完成诸多信息的存储和处理的工作，并将信息的处理结果以控制信号的形式传给后续的伺服电机，**这些控制信号的工作效果依赖于两大核心技术：①曲线曲面的插补运算，②机床多轴的运动控制。**高性能的坐标轴进给伺服装置构成了实现多轴联动控制的物理基础。现代数控机床普遍采用数字计算机通过软件实现轨迹插补。当前 5 轴联动插补可高效方便地实现各种复杂曲线和曲面插补的功能，并进一步发展样条插补和先进的速度、加速度、加速度变化率（Jerk）等控制功能，是高速、高精度、高动态响应加工的核心技术。**未来，数控系统还将发展自由曲面直接插补功能（SDI）并可望与基于人工智能和数字孪生的走刀轨迹规划相结合，在考虑多轴联动动力学模型以及轨迹误差和速度约束条件下，实现由 3D 模型驱动的刀轨生成和最优控制的多轴联动直接插补。**

➤ **当下我国高端数控系统处在创新链产业链加快融合阶段。**改革开放初期，我国主要采用以“引进—消化—吸收”为主导的技术学习推动高档数控机床技术追赶，产业配套政策包括国企改革、特殊优惠折旧政策科技院所改制，以“十八罗汉”和“七所一院”为主导的产业链和创新链初步形成；21 世纪进入自主创新阶段，2000-2010 年推出“04 专项”、863 课题“高精尖数控机床”重点专项，2010-2020 年，创新链与产业链加快融合，在重大专项支持下，一批专精特新民企崛起，部分国企龙头发挥产业链“链长”作用，产业创新生态系统优化，诞生了数控系统中的华中 8 型（2010 年）、i5（2015 年）、华中 9 型（2019 年）等国产优质产品，在 3c、航空航天、激光加工、汽车制造等领域均实现高端数控系统突破。但目前我国高端数控系统与海外企业差距仍明显。**国外高档数控系统基本都是驱控一体的全数字闭环控制系统。**国内数控系统硬件体系架构主要以前三个阶段为主，目前有一代的差距。**国外高档系统具有的纳米插补、力矩控制、前馈控制等核心技术都需要第四代全数字硬件架构支持，底层技术包括软件（芯片，海外工业控制专用芯片；CAE 及 CAM 领域国内大部分加工厂都在使用国外功能简化的免费版），硬件（例如海德汉的光栅尺、多摩川或尼康的光电编码器，国内产品基本处于中低端市场）。**我们预计到 2025 年我国数控系统规模达 210-262 亿元，目前数控系统外资占据绝大份额，特备是高端数控系统，替代需求强。

➤ **投资建议：**建议关注国内高端数控龙头：**华中数控、科德数控。**

➤ **风险提示：**宏观经济复苏低于预期风险，技术进步低于预期风险。

推荐

维持评级

**分析师 李哲**

执业证书：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

分析师 罗松

执业证书：S0100521110010

电话：18502129343

邮箱：luosong@mszq.com

相关研究

- 1.一周解一惑系列：制氢电解槽先行，氢能产业发展有望提速-2023/03/19
- 2.机械行业中国特色估值体系研究专题报告：设备央国企，吹响集结号-2023/03/18
- 3.一周解一惑系列：掘进机装备行业及产业链梳理-2023/03/13
- 4.一周解一惑系列：钙钛矿电池技术中激光设备应用梳理-2023/03/05
- 5.一周解一惑系列：叉车国内需求改善，锂电化加速全球竞争力-2023/02/26

目录

1 数控系统全球演进历史即信息技术发展史	3
1.1 数控机床集电子/计算机/控制/信息技术为一体	3
1.2 数控机床关键和核心技术迭代与计算机信息技术一致	3
1.3 加工效率和精度持续持续提升	7
2 我国高端数控系统国产化之路	8
2.1 当下处于创新链与产业链加快融合阶段	8
2.2 “04”专项是我国高端数控系统国产化重大举措	8
2.3 “04”专项打开国内数控系统市场空间	10
3 2025 年国内数控系统规模预估达 210-262 亿	12
3.1 2025 年我国数控系统空间约 210-262 亿元	12
3.2 当前我国数控系统以外资为主	13
3.3 系统设计及上下游配套与海外有差距	15
3.4 主流机床企业数控系统对外资依赖度高	17
4 风险提示	18
插图目录	19
表格目录	19

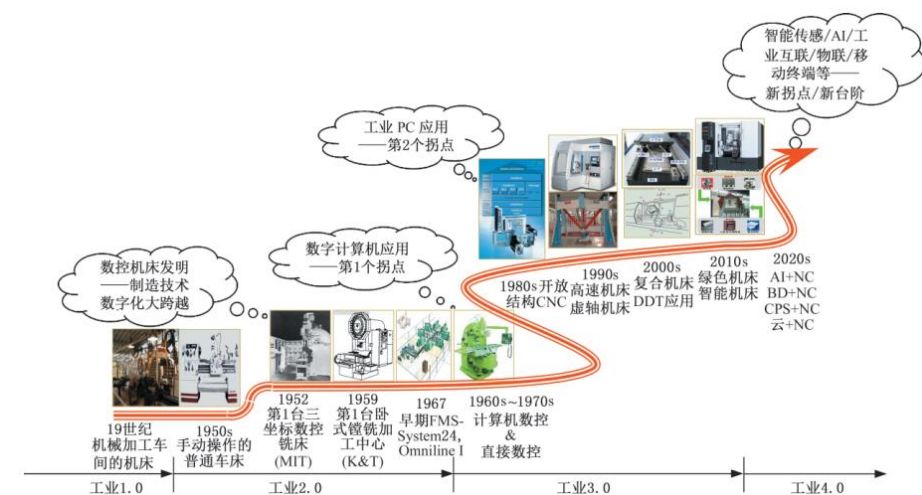
1 数控系统全球演进历史即信息技术发展史

1.1 数控机床集电子/计算机/控制/信息技术为一体

1952 年世界第 1 台数控机床在美国麻省理工学院研制成功，这是制造技术的一次革命性跨越。数控机床采用数字编程、程序执行、伺服控制等技术，实现按照零件图样编制的数字化加工程序自动控制机床的轨迹运动和运行，从此 NC 技术就使得机床与电子、计算机、控制、信息等技术的发展密不可分。随后，为了解决 NC 程序编制的自动化问题，采用计算机代替手工的自动编程工具（APT）和方法成为关键技术，计算机辅助设计 / 制造（CAD / CAM）技术也随之得到快速发展和普及应用。可以说，制造数字化肇始于数控机床及其核心数字控制技术的诞生。

