

人形机器人专题4： 变革前夜：旋转vs直线，关节模组还有哪些机会？ —— 硬件、工艺及设备

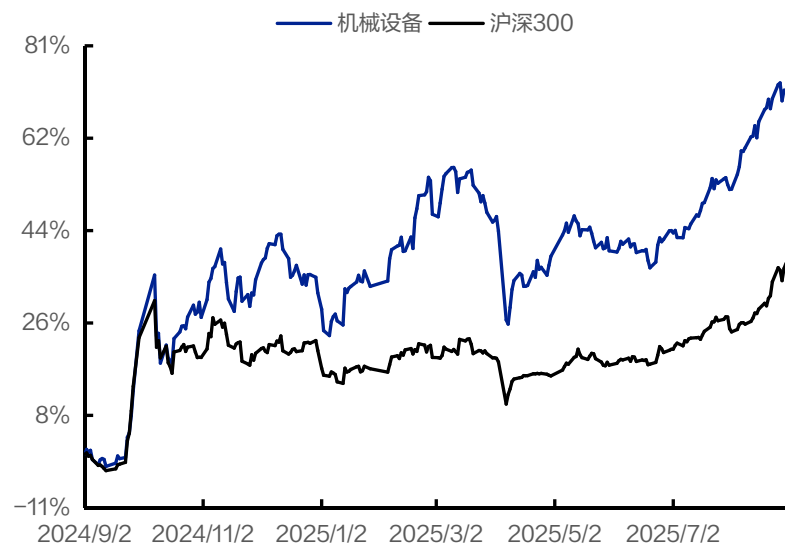
评级：推荐(维持)

张钰莹(证券分析师)
S0350524100004
zhangyy03@ghzq.com.cn

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

最近一年走势



相关报告

《机械行业专题报告：摩托车行业2025年7月海关数据更新（推荐）*机械设备*张钰莹》——2025-08-24

《机械行业专题报告：摩托车行业2025年1-7月数据更新（推荐）*机械设备*张钰莹》——2025-08-17

《机器人行业专题报告：人形机器人产业变革与投资机遇——基于政策驱动及产业进展维度（推荐）*机械设备*张钰莹》——2025-07-24

相对沪深300表现

表现	1M	3M	12M
机械设备	11.2%	20.5%	71.4%
沪深300	8.3%	16.5%	37.2%

本篇报告解决了以下核心问题：1）梳理了人形机器人关节模组的部分本体和厂商方案，进行现有方案的供/需比对。关节模组是人形本体的核心硬件，目前主要分为旋转和直线两大类，适配不同的部位和功能，在两个类别中又有许多可选方案。2）重点介绍了旋转执行器中的减速器方案、加工工艺及部分厂商布局，并介绍了精冲工艺在减速器核心零部件中的制备应用和微型减速器零部件的制备；3）梳理了直线执行器的加工工艺、参数及设备竞争格局等。

◆ 1、旋转：多种减速器方案满足人形本体功能需求

- ◆ 精密行星减速器：适配大负载、冲击性强的本体，工艺较为成熟；加工工艺及设备方面，工艺较为成熟，可更新为高精度数控机床方案；
- ◆ 摆线针轮减速器：一级行星+一级摆线针轮结构，灵活调整实现不同部位对应需求；新型号设计和迭代有加速的趋势，部分厂商有针对性开发的轻量化工艺；
- ◆ 谐波减速器：高精度轻量减速器，可用于人形上肢等位置；
- ◆ 加工工艺创新：介绍了精冲工艺在减速器核心零部件中的制备应用和微型减速器零部件的制备；

◆ 2、直线：电机+线性零部件，推/拉如何实现机器人的运动+负载？

- ◆ 梳理了丝杠的应用方案，我们认为：由于目前存在加工难度，灵巧手用微型减速器以丝杆或滚珠丝杠为主，较大尺寸的执行器有滚柱丝杠的方案；
- ◆ 介绍了滚珠丝杠、滚柱丝杠的加工工艺、参数，其中，滚珠丝杠工艺较为成熟，加工工艺难度在螺母内滚道加工，特别是大导程螺母中的砂轮干涉；滚柱丝杠分为标准式、反向式等，加工工艺有磨削和以车代磨等；
- ◆ 梳理了部分机床设备厂商的布局。

- ◆ 我们认为人形机器人目前处于技术突破、商业化落地初期，后续有望迎来量产空间，维持人形机器人行业“推荐”评级。建议关注：1）减速器厂商中大力德、绿的谐波、丰立智能、科达利等；2）丝杠：恒立液压等；3）灵巧手供应商兆威机电、电子皮肤供应商汉威科技等。

- ◆ **风险提示：**人形机器人行业进展不及预期风险；中美贸易摩擦超预期风险；人型机器人未来大规模商业化可能涉及法律监管方面的风险；重点关注公司业绩不及预期风险；研究报告中使用的公开资料可能存在信息滞后或更新不及时的风险。

01 人形机器人一体化关节：本体方案及供应商的供需适配性如何？

1.1 “需求”：头部机器人本体厂关节模组方案

◆ 当前各人形机器人产品在驱动器技术存在多种方案，不同方案的选择往往是应用场景和制造成本之间权衡的结果。国内人形机器人关节以旋转驱动器为主，代表厂商有优必选、傅利叶、智元和宇树科技等。在具体应用中，如，星动纪元自研高性能通用人形机器人星动 STAR1 共有 55 个自由度含有 19 个谐波减速器、12 个行星减速器、24 个小微减速器。最高关节扭矩达 400Nm，最高转速达 25rad/s。

表：部分本体厂关节模组方案

公司	型号	执行器类型	应用需求	电机	伺服驱动	编码器	力矩传感器	减速器方案	丝杠方案	峰值扭矩 N.m	电机重量 Kg	中空走线	续航时间h
优必选	WalkerS1	旋转	工业精度	无框力矩电机	有	2	有	谐波	无	250	/	/	/
开普勒	先行者K2	旋转+直线	高负载	/	有	有	有	谐波	行星滚柱	220	/	/	8
傅利叶	GR-2	旋转	工业精度	/	有	2	无	/	无	380	/	/	2
智元	远征A2	旋转	工业精度	自研电机	矢量控制驱动器	2	/	行星	无	350	1.6	有	2
宇树	H1-2	旋转	运动控制	永磁同步电机	自研驱动器	2	有	行星	无	360	1.9	有	/
星动纪元	L7	旋转	工业精度	自研	/	/	/	行星+谐波	无	400	/	/	/
众擎机器人	ENGINEAI SE01	旋转	运动控制	自研低惯量高速内转子永磁同步电机	有	2	/	谐波	滚珠	400	/	有	2
小鹏	PX5	/	拟人行走	/	/	/	/	谐波+行星	无	/	/	/	/
小米	Cyberone	旋转	/	/	/	/	/	/	无	300	/	有	/
特斯拉	Optimus	旋转+直线	工业精度	无框力矩电机	有	/	有	谐波	行星滚柱	/	/	/	/
figureAI	figure02	旋转	家庭/工业操作	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
lxtechnologies	Neo	/	家庭	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

1.2 “供给”：部分供应商模组产品方案拆解

◆ 我们梳理了部分供应商已正式推出的关节模组方案，其中，旋转关节模组可以以减速器类型进行划分，分为摆线/行星/谐波旋转关节，主要厂商包括中大力德、昊志机电、绿的谐波、禾川科技等；直线关节模组可分为滚珠/滚柱/灵巧手用丝杠，主要厂商包括新剑传动、捷昌驱动、狄兹精密、禾川科技等。

表：部分旋转关节模组厂商产品及参数

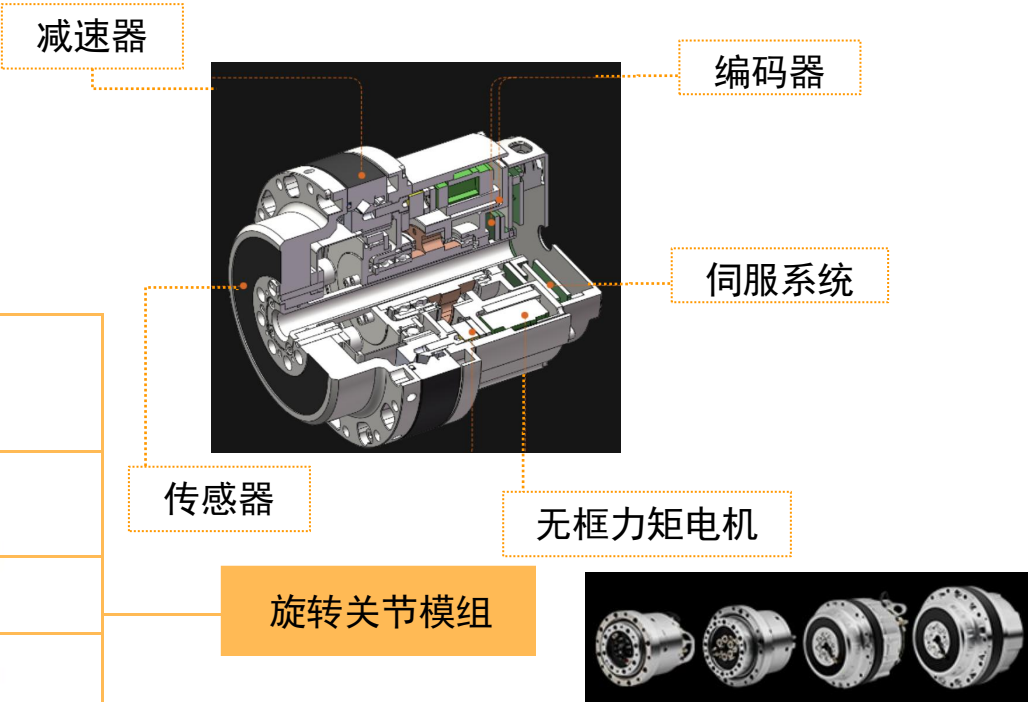
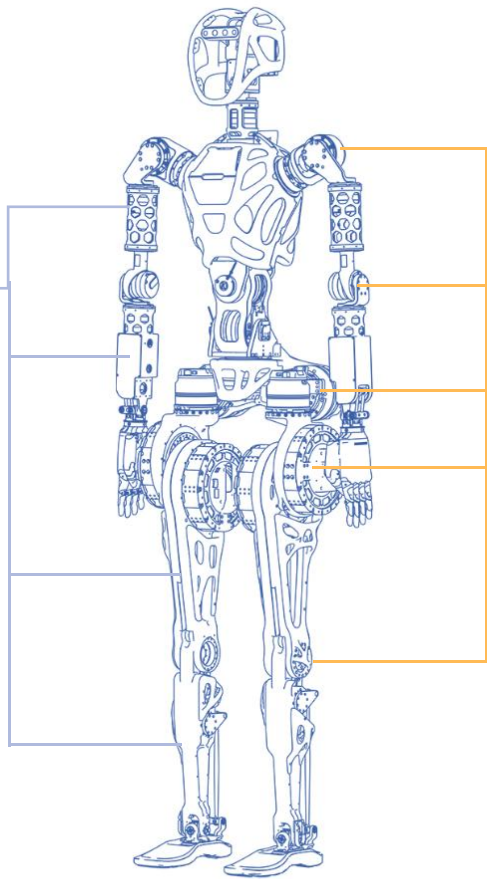
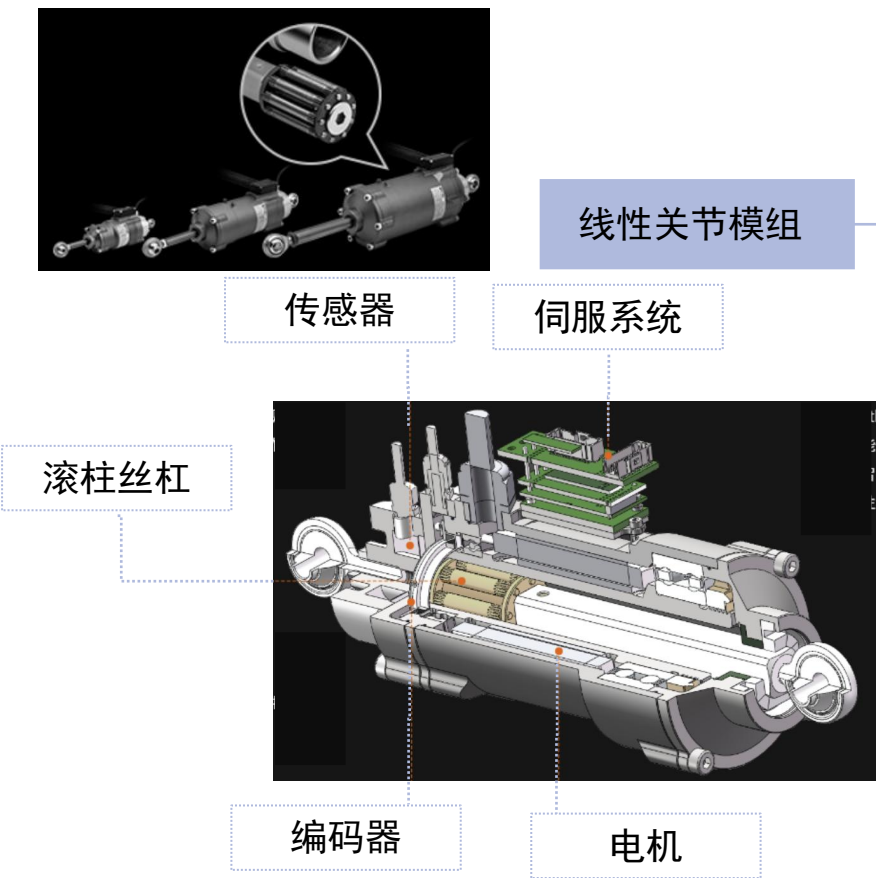
旋转关节模组									
公司	产品型号	核心减速器种类	参数						
			尺寸mm	重量g	额定/峰值 转速 rpm	额定/峰值 扭矩 N.m	扭矩密度 N.m/KG	减速比	单向/重复 定位精度
中大力德	ZD155-25-B18-1	摆线	155*74.4	2770	70/100	160	115	18：1	/
	ZD113-20-B18-1		113*63	1540	75/185	57.6/175	112	18：1	/
	ZD113-20-B10-1		113*54	1300	120/330	32/96	73	10：1	/
昊志机电	DGMZ-17-48-S-E-L	行星	/	2400	20/30	50/69	/	/	/
绿的谐波 (开璇智能)	KAH-14A (交流电220V)	谐波减速器	/	1600	59/125	8.6/23	/	51:1	40/8
	KAH-25E (交流电220V)		/	3200	19/31	133/217	/	161:1	30/7
	KAT-25A (交流电220V)	加大孔径中空轴旋转执行器	/	4300	58.8/102	68.5/121	/	51:1	40/8
禾川科技	HU-MRS030-6D000	谐波减速器	70	900	49.5	9.6/13.5	/	101：1	/
	HU-MRS070-6D000		80	1000	44.5	30/49	/	101：1	/
	HU-MRS190-6D000		110	1800	39.6	84/133	/	101：1	/

