



丝杠行业研究

买入（首次评级）

行业专题研究报告

证券研究报告

机械组

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

manzaipeng@gjzq.com.cn

lijialun@gjzq.com.cn

关注利润率、空间、设备潜在“超预期”机会

投资逻辑

丝杠利润率可能“超预期”：丝杠加工流程长工艺复杂，材料、热处理、设计、粗精加工、检测环环相扣涉及大量“Know How”具有较高壁垒。一方面其中涉及较多难以逆向的内容，例如以一个进口丝杠作为对比，在不知道其具体采用钢材的化学成分情况下采用不同材料生产最终性能会不同，而即使采用了类似化学成分的材料，若热处理工艺不成熟，表面硬度梯度分布不合理、金相组织不均匀等问题也会导致丝杠性能打折扣，需要不断试错来优化工艺。另一方面我们认为，“能造丝杠”和“能造更好的丝杠”之间有较大差异，丝杠本就是多 SKU 赛道企业需要拥有面向多种不同应用场景进行设计的能力，而丝杠设计中的小变化就会导致性能出现较大差异，终端用户除精度外更看重丝杠的动态特性、精度保持性等指标，如何快速打造出一套“设计-制造-检测”的闭环正向研发体系至关重要。以丝杠龙头中国台湾上银科技作为参考，上银科技 21 至 23 年综合毛利率分别为 36%/36.55%/31.07%（同时包含了直线导轨、工业机器人等产品，单看滚珠丝杠毛利率或更高），能够实现突破的中国大陆丝杠头部企业后续也有望实现较高利润率。

丝杠空间可能“超预期”：根据 IMARC 信息，全球精密滚珠丝杠 24 年市场空间 16 亿美元，预计到 2033 年达到 24 亿美元，期间复合增速 4.3%，主要看好医疗、航空航天、半导体等领域市场，我们认为除这些方向外，工业母机、人形机器人、汽车领域也有较大成长空间。

工业母机：丝杠与导轨配套使用为工业母机传动和定位的关键零部件，根据我们测算 23 年中国工业母机丝杠+导轨市场空间为 181.6 亿元人民币。根据秦川机床公告信息，中国台湾上银科技、银泰科技市占率接近 50%，日本 NSK、THK 市占率约 15%，中国大陆企业占有率仅约 25%，有较大进口替代成长空间。

人形机器人：自特斯拉首次发布“Optimus”人形机器人并采用行星滚柱丝杠作为线性执行器后，丝杠在人形机器人领域的应用加速走向成熟，目前多家企业推出了将丝杠作为手臂、腿部、灵巧手线性执行器的方案，有较好应用前景。根据我们测算，假设平均一台人形机器人采用 10 支行星滚柱丝杠，平均价格 800 元/支，在人形机器人达到百万台出货量时对应 80 亿元人民币潜在市场空间，具有爆发式成长潜力。

汽车：L3 级及以上智能驾驶进一步强化了对底盘的要求，线控转向、线控制动（刹车+驻车）、主动悬架等场景均需要更智能、响应速度更快的线性执行器，目前通过电机+丝杠+传感器构成的线性执行器有较好应用前景。例如舍弗勒推出的创新后轮转向系统目前就使用了行星滚柱丝杠，整个系统结构紧凑、重量轻、运行安静且易于整车集成，国内部分丝杠公司开发的汽车丝杠产品也已经完成了交样，25 年有望看到汽车丝杠进一步放量，未来有更大成长空间。

丝杠设备重要性可能“超预期”：在丝杠有较大潜在成长空间背景下，设备企业作为“卖铲人”有较强需求确定性，同时考虑到人形机器人、汽车等下游领域会有较强降本诉求，设备端也存在技术升级迭代的新机会。建议关注一部分新技术带来的机会，例如通过以车代磨、以铣代磨实现降本，这会带来硬车床、旋风铣床、超硬刀具的需求；同时建议关注部分弹性大的环节例如螺纹磨床，根据我们测算百万台人形机器人出货量对应 44 至 89 亿元人民币螺纹磨床市场空间，而原先的市场规模较小，若国内企业能实现国产替代突破会有较大成长弹性。

投资建议

考虑丝杠赛道高壁垒后续头部企业有望实现高利润率，同时丝杠在工业母机、人形机器人、汽车等领域应用前景广阔，丝杠企业和“卖铲人”设备企业均有较好成长前景，建议关注贝斯特、恒立液压、秦川机床。

风险提示

国产替代进展不及预期、人形机器人产业化进展不及预期。



内容目录

1. 丝杠为线性驱动核心部件	7
1.1 丝杠为机械传动核心部件，通过滚珠丝杠副实现线性驱动应用广泛	7
1.2 行星滚柱丝杠在承载能力、传动效率、寿命等方面更具优势	9
1.3 精度是区分丝杠等级的一个核心指标	10
2. 丝杠利润率可能“超预期”：丝杠制造困难重重，预计高壁垒带来较高利润率	11
2.1 第一难：材料/热处理工艺	12
2.2 第二难：设计	14
2.3 第三难：粗精加工	18
2.4 第四难：检测、试验平台	21
2.5 第五难：降本	24
2.6 对标中国台湾上银科技，中国大陆头部企业有望实现高毛利率	26
3. 丝杠空间可能“超预期”：工业母机+人形机器人+汽车三大下游齐发力	27
3.1 工业母机：国产化率低，自主可控成长空间较大	27
3.2 人形机器人：多种类丝杠需求齐增，有望迎爆发式增长	32
3.3 汽车：伴随智驾升级线控化大势所趋，在转向、制动、悬架等均有应用前景	37
4. 丝杠设备重要性可能“超预期”：关注“卖铲人”机会	44
4.1 热处理：热处理炉、感应淬火设备需求提升	44
4.2 校直：丝杠自动校直机具有较好前景	47
4.3 粗精加工：螺纹磨床具有较大弹性，同时关注以车代磨、以铣代磨新机会	48
4.3.1 车床：国产化率较高，关注以车代磨新机会	48
4.3.2 旋风铣设备：以铣代磨也是实现降本核心方向	50
4.3.3 以车代磨、以铣代磨同时有望带动一部分超硬刀具需求	51
4.3.4 螺纹磨床：精加工核心设备，未来具有较大弹性	53
4.4 检测设备：打造“设计—制造—检测”的闭环正向研发体系核心	66
5. 投资建议	68
6. 风险提示	70

图表目录

图表 1： 传动机构基本要求	7
图表 2： 丝杠螺母主要包括四种基本传动形式	7
图表 3： 滚珠丝杠副传动效率高于普通滑动丝杠	8
图表 4： 滚珠丝杠的循环方式	8
图表 5： 滚珠丝杠两端常用支承形式	9



图表 6: 行星丝杠通过螺纹滚柱来传递负载.....	9
图表 7: 行星滚柱丝杠副相比滚珠丝杠副, 在承载能力、传动效率方面具有显著优势.....	10
图表 8: 基于行星滚柱丝杠开发的电动缸性能更优.....	10
图表 9: 国内丝杠标准公差等级.....	10
图表 10: 导程精度是衡量丝杠精度的关键指标.....	11
图表 11: 同样精度等级的丝杠在螺纹部有效长度不同的情况下导程精度的容许值也不同.....	11
图表 12: 丝杠的加工流程较长, 材料、热处理、设计、粗精加工、检测环环相扣涉及大量“Know How”.....	12
图表 13: 钢材不同的化学成分会对性能产生较大影响.....	12
图表 14: 新型热处理工艺后的 M50 钢组织得到大幅度细化.....	13
图表 15: 丝杠加工过程会经过多次热处理.....	13
图表 16: 材料升级和热处理工艺优化是实现国产替代必不可少的一环.....	13
图表 17: 丝杠中频感应淬火示意.....	14
图表 18: 丝杠是多 SKU 产品, 采购时有较多考虑因素.....	14
图表 19: 滚珠丝杠的变形关系和受力分析较为复杂, 需要考虑的设计变量较多.....	15
图表 20: 行星滚珠丝杠的螺纹牙设计也会对性能产生较大影响.....	15
图表 21: 不同的修形量会让螺纹牙载荷分布造成较大影响.....	15
图表 22: 行星滚柱丝杠的设计较为复杂.....	16
图表 23: 通过正向设计实现丝杠动态特性、寿命优化难度较高.....	16
图表 24: 象限突起会导致加工过程出现条纹.....	17
图表 25: NSK2021 年推出了抑制插补象限突起的滚珠丝杠技术.....	17
图表 26: 丝杠加工一般分别磨削加工和冷轧加工.....	18
图表 27: 磨削滚珠丝杠加工工艺复杂.....	18
图表 28: 不同下游对丝杠精度等级需求不同.....	19
图表 29: 丝杠粗车加工改进路线.....	19
图表 30: 磨削丝杠会导致出现热形变.....	19
图表 31: 外螺纹磨床加工丝杠轴示意.....	20
图表 32: 磨削过程有较多因素会影响最终丝杠性能.....	20
图表 33: 丝杠螺母内螺纹加工方式.....	21
图表 34: 砂轮回转面与滚道螺旋面接触对应关系.....	21
图表 35: 反式行星滚柱丝杠螺母内螺纹加工可能出现加工干涉, 需针对设备、砂轮等进行优化.....	21
图表 36: 丝杠行程公差检测基本测量原理.....	22
图表 37: P 型丝杠有效行程允差.....	22
图表 38: 丝杠圆跳动误差测量方式.....	23
图表 39: 需要通过成套测试装备来实现可靠性评测, 以解决测试时间较长的问题.....	23
图表 40: 丝杠内/外滚道综合精度非接触高精测量方法与装置.....	24



图表 41: 综合刚度检测与建模.....	24
图表 42: 预紧力精确计算方法与高精装配技术.....	24
图表 43: 丝杠粗加工有多重工艺.....	25
图表 44: 丝杠螺母硬车削加工.....	25
图表 45: 通过旋风铣加工可以显著提升粗加工效率, 甚至缩短精加工工时.....	26
图表 46: 上银科技高点营收超过 60 亿元人民币.....	26
图表 47: 上银科技高点利润超过 10 亿元人民币.....	26
图表 48: 上银科技保持了较高毛利率.....	27
图表 49: 上银科技 23 年收入结构.....	27
图表 50: 丝杠/导轨是数控机床传动和定位的关键零部件.....	28
图表 51: 丝杠是数控机床半闭环/闭环进给伺服系统的核心一环.....	28
图表 52: 分段式丝杠热变形误差补偿.....	28
图表 53: 丝杠导轨主机厂以外购为主.....	29
图表 54: 传动系统(丝杠/导轨为主)占机床价值量 15%左右.....	29
图表 55: 23 年中国滚动功能部件市场空间 181.6 亿元人民币.....	30
图表 56: 丝杠导轨国产化率约 25%, 国产替代空间巨大.....	30
图表 57: 目前有更多民营企业积极布局工业母丝杠领域.....	30
图表 58: 从 2011 年到 2020 年国产滚动功能部件中高端应用比例明显提升.....	31
图表 59: 终端用户在滚珠丝杠的采购上话语权较强.....	31
图表 60: 在有政策引导情况下, 有 85.1% 企业愿意试用或购买国产中高端滚动功能部件.....	32
图表 61: 机械臂的线性执行器主要由电机+丝杠驱动.....	32
图表 62: 特斯拉“Optimus”采用行星丝杠作为下肢的线性执行器.....	32
图表 63: 人形机器人线性执行器结构.....	33
图表 64: 人形机器人手臂可通过行星滚柱丝杠的线性执行器进行驱动.....	34
图表 65: 人形机器人的腿部也会用到大量线性执行器.....	34
图表 66: 灵巧手驱动方式以连杆传动、齿轮传动、带传动、线绳传动为主.....	34
图表 67: 灵巧手可使用电机+微型丝杠作为主动关节.....	35
图表 68: 微型滚珠丝杠、微型滚珠花键、中空电机集成可制作出非常紧凑的灵巧手线性驱动器.....	36
图表 69: 新剑传动开发了针对人形机器人手臂、腿部、灵巧手的各类行星滚柱丝杠.....	37
图表 70: 汽车转向系统结构.....	37
图表 71: 电动助力转向系统可采用滚珠丝杠作为传动机构.....	38
图表 72: 线控转向系统增加了较多传感器信号以完成有人/无人驾驶的闭环控制.....	38
图表 73: 舍弗勒后轮转向系统的核心是行星滚柱丝杠.....	39
图表 74: 博世 SBC 系统原理.....	39
图表 75: 博世主要电液系统产品 iBooster 原理.....	40



图表 76: NSK 开发的电液制动系统滚珠丝杠.....	40
图表 77: 电机械制动系统原理.....	41
图表 78: 丝杠尤其是行星滚柱丝杠在电机械制动系统中有较好应用前景.....	41
图表 79: 电机械驻车系统也会用到丝杠.....	42
图表 80: 主动悬架系统中需要使用线性执行器作为作动器.....	42
图表 81: 滚珠丝杠悬架作动器.....	43
图表 82: 新剑传动目前已经推出了针对汽车行业的各类丝杠产品.....	44
图表 83: GCr15 钢滚珠丝杠热处理工艺规范.....	45
图表 84: 井式热处理炉适合用于长轴类零件热处理.....	45
图表 85: 卧式轴类淬火生产线.....	46
图表 86: 国产热处理设备市场主要参与者.....	46
图表 87: 国内企业总体技术处于追赶期, 产品进口替代有较大成长空间.....	46
图表 88: 丝杠自动校直设备结构.....	47
图表 89: 集智股份丝杠自动校直机.....	48
图表 90: 金属切削机床主要分类.....	48
图表 91: 金属切削加工根据工件/刀具相对运动关系的分类.....	49
图表 92: 丝杠轴螺纹会经过粗车、精车等工序完成车削加工.....	49
图表 93: 浙海德曼实现了车床三大核心零部件突破.....	49
图表 94: 硬车削车床可实现以车代磨显著提升丝杠加工效率.....	50
图表 95: 南京工艺目前所使用旋风铣床为德国进口.....	50
图表 96: 汉江机床已经开发了旋风铣床来进行丝杠加工.....	51
图表 97: 晨光数控丝杠旋风铣床.....	51
图表 98: PCBN 刀具可替代磨削加工.....	52
图表 99: PCBN 刀具主要应用于汽车行业、车削和加工淬火钢等领域.....	52
图表 100: 华菱超硬推出了针对丝杠加工的超硬刀具.....	53
图表 101: 郑钻推出了针对丝杠螺母加工的硬车削刀具方案和丝杠轴加工的硬铣削刀具方案.....	53
图表 102: 磨削加工主要通过砂轮等实现材料去除.....	54
图表 103: 磨床以外圆磨、内圆磨、平面磨为主.....	54
图表 104: 磨床精度等级为机床精度最高一档, 技术难度最高(研磨后精度可进一步提高).....	55
图表 105: 精密磨床加工精度可达微米级, 技术难度较高.....	55
图表 106: 要实现最终的高精度加工, 磨床核心功能部件需要具有较高精度.....	56
图表 107: 磨床根据砂轮线速度分为普通磨床、高速磨床和超高速磨床.....	56
图表 108: 实现超高速磨削对磨床性能要求较高.....	57
图表 109: 海外磨床企业以欧、美、日等国家与地区为主, 企业发展较为成熟.....	57
图表 110: PSS 集团有能力为多个行业提供全套解决方案.....	58



图表 111: PSS 集团旗下 9 大品牌均有较长发展历史技术, 构筑强大品牌矩阵..... 58

图表 112: 法孚集团也以多个知名品牌构筑品牌矩阵, 提供高精度磨削解决方案。..... 59

图表 113: 法孚集团超精密设备事业部 21 年新签订单约 3.02 亿欧元, 占比约 16%..... 59

图表 114: 三井精机螺纹磨床具有较高市场份额, 尤其在日本几乎为 100%..... 60

图表 115: 三井精机工厂建设坚固地基以减少振动影响..... 60

图表 116: 三井精机工厂采用特殊设计的空调系统以降低温度变化..... 60

图表 117: 三井精机“Kisage”工艺追求更高加工精度..... 61

图表 118: 三井精机使用“三面摩擦”的方式创造平面..... 61

图表 119: 采用“Kisage”工艺多次测量多次加工以实现机械加工无法达到的精度..... 61

图表 120: 国产磨床与进口磨床进行刀具加工性能较为接近..... 62

图表 121: 外螺纹磨床完成丝杠轴加工..... 62

图表 122: 内螺纹磨床完成螺母加工..... 62

图表 123: 秦川机床滚动功能部件扩产设备投资中磨床占比 48%..... 62

图表 124: 秦川机床扩产部分进口设备单价可上千万..... 62

图表 125: 上海机床厂开发的 SK7420 机床可实现 P1 级滚珠丝杠副加工, 我们认为技术层面看具备国产替代基础..... 63

图表 126: 丝杠加工设备有较大优化空间, 国内企业贴近终端客户有望抢占先机..... 63

图表 127: 人形机器人百万台出货量有望拉动 44 至 89 亿元螺纹磨床设备市场..... 64

图表 128: 国内磨床企业收入体量较小, 未来有较大成长空间..... 64

图表 129: 秦川机床子公司汉江机床能提供滚珠丝杠副成套设备, 螺纹磨床技术实力突出..... 65

图表 130: 华辰装备精密螺纹磨床已获得订单..... 65

图表 131: 日发精机数控螺纹磨床自动生产线..... 66

图表 132: 日发精机自动化线可实现连续加工..... 66

图表 133: 丝杠导程精度测量设备构成..... 67

图表 134: KUNZ 丝杠轴检测设备通过激光干涉仪捕捉纵向位置..... 67

图表 135: 南京工艺滚动功能部件综合性能实验室..... 68

图表 136: 汉江机床滚动功能部件综合性能实验室..... 68

图表 137: 目前布局丝杠领域上市公司梳理..... 68

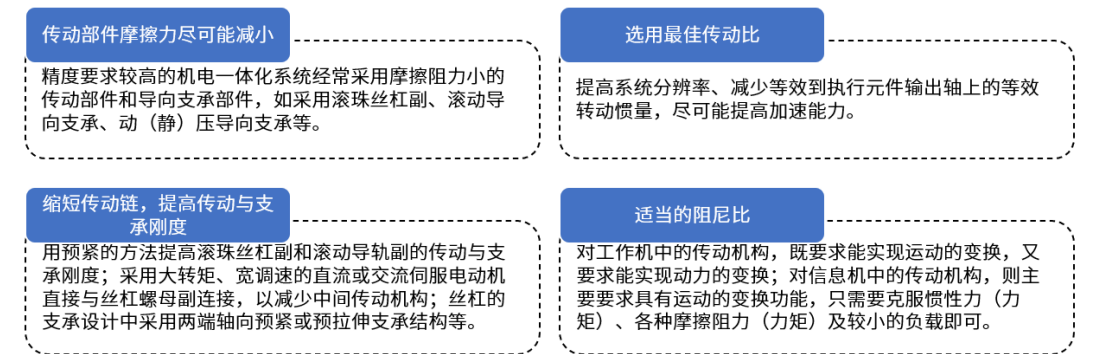


1. 丝杠为线性驱动核心部件

1.1 丝杠为机械传动核心部件，通过滚珠丝杠副实现线性驱动应用广泛

机械传动方式通常包括螺旋传动、齿轮传动、同步带传动、高速带传动、各种非线性传动等，传动系统的性能直接影响设备的精度、稳定性和响应速度。

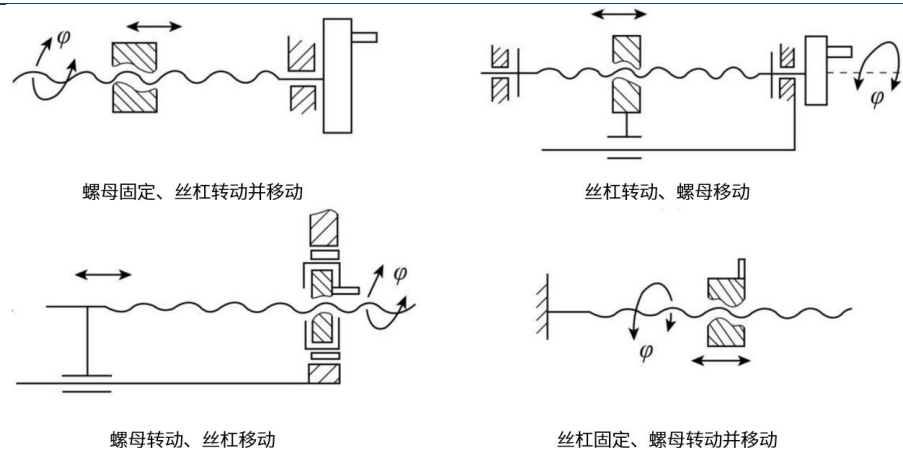
图1：传动机构基本要求



来源：《机电一体化技术》，国金证券研究所

丝杠螺母传动将旋转运动变换为直线运动（或相反传递），可以用于传递能量（螺旋压力机、千斤顶等）或传递运动（机床进给丝杠），通常包括以下四种基本传动形式。

图2：丝杠螺母主要包括四种基本传动形式



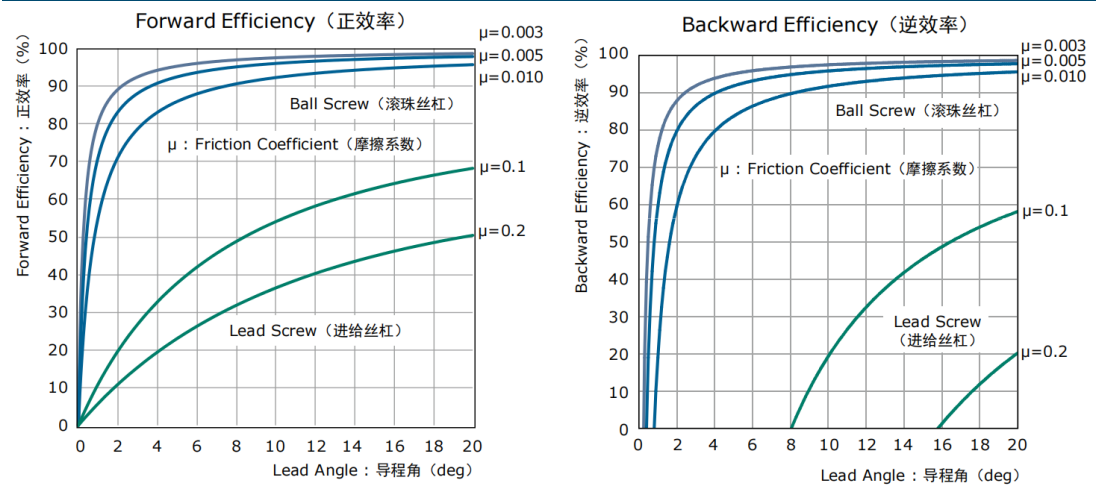
来源：《机电一体化技术》，国金证券研究所

丝杠螺母机构有滑动丝杠螺母机构和滚珠丝杠螺母机构之分，滚珠丝杠由于使用滚珠传递运动，相比普通滑动丝杠成本高，但具有明显优势：

- 1) 传动效率高。滚珠丝杠副的传动效率高达 92%~96%，是普通梯形丝杠的 3~4 倍，功率消耗减少 2/3~3/4。
- 2) 灵敏度高、传动平稳。由于是滚动摩擦，动、静摩擦因数相差极小，因此低速不易产生爬行，高速传动平稳。
- 3) 定位精度高、传动刚度高。用多种方法可以消除丝杠螺母的轴向间隙，使反向无空行程，定位精度高，适当预紧后，还可以提高轴向刚度。



图表3: 滚珠丝杠副传动效率高于普通滑动丝杠

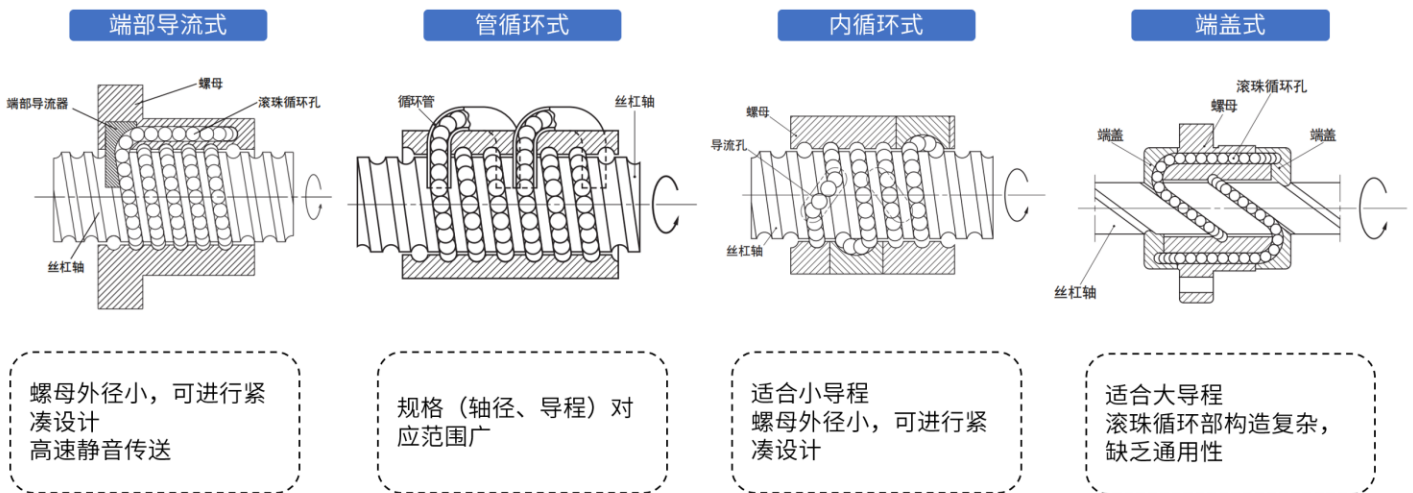


来源: KSS 综合产品目录, 国金证券研究所

滚珠丝杠副是回转运动与直线运动相互切换的传动装置, 滚珠丝杠和滚珠螺母上都加工有弧形螺旋槽, 将它们套装在一起时, 这两个圆弧形的螺旋槽对合起来就形成了螺旋滚道, 并在滚道内装满滚珠。当丝杠相对于螺母旋转时, 滚珠在滚道内自转, 同时又在封闭的滚道内循环, 使丝杠和螺母相对产生轴向运动。

由丝杠轴和螺母之间装入滚珠进行转动的单元是滚珠丝杠, 由于滚珠需要循环, 所以由丝杠轴、螺母、滚珠以及循环部件组成。

图表4: 滚珠丝杠的循环方式

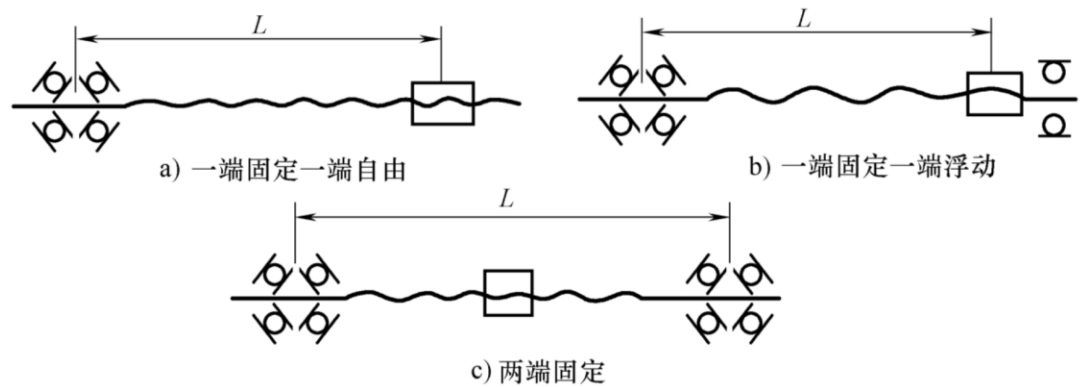


来源: NSK 官网, 国金证券研究所

滚珠丝杠主要承受轴向载荷, 它的径向载荷主要是卧式丝杠的自重。因此, 对滚珠丝杠的轴向精度和刚度要求较高。



图表5: 滚珠丝杠两端常用支承形式

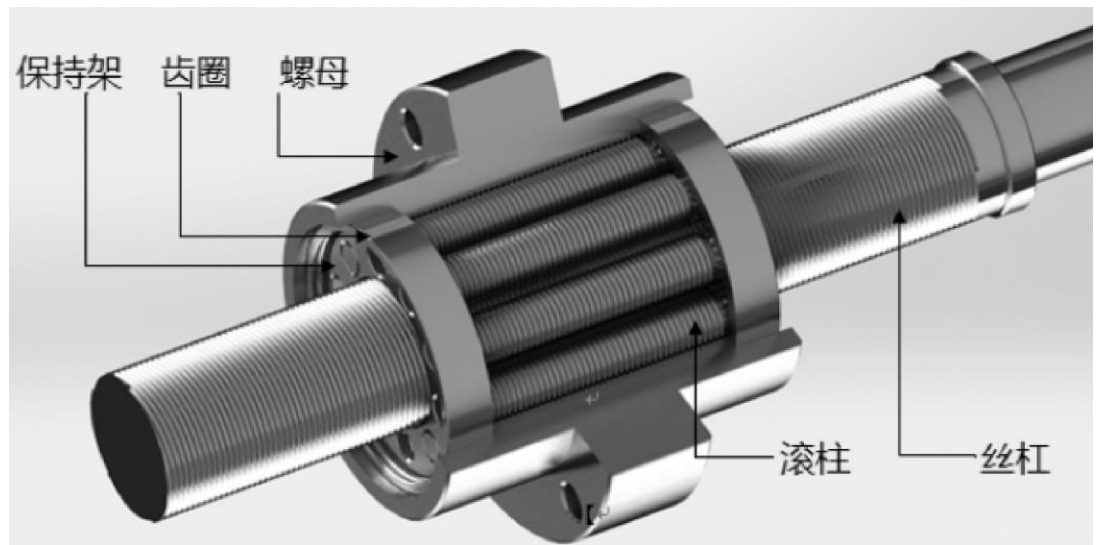


来源:《数控技术》, 国金证券研究所

1.2 行星滚柱丝杠在承载能力、传动效率、寿命等方面更具优势

行星滚柱丝杠最早在 1942 年发明, 但是由于结构复杂、加工难度大和成本高, 一直没有得到广泛应用。行星丝杠与滚珠丝杠主要的区别在于负载的传递单元使用螺纹滚柱而不是滚珠。

图表6: 行星丝杠通过螺纹滚柱来传递负载



来源:《行星滚柱丝杠副产品产业化应用分析》, 国金证券研究所

行星滚柱丝杠相比滚珠丝杠, 在承载能力、传动效率方面具有显著优势。



图表7: 行星滚柱丝杠副相比滚珠丝杠副, 在承载能力、传动效率方面具有显著优势

高负载、长寿命	滚柱与丝杠接触半径更大, 且所有滚柱同时参与啮合, 接触点多, 比滚珠丝杠副在相同的丝杠公称直径下承载能力提高6倍, 相同负载下比滚珠丝杠副节省1/3的安装空间、寿命提高14倍, 工作环境温度范围提高2倍。
传动效率高	行星滚柱丝杠副以滚动摩擦代替滑动摩擦, 且作为滚动体的滚柱之间没有碰撞接触, 在润滑良好的情况下其传动效率可达90%。
运动性能好	滚柱相对于螺母没有轴向运动, 因此具有加速、旋转和减速能力, 转速可达6000r/min, 直线速度可达2m/s, 加速度7000rad/s ² , 而滚珠丝杠副则很难达到上述指标。
低噪音	采用行星机构控制滚柱运动, 不需要滚动元件循环装置, 且高速运转时产生的振动噪声较小。
适应性强	可在恶劣环境下使用。滚柱两端的直齿与安装在螺母内的内齿圈啮合, 容易实现滚柱行星运动的正常执行。拆卸时可将丝杠旋出而不影响螺母、滚柱等其他元件的装配状态。