数控机床升级历史经历几个阶段：①60s 初，集成电路和大规模集成电路电子计算机出现计算机在运算处理能力、小型化和可靠性方面的突破性进展，由基于分立元件的数字控制（NC）走向了的计算机数字控制（CNC），数控机床也开始进入实际工业生产应用；②80s，IBM 推出 PC 电脑，由过去专用厂商开发数控装置（包括硬件和软件）走向采用通用的 PC 化计算机数控，同时开放式结构的 CNC 系统应运而生，推动数控技术向更高层次的数字化、网络化发展，高速机床、虚拟轴机床、复合加工机床等新技术快速迭代并应用；③21 世纪开始，智能化趋势。

图1：数控机床发展历程及重要拐点



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

1.2 数控机床关键和核心技术迭代与计算机信息技术一致

机床结构主要包括两大部分：机床的各固定部分（如底座、床身、立柱、头架等）、携带工件和刀具的运动部分，这两部分现在通称为机床基础件和功能部件。随着技术的进步，当前，在同一台数控机床上实现“增材加工 + 切削加工”功能的增

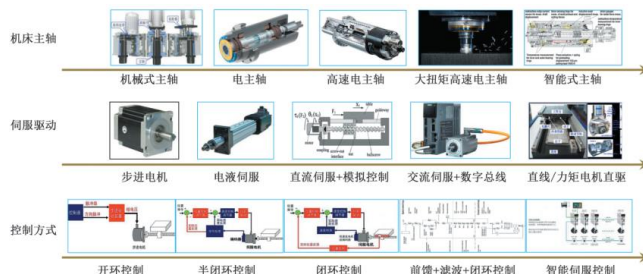
减材混合加工新 型结构机床已经进入实用化发展阶段。核心功能部件主轴/伺服驱动/控制方式也经历了智能化的演进过程。

图2：机床主机结构的演进



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

图3：数控机床主轴和伺服驱动方式的发展演进



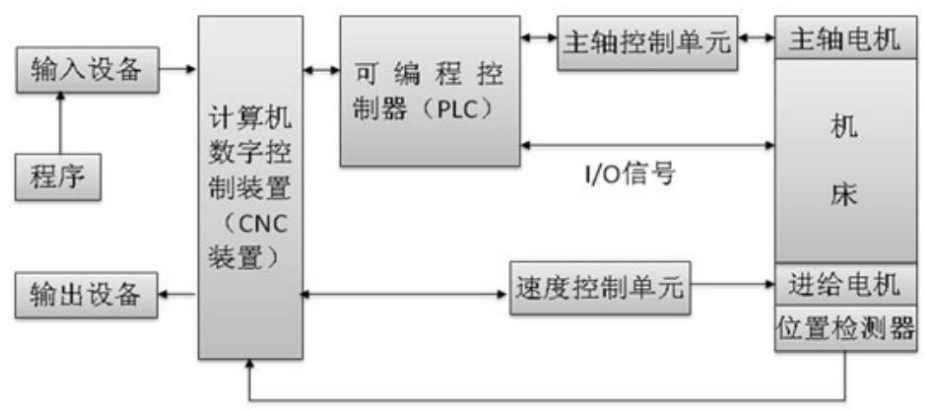
资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

1.2.1 数控系统在 AI 赋能下有望加快插补技术进步

数控系统（CNC 系统）是数控机床的重要部分，有数控程序、输入输出设备、CNC 装备（核心）、可编程控制器（plc）、主轴驱动单元和给进驱动单元（包括检测装备）等组成。数控系统随着计算机技术的发展而进步：

- ✓ NC 硬件系统：即由硬件电路来完成插补的数控系统，出现在 1952-1965；
- ✓ CNC 计算机数字系统：由硬件和软件共同完成数控的功能，具有柔性，出现在 1974 年以后。

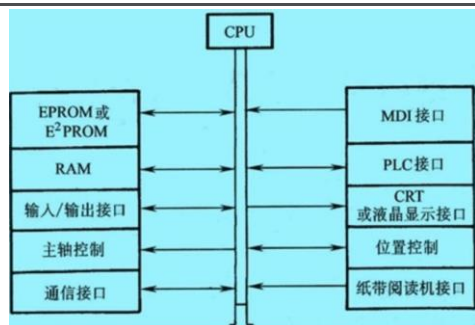
图4：数控系统部件构成



资料来源：电工学习网，民生证券研究院

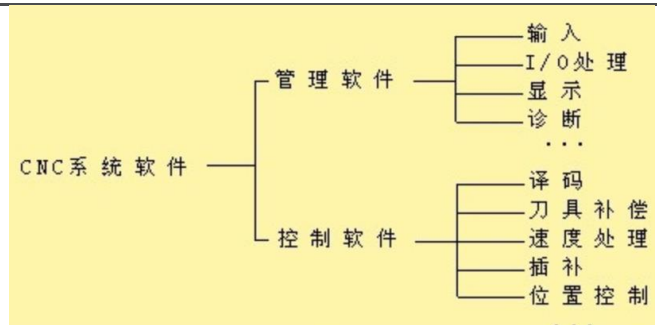
CNC 装置由硬件和软件组成，硬件一般是计算机的基本结构，还有数控机床特有功能的功能模块与接口单元，软件有管理软件和控制软件。

图5: CNC 装置硬件



资料来源: 电工学习网, 民生证券研究院

图6: CNC 装置软件



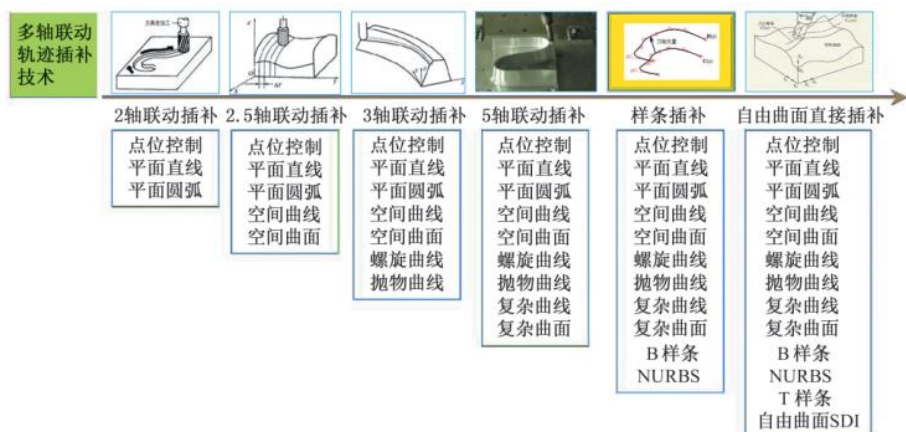
资料来源: 电工学习网, 民生证券研究院

数控系统完成诸多信息的存储和处理的工作，并将信息的处理结果以控制信号的形式传给后续的伺服电机，**这些控制信号的工作效果依赖于两大核心技术：一个是曲线曲面的插补运算，一个是机床多轴的运动控制。**

