

机床工具行业深度报告

数控机床核心装置百亿市场空间，国产替代进行时

方正证券研究所证券研究报告

分析师

李鲁靖

登记编号：S1220523090002

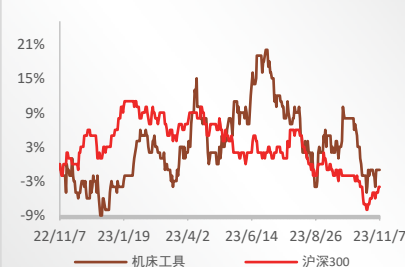
联系人 赵璐

行业评级：推荐

行业信息

上市公司总数家数	21
总股本(亿股)	132.16
销售收入(亿元)	347.84
利润总额(亿元)	13.08
行业平均 PE	250.05
平均股价(元)	18.61

行业相对指数表现



数据来源：wind 方正证券研究所

相关研究

机床行业的国产化率在很大程度上取决于其核心零部件的国产化情况。本文重点梳理了数控系统、主传动系统、伺服进给系统、导轨、位置检测装置等核心装置及其内部零部件的均价、技术要求、市场规模及国产化情况。总体上看，数控系统、电主轴、滚珠丝杠、导轨、位置检测装置等合计国内市场空间近 250 亿元，外资品牌占据主导地位，尤其在高端机床用零部件，国产替代空间较大。

数控系统是机床“大脑”，市场规模达百亿，国产化率仅 20%，国产替代空间大。数控系统的主要任务是对刀具和工件之间的相对运动进行控制，是实现加工过程自动化之关键。平均来看，数控系统约占机床价格比重约为 15.4%。从均价来看，数控系统中，数控装置均价约为 3884 元/台，价格最高，伺服驱动单元、电机均价在 1600 元/台左右，其中主轴伺服驱动单元、电机价格较高，数显装置均价在 170 元/台。目前，根据纽威数控招股书、秦川机床公告，我国 80%以上的数控机床的数控系统仍然使用进口产品，其中，国外品牌在中高端数控系统市占率约为 70%，高端系统占 90%以上，发那科、西门子是主要进口品牌，国内企业华中数控、广州数控、苏州新代等市占率不断提升。

主传动系统：高效高精度加工催生电主轴技术，市场规模近 50 亿元。主传动系统是用来实现机床主运动的传动系统，主要包括电动机、传动系统、主轴部件三部分。数控机床最早使用低速大扭矩、大功率、刚性好的机械主轴，但终端市场对高效率、高精度、高可靠性的加工要求催生了电主轴的诞生。据 QY Research 数据，2022 年全球电主轴市场空间约为 94 亿元，国内约为 48 亿元，瑞士 Fisher、IBAG 公司、德国 Kessler 公司、英国西风为全球主要电主轴品牌，日本、中国台湾品牌在大陆市场也占有较大市场份额，国内市场电主轴的核心生产商有昊志机电、Celera Motion、Fisher、普森精密主轴、江苏星辰等，前三大厂商市占率约为 23%。在众多关键核心零部件中，电主轴市场集中度相对较低，竞争相对充分，或成为国产替代较早突破领域。

伺服进给系统：连接数控装置与机床本体的关键环节。伺服进给系统由伺服驱动器、伺服驱动装置、机械传动机构、执行部件组成。其传动方案主要有两种，其中，旋转电机+滚珠丝杠是机床中最常用传动方案，据华经产业研究院数据，2022 年全球滚珠丝杠市场规模约为 136 亿元，国内约为 28 亿元，2023 年全球滚柱丝杠市场规模约为 22 亿元，国内 1.9 亿元。滚珠丝杠的核心厂商主要有 NSK、THK、SKF、博世力士乐、Kuroda、舍弗勒等，CR5 市占率达到约 46%，日本和欧洲滚珠丝杠企业占据了全球约 70%的市场份额。国内市场，大陆企业市占率仅为 25%，布局企业主要有南京工艺装备、山东博特精工、山东华珠机械、秦川机床（陕西汉江机床）、贝斯特、恒立液压等。

导轨对运动部件起导向和支承作用，对机床加工精度有重要影响。导轨可以分为滚动导轨（滚珠、滚珠型导轨）、滑动导轨、静压导轨。其中，滚动导轨灵敏度及定位精度高，滑动导轨结构简单、刚度好，是机床中最常用的两种导轨。据 QY Research 数据，2020 年全球直线导轨市场规模约为 147 亿元，国内约为 38 亿元，主要生产企业有日本 THK、NSK、中国台湾上银、

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

博世力士乐、舍弗勒等，CR5 超过 78%，与滚柱丝杠相似，导轨的市场集中度也较高。秦川机床、恒而达、贝斯特等企业布局直线导轨领域。

位置检测装置：决定机床加工精度之关键，光栅为主要测量装置。精密测量技术主要包括角度测量、位移测量两种，旋转变压器、脉冲编码器多用于角度测量，光干涉仪、光栅测量仪是实现高精度、高分辨率的两种位移测量方式。目前，光栅测量系统在整个测量领域里市场份额可以占到 80 %以上，在整个测量领域中有着不可替代的地位。据 QY Research 数据，2021 年全球光栅尺市场销售额达 46 亿元，一般一个五轴的加工中心会用 XYZ 轴，加 2 个旋转轴，其中旋转轴用角度传感器，对应国内高端光栅尺的年需求约为十几万支。目前国际上生产光栅尺的企业主要有德国海德汉、西班牙发格（FAGOR）、英国雷尼绍、日本三丰等。这些企业都已经实现 nm 级分辨率，甚至是 pm 级。目前国内应用最多的是增量式光栅尺，但绝对式光栅尺在国内目前成熟的产品很少，大部分都需要进口。长春奥普光电控股子公司禹衡光学生产的光栅尺在机床领域可以满足高端数控技术需求。

投资建议：建议关注国内数控系统龙头企业**华中数控**、电主轴领域**昊志机电**、丝杠及导轨领域**秦川机床**、贝斯特、恒立液压、恒而达，位置检测装置领域**奥普光电**。

风险提示：宏观经济波动风险，技术推进不及预期风险，产能消化风险，行业政策调整风险

正文目录

1 数控机床结构及关键装置拆解.....	6
2 数控系统是机床“大脑”，实现加工过程自动化之关键.....	10
2.1 数控系统的组成：数控装置为数控系统的核心，价值量占比最高.....	10
2.2 市场规模：数控系统约占数控机床成本比重 22%，国内市场规模 135 亿元.....	11
2.3 竞争格局：高端市场仍有外资品牌主导，国产替代空间广阔.....	12
3 主传动系统：高效高精度加工催生电主轴技术，市场规模近 50 亿元.....	15
3.1 主轴的演进：高效率、高精度、高可靠性加工催生电主轴技术的出现.....	15
3.2 电主轴由数十种精密零件组成，材料、设计及装配工艺是决定精度之关键.....	18
3.3 电主轴市场规模近 50 亿元，CR3 约 23%，高端磨床及加工中心主轴仍以进口为主.....	19
4 伺服进给系统：连接数控装置与机床本体的关键环节.....	21
4.1 伺服进给系统的特点.....	21
4.2 旋转电机+滚珠丝杠：机床中最常用的传动系统方案.....	21
4.2.1 丝杠的分类.....	22
4.2.2 滚珠丝杠预紧力的实施.....	23
4.2.1 滚珠 & 滚柱丝杠的市场空间及竞争格局.....	24
4.3 直线进给系统方案，诞生于超高速加工背景.....	27
5 导轨：对运动部件起导向和支承作用，对机床加工精度有重要影响.....	29
5.1 滚动导轨：可分为滚珠、滚柱型导轨，灵敏度及定位精度高.....	29
5.2 滑动导轨：结构简单、刚度好，是机床中使用最广泛的导轨形式之一.....	31
5.3 静压导轨：不产生磨损，精度保持性好，显著降低驱动功率.....	31
5.4 竞争格局：全球滚动直线导轨市场规模近 150 亿元，CR5 达 78%.....	32
6 位置检测装置：决定机床加工精度之关键，光栅为主要测量装置.....	33
6.1 旋转变压器.....	34
6.2 脉冲编码器.....	34
6.3 光栅位置检测装置.....	35
6.4 磁栅位置检测装置.....	37
6.5 感应同步器.....	38
6.6 激光干涉检测仪.....	38
6.7 竞争格局：全球光栅尺市场规模近 50 亿元，欧洲及日本供应商占主导地位.....	39
7 相关标的.....	41
7.1 华中数控.....	41
7.2 昊志机电.....	41
7.3 秦川机床.....	41
7.4 贝斯特.....	42
7.5 恒立液压.....	42
7.6 恒而达.....	42
7.7 奥普光电.....	42
8 风险提示.....	44

图表目录

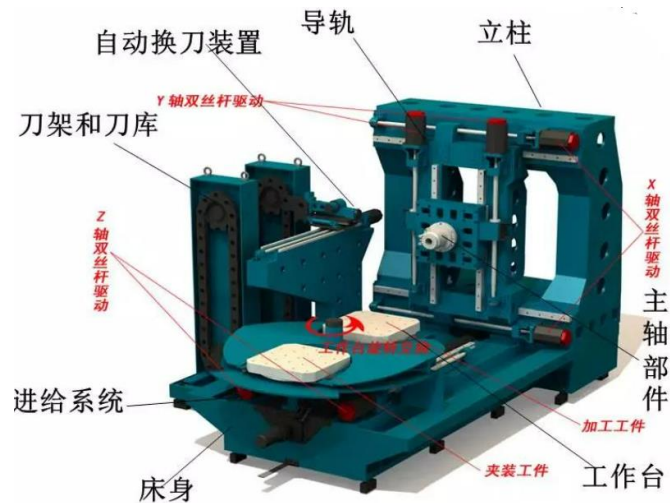
图表 1: 数控机床的机械结构组成	6
图表 2: 数控车床常见布局形式	6
图表 3: 数控铣床（加工中心）的布局形式	6
图表 4: 机床成本构成	7
图表 5: 2020 年数控机床功能部件销售情况（协会统计 27 家公司）	8
图表 6: 2020 年数控系统产品销售情况（6 家公司）	9
图表 7: 2020 年量具量仪产品销售情况（99 家企业）	9
图表 8: 数控机床核心装置市场规模及国产化情况	9
图表 9: 数控系统组成的一般形式	10
图表 10: 数控系统组成的一般形式	11
图表 11: 不同等级数控机床功能及指标	11
图表 12: 2020 年数控系统相关产品销售金额占比	12
图表 13: 2020 年协会统计数控系统相关装置销售情况	12
图表 14: 2021Q1 国内数控系统竞争格局	13
图表 15: 国内外不同数控系统功能及性能对照	14
图表 16: 三种主传动系统变速方式对比	15
图表 17: 主轴的演进过程	16
图表 18: 电主轴在机床中的位置	16
图表 19: 电主轴的分类（按采用轴承类型划分）	17
图表 20: 按应用领域划分电主轴（以昊志机电为例）	17
图表 21: 电主轴内部结构及其核心零部件	18
图表 22: 电主轴核心零部件及其作用	19
图表 23: 国内外电主轴主要参与厂商	20
图表 24: 伺服进给系统的构成	21
图表 25: 滚珠丝杠螺母副工作原理	22
图表 26: 丝杠按摩擦特性分类	22
图表 27: 滚珠丝杠的滚道形式	23
图表 28: 滚柱丝杠的循环方式	23
图表 29: 滚柱丝杠预紧方式	24
图表 30: 全球及中国滚珠丝杠市场规模（亿元）	25
图表 31: 中国滚珠丝杠产量需求量及单价变化	25
图表 32: 供给端：滚珠丝杠前三家品牌市占率 25%	25
图表 33: 需求端：全球各国家、地区滚珠丝杠需求占比	25
图表 34: 全球滚柱丝杠市场规模及其在滚动丝杠中渗透率	26
图表 35: 2023 年全球各国滚柱丝杠市场规模占比	26
图表 36: 2021 年全球滚柱丝杠终端用户占比	26
图表 37: 全球滚动丝杠各产品头部企业	27
图表 38: 滚珠丝杠国内外厂商布局情况	27
图表 39: 直线电机进给系统外观	28
图表 40: 旋转电机展平为直线电机的过程	28
图表 41: 滚珠丝杠与直线导轨的关系	29
图表 42: 滚珠直线导轨副	30
图表 43: 滚柱直线导轨副	30
图表 44: 滚动直线导轨内部结构	30
图表 45: 开式与闭式静压导轨工作原理	31

图表 46: 全球直线导轨销售收入及增速变化.....	32
图表 47: 全球直线导轨市占率情况.....	32
图表 48: 2020 年滚珠丝杠及滚动导轨、直线导轨均价	32
图表 49: 位置检测装置分类	33
图表 50: 光电式与高分辨率脉冲编码器.....	34
图表 51: 光电脉冲编码器光栅	35
图表 52: 脉冲编码器的输出波形	35
图表 53: 光栅检测装置的安装结构.....	36
图表 54: 光栅读数头内部结构	36
图表 55: 莫尔条纹的产生	37
图表 56: 莫尔条纹的光学放大作用.....	37
图表 57: 磁栅尺读数头工作原理	38
图表 58: 磁栅检测装置工作原理	38
图表 59: 直线感应同步器结构	38
图表 60: 感应同步器工作原理	38
图表 61: 激光干涉仪原理	39
图表 62: 机床量具、量仪价格	39

1 数控机床结构及关键装置拆解

数控机床使传统机械加工工艺，实现了加工过程自动化的质的变化。其机械结构特点一般要求：**1) 结构简单、自动化程度高**：一般，若采用旋转电机+滚柱丝杠进给方案，则主轴箱、进给箱结构相对简单，电机直接连接主轴及滚珠丝杠；若采用直线电机、电主轴方案，则不需要丝杠、主轴箱。**2) 广泛采用高效、无间隙传动装置**：数控机床常用的滚柱丝杠副、塑料滑动导轨、静压导轨、直线导轨等高效执行部件，可有效减小摩擦力，提高传动效率；**3) 具有适应无人化、柔性化加工的特殊部件**：数控机床往往具有自动换刀装置、动力刀架、自动排屑装置、自动润滑装置、自动工作台交换装置、自动装卸、自动对刀、破损检测、立卧转换等，工艺更加复合化，功能集成化；**4) 对机械结构、零部件要求高**：往往体现在刚度、功率、精度、抗震性。因为数控机床开机时间长、工作负载增加，但又要求高速、高精度、高效、无人化，因此要求粗精合一。

图表1:数控机床的机械结构组成



资料来源：金属加工，方正证券研究所

要提升数控机床的性能，往往需要从以下几个方面提升，分别是**保证运动的精度和稳定性、提高结构件的刚度、提高机床的抗震性、改善机床的热变形，以及选择合理的数控机床总体布局。**

图表2:数控车床常见布局形式

	平床身布局	斜床身布局	立式床身布局
示例			
内部结构			
应用领域	经济型、普及型数控车床，以及数控化改造的车床	性能要求较高的中、小规格数控车床	大型数控车床或精密数控车床

资料来源：金属加工，方正证券研究所

图表3:数控铣床（加工中心）的布局形式

	示例	布局形式
卧式数控铣床（加工中心）		
立式数控铣床（加工中心）		

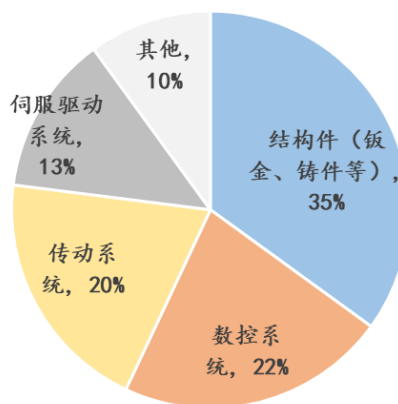
资料来源：金属加工，方正证券研究所

数控机床目前大多采用机、电、液、气一体化布局，全封闭或半封闭防护，机械结构大大简化，易于操作及实现自动化。

数控车床主要包括平床身布局、斜床身布局、立式床身布局几种形式。其中，平床身布局多用于经济型、普及型数控车床以及数控化改造的车床；斜床身布局车床，多用于性能要求较高的中、小规格数控车床；立式床身布局多用于大型或精密数控车床。数控镗铣床、加工中心的布局形式类似，主要有卧式、立式两种。

数控机床的核心装置也是提高数控机床精度和稳定性的重要因素。具体来看，机床主要包含结构件、数控系统、伺服驱动系统、传动系统、刀塔刀库、其他零部件等部分，成本中结构件（铸件、钣金件）、数控系统、伺服驱动系统、传动系统等占比较高。根据秦川机床公告，其中结构件占总成本的 35%左右，数控系统占总成本的 22%左右，传动系统占总成本的 20%左右，伺服驱动系统占总成本的 13%左右。

图表4: 机床成本构成



资料来源：秦川机床公告，方正证券研究所

此外，我们也对中国机床工具工业协会统计的 27 家企业机床功能部件的销售情况进行了分析。

功能部件方面，根据机床工具工业协会统计的 27 家机床功能部件企业销售情况，2020 年 27 家企业供给销售功能部件 22.8 亿元，其中，1) 工具/工件夹具等辅助装置占比约 15%，销售额约 3.5 亿元，其中工具夹具均价相对便宜，约为 206 元/台，但数量较大，因此在约占销售额比重 10%。工件夹具价格较贵，均价约 832 元/台。2) 数控机床功能部件约占 78.5%，销售额约 17.9 亿元，其中，直线导轨副、电主轴分别占比在 1/3 左右，滚珠丝杠副占比约 1/6，其余部件中，滚动导轨、数控刀架占比较高。