表：部分直线关节模组厂商产品及参数

直线关节模组								
公司	产品型号	参数						
		最大推力 N	尺寸 mm	行程mm	重量g	标准导程	额定静载 荷N	精度等级
新剑传动	直线型电驱动 关节	500/4k/8k	170/210/280	40/75/85	60/260/350	3mm	3k/15k/27k	/
	灵巧手微分行星 滚柱丝杠	有						
捷昌驱动	直线关节模组	500/4k/8k	150/250/300	45/65/85	/	1mm	/	/
	灵巧手用微型 电缸	/	62	10	/	/	/	/
狄兹精密	行星滚柱丝杠 执行器	500/4k/8k	4-210	30/50/60	/	1-50mm	/	G3/G5/G7
	灵巧手用微型 丝杠	/	1.4-20	/	/	0.5-40mm	/	C3/C5/C7
禾川科技	行星滚珠丝杠	200/500	141-176	35	300	/	/	/
	反向行星滚柱	600/1500	198-248	50	750	/	/	/

1.3 本体核心硬件：旋转关节 vs 直线关节

◆ 线性执行器将电机的旋转运动转换为直线运动输出，具有较好的支撑性能和承重性能，主要用于高负载且运动旋转角度较小的场景，例如膝部、肘部，脚踝等部位。



◆ 旋转执行器可实现绕单轴旋转，输出旋转运动，使人形机器人可以完成各种角度的旋转动作，通常应用在需要高扭矩的关节处，例如肩关节、腰部、髋关节等。

1.4 旋转关节 vs 直线关节：应用、构成及成本拆分

- ◆ **旋转执行器**可实现绕单轴旋转，输出旋转运动，使人形机器人可以完成各种角度的旋转动作，通常应用在需要高扭矩的关节处，例如肩关节、腰部、髋关节等。从成本来看，旋转执行器中，谐波减速器、扭矩传感器、无框力矩电机成本占比相对较高，分别为 36.0%、30.0%、13.5%，合计占旋转执行器成本的 79.5%；
- ◆ **线性执行器**将电机的旋转运动转换为直线运动输出，具有较好的支撑性能和承重性能，主要用于高负载且运动旋转角度较小的场景，例如膝部、肘部，脚踝等部位。线性执行器中，行星滚柱丝杠、力传感器、无框力矩电机的成本占比较高，分别为 64.2%、16.1%、7.2%，合计占线性执行器成本的 87.5%。

表：旋转、直线执行器比较

类别	优点	缺点
旋转执行器	多功能性：适用于需要大角度旋转的关节，如肩髋等。	空间限制：在需要紧凑设计的关节中可能不适用。
	成本效益：相比较线性执行器，旋转执行器在成本上更具优势，特别是在大规模生产中。	运动范围限制：主要提供旋转运动，不适合需要直线运动的关节。
	成熟度高：伺服电机 + 减速器方案已达工业级可靠性（>90% 效率）。	
线性执行器	精度保持性好、刚度好：相比较旋转执行器，线性执行器中的行星滚柱丝杠通过预压螺母的形式，易实现传动零背隙，行星滚柱丝杠由于线 / 面接触，刚度保持性好，更加利于上肢精巧平稳操作。	动态特性偏弱：由于高减速比，在同样的功率密度情况下，输出速度偏低，通频带低，不利于高动态运动的实现（相较于行星减速器关节或液压驱动）。
	耐冲击能力强：行星丝杠的耐冲击性远远好于谐波传动（谐波，每次的受力齿数较少，柔轮壁厚薄，容易断齿与简裂等），而行星丝杠受力均匀，寿命长。	系统集成度低，成本高：由于自锁特性，关节端无法通过电流环的方式感知外力，在做力控时必须依靠关节端额外加装的力传感器，系统集成度偏低，成本较高。目前特斯拉采用的 RVI（反向行星滚柱丝杠）构型，加工工艺难度大。
	能量效率高：腿部由于行星滚柱丝杠的自锁特性，站立作业时腿部电机无需出力，能量效率高，续航长。	
	空间利用率高：线性执行器可以纵向布局在手臂或腿部，最大限度利用躯干内部空间，可布置体积更大、推动力更大电机。	

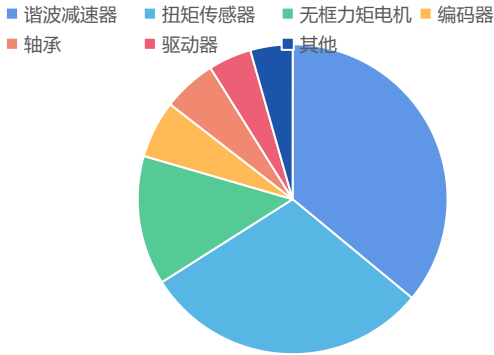
表：旋转执行器核心零部件构成

组成零件	性能需求	常见类型
电机	大扭矩、体积小、质量轻、低转动惯量。	无框力矩电机
减速器	刚性驱动器采用高传动比的减速器； 准直驱驱动器采用低传动比的减速器。	谐波减速器、行星减速器
传感器	可准确测量关节电机的位置、速度和扭矩的参数。	编码器、扭矩传感器
轴承	可承受轴向力和径向力，满足人形机器人的复杂运动场景。	交叉滚子轴承、角接触球轴承

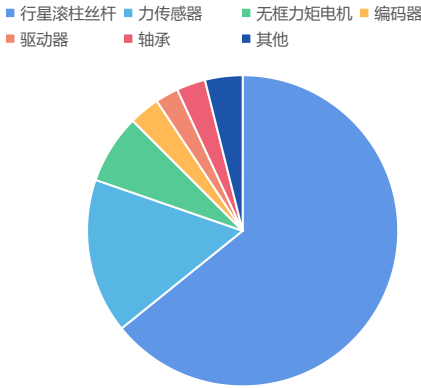
表：直线执行器核心零部件构成

组成零件	性能需求	常见类型
电机	大扭矩、体积小、质量轻、低转动惯量。	无框力矩电机
丝杠	高精度、长寿命、高承载。	行星滚柱丝杠、滚珠丝杠
传感器	需要测量多个方向的力和力矩。	力矩传感器

图：旋转执行器成本拆分



图：直线执行器成本拆分



02 旋转执行器：高精度行星/摆线针轮/谐波减速器

2.1 精密减速器：分类及参数对比

◆ 目前在人形机器人本体的旋转关节模组中，可能考虑的减速器方案包括精密行星减速器、摆线针轮减速器和谐波减速器，可能考虑的核心指标包括回程间隙、精度、使用寿命、稳定性。精密减速器通常具有回程间隙小、精度较高、使用寿命长、更加可靠稳定的特征，可以应用于机器人、数控机床等高端领域。

表：各型减速器参数对比

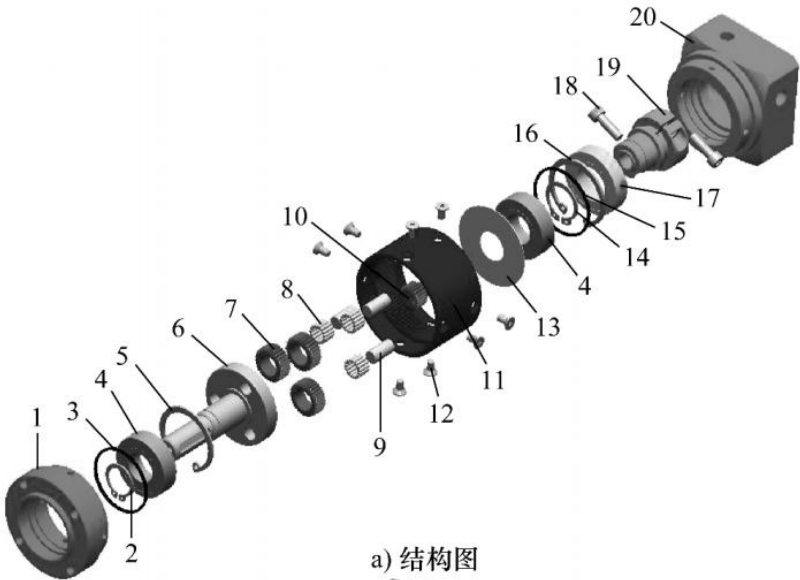
减速器类型	精度	减速比范围	减速效果	实现关节扭矩/负载	扭矩范围参数N.m	成本	寿命/耐用性	寿命参数 h	应用场景
精密行星	较高	单级3-10	需要多级实现较高减速比	较大	40-1200	低	长，工艺较为成熟	>20000	下游应用广泛，汽车、机器人等
摆线针轮	高	30-192.4	传动比范围广泛	较大	101-6135	较高	强	>6000	汽车
谐波	高	30-160	可单级实现较高减速比	较小	6.6-921	较高	抗冲击性略差	>8000	机器人、高端数控机床等

2.2.1 精密行星减速器：单级/多级实现减速，方案成熟，多级体积空间较大

- ◆ 精密行星减速器定义：精密行星减速器是一种具有高精度传动特性的机械传动装置，其核心工作原理基于行星齿轮传动结构。它通过多个行星齿轮围绕中心太阳轮和外齿圈啮合运动，实现动力的传递与速度、扭矩的转换。
- ◆ 分类：可分为单级和多级，其中，单级仅包含一级减速齿轮，减速比通常较低（10以内），结构简单、效率高，但精度低；多级可能有2-4级，可以实现100及以上的减速比和高精度，但缺点是体积大、长度较长。

表：中大力德部分行星减速器型号及对应参数

型号	尺寸 (直径mm)	尺寸 (箱体总长mm)	级数	减速比	额定输出 力矩N.m	寿命h	噪音 dB(A)	重量 kg	回程间隙
ZDE40	30	39	单级	3~10	4~6	20000	55	0.4	<12
		52	两级	9~64	7.5~20			0,5	<15
ZDE80	70	144	单级	3~10	40~50	20000	60	2.1	<8
		162	两级	9~64	45~120			2.6	<12
HD110	110	121.5	单级	4~10	230~330	20000	<=63	5.6	<=3
	80	160	两级	20~100	230~330			7.3	<=5



a) 结构图



b) 外形图

2.2.2 精密行星减速器：加工工艺及流程

- ◆ 精密行星齿轮减速器加工工艺主要包括：
- ◆ 1) 零部件加工工艺：包括齿轮、行星架、内齿圈加工工艺及装配和检测工艺；
- ◆ 2) 设备：引进、研发或委托定制专用关键加工、装配、检测工艺设备；
- ◆ 3) 研发系列专用刀具等。

图：减速器及核心零部件制备工艺



2.2.3 精密行星减速器加工工艺改进：数控机床+精密刀具，适配薄壁内齿

- ◆ 内齿加工难点：高精度机器人行星减速器需要小而薄的内齿圈，存在问题：1) 切削变形问题。薄壁齿圈的壁厚与径向尺寸相比有很大的差距，在车削以及后续磨削、插齿加工过程中，因切削力的影响易产生局部变形；2) 夹紧变形问题。在夹紧过程中难以时刻保持夹紧力的均匀，会引起夹持变形，导致工件整体精度下降，影响回转机构减速器的强度、噪声、寿命和可靠性。
- ◆ 加工工艺：有插齿和拉削两种，其中，**设备**：可以将传统的普通精密车床升级为数控车床；**刀具**：可以使用内齿圈拉刀、内齿圈插刀。
- ◆ 工艺创新：由于传统加工方法存在拉刀等刀具的尺寸在有限空间内难以实现作业、灵活性和可操作性太差等缺点，相对应地，出现一些新的工艺路径，包括滚插、车齿等。
- ◆ 1) 滚插工艺：能实现连续切削；可实现干式切削代替湿式切削，节省了切削液成本及切削液的处理成本。
- ◆ 2) 车齿工艺：可以实现连续切削；没有让刀运动，加工效率较高。

