

行业研究

工业母机：国之重器，高端装备制造的基石

——工业母机系列报告（一）

要点

工业母机市场

国产化与数控化：目前我国低端数控机床基本达到自给自足，中端数控机床基本实现国产替代，但高端数控机床国产化率仍处于较低水平；2022 年金属切削机床数控化率为 46.3%，金属成形机床数控化率为 11.3%，与美、德、日等发达国家 70-80% 的水平仍有较大差距。

全球工业母机市场：根据德国 VDW 数据，2022 年全球机床产值 803 亿欧元，同比+12%。2022 年，中国（不包含中国台湾地区）机床产值全球占比 32%，机床消费全球占比 34%，机床出口全球份额 14%，机床进口全球份额 16%。

国内工业母机市场：2023 年我国金属加工机床生产额为 1935 亿元，同比增长 1.1%。消费额为 1816 亿元，同比下降 6.2%。根据 VDW 数据，我国机床消费中进口依赖度从 2018 年的 33% 下降至 2022 年的 24%。随着 10 年更换周期的到来，预计我国机床行业将迎来大规模替换需求。

工业母机产业链

1) 数控系统：关键技术包括译码及刀具补偿、插补方法、速度前瞻、坐标变换及误差补偿。2022 年全国数控系统市场规模约在 135.2 亿元，市占率前三分别为发那科、三菱、西门子（市占率 37%/17%/12%）。国产品牌主要面向中端市场和低端市场，代表厂商华中数控、广州数控；

2) 主轴：主轴部件是主运动的执行件，它夹持刀具或工件，并带动其旋转。电主轴在速度、精度、噪声和更换方便性方面，皆优于其他传动形式，是高端数控铣床、加工中心和复合加工机床的首选方案；

3) 进给驱动：负责在数控系统的指挥下，将机床的执行部件（如工作台、滑座、立柱等）移动到预定位置。直线进给主要用到滚珠丝杆、直线电机；圆周进给主要用到蜗轮蜗杆转台、凸轮滚子转台、谐波转台、直驱转台；

4) 测量系统：作用是检测位移和速度，发送反馈信号，构成闭环控制，主要包括编码器和光栅尺。国内市场由海德汉、雷尼绍等品牌占领，禹衡光学（奥普光电子公司）发力高端市场。

投资建议：

整机层面：看好技术领先的头部机床企业，建议关注科德数控（五轴联动数控机床）、海天精工（数控龙门加工中心）、纽威数控（立加、卧加产品线丰富）、宇环数控（数控研磨抛光）；

零部件层面：

1) 数控系统作为工业母机之“脑”，技术壁垒高，产业链地位关键，建议关注华中数控；2) 主轴与进给系统作为工业母机之“四肢”，是数控机床高精度的保证，代表了高水平的机加工工艺和先进制造能力，建议关注贝斯特（丝杠）、昊志机电（主轴）、绿的谐波（转台）；3) 测量系统作为工业母机之“眼”，是数控机床实现闭环控制的重要组成，目前国产化率仍处于较低水平，建议关注奥普光电。

风险分析：（1）政策支持力度不及预期；（2）竞争加剧风险；（3）核心技术进步不及预期。

机械行业
买入（维持）

作者

分析师：黄帅斌

执业证书编号：S0930520080005

0755-23915357

huangshuaibin@ebscn.com

分析师：陈佳宁

执业证书编号：S0930512120001

021-52523851

chenjianing@ebscn.com

联系人：李佳琦

021-52523853

lijiaqi@ebscn.com

联系人：夏天宇

xiatianyu@ebscn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

目录

1、工业母机：高端装备制造的基石	6
2、工业母机市场：聚焦头部国家.....	8
2.1、全球市场：中国稳居全球生产、消费第一	8
2.2、国内市场：进口依赖度下降，出口快速提升.....	11
3、工业母机产业链：国产替代任务艰巨	14
3.1、数控系统：工业母机之“脑”	14
3.1.1、数控系统关键技术.....	17
3.1.2、数控市场格局	18
3.2、主轴：工业母机之“左手”	20
3.2.1、从机械主轴到电主轴	20
3.2.2、主轴轴承	21
3.3、进给驱动工业母机之“右手”	22
3.3.1、直线进给	24
3.3.2、圆周进给	28
3.4、测量系统：工业母机之“眼”	31
3.4.1、编码器	31
3.4.2、光栅尺	33
4、投资建议.....	37
4.1、科德数控	38
4.2、海天精工	38
4.3、纽威数控	39
4.4、宇环数控	40
4.5、华中数控	41
4.6、奥普光电	42
5、风险分析.....	42

图目录

图 1：数控机床分类	6
图 2：数控机床上下游	6
图 3：中国机床国产化率	7
图 4：中国金属切削机床数控化率	7
图 5：国内机床行业竞争结构	7
图 6：全球机床产值	8
图 7：2022 年全球机床生产情况	8
图 8：全球机床产值国家和地区前十	8
图 9：2022 年全球机床消费情况	9
图 10：全球机床消费国家和地区前十	9
图 11：2022 年全球机床出口情况	9
图 12：全球机床出口国家和地区前十	9
图 13：2022 年全球机床进口情况	10
图 14：全球机床进口国家和地区前十	10
图 15：主要国家和地区机床供需平衡	10
图 16：主要国家和地区机床生产中出口占比	11
图 17：主要国家和地区机床消费中进口占比	11
图 18：中国机床产业发展历程	11
图 19：我国金属加工机床生产与消费额	12
图 20：我国机床消费中进口依赖度	12
图 21：我国金属加工机床产量	12
图 22：日本对华机床订单	12
图 23：中国制造业固定资产投资完成额累计同比	13
图 24：中国金属切削机床产量与日本对华机床订单	13
图 25：金属切削机床进出口	13
图 26：金属成形机床进出口	13
图 27：2023 年中国进口机床分布	13
图 28：2023 年中国出口机床分布	13
图 29：表面成形运动简图	14
图 30：数控机床的加工过程	14
图 31：数控系统的原理	15
图 32：全球与中国数控系统发展历程	17
图 33：刀具路径的分解	17
图 34：中国数控系统厂商市场竞争格局	19
图 35：2022 年中国数控系统竞争格局（销售额）	19
图 36：全国数控系统市场规模	19
图 37：数控机床主轴的传动类型	20
图 38：电主轴剖面图	20
图 39：智能电主轴	21

图 40: 滚动轴承与滑动轴承 (性能)	22
图 41: 液体静压轴承工作原理图	22
图 42: 进给驱动的组成	23
图 43: 进给系统的分类	23
图 44: 不同用途区分的滚珠丝杠精度等级表	24
图 45: 2015-2022 年全球滚珠丝杠市场规模	26
图 46: 2015-2022 年中国滚珠丝杠市场规模	26
图 47: 2021 年国内滚珠丝杠高端市场	26
图 48: 2021 年国内滚珠丝杠中端市场	26
图 49: 直线电动机原理	27
图 50: 直线电动机	27
图 51: 全球直线电机行业市场	27
图 52: 全球直线电机行业市场格局	27
图 53: 直接驱动与间接驱动的加速能力	28
图 54: 直接驱动与间接驱动的成本比较	28
图 55: 蜗轮蜗杆传动的工作台	29
图 56: 滚柱传动机构的原理	29
图 57: 四轴转台	29
图 58: 五轴转台	29
图 59: 直接驱动工作台和力矩电动机	30
图 60: 中国数控转台市场规模	31
图 61: 中国数控转台市场 (单轴与双轴) (2021)	31
图 62: 光电编码器的结构示意图	32
图 63: 全球编码器市场规模	32
图 64: 全球编码器市场 (直线型与旋转型)	32
图 65: 全球编码器市场规模 (按检测方式)	33
图 66: 全球编码器市场规模 (按地域)	33
图 67: 光栅尺测量系统组成原理	33
图 68: 封闭式直线光栅尺结构示意图	34
图 69: 相位光栅的刻线高度约为 $0.25\ \mu\text{m}$	34
图 70: 成像扫描原理	34
图 71: 干涉扫描原理	34
图 72: 增量式光栅尺	35
图 73: 绝对式光栅尺	35
图 74: 中国光栅尺市场	35
图 75: 全球光栅尺市场	35
图 76: 中国光栅尺下游应用领域 (2021)	36
图 77: 中国光栅尺销量	36
图 78: 海天精工发展历程	38
图 79: 纽威数控发展历程	39
图 80: 宇环数控发展历程	40

图 81：华中数控发展历程.....	41
图 82：奥普光电发展历程.....	42

表目录

表 1：机床数控技术发展的不同阶段	15
表 2：数控系统分类（高、中、低端）	16
表 3：数控系统中的关键技术	18
表 4：不同领域对机床主轴的要求	20
表 5：不同主轴的性能评价	21
表 6：不同轴承系统的性能比较.....	22
表 7：滚珠丝杠分类与特点	25
表 8：直线电机直驱方式与传统驱动方式性能比较	28
表 9：常用位置检测装置分类	31
表 10：编码器在机床各部件中的应用.....	32

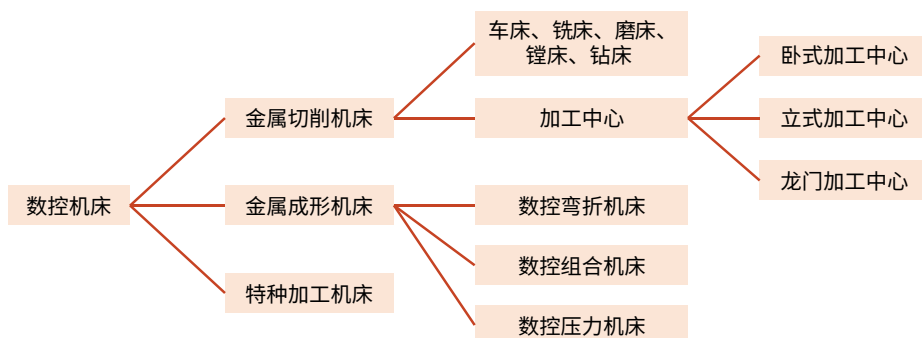
1、工业母机：高端装备制造的基石

机床是对金属、其他材料的坯料或工件进行加工，使之获得所要求的几何形状、尺寸精度和表面质量的机器。机床是制造机器的机器，这是机床区别于其他机器的主要特点，故机床又称为工业母机。

数控机床是用数字化信息对机床的运动及其加工过程进行控制的机床，是高效率、高精度、高柔性和高自动化的现代机电一体化设备。

数控机床按照材料加工方式，工业母机可分为金属切削机床、金属成形机床、特种加工机床。其中金属切削机床包括车床、铣床、磨床等单功能性机床以及带有刀库和自动换刀装置，从而可以实现多种不同加工操作的加工中心。

图 1：数控机床分类



资料来源：头豹产业研究院

数控机床上游行业主要供应钣金件、铸件、精密件、功能部件、数控系统、电气元件等。精密件主要包括主轴单元和丝杠、线轨、轴承等传动部件等，功能部件主要包括数控回转工作台、刀库、机械手、齿轮箱、铣头、刀架等。数控系统包括驱动装置，以及控制和检测装置等。数控机床的下游用途十分广泛，涵盖国民经济的多个重要领域，如航空航天、机械设备等。

图 2：数控机床上下游

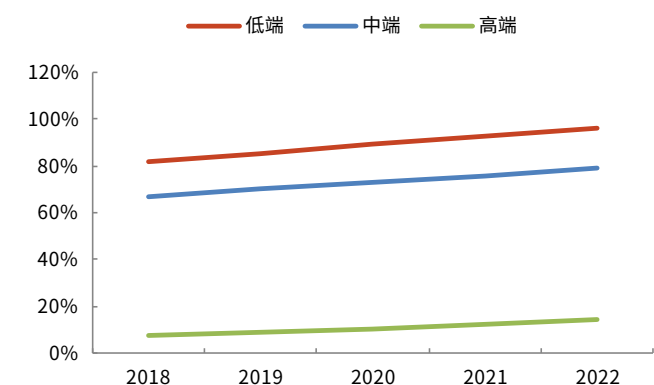


资料来源：国盛智科招股说明书

目前我国低端数控机床基本达到自给自足，中端数控机床基本实现国产替代，但高端数控机床国产化率仍处于较低水平。根据科德数控公告，截至 2022 年底国内高端机床国产化率不足 10%。

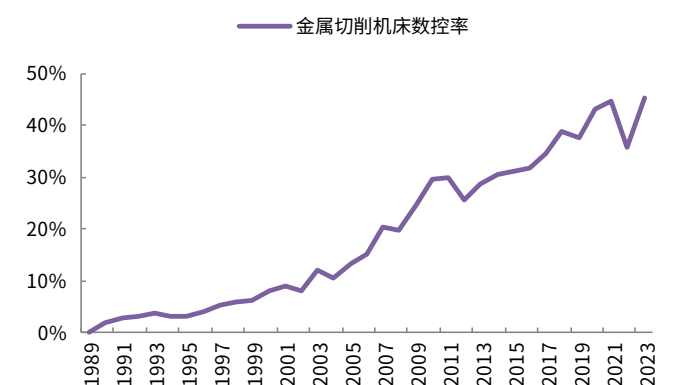
据中国机床工具工业协会数据，2023 年金属切削机床数控化率为 45.5%。在发达国家中，日本机床数控化率维持在 80% 以上，美国和德国机床数控化率均超过 70%，与之相比国内机床数控化率提升空间较大。

图 3：中国机床国产化率



资料来源：头豹产业研究院

图 4：中国金属切削机床数控化率



资料来源：、光大证券研究所

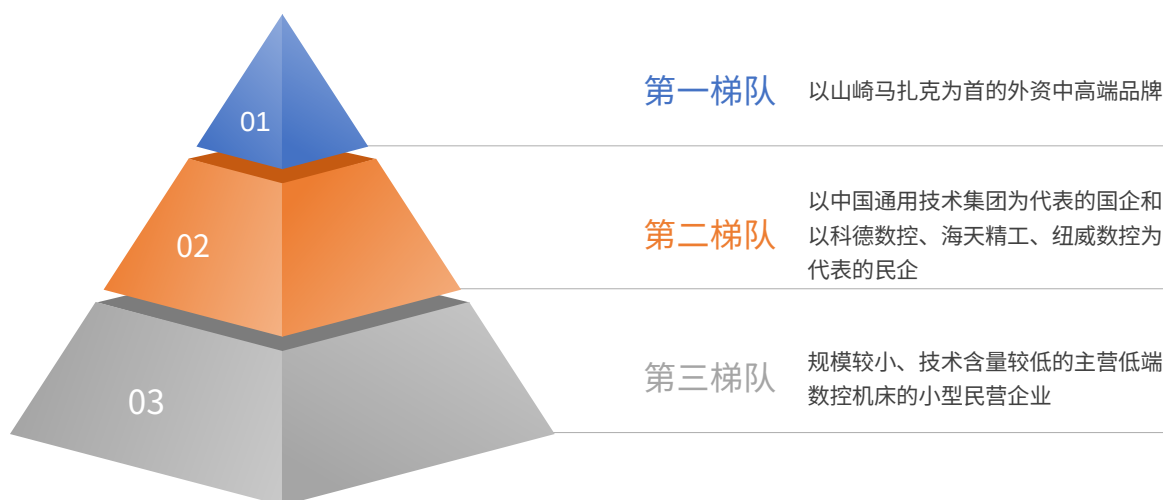
当前国内机床行业大致可分为三大梯队，其中：

第一梯队：历史悠久，实力雄厚的外资企业，主营业务是高端数控机床，如日本山崎马扎克，德国通快，德马吉森精机，美国马格等。目前大多数都通过在中国投资或合资建厂；

第二梯队：国内最先起步，并具有一定技术实力，资金实力和品牌影响力的民企和国企。从最早的国营企业“十八罗汉”，到现在如海天精工，创世纪，纽威数控等新主力军民营企业；

第三梯队：规模较小，技术含量较低的主营低端数控机床的小型民营企业。产品价格便宜，产品加工精度要求不高，主要应用于一般民用产品，汽车零部件粗加工等领域。

图 5：国内机床行业竞争结构



资料来源：头豹产业研究院

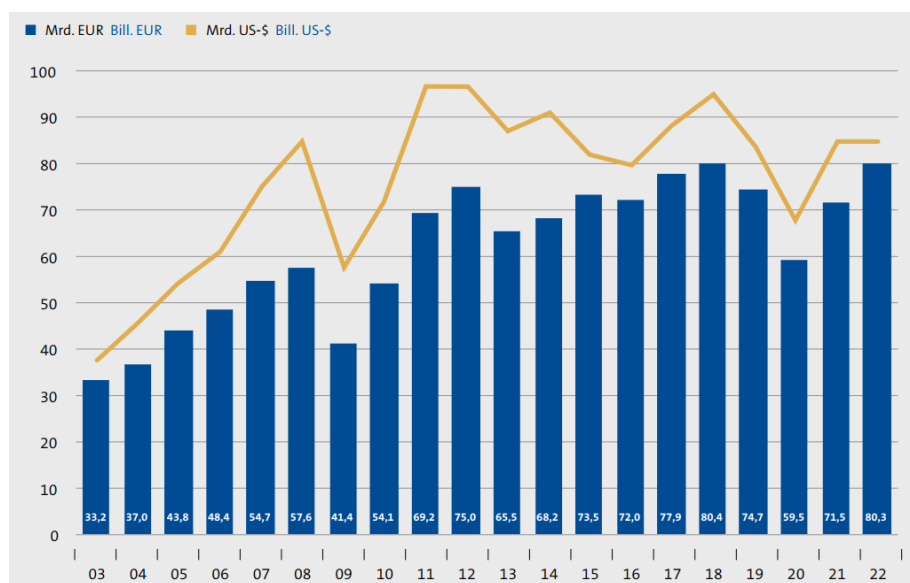
2、工业母机市场：聚焦头部国家

2.1、全球市场：中国稳居全球生产、消费第一

生产：

根据德国 VDW 数据，2022 年全球机床产值 803 亿欧元，同比+12%。其中金属切削机床 566 亿欧元，金属成形机床 235 亿欧元（过去 5 年比例约为 7:3）。2022 年全球机床产值排名前十的国家和地区依次为：中国（不包含中国台湾地区，下同）（257 亿欧元）、日本（99 亿欧元）、德国（97 亿欧元）、意大利（65 亿欧元）、美国（56 亿欧元）、韩国（43 亿欧元）、中国台湾地区（39 亿欧元）、瑞士（28 亿欧元）、印度（13 亿欧元）、奥地利（12 亿欧元）。