图表5:2020 年数控机床功能部件销售情况（协会统计 27 家公司）

产品名称	销售量（台）	销售额（亿元）	销售额占比	均价（元/台）
功能部件产品合计		22.8	100%	
工具/工件夹具等辅助装置	1281059	3.5	15%	273
工具夹具	1163496	2.4	10.5%	206
卡盘	293396	1.7	7.5%	579
自动定心卡盘	239210	1.3	5.7%	543
单动卡盘	50287	0.3	1.3%	597
动力卡盘	3899	0.1	0.4%	2565
夹头	451300	0.1	0.4%	22
钻夹头		0	0.0%	
弹簧夹头	451300	0.1	0.4%	22
车床刀架	112960	0.1	0.4%	89
铣头、插头、镗头	4632	0.03	0.1%	648
刀杆（刀柄）	40955	0.03	0.1%	73
回转工作台	1053	0.03	0.1%	2849
机械回转工作台	1053	0.03	0.1%	2849
其他工具夹具	259200	0.5	2.2%	193
工件夹具	108135	0.9	3.9%	832
顶尖	31550	0.02	0.1%	63
虎钳	71710	0.5	2.2%	697
多联组合虎钳	71710	0.5	2.2%	697
其他工件夹具	4875	0.3	1.3%	6154
特殊辅助装置	9428	0.2	0.9%	2121
分度头	4832	0.1	0.4%	2070
机械分度头	3634	0.05	0.2%	1376
数控分度头	1198	0.1	0.4%	8347
其他特殊辅助装置	4596	0.1	0.4%	2176
数控机床功能部件	1682584	17.9	78.5%	1064
电主轴	130290	5.1	22.4%	3914
机械主轴	5982	0.1	0.4%	1672
数控刀架	33070	1	4.4%	3024
普通数控刀架	33070	1	4.4%	3024
数控动力刀架	2351	0.3	1.3%	12761
普通数控动力刀架	2351	0.3	1.3%	12761
刀库及换刀机构	9	0.001	0.0%	11111
数控转台	1000	0.8	3.5%	80000
机械传动数控转台	1000	0.8	3.5%	80000
数控平旋盘	5	0.01	0.0%	200000
滚珠丝杠副	176179	3	13.2%	1703
滚动导轨副	151961	1.2	5.3%	790
直线导轨副	1136037	5.9	25.9%	519
其他数控机床功能部件	45700	0.3	1.3%	656
其他机床附件及辅助装置	29179	1.2	5.3%	4113

资料来源：中国机床工具工业年鉴，方正证券研究所

此外，数控系统中，数控装置、伺服驱动单元、电机销售额约各占 1/3 左右比重，从单价看，数控装置是数控系统的核心，均价最高，约为 3884 元/台。

协会统计 99 家机床工具与量具量仪企业销售额中，量具、量仪销售额分别为 12.5、2.2 亿元，其中量具均价较低，但数量大，量仪则均价较高，通用长度量仪、表面质量量仪、齿轮量仪均价在万元以上，而通用角度量仪、形状和位置误差量仪价格也在数千元。

图表6:2020 年数控系统产品销售情况 (6 家公司)

产品名称	销售量 (台)	销售额 (亿元)	销售额占比	均价 (元/台)
数控装置	139007	5.4	28.4%	3884.7
伺服驱动单元	336888	5.5	28.9%	1632.6
主轴伺服驱动单元	68734	1.4	7.4%	2036.8
进给伺服驱动单元	268154	4.1	21.6%	1529.0
电机	403803	6.6	34.7%	1634.5
主轴电机	59287	1.9	10.0%	3204.7
伺服电机	344516	4.7	24.7%	1364.2
数显装置	881186	1.5	7.9%	170.2
角位移传感器	881186	1.5	7.9%	170.2
圆光栅编码器	881186	1.5	7.9%	170.2
总计	1760884	19	100.0%	1079.0

资料来源:中国机床工具工业年鉴,方正证券研究所

图表7:2020 年量具量仪产品销售情况 (99 家企业)

产品名称	单位	销售量	销售金额 (亿元)	均价 (元/台)
量具	万件	2486	12.5	50
卡尺	万件	299	3.6	120
量块及量规	万件	193	1.7	88
测微螺杆类量具	万件	126	1.5	119
量表	万件	215	2	93
角度核平直度量具	万件	750	0.4	5
电子数显量具	万件	271	2.6	96
辅助测量器具	万件	44	0.1	23
其他量具	万件	588	0.6	10
量仪	台	76806	2.2	2864
通用长度量仪	台	834	0.3	35971
通用角度量仪	台	400	0.01	2500
形状和位置误差量仪	台	113	0.01	8850
表面质量量仪	台	16	0.01	62500
齿轮量仪	台	160	0.4	250000
气动、电动、主动量仪检验机	台	19728	0.4	2028
其他量仪	台	55555	1.1	1980

资料来源:中国机床工具工业年鉴,方正证券研究所

目前,我国在数控系统、主轴部件、滚珠丝杠、直线导轨、光栅检测装置等机床核心部件领域国产化水平仍然较低,在一定程度上阻碍了高端机床的发展,国产替代空间较大。从价格来看,数控系统数控装置、电主轴、位置检测装置均价较高,从国产化水平来看,数控系统、滚珠丝杠分别为 20%、25%,均处于较低水平,普通型、经济性机床用部件国内基本可以满足,但高端机床用功能部件基本依赖进口。从竞争格局看,数控系统、滚珠丝杠、导轨市场集中度较高,外资品牌占据主导地位,电主轴市场集中度相对较低,或成为国内厂商率先突破领域。

图表8:数控机床核心装置市场规模及国产化情况

主要装置	核心部件	主要参数	均价	市场规模	竞争格局	国产化率	2025 国产化目标	国际厂商	国内厂商
数控系统	数控装置、伺服驱动单元、电机、数显装置	功能完备性、性能及适用范围、可靠性	数控装置3885元/台; 伺服驱动单元1633元/台; 电机1635元/台; 数显装置170元/台	国内135亿元 (2022)	80%以上进口, 进口中进一半来自发那科	约20% (中高档30%, 高档10%)	标准型、智能型分别达到80%、30%	发那科、西门子、三菱	华中数控、广州数控、苏州新代、光洋
主传动系统	电动机、传动系统、主轴部件	加工精度、寿命等	电主轴3914元/台; 机械主轴1672元/台	电主轴全球94亿元 (2022); 国内48亿元 (2020)	国内电主轴市场CR3 ≈23%, 集中度相对较低	电主轴大部分内圆磨床国内可以配套, 高端内圆磨床、高速加工该中心电主轴仍需进口	主轴等中高档功能部件国产化率达到80%	瑞士 FISCHER 公司、瑞士 IBAG 公司、德国 Kessler公司、英国西尔、美国 Celera Motion	昊志机电、江苏星辰
伺服进给系统	伺服驱动器、驱动装置、机械传动机构、执行部件	精度保持性	滚珠丝杠副1703元/台	全球滚珠丝杠市场规模136亿元, 国内28亿元 (2022); 全球滚柱丝杠市场规模22亿元, 国内1.9亿元 (2023);	滚柱丝杠: 全球CR5 ≈46%, 欧洲、日本企业占据全球70%份额。国内上银、银泰占50%, NSK、THK15;	约25% (滚珠丝杠)		日本精工 (NSK)、日本THK、瑞典斯凯孚 (SKF)、博世力士乐、Kuroda、舍弗勒	南京工艺、博特精工、银泰科技、华珠机械、秦川机床 (汉江机床)、贝斯特、恒立液压、新剑传动
导轨	滚动导轨、滑动导轨、静压导轨	灵敏度、定位精度、摩擦阻力、抗震性、精度保持性	滚动导轨副790元/台, 直线导轨副519元/台	直线导轨: 全球147亿元, 国内38亿元 (2020);	全球直线导轨CR5超过78% (2020)			日本THK、台湾上银 (Hiwin)、日本 NSK、博世力士乐、舍弗勒	秦川机床、恒而达、贝斯特
位置检测装置	脉冲编码器、光栅、磁栅、激光干涉仪等	分辨率、测量精度、稳定性	通用长度量仪3.6万元/台; 通用角度量仪2500元/台, 形状和位置误差量仪8850元/台	全球光栅尺市场规模46亿元 (2021)	国内应用最多的是增量式光栅尺, 但绝对式光栅尺目前成熟产品很少, 大部分需要进口	头部企业在机床领域, 已经可以满足最高端数控技术需求, 正在逐步推广和替代		德国海德汉、西班牙发格 (FAGOR)、英国雷尼绍、日本三丰	奥普光电 (禹衡光学)

资料来源:QY Research, PERSISTENCE, 纽威数控招股书, 秦川机床公告, 中国机床工具工业年鉴, 方正证券研究所

总体上看,数控系统、电主轴、滚珠丝杠、导轨、位置检测装置等合计国内市场空间约有 250 亿元, 国产替代空间较大。

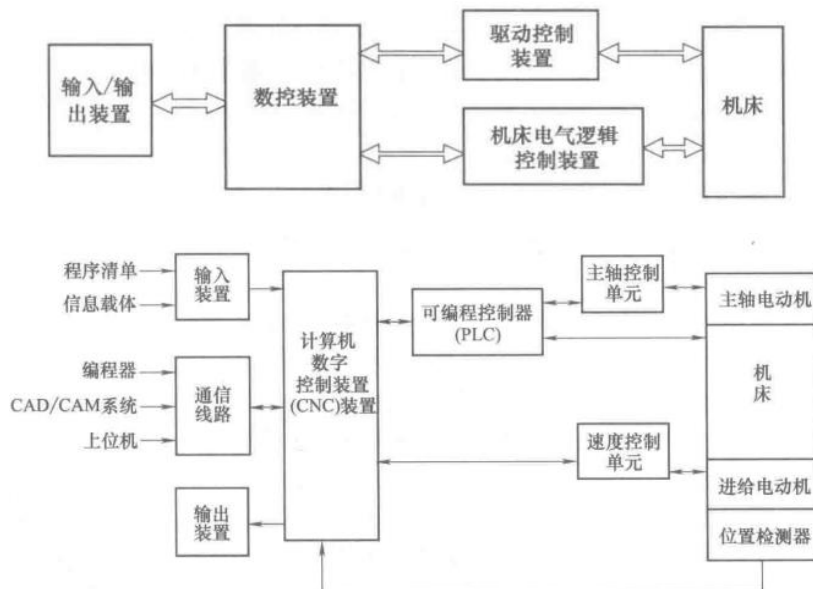
2 数控系统是机床“大脑”，实现加工过程自动化之关键

数控系统的主要任务是对刀具和工件之间的相对运动进行控制，集机械制造、计算机、微电子、现代控制及精密测量等多种技术为一体，使传统机械加工工艺，实现了加工过程自动化的质的变化。

2.1 数控系统的组成：数控装置为数控系统的核心，价值量占比最高

数控系统一般由输入/输出装置、数控装置、驱动控制装置、机床电气逻辑控制装置部分组成。其工作原理是，数控系统严格按照外部输入程序对工件自动加工，数控加工程序按照零件加工顺序记载机床加工所需的各种信息，例如零件加工的轨迹信息（几何形状、几何尺寸等）、工艺信息（如进给速度、主轴转速等）、开关命令（如换刀、冷却液开/关、工件装卸等），记录的信息通过输入装置，被数控装置接受。

图表9:数控系统组成的一般形式



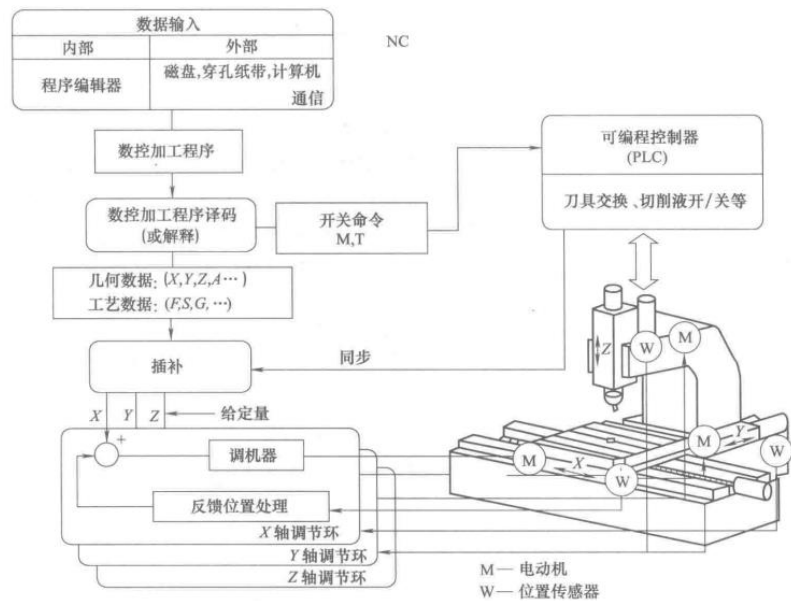
资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

数控装置是数控系统的核心，在数控系统中价值量占比也最高，其主要功能是识别和解释数控加工程序，并将该信息按照两类控制量分别输出：一类是连续控制量，送往驱动控制装置，一类是离散开关控制量，送往电气逻辑控制装置。驱动控制装置，包括进给伺服驱动装置、主轴驱动装置，前者由位置控制单元、速度控制单元、电动机、测量反馈单元等部分组成，根据指令正确驱动受控部件（机床移动部件、主轴头等）。主轴驱动装置由速度控制单元控制。电动机可以是各种步进电机、直流电机、交流电机。电气逻辑控制装置，接受数控装置发出的开关命令，主要完成机床主轴选速、启停、方向控制等功能，以及换刀、工件装夹、冷却、液压、气动、润滑系统控制等其他辅助功能。其形式可以是继电器控制线路，也可以是可编程控制器（PLC）形式。

对数控装置而言，以NC装置为核心的硬件数控系统已经日益减少，CNC（计算机数控系统）成为主流，由软件及硬件共同完成数控任务。在软件作用下，数控装置可以实现图形显示、系统诊断、各种复杂轨迹的算法控制、补偿算法实现、智能控制等硬件数控装置所不能完成的功能。此外，现代数控系统还采用PLC取代了传统的电气逻辑控制装置，直接实现对机床各种继电器控制逻辑，

PLC 可以位于数控装之外（即独立型 PLC），也可与数控装置合为一体，即内装型 PLC。

图表10: 数控系统组成的一般形式



资料来源:《数控机床结构(第2版)》, 魏杰, 方正证券研究所

按照数控系统的功能水平, 通常可以将数控机床划分为低、中、高档三类, 但该划分方式也是相对的, 不同时期划分标准会有所不同。其中, 高档、中档机床一般也成为全功能数控机床或标准型数控机床, 低档数控机床属于经济型数控机床, 由单板机、单片机和步进电机组成的数控系统, 功能相对简单, 价格低廉, 使用维修方便, 主要用于部分车床、线切割机床以及旧机床改造等。

图表11: 不同等级数控机床功能及指标

功能	低档	中档	高档
系统分辨率	10 μ m	1 μ m	0.1 μ m
进给速度	8-15m/min	15-24m/min	24-100m/min
伺服进给类型	开环及步进电机系统	半闭环及直、交流伺服	闭环及直、交流伺服
联动轴数	2-3轴	2-4轴	5轴或5轴以上
确信功能	无	RS232或DNC	RS232C、DNC、MAP
显示功能	数码管显示	CRT/图形/人机对话	CRT/三维图形/自诊断
内装PLC	无	有	强功能内装PLC
主CPU	8位CPU	16位、32位CPU	32位、64位CPU

资料来源:《数控机床结构(第2版)》, 魏杰, 方正证券研究所

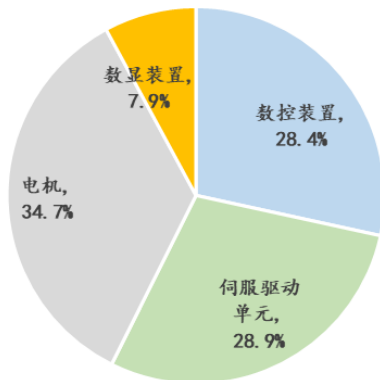
2.2 市场规模: 数控系统约占数控机床成本比重 22%, 国内市场规模 135 亿元

数控系统对于机床的精度、效率、可靠度及维护成本均有较大影响。从销售价格角度看, 我们根据浙海德曼招股书披露公司营业收入及数控系统采购金额, 大致测算其 2017-2019 年数控系统采购金额占机床收入比重约为 11.6-17.4%, 纽威数控的电气件（主要为数控系统）采购金额占机床收入比重约为 14.8-17.4%。平均来看, 数控系统约占机床价格比重约为 15.4%。如果从成本角度看, 据秦川机床公告, 数控系统约占机床总成本比重 22%。中高端机床中, 数控系统的成本占比更高。

根据华中数控 2022 年年报及 MIRDATA 数据，2022 年我国数控系统市场规模达 135 亿元，同比增长 7.14%，已连续 3 年保持在百亿市场规模。

根据中国机床工具工业年鉴统计的 6 家企业，2020 年数控系统相关产品中，数控装置、伺服驱动单元、电机、数显装置分别占比销售总额的 28%、29%、35%、8%。从均价来看，数控装置均价为 3884 元/台，价格最高，伺服驱动单元、电机均价在 1600 元/台左右，其中主轴伺服驱动单元、电机价格较高，数显装置均价在 170 元/台。