多轴联动控制技术是数控机床控制的核心技术之一。数控机床各进给轴（包括直线坐标进给轴和回转坐标进给轴）在数控装置控制下按照程序指令同时运动称为多轴联动控制。高档数控机床一般都具有3轴或3轴以上联动控制功能，多为4轴联动或5轴联动，各个进给坐标轴的运动一般由电动机在伺服驱动器控制下实现，因此，**高性能的坐标轴进给伺服装置构成了实现多轴联动控制的物理基础。**

轨迹插补也是数控机床控制的核心技术之一。实现插补运算的装置（或软件模块）称为插补器，现代数控机床普遍采用数字计算机通过软件实现轨迹插补。当前5轴联动插补可高效方便地实现各种复杂曲线和曲面插补的功能，并进一步发展样条插补和先进的速度、加速度、加速度变化率（Jerk）等控制功能，是高速度、高精度、高动态响应加工的核心技术。**未来，数控系统还将发展自由曲面直接插补功能（SDI）并可望与基于人工智能和数字孪生的走刀轨迹规划相结合，在考虑多轴联动力学模型以及轨迹误差和速度约束条件下，实现由3D模型驱动的刀轨生成和最优控制的多轴联动直接插补。**

图7：多轴联动插补技术



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

1.2.2 五轴联动数控系统特点

加工复杂曲面不仅要理论上可以加工，还需要考虑刀具和被加工的表面之间的相对位置关系。一方面如果刀具的姿态不合适会导致加工的表面质量低下；另一方面刀具还会和加工好的零件结构互相干涉，不调整刀具的相对姿态没有办法加工。这就需要赋予数控机床更多的运动自由度，使之更为灵巧。

图8：空间中的六个自由度

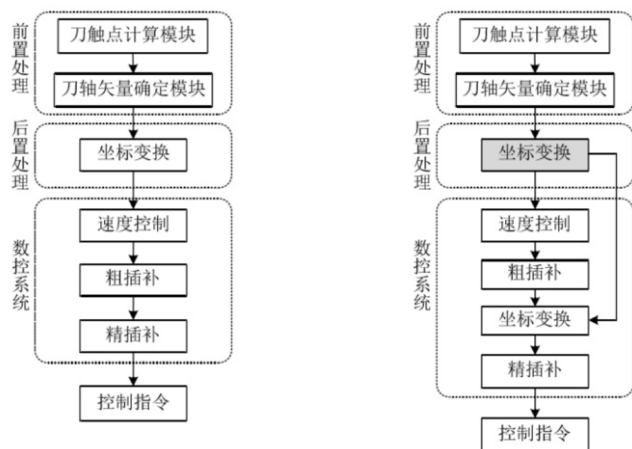


资料来源：新吴发改，民生证券研究院

由于我们所处的三维空间的相对运动只包含六个自由度（3个平动自由度以及3个转动自由度），五坐标联动就是使数控机床在具有空间上x、y、z三个方向的平动自由度外，又增加了两个方向的转动的自由度，再加上刀具本身的用于切削的转动自由度，这样刀具和工件之间的相对运动就有了全部的六个自由度，使得刀具和工件之间可以呈现任意的相对位置和相对姿态。

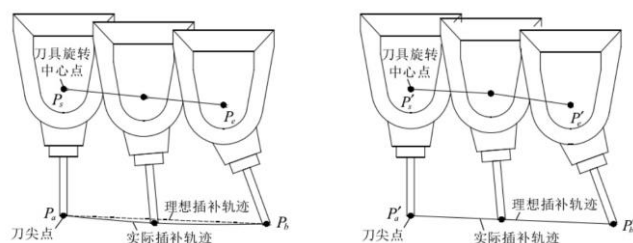
属于五轴联动机床的RTCP（旋转刀具中心编程）功能：从根本上说，主要是改变了插补运算的流程。没有RTCP功能的机床，其插补的运算对象是刀具旋转中心，也就是刀轴点，而开启RTCP功能的机床，则变成了刀尖点，有效提升了加工精度。

图9：关闭 RTCP 和打开 RTCP 指令转换流程



资料来源：OSCAX 工业数字化技术，民生证券研究院

图10：关闭 RTCP 和打开 RTCP 指令插补运算中心差异

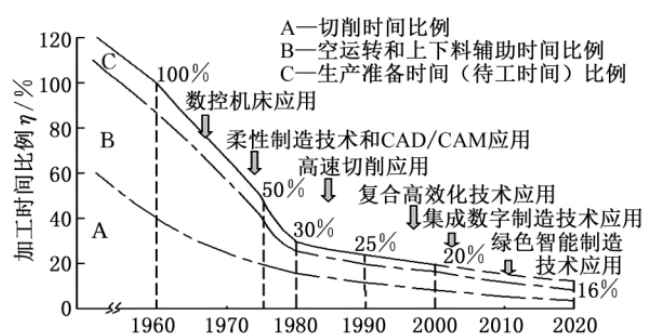


资料来源：OSCAX 工业数字化技术，民生证券研究院

1.3 加工效率和精度持续提升

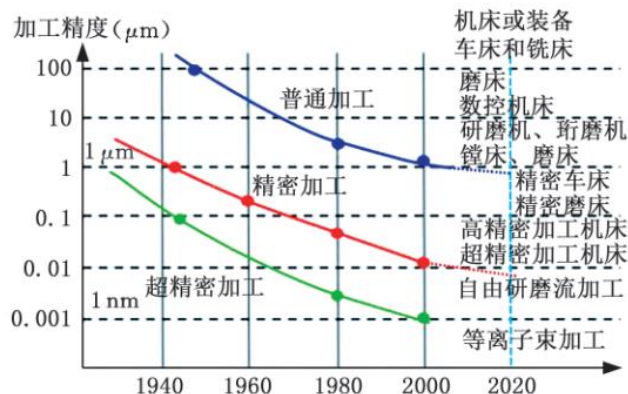
从 1960 年-2020 年，制造生产中总的加工时间（包括切削时间、辅助时间和准备时间）减少到原加工时间的 16%，即加工效率显著提升；另一方面，“切削时间、辅助时间、准备时间”这三者之间的占比也逐渐趋向一致，因此，未来提高加工效率，不仅要着眼于工艺方法优化改进和提高自动化程度，还需要从生产管理的数字化、网络化和智能化的角度，有效缩短待工时间。此外，各种加工工艺方法和机床（或装备）技术的发展带来了加工精度的持续提高，其精度提升是一个长时间技术累积和不断迭代的过程（精密加工提高 1 个精度数量级的时间超过 20 年）。