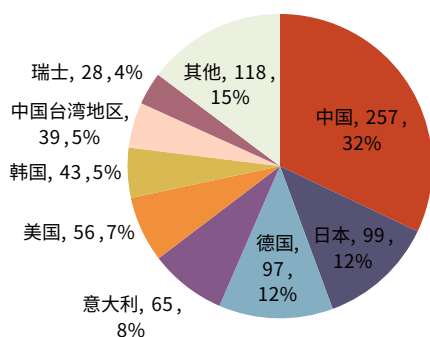
图 6：全球机床产值



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：柱子单位为十亿欧元，线条单位为十亿美元

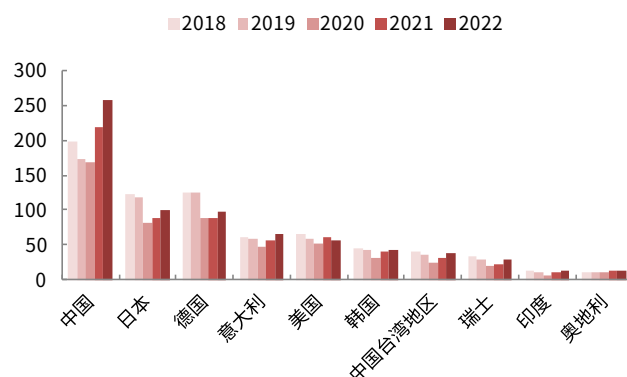
中国目前是全球最大的机床生产国，2022 年产值占全球 32%，其次为日本（12%）、德国（12%）、意大利（8%）、美国（7%）。

图 7：2022 年全球机床生产情况



资料来源：VDW、光大证券研究所；注：不含配件、附件；单位：亿欧元

图 8：全球机床产值国家和地区前十

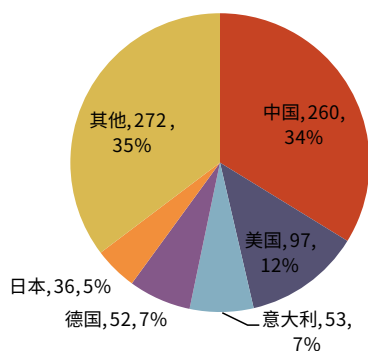


资料来源：VDW、光大证券研究所；注：不含配件、附件；单位：亿欧元

消费：

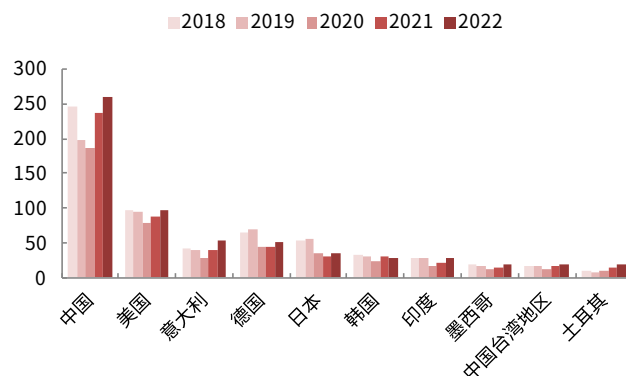
中国目前是全球最大的机床消费国，2022 年机床消费占全球 34%，其次为美国（12%）、意大利（7%）、德国（7%）、日本（5%）。

图 9：2022 年全球机床消费情况



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

图 10：全球机床消费国家和地区前十



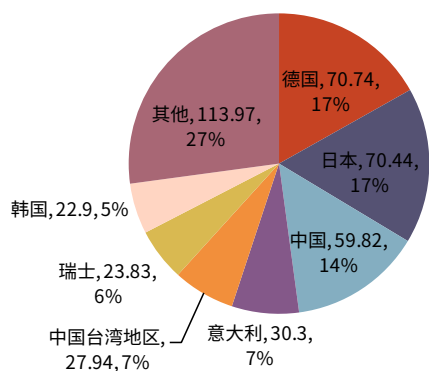
资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

出口：

作为老牌机床强国，德国与日本的机床出口额位居前列，2022 年全球出口份额分别为 17%、17%。2020-2022 年，中国机床出口额快速增长，2022 年中国机床全球出口份额已提升至 14%，且在全球机床出口额前 5 名中，仅中国的机床出口额超过了 2018 年水平。

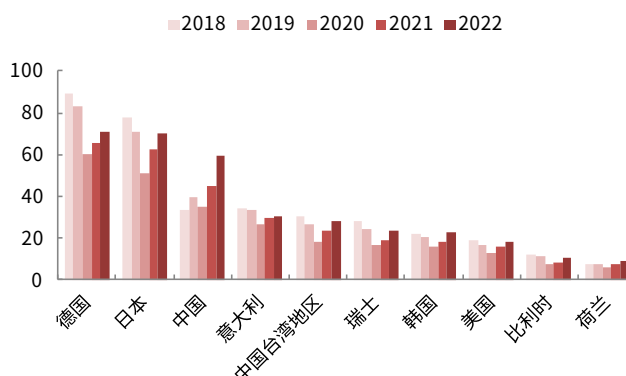
值得一提的是，根据 VDW 口径，有相当一部分出口额来自于德国、日本、瑞士等机床制造商在中国生产的顶级机床。

图 11：2022 年全球机床出口情况



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

图 12：全球机床出口国家和地区前十

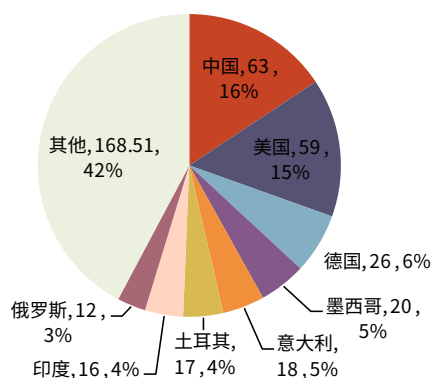


资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

进口：

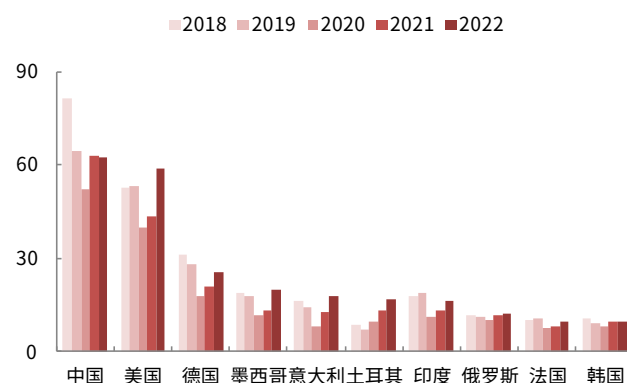
中国和美国是全球排名前二的机床进口国，随着国产替代的推进，中国的机床进口额稳中有降，2022 年为 62.6 亿欧元，较 2021 年微降 0.4%；美国 2022 年机床进口额 59.0 亿欧元，较 2021 年增加 36.2%。

图 13：2022 年全球机床进口情况



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

图 14：全球机床进口国家和地区前十

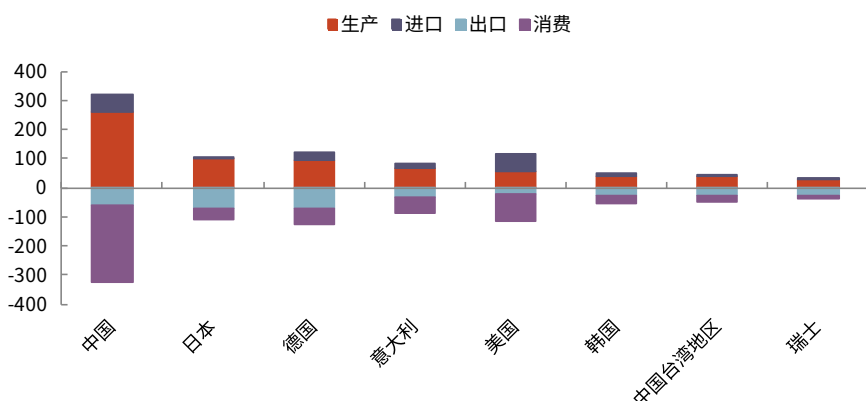


资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

主要国家和地区机床供需平衡：

作为全球最大的机床消费国，中国基本实现自给自足，2022 年机床进口额与出口额基本持平，大部分国内消费由本土供应。德国、日本机床出口额远大于机床进口额，2022 年贸易顺差分别达到 45、63 亿欧元。美国机床进口额远大于机床出口额，2022 年贸易逆差达到 41 亿欧元。而韩国、中国台湾地区、瑞士 2022 年机床贸易顺差分别达到 13、20、18 亿欧元。

图 15：主要国家和地区机床供需平衡



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

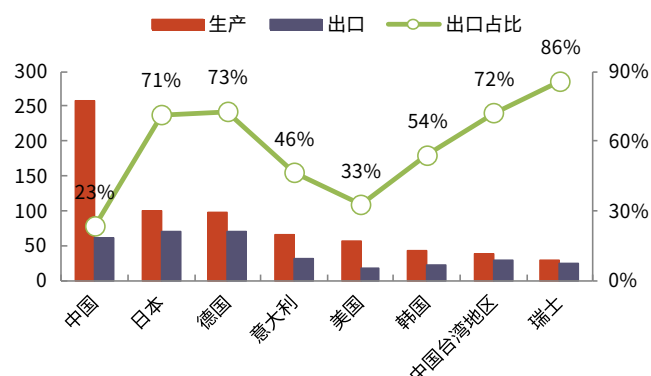
出口比例：

2022 年，日本、德国、中国台湾地区、瑞士机床出口占生产比例均超 70%，为典型的出口导向型经济；意大利、韩国机床出口占生产比例在 50%附近，内外需较为均衡；中国、美国机床出口占生产比例分别为 23%、33%，随着国内机床出口额不断增长，国内机床出口比例仍有较大提升空间。

进口比例：

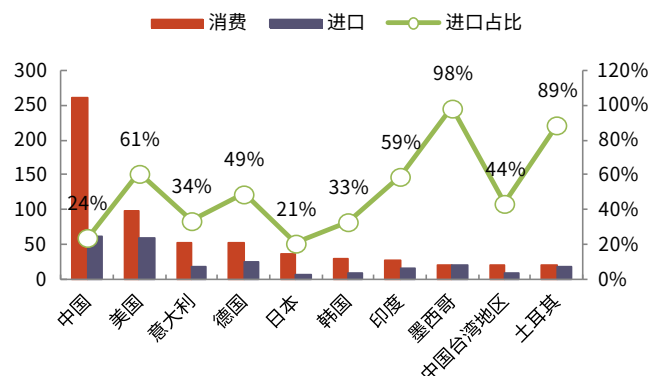
2022 年，墨西哥、土耳其、美国、印度机床进口占消费比例均超 50%，其中墨西哥、土耳其机床消费中进口依赖度分别达到 98%、89%；而德国机床消费中进口依赖度亦达到 49%；中国机床消费中进口依赖度为 24%。

图 16：主要国家和地区机床生产中出口占比



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

图 17：主要国家和地区机床消费中进口占比



资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：亿欧元

2.2、国内市场：进口依赖度下降，出口快速提升

中国数控机床产业经历了起步、扩产、整合、高速发展与转型升级，目前已形成了品类完善、功能齐全的制造格局。

图 18：中国机床产业发展历程

起步阶段

- 1949 年以前：中国尚未真正诞生机床行业、当时机床行业十分落后；
- 1949 年：建国之初。全国机床保有量在 9.5 万台左右；
- 1952 年：美国已经制造出世界第一台数控机床；中国金属切削机床年产量仅为 1.37 万台左右；第二机器工业管理局成立。改建和新建 18 个机床厂、四个工具厂；
- 1958 年：研发出第一台数控机床，比美国晚 6 年，比德国、日本和苏联晚 2 年。

整合阶段

- 1979-1993 年：改革开放前期，中国机床行业迎来了大规模整改结束了前期混乱的现象；1993 年，昆明机床成为股份制公司；1988 年，中国机床工具工业协会成立；
- 1994 年：昆明机床上市；沈一机床合并了沈阳第二机床厂，第三机床厂和辽宁精密仪器厂为沈机集团；
- 1996 年：上海机床厂开始改制；
- 1997 年：机床出口额达到 2.8 亿美元，较 1979 年增长 7 倍；
- 1998 年：南京机床厂重组为南京数控有限公司；
- 2000 年：齐一机床改为齐重数控。

扩产阶段

- 1958-1960 年：成立高精度精密机床规划领导小组，领头发展高精度精密机床；同时该阶段受到“冷战”影响，欧美国家对中国进行技术封锁，国际形势严峻，各行各业都在进行大量扩产、盲目追求产量，造成产品粗制滥造现象严重；
- 1961-1978 年：盲目追求产量、大规模扩产的现象持续加重，该阶段共生产了 164 万台机床，但合格率不足二分之一，消耗了大量人力物力资源，同时不注重技术发展，造成了后来的技术滞后。

高速发展+转型升级阶段

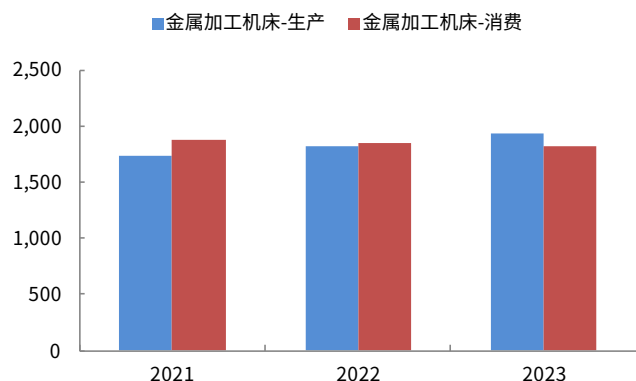
- 2001-2011 年：随着 2001 年中国加入世贸组织，经济实现高速增长，中国机床行业迎来质的飞跃。中国本土机床企业快速增长，2009 年中国机床产值和产量位居世界第一，2011 年沈阳机床营收登顶行业第一；
- 2012-2020 年：受下游需求萎缩影响，中国机床行业开始下行。由于产品同质化严重、缺乏核心技术，大量国营企业退出市场，市场转由民营企业主导；2019 年，沈阳机床破产重组；
- 2020 年以后：政策利好，工业母机行业景气度回暖，开始重视核心技术发展，国产替代浪潮将至。

资料来源：头豹产业研究院

根据中国机床工具工业协会，2023 年我国金属加工机床生产额为 1935 亿元，同比增长 1.1%。消费额为 1816 亿元，同比下降 6.2%。

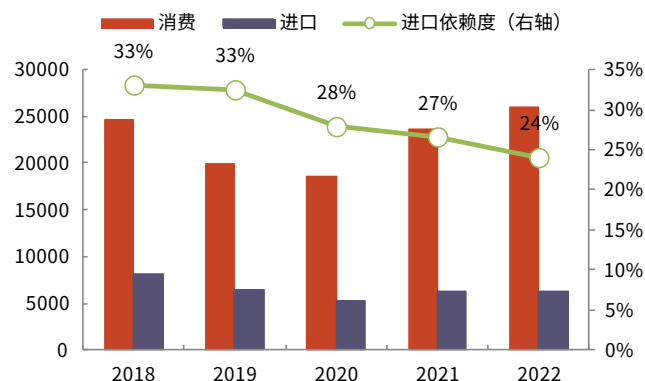
根据 VDW 数据，我国机床消费中进口依赖度从 2018 年的 33% 下降至 2022 年的 24%。

图 19：我国金属加工机床生产与消费额



资料来源：中国机床工具工业协会、光大证券研究所整理；单位：亿元人民币

图 20：我国机床消费中进口依赖度

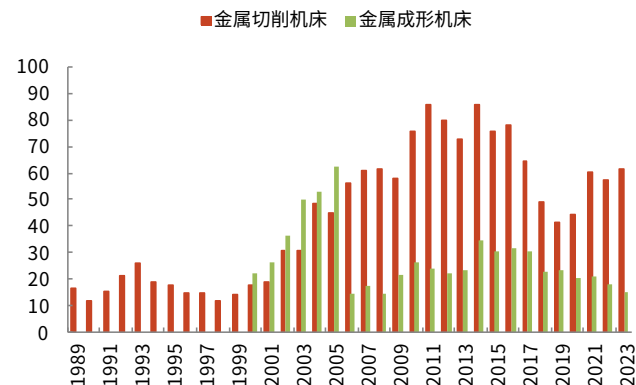


资料来源：VDW、光大证券研究所；单位：百万欧元

从产业周期来看，机床呈现约 10 年的更换周期。2009 年，“04 专项”的实施为我国机床行业注入新的动力，我国金属切削机床在 2011/2014 年形成产量高峰。随着 10 年更换周期的到来，预计我国机床行业将迎来大规模替换需求。