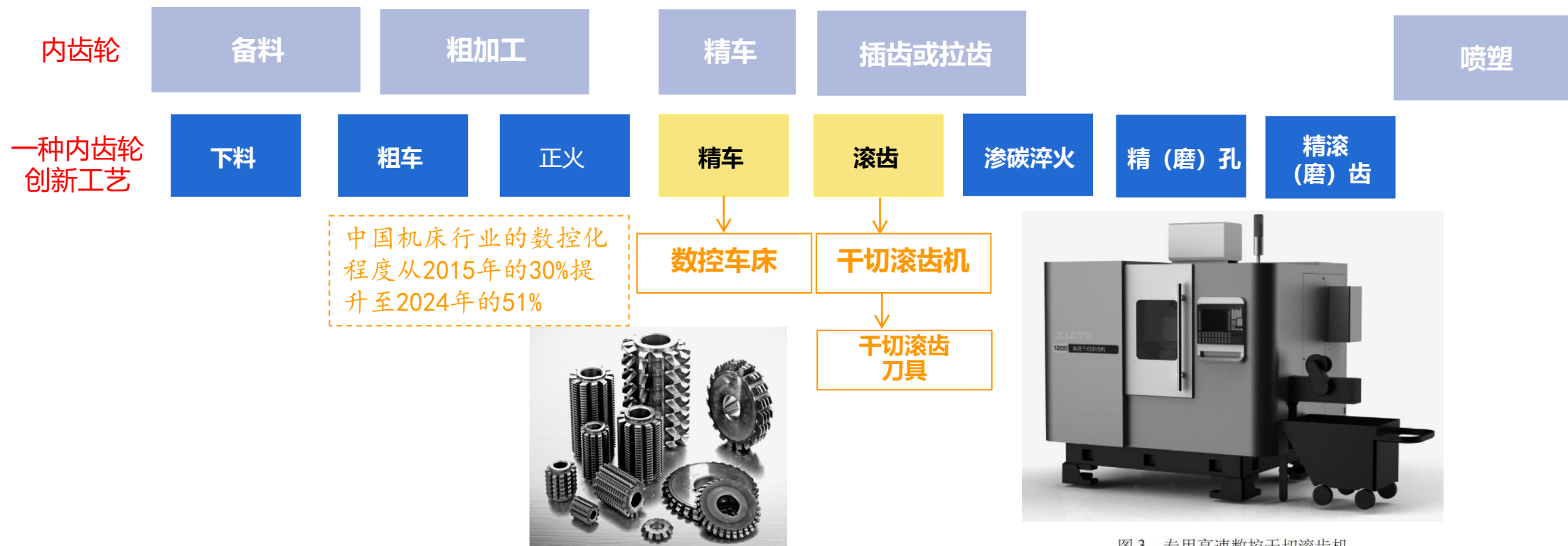


图4 高速系列干切滚齿刀具



图3 专用高速数控干切滚齿机

2.2.4 精密行星减速器：厂商格局

◆ 国产化率：根据中大力德招股书，2022年，精密减速器国产化率很低，RV 减速器、谐波减速器不超过 5%，精密行星减速器不超过 40%

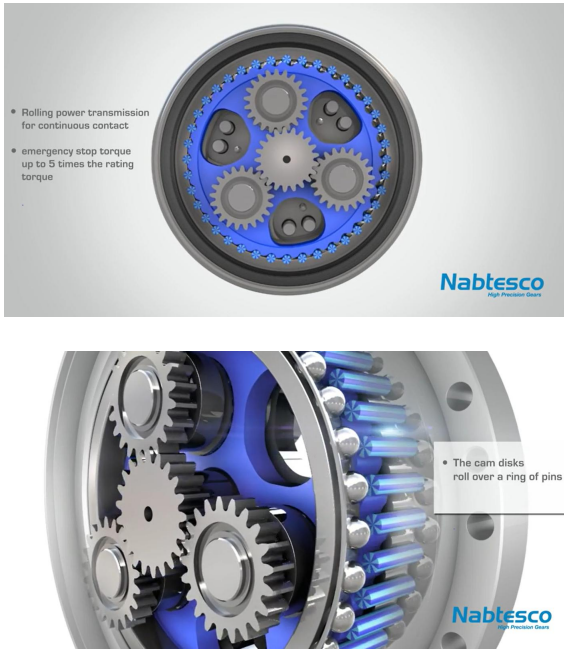
表：部分行星减速器厂商格局

厂商	相关布局	产品进展	设备研发	产能规划	下游厂商
国茂股份	控股子公司国茂精密，主营谐波减速器；控股子公司摩多利生产的主要产品为精密行星减速器	为杭州云深处科技四足机器人定制开发的减速器；摩多利智能传动（江苏）有限公司生产的精密行星减速机可运用于数控机床、机器人/机械手等工业自动化领域。	高精度减速机传动设备的研发和生产	年产35万台高精度减速机项目	云深处等
中大力德	/	目前公司在相关业务的收入占比较小，针对人形机器人主机厂的需求，公司会积极争取合作机会	从日本、德国、美国进口大量精密加工设备和检测设备，包括数控磨齿机、数控插齿机、数控滚齿机、立式复合磨床、数控立式加工中心、数控立式镗铣加工中心、三坐标测量机等；超高精度行星减速器的研发	/	智元机器人、傅利叶、伯朗特等
宁波东力	对人形机器人、工业机器人相关零部件谐波减速器、RV减速器、行星减速器和关节模组等方面进行了内部研发立项	截至2025年7月，机器人精密减速器处于样机试制阶段	/	/	/
双环传动	发布《关于分拆所属子公司浙江环动机器人关节科技股份有限公司至上海证券交易所科创板上市的预案》，拆分完毕后，环动科技独立上市有利于上市公司更加专注于齿轮业务	/	/	/	下游客户已覆盖埃斯顿、埃夫特等。

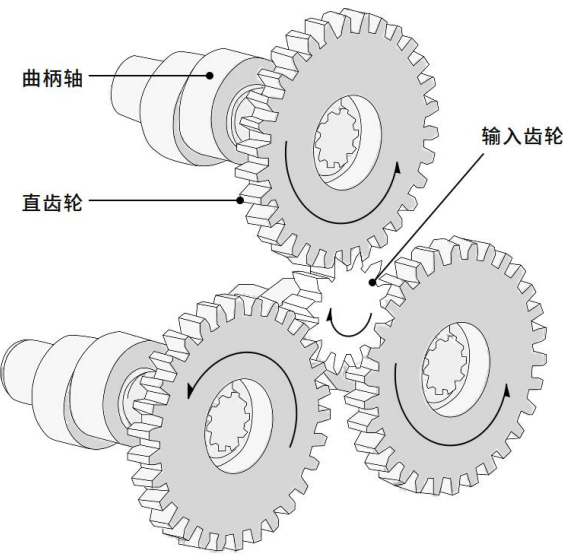
2.3.1 摆线针轮减速机： 减速结构及工作原理

- ◆ 概念： 由少齿差渐开线齿形行星减速器发展而来的,所不同的是它的行星轮齿是采用摆线齿，而内齿轮采用针齿，核心部件包括：带偏心轴承的高速轴（曲柄轴）、RV齿轮、直齿轮、针齿槽等。
- ◆ 工作原理：
- ◆ 1) 第一级减速： 伺服电动机旋转—输入齿轮传动至直齿轮（输入齿轮和直齿轮的齿数比为减速比），曲柄轴直接连接在直齿轮上，与直齿轮旋转数一致；曲柄轴的偏心部中，通过滚针轴承安装了2个RV齿轮，目的是取得力的平衡；随着曲柄轴的旋转，偏心部中安装的2个RV齿轮也跟着做偏心运动（曲柄运动）；
- ◆ 2) 第二级减速： 在壳体内侧的针齿槽里，比RV齿轮的齿数多一个的针齿槽等距排列，曲柄轴旋转一次，RV齿轮与针齿槽接触的同时作一次偏心运动（曲柄轴运动），RV齿轮沿着与曲柄轴的旋转方向相反的方向旋转一个齿轮距离，借助曲柄轴在输出轴上取得旋转。曲柄轴的旋转速是根据针齿槽的数量来区分的。
- ◆ 3) 输出结果： 通过上述两级减速，实现总减速比=第1级减速的减速比x第2级减速的减速比。

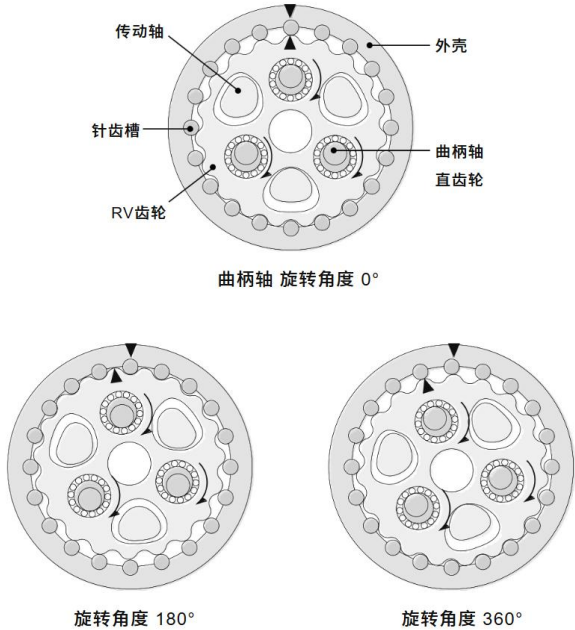
图：摆线针轮减速机



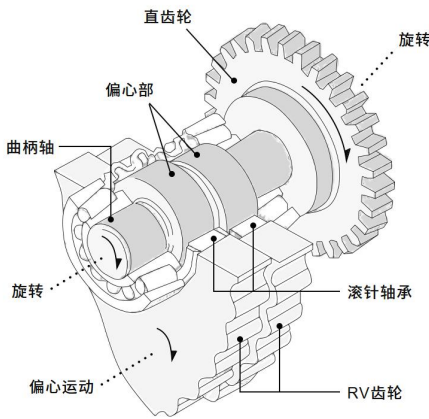
图：工作原理1：第一级减速



图：工作原理2：第二级减速



图：曲柄轴部



2.3.2 摆线减速机：核心优势

- ◆ 核心优势：相较于渐开线齿轮，仅靠单个或者两个齿轮吸收所有负载，摆线驱动能将负载分散到30%以上的曲线板凸缘上。可以同时啮合较多齿轮数量，具备小型、轻量、高刚性、耐超载、适应环境、使用寿命长的特点；另外，由于齿隙、旋转振动、惯性小，所以具备良好的加速性能。

表：摆线减速器优势

参数	优势
vs行星：高减速比	相较于渐开线齿轮，仅靠单个或者两个齿轮吸收所有负载，摆线驱动能将负载分散到30%以上的曲线板凸缘上。即使在严苛的运行环境中，摆线型驱动产品也能确保性能良好，可靠性高和使用寿命长等特点。基于多种因素的考量和验证，在大多数情况下，它们已被普遍认可为比其他驱动类型更具优势的解决方案。
vs行星：结构紧凑	尽管拥有高减速比，但摆线齿轮箱却能保持一个紧凑高效的设计。这是由于通过曲线板和减速机所固有的平衡稳定的机械结构，能高效地传输动力。
vs行星：精密和低齿隙	结合摆线传动的运转特点的齿轮比，可以产生非常低的齿隙。这使得摆线传动适合于需要高精度和重复性的应用，例如机器人、机床以及自动化系统。
vs谐波：耐久性和负载能力	摆线设计通过曲线板和外销钉之间的多点接触均匀地分散了负载。这种分散方式，搭配齿轮箱固有的机械优势，提升了其耐久性和承受高负载的能力。

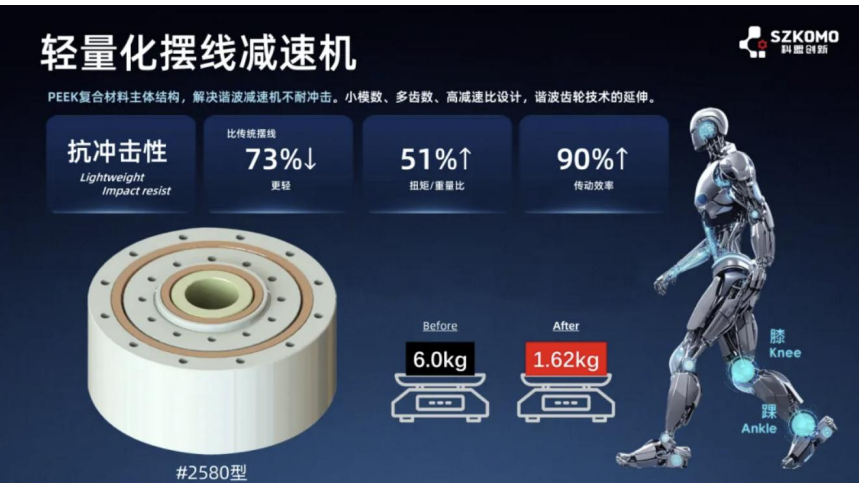
表：摆线减速器选型标准

选项	重要程度	说明
减速比	高	直接决定应用所需的输出转速
扭矩值	高	必须匹配或者超过应用所要承受的最大载荷
齿隙	中到高	对于高精度的应用至关重要
尺寸和重量	中	空间有限的应用中的核心要素
能效	中	高能效对于能源敏感型应用可能是必备的

2.3.3 摆线减速机格局变化：针对人形推出新品，小型化、轻量化趋势

- ◆ 应用：根据科盟创新，摆线减速机目前主要应用在人形机器人本体的下半身，如腰/髋/膝盖/踝部等，并有使用PEEK等轻量化材料的趋势。
- ◆ 厂商及布局情况：根据觅途咨询，我国工业机器人市场是RV减速机应用最主要的市场，占据市场份额的95%，国内市场以外资主导，纳博特斯克占中国市场的70%，其他核心厂商包括住友、中大力德等。随着人形机器人发展，RV减速机格局发生变化包括：1) 小型化、轻量化，以适应人形机器人体型应用；2) 部分厂商成为新入局势力。推出针对人形新产品的公司包括禾川科技、科盟创新和中大力德等。

图：科盟创新摆线减速机创新型号



表：部分厂商摆线减速机布局

创新摆线	布局情况
禾川科技	通过全栈自研+深度协同设计，在核心性能上实现质的飞跃；精度与抗冲击兼得低背隙、超高精度，同时可承受5倍瞬时过载冲击，颠覆“高精度必弱抗冲击”的传统认知。动力与响应无短板高爆发扭矩输出 + 毫秒级响应速度，额定转速与峰值转速适配人形机器人步态调整、动态平衡等场景需求。轻量化与集成度兼具集成化设计大幅降低冗余结构，相同扭矩下重量较传统方案更轻，减轻机器人肢体负载。可靠性与稳定性兜底全生命周期低衰减特性，配合高透明驱动设计，无需额外传感器即可实现安全合规交互。
科盟创新	新型轻量化摆线减速机，采用peek材料轻量化设计，解决谐波不耐冲击结构；小模数、多齿数、高减速比，实现重量减轻73%，扭矩/重量比提高51%，传动效率提高90%。
中大力德	“高精度长寿命机器人减速器” 完成样机测试，性能指标较前代产品提升20%，已与宇树科技、优必选达成合作意向；向智元机器人批量供应 RV 减速器，2024 年订单量超5万台，占其需求的50%。
双环传动 (环动科技)	成熟摆线减速机产品系列，下游应用目前主要为工业机器人、医疗、风力、雷达、太阳能、航空航天等。
豪能股份	已布局机器人用高精密减速机及关节驱动总成，目前已形成高精密行星减速机、高精密新型摆线减速机等系列化产品，部分产品已在人形机器人、机器狗、外骨骼等领域成功应用。

