

行业研究

丝杠：线性传动核心部件，国产替代星辰大海

——人形机器人行业系列报告（四）

要点

特斯拉机器人 Optimus 躯干共有 28 个关节，旋转关节和直线关节各 14 个。其中线性执行器配备反向式行星滚柱丝杠，将电机的旋转运动转换为直线运动。相比其他直线机构，丝杠在承载能力、位置可控性、抗冲击性等多方面具备优势，具备效率高、紧凑性好、耐用性强等特点。

产品方面

滚珠丝杠：传动效率高、定位精度高。精度等级有 P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10。根据秦川机床公告，2022 年全球市场规模预计为 18.6 亿美元，我国市场规模 27.7 亿元。目前国内行业供需缺口明显，2021 年国内需求量约 1406 万套，产量约 983 万套。滚珠丝杠高端市场基本被德国力士乐、日本 THK、NSK 占据，中端市场则由德国、日本品牌（力士乐、THK、NSK），中国台湾品牌（上银、银泰），中国大陆品牌（汉江、南工艺）占据。

行星滚柱丝杠：高承载，耐冲击，长寿命，体积小。主要分为标准式、反向式、循环式、轴承环式和差动式四类。标准精度等级为 G1、G3、G5。根据 IHSMarkit，2022 年全球销售数量 8.6 万根，销售额 6.5 亿元人民币，其中中国销售数量 1.0 万根，销售额 1.1 亿元人民币。目前国内市场中，SKF、Rollvis、GSA 等国际品牌市占率较高，此外还有南京工艺和济宁博特两家国内品牌。

工艺方面

工艺方面，需综合考虑丝杠精度与生产效率的平衡。按照精度排序，依次是磨削>旋风铣>辊轧，按照生产效率排序，依次是辊轧>旋风铣>磨削，而硬车削通常作为螺纹滚道半精加工的选择之一。为了满足人形机器人降本、放量的要求，行星滚柱丝杠的生产效率和量产成本需在当前水平基础上有较大下降。我们预计，在满足精度要求的前提下，中精度丝杠使用旋风铣、辊轧更能适应大批量、快速交付的要求，而磨床将在高精度丝杠中继续占据不可替代的地位。

投资建议：

人形机器人与人工智能技术不断突破，产业链正处于放量前夕，相关产业链面临巨大投资机遇。丝杠作为人形机器人核心传动部件，正面临新一轮产业机遇。其中行星滚柱丝杠为了满足人形机器人降本、放量的要求，生产效率和量产成本需在当前水平基础上有较大下降，生产工艺正持续优化中，设备、技术等均存在较大国产替代空间。

产品层面：行星滚柱丝杠部分厂商已具备生产能力并向下游客户送样；**工艺层面：**磨削、旋风铣、辊轧、硬态车削预计都将发挥作用。

建议关注：（1）积极布局行星滚柱丝杠产品的贝斯特、五洲新春、恒立液压；（2）高端磨床、“以车代磨”、“以铣代磨”等工艺路线：浙海德曼、华辰装备、秦川机床、日发精机。

风险分析：（1）产业化进程不及预期；（2）竞争加剧风险；（3）核心技术进步不及预期。

电力设备新能源
买入（维持）

作者

分析师：殷中枢

执业证书编号：S0930518040004
010-58452071yinzs@ebcn.com

分析师：黄帅斌

执业证书编号：S0930520080005
0755-23915357huangshuaibin@ebcn.com

分析师：和霖

执业证书编号：S0930523070006
021-52523853helin@ebcn.com

分析师：陈佳宁

执业证书编号：S0930512120001
021-52523851chenjianing@ebcn.com

联系人：李佳琦

021-52523853
lijiaqi@ebcn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：

相关研报

经典五指灵巧手拆解：科研及通用篇——人形机器人专题（三）（2023-11-27）

经典五指灵巧手拆解：医疗假肢篇——人形机器人专题（二）（2023-11-18）

经典五指灵巧手拆解：航空航天篇——人形机器人专题（一）（2023-11-16）

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

投资聚焦

随着大模型等 AI 技术取得突破性进展，作为其重要载体的人形机器人受到广泛关注。2023 年 10 月，工信部印发《人形机器人创新发展指导意见》，称人形机器人有望成为继计算机、智能手机、新能源汽车后的颠覆性产品。为此，我们撰写一系列有关人形机器人的报告，对相关产品、技术进行梳理，并提示相关的投资机会。

我们与市场的不同之处

市场对于行星滚柱丝杠的制造工艺尚缺乏清晰的框架，我们从丝杠精度与生产效率出发，系统性对比了磨削、硬车削、旋风硬铣、辊轧等路线的优劣势，并对长期趋势做出预判。

股价上涨的催化因素

- (1) **重大节点性事件催化。**人形机器人产业正处于产业化前夕，容易受到重大节点性事件催化，如特斯拉举办 AIDAY，Optimus 产品发布新进展，以及其他国内外人形机器人厂商发布新产品等；
- (2) **人形机器人技术取得突破性进展。**人形机器人的成熟建立在 AI 大模型、自动驾驶等多项前沿技术之上，底层技术的快速成熟有助于进一步推动人形机器人产业化落地；
- (3) **订单与投资。**随着人形机器人在诸多场景落地，产业将迎来实质性落地。如果行业内披露相关订单、投资计划，将对股价形成催化。

投资观点

产品层面：行星滚柱丝杠部分厂商已具备生产能力并向下游客户送样；工艺层面：磨削、旋风铣、辊轧、硬态车削预计都将发挥作用。

建议关注：

- (1) 积极布局行星滚柱丝杠产品的贝斯特、五洲新春、恒立液压；
- (2) 高端磨床、“以车代磨”、“以铣代磨”等工艺路线：浙海德曼、华辰装备、秦川机床、日发精机。

目录

1、丝杠：高性能线性传动机构	6
2、滚珠丝杠：广泛应用，高效精准	7
2.1、滚珠丝杠较滑动丝杠更具优势	7
2.2、滚珠丝杠分内循环、外循环两大类型	8
2.3、滚珠丝杠市场：国内企业正向中高端渗透	10
3、行星滚柱丝杠：下一代高承载产品	13
3.1、行星滚柱丝杠：高承载、高速度、长寿命	13
3.2、行星滚柱丝杠主要具有五种类型	14
3.3、行星滚柱丝杠市场：国内外企业差距相对较大	15
4、滚珠丝杠与行星滚柱丝杠的对比	17
5、丝杠加工工艺：生产效率与产品精度的平衡	19
5.1、辊轧路线：精密滚轧技术提效降本潜力大	21
5.2、先车后磨：经典工序精度高，生产效率更待提升	23
5.3、热处理：隐形壁垒，需控制精度	24
5.4、旋风硬铣：新兴工艺，兼具生产效率与产品精度	25
5.5、硬态车削：螺纹滚道半精加工方案	28
6、工艺路线对比：精度、成本、效率、环境	31
6.1、国内在专利、经验、原材料的差距	32
6.1.1、专利：国内正在持续追赶中	32
6.1.2、经验：需要不断积累以提高精度	33
6.1.3、原材料：上下游要协同，提升纯净度	34
6.2、发展趋势：面向量产任务，设备与原材料升级	35
7、投资建议	36
7.1、产品方面	36
7.2、工艺方面	37
8、风险分析	41

图目录

图 1：特斯拉 Optimus 的 6 类执行器.....	6
图 2：特斯拉 Optimus 旋转执行器与线性执行器	6
图 3：滑动丝杠与滚珠丝杠传动效率对比	7
图 4：导程精度的说明	9
图 5：不同用途区分的滚珠丝杠精度等级表	10
图 6：各行业领域应用滚珠丝杠比例（2020 年）	11
图 7：2015-2022 年全球滚珠丝杠市场规模	11
图 8：2015-2022 年中国滚珠丝杠市场规模	11
图 9：2014-2022 年中国滚珠丝杠产需缺口情况.....	12
图 10：2014-2022 年中国滚珠丝杠价格走势情况.....	12
图 11：2021 年国内滚珠丝杠高端市场.....	12
图 12：2021 年国内滚珠丝杠中端市场.....	12
图 13：行星滚柱丝杠结构图	13
图 14：滚柱丝杠与滚柱螺母啮合原理图	13
图 15：行星滚柱丝杠的应用场景	16
图 16：2022 年中国滚柱丝杠份额预测.....	16
图 17：行星滚柱丝杠成本构成	16
图 18：滚柱丝杠的销售预测	17
图 19：滚珠丝杠与行星滚柱丝杠应用历程对比	17
图 20：行星滚柱丝杠所有零件	18
图 21：行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比.....	18
图 22：行星滚柱丝杠误差来源	19
图 23：行星滚柱丝杠关键技术	20
图 24：不同类型丝杠的制造工艺	20
图 25：行星滚柱丝杠螺纹副的加工工艺方法.....	21
图 26：轧制滚珠丝杠制作过程	22
图 27：砂轮加工外螺纹螺旋面	23
图 28：磨削实验用五线砂轮	23
图 29：丝杠制造相关热处理方式.....	24
图 30：切削温度与切削速度变化关系.....	25
图 31：软铣与硬铣的区别.....	25
图 32：滚珠丝杠旋风铣削加工示意图.....	26
图 33：旋风铣——外螺纹.....	26
图 34：旋风铣——内螺纹.....	26
图 35：汉江机床厂自主研发 8m 旋风机床	27
图 36：Leistritz 生产的 LWN190 旋风铣床	27
图 37：三维螺纹车削的简化模型.....	28
图 38：螺纹车削的分析区域	28
图 39：CBN 专用车刀与刀杆	30

图 40：丝杠螺纹车削现场.....	30
图 41：螺纹车削的进刀方法	30
图 42：径向进刀法的进刀量分配方式.....	30
图 43：专利申请趋势图	32
图 44：各关键技术分支的专利申请情况	33
图 45：丝杠高效规模化生产发展趋势.....	35

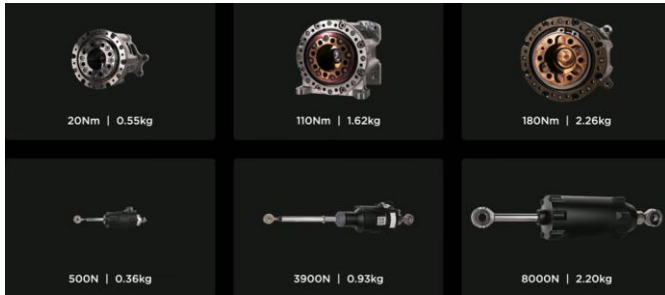
表目录

表 1：直线机构性能对比.....	6
表 2：滚珠丝杠分类与特点	8
表 3：滚珠丝杠国际标准精度等级（单位：0.001mm）	9
表 4：行星滚柱丝杠分类与特点.....	14
表 5：行星丝杠公差等级.....	15
表 6：行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比	18
表 7：行星滚柱丝杠产品竞争品牌分析	19
表 8：丝杠工艺流程	23
表 9：滚珠丝杠三种螺纹制造技术的对比	31
表 10：滚珠丝杠三种螺纹制造技术环境对比.....	31
表 11：具体参数及要求（单位：mm）	33
表 12：材料的化学成分对比表（单位：%）	34
表 13：丝杠主要厂商	36
表 14：国外各类型的磨床具有代表性的生产商	37
表 15：海外丝杠机床主要参与者	38
表 16：国内上市公司中丝杠行业主要参与者.....	39

1、丝杠：高性能线性传动机构

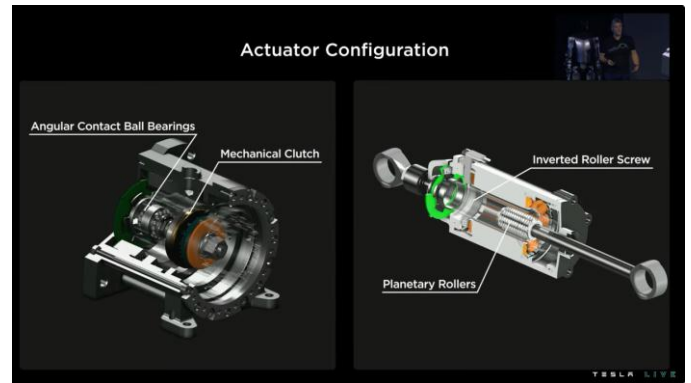
特斯拉机器人 Optimus 躯干共有 28 个关节，旋转关节和直线关节各 14 个。每个关节对应 1 个执行器，为满足大批量生产的需要，特斯拉最终选取了 6 类执行器应用于 28 个关节，6 类执行器中有 3 类旋转执行器，3 类线性执行器，其中线性执行器重量从 0.36kg~2.20kg 不等，推力分别为 500N, 3900N 与 8000N，配备反向式行星滚柱丝杠，具备效率高，紧凑性好、耐用性强等特点。

图 1：特斯拉 Optimus 的 6 类执行器



资料来源：TeslaAIDay2022

图 2：特斯拉 Optimus 旋转执行器与线性执行器



资料来源：TeslaAIDay2022

在线性执行器中，反向式行星滚柱丝杠负责将电机的旋转运动转换为直线运动。相比其他直线机构，丝杠在承载能力、位置可控性、抗冲击性等多方面具备优势。

表 1：直线机构性能对比

项目	直线电机系统	气动伺服系统	液压伺服系统	齿轮齿条系统	滚珠丝杠系统	行星滚柱丝杠系统
承载能力	低	高	很高	高	高	很高
寿命	较长	较长	较长	较长	较长	很长
速度	较快	很快	中等	较快	中等	很快
有无泄露	无	有	有	有	无	无
位置可控性	容易	很困难	困难	容易	容易	容易
抗冲击性	高	高	很高	高	很高	很高
机械刚度	中等	低	高	高	中等	较高
相对体积	小	大	大	大	中等	小
摩擦	小	中等	小	小	小	小
效率	—	中等	中等	很高	很高	较高
安装	简单	复杂	复杂	简单	简单	简单

资料来源：杜兴《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究》

常见的丝杠产品包括滑动丝杠、滚珠丝杠、行星滚柱丝杠等。丝杠轴上有圆弧轮廓，此轮廓在轴上按照一定的升角（导程角）盘旋在轴上，基本原理是，把丝杠轴一端或者两端沿轴向固定，用电机驱动丝杠旋转，螺母就会沿丝杠轴线方向运动。其中，滑动丝杠制造成本最低，结构简单，依靠螺母与丝杠之间的滑动推动螺母运动，产生滑动摩擦；滚珠丝杠与行星滚柱丝杠将滑动摩擦改为滚动摩擦，大大提高了传动效率。

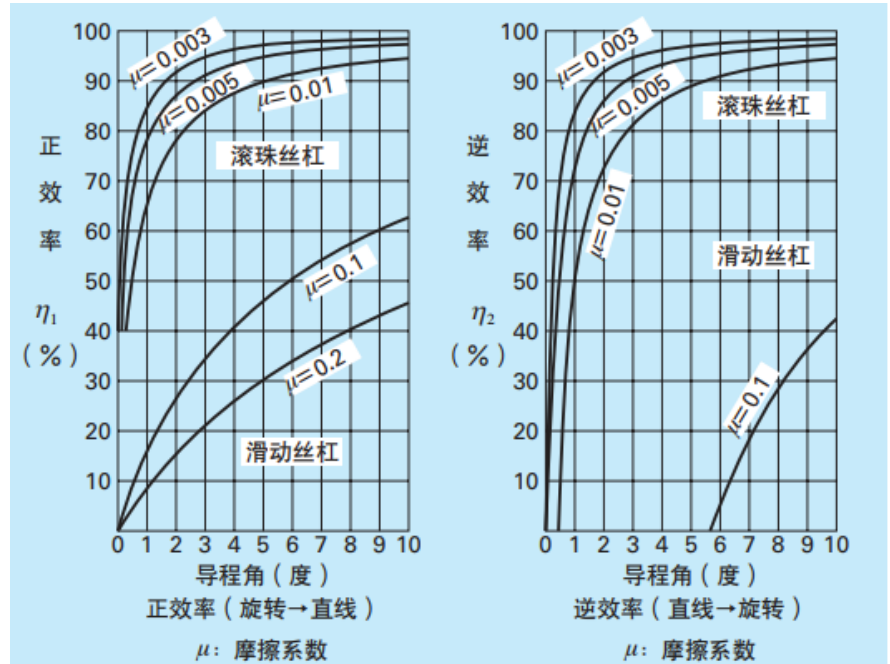
2、滚珠丝杠：广泛应用，高效精准

2.1、滚珠丝杠较滑动丝杠更具优势

滚珠丝杠在丝杠与螺母上都磨有圆弧形的螺旋槽，两个圆弧形的螺旋槽对合后形成螺旋线滚道，丝杠被电机带动旋转时，滚珠在管道内做循环运动，并在螺旋槽两端设有回旋引导装置，使滚珠循环流动。

滚珠丝杠的摩擦系数在 0.003 到 0.01 之间，而梯形丝杠的摩擦系数在 0.1 到 0.2 之间。因此，由于滑动摩擦系数远高于滚动摩擦系数，滑动丝杠为避免产生大量热量，其转速一般不超过 3000RPM，而滚珠丝杠可以达到 10000RPM。