来源: 《行星滚柱丝杠副产品应用研究》, 国金证券研究所

基于行星滚柱丝杠开发的电动缸性能更优。

图表8: 基于行星滚柱丝杠开发的电动缸性能更优

项目	滚柱丝杠电动缸	滚珠丝杠电动缸	液压缸	气缸
承载能力	很高	高	很高	高
寿命	很长	中等	维护得当, 可较长	维护得当, 可较长
速度	很快	中等	中等	很快
加速度	很快	中等	很高	很高
位置可控制性	容易	容易	困难	很困难
机械刚性	很高	中等	很高	很低
抗冲击性能	很高	中等	很高	高
相对体积	小	中等	大	大
摩擦	小	小	大	中等
效率	>90%	>90%	<50%	<50%
安装	简单	简单	复杂	复杂

来源: 《行星滚柱丝杠副产品应用研究》, 国金证券研究所

1.3 精度是区分丝杠等级的一个核心指标

国内的滚珠丝杠按照 GB/T 1800.1-2009 标准分为 8 个标准公差等级, 根据丝杠的用途分为定位 (P 型) 和传动 (T 型), P0 级精度为最高的精度等级。

图表9: 国内丝杠标准公差等级

滚珠丝杠副的类型	标准公差等级
定位(P型)	0-1-2-3-4-5
传动(T型)	0-1-2-3-4-5-7-10

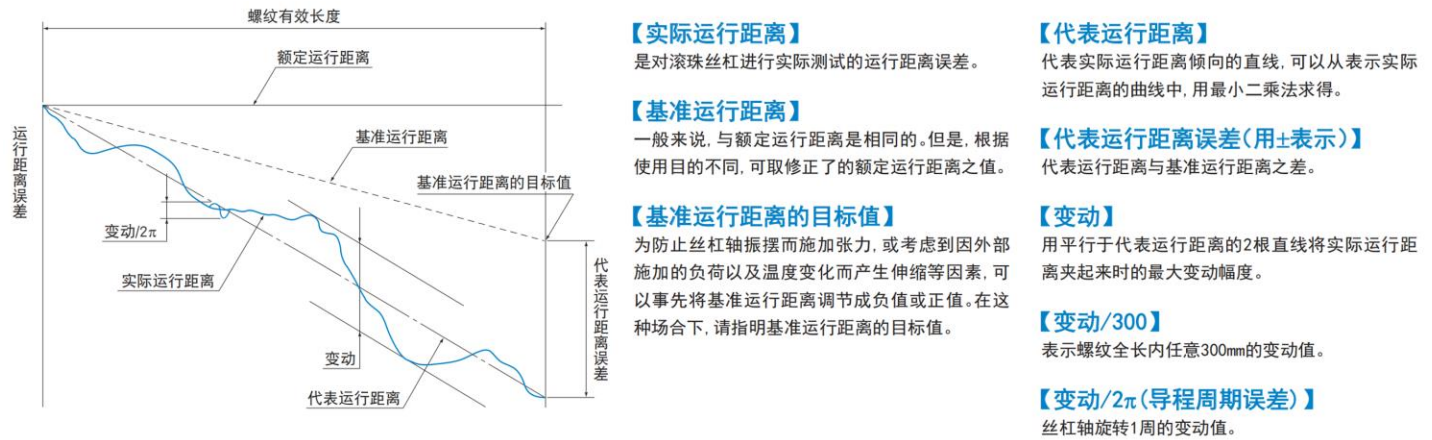
来源: 《滚珠丝杠副 第三部分: 验收条件和验收检验》, 国金证券研究所

丝杠的精度指标包括导程精度、轴向间隙、安装部精度等, 其中导程精度是衡量丝杠精度



关键指标，导程是指丝杠旋转一周螺母所移动的距离，导程精度反应了丝杠实际导程和理论导程之间的偏差程度。

图表 10：导程精度是衡量丝杠精度的关键指标



来源：THK 官网，国金证券研究所

以 JIS B 1192 (ISO 3408) 精度标准为例，同样精度等级的丝杠在螺纹部有效长度不同的情况下导程精度的容许值也不同。

图表 11：同样精度等级的丝杠在螺纹部有效长度不同的情况下导程精度的容许值也不同

精度等级	精密滚珠丝杠												轧制滚珠丝杠		
	C0		C1		C2		C3		C5		C7	C8	C10		
	大于	小于等于	代表运行距离误差	变动	代表运行距离误差	变动	代表运行距离误差	变动	代表运行距离误差	变动	运行距离误差	运行距离误差	运行距离误差		
—	100	3	3	3.5	5	5	7	8	8	18	18				
100	200	3.5	3	4.5	5	7	7	10	8	20	18				
200	315	4	3.5	6	5	8	7	12	8	23	18				
315	400	5	3.5	7	5	9	7	13	10	25	20				
400	500	6	4	8	5	10	7	15	10	27	20				
500	630	6	4	9	6	11	8	16	12	30	23				
630	800	7	5	10	7	13	9	18	13	35	25				
800	1000	8	6	11	8	15	10	21	15	40	27				
1000	1250	9	6	13	9	18	11	24	16	46	30	±50/300mm	±100/300mm	±210/300mm	
1250	1600	11	7	15	10	21	13	29	18	54	35				
1600	2000	—	—	18	11	25	15	35	21	65	40				
2000	2500	—	—	22	13	30	18	41	24	77	46				
2500	3150	—	—	26	15	36	21	50	29	93	54				
3150	4000	—	—	30	18	44	25	60	35	115	65				
4000	5000	—	—	—	—	52	30	72	41	140	77				
5000	6300	—	—	—	—	65	36	90	50	170	93				
6300	8000	—	—	—	—	—	—	110	60	210	115				
8000	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	260	140				

来源：THK 官网，国金证券研究所

注：螺纹有效长度单位为 mm，误差单位为 μm

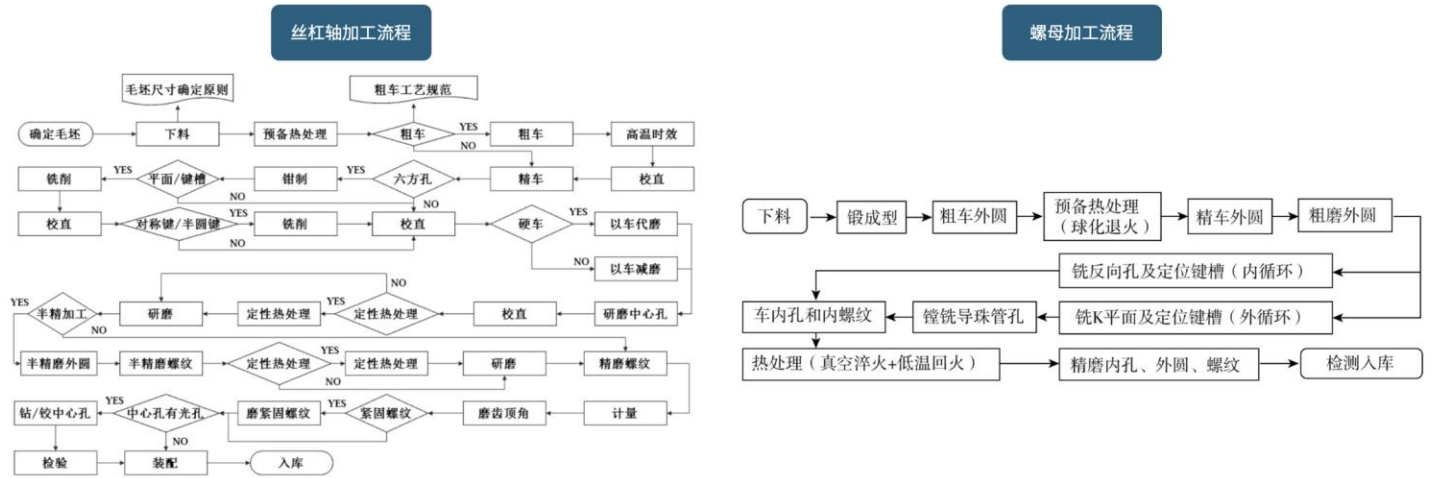
2.丝杠利润率可能“超预期”：丝杠制造困难重重，预计高壁垒带来较高利润率

丝杠加工流程长工艺复杂，材料、热处理、设计、粗精加工、检测环环相扣涉及大量“Know How”，以丝杠龙头中国台湾上银科技作为参考，上银科技 21 至 23 年综合毛利率分别为 36%/36.55%/31.07%（同时包含了直线导轨、工业机器人等产品，单看滚珠丝杠毛利率或



更高), 我们认为能够实现突破的中国大陆丝杠头部企业后续也有望实现较高利润率。

图表12: 丝杠的加工流程较长, 材料、热处理、设计、粗精加工、检测环环相扣涉及大量“Know How”



来源: 《高性能滚珠丝杠副加工工艺分析研究与 CAPP 系统的开发》, 国金证券研究所

2.1 第一难: 材料/热处理工艺

要实现高精度、高刚度、长寿命丝杠的制造, 材料的选用以及配套的热处理工艺至关重要。最基础的丝杠制造材料为 GCr15 高碳铬轴承钢, 其典型化学成分为 1%C、1.5%Cr, 采用高碳铬合金体系, 约 0.5%的 C 固溶基体产生固溶强化, 以获得 58HRC 以上的高硬度, 满足轴承高承载和高接触疲劳性能要求, 剩余的 C 与 Fe 和部分 Cr 结合生成 (Fe, Cr)3C 碳化物弥散分布于基体上满足轴承耐磨性的需求。Cr 部分形成碳化物以外, 其余固溶于基体当中, 提高轴承钢的淬透性和耐蚀性能。

图表13: 钢材不同的化学成分会对性能产生较大影响

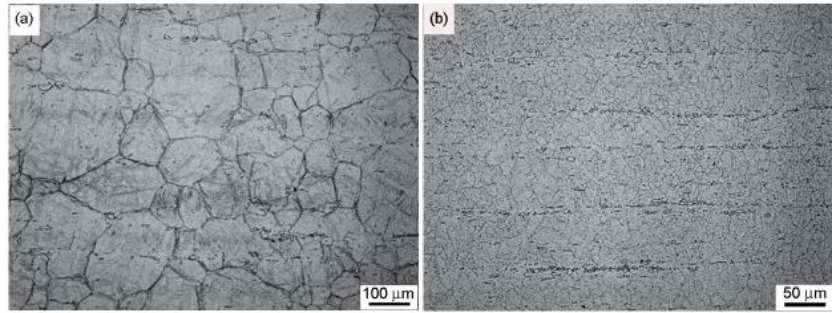
轴承钢迭代	特性	主要材料	材料性能
第一代	常温 ($\leq 150^{\circ}\text{C}$)	GCr15	高硬度, 耐磨性
		9Cr18 (Mo)	高硬度, 耐腐蚀性
		G20CrNi2Mo	抗冲击性
		42CrMo, G55Mn	强度和韧性兼具
第二代	高温 ($\leq 350^{\circ}\text{C}$)	8Cr4Mo4V	高硬度, 高耐磨性, 耐高温性
		G115Cr14Mo4V	高硬度, 耐高温性, 耐腐蚀性
第三代	高温和耐腐蚀性 ($350\sim 500^{\circ}\text{C}$)	G13Cr4Mo4Ni4V	耐高温性, 抗冲击性
		G13Cr14Co12Mo5Ni2	高强度和韧性, 耐高温性, 耐腐蚀性
第四代	轻质材料, 密度 $\rho \leq 6.7\text{ g/cm}^3$	G30Cr15MoN 60NiTi, GCr15Al	高硬度, 高耐腐蚀性 低密度, 耐高温性, 高耐腐蚀性

来源: 《滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向》, 国金证券研究所

除了材料化学成分的区别外, 热处理工艺也会对丝杠的最终性能产生较大影响, 热处理的目的是获得细小均匀的集体组织和析出相, 经过正火、深冷、回火、淬火等热处理工艺获得内外均匀一致的马氏体、残留碳化物等第二相和少量残余奥氏体等的组织状态。



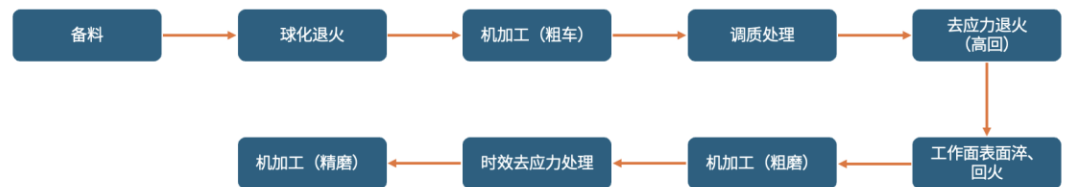
图表 14: 新型热处理工艺后的 M50 钢组织得到大幅度细化



来源:《滚动轴承钢冶金质量与疲劳性能现状及高端轴承钢发展方向》, 国金证券研究所

在丝杠的加工过程中通常会经过多次热处理, 涉及了冷热工序与加工的配合、淬火加热温度、设备选择等大量“know how”。

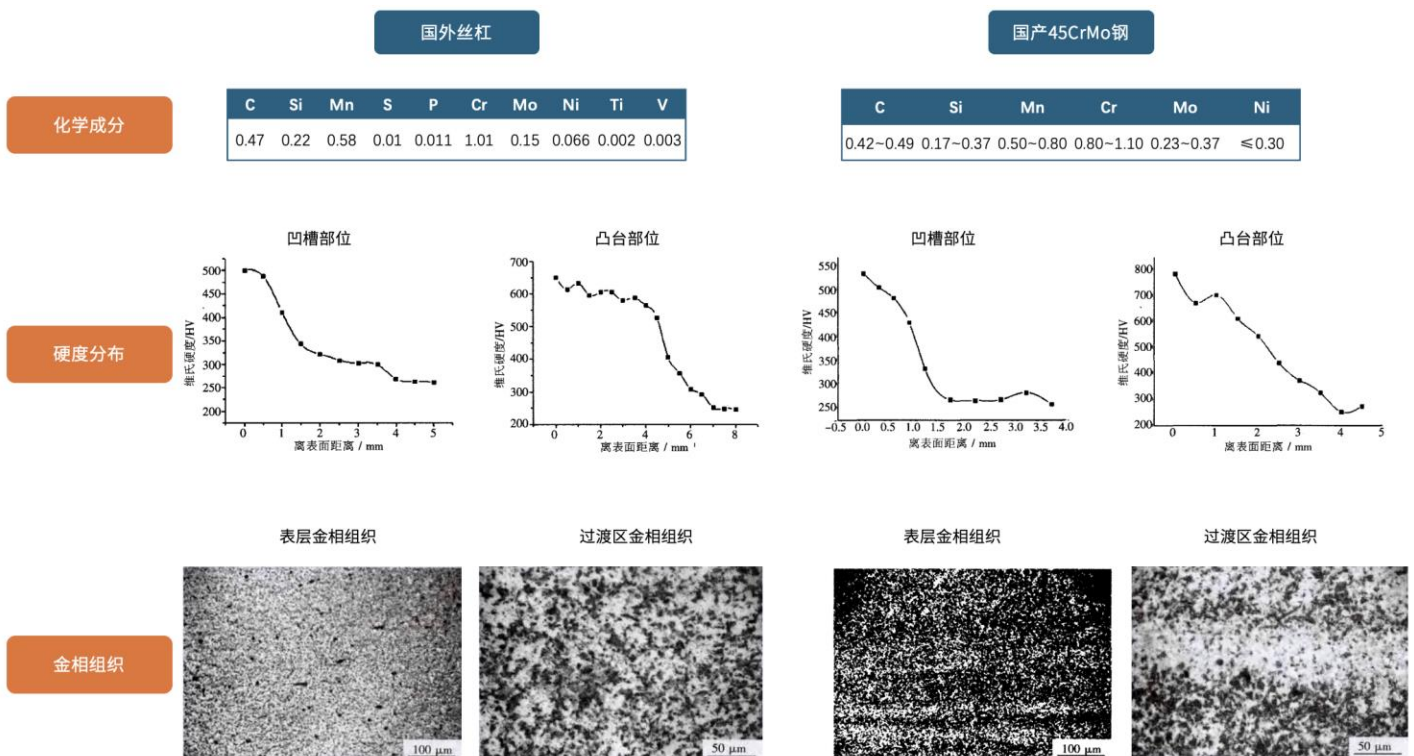
图表 15: 丝杠加工过程会经过多次热处理



来源:《滚珠丝杠的选材及热处理工艺分析》, 国金证券研究所

从《国产 Cr / Mo 钢滚珠丝杠与国外同类产品的质量分析》中的案例看, 其选取的国外丝杠和国产丝杠在化学成分基本类似的情况下, 国外丝杠由于硬度梯度分布更合理、金相组织更均匀, 整体性能优于国产丝杠。材料升级和热处理工艺优化是实现国产替代必不可少的一环。

图表 16: 材料升级和热处理工艺优化是实现国产替代必不可少的一环

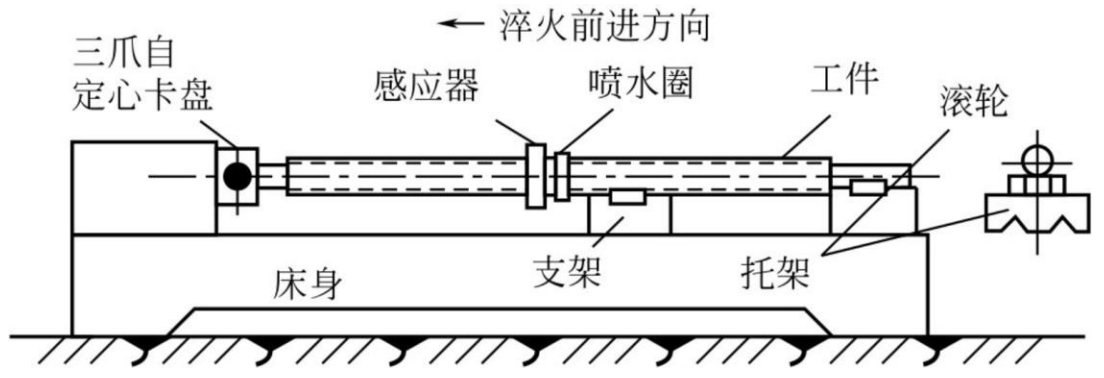




来源：《国产 Cr / Mo 钢滚珠丝杠与国外同类产品的质量分析》，国金证券研究所

感应淬火是改善丝杠机械性能最有效的途径之一，可以控制加热深度还具有加热速度快、节能、环保及成本低等优点。

图表 17：丝杠中频感应淬火示意

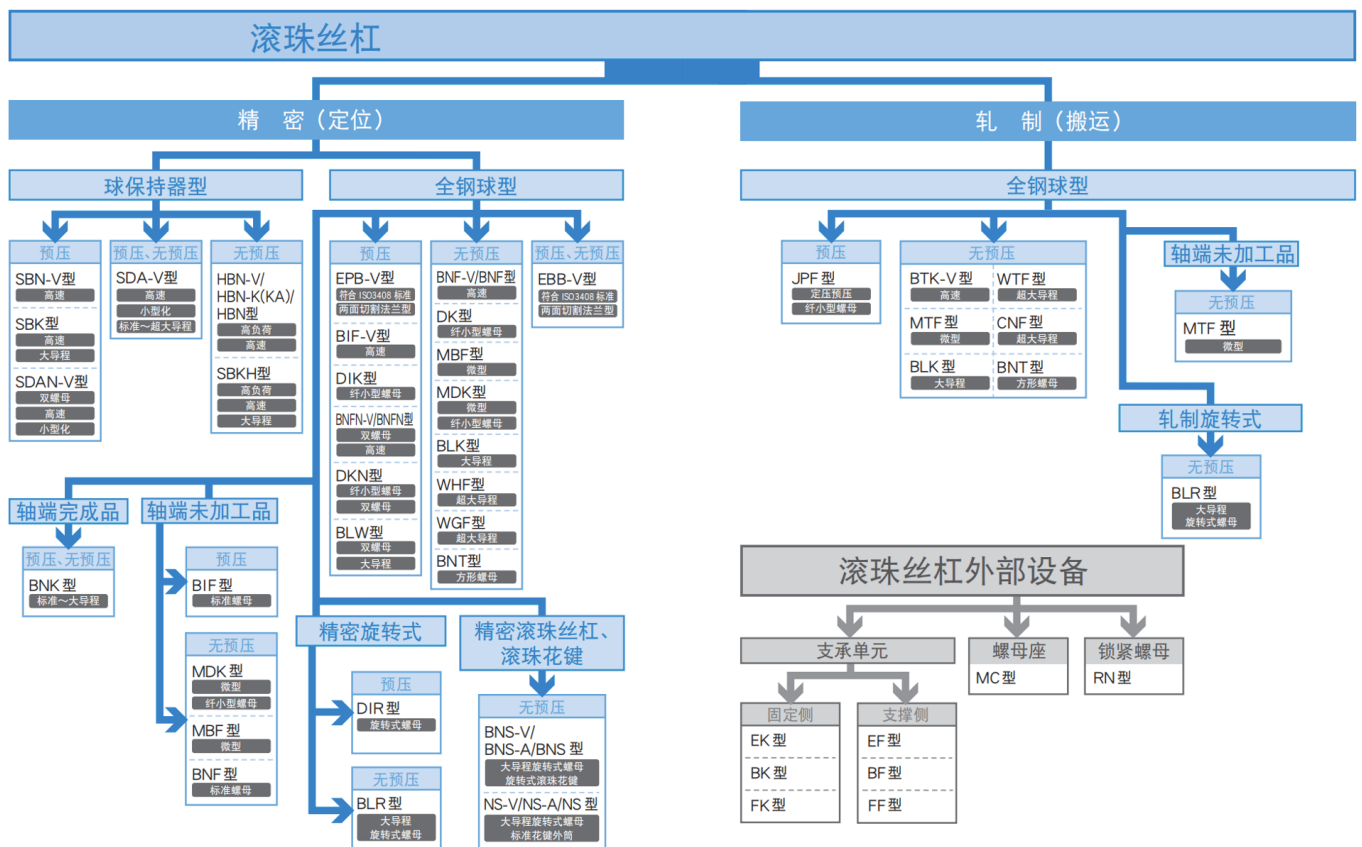


来源：《典型零件热处理工艺与规范下》，国金证券研究所

2.2 第二难：设计

丝杠是一个多 SKU 的产品，其不同型号的区别一方面来自于具体应用设备的负载、精度、速度、行程等要求，一方面也来自于丝杠的类型、型面设计等。

图表 18：丝杠是多 SKU 产品，采购时有较多考虑因素

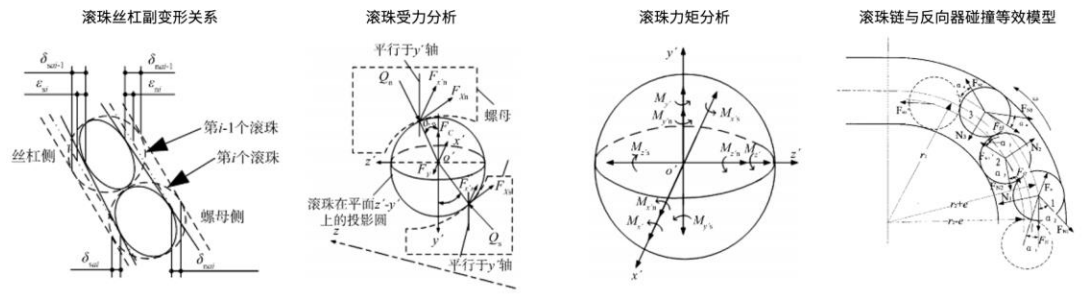


来源：THK 官网，国金证券研究所

以滚珠丝杠为例，滚珠丝杠的公称直径、滚珠体的直径、螺旋升角、滚珠丝杠导程、工作滚珠数、工作滚珠圈数与列数、滚珠螺母外径、滚珠螺母螺底径、滚珠丝杠螺底径、滚珠螺母长度、滚珠丝杠长度等结构尺寸都可作为设计变量。



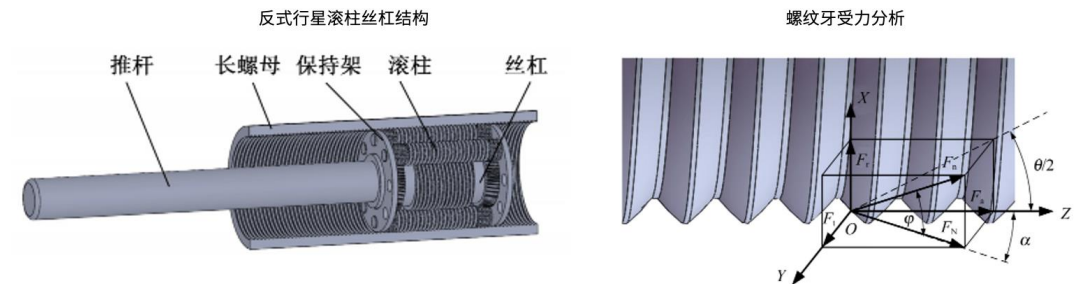
图表19: 滚珠丝杠的变形关系和受力分析较为复杂, 需要考虑的设计变量较多



来源: 《基于滚珠丝杠副流畅性的滚珠返向器型线优化设计》, 《基于滚珠丝杠副滚珠载荷分布的摩擦力矩计算方法研究》, 国金证券研究所

行星滚柱丝杠主要通过螺纹牙啮合来进行传动, 其螺纹牙的设计对丝杠的性能也会造成较大影响。

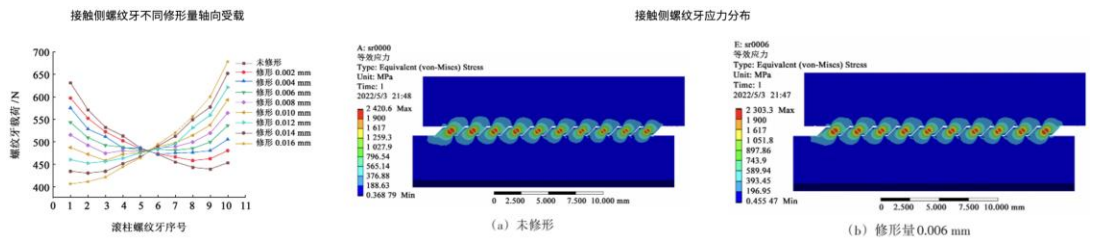
图表20: 行星滚珠丝杠的螺纹牙设计也会对性能产生较大影响



来源: 《反向式行星滚柱丝杠副的螺纹牙修形设计》, 国金证券研究所

在设计上的小修改就会导致丝杠的性能出现较大变化。

图表21: 不同的修形量会让螺纹牙载荷分布造成较大影响

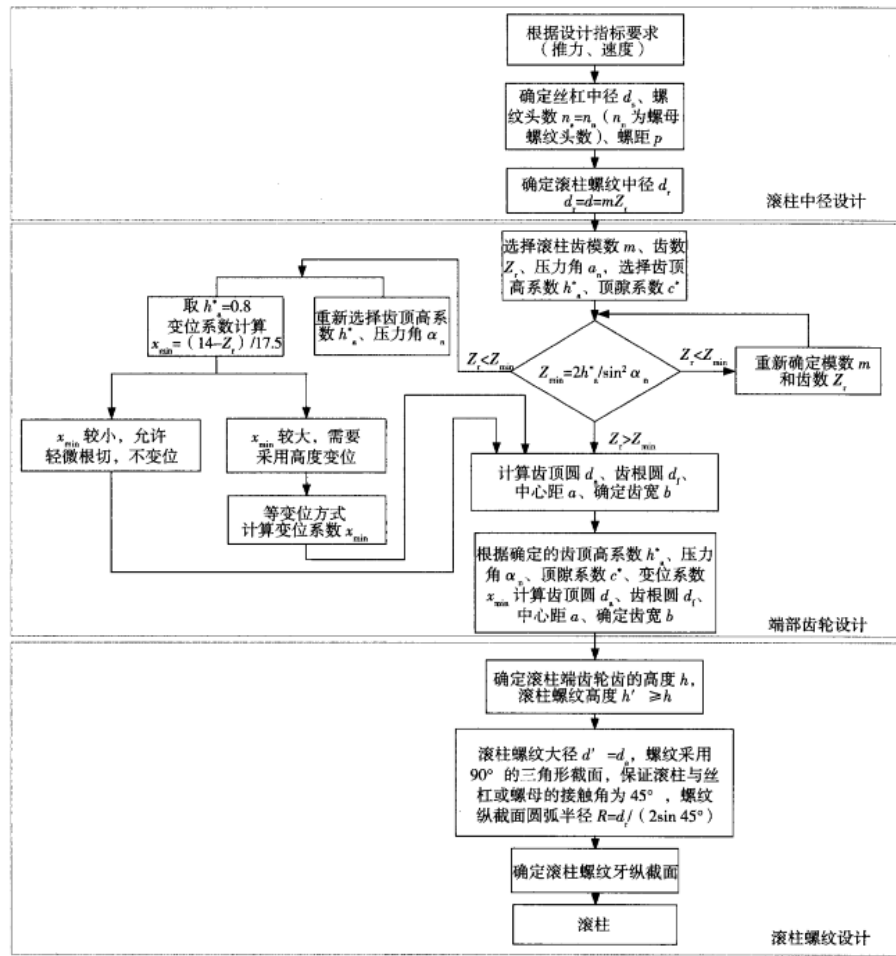


来源: 《反向式行星滚柱丝杠副的螺纹牙修形设计》, 国金证券研究所

根据《行星滚珠丝杠副滚柱的设计方法与虚拟装配》信息, 行星滚柱丝杠的设计流程较为复杂。



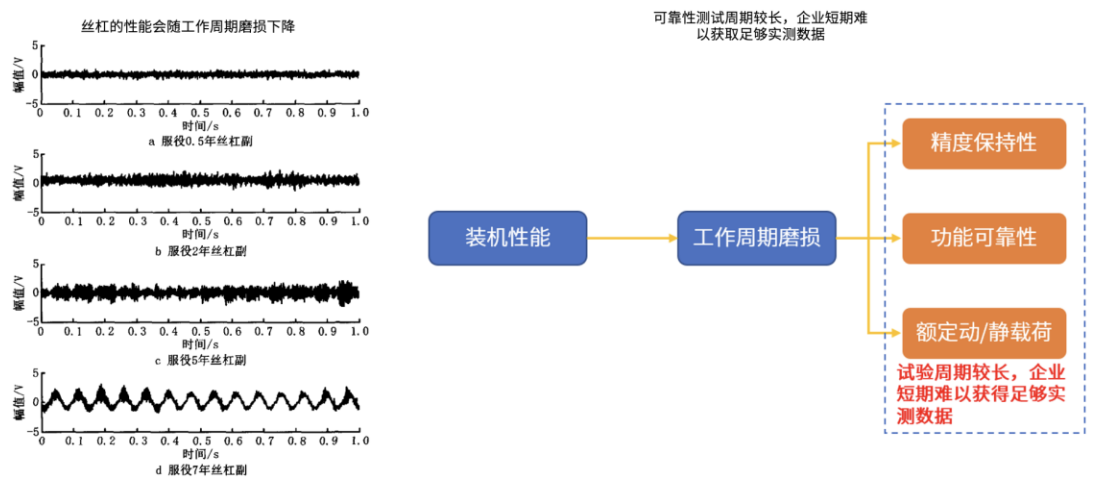
图表22：行星滚柱丝杠的设计较为复杂



来源：《行星滚柱丝杠副滚柱的设计方法与虚拟装配》，国金证券研究所

相比出厂精度等指标，丝杠使用时的动态特性、精度保持性等指标更加重要，我们认为如何构筑一套“设计-制造-检测”的闭环正向研发的体系来实现丝杠性能优化更加困难，主要由于试验时间往往需要长达数年时间。