图11：制造技术应用与加工效率



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

图12：加工工艺装备与加工精度



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

2 我国高端数控系统国产化之路

2.1 当下处于创新链与产业链加快融合阶段

改革开放初期，面对同西方发达国家数控技术的巨大差距，我国主要采用以“引进—消化—吸收”为主导的技术学习推动高档数控机床技术追赶，产业配套政策包括国企改革、特殊优惠折旧政策科技院所改制，以“十八罗汉”和“七所一院”为主导的产业链和创新链初步形成；21 世纪开始，进入自主创新阶段，2000-2010 年推出“04 专项”、863 课题“高精尖数控机床”重点专项，2010-2020 年，创新链与产业链加快融合，在重大专项支持下，一批专精特新民企崛起，部分国企龙头发挥产业链“链长”作用，产业创新生态系统优化，诞生了数控系统中的华中 8 型（2010 年），i5（2015 年）、华中 9 型（2019 年）等国产优质产品。

图13：我国高档数控机床技术追赶历程



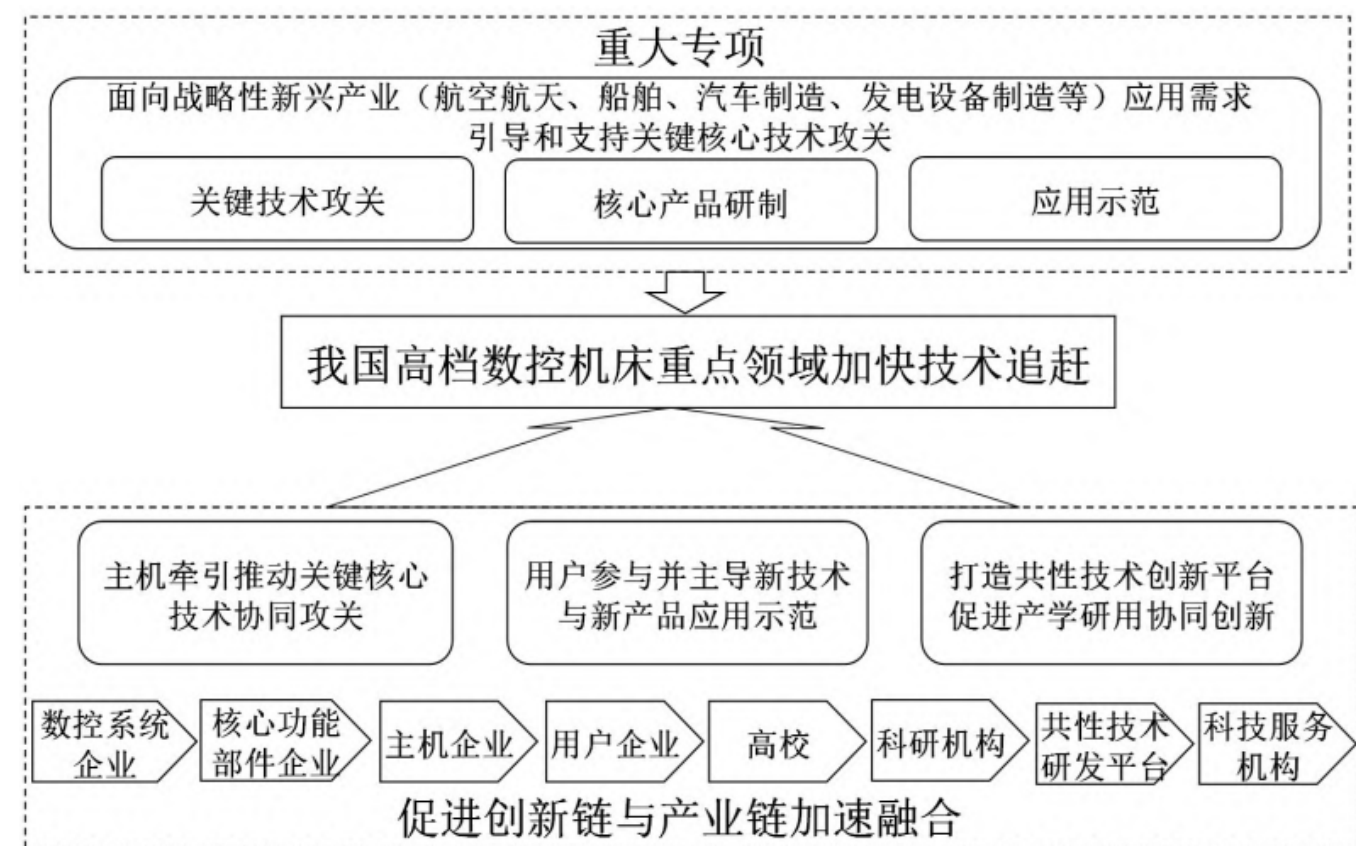
资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

2.2 “04”专项是我国高端数控系统国产化重大举措

攻克高档数控系统是“04 专项”的主要实施目标之一。在重大专项引导和支持下，高档数控机床领域产学研用主体，围绕航空航天、船舶、汽车制造、发电设备制造等战略性新兴产业重大应用需求，通过协同攻关突破了一系列关键核心技术的“卡脖子”问题，研制出一批具有自主知识产权的高档数控系统，并在战略性新兴产业

产业形成了规模化应用。

图14：我国高档数控机床重点领域加快技术追赶的主要机制



资料来源：《数控机床发展历程及未来趋势》，民生证券研究院

2.2.1 重大专项加大对重点领域核心技术攻关的引导和支持

“04 专项”实施之初采用先行先试的策略，立项支持了华中数控、广州数控、大连光洋（即科德数控）、沈阳高精和航天数控等 5 家数控系统企业自主研发高档数控系统。经过 2 年多的努力，5 家企业攻克了数控系统软硬件平台、高速高精、多轴联动、总线技术和纳米插补等一系列高档数控系统关键技术，研制出全数字总线式高档数控系统产品样机，实现了从模拟接口、脉冲接口到全数字总线控制、高速高精的技术跨越。2012 年，“04 专项”对数控系统的任务部署转向重点对标，确立了“高档数控系统瞄准国外具有五轴联动、多通道、高速高精和车铣复合功能的最先进的数控系统”“中档普及性、标准型技术瞄准市场占有率最大的进口数控系统”两大标靶，技术攻关单位公开招标的结果是：**华中数控、大连光洋承担了高档型数控系统开发和应用验证课题，广州数控、华中数控承担了标准型数控系统开发及产业化课题。**