图表12:2020 年数控系统相关产品销售金额占比



资料来源：中国机床工具工业年鉴，方正证券研究所

图表13:2020 年协会统计数控系统相关装置销售情况

产品名称	销售量(台)	销售额(亿元)	销售额占比	均价(元/台)
数控装置	139007	5.4	28.4%	3884.7
伺服驱动单元	336888	5.5	28.9%	1632.6
主轴伺服驱动单元	68734	1.4	7.4%	2036.8
进给伺服驱动单元	268154	4.1	21.6%	1529.0
电机	403803	6.6	34.7%	1634.5
主轴电机	59287	1.9	10.0%	3204.7
伺服电机	344516	4.7	24.7%	1364.2
数显装置	881186	1.5	7.9%	170.2
角位移传感器	881186	1.5	7.9%	170.2
圆光栅编码器	881186	1.5	7.9%	170.2
总计	1760884	19	100.0%	1079.0

资料来源：中国机床工具工业年鉴，方正证券研究所

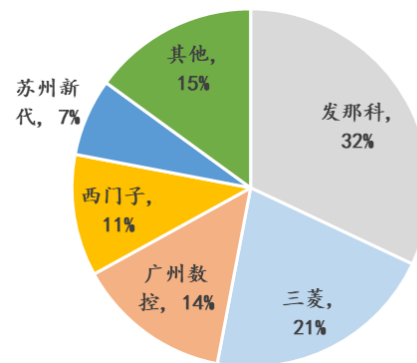
2.3 竞争格局：高端市场仍有外资品牌主导，国产替代空间广阔

总体上看，根据纽威数控 2021 年招股书数据，我国 80%以上的数控机床的数控系统仍然使用进口产品，其中日本发那科约占据 50%，数控系统国产化空间广阔。

分高中低端来看，根据秦川机床公告，国内低档数控系统市场基本被国内企业占据，国外品牌在我国高档和中档数控系统的市场占有率高达 70%，高档数控系统占有率在 90%以上，我国在中低档数控系统已经占有较大的市场份额，但是高端市场国产化率仍然较低。

分企业来看，根据华经产业研究院数据，2021Q1 发那科、三菱、西门子分别占比 32%、21%、11%，广州数控、苏州新代分别占比 14%、7%。

图表14:2021Q1 国内数控系统竞争格局



资料来源：华经产业研究院，方正证券研究所

具体来看，我国**经济型数控系统**由于顺应了大多数中国用户的实际使用水平和机床制造企业数控技术配套要求，加上价格优势得到了广大用户的认同，已形成了规模优势，国产数控系统企业已占领了我国经济型数控系统95%以上的市场份额，此类市场的典型参与企业包括**广州数控、北京凯恩帝**以及其他规模相对较小的民营企业等。

中档数控系统，主要与中档数控铣床、车削加工中心、立/卧式铣削中心配套。在国家一系列政策扶持下，以华中数控为代表的国产中高档数控系统企业，已经实现中端数控装置的批量生产，并且具备了全数字交流伺服驱动装置和主轴驱动装置等产品配套能力，用户反映良好。目前，国产中端数控系统功能和系统已经达到与国外产品同等水平，价格与服务方面有较大优势，市占率仍在提升。典型参与企业有**华中数控、广州数控、科德数控、北京凯恩帝等**，**外资的日德企业发那科、西门子等在中端市场也占据一定份额，竞争相对激烈**。

高端市场领域，是指可与多轴、多通道、高速、高精、柔性、复合加工以及大型、重型数控机床配套的数控系统，主要用于满足航空航天、汽车、船舶等重要关键零部件机械加工装备的配套需求。目前该市场主要由**日本发那科、德国西门子占据大部分市场份额，德国海德汉、日本三菱、马扎克等相对较少**。经过一系列自主研发和工程化、产业化攻关，国内高端数控系统已经取得了明显突破。

目前，在高端数控系统领域，国内外机床的差距主要体现在功能的完备性、现场总线技术的应用、高速高精多通道加工功能、可靠性时长等方面。

图表15: 国内外不同数控系统功能及性能对照

分类	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、纳米级别高速高精度曲线插补、智能化自适应机床参数配置、通过参数可满足几乎所有设备控制	30000h
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、综合智能误差补偿、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、纳米级别高速高精度曲线插补、通过参数数据可满足车、铣、加工中心及各类专用设备控制	15000h
中国台湾	新代、亿图、宝元	简易CAM、NURBS样条曲线插补、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	位置环闭环控制、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	10000h
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	位置环闭环控制、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；加工效率尚可	10000h
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；加工效率一般	3000h

资料来源：《中外高端数控系统差距分析及对策》，郭远东等，方正证券研究所

根据《中国制造 2025》重点领域技术路线图对机床关键部件国产化提出了明确的国产化目标：到 2020 年，数控系统标准型、智能型国内市场占有率分别达到 60%、10%，到 2025 年，数控系统标准型、智能型国内市场占有率分别达到 80%、30%。

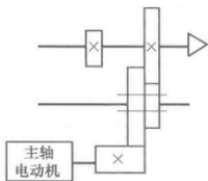
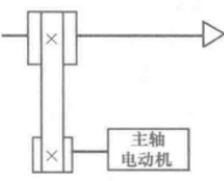
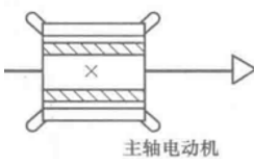
3 主传动系统：高效高精度加工催生电主轴技术，市场规模近 50 亿元

主传动系统是用来实现机床主运动的传动系统，具有一定的转速（速度）和一定的变速范围，以便采用不同材料的刀具，加工不同材料、不同尺寸、不同要求的工件，并能方便地实现运动的开停、变速、换向和制动等。

数控机床的主传动系统主要包括**电动机、传动系统、主轴部件**三部分，与普通铣床的主传动系统相比，在结构上反而相对简单，这是由于数控机床的变速功能全部或大部分由主轴电动机的无级调速来实现了，省去了复杂的齿轮变速机构，有些只有二级或三级齿轮变速机构，用来扩大电动机无级调速的范围。

数控机床的主传动系统，一般采用直流或交流主轴电动机，通过**带传动和主轴箱的变速齿轮带动主轴旋转**。主轴电动机输出功率随着转矩及转速变化，低速切削所需转矩大，高速切削消耗功率大。然而，电动机的有效转速范围不一定能满足主轴工作需要，因此主轴箱也会设置几档变速，有些小型或者调速范围不是很大的数控铣床，也采用直接由电动机直接带动主轴或带传动的方式使主轴旋转。

图表16:三种主传动系统变速方式对比

变速方式	二级以上齿轮变速系统	一级带传动变速方式	调速电动机直接驱动方式
图片			
原理	多采用 齿轮变速结构 ，滑移齿轮的移位大都采用 液压驱动 ，因数控机床使用可无级变速交流、直流电动机，所以经齿轮变速后，可以实现分段无级变速，调速范围增加。	多采用 带（同步齿形带）传动装置	电动机转子即为机床主轴的电动机主轴，简称 电主轴
优点	能够满足各种切削运动的转矩输出，且具有大范围调节速度的能力。	结构简单，安装调试方便，且在一定条件下能满足转速与转矩的输出要求，可以避免齿轮传动时引起的振动与噪声。	结构紧凑、占用空间少，转换频率高，具有 高转速、高精度、高稳定性
缺点	结构复杂，需要增加润滑及温度控制装置，成本较高，制造和维修也比较困难。	调速范围受电动机调速范围的约束	转速的变化及转矩的输出和电动机输出特性完全一致，电动机发热对主轴精度有一定影响
应用领域	多用于大中型数控机床	低转矩特性要求的主轴	中高端数控机床中应用广泛

资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

3.1 主轴的演进：高效率、高精度、高可靠性加工催生电主轴技术的出现

主轴的作用是带动刀（磨）具（钻、铣、磨）或工件（车削）按给定速度旋转，并传递切削加工所需的功率和扭矩，使刀（磨）具在工件上实现材料去除。主轴技术水平的高低和质量的优劣直接决定和影响机床的品质、性能、工作效率及运行稳定性。

数控机床主轴的发展过程中出现了非调速的交流电动机经主轴箱传动的**机械式主轴**、电动机与主轴一体化的**电主轴**、**高速电主轴**、**高刚性大扭矩高速电主轴**和**智能式主轴**等发展历程。机械主轴采用齿轮传动，其本身刚性好，在低速大扭矩、大功率等性能上有优势，主要用于重切削。随着终端市场对数控机床的生产效率、加工精度、可靠性等要求越来越高，传统机械主轴由于其固有的局

限性，在部分领域正逐渐淡出中高端数控机床的舞台，广泛被具有高转速、高精度、高稳定性的电主轴所替代。同时，电主轴在低速段的输出扭矩也在不断提高，使其能同时满足低速重切削和高速精加工的要求。

图表17: 主轴的演进过程



资料来源:《数控机床发展历程与未来趋势》，刘强，方正证券研究所

电主轴是在数控机床领域出现的将机床主轴与主轴电机融为一体的新技术。机床主轴实际上是一套组件，包括电主轴本身及其附件（如电主轴、高频变频装置、油雾润滑器、冷却装置、内置编码器、换刀装置等）。而将主轴电机与主轴“合二为一”的传动结构形式，使主轴部件从传动系统和整体结构中相对独立出来，因此可做成“主轴单元”，俗称“电主轴” (Electric Spindle, Motor Spindle)。电主轴的特点是高转速、高精度、低噪音、内圈带锁口的结构更适合喷雾润滑。电主轴省去了皮带、齿轮或联轴器的传动环节，是数控机床传动系统的重大变革。

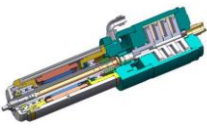
图表18: 电主轴在机床中的位置



资料来源: 昊志机电招股书，方正证券研究所

按照采用的轴承类型划分，电主轴可以分为滚动轴承、气浮轴承、液体滑动轴承、磁悬浮轴承等支承的电主轴，其中，前三种是目前应用最广泛的轴承类型。

图表19:电主轴的分类（按采用轴承类型划分）

类型	滚动轴承电主轴	气浮轴承电主轴	液体滑动电主轴	磁悬浮轴承电主轴
图片				
优点	- 摩擦阻力小、功耗小、精度高、刚度好，成本相对较低，便于系列化和标准化 - 承载能力强，可适用较大载荷	- 以“气膜”作为支撑，结构紧凑、体积较小 - 回转精度和极限转速高于滚动轴承电主轴和液体滑动轴承电主轴 - 摩擦损耗较小，噪音低，热稳定性好 - 污染小、寿命长	- 以液态“油膜”作为支撑，具有显著的“误差均化效应”和阻尼减振性 - 回转精度高、刚度好、磨损小、寿命长	- 极限转速高、无接触、无摩擦、无损耗、寿命长 - 转动时能够自动平衡，没有振动 - 不需润滑和密封 - 能实现实时诊断和在线监控
缺点	- 转速相对较低，噪音大 - 对轴承转速和寿命要求较高	- 承载能力较低 - 工艺要求高，维护和使用费用较高	由于存在液体摩擦，驱动功率损失比滚动轴承大。	- 机械结构复杂，成本极高 - 热源多，对冷却系统要求高 - 要求工作环境较为苛刻，使用和推广难度大
技术难点	提高精度寿命和可靠性	解决气锤振动及高速时涡动问题	控制高速时主轴的温升和热变形	提高动刚度和阻尼减振性能，在实现高速的同时 保证高加工精度
应用领域	应用最为广泛，在数控雕铣机、PCB成型机、加工中心、数控铣床、车床、内圆磨床等领域应用普遍。	主要应用于高精度、高转速、轻载荷加工领域，如超精密数控机床、PCB 钻孔机、小孔磨削、高光加工等。	主要应用于重载大功率加工及精密、超精密机床。	主要应用于超高速加工领域。

资料来源：昊志机电招股书、昊志机电官网、江淮机电网，方正证券研究所

按照电机的类型，电主轴又可以分为异步型电主轴、同步型电主轴。其中，异步型电主轴的优点在于，当前高速的电主轴，几乎都是内置的异步交流感应电机，其结构相对简单，制造工艺成熟，安装更方便，而且可以实现恒转矩、恒功率的调节；但缺点是效率偏低，输出功率偏小；永磁同步型电主轴，优点是转矩密度高，转动惯量小，动态响应特性更好，噪音低、体积小、使用寿命长，而且启动时电流无冲击，负载变化时电流变化小，功率密度和效率也更高。但永磁同步电机使用的稀土材料成本也相对较高。

图表20:按应用领域划分电主轴（以昊志机电为例）

应用领域	加工中心	数控车床	磨床	钻削	雕铣	特殊
图片						
转速 (rpm)	6000-24000	4500-8000	30000-100000	24000-30000	30000-40000	
功率 (kw)	11-75	2.5-22	1.2-20	3.7-8.5	2.5-8.5	
额定扭矩 (Nm)	30.7-551	3.7-190	0.11-6.4	3-8.1	0.6-8.1	
主要特点	- 高速、高精度、低速大扭矩特性； - 具备自动松拉刀功能； - 具备准速、准停、零速锁定功能。	- 具备高速、高精度、低速大扭矩特性； - 前后主轴端能安装相应的动力卡盘或旋转油缸，并实现自动松开与拉紧工件功能 - 具备定速性能以适应螺纹车削。	- 以恒转矩电主轴为主； - 具备高速、高精度特性； - 具备高密封性。	- 轴向刚性高； - 具备高速、高精度特性； - 印刷电路板钻孔用电主轴常用空气动静压轴承（即气浮轴承）	- 具备高速、高精度特性； - 换刀便捷； - 木工机械用电主轴一般使用空气冷却，具备高密封性。	拉锯、切割、离心机、试验机用电主轴及其它用途电主轴等
具体应用	数控铣床及加工中心	数控车床	表面磨削	钻孔专用机床，包括PCB钻孔机	复杂曲面加工的数控雕铣床，包括木工机械	

资料来源：昊志机电招股书，昊志机电官网，方正证券研究所

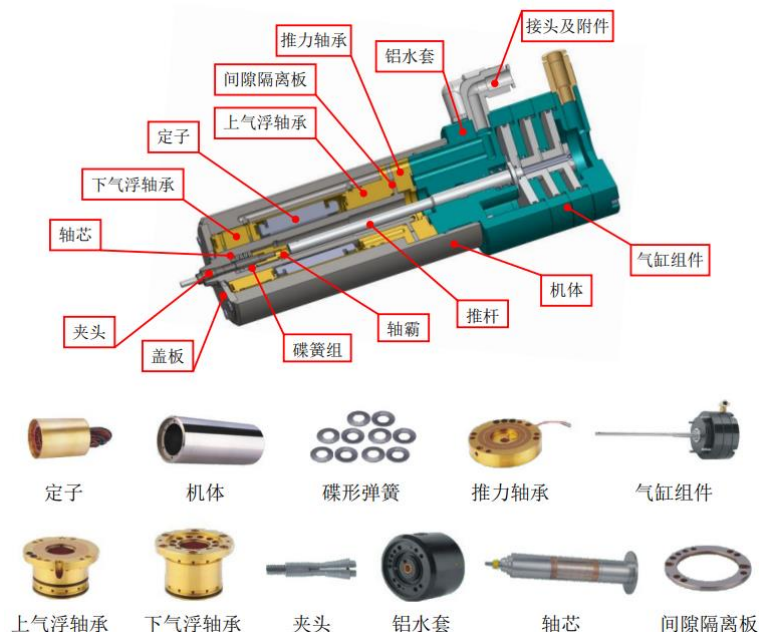
按应用机床类型划分，电主轴包括用于加工中心、数控车床、磨床、钻削、雕铣、特殊用电主轴六类。总体上看，车床、加工中心主轴均要求低速、大扭矩，额定功率也相对较高，磨床主轴对转速要求较高，相比之下，钻削、雕铣的扭矩、功率均相对较小，对转速要求相对较高，这些均与机床应用的工艺环节息息相关。

在国外，电主轴最早用于内圆磨床。20 世纪 80 年代，随着数控机床和高速切削技术的发展，电主轴技术开始逐渐应用于数控铣床、加工中心等高档数控机床。国内对电主轴技术的研究始于 20 世纪 60 年代，主要用于零件内表面磨削，这种电主轴的功率小、刚度低；到 80 年代，研制出系列高刚度、高速电主轴，广泛应用于内圆磨床和机械零件制造等领域；90 年代以后由磨削电主轴转向铣削电主轴，不仅能加工各种形体复杂的模具，而且开发了用于木工机械用的风冷式高速铣用电主轴，推动了高速电主轴在铣削加工中的应用。

3.2 电主轴由数十种精密零件组成，材料、设计及装配工艺是决定精度之关键

电主轴是高端机电一体化产品，由轴芯、轴承、定子、机体、夹头、传感器、气缸等数十种精密零部件组装而成，技术含量高、结构复杂，其转速、动态性能、加工精度和使用寿命等取决于各零配件的材料选用、结构设计、制造精度和装配工艺，以及高速轴承技术、润滑技术、冷却技术、动平衡技术、精密制造与装配技术和检测技术的综合运用。