图表23：通过正向设计实现丝杠动态特性、寿命优化难度较高



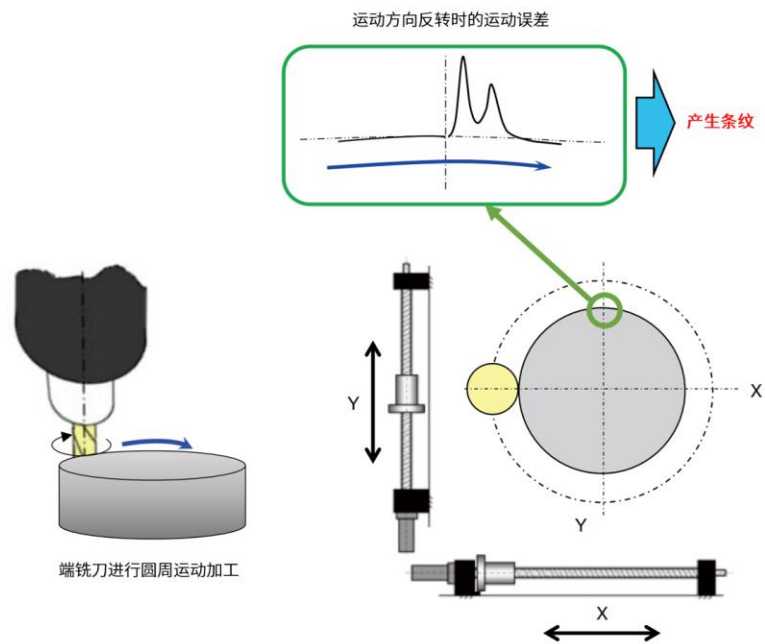
来源：《数控机床滚珠丝杠副性能退化评估技术》，《滚动功能部件成套测评方法与装备及性能提升关键技术》，国金证券研究所

例如机床行业在丝杠使用时会出现的象限突起问题，当圆周运动的象限切换时（即两个滚



珠丝杠的驱动方向切换)，滚珠丝杠的摩擦特性会发生变化，由于这种象限突起，在加工表面上会出现类似条纹的图案，导致加工表面质量恶化。

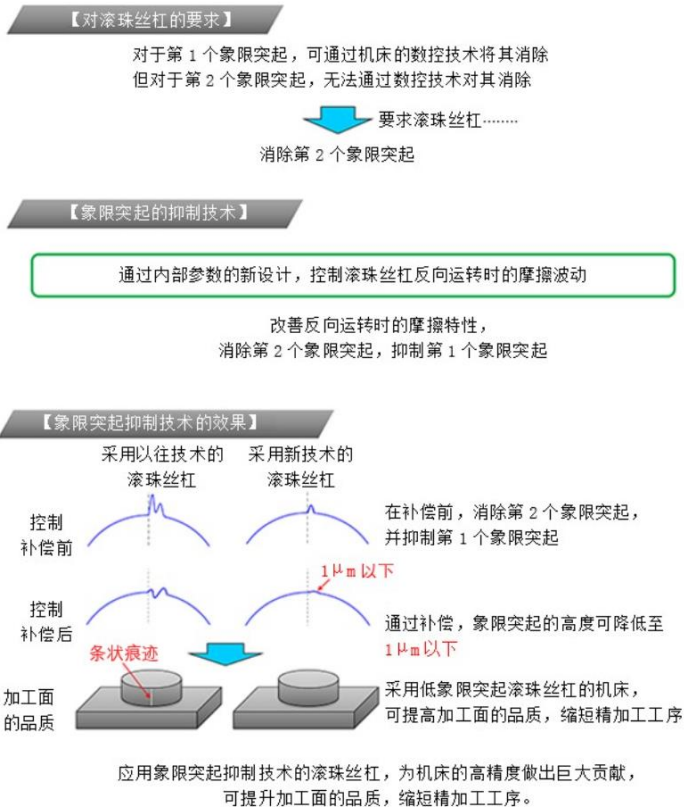
图表24：象限突起会导致加工过程出现条纹



来源：NSK 官网，国金证券研究所

NSK 在 2021 年推出了抑制插补象限突起的滚珠丝杠技术，依靠 NSK 独有的摩擦控制技术 与高精度评价技术，大幅降低了滚珠丝杠反向运转时的摩擦波动。

图表25：NSK2021年推出了抑制插补象限突起的滚珠丝杠技术



来源：NSK 官网，国金证券研究所

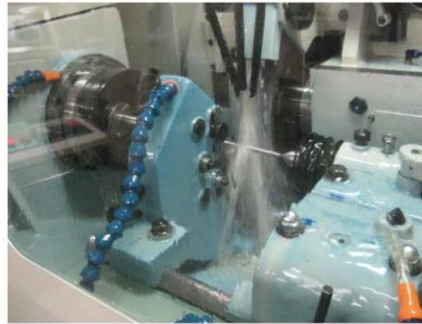


2.3 第三难：粗精加工

滚珠丝杠加工一般分为磨削加工与冷轧加工，冷轧加工通过冷加工工艺模具制造，批量生产后成本低，但是通常精度控制有限；磨削加工通过热处理、车削、磨削等几十道工序逐一完成，可用于给高精度设备作为定位部件。

根据 KSS 信息，C5 以上精度等级的滚珠丝杠一般采用研磨加工(精密滚珠丝杠)，C7、C10 级的滚珠丝杠则采用冷轧加工。对于无滚丝模(冷轧加工模具)的型号，也可采用研磨加工生产 C7、C10 级产品。

图表26：丝杠加工一般分别磨削加工和冷轧加工



通过螺纹磨床进行的高精度螺纹槽加工



通过滚丝模进行的冷轧加工

来源：KSS 综合产品名录，国金证券研究所

磨削滚珠丝杠是按照基准统一原则，以两端中心孔为加工工艺工序基准，通过热处理、车削、磨削等几十道工序逐一完成，工艺较为复杂。

图表27：磨削滚珠丝杠加工工艺复杂

序号	工艺内容	序号	工艺内容
1	下料	12	粗磨 90° v 形槽
2	球化退火热处理并检验校直	13	磁力探伤
3	加工端面，钻中心孔	14	时效处理并检验
4	粗车	15	研磨中心孔
5	高温时效并检验	16	半精磨滚道
6	加工端面，修研中心孔	17	低温时效处理并检验
7	半精车	18	铣键槽
8	铣	19	磨端部螺纹
9	粗磨	20	研磨中心孔
10	工作表面(滚道)与加工基准(中心孔)淬、回火--检验	21	精磨滚道，全检
11	研磨中心孔	22	装配--跑合--检验--防锈包装--检验--入库

来源：《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》，国金证券研究所

面向不同的下游行业丝杠会有不同的精度等级，例如在对精度要求高的工业母机行业丝杠最高可达到 C0 级。



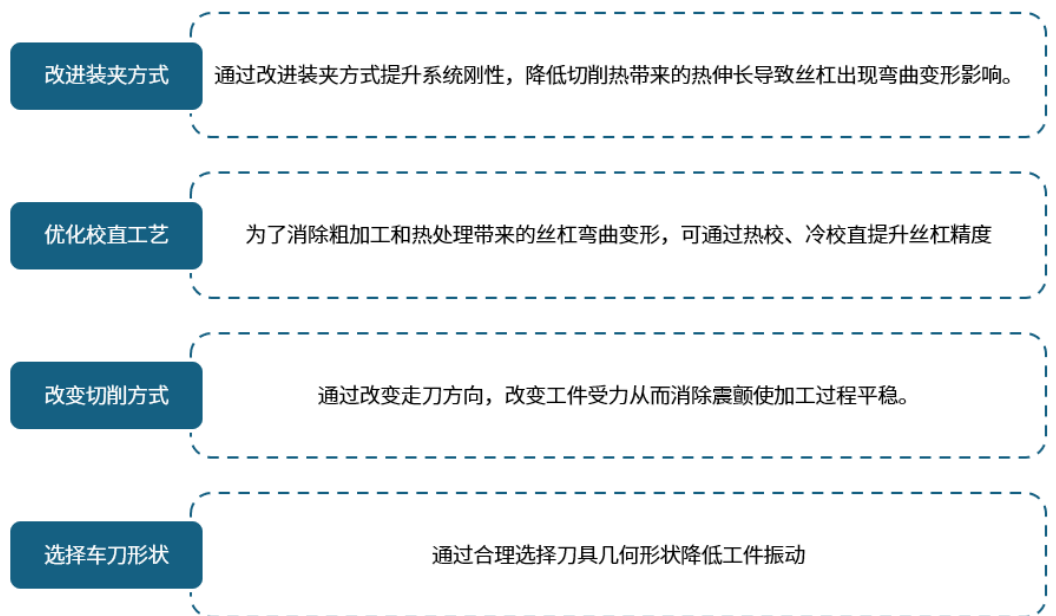
图表 28：不同下游对丝杠精度等级需求不同

用途	NC 机床													用途	半导体/印刷板制造装置				工业用机器人				原子能															
	车床	铣床	加工中心	铣床	坐标镗床	磨床	电火花加工机械	电火花加工机械	线切割机	冲床	激光加工机械	木工机械	通用机械·专用机械		曝光装置	化学处理装置	焊接机	探测器	电子零件插件机	印刷板穿孔机	正交坐标型	其他	垂直多关节型	其他	圆筒坐标型	冶金设备机械	注塑机	三坐标量仪	办公设备	图像处理装置	控制棒	机械式镗床	飞机					
轴	X	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z	XY	Z		
精度等级	C0	○											○																									
	C1	○											○																									
	C2	○											○																									
	C3	○											○																									
	C5	○											○																									
	C7	○											○																									
	C10	○											○																									

来源：NSK 官网，国金证券研究所

粗加工环节难度相对较低，但也有较大优化空间。以常见的粗车加工为例，优化空间主要在改进装夹方式、优化切削方式、车刀几何形状选择等。

图表 29：丝杠粗车加工改进路线



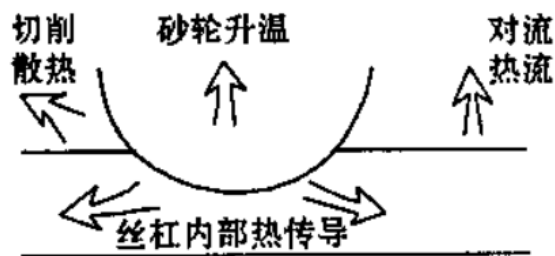
来源：《浅谈细长丝杠车削方法的改进》，国金证券研究所

精加工环节则有较多加工难点：

1) 热形变误差

丝杠加工误差的主要影响因素为热变形和残余应力，在磨制丝杠加工中产生的磨削热有 60%-95% 被传入被磨丝杠中，需要针对实际加工数据进行热形变计算，需要考虑热源特征、热源移动性、热量传导特征等多种因素，优化难度较高。

图表 30：磨削丝杠会导致出现热形变



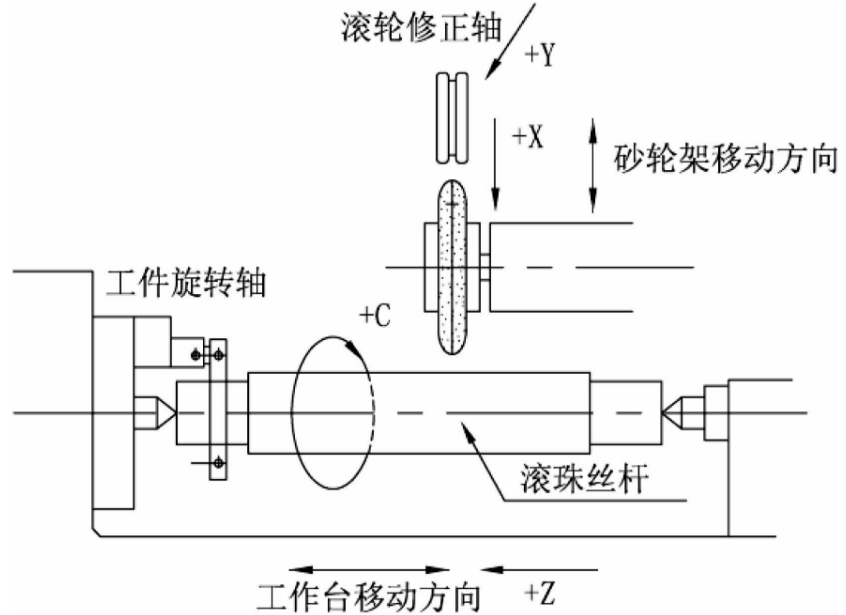
来源：《精密丝杠加工误差数学模型分析》，国金证券研究所



2) 滚道加工

不管是螺母还是丝杠轴，除使用内圆磨床、外圆磨床进行加工外，难点都在滚道的加工，其中丝杠轴的滚道加工主要使用外螺纹磨床进行外圆磨削加工。

图表31：外螺纹磨床加工丝杠轴示意



来源：《数控系统在外螺纹磨床控制上的功能应用》，国金证券研究所

相比普通轴类零件的外圆磨削，丝杠滚道表面的几何复杂性增加了高精度磨削难度，同时即使能够满足精度指标，砂轮粒度、砂轮速度、丝杠速度等工艺参数的选择也会对丝杠的最终性能产生较大影响。

图表32：磨削过程有较多因素会影响最终丝杠性能

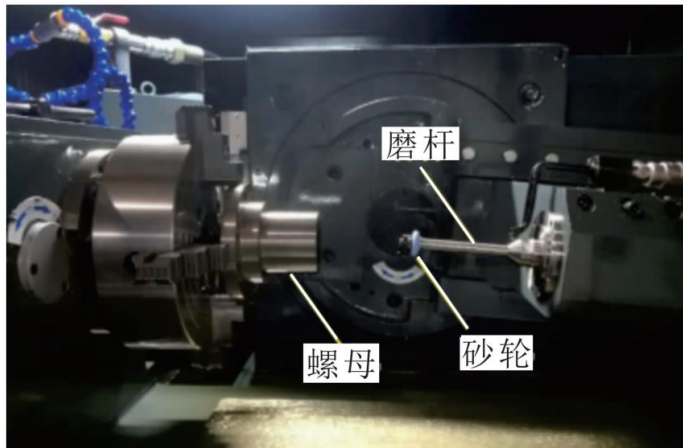
实验编号	砂轮粒度	砂轮速度 ($m \cdot min^{-1}$)	丝杠速度 ($mm \cdot min^{-1}$)	磨削深度 (mm)	滚道表面粗糙度 Ra (μm)
1	80K	25	64	0.02	0.6235
2	80J	30	64	0.025	0.7023
3	100K	35	64	0.03	0.6012
4	80J	25	80	0.03	0.5847
5	100K	30	80	0.02	0.521
6	80K	35	80	0.025	0.4011
7	100K	25	96	0.025	0.5831
8	80K	30	96	0.03	0.4256
9	80J	35	96	0.02	0.3218

来源：《滚珠丝杠精密磨削表面加工质量及其试验研究》，国金证券研究所

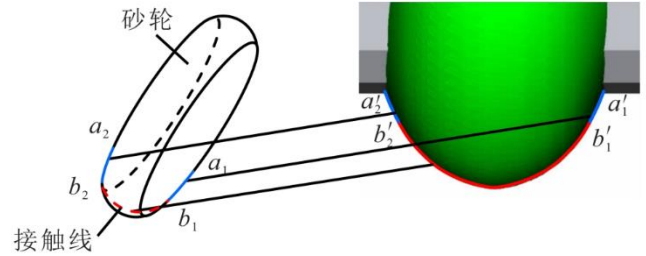
螺母的内滚道加工难度更高，主要通过磨杆带动砂轮旋转，由砂轮轴线相对螺母中心线成螺旋升角进行安装，对工件进行磨削。在内滚道加工中由于受到螺母直径限制（如果是更小的丝杠难度更高），砂轮的尺寸受限，砂轮需沿滚道进行曲面加工，加工难度提升且效率降低，尤其和外圆磨中通过采用大砂轮进行成形磨削相比。



图表33：丝杠螺母内螺纹加工方式



图表34：砂轮回转面与滚道螺旋面接触对应关系

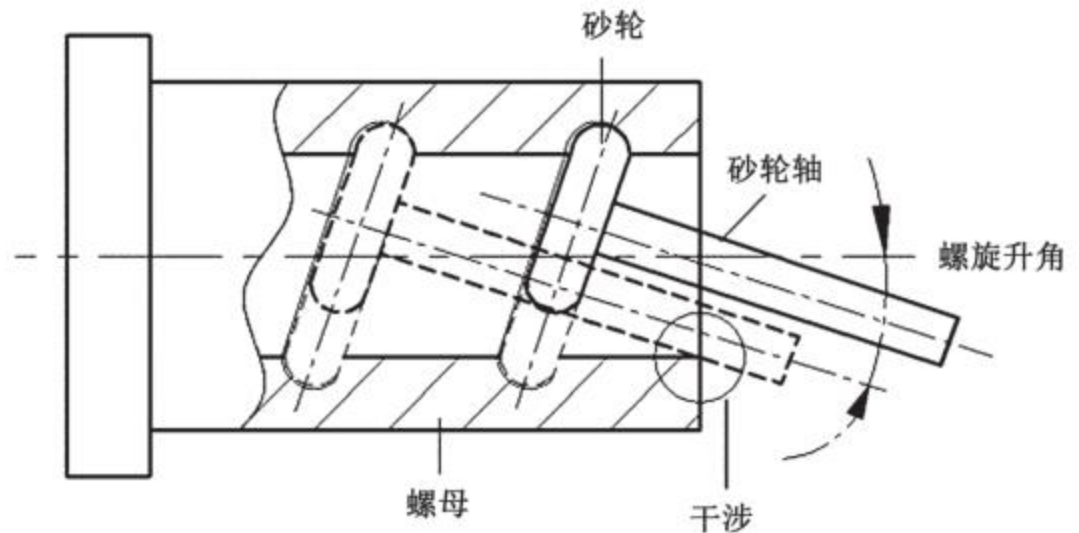


来源：《大导程滚珠螺母内滚道接触区磨削分析》，国金证券研究所

来源：《大导程滚珠螺母内滚道接触区磨削分析》，国金证券研究所

如果是反式行星滚柱丝杠，由于丝杠螺母较长，在加工的过程中会发生加工干涉问题，预计在设备上需要进行一定调整，需要通过调整砂轮直径、调整磨杆直径（需要综合考虑磨杆刚度变化）避免加工干涉问题。

图表35：反式行星滚柱丝杠螺母内螺纹加工可能出现加工干涉，需针对设备、砂轮等进行优化



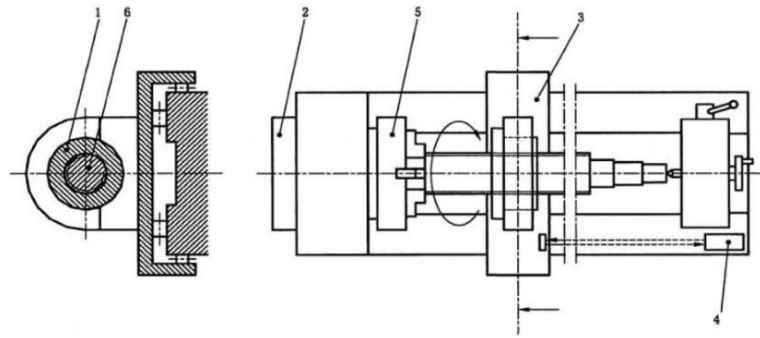
来源：《一种加工大导程螺母内滚道方法的研究》，国金证券研究所

2.4 第四难：检测、试验平台

要实现丝杠的高精度加工，配套的检测能力必不可少。根据 GB/T 17587.1-2017《滚珠丝杠副 第三部分：验收条件和验收检验》信息，丝杠的精度等级确定方法主要包括行程补偿值、目标行程公差、有效行程内允许的行程变动量等，有一套基本测量原理。



图表36：丝杠行程公差检测基本测量原理



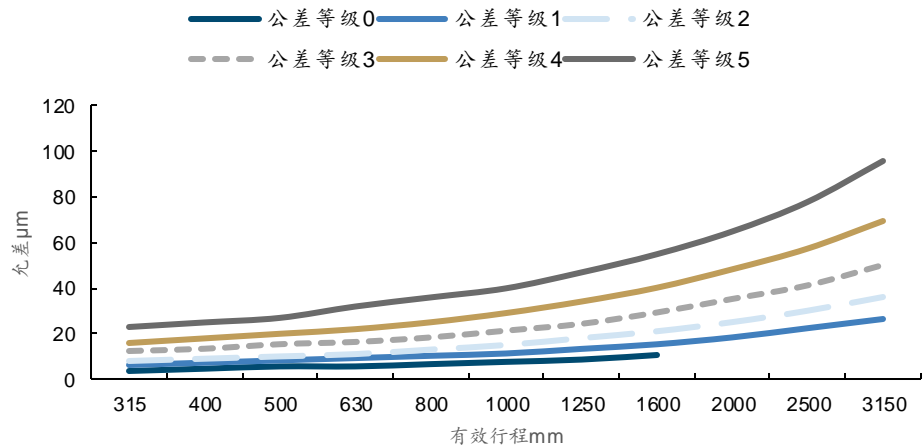
说明：
1——滚珠螺母；
2——角度测量仪(允许误差 $\leq 10''$)；
3——测量架；
4——行程测量仪器(允许误差 $\leq 1\ \mu\text{m}$)；
5——夹紧装置(如卡盘),驱动；
6——滚珠丝杠。

来源：《滚珠丝杠副 第三部分：验收条件和验收检验》，国金证券研究所

1) 行程公差和变动量

在滚珠丝杠的有效行程内，允许存在一定量的目标行程公差，有效行程越大，丝杠的行程公差范围越大。

图表37：P型丝杠有效行程允差



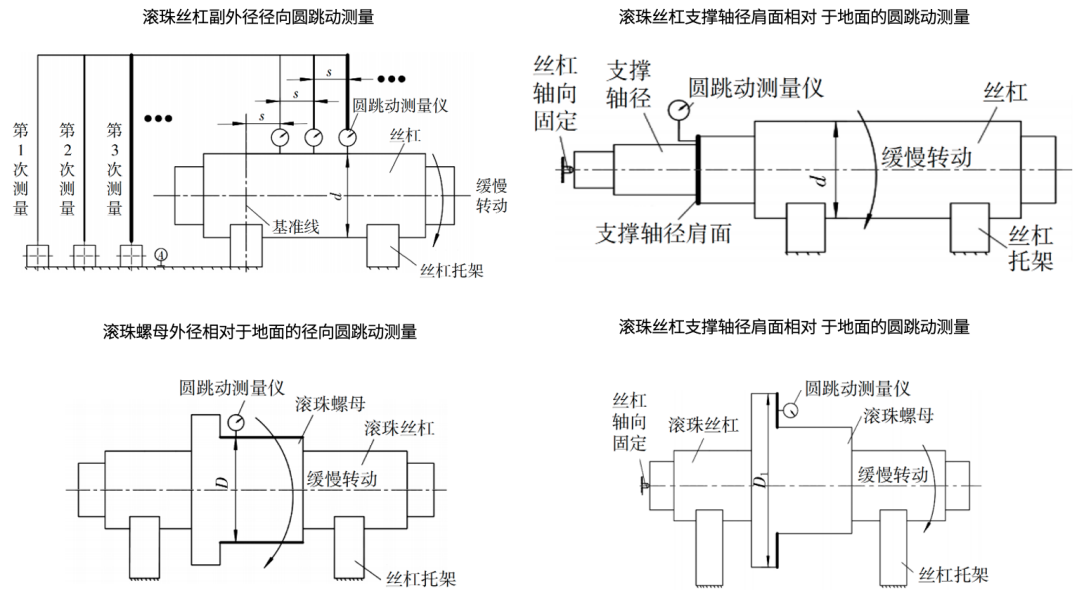
来源：《滚珠丝杠副 第三部分：验收条件和验收检验》，国金证券研究所

2) 圆跳动测量

跳动和位置公差主要检验丝杠在给定长度下的径向跳动，用于确定相比基准水平面的直线度，包含外径径向圆跳动测量、支撑轴肩端面圆跳动测量、螺母外径径向圆跳动测量、螺母安装端面圆跳动测量。



图表 38: 丝杠圆跳动误差测量方式



来源:《中日数控机床滚珠丝杠副精度等级标准差异现状分析》, 国金证券研究所

除了完成出厂静态精度指标检测外,通过构筑成套检测评价装备体系来实现前文提到的正向研发循环也是核心壁垒之一:

1) 可靠性评测技术

丝杠在满足出厂精度指标的情况下,在用户端更多体现的是精度保持性、功能可靠性,而这方面的数据测试通常需要数年时间,如何通过开发成套测试装备来实现加速试验以评估丝杠实际性能是一个难点。

图表 39: 需要通过成套测试装备来实现可靠性评测,以解决测试时间较长的问题

	术语	型谱参数	可靠性及额定动载荷				精度及性能检测		刚性及额定静载荷		产品应用维护		
			基本	扩充	理论计算	试验测试			精度测试	性能测试		理论计算	试验测试
						参数与安装连接尺寸	额定动载荷	功能可靠性					
滚珠丝杠副	滚珠丝杠副	1	1	3	1	1	1	1	1	1	2	1	
	高速滚珠丝杠副												
滚动直线导轨副	滚珠直线导轨副	1	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	
	高速直线导轨副												
	滚柱直线导轨副												

“04专项”支持下标准评价体系逐步健全

可靠性评测成套试验装置被开发出来

滚珠丝杠副精度保持性试验台、可靠性试验台、寿命试验台、综合性能试验台、滚动直线导轨副精度保持性试验台、可靠性试验台、寿命试验台、综合性能试验台、导轨副阻尼器可靠性试验台和钳制器可靠性试验台等

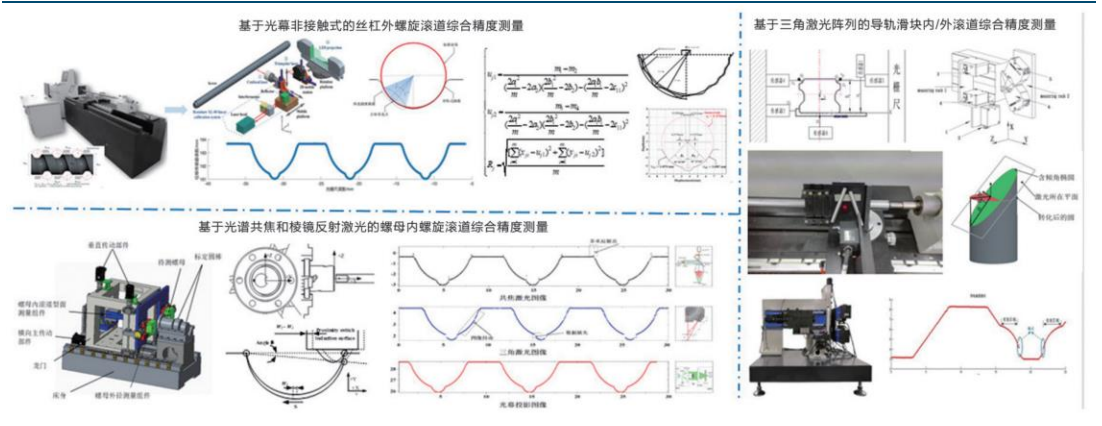
来源:《滚动功能部件成套测评方法与装备及性能提升关键技术》, 国金证券研究所

2) 内/外滚道型面精度与动态行程误差测量技术

内/外滚道型面精度与动态行程误差是影响滚动功能部件传动精度最核心的性能指标。只有深入开展滚道型面质量控制技术研究与能力提升,从设计、制造、测量等多方面控制,才能有针对性地提升丝杠的性能,提高产品的市场竞争力。



图40：丝杠内/外滚道综合精度非接触高精测量方法与装置

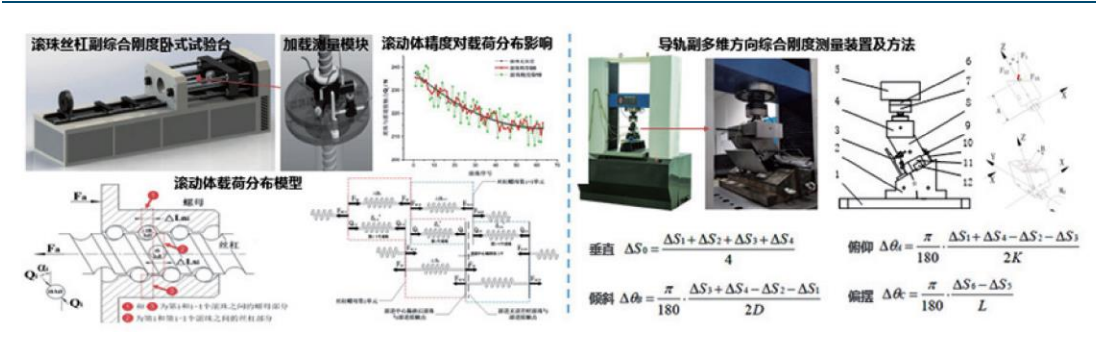


来源：《滚动功能部件成套评测方法与装备及性能提升关键技术》，国金证券研究所

3) 综合刚度高精高效测量方法和装备及高刚性设计技术

综合刚度是反映丝杠多维方向上承载能力的关键性能指标，通过有效检测手段实现高刚性产品设计优化能大幅改善产品的刚度值。

图41：综合刚度检测与建模

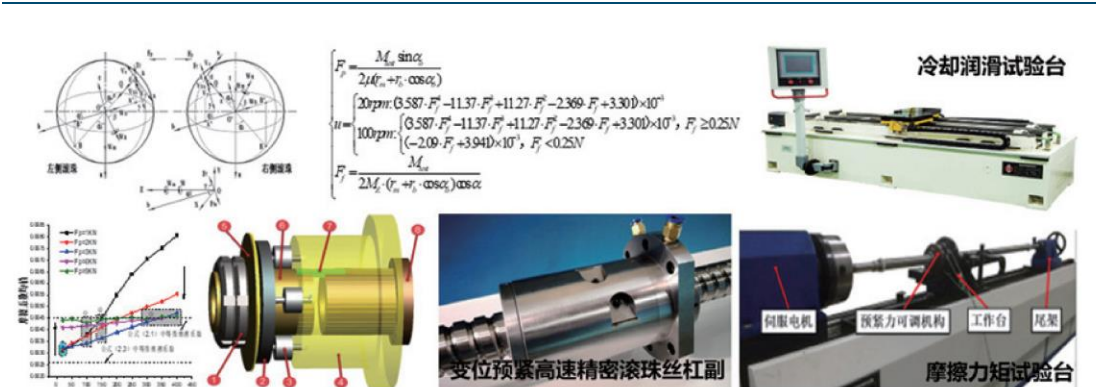


来源：《滚动功能部件成套评测方法与装备及性能提升关键技术》，国金证券研究所

4) 预紧力精确计算方法与高精装配技术

通过使用丝杠摩擦力矩和预紧力同步测量装置，可实现以预紧力精确调控为目标的丝杠高精装配。

图42：预紧力精确计算方法与高精装配技术



来源：《滚动功能部件成套评测方法与装备及性能提升关键技术》，国金证券研究所

2.5 第五难：降本

丝杠粗加工环节我们认为未来比拼的主要是成本控制，若能将以车代磨、旋风铣等工艺打磨成熟以提升粗加工效率和减少精加工工时，将带来显著的成本优势。



图表43: 丝杠粗加工有多重工艺

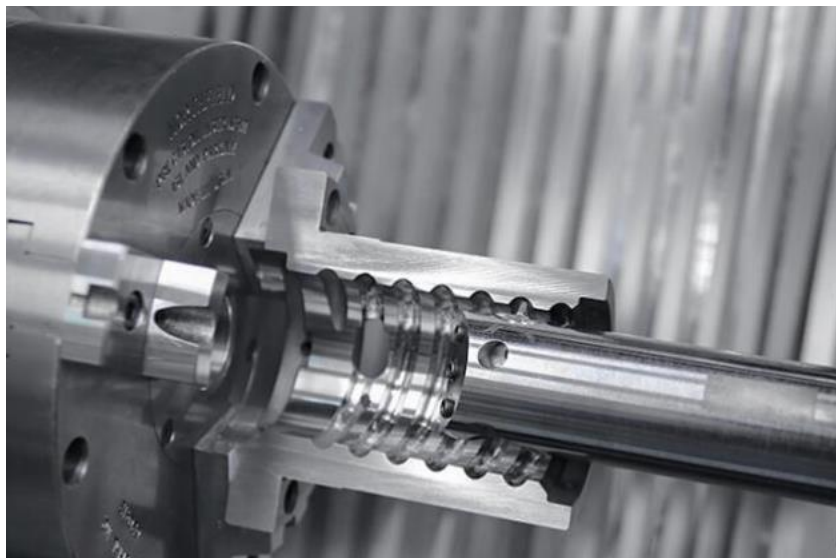
粗加工	设备与刀具	粗加工	生产效率	备注
砂轮磨削	丝杠磨床或开槽磨床	磨制 90° V 型槽	低	需要半精磨和精磨
硬车削	CBN 刀具及数控车床	车制 90° V 型槽 工作滚道一次	中	适于长度 1m、螺距 6mm 以下长径比小的滚珠丝杠
旋风铣削	CBN 刀具及数控车床	铣削成型, 加工达到半精磨精度	高	适于较长以及长径比大的滚珠丝杠