2.2.2 主机牵引推动关键核心技术协同攻关

主机牵引主要强调 3 个方面，一是“数控系统企业要在充分研究主机用户工艺

的基础上，开展研究和开发”；二是“针对主机用户反映强烈的产品可靠性和精度保持性问题，重点攻关”；三是“数控系统必须在主机上考核”。

在研制高档型数控系统的过程中，**华中数控以劲胜智能、巨高机床、鼎泰智能等主机企业的需求为牵引**，开展高速高精控制、多轴多通道等关键核心技术的协同攻关，成功研制出达到国际先进水平的“华中 8 型”系列高性能数控系统，为相关主机产品提供了高档数控系统配套解决方案。

随着“互联网+”时代的到来和智能数控机床的普及，国内主机企业对于高档数控系统提出了更高要求。**华中数控与江西佳时特、秦川机床集团、山东蒂德、湖大海捷等主机企业协同攻关、密切合作**，在“华中 8 型”的基础上，围绕主机企业数字化转型需求，进一步开发出适用于智能精密加工中心、智能五轴加工中心、智能高速轮毂加工中心、智能车削中心、智能凸轮轴磨床、智能螺杆磨床、智能滚齿机等多种类型智能机床的“华中 9 型”数控系统。

2.3 “04” 专项打开国内数控系统市场空间

2.3.1 3c：与蓝思、创世纪、宇环等合作打破海外垄断

据湖南华数初步统计，每年我国需要数万台 3C 加工数控机床，其最典型的技术特点是**高速高精**。但是 2014 年以前，国内在加工 3C 产品的加工机床一直被日本、美国、韩国等国家占据第一阵营，数控系统主要也是以发那科、三菱等进口系统为主。这种现象，严重制约了我国 3C 行业的发展。

2015 年开始，以华中数控为代表的国产数控系统成功打破国外技术封锁，成功进入 3C 加工领域，**华中数控已经有数万台套华中 8 型数控系统在 3C 行业应用，在国产数控系统是唯—与国外数控系统同台竞技的品牌**。根据 3C 加工工艺的不同，可以将所需数控机床分为如下几类：金属加工用高速钻攻中心（与深圳创世纪、湖北毅兴等企业批量配套）；玻璃加工类玻璃机（与深圳创世纪、蓝思科技等企业批量配套）；手机抛光类抛光机（与湖南宇环数控、宇晶数控等企业批量配套）；超声波雕铣机（与深圳汇专科技等公司批量配套）。这三类机型，华中数控都与头部机床企业实现大批量配套，已经打入苹果核心供应链。

2.3.2 航空航天：与沈飞合力打开国内市场

在“04 专项”支持下，沈飞与华中数控共同组建了“联合攻关小组”，深度参与“华中 8 型”等高档数控系统的技术攻关。在技术攻关取得成功后，双方还共同投资成立了沈阳华飞智能科技有限公司，推动“华中 8 型”数控系统、数控车间信息化管理系统和数控加工编程技术等“04 专项”成果的产品化及推广应用。2012 年以来，国产数控系统在沈飞对五轴高速龙门加工中心、AB 摆五轴加工中心、立

式加工中心、车削中心等进口机床的改造中得到应用，其功能、性能和可靠性在长时间生产验证中通过了考验。

目前，沈飞批量配置华中 8 型数控系统数百台套，其中很多都是五轴以上数控系统，主要用于各种飞机的梁、框、肋类零件、发动机、燃汽轮机等机匣、整体叶盘、叶片、盘轴、复杂壳体、燃料元件和特种材料等关键零件加工。在沈飞的示范效应下，“华中 8 型”在上海航天八院、航天三院、航天四院等重点航空航天企业，以及东方汽轮机公司等重点发电装备行业获得批量应用。

2.3.3 汽车制造：与吉通机械打开市场

2014 年，华中 8 型高档数控系统开始在吉通机械试用，用于加工乘用车换挡操纵机构、轮毂轴、车轮支架、转向节、控制臂、手刹车及各类冲压件等乘用车零部件产品。同样的配置，尤其是五轴数控设备，其价格是国外品牌同类产品的约 1/4，既解决了“卡脖子”问题，又带来巨大的福利。吉通机械目前有千余台加工中心和数控机床，目前近一半设备配备华中数控系统。

2.3.4 激光加工：与华工激光合作开启国产化

五轴联动数控系统是三维五轴激光切割机的核心单元技术，华中数控与华工激光合作研发的国产化系统在测试中效率、性能比肩国际一流品牌，效率上甚至实现了超越。2022 年 10 月，“三维五轴流线化智造”产线已正式投入使用，该产线可实现激光装备标准化、自动化、批量化生产，效率提升 200%。

3 2025 年国内数控系统规模预估达 210-262 亿

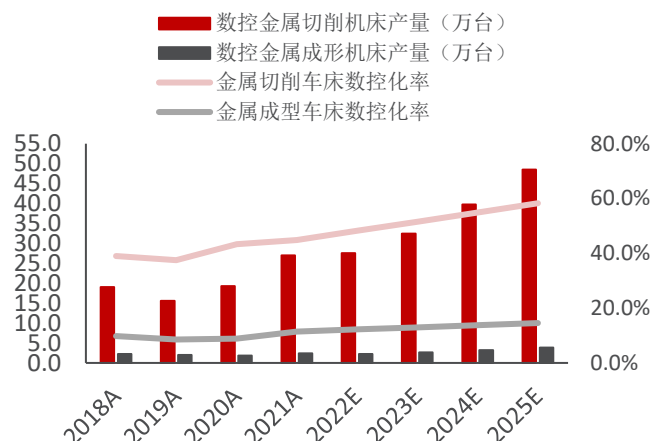
机床作为工业母机，是工业生产最重要工具之一。参考智研咨询披露，国外发达经济体机床数控化率高，日本机床数控化率维持在 80%以上，美国和德国机床数控化率超过 70%。根据日本机床工业数据显示，2021 年日本机床产量 6.76 万台，其中数控机床产量 5.63 万台，机床数控化率 83.3%，2022 年 1-5 月机床产量 3.11 万台，其中数控机床 2.66 万台，机床数控化率 85.6%。**2021 年中国金属切削机床产量 60.2 万台，数控金属切削机床产量 27 万台，金属切削机床数控化率为 43.3%；金属成型机床产量 21 万台，数控金属成型机床 2.4 万台，金属成型机床数控化率 11.4%，二者合计近 30 万台。参考日本数控化率，我国机床数控化率有望持续提升，带动数控系统需求持续增长。**

