

2023年07月23日

工业机器人及工控系统

行业深度分析

人形机器人系列报告（二）：行星滚柱丝杠——“卡脖子”零件，高价值的必需品

投资要点

- ◆ 我们站在特斯拉角度，将 Optimus 人形机器人潜在零部件厂商分为以下几类：
 - ◆ 1) 与特斯拉有长期合作关系，配合度高，原有合作领域相关产品可直接应用于人形机器人领域，优先选择；2) 细分领域有头部公司，由于原有市场空间较小，且有一定技术壁垒，行业龙头未切入该细分领域，其他零部件厂商短期内较难实现大规模供应，但长期有竞争加剧趋势，如空心杯电机和无框力矩电机等领域；3) 细分领域有龙头公司，原有市场空间较小，且技术上 know-how 壁垒较高，其他零部件厂商短期较难突破技术壁垒，中期较难实现大规模量产，这类厂商具有较强的不可替代性，如谐波减速器领域；4) 产品壁垒不高，原有市场空间较大，厂商多，市场集中度较低，如连接器、编码器等产品，侧重响应快、配合度高、管理能力强的公司。5) 原有市场空间较小，产品壁垒非常高，原有市场中生产这类产品性价比低，市场集中度高，而在人形机器人中价值量大，降本难度大，是“卡脖子”的零件，如行星滚柱丝杠。
- ◆ 我们认为在选择以行星滚柱丝杠为代表的第 5 类厂商时可能的要求：1) 能够突破技术壁垒，实现应用 2) 长期具有大幅降低成本的可能 3) 具备大规模量产的能力 4) 初期降低性能要求，逐步优化迭代。
- ◆ 人形机器人中，丝杠类型选取核心制约因素是小型化，小型化诉求下优先级为：倒置行星滚柱丝杠>行星滚柱丝杠>滚珠丝杠。Optimus 因为有“人形”要求，小型化是“能不能用”的问题，承载能力是“好不好用”的问题，单位寿命的价格是“贵不贵”的问题。丝杠的寿命和额定负载正相关，额定负载和体积正相关，因此制约寿命和负载的原因就是体积要求。行星滚柱丝杠相比滚珠丝杠有明显优势的核心就是易满足小型化要求。体现在：1) 可以倒置。从结构上来看，行星滚柱丝杠具有行星滚子部件，其螺母可作为伺服电机的转子，螺母旋转带动丝杠做轴向运动。而滚珠丝杠螺母上的反向循环装置无法驱动滚柱大幅度移动，因此无法倒置。2) 单位体积承载力高。行星滚柱丝杠是面接触而滚珠丝杠是点接触，因此在相同丝杠直径下，前者比后者的承载能力提高 6 倍，相同负载下节省 1/3 空间，寿命提高 14 倍。
- ◆ 行星滚柱丝杠核心难点在于制造工艺，加工精度主要影响寿命。行星滚柱丝杠价值量高，单价约 2 万元，方案明确；滚珠丝杠价值量较低，价格在几十元到几百元，方案尚不明确，不过由于两者结构相似，生产过程中部分设备和工艺通用，部分滚珠丝杠厂商具备切入行星滚柱丝杠的可能性。因此本篇报告我们以行星滚柱丝杠为主，滚珠丝杠为辅。我们认为行星滚柱丝杠领域工艺壁垒>设备壁垒>设计壁垒>材料壁垒。行星滚柱丝杠设计难度不算太大，难点在于制造。考虑到特斯拉对供应商扶持力度较大，目前全球已有成熟的制造设备，因此设备不是“有无”的问题，只是“价格高低”的问题。而工艺问题较难用资金实现突破，