图 3：滑动丝杠与滚珠丝杠传动效率对比



资料来源：NSK

按照滚珠的循环方式和是否始终与丝杠保持接触，滚珠丝杠主要分为内循环与外循环，外循环按结构不同分为端部导流式、管循环式、端盖式。

相比滑动丝杠，滚珠丝杠具有以下特点：

- 1) 传动效率高：大多数滚珠丝杠的传动效率可以达到 90% 以上，而滑动丝杠的传动效率大多低于 70%；
- 2) 传动精度、定位精度高：无爬行现象，运动平稳；
- 3) 能够预紧：给予适当预紧，可消除丝杠和螺母的螺纹间隙，反向时可消除空行程死区，提高接触刚度与传动精度；
- 4) 运动具有可逆性：丝杠和螺母都能作为主动件，既可以化旋转为直线运动，也能化直线运动为旋转；
- 5) 摩擦损失小：由于采用滚动方式，物件磨损小，使用寿命长；制造工艺复杂，滚珠丝杠和螺母原件加工精度与表面粗糙程度要求高，带来制造成本的上升；

需要指出，滚珠丝杠由于传动效率较高，自身一般不具有自锁性，滑动丝杠具有一定的自锁性，因此在丝杠应用于竖直方向时，滚珠丝杠可能在断电后滑落，需要额外结构或器件以确保安全。

2.2、 滚珠丝杠分内循环、外循环两大类型

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

按照滚珠循环方式，可分为内循环、外循环两大类型：

(1) 内循环在相邻的导程间通过马蹄状导流器循环，适合小导程；

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

表 2：滚珠丝杠分类与特点

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

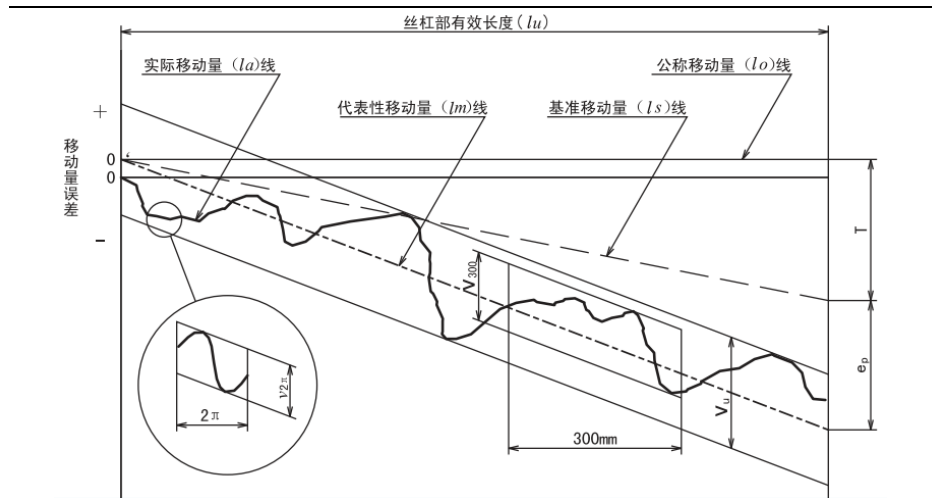
资料来源：NSK、光大证券研究所

滚珠丝杠精度等级划分标准是任取长度为 300MM 的一段丝杠，测量实际移动距离和理想移动距离的偏差，偏差越小，精度越高。按国内分类，精度等级有 P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10；日本、韩国和中国台湾省采用 JS 等级即 C0、C1、C2、C3、C5、C7、C10；欧洲国家采用的标准是 IT0、IT1、IT2、IT3、IT4、IT5、IT7、IT10。

通常情况下，普通机械采用 C7、C10 级别丝杠即可满足加工要求；数控设备一般需要 C3、C5 级别丝杠，其中国内大部分数控机床配套 C5 级丝杠。航空制造设备、精密投影及三坐标测量设备等一般采用 C3、C2 级别丝杠。

从功能上讲，丝杠分为传动级丝杠和定位级丝杠。传动级丝杠包括 C6-C10 精度，由于一般采用辊轧方式制造，也被称为转造级丝杠；定位级丝杠包括 C0-C7 精度，由于一般采用磨床方式制造，也被称为研磨级丝杠。

图 4：导程精度的说明



资料来源：NSK、光大证券研究所

表 3：滚珠丝杠国际标准精度等级（单位：0.001mm）

等级		研磨级									
								转造级			
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C10
v300	ISO,DIN		6		12		23		52		210
	JIS	3.5	5		8		18		50		210
	HIWIN	3.5	5	6	8	12	18	23	50	100	210

资料来源：中国台湾 HIWIN

根据 NSK 披露，数控机床中车床、铣床、镗床、钻床、冲床等常用精度等级为 C5，磨床、电火花加工机械、线切割机常用精度等级为 C3，半导体/印刷版制造装置常用精度等级为 C1，工业机器人常用精度等级为 C5-C7。

图 5：不同用途区分的滚珠丝杠精度等级表

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

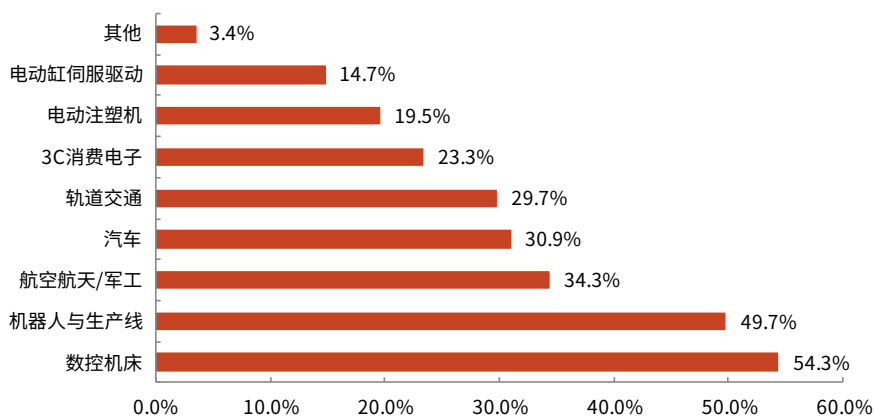
用途	通用机械・专用机械	半导体 / 印刷板制造装置						工业用机器人						冶金设备机械	注塑机	三维测量仪	办公设备	图像处理装置	原子能			
		曝光装置	化学处理装置	焊线机	探测器	电子零件插件机	印刷板开孔机	正交坐标型		垂直多关节型		圆筒坐标型	控制棒						机械式缓冲器	飞机		
								组装	其他	组装	其他											
精度等级	C0		○			○										○		○				
	C1		⊙		⊙	⊙	○									⊙		⊙				
	C2				○	⊙	○	○	○							○						
	C3	○		○			○	⊙	○		○		○						○		○	
	C5	⊙		○			⊙	○	⊙	○	⊙	○	○	○		○		○		⊙		⊙
	Ct7	⊙		⊙				○	⊙	○	⊙	⊙	⊙	○	⊙		⊙		○	⊙		
	Ct10	○		○					○					⊙	○		○			○		

资料来源：NSK

2.3、滚珠丝杠市场：国内企业正向中高端渗透

根据 2020 年金属加工杂志社第三届滚动功能部件用户调查分析报告，数控机床依然是滚动功能部件最主要的用户。随着制造业向数字化、智能化的转型升级，机器人与生产线领域的应用占比快速增长。

图 6：各行业领域应用滚珠丝杠比例（2020 年）

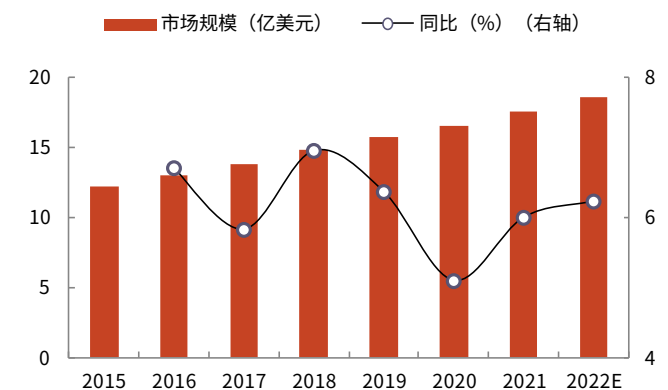


资料来源：金属加工杂志社

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

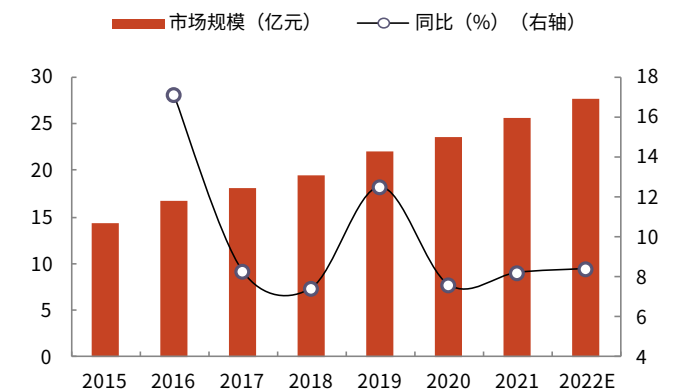
从市场竞争格局看，目前全球主要的滚珠丝杠厂商有 NSK、THK、SKF 等，根据华经产业研究院统计，2021 年 CR5 销售额市占率达到约 46%，其中主要来自欧洲和日本，日本和欧洲滚珠丝杠企业占据了全球约 70% 的市场份额。

图 7：2015-2022 年全球滚珠丝杠市场规模



资料来源：秦川机床公告预测、光大证券研究所

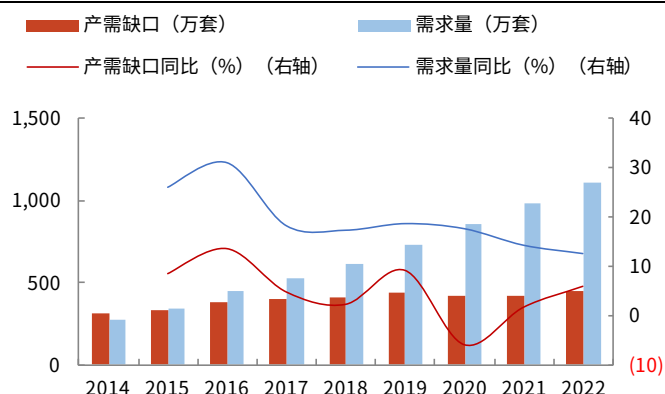
图 8：2015-2022 年中国滚珠丝杠市场规模



资料来源：秦川机床公告预测、光大证券研究所

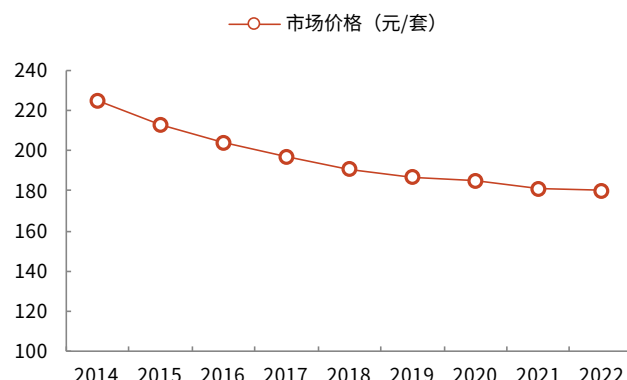
从国内行业供需情况来看，滚珠丝杠需求量大于产量，行业供需缺口明显。根据华经产业研究院统计，2021 年中国滚珠丝杠产量达到 983 万套，需求量为 1406 万套。价格走势来看，近几年来随着我国滚珠丝杠行业市场竞争加剧，国内企业向中高端市场渗透，外资品牌积极抢占经济型产品市场份额，行业市场竞争显著加剧，使得行业市场价格总体呈现出明显的下降态势。国内滚珠丝杠价格从 2014 年 225 元/套的均价下降至 2021 年的 181 元/套，预计 2022 年市场价格降至 180 元/套，下降速度趋缓。

图 9：2014-2022 年中国滚珠丝杠产需缺口情况



资料来源：华经产业研究院、光大证券研究所

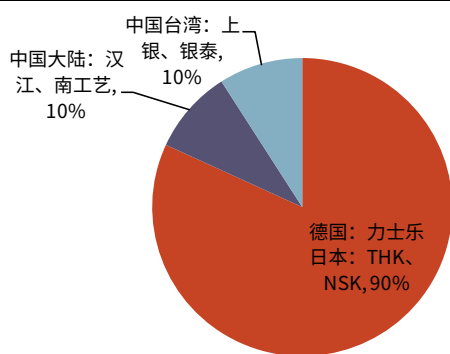
图 10：2014-2022 年中国滚珠丝杠价格走势情况



资料来源：华经产业研究院、光大证券研究所

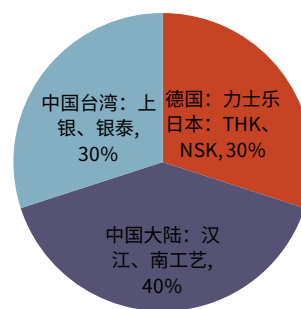
国内滚珠丝杠高端市场基本被德国力士乐、日本 THK、NSK 占据，中端市场则由德国、日本品牌（力士乐、THK、NSK），中国台湾品牌（上银、银泰），中国大陆品牌（汉江、南工艺）占据。

图 11：2021 年国内滚珠丝杠高端市场



资料来源：金属加工微信公众号；销售额口径

图 12：2021 年国内滚珠丝杠中端市场



资料来源：金属加工微信公众号；销售额口径

3、行星滚柱丝杠：下一代高承载产品

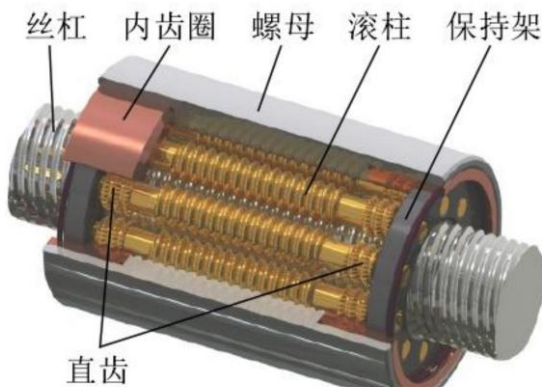
3.1、行星滚柱丝杠：高承载、高速度、长寿命

行星滚柱丝杠（Planetary rollerscrew, PRS）与滚珠丝杠类似，是一种可将旋转运动和直线运动相互转化的机械装置。PRS 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。目前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。

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、高频率、高效率、长寿命的机械装置作为机电传动系统（Electro-Mechanical Actuator, EMA）的执行机构，取代易污染、维护成本高的传统液压传动系统（Electro-Hydrostatic Actuator, EHA）。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，近年来行星滚柱丝杠被广泛关注。

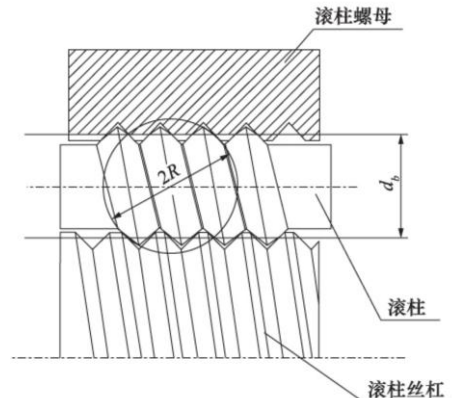
标准行星滚柱丝杠主要由滚柱丝杠、滚柱螺母、滚柱、内齿圈、压盖及挡圈组成。滚柱丝杠与滚柱螺母为齿形角 90° 的多头螺纹。滚柱为齿形为双凸圆弧的单头螺纹。若干滚柱围绕丝杠均匀分布。当滚柱丝杠旋转时，滚柱既围绕丝杠轴作公转，又围绕自身轴线作自转，带动滚柱螺母作轴向移动。因此，滚柱丝杠副滚柱与丝杠、螺母为滚动摩擦，传动效率最高可以达到 90%。行星滚柱丝杠副承载主要靠滚柱螺纹与丝杠、螺母 90° 齿形角两边点接触承载。

图 13：行星滚柱丝杠结构图



资料来源：柯浩《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》

图 14：滚柱丝杠与滚柱螺母啮合原理图



资料来源：肖正义《行星滚柱丝杠副的研究》

与目前广泛应用的滚珠丝杠相比，采用行星滚柱丝杠进行传动，具备以下优点：

1) 高承载，耐冲击，体积小。行星滚柱丝杠是线接触，接触面的增加使承载能力和刚性大大提高。每个滚柱的每条螺旋线都同时与配合部件受力接触，同时承受负载。这种设计保证负载分散在更多的接触点上，降低每个接触点上的最大压力，承受冲击载荷能力强，工作可靠。相同载荷情况下，行星滚柱丝杠体积比滚珠丝杠小 $1/3$ 的空间。

2) 速度高，噪声低。不像滚珠丝杠那样，钢球需要反复加载、卸载，还需要在滚珠循环通道两端急剧转向，所以行星滚柱丝杠转速可达 6000RPM，最高线速度可达 2000mm/s，最大加速度可达 3G。滚珠丝杠机构的噪声来源于滚珠在循环通道中的相互碰撞和急速转向，而行星滚柱丝杠的噪声来源于滚柱两端正时齿轮机构的啮合，其频率更高，而且不会随丝杠转速升高呈指数级增加。因此，行星滚柱丝杠比滚珠丝杠的噪声更低。