来源:《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》, 国金证券研究所

1) 以车代磨

以车代磨主要是通过采用高强度、高硬度、高耐磨性的刀具材料(金刚石、立方氮化硼等)在数控车床上进行高速切削加工, 实现高加工效率和低表面粗糙度, 以缩短磨削加工工时, 显著降低丝杠加工成本。

图表44: 丝杠螺母硬车削加工



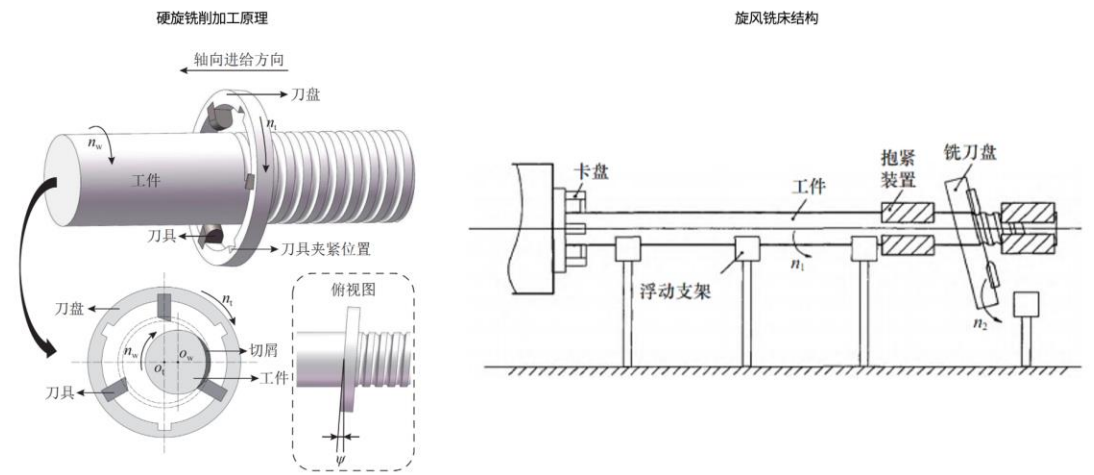
来源: 达诺巴特官网, 国金证券研究所

2) 旋风铣

旋风硬铣加工主要通过刀盘上的多把铣刀完成切削加工, 刀盘与工件同向旋转但刀盘转速更高, 让工件每旋转一周刀盘沿着工作轴线切削一个螺纹导程的距离, 与一般的铣削相比单位时间金属切削率大幅提高, 并且大部分热量被切屑带走, 可以得到与磨削相当甚至超过磨削的表面加工质量。



图表45：通过旋风铣加工可以显著提升粗加工效率，甚至缩短精加工工时



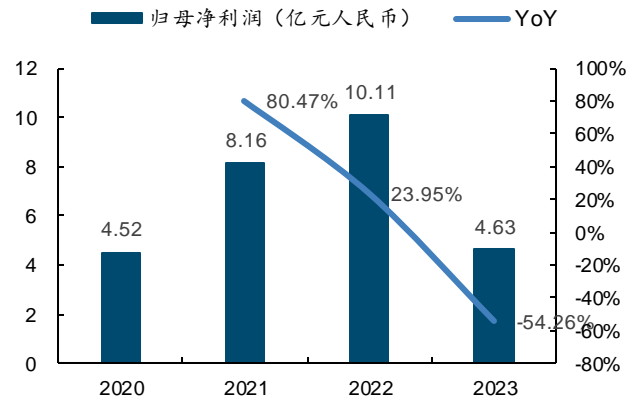
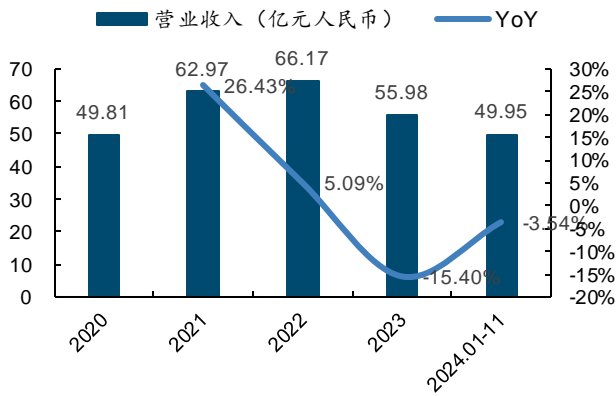
来源：《考虑材料形变的旋风铣削螺纹工件表面粗糙度建模》，《旋风硬铣削加工技术及其在精密滚珠丝杠加工中的应用》，国金证券研究所

2.6 对标中国台湾上银科技，中国大陆头部企业有望实现高毛利率

以丝杠龙头企业上银科技作为参考，23 年上银科技实现营业收入新台币 246.33 亿元，同比下降 16%，折合人民币约 55.98 亿元；实现归母净利润新台币 20.35 亿元，同比下降 54.57%，折合人民币约 4.63 亿元。23 年利润出现较大下降主要由于全球经济衰退制造业景气度较低影响，在 22 年的高点上银科技利润规模超过了 10 亿元人民币。

图表46：上银科技高点营收超过60亿元人民币

图表47：上银科技高点利润超过10亿元人民币



来源：上银科技官网，I find，国金证券研究所

来源：上银科技官网，I find，国金证券研究所

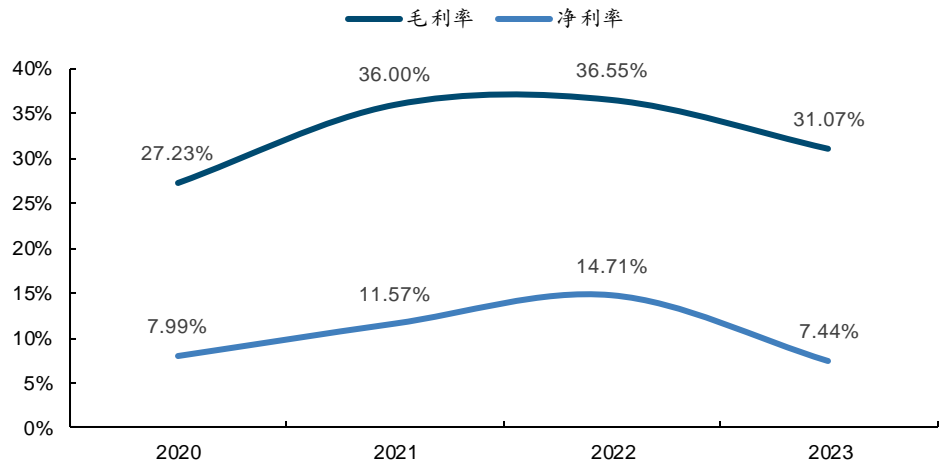
注：按照年平均汇率换算

注：按照年平均汇率换算

近年伴随制造业景气度变化上银科技净利率也出现较大波动，但毛利率始终保持了较高水平。



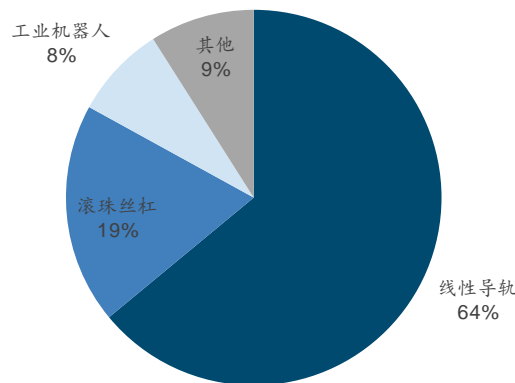
图表48：上银科技保持了较高毛利率



来源：上银科技官网，国金证券研究所

考虑上银科技滚珠丝杠 23 年收入占比为 19%，其余线性导轨、工业机器人毛利率预计低于滚珠丝杠，滚珠丝杠的单产品毛利率预计比综合毛利率更高。

图表49：上银科技 23 年收入结构



来源：上银科技官网，国金证券研究所

3.丝杠空间可能“超预期”：工业母机+人形机器人+汽车三大下游齐发力

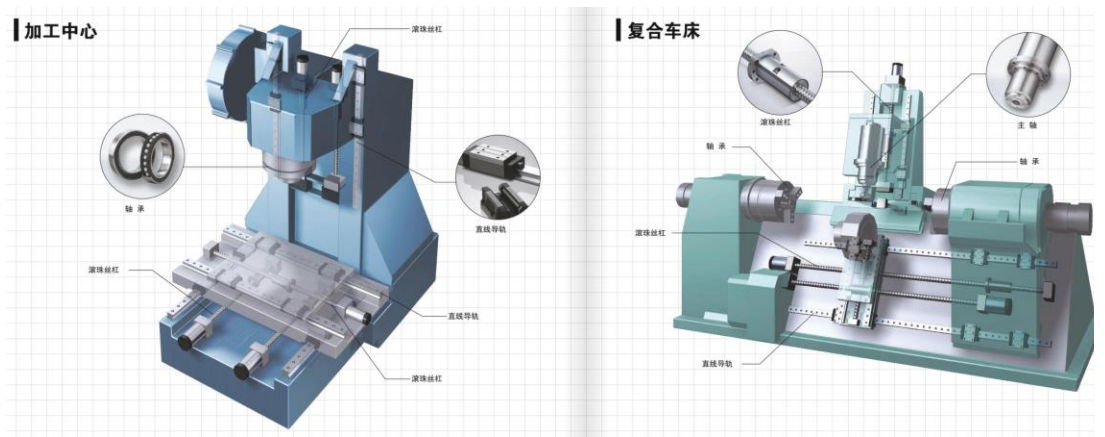
根据 IMARC 信息，全球精密滚珠丝杠 2024 年市场空间为 16 亿美元，预计到 2033 年市场空间达到 24 亿美元，期间复合增速 4.3%，主要看好医疗、航空航天、半导体等领域市场增长前景。我们认为除这些方向外，根据我们测算 23 年中国工业母机丝杠+导轨市场空间为 181.6 亿元人民币，国内企业占有率仅约 25%，有较大进口替代成长空间；人形机器人行业假设平均一台人形机器人采用 10 支行星滚柱丝杠，平均价格 800 元/支，在人形机器人达到百万台出货量时对应 80 亿元人民币潜在市场空间，具有爆发式成长潜力；汽车行业丝杠在线控转向、线控制动（刹车+驻车）、主动悬架等场景均有较好应用潜力，国内部分丝杠公司开发的汽车丝杠产品也已经完成了交样，25 年有望看到汽车丝杠进一步放量，未来也有较大成长空间。

3.1 工业母机：国产化率低，自主可控成长空间较大

丝杠与导轨配套使用，是数控机床传动和定位的关键零部件。伴随滚珠丝杠、伺服电机及控制单元性能提高，数控机床的进给系统中可去掉减速机构，直接用伺服电机与滚珠丝杠连接，一方面使整个系统结构简单，减少了产生误差的环节；一方面由于转动惯量减小，伺服特性亦有改善。



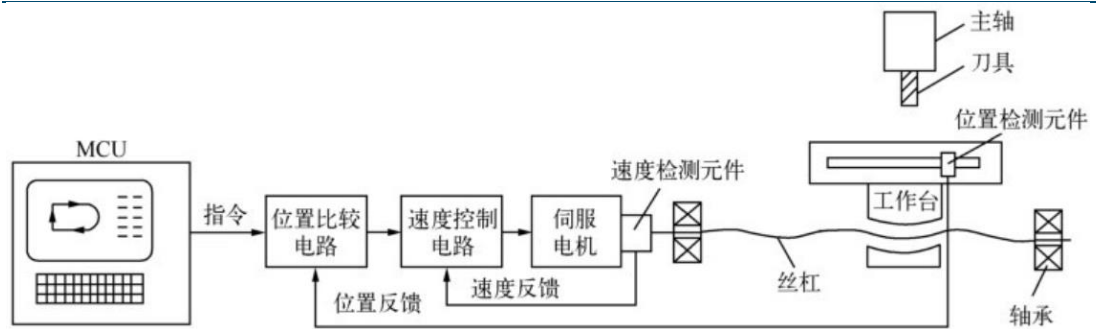
图表50：丝杠/导轨是数控机床传动和定位的关键零部件



来源：NSK 官网，国金证券研究所

数控机床的半闭环/闭环进给伺服系统主要通过检测关键捕捉工作台位移量，然后在数控系统进行计算后生成新的运控指令以消除整个驱动和传动环节的误差、间隙和失动量。故丝杠的精度、稳定性会对机床的整体性能造成较大影响。

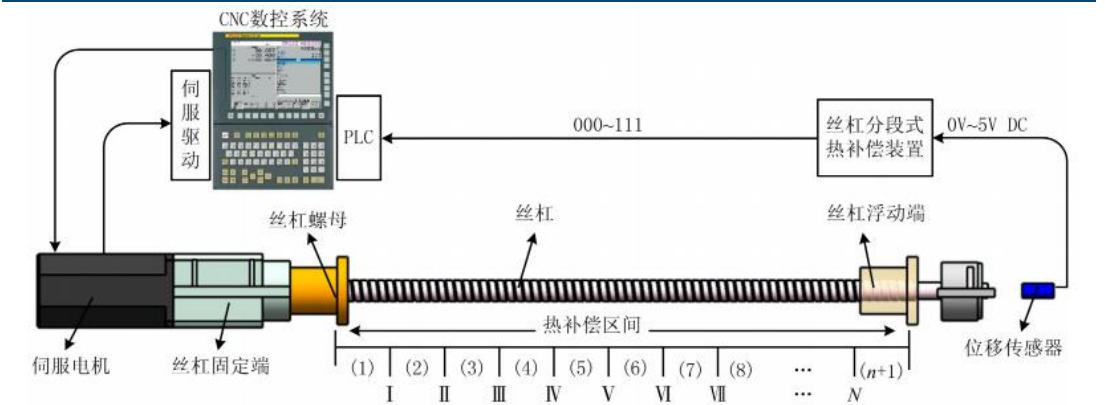
图表51：丝杠是数控机床半闭环/闭环进给伺服系统的核心一环



来源：《数控机床》，国金证券研究所

数控机床由于工作时间较长，丝杠传动系统中的各个零件接触面之间的频繁摩擦会导致升温，引起机床的热变形，导致机床的定位精度下降，需要通过数控系统热误差补偿功能消除误差。丝杠的热稳定性越强数控机床就更容易消除热变形影响。

图表52：分段式丝杠热变形误差补偿



来源：《数控机床丝杠传动系统热误差实时补偿技术》，国金证券研究所

目前机床核心功能部件中，主轴、摆头、转台等部件考虑打造定制化/差异化能力，主机厂倾向于逐步发展为自制，但数控系统、滚动功能部件、轴承等由于制造难度高/规模化效应明显，即使主机厂已具有较大规模也倾向于继续外采。



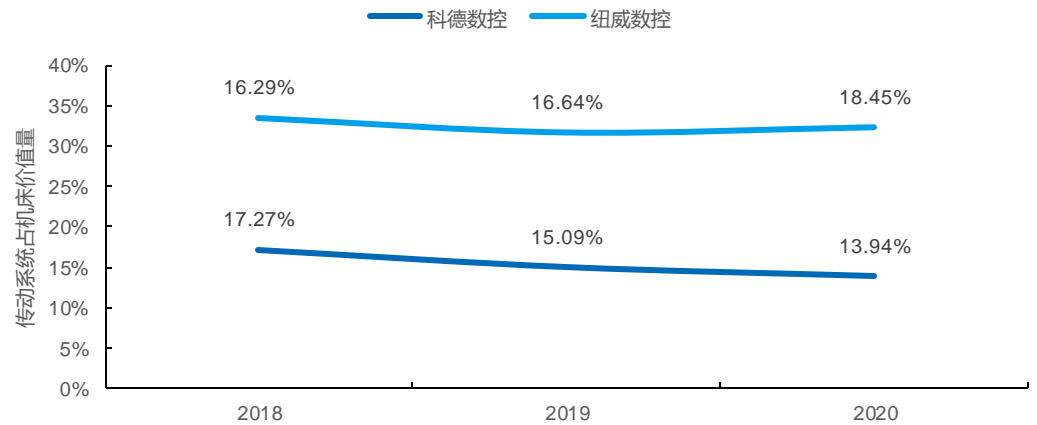
图表53: 丝杠导轨主机厂以外购为主

核心零部件	德国哈默	日本马扎克	日本大隈	科德数控
数控系统	外购	外购（基于三菱二次开发）	自制	自制
伺服驱动器	外购	外购	自制	自制
电机	外购	外购	自制	自制
传感器	外购	外购	部分自制/外购	部分自制/外购
主轴	自制	自制	自制	自制
双轴转台	自制	自制	外购	自制
刀库	自制	自制	自制	自制
导轨	外购	外购	外购	外购
丝杠	外购	部分自制/外购	部分自制/外购	外购

来源：科德数控招股说明书，国金证券研究所

科德数控、纽威数控传动系统部件（丝杠/导轨为主）以外采为主，从18至20年传统系统部件采购金额占营业收入比例来看，在三轴/五轴机床中，传动系统价值量占比在15%左右。

图表54: 传动系统（丝杠/导轨为主）占机床价值量15%左右



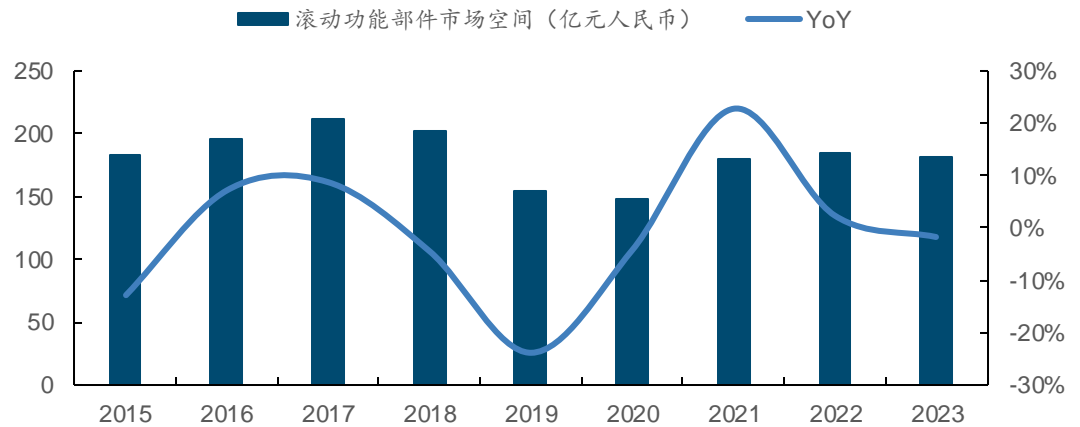
来源：科德数控招股说明书，纽威数控招股说明书，国金证券研究所

注：按照传动系统采购金额/营业收入计算

假设按照滚动功能部件（丝杠+导轨）在机床中价值量占比10%计算（考虑金属成形机床传动系统要求低于金属切削机床），23年中国机床消费额1816亿元人民币，测算对应滚动功能部件市场空间181.6亿元人民币。



图表55：23年中国滚动功能部件市场空间181.6亿元人民币

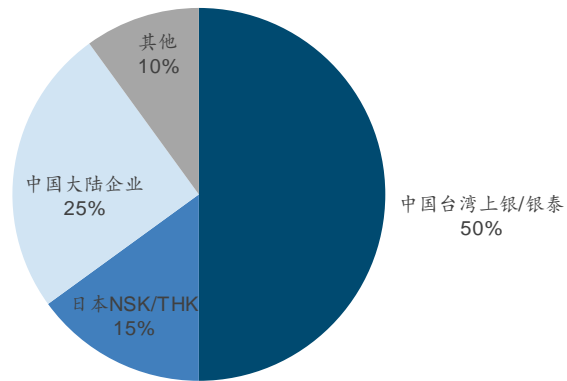


来源：中国机床工具工业协会，国金证券研究所测算

注：2015至2023年按照美元兑人民币年平均汇率换算

由于在精度保持性、功能可靠性、寿命、精度、刚度等关键性能指标上落后于境外产品，国产品牌市场占有率低。根据秦川机床公告信息，目前全球市场被日本NSK、日本THK等企业垄断，CR5约46%，日本和欧洲企业占据了全球约70%市场份额。国内市场目前中国台湾上银、银泰市场占有率接近50%，NSK、THK等企业市场占有率约15%，中国大陆企业占有率约为25%。

图表56：丝杠导轨国产化率约25%，国产替代空间巨大



来源：秦川机床公告，国金证券研究所

目前国内涌现了南京工艺、秦川机床、贝斯特、恒立液压等积极布局工业母机丝杠领域的企业。

图表57：目前有更多民营企业积极布局工业母机丝杠领域

公司	丝杠业务布局	丝杠收入规模
南京工艺	创建于1952年，主营滚动功能部件，产品广泛应用于高档数控机床、人工智能、3C自动化等领域。	23年总营收4.94亿元
秦川机床	子公司汉江机床是国内螺纹磨床主导企业之一，拥有从加工工艺、加工设备、计量检测、标准制定的螺纹制造核心技术，滚珠丝杠实现了工业母机领域销售，同时积极布局行星滚柱丝杠。	汉江机床23年营收3.21亿元（含螺纹磨床）
贝斯特	积极布局滚动功能部件领域，向工业母机、人形机器人等领域扩张，继24年二季度高精度丝杠副和导轨副在得到国内知名机床	-



公司	丝杠业务布局	丝杠收入规模
	厂商的成功应用后,三季度与知名机床商签订了批量滚动交付订单,其中代表滚珠丝杠副最高制造水平的C0级丝杠副实现突破,获得了客户的首批订单	
恒立液压	切入滚动功能部件领域,滚珠丝杠产品已进行送样和小批量供货	-

来源:秦川机床官网,秦川机床公司公告,南京化纤公司公告,贝斯特公司公告,恒立液压公司公告,国金证券研究所

根据金属加工杂志社《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》数据,将被调查企业中采用滚动功能部件的比例划分为5个区间(0~19%、20%~39%、40%~59%、60%~79%、80%~100%),并按经济型、中高档数控机床及其他领域两类,分别对企业采用国产和进口滚动功能部件的比例进行调查与对比分析,从2011年到2020年,国产滚动功能部件在中高端的应用比例可以看到明显提升。

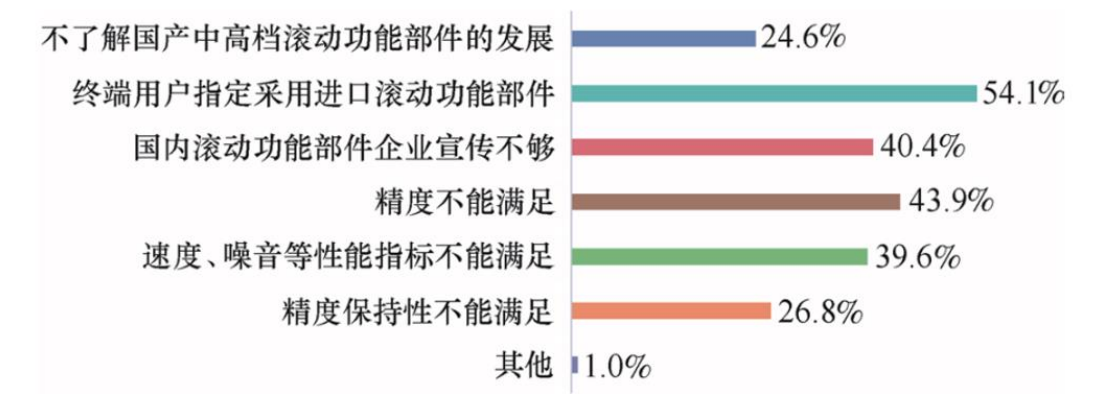
图表58:从2011年到2020年国产滚动功能部件中高端应用比例明显提升

项目		滚珠丝杠副				滚动直线导轨				
		国产		进口		国产		进口		
经济型	采用比例	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	
	企业占比	2011数据	8	68	10	27	12	56	18	36
	比)	2020数据	35.5	24.9	36.1	19.2	33.9	24.6	38.4	21.5
中高档	采用比例	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	40%~59%	≥60%	
	企业占比	2011数据	14	24	13	67	12	23	12	71
	(%)	2020数据	34.3	21.5	32.5	27.4	33.2	21.7	36.3	26.4

来源:《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》,国金证券研究所

目前除性能、精度、精度保持性等指标相比进口品牌有差距带来的国产品牌应用限制外,根据《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》数据,终端用户指定采用进口滚动功能部件占比达到54.1%,终端用户对于滚动功能部件的采购有较大话语权。

图表59:终端用户在滚珠丝杠的采购上话语权较强

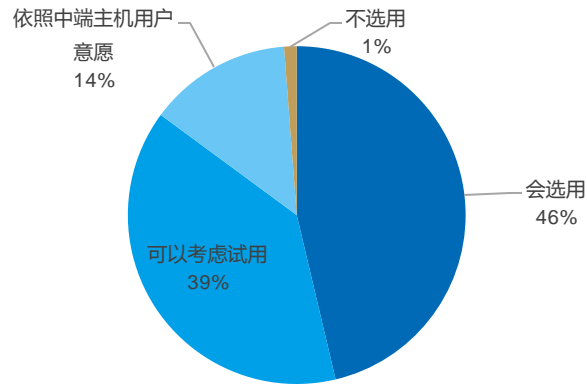


来源:《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》,国金证券研究所

在国产替代在中高端领域面临一定阻碍的同时,也有85.1%的企业表示若有政策鼓励,会考虑购买或试用国产中高档滚动功能部件,政策引导有望显著加速国产替代节奏。由于滚动功能部件对于机床性能、精度的重要性,国家从2006年先后出台了一系列相关支持政策与措施,2009年开始的“高档数控机床与基础制造装备”也把滚动功能部件列为重要支持目标,考虑当前国产滚动功能部件技术水平虽已经明显改善,但相比进口品牌仍有较多不足,未来国家政策有望针对技术进步、主机厂应用示范等方面给予进一步支持。



图表60: 在有政策引导情况下, 有85.1%企业愿意试用或购买国产中高端滚动功能部件

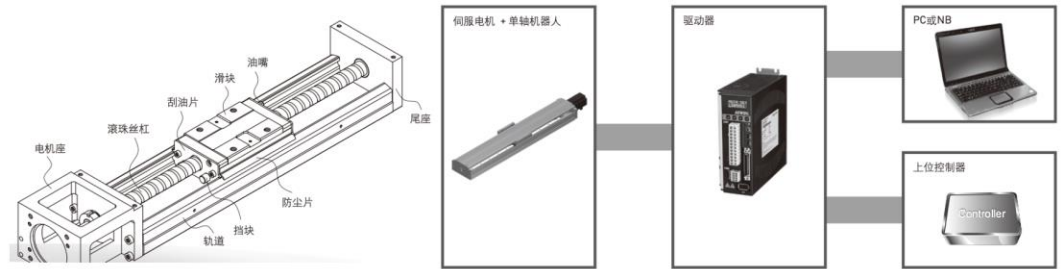


来源:《第三届滚动功能部件用户调查分析报告》, 国金证券研究所

3.2 人形机器人: 多种类丝杠需求齐增, 有望迎爆发式增长

在人形机器人出现前, 丝杠主要作为机械臂的线性执行器, 完成分拣、搬运、组装、贴片等工作, 应用于 3C、仓储物流、医疗等领域。

图表61: 机械臂的线性执行器主要由电机+丝杠驱动



来源: 上银科技官网, 国金证券研究所

在人形机器人中, 丝杠同样用作线性执行器以完成双足、手臂的驱动。根据特斯拉 AI Day2022 信息, 特斯拉人形机器人“Optimus”拥有 28 个身体执行器, 其中上肢关节模组以无框力矩电机和谐波减速器为主, 下肢腿部采用了无框电机与行星丝杠的线性执行器。