图表21: 电主轴内部结构及其核心零部件



资料来源：昊志机电招股书，方正证券研究所

电主轴的具体结构和构成因不同应用领域对性能要求的差异有所不同，主要部件包括轴芯组件、电机、支撑部件、冷却系统、气缸组件、拉刀组件、气封组件等。

图表22:电主轴核心零部件及其作用

应用领域	轴芯组件	高速电机	支撑部件	冷却系统	气缸组件	拉刀组件	气封组件
结构	包括轴芯、转子等零配件，为高速旋转件，是电主轴结构部分的核心部件之一	包括定子、转子两部分，是电主轴驱动系统核心部件之一	包括精密轴承、轴承座、内/外环压盖、预紧碟形弹簧等零配件，是电主轴旋转支撑系统核心部件之一	由机体、冷却通路、铝水套等零配件组成的冷却循环通道，是电主轴冷却散热部分的核心部件之一	由活塞、缸体、推杆、气缸顶盖、复位弹簧等零配件组成，是电主轴拉刀系统核心部件之一，其结构多为单作用或双作用形式	由夹头、拉杆、夹头碟簧、调节垫片等零配件组成	包括中心出气密封和主轴前端防护气密封两个部分，由防护盖、轴承座、机体、铝水套、拉杆、气缸等相关零件组成，是电主轴防尘密封核心部件之一；
主要功能	关系到电主轴偏摆、振动、电机性能等重要性能指标；工艺上对形状、尺寸精度、位置公差精度要求极高。	作用主要为驱动轴芯（转子）实现高速旋转，关系到电主轴的最高转速、功率、扭矩、电流等性能指标	作用主要为支撑轴芯（转子）实现高速旋转；轴承极限转速关系电主轴最高转速，轴承精度等级关系到电主轴静刚度和轴芯回转精度	大部分热量由循环冷却通道带走，保证主轴各项性能指标稳定；针对各种不同类型高速电机，冷却通道设计需要大量测试和实验数据作为依据。	其工作寿命和可靠性关系到电主轴拉刀系统的稳定性。	工作寿命和可靠性关系到电主轴拉刀力大小、偏摆、振动等性能指标	中心出气密封的作用是防止更换刀具时刀具冷却液、金属粉颗粒进入轴芯内部，从而影响主轴偏摆、振动、夹持力等性能；主轴前端防护气密封采用环形气密封和机械密封组合形式，防止刀具冷却液、金属粉颗粒进入主轴内部，影响主轴前端轴承旋转精度和使用寿命。

资料来源：昊志机电招股书，方正证券研究所

3.3 电主轴市场规模近 50 亿元，GR3 约 23%，高端磨床及加工中心主轴仍以进口为主

根据 2021 年中国机床工具工业年鉴，协会统计的 27 家生产功能部件的企业中，电主轴销售总量约为 130290 台，销售额约为 5.1 亿元，即对应电主轴均价约 3914 元/台，而机械主轴销量约为 5982 台，销售额 0.1 亿元，对应机械主轴均价约 1672 元/台。电主轴均价要高于机械主轴，销售数量及金额也要远高于机械主轴。

随着终端市场对数控机床的生产效率、加工精度、可靠性等要求越来越高，传统机械主轴由于其固有的局限性，在部分领域正逐渐淡出中高端数控机床的舞台，广泛被具有高转速、高精度、高稳定性的电主轴所替代。目前，在美国、德国、日本、瑞士、意大利等工业发达国家，电主轴已占据了主轴市场的主要份额，而在国内，机械主轴因技术成熟、结构简单、制造和维修难度小、价格低廉且后期维护成本低，以及在低速大扭矩、大功率等性能上的优势，仍在国内机床行业中占据一定地位。

市场规模方面，根据 QY Research 数据，2022 年全球电主轴市场规模约为 94 亿元，预计到 2029 年达到 141 亿元。根据观研天下数据，估计 2020 年我国电主轴市场规模约为 48.12 亿元。

竞争格局方面，全球主轴行业领先企业主要集中在欧洲、日本、中国台湾等地，其中欧洲的领先电主轴制造商凭借强大的研发实力、优异的产品性能、悠久的历史 and 较好的业绩口碑，在电主轴的不同应用领域均占据了重要市场份额，代表了各自领域的世界最高水平，其中比较著名的有瑞士 FISCHER 公司、瑞士 IBAG 公司、德国 Kessler 公司、英国西风等。日本、中国台湾的主轴技术水平相对落后于欧洲，但产业发展成熟，性价比较好，在我国大陆等主轴技术相对落后的地区占有较大的市场份额。

根据 QY Research 数据，目前，国内市场电主轴的核心生产商有昊志机电、Celera Motion、Fisher、普森精密主轴、江苏星辰等，前三大厂商市占率约为 23%。但我国目前主轴的国产化率仍然不高，《中国制造 2025》重点领域技术路

线图对机床关键部件国产化提出了明确的国产化目标：到 2020 年，主轴等中高档功能部件国内市场占有率达到 50%，到 2025 年国内市场占有率达到 80%。

图表23: 国内外电主轴主要参与厂商

类型	简介
英国西风	Westwind Air Bearings., Ltd., 该公司总部位于英国普尔, 是世界上最大的气浮轴承电主轴制造商, 具有数十年的设计和制造经验, 产品广泛用于 PCB 行业、汽车涂层、半导体制造器材等行业。该公司在苏州和深圳分别设立了生产基地和服务中心。
英国ABL	Air Bearing Co., Ltd., 该公司创立于 1993 年, 是全球领先的 PCB 钻孔机气浮轴承电主轴制造商, 其 PCB 钻孔机电主轴的最高转速高达 35 万转/分。
德国Kessler	Franz Kessler GmbH, 该公司成立于 1923 年, 专业生产机床用的电机和电主轴, 其产品已广泛应用于 PCB 钻孔机、数控雕铣机、加工中心等, 其在欧洲、北美、亚洲(含中国)建立了电主轴维修服务中心。
瑞士Fischer Precise集团	FISCHER PRECISE Group AG, 成立于 1939 年, 总部位于瑞士, 是全球规模最大的精密主轴制造商之一。2006 年收购原 PCB 成型机电主轴行业知名企业德国 Precise, 现已拥有瑞士 FISCHER、德国 Precise 及 Fortuna 等品牌。该公司在上海设有飞速主轴技术(上海)有限公司, 是其技术服务中心和主轴维修中心。
瑞士MCT	Mechatronic SA, 该公司成立于 2000 年, 总部位于瑞士, 专注于 PCB 钻孔机电主轴的研发和生产, 是全球优秀的 PCB 钻孔机电主轴制造商, 在我国深圳设立了服务中心。
昊志机电	国内电主轴龙头企业, 产品覆盖PCB钻孔机、成型机、数控车床、走芯车床、加工中心、内外圆磨床电主轴等多个领域, 具有数十个系列上百种产品。
江苏星辰	国内电主轴行业标准起草单位之一, 主要生产 GDS、SDK、SDS 等系列的高速电主轴, 用于数控钻铣设备、精密雕刻、雕铣、木工机械、电脑锣、精密磨床、车铣复合加工中心等

资料来源：昊志机电招股书，方正证券研究所

分不同机床来看，1) 磨床是国内电主轴最早应用的领域，长期以来应用于轴承行业，随着加工效率和加工精度提高，开始在精密机械制造、汽车零部件等行业的轴类、盘套类零件的生产中应用。目前，国产电主轴已经基本可以配套国内大部分内圆磨床，但加工精度、寿命等于德国、瑞士主轴仍存在较大差距，相对高端的内圆磨床仍需要大量采购进口电主轴。2) 车床是国内使用量最大、覆盖面最广的机床，但大多采用机械主轴，仅有少量高端产品采用电主轴，价格也较为昂贵。3) 加工中心，欧美国家使用电主轴的比例已经超过机械主轴，国内加工中心主轴系统多采用皮带式或直联式等机械传动方式，国内渗透率还相对较低，但在持续提升。从供给来看，国内加工中心电主轴技术水平相对落后，在精度、功率、寿命、可靠性及稳定性上与国外存在较大差距，因此国内高速加工中心配套电主轴多为进口。

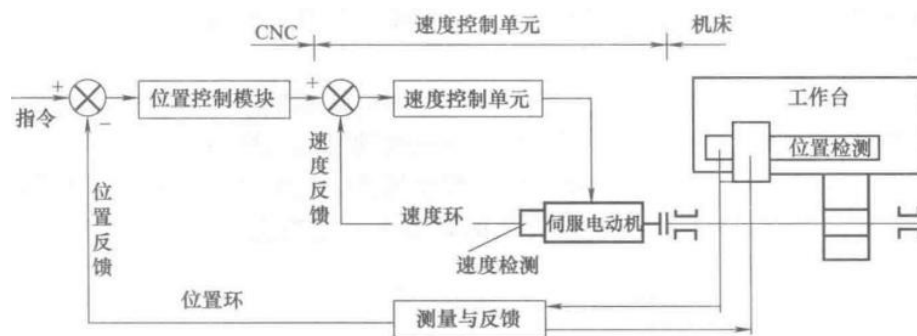
4 伺服进给系统：连接数控装置与机床本体的关键环节

进给伺服系统是数控装置与机床本体的传动环节，其作用是接收数控装置发出的进给速度和位移指令信号，由伺服驱动电路作转换和放大后，经伺服驱动装置（直流、交流伺服电动机、功率步进电机、电液脉冲马达等）和机械传动机构，驱动机床的工作台、主轴头架等执行部件，实现工作进给和快速运动。伺服进给系统可以精确地控制执行部件的速度和位置，以及多个执行部件按一定规律运动所合成的运动轨迹。

4.1 伺服进给系统的特点

伺服进给系统由伺服驱动器、伺服驱动装置、机械传动机构、执行部件组成。例如，一个双闭环系统中，内环为速度环，使用测速发电机、脉冲编码器等作为速度反馈的检测装置，速度环主要由速度调节器、电流调节器、功率驱动放大器等组成；外环为位置环，是由 CNC 装置中的位置控制模块、速度控制单元、位置检测及反馈控制等部分组成，位置控制主要对机床运动坐标进行控制，轴控制是要求最高的位置控制。

图表24: 伺服进给系统的构成



资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

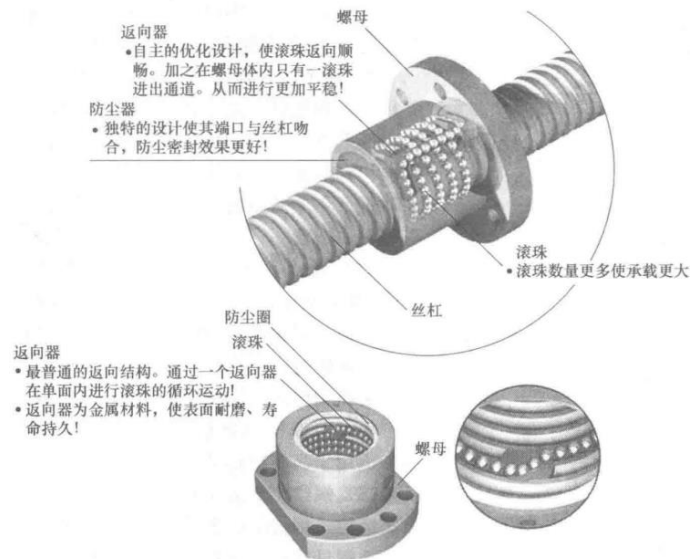
伺服进给系统的几个关键指标主要包括：1) **精度要求**：低档型数控系统，驱动控制精度一般在 0.01mm，而高性能数控系统精度为 1 微米，甚至为 0.1 微米；2) **响应速度**：为保证轮廓切削形状精度和低表面粗糙度，还要能够快速跟踪指令信号并响应；3) **调速范围**：由于数控机床中加工用刀具、被加工工件材质、零件加工要求不同，因此要保证在任何情况下都能得到最佳切削条件，要求进给驱动系统有足够宽的调速范围；4) **低速、大转矩**：经常在低速下进行重切削的机床，驱动系统要有足够大的转矩输出。5) **运动部件惯量小**，运动部件惯量对伺服机构的启动、制动特性都有影响，尤其是处于高速运转的零部件，因此要尽量减小其质量、直径等；6) **摩擦阻力小**：要提高进给系统响应速度和运动精度，必须减小运动件间的摩擦阻力和动、静摩擦力之差，普遍采用滚珠丝杠螺母副、静压丝杠螺母副、滚动导轨、静压导轨、塑料导轨等，各运动部件还要考虑有适当的阻尼，以保证系统的稳定性。

4.2 旋转电机+滚珠丝杠：机床中最常用的传动系统方案

滚珠丝杠螺母副是回转运动与直线运动相互转换的一种新型传动装置，在数控机床中有广泛应用。其结构特点是在具有螺旋槽的丝杠螺母间装有滚珠，其作用是使丝杠与螺母间的运动成为滚动，减少摩擦。滚珠丝杠的工作原理是，丝杠与螺母上都有圆弧形螺旋槽，二者对合起来形成螺旋滚道，滚道内装有滚珠，滚珠在滚道内滚动，将丝杠的旋转运动转换为螺母的直线运动。

珠，当丝杠与螺母相对运动时，滚珠沿螺旋槽向前移动，滚珠在丝杠上滚过数圈后通过回程引导装置，逐个滚回丝杠与螺母之间，形成一个闭合回路。

图表25: 滚珠丝杠螺母副工作原理



资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

4.2.1 丝杠的分类

丝杠是用来完成进给运动的一个重要原件，是一种精度很高的零件，它能精确地确定工作台坐标位置，将旋转运动转换成直线运动，而且还要传递一定的动力，所以在精度、强度及耐磨性等方面都有很高的要求。所以，丝杠的加工从毛坯到成品的每道工序都要周密考虑，以提高其加工精度。

机床丝杠按其摩擦特性可分为三类，即滑动丝杠、滚动丝杠、静压丝杠。目前比较常用的是滚动丝杠中的滚柱丝杠。

图表26: 丝杠按摩擦特性分类

指标	滑动丝杠	滚珠丝杠	滚柱丝杠	静压丝杠
图片				
牙形	多为梯形	哥德式牙型珠槽，能产生大约45°的钢球接触角		牙形与标准梯形相同，但牙形高于同规格标准螺纹1.5-2倍
优点	结构简单、制造方便、价格便宜，在机床应用较广泛。	传动精度高、效率高、摩擦力小	高承载，耐冲击，体积小，高速度，噪音低，高精度，长寿命	静压油腔位于螺母上。静压油膜位于螺母和精密丝杠间，螺母和丝杠本身不接触，因此无磨损，最佳的减震性消除了滚珠丝杠的震动和噪声。且可调整为任意方向的轴向载荷、最大速度、刚度水平。
缺点	滑动摩擦大，发热多，不适合高速运行，传动效率、精度也较低	对环境要求高、价格昂贵	加工精度要求很高，目前我国在该领域普及率低	传动装置复杂，调整比较麻烦，需要一套液压系统，工艺复杂，成本较高，应用受限
机械效率	25-50%	90-95%		
应用领域	普通机床。只用于传力。在长期连续使用的场合，没有较高的定位要求。	数控机床，配合步进电机和伺服电机，定位工作台等需要精确定位传动的场合；	飞机起落架等需要高精度传动的场景	常被用于精密机床、数控机床

资料来源：Thomson, 深圳汉工精密，苏州卓昱，斯凯孚，海浮乐静压，方正证券研究所

螺旋滚道型面是指通过滚珠中心做螺旋线的法向截面与丝杠、螺母螺纹滚道面的交线。内滚道的截面形状有直线形、单圆弧形、双圆弧形等几种。目前国内应用最广泛的有单圆弧形滚道、双圆弧形滚道。按滚道结构形式划分，又可以分为

直线形、单圆弧、双圆弧内滚道三类。其中，双圆弧滚道是目前滚柱丝杠中使用最多的截面形状。

图表27:滚珠丝杠的滚道形式

	直线滚道	单圆弧滚道	双圆弧滚道
图片			
优点	具有制造简单，摩擦力小的特点	滚珠与内滚道的接触面积大，因而承载能力大	兼有前述二种形式的优点，即接触刚性好，摩擦小，有较大的承受能力，顶紧或承载后接触角 $\phi=45^\circ$ 。基本不变，传动精度也较高，因此是目前滚珠丝杠中用得最多的截面形状
缺点	由于接触面小(理论上为点接触)，接触刚性差因此仅用于轻载和精度要求不高的地方	摩擦情况不好，尤其当内滚道形状制造有误差，丝杠有弯曲或震摆时，所造成的径向位移会引起很大的轴向位移，使螺距误差增加	制造工艺较复杂

资料来源：捷众智能装备，方正证券研究所

滚珠丝杠的循环方式按滚珠在循环反向过程中与丝杠表面脱离与否，可以分为内循环、外循环。1) **内循环**是一种滚珠在循环过程中始终不与丝杠表面脱离的循环方式，螺母内反向器上回珠槽使滚珠沿滚道滚动一圈后，翻越过丝杠螺纹滚道压顶，重新回到初始滚道。优点是滚珠循环的回路短、流畅性好、效率高、螺母径向尺寸也较小，缺点是反向器加工困难、装配调整不方便。**内循环**方式多适用于高速、高灵敏度、高刚度的精密给进系统。2) **外循环**是指滚珠在循环反向时离开丝杠滚道、在螺母体内或体外的循环方式，其优点是工艺简单，螺母径向尺寸大，容易制造，缺点是滚珠循环回路长，流畅性差，效率低；挡珠器刚性差，易磨损。根据 QY Research 数据，内循环滚珠丝杠在滚珠丝杠市场中约占 63% 的市场份额。

图表28:滚柱丝杠的循环方式

	内循环	外循环		
	回球器式	螺旋槽式	插管式	端盖式
结构原理图				
循环机构				
特点	是最紧凑的丝母，钢球通过回球器改变进行方向，返回丝杠轴的原先位置	钢板循环式，是如同弯管式的，将钢球导入后沿钢板上的沟进行循环，钢板回球式与回球器式相比，多用于小型滚珠丝杠	循环弯管式也称“外循环式”是最普通的循环方式，钢球从丝杠轴上，沿弯管的牙嘴部导入，通过弯管返回，形成无限循环	适用于高速进给的丝母，钢球从端盖部导入，通过丝母上的贯通孔，返回起始位置