图15：日本机床数控化率



资料来源：智研咨询，民生证券研究院

图16：中国金属切削及成型机床数控化率偏低



资料来源：智研咨询，民生证券研究院

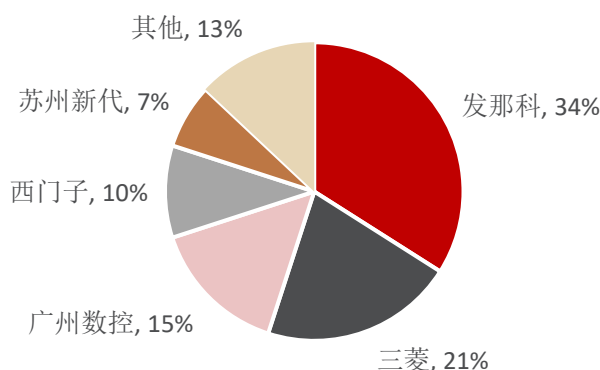
3.1 2025 年我国数控系统空间约 210-262 亿元

2022 年我国金属切削机床产量 57.2 万台，金属成型机床产量 18.3 万台，随着设备更新周期到来及经济恢复上行，我国机床有望迎来产量上行周期，我们假设到 2025 年金属切削机床产量达 83.2 万台，金属成型机床产量达 26.6 万台；假设金属切削机床数控化率保持每年 3.4%的提升速度（2016-2021 年的平均提升速度），2025 年达 58.3%，金属成型机床数控化率提升至 2025 年的 14.5%，每年提升 0.8%（2016-2021 年的平均提升速度），我们计算得出**2025 年我国数控金属切削机床产量 48.5 万台，数控金属成型机床产量达 3.9 万台，合计为 52.4 万台，我们参考华中数控数控系统均价 4-5 万元估算出市场空间约 210-262 亿元。**

3.2 当前我国数控系统以外资为主

发那科、西门子、三菱三大龙头 2020 年合计市场份额达 65%，排名第五的苏州新代为台湾数控系统供应商新代科技在大陆设立的子公司。仅有国产厂商广州数控凭借在中低端车床数控系统领域的拓展跻身国内市场前列。整体而言，目前国内主流数控系统市场还是被外资龙头垄断，整体国产化率较低导致我国整体机床产品仅为中低端产品，高端五轴数控机床仍主要依赖进口。根据科德数控招股书披露，在国家政策的支持与引导下，国内涌现了一小批研制高档数控系统的企业并实现部分国产化，但市场占有率不足 10%。

图17：2020 年我国数控系统竞争格局占比情况



资料来源：华经产业研究院，民生证券研究院

3.2.1 当前国内外功能和性能差距

广义的高档数控系统一般是指以西门子 840D、海德汉 TNC640 的功能和性能为指标的全数字数控装置，并能够实现产业化、规模化量产，满足高端工业母机如五轴联动铣削加工中心、车削加工中心、车铣复合加工中心等数控机床的配套需求。高档数控系统的硬件架构主要是高性能、多 CPU 计算机硬件平台和基于高速现场总线技术的全数字高性能运动控制硬件平台；软件以开放式软件平台、数字化通讯接口协议的模块化软件结构，实现数控系统的工程化开发。高档数控系统通过体系结构、软硬件功能模块及整机可靠性设计、试验和测评，取得高质量批量生产的许可。

国外高档数控系统具备高速程序预处理技术、多通道多轴联动控制技术、多通道及复合加工控制技术、纳米级高精度插补技术、样条插补技术、空间刀补、机床几何误差补偿、热变形补偿、动态误差补偿和智能故障诊断技术、双轴同步驱动技术、旋转刀具中心编程 (RTCP) 技术等。国内的华中数控、大连广洋、广州数控也具备以上部分功能。

表1：国内外各档次代表性数控系统功能及性能表

分类级别	代表品牌	功能完备性	性能及适用范围	可靠性 (MTBF)
国外顶尖	西门子、海德汉	CAD、CAM、多种样条曲线插补、RTCP、空间刀补、智能误差补偿、3D 仿真、后置处理、智能诊断、MES、ERP；1000M 工业总线通讯	三环全数字驱控一体、纳米级高速高精曲线插补、智能化自适应机床参数配置、通过参数选择可以满足几乎所有设备控制应用	30,000h
国外一流	发那科、三菱、NUM	CAD、简易 CAM、多种样条曲线插补、RTCP、空间刀补、综合误差补偿、3D 仿真、后置处理、智能诊断；1000M 工业总线通讯	三环全数字驱控一体、纳米级高速高精曲线插补、通过参数数据可满足车、铣、加工中心及各类专用设备控制	15,000h
台湾系统	新代、亿图、宝元	简易 CAM、NURBS 样条插补、RTCP、侧刃加工、动态误差补偿、2D 仿真、在线诊断；100M 工业总线通讯	位置闭环控制、微米级高速高精插补、通过参数选择可满足车、铣、加工中心及部分专用设备控制	10,000h
国内高端	华中、光洋、广数、KND	NURBS 样条插补、RTCP、侧刃加工、动态误差补偿、2D 仿真、在线诊断；100M 工业总线通讯	位置闭环控制、微米级高速高精插补、具有车、铣、加工中心及部分专用设备控制系统；加工效率一般	10,000h
国内普适	华兴、开通、达丰、广泰	通用插补功能、刀具直线及半径补偿功能、静态误差补偿、2D 仿真、在线诊断；100M 工业总线通讯	脉冲或总线闭环控制、小线段前瞻插补控制、具有车、铣、加工中心及个别专用设备控制系统；加工效率较低	3,000h

资料来源：《中外高端数控系统差距分析及对策》，民生证券研究院预测

目前，复杂曲面零部件的生产和制造在航空航天/汽车/刀具和磨具等行业具有重要的现实意义。首先，这类零件的高速加工一般在五轴联动数控机床上完成，其次，在 CAD/CAM 软件中，零件自由曲面的设计常采用 NURBS（非均匀有理 B 样条）表示，NURBS 技术在 CAD/CAM 领域已经取得比较成功的应用，但在 CNC 领域应用相对滞后，目前只有发那科/西门子/三菱等少数高档数控系统支持 NURBS 样条曲线插补。目前有关 NURBS 插补方法的研究大多局限于三轴联动，五轴联动 NURBS 插补技术未见公开发表。国外 CNC 系统企业的五轴联动 NURBS 插补技术对华禁售，国内进口的五轴联动数据系统大多只是线性插补等简单功能。