图表62: 特斯拉“Optimus”采用行星丝杠作为下肢的线性执行器



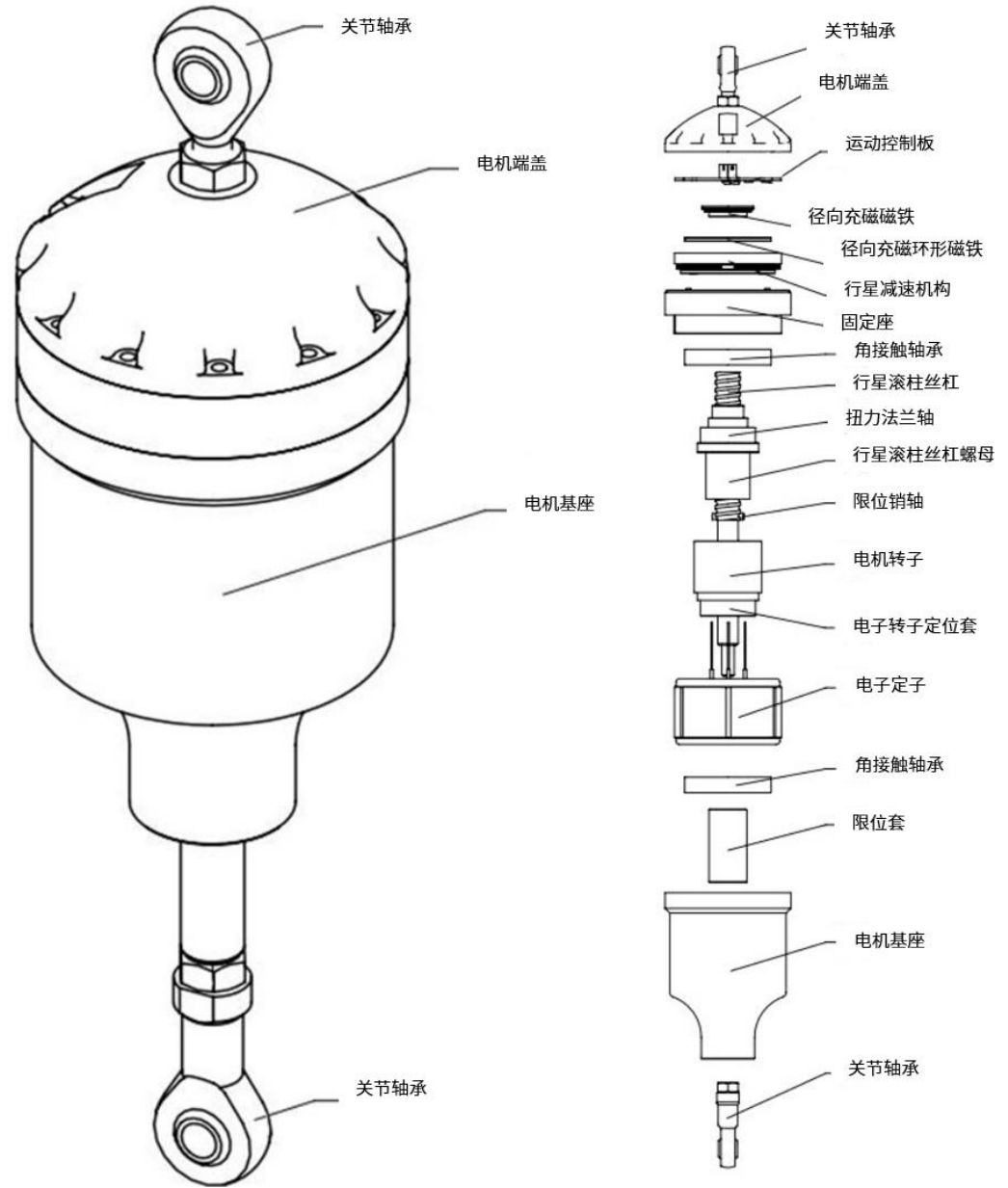
来源: 电子工程专辑 EE Times China, 国金证券研究所

根据江苏云募智造科技有限公司发布的《一种人形机器人腿部线性执行器》信息, 线性执



行器主要将电机、行星滚柱丝杠、角度传感器、行星减速机构进行了高度集成。

图63: 人形机器人线性执行器结构

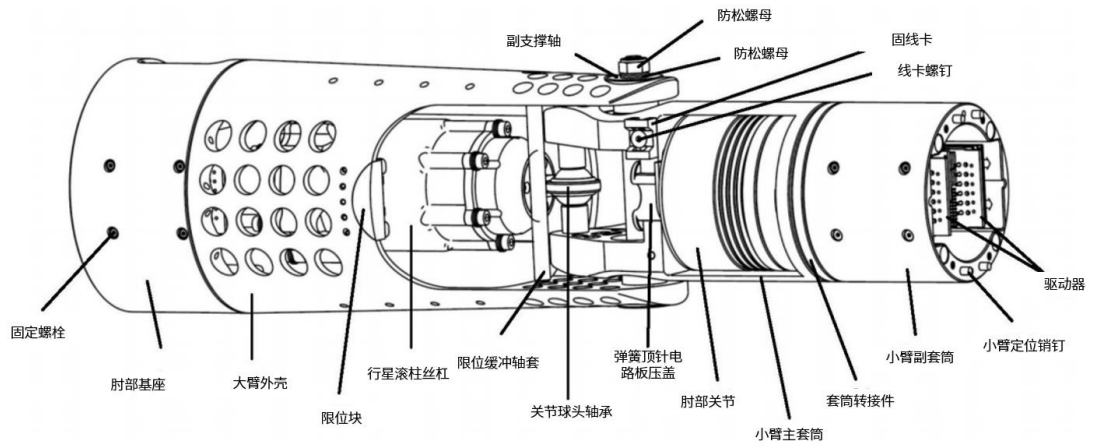


来源：国家知识产权局，《一种人形机器人腿部线性执行器》，国金证券研究所

根据九光智能技术有限公司《一种人形机器人的肘部系统》信息，手臂的驱动方式主要通过行星滚柱丝杠作为主动力单元，丝杠伸出时带动输出端关节球头轴承向外移动，输出端关节球头轴承带动小臂主套筒做弯曲运动。



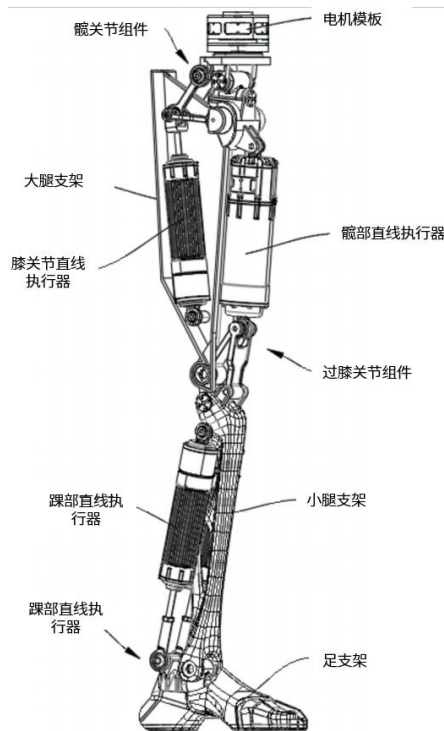
图表64: 人形机器人手臂可通过行星滚柱丝杠的线性执行器进行驱动



来源: 国家知识产权局, 《一种人形机器人的肘部系统》, 国金证券研究所

根据小鹏汽车科技有限公司《腿部结构及人形机器人》信息, 在人形机器人的腿部也会用到大量线性执行器。

图表65: 人形机器人的腿部也会用到大量线性执行器



来源: 国家知识产权局, 《腿部结构及人形机器人》, 国金证券研究所

原先在灵巧手的研究中使用的主要是连杆传动、齿轮传动、带传动、线绳传动等。

图表66: 灵巧手驱动方式以连杆传动、齿轮传动、带传动、线绳传动为主

灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度	传动方式
LARM Hand	Cassino 大学	2010	3	9	12	连杆
KNTH	K. N. Toos 科技大学	2011	3	6	9	全柔性
Metamorphic Hand	天津大学	2013	4	12	16	连杆
Barret Hand	巴雷特技术公司	2013	3	9	9	连杆齿轮
Ritsumeikan Hand	日本立命馆大学	2013	5	16	20	连杆

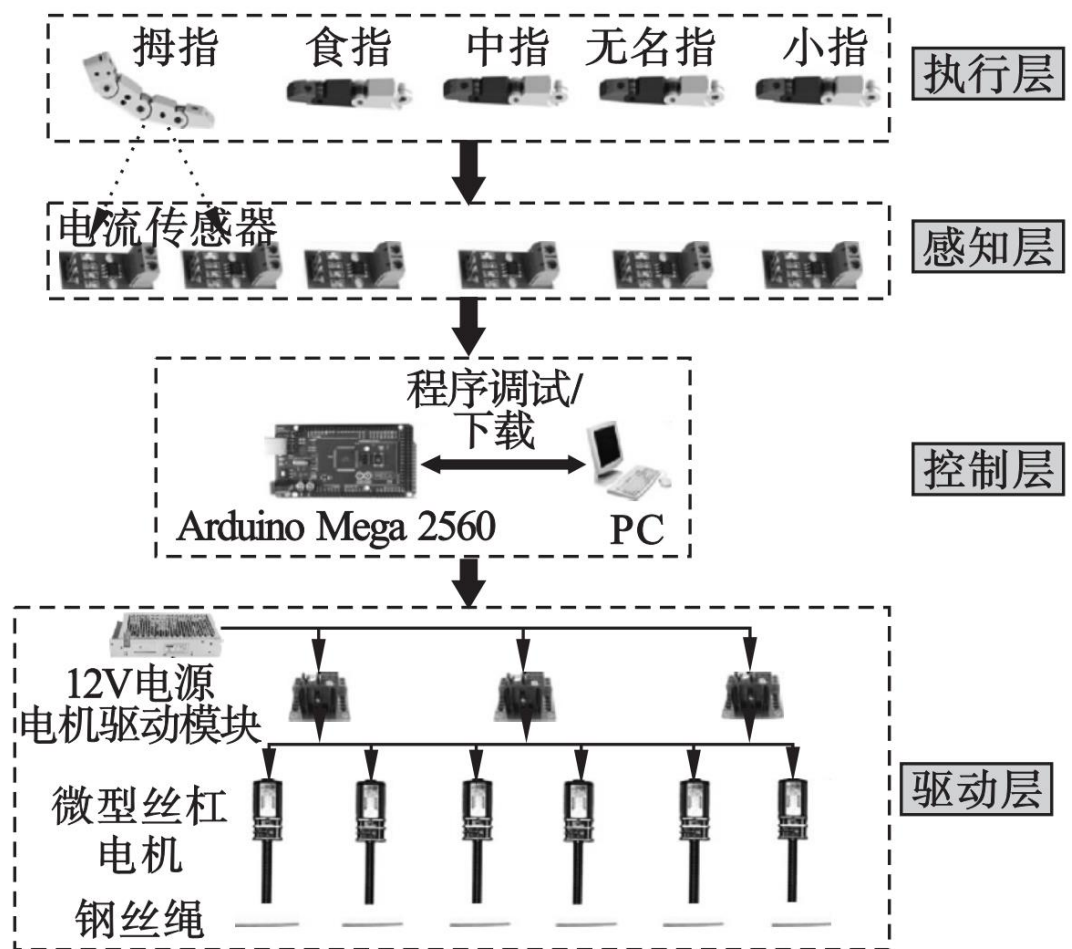


灵巧手	主要研究单位	研究年份	手指个数	关节数目	自由度	传动方式
Pisa/IIT Soft Hand	意大利	2014	5	19	21	韧带
ISR - Soft Hand	美国	2014	5	15	21	腱
Washington Hand	华盛顿大学	2016	5	15	21	线绳
SSSA - My Hand	Scuola Superiore Sant' Anna	2016	5	10	21	齿轮连杆
HERI Hand	意大利	2017	3	12	15	连杆
Shadow Hand	Shadow 公司	2019	5	24	20	腱-滑轮
欠驱动灵巧手	河北工业大学	2020	5	15	15	单腱
软体仿人手	上海交通大学	2020	5	15	11	软体
Anthropomorphic Robot Hand	韩国	2021	5	15	20	线绳
ILDA Hand	韩国	2021	5	20	15	连杆

来源：《机器人灵巧手研究综述》，国金证券研究所

目前出现了使用电机+微型丝杠的主动关节方案，后续有望进一步增加丝杠在人形机器人行业的应用空间。

图表67：灵巧手可使用电机+微型丝杠作为主动关节

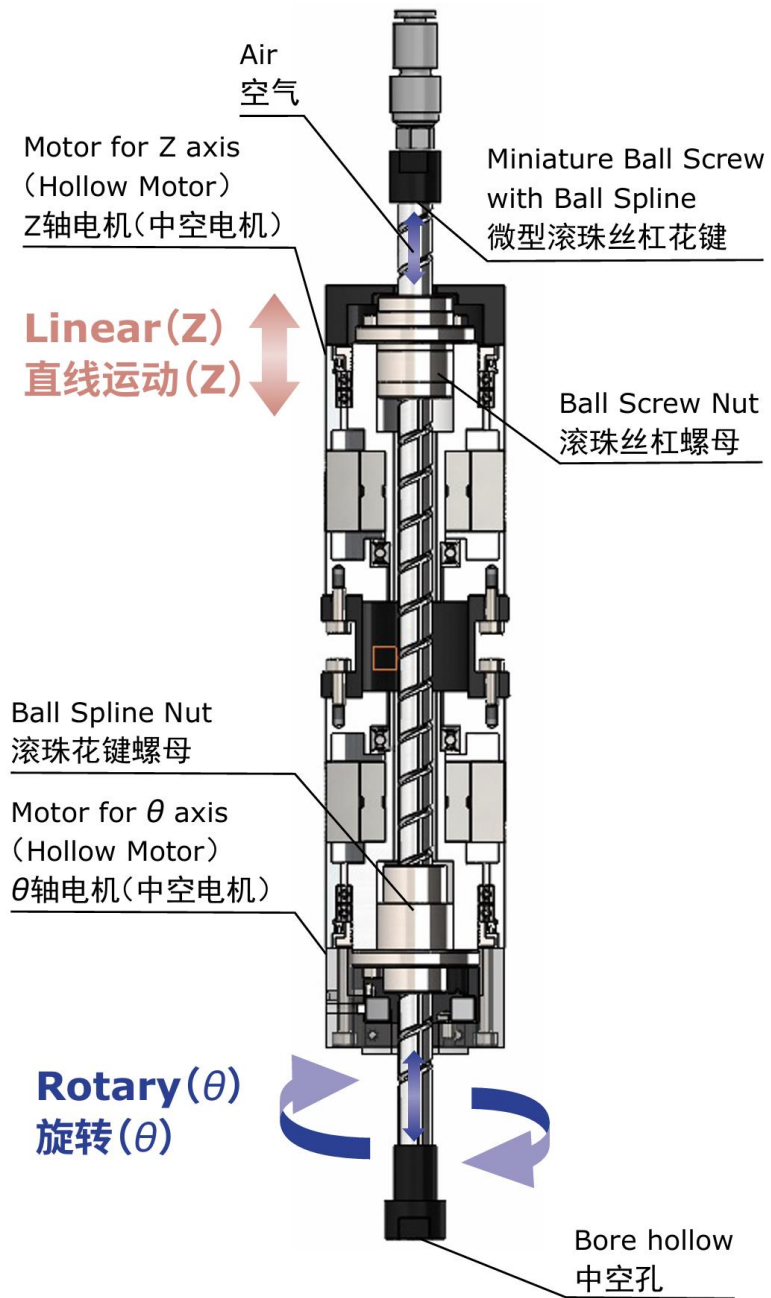


来源：《仿人机械手设计与硬度感知研究》，国金证券研究所

通过将微型滚珠丝杠、微型滚柱花键、中空电机集成的方式可以制作出非常紧凑的灵巧手线性驱动器，HIPP 提供的最小的微型丝杠公称直径仅有 3mm。



图表 68: 微型滚珠丝杠、微型滚珠花键、中空电机集成可制作出非常紧凑的灵巧手线性驱动器



来源: KSS 综合产品名录, 国金证券研究所

整体来看, 丝杠尤其是行星滚柱丝杠在人形机器人手臂、腿部、灵巧手均有应用前景。



图表 69：新剑传动开发了针对人形机器人手臂、腿部、灵巧手的各类行星滚柱丝杠



来源：新剑传动官网，国金证券研究所

假设平均一台人形机器人采用 10 支行星滚柱丝杠（大臂、小臂、大腿、小腿、灵巧手等）作为线性执行器，参考上银科技 22、23 年滚珠丝杠均价分别为 645、557 元人民币/支，考虑行星滚柱丝杠成本会高于滚珠丝杠，假设在人形机器人出货量达到 100 万台时行星滚柱丝杠的售价为 800 元，折合 80 亿潜在增量市场空间。

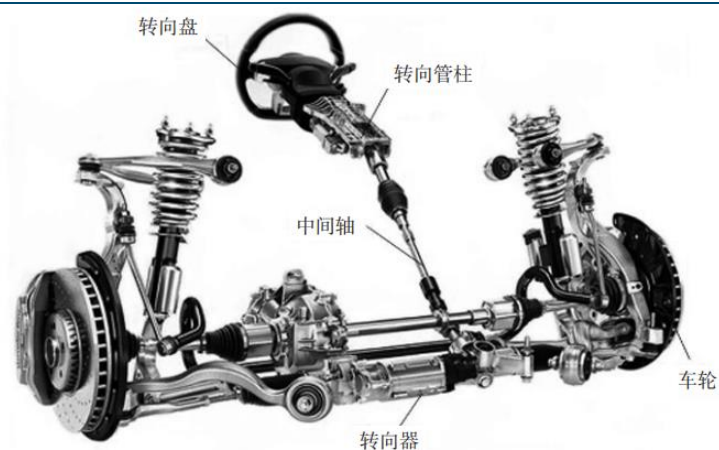
3.3 汽车：伴随智驾升级线控化大势所趋，在转向、制动、悬架等均有应用前景

目前智能驾驶进一步强化了对底盘的要求，线控转向、线控制动、主动悬架等场景需要更智能、响应速度更快的线性执行器，以电机+丝杠+传感器构成的线性执行器需求有望大幅提升：

1) 线控转向

传统的汽车转向系统包括转向盘、转向管柱、中间轴、转向器，驾驶员通过转动转向盘将力矩通过转向管柱和中间轴传递至转向器，转向盘的旋转运动转变为转向器齿条的直线运动，转向器推动车轮转动实现汽车的转向。

图表 70：汽车转向系统结构



来源：《汽车线控转向系统研究综述》，国金证券研究所

目前汽车转向结构逐步从机械转向、液压助力转向过渡至电动助力转向，并应用于高级驾驶辅助系统。电助力转向系统可采用滚珠丝杠作为传动机构。



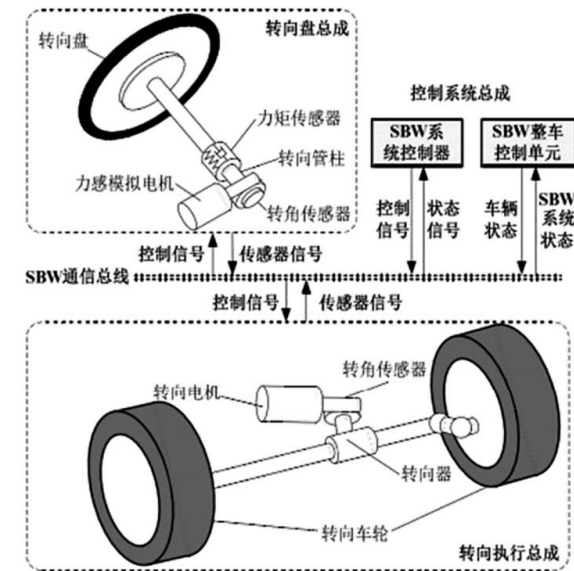
图表71：电动助力转向系统可采用滚珠丝杠作为传动机构



来源：《汽车线控转向系统研究综述》，《汽车智能控制技术》，国金证券研究所

线控转向系统在驾驶员模式下具有改善转向操作性、提高驾乘舒适性、强化主动安全系统等优势，在L3级及以上级别自动驾驶领域更是必不可少。

图表72：线控转向系统增加了较多传感器信号以完成有人/无人驾驶的闭环控制



来源：《汽车线控转向关键技术浅析》，国金证券研究所

根据舍弗勒信息，其创新后轮转向系统实现量产，采用行星滚柱丝杠。整个系统结构紧凑，重量轻，运行安静，且易于整车集成。



图表 73: 舍弗勒后轮转向系统的核心是行星滚柱丝杠

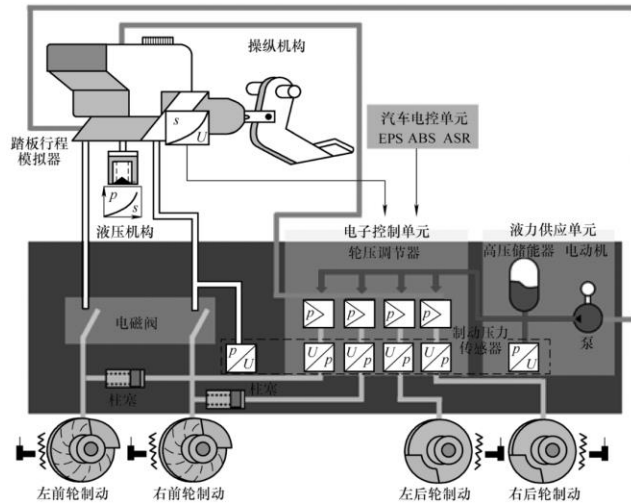


来源：舍弗勒官网，国金证券研究所

2) 线控制动

线控制动的初级阶段为电液制动 (EHB)，最早量产的 EHB 系统为博世公司的 SBC 系统和爱克斯公司的 ECB 系统。

图表 74: 博世 SBC 系统原理

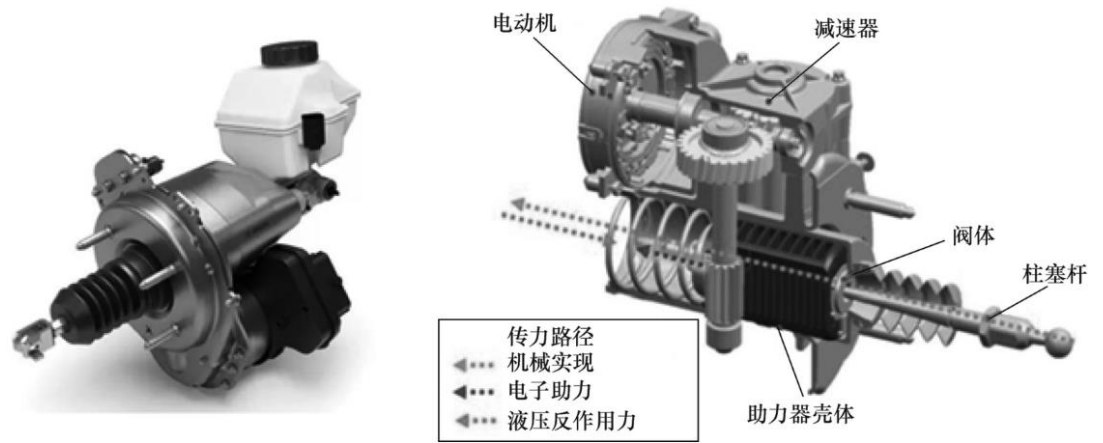


来源：《电机械制动 (EMB) 技术》，国金证券研究所

目前博世的主要的电液系统产品为第二代 iBooster，由永磁同步电动机、蜗轮蜗杆、齿轮齿条、踏板行程传感器等组成，工作原理与传统真空助力器的工作原理基本一致，通过踏板推杆与助力阀体在反应盘处耦合原理来控制助力大小。



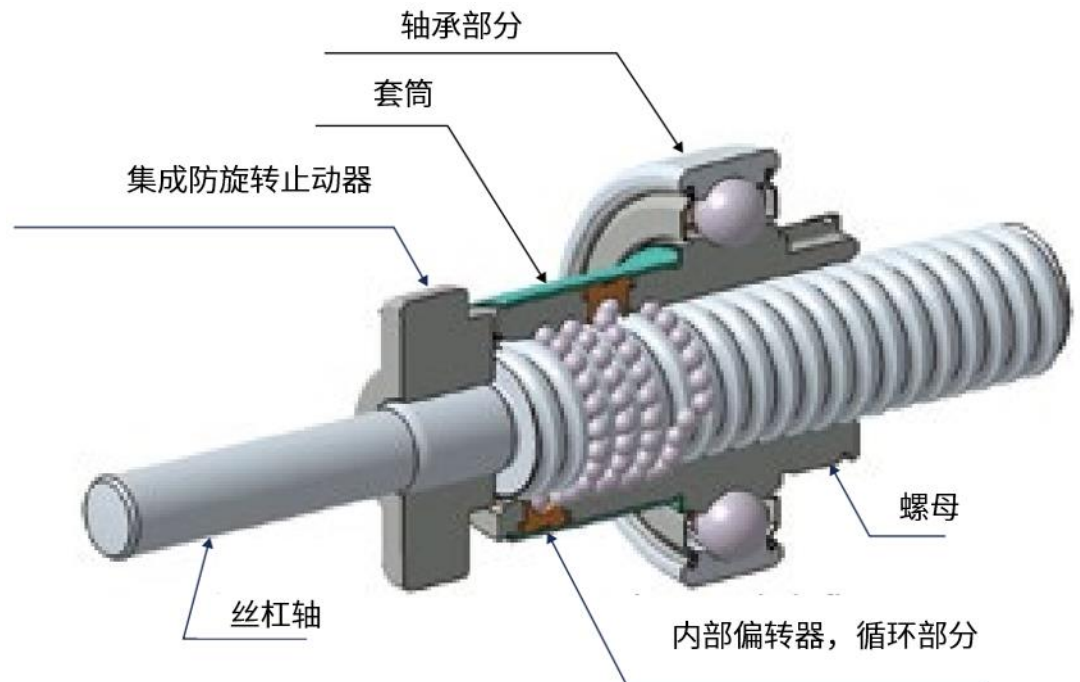
图表 75: 博世主要电液系统产品 iBooster 原理



来源:《电机械制动 (EMB) 技术》, 国金证券研究所

NSK 推出了用于电液制动系统的滚珠丝杠, 通过集成轴承实现更紧凑的设计并减少间隙, 并使用塑料内部偏转器用于滚珠循环简化装备降低生产成本, 目前主要用于轻型卡车的电液制动助力器。

图表 76: NSK 开发的电液制动系统滚珠丝杠

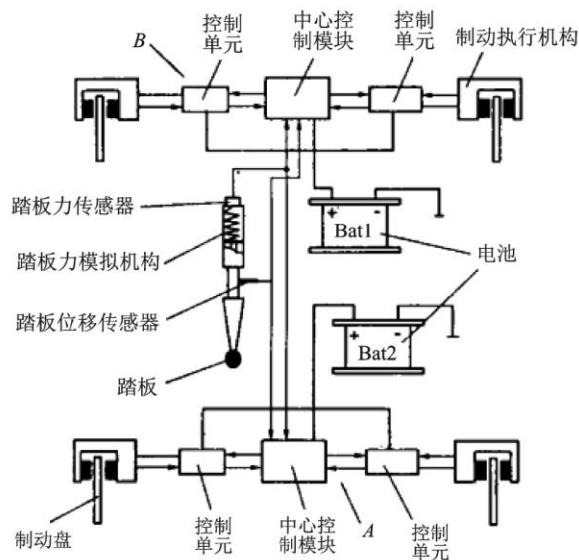


来源: NSK 官网, 国金证券研究所

为了适应电动化与智能化发展趋势, 采用全电驱的电机械制动 (EMB) 具有更好发展前景。



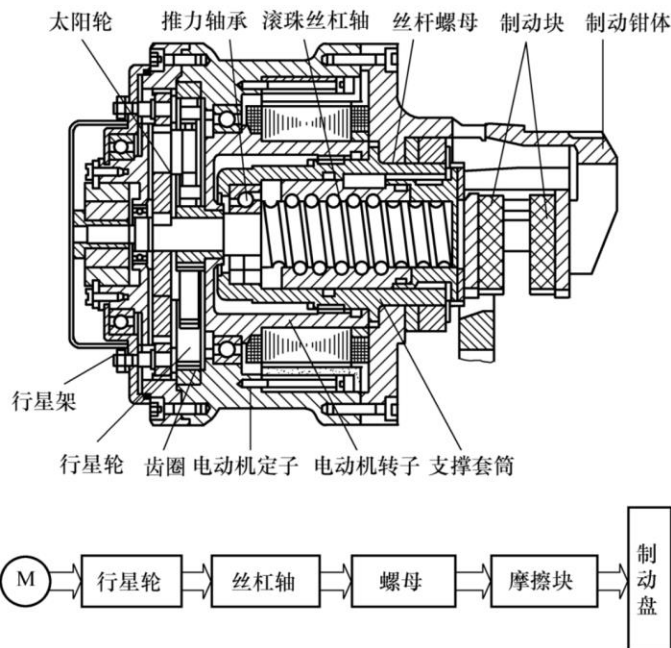
图表 77: 电机械制动系统原理



来源:《基于滚柱丝杠执行装置的汽车电子制动器设计》, 国金证券研究所

电机械制动系统与常规制动系统的核心区别是要将电机的转动转化为摩擦片的平动, 通常可使用丝杠、连杆、电液复合等多种模式, 丝杠尤其是行星滚柱丝杠能够实现较大承载能力和等效减速比, 同时具有传动效率高、传动精度高、同步性能好、传动可逆等多种优点, 有望在电机械制动系统中得到大量应用。

图表 78: 丝杠尤其是行星滚柱丝杠在电机械制动系统中有较好应用前景

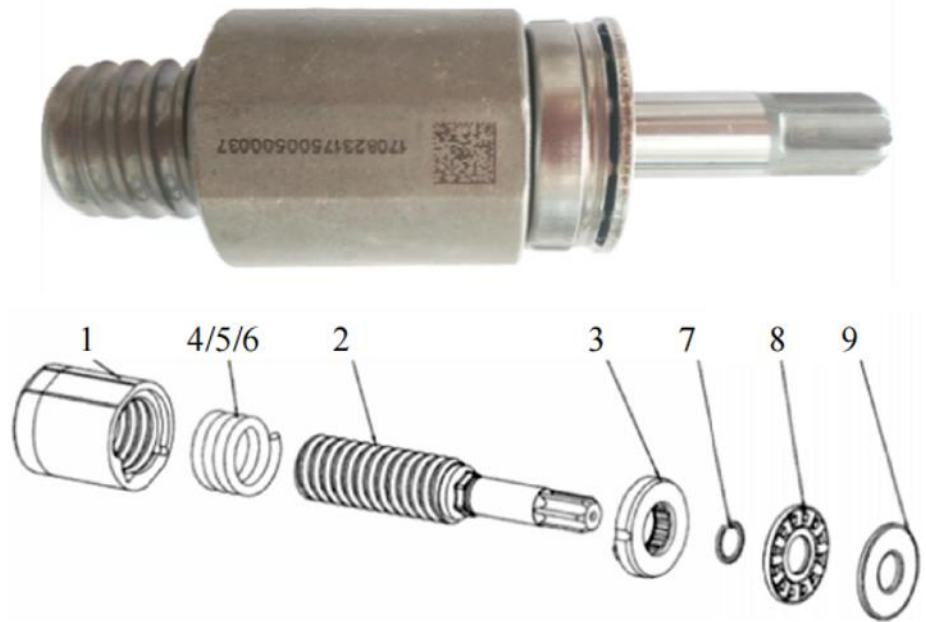


来源:《电机械制动 (EMB) 技术》, 国金证券研究所

EMB 技术在汽车上的另外一个应用就是电机械驻车制动系统 (EPB)。传统的机械式驻车制动系统是通过驾驶者操纵驻车手柄, 带动制动蹄片张开或制动卡钳活塞移动完成驻车, 其制动力完全来自驾驶者。而 EPB 系统则是通过电机施加制动力, 驻车时驾驶者只需操作按钮 (EPB 开关), 由电子驻车制动系统的 ECU 控制电动机工作完成驻车制动。



图表 79：电机械驻车系统也会用到丝杠



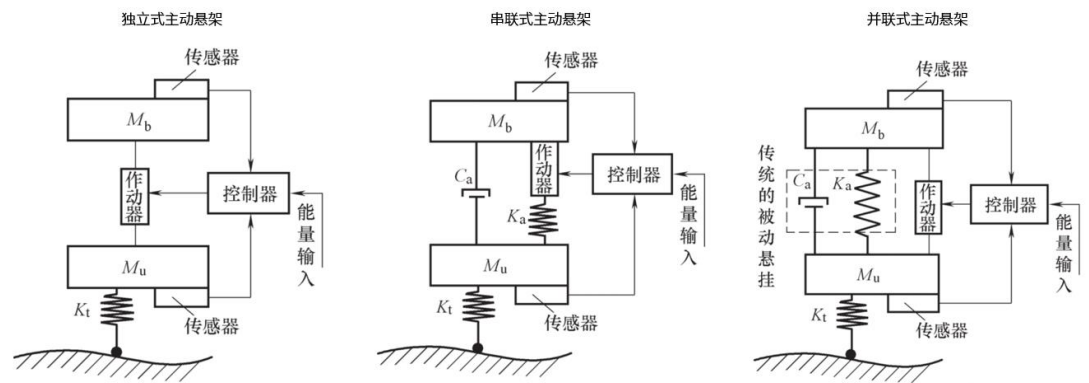
1.丝母 2.丝杆 3.支撑垫圈 4、5、6.各类弹簧与钢球（丝母沟道内弹簧与钢球均匀分布） 7.卡簧 8.平面轴承 9.平面垫片