资料来源：《金属加工》，方正证券研究所

4.2.2 滚珠丝杠预紧力的实施

预紧力是指机构或构件在受到工作载荷之前，为了增强连续的可靠性和紧密性，以防止受到工作载荷后连接件间出现间隙或相对滑移而预先施加的相互作用力。滚动功能部件预紧力作用是为了减小或消除滚珠丝杠和滚柱直线导轨副因制造和装配误差产生的间隙，导致滚动体和滚道接触产生弹性形变，避免出现滚动体在滚到内的窜动。

图表29:滚柱丝杠预紧方式

预紧方式	单螺母滚珠丝杠		双螺母滚珠丝杠		
	导程变位法	滚珠直径增大法	垫片式	齿差式	螺纹式
图片					
原理	在加工丝母的中央螺纹沟槽时，通过改变导程，偏离出预紧量大小进行预紧。	通过增大滚珠直径，使滚珠分别与滚道两侧面接触，导致滚珠与圆弧滚道面间预先产生一定变形，增加相互间作用压力，消除轴向间隙。	通过选用不同厚度垫片增大滚珠与滚道面间相对距离，使螺母和丝杠分别受道相互作用的轴向力，保证两螺母间滚珠以垫片为中线，分别与滚道两侧面接触，产生弹性形变。	在两个螺母的法兰上切出一个齿数差为1的齿轮，分别与两端相应的内齿圈啮合，用螺钉固定在螺母座上。通过转动其中一个螺母，改变两个螺母的相互位置，以调整间隙并施加预紧力。	利用一个螺母上的外螺纹，通过圆螺母调整两个螺母的相对轴向位置实现预紧。
优点	形式结构最为简单，尺寸最紧凑。	结构十分简单，对装配工艺要求较低，操作方便，螺母体积小，出现磨损后更换滚珠可再次预紧。	结构简单，刚性高，预紧可靠性好，过度磨损后产生的间隙理论上可以重新预紧。	调整精度高，可实现0.002mm以下的精密微调。	调整方便，使用中可随时调整。
缺点		滚珠丝杠精度不高，滚珠与滚道磨损较快。	准确快速选取合适的垫片厚度较难，垫片本身加工质量会影响滚珠丝杠的性能。	结构复杂，尺寸较大，加工工艺和装配性能差。	不能微量微调螺母，轴向尺寸长。
适用场合	预紧力要求不大且不需要经常间隙的场合。	不适用于高载荷环境。	高刚度、重载荷传动，也是目前国内应用最广泛的预紧结构。	用于要求获得准确预紧力的精密定位系统。	要求得到准确预紧力但要求随时可调节预紧力的场合。

资料来源：《滚动功能部件预紧力与刚性的关联性研究》，汪远远，三晖机械科技，机械资料网，方正证券研究所

对于不同结构形式滚柱丝杠，采用的预紧方式也不同。一般预紧的对象主要为螺母，若为单螺母滚柱丝杠，预紧方式主要包括导程变位法、滚珠直径增大法，若为双螺母滚珠丝杠副，预紧方式主要为垫片式、齿差式、螺纹式。

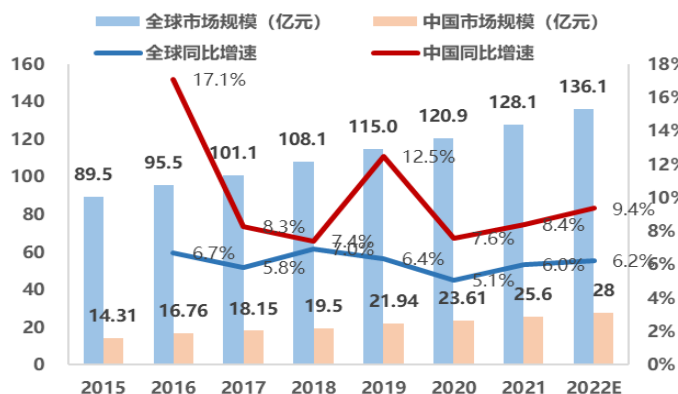
4.2.1 滚珠 & 滚柱丝杠的市场空间及竞争格局

1. 滚珠丝杠 (Ball Screw)

根据华经产业研究院数据，2021 年全球滚珠丝杠市场规模约为 17.5 亿美元，同比增长 6.0%，年均复合增速达到 6.2%。预计 2022 年全球市场规模达到 18.59 亿美元（约合人民币 136 亿元）。从国内市场规模来看，中国作为滚珠丝杠产品重要的消费市场之一，国内市场规模占全球规模总量的 20% 左右，2021 年我国滚珠丝杠市场规模为 25 亿元，预计 2022 年市场规模达 28 亿元。

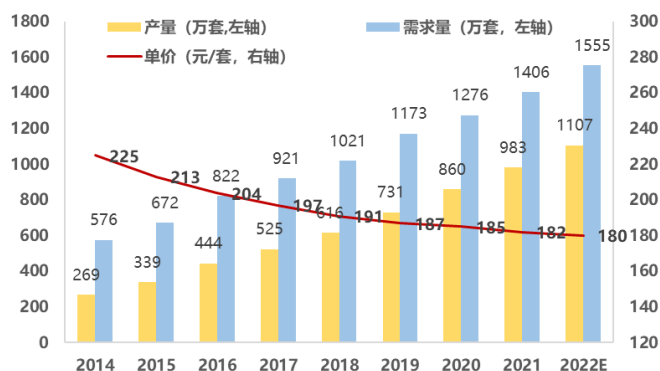
近几年来随着我国滚珠丝杠副行业市场竞争加剧，国内企业向中高端市场渗透，外资品牌也抢占了部分经济型产品市场份额，行业市场竞争有所加剧，丝杠总体价格成下降趋势。据华经产业研究院数据，国内滚珠丝杠价格从 2014 年 225 元/套的均价下降至 2021 年的 181 元/套。不过，滚珠丝杠被广泛应用于各种工业设备和精密仪器，而机床行业用滚柱丝杠精度要求更高，价格也相对更高。根据中国机床工具工业年鉴数据，2020 年统计的 27 家生产功能部件企业，滚珠丝杠副销量约为 176179 台，销售金额为 3 亿元，对应机床用滚珠丝杠副均价约 1703 元/台。

图表30:全球及中国滚珠丝杠市场规模（亿元）



资料来源：华经产业研究院，方正证券研究所

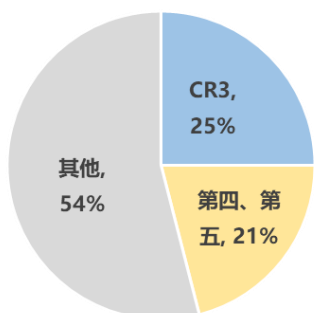
图表31:中国滚珠丝杠产量需求量及单价变化



资料来源：华经产业研究院，方正证券研究所

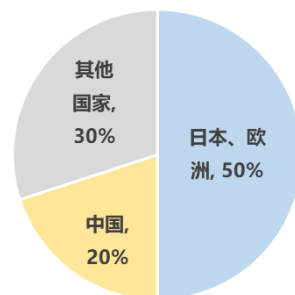
目前全球主要的滚珠丝杠厂商有 NSK、THK、SKF 等，CR5 市占率达到约 46%，其中主要来自欧洲和日本，日本和欧洲滚珠丝杠企业占据了全球约 70% 的市场份额。尤其是高端滚珠丝杠市场，国际市场主要由欧美、日韩企业所占据，包括日本精工（NSK）、日本 THK、瑞典斯凯孚（SKF）、博世力士乐、Kuroda、舍弗勒集团等。

图表32:供给端：滚珠丝杠前三家品牌市占率 25%



资料来源：QY Research，方正证券研究所

图表33:需求端：全球各国家、地区滚珠丝杠需求占比



资料来源：QY Research，华经产业研究院，方正证券研究所

国内市场方面，根据秦川机床公告，目前中国台湾上银科技、银泰市场占有率接近 50%，此外 NSK、THK 等日本企业市场占有率约为 15%，其他大陆企业的市场占有率约为 25%。根据中国机床协会的统计，高档数控机床中的高端滚动功能部件产业的国产化率仅为 5%；

近年来，随着科技技术进步，我国滚珠丝杠行业内也涌现出一批具有一定竞争优势的优秀企业，例如南京工艺装备、山东博特精工、山东华珠机械、秦川机床（陕西汉江机床）、贝斯特、恒立液压等企业。

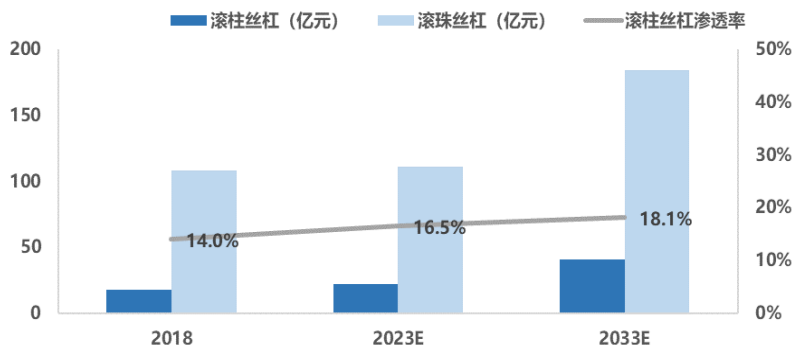
2. 滚柱丝杠（Roller Screw Pair）

根据 PERSISTENCE 数据，2023 年全球滚柱丝杠市场规模约为 2.997 亿美元（合人民币约为 22 亿元），预计到 2033 年市场规模将达到 5.573 亿美元（合人民币

约 39 亿元), CAGR 约为 6.4%。国内方面, 2023 年中国滚柱丝杠市场规模约为 0.26 亿美元 (约合人民币 1.9 亿元)。

总体上看, 目前滚柱丝杠在滚动丝杠中的渗透率仍然较低。滚柱丝杠最早由瑞典人 Carl Bruno Strandgren 于 1942 年发明, 至今未广泛应用主要是由于其结构复杂、加工难度大和成本较高。

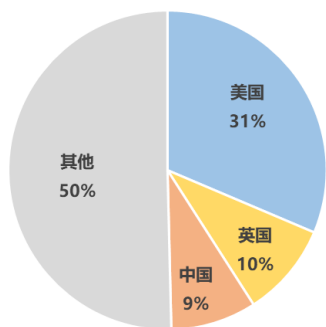
图表34: 全球滚柱丝杠市场规模及其在滚动丝杠中渗透率



资料来源: PERSISTENCE, 华经产业研究院, 方正证券研究所

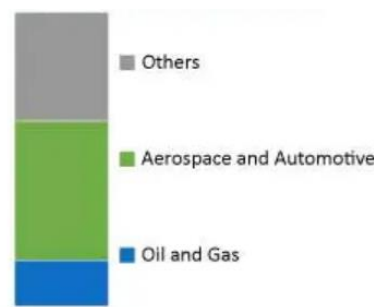
从各国市场规模来看, 全球滚柱丝杠应用市场主要集中于美国、德国、英国、中国。从下游应用来看, 目前, 滚柱丝杠主要应用在民用领域, 如精密机床、食品包装、特种机械、测试仿真等。但随着飞行器和武器装备全电化发展以及石油、化工、机床等需要大推力、高精度、高频响、高效率、长寿命的机械装置作为机电作动系统的执行机构, 取代易污染、维护成本高的传统液压作动系统, 加之内、外螺纹加工工艺的提高, 以及制造设备和相关材料技术的发展, 近年来, 滚柱丝杠被广泛关注。

图表35: 2023 年全球各国滚柱丝杠市场规模占比



资料来源: PERSISTENCE, 方正证券研究所

图表36: 2021 年全球滚柱丝杠终端用户占比



资料来源: linkwire, PERSISTENCE, 方正证券研究所

从全球来看, 滚动丝杠中滚珠丝杠、滚柱丝杠、行星滚柱丝杠的头部厂商主要来自欧美及日本, 各类产品的头部企业有一定重合性, 但市占率排名略有不同。

图表37:全球滚动丝杠各产品头部企业

产品	国际厂商
行星滚柱	NOOK Industries、Moog、Ewellix、Rollvis、Tolomatic等
滚柱丝杠	SKF、Creative Motion Control、Rollvis、Kugel Motion、Nook Industries等
滚珠丝杠	NSK、THK、SKF、Hiwin、TBI MOTION等

资料来源: QY Research, 方正证券研究所

图表38:滚珠丝杠国内外厂商布局情况

企业名称	国家及地区	布局情况
日本精工 (NSK)	日本	成立于1916年, 是日本国内第一家设计生产轴承的厂商。几十年来, NSK开发出无数新型轴承, 满足世界各地用户的需求, 并为产业发展和技术进步做出了极大的贡献。
日本THK	日本	致力于开发、生产并且销售LM滚动导轨、滚珠花键、滚珠丝杠、电动智能组合单元等在内的机械原件。LM滚动导轨系公司主要产品, 是全球率先将直线滚动部件付诸于实际应用的产品。
斯凯孚 (SKF)	瑞典	来自瑞典哥德堡, 是全球旋转相关领域解决方案的领先企业, 致力于帮助各行各业实现可靠运转。产品包括包括轴承、密封、润滑管理。
博世力士乐 (Bosch Rexroth)	德国	公司与原博世自动化技术部于2001年合并成为博世力士乐公司, 属集团全资拥有, 但独立进行业务运作, 提供工业液压、电子传动与控制、线性传动与组装技术、气动、液压传动服务以及行走机械液压方面的传动与控制解决方案。
台湾上银 HIWIN	中国台湾	全球知名的直线导轨品牌, 其旗下产品包括: 直线导轨、滚珠丝杠、直线模组、直线电机、线性致动器、位置测量系统、DD马达等。产品广泛应用于数控机床, 木工机械, 搬运、输送机械, 精密测量仪器, 工业自动化机械, 电子半导体机械等所有需求精密直线传动及定位的领域。
南京工艺	中国	公司在滚动功能部件领域积累了70年丰富经验, 构筑了完备的设备保障体系, 建成了高精度滚珠丝杠副、大型滚珠丝杠副、滚动导轨副生产线。公司产品为高速、高精中高档数控机床大批量配套, 推进了国产滚动功能部件的提档升级和替代进口。
新剑传动	中国	具备滚珠丝杠、行星滚柱丝杠产品大批量生产能力, 年产能超过350万套。成功应用于汽车底盘 EMB制动系统和人形机器人线形驱动。公司行星滚柱丝杠批量化生产线为国内首条, 2022年3月批量化生产, 在汽车行业首先进行了应用。
贝斯特 (宇华精机)	中国	以工装夹具、智能装备、工业自动化集成等现有业务为切入点, 叠加直线滚动功能部件。全资子公司宇华精机落实“高端装备核心滚动功能部件研发及产业化项目”, 产品主要包括高精度滚珠丝杠副、高精度滚动导轨副等, 面向高端机床、半导体、自动化三大产业。项目将引进生产及检测等进口设备约300台套 (其中, 研发设备70台), 配套软件及系统、公辅设施等30余套。根据中国机床工具工业协会信息, 贝斯特生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等首台套已实现成功下线, 并已将部分产品送样至战略客户处进行验证。
秦川机床 (汉江机床)	中国	汉江机床是国产丝杠的龙头骨干企业, 牵头制定了丝杠的国家标准, 具备加工丝杠所需关键装备螺纹磨床的研发制造能力。产品广泛应用于航空航天、高铁及高档数控机床等领域, 参与多项国家重大项目。重型滚珠丝杠副已应用于军工行业, 微型精密滚珠丝杠副已成为军工行业多家企业指定产品; 滚珠导轨、地铁导轨、智能直线导轨副等产品实现进口替代。
长盛轴承	中国	公司滚珠丝杠产品主要应用于商用车变速箱, 乘用车制动、转向及驻车系统。目前公司已经取得商用车主机厂定点, 其他乘用车客户正在开发过程中。2022年, 公司发布定增预案, 拟建设包括3万套滚珠丝杠等在内的项目。
恒立液压	中国	2021年, 公司非公开发行募资50亿元, 其中15亿元用于线性驱动器项目投资建设。该项目达产后将形成年产104,000根标准滚珠丝杠电动缸、4,500根重载滚珠丝杠电动缸、750根行星滚柱丝杠电动缸、100,000米标准滚珠丝杠和100,000米重载滚珠丝杠的生产能力。

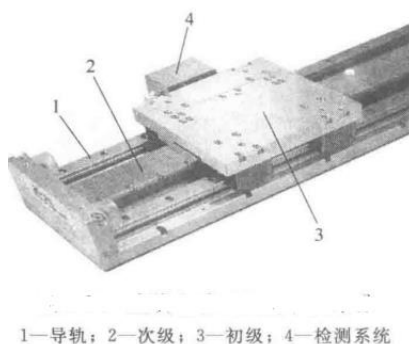
资料来源: 南京工艺官网, 界面新闻, 澎湃新闻, 汉江机床官网, 机床协会, 公司年报及半年报、公开投资者调研纪要及问答平台, 方正证券研究所