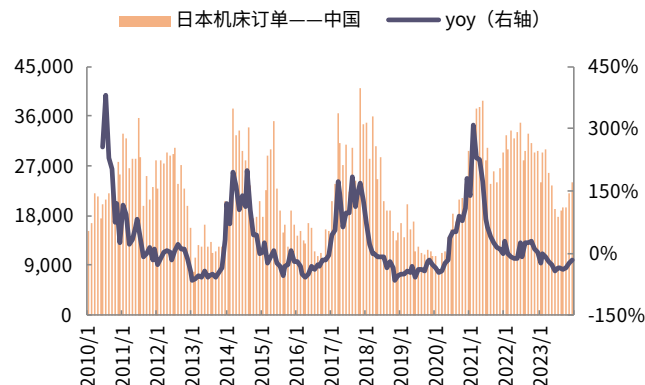
根据日本机床工业协会，日本来自中国的机床订单基本呈现 3 年一个小周期的规律。

图 21：我国金属加工机床产量



资料来源：、光大证券研究所；单位：万台

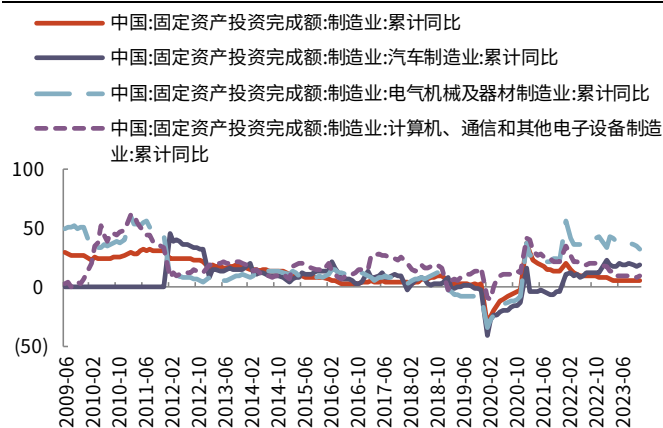
图 22：日本对华机床订单



资料来源：日本机床工业协会；单位：百万日元；截至 2023.12

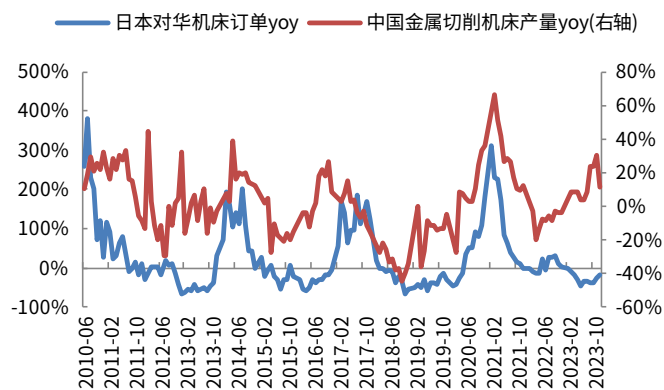
从月度数据来看，中国金属切削机床产量与日本来自中国的机床订单呈现同步状态。2023 年 1-12 月，中国制造业固定资产投资完成额累计同比增长 6.5%，较 2023 年 1-11 月提升 0.2pct。目前国内金属切削机床产量及日本对华机床订单均有底部回暖趋势，随着新质生产力发展，中高端机床的市场需求或将企稳回升。

图 23：中国制造业固定资产投资完成额累计同比



资料来源：、光大证券研究所；单位：%

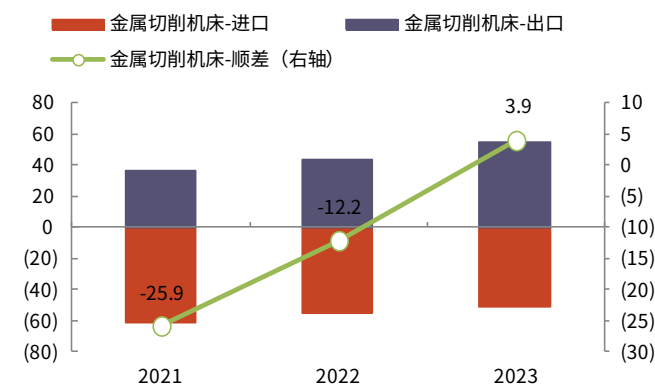
图 24：中国金属切削机床产量与日本对华机床订单



资料来源：、光大证券研究所；截至 2023.12

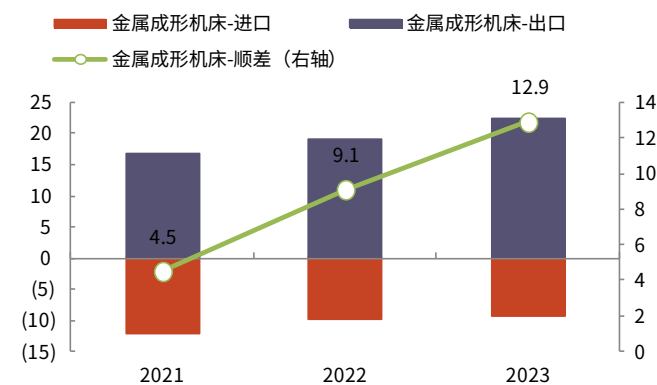
从进出口情况来看，2021-2023 年，我国金属切削机床出口金额逐年提升，进口金额逐年下降，在 2023 年完成贸易顺差 3.9 亿美元；2021-2023 年，我国金属成形机床出口金额提升较快，贸易顺差逐步扩大，在 2023 年达到 12.9 亿美元。

图 25：金属切削机床进出口



资料来源：中国机床工具工业协会、光大证券研究所整理；单位：亿美元

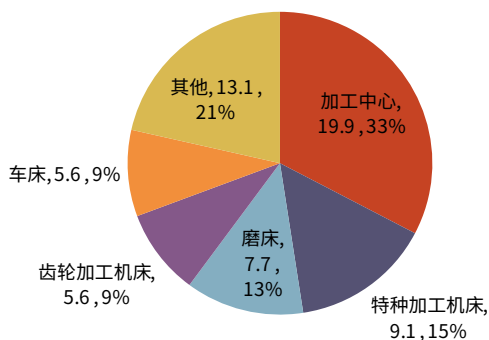
图 26：金属成形机床进出口



资料来源：中国机床工具工业协会、光大证券研究所整理；单位：亿美元

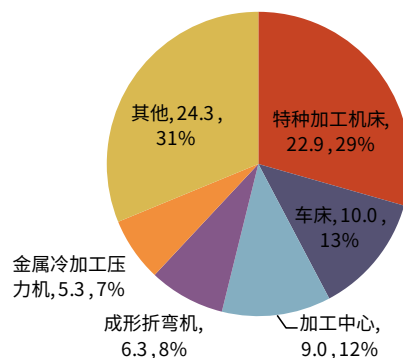
从进口机床种类来看，我国对外进口的机床主要是加工中心、特种加工机床、磨床、齿轮加工机床、车床；从出口机床种类来看，我国对外出口的机床主要是特种加工机床、车床、加工中心、成形折弯机、金属冷加工压力机。

图 27：2023 年中国进口机床分布



资料来源：中国机床工具工业协会、光大证券研究所整理；单位：亿美元

图 28：2023 年中国出口机床分布



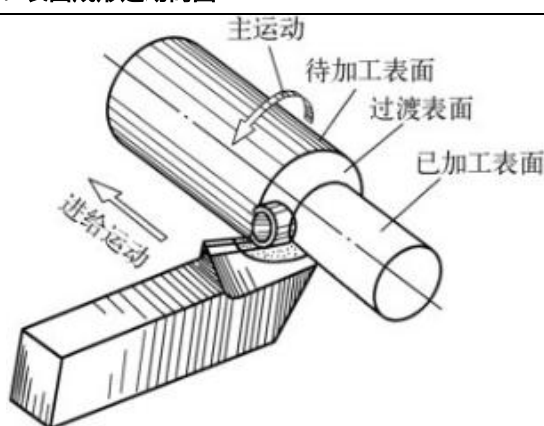
资料来源：中国机床工具工业协会、光大证券研究所整理；单位：亿美元

3、工业母机产业链：国产替代任务艰巨

从机床的发展来看，金属切削的基本工作原理是借助高硬度材料的刀具从硬度较低的工件毛坯上切除多余的金属，从而获得具有一定形位精度和表面质量的特定形状的零件。因此，工件和刀具的机床内部一对相互对抗的矛盾体。

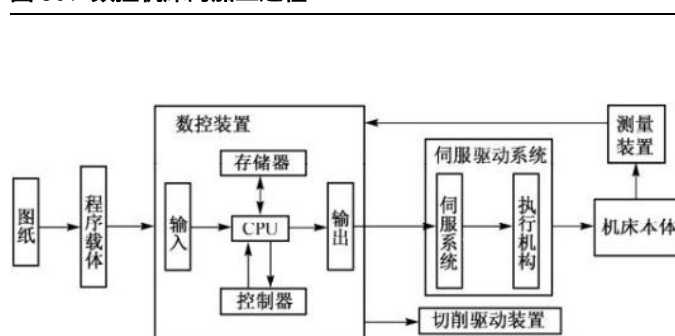
从机床结构来看，可分为主传动系统、进给传动系统、检测系统、数控系统。其中主传动系统是由主轴电动机经一系列传动元件和主轴构成的具有运动、传动联系的系统；进给传动系统以保证刀具与工件相对位置关系为目的，其作用是将伺服电动机的旋转运动转变为执行件的直线运动或旋转运动；检测系统负责将机床运动部件的实际位移量随时检测出来，与给定的控制值（指令信号）进行比较，从而控制驱动元件正确运转，实现闭环控制；而数控系统是数控机床的核心，是实现机床精确加工功能的关键。

图 29：表面成形运动简图



资料来源：《数控机床》李雪梅主编

图 30：数控机床的加工过程



资料来源：《数控技术》马宏伟

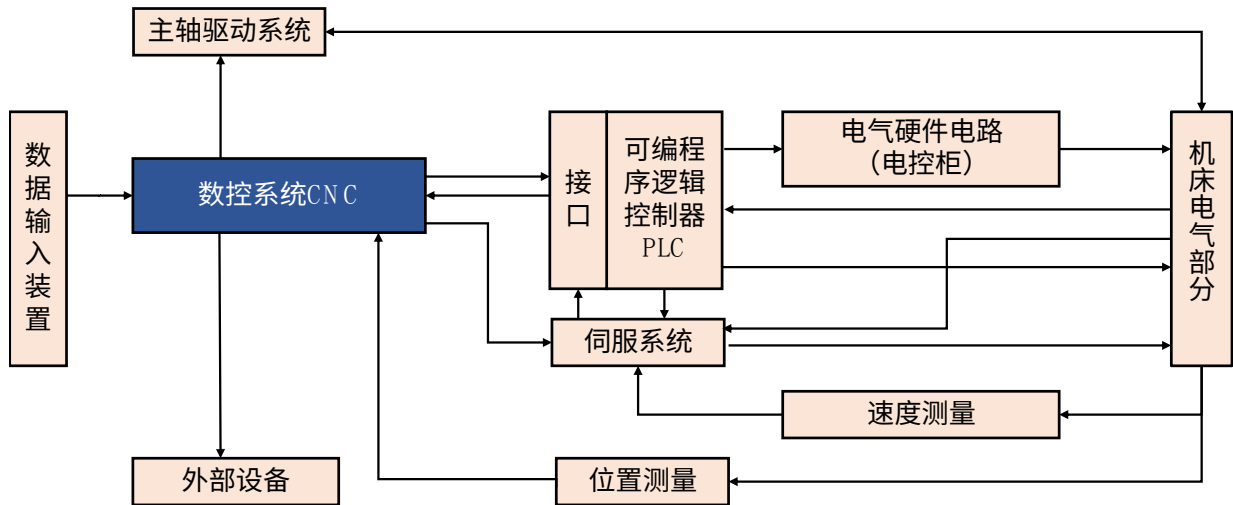
3.1、数控系统：工业母机之“脑”

数字控制（Numerical Control-NC）技术是近代发展起来的一种自动控制技术。国家标准 GB 8129-87 将其定义为“用数字化信号对机床运动及其加工过程进行控制的一种方法”。

数控机床是用数字信息进行控制的机床，借助输入控制器中的数字信息来控制机床部件的运动，自动地将零件加工出来。现代数控系统普遍采用微机技术，成为计算机数控（Computer Numerical Control-CNC）。

伴随数控机床的发展，机床数字控制器也从最初的机床研制单位自行设计制造转变为专业的制造商批量生产，形成了专门的产品——数控系统及其产业。

图 31：数控系统的原理



资料来源：头豹产业研究院

从全球数控系统的发展来看，主要经历了五个时期：

- 1) 第 1 阶段：研究开发期(1952-1970)，系统组成以电子管、晶体管小规模集成电路为主；
- 2) 第 2 阶段：推广应用期(1970-1980)，使用专用 CPU 芯片，实现全数字控制刀具自动交换；
- 3) 第 3 阶段：系统化(1980-1990)，使用多 CPU 处理器，完成多轴联动控制且人机界面友好；
- 4) 第 4 阶段：集成化（1990-2000），使用模块化多处理器，实现复合多任务加工；
- 5) 第 5 阶段：网络化（2000-2015），使用开放体系结构工业微机，从而达到开放式数控系统网络化和智能化。

表 1：机床数控技术发展的不同阶段

特 点	第 1 阶段：研究开发期 (1952-1970)	第 2 阶段：推广应用期 (1970-1980)	第 3 阶段：系统化 (1980-1990)	第 4 阶段：集成化 (1990-2000)	第 5 阶段：网络化 (2000-2015)
典型应用	数控车床、数控铣床、数控钻床	加工中心、电加工机床和成形机床	柔性制造单元柔性制造系统	复合加工机床 5 轴联动机床	智能、可重组制造系统
系统组成	电子管、晶体管小规模集成电路	专用 CPU 芯片	多 CPU 处理器	模块化多处理器	开放体系结构工业微机
工艺方法	简单加工工艺	多种工艺方法	完整的加工过程	复合多任务加工	高速、高效加工微纳米加工
数控功能	NC 数字逻辑控制 2 轴~3 轴控制	全数字控制刀具自动交换	多轴联动控制人机界面友好	多过程多任务、复合化、集成化	开放式数控系统网络化和智能化
驱动特点	步进电动机、伺服液压马达	直流伺服电动机	交流伺服电动机	数字智能化直线电动机驱动	高速、高精度、全数字、网络化

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

数控系统一般分为高、中、低端三种类型：

- 1) 低端（普及型）数控：一般采用 32 位中央处理器(CPU)芯片，以模拟量或脉冲信号控制伺服驱动系统，以实现运动控制，可完成基本的直线和圆弧插补功能，实现轴或 3 轴控制。系统分辨率大于 $1\mu\text{m}$ ，定位精度 0.03mm 。典型产品有广州数控的 GSK928 系统、华中数控 HNC-808 系列、西门子的 808D 系统等；
- 2) 中端数控：通常称为全功能数控系统，可实现主要的插补功能，具有丰富的图形化界面和数据交换功能，实现三轴或四轴联动。系统分辨率 $1\mu\text{m}$ ，定位精度 0.03mm - 0.005mm 。典型产品有广州数控 980 系列，华中数控 HNC-818 系列，西门子 828D 系统，发那科 Oi 系统等；
- 3) 高端数控：具有 5 轴以上的控制能力，多通道、全数字总线，丰富的插补及运动控制功能，智能化的编程和远程维护诊断。主轴转速 10000r/min 以上，系统分辨率亚微米或纳米级，定位精度 0.01mm - 0.001mm 。典型产品有西门子 840Dsl、发那科 30i、华中数控 HNC-848、沈阳机床 i5 等。

表 2：数控系统分类（高、中、低端）

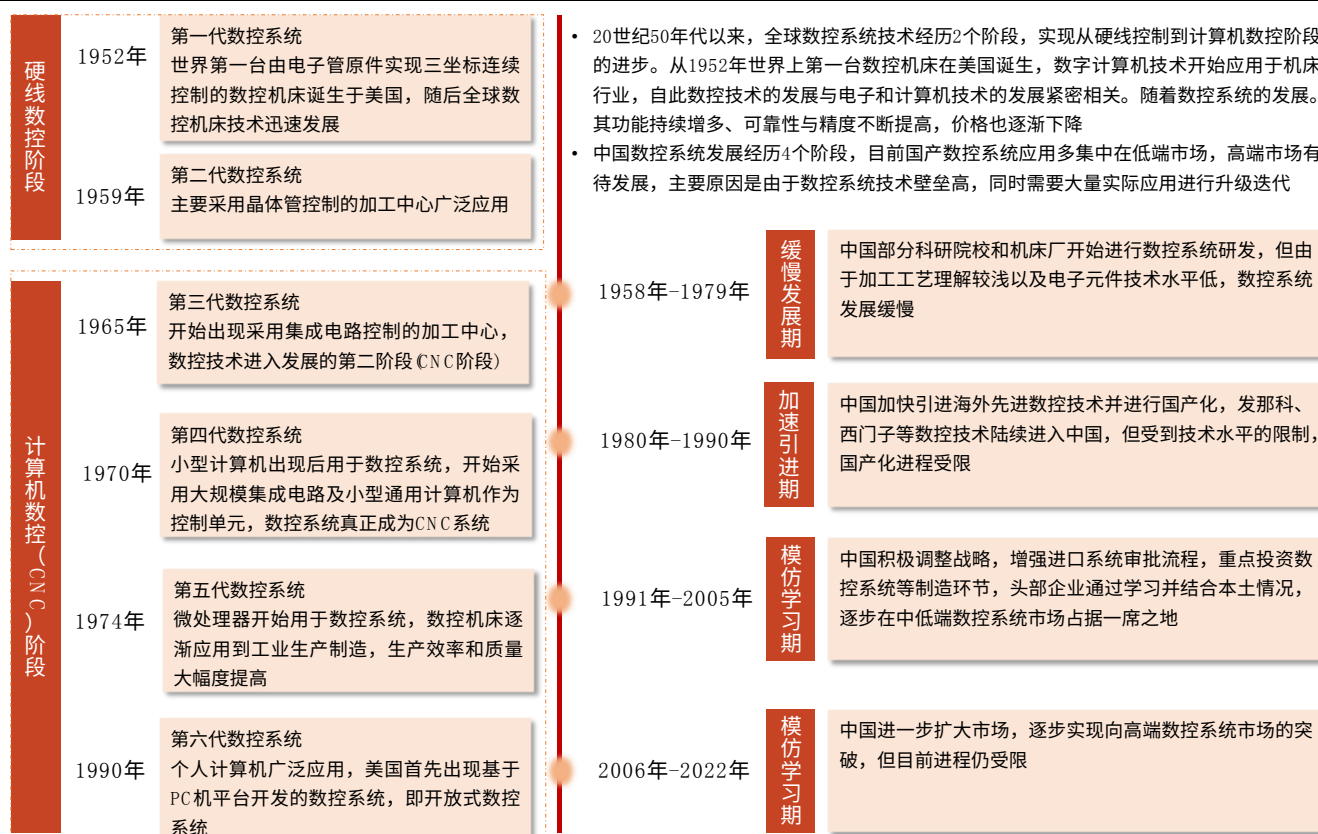
	低端数控系统	标准数控系统	高端数控系统
特点	一般采用 32 位中央处理器(CPU)芯片，以模拟量或脉冲信号控制伺服驱动系统，以实现运动控制，可完成基本的直线和圆弧插补功能。主轴则采用变频控制，通常用于普及型数控车床和数控铣床。	通常称为全功能数控系统，可实现主要的插补功能，具有丰富的图形化界面和数据交换功能。	多通道、全数字总线，丰富的插补及运动控制功能、智能化的编程和远程维护诊断。
电机类型	步进电机，开环控制	伺服电机，半闭环或全闭环控制	伺服电机，具备多通道控制能力，全闭环控制
多轴联动	两轴或三轴联动	三轴或四轴联动	五轴或五轴以上联动
系统分辨率	大于 $1\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$	亚微米或纳米级
主轴转速	最高可达 6000r/min	最高可达 10000r/min	10000r/min 以上
快移速度	最高可达 $8\text{-}10\text{m/min}$	最高可达 $24\text{-}40\text{m/min}$	40m/min 以上
定位精度	0.03mm	0.03mm - 0.005mm	0.01mm - 0.001mm
开发程度	不具备用户可编程 PLC 功能	支持用户开发 PLC 功能	完备的 PLC 控制功能
应用场景	与价格较低的数控机床搭配	与数控机床、全功能车、卧式加工中心搭配的数控系统产品	主要与多轴、多通道、高精、柔性、复合加工的高档数控机床搭配使用
典型产品	广州数控的 GSK928 系统 华中数控 HNC-808 系列 西门子的 808D 系统	广州数控 980 系列 华中数控 HNC-818 系列 西门子 828D 系统 发那科 Oi 系统	西门子 840Dsl 发那科 30i 华中数控 HNC-848 沈阳机床 i5