来源：《影响 EPB 滚珠丝杠副耐久性能的原因分析与改进》，国金证券研究所

3) 主动悬架

主动悬架系统一般由测量单元、控制单元、作动器及动力源四个部分组成，作动器可是液压缸、气缸、电缸等线性执行器。

图表 80：主动悬架系统中需要使用线性执行器作为作动器

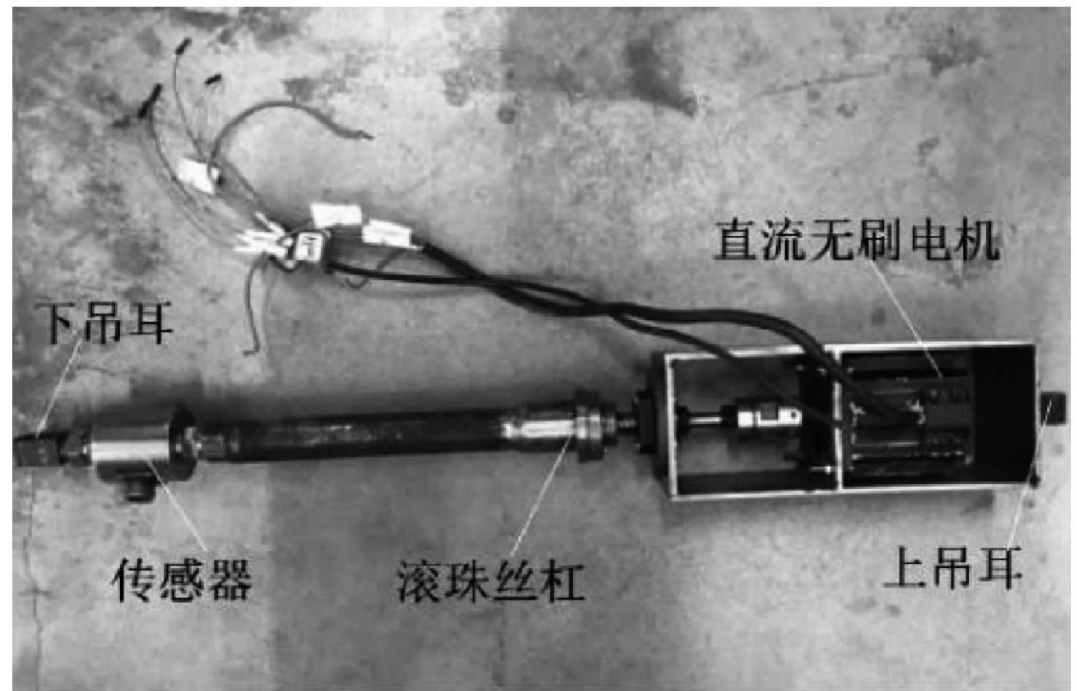


来源：《电动汽车工程手册第六卷》，国金证券研究所

滚珠丝杠可作为作动器用于主动悬架系统，可以将丝杠的双向转动转换为电机轴的单向转动并增大电机转速，避免了馈能电机高频正反转，提高了能量回收效率，具有阻尼力范围广、结构可靠性高、传动效率高、造价低廉等优点。



图表81：滚珠丝杠悬架作动器

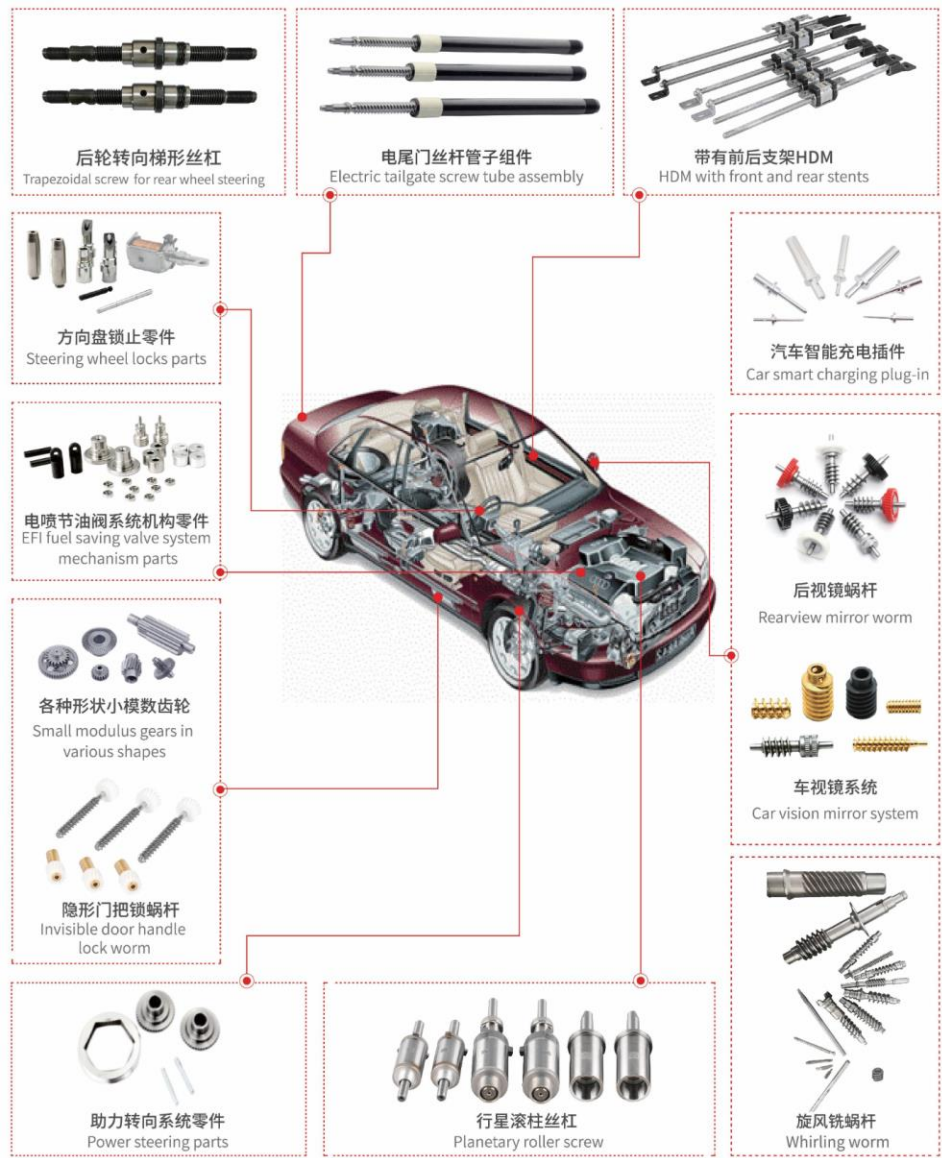


来源：《基于行驶工况的滚珠丝杠主动悬架多模式切换》，国金证券研究所

新剑传动目前已经推出了针对汽车行业的各类丝杠产品。



图表82：新剑传动目前已经推出了针对汽车行业的各类丝杠产品



来源：新剑传动官网，国金证券研究所

4.丝杠设备重要性可能“超预期”：关注“卖铲人”机会

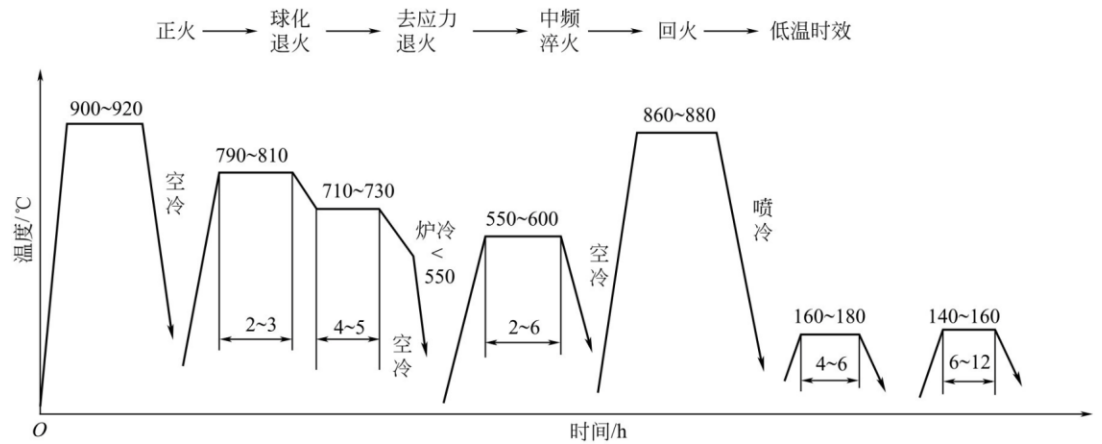
丝杠制造流程较长，会带来热处理、校直、车床、磨床、检测设备等多类设备需求，在丝杠有较大潜在成长空间背景下，设备企业作为“卖铲人”有较强需求确定性，同时考虑到人形机器人、汽车等下游领域会有较强降本诉求，设备端也存在技术升级迭代的新机会。建议关注一部分新技术带来的机会，例如通过以车代磨、以铣代磨实现降本，这会带来硬车床、旋风铣床、超硬刀具的需求；同时建议关注部分弹性大的环节例如螺纹磨床，根据我们测算百万台人形机器人出货量对应44至89亿元人民币螺纹磨床市场空间，而原先的市场规模较小，若国内企业能实现国产替代突破会有较大成长弹性。

4.1 热处理：热处理炉、感应淬火设备需求提升

丝杠的热处理需要经过正火、退火、淬火、回火等多次处理。



图表83: GCr15 钢滚珠丝杠热处理工艺规范



来源:《典型零件热处理工艺与规范下》, 国金证券研究所

当丝杠材料中网状碳化物或带状碳化物不合格时,需要进行正火和球化退火处理,可以使用井式炉进行处理,在常温下批量进行吊挂装炉,之后进行加热、等温球化退火等操作。

图表84: 井式热处理炉适合于长轴类零件热处理



来源:天利热工官网, 国金证券研究所

丝杠的工作表面(滚道)和加工表面(中心孔)需要进行淬火和回火处理,以在表面形成高硬度、高耐磨性的淬硬层,进一步提升丝杠性能。常用的设备为感应淬火设备,以恒进感应的卧式轴类淬火生产线为例,机床由上料料仓、进料输送链、工件抓取及翻转机构、送料机构、淬火工位、变压器移动机构、变压器两维滑台、下料输送链、控制系统等组成,可实现轴类零件的连续扫描淬火、回火。



图表85：卧式轴类淬火生产线



来源：恒进感应官网，国金证券研究所

国际著名热处理企业有鲍迪克、易普森、爱协林、易孚迪、萨伊集团等；其中，鲍迪克等前三家主要做可控气氛炉等工业炉热处理设备，易孚迪和萨伊集团主要生产感应热处理设备。国内少数技术实力较强的热处理设备制造及服务企业主要有金财互联、世创科技、恒进感应、恒精感应和升华感应，均为上市或挂牌企业；其中，前两家主要生产可控气氛炉等工业炉热处理设备，恒进感应、恒精感应和升华感应为生产感应热处理设备的企业。

图表86：国产热处理设备市场主要参与者

公司	介绍	收入规模(亿元)
恒进感应	主营业务是中高档数控感应热处理成套设备及其关键功能部件的研发、生产、销售和技术服务，其中核心产品为高档数控感应淬火机床	23年0.74亿元
恒精感应	主营业务为高端数控感应加热装备的研发、制造、销售及感应热加工服务，主要产品为高端数控感应加热装备、数控感应热加工服务、售后服务	20年3.23亿元
升华感应	主营业务是感应加热成套设备、感应器及中高频电源的研发、生产和销售。主要产品和服务为感应热处理自动线、各种复杂感应器、高、中、低、频电源、变压器等。	23年0.36亿元
金财互联	主营业务包含热处理装备制造、商业热处理加工服务、热处理设备售后服务及热处理工艺技术咨询四大块。公司主要产品为箱式渗碳淬火炉；井式渗碳炉；氮化炉；调质线、锻造加热炉、台车炉；网带炉、链条炉；辊棒炉；推盘炉；铝合金炉；环保、减排装置；智能热处理软件。	23年热处理设备2.71亿元
世创科技	主营业务是智能化热处理装备制造；金属热处理及涂层加工服务；复合新材料。主要产品和服务为智能化热处理装备、金属新材料、智能装备。	23年智能化热处理设备1.02亿元

来源：恒进感应招股说明书，升华感应年报，Ifind，国金证券研究所

海外热处理企业普遍规模较大，例如鲍迪克2023年收入规模为8.03亿英镑，国内企业总体技术处于追赶期，产品进口替代有较大成长空间。

图表87：国内企业总体技术处于追赶期，产品进口替代有较大成长空间

差距	具体内容
热处理技术落后于发达国家	我国热处理及表面工程技术和设备研究始于20世纪50年代苏联援建，改革开放后引进先进技术设备，但因起点低、底子薄，与发达国家在热处理技术上有较大差距，体现在先进设备设计制造、精密控制、节能环保等技术方面，这些差距需设备提升与企业经验积累来弥补。
热处理数字化技术存在短板	我国热处理工艺过程数字化较工业先进国家有明显差距，主因是基础研究与数据匮乏，工艺技术数据不完善，软件多照搬国外。在精密控制上，多数企业设备靠人工经验设定和估算，不以产品为对象，仅定时定值控制工艺参数，



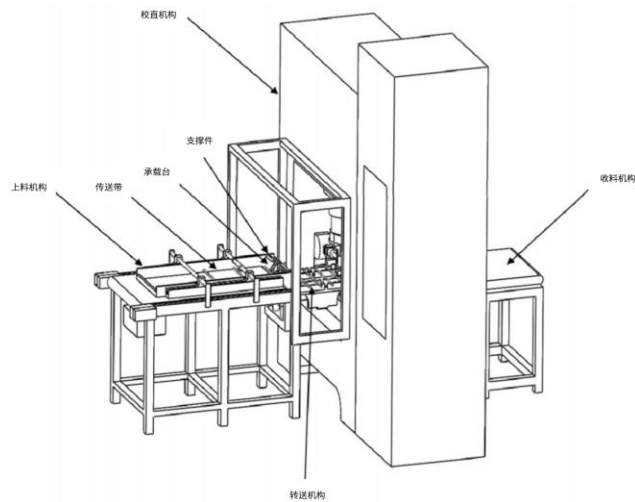
差距	具体内容
高档齿轮感应淬 火机床等高端热 处理设备依赖进 口	致产品质量波动大，准确性、可靠性及重现性低。 高端热处理和表面改性工艺装备依赖进口，“落后—引进—再落后—再引进”循环严重，国内技术难追海外，国外设备价格数倍于国内。当前航空航天关键零件的大型真空热处理装备等仍需进口。国外用计算机模拟优化感应器设计，模具化水平高，我国采用通用或手工模具，精度低且一致性差；德美日已将双频感应淬火工艺用于零件淬火，我国尚处试验初期。

来源：恒进感应招股说明书，国金证券研究所

4.2 校直：丝杠自动校直机具有较好前景

丝杠属于细长轴件，丝杠轴加工过程中易出现变形，螺母出现变形的概率较小，丝杠轴通常需要进行校直处理。根据上海奥林汽车安全系统有限公司《一种丝杠自动校直装置》信息，丝杠自动校直设备主要包括上料机构、转送机构、校直机和收料机构。

图表88：丝杠自动校直设备结构



来源：国家知识产权局，《一种丝杠自动校直装置》，国金证券研究所

根据集智股份信息，其开发的丝杠自动校直机可实现蜗杆轴、空心轴、实心轴、花键轴等产品的跳动测量与校直，整体全自动上下料且可实现多产品一键换型，工装换型只需要10分钟。



图表 89：集智股份丝杠自动校直机



来源：集智股份官网，国金证券研究所

4.3 粗精加工：螺纹磨床具有较大弹性，同时关注以车代磨、以铣代磨新机会

4.3.1 车床：国产化率较高，关注以车代磨新机会

金属切削机床按照国家标准的《金属切削机床型号编制方法》，分为车床、铣床、钻床、镗床、齿轮加工机床、螺纹加工机床、磨床、刨插床、拉床、锯床和其他机床 11 类。

图表 90：金属切削机床主要分类

类别	车床	钻床	镗床	磨床	齿轮加工机床	螺纹加工机床	铣床	刨插床	拉床	锯床	其他机床
代号	C	Z	T	M	Y	S	X	B	L	G	Q
参考读音	车	钻	镗	磨	牙	丝	铣	刨	拉	锯	其

注：磨床的种类因为很多，所以该类又分为 M、2M、3M，参考读音是磨、2 磨、3 磨。

来源：《金属切削机床（第 3 版）》，国金证券研究所

根据工件/刀具的相对运动关系，可以将金属切削加工分为三大类。



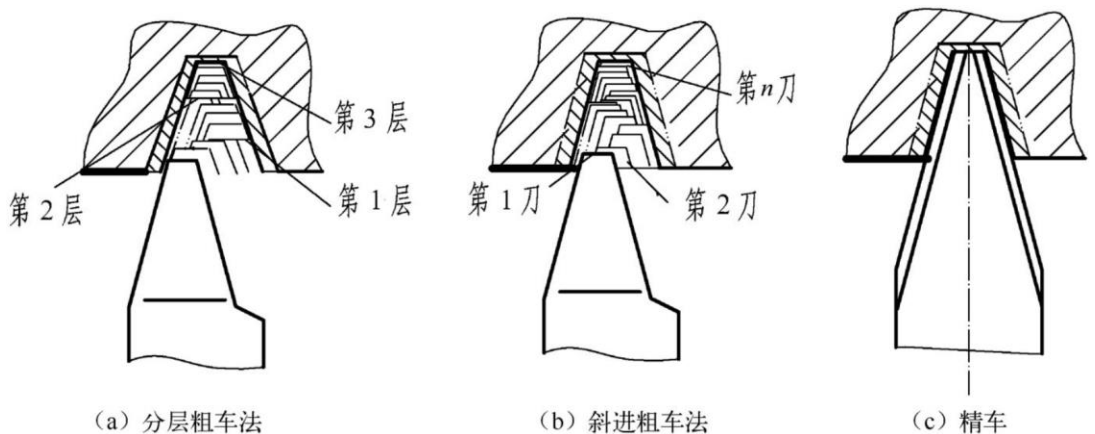
图91：金属切削加工根据工件/刀具相对运动关系的分类



来源：《数控车削编程与加工》，国金证券研究所

车削加工主要是在工件高速旋转的情况下通过刀具平动进行进给实现材料去除，通常会经过粗车、精车等工序完成车削加工。

图92：丝杠轴螺纹会经过粗车、精车等工序完成车削加工



来源：《零件普通车削加工》，国金证券研究所

车床属于金属切削机床中国产成熟度较高的设备，目前国内以浙海德曼为代表的企业具备了与国外同行竞争的实力，实现了主轴、刀塔、尾座等核心部件突破，依托本土化、性价比的优势持续扩大国产份额。

图93：浙海德曼实现了车床三大核心零部件突破



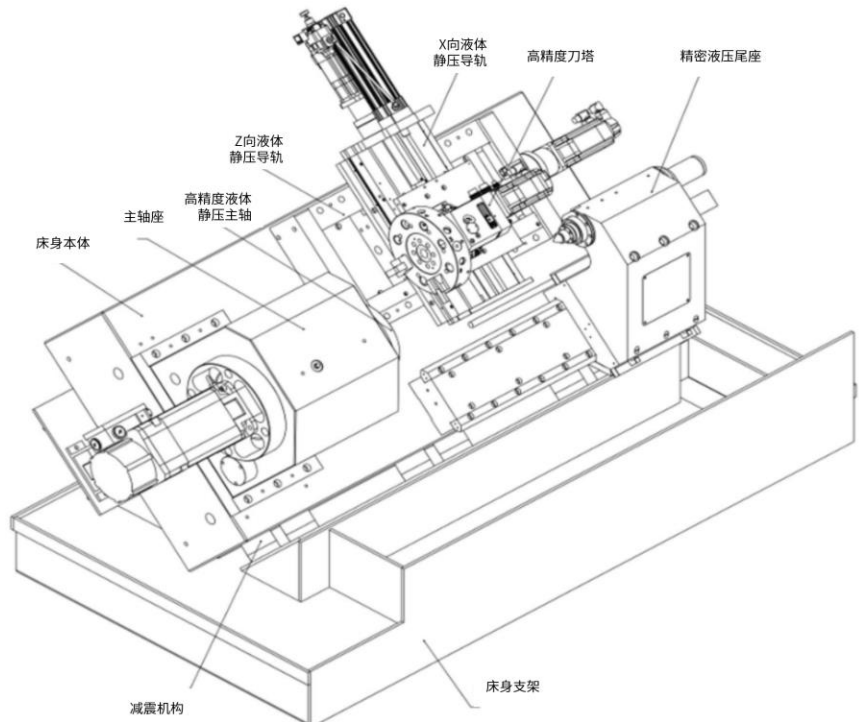
来源：浙海德曼官网，国金证券研究所

后续通过数控车床实现以车代磨，以缩短磨削加工工时、提升加工效率是丝杠降本核心方向之一。目前浙海德曼开发的高精度高刚性主轴结构电主轴，可以承受较大的轴向负荷，可实现重切削及以车代磨，根据浙海德曼公告信息，公司已积极与下游多家企业进行了应



用技术交流对接，已向有关企业供应过相关设备。现有产品高端机（车床及车铣复合加工中心）系列精度指标已达到了行业领先水平，未来将往更高精度突破，实现部分工艺以车代磨技术。

图表 94：硬车削车床可实现以车代磨显著提升丝杠加工效率



来源：国家知识产权局，《改进型高精度硬车削机床》，国金证券研究所

4.3.2 旋风铣设备：以铣代磨也是实现降本核心方向

根据《旋风硬铣削加工技术及其在精密滚珠丝杠加工中的应用》信息，旋风铣削技术突破推广于 20 世纪 60-70 年代，后续逐步应用在大连机床厂、北京机床研究所、山东博特和南京工艺等，通过旋风铣床完成滚珠丝杠的粗加工。南京工艺在 2004 年首次引进了德国莱斯特瑞兹 PW160 型和 PW300HP 型 CNC 旋风硬铣机床，可以精铣出 800mm 以上的大型滚珠丝杠副。

图表 95：南京工艺目前所使用旋风铣床为德国进口



德国CNC10米高速硬体旋铣螺纹加工机床

来源：南京工艺官网，国金证券研究所

目前国内企业正积极布局旋风铣床开发，秦川机床子公司汉江机床目前开发的数控丝杠铣床可用于滚珠丝杠滚道硬旋铣成型加工，加工效率比传统方式提高 30%。



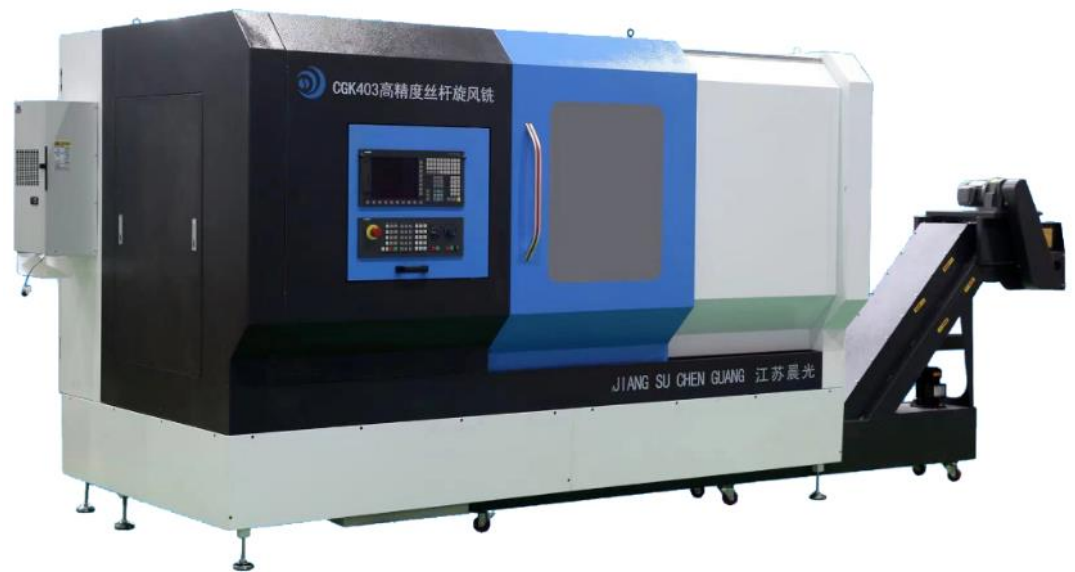
图表 96: 汉江机床已经开发了旋风铣床来进行丝杠加工



来源: 汉江机床官网, 国金证券研究所

晨光数控也开发了高精度丝杠旋风铣床, 主要用于于旋铣小型的滚珠丝杠的滚道、T型丝杠及蜗杆的牙型加工。机床采用内旋方式, 通过工件旋转及 Z 方向进给的两轴联动完成螺旋线加工。旋铣刀盘平面与工件轴相交, 其相交角度等于工件螺纹升角。通过旋铣刀盘的高速旋转及 X 方向进给运动完成旋铣加工的主切削运动及切深的进给运动。

图表 97: 晨光数控丝杠旋风铣床



来源: 晨光数控微信公众号, 国金证券研究所

4.3.3 以车代磨、以铣代磨同时有望带动一部分超硬刀具需求

硬车削、硬铣削加工工艺加工效率高, 但需要对淬火钢进行加工, 通常需要在韧性较好的硬质合金刀具上涂一层或多层的 TiN、Al₂O₃ 或多晶立方氮化硼 (PCBN)。



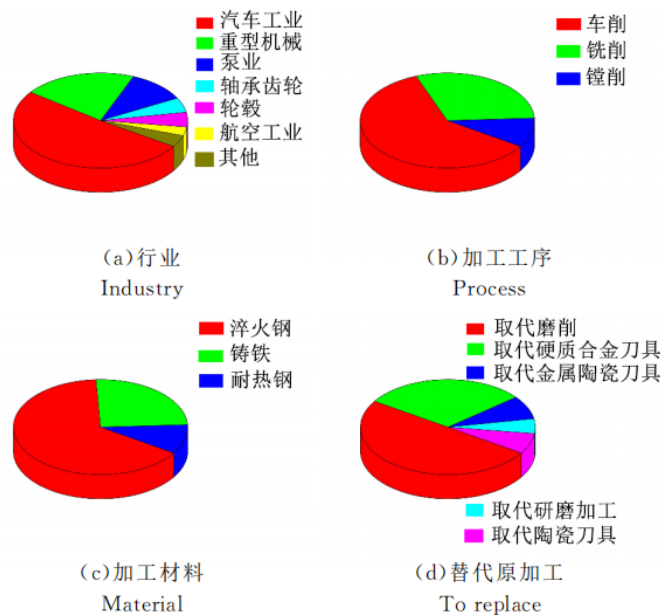
图表98: PCBN 刀具可替代磨削加工

刀具种类	密度 ρ (g/cm ³)	硬度 Hv/GPa	抗弯强度 σ_s /MPa	抗压强度 σ_b /MPa	弹性模量 E/GPa	断裂韧性 KIC/MPa	热稳定性 T/K	热导率 λ (W/m·K)	热膨胀系数 α (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	与铁系元素化学惰性	加工质量
PCD	3.40~4.20	70.5~90.0	1100~2800	4200~7600	560~840	6.8~9.0	<1000	120	3.8~4.9	化学惰性小	高精度、高光洁度 Ra0.1~0.5 μ m
PCBN	3.12~4.30	30.0~70.0	350~1200	2700~3800	580~820	3.7~6.4	1400~1800	40~100	3.6~4.9	化学惰性大	可替代磨削 Ra0.2~0.4 μ m IT5~IT6
复合陶瓷	3.80~5.00	30.0~32.5	500~800	2000~4000	300~400	2.0~3.1	1600~2100	30~40	3.2~8.5	化学惰性大	一般精度 Ra<0.8 μ m IT8~IT7
硬质合金	14.00~15.00	10.5~18.0	800~1500	4000~4600	590~630	10.0~11.0	100~1600	100	5.0~5.4	比高速钢小	一般精度 Ra<0.8 μ m IT8~IT7

来源:《PCBN 超硬刀具研究与进展》, 国金证券研究所

PCBN 刀具主要应用于汽车行业、车削和加工淬火钢等领域, 用于替代部分磨削和硬质合金刀具加工等场景。

图表99: PCBN 刀具主要应用于汽车行业、车削和加工淬火钢等领域



来源:《PCBN 超硬刀具研究与进展》, 国金证券研究所


目前有多家企业推出了针对丝杠的高效加工刀具:

华菱超硬推出了针对滚珠丝杠硬车加工的 CBN (立方氮化硼) 刀片, 加工材质为 GCr15 的丝杠端头与螺纹, 可实现高切削速度与较低表面粗糙度。



图100: 华菱超硬推出了针对丝杠加工的超硬刀具

硬车端头（轧制丝杠），常用刀片型号：BN-S20 CNMN120708/04，改善加工工艺，提高生产效率

	工件材质：GCr15（硬度HRC60-62） 刀片材质：BN-S20 CNGN120708 切削参数：ap=4.5mm，Fr=0.10mm/r，Vc=95m/min 加工方式：干式切削		
	刀具材质	切削速度	吃刀深度
华菱超硬BN-S20材质	95m/min	4.5mm	正常磨损
某品牌陶瓷刀具	65m/min	0.5mm	破损碎裂

螺纹加工，生产效率高，刀具耐用度高，抗震性好不碎裂。

	工件材质：GCr15（硬度HRC60-62） 刀片材质：BN-H10 切削参数：Fr=0.10mm/r，Vc=150m/min 加工方式：干式切削	
	刀具材质	表面粗糙度
华菱超硬BN-H10材质	<Ra0.8	正常磨损
某品牌CBN刀具	Ra1.2-1.6	破损碎裂