4.3 直线进给系统方案, 诞生于超高速加工背景

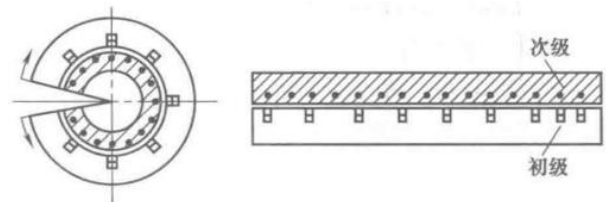
常规的机床进给系统中，一般采用“旋转电机+滚珠丝杠”的传动系统，而近年来，随着超高速加工技术的发展，滚柱丝杠对有些高速和高加速度要求无法满足。直线电机，是指可以直线产生直线运动的电动机，可作为进给驱动系统，大功率电子器件、新型交流变频调速技术、微型计算机数控技术的发展为直线电机的使用提供了条件。

直线电机的工作原理，与旋转电机相比并无本质区别，可以看作是旋转电机沿圆周方向拉平展开的产物。其工作原理是，直线电机的初级，对应于旋转电机的定子，次级对应旋转电机的转子。当多相交变电流通入多相对称绕组时，直线电机的初级和次级气隙间，就会产生行波磁场，使二者之间相对移动。此外，二者之间也存在垂直力，可以是吸引力，也可以是排斥力。

图表39: 直线电机进给系统外观



图表40: 旋转电机展平为直线电机的过程



资料来源:《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

资料来源:《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

直线电机又可以分为直流、步进、交流直线电机三大类。目前在机床中，主要使用交流直线电机。

在结构上，直线电机有“短次级”、“短初级”两种形式。为了减少发热量和降低成本，高速机床用直线电机一般采用“短初级”形式。在励磁方式上，交流直线电机又可以分为永磁（同步）、感应（异步）两种形式。其中，永磁式的次级是一块块铺设的永久磁钢，初级为含铁芯的三相绕组；感应式电机的次级为不通电的绕组替代永磁铁，且每个绕组每一匝均是短路的，而初级与永磁式相同。相比较而言，永磁式在单位面积推力、效率、可控性等方面更好，但成本较高，工艺复杂，安装使用也较复杂。感应式不通电时无磁性，便于安装使用和维护，近年来其性能不断改进，已逐渐接近永磁式的水平。

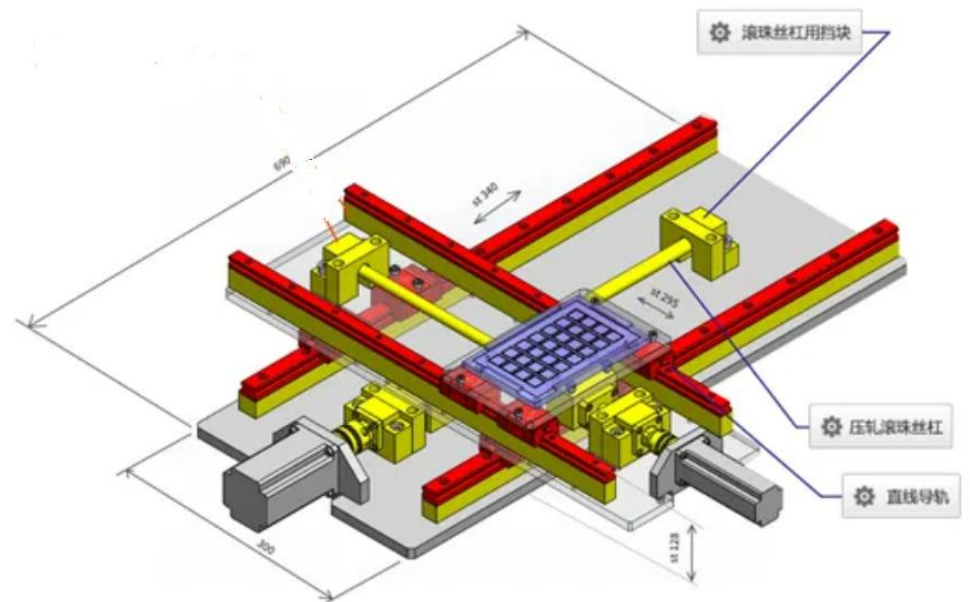
5 导轨：对运动部件起导向和支承作用，对机床加工精度有重要影响

机床上的直线运动部件都是沿着它的床身、立柱、横梁等支承件上的导轨进行运动的，因此，导轨的作用，可以概括地说是**对运动部件起导向和支承作用**，导轨的制造精度及精度保持性对机床加工精度有着重要影响。

导轨按接触面的摩擦性质，可以分为滚动导轨、滑动导轨、静压导轨三种。其中，数控机床最常用的是**滚动导轨、滑动导轨**。

滚动直线导轨副 Rolling Linear Guide (RLG)：常作为引导和支撑部件，配合滚珠丝杠副完成工作要求。一般情况下，一整套运行机构由 2 套滚动直线导轨 + 1 根滚珠丝杠副组成，驱动运动部件实现精确移动。

图表41:滚珠丝杠与直线导轨的关系



资料来源：Solidworks 非标机械自动化，方正证券研究所

5.1 滚动导轨：可分为滚珠、滚柱型导轨，灵敏度及定位精度高

滚动直线导轨由滑轨、滑块、滚珠、滚珠保持器、回珠槽等组装而成，主要原理是通过回珠槽、滚珠保持器等结构使钢球列作循环运动，从而实现滑块在滑轨上的低摩擦直线运动。滚动体被平均分割为 4 等份，插入滑块与导轨滚道面间。滑块在导轨上往复运动，带动四条滚道内滚动体的循环滚动。

相比滑动导轨，滚动导轨的优点是**灵敏度高**，动静摩擦因数相差甚微，因此运动平稳，低速运动时不易出现爬行现象。而且**定位精度高**，摩擦阻力小，磨损小，精度保持性和寿命更长。但缺点是抗振性较差，对防护要求较高。滚动导轨特别适用于机床的**工作部件要求移动均匀、运动灵敏度和定位精度高的场合**。这也是滚动导轨在数控机床上得到广泛应用的原因。

按滚动体形式，滚动直线导轨又可以分为滚珠型和滚柱型；

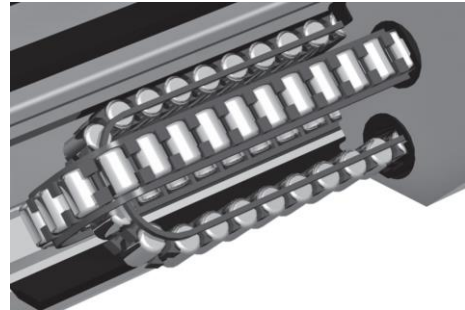
1) 滚珠型：滚珠结构直线导轨副中，滚动体与滚道接触理想形式为点接触，接触面积小，承载能力小。但由于摩擦系数小，所以速度也更快。

2) **滚柱型**：滚柱结构直线导轨副中，滚动体与滚道接触理想形式为线接触，接触面积相比点接触大，承载能力更大。摩擦系数略大，速度比较慢些

图表42:滚珠直线导轨副



图表43:滚柱直线导轨副



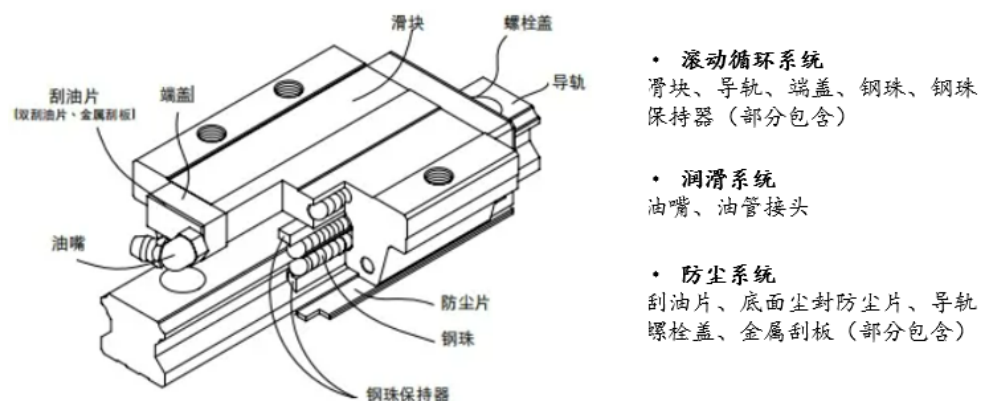
资料来源：宁波锐思隆自动化科技有限公司，方正证券研究所

资料来源：无锡达维动力科技有限公司，方正证券研究所

导轨是决定整个导轨组件的导向精度和运动性能的主要元件，用螺钉紧固在机床固定部件上（如床身、立柱等），其安装底面、定位侧面和滚道经过精密平面成形磨削，保证滚道精确的几何形状，以及滚道与安装定位面之间的精确的尺寸精度。

滑块一般用螺钉紧固在机床运动部件上（如工作台，主轴箱等）。滑块上的**返向器**采用高强度工程塑料制成，并引导滚动体返向形成连续的循环运动。**密封端盖**和**密封底片**是防尘的必要部件。导轨副的**润滑**通过**油杯**注入**润滑油脂**来进行。

图表44:滚动直线导轨内部结构



资料来源：《滚动直线导轨副关键性能指标分析与评价》，柯楠，方正证券研究所

滚动导轨又可以分为**预加负载**、**不预加负载**两类，**预加负载**可以提高导轨刚度，但制造工艺比较复杂，成本较高，**适用于**颠覆力矩较大和垂直方向的**导轨**，数控机床中常采用**预加负载**导轨。而**无预加负载**滚动导轨常用于数控铣床，或加工中心的机械手、刀库等传送机构。

滚动导轨的寿命计算与滚动轴承类似，即在一定载荷下走一定距离，以90%的支承不发生点蚀为依据，这个载荷称为**额定动载荷**，行走的距离称为**额定寿命**。滚动导轨的预期寿命，除了与**额定动载荷**和**导轨的实际工作载荷**有关，还与**导轨的硬度**、**滑块部分的工作温度**、**每根导轨的滑块数目**相关。

5.2 滑动导轨：结构简单、刚度好，是机床中使用最广泛的导轨形式之一

滑动导轨具有结构简单、制造方便、刚度好、抗震性高等优点，是机床上使用最广泛的导轨形式。但普通的铸铁-铸铁，铸铁-淬火钢导轨，存在的缺点是静摩擦因数大，而且动摩擦因数随速度变化而变化，摩擦损失大，低速（1-60mm/min）时易出现爬行现象，降低运动部件的定位精度。

通过选用合适的导轨材料和相应的热处理及加工方法，可以提高滑动导轨的耐磨性并改善其摩擦特性。例如，采用优质铸铁、合金耐磨铸铁或镶淬火钢导轨，进行导轨表面滚轧强化、表面淬硬、涂铬、涂钼工艺等。

镶粘塑料滑动导轨是通过在滑动导轨轨面上镶粘一层由多种成分复合的塑料导轨软带，来达到改善导轨性能的目的。这种导轨不仅可以满足机床对导轨的低摩擦、耐磨、无爬行、高刚度要求，而且成本较低，工艺简单，在数控机床中得到了广泛应用。塑料导轨多与铸铁导轨或淬硬刚导轨相匹配使用。

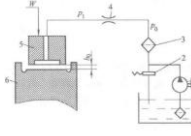
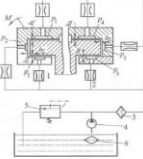
一个滚动直线导轨副，是由导轨、滑块、钢球、反相器、密封端盖、挡板等部分组成。当导轨与滑块相对运动时，钢球沿着导轨上的滚道滚动，在滑块端部，钢球通过反相器反向重新返回滚道，往复运动。反相器两端装有防尘密封端盖，可有效防止灰尘、屑末进入滑块内部。

5.3 静压导轨：不产生磨损，精度保持性好，显著降低驱动功率

静压导轨是将具有一定压力的油液，经节流器输送到导轨面上的油腔中，形成承载油膜，将相互接触的导轨面隔开，实现液体摩擦。这在数控机床中已经得到日益广泛的应用。静压导轨的滑动面之间开有油腔，将一定量的油通过节流输入油腔，形成压力油膜，浮起运动部件，使导轨工作表面处于纯液体摩擦，不产生磨损，精度保持性好，并大大降低驱动功率，低速无爬行，承载能力大、刚度好。此外，油液还有吸振作用，抗震性好。但其缺点是结构复杂，要配有供油系统，油的清洁度要求高。

静压导轨的横截面形状有V形、矩形两种。采用V形便于导向和回油，采用矩形便于做成闭式静压导轨，油腔的结构对于导轨性能影响很大。

图表45: 开式与闭式静压导轨工作原理

分类	图片	工作原理
开式静压导轨	 开式静压导轨工作原理 1—供油泵；2—节流阀；3—过滤器；4—节流器；5—运动导轨；6—底座导轨	来自液压泵的压力油，压力为 P_0 ，经过节流器压力降低到 P_1 ，进入导轨各油腔中，借油腔内的压力将运动导轨浮起，使导轨面间以一厚度为 h_0 的油膜隔开，油腔中的油不断穿过各油腔的封油间隙流回油箱，压力将为0。当运动导轨受到外部载荷 W 时，使运动导轨向下产生一个位移，导轨间隙由 h_0 降为 h ，使油腔回油阻力更大，油腔中压力也相应增大为 P_0 ，以平衡负载，使导轨在纯液体摩擦下工作。
闭式静压导轨	 闭式静压导轨工作原理 1—导轨；2—节流器；3、4—过滤器；5—节流器；6—节流器	闭式静压导轨各方向导轨面上都开有油腔，因此闭式导轨具有承受各方面载荷和颤震力矩的能力，当油腔受到颤震力矩时，油腔部分间隙变小，其余间隙变大，由于节流器作用，使得间隙变小处压力升高，间隙变大处压力下降，从而形成与颤震力矩成反向的力矩，使工作台恢复平衡。

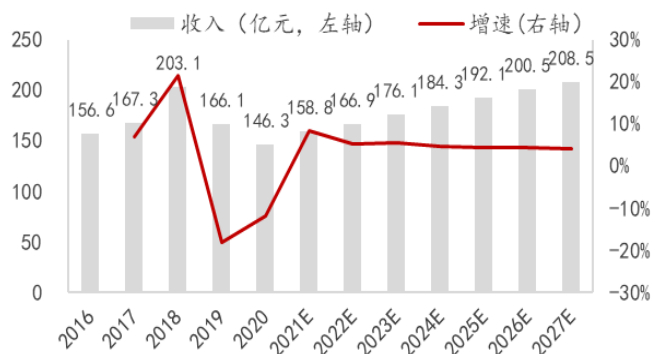
资料来源：《数控机床结构（第2版）》，魏杰，方正证券研究所

5.4 竞争格局：全球滚动直线导轨市场规模近 150 亿元，CR5 达 78%

根据 QYResearch 数据，2020 年，全球直线导轨市场收入达 20.1 亿美元（约合 146 亿元人民币），预计 2027 年将达到 28.6 亿美元（约合 209 亿元人民币），2021-2027CAGR 约为 4.65%。中国直线导轨市场生产消费规模 2020 年约为 5.16 亿美元（约合 38 亿元人民币），预计到 2027 年中国的直线导轨市场规模将会达到 8.2 亿美元（约合 60 亿元人民币），约占全球 28.67%。

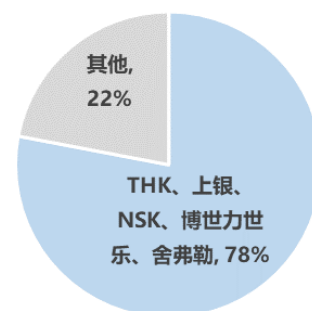
从供应格局来看，根据 QY Research 数据，全球主要的生产企业有日本 THK、中国台湾上银（Hiwin）、日本 NSK、博世力士乐（Bosch Rexroth）和舍弗勒（Schaeffler）等公司，2020 年 CR5 超过 78%。

图表46:全球直线导轨销售收入及增速变化



资料来源：QY Research, 方正证券研究所

图表47:全球直线导轨市占率情况



资料来源：QY Research, 方正证券研究所

过去由于我国的工业基础较为薄弱，装备制造业研发生产的工艺技术水平低，精密滚动直线导轨副在我国装备制造业的应用历史仅仅 20 年，其应用领域仅仅局限在有限的数控机床，以及对产品较为熟悉的工程技术人员设计的专用机械产品上。但近年来，我国直线导轨发展迅速，有国外的大企业与中国公司合资在中国也建立了生产基地。

价格方面，2020 年中国大陆地区生产完成的直线导轨大概 8966 千套，按照前文提到 38 亿元市场规模计算，对应单套直线导轨均价约为 424 元/套。另据 QY Research 数据，2021 年全球 3 种直线导轨均价约为 40.27 美元/套，约合人民币 294 元/套。

然而，由于机床的精度要求更高，其直线导轨均价也要高于普通直线导轨。根据中国机床工具工业协会统计的 27 家机床功能部件销售企业滚动导轨、直线导轨的销售量、销售额，可以大致计算出，2020 年滚动导轨副、直线导轨副的均价分别为 790、519 元/台，高于普通导轨均价。另据秦川机床公告，公司滚动直线导轨售价约为 1050 元/台。

图表48:2020 年滚珠丝杠及滚动导轨、直线导轨均价

产品	销售量 (台)	销售额 (亿元)	均价 (元/台)
滚珠丝杠副	176179	3	1702.8
滚动导轨副	151961	1.2	789.7
直线导轨副	1136037	5.9	519.3