3) 高精度，长寿命。丝杠轴是小导程角的非圆弧螺纹，有利于达到较高的导程精度，可实现精密微进给。行星滚柱丝杠能承受的静载为滚珠丝杠的 3 倍，寿命是滚珠丝杠的 15 倍。

4) 易安装维护，环境适应。电动缸中一体化螺母组件很容易从丝杠轴分离，滚动体及相关零件不会散落，便于安装与维修。电动缸对恶劣的环境（低温、粉尘、化学沉积和无润滑等）的适应能力较强。

3.2、行星滚柱丝杠主要具有五种类型

经过数十年的发展，行星滚柱丝杠衍生出不同种类，主要分为标准式、反向式、循环式、轴承环式和差动式。

(1) 对于标准式行星滚柱丝杠，为了避免滚柱轴线相对于丝杠倾斜，消除丝杠螺旋升角对滚柱产生的倾覆力矩，滚柱两端带有螺旋齿，确保滚柱平行于丝杠轴线而正常转动；

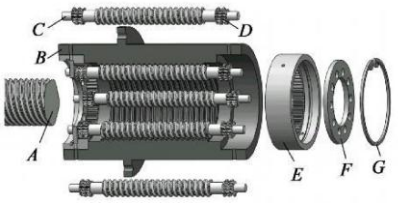
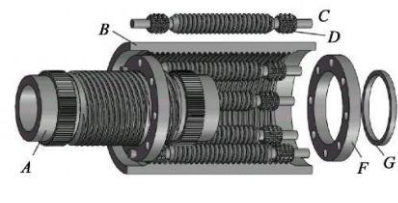
(2) 反向式行星滚柱丝杠与标准式行星滚柱丝杠的区别在于，反向式行星滚柱丝杠是螺母作为旋转输入而丝杠作为直线输出，并且丝杠螺纹两端加工有直齿，其优势在于便于集成；

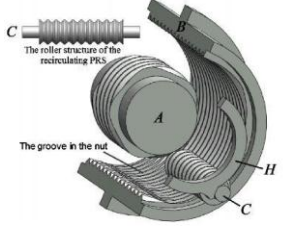
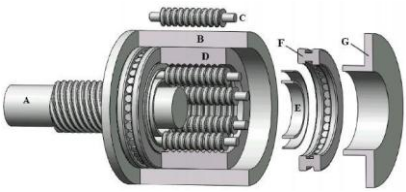
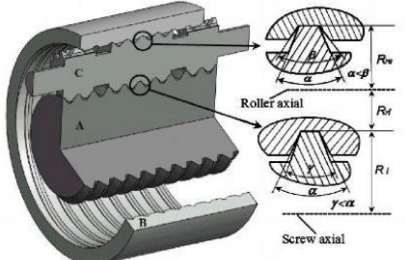
(3) 循环式行星滚柱丝杠明显特征在于其滚柱螺纹为螺旋升角为零的环槽，该类行星滚柱丝杠的优势在于可以实现小导程、高位置精度、啮合点更多和承载能力更高；

(4) 轴承环式行星滚柱丝杠中，螺母不是单个部件，而是由轴承环、壳体 and 端盖组成。动力由丝杠传给滚柱，再由滚柱传给轴承环，轴承环两端装有推力圆柱滚子轴承，轴承环在推力圆柱滚子轴承中可自由旋转并将动力传给推力圆柱滚子轴承，最后由推力圆柱滚子轴承传到螺母壳体上；

(5) 差动式行星滚柱丝杠其明显特征在于滚柱和螺母均为无螺旋升角的环槽，且滚柱分为大直径段和小直径段，大直径段的环槽与丝杠螺纹啮合，小直径段的环槽与螺母环槽啮合，其优势在于小导程的实现、结构简单且便于加工。

表 4：行星滚柱丝杠分类与特点

分类	构造	特点	图例
标准式	丝杠 A 和螺母 B 为多头螺纹，牙型均为三角形；C 是滚柱，为单头螺纹，球形轮廓，为了消除丝杠螺旋升角对滚柱产生的倾覆力矩，在滚柱两端加工有直齿 D 与内齿圈 E 啮合，以确保滚柱轴线平行于丝杠轴线而正常滚动；F 为滚柱保持架，使滚柱沿圆周均匀分布；滚柱保持架则由弹簧挡圈 G 轴向定位。	能适应恶劣环境、大负载、高速运动及较大直线行程的场合，如轧钢、切削等。可能的失效模式为：材料疲劳失效和三大部件啮合螺纹面的磨损失效。	
反向式	与标准行星滚柱丝杠工作原理一样，不同是将螺母作为主动件，由丝杠直线输出，滚柱和丝杠之间没有相对轴向位移，因此滚柱螺纹和丝杠螺纹长度一致。与标准行星滚柱丝杠相比，去掉了内齿圈 E。在丝杠螺纹两端加工有外齿，将标准式中的齿轮内啮合变为丝杠齿与滚柱齿的外啮合，功能与内啮合相同。	优点是可将螺母作为电机的转子实现电机和行星滚柱丝杠的融合设计，螺母作为电机转子可使机电作动系统 EMA 的结构更加紧凑、重量更小；缺点是需要加工较长的螺母内螺纹以保证丝杠行程，对螺母的加工提出了更高的要求。反向式行星滚柱丝杠也能适用于恶劣环境、大负载和高速场合，但直线作动行程与螺母加工技术密切相关，失效形式与前者相同。	

循环式	与标准行星滚柱丝杠相比,区别在于滚柱结构形式不是单头螺纹,而是“沟槽”状并沿轴线排列。若干个滚柱沿轴向均匀分布在行星架上,去掉了内齿圈,增加了凸轮环 H,使滚柱每完成一个循环后即回到初始位置重新与丝杠啮合。	主要优势在于可采用更小的螺纹导程提供更高的位置精度。啮合点更多,承载力更大,但摩擦也会增加。主要用在对传动件刚度要求高并能实现精确定位和提高分辨率场合。如医疗器械、印刷等。主要失效模式与施加在滚柱上的循环应力有关,在频繁加载和卸载情况下,这种失效模式很难预测,且高速时滚柱回位对凸轮环的冲击和震动较大,存在噪声问题。	
轴承环式	与循环式行星滚柱丝杠类似,滚柱 C 和轴承环 D 之间没有轴向位移,均为具有相同牙型的“沟槽”。但螺母不是单个部件,由轴承环 D、壳体 B 和端盖 G 组成。动力由丝杠传给滚柱,再由滚柱传给轴承环。轴承环两端装有推力圆柱滚子轴承 F,轴承环在 F 中可自由旋转并将动力传给推力圆柱滚子轴承,最后由推力圆柱滚子轴承传到螺母壳体上。	通过轴承环的旋转将由负载产生的摩擦力沿圆周方向分散,最大程度减小了摩擦力,提高了系统传动效率。	
差动式	滚柱和螺母均为无螺旋升角的环境,且滚柱分为大直径段和小直径段,大直径段的环槽与丝杠螺纹啮合,小直径段的环槽与螺母环槽啮合。	实现了小导程、结构简单且便于加工。主要用于中速和大传动比的场合。由于改变了啮合接触位置,通常是牙顶和牙底接触,使得承载能力降低、可靠性不高,位置控制精度较低。失效模式通常是推力轴承的疲劳失效。	

资料来源:刘更《行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术》、杜兴《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究》,光大证券研究所

行星丝杠的公差等级划分定义根据 ISO3408-3,决定因素为 300mm 螺纹长度的导程误差 V300p。标准精度等级为 G1、G3、G5,更高精度等级可按要求非标生产。

表 5: 行星丝杠公差等级

公差等级	V300p
G1	6μm/300mm
G3	12μm/300mm
G5	23μm/300mm

资料来源:Rollvis

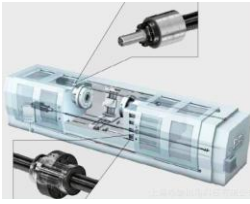
3.3、行星滚柱丝杠市场：国内外企业差距相对较大

随着装备制造业自动化和智能化的发展进程不断推进,机电伺服作动系统因具有系统重量轻、效率高、安装与维护方便等优点,逐渐代替了传统液压伺服作动系统和气压伺服作动系统,成为伺服控制领域的首选选择,已广泛应用于航空航天、机器人、汽车、高精度机床等领域。

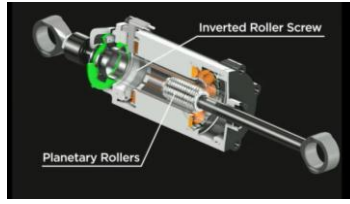
机电作动器(electro-mechanical actuator,EMA)是机电伺服作动系统的核心部件,主要由电机、减速装置和执行机构组成,其中执行机构是 EMA 的核心构件,其传动与承载性能直接决定 EMA 的工作性能。

常用的 EMA 执行机构主要有滚珠丝杠和行星滚柱丝杠两类。由于行星滚柱丝杠的高承载,耐冲击性能,在航空、航天、船舶、石化、电力、医疗机械等要求大承载、高精度、长寿命的领域中,行星滚柱丝杠成为优选项。

图 15：行星滚柱丝杠的应用场景



行星滚柱丝杠在机床的应用



F-35B 战斗机所用伺服作动缸



汽车离合器系统



直升机螺旋桨



飞机起落架



F-35B 战斗机所用伺服作动缸

资料来源：岳琳琳《行星滚柱丝杠机构运动仿真及承载特性研究》、郑正鼎《差动式行星滚柱丝杠传动特性理论研究》

该产品的行业巨头多来自于欧洲、美国及日本等地方。这些国外企业长期致力于行星滚柱丝杠的研发、推广工作，已经积累了大量的生产应用经验，并已经具备成熟的产品系列。

目前国外具备生产行星滚柱丝杠能力的企业主要有：瑞典 SKF、瑞士 Rollvis、德国 INA、美国 Exlar、德国 Rexroth、瑞士 GSA、英国 PowerJack、德国 LTK 及日本 NTN 株式会社等。相比于国外，国内行星滚柱丝杠的生产应用发展较为缓慢。目前仅有几家企业具备小批量生产的能力，相关企业包括博特精工、汉江机床、南京工艺等。虽然这些单位已具备单件生产的能力，但是与国外的大规模生产应用还有一定的距离，因此国内还需争取校企合作、加强基础理论研究、加大研发投入、攻克核心技术。

目前国内市场中，SKF、Rollvis、GSA 等国际品牌市占率较高，此外还有南京工艺和济宁博特两家国内品牌，目前两家公司的产品性能与国外还有一定差距，产业化处于早期阶段。从 SKF 公司行星滚柱丝杠产品成本结构来看，原材料成本占比大概为 60%，工时成本和生产所需成本占比 15%，工厂内的固定成本分摊为 15%，集团向法国工厂征收的管理成本占比 10%。

图 16：2022 年中国滚柱丝杠份额预测

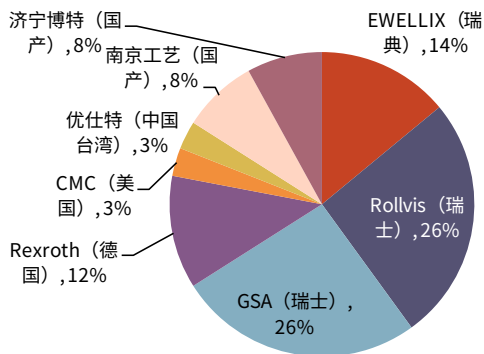
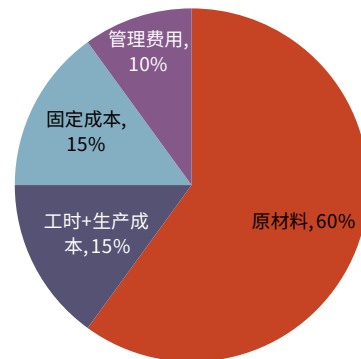


图 17：行星滚柱丝杠成本构成

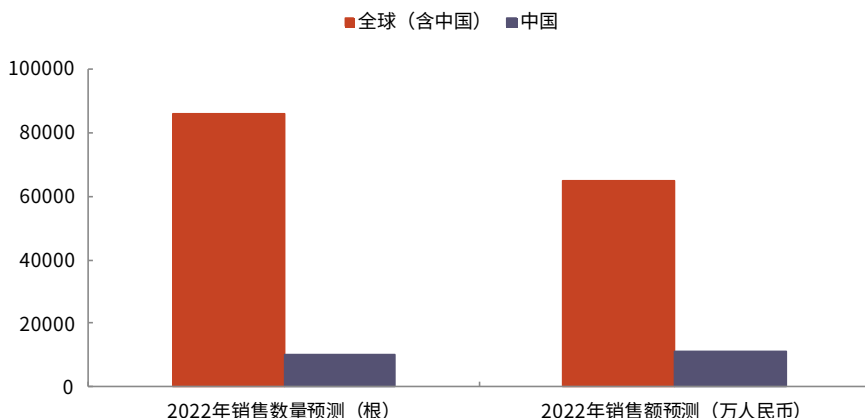


资料来源：王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》；销售额口径

资料来源：王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》；2022 年口径

根据 IHSMarkit 对滚柱丝杠的销售预测，2022 年全球销售数量 8.6 万根，销售额 6.5 亿元人民币，其中中国销售数量 1.0 万根，销售额 1.1 亿元人民币。

图 18：滚柱丝杠的销售预测



资料来源：IHSMarkit

4、滚珠丝杠与行星滚柱丝杠的对比

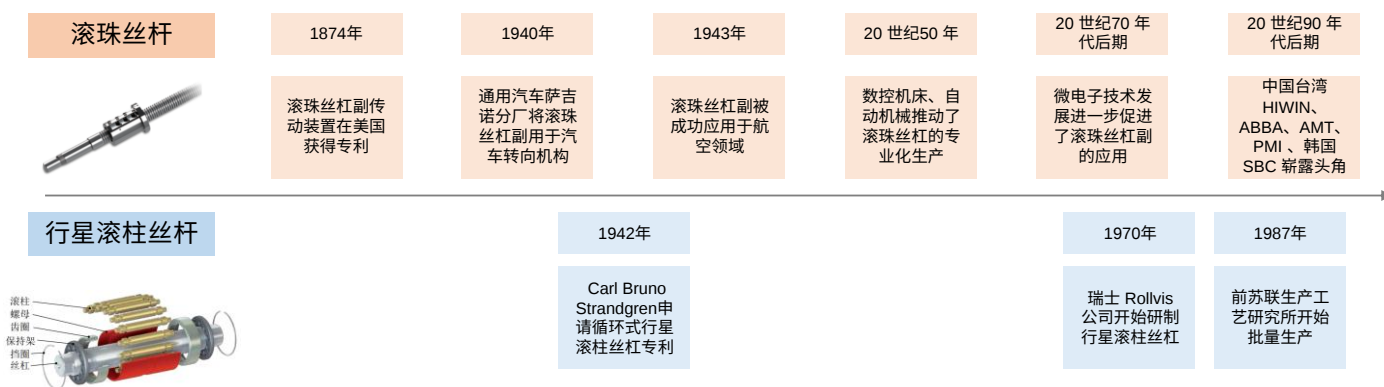
应用历程方面：

(1) 滚珠丝杠在 1874 年首次获得专利，行星滚柱丝杠在 1942 年首次获得专利，相隔 68 年；

(2) 滚珠丝杠在 1940 年首次获得实际应用（汽车转向机构），行星滚柱丝杠在 1987 年获得大批量生产，相隔 47 年；

相比之下，液压系统于 1795 年被发明，到了 1870 年，液压传动技术被用来驱动多种设备，如起重机、绞车、剪切机等。

图 19：滚珠丝杠与行星滚柱丝杠应用历程对比



资料来源：机工机床世界微信公众号、杭州新剑官网、光大证券研究所整理

对比滚珠丝杠与行星滚柱丝杠的截面，行星滚柱丝杠的结构尺寸小、接触线长、传动间隙小，具有结构尺寸小、承载能力大、传动精度高等优点，尤其在动载工况下，行星滚柱丝杠的多根滚柱可以将冲击分散到螺纹接触线上，具有更好的刚度与抗冲击能力。

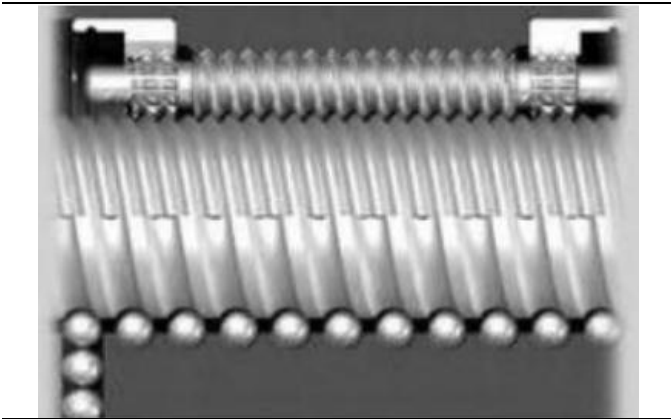
在高速运转时，滚珠丝杠里的滚珠受离心力作用发生滑动，使机构的径向振动加剧，出现温升过快与寿命下降等问题；在重载工况下，滚珠由于弹性变形和摩擦力作用，易发生卡死导致无法正常运转。国外学者根据 Hertz 应力定律与实际测试结果，在结构尺寸相同的情况下，PRS 的静承载能力是滚珠丝杠的 3 倍，使用寿命是滚珠丝杠的 15 倍左右。