2.3.3 科盟创新/科达利：减速器产品更新加速

- ◆ 以科盟创新为例，2025年4月发布七款机器人传动技术产品，涵盖轻量化、结构紧凑、扭矩/重量比与高精度&高负载稳定性四大技术方向，包括5款谐波及一款摆线和一款关节模组（铝钢复合减速机、PEEK轻量化谐波减速机、具扭力限制谐波减速机、PEEK轻量化摆线减速和薄型马达关节模块）；
- ◆ 2025年7月-8月，公司在上海WAIC与北京WRC两站展会中发布了迭代产品，包括3款谐波+2款摆线减速器+薄型关节模组（薄型马达关节模组、无框马达关节模组、铝钢复合谐波减速机、PEEK复合材料轻量化谐波减速机、PEEK-CF复合轻量化谐波减速机（碳纤增强版）、PEEK复合轻量化摆线减速机，以及铝钢轻量化摆线减速机）。

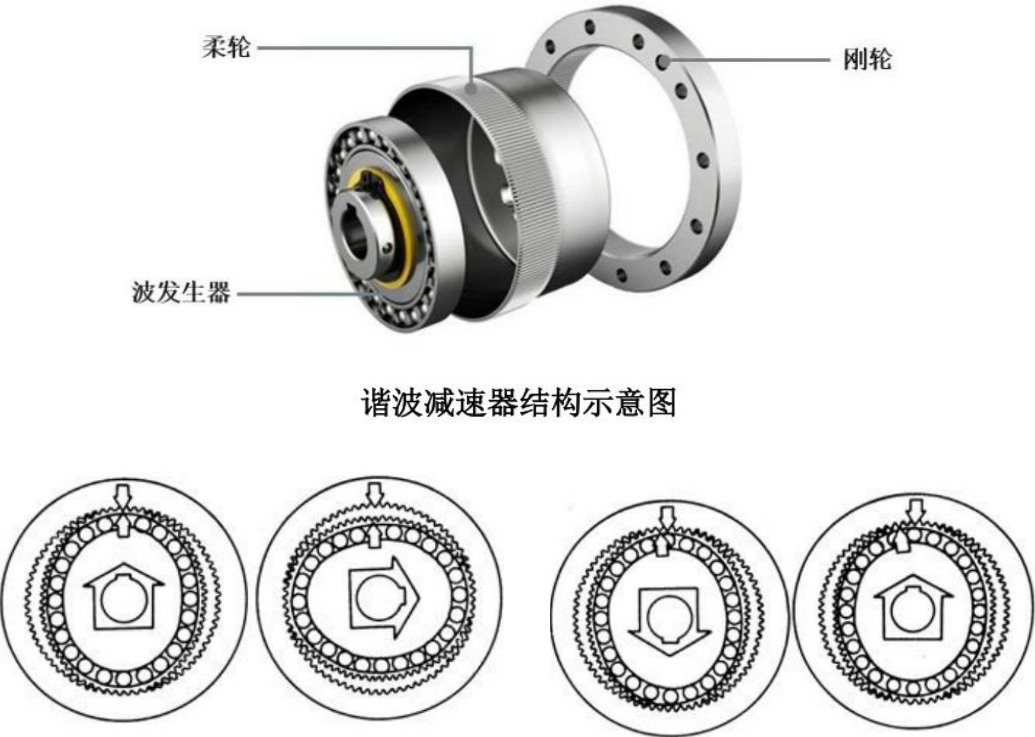
图：科盟创新减速器迭代产品参数对比

	单位	标准型	铝钢合金（新型号）	PEEK复合（新型号）	PEEK复合（旧型号）
重量	kg	0.52	0.37	0.26	0.20
尺寸	mm	90*19	90*19	90*19	90*19
寿命	周期	120万	120万	60万	12万
峰值扭矩	Nm	39	39	27	17
传动误差	arc-min	0.75	0.75	0.75	2.3
刚性	Nm/rad	29000	29000	21500	14100
机械滞后	arc-min	0.4	0.75	1	1.7
扭力/重量比	/	75	105	104	85

2.4.1 谐波减速器

- ◆ 定义：谐波齿轮减速器是一种靠波发生器使柔轮产生可控的弹性变形波，通过其与刚轮的相互作用，实现运动和动力传递的传动装置，其构造主要由带有内齿圈的刚性齿轮（刚轮）、带有外齿圈的柔性齿轮（柔轮）、波发生器三个基本构件组成。
- ◆ 工作原理：通常采用波发生器主动、刚轮固定、柔轮输出形式，当波发生器装入柔轮内圆时，迫使柔轮产生弹性变形而呈椭圆状，使其长轴处柔轮齿轮插入刚轮的轮齿槽内，成为完全啮合状态；而其短轴处两轮轮齿完全不接触，处于脱开状态，当波发生器连续转动时，迫使柔轮不断产生变形并产生了错齿运动，从而实现波发生器与柔轮的运动传递。

图：谐波减速器爆炸图及工作原理



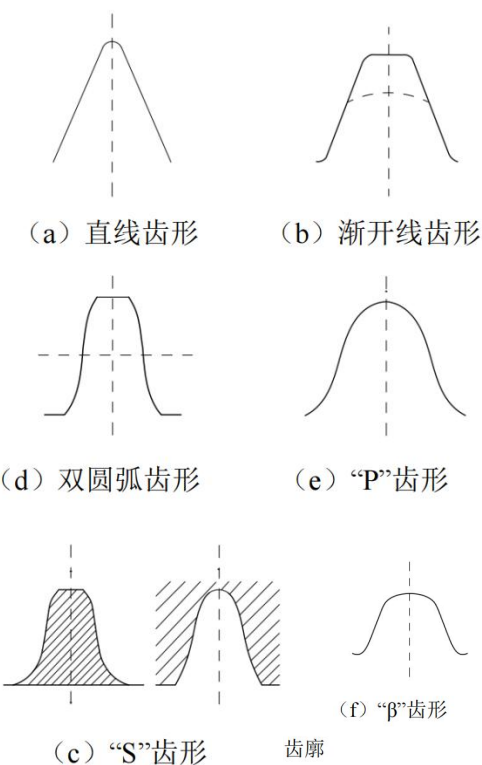
图：谐波减速器部分型号示例

谐波减速器型号示例	产品特征	图示
标准型	柔轮为杯形标准筒结构，输入轴通过十字滑块联轴器与波发生器内孔连接。一般采用刚轮端固定，柔轮端输出的连接方式使用。	
超薄型	柔轮为超薄中空翻边结构，设计扁平，非常适合于对减速器有苛刻厚度要求的场合使用。	
机器人适配	柔轮为超薄杯状结构，整机设计采用超扁平结构，体积小、重量轻，非常适合于作为机器人末端关节及客户端减速器使用。	

2.4.2 谐波减速器柔轮：齿型设计及加工工艺

- ◆ 在谐波传动过程中，柔轮轮齿与刚轮轮齿发生周期性啮合，其齿形直接影响到啮合范围、应力极值和啮合侧隙等啮合特性，对于谐波减速器的性能有着重要影响。齿廓设计经历了几个发展阶段，最早是直线齿形，然后是渐开线齿形，随后又出现了“S”形，双圆弧形“P”形，“ β ”形等多种齿形。
- ◆ 柔轮加工工艺：在谐波减速器关键零部件中，柔轮因其薄壁结构以及齿廓曲面复杂，加工工艺最为复杂，涉及零件材料的选择、毛坯锻造、热处理、薄壁结构切削加工、制齿工艺以及毛刺去除工艺等。我国柔轮制成工艺距离美、日国家仍有一定距离。
- ◆ 谐波减速器柔轮齿廓加工精度：由于谐波减速器柔轮的齿轮模数较小，齿廓曲面复杂且对于加工精度要求较高，有多种方式尝试提高齿廓加工精度，如再现展成法、慢走丝线切割、冷滚轧成形法、滚齿加工、插齿加工和刮齿加工等，其中，滚齿加工与插齿加工需要适配五轴加工中心与滚齿机等精密齿轮加工机床，并对滚刀设计与插刀设计方法进行研究。

图：谐波减速器齿形示例



表：谐波减速器齿形对比

齿型分类	优势	不足
直线齿型	/	由于未考虑中性层曲线的空间变形，故直线齿形无法应用到高精密谐波传动
渐开线齿型	齿形便于计算，齿顶不易干涉，加工工艺较为成熟	渐开线齿形啮合范围过小，柔轮齿根易发生疲劳破坏，而啮合时柔轮齿与刚轮齿之间的尖点啮合导致的滑齿与干涉极大地降低了谐波减速器的传动精度、疲劳寿命和承载能力。
s齿型	相互啮合的轮齿可在小变形前提下发生连续接触，极大提高了谐波减速器的啮合性能与减速器承载能力	刀具制造成本高
圆弧齿形	美日广泛应用；发生啮合时，刚柔轮曲率半径较大，提高了轮齿接触强度，且柔轮齿底的圆弧设计极大地改善了齿根处的应力集中现象，而柔轮齿顶的凸圆弧与刚轮凹圆弧的啮合避免了尖点接触现象的发生。	/
P齿型	绿的谐波公司针对圆柱坐标型工业机器人提出，通过增大齿宽、降低齿面比压以获取较大的扭矩承载性能	/
β 齿形	提高谐波传动啮合性能的同时便于针对环境调整齿形参数	/

图：谐波减速器齿形加工示例

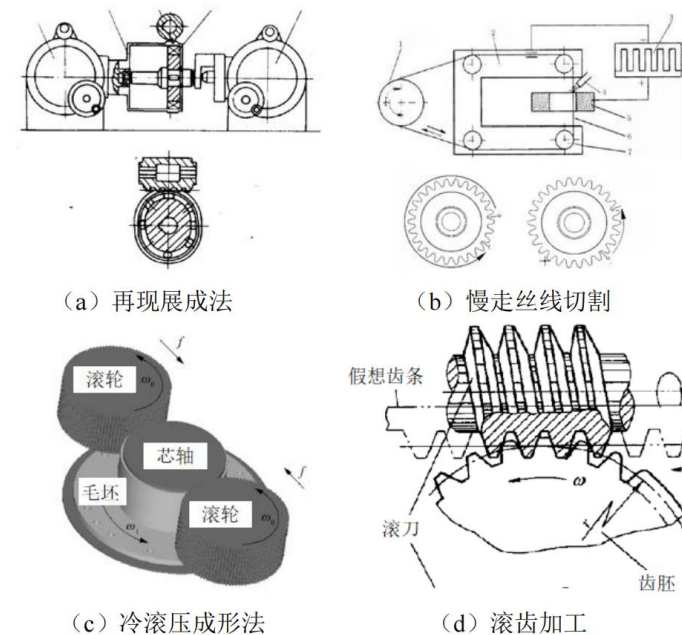


图 1.5 齿廓加工方式

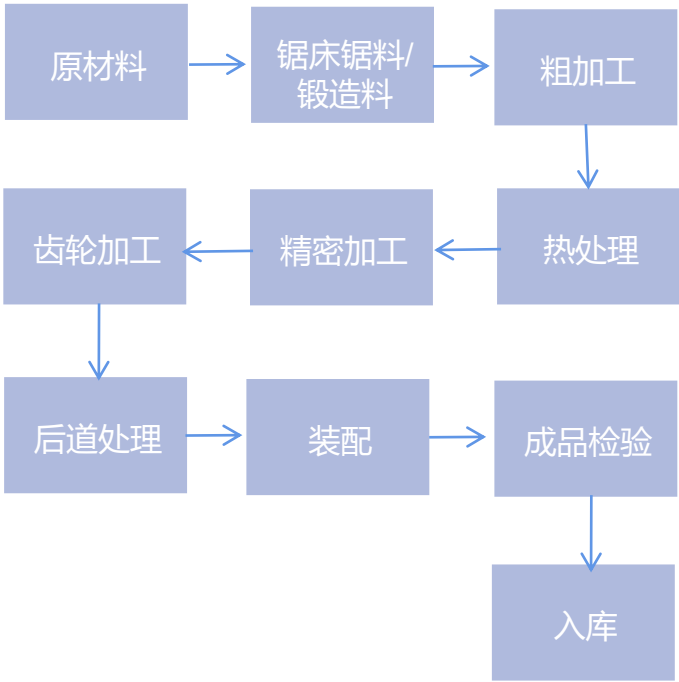
2.4.3 谐波减速器柔轮：齿型设计及加工工艺

- ◆ 柔轮薄壁体成形工艺：目前多采用对锻件进行切削加工的方式来完成。同时通过热处理或表面喷丸处理等方式改善金属组织、表面质量，提高其疲劳强度。为了保证薄壁结构的尺寸精度，需要设计专用工装夹具。
- ◆ 柔轮表面的强化处理：由于谐波减速器重要部件在初步成形后，加工表面存在残余应力、毛刺等问题，当前对于柔轮表面强化的方式主要有表面喷丸处理、微细磨削精加工以及线切割加工等。

表：谐波减速器柔轮加工设备及价格区间

设备类型	加工用途	价格区间
数控车床	用于加工柔轮的内外圆、端面、齿圈基准面等	约30万元/台
数控插齿机/滚齿机	用于加工柔轮的齿形	约328万元/台
数控磨床	用于精加工柔轮的齿形和关键表面	175万元/台
热处理设备	用于对柔轮进行调质处理、渗碳淬火等热处理工艺，提高柔轮的强度和耐磨性，例如真空淬火炉、气体渗碳炉等	相关定制产线价值量参考绿的谐波，约375万元/条
检测设备	用于对柔轮的尺寸精度、形位公差、表面粗糙度等进行检测，例如三坐标测量仪、齿轮测量中心、轮廓仪等	/