资料来源：中国机床工具工业年鉴, 方正证券研究所

6 位置检测装置：决定机床加工精度之关键，光栅为主要测量装置

数控系统的位置控制，是将插补计算的理论位置与实际反馈位置相比较，用其差值控制进给电动机。而实际反馈位置的采集，是由一些位置检测装置来完成的。

对于不同类型的数控机床，根据工作环境和检测要求不同，需要采用不同的检测方式。中高档数控机床一般采用半闭环控制系统，而全功能数控机床则是采用闭环控制系统。

对于采用半闭环控制的数控机床，其环路内部不包括机械传动环节，位置检测装置一般采用旋转变压器，或高分辨率的脉冲编码器，装在进给电动机或丝杠的端头。旋转变压器（或脉冲编码器）每旋转一定角度，都会严格地对应工作台移动一定的距离，测量电动机或丝杠的角位移，也就间接测量了工作台的直线位移。

对于采用闭环控制系统的数控机床，应该直接测量工作台的直线位移，可采用感应同步器、光栅、磁栅等测量装置。当由工作台直接带动感应同步器的滑动尺移动时，与装在机床身上的定尺配合，测量出工作台的实际位移值。因此，数控机床的加工精度，主要由检测系统的精度决定。

分辨率是指位置检测系统能够测量的最小位移，它不仅取决于检测元件本身，也取决于测量线路。数控机床的位置检测系统需要具有高可靠性和高抗干扰性（抗电磁干扰、温湿度变化影响小）、满足精度和速度要求、使用维护方便等。

根据不同机床在不同工作环境和要求下，检测的方式主要分为数字式、模拟式，以及增量式与绝对式。

图表49:位置检测装置分类

类型	模拟式		数字式	
	增量式	绝对式	增量式	绝对式
直线型	直线型感应同步器 磁尺	三速直线型感应同步器 绝对值式磁尺	计量光栅 激光干涉仪	多通道投射光栅
回转型	旋转变压器 圆形感应同步器 圆形磁尺	多极旋转变压器 三速圆型感应同步器	增量式光电脉冲编码器 圆光栅	绝对式光电脉冲编码器

资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

数字式是指将被测量单位量化为数字形式，特点是量化后，单位转换成脉冲个数，便于显示处理，而且测量精度取决于测量单位，与量程基本无关，检测装置也比较简单，脉冲信号抗干扰能力强。模拟式是指将被测量单位用连续变量表示，可以直接对被测量单位进行检测，无需量化。但在大量程内作精确的模拟式检测对技术要求较高，因此，数控机床中模拟式检测主要用于小量程测量，可以实现高精度测量。

增量式测量只能测量位移增量，移动一个测量单位即发出一个信号，优点是装置简单，可做到高精度，任何一个中点均可作为测量起点，缺点是一旦计数有无，此后结果全错，发生故障后无法找到正确位置。绝对式测量被测量的任一点都以一个固定的零点为基准，每个被测量点都有一个测量值，避免了增量式的缺陷，但其结构较复杂。

6.1 旋转变压器

旋转变压器是一种常用的转角检测元件，由于结构简单，工作可靠，对环境要求较低、信号输出幅度大、抗干扰能力强，因此被广泛用于半闭环控制的数控机床上。

旋转变压器的结构可以分为有刷、无刷式。其结构与绕线式异步电动机相似，其定子、转子铁芯由高导磁的铁镍软磁合金或硅钢薄板冲程的带槽芯片叠成，槽中嵌有线圈。定子线圈为变压器的原边，转子线圈为变压器的副边，励磁电压接到原边。

旋转变压器的工作原理是，在结构上保证定子、转子之间气隙内磁通分布符合正弦规律，当励磁电压加到定子绕组时，通过电磁耦合，转子绕组产生感应电动势。

6.2 脉冲编码器

脉冲编码器是一种旋转式脉冲发生器，将机械转角变成电脉冲，是一种常用的角位移传感器。脉冲编码器一般可以分为光电式、接触式、电磁感应式3种。其中，光电式脉冲编码器按每转发出的脉冲数量，又可以分为多种型号。

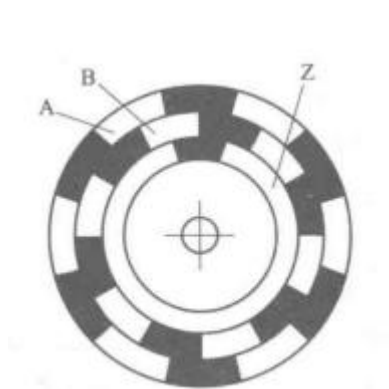
图表50: 光电式与高分辨率脉冲编码器

光电式脉冲编码器		高分辨率脉冲编码器	
脉冲编码器每转产生脉冲数	每转脉冲移动量 (mm)	脉冲编码器每转产生脉冲数	每转脉冲移动量 (mm)
2000	2, 3, 4, 6, 8	20000	2, 3, 4, 6, 8
2500	5, 10	25000	5, 10
3000	3, 6, 12	30000	3, 6, 12

资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

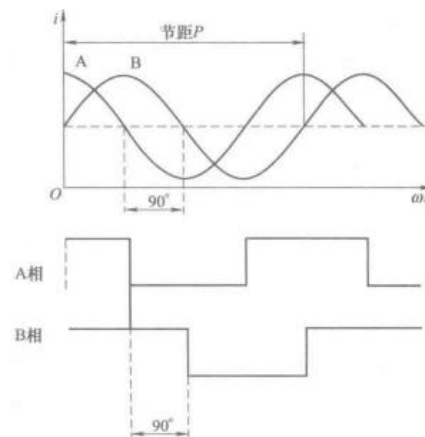
增量式光电脉冲编码器，最初的结构就是一种光电盘，在一个圆盘圆周上分成相等的透明与不透明部分，圆盘与工作轴一起旋转。此外，还有一个固定不动的扇形薄片与圆盘平行放置，并制作有辩向窄缝，当光线通过两个做相对运动的透光与不透光部分时，光电元件按接收到的光通量也时大时小连续变化。通过计量脉冲的数目核频率可以测算出工作轴的转角和速度。高精度脉冲编码器则要求提高光电盘圆周的等分窄缝密度，实际上变成了圆光栅线纹。

图表51:光电脉冲编码器光栅



资料来源:《数控机床结构(第2版)》,魏杰,方正证券研究所

图表52:脉冲编码器的输出波形



资料来源:《数控机床结构(第2版)》,魏杰,方正证券研究所

脉冲编码器的原理,即光纤透过圆光栅和指示光栅的线纹,在光电元件上形成明暗交替变化的条纹,产生两组近似于正弦波的电流信号A、B,两者相位差 90° ,经放大、整形电路变成方波,可以得到A相、B相,二者前后关系代表正向位移、反向位移。一般情况下,在测量直线距离时,可以将光电编码器装在伺服电动机轴上,由于伺服电动机与滚柱丝杠相连,因此当电机转动时,滚珠丝杠会带动工作台或刀具移动。这时,光电编码器的转角对应直线移动部件的移动量。编码器可以通过十字接头与伺服电机连接,其法兰盘固定在电动机端面上,罩上防护罩,即构成完整的驱动部件。

6.3 光栅位置检测装置

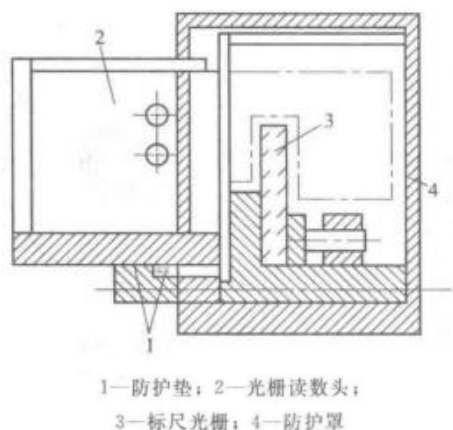
在数控机床中,光栅测量装置应用较多,其精度可达到 $1\mu\text{m}$,通过细分电路可达到 $0.1\mu\text{m}$ 甚至更高。

光栅可以进一步分为物理光栅、计量光栅。物理光栅刻线细密,栅距在 $0.002-0.005\text{mm}$ 之间,常用于光谱分析与光波波长的测定。计量光栅,相比较而言刻线较粗,栅距也较小,在 $0.004-0.25\text{mm}$ 之间,主要用于数字检测系统。

光栅传感器是动态测量元件,按照运动方式可以分为长光栅、圆光栅。长光栅可以用来测量直线位移,而圆光栅可以用来测量角度位移。

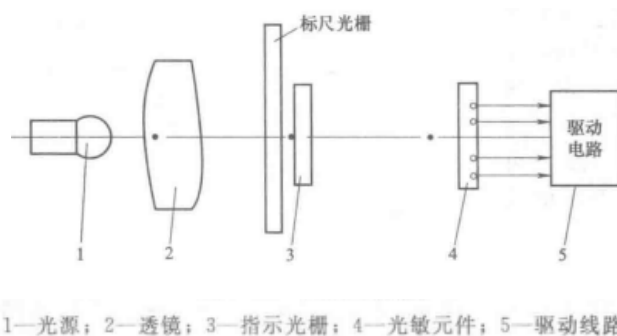
根据光线在光栅中的运动路径,又可以分为透射光栅、反射光栅。一般光栅传感器既可以是增量式,也可以是绝对值式的。目前,光栅传感器在高精度数控机床伺服系统中,其精度仅次于激光式测量。机床中经常使用计量光栅这种精密检测装置,具有测量精度高、响应速度快等特点。

图表53:光栅检测装置的安装结构



资料来源:《数控机床结构(第2版)》, 魏杰, 方正证券研究所

图表54:光栅读数头内部结构



资料来源:《数控机床结构(第2版)》, 魏杰, 方正证券研究所

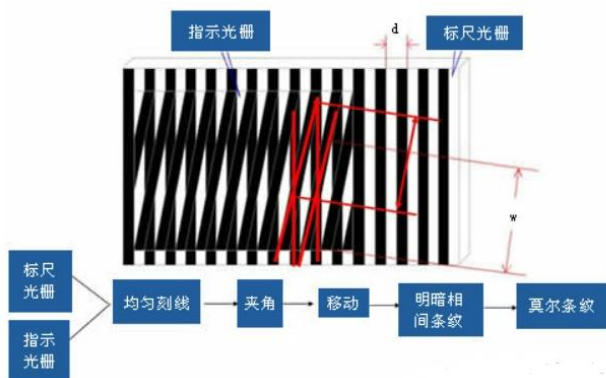
从结构上看,长光栅检测装置(直线光栅传感器)是由标尺光栅、光栅读数头两部分组成。标尺光栅一般固定在机床活动部件(如工作台)上,光栅读数头装在机床固定部件上。当读数头相对于标尺光栅移动时,指示光栅便在标尺光栅上相对移动。标尺光栅与指示光栅的平行度,及两者之间的间隙要严格保证0.05-0.1mm。

标尺光栅、指示光栅通称为光栅尺,它们是在真空镀膜的玻璃片或长条形的金属镜面上光刻出均匀密集的线纹。光栅的线纹互相平行,之间的间距称为“栅距”。对于圆光栅,这些线纹是与圆心角相等的向心条纹,条纹之间的夹角称为“栅距角”。栅距与栅距角都是光栅的重要参数。对于长光栅,金属反射光栅的线纹密度为每毫米有25-50个条纹,玻璃透射光栅的线纹密度为每毫米100-250个条纹。对于圆光栅,一周内可有1.08万条线纹。

光栅读数头,又称为光电转换器,将光栅莫尔条纹变为电信号。读数头是由光源、透射镜、指示光栅、光敏元件、驱动线路组成。标尺光栅不属于光栅读数头,但它要穿过光栅读数头,且需要保证与指示光栅有准确的相互位置关系。光栅读数头还可以分为分光读数头、反射读数头、镜像读数头等。

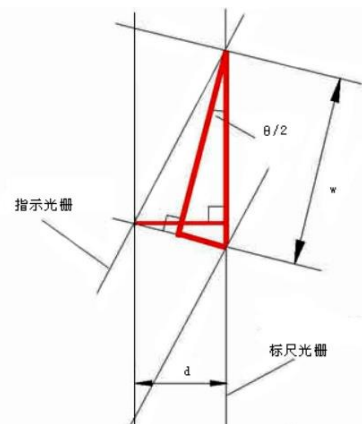
光栅传感器的工作原理(以透射光栅),就是当指示光栅上的线纹与标尺光栅上的线纹之间形成小角度 θ ,并且两个光栅尺面相对平行放置时,在光源的照射下,位于几乎垂直栅纹上,形成明暗间隔的条纹,这种条纹被称为“莫尔条纹”。

图表55:莫尔条纹的产生



资料来源：机电之家，方正证券研究所

图表56:莫尔条纹的光学放大作用



资料来源：机电之家，方正证券研究所

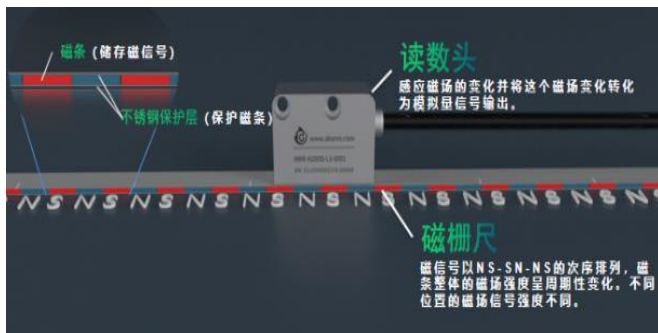
莫尔条纹的排列方向是与两片光栅线纹夹角的平分线相互垂直。莫尔条纹中两条亮纹、两条暗纹之间的距离，称为莫尔条纹宽度，用 W 来表示。一般来说，莫尔条纹具有两个特点：1) **莫尔条纹的移动与栅距成正比**，两片光栅相对移过一个栅距，莫尔条纹移过一个条纹间距，由于光的衍射与干涉作用，莫尔条纹的变化规律近似于正（余）弦函数，变化周期与光栅相对移过的栅距数同步。2) **放大作用**：在两光栅线夹角小的情况下，莫尔条纹宽度 W 、条纹栅距 P 、栅线角 θ 之间的关系为 $W = P / \sin \theta$ ，由于夹角很小，所以 $\sin \theta \approx \theta$ ， $W \approx P / \theta$ ，假设 $P = 0.01\text{mm}$ ， $\theta = 0.001\text{rad}$ ，则 $W \approx 10\text{mm}$ ，则光栅栅距被转换为放大 1000 倍的莫尔条纹宽度；3) **均化误差作用**：莫尔条纹是由若干条光栅条纹共用形成，例如，每毫米 100 线的光栅，10mm 宽的莫尔条纹就是由 1000 条线纹组成，这样可以使栅距之间的相邻误差被平均化，消除了由于栅距不均匀、断裂造成的误差；4) **光强为正弦变化**：在一个栅距内，光电元件所检测到的光强变化为正弦或余弦变化，利用这一点可以测出小于 1 个栅距的位移量。根据莫尔条纹的上述 4 个特点，依光电原件所测得的光强变化，可测出 1 个栅距内的位移量，依光强变化的周期可测出光栅距整数倍的位移量。

6.4 磁栅位置检测装置

磁栅是用电磁方法计算磁波数目的一种位置检测元件，可用作直线、角位移测量。与同步感应器、光栅相比，磁栅的测量精度略低，但具有复制简单及安装方便等一系列优点，尤其是在油污、粉尘较多的环境中，具有较好的稳定性。因此，磁栅也被较广泛地应用在数控机床、精密机床和各种测量机上。

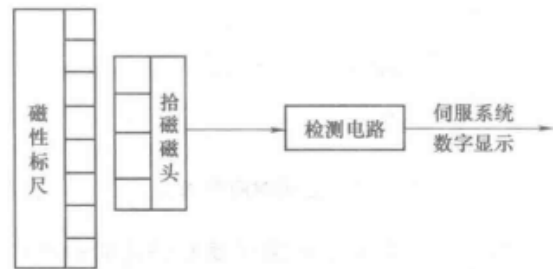
磁栅检测装置是将具有一定节距的磁化信号用记录磁头记录在磁性标尺的磁膜上，用来作为测量基准。在测量过程中，用拾磁磁头读取磁性标尺上的磁化信号并转换成电信号，通过检测电路将位置信息送给伺服控制系统或数字显示装置。磁栅检测装置由磁性标尺、拾磁磁头、检测电路三部分组成。

图表57:磁栅尺读数头工作原理



资料来源:阿童木(广州)智能科技有限公司,方正证券研究所

图表58:磁栅检测装置工作原理



资料来源:《数控机床结构(第2版)》,魏杰,方正证券研究所

6.5 感应同步器

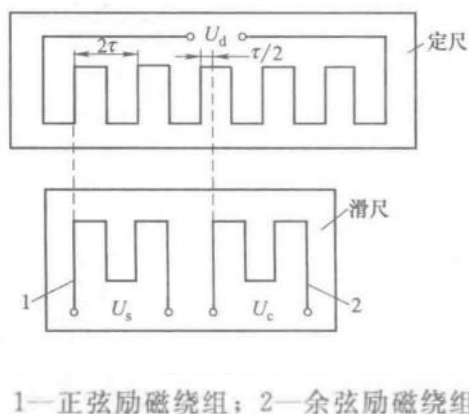
感应同步器可理解为多极旋转变压器的展开形式,利用两个平面形印刷绕组,其间保持均匀的气隙,相对平行移动时其互感随位置的变化而变化,是一种高精度的检测装置。