其次，在 RTCP 功能方面，国内部分头部数控系统企业已经掌握，但技术成熟度相比国外企业仍需不断训练迭代。

性能较低，由于高精密检测器件的配套，国外高档系统已实现纳米插补、镜面插补。通过高速总线实现多达 128 通道，每通道联动轴数 8 轴的多通道复合加工技术，拥有通道独立轨迹控制、同步控制及通道间的协调控制技术。国产高端系统能够稳定满足同时控制 4 通道，每通道最大联动轴数 6 轴，性能达到插补周期 0.1ms，程序前瞻段数达到 5000 段，处理速度 1000 段 / 毫秒，最小分辨率 0.1 μm 。

3.2.2 可靠性和寿命有差距

国外高档系统的平均无故障运行时间可达 30,000 小时，使用寿命也远大于配套的机床本体，可达 10 年之久，国内一般在 10,000 小时左右，硬件本体质保在 3 年。因为国内数控系统主要与中低端机床配套，使用环境恶劣，因此硬件本体寿

命较短。近年来，中国电子技术飞速发展，从 PCB 电磁兼容设计、制造、元器件焊接、电路板老化处理等多个环节已经与国外不相上下。造成国内系统与国外高端系统相比，可靠性较低的主要原因是软件的容错性及智能化较低。

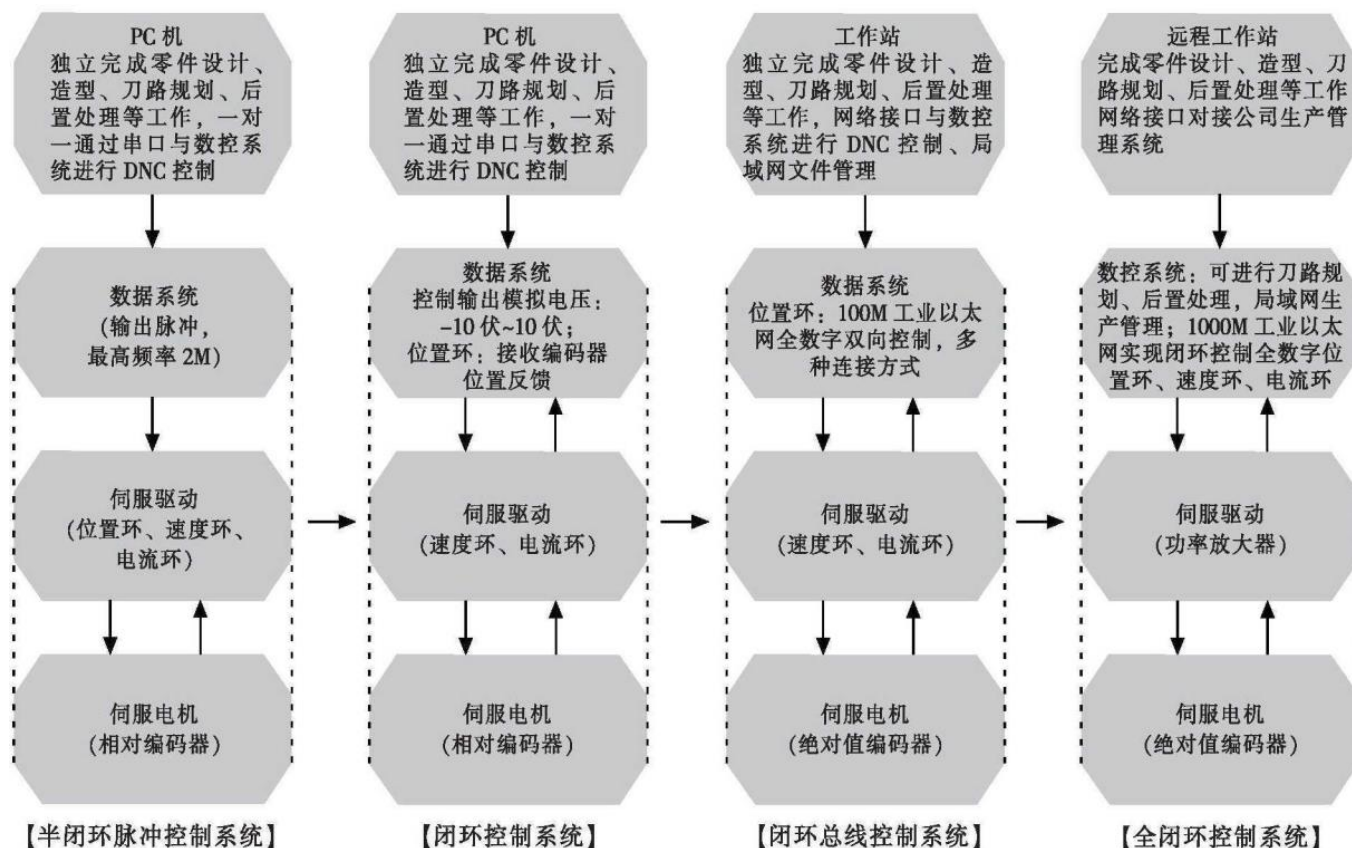
国外系统软件经过多年多种现场应用的反馈修改积累、迭代，健壮性已经大大增强，几乎可以兼容任何工况，国内系统软件主要是为了通用机床设计开发，专用场合应用较少，由于国内使用时间较短，因此反馈迭代问题不足以应对各种各样的工作现场。

3.3 系统设计及上下游配套与海外有差距

3.3.1 系统整体设计

广义的数控系统包括控制器、驱动器及进给电机，其三者的连接结构、数据通讯方法、运行软件分工决定了整套数控系统的成本及性能。**国外高档数控系统基本都是驱控一体的全数字闭环控制系统。**国内数控系统硬件体系架构主要以前三个阶段为主，国外高档数控系统系统架构早已进入第四阶段，目前仍有一代的差距。**国外高档系统具有的纳米插补、力矩控制、前馈控制等核心技术都需要第四代全数字硬件架构支持。**

图18：数控系统体系架构发展阶段



资料来源：《中外高端数控系统差距分析及对策》，民生证券研究院

3.3.2 软件开放度和完整度

数控系统应用软件由人机交互、译码、刀补、插补、位置控制等软件模块组成，是数控系统的灵魂，决定了系统的功能和性能，开放的软件体系架构支撑了系统的普适性，是高档系统的一个重要标志，国内系统以嵌入式软件架构为主。数控系统的功能和算法是系统核心技术的集中体现，功能的扩展完善及算法的性能提升是应用端长期迭代的结果。部分国产高端系统虽然功能强大，但由于缺乏现场应用经验，软件迭代周期短，参数配置不够灵活，导致软件完备性和成熟度较低，这些可以通过国产化解决，并非核心难点。