来源：华菱超硬官网，国金证券研究所

郑钻推出了针对丝杠螺母加工的硬车削刀具方案和丝杠轴加工的硬铣削刀具方案。

图101: 郑钻推出了针对丝杠螺母加工的硬车削刀具方案和丝杠轴加工的硬铣削刀具方案

以车代磨 高效切削

通用机械传动行业

丝杠螺母加工方案

金属去除率是传统工艺的3-4倍；
加工效率显著提升；
工件表面质量高，尺寸精度稳定；
助力客户单件降本50%。



以铣代磨 高效切削

通用机械传动行业

丝杠旋铣加工方案

一次加工成形，精度高、绿色环保；
加工效率比传统工艺可提高10倍；
有效降本35-40%；
刀具加工寿命≥1200m。



MC42HB系列
专利号：ZL 2021 2 1585458.X

来源：郑钻官网，国金证券研究所

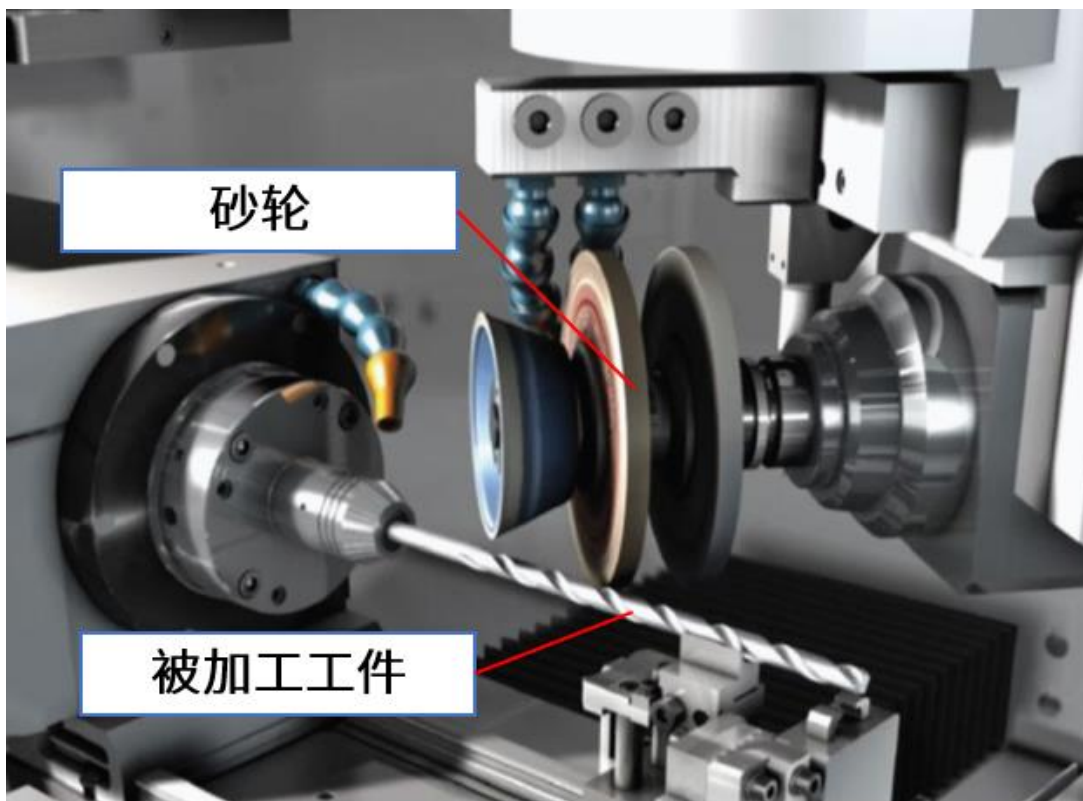
根据沃尔德公告信息，公司针对人形机器人领域的减速器、行星滚柱丝杠加工提供超硬切削刀具，针对行星滚柱丝杠铣削加工刀具，公司与生产设备厂家、客户进行合作，从生产设备制造、产品工艺开发及配套刀具进行深度合作，公司PCBN旋铣刀具现场测试效果较好；梯形丝杠加工用刀具也正在研发中。

4.3.4 螺纹磨床：精加工核心设备，未来具有较大弹性

磨床类机床是以磨料、磨具（砂轮、砂带、油石、研磨料）为工具进行磨削加工的机床，它们是由精加工和硬表面加工的需要而发展起来的。



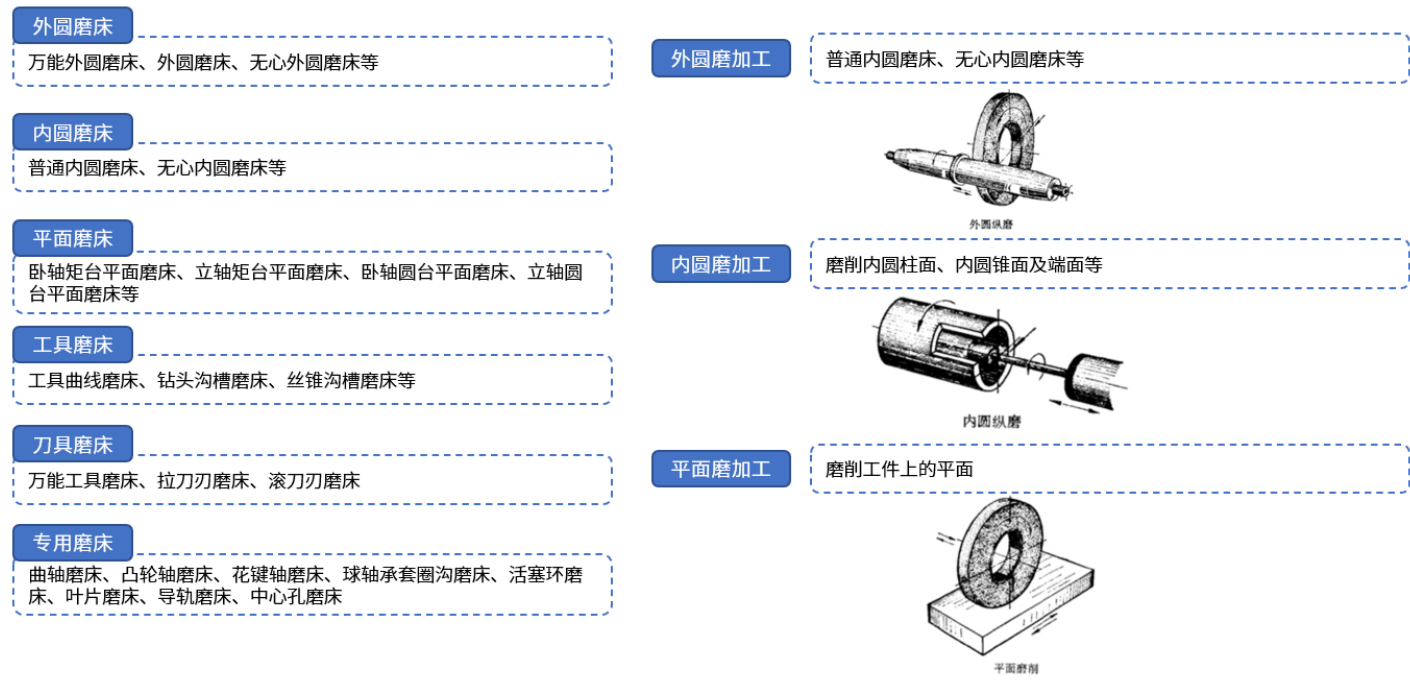
图表102: 磨削加工主要通过砂轮等实现材料去除



来源:《五轴联动工具磨床的关键技术及其研究现状》, 国金证券研究所

磨削加工根据被加工工件形状不同有较多分类, 其中外圆磨、内圆磨、平面磨为最常见的三种磨削加工方式。

图表103: 磨床以外圆磨、内圆磨、平面磨为主



来源:《金属切削机床(第3版)》、《机械制造基础》、国金证券研究所

磨床在高精度、高速追求下具有较高技术壁垒:

1) 高精度: 磨床属于机床精度最高一档, 超精密磨床要求尤其高



整体来看，磨床精度等级属于机床里最高一档，技术难度最高。

图表104：磨床精度等级为机床精度最高一档，技术难度最高（研磨后精度可进一步提高）

加工方法	IT等级																
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
外圆磨削							■	■									
内圆磨削							■	■									
平面磨削						■	■										
无心磨削							■	■									
粗车												■	■	■			
半精车									■	■	■						
精车								■	■								
精细车							■	■									
粗铣													■	■	■		
精铣								■	■	■							

来源：《机械加工工艺简明速查手册》，国金证券研究所

精密磨床技术难度较高，以高精度磨床为例，主要可用于丝杠导轨、机床主轴等部件加工，要求表面粗糙度 Ra 不大于 0.01-0.14 μm，精度达到 0.1-0.5 μm。

图表105：精密磨床加工精度可达微米级，技术难度较高

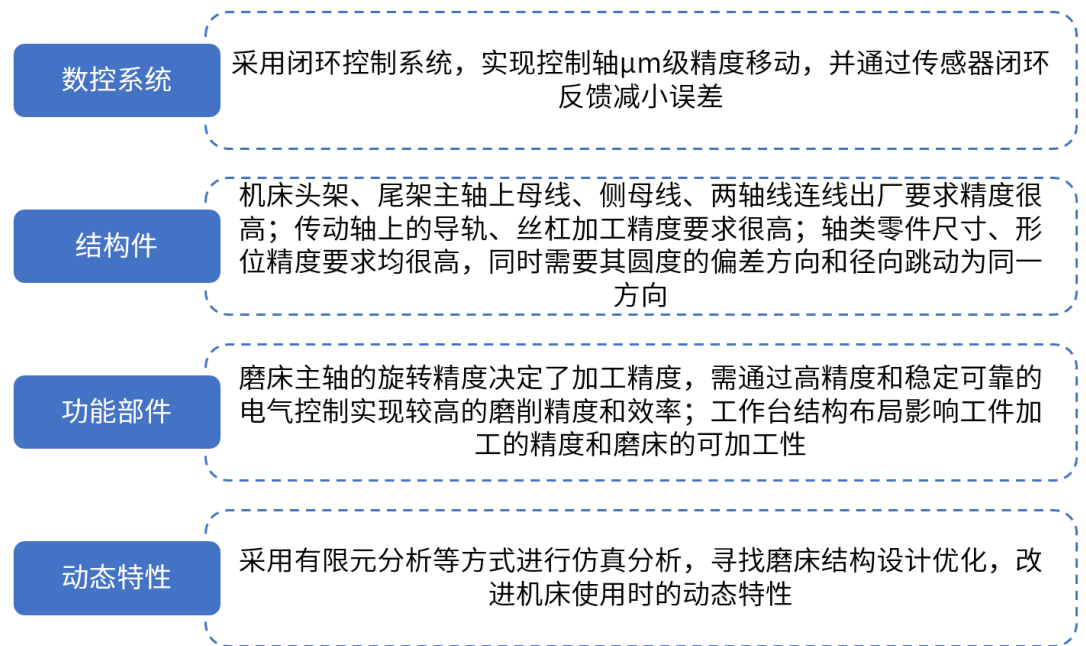
相对磨削等级	加工精度/μm	表面粗糙度 Ra/μm	适用范围
普通磨削	>1	0.16~1.25	各种零件的滑动面、曲轴轴颈、凸轮轴轴颈、活塞、普通滚动轴承滚道及平面、内圆、外圆和桃形凸轮，各种刀具的刃磨，一般量具的测量面等
精密磨削	0.5~1	0.04~0.16	液压滑阀、液压泵、油嘴、针阀、机床主轴、量规、四棱尺、高精度轴承滚柱、塑料及金属带、压延辊
高精度磨削	0.1~0.5	0.01~0.04	高精度滚柱导轨、精密机床主轴、金属线纹尺、标准环、塞规、量杆、半导体硅片、金属带、压延辊
超精密磨削	≤0.1	≤0.01	精密级金属线纹尺、轧制微米级厚度带的压延辊、超光栅、超精密磁头、超精密电子枪、固体电子元件及航天器械、激光光学部件、核融合装置、天体观测装置等零件加工

来源：《磨料、磨具与磨削技术（第二版）》，国金证券研究所

要实现最终的高精度加工，磨床核心功能部件需要具有较高精度。



图表106: 要实现最终的高精度加工, 磨床核心功能部件需要具有较高精度

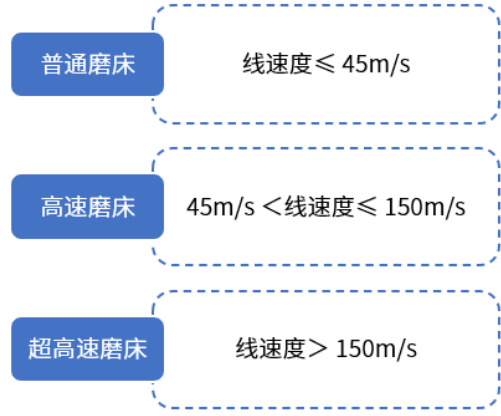
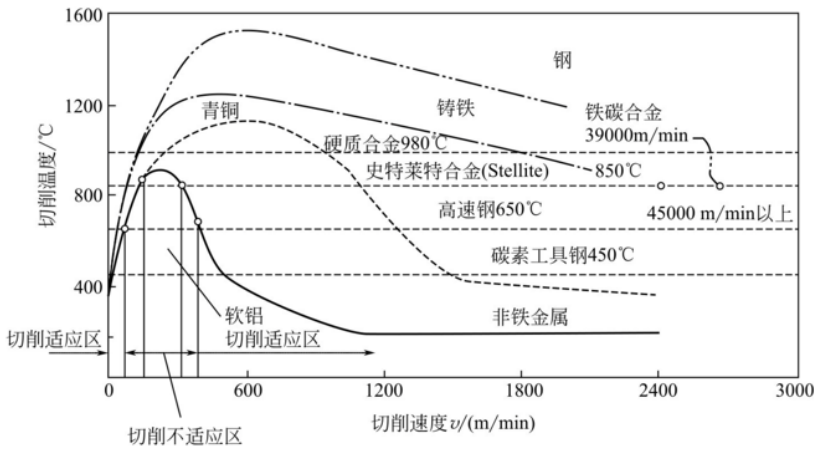


来源: 《超高速磨床仿真分析》, 《高速精密轧辊磨床主轴驱动控制系统设计》, 《基于数控磨床闭环位置反馈实现大型零件带锥表面配磨》, 国金证券研究所

2) 高速度: 实现高速、超高速磨削对磨床性能要求较高
磨床根据砂轮线速度分为普通磨床、高速磨床和超高速磨床。

图表107: 磨床根据砂轮线速度分为普通磨床、高速磨床和超高速磨床

在大于临界切削速度的范围内, 则可进行高速切削, 大幅度地提高机床的生产率

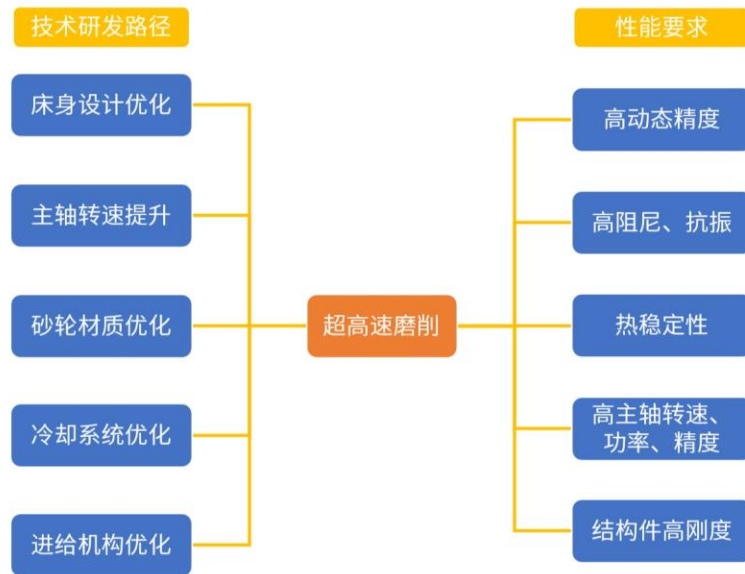


来源: 《高速磨削机床研究综述》, 《磨料、磨具与磨削技术(第二版)》, 国金证券研究所

要实现磨床的超高速磨削, 对床身、主轴、冷却系统等需要进行进一步优化, 以实现较好的动态特性。



图表108: 实现超高速磨削对磨床性能要求较高



来源:《磨料、磨具与磨削技术(第二版)》, 国金证券研究所

欧、美、日等国家与地区由于高端制造业、半导体产业起步较早, 在磨床技术研发水平处于全球领先地位, 相关企业资历老产品成熟。

图表109: 海外磨床企业以欧、美、日等国家与地区为主, 企业发展较为成熟

公司	简介
Precision Surfacing Solutions (PSS)	生产微米级精密表面处理技术开发的全球行业领导者, 拥有 Lapmaster、Peter Wolters、ELB、aba、REFORM、KEHREN、MICRON、ISOG、Barnes 等 9 大品牌家族。能够提供面向各种场景的精密加工解决方案。
UNITED GRINDING Group (联合磨削集团)	世界领先的机床制造商之一, 主要产品有精密磨床、电解机床、激光机床、测量机以及增材制造机床。集团在 20 多个制造、服务和销售地点拥有约 2300 名员工。
hardinge (哈挺机床)	全球一流的高精度, 高可靠性金属切削机床及相关的工具附件供应商。拥有超过 125 年的丰富经验, 产品包括多元化的数控车床、铣床、磨床以及夹持工具配件, 为全球超过 65 个国家及地区提供优质解决方案
Fives (法孚)	法孚在磨削领域已有 120 多年的经验, 并在广泛的应用和材料制作中设计提供磨削技术。在全球磨削领域拥有 141 项有效专利, 能为不同行业客户提供解决方案。
Hamai Company (浜井产业株式会社)	主要产品包括研磨抛光机、滚齿机和双面铣床, 具有 90 多年的双面研磨机、滚齿机制作经验, 产品适合加工各种晶体、硅片、玻璃、蓝宝石、电脑磁盘、液晶等。
AM Technology	主要产品包括单/双面精磨系列设备、研磨抛光系列设备以及精密切割切面系列设备等, 产品应用于工件的精磨、研磨、切割和抛光领域, 其中 ADL 双面精磨, 研磨抛光系列设备和 VRG 半自动减薄系列设备达到欧盟 CE 标准。
Mitsui Seiki (三井精机)	1928 年成立, 专注制造高精度母机, 在丝杠螺纹磨床中占有较高份额, 尤其是在日本的份额接近 100%。
TOYO (东洋先进机床)	凭借在汽车生产制造中孕育出来的加工制造技术, 在超精密加工领域持续突破, 尤其是内圆磨床市场认可度较高, 60 年内圆磨床累计产量达到 10000 台, 23 年销售额 303 亿日元。

来源: 各公司官网, 宇环数控招股说明书, 国金证券研究所

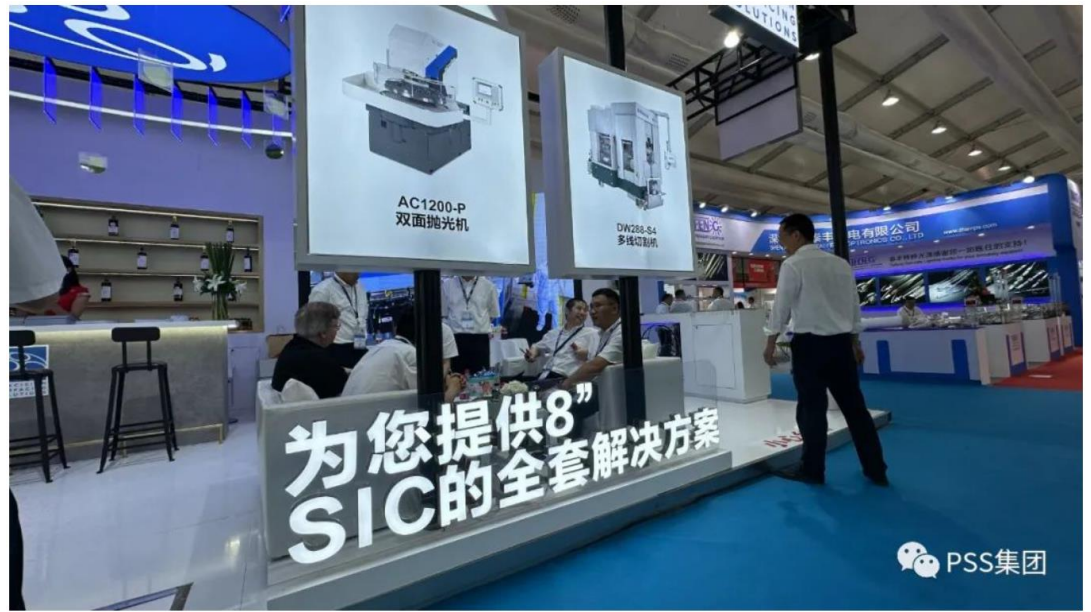
整体来看, 海外市场参与者可以分为“大而全”、“小而美”两类:

1) “大而全”: 打造多品牌产品矩阵, 为多个精密加工下游提供整体解决方案

美国 PSS (Precision Surfacing Solutions) 集团, 前身莱玛特·沃尔特斯 (Lapmaster Wolters), 作为全球最大的超精密机床生产制造者之一, 旗下拥有来自于德国、瑞士、美国、英国及荷兰的多个百年品牌。集团产品涵盖了半导体晶圆设备、多线切割设备、研磨、抛光、双端面磨床、强力成形磨、平面成形磨、去毛刺机、立式磨削中心、叶尖磨、内外圆磨及耗材。为全球超过 9000 个客户提供精密加工解决方案。



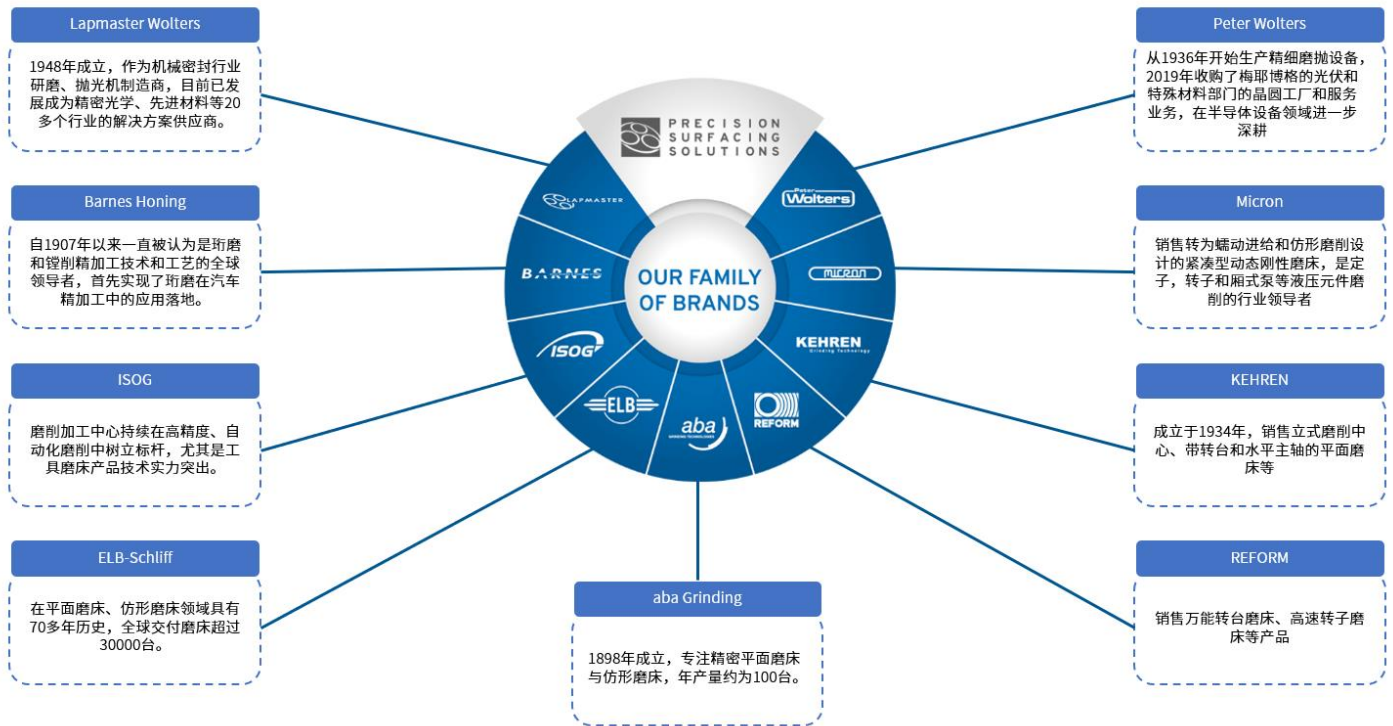
图表110: PSS 集团有能力为多个行业提供全套解决方案



来源: PSS 集团微信公众号, 国金证券研究所

PSS 集团旗下 9 大品牌均有较长发展历史, 构筑强大品牌矩阵。

图表111: PSS 集团旗下 9 大品牌均有较长发展历史技术, 构筑强大品牌矩阵



来源: PSS 集团官网, 国金证券研究所

法孚集团超精密设备事业部提供金属切削、复合材料自动化解决方案、磨削/超精密加工、切削工具/磨具磨料等产品与服务。其磨床板块下属多个品牌, 在汽车行业以其先进的凸轮轴磨削系统和曲轴磨削系统闻名, 同时也在无心磨削、圆盘磨削和数控磨削工艺方面处于领先地位, 其磨削的轴类零件广泛应用于各个行业。



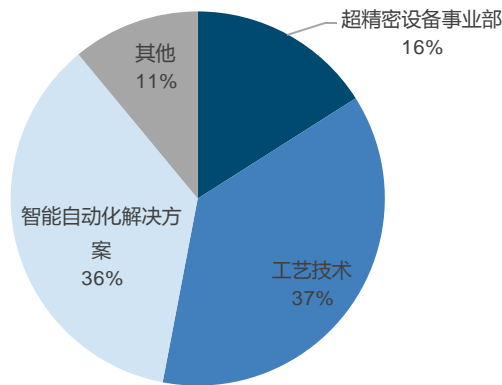
图表112: 法孚集团也以多个知名品牌构筑品牌矩阵, 提供高精度磨削解决方案。

 <p>无心磨削</p> <p>Cincinnati (辛辛那提) 无心磨床能够实现贯通进给或者切入进给的磨削方式。机床的高刚度不仅能确保其超高精度, 还提高了生产效率, 达到更高的磨削余量。</p>	 <p>外圆磨削</p> <p>Landis (兰迪斯) 系列外圆磨床能够为各种大、中、小圆柱形工件的磨削提供精确、可靠、灵活和高效的解决方案。</p>	 <p>内圆/外圆磨削</p> <p>法孚Bryant (布莱恩特) 产品线包含了单一目标的内外圆磨床和复合型磨床(外圆/内圆/滚道/端面)。适用于多种应用场景和广泛的尺寸范围。</p>
 <p>随动磨床</p> <p>法孚Landis (兰迪斯) 领先的随动磨削技术为加工曲轴的连杆径和主轴径, 凸轮轴的凸轮和轴颈, 以及非同轴工件提供高效的解决方案。</p>	 <p>单端面 and 双端面磨削技术</p> <p>提供Gardner (加德纳)、Giustina (吉斯天尼) 或Daisho (大昌) 等品牌的磨床解决方案</p>	 <p>超精密磨削</p> <p>法孚的Cranfield Precision (克兰菲尔德精密) 精密业务领域包括从小型光学自由曲面、棱柱形和非球面磨削, 到大型光学元件的自由曲面磨削, 以及大型鼓轮的金刚石车削。</p>

来源: 法孚集团官网, 国金证券研究所

法孚集团 21 年实现营业收入 17.24 亿欧元, 新签订单 18.89 亿欧元, 其中超精密设备事业部(含金属切削、复合材料自动化解决方案、磨削/超精密加工、切削工具/磨具磨料等多个子版块) 订单占比约为 16%, 对应约 3.02 亿欧元。

图表113: 法孚集团超精密设备事业部 21 年新签订单约 3.02 亿欧元, 占比约 16%



来源: 法孚集团官网, 国金证券研究所

2) “小而美”: 深耕细分领域打造拳头产品

以三井精机为例, 其 23 年营业收入为 212 亿日元, 企业规模小于德玛吉森精机等龙头机床厂, 但高精度机床具有较高知名度, 尤其是螺纹磨床市场份额较高, 在日本份额几乎为 100%。



图表114: 三井精机螺纹磨床具有较高市场份额, 尤其在日本几乎为100%

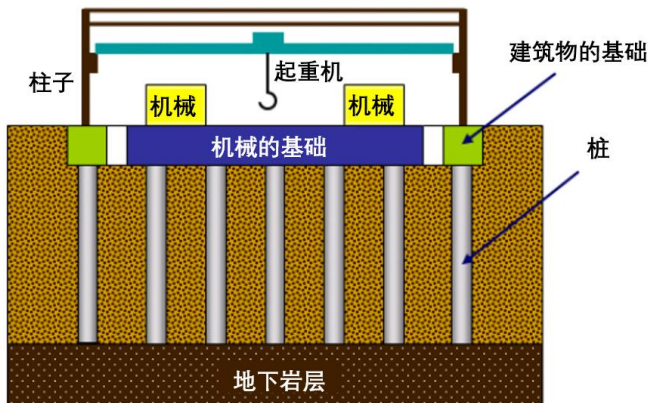


来源: 三井精机官网, 国金证券研究所

为了实现高精度机床制造并保持较高产品一致性, 三井精机在工厂建设、制造/装配工艺等领域不断精进:

1) 实现彻底的温度控制与振动控制。根据三井精机官网信息, 其工厂建设为了确保地基水平与降低外部振动影响, 地基由1700根桩打入地下基岩组成, 同时建筑物的地基与设备安装的地基进行了隔离, 确保其他振动不会对设备造成影响。同时工厂采用了特殊设计的空调系统成为天花板层流系统, 将空调空气泵入天花板, 然后从众多穿孔板中吹出小孔, 朝向地板进行收集并通过回风管循环, 以实现工厂在垂直/水平方向均几乎没有温差, 同时地面几乎没有风速。

图表115: 三井精机工厂建设坚固地基以减少振动影响



来源: 三井精机官网, 国金证券研究所

图表116: 三井精机工厂采用特殊设计的空调系统以降低温度变化



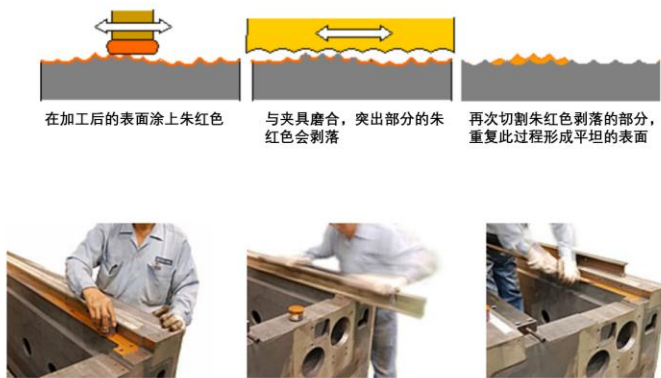
来源: 三井精机官网, 国金证券研究所

2) 采用“Kisage”特殊工艺追求更高精度。工业母机的加工精度无法超过母机本身的精度, 为了解决这个问题三井精机提出了“Kisage”工艺, 使用类似凿子的工具刮掉铸件表面的过程。在高低不平的金属切削表面上涂上朱红色, 再用夹具进行擦拭, 凸出部的朱红色会被剥离, 再次切割朱红色剥离的部分, 重复进行这个过程以确保形成平坦的表面。

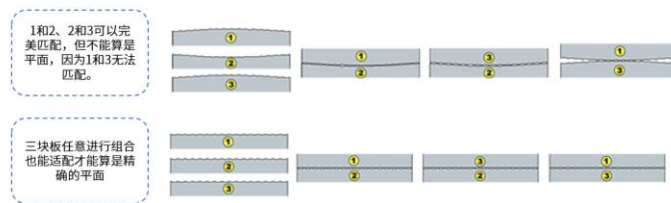


图表117: 三井精机“Kisage”工艺追求更高加工精度

图表118: 三井精机使用“三面摩擦”的方式创造平面



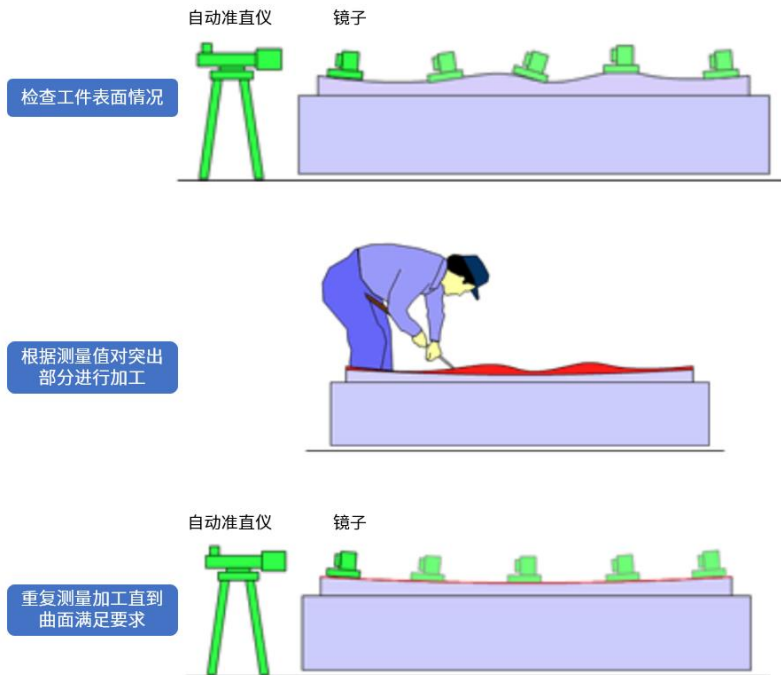
来源: 三井精机官网, 国金证券研究所



来源: 三井精机官网, 国金证券研究所

在一个滑动表面的加工中, 需要进行多次的重复加工与测量以实现高精度。对于加工工人的要求较高, 最好的工人能用身体记住要调整多少到 $1\mu\text{m}$ 去除量。