投资评级

领先大市-B维持

一年行业表现



资料来源：聚源

升幅%	1M	3M	12M
相对收益	-8.92	14.6	13.1
绝对收益	-10.01	9.38	3.32

分析师

刘荆

 SAC 执业证书编号：S0910520020001
 liujing1@huajinsc.cn

相关报告

耐普矿机：业绩超预期，海外市场潜力逐步兑现-耐普矿机 2023 半年度业绩快报点评 2023.7.21

工业机器人及工控系统：特斯拉 Optimus 性能全面升级，“身具智能”引领未来趋势-机器人行业点评 2023.5.22

通用设备：通用设备机床板块 2022 年报、2023Q1 季报综述-机械行业周报 2023.5.7

博实股份：22 年业绩略低于预期，23 年一季度整体经营情况大幅改善，公司订单饱满业绩有望集中兑现-博实股份一季报点评 2023.5.4

卓然股份：年报业绩符合预期，新订单落地炼化景气周期启动-卓然股份年报点评 2023.4.26

精工科技：国产碳纤维设备整线龙头，订单饱满业绩腾飞-精工科技深度报告 2023.4.24

纽威数控：公司业绩符合预期，盈利能力持续增强，海外营收占比提升-纽威数控年报点评 2023.4.17



且特斯拉在工艺方面很难提供大的支持，因此对行星滚柱丝杠领域厂商来说，核心是掌握制造工艺。

- ◆ **中国厂商短板是工艺和设备，欧洲厂商短板是人力成本、能源价格和产业链稳定性，前者是短期、可解决的，后者是难解决的。**根据特斯拉 2022 年 AI Day，我们推测 Optimus 中共用到 14 个线性执行器，均采用倒置行星滚柱丝杠。当前行星滚柱丝杠单价约 2 万元，倒置的工艺更复杂，价值量更高，因此不考虑量产后降本因素，行星滚柱丝杠在单台机器人价值量近 30 万元。由于工艺复杂，国内行星滚柱丝杠执行器的应用起步不久，主要集中在国外德国 LTK、瑞士 Rollvis、瑞典 SKF 等公司，其中 Rollvis 全球市占率达 40%。目前滚柱丝杠的加工还无法实现自动化，扩大产能就必须同时增加必要的生产人员，欧洲高昂的人力成本、俄乌冲突带来的能源危机等问题下，欧洲有色金属协会甚至提出欧洲面临“永久去工业化”的风险，我们认为欧洲厂商很难成为特斯拉长期大批量生产零部件的选择。

◆ 相关标的

恒力液压、秦川机床、鼎智科技、贝斯特、长盛轴承等。

- ◆ **风险提示：**人形机器人发展进度不及预期风险；人形机器人需求不及预期风险；产能不及预期风险。

内容目录

一、行星滚柱丝杠：高难度、高价值，国内起步较晚	5
（一）什么是行星滚柱丝杠？	5
（二）生产难度大，磨削工艺精度最高	7
（三）瑞士 Rollvis 全球市占率 40%，国内处于起步阶段	11
二、行星滚柱丝杠性能优势显著，为 Optimus 直线关节方案	13
（一）滚珠丝杠与行星滚柱丝杠结构类似，部分设备工艺通用	13
（二）行星滚柱丝杠核心优势是高承载，高承载带来一系列优势	16
（三）加工精度主要影响寿命，疲劳破坏主要在滚柱	18
（四）Optimus 直线关节为反式行星滚柱丝杠，核心优势是小型化	19
三、投资建议	23
（一）恒力液压：21 年定增布局线性驱动器，兼具滚珠丝杠与行星滚柱丝杠	23
（二）秦川机床：滚珠丝杠已量产，行星滚柱丝杠的“卖铲人”	24
（三）鼎智科技：微型行星滚柱丝杠里程碑式达成，线性执行器市占率全球第二	24
（四）贝斯特：特斯拉汽车供应商，已布局高精度滚珠丝杠	25
（五）长盛轴承：特斯拉二级供应商，具备人形机器人滚珠丝杠生产能力	25
四、风险提示	26

图表目录

图 1：行星滚柱丝杠示意图	5
图 2：滚珠丝杠示意图	5
图 3：行星滚柱丝杠主要部件	6
图 4：行星滚柱丝杠的电动缸结构示意图	6
图 5：I-EMA 结构	7
图 6：C-EMA 结构	7
图 7：合金结构钢 42CrMo	7
图 8：高碳铬轴承钢 GCr15	7
图 9：行星螺纹滚柱	8
图 10：行星滚柱丝杠误差来源	8
图 11：行星滚柱丝杠能量损失	9
图 12：行星滚柱丝杠螺纹副的加工工艺方法	9
图 13：螺纹磨床	10
图 14：砂轮磨削原理	10
图 15：滚珠丝杠螺距误差	11
图 16：行星滚柱丝杠应用领域	12
图 17：战斗机起落架-电动作动器	12
图 18：滚柱丝杠国内市场份额（2022 年预测）	12
图 19：行星滚柱丝杠成本构成	12
图 20：滚珠丝杠副构成	13
图 21：滚珠丝杠示意图	13
图 22：滚珠丝杠螺母中的滚珠循环方式	14
图 23：滚珠丝杠精度等级（单位：0.001mm）	14
图 24：各种机械适应的精度等级	15