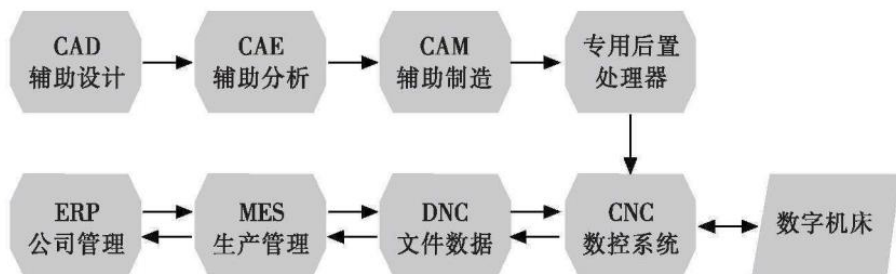
3.3.3 上下游配套

机械零件的加工效率、精度及表面的光洁度由多重因素决定。从 2D 零件设计到 3D 外形设计仿真，再到走刀路径规划、力学加工分析、后置处理及系统插补算法，每一层软件功能都在对最终加工效果起着作用。目前国内 2D 设计软件 CAD 功能基本与国外一致，但是在 CAE 及 CAM（北京精雕 CAM 软件在国内值得肯定）领域落后较多，大部分加工厂都在使用国外功能简化的免费版。针对国产高端数控系统设计的专用后置处理器更弱，国产系统只能使用国外 CAM 软件免费开放的后置处理功能，与数控系统配合简单，导致系统使用部分功能缺失，整体性能低下，错失特定市场机会。

数控系统是一套复杂的计算机系统，硬件模块使用大量的芯片，芯片大多欧美企业供应，且工业控制类芯片逐渐专业化，海外巨头与芯片企业进行制定设计，但国内企业规模偏小，定制化需求难以满足。

系统配套的零部件主要是检测模块，包括温度传感器、压力传感器、光栅尺、光电编码器等，目前高端设备主要使用进口器件，例如海德汉的光栅尺、多摩川或尼康的光电编码器，国内产品基本处于中低端市场。由于各厂家接口不统一，使得系统出厂时需要配置相应的接口板，不但增加了成本，而且降低了整体可靠性。

图19：数控系统支撑软件



资料来源：《中外高端数控系统差距分析及对策》，民生证券研究院

3.4 主流机床企业数控系统对外资依赖度高

如果以进口数控加工中心代表五轴高端数控机床需求，2017-2022 年，我国每年进口高端数控机床在 1.46-3.34 万台，进口金额 21.3-34.7 亿美元，按照美元兑人民币 6.9 元计算，我国高端数控机床占国内需求约 10%。其次，从国内主流数控机床企业数控系统供货比例来看，目前国内头部数控机床企业数控系统对外资依赖度较高，尤其民企，除了科德自研系统外，其他依赖度大多在 50%以上，甚至 100%，而国内数控系统供应商基本为华中数控和广州数控。后续可替代潜力较大。

表2：2017-2022 年我国进口数控加工中心情况

时间	数控机床进口金额 (亿美元)	进口台数 (台)	均价 (万美元/台)
2017A	33.9	33,407	10.1
2018A	34.7	29,035	11.9
2019A	21.3	10,287	20.7
2020A	18.5	14,644	12.6
2021A	26.7	24,049	11.1
2022A	23.7	18,840	12.6

资料来源：中国海关，民生证券研究院

表3：国内主流机床企业数控系统外资占比情况

企业名称	2021 年销量 (台)	行业市占率 1 (金属切削机床口径)	行业市占率 2 (数控金属切削机床口径)	数控系统外资占比	外资供应商	国内供应商
创世纪	25,769	4.3%	9.5%	较高	三菱战略客户/西门子/发那科	华中数控（玻璃加工）
秦川机床	13196	2.2%	4.9%	-	-	华中数控（联合开发华中 9 型）
沈阳机床	10100	1.7%	3.7%	无	无	自供
海天精工	4882	0.8%	1.8%	100%/77.2%/100%/100% (2013-2016H1, 前五供货商占比)	发那科/三菱	宁海海格
浙海德曼	4211	0.7%	1.6%	2017-2018 年超过 50%，2019 年降到 50%以上	西门子	广州数控
华东重机	3508	0.6%	1.3%	100%	发那科/三菱	无
纽威数控	3,025	0.5%	1.1%	99.5%/97.8%/93.0% (2018-2020)	发那科/西门子/海德汉	华中数控、广州数控
国盛智科	1,850	0.3%	0.7%	77.3%/83.5%/91.1% (2017-2019)	发那科（主要）/西门子	华中数控、广州数控
日发精机	1696	0.3%	0.6%	较高	西门子	-
科德数控	158	0.03%	0.1%	无	-	自供

资料来源：相关公司公告，民生证券研究院

4 风险提示

1) 宏观经济复苏低于预期风险。机床设备属于通用设备，与下游经济紧密相关，如果宏观经济复苏低于预期，将意味着机床企业需求低于预期，下游购机意愿存在低于预期可能。

2) 技术进步低于预期风险。高端数控系统为集成技术，国内当下在软硬件角度均与海外存在差距，存在技术进步低于预期风险。

插图目录

图 1: 数控机床发展历程及重要拐点.....	3
图 2: 机床主机结构的演进	4
图 3: 数控机床主轴和伺服驱动方式的发展演进.....	4
图 4: 数控系统部件构成.....	4
图 5: CNC 装置硬件	5
图 6: CNC 装置软件	5
图 7: 多轴联动插补技术.....	6
图 8: 空间中的六个自由度	6
图 9: 关闭 RTCP 和打开 RTCP 指令转换流程.....	7
图 10: 关闭 RTCP 和打开 RTCP 指令插补运算中心差异.....	7
图 11: 制造技术应用与加工效率.....	7
图 12: 加工工艺装备与加工精度.....	7
图 13: 我国高档数控机床技术追赶历程	8
图 14: 我国高档数控机床重点领域加快技术追赶的主要机制.....	9
图 15: 日本机床数控化率	12
图 16: 中国金属切削及成型机床数控化率偏低.....	12
图 17: 2020 年我国数控系统竞争格局占比情况	13
图 18: 数控系统体系架构发展阶段	15
图 19: 数控系统支撑软件	16

表格目录

表 1: 国内外各档次代表性数控系统功能及性能表.....	14
表 2: 2017-2022 年我国进口数控加工中心情况	17
表 3: 国内主流机床企业数控系统外资占比情况.....	17

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，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，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026