图：谐波减速器柔轮加工工艺



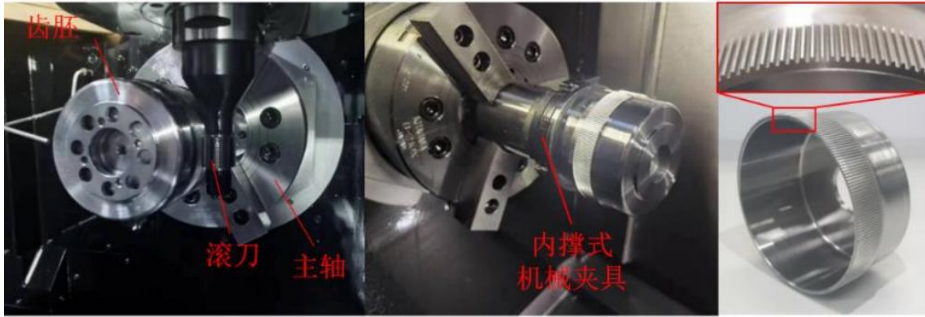
图：谐波减速器柔轮加工刀具设计

在柔轮齿廓滚齿加工过程中，刀具齿廓直接关系到柔轮齿廓形状，而刀具结构参数对于被加工齿表面质量、加工精度等具有直接影响。

滚刀法向齿廓：滚齿加工柔轮过程可视作蜗杆与齿轮的啮合过程，滚刀刀齿法向齿廓即为柔轮齿廓的包络曲面。

滚刀结构设计：可参照小模数渐开线圆柱齿轮滚刀，如选取非全切式滚刀、在滚齿加工过程中刀齿顶刃与侧刃参与切削等。

柔轮齿廓滚齿加工：可采用五轴加工中心进行加工，便于在外轮廓加工完成后直接滚齿。



*本表数据截至2020年8月

2.4.4 谐波减速器：竞争格局

表：谐波减速器部分厂商布局

	产品研发	人形机器相关	相关公司或子公司	设备及生产制造研发	产能规划
国茂股份	公司生产的谐波减速器、行星减速器等精密减速器可用于机器人/机械手等工业自动化领域		控股子公司国茂精密，主营谐波减速器	高精密减速机传动设备的研发和生产	年产 9 万台高精密减速机项目
绿的谐波	工业机器人：提升精度、增强刚性、延长寿命，开发系列化产品； 半导体核心装备：进入门槛较高，突破低振动、高动态性、高可靠性以及真空或洁净环境下的严苛要求，开发针对性产品及解决方案，成功应用于多家半导体行业龙头企业。	聚焦谐波减速器的轻量小型化技术突破，同等出力情况下减重 30%以上。时开发出灵巧手适用微型谐波减速器,外径最小可达 6mm。	旗下开璇智能负责旋转执行器等产品	完成了机械设备改造和控制系统二次开发，基于高精度直线光栅尺、超程和参考点传感器、自制液压夹具等装备，实现了自动对刀、自动修磨、自动补偿及工艺升级等功能，掌握了精密测量、精密切削、小模齿轮加工、薄壁金属零部件制造等关键生产工艺，建立起了完备的谐波减速器生产制造体系	通过首次发行和增发募集资金实现谐波减速器扩产，两次募投项目达满产后可以实现150万台谐波减速器产能扩张
丰立智能	“小型精密减速器升级及改造项目”于 2024 年 12 月项目基本完结，谐波减速器产品的常规型号全部研发完成，同时开发多系列特殊型号减速器产品，主要应用于人形机器人、协作及工业机器人等，未来一年将全力进行产能爬坡。		2024年，新增谐波减速器事业部	2023年设备投产，主要以海外进口为主	2025年规划5万套谐波减速器；共计产能规划四条产线14 万套，已投一条3.5万台套，并预留扩产产线场地。
众辰科技	/	/	2025年上半年陆续取得江苏三木科技和浙江贝托的控股权；江苏三木科技专注于高低压高性能驱动器、人形机器人关节模组及移动机器人模组的研发与应用；浙江贝托专业从事行星减速器、谐波减速器等精密传动装置	/	/
富临精工	在机器人关键硬件智能电关节上已预研布局产业，即整合减速器、智能控制及电机技术，拓展谐波减速器和行星减速器两个平台的电关节产品。相关产品已进行小批量生产，并积极拓展适配多家主流机器人客户		与智元机器人等合作方签署了《人形机器人应用项目投资合作协议》	拓展谐波减速器和行星减速器两个平台的电关节产品，目前已进行小批量生产和交付。	

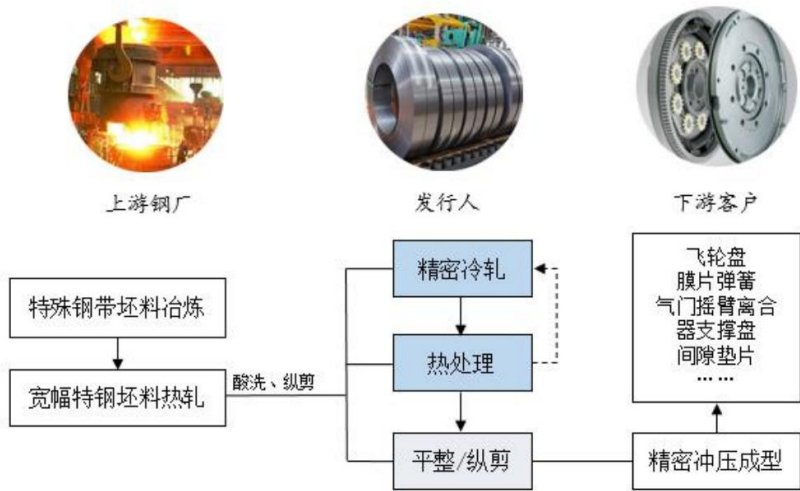
2.5.1 精冲工艺：谐波减速器柔轮加工的可能方案

- ◆ 精冲相较于传统锻造、铸造、机加工等加工方式具有材料利用率高、生产效率高等特殊优势，在诸多领域正在加速替代其他加工方式，因此精冲材料行业渗透率也在逐步提升。
- ◆ 传统应用：汽车替代机会。据翔楼新材公司公告，传统汽车切到新能源汽车后，以汽车卡箍为例，传统燃油车整车大约使用40个，而新能源汽车的用量则增加到了120个，汽车导轨的数量及重量相较于燃油车，其使用量扩大50%以上。
- ◆ 机器人领域应用：精冲路线的生产效率优势明显，如使用棒材加工柔轮产品，生产流程复杂，生产周期漫长；如使用精冲/冲压材料生产，一分钟能生产多个柔轮胚料，缩短工序，生产效率大幅提升。

图：精冲加工零部件示意图



图：冲压工艺上下游产业链



翔楼新材

- ◆ 1) 机器人业务：公司的机器人业务在2024年立项，和客户开始合作研发，进行送样测试；2025年3月新成立机器人材料研究院，进一步探索冲压材料在机器人核心零部件如谐波减速器柔轮、行星减速器齿轮、RV减速器摆线轮及传感器弹性体关键零部件卡脖子材料的科技攻关力度，并且探索其他高强高韧金属材料在机器人领域的应用可行性，力争将机器人关键零部件材料作为公司新的业绩增长点等领域的创新应用。目前，部分产品已完成开模，部分已进入测试阶段；
- ◆ 2) 产能规划：2024年，公司苏州工厂产能18万吨；安徽工厂一期规划产能为15万吨，2025年预计产能达到4万吨，4月已开始投产，将在3年内逐步爬坡投产达到满产状态；在产品结构上，安徽生产基地将倾向于工艺复杂、技术含量高的轴承等高端制造领域，在汽车市场基础上开拓高端轴承、机器人等其他下游市场。

2024年：苏州工厂18万吨满产

苏州工厂18万吨满产

2025年：4月开始投产，预计释放产能4万吨

苏州工厂18万吨满产

2028年：安徽工厂15万吨满产

2.6 小微减速器：粉末冶金vs切削工艺

- ◆ 与传统传动系统相比，微型传动系统主要材料以工程塑料和金属粉末材料为主，生产工艺以**模具成型工艺**和**切削加工工艺**为主，考虑齿轮型腔形状、尺寸精度、收缩变形等因素，并对齿轮强度进行校核和力学仿真，具有质量轻、能耗低、生产效率高等优势。相对地，传统传动系统以金属机械加工为主，主要包括滚齿、铣齿、插齿、磨齿等。
- ◆ 微型齿轮模具设计：需要根据产品参数和收缩率计算型腔的齿形参数；
- ◆ 精密加工：需要高精度加工设备，如高性能的线切割机、火花机、滚齿机、注塑机、加工中心等，对装备的加工精度、使用线径、表面光洁度等要求相应较高，设备精度需达到微米级。

与传统传动系统相比，微型传动系统的主要差异情况如下表所示：

分类标准	微型传动系统	传统传动系统
产品规格	小型、微型	中大型
主要材料	工程塑料、金属粉末为主	齿轮钢为主
生产工艺	模具成型为主，包括塑料注射成型、金属粉末注射成型、粉末冶金成型等	金属机械加工为主，包括滚齿、铣齿、插齿、磨齿等
主要功能	控制调节、传递运动为主	传递动力为主
应用领域	通信设备、智能手机、智能家居、服务机器人等新兴产业和汽车电子、医疗器械等传统产业	汽车变速箱、工程机械、船舶、电力设备、电动工具等传统工业领域

参数	概念
齿轮模数	齿轮齿形大小的参数，计算方法为齿距除以圆周率 π
齿轮精度	根据国家标准分为0-13级，0级为最高精度级
微型齿轮	模数小于 0.2mm 的齿轮，也称为微小模数齿轮

丰立智能

- ◆ 齿轮产品主要采用**切削加工**技术，硬齿面切削使齿轮的制造精度和效率稳定提高，还能降低齿轮传动的噪声。铣齿、滚齿等核心的精密制造工序都由公司自行切削加工。
- ◆ 设备：外购+自研，提高产品质量、降低生产成本。公司通过外购方式，为生产环节配备了先进的生产、检测设备，如德国DMG加工中心、克林贝格磨齿机、美国HARDINGE车削中心、日本HAMAI硬齿面高速CNC滚齿机等；自主研发定制化的数控铣齿机，助力于产能提升的同时降低成本。

兆威机电

- ◆ 公司通过塑料注射成型、粉末冶金成型、金属粉末注射成型、金属机械加工四种主要的齿轮生产工艺实现微型精密齿轮零件制造，构建“1+1+1”的协同创新体系（传动、微电机与电控系统）。
- ◆ 传动方面，兆威机电通过引入CNC高速插齿、高精度磨齿机、高精度珩磨机先进工艺，研发出兼具高精度与低噪声的高性能行星齿轮减速器；截至2025年4月，拥有4700+台先进设备，包括瑞士AGIE分割线、AGIE火花机、MAKINO等高端进口设备。

03 线性执行器：方案、工艺及机床设备

3.1 线性执行器应用：大尺寸滚柱/小尺寸滚珠/灵巧手用丝杆，存在多种方案

◆ 通过整理部分公司现有的线性执行器产品，我们认为，目前市面上主要的丝杆/滚珠/滚柱选择，主要取决于模组的体积大小及所需的输出推力，如，手部可以选用丝杆（因时机器人）或滚珠的方案（兆威），轴向安装距离在62mm、行程10mm；手臂用线性执行器可采用滚珠或滚柱的方案，轴向安装距离在150-220mm，推力可实现150/500-650/4000N。

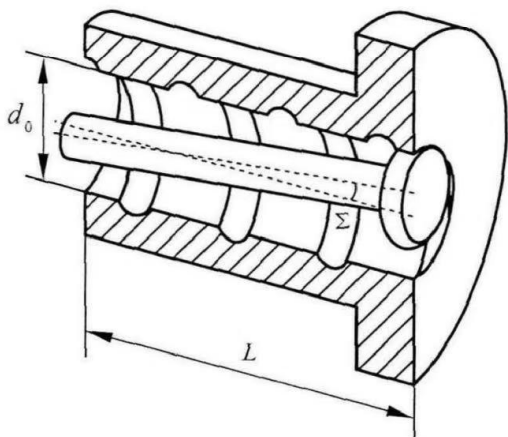
表：线性执行器尺寸及参数对比

图示						
型号	灵巧手用微型电缸 JCLA01	JCLA-30-116	JCLA-35-150	JCLA-55-220	JCLA-55-250	JCLA-75-290
丝杆类型	/	T型丝杠	滚珠丝杠	行星滚柱丝杠	行星滚柱丝杠	行星滚柱丝杠
丝杆导程	可调节	1mm	2.5mm	4.5mm	4.5mm	4.5mm
轴向安装距离	62mm	116mm	150mm	220mm	250mm	290mm
轴向间隙	/	/	/	0.02 mm	0.02 mm	0.02 mm
行程	10mm	45mm	45mm	65mm	65mm	85mm
额定/最大推力	Max 70N	150/500N	150/500N	650/4000N	650/4500N	1700/8000N
额定/最大线速度	/	50/100 mm/s	125/200 mm/s	225/330 mm/s	225/330 mm/s	180/330mm/s