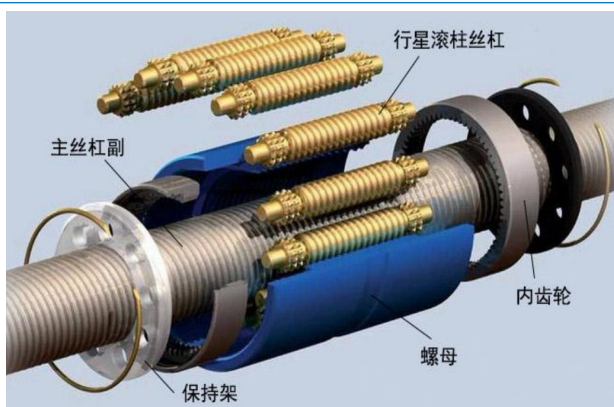
图 25: 行星滚柱和滚珠丝杠受力承载面积比较	17
图 26: 滚珠丝杠和滚柱丝杠受力示意图	18
图 27: 各参数对接触疲劳寿命的影响	18
图 28: 丝杠、螺母及滚柱的可靠性	18
图 29: Optimus 躯干共 28 个关节	19
图 30: Optimus 手部有 6 个执行器	19
图 31: 考虑成本和重量选出最优执行器	20
图 32: 28 个关节选出各自最优执行器	20
图 33: Optimus 躯干用到共 6 个关节执行器	20
图 34: Optimus 线性执行器吊起半吨重钢琴	20
图 35: 行星滚柱丝杠直线执行器示意图	20
图 36: Optimus 直线关节传感器	21
图 37: Optimus 直线关节采用行星滚柱丝杠	21
图 38: 标准型和反向式行星滚柱丝杠对比	22
图 39: Optimus 大臂执行器	22
图 40: Optimus 腕部执行器	22
图 41: Optimus 大腿执行器	23
图 42: Optimus 小腿执行器	23
图 43: 汉江机床高精度磨床介绍	24
图 44: 汉江机床滚珠丝杠副系列产品	24
图 45: 鼎智科技滑动丝杆线性执行器	25
图 46: 鼎智科技滚珠丝杠线性执行器	25
表 1: 行星滚柱丝杠五种类型	6
表 2: 同一个轴上成形螺纹和齿轮的加工工艺的比较	9
表 3: 砂轮磨削、硬车削、旋风铣削三种加工工艺对比	10
表 4: 各类加工工艺介绍	10
表 5: 滚珠丝杠螺距误差主要来源	11
表 6: 各品牌行星滚柱丝杠产品介绍	13
表 7: 滚珠丝杠选型指标	14
表 8: 轧制滚珠丝杠和磨制滚珠丝杠对比	15
表 9: 磨削滚珠丝杠机械加工工艺过程	16
表 10: 冷轧滚珠丝杠机械加工工艺过程	16
表 11: 行星滚柱丝杠和滚珠丝杠比较	17
表 12: 各类传动产品性能对比	17
表 13: 恒力液压募投项目介绍	24

一、行星滚柱丝杠：高难度、高价值，国内起步较晚

（一）什么是行星滚柱丝杠？

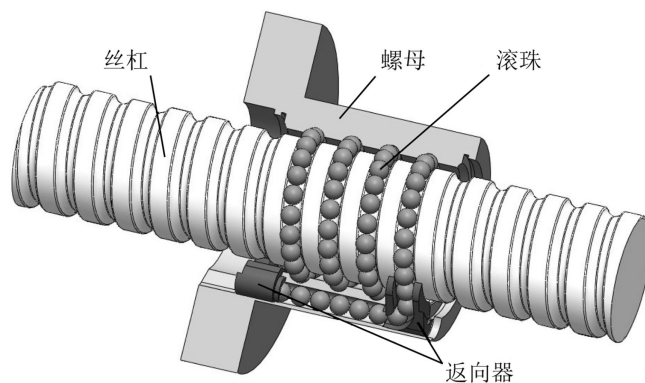
行星滚柱丝杠是将旋转运动转化为直线运动，传动单元为丝杠及螺母之间的滚柱。根据新剑机电传动公众号，行星滚柱丝杠在主螺纹丝杠的周围，行星布置安装了 6-8 个螺纹滚柱小丝杠，利用电机的旋转转换为丝杠或螺母的直线运动。丝杠、滚柱、螺母三者之间通过螺纹啮合实现传动。丝杠是牙型角为 90° 的多头螺纹；滚柱是具有相同牙型角的单头螺纹；螺母是具有与丝杠相同头数和牙型的内螺纹。行星滚柱丝杠结构与滚珠丝杠相似，是将滚珠替换为具有螺纹结构的滚柱，而丝杆和螺母结构基本相似。¹

图 1：行星滚柱丝杠示意图



资料来源：《行星滚柱丝杠电动缸应用现状_邓琦》，华金证券研究所

图 2：滚珠丝杠示意图



资料来源：《滚珠丝杠副发展及研究现状_汤文成等》，华金证券研究所

电机驱动丝杠旋转，从而使螺母完成直线运动。行星滚柱丝杠副的工作原理为：丝杠可视为太阳轮，滚柱视为行星轮，螺母视为中心轮，当丝杠旋转且螺母的周向固定时，滚柱在圆周方向做类行星运动，同时通过螺旋传动将丝杠(或螺母)的回转运动转换为螺母(或丝杠)的直线往复运动。行星滚柱丝杠工作原理和滚珠丝杠同样类似的，即伺服电机驱动丝杠旋转，从而使行星滚柱螺母总成带动电动缸推杆完成直线往复推拉运动。²