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）、头豹产业研究院

20 世纪 50 年代以来，全球数控系统技术经历 2 个阶段，实现从硬线控制到计算机数控阶段的进步。从 1952 年世界上第一台数控机床在美国诞生，数字计算机技术开始应用于机床行业，自此数控技术的发展与电子和计算机技术的发展紧密相关。随着数控系统的发展，其功能持续增多、可靠性与精度不断提高，价格也逐渐下降。

中国数控系统发展经历 4 个阶段，目前国产数控系统应用多集中在低端市场，高端市场有待发展，主要原因是由于数控系统技术壁垒高，同时需要大量实际应用进行升级迭代。

图 32：全球与中国数控系统发展历程



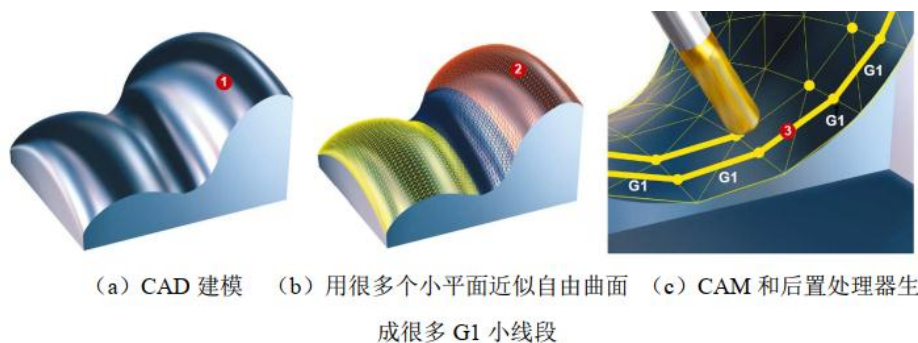
资料来源：头豹产业研究院

3.1.1、数控系统关键技术

数控系统中的关键技术包括：

- 1) 译码及刀具补偿：**译码指从零件加工程序的文本文件中提取出插补种类及相关参数、速度信息、刀具信息以及辅助信息；而刀具补偿已成为 ISO 中定义的标准功能，在编制工件粗、精加工程序的过程中，合理运用刀具补偿功能，可以极大减少计算工作量及编程工作，提高加工效率；
- 2) 插补方法：**数控编程时将零件上要加工的平面、凸台、型腔及曲面等规划成相应的刀具加工轨迹，这些轨迹通常由直线、圆弧、曲线组成。插补就是根据给定曲线的起点和终点、进给速度、轨迹线形和插补周期计算轨迹上中间点的方法；

图 33：刀具路径的分解



资料来源：郎言书《智能化数控系统轨迹规划方法的研究与应用》

3) 速度前瞻：速度前瞻处理功能预先获得待加工零件轮廓上的速度突变点，使得数控机床进入这些突变点之前，能及时修调进给速度，避免加工表面质量变差，有效抑制机床在突变点产生振动；

4) 坐标变换及误差补偿：坐标变换负责将编程坐标系转换成机床的物理坐标系。误差补偿指的是数控系统通过对加工过程的误差源分析、测量、建模，实时地计算出位置误差、热误差等，将该误差反馈到控制系统中，改变实际坐标指令来实现误差修正，从而使工件获得理想的加工精度。

表 3：数控系统中的关键技术

关键技术		含义
译码及刀具补偿	译码处理	从零件加工程序的文本文件中提取出插补种类及相关参数、速度信息、刀具信息以及辅助信息，以内部中间格式存储供后面的任务调用处理。可分为解释型译码和编译型译码。
	刀具补偿	根据实际所采用的刀具形状和尺寸进行补偿，使实际的切触点和编程加工点重合，从而加工出合格的工件。具有空间三维刀具补偿功能成为高端数控系统的竞争热点。
插补方法		根据给定曲线的起点和终点、进给速度、轨迹线形和插补周期计算轨迹上中间点的方法，其理论坐标作为伺服系统进行位置控制的理论值。
速度前瞻	加减速处理	为了保障刀具沿轨迹运动，除了起点和终点，转接点处的速度及加速度也需要频繁变化。
	速度前瞻	速度前瞻处理功能预先获得待加工零件轮廓上的速度突变点，使得数控机床进入这些突变点之前，能及时修调进给速度，避免加工表面质量变差，有效抑制机床在突变点产生振动。
	曲面加工	精优曲面控制技术采用优化的“预读”功能，确保良好的加工表面质量，并可进一步提高加工速度。
坐标变换及误差补偿	坐标变换	插补是在机床坐标系下进行，所得到的数据是机床笛卡尔坐标系下的坐标值，需要根据机床结构配置将其进行逆变换，转换成机床的实际进给轴物理坐标。
	误差补偿	数控系统通过对加工过程的误差源分析、测量、建模，实时地计算出位置误差、热误差等，将该误差反馈到控制系统中，改变实际坐标指令来实现误差修正，从而使工件获得理想的加工精度。

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

3.1.2、数控市场格局

自 2017 年中国科技专项后，数控系统国产化率实现提升，打破高端市场外资垄断局面，但目前中高端市场仍以外资为主，这主要是由于数控系统的技术壁垒与较高的用户粘性。

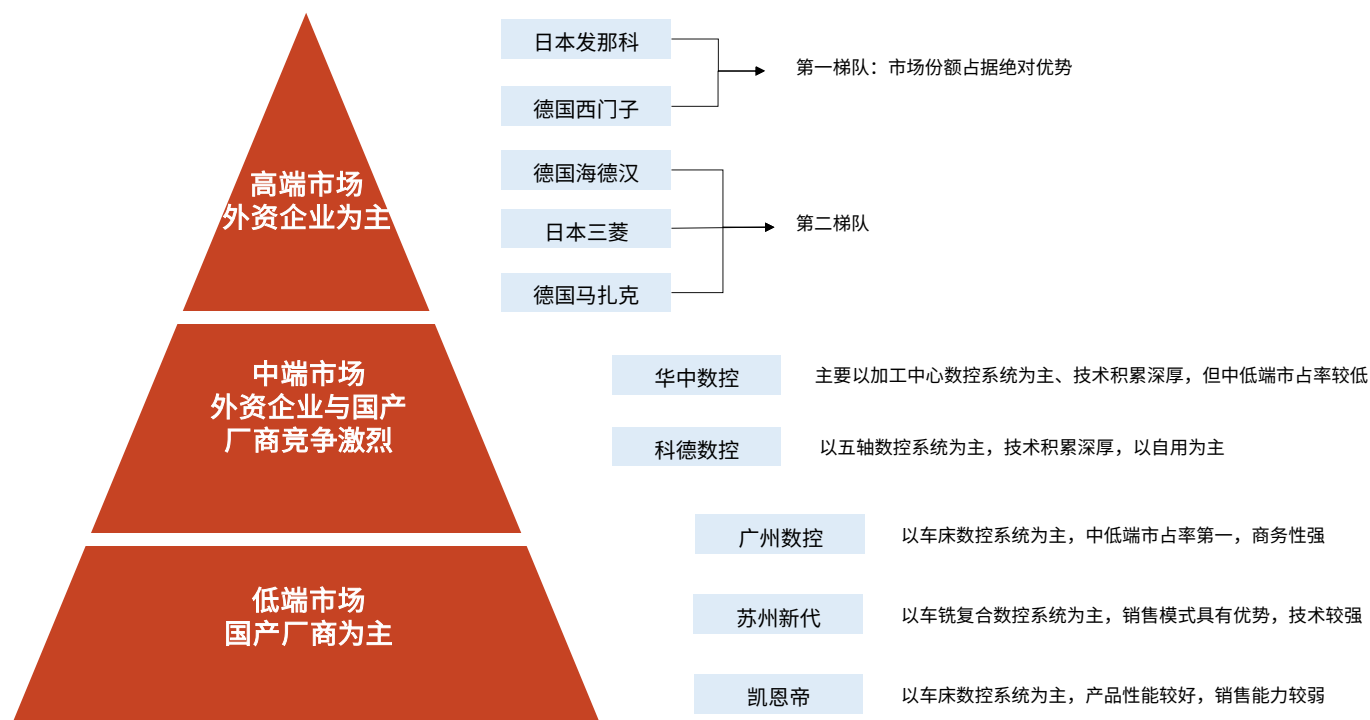
目前中国数控系统市场中：

高端市场以外资企业为主，其中第一梯队代表为日本发那科、德国西门子，第二梯队代表为德国海德汉、日本三菱、德国马扎克；

中端市场面临外资企业与国产厂商的激烈竞争，其中国产品牌华中数控主要以加工中心数控系统为主、技术积累深厚，科德数控以五轴数控系统为主，技术积累深厚，以自用为主；

低端市场以国产厂商为主，如广州数控（以车床数控系统为主，中低端市占率第一，商务性强）、苏州新代（以车铣复合数控系统为主，销售模式具有优势，技术较强）、凯恩帝（以车床数控系统为主，产品性能较好，销售能力较弱）。

图 34：中国数控系统厂商市场竞争格局

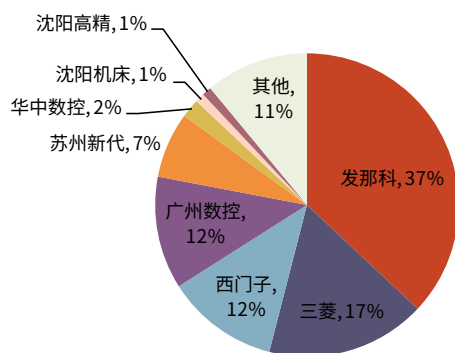


资料来源：头豹产业研究院

2022 年，中国数控系统市占率前三均为外资企业，分别为发那科、三菱、西门子，销售额市占率分别为 37%、17%、12%，合计占比 66%。

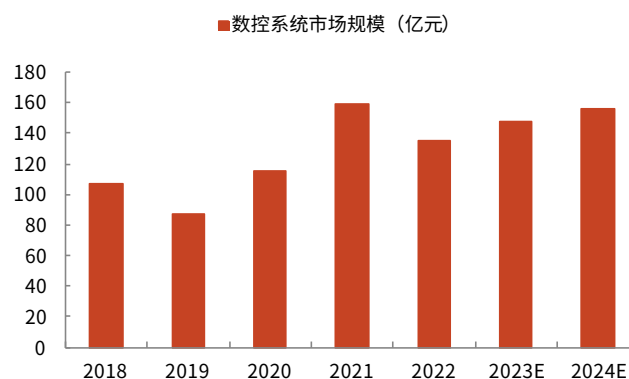
数控系统占数控机床成本比例约在 15% 左右。据头豹产业研究院数据，2022 年全国数控系统市场规模约在 135.2 亿元。未来随着我国机床数控率提升，数控系统市场规模增速预计将高于机床行业整体增速。

图 35：2022 年中国数控系统竞争格局（销售额）



资料来源：头豹产业研究院

图 36：全国数控系统市场规模



资料来源：头豹产业研究院

3.2、 主轴：工业母机之“左手”

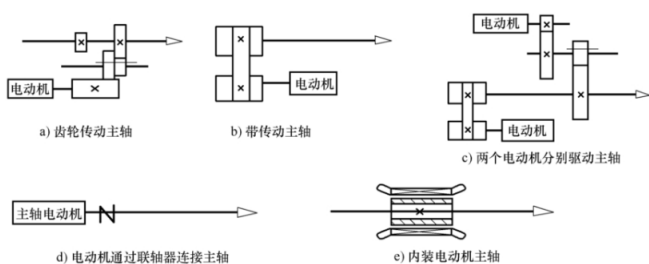
3.2.1、从机械主轴到电主轴

主轴部件是主运动的执行件，它夹持刀具或工件，并带动其旋转。数控机床主轴部件的精度、刚度、抗振性和热变形对加工质量和生产率等有着直接的影响。数控机床的主轴部件包括主轴、主轴支承、装在主轴上的传动件和密封件等。

主轴的发展经历了三个阶段：

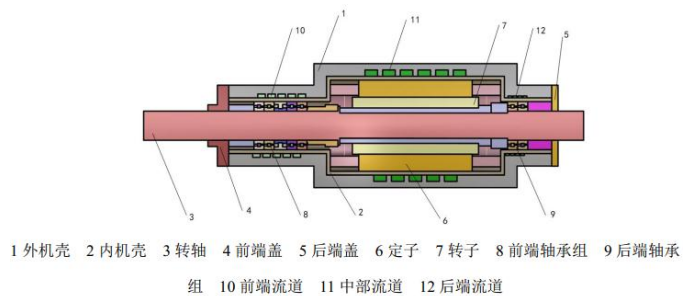
- 1) 齿轮/带传动。传统机床主轴的驱动方式是电机轴线和主轴的轴线互相平行，电机通过皮带或齿轮间接地驱动主轴。由于当主轴转速提高到一定水平后，传动皮带开始受离心力的作用而膨胀，传动效率急剧下降，传动齿轮的发热和噪音问题也开始变得严重。
- 2) 联轴器传动。为了解决间接传动的转速瓶颈，机床设计人员开始研究将电机和主轴同轴配置，由电机通过联轴节直接驱动主轴。这种驱动方式尽管取消了皮带和齿轮等中间传动带来的问题，但又为刀具夹紧机构的配置带来新的问题。
- 3) 电主轴。电主轴的出现，从根本上解决了主轴直接驱动的问题。电主轴是将电机的转子和主轴集成为一个整体。中空、直径较大的转子轴同时也是机床的主轴，它有足够的空间容纳刀具夹紧机构或送料机构。

图 37：数控机床主轴的传动类型



资料来源：数控技术（刘伟主编）

图 38：电主轴剖面图



资料来源：李毅《电主轴水冷系统优化设计研究》

从不同领域对机床主轴的要求来看，主轴的选择与机床类型、加工工艺、刀具、工件材料和加工精度都有密切的关系。

复合加工中心的愿景是在一台机床上进行镗铣、车、钻、磨等不同工序，其进步完善的主要瓶颈就是主轴，没有一种主轴可以满足不同加工情况的要求，达到同样优良的性能。可重构机床、模块化机床则往往需要具有机械、液压、气动和电气标准化接口的可交换主轴。

表 4：不同领域对机床主轴的要求

应用领域	加工材料	速度	功率	扭矩	精度
汽车工业	铸铝	中等	高	中等	中等
	铸铁	低	中等	高	中等
航空航天工业	铝合金	高	非常高	低	高
	钛合金	非常低	低	非常高	高
模具工业	碳纤维复合	非常高	低	低	中等
	钢	高	低	中等	非常高
通用机械工业	铝合金	非常高	中等	低	非常高
	各种材料	中等	中等	中等	中等

电子工业(PCB)	纤维复合板	非常高	中等	中等	高
-----------	-------	-----	----	----	---

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

不同类型主轴传动的性能各异，可根据应用场合的需求加以选用和设计。电主轴在速度、精度、噪声和更换方便性方面，皆优于其他传动形式，是高端数控铣床、加工中心和复合加工机床的首选方案。

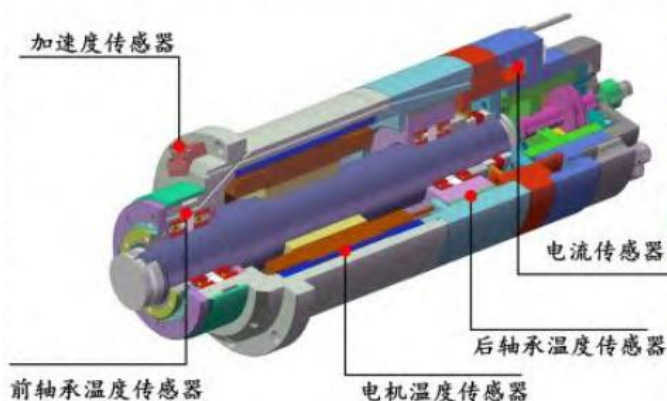
表 5：不同主轴的性能评价

传动类型	扭矩	速度	精度	维修	成本	刚度	噪音	更换	热性能
齿轮	优	差	良	良	中	良	差	中	良
皮带	良	中	中	良	良	良	中	中	良
联轴节	中	良	良	良	良	良	良	中	良
电主轴	中	优	优	中	良	中	优	优	中