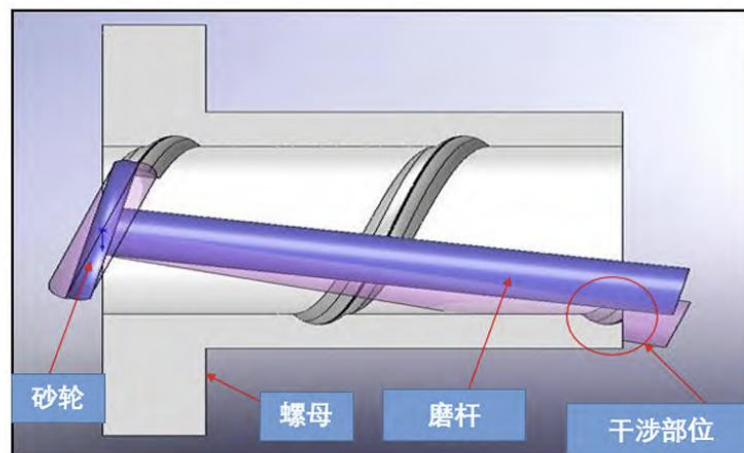
3.2 滚珠丝杠：加工工艺及加工难点

- ◆ 滚珠丝杠工艺加工难度：主要在于螺母内滚道。目前加工方法主要有：车削、铣削、冷挤压、电解加工等，其中车削、铣削一般用于内滚道的粗加工。伴随着精密机床和高速切削刀具材料的发展，以铣代磨、以车代磨被引入，主要有高速硬体内螺旋纹旋风铣及分层包络细微硬车削技术。目前对于内螺纹精密加工，较为成熟及应用广泛的工艺为磨削成型。
- ◆ 磨削成型：砂轮高速回转切削，工件绕自身轴线做螺旋运动，从而磨削出内滚道螺旋槽。砂轮磨杆与螺母轴线之间的夹角等于螺母的螺旋升角，螺母绕其轴做旋转运动，而砂轮系统沿轴向进给。
- ◆ 加工中可能产生的问题：1) 随着螺旋升角的增加，砂轮磨杆与螺母的端面发生干涉；2) 滚珠螺母的普通加工方式将加工螺母外圆、端面和螺母滚道分布在不同类机床上进行，螺母加工工艺经过多次基准的转换，使得各相关位置精度误差增大，尤其是螺纹轮廓的尺寸精度、对称度等无法保证，导致装配后滚珠丝杠副精度降低等。

图：砂轮磨削过程示意图

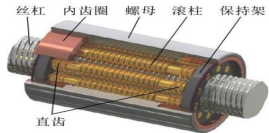
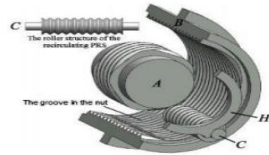
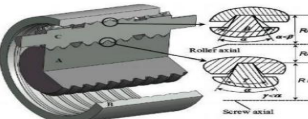
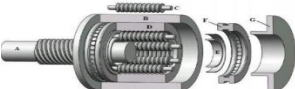


图：砂轮磨削发生干涉示意图



◆ 行星滚柱丝杠的结构与滚珠丝杠较为类似，包括丝杠、行星滚柱、保持架、内齿轮和螺母等，其中滚动元件为行星滚柱而非滚珠丝杠中的滚珠。滚柱通过保持架均匀的分布在丝杠、螺母之间，为了防止滚柱相对于螺母发生轴向窜动的现象，保持架与螺母之间轴向方向相对固定，另外滚柱两边加工有直齿轮，目的是为了避免滚柱相对于螺母的滑动而产生零件偏斜现象。当丝杠旋转时，滚柱通过与丝杠之间的螺纹啮合一方面会沿着丝杠轴线方向作直线运动，另一方面会在丝杠、螺母之间作行星运动，而螺母则通过保持架使其与滚柱之间无相对轴向位移，因此螺母与滚柱保持着相同的轴向移动速度。

表：行星滚柱丝杠分类

分类	图例	结构
标准式		丝杠、螺母为三角形多头螺纹，滚柱为具有一定螺旋升角的球形单头螺纹，并在其两端加工有直齿，内齿圈固定在螺母两端并与滚柱两端的直齿啮合。一般情况下，丝杠为主动件，螺母为输出构件
反向式		其结构形式与标准式类似，不同在于其没有内齿圈，丝杠两端加工有直齿与滚柱两端的齿轮啮合，且螺母作为主动件，其长度比标准式的大得多。一般情况下，反向式行星滚柱丝杠的螺母为主动件，丝杠为输出构件，滚柱、丝杠之间无相对轴向位移。
循环式		相比于标准式，其去掉了内齿圈，增加了凸轮环结构，其功能类似于滚珠丝杠的返回器，目的是为了让滚柱在螺母内旋转一周后回到初始位置，另外其滚柱上无螺纹、齿轮结构，为环槽状，环槽间距与丝杠、螺母的螺纹匹配，其安装在具有凹槽结构的保持架上。
差动式		与标准式相比，其去掉了内齿圈，滚柱上也没有齿轮段。其滚柱、螺母均为环槽结构，且滚柱的环槽分为多段，其中小中径段与螺母啮合，大中径段与丝杠啮合。
轴承环式		其滚柱与循环式相同，为环槽结构，相比于标准式，其螺母上去掉了内齿圈，增加了壳体、端盖及推力圆柱滚子轴承等部件。

图：行星滚柱丝杠结构

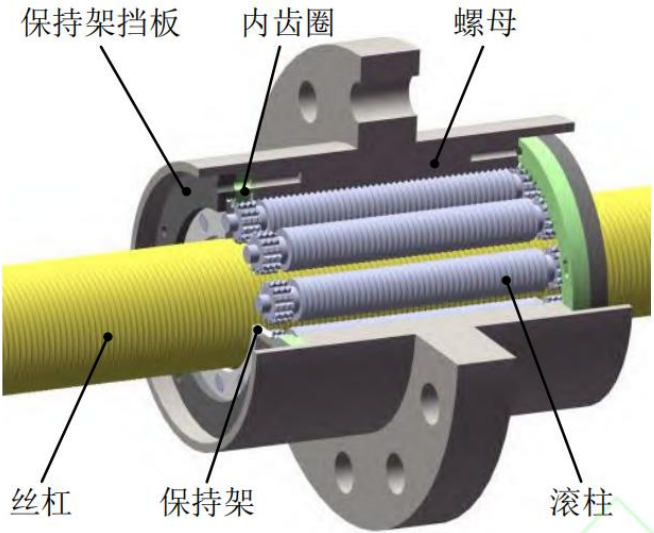


图 1 PRSM 结构图

3.4 行星滚柱丝杠副： 螺纹核心参数及误差评价

表：行星滚柱丝杠核心参数及评价

指标	释义	造成结果	效果影响	图示
螺纹中径误差	定义在轴向上，指一个假想圆柱的直径，该假想圆柱母线通过螺纹上牙厚等于牙槽宽的位置	螺纹间干涉	使旋转过程中发生卡滞现象甚至导致整机无法进行装配	
		轴向间隙、啮合位置、刚度等发生变化	影响整机的行程精度及承载能力	
		影响螺旋升角	降低传动效率	
螺纹螺距及累积螺距误差	相邻两牙体上对应牙侧与中径线相交两点间的轴向距离，由实际廓形线计算得到的实际螺距与理论螺距之间的偏差	滚柱沿丝杠螺纹轴向移动时其实际位移与理论位移发生偏差	造成行程误差	
		导致各个螺纹牙的承载规律发生变化	加速个别螺纹牙的磨损，进一步影响承载能力及使用寿命	
		影响螺旋升角	影响传动效率	
螺纹偏心误差	工件的理论轴线和实际旋转轴线之间的距离	/	影响整机运行平稳性及行程精度	
		丝杠与螺母偏心误差的叠加效应	加剧载荷分布不均匀性，使部分螺纹牙快速磨损从而影响整机的承载能力、传动效率及使用寿命	
螺纹牙型角	在螺纹中径位置得到螺纹牙左右牙侧两交点处廓形曲线的切线，两侧切线与理论 45°直线的夹角	随螺纹牙型角误差大小改变螺纹啮合位置及最大接触应力	影响整机承载稳定性、承载能力及使用寿命	
		左右牙型角不一致	导致丝杠正反转时的传动精度差异	

3.5.1 丝杠：内/外螺纹可采用磨/车削加工工艺

- ◆ 螺纹常规加工方式包括车削、铣削、滚轧和磨削等，而行星滚珠/滚柱丝杠的制成加工涉及内/外螺纹两个方面，其中：
- ◆ 滚珠/滚柱的区别：目前现有研究对象大多是滚珠丝杠圆弧形螺母，或是用于连接的牙型角为 60° 公制内螺纹；而行星滚柱丝杠副这类牙型角为 90° 的直线牙型内螺纹磨削。
- ◆ 内螺纹/外螺纹：如下图所示，外螺纹加工在开放环境中进行，内螺纹需要在螺母滚道内加工，如磨削工艺中砂轮尺寸小。
- ◆ 工艺区别：
- ◆ 磨削：内螺纹磨削过程实际上是采用回转面刀具加工螺旋面工件的一种形式，故其磨削原理与螺旋面加工原理类似，主要是使用啮合条件建立接触线方程并求解，再将接触线绕工件母线螺旋运动，即可得到内螺纹螺旋曲面。
- ◆ 车削：车削加工内螺纹滚道可采用内螺旋滚道拟合车削法。该方法以内螺旋滚道的轴截面为基础，用标准的刀片通过拟合车削形成所要求的内螺旋滚道。目前的理论研究中，车削可以用在大导程螺母的加工工艺和较为创新的丝杠加工中。

图：内外螺纹磨削示意图

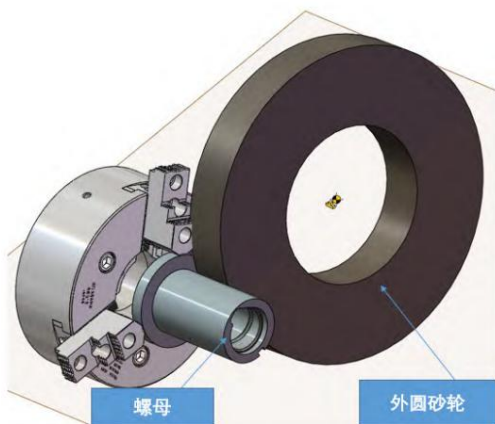


图2 螺母外圆与端面的磨削

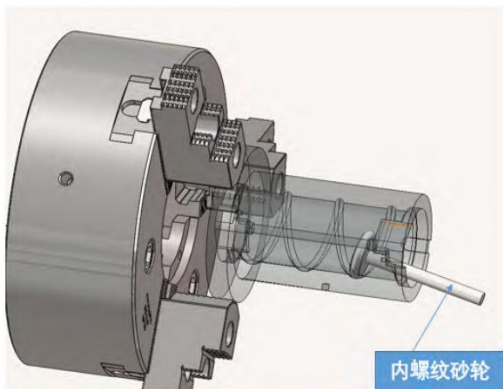


图3 螺母滚道的磨削

图：内螺纹车削示意图

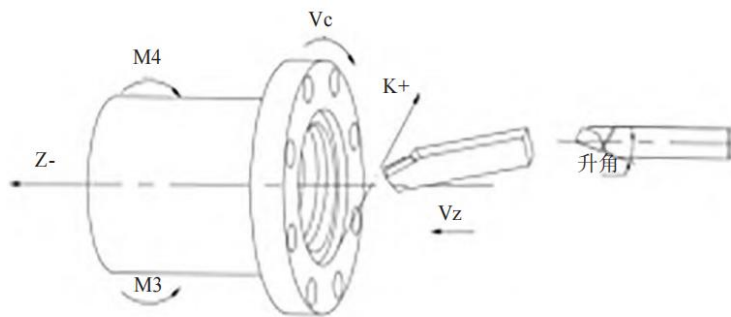


图4 展成车削示意图

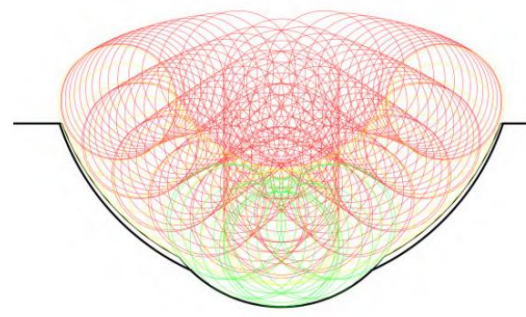


图5 车削刀路圆弧包络线

3.5.2 磨削工艺：粗磨-半精磨-精磨-终磨实现加工精度

◆ 磨削原理：螺纹磨削原理如中间图(a)所示，试件绕工件主轴 B 轴做低速回转运动并随工作滑台沿 Z 轴做轴向进给运动。砂轮绕砂轮电主轴 C 轴做高速回转运动并随砂轮水平滑台沿 X 轴径向进给；砂轮回转架带动砂轮绕 A 轴摆动形成试件的螺旋升角。试件和砂轮在机床内的耦合运动使内外螺旋面得以生成。螺纹磨床常见内部结构图如图 (b)、(c) 所示，由于螺母内螺纹成型的特点，砂轮通过磨杆与砂轮电主轴连接进行内螺纹的加工。国内 PRSM 螺纹磨削过程一般经四个阶段，粗磨阶段快速去除大部分余量；在半精磨阶段达到一定的加工精度并留出加工余量；经过精磨后，试件已接近最终的加工精度；最后通过终磨达到试件图纸要求的加工精度和表面质量。

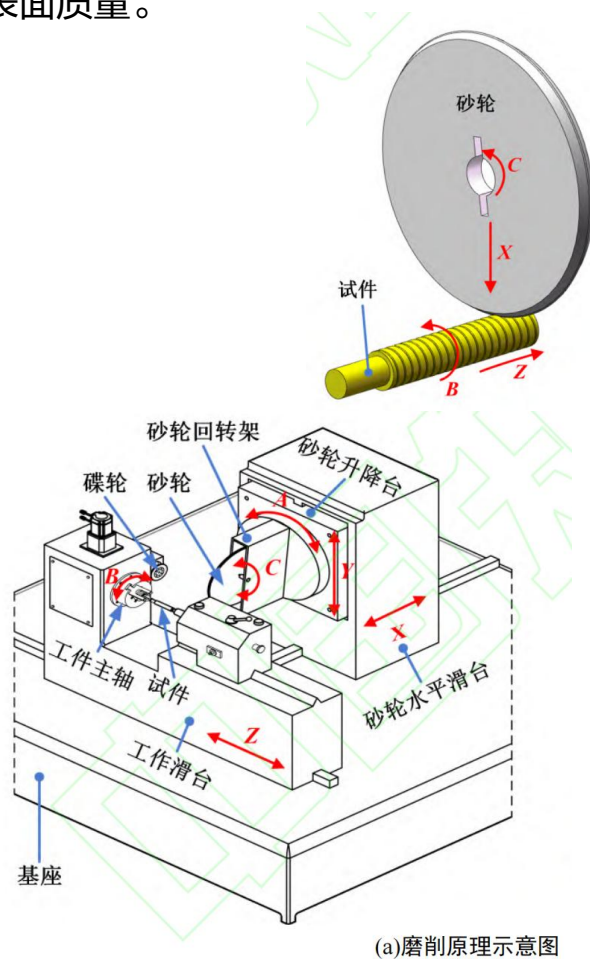
图：磨削及后续热处理工艺

磨削

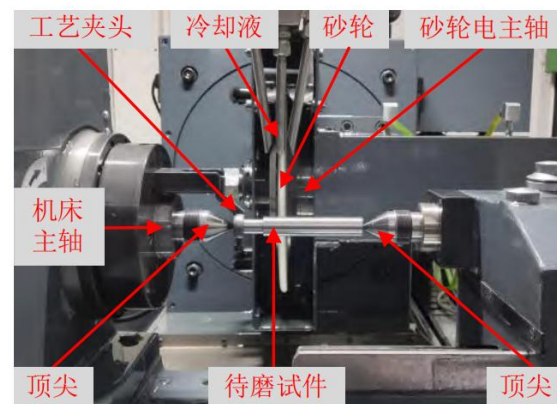
丝杠小螺距硬廓面精密螺纹加工的主要方式，其加工工艺是丝杠的核心壁垒，而磨削工艺优化是螺纹加工质量调控的有效手段。