图 20：行星滚柱丝杠所有零件



资料来源：王家健《行星滚柱丝杠设计》

图 21：行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比



资料来源：陈晖《行星滚柱丝杠滚道的硬态车削加工技术研究》

表 6：行星滚柱丝杠与滚珠丝杠对比

项目	滚珠丝杠副	行星滚柱丝杠副
结构组成	由丝杠、螺母、钢球、导珠管等组成。丝杠和螺母螺纹为单头或多头。丝杠、螺母滚道为单圆弧滚道或双圆弧滚道。结构简单。	由丝杠、螺母、滚柱、内齿圈、压盖、挡圈等构成。丝杠、螺母为齿形角 90°三角形多头螺纹。滚柱为双凸圆弧齿形单头螺纹。结构复杂。
循环方式特点	丝杠、螺母滚道通过导珠管组成滚珠循环回路，每一个导珠管组成 1.5 圈或多圈滚珠链，丝杠副可以由多个导珠管组成多个滚珠链。	滚柱丝杠副结构类似于行星齿轮结构。丝杠副有多个滚柱，且滚柱与丝杠、螺母呈多点接触。
滚动体	滚珠	滚柱
外形尺寸	由于滚珠螺母及滚珠丝杠滚道槽较深，滚珠嵌在丝杠、螺母内部，因此，滚珠螺母外形尺寸小。	由于丝杠螺母牙型深度较小，滚柱直径又大，滚柱螺母外形尺寸大。
运动平稳性	由于滚珠在丝杠副循环滚珠链中运动要通过返回机构，容易产生冲击，影响丝杠副平稳性。	滚柱在丝杠副中滚动没有返回机构，不产生冲击、震动，因而丝杠副运行平稳。
传动效率	由于滚珠外表面粗糙度高且精度高，滚动摩擦系数小，传动效率高，可以大于 90%。	虽滚柱与丝杠、螺母接触为点接触及滚动摩擦，由于螺母、丝杠及滚柱加工误差及表面粗糙度等原因，传动效率一般低于 90%。
承载	滚珠受载面积小，轮流受载，有循环交变应力。	螺纹滚柱受载面积大，且同时受载，无循环交变应力。
加工及装配工艺性	简单	复杂
可靠性	结构简单，零件加工及装配精度易于保证，因此，可靠性高。	丝杠、螺母为多头细牙螺纹，由于螺纹分度误差及牙型强度等原因，实际承载远小于理论承载，且可靠性差。

资料来源：段体清《螺纹滚柱轧制工艺研究》、肖正义《行星滚柱丝杠副的研究》

根据王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》，目前国内市场份额较大的行星滚柱丝杠来自 Rollvis, GSA 和 Rexroth 三家国际品牌，以及南京工艺和济宁博特两家国内品牌。其中瑞士 Rollvis 是世界上著名的行星滚柱丝杠专业生产厂家，经过 30 年的发展，该公司产品销售额全球市场占有率近 40%。

国内滚柱丝杠高端市场基本被德国力士乐、日本 THK、NSK 占据，中端市场主要有三股势力，及德国、日本品牌（力士乐、THK、NSK），中国台湾品牌（上银、银泰），中国大陆品牌（汉江、南工艺）。

表 7：行星滚柱丝杠产品竞争品牌分析

品牌	与 E 公司相比的优势	与 E 公司相比的劣势	国内销售份额 (2022 年预测)
Rollvis(瑞士)	产品尺寸系列较全；进入国内时间早	国内销售人员少(2 个人)；技术服务能力有限	26%
GSA(瑞士)	产品尺寸系列较全；商务政策灵活；价格低	国内无办事处，靠总代理销售；技术服务能力有限	26%
Rexroth(德国)	品牌知名度高；轧制经济性产品；销售体系健全	产品无法覆盖高端应用；定制化能力有限	12%
CMC(美国)	价格竞争力强	尺寸系列有限；交货期长	3%
优仕特（中国台湾）	价格竞争力强	尺寸系列有限；市场知名度低	3%
南京工艺(国产)	价格竞争力强	尺寸系列有限；批量产品质量不稳定；应用场景有限(军工为主)	8%
济宁博特(国产)	价格竞争力强	尺寸系列有限；批量产品质量不稳定；应用场景有限(军工为主)	8%

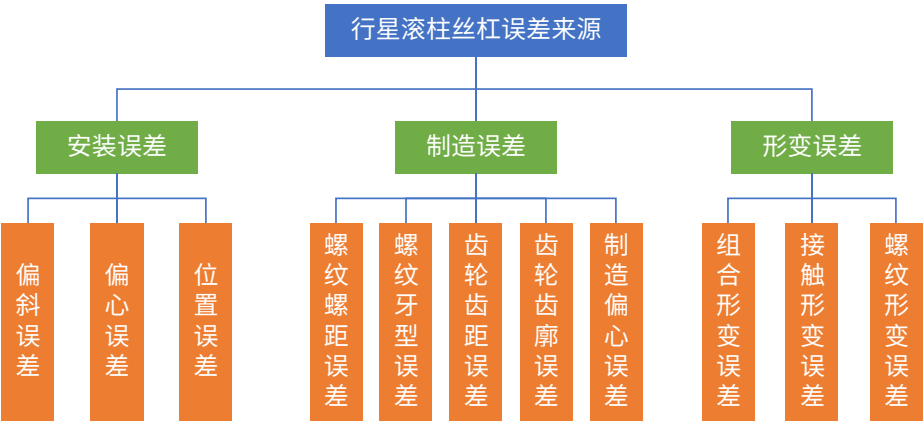
资料来源：王有雪《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究》

5、丝杠加工工艺：生产效率与产品精度的平衡

在机电伺服系统中，行星滚柱丝杠作为核心机构，对整个系统的动态性能起着关键的作用，若其传动精度不足，则会直接影响整个伺服系统的响应速度及系统精度。

对于行星滚柱丝杠来说，影响其传动精度的因素有很多，如其自身误差，环境误差，回程误差及中间误差等。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，精度是企业采用行星滚柱丝杠考核的第一大技术指标。

图 22：行星滚柱丝杠误差来源



资料来源：柯浩《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》

行星滚柱丝杠关键技术涉及：

(1) 设计时要同时考虑螺纹与齿的加工，丝杠直径较小时，滚柱齿的齿数、模数均较小，需考虑根切变位和保证丝杠中心线与齿轮中心线重合等问题；

(2) PRS 的装配难度较大，主要是螺纹加工与轮齿加工相位匹配问题，需保证滚柱螺纹与螺母螺纹啮合的同时保证滚柱齿与内齿圈啮合，又便于多个滚柱顺序安装；

- (3) 对效率、寿命和承载能力的分析，建立完整的刚度、强度分析体系。而螺纹牙型角、接触角等参数对总体性能的影响程度，还缺少实验研究；
- (4) 传动部件主要靠滚动摩擦来实现动力传输，因此摩擦、润滑和由摩擦产生热等也是未来需要研究的问题；
- (5) PRS 作为执行部件的 EMA 广泛应用于各行各业，尤其是航空、航天领域，PRS 的设计与 EMA 系统相匹配，必须在保证力学性能的同时兼顾行业应用要求；
- (6) 目前已有 5 种 PRS 结构形式。设计新型 PRS 结构形式也值得探索，例如行星齿轮系统中的串联、并联结构形式等；
- (7) 为了满足 PRS 传动的工作性能和精度要求，螺纹滚道一般为 HRC58~62，滚柱一般为 HRC62~64。热处理方面，一般视材料选取和实际工作环境而定。

图 23：行星滚柱丝杠关键技术

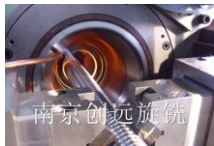
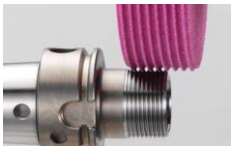
结构设计与制造相结合	滚柱螺纹与轮齿相位匹配	力学分析体系	摩擦、润滑和热问题	作为部件设计时的匹配问题	新型 PRS 结构	材料和热处理
设计时要同时考虑螺纹与齿的加工，丝杠直径较小时，滚柱齿的齿数、模数均较小，需考虑根切变位和保证丝杠中心线与齿轮中心线重合等问题	PRS 的装配难度较大，主要是螺纹加工与轮齿加工相位匹配问题，需保证滚柱螺纹与螺母螺纹啮合的同时保证滚柱齿与内齿圈啮合，又便于多个滚柱顺序安装	对效率、寿命和承载能力的分析，建立完整的刚度、强度分析体系。而螺纹牙型角、接触角等参数对总体性能的影响程度，还缺少实验研究	传动部件主要靠滚动摩擦来实现动力传输，因此摩擦、润滑和由摩擦产生热等也是未来需要研究的问题	PRS 作为执行部件的 EMA 广泛应用于各行各业，尤其是航空、航天领域，PRS 的设计与 EMA 系统相匹配，必须在保证力学性能的同时兼顾行业应用要求	目前已有 5 种 PRS 结构形式。设计新型 PRS 结构形式也值得探索，例如行星齿轮系统中的串联、并联结构形式等	为了满足 PRS 传动的工作性能和精度要求，螺纹滚道一般为 HRC58~62，滚柱一般为 HRC62~64。热处理方面，一般视材料选取和实际工作环境而定

资料来源：刘更《行星滚柱丝杠副的新发展及关键技术》

螺纹加工是滚道加工的核心要素，也是滚珠丝杠和行星滚柱丝杠（包括丝杠和滚柱）加工的核心步骤。

传动级丝杠一般采用辊轧方式制造，定位级丝杠要求的精度更高，一般使用车、铣、磨联合制造，精度取决于磨削环节。

图 24：不同类型丝杠的制造工艺

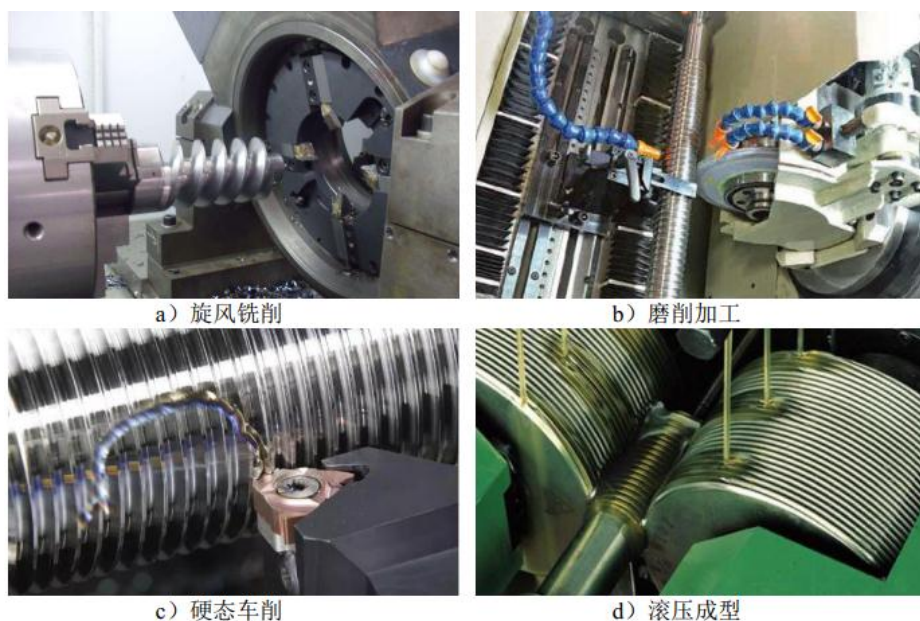
丝杠类型	精度等级	制造工艺	
定位型	C6-C10	辊轧	
滚珠丝杠			
传动型	C0-C7	车、铣、磨	  
			车削 旋风铣 研磨

资料来源：南京创远旋铣官网、光大证券研究所

螺纹的加工精度将直接影响系统的传动精度、使用寿命与平稳性，故优化螺纹的加工技术是提升 PRS 整体性能的关键。螺纹是由特定参数设计而成，其制造工艺方法主要为成型加工，例如旋风铣削、磨削加工、硬态车削、滚压成型等。

根据黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展》，在全球绿色环保浪潮的助推下，丝杠螺纹制造从采用“白钢刀挑扣”到高速硬车削，从螺纹磨削扩展到高速旋风铣削（软、硬），从切削加工向无屑精密滚轧成形制造，从低档、低速、低精度向高档、高速、高精度发展，高效、低耗、绿色已成为 21 世纪螺纹制造技术发展的主旋律。

图 25：行星滚柱丝杠螺纹副的加工工艺方法



资料来源：陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

5.1、 辊轧路线：精密滚轧技术提效降本潜力大

丝杠螺纹滚轧成形技术以金属塑性变形理论为基础，具备材料利用率高、产品机械强度高（抗拉强度提高 20%~30%，疲劳强度提高 20%~40%，抗剪强度提高 5%）、使用寿命长、丝杠螺纹的尺寸和导程精度具有较高的同一性、互换性、生产周期短和制造成本低等特点。

用于工业传动和定位的滚轧丝杠产品有两类：滚轧梯形丝杠副 RLS

（RollingLeadScrew）和滚轧滚珠丝杠副 RBS（RollingBallScrew）。早期的产品精度较低，主要用于各类工业机械的动力传递和快速驱动。据不完全统计，在全球制造滚珠丝杠的专业生产企业中，有 30 多家企业配备有滚轧设备生产线，按标准系列批量生产 RBS 和 RLS 产品。但多数企业的 RBS 产品精度长期停留在 T7~T10 级的水平。

冷轧滚珠丝杠是采用冷加工工艺模具制造，开模工艺自动化程度高，批量生产后成本低，效率高，精度一般停留在 P7 级左右，在设备中做传动部件。

图 26：轧制滚珠丝杠制作过程



资料来源：山东省汶上县丝杠有限责任公司官网

精密滚轧技术 HPR (HIGH PRECISION ROLLING)

国外制造 RBS 的知名企业，例如：Rexroth、Thomson、Warner Electric、Eichenberger、NSK、THK 等，他们拥有新一代高性能的 CNC 精密滚轧机，又掌握了核心技术，在成批大量生产中使 RBS 的精度能稳定达到 P5~P7 级部分达到 P3 级。

精密 RBS 从量变到质变、从低端迈向高端，归纳起来有以下几方面的原因：

- (1) 新一代的滚轧机精度高、刚性好，实现了高水平的数控化、智能化，在轧制过程中根据金属塑性变形的状况和滚轧力的变化动态调整滚轧工艺参数。
- (2) 轧辊的进给方式由一个轧辊的单向进给发展到以丝杠（精胚）中心线为基准，用计算机控制一对伺服交流电动机完成双轧辊同步向心微米级精密径向进给。
- (3) 对精密轧辊 3D 优化设计，按材料变形规律对导程（螺距）和齿形进行修正。采用优质合金钢，使其制造精度和工作寿命大幅提高。
- (4) 用于 RBS 滚轧精胚的材料，其品牌和质量稳定可靠（钢厂定点供应，不吃“杂粮”），材料合金元素的纯净度、塑性应变能力、延伸率以及微量元素的含量、晶粒的球化程度等方面能满足冷滚轧的要求。
- (5) 凡是在 RBS 产品上做得好的企业，在 RBS 生产线上均配置有 CNC 中频淬火设备，自动矫直机、螺纹滚道抛光设备、控制产品质量的全套检测仪器等。

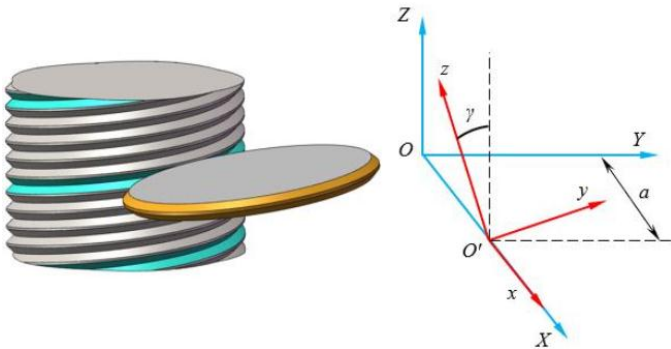
达到 P3~P5 级精度的精密 RBS 具备了进入 CNC 机床和 CNC 工业装备领域的机会。对精密 RBS 颇有建树的德国 Rexroth 公司已作出集中全力批量生产 RBS 的决策，据博世力士乐（中国）有限公司业务总经理介绍，在其销售 BS 总量中，RBS 占 80%~90%，而磨削 BS 仅占 10%~20%。如果把相同规格、相同精度等级的 RBS 与磨削 BS 做一个比较就可以发现：RBS 具有“同级质优”的“芯里美现象”。