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

电主轴作为一种机电一体化系统，机床的核心部件，越来越多地集成各种传感器和软件，对其工作状态的进行监控、预警、可视化和补偿。装上各种传感器的电主轴能产生海量数据，各大电主轴制造商和机床制造商，目前正努力合作开发专家系统，将这些数据综合后用简明的方式向用户报告。

图 39：智能电主轴



资料来源：李小虎《智能化电主轴关键技术与系统开发》

3.2.2、主轴轴承

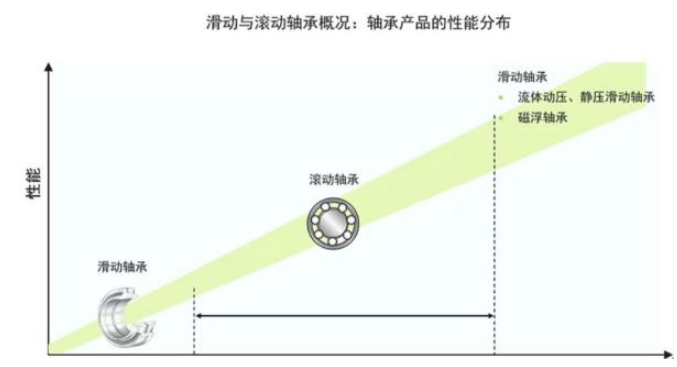
主轴轴承是主轴部件的重要组成部分。它的类型、结构、配置、精度、安装、调整、润滑和冷却都直接影响主轴的工作性能。在数控机床上，常用的主轴轴承有滚动轴承和静压滑动轴承。

在液体静压轴承中，供油装置在一定初始压力下使得润滑油流经节流孔，在轴承和主轴间隙间形成压力油膜，油膜上下存在压差从而承受载荷。

液体静压轴承的特点：

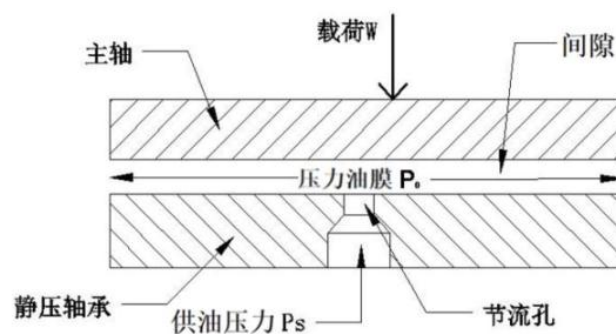
- (1) 主轴在转动前会先被浮起，轴承不会与主轴接触，因此摩擦力损耗较小；
- (2) 所适应的转速范围广，在静止和相对运动状态下都具有承载能力；
- (3) 压力油膜的支承刚度大，具有较好的吸振性；
- (4) 使用寿命长，精度保持性好；
- (5) 油膜具有均化误差的作用，这样可以减小主轴和轴承自身精度造成的影响；
- (6) 对轴承的材料要求不高。

图 40：滚动轴承与滑动轴承（性能）



资料来源：舍弗勒

图 41：液体静压轴承工作原理图



资料来源：田洪雨《内圆磨床液体静压轴承的承载性能分析及结构优化》

机床应用领域不同，对主轴轴承系统的要求是不一样的。例如，铝合金的高速切削需要高转速而刚度较低的轴承系统，而软合金或镍基合金的重切削则需要能承受大切削力和低转速的轴承系统。合理选择轴承类型和配置轴承以及轴承系统的设计优化对机床主轴的性能和寿命有很大影响。

主轴轴承的类型有：1) 滚动轴承，包括球轴承和圆柱滚子轴承；2) 液体动压轴承；3) 液体静压轴承；4) 空气轴承；5) 磁浮轴承。滚动轴承具有明显的综合优势，应用最为广泛。

表 6：不同轴承系统的性能比较

性能参数	滚动轴承	动压轴承	静压轴承	空气轴承	磁浮轴承
n.d _m 值	较高	中等	中等	非常高	非常高
长寿命	较长	较长	几乎无限	几乎无限	几乎无限
高精度	高	高	非常高	非常高	非常高
高阻尼	较低	较大	较大	中等	较大
高刚度	较高	较高	很高	中等	较高
润滑技术	简单	中等	复杂	中等	复杂
低摩擦	中等	较大	较大	很小	很小
低价格	较低	可接受	可接受	可接受	昂贵

资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

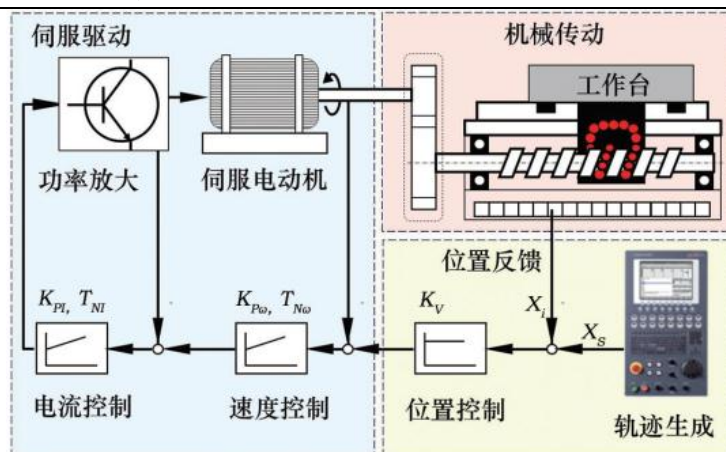
3.3、进给驱动工业母机之“右手”

数控机床的进给驱动系统是在数控系统的指挥下，将机床的执行部件（如工作台、滑座、立柱等）移动到预定位置，主要由以下部分组成：

- 1) 位置控制指令生成。待加工的零件通过数控编程后生成刀具轨迹并分解为各轴的位移，发出位置控制指令。
- 2) 伺服驱动。将位置指令的电信号通过速度控制、电流控制和功率放大后，借助伺服电动机转换成机械运动。伺服电动机可以是旋转电动机，也可以是直线电动机。速度反馈和电流反馈回路用以保证系统的工作稳定性。
- 3) 机械传动。伺服电动机的回转运动通过机械传动机构转换成直线运动，驱动诸如工作台、滑座等执行部件实现所要求的位移。采用直线电动机等直接驱动方式可简化机械传动。
- 4) 位置检测与反馈。由直线或回转位移测量装置检测实际的直线位移和角位移并将误差反馈给位置控制环，加以补偿。

数控程序的插补功能，生成进给运动的路径规划。在刀轨规划中不仅要考虑刀具的位移和进给速度，还要考虑其加速度和加加速度，然后向驱动系统输出参考轨迹的位移、速度、加速度和加加速度 4 个参数，进行各轴运动轨迹的控制。在进给驱动系统动力特性的影响下获得真实的位移，并将其反馈给位置信号的输入端，形成一个闭环回路。

图 42：进给驱动组成

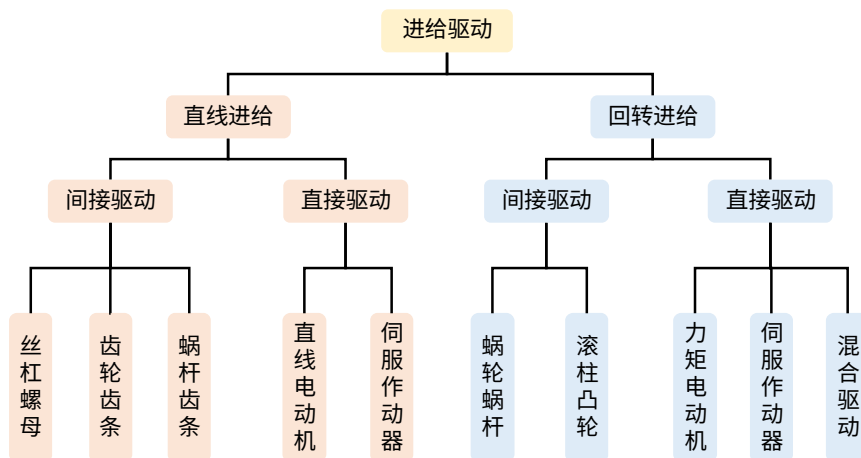


资料来源：张曙《直线进给驱动及其技术热点》

机床进给驱动的任务是完成刀具和工件之间的复杂空间运动。按照运动的形式，可以分为直线进给驱动和回转进给驱动两大类。按照驱动动力和执行部件之间是否有中间机械传动环节，可分为间接驱动和直接驱动。

- 1) 实现间接直线驱动的机械传动机构有丝杠螺母、齿轮齿条和蜗杆齿条；
- 2) 能完成直接直线驱动的有直线电动机和电液伺服作动器；
- 3) 实现间接回转驱动的机械传动机构有蜗轮蜗杆、滚柱凸轮传动；
- 4) 能完成直接回转驱动的有大力矩电动机、伺服作动器和混合驱动装置等。

图 43：进给系统的分类



资料来源：机床产品创新与设计（张曙等编）

3.3.1、直线进给

滚珠丝杠：

滚珠丝杠的传动效率高，具有高载荷下发热量较小、磨损小、寿命长和无爬行以及驱动力矩大等一系列优点，应用广泛，是高性能数控机床不可或缺的功能部件。

滚珠丝杠副广泛用于各种机床中行程小于 5m 的水平和垂直进给驱动系统，也有 10m 以上行程的个别案例。机床上所采用的滚珠丝杠的直径和导程多在 12mm~160mm 和 5mm~40mm 范围之间。根据 NSK 披露，数控机床中车床、铣床、镗床、钻床、冲床等常用精度等级为 C5，磨床、电火花加工机械、线切割机常用精度等级为 C3。

图 44：不同用途区分的滚珠丝杠精度等级表

用途		NC 机床																						
		车床		铣床 镗床		加工中心		钻床		坐标镗床		磨床		电火花加工机械		线切割机		电火花加工		冲床		激光加工机械		木工机械
轴		X	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	XY	Z		
精度等级	C0	○								○	○	○												
	C1	○		○		○				⊙	⊙	○	○	○		○	○							
	C2	○		○	○	○	○					⊙	○	○	○	⊙	○							
	C3	⊙	○	⊙	○	○	○	○					⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	○	○	○				
	C5	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙	⊙							⊙		○	⊙	⊙	⊙			⊙
	Ct7								○															⊙
	Ct10																							○

资料来源：NSK

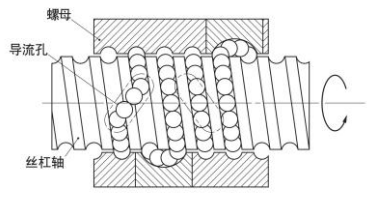
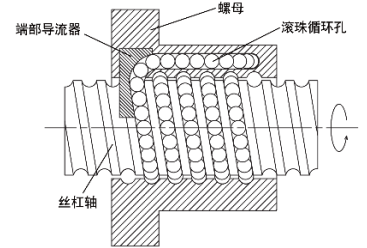
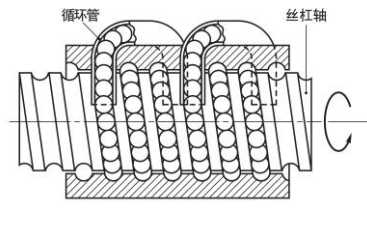
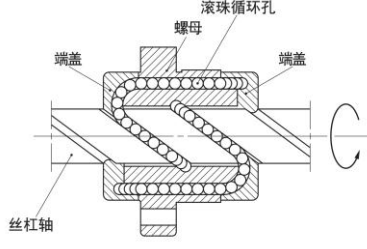
由于滚珠需要无限循环，所有滚珠丝杠至少由丝杠轴、螺母、滚珠、循环部件四大零部件构成。

按照滚珠循环方式，可分为内循环、外循环两大类型：

(1) 内循环在相邻的导程间通过马蹄状导流器循环，适合小导程；

(2) 外循环又分为端部导流式、管循环式、端盖式。其中端部导流式在螺母端部沿丝杠螺纹槽切线方向平滑地将滚珠掬起，并通过设在螺母内部的贯通孔循环，适合高速静音传送；管循环式在适合滚珠大小的循环管内使滚珠通过始点、终点间往复循环，规格(轴径、导程)的对应范围广；端盖式在螺母端部配置拉升滚珠的端盖，在螺母内设置的贯通孔循环，适合大导程。

表 7：滚珠丝杠分类与特点

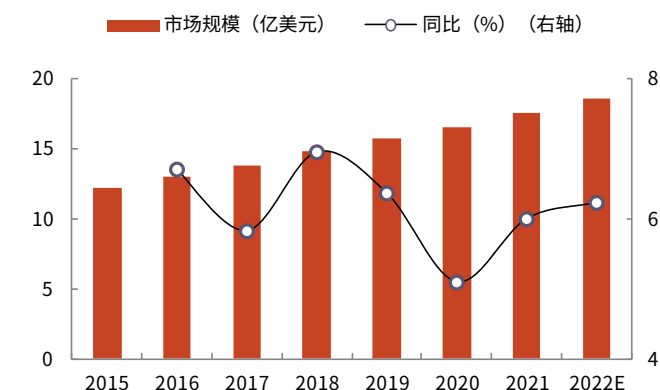
丝杠分类		构造	优点	缺点	图例
内循环		在相邻的间距（导程）间，通过马蹄状导流器改变滚珠的行进方向，返回丝杠轴的原先位置	滚珠循环的回路短、流畅性好、效率高、螺母的径向尺寸小，可进行紧凑设计	导流器加工困难，装配调整过程复杂	
外循环	端部导流式	在螺母端部沿丝杠螺纹槽切线方向平滑地将滚珠掏起，并通过设在螺母内部贯通孔循环	螺母外径小，可进行紧凑设计，噪音较小	管路转弯处易磨损	
	管循环式	滚珠从丝杠轴的末端进入循环管，再重新返回初始点，实现往复循环	结构相对简单，规格应用范围广	循环回路长，流畅性差	
	端盖式	滚珠从端盖部导入，通过丝母上的贯通孔返回起始位置	适合大导程应用	滚珠循环部的构造复杂，缺乏通用性	

资料来源：NSK、光大证券研究所

从市场空间来看，全球滚珠丝杠市场规模稳健增长，中国已成为最重要的消费市场之一，长期成长空间可观。根据秦川机床公告，2016-2021 年全球滚珠丝杠市场规模从 13.1 亿美元增长至 17.5 亿美元；同期我国滚珠丝杠市场规模从 16.8 亿元增长至 25.6 亿元。中国已成为滚珠丝杠产品重要的消费市场之一，约占全球规模总量的 20% 左右。

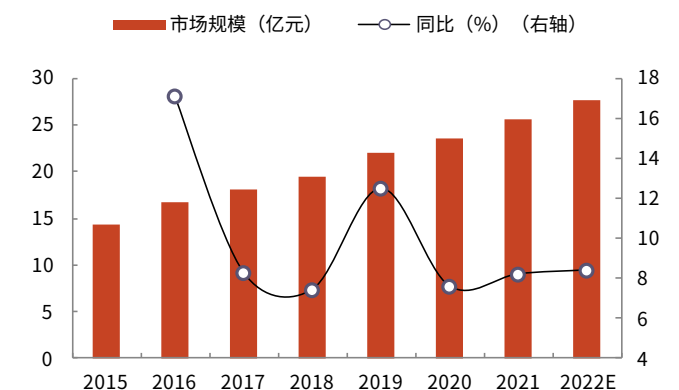
从市场竞争格局看，目前全球主要的滚珠丝杠厂商有 NSK、THK、SKF 等，根据华经产业研究院统计，2021 年 CR5 销售额市占率达到约 46%，其中主要来自欧洲和日本，日本和欧洲滚珠丝杠企业占据了全球约 70% 的市场份额。

图 45：2015-2022 年全球滚珠丝杠市场规模



资料来源：秦川机床公告预测、光大证券研究所

图 46：2015-2022 年中国滚珠丝杠市场规模

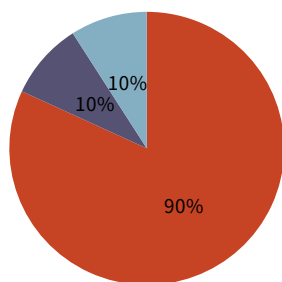


资料来源：秦川机床公告预测、光大证券研究所

国内滚珠丝杠高端市场基本被德国力士乐、日本 THK、NSK 占据，中端市场则由德国、日本品牌（力士乐、THK、NSK），中国台湾地区品牌（上银、银泰），中国大陆品牌（汉江、南工艺）占据。

图 47：2021 年国内滚珠丝杠高端市场

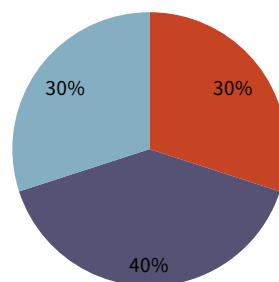
■ 德国：力士乐、日本：THK、NSK ■ 中国大陆：汉江、南工艺
■ 中国台湾地区：上银、银泰