图表119: 采用“Kisage”工艺多次测量多次加工以实现机械加工无法达到的精度



来源: 三井精机官网, 国金证券研究所

根据《国产与进口五轴工具磨床加工能力的对比测试》中的株洲钻石刀具加工案例信息, 使用国产磨床和进口磨床各加工 5 支 D10 抗振铣刀, 结果显示, 国产磨床和进口磨床加工所有参数均合格, 一致性均较好, 仅从检测样品 A 齿和 B 齿的刃径、芯厚、前后角及跳动的一致性来看, 国产磨床加工的产品质量比进口磨床略好。两种机床加工的产品参数无明显差异, 因此国产磨床加工抗振铣刀的调整控制能力能满足加工要求, 与进口磨床的加工能力处于同一水准, 但产磨床的装夹跳动精度和加工产品的外径跳动精度与进口磨床相比存在一定差距。

我们认为目前国产磨床已具备一定技术积累能够与进口品牌进行竞争, 在有足够需求催化的背景下能够实现国产替代。



图表 120: 国产磨床与进口磨床进行刀具加工性能较为接近

参数	进口 D10 抗振铣刀			国产 D10 抗振铣刀		
	A 齿	B 齿	A、B 齿差值	A 齿	B 齿	A、B 齿差值
刃径 (刃长 1 mm 处) /mm	9.956	9.960	0.004	9.957	9.957	0.000
刃径 (刃长 21 mm 处) /mm	9.945	9.953	0.008	9.951	9.950	0.001
芯厚 /mm	5.50	5.52	0.02	5.62	5.62	0.00
前后段芯厚差 /mm	0.00	0.01	0.01	-0.03	0.00	0.03
前端刃宽 /mm	1.55	1.59	0.04	1.64	1.59	0.05
后端刃宽 /mm	1.570	1.480	0.090	1.600	1.633	0.030
带起宽 /mm	0.285	0.290	0.005	0.185	0.180	0.005
倒角 /mm	0.050	0.045	0.005	0.045	0.050	0.005
前角 / (°)	6.3	5.9	0.4	5.1	5.2	0.1
后角 / (°)	9.0	9.4	0.4	9.2	9.4	0.2
螺旋角 / (°)	38	41	—	38	41	—
刃部径向跳动 /mm	0.003/0.004		0.001	0.004/0.004		0
周刃锯齿 /mm	0.008×0.004		—	0.011×0.005		—
端齿锯齿 /mm	0.010×0.004		—	0.010×0.004		—

来源:《国产与进口五轴工具磨床加工能力的对比测试》, 国金证券研究所

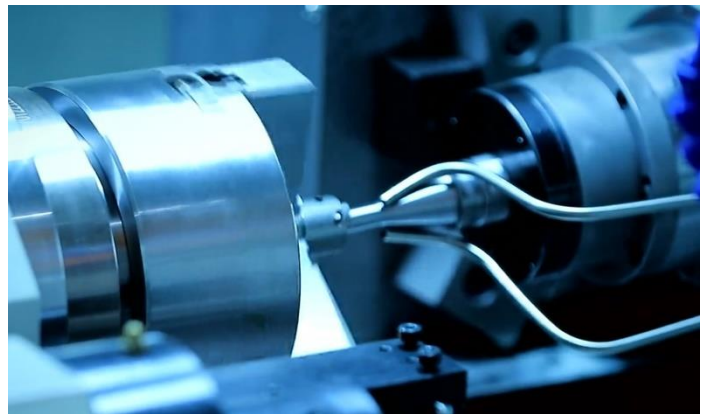
在丝杠加工中磨床的需求主要为外螺纹磨床和内螺纹磨床, 分别完成丝杠轴的外螺纹加工和螺母的内螺纹加工。

图表 121: 外螺纹磨床完成丝杠轴加工



来源: 日发精机微信公众号, 国金证券研究所

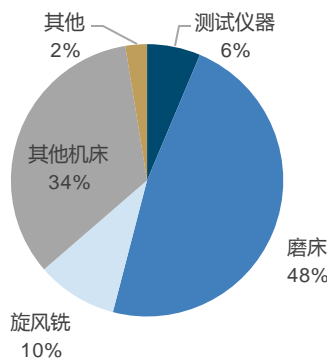
图表 122: 内螺纹磨床完成螺母加工



来源: 日发精机微信公众号, 国金证券研究所

根据秦川机床公告信息, 从再融资项目中关于滚动功能部件扩产的项目规划看, 5 亿丝杠产值 (公司公告披露的测算结果) 对应设备投资额 1.56 亿元, 共采购设备 46 台, 其中磨床价值量占比约为 48%, 价值量占比高主要由于高端磨床采用了进口机床, 单价较高, 高精度床身导轨磨单价可达 2800 万元。

图表 123: 秦川机床滚动功能部件扩产设备投资中磨床占比 48%



来源: 秦川机床公司公告, 国金证券研究所

图表 124: 秦川机床扩产部分进口设备单价可上千万

设备	单价 (万元)
高精度床身导轨磨床	2800
龙门式五面体加工中心	1100
高精度数控直线导轨磨床	1800
高精度数控旋风铣	750

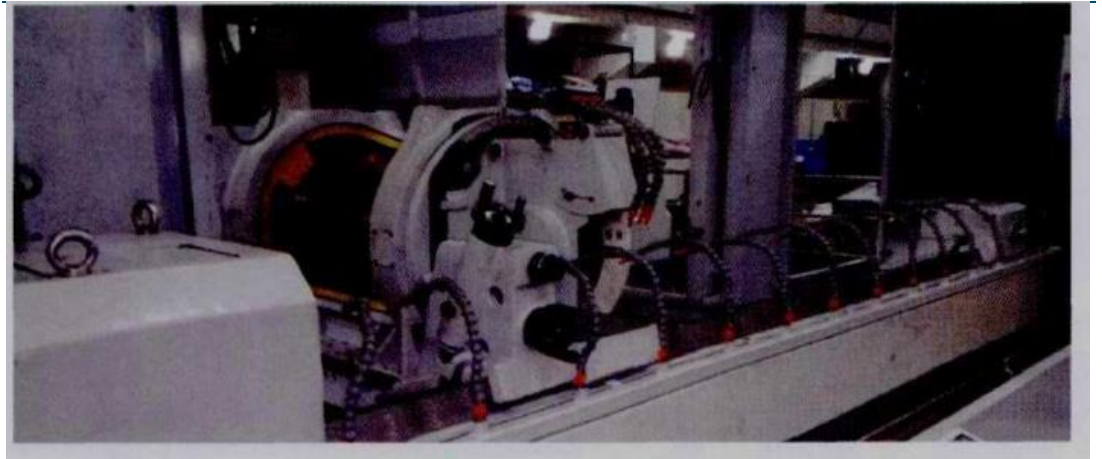
来源: 秦川机床公司公告, 国金证券研究所



我们认为丝杠通过国产设备进行降本势在必行：

1) 在国家重大科技专项的支持下，国产高端螺纹磨床已具备一定技术基础：根据 2014 年发布的《高精度滚珠丝杠磨床的设计与开发》信息，上海机床厂开发的 SK7420 数控丝杠磨床可实现 P1 级别滚珠丝杠副加工，属于国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项资助课题(2011ZX04003—022)，填补了国内缺少高精度数控螺纹磨床的技术空白。我们认为在国家的政策支持下，国内企业在技术层面已经取得了突破，在市场需求快速增长的背景下具备设备国产化放量的基础。

图表 125: 上海机床厂开发的 SK7420 机床可实现 P1 级滚珠丝杠副加工，我们认为技术层面看具备国产替代基础



来源：《高精度滚珠丝杠磨床的设计与开发》，国金证券研究所

2) 定制化开发&自动化升级需求较强：如前文所述，丝杠在磨削加工过程中根据结构不同面临如何避免加工干涉、提升加工效率等问题，需要针对具体需求进行定制化开发。同时考虑人形机器人用丝杠体积较小，在加工上或需要更多的考虑自动化升级所带来的降本空间，国产设备厂商相比进口品牌更贴近终端客户，我们认为在设备定制化开发&自动化升级上国内企业有望抢占先机。

图表 126: 丝杠加工设备有较大优化空间，国内企业贴近终端客户有望抢占先机

丝杠加工时间对比					
普通加工时间/h·件 ⁻¹			智能单元复合加工时间/h·件 ⁻¹		
工序号	工序名称	工时	工序号	工序名称	工时
1	车	3.5	1	电弧铣	3
2	磨	2	2	磨	2
3	铣	1.5	3	热处理	0
4	热处理	0	4	电弧铣	1.5
5	车	2	5	铣	1
6	磨	2	6	磨	1.5
7	铣	1			
8	磨	1			
合计		13	合计		9

来源：《面向精密螺纹丝杠的智能制造单元系统研究》，国金证券研究所

假设人形机器人出货量达到 100 万台，平均每台机器人使用 10 支行星滚柱丝杠，使用两台磨床（内螺纹和外螺纹加工）进行制造，假设设备单价为 200 万元（内螺纹磨加外螺纹磨对应 400 万元/套），每支丝杠平均制造时间分别为 40/60/80 分钟（按照精磨环节时间计算），对应磨床市场需求分别为 44/67/89 亿元。



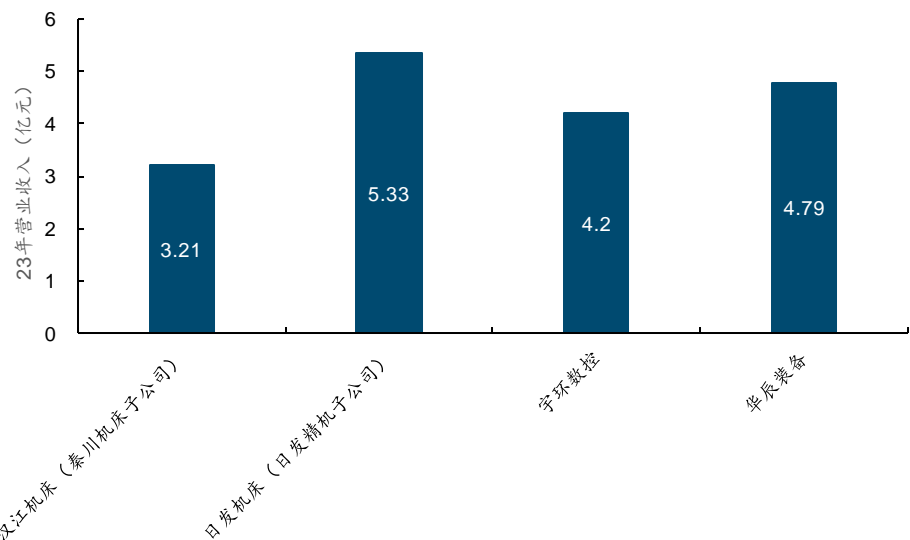
图表127: 人形机器人百万台出货量有望拉动44至89亿元螺纹磨床设备市场

人形机器人出货量 (万台)	100		
单机行星滚柱丝杠需求 (支)	10		
丝杠总需求 (万支)	1000		
平均加工时间 (分钟)	40	60	80
每日有效加工时间 (小时)	20	20	20
一套设备年产量 (按照 300 天计算)	9000	6000	4500
设备需求量 (套)	1111	1667	2222
设备单价 (万元/套)	400	400	400
设备市场需求 (亿元)	44	67	89

来源:《面向精密螺纹丝杠的智能制造单元系统研究》, 仪器招标采购网, 国金证券研究所测算

螺纹磨床原本是较小的市场, 海外企业单一体量不会太大, 国内磨床企业普遍体量也还较小, 在丝杠扩产有较大潜在市场需求的情况下, 我们认为国内有能力实现螺纹磨床突破的企业将有较大弹性。

图表128: 国内磨床企业收入体量较小, 未来有较大成长空间



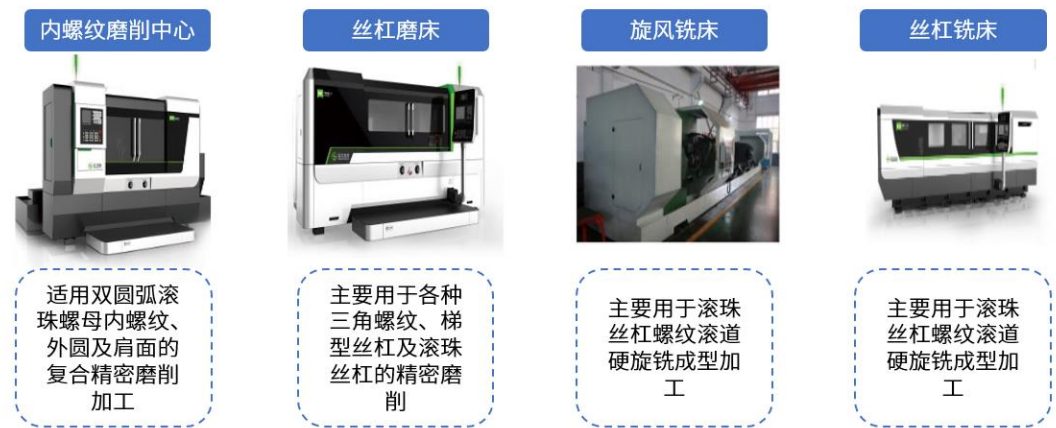
来源: Wind, 国金证券研究所; 注: 汉江机床、日发机床业务不仅限于磨床

目前秦川机床、华辰装备、日发精机均积极加码螺纹磨床布局:

1) 秦川机床: 秦川机床子公司汉江机床为国内螺纹磨床主导企业, 能够提供滚珠丝杠副成套设备。子公司格兰德在磨床领域也开发了外圆磨床、万能外圆磨床、端面外圆磨床、轴承磨床、球面磨床、外圆系列数控磨床、汽车及工具行业专用磨床等 11 大类、110 多个品种、150 多个规格。



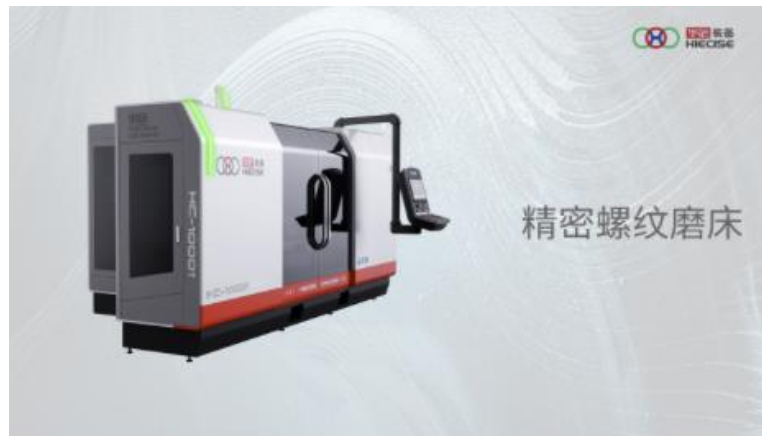
图表 129: 秦川机床子公司汉江机床能提供滚珠丝杠副成套设备, 螺纹磨床技术实力突出



来源: 汉江机床官网, 国金证券研究所

2) 华辰装备: 华辰装备开发了精密螺纹磨床, 标准丝杠试件加工精度等级最高可达 P0 级, 公司与丽水职业技术学院签订设备销售合同, 为其提供数控丝杠超精密磨床 (数控高精度螺纹磨床)、亚 μ 中心孔磨床等设备。并成功中标南京理工大学“江苏省高端制造装备工程技术联合实验室高精度外螺纹磨床项目”, 该项目采购需求为用于工业母机用 P0 级滚珠丝杠副加工工艺, 主要针对小螺距、小钢球、多头螺纹的磨削加工、用于新型人形机器人直线运动关键一体化传动组件磨削加工工序, 用于高精高效螺纹磨削工艺研究等。

图表 130: 华辰装备精密螺纹磨床已获得订单



来源: 华辰装备官网, 国金证券研究所

3) 日发精机: 日发精机多年深耕轴承装备领域, 在高端轴承加工装备技术沉淀基础上开发了数控螺纹磨床及自动生产线等产品。



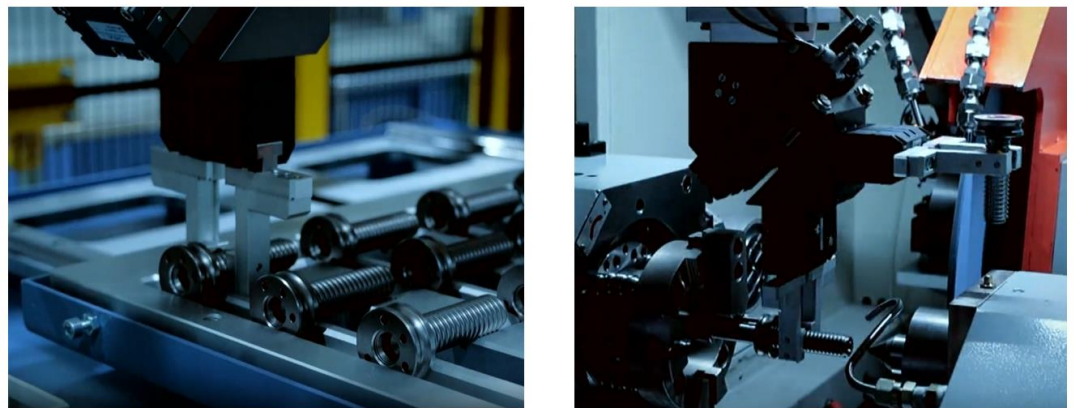
图表 131: 日发精机数控螺纹磨床自动生产线



来源: 日发精机微信公众号, 国金证券研究所

日发精机通过螺纹磨床搭配一体式上下料机、桁架机械手, 完成自动上下料、运输等程序, 具有高精度、高效率、高可靠性等优点, 实现自动化生产线的高效运行。

图表 132: 日发精机自动化线可实现连续加工



来源: 日发精机微信公众号, 国金证券研究所

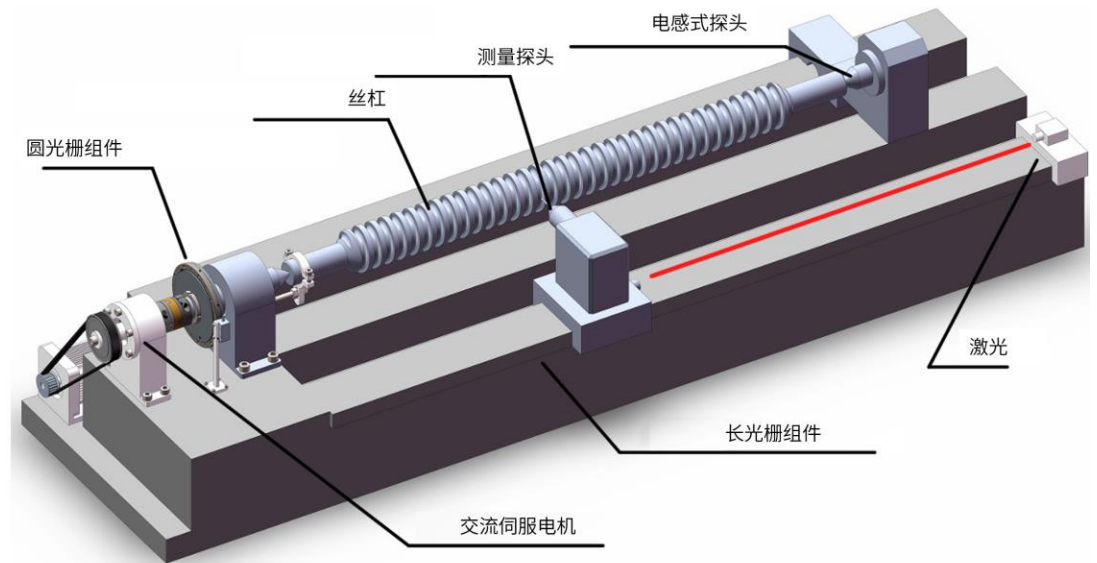
4.4 检测设备: 打造“设计—制造—检测”的闭环正向研发体系核心

丝杠在设计、生产时需要针对行程误差、摩擦力矩、滚道型面误差等进行高精度测试, 需要对定位精度、加速度、温度、噪声、湿度、热位移等指标进行动态测量, 对应的设备包括导程精度测量仪、触针式轮廓测量仪、动态预紧力矩仪、摩擦力矩测量仪、寿命试验机和接触刚度测量机等。

海外的丝杠龙头企业都把检测手段的更新换代放在重要的地位, 经过多年的开发和试验形成了一套较为完整的体系。



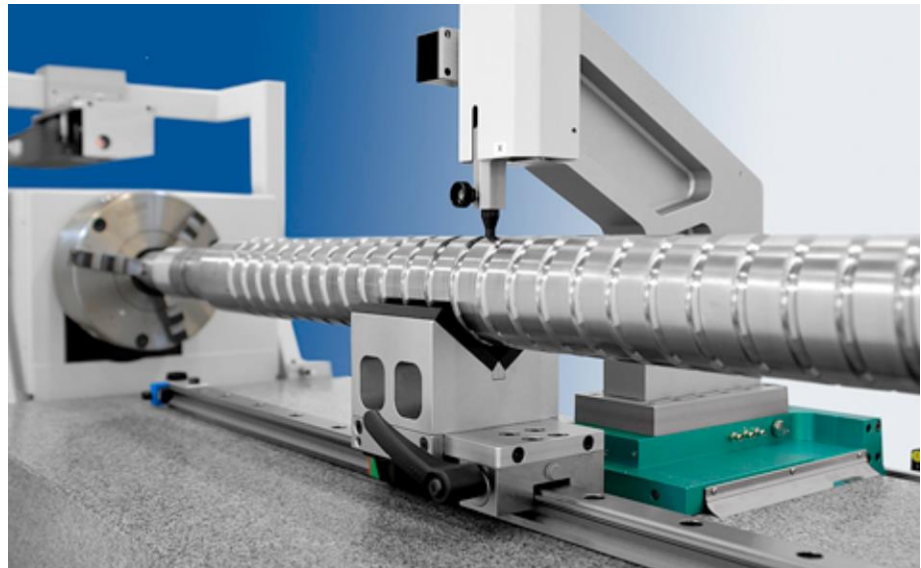
图表 133: 丝杠导程精度测量设备构成



来源: 《Dynamic Screw Lead Accuracy Measurement: Research on the Compensation of the Workpiece Placed Away from the Ideal Position》, 国金证券研究所

目前丝杠检测设备的海外供应商包括瑞士 KUNZ Precision、德国 Kordt、日本三丰精密、日本东京精密等, 产品包括激光干涉仪测量设备、丝杠螺纹主轴间距测量装置、表面形状测量仪等。

图表 134: KUNZ 丝杠轴检测设备通过激光干涉仪捕捉纵向位置



来源: Kunz 官网, 国金证券研究所

经过“04 专项”多年攻关, 目前国内也拥有了一整套科学规范的丝杠副和导轨副测评标准体系, 后续有望加速追赶进口品牌。南京理工大学在江苏省苏州张家港市分别建成省部级和行业重点实验室, 以及行业第三方检测平台“数控机床功能部件共性技术工业和信息化部重点实验室”、“机械工业数控机床功能部件性能测试与可靠性技术重点实验室”。

南京工艺和汉江机床分别建立了南京工艺装备制造有限公司滚动功能部件综合性能实验室、汉江机床滚动功能部件性能实验室。



图表 135: 南京工艺滚动功能部件综合性能实验室



图表 136: 汉江机床滚动功能部件综合性能实验室



来源:《滚动功能部件成套测评方法与装备及性能提升关键技术》,国金证券研究所

来源:《滚动功能部件成套测评方法与装备及性能提升关键技术》,国金证券研究所

后续布局丝杠领域的企业一方面在生产过程中需要丝杠检测设备进行配套,一方面也需要建立自己的成套试验能力,以实现“设计—制造—检测”的闭环正向研发体系,检测设备的重要性较强。

5.投资建议

考虑丝杠赛道高壁垒后续头部企业有望实现高利润率,同时丝杠在工业母机、人形机器人、汽车等领域应用前景广阔,丝杠企业和“卖铲人”设备企业均有较好成长前景,建议关注:

丝杠:贝斯特、恒立液压、秦川机床(同时有螺纹磨床、旋风铣床)、绿的谐波、南京化纤等

热处理设备:恒进感应、金财互联

车床:浙海德曼

螺纹磨床:华辰装备、日发精机

校直机:集智股份

旋风铣刀具:沃尔德

图表 137: 目前布局丝杠领域上市公司梳理

所处环节	代码	公司	市值(亿元)	丝杠布局进展	归母净利润(亿元)					PE				
					2022A	2023A	2024E	2025E	2026E	2022A	2023A	2024E	2025E	2026E
丝杠	300580	贝斯特	122	工业母机丝杠实现应用,签订了批量滚动交付订单,并实现C0级突破;人形机器人行星滚柱丝杠为25年批量供货做好了技术和设备储备;新能源汽车EMB制动系统丝杠完成交样。	2.29	2.64	3.09	3.68	4.53	53	46	39	33	27
	601100	恒立液压	706	线性驱动器项目稳步推进,目前滚珠丝杠产品已进行送样和小批量供货。	23.43	24.99	25.01	30.48	36.25	30	28	28	23	19
	000837	秦川机床	87	子公司汉江机床为成熟滚珠丝杠企业,同时拥有行星滚柱丝杠的研发、制造基础,近年来已有多款产品供给某些特殊行业,部分新型号产品正在研制和试验验证。螺纹磨床市场占有率稳居市场第一,同时开发了旋风铣床。	2.75	0.52	0.77	1.53	2.39	32	166	113	57	36
	688017	绿的谐波	220	筹划将正向/反向行星滚柱丝杠研发成果进行转化,未来面向人形机器人、汽车等领域开展工程	1.55	0.84	0.87	1.15	1.55	142	261	253	192	142



化应用推广。

	600889	南京	63	拟收购南京工艺100%股份，南京工艺为滚珠丝杠领军企业，后续融资渠道拓宽发展有望加速。	-1.77	-1.85									
	.SH	化纤													
	603009	北特	149	规划建设行星滚柱丝杠研发生产基地项目，目前正在上海嘉定工厂投资建设了相应的小批量产线。	0.46	0.51	0.78	1.15	1.69	325	293	191	130	88	
	.SH	科技													
	688320	禾川	65	正在推动直线导轨和丝杠研发项目的研制，应用于高端机床、航空航天、机器人等领域，部分产品已量产。	0.90	0.54				72	121				
	.SH	科技													
	300100	双林	138	于2024年5月完成车用滚珠丝杠样件制造，样件在三方验证中；人形机器人滚柱丝杠产品已研发出样品，试制产线也在建设之中。	0.75	0.81	4.14	4.03	4.78	184	171	33	34	29	
	.SZ	股份													
	603667	五洲	114	开发了汽车转向系统丝杠螺母副、线控系统丝杠螺母副、反向行星滚柱丝杠及灵巧手微型滚珠丝杠等丝杠产品。	1.48	1.38	1.57	2.04	2.48	77	82	73	56	46	
	.SH	新春													
	873593	鼎智	56	布局精密减速箱、T型丝杆、滚珠丝杆、行星滚柱丝杆，公司掌握反式梯形丝杆独特的工艺技术，行星滚柱丝杆已送样，微型伺服电机正在研发。	1.01	0.81	0.53	0.70	0.87	55	69	105	79	64	
	.BJ	科技													
	301550	斯菱	85	计划逐步开发和量产谐波减速器、执行器模组、丝杠三大类产品，丝杠类产品已初步完成样品打造。	1.23	1.50	1.96	2.31	2.72	70	57	44	37	31	
	.SZ	股份													
	300660	江苏	127	布局滚珠丝杆、行星滚柱丝杠等产品。公司微型精密滚珠丝杆及行星滚柱丝杆产品已完成技术储备，进入产能提升阶段。	2.59	3.17	3.49	4.35	5.01	49	40	36	29	25	
	.SZ	雷利													
	300953	震裕	98	建有一条机器人线性关节核心零部件行星滚柱丝杠样品线。根据设计方案，一条全自动中试线预计能达到日行星滚柱丝杠100套的产能。	1.04	0.43	3.02	4.56	6.48	94	229	32	21	15	
	.SZ	科技													
	301368	丰立	56	为人形机器人客户配套的产品有谐波/行星减速器、小伞齿、小圆柱齿、丝杠等。	0.45	0.24				125	233				
	.SZ	智能													
	300946	恒而	30	直线导轨已有百种以上型号，在进行滚珠丝杠副研发。	0.95	0.87	1.04	1.22	1.47	32	34	29	25	20	
	.SZ	达													
热处	838670	恒进	20	公司研发的高端直线导轨/滚珠丝杠系列淬火设备已经在高端数控机床领域实现应用。	0.61	0.28	0.17	0.20	0.23	32	71	115	99	87	
理设	.BJ	感应													
备	002530	金财	71	子公司丰东热技术为知名热处理装备供应商。	-3.41	-0.84									
	.SZ	互联													
校直	300553	集智	20	拥有丝杠自动校直机产品。	0.19	0.33				109	62				
	.SZ	股份													
车床	688577	浙海	31	国产车床领军企业，部分高端数控车床可以凭借高精度、高刚性等优异性能实现以车代磨效果。	0.60	0.29	0.32	0.66	0.88	52	105	97	47	35	
	.SH	德曼													
	300809	华辰	78	开发了满足P0级滚珠丝杠副加工的外螺纹磨床。	0.47	1.18	0.94	1.29	1.68	164	66	83	60	46	
	.SZ	装备													
螺纹	002520	日发	44	用于丝杆、螺母的内、外螺纹磨床及磨削中心已向部分客户交付使用，用于螺母的端面外圆专用磨床已向部分客户交付使用。	-15.30	-9.03									
磨床	.SZ	精机													
旋风	688028	沃尔	28	针对人形机器人领域的减速器、行星滚柱丝杠加工提供超硬切削刀具解决方案，目前已对接下游	0.63	0.97	1.43	1.94	2.30	45	29	20	15	12	
铣刀	.SH	德													



具

客户进行研发、供样等工作。

来源：I find，各公司公告，中国机械工业联合会机器人分会，集智股份官网，丰东热技术官网，国金证券研究所

注：除贝斯特、恒立液压、秦川机床外取自 I find 2025 年 1 月 10 日一致预期

6.风险提示

国产替代进展不及预期：丝杠技术壁垒较高，目前从数据统计看国内外差距正在缩小，下游客户对于国产品牌认可度也在提升，但若国产品牌在研发速度上落后进口品牌，导致技术差距加大，将影响国产品牌国产替代推进。

人形机器人产业化进展不及预期：目前丝杠的潜在增量市场中有较大一部分来自人形机器人行业，若人形机器人产业化进展不及预期，将对市场需求造成负面影响。



行业投资评级的说明：

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



特别声明：

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

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

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

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

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

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

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

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

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

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



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究