冷轧滚珠丝杠轴端加工方法有三种：退火后车制、磨削、硬车削。冷轧滚珠丝杠轴端的加工特点是材料硬度高，加工余量大，很多企业采用传统的加工工艺，轴端退火--车削--轴端淬硬，这种加工方法因为轴端部位反复软化硬化热处理，致使冷轧滚珠丝杠会产生性能不稳定的缺陷。也有的企业采用磨床大余量磨削加工冷轧滚珠丝杠轴端。随着刀具材料及制造技术的进步，硬车削大余量加工淬硬钢工艺简单效率高，可选择 CBN 高硬刀具，适合的加工硬度范围为 HRC45-79，省去了退火淬火热处理工艺，避免了退火后再二次淬火的弊端，更彻底解决了采用砂轮进行大余量磨削加工的工艺难题。

5.2、先车后磨：经典工序精度高，生产效率更待提升

现在大部分滚珠丝杠制造厂家都是以先车后磨的方式进行加工制造生产。先把原材料车到一定精度，再用专用丝杠磨床先粗磨再精磨到所需要的尺寸。这种加工方式优点是精度高，成本低，国内的专用丝杠磨床就可以达到，缺点是加工效率低下，单只螺母单道磨削工艺所需时间在 13-15 分钟，且磨削所造成的大量粉尘和油烟不仅对操作工人的身体健康造成极大隐患，对环境污染严重。

图 27：砂轮加工外螺纹螺旋面



资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》

图 28：磨削实验用五线砂轮



资料来源：董超《行星滚柱丝杠副小螺距螺纹数控磨削工艺研究》

砂轮磨削：因为第 12 道工序对磨削滚珠丝杠工作滚道淬硬热处理，导致工作滚道粗加工最常用的工艺方法就是采用砂轮磨削磨制出 90°V 型槽。但这种工艺方法经磁力探伤检测后，会发现在滚珠丝杠滚道的圆弧上，有沿着轴线方向的或网状的裂纹，可以通过“小磨量多次进给”的工艺方法，或采用“磨——工作滚道表面温度稳定——磨”的技术方法解决，最大幅度降低滚珠丝杠工作滚道表面的磨削应力及磨削热量，最大程度避免磨削裂纹或烧伤现象的产生。

表 8：丝杠工艺流程

序号	丝杠（滚柱丝杠）	滚柱（滚柱丝杠）	丝杠（滚珠丝杠）
1	丝杠毛坯	滚柱毛坯	丝杠毛坯
2	预备热处理	预备热处理	预备热处理
3	校直	校直	校直
4	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔	加工端面及中心孔
5	粗车	粗车	粗车
6	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
7	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔	加工端面及修中心孔
8	半精车	半精车	半精车
9		滚齿	
10	铣	铣	铣
11	粗磨	粗磨	粗磨
12	感应淬火并检验	表面氮化并检验	感应淬火并检验
13	研中心孔	研中心孔	研中心孔
14	粗磨	粗磨	粗磨
15	探伤	探伤	探伤
16	高温时效并检验	高温时效并检验	高温时效并检验
17	研中心孔	研中心孔	研中心孔
18	半精磨	半精磨	半精磨

19	低温时效并检验	低温时效并检验	低温时效并检验
20	铣键槽	铣键槽	铣键槽
21	磨端部螺纹	磨端部螺纹	磨端部螺纹
22	研中心孔	研中心孔	研中心孔
23	精磨并全面检验	精磨并全面检验	精磨并全面检验
24	入库	入库	入库

资料来源：郑伟《精密行星滚柱丝杠副工艺制造与传动性能研究》、郑红《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》

其中磨削滚珠丝杠的加工工艺约有 20 多道工序，周期在 30-45 天，周期长，效率低，成本高。加工工艺中有材料热处理与工作滚道粗加工两大重点。

磨削滚珠丝杠工作滚道粗加工常用方法有：砂轮磨削、硬车削、旋风铣削。

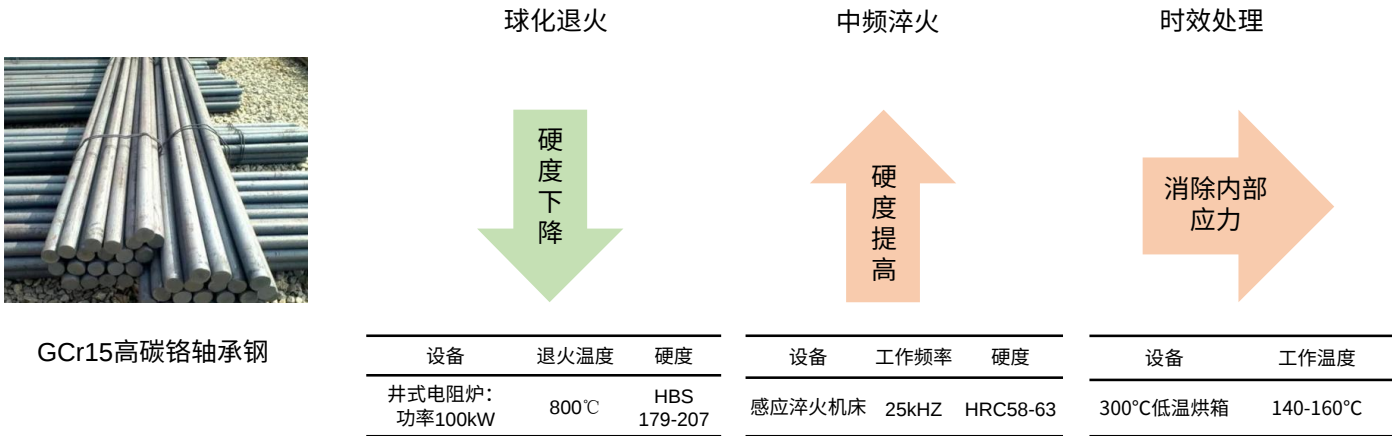
5.3、 热处理：隐形壁垒，需控制精度

磨削滚珠丝杠材料及热处理方式对滚珠丝杠成品零件的制造质量及精度影响非常大。

滚珠丝杠材料常常选用 GCr15 高碳铬轴承钢，轴承钢经过淬火加低温回火后具有硬度高、组织均匀、耐磨性强、接触疲劳强度高的优点，但轴承钢材料塑性一般，切削性能中等，焊接性能差，有回火脆性，所以磨削滚珠丝杠粗加工之前要对轴承钢材料进行预先热处理，通过球化退火把 GCr15 材料中的碳化物球化，得到在铁素体基体上均匀分布的球状或颗粒状碳化物组织，降低材料组织硬度，提高材料塑性机能，改善材料金属切削机加工性能。

轴坯加工完成后将磨削滚珠丝杠工件工作表面（滚道）与加工基准（中心孔）淬硬，为后续滚珠丝杠开滚道做好材料力学性能准备。每一道金属切削加工均会产生应力变形，为消除应力变形给工件带来的不良影响，关键的质量控制点都要进行时效去应力处理，控制好工件加工质量。通过滚珠丝杠材料选择、热处理内容及顺序的合理安排，能够在最大程度上保证磨削滚珠丝杠零件的表面接触强度、整体刚性、耐摩擦性等工程力学性能指标要求，保证磨削滚珠丝杠在尺寸精度、几何公差、表面粗糙度方面的零件工作配合技术要求。

图 29：丝杠制造相关热处理方式



资料来源：郑红《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究》

滚珠丝杠在中频淬火后，由于金相组织的改变导致轴向尺寸的变化，摸清淬火的变化规律是螺纹粗加工中必须解决的难题。

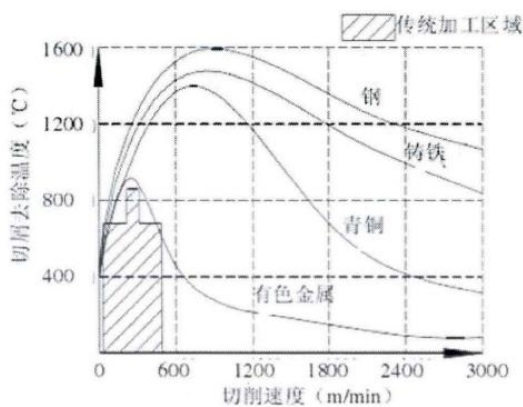
不同钢厂的 GCr15 轴承钢，不同的冶炼炉号（批次），虽然尺寸规格和淬火工艺相同，但轴向变形量依然不同，掌握变形规律是有难度的。如果淬火前的导程修正量不准确，将使磨削余量偏移并导致滚道表面硬化层厚度不均匀，最终影响产品的摩擦特性、接触刚度和使用寿命。

5.4、 旋风硬铣：新兴工艺，兼具生产效率与产品精度

高速旋风铣削淬硬丝杠（HRC60 以上）是一种新兴的高效绿色加工方法，加工时工件一次铣削完成，不使用任何切削液，加工效率大约是磨削加工的 5-8 倍，在国外滚动部件加工行业得到了广泛应用。

高速硬切削是基于高速切削理论的一种加工技术，是对高硬度金属材料（HRC55-65）直接进行车削或铣削加工，其理论依据是 Salomon 博士理论（发现当切削速度提高到一定程度时，切削温度不升反降）。

图 30：切削温度与切削速度变化关系



资料来源：李彦凤《滚珠丝杠旋风硬铣削加工热变形误差及其控制技术研究》

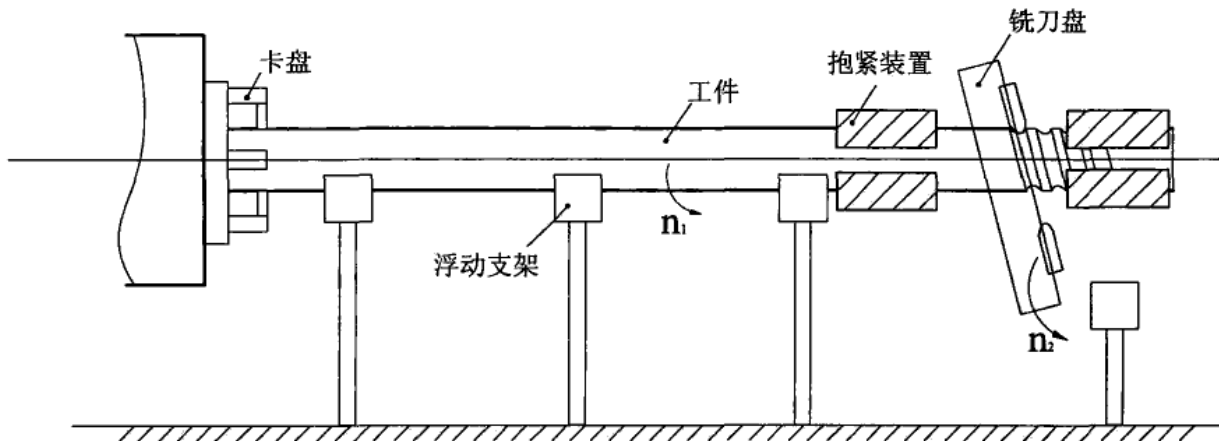
图 31：软铣与硬铣的区别



资料来源：黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(上)》

在数控车床上配套安装高速铣削螺纹动力头，淬硬轴承钢 GCr15 工件（硬度为 62~65HRC）利用刀盘上的多把（6 或 8）均匀对称的高强度成型铣刀，借助于刀盘旋转轴线与工件轴线存在的偏心距 e 依次参与切削，且两轴线夹角为螺纹的螺旋角。旋风铣削加工时，刀盘与工件同向旋转完成顺铣；工件以 4~10r/min 低速旋转，而刀盘以每分钟大于 600r/min 的转速旋转，工件每旋转一周，刀盘沿着工件轴线移动一个螺纹导程的距离，从而实现整个螺纹滚道的加工。

图 32：滚珠丝杠旋风铣削加工示意图

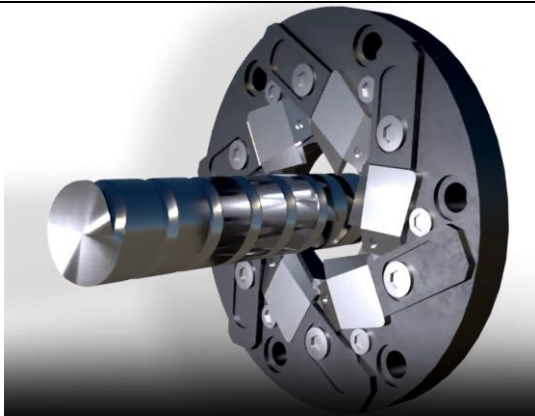


资料来源：李彦凤《滚珠丝杠旋风硬铣削加工热变形误差及其控制技术研究》

用 PW160 型 CNC 硬旋铣床高速旋铣 CF63 钢（德国钢号）淬硬至 60~62HRC 的滚珠丝杠，以 1000mm 长为例：导程精度可达 P3 级（ISO3408-3），中径圆柱度 0.01mm/1000mm，齿形精度 $\pm 0.005\text{mm}$ ，滚道表面粗糙度值 $Ra < 0.4\mu\text{m}$ 。

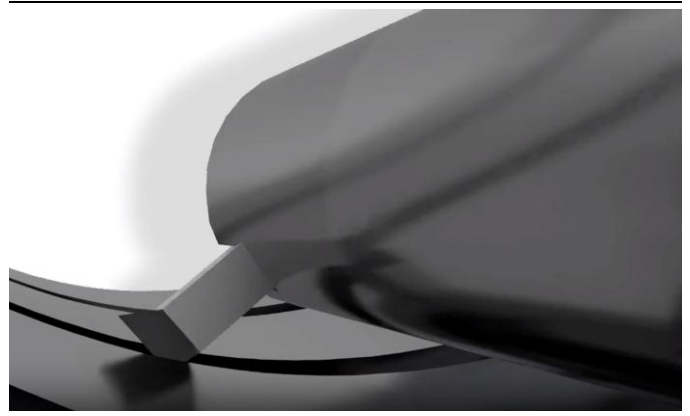
在丝杠外螺纹硬旋铣技术快速发展的同时，用于滚珠螺母高速加工的“CNC 内螺纹硬旋铣技术和装备”也正在引起人们的关注。德国等西方工业发达国家，上世纪六七十年代就已经对旋风铣削工艺技术进行研究，并在八十年代推出 CNC 旋风铣床，用于滚珠丝杠的硬铣削加工。德国 Leistriz 公司的 PWM200 型 CNC 内螺纹旋风硬铣机床对淬火 60HRC 滚珠螺母实施内旋铣，导程精度可达 P3 级，表面粗糙度值 $Ra < 0.4\mu\text{m}$ ，中径圆柱度 0.01mm，齿形精度 0.004mm。

图 33：旋风铣——外螺纹



资料来源：Leistriz

图 34：旋风铣——内螺纹



资料来源：Leistriz

国内方面，汉江机床自主研发成功 HJ092 型九轴三联动 CNC 丝杠硬旋铣床（6m、8m），该机床用国产 CBN 盘铣刀对 62HRC 的滚珠丝杠硬旋铣后精度可达 P4 级，表面粗糙度值 $Ra = 0.4 \sim 0.6\mu\text{m}$ 。

图 35：汉江机床厂自主研发 8m 旋风机床



资料来源：汉江机床官网

图 36：Leistritz 生产的 LWN190 旋风铣床



资料来源：Leistritz 官网

旋风硬铣达到目前的精度，依赖以下几个方面：

(1) 高速硬旋铣是建立在德国切削物理学家萨洛蒙（Carl Salomon）高速切削理论基础上的，按照“Salomon 曲线”，当切削速度超过“临界速度”后，单位切削力下降（30%以上），而 95%以上的切削热还来不及传给工件，就被大量呈“，”状的小块切屑飞速带走，切削力小，工件又处于低温状态，十分有利于减小丝杠的径向和轴向变形。

(2) 新一代的 CNC 硬旋铣床大大强化了“机床—旋风铣头及刀具——工件（安装、支承定位）”的系统动刚度。高速旋铣时机床激振频率特别高，其范围远远超越工艺系统的固有频率。因此，振动小、工作平稳，有利于减少 Ra，提高加工表面质量。

(3) 高档 CNC 硬旋铣机床在控制技术、旋铣刀盘电主轴直驱技术、误差适时补偿技术及智能化水平等方面都大幅提升。

(4) 在刀具系统方面，采用先进的刀片材料（例如：CBN、PCBN）和高精度的 CNC 刀片刃磨（修复）技术和机床，并提高刀片在刀盘上的安装及对刀精度。

高乃坤等通过对大量旋铣加工的滚珠丝杠的螺纹精度检测，并对其装配后产品性能进行测试，对磨削加工和旋风硬铣加工的滚珠丝杠各项质量参数进行了分析比较，得出了以下结论：

(1) 采用成形刀具加工的丝杠滚道截形稳定性和中径一致性，同比明显优于磨削加工的丝杠。

(2) 经过对精度检测数据的统计，旋风硬铣丝杠在有效行程内的行程变动量（线性），同比明显优于磨削加工的丝杠。

(3) 因旋风硬铣丝杠加工过程产生的温升高，完全消除了螺纹磨削后滚道表面可能发生的退火现象，使丝杠的性能质量优于磨削加工的丝杠。

(4) 经过对旋风硬铣滚珠丝杠装配后的综合性能测试，动态预紧转矩的波动值及运动的平稳性均优于磨削加工的丝杠。

(5) 经过对精度检测数据的统计，目前仅有很少数量的丝杠可达到 P2 级精度，因此在高精度丝杠的加工上，与磨削加工的丝杠存在差距。

旋风铣削在我国国内很多机械制造公司都有所应用，最主要的使用在一般钢材各种螺纹软铣的旋风铣头，这种技术突破推广于 20 世纪 60~70 年代。

在此之后，旋风铣床逐渐在大连机床厂、北京机床研究所、济宁博特和南京工艺等投入使用，利用旋风铣床完成精密滚珠丝杠的高效粗加工。2004 年南京工艺装备厂首次购进德国 Leistritz 公司的 PW160 型 CNC 硬铣铣床，2009 年又购进 Leistritz 公司最新的 PW300HP 型 10mCNC 硬铣铣床，可以精铣出整体 800mm 以上的大型滚珠丝杠副。山东济宁博特精工股份有限公司也引进了螺纹旋风硬铣削设备。