资料来源：金属加工微信公众号；销售额口径

图 48：2021 年国内滚珠丝杠中端市场

■ 德国：力士乐、日本：THK、NSK ■ 中国大陆：汉江、南工艺
■ 中国台湾地区：上银、银泰



资料来源：金属加工微信公众号；销售额口径

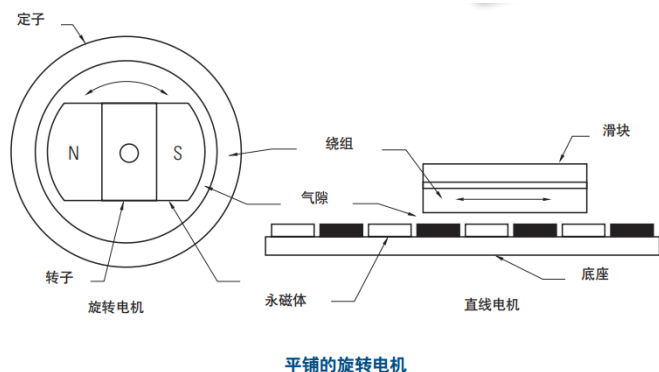
直线电机：

直接进给驱动是依靠直线电动机初级和次级间的磁力移动工作台，中间没有机械传动元件，导轨一般与滚珠丝杠驱动装置一样。由于没有丝杠、螺母、联轴节、电机轴和轴承的柔度，切削载荷和运动质量直接作用在直线电动机上。

与滚珠丝杠驱动相较，直线驱动的加速度较高，移动速度快，能快速定位，伺服带宽大等优点。此外，由于直线电动机无接触传递力，机械摩擦损耗和爬行现象几乎为零，能达到比滚珠丝杠更高的精度和可靠性。

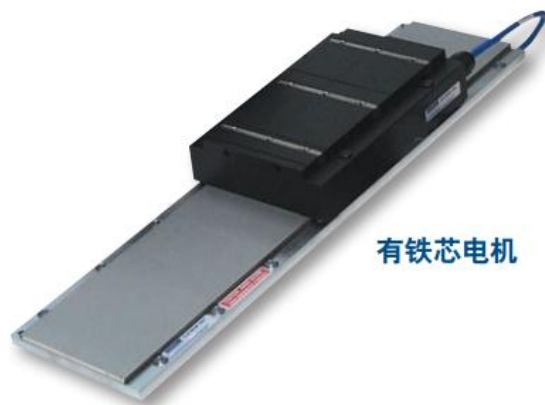
直线电动机分为同步直线电动机和感应直线电动机两类，感应电动机的定子由金属条构成，同步电动机的定子由永磁材料构成。商品化的同步电动机产生的最大推力达 15~20 kN，额定推力 6~8 kN，远比感应电动机的最大推力 5~10 kN，额定推力 0.8~2 kN 为高，适用于重切削的机床。而商品化的感应直线电动机由于推重比高（小型感应直线电动机重量仅 1.5kg），因此较适合中小型要求高加速度的机床使用。

图 49：直线电动机原理



资料来源：科尔摩根

图 50：直线电动机



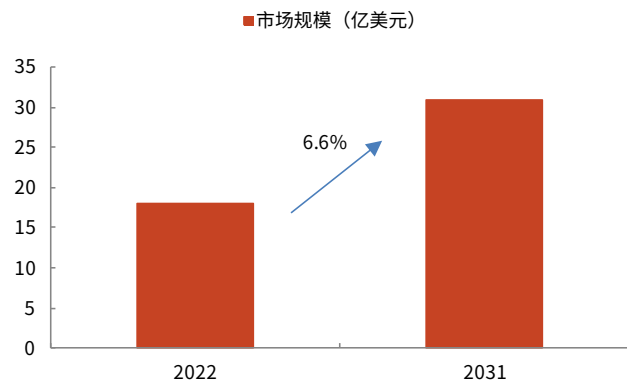
资料来源：科尔摩根

目前，直线电机的主要应用领域包括电子、半导体、医疗等领域，随着下游应用场景的增加、技术的逐渐成熟，直线电机有望成为性价比更高的选择，行业规模也将随之快速增长。

据 Transparency Market Research 数据，2022 年全球直线电机行业市场规模约为 18 亿美元，到 2031 年预计增长至 31 亿美元。

目前我国直线电机市场 60% 以上的市场份额由中国大陆以外的品牌垄断，这些品牌主要集中在新加坡、中国台湾地区、日本以及欧美地区，而中国大陆品牌竞争力较弱，在中国大陆仅有少数企业能够系统地完成工艺要求。具体来看，目前中国大陆直线电机行业领先企业主要包括雅科贝思、大族电机、德康威尔、东莞智赢、泰科贝尔等。

图 51：全球直线电机行业市场



资料来源：Transparency Market Research

图 52：全球直线电机行业市场格局

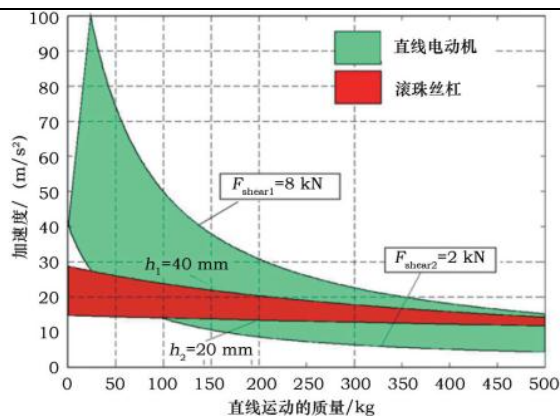


资料来源：transparency market research

与滚珠丝杠驱动相较，直线驱动的加速度较高，移动速度快，能快速定位，伺服带宽大等优点。此外，由于直线电动机无接触传递力，机械摩擦损耗和爬行现象几乎为零，能达到比滚珠丝杠更高的精度和可靠性。但是，直线电动机的加速性与运动的总质量成反比，与电动机驱动力成正比。其加速性并非在所有情况下都优于滚珠丝杠螺母系统。

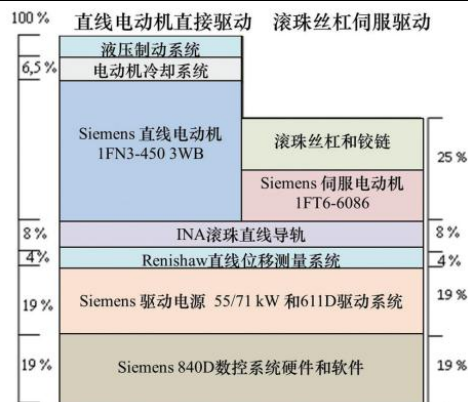
直线电动机只有在承载量较小时达到高加速度，而滚珠丝杠驱动却在较大范围内保持其加速能力，因为运动惯性经过减速比才反映到回转电动机上。

图 53：直接驱动与间接驱动的加速能力



资料来源：张曙《直线进给驱动及其技术热点》

图 54：直接驱动与间接驱动的成本比较



资料来源：张曙《直线进给驱动及其技术热点》

表 8：直线电机直驱方式与传统驱动方式性能比较

性能	旋转电机+滚珠丝杠方式	直线电机直驱方式
最高速度(m/min)	90~120	60~200
最大加速度(g)	1.5	2~10
精度(μm/300)	5	0.5
重复定位精度(μm)	3	0.1
静态刚度(N/μm)	90~180	70~270
动态刚度(N/μm)	90~120	160~210
平稳性(%速度)	10	1
调整时间(ms)	100	10~20
工作寿命(h)	6000~10000	50000
行程	受丝杆限制	不受限制
工作死区	存在反向工作死区，螺距误差传递	无反向间隙，无误差传递
频率响应特性	附件惯性大，响应慢	附件惯性小，较高的频率影响特性
其他	摩擦磨损引起精度渐变、弹性形变引起爬行等	无上述现象

资料来源：唐传胜《永磁同步直线电机控制方法研究》

3.3.2、圆周进给

机床在加工负责形状表面时，为了提高加工效率、保证加工质量和防止干涉，除了笛卡尔坐标系 X、Y、Z 轴的直线进给外，还需要控制刀具与工件相对姿态的回转坐标系 A、B、C 轴的圆周进给。

第 4 和第 5 轴的圆周进给是 5 轴联动加工机床的关键技术之一。它可以是 AC 轴联动、AB 轴联动或 BC 轴联动。这两种圆周进给可由安装工件的工作台完成，也可以由装有刀具的主轴系统来完成，或者由两者共同完成。

对各类机床以及复杂的加工中心来说，回转工作台是其圆周进给运动功能实现最为关键的部分，在各类机床和加工中心上广泛应用的回转工作台可以如下划分，分度工作台、数控回转工作台以及直驱回转工作台。

间接驱动

间接驱动包括蜗轮蜗杆转台、凸轮滚子转台以及谐波转台。

蜗轮蜗杆副是传统的分度和圆周进给机构，广泛用于镗铣床和齿轮加工机床。通常作为分度装置，对于 100mm 到 500mm 直径的工作台分度精度一般为 $\pm 20''$ 左右。

滚柱驱动（RollerDrive）是一种新型的无间隙传动机构，可用于构建新型数控回转工作台。

滚柱驱动的工作台的静态和动态性能皆明显高于传统的蜗轮蜗杆驱动的工作台。

图 55：蜗轮蜗杆传动的工作台



资料来源：张曙《回转工作台和圆周进给》

图 56：滚柱传动机构的原理



资料来源：张曙《回转工作台和圆周进给》

中小型雕刻机的雕刻、钻铣、车削、打孔等工艺中，数控回转工作台不仅需要高速输出，也需要低速高精度输出。蜗轮蜗杆转台扭矩高，但是精度难以保证，且采购及维护成本较高。

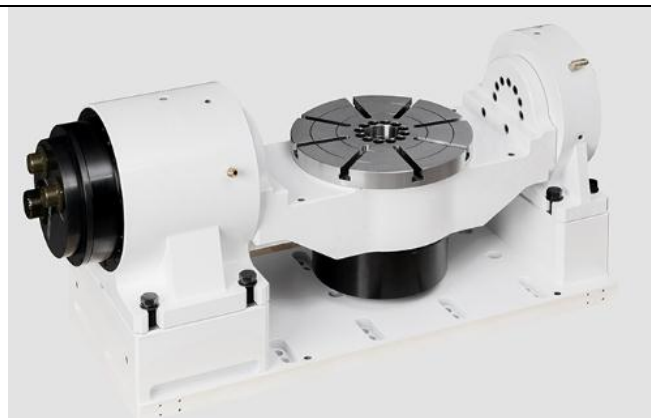
谐波转台主要由谐波减速器和伺服电机组成，具有精度高、体积小、传递扭矩大、成本低等优点，能够适应于各种机床的生产需求，近年来在市场上的占比也越来越大。谐波转台主要应用于如笔记本电脑、手机壳、手表后盖类 3C 产品、珠宝首饰等行业零件加工，可以一次装夹完成多面加工，大幅度提升设备加工效率和加工能力范围。

图 57：四轴转台



资料来源：开璇智能官网

图 58：五轴转台



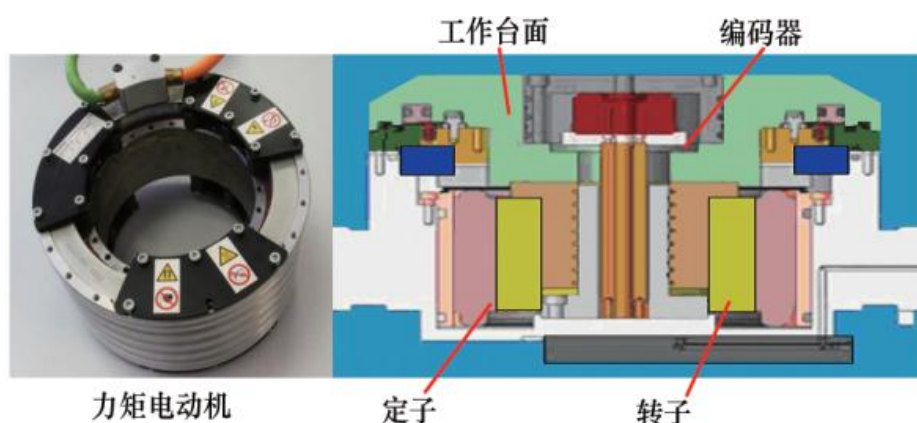
资料来源：开璇智能官网

直接驱动

采用伺服电动机配合蜗轮蜗杆传动副驱动的工作台的缺点是体积大，电主轴和转台之间的干涉位置多，导致可用回转半径小，工件装夹和机床操作不便。直接驱动的回转工作台是一项新技术，工作台由专门设计的力矩电动机直接驱动，电动机的转子与工作台主轴直接连接在一起，中间没有任何机械传动机构。

直接驱动回转工作台结构非常紧凑，动态性能好，惯性小，转速高，除圆周进给外，还可用于车削。由于没有机械传动的背隙和磨损问题，维修方便，辅以直接测量系统，可获得很高的回转精度（约±5"），使用寿命远比机械传动回转工作台长。

图 59：直接驱动工作台和力矩电动机



资料来源：张曙《回转工作台和圆周进给》

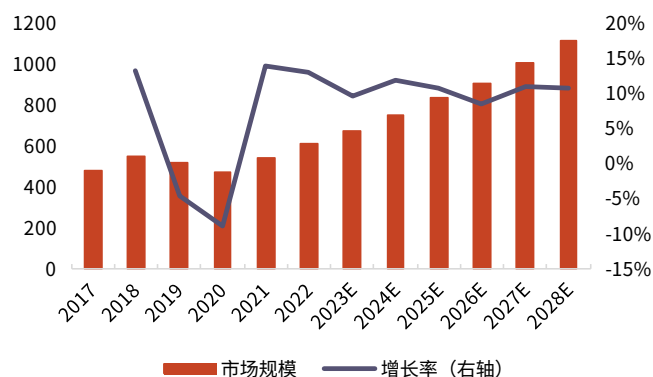
大陆及中国台湾地区生产厂家生产的中低档数控转台占据了我国大部分的转台市场；少部分市场由美国、德国、日本等国家公司生产的高端产品所占据。内地最具竞争力的数控转台生产厂家是烟台环球机床附件集团有限公司，该厂家的产品体系完备，规格齐全，种类繁多，且设计开发和制造方面具备丰富的经验。中国台湾地区的德川机械股份有限公司是专业数控转台生产厂商之一。国外有日本的 NIKKEN（日研）、德国 Peiseler、美国 HASS 公司等专业的生产厂家。国内生产的数控转台产品与国外的产品相比，在精度、速度及可靠性等参数上仍与国外数控转台存在一定差距。

2021 年中国数控转台市场销售收入达到了 5.43 亿美元，据 QYResearch 预计，2028 年可以达到 11.17 亿美元。

从产品类型及技术方面来看，单轴占有重要地位，2021 年份额达到 89.43%，销量达到 58678 台，而双轴由于价格较贵，从 2021 年销量上来看仅为单轴的 1/9，达到 6935 台，但销售额超过单轴的 1/3，达到 1.44 亿美元。预计未来单轴和双轴的比例稳定，在 2028 年，单轴的销量将达到 104280 台，而双轴达到 13671 台。

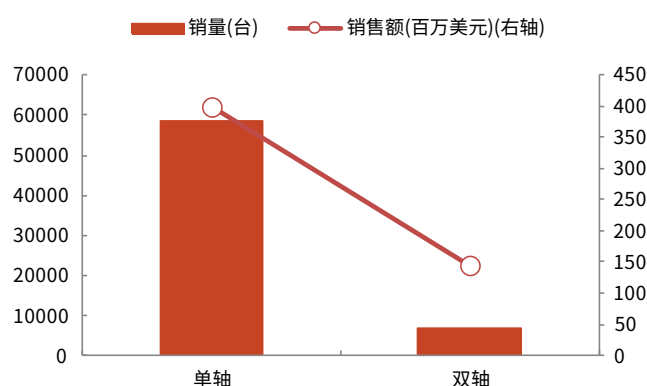
从产品市场应用情况来看，与立式数控机床配套使用的数控转台最多，接近 60%，在 2021 年达到 38816 台，而卧式和龙门分别达到 19330 台与 7467 台。未来增长速度最快的为龙门数控机床，2022-2028 年的 CAGR 达到 9.69%。目前中国主要厂商包括旭阳国际精机、宝嘉诚、德川机械、潭佳精密科技和潭兴精工等，2021 年 Top5 厂商份额占比超过 50%。

图 60：中国数控转台市场规模



资料来源：QYResearch 预测、光大证券研究所；单位：百万美元

图 61：中国数控转台市场（单轴与双轴）（2021）



资料来源：QYResearch、光大证券研究所

3.4、测量系统：工业母机之“眼”

数控机床检测元件的作用是检测位移和速度，发送反馈信号，构成闭环控制。

位置检测装置的分类按照不同的分类标志，可以分为不同的类型。

根据测量方法，可分为增量式和绝对式；根据检测信号的类型，可分为模拟式和数字式；根据安装的位置及耦合方式，可分为直接测量和间接测量；根据运动形式，可分为回转型和直线型检测装置。

表 9：常用位置检测装置分类

分类	数字式		模拟式	
	增量式	绝对式	增量式	绝对式
回转型	增量式脉冲编码器 圆光栅尺	绝对式编码器	旋转变压器 圆磁尺 圆盘感应同步器	多极旋转变压器 三速圆感应同步器
直线型	计量光栅尺 激光干涉仪	多通道透射光栅尺 编码尺	直线感应同步器 磁尺	三速感应同步器 绝对值式磁尺

资料来源：《数控技术》马宏伟主编

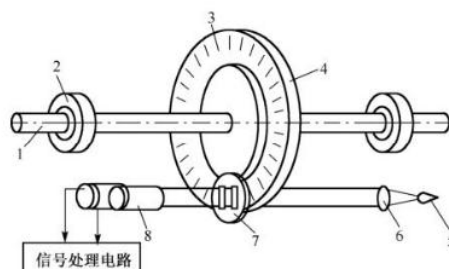
3.4.1、编码器

编码器是一种旋转式测量元件，通常装在被测轴上，随被测轴一起转动，可将被测轴的角位移转换成增量脉冲或绝对式的数字代码。在数控机床上，通常与驱动电动机同轴连接，属间接式测量元件。