热处理

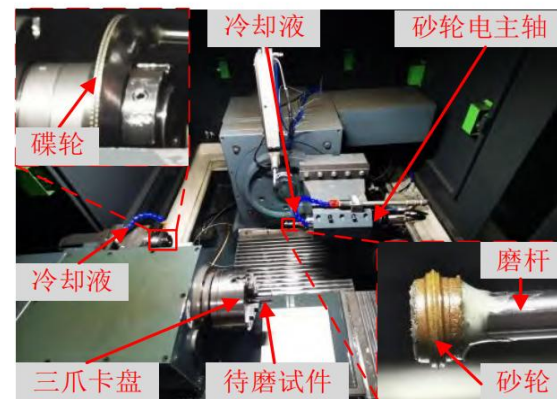
- 1) 采用球化退火作为预备热处理来改善材料的切削性能；
- 2) 采用调质处理来消除材料的内应力，同时提高材料基体硬度；
- 3) 最终热处理一般采用高频淬火或真空淬火以达到螺纹滚道要求的最终硬度；
- 4) 最后采用低温时效处理消除内、外圆磨削后零件的表面应力



(a)磨削原理示意图



(b) 外螺纹磨床结构图



(c) 内螺纹磨床结构图

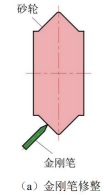
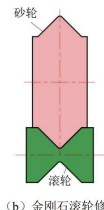
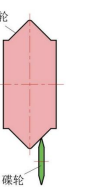
3.5.3 磨削工艺：工艺参数对内螺纹齿廓精度及表面质量的影响

- ◆ 行星滚柱丝杠内螺纹磨削过程中，涉及砂轮修整、内螺纹加工两类工艺参数调控。
- ◆ 砂轮修整参数：影响砂轮修整廓形，进而影响内螺纹齿廓精度和表面质量。

在实际磨削加工生产时，砂轮作为去除工件多余材料致使零件精密成形的加工刀具，其修整作用主要有两个方面，一方面是基于内螺纹齿廓形状将砂轮轮廓进行修整；另一个方面是砂轮在磨削时轮廓会愈发磨损，导致砂轮不能保持原始轮廓进行加工，这会严重影响内螺纹齿廓精度，故必须利用修整刀具去除砂轮表面钝化的磨粒和结合剂，致使新的磨粒暴露出来形成切削刃，提高砂轮加工能力。

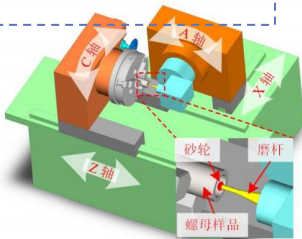
- ◆ 目前常见的砂轮修整方式有三种，包括金刚笔修整、金刚石滚轮修整和金刚石碟轮修整。

表：磨削工艺中，砂轮修整对比

修整方式	原理	优缺点	配图
金刚笔修整	利用单颗粒金刚石进行砂轮轮廓修整，原理与车削加工类似	修整方式时间较长，精度较低，而且金刚笔容易损耗，不适用大批量加工	 (a) 金刚笔修整
金刚石滚轮修整	先将滚轮形状加工出所需轮廓，然后利用滚轮与砂轮靠磨方式将滚轮形状拓印在砂轮表面	成型面精度较高，且修整效率高，但针对不同廓形螺纹需要不同型面的金刚石滚轮，即修整适用范围窄。	 (b) 金刚石滚轮修整
金刚石碟轮修整	通过碟轮与砂轮对磨方式对砂轮进行修整，轮磨削刃弧由大量的金刚石微粒组成	可以选用不同直径尺寸的磨削刃弧来满足不同内螺纹齿廓修整要求，其修整精度、修整效率都很高	 (c) 金刚石碟轮修整

碟轮尺寸：根据行星滚柱丝杠副内螺纹的最小结构尺寸，即内螺纹的牙底圆弧半径选择。如，内螺纹的牙底圆弧半径为 0.05 mm，需要相同大小或更小的砂轮成型面，否则会导致工件欠磨或过磨现象发生。因此，可对应选择单个刃弧半径 $R = 0.05\text{ mm}$ 的碟轮。

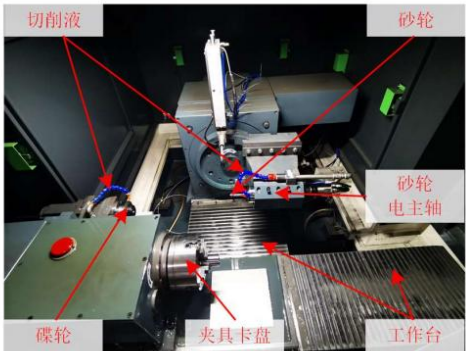
磨床及安装：磨床主体和主要结构包括X轴和Z轴工作台、夹具卡盘、砂轮电主轴、碟轮和切削液等。



(b) 磨床各轴运动



(b) 碟轮实物



(a) 磨床结构

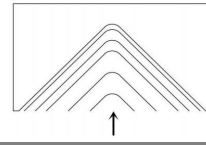
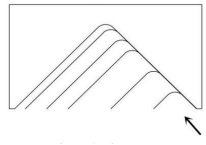
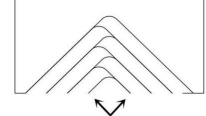
3.6 车削：以车代磨的可行性

- ◆ 针对磨削加工工序复杂、对砂轮品质要求高、生产能耗大、会产生粉尘污染等问题，难以满足精密 PRS 的制造需求，车削作为一种新的加工技术开始应用。特别是在传统的航空航天及军事工业领域，数控车床的应用更是占据特殊地位，最突出的应用是以车代磨技术和车铣复合加工技术。
- ◆ 车削定义：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 与金刚石等。可简化成刀具在丝杆表面沿螺旋线切削出成型槽，经历数次走刀最终切削出完整的螺纹轮廓，其加工特点是精度要求高、被加工的工件材料硬度高、每次进刀的吃刀量较小。
- ◆ 车削优势：硬车削的加工效率是普通磨削加工的 4 ~ 6 倍，所消耗的能量是普通磨削加工的 1/5。硬车削往往采用大的背吃刀量、高的主轴转速，其金属切除率通常是磨削加工的 3 ~ 4 倍。车削加工时一次装夹可完成多种表面加工，辅助时间短，表面间位置精度高。使用 PCBN 刀具精车获得的表面粗糙度可达到 0.32μm，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；表面残余应力分布更加均匀，增加了螺纹部件的疲劳寿命；加工过程中无需冷却液，降低对环境的污染与资源的浪费。

表：车床精度衡量标准对比

项目	精车外圆的圆度	精车端面的平面度
精密车床	0.0035mm	0.0014mm
高精度车床	0.0085mm	0.0035mm

表：车削工艺中，进刀方式对比

进刀方式	优点	不足	
径向进刀	螺纹车削中普遍应用的进刀方式，刀具的三个刀刃都参与螺纹型面的切削，能够得到较为精确的螺纹形状，同时三个切削刃磨损均匀，操作简单	由于存在排屑干涉，导致排屑困难、切削力与切削热都会有所增加，并会在两侧产生毛刺	
侧向进刀	只有单侧的刀刃参与切削，类似于普通的外圆车削，排屑较为顺畅，刀尖处产生的切削热也较少，整体的振动也得以改善	由于单刀切削，刀具的磨损都偏于一侧，刀具寿命有所下降，并且螺纹两侧工作面的精度也有所不相同	
交替式进刀	左右两侧切削刃交替进刀，具有侧向进刀法的优点，同时刀具磨损均匀，延长了刀具寿命，降低了“扎刀”的发生概率。	/	

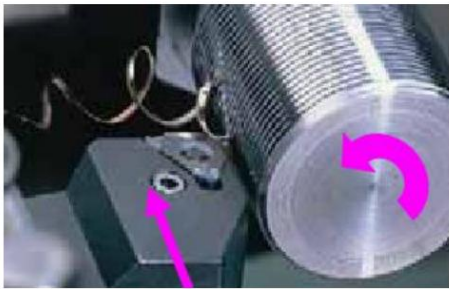


图 2-8 丝杆螺纹车削现场

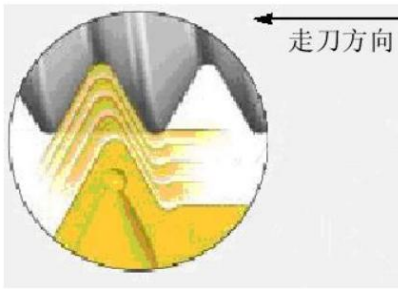


图 2-9 螺纹车削加工原理图

表 1-1 各刀具材料的机械性能和热力性能

		硬质合金	陶瓷	PCBN	金刚石
机械特性	硬度 HV	1500~1700	1800~2500	3000~4500	1500~1700
	抗压强度 MPa	3100~5900	2750~5000	3800	7600
	冲击韧性 KJ/m²	25~600	5~12	25~60	10~24
	杨氏模量 Gpa	590~630	300~400	580~680	680~810
热力特性	导热系数 W/(K·m)	100	30~40	40~100	560
	热膨胀系数 ×10⁻⁶/℃	5.4	7.5~8.0	3.6~5.1	4.2~4.9
	热稳定性 °C	800~1200	1300~1800	1500	600

3.6.2 磨/车削/旋风铣削对比

- ◆ **磨削**：采用砂轮磨削磨制出90° V 型槽，生产效率较低。
- ◆ **车削**：把淬硬材料的车削作为粗加工或最终加工、精加工的新工艺，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，优点是效率较高，缺点是适用于长径比小的滚珠丝杠。
- ◆ **旋风铣削**：旋风铣是在数控车床上配套安装高速铣削螺纹动力头，用装在高速旋转刀盘上的硬质合金成型刀具，从工件上铣削出螺纹的加工方法，旋风铣一刀成型，采用压缩空气排屑冷却，而且无需加工螺纹退刀槽，解决了退刀槽部位的应力集中缺陷。

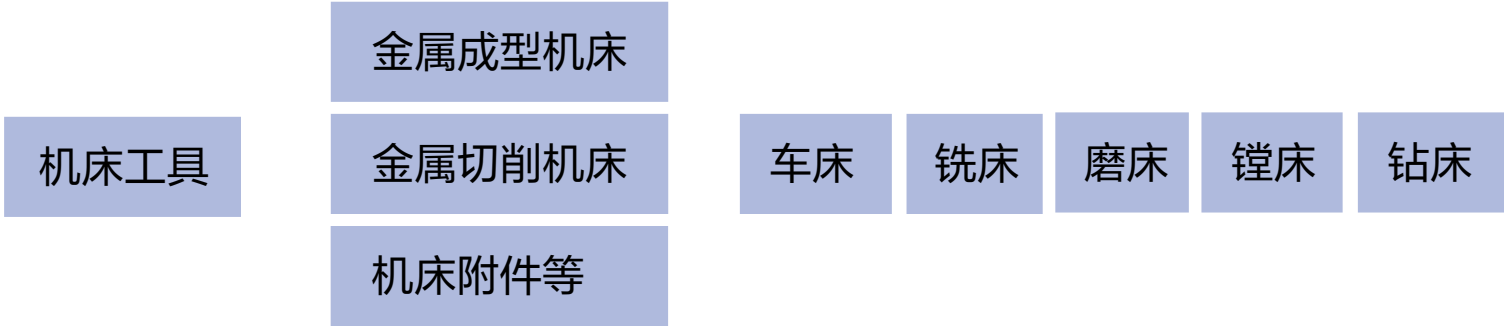
表：砂轮磨削、硬车削、旋风铣削三种粗加工工艺对比

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	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	工作滚道一次铣削成型，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

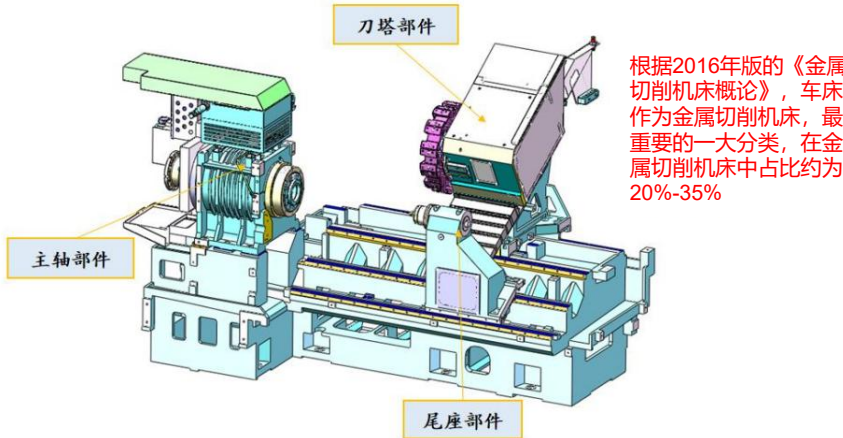
3.7.1 精密机床格局梳理

◆ 根据对加工件的加工方式差异，金属切削机床可分为车床、镗床、铣床、钻床和磨床等。目前高端精密机床仍较多依赖进口（如德国、瑞士设备），但国内厂商正加速突破，国产装备凭借技术突破和成本、服务优势，有望在该领域逐步实现进口替代，享受到行业增长红利。