国内滚珠丝杠副生产厂家大连高金、济宁博特及南京艺工均有旋风铣加工设备，但旋风硬铣机床未能在国内快速推广应用，主要原因包括：

(1) 旋风硬铣对滚珠丝杠原材料和刀具要求较高，国产材料和刀具达不到加工要求，致使加工成本相对较高，滚珠丝杠原材料和刀具的国产化是影响硬铣加工降低成本程度的关键因素；

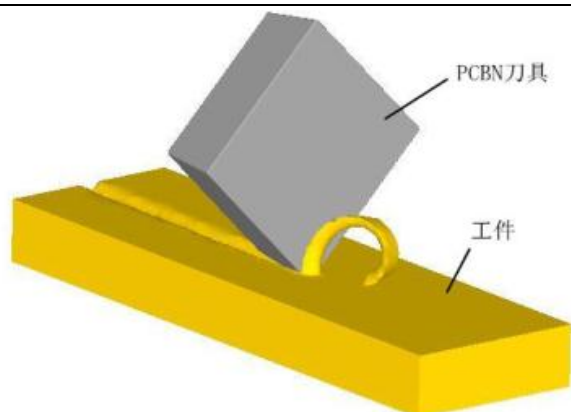
(2) 旋风硬铣机床是一种技术附加值高的精密设备，8m 的旋风硬铣机床售价折合约 1200 万人民币；

(3) 旋风硬铣加工精度的众多影响的因素以及我国数控技术的落后。

5.5、硬态车削：螺纹滚道半精加工方案

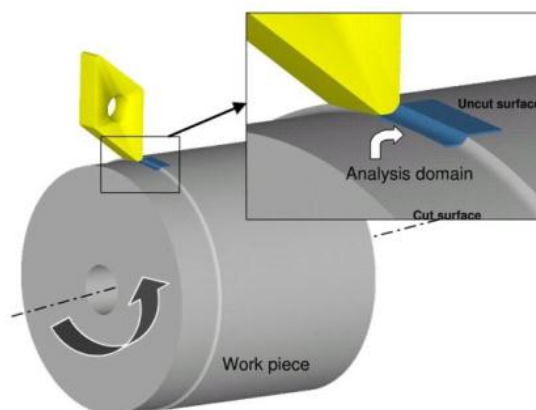
硬态车削指使用超硬刀具对硬度高于 50HRC 的材料进行精密切削的加工工艺，通常使用的刀片材料为硬质合金、陶瓷、PCBN 与金刚石。把淬硬材料的车削作为粗加工或最终加工、精加工的新技术新工艺，回避了使用磨削加工技术。使用 PCBN 刀具精车获得的表面粗糙度可达到 $0.32\mu\text{m}$ ，相当于半精磨水准；在一台机床上就能完成毛坯到成品的加工，大大提升了加工效率。

图 37：三维螺纹车削的简化模型



资料来源：陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

图 38：螺纹车削的分析区域



资料来源：陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

有的企业直接采用硬车削的先进技术对滚珠丝杠工作滚道开粗加工，车制出 90°V 型槽。其优势包括：

(1) 硬车削通常采用高转速、大切深，金属切除效率是磨削加工的 3 倍多；

(2) 硬车削加工时一次装夹即可完成零件多个表面的加工（比如车外圆、车内孔、车槽等），而磨削加工需要多次安装才能完成，会产生二次安装误差；

(3) 硬车削产生的热能一半以上被切屑带走，不会产生像磨削加工那样的表面裂纹与烧伤，所以硬车削可使工件获得良好的加工精度与表面粗糙度，能够保证形位公差技术要求（比如圆度、位置精度）。

在高刚性硬车刀具系统和硬车机床系统得到突破性发展的前提下，以及市场环境对滚珠丝杠高品质、低成本要求不断提升的情形下，以车代磨的硬车技术应势而生。螺纹滚道硬车削是一种新型螺纹滚道粗加工技术，最大优势是避免在磨削粗加工螺纹滚道过程中，因切削热导致丝杠硬度降低而引起可靠性差问题的发生，并且加工效率高，无油烟粉尘污染、绿色环保。

以车代磨螺纹滚道的粗加工技术被海外的滚珠丝杠制造厂家大量采用，在国内目前由于技术所限应用较少。硬车粗加工的滚珠丝杠，圆弧滚道的圆度在 0.008mm 以内，圆柱度在 0.01mm 以内，表面粗糙度值 $Ra \leq 1.6\mu m$ ，是符合滚珠丝杠加工技术要求的。而且，生产效率比磨制也要高出许多。直径 40 导程 10 长度 1M 的滚珠丝杠，磨削所花时间大概为 70 至 100 分钟左右，但采用硬车的话，则仅需 30 至 45 分钟。

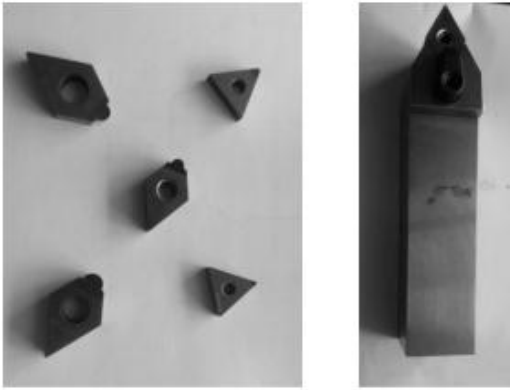
滚珠螺纹滚道硬车不仅在效率上较螺纹滚道硬磨削提高了不少，而且生产制造成本亦下降很多，因为它不再需要那么多的昂贵的专用外螺纹磨床。因此，滚珠螺纹滚道硬车的使用将会越来越广泛。越来越多的滚珠丝杠厂家将采用滚珠螺纹滚道硬车作为螺纹滚道半加工的最佳工艺方法。

根据张广明《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》，对于高精度的滚珠丝杠螺纹，欧洲、日本均采用淬火前软车补偿、淬后磨削。国内部分厂商也尝试采用这种淬火前软车补偿、旋铣补偿，淬火后磨削的加工方式，并做了大量工艺验证试验，期待解决、打通这一主要瓶颈。但由于受国内滚珠丝杠用材稳定性的制约，淬火前后滚珠丝杠变形无规律，致使软车补偿、旋铣补偿工艺存在一定的技术风险。硬车加工代替传统工序中滚珠螺纹滚道的粗磨和半精磨工序。

以车代磨螺纹滚道的粗加工技术在日本和中国台湾地区应用较为广泛，国内大连高金数控集团首先打破了这种技术垄断，与大连机床集团联合研制开发了滚珠丝杠专用高刚性数控硬车机床，经过长时间的试验，得到一手滚珠丝杠硬车数据，形成完整的独立自主的硬车技术体系。

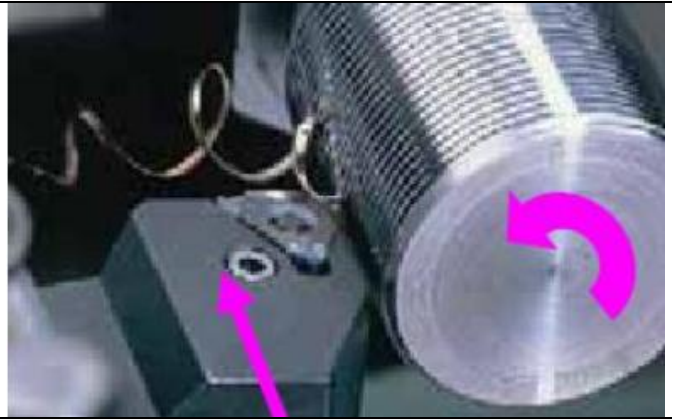
虽然滚珠螺纹滚道硬车削效率不及硬旋铣加工，但它较螺纹滚道硬磨削效率提高 2~3 倍，同时省去了大量的外螺纹磨床，极大地降低了生产制造成本。通常，滚珠螺纹滚道硬车削生产制造成本是螺纹滚道硬磨削成本的 $1/3 \sim 1/2$ ，是螺纹滚道硬旋铣加工成本的 $1/4 \sim 1/3$ ，从成本、效率综合比较，滚珠螺纹滚道硬车削工艺具有广阔的发展前景，将是未来滚珠螺纹滚道半精加工的首选工艺方案之一。

图 39: CBN 专用车刀与刀杆



资料来源: 张广明《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》

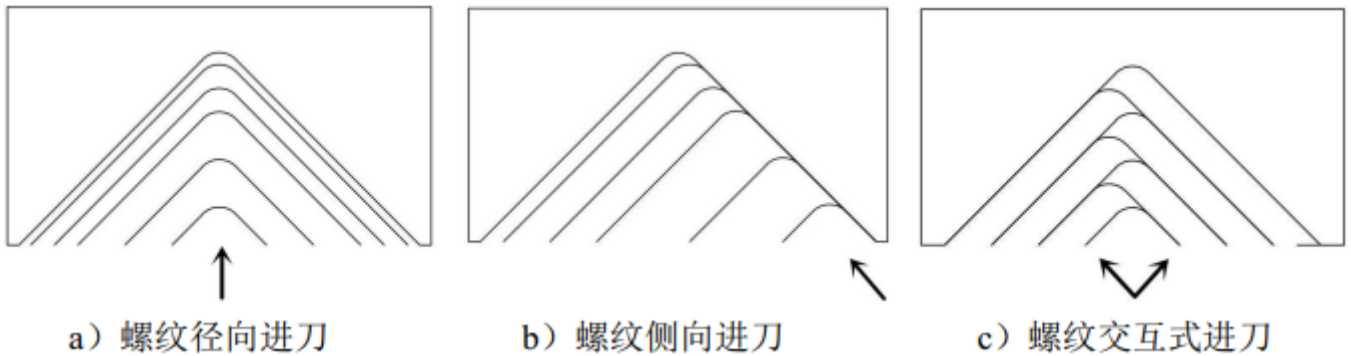
图 40: 丝杠螺纹车削现场



资料来源: 陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

完整的螺纹加工, 需要刀具的多次进刀车削完成。螺纹的车削加工有三种进刀方法, 分别是径向进刀、侧向进刀和交互式进刀。三种方法都可以加工出相同轮廓的螺纹, 但是受到的切削力、刀具磨损、切削形貌及工件的表面质量都各不相同。

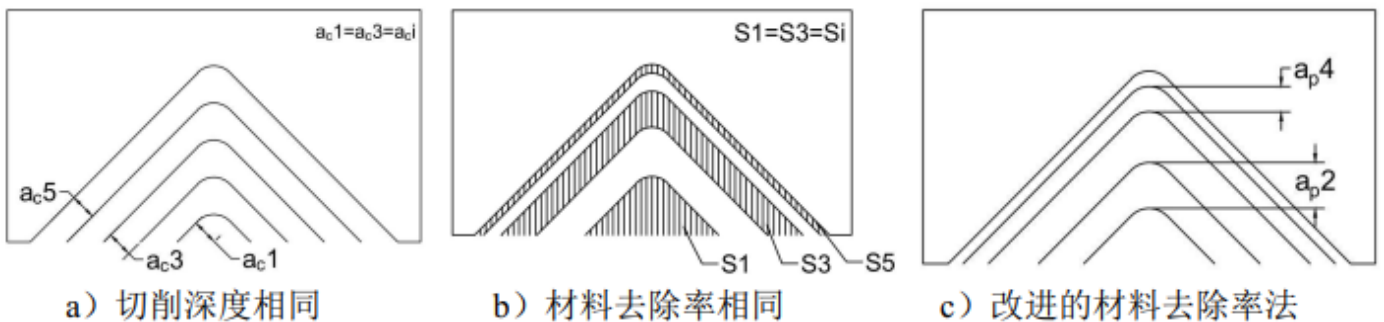
图 41: 螺纹车削的进刀方法



资料来源: 陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

车削螺纹时, 进刀量的分配影响着工件的加工质量和刀具的使用寿命, 最后一次的进刀更是决定了最终螺纹面的表面质量, 所以合理的进刀量分配会大大提升螺纹车削的效率。

图 42: 径向进刀法的进刀量分配方式



资料来源: 陈晖《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究》

6、工艺路线对比：精度、成本、效率、环境

精密螺纹磨削、精密硬旋风铣削、精密滚轧成形三种工艺路线中：

精密螺纹磨削的优势在于对丝杠材料没有特殊要求，最高可以达到 P0 级精度，劣势在于磨削效率低、生产工序多、制造成本高，常用于高规格精度丝杠螺纹的精加工；

精密硬旋风铣削对丝杠材料的要求属于中等，最高可以达到 P3 级精度， $Ra=0.4\mu m$ ，表面质量优于螺纹磨削，劣势在于关键设备前期投入大，调整对刀较费事，适于加工有一定批量的产品，效率方面高于磨削低于冷滚轧；

精密滚轧成形对丝杠材料的要求最高，最高可以达到 P3-P5 级精度， $Ra=0.5\sim 0.8\mu m$ ，表面光滑、处于压应力状态，可以实现标准化、系列化大批量生产，适合单机快速出库存性供货。

表 9：滚珠丝杠三种螺纹制造技术的对比

制造工艺	工艺基准	对丝杠材料（精胚）的要求	最高加工精度	齿形精度及表面质量	对有预加负荷 BS 产品性能的影响	装备及制造成本	生产批量
CNC 精密螺纹磨削	中心孔(辅以外圆)	没有特殊要求	P3 级, P1 级, P0 级	砂轮（磨轮）的品质和使用寿命直接影响齿形精度和螺纹表面质量	齿形和中径尺寸分散度较大影响 ΔTPP	螺纹磨床已国产化生产工序多制造成本高	更换工件规格较容易，不受生产批量限制
CNC 精密硬旋风铣削	丝杠外圆	对精胚外圆的圆度，圆柱度，直线度以及硬化层深度，硬度的均匀性有要求	P3 级导程误差的波动小、线性好	$Ra=0.4\mu m$ ，高速、渐近、低温切削，表面质量优于螺纹磨削	齿形和中径尺寸精度稳定有利于改善摩擦特性， ΔTPP 误差波动小	关键设备前期投入大，后期成本取决于 CBN 刀片寿命及刃磨的自主化能力	调整对刀较费事，适于加工有一定批量的产品
CNC 精密滚轧成形	丝杠外圆	对精胚外圆尺寸、公差、圆度，圆柱度，直线度有严格要求，对钢材的塑性应变能力、延伸率有较高要求	P3、P5 导程误差的波动小、线性好	$Ra=0.5\sim 0.8\mu m$ 表面光滑、处于压应力状态，无磨削加工的弊端	齿形和中径尺寸精度稳定有利于改善摩擦特性 ΔTPP 误差波动小。摩擦特性、疲劳寿命均优于磨削	关键设备前期投入大，后期成本取决于轧辊寿命、设计制造的研发能力，是否外购	标准化，系列化大批量生产
备注			按 ISO3408-3(1996)标准	有待在疲劳寿命试验机上做对比试验			

资料来源：黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(下)》

在环境影响方面：

精密螺纹磨削属于湿切削，能耗、油耗、水耗都较高，且需要采取措施排除磨粒金属粉尘、油雾对工人健康的影响；

精密硬旋风铣削属于干切削，省工序、能耗、油耗、水耗低于磨削，在封闭环境中高速旋铣、噪声小、无油屑便于集中处理，对环境污染小；

精密滚轧成形属于低耗无屑加工、材料利用率高达 80%以上，无油雾和粉尘，对环境污染小。

表 10：滚珠丝杠三种螺纹制造技术环境对比

制造工艺	最适宜的加工对象	低耗低碳化	环境友好宜人化	生产效率与制造周期
CNC 精密螺纹磨削	常用规格高精度丝杠螺纹的精加工	湿切削：能耗、油耗、水耗都较高	需要采取措施排除磨粒金属粉尘、油雾对工人健康的影响	磨削效率低、工序多制造周期最长
CNC 精密硬旋风铣削	整体大型超长丝杠，大钢球重型 BS，各类异型螺杆，在丝杠结构上不允许出现大于螺纹外径的轴段	干切削：省工序、能耗、油耗、水耗，低于磨削	在封闭环境中高速旋铣、噪声小、无油屑便于集中处理，对环境污染小	生产效率高于磨削低于冷滚轧

CNC 精密滚轧成形	超细长 (L/D>50)。大导程、超大导程 ($\phi>17^\circ$) 双头和多头螺纹, 目前最大直径 6080, 最大长度 8m。在丝杠结构上部允许出现大于螺纹外径的轴段	低耗无屑加工、材料利用率高达 80%以上	无油雾和粉尘, 对环境污染小	单机快速出库存性供货
备注	CNC 硬旋铣、CNC 精密滚轧是绿色制造技术的典范			