编码器根据内部结构和检测方式分类，可分为接触式、光电式和电磁式三种。按照编码方式可分为绝对式编码和增量式编码两种。

在数控机床上，大多采用光电式增量脉冲编码器。

图 62：光电编码器的结构示意图



1—轴；2—轴承；3—光电码盘狭缝；4—光电码盘；5—光源；6—聚光镜；7—光栏板；8—光电

资料来源：《数控技术》马宏伟主编

从编码器在机床各部分的使用来看，编码器可以分为：主轴编码器，手持脉冲发生器，分度头编码器（角度编码器），刀架编码器，伺服进给编码器。

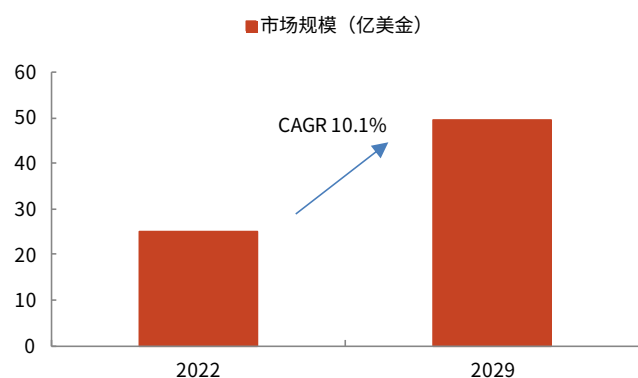
表 10：编码器在机床各部件中的应用

分类	安装位置	安装要求
主轴编码器	主轴	主轴带动工件或刀具旋转，其高刚性、高精度、高强度、高转速特点，要求编码器具有高防护等级、耐震动、具有一定刚性和回转精度要求。
手动脉冲发生器	手动脉冲发生器	手动脉冲发生器用于工件加工的原点修正，手动脉冲发生器要求手感舒适、准确性好、耐磨性好、抗震能力强。
分度头编码器	分度盘	分度盘是将工件夹持在卡盘上或两顶尖间，并使其旋转、分度和定位，精度要求高、准确度要求高，因此必须使用高分辨率和高精度的角度编码器。
刀架用编码器	刀架	刀架可自动更换刀具，工作环境恶劣，要求故障率小，但对编码器分辨率要求较低。
伺服进给编码器	伺服系统	目前伺服进给编码器主要分三类，分别是增量式、增量总线式、绝对式。

资料来源：王忠杰《光栅编码器在机床行业中的应用》

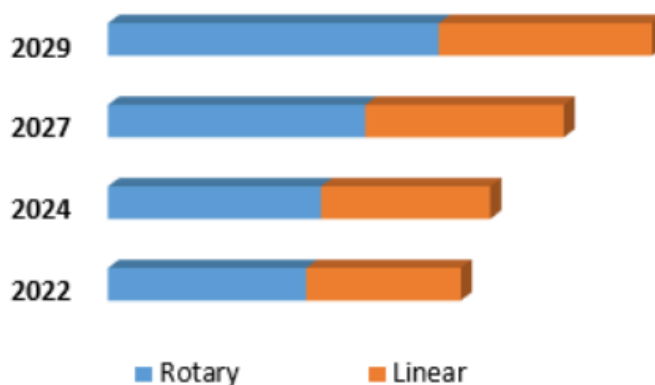
根据 MMR 数据，全球编码器市场规模将从 2022 年的 25.2 亿美元提升至 2029 年的 49.6 亿美元，CAGR 为 10.1%。

图 63：全球编码器市场规模



资料来源：MMR

图 64：全球编码器市场（直线型与旋转型）

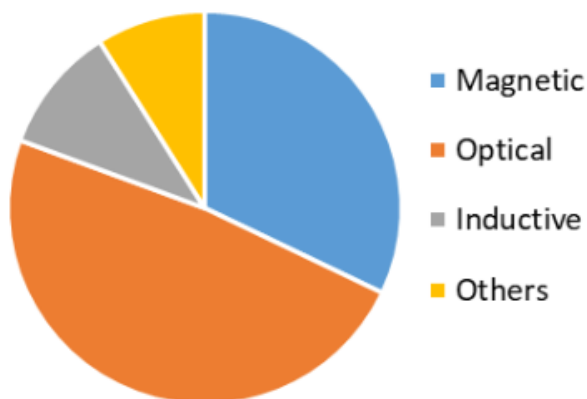


资料来源：MMR

美国是编码器解决方案销售的主要国家之一。美国拥有主要的编码器制造商，包括霍尼韦尔国际公司、罗克韦尔自动化公司、海德汉公司等。

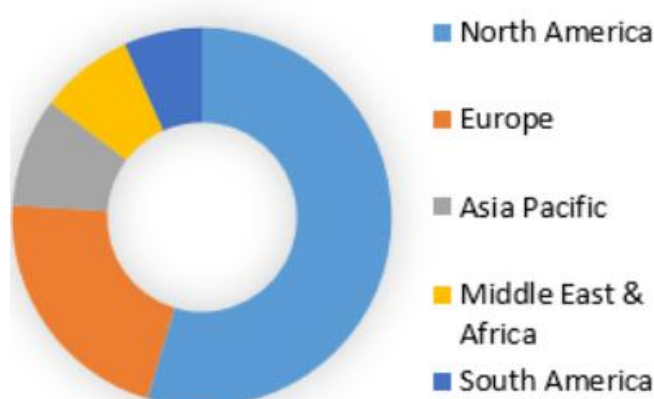
中国是编码器消费的重要国家。这归因于汽车和其他制造业对编码器的需求大幅增长，以及该国最终用途行业的增长。由于市场参与者的大量存在以及工业革命 4.0 在该国的不断发展，多年来对编码器的需求不断增加。

图 65：全球编码器市场规模（按检测方式）



资料来源：MMR

图 66：全球编码器市场规模（按地域）



资料来源：MMR

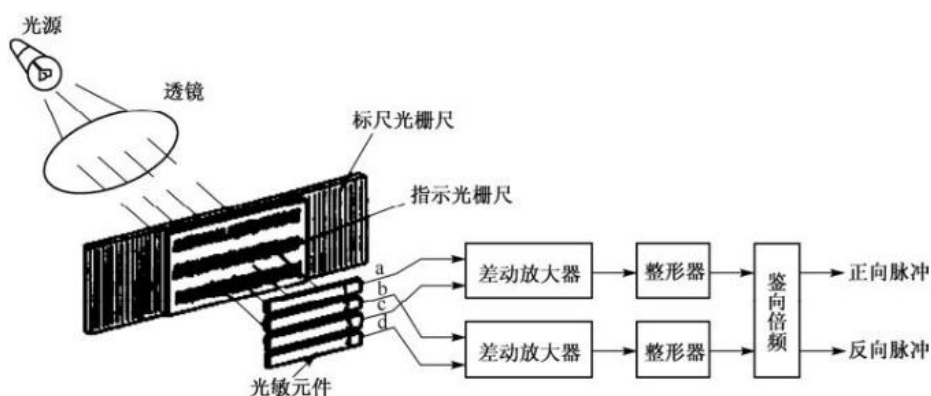
3.4.2、光栅尺

光栅尺是光栅线位移传感器的简称，是一种利用光栅原理实现线位移测量的传感器。光栅线位移传感器主要应用于直线移动导轨机构，可实现移动量的精确显示和自动控制，广泛应用于金属切削机床加工量的数字显示和 CNC 加工中心位置环的控制。

按照材质不同，可分为玻璃光栅和钢光栅；按照测量原理可分为绝对式和增量式；按照扫描方式可分为成像扫描和干涉扫描；按照防护性能不同，可分为封闭式光栅尺和开放式光栅尺。

从产品类型及技术方面来看，目前增量式光栅尺由于较低的成本和技术要求，占有超过 80% 的份额。预计未来几年，绝对式光栅尺将保持更快的增长速度。

图 67：光栅尺测量系统组成原理

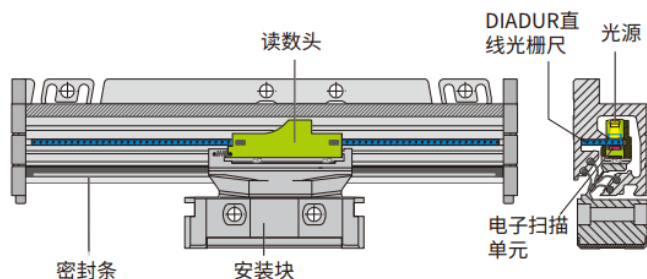


资料来源：《数控技术》马宏伟主编

光栅是实现高精度测量的基础，其由一系列等间距排列的刻线和狭缝组成，其间距误差极小，刻线边缘整齐清晰。根据海德汉公司产品手册，公司通过光刻、镀膜等工艺制造的光栅包括 DIADUR 精密光栅、METALLUR 光栅、相位光栅、

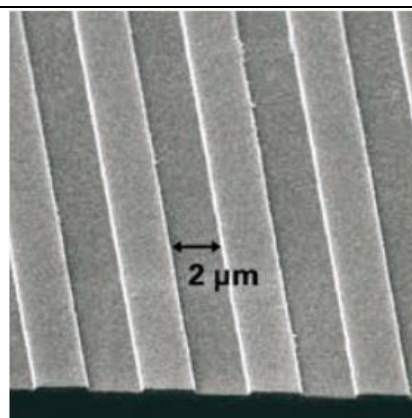
SUPRADUR 光栅、OPTODUR 光栅、MAGNODUR 光栅等，度可达到微米级或亚微米级。

图 68：封闭式直线光栅尺结构示意图



资料来源：海德汉官网

图 69：相位光栅的刻线高度约为 $0.25\ \mu\text{m}$



资料来源：海德汉官网

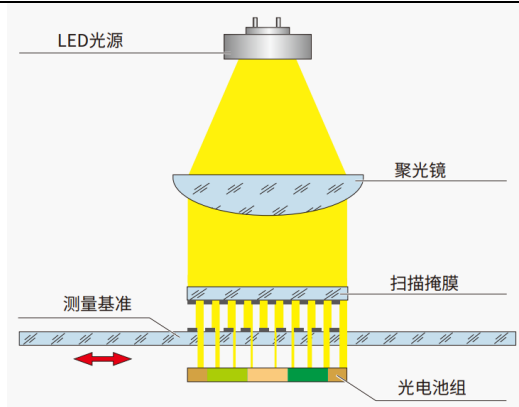
成像扫描原理

成像扫描原理是用透射光生成信号，两个栅距相同或相近的光栅与扫描掩膜彼此相对运动。在狭缝对齐时，光线通过。如果一条光栅的栅线与另一条光栅上的狭缝对齐，光线无法通过。光电池组将光强变化转化成电信号。扫描掩膜的特殊栅状结构将光强调制为近正弦输出信号。

干涉扫描原理

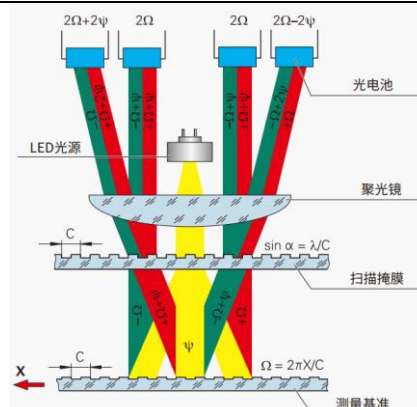
干涉扫描原理是用精细栅状结构的光衍射和光干涉生成位移信号，测量运动。光波穿过扫描掩膜时，将光波衍射为光强近似的三束光： $+1$ 、 0 和 -1 。光栅尺所衍射的光波是反射的衍射光 $+1$ 和 -1 中光强最强的光束。这两束光波在扫描掩膜的相位光栅处再次相遇，再一次被衍射和干涉。也形成三束光，并以不同的角度离开扫描掩膜。光电池将这些交变的光强转化成电信号。扫描信号基本没有高次谐波，能进行高频细分。因此，这些光栅尺特别适用于小测量步距和高精度应用。

图 70：成像扫描原理



资料来源：海德汉官网

图 71：干涉扫描原理



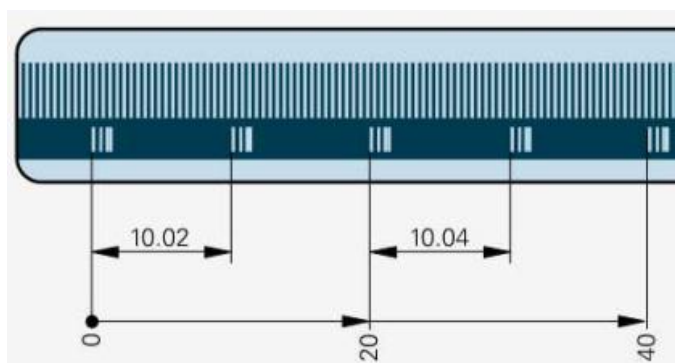
资料来源：海德汉官网

增量式光栅尺的测量原理是将光通过两个相对运动的光栅调制成摩尔条纹，通过对摩尔条纹进行计数、细分后得到位移变化量，并通过在标尺光栅上设定一个或是多个参考点来确定绝对位置；绝对式光栅尺的测量原理是在标尺光栅上刻划一条带有绝对位置编码的码道，读数头通过读取当前位置的编码可以得到绝对位

置。绝对式光栅尺的优点是开电后直接得到当前位置信息，无需“归零”操作，简化控制系统设计。

绝对式光栅尺可以从上一次停机的地方开始继续原来的加工工作，提高了工作效率，并且可以随时监控光栅尺所处的位置，使得机床或仪器有一永远不变的参考坐标，使机床或仪器的误差修正等工作变得非常容易和可靠。因此，绝对式光栅尺是未来光栅尺发展的一个趋势，会逐步取代增量式光栅尺被广泛的应用到精密数控机床上。

图 72：增量式光栅尺



资料来源：胡国良《绝对式光栅传感器关键技术的研究》

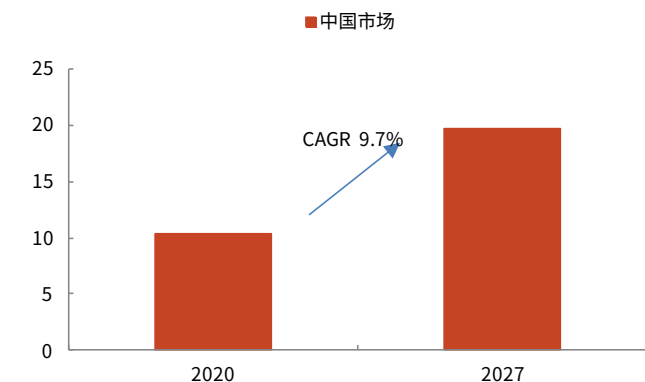
图 73：绝对式光栅尺



资料来源：胡国良《绝对式光栅传感器关键技术的研究》

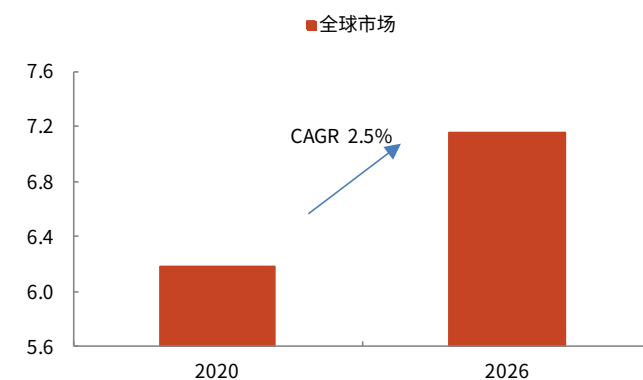
根据 Global Info Research，2020 年，中国光栅尺市场规模达到了 10.3 亿元，预计 2027 年将达到 19.7 亿元，年复合增长率（CAGR）为 9.7%。2020 年全球光栅尺收入大约 6.18 亿美元，预计 2026 年达到 7.16 亿美元，2020 至 2026 年间，年复合增长率为 2.5%。

图 74：中国光栅尺市场



资料来源：Global Info Research 预测；单位：亿元

图 75：全球光栅尺市场



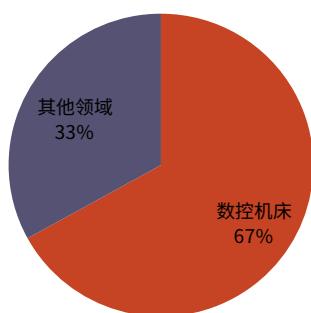
资料来源：Global Info Research 预测；单位：亿美元

光栅尺常用于数控机床的闭环伺服系统中。在机床中用于检测刀具和工件的坐标，观察和跟踪走刀误差，起到补偿刀具运动误差的作用。中国市场，光栅尺主要用在高性能机床、磨床、车床、铣床和加工中心等。其他领域及其他设备包括半导体行业的生产和测量设备、电路组装设备、测量显微镜和其他精密设备等。从产品市场应用情况来看，目前，数控机床是最大的下游应用领域，占有 67% 的份额（2021 年），预计接下来几年该领域依然是最大的下游市场，尤其是其中的高端类型。

目前中国光栅尺市场，主要由德国的海德汉 Heidenhain、西班牙发格、英国雷尼绍、和三丰 Mitutoyo 等欧洲和日本品牌主导，尤其是在中高端领域，这几个

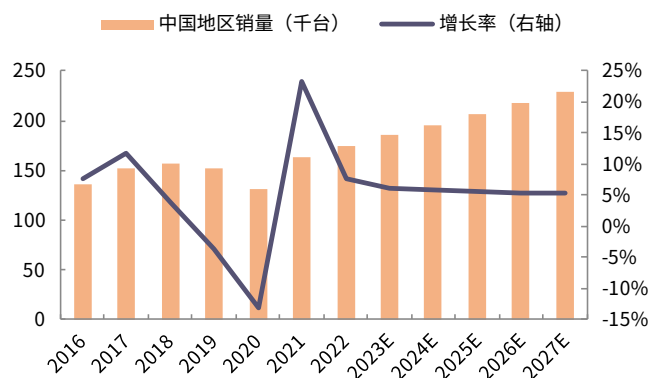
品牌占有接近 90% 的市场份额。国内本土厂商主要是长春光机数显技术有限责任公司（长春禹衡光学）、广州市诺信数字测控设备有限公司（信和）和东莞市索信测量仪器有限公司等。目前国内厂商主要产品是增量式光栅尺，不过长春光机已经突破了绝对式光栅尺的相关技术，预计未来几年，本土品牌将扮演更重要的角色。