图：机床设备分类标准



图：车床结构示意图



表：公司主要产品技术路线及人形机器人业务进展

转速区间	技术路线	优势/亮点
浙海德曼	车床	车床可实现0.5μm主轴跳动精度。已向人形机器人行业部分企业销售相关产品，并结合行业需求进行了定制开发，解决工艺难点，相关工作正在推进中。
华辰装备	磨床	华辰装备研发的P0级滚珠丝杠磨床（导程误差≤3μm），在3月获福立旺100台订单，用于人形机器人行星滚柱丝杠的制造。
日发精机	磨床	数控螺纹磨床于2023年研发完成，可用于加工新能源汽车、人形机器人、工业母机等行业的丝杆与螺母
秦川机床	磨/铣	截至2025年7月，公司齿轮机床、螺纹磨床均有适用制造机器人（含人形）零部件的能力，内螺纹磨床加工丝杠精度达P0级，滚珠丝杠副产品精度稳定达到P2级，部分达到P1、P0级，行星丝杠副产品精度达P3级。
创世纪	钻铣	其T-500U五轴钻铣加工中心和NESIS五轴加工中心等专为机器人关节、骨架加工设计的五轴设备，25Q1实现约1000台销售。

3.7.1 精密机床格局梳理：华辰装备

- ◆ 新产品亚微米随动磨床可应用于人形机器人中RV减速器及谐波减速器核心零件的精密磨削加工；精密内外螺纹磨床可应用于人形机器人中行星滚柱丝杠成套零部件的精密磨削加工。
- ◆ 与福立旺的业务合作目前正按照合同约定持续推进中，首批设备将于2025年9月交付。

表：公司主要产品及合作情况

主营产品	公司核心产品是全自动精密数控轧辊磨床、亚微米级高端复合系列磨削产品、精密螺纹磨床、精密数控直线导轨磨床、新型超精密曲面磨床等高端磨削设备。		
合作情况	2023年10月8日	贝斯特	提供精密数控直线导轨磨床及相应技术支持
	2024年9月23日	科德数控	为科德数控提供高质量、高标准的高端精密磨削加工设备，为其高档五轴联动数控机床相关主轴、转台、盘类、套类等核心部件，提供外圆、端面、内孔、螺纹等高精度磨削加工
	2025年3月25日	福立旺	提供精密内螺纹磨床、高速外螺纹磨床及高速外圆磨床产品共计100台，主要用于螺母螺纹中径小于10mm的行星滚柱丝杠相关零件的螺纹加工，并为其行星滚柱丝杠、滚珠丝杠等核心零部件产品的生产制造提供专用的高精度高效率磨削解决方案。

产品	最高加工精度	可实现加工参数					转速区间	优势/亮点
发布时间： 2025年7月		最小加工内径	螺母长径比	最高导程极限误差	螺纹中径一致性	表面粗糙度		
精密内螺纹磨床	C0	ø4mm	10倍以上	0.001mm	0.001mm	<=Ra 0.4 μm	70000-150000 rpm	双磨杆两端同步磨削技术，搭载自研高速电主轴，磨削效率提高300%以上
精密外螺纹磨床	/	ø1mm	20倍以上	/	螺纹全长中径圆度误差 0.001mm	<=Ra 0.25 μm	砂轮线速度可达 100m/s	采用新型工件装夹技术，搭载高速磨削主轴，磨削效率提高300%以上
亚μ随动磨床	/	/					/	轮廓度最高可达1μm；采用高速磨削主轴（砂轮线速度可达100m/s），加工效率提高100%。

3.7.2 精密机床格局梳理：秦川机床

- ◆ 主营业务按产业分为四大板块，分别为机床板块、零部件板块、工具类板块和仪器仪表板块，机床板块的主要产品为精密磨齿机、数控车床、加工中心、车铣复合加工中心、秦川 QCK/QMK 系列专用机床、数控螺纹磨床、外圆磨床等。
- ◆ 公司自2022年开始布局，首先在新能源汽车产业制造领域，能够向下游提供关键零件加工所需的高端装备和机床滚动功能部件（滚珠丝杠副和滚动直线导轨副），并向新能源汽车企业直接提供精密螺杆副、高档齿轮等关键零部件。
- ◆ 截至2025年6月，公司齿轮机床、螺纹磨床均有适用制造机器人（含人形）零部件的能力，内螺纹磨床加工丝杠精度达P0级，滚珠丝杠副产品精度稳定达到P2级，部分达到P1、P0级，行星丝杠副产品精度达P3级。
- ◆ 子公司汉江机床：SH系列高性能滚珠丝杠副定型等。

表：公司主要合作情况

产业项目合作情况	高档工业母机创新基地项目	已部分投入使用，预计2025年底完成项目建设，目前产能逐步释放，2024年在该基地出产的五轴机床台数同比增长超过100%
	新能源汽车领域滚动功能部件研发与产业化项目	预计2025年底建设完成
	复杂刀具产业链强链补链赋能提升技术改造项目	预计2025年底建设完成，该项目2024年实现收入6276万元。
	陕西智莱特	公司参股，创始股东包括法士特集团、智元机器人等

表：公司推出产品梳理

产品	应用场景	可实现加工参数			表面粗糙度	转速区间	优势/亮点
		可磨工件直径	可磨螺纹螺距	可磨螺纹导程			
SK7432×15 GX高精高效数控丝杠磨床	用于各种三角螺纹、梯型丝杠及滚珠丝杠的高效精密磨削	Φ20mm-250mm	1.5 ~ 48mm	最大导程：300mm	/	/	/
SK6010 数控丝杠铣床	主要用于滚珠丝杠螺纹滚道硬铣成型加工	/	5~40mm	/	/	丝杠中径一致性误差：0.05mm	旋风硬铣削工艺技术，保证丝杠滚道表面硬度。采用可转位CBN刀片进行成型高速铣削，加工效率比传统方式提高30%，降低加工成本。
SK7640A 数控内螺纹磨床	可磨削圆柱形、圆锥形、齿形为三角形、锯齿形、梯形及圆弧形的内螺纹螺母	100-400mm	1-24mm(公制)	/	Ra≤0.4μm	/	/
SKR7612A 内螺纹磨削中心	本机床主要适用于滚珠丝杠厂、汽车转向器厂以及其它机械制造行业，用于单件、名品种及大批量滚珠丝杠螺母的磨削加工	内螺纹：12-80mm； 外圆：20-120mm	1-24mm(公制)	砂轮尺寸内螺纹直径：16-60mm 外圆：300-400mm	肩面：Ra0.63um 外圆：Ra0, 4um 圆弧内螺纹磨削精度 表面粗糙度：Ra≤0.4um	砂轮主轴转速：内螺纹 30000rpm 外圆 1672~2000rpm	CNC控制机床，机床在一次装夹中能自动完成螺母的螺纹滚道面、外圆面及肩面的磨削加工。

3.7.3 精密机床格局梳理：日发精机

◆ 公司的数控螺纹磨床于2023年研发完成，可用于加工新能源汽车、人形机器人、工业母机等行业的丝杆与螺母，高效且精度符合客户要求，获得了客户的认可。因此，日发机床公司已具备了用于丝杆、螺母加工的数控磨削设备的生产能力。市场开拓如期推进并取得一定的进展，已与部分客户如贝斯特、五洲新春等签署合同或达成战略合作，同时与一些意向客户正在进行技术交流、洽谈合作事宜。据全景网-互动平台（2025/5），公司目前用于丝杆、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。

表：公司主要产品及合作情况

产品	可实现加工参数			转速区间	优势/亮点
	最大磨削直径	螺纹中径一致性	表面粗糙度		
SK7405 数控丝杠磨床	ø50mm	中径变动量 0.003	Ra 0.2 μm	砂轮线速度 ≤60m/s	加工的丝杠具有极小螺距误差和超高轴向刚性，为机器人的关节传动提供了稳定而精准的动力传输，使得机器人能够灵活、准确地完成各种复杂动作。
发布时间： 2025年4月				工件转速10-200rpm	
SKD7620W 数控内螺纹磨床	ø150mm	中径变动量 0.006	Ra 0.32 μm	砂轮线速度 ≤80m/s	
				工件转速10-800rpm	

4.1 相关标的

◆ 我们认为人形机器人目前处于技术突破、商业化落地初期，后续有望迎来量产空间，维持人形机器人行业“推荐”评级。建议关注：1) 减速器厂商中大力德、绿的谐波、丰立智能、科达利等；2) 丝杠：恒立液压等；3) 灵巧手供应商兆威机电、电子皮肤供应商汉威科技等。

表：相关标的梳理

分类	标的	代码	总市值（亿元）	PE			主营业务
				2025E	2026E	2027E	
减速器及材料	中大力德	002896.SZ	192.49	223.83	182.46	146.38	机械传动与控制应用领域关键零部件如精密减速器、减速电机等核心零部件供应商
	绿的谐波	688017.SH	292.76	271.34	207.04	157.72	机器人用谐波减速器、机电一体化产品、旋转执行器供应商
	丰立智能	301368.SZ	88.96	—	—	—	齿轮、精密（谐波）减速器和小微齿供应商
	科达利	002850.SZ	380.17	21.15	17.17	14.07	主业锂电结构件，合资公司科盟创新主营创新减速器
	翔楼新材	301160.SZ	76.48	32.55	28.33	24.13	定制化精密冲压特殊钢材料供应商
丝杠	恒立液压	601100.SH	1,252.73	44.05	37.98	32.33	线性驱动器杠供应商
灵巧手电机	兆威机电	003021.SZ	296.19	110.56	88.90	69.21	微型驱动系统供应商，提供高性能伺服电机、减速箱和齿轮零部件
灵巧手柔性皮肤	汉威科技	300007.SZ	170.11	—	—	—	气体传感器及仪表制造商、物联网解决方案提供商，提供柔性压力传感器

*各公司盈利预测均来源于一致预期，总市值数据统计截至2025年9月2日

- ◆ **人形机器人行业进展不及预期风险：**人形机器人行业硬件技术及软件技术（大脑及大模型、小脑及运控技术等）发展低于预期，将对人形机器人技术成熟的速度、后续商业化落地和放量节奏产生不利影响；
- ◆ **中美贸易摩擦超预期风险：**若美国对人形机器人中国配套供应链厂商加强技术封锁和关税限制，将对机器人国产产业链中的企业技术革新造成不利影响，增加关税负担和经营成本等；
- ◆ **人型机器人未来大规模商业化可能涉及法律监管方面的风险：**人型机器人未来大规模商业化可能涉及法律监管方面的数据安全、标准缺失等风险；
- ◆ **重点关注公司业绩不及预期风险：**灵巧手未来技术路线不确定性大，放量时间节点未确定，存在前期投入成本难以收回的风险；涉及上游零部件供应商众多，行业竞争较为激烈；
- ◆ **研究报告中使用的公开资料可能存在信息滞后或更新不及时的风险：**人形机器人行业技术方案多样，迭代速度快，研究报告中使用的公开资料可能存在信息滞后或更新不及时的风险。

机械小组介绍

张钰莹，机械行业首席分析师，致力于前瞻研究及深度研究，擅长自上而下与自下而上相结合挖掘机械板块投资机会。

分析师承诺

张钰莹，本报告中的分析师均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，独立，客观的出具本报告。本报告清晰准确的反映了分析师本人的研究观点。分析师本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收取到任何形式的补偿。

国海证券投资评级标准

行业投资评级

推荐：行业基本面向好，行业指数领先沪深300指数；
中性：行业基本面稳定，行业指数跟随沪深300指数；
回避：行业基本面向淡，行业指数落后沪深300指数。

股票投资评级

买入：相对沪深300 指数涨幅20%以上；
增持：相对沪深300 指数涨幅介于10%～20%之间；
中性：相对沪深300 指数涨幅介于-10%～10%之间；
卖出：相对沪深300 指数跌幅10%以上。

免责声明

本报告的风险等级定级为R3，仅供符合国海证券股份有限公司（简称“本公司”）投资者适当性管理要求的客户（简称“客户”）使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。客户及/或投资者应当认识到有关本报告的短信提示、电话推荐等只是研究观点的简要沟通，需以本公司的完整报告为准，本公司接受客户的后续问询。

本公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。本报告中的信息均来源于公开资料及合法获得的相关内部外部报告资料，本公司对这些信息的准确性及完整性不作任何保证，也不保证其中的信息已做最新变更，也不保证相关的建议不会发生任何变更。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。报告中的内容和意见仅供参考，在任何情况下，本报告中所表达的意见并不构成对所述证券买卖的出价和征价。本公司及其本公司员工对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。本公司或关联机构可能会持有报告中所提到的公司所发行的证券头寸并进行交易，还可能为这些公司提供或争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等服务。本公司在知晓范围内依法合规地履行披露义务。

风险提示

市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告为作出投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在决定投资前，如有需要，投资者务必向本公司或其他专业人士咨询并谨慎决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。

若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。通过此途径获得本报告的投资者应自行联系该机构以要求获悉更详细信息。本报告不构成本公司向该机构之客户提供的投资建议。

任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。本公司、本公司员工或者关联机构亦不为该机构之客户因使用本报告或报告所载内容引起的任何损失承担任何责任。

郑重声明

本报告版权归国海证券所有。未经本公司的明确书面特别授权或协议约定，除法律规定的情况外，任何人不得对本报告的任何内容进行发布、复制、编辑、改编、转载、播放、展示或以其他方式非法使用本报告的部分或者全部内容，否则均构成对本公司版权的侵害，本公司有权依法追究其法律责任。

国海证券 · 研究所 · 机械研究团队

心怀家国，洞悉四海



国海研究上海

上海市黄浦区绿地外滩中心C1栋
国海证券大厦

邮编：200023

电话：021-61981300

国海研究深圳

深圳市福田区竹子林四路光大银
行大厦28F

邮编：518041

电话：0755-83706353

国海研究北京

北京市海淀区西直门外大街168
号腾达大厦25F

邮编：100044

电话：010-88576597