资料来源: 黄祖尧《滚珠丝杠螺纹制造技术向高效、低耗、绿色方向发展(下)》

成本比较:

滚珠螺纹滚道硬车削效率不及硬旋铣加工, 但它较螺纹滚道硬磨削效率提高 2-3 倍, 同时省去了大量的外螺纹磨床, 极大地降低生产制造成本。

通常滚珠螺纹滚道硬车削生产制造成本是螺纹滚道硬磨削成本的 1/3~1/2, 是螺纹滚道的硬旋铣加工成本的 1/4~1/3, 从成本、效率比较, 滚珠螺纹滚道硬车削工艺具有广阔的发展前景, 将是未来滚珠螺纹滚道半精加工的首选方案之一。

6.1、国内在专利、经验、原材料的差距

6.1.1、专利: 国内正在持续追赶中

行星滚柱丝杠技术方面相关专利自 20 世纪 40 年代便开始出现, 1988 年以后的专利申请趋势可划分为 2 个阶段, 即萌芽期 (2009 年之前) 和成长期 (2010 年至今)。

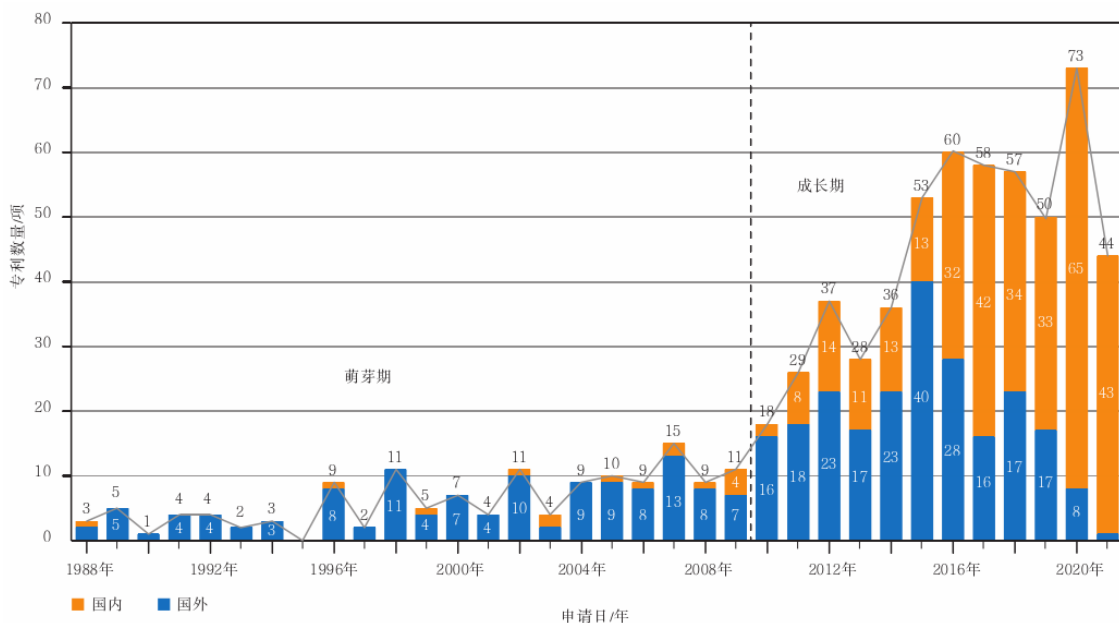
在萌芽期, 每年的专利申请数量不超过 15 项, 技术主要涉及行星滚柱丝杠总体结构设计技术、行星滚柱丝杠及螺母螺纹加工制造技术方面, 主要申请人有日本丰田公司 (TOYOTA)、德国舍弗勒技术公司、瑞典滚珠轴承制造公司 (SKF)、日本精工株式会社 (NSK) 等。

在成长期, 专利数量总体呈现快速增长趋势, 可分为 2 个阶段:

第一阶段系 2015 年之前, 专利数量增长动力主要来源于德国、瑞典、法国、日本等国家, 技术主要涉及行星滚柱丝杠总体结构设计方面。

第二阶段系 2016 年以后, 中国专利数量的占总申请量比重逐年扩大, 技术主要涉及行星滚柱丝杠总体结构设计、行星滚柱丝杠及螺母螺纹加工制造、行星滚柱丝杠副传动精度及效率测量、刚度特性试验等方面。

图 43: 专利申请趋势图



资料来源: 田青《行星滚柱丝杠技术专利分析》

行星滚柱丝杠螺纹加工工艺研究方面专利，具体包括螺纹硬态车削工艺研究、螺纹磨削用砂轮—廓形修整及保持技术研究、深孔内螺纹制造技术研究、大长径比外螺纹制造技术研究。其中，深孔内螺纹制造技术研究方面专利数量较多，技术主要涉及内螺纹采用磨削、研磨、车削、铣削的加工方法及装置，加工过程中磨削力预测、监测方法及装置方面。

行星滚柱丝杠副总体结构设计技术、螺纹磨削用砂轮—廓形修整及保持技术、深孔内螺纹制造技术研究、传动效率测量试验研究方面的年申请数量较多且呈增长趋势，是目前高精度行星滚柱丝杠副技术领域的热点。

图 44：各关键技术分支的专利申请情况

一级技术	二级技术	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
1 行星滚柱丝杠设计研究	1.1 总体结构设计	2	1	1	2	3	2	2		7	2	1	5	7	3	1	4	7	10	7	13	7	5	14	22	26	16	23	39	31	38	37	27	36	13
	1.2 啮合机理与接触特性研究																																1	5	1
	1.3 静刚度与变形研究																																		1
	1.4 载荷分布与均载方法研究																										2		1	1			2	3	
	1.5 摩擦机理与传动效率研究																																1		1
2 行星滚柱丝杠螺纹加工工艺研究	2.1 螺纹硬态车削工艺研究																1									2		1	1	1		1	1	1	
	2.2 螺纹磨削用砂轮廓形修整及保持技术		1		2	1				1										1	1	1					3	3	4	4		2	8	2	
	2.3 深孔内螺纹制造技术研究	1	3				1		1					1		1		1	1	1	3	1	1	4	5	4	3	6	2	10	4	13	13		
	2.4 大长径比外螺纹制造技术研究																			1		1	1	1	1	1	1	3	3		1	2			
3 行星滚柱丝杠综合性能测量方法	3.1 内外螺纹检测技术研究																								1				2						
	3.2 传动精度测量试验研究																					1	1	3	4	4	2	2	4	5	3	1	1	3	
	3.3 刚度特性试验研究																									1		1	1	3	3		2	1	
	3.4 传动效率测量试验研究																			1		1	1	1	1	1	1	7	4	3	11	5	5		

资料来源：田青《行星滚柱丝杠技术专利分析》

6.2、经验：需要不断积累以提高精度

国内一些生产厂家也先后购买了旋风硬铣机床，但滚珠丝杠的加工精度与国外还存在很大差异，主要原因有以下几个方面：一是缺乏对旋风硬铣机理和实验研究；二是国内、外生产企业在工件材料存在差异，在控制工件热变形误差上没有可以参考的数据。

针对硬车：

滚道硬车削工艺效率关键点在于滚道的留量控制，而滚道的留量大小取决于导程、钢球大小、滚珠丝杠的长度及滚珠丝杠自身综合状况等因素。

滚道硬车削需考虑车削后的工艺流向，通常情况下滚道硬车削后还需进行低温时效处理，丝杠会产生弯曲变形和长度方向的伸缩，这些变形会因滚珠丝杠长径比、导程、钢球大小、丝杠材质的纯净度等因素的不同而大小不一。

表 11：具体参数及要求（单位：mm）

导程	钢球	中径	长度	留量	圆度	圆柱度	跳动
4	2.381	<25	<800	0.20~0.25	0.02	0.03	0.05
5	3.175	<32	<1000	0.25~0.30	0.02	0.03	0.05

6	3.969	3240	<2000	0.30~0.35	0.02	0.04	0.05
8	4.763	3240	<2000	0.30~0.35	0.02	0.04	0.05
10	6.35	3240	<2200	0.30~0.35	0.02	0.04	0.06
12	7.144	4063	<2500	0.35~0.40	0.02	0.05	0.06
16	9.525	5080	<3000	0.40~0.45	0.02	0.05	0.06

资料来源：张广明《滚珠丝杠滚道硬车加工技术研究》

补偿

(1) 硬件补偿原理通过机械方法得到丝杠全程的螺距误差分布曲线，并在丝杠累积螺距误差值达到一个脉冲当量的位置安装挡块。当机床工作台移动时，机床控制开关向控制电路发送误差补偿信号。

(2) 软件补偿原理通过理想加工与螺距误差测量仪两种状态下得到的丝杠螺距误差值对比，得到螺距误差分布情况与补偿文件，将补偿数据输入数控系统后为下次铣削加工提供补偿值。这种定点补偿方法可以提高定位精度。

6.2.1、原材料：上下游要协同，提升纯净度

在引进旋风铣硬铣技术之初发现，处在国际顶尖水准的设备，进口的滚珠丝杠原材料铣削过程中铣削声音清脆，国产原材料则是声音比较沉闷，变形大，铣削结果是国产材料的滚珠丝杠废品率高，刀具磨损快。主要因素是原材料的差异。经长时间的试验和经验积累，发现原材料不仅影响了滚珠丝杠的加工，更主要的是它是导致我国的滚珠丝杠副普遍存在疲劳寿命低、可靠性差的根本原因之一，已成为制约国产滚珠丝杠副行业发展的瓶颈。

目前国内滚珠丝杠副生产厂家多以轴承钢 GCr15 作为滚珠丝杠、螺母的原材料；日本 THK 公司的高精度丝杠选用 AISI4150H，螺母选用渗碳钢 SCM420H，精度要求一般的丝杠选用 S55C，这种材料相当于国内的 55 号钢；在欧洲，多数滚珠丝杠厂家选用 CF53 作原材料；中国台湾上银用的则是 ILM-1、ILM-2 和 ILM-3。

从纯净度上讲，我国的钢材整体水平较差。例如，氧的含量，我国国家标准规定，高碳铬轴承钢氧的质量分数在 15×10^{-6} 以内，国内钢材含氧量一般在 12~15 个 ppm，而工业发达国家（如日本、瑞典等），轴承钢的氧含量普遍在 10×10^{-6} 以下即 10 个 ppm 以下，甚至达到 5×10^{-6} 以下。

表 12：材料的化学成分对比表（单位：%）

牌号	范围	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	P	S	Ni	Cu	Ni+Cu
GCr15	Min	0.95	0.15	0.25	1.40							
	Max	1.05	0.35	0.45	1.65	0.10		0.025	0.025	0.3	0.25	0.5
S55C	Min	0.52	0.15	0.60								
	Max	0.58	0.30	0.90				0.030	0.035			
CF53	Min	0.47	0.17	0.50								
	Max	0.55	0.37	0.80				0.035	0.035			
AISI4150H	Min	0.51	0.21	0.92	0.90	0.13				0.06	0.12	
	Max	0.53	0.22	0.94	0.91	0.15		0.008	0.013	0.07	0.12	
ILM-1	Min	0.55	0.15	0.75	0.10							
	Max	0.60	0.30	1.00	0.40			0.025	0.025			
ILM-2	Min	0.56	0.15	0.75	0.90	0.15	0.10					
	Max	0.62	0.35	1.00	1.05	0.20	0.15	0.025	0.025			
ILM-3	Min	0.53	0.15	1.35	0.10				0.005			

	Max	0.57	0.35	1.65	0.35			0.025	0.030			
SCM420H	Min	0.17	0.15	0.55	0.85	0.15						
	Max	0.23	0.35	0.95	1.25	0.30		0.030	0.030	0.25		

资料来源：张广明《精密滚珠丝杠制造技术的变革创新》

6.3、发展趋势：面向量产任务，设备与原材料升级

根据华经产业研究院，2022 年中国滚珠丝杠需求量 1555 万根，我们估计全球需求量约 7700 万根；根据 IHSMarkit，2022 年中国行星滚柱丝杠销售数量 1.0 万根，全球销售数量 8.6 万根。

目前滚珠丝杠已得到广泛应用，但行星滚柱丝杠的使用范围相对较小。面向人形机器人“百万级”量产的目标，行星滚柱丝杠还面临巨大的量产压力。

从解决高效规模化生产的角度看，丝杠制造技术的发展趋势包括以下几个方面：

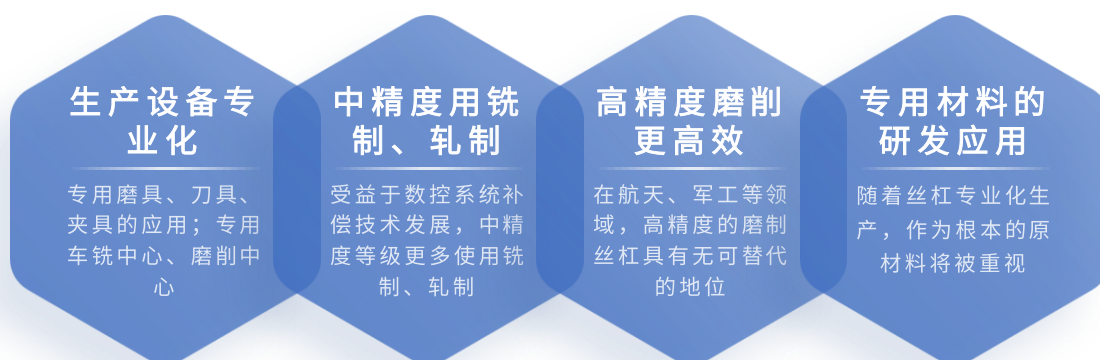
(1) 生产设备专业化。目前国内滚珠丝杠生产企业的加工设备还是常规的通用设备，专用设备工具和专有技术少之又少。为了应对日益激烈竞争的市场需求，大量的专业化生产设备、工具将被研发、应用。例如，专用磨具、刀具和夹具的研发应用，螺母加工专用车铣中心及磨削中心的研发应用，硬加工机床的研发应用，以及自动生产线的研发应用等。

(2) 磨制的中等精度等级滚珠丝杠将逐渐被铣制、轧制滚珠丝杠代替。由于数控系统补偿技术得到长足进步和发展，对滚珠丝杠精度要求不再像以往那样地追逐，中等精度等级滚珠丝杠将被更广泛地应用，铣制、轧制滚珠丝杠将在满足中等精度等级要求的前提下占有更大的市场份额。

(3) 在高精度等级滚珠丝杠方面，对滚珠丝杠磨削技术的要求将越来越高，不仅要求更精密、而且要求更高效。在电子系统受干扰的航天、航空和军工等领域，高精度的磨制滚珠丝杠具有无可替代的地位。

(4) 滚珠丝杠专用材料将被研发和应用。随着滚珠丝杠企业转型升级的不断深入，滚珠丝杠专业化生产将达到史无前例的程度，原材料作为滚珠丝杠的根本，必将会被重视和研究。