图 76：中国光栅尺下游应用领域（2021）



资料来源：Global Info Research

图 77：中国光栅尺销量



资料来源：Global Info Research

4、投资建议

高档数控机床是具有战略性、基础性地位的“工业母机”和高端装备制造业的基石，作为高端装备制造价值生成的重要基础和产业跃升的关键支撑，其性能、质量和拥有量已成为当今衡量一个国家工业化水平与综合国力的重要标志，对于我国制造业实现高水平科技自立自强、塑造国际竞争新优势具有重大的战略意义。

《中国制造 2025》将“高档数控机床”列为未来十年制造业重点发展领域之一。2023 年 7 月，工业和信息化部、教育部、科技部、财政部、国家市场监管总局等五部门联合印发《制造业可靠性提升实施意见》，提出重点提升立/卧式加工中心、五轴联动加工中心、车铣复合加工中心、重型数控机床等工业母机的可靠性水平。同月，财政部税务总局印发关于工业母机企业增值税加计抵减政策的通知，自 2023 年 1 月 1 日至 2027 年 12 月 31 日对生产销售先进工业母机主机、关键功能部件、数控系统的企业，加计 15%抵减企业应纳增值税税额。

从产品特征看，高档数控机床由刀具、主轴、滚珠丝杠、导轨、卡盘、转台等核心功能部件以及主机、数控系统 3 大部分构成，是具备高成本、技术密集型、高端定制等特征的复杂产品系统。

截至 2022 年底，国内高端机床国产化率不足 10%，进口替代空间巨大，但国内开展高端机床业务的企业数量及产销量仍与发达国家相差较大，而且高档数控系统及关键功能部件仍以进口为主。随着《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》出台，有望释放国内机床设备更新需求，推动高端数控机床国产替代，加速关键工序数控化率提升。

投资方面：

整机层面：看好技术领先的头部机床企业，建议关注科德数控（五轴联动数控机床）、海天精工（数控龙门加工中心）、纽威数控（立加、卧加产品线丰富）、宇环数控（数控研磨抛光）；

零部件层面：

- 1) 数控系统作为工业母机之“脑”，技术壁垒高，产业链地位关键，建议关注华中数控；
- 2) 主轴与进给系统作为工业母机之“四肢”，是数控机床高精度的保证，代表了高水平的机加工工艺和先进制造能力，建议关注贝斯特（丝杠）、昊志机电（主轴）、绿的谐波（转台）；
- 3) 测量系统作为工业母机之“眼”，是数控机床实现闭环控制的重要组成，目前国产化率仍处于较低水平，建议关注奥普光电。

4.1、科德数控

科德数控股份有限公司是大连光洋科技集团有限公司的控股子公司，是中国本土专业化高档数控系统和关键功能部件的完整产业制造商；是国内制造类企业中，实现“机床和控制、反馈装置及电机一体化”的知名供应商；凭借高度专业自主化程度，目前科德已经成长为国内颇具规模的五轴装备产销基地。

公司主营业务为五轴联动数控机床、高档数控系统、关键功能部件以及柔性自动化产线。主要产品包括系列化五轴立式（含车铣）、五轴卧式（含车铣）、五轴龙门、五轴卧式铣车复合四大通用加工中心和五轴工具磨削、五轴叶片机、高速叶尖磨削中心三大系列化专用机床以及服务于高端数控机床的高档数控系统，伺服驱动装置、系列化电机、系列化传感产品、电主轴、铣头、转台等关键功能部件。

在产品布局上，既有面向军工领域打造的高端 KD 系列，又有适用于民用领域的高性价比的德创系列。产品线覆盖了高端数控机床领域大部分加工类型、尺寸规格的高端数控机床产品且产品的各项性能同国外先进产品基本相当，因此能够满足于航空、航天、兵器、能源、汽车等多数高端制造行业的多类型、多尺寸规格的部件加工需求。

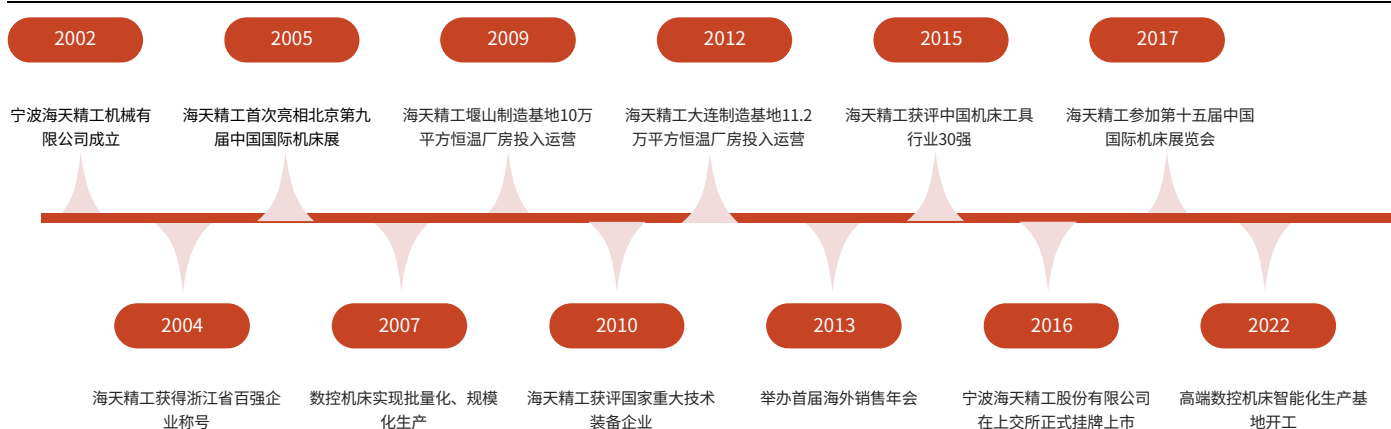
2022 年，公司高档数控机床生产量 230 台，同比+45.57%，销售量 177 台，同比+40.48%。2022 年，公司实现营业收入 3.15 亿元，同比+24.39%，实现归母净利润 0.60 亿元，同比-17.04%。2023 年，公司实现营业收入 4.52 亿元，同比+43.37%，实现归母净利润 1.02 亿元，同比+68.92%。

风险提示：五轴联动机床高端细分领域国产替代进展不及预期的风险，竞争加剧的风险。

4.2、海天精工

宁波海天精工股份有限公司是一家专业制造数控机床的上市企业，拥有宁波大港制造基地、宁波堰山制造基地、大连海天精工制造基地、宁波高端数控机床智能化生产基地，共计 50 余万平方米的现代化恒温加工装配厂房，员工近 1900 人，是国家重大技术装备企业，国家高新技术企业，省级高新技术研发中心。

图 78：海天精工发展历程



资料来源：海天精工官网

2022 年，公司卧式、立式、龙门数控加工中心及其他机床生产量 5085 台，同比+4.16%，销售量 4825 台，同比+10.74%。2022 年，公司实现营业收入 31.77

亿元，同比+16.37%，实现归母净利润 5.21 亿元，同比+40.31%。2023 年 Q1-3，公司实现营业收入 25.07 亿元，同比+5.95%，实现归母净利润 4.64 亿元，同比+18.94%。

风险提示：宏观经济下行导致需求不及预期的风险，关键零部件依赖进口的风险，买方信贷结算方式发生连带担保赔偿的风险。

4.3、 纽威数控

纽威数控装备（苏州）股份有限公司座落于苏州高新区科技城，占地面积 20 万平方米，集恒温综合性装配车间、精密检测车间、精密机加工车间、喷涂车间及物流中心于一体的高标准现代化生产车间。

纽威数控装备引进欧美龙门五面体、坐标镗、高精度卧加、万能磨床、导轨磨等作为工作母机，并配备三坐标、激光干涉仪、动平衡仪、主轴温升试验台等检测试验设备。公司采用先进的 SAP 管理系统，致力于追求产品的零缺陷，为客户提供优质的中高档数控加工设备。

公司现有大型加工中心、立式数控机床、卧式数控机床、典型行业应用机床等系列 200 多种型号产品，广泛应用于汽车、新能源、航空、工程机械、模具、阀门、自动化装备、电子设备、通用设备等行业，产品销往全国和美国、德国、英国、意大利、俄罗斯、巴西等 40 多个国家和地区。

图 79：纽威数控发展历程



资料来源：纽威数控官网

2022 年，公司大型加工中心、立式数控机床、卧式数控机床及其他机床生产量 2957 台，同比-3.05%，销售量 2871 台，同比-3.37%。2022 年，公司实现营业收入 18.46 亿元，同比+7.76%，实现归母净利润 2.62 亿元，同比+55.59%。

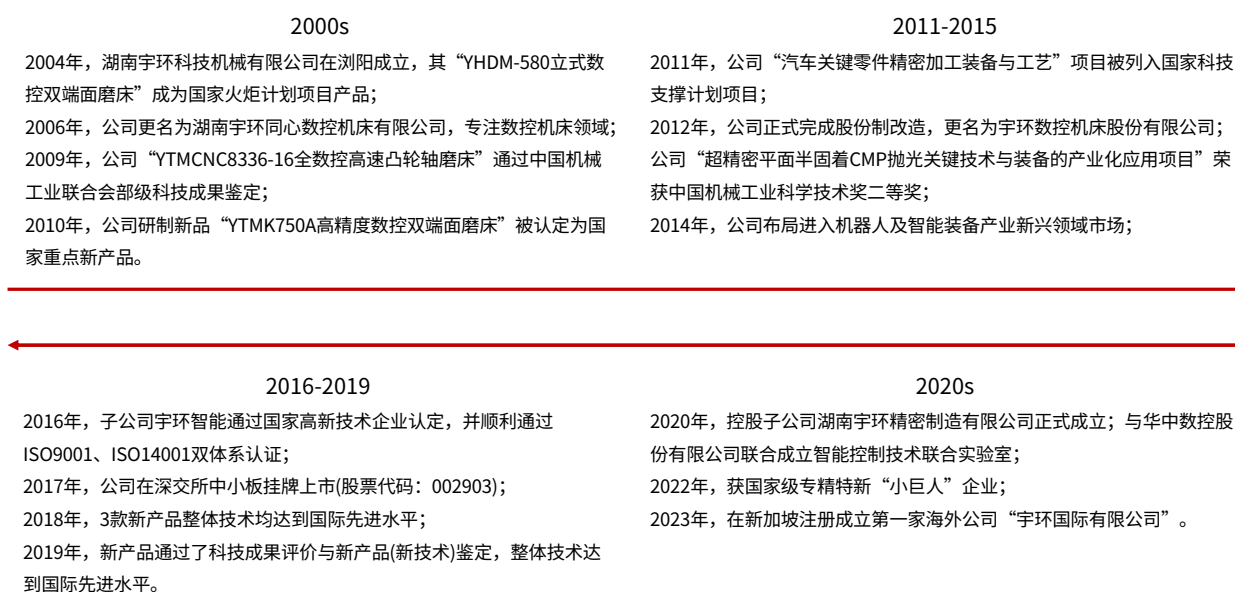
2023 年，公司实现营业收入 23.26 亿元，同比+26.05%，实现归母净利润 3.20 亿元，同比+21.89%。

风险提示：核心零部件进口依赖的风险，竞争加剧的风险，主要采用销售服务商及经销模式引致的风险。

4.4、宇环数控

宇环数控机床股份有限公司是专业从事数控磨削设备及智能装备的研发、生产、销售与服务，为客户提供精密磨削与智能制造技术综合解决方案，是国内精密数控磨床和数控研磨抛光设备领域的领军企业。

图 80：宇环数控发展历程



资料来源：宇环数控官网

公司产品主要分为数控磨床、数控研磨抛光机和智能装备系列产品，广泛应用于消费电子、汽车工业、能源电力、新材料、粉末冶金等行业领域。

2022 年，公司实现营业收入 3.58 亿元，同比-18.39%，实现归母净利润 0.55 亿元，同比-24.63%。2023 年 Q1-3，公司实现营业收入 3.00 亿元，同比-1.86%，实现归母净利润 0.38 亿元，同比-28.13%。

风险提示：技术升级迭代的风险，核心客户集中度过高的风险。

4.5、华中数控

武汉华中数控股份有限公司创立于 1994 年，是国产中、高档数控系统研究和产业化基地，国产数控系统行业首家上市公司。主营业务包括数控系统配套、工业机器人及智能制造、工程职业教育、新能源汽车配套、红外人体测温设备等。

图 81：华中数控发展历程



资料来源：华中数控官网

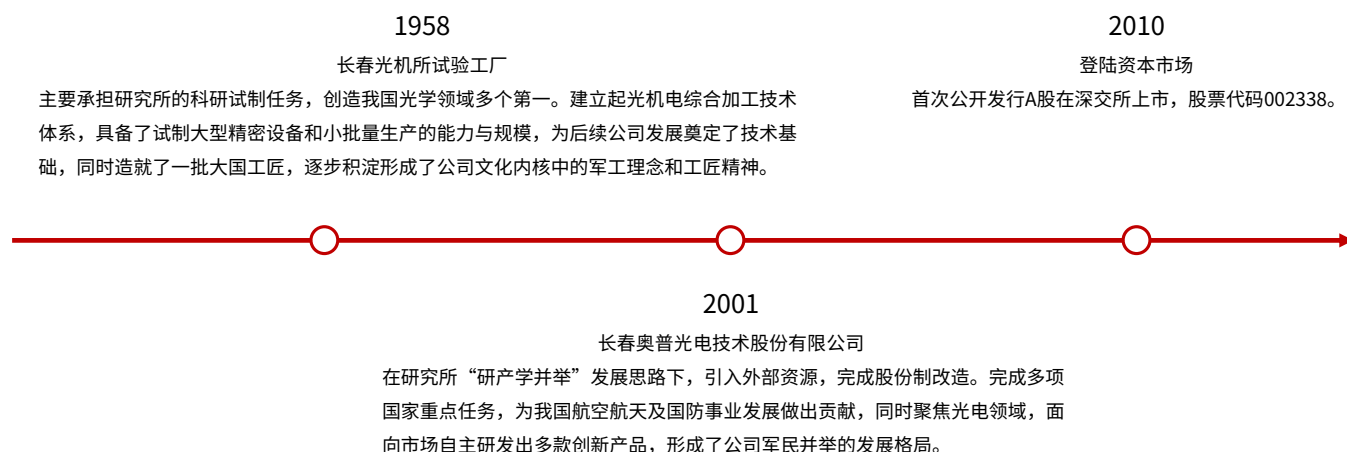
公司坚持“一核三军”的发展战略，即“以数控系统技术为核心，以机床数控系统、工业机器人及智能产线、新能源汽车配套为三个主要业务板块”。2022 年，公司实现营业收入 16.63 亿元，同比+1.81%，实现归母净利润 0.17 亿元，同比-46.20%。2023 年 Q1-3，公司实现营业收入 12.96 亿元，同比+33.31%，实现归母净利润-0.34 亿元，同比转亏。

风险提示：市场竞争加剧的风险，数控系统技术迭代的风险，原材料成本波动的风险。

4.6、奥普光电

长春奥普光电技术股份有限公司成立于 2001 年 6 月，是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所和广东风华高新科技股份有限公司等出资设立的高新技术企业。其前身是始建于 1958 年的中国科学院长春光机所实验工厂。

图 82：奥普光电发展历程



资料来源：奥普光电官网

公司从事的主要业务为光电测控仪器设备、新型医疗仪器、光学材料、光栅编码器、高性能碳纤维复合材料制品等产品的研发、生产与销售。公司主导产品为光电经纬仪光机分系统、航空/航天相机光机分系统、新型雷达天线座、精密转台、军民两用医疗检测仪器、光栅编码器、导弹火箭及空间结构件、k9 光学玻璃等。

2022 年，公司实现营业收入 6.27 亿元，同比+14.67%，实现归母净利润 0.82 亿元，同比+75.31%。2023 年，公司实现营业收入 7.75 亿元，同比+23.59%，实现归母净利润 0.94 亿元，同比+15.28%。

风险提示：核心技术进步不及预期的风险，人才流失的风险，高端产品国产替代进度不及预期的风险。

5、风险分析

(1) 政策支持不及预期：数控机床属于多个核心部件组合而成的技术密集型复杂产品，在实现国产替代的过程中需要政策支持。若相关政策支持不及预期，可能对技术攻关造成不利影响；

(2) 竞争加剧风险：若不能实现高附加值产品的突破，则在中低端市场可能面临竞争加剧的风险；

(3) 核心技术进步不及预期：若数控系统、主轴、丝杠等核心零部件的技术进步不及预期，可能对产业链造成负面影响。

行业及公司评级体系

评级	说明
买入	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上
增持	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
中性	未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
减持	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
卖出	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
无评级	因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：A 股市场基准为沪深 300 指数；香港市场基准为恒生指数；美国市场基准为纳斯达克综合指数或标普 500 指数。	

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

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注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不曾与、不与、也将不会与本报告中的具体推荐意见或观点有直接或间接的联系。

法律主体声明

本报告由光大证券股份有限公司制作，光大证券股份有限公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格，负责本报告在中华人民共和国境内（仅为本报告目的，不包括港澳台）的分销。本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格编号已披露在报告首页。

中国光大证券国际有限公司和 EverbrightSecurities(UK)CompanyLimited 是光大证券股份有限公司的关联机构。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）成立于 1996 年，是中国证监会批准的首批三家创新试点证券公司之一，也是世界 500 强企业——中国光大集团股份公司的核心金融服务平台之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中所载观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

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、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区新闻路 1508 号
静安国际广场 3 楼

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

EverbrightSecurities(UK)CompanyLimited
6thFloor,9AppoldStreet,London,UnitedKingdom,EC2A2AP