按照结构,感应同步器还可以分为直线、圆形感应同步器两种,分别用于测量直线位移、角位移。

直线感应同步器由定尺、滑尺两部分组成,圆形感应同步器由定子、转子组成,这两部分分别相当于旋转变压器的初级、次级线圈,都是利用交变磁场和互感原理。

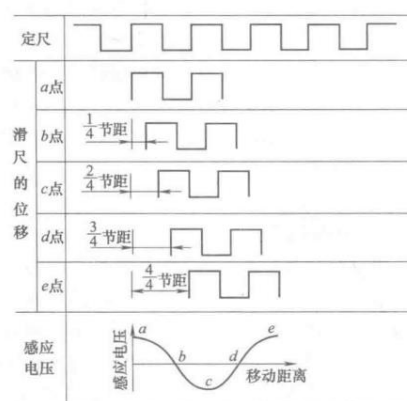
滑尺上具有在空间相差 $1/4$ 节距的正弦绕组和余弦绕组,且定尺与滑尺节距相同,当滑尺励磁绕组与定尺感应绕组间发生相对位移时,由于电磁耦合作用,感应绕组中的感应电压随位移的变化而呈周期性变化,感应同步器就是利用这一特点来检测滑尺相对定尺的位置的。

图表59:直线感应同步器结构



资料来源:《数控机床结构(第2版)》,魏杰,方正证券研究所

图表60:感应同步器工作原理



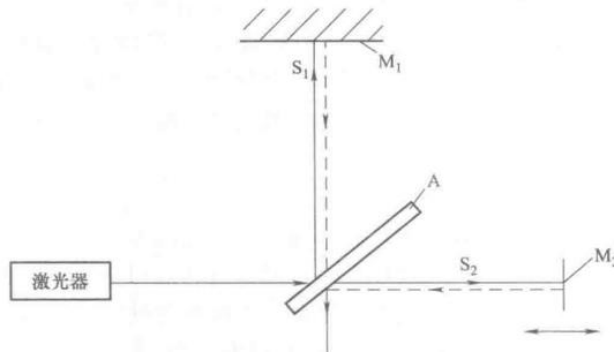
资料来源:《数控机床结构(第2版)》,魏杰,方正证券研究所

6.6 激光干涉检测仪

在高精度数控机床中,也要求有高精度的机床位置检测装置及定位系统。双频激光干涉仪经常被用作精密数控机床的测量装置,也是精密位置测量的决定因素。其基本原理是利用光的干涉原理和多普勒效应来进行位置检测。

光的干涉原理表明，两列具有固定相位差、相同频率、相同振动方向或振动方向之间夹角很小的光之间互相交叠，将会产生干涉。由于激光器发出的激光经过分光镜 A 分成反射光 S1 和投射光束 S2, S1 由固定反射镜 M1 反射，S2 由可动反射镜 M2 反射，反射回来的光在分光镜处汇合成相干光束。激光干涉仪利用这一原理，使激光束产生明暗相间的干涉条纹，由光电转换元件接收并转换为电信号，经处理后由计数器计数，从而实现对位移检测。

图表61:激光干涉仪原理



资料来源：《数控机床结构(第2版)》，魏杰，方正证券研究所

6.7 竞争格局：全球光栅尺市场规模近 50 亿元，欧洲及日本供应商占主导地位

根据 2021 年机床工具工业年鉴，2020 年协会调研的 6 家企业销售数显装置（主要为角位移圆光栅编码器）88.2 万套，销售金额 1.5 亿元，据此可以大致测算，圆光栅编码器均价约为 170 元/台。此外，我们根据机床工具工业年鉴量具、量仪的销售量、销售额计算出的均价，量仪的价格普遍较高，均价在 2864 元/台，2020 年通用长度量仪、角度量仪均价分别为 3.6 万元/台、2500 元/台，形状和位置误差量仪均价为 8850 元/台。

图表62:机床量具、量仪价格

产品名称	单位	销售量	销售金额 (亿元)	均价 (元/台)
量具	万件	2486	12.5	50
卡尺	万件	299	3.6	120
量块及量规	万件	193	1.7	88
测微螺杆类量具	万件	126	1.5	119
量表	万件	215	2	93
角度核平直度量具	万件	750	0.4	5
电子数显量具	万件	271	2.6	96
辅助测量器具	万件	44	0.1	23
其他量具	万件	588	0.6	10
量仪	台	76806	2.2	2864
通用长度量仪	台	834	0.3	35971
通用角度量仪	台	400	0.01	2500
形状和位置误差量仪	台	113	0.01	8850
表面质量量仪	台	16	0.01	62500
齿轮量仪	台	160	0.4	250000
气动、电动、主动量仪检验机	台	19728	0.4	2028
其他量仪	台	55555	1.1	1980

资料来源：中国机床工具工业年鉴，方正证券研究所

精密测量技术主要包括角度测量、位移测量两种。在前文提及的各类测量装置中，激光干涉仪、光栅测量仪是实现高精度、高分辨率的两种位移测量方式。激光干涉仪精度高，但以空气为传播媒介，以波长为测量基准，对环境要求较

高，而光栅受环境影响较小，且响应速度快，可以实现动态测量，更适用于数控机床，应用非常广泛。根据《绝对式光栅传感器关键技术的研究》，光栅测量系统在整个测量领域里市场份额可以占到 80 %以上，在整个测量领域中有着不可替代的地位。

据 QY Research 数据，2021 年全球光栅尺市场销售额达到了 6.3 亿美元（约合人民币 46 亿元），预计 2028 年将达到 8.3 亿美元，CAGR 约为 3.9%。

从数量上看，根据奥普光电 2023 年 5 月 31 日公开投资者调研纪要，国内光栅尺也分为不同的精度等级。其中，相对低端的光栅尺，主要用于简易数控机床；而绝对式光栅尺多用于高端数控机床。一般情况下，一个闭环控制的数控机床，包括当前应用较广的五轴加工中心，都会用到绝对式光栅尺。其匹配数量是，一个五轴的加工中心会用 XYZ 轴，加 2 个旋转轴，其中旋转轴用角度传感器。按国内 2022 年规模计算，数控机床的年产量是 27-28 万台的产量。对应到高端的高档数控约有 20%-30%，因此，国内每年用绝对尺的机床数量约为 4-5 万台，根据轴的数量，对应国内高端光栅尺的年需求约为十几万支。

目前国际上生产光栅尺的企业主要有德国海德汉（HEIDENHAIN）、西班牙发格（FAGOR）、英国雷尼绍（RENISHAW）、日本三丰（MITUTOYO）等。这些企业都已经实现 nm 级分辨率，甚至是 pm 级。尤其以海德汉最为著名，其超精密高端光栅尺 LIP 系列的分辨率能够稳定在 31.25pm，精度能够达到±0.1um，代表了整个光栅尺行业的最高水平。

作为数控机床重要功能部件的光栅尺，目前国内应用最多的是增量式光栅尺，在工作效率上增量式光栅尺相比于绝对式光栅尺还是有一定差距的，但绝对式光栅尺在国内目前成熟的产品很少，大部分都需要进口，使得我们在这一领域一直处于被动状态。加上国外对于绝对尺的关键技术保密，无法获取到最新的光栅技术。我国虽然从上世纪六十年代开始了对精密测量领域的研究，但主要以科研单位为主，国内企业的研发能力还较弱，相关产品技术主要依赖进口。此外，国内大多数光栅产品的分辨率依旧停留在微米级，测量精度和稳定性也较国外有一定差距。

长春奥普光电控股子公司禹衡光学，生产光栅编码器，用于伺服、自动化、机器人、数控机床等行业。公司生产的光栅尺在机床领域，已经可以满足最高的高端数控技术需求，对标海德汉产品。在半导体领域可应用于晶圆搬运、切割及封测等设备。目前禹衡光学的高端产品处于推广和逐步替代阶段。

7 相关标的

7.1 华中数控

华中数控是国家科技部 130 家国家重点高新技术企业和国内数控系统行业中少数拥有成套核心技术自主知识产权和自主配套能力的企业之一，主要从事中、高档数控装置、伺服驱动装置、数控机床、红外热像仪等产品研发、生产和销售，主导产品为中、高档数控装置和伺服驱动装置。

数控系统是公司的核心业务。公司拥有中、高档数控系统（包括数控装置和伺服及主轴驱动装置）的成套自主知识产权，能满足对国民经济发展、装备制造业振兴至关重要的大型、高性能数控机床等装备对数控系统的需求。

工业机器人业务是公司重点战略发展方向。近年来，公司围绕主业拓展了工业机器人、注塑机节能改造等业务。在工业机器人领域，公司已布局了深圳华数机器人有限公司、重庆华数机器人有限公司两家控股子公司，拥有多关节工业机器人、圆柱坐标工业机器人、直角坐标桁架工业机器人和教育实训机器人等四个系列产品线，在焊接、注塑、机加上下料、冲压、喷涂等领域的自动化线上得到了应用。

7.2 昊志机电

广州市昊志机电股份有限公司成立于 2006 年，是一家专业从事中高端数控机床、机器人、新能源汽车核心功能部件等的研发设计、生产制造、销售与维修服务的国家高新技术企业，于 2016 年在创业板上市。

近年来，公司逐步发展成为国内外主轴专业领域中研产销规模最大的企业之一，电主轴领域全球市场占有率领先。此外，公司立足主轴行业，借助在研发、制造、客户、品牌等方面的积累，稳步向数控机床和工业机器人等高端装备的核心功能部件领域横向扩张，目前产品涵盖 PCB 钻孔机/成型机/划片机电主轴、数控金属/玻璃雕铣机电主轴、数控车床主轴/电主轴、数控转台、直线电机、谐波减速器、数控系统、伺服电机、驱动器、传感器、燃料电池压缩机、曝气鼓风机、直驱类高速风机等数十个系列上百种产品

7.3 秦川机床

秦川机床工具集团股份公司拥有秦川机床本部、宝鸡机床、汉江机床、汉江工具、沃克齿轮、秦川格兰德、秦川宝仪等多家企业。公司是中国机床工具行业龙头骨干，中国精密数控机床与复杂工具研发制造基地，工业机器人减速器研发制造基地。

公司主要产品包括高档数控车床、加工中心、外圆磨床、齿轮加工机床、螺纹磨床、精密测量仪器等高端数控装备及数控复杂刀具；工业机器人减速器、精密（特种）齿轮箱等高端制造产品；滚动功能部件、汽车零部件、精密齿轮、精密仪器仪表、精密铸件等零部件产品；智能机床、高档数控系统、自动化生产线、数字化车间、秦川云等智能制造及核心数控技术和服务业务。

汉江机床是国产丝杆的龙头骨干企业，牵头制定了丝杠的国家标准，具备加工丝杆所需关键装备螺纹磨床的研发制造能力。产品广泛应用于航空航天、高铁及高档数控机床等领域，参与多项国家重大项目。重型滚珠丝杠副已应用于军

工行业，微型精密滚珠丝杠副已成为军工行业多家企业指定产品；滚珠导轨、地铁导轨、智能直线导轨副等产品实现进口替代。

7.4 贝斯特

无锡贝斯特精机股份有限公司是江苏省高新技术企业，成立于1997年5月。公司主营业务为研发、生产及销售各类精密零部件及工装夹具产品。公司主要产品为涡轮增压器精密轴件、涡轮增压器叶轮、涡轮增压器中间壳（为无锡石播增压器有限公司供货）。

公司全资子公司宇华精机落实“高端装备核心滚动功能部件研发及产业化项目”，产品主要包括高精度滚珠丝杠副、高精度滚动导轨副等，面向高端机床、半导体、自动化三大产业。项目将引进生产及检测等进口设备约300台套（其中，研发设备70台），配套软件及系统、公辅设施等30余套。根据中国机床工具工业协会信息，贝斯特生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等首台套已实现成功下线，并已将部分产品送样至战略客户处进行验证。

7.5 恒立液压

恒立液压总部位于常州，经过30多年的专注与创新，公司从液压油缸制造发展成为集液压元件、精密铸件、液压系统等产业于一体的大型综合性企业。在中国、德国、美国、日本、墨西哥分别建有5个液压研发中心与10个生产制造基地。技术水平和生产规模已跻身于世界液压领域前列，为全球2000多家客户提供服务，主要市场涵盖20多个国家和地区，产品遍及工程机械、农业机械、工业工程、海洋工程、能源科技、隧道工程等众多行业。

2021年9月发布50亿定增，主要针对墨西哥油缸生产基地建设、线性驱动器项目、通用液压泵技改项目等领域。2023年1月6日，定增约20亿元。其中线性驱动项目拟投入15亿元实现产品的电动化升级，包括电动缸和滚珠丝杠的生产。该项目达产后将形成年产104,000根标准滚珠丝杠电动缸、4,500根重载滚珠丝杠电动缸、750根行星滚柱丝杆电动缸、100,000米标准滚珠丝杠和100,000米重载滚珠丝杠的生产能力。

7.6 恒而达

福建恒而达新材料股份有限公司，创建于1995年，2021年2月8日于深交所创业板首次挂牌上市，是一家专注于金属新材料领域的国家高新技术企业，致力于各种高强韧材料、多金属复合材料、模切工具、锯切工具、智能装备及功能部件等系列产品的研发生产、销售及服务，致力于为轻工、重工、军工、机械、建筑建材、智能制造等国民经济基础性产业，提供产品系列化及装备配套一体化的切削加工方案。

除现有的模切工具、锯切工具和智能数控装备外，公司积极推进高精度滚动功能部件直线导轨副的产业化项目。根据公司公开投资者调研纪要，当前，该产品从22年的研发与小试步入到提升与中试的新阶段，同时不断丰富产品规格、系列、型号及配套能力，部分规格、系列、型号产品已小批量生产。2023年上半年公司滚动功能部件实现销售收入978.78万元，较上年同期增加5,644.07%，是该产品2022年全年销售收入的2.20倍。

7.7 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。2010 年 1 月 15 日，公司首次公开发行 A 股，在深交所挂牌上市。公开发行 A 股，在深交所挂牌上市。

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。公司目前以军工产品业务为主，从技术实现和产品生产上主导了国内国防光电测控仪器设备的升级和更新换代，在国防光电测控领域处于同行业领先地位。

公司控股子公司禹衡光学，生产光栅编码器，用于伺服、自动化、机器人、数控机床等行业。公司生产的光栅尺在机床领域，已经可以满足最高的高端数控技术需求，对标海德汉产品。在半导体领域可应用于晶圆搬运、切割及封测等设备。目前禹衡光学的高端产品处于推广和逐步替代阶段。

8 风险提示

宏观经济波动风险。机床行业下游十分广泛，与制造业景气度及宏观经济景气度息息相关，若宏观经济经下滑可能会导致下游需求不及预期，采购意愿下降，减缓国产替代进程。

技术推进不及预期风险。机床行业核心零部件技术壁垒较高，海外主要企业经过数十年发展和积淀在全球及国内市场占据一定市场地位，若国内企业在产品研发效果上不及预期，可能也会减缓国产替代进程，相关产品收入不及预期。

产能消化风险。国内企业多针对核心零部件进行了特定产品的产能扩充，在相关产品产能大幅提升后，若公司市场开发进度或市场容量扩张速度不及预期等因素影响，可能导致项目新增产能无法完全消化。

行业政策调整风险。行业政策是影响机床行业发展速度的重要因素之一，近年来在国家倡导装备制造业整体向高端化、智能化发展的背景下，国家出台了一系列鼓励政策以支持、推动我国高档数控机床与高端装备制造业的发展，提升对核心技术自主可控的能力，增强产业创新能力和国际竞争力。若未来相关产业政策支持力度减弱，可能对企业发展产生不利影响。

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，保证报告所采用的数据和信息均来自公开合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。研究报告对所涉及的证券或发行人的评价是分析师本人通过财务分析预测、数量化方法、或行业比较分析所得出的结论，但使用以上信息和分析方法存在局限性。特此声明。

免责声明

本研究报告由方正证券制作及在中国（香港和澳门特别行政区、台湾省除外）发布。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告内容仅供我公司适当性评级为 C3 及以上等级的投资者使用，本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。若您并非前述等级的投资者，为保证服务质量、控制风险，请勿订阅本报告中的信息，本资料难以设置访问权限，若给您造成不便，敬请谅解。

在任何情况下，本报告的内容不构成对任何人的投资建议，也没有考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需求，方正证券不对任何人因使用本报告所载任何内容所引致的任何损失负任何责任，投资者需自行承担风险。

本报告版权仅为方正证券所有，本公司对本报告保留一切法律权利。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，不得将报告内容作为诉讼、仲裁、传媒所引用之证明或依据，不得用于营利或用于未经允许的其它用途。如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处且不得进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

评级说明：

类别	评级	说明
公司评级	强烈推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有20%以上的涨幅。
	推荐	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的涨幅。
	中性	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数在-10%和10%之间波动。
	减持	分析师预测未来12个月内相对同期基准指数有10%以上的跌幅。
行业评级	推荐	分析师预测未来12个月内行业表现强于同期基准指数。
	中性	分析师预测未来12个月内行业表现与同期基准指数持平。
	减持	分析师预测未来12个月内行业表现弱于同期基准指数。
基准指数说明		A股市场以沪深300 指数为基准；香港市场以恒生指数为基准，美股市场以标普500指数为基准。

方正证券研究所联系方式：

北京：西城区展览馆路 48 号新联写字楼 6 层

上海：静安区延平路71号延平大厦2楼

深圳：福田区竹子林紫竹七道光银行大厦31层

广州：天河区兴盛路12号楼隼峰苑2期3层方正证券

长沙：天心区湘江中路二段36号华远国际中心37层

网址：<https://www.foundersc.com>

E-mail：yjzx@foundersc.com