图 45：丝杠高效规模化生产发展趋势



资料来源：张广明《精密滚珠丝杠制造技术的变革创新》

7、投资建议

7.1、产品方面

对比滚珠丝杠和行星滚柱丝杠的主要生产商，主要分为以下三类：

(1) 滚珠丝杠和行星滚柱丝杠生产商。如 Rexroth、EWELLIX、LTK、SKF、南京工艺、济宁博特；

(2) 专业化滚柱丝杠生产商。如 THK、NSK、上银、银泰；

(3) 专业化行星滚柱丝杠生产商。如 Rollvis、GSA、CMC、优仕特。

多家丝杠厂商同时具备轴承业务，如 NSK、上银、银泰、EWELLIX、CMC、SKF、LTK 等。

表 13：丝杠主要厂商

品类	生产商	成立年份	简介	营收规模 (2022 年)
滚珠丝杠	Rexroth (德国)	1795	隶属于博世力士乐集团，是一家主要生产液压系统、减速机、电控技术以及机电一体化产品的大型工业品公司。在线性传动技术领域，Rexroth 提供直线导轨、滚珠和滚柱丝杠、电动缸和直线运动模组等产品。其滚柱丝杠产品是在近 10 年内推出的新产品，采用轧制成型技术以满足追求更高经济性的客户需求，但在有高精度和高寿命要求的场景下无法使用。	70 亿欧元
	THK (日本)	1971	THK 于 1972 年成为世界上第一家开发和商业化直线运动(LM)导轨的公司，主要产品包括 LM 直线运动导轨和滚珠丝杠。	3936 亿日元
	NSK (日本)	1916	主要业务包括：工业领域的轴承、滚珠丝杠、精密机械及零部件；汽车领域的轴承、转向系统、自动变速箱产品。	9381 亿日元
	汉江机床 (中国大陆)	1998	国家第三个五年计划时期兴建的三线建设重点工程之一，机械工业大型骨干企业，国内螺纹磨床主导企业。滚动部件具备年产能滚珠丝杠 20 万套，丝杠导轨 10 万套（2014 年）。	4 亿元
	南京工艺 (中国大陆)	1952	国内滚动功能部件行业的龙头企业，产品包括滚珠丝杠、行星滚柱丝杠，公司 2021 年主持编制 4 项国家标准、4 项行业标准。	
	上银 (中国台湾)	1989	产品包括滚珠丝杠，直线导轨、轴承、谐波减速器、单轴/多轴机器人、回转工作台、医疗设备等。	223 亿新台币
行星滚柱丝杠	银泰 (中国台湾)	1990	主要生产滚珠丝杠、精密丝杠花键、线性导轨、滚珠花键和线性模组，精密机械关键性零部件，主要供应机床、放电加工机、线切割机、塑胶注塑机、半导体设备、精密定位及其他各式设备与机器上。	
	Rollvis (瑞士)	1970	可以提供直径范围从 5mm 至 245mm，导程范围从 0.1mm 至 50mm 的几乎全系列研磨级高精度产品。Rollvis 的产品主要应用于航空航天、军工设备、钢铁冶金等领域，近年来也面向普通工业应用如电动缸等提供批量化供货。	
	GSA (瑞士)	1932	GSA 的丝杠尺寸系列较全，可以向市场提供直径范围从 5mm 至 245mm，导程范围从 0.5mm 至 50mm 的产品系列。GSA 是目前市场上最具价格竞争力的研磨级滚柱丝杠品牌，其定价相对于 Rollvis 更低，产品质量等级和性能表现也略低于 Rollvis 公司。在国内产品主要销售到航空航天、军工设备以及钢铁冶金等行业中。	
	EWELLIX (瑞典)	1968	全球领先的线性运动及驱动解决方案的制造商和供应商，致力于为各种工业应用设计、制造和定制线性运动解决方案和线性驱动器，包括智能驱动器、线性导轨和滚珠丝杠，支持客户逐步过渡到全电解决方案。	年均 2.5 亿欧元
	Rexroth (德国)	1795	隶属于博世力士乐集团，是一家主要生产液压系统、减速机、电控技术以及机电一体化产品的大型工业品公司。在线性传动技术领域，Rexroth 提供直线导轨、滚珠和滚柱丝杠、电动缸和直线运动模组等产品。其滚柱丝杠产品是在近 10 年内推出的新产品，采用轧制成型技术以满足追求更高经济性的客户需求，但在有高精度和高寿命要求的场景下无法使用。	70 亿欧元
	CMC (美国)	2002	产品包括电动直线执行器、行星滚柱丝杠、深沟滚子轴承。	
	SKF (瑞典)	1907	推出的 SR/BR/TR/PR 系列标准式行星滚柱丝杠已应用于塑料模具、自动控制、军工和核工业等领域，其生产的 SV/BV/PV 系列循环式滚柱丝杠则主要应用于一些高精技术场合。	969 亿瑞典克朗
	LTK (德国)	1993	所生产的主要型号有 RV/BRV/RVR/RVI/RVD 等系列。	

优仕特 (中国台湾)	2018	专注行星滚柱丝杠，自有品牌 U-SCREWS，应用内领域：军事、航空业和工业用途。	
南京工艺 (中国大陆)	1952	所研制出的行星滚柱丝杠样品承载能力达到了 39t。	
济宁博特 (中国大陆)	1966	研制出的 BT-GZXS 行星滚柱丝杠已经投入市场使用，并联合北京航空航天大学、国家机床质量监督检测中心等单位起草了行星滚柱丝杠副的产品标准。	
常州思科瑞 (中国大陆)	2014	已研制出多种系列行星滚柱丝杠产品并应用阀门、石化、军事等领域	

资料来源：各公司官网、柯浩《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》、光大证券研究所

7.2、工艺方面

工艺方面，需综合考虑丝杠精度与生产效率的平衡。按照精度排序，依次是磨削>旋风铣>辊轧，按照生产效率排序，依次是辊轧>旋风铣>磨削，而硬车削通常作为螺纹滚道半精加工的选择之一。

为了满足人形机器人降本、放量的要求，行星滚柱丝杠的生产效率和量产成本需在当前水平基础上有较大下降。我们预计，在满足精度要求的前提下，中精度丝杠使用旋风铣、辊轧更能适应大批量、快速交付的要求，而磨床将在高精度丝杠中继续占据不可替代的地位。

➤ 磨床

表 14：国外各类型的磨床具有代表性的生产商

磨床型号	生产商
高精度内外圆磨床	Studer、Kellenberger、Schleifring
高精度平面磨床	Blohm、Aba、ELB、Favretto
导轨磨床	WaldrichCoburg、Favretto、住友精机
曲轴、凸轮磨床	Junker、Landis、Studer、丰田工机
大型曲轴磨床	Naxosunion、Cetos、Wohlenberg、唐津
大型轧辊磨床	Ingesoll
无心磨床	Koyo、Mikrosa
珩磨机	格林、善能、那格尔
滚珠丝杠磨床	科堡、三井精机
齿轮磨床	Gleason
五坐标工具磨床	瓦尔特、安卡、萨克

资料来源：虞行国《高端磨削技术需求及国内磨床行业现状》

在计划经济时代，我国设备制造业基本有明确专业的分工，如上海机床厂生产外圆磨床系列，杭州机床厂生产平面磨床系列，无锡机床厂生产内圆磨床系列，天津机床厂生产齿轮磨床系列，还有北京二机床、陕西机床、秦川机床、桂北机床、威海华东等厂生产制造出了一批代表我国较高水平的磨床。

目前，磨床行业竞争格局可划分为三个类别：

(1) 国外企业：德国、日本等发达国家的磨床企业起步较早、技术水平领先，产品附加值较高，主要面向航空航天、汽车、模具等下游产业，典型公司包括德国斯来福临集团、日本捷太格特、德国埃马克、瑞士罗曼蒂克等，是目前国际上的高端磨床制造商。

(2) 国内国有企业：国内市场现存知名磨床制造国有企业，主要由曾以“十八罗汉”为代表的国有控股机床企业改制重组而来，发展历史悠久，实力雄厚，规模居于国内前列，代表公司主要有秦川机床（000837.SZ）、无锡机床、上海机床等。

(3) 国内民营企业：自 2001 年中国加入 WTO，数控机床进入高速发展时期，国内市场对数控机床需求急增，一批民营数控磨床企业开始快速发展，产品在一些细分领域占有重要地位，代表公司主要包括宇环数控（002903.SZ）、华辰装备（300809.SZ）等。

➤ 旋风铣床

20 世纪 80 年代，西方工业发达的国家出现了一批专业生产 CNC 旋风铣床的厂家，例如：德国 Leistritz 公司、GWT 公司、Burgsmuller 公司、奥地利 WEINGÄRTNER 公司、Linsinger 公司等。到 1990 年后期，随着高速硬切削理论和制造技术以及刀具制造和刃磨技术的成熟，智能化、复合化的高档 CNC 硬旋风铣床和旋铣加工中心相继进入市场。

国内汉江机床研发了适宜大批量产业化生产、具有自主知识产权的大型螺纹旋风硬铣削机床。HJ092×80 数控螺纹旋风铣床适用于加工直径 230mm 以内、长度 8000mm 以下的滚珠丝杠（精度可达 3 级）、梯形丝杠及螺杆，还可对直径 100mm 以内、长度 8000mm 以上的滚珠丝杠进行接刀加工。

➤ 精密滚轧机

精密滚轧技术 HPR（High Precision Rolling）的出现，使丝杠螺纹的轧制精度出现重大突破，从 20 世纪 90 年代开始在欧美国家中出现了一批数控化、智能化水平较高的 CNC 精密滚轧机。

德国（PROFIROLL）宝飞螺公司在经济适用型系列产品的基础上推出锐意创新型高档 CNC 精密滚轧机（第五代），新配置的宝飞螺 CNC/AC 数控系统可根据材料的成形过程，随机调整主轴转速和轧辊的进给量，并具有滚压过程参数程序化、屏幕化和管理提示等功能。

由美国在这个领域的权威人士 Howard AGreis 先生创建的 KINEFAC 肯尼福公司推出了封闭受力闸式 CNC 高强度滚轧机（第三代），该公司下设国家级挤压滚轧成形工艺开发试验室：两模、三模冷滚轧技术中心等多个研发机构。

德国 Leistritz 公司在生产 CNC 旋风铣床的同时还生产不同吨位的滚压成形机，其中 LWN-RT 系列 CNC 精密滚轧机配有新一代数控技术，力学结构的高刚度床身，两个 AC 电动机驱动双主轴，其定位精度和重复定位精度都很高，用于加工 RBS 等产品。

表 15：海外丝杠机床主要参与者

英文名	国家	创立年份	主要产品
螺纹磨床			
waldrich-coburg 科堡	德国	1920	大型高精度铣床、磨床和车床。包括 TAURUS、TAURUS Gemini、MasterTec 和 PowerTec 铣床系列，WayGrind 和 RailGrind 磨床系列、ValuTurn、MultiTurn 和 PowerTurn 车床系列；
Mitsubishi 三井精机	日本	1928	高精度机床母机和固定式空气压缩机。机床有卧式 CNC 加工、立式 CNC 加工、坐标磨床、螺纹磨床和坐标镗床系列。压缩机包括高效节能水润滑变频无油压缩机、环保性能的标准型水润滑无油压缩机、功率超过型号标准的小型水润滑无油压缩机、用于大型设施的大功率水润滑无油压缩机、环保节能涡旋压缩机等。
旋风铣			

Leistritz 莱斯特瑞兹	德国	1905	航空和能源技术用涡轮产品，石油天然气、化工及造船行业用螺杆泵，塑料和制药行业用双螺杆挤出机，汽车和机械工程行业用刀具和旋风铣床。
Burgsmuller 伯格斯穆勒	德国	1876	公司定位为螺纹切削专家和旋风铣技术的发明者，近年来逐步停止销售旋风铣床，转向双螺杆挤出机螺杆元件和丝杠的生产。
WEINGÄRTNER 魏因加特纳	奥地利	1966	公司重新定义了“旋风铣”，公司的机床、刀具、工艺流程和 CAD/CAM 软件用于生产大型曲轴、发电厂发电机转子、风力涡轮机、蒸汽和燃气轮机、大型压缩机螺杆以及造纸和钢铁行业的轧制加工。
Linsinger 林辛格	奥地利	1939	铣削技术，锯切技术，钢轨技术，客户服务和设备保养服务。产品包括螺旋式钢管锯切机、圆盘锯机、带钢铣边机等。
精密轧机			
PROFIROLL 宝飞螺	德国	-	螺纹及成形滚压机、花键滚轧机、环形件冷辗扩机和滚压模具。滚压模具包括圆形滚压模具、Rollex 花键模具、增量式圆模具、行星式模具、搓丝板和齿条模具。
KINEFAC 肯尼福	美国	1962	公司是精密金属成型和加工技术领域的世界领先者。可提供两模、三模精密轧机和相关模具。
EVIRT 艾瓦特	意大利	-	智能轧制机，包括 MONO™系列、PLANAR™系列、RADIAL™系列和 SPECIAL 系列，广泛应用于圆形和管型材上的 ISO 螺纹和梯形螺纹、接头连接、滚珠丝杠、滚花几何形状、开槽和成型等等。

资料来源：各公司官网、光大证券研究所

产品方面：

贝斯特生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品首台套已实现成功下线，部分产品已在送样验证过程中；

五洲新春生产的 T 型螺纹丝杠开发完成并向客户送样，行星滚柱丝杠零部件向下游重要客户多次送样；

恒立液压线性驱动器项目预计 2024 年第二季度投产，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。

工艺方面：

浙海德曼的 T 系列高端数控车床及高精密级数控车床具备较强的以车代磨效果。该系列的复合加工功能能够实现铣削功能，可以代替部分以铣代磨功能；

华辰装备与贝斯特达成全面战略合作关系，共同推动国产高端数控直线导轨磨床关键核心技术攻关；

秦川机床的螺纹磨床广泛供应滚动功能部件行业、工量具行业、减速机行业、汽车零部件制造、螺杆空气压缩机行业；子公司汉江机床拥有行星滚柱丝杠产品的研发、制造基础，近年来已有多种产品供给某些特殊行业；同时公司具备旋风铣机床生产能力；

日发精机的数控螺纹磨床用于新能源汽车、人形机器人上的丝杠与螺母的试磨情况良好，高效且精度符合客户要求；用于丝杠螺母的端面外圆磨床已向某客户交付，并与另一客户签订了螺纹磨床合同。

表 16：国内上市公司中丝杠行业主要参与者

公司	整体实力	丝杠、机器人相关进展
五洲新春	公司主要生产轴承及汽车配件等高端精密零部件。为德国舍弗勒和瑞典斯凯孚两家轴承制造商提供轴承套圈。	公司研发的各类丝杠类产品主要面向新能源汽车产业和机器人产业。公司 T 型螺纹丝杠开发完成并向客户送样，行星滚柱丝杠零部件向下游重要客户多次送样，公司的短期目标是切入主流客户产业链。

贝斯特	公司业务分为三大板块：一、各类精密零部件、智能装备及工装夹具等原有业务；二、新能源汽车零部件业务；三、工业母机领域，全面布局直线滚动功能部件，产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等。	公司通过设立全资子公司“无锡宇华精机有限公司”全面布局直线滚动功能部件（产品包括：高精度滚珠/滚柱丝杠副、高精度滚动导轨副等），公司生产的滚珠丝杠副、直线导轨副等产品首台套已实现成功下线，部分产品已在送样验证过程中。
恒立液压	经过 30 多年的专注与创新，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，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。	公司拟投资 15 亿元建设线性驱动器项目，预计 2024 年第二季度投产。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。
浙海德曼	公司专门从事高端数控车床生产，掌握了数控车床三大核心技术，即主轴技术、伺服刀塔技术、伺服尾座技术国家级专精特新“小巨人”企业。与贝斯特、五洲新春、双环传动等建立多年的合作关系。	公司的 T 系列高端数控车床及高精密级数控车床具备较强的以车代磨效果。该系列的复合加工功能能够实现铣削功能，可以代替部分以铣代磨功能。
华辰装备	公司是国内专业从事全自动高精度数控轧辊磨床研发生产的创新型领先企业。公司公司与德国 Wieland 公司开展国际合作，开发内外圆复合磨床（亚μ磨削系列产品），属于高精度数控万能复合磨床，具有外圆、内圆、非圆、螺纹磨削功能。	与贝斯特达成全面战略合作关系，共同推动国产高端数控直线导轨磨床关键核心技术攻关。华辰装备计划于 1 年内向贝斯特精机提供对标国际行业龙头企业领先水平的精密数控直线导轨磨床产品以及相应技术支持，该产品为目前全球磨削长度最长、技术难度及磨削效率最高的产品。
秦川机床	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，国家级高新技术企业和创新型试点企业，拥有国家级制造业单项冠军产品和多家国家级专精特新“小巨人”企业。	公司螺纹磨床产品下游市场主要有：滚动功能部件行业、工量具行业、减速机行业、汽车零部件制造（尤其是新能源汽车）、螺杆空气压缩机行业。子公司汉江机床拥有行星滚柱丝杠产品的研发、制造基础，近年来已有多种产品供给某些特殊行业，同时，部分新型号产品正在研制和试验验证。同时也具备旋风铣机床生产能力。
日发精机	日发机床公司定位于高端数控机床，用定制化设计、规模化生产、全方位服务逐步实现进口替代并占有优势的行业地位。	公司数控螺纹磨床用于新能源汽车、人形机器人上的丝杠与螺母的试磨情况良好，高效且精度符合客户要求，获得了客户的认可；用于丝杠螺母的端面外圆磨床已向某客户交付，并与另一客户签订了螺纹磨床合同。

资料来源：各公司官网、各公司公告、光大证券研究所

人形机器人与人工智能技术不断突破，产业链正处于放量前夕，相关产业链面临巨大投资机遇。丝杠作为人形机器人核心传动部件，正面临新一轮产业机遇。其中行星滚柱丝杠为了满足人形机器人降本、放量的要求，生产效率和量产成本需在当前水平基础上有较大下降，生产工艺正持续优化中，设备、技术等均存在较大国产替代空间。

产品层面：行星滚柱丝杠部分厂商已具备生产能力并向下游客户送样；工艺层面：磨削、旋风铣、轧制、硬态车削预计都将发挥作用。

建议关注：

- (1) 积极布局行星滚柱丝杠产品的贝斯特、五洲新春、恒立液压；
- (2) 高端磨床、“以车代磨”、“以铣代磨”等工艺路线：浙海德曼、华辰装备、秦川机床、日发精机。

8、风险分析

(1) 产业化进程不及预期：目前人形机器人产业链成本仍较高，尚未具备确定的应用场景，若产业化进程不及预期，可能对供应链企业造成不利影响；

(2) 竞争加剧风险：产业界对人形机器人高度关注，若后续丝杠、空心杯电机、减速器等领域竞争加剧，可能对供应链企业造成不利影响；

(3) 核心技术进步不及预期：人形机器人的产业化推进有赖于 AI、自动驾驶、以及相关零部件的核心技术持续进步，若后续核心技术进步不及预期，可能对产业链落地造成负面影响。

行业及公司评级体系

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

分析、估值方法的局限性说明

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

分析师声明

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

法律主体声明

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

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

特别声明

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

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

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

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

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

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

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

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区新闻路 1508 号
静安国际广场 3 楼

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

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