¹ 《精密行星滚柱丝杠的传动特性_李凯等》

² 《行星滚柱丝杠副刚度及效率的分析与研究_韦振兴》

图 3：行星滚柱丝杠主要部件

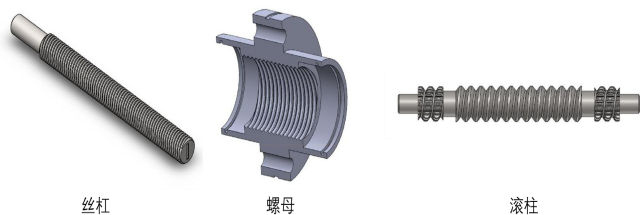
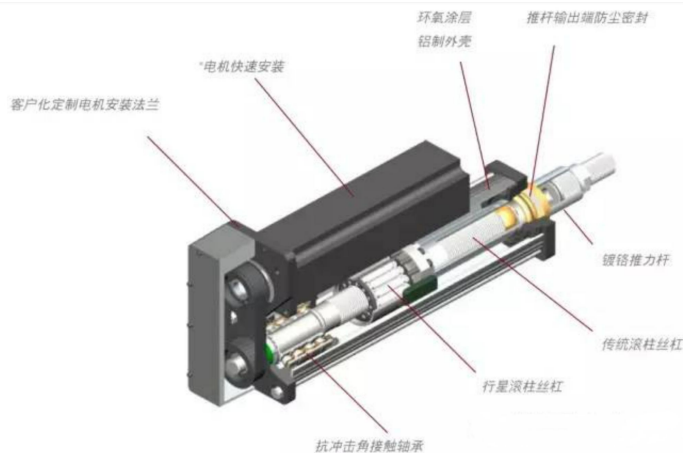


图 4：行星滚柱丝杠的电动缸结构示意图



资料来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计_柯浩》，华金证券研究所

资料来源：麦客厅，华金证券研究所

行星滚柱丝杠根据结构组成及运动关系的不同，可以分为 5 种类型：标准式行星滚柱丝杠、反向式行星滚柱丝杠、循环式行星滚柱丝杠、差动式行星滚柱丝杠、轴承环式行星滚柱丝杠。³

表 1：行星滚柱丝杠五种类型

行星滚柱丝杠类型	介绍	图片
标准式	丝杠为主动件，螺母为输出构件。它能够实现较大行程，适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，是目前应用最广泛的类型，其他的 4 种类型均是为了适应于不同的应用环境而在其基础上演变而来的。主要用于精密机床、机器人、军工装备等领域。	
反向式	结构形式与标准式类似，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，其主要用于中小负载、小行程和高速的应用场景，其最大的优势在于可将其螺母作为电机转子实现电机和丝杠一体化设计，形成结构紧凑的一体式机电作动器。	
循环式	增加了参与啮合的螺纹数量，因此具有较高的刚度和较大的承载能力，主要应用于要求高刚度、高承载、高精度的场合。缺点在于其凸轮环结构会产生振动冲击，存在噪音问题。主要用于医疗器械、光学精密仪器等领域。	
差动式	结构特点使其可以获得更小的导程，适用于传动比较大，承载能力较高的应用场合。但在其运动过程中，螺纹会产生滑动现象，在重载情况下，容易产生磨损，导致精度丧失，可靠性降低等问题。	
轴承环式	推力圆柱滚子轴承大大提高了其承载能力，同时也减小了各构件间的磨损，增大了传动效率，其主要适用于高承载、高效率等场合，如石油化工、重型机械等领域。其存在着结构复杂，径向尺寸大，制造成本高等缺点。	

资料来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计_柯浩》，华金证券研究所

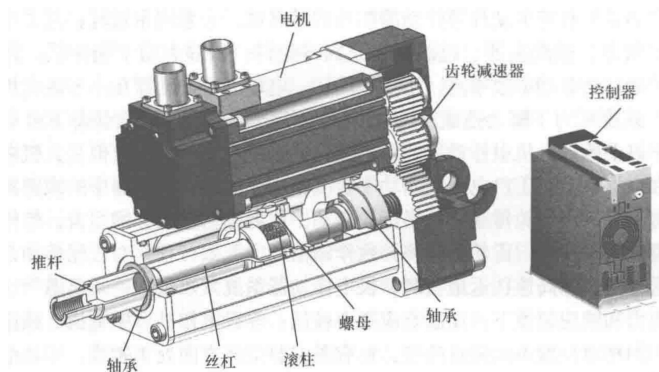
反向式行星滚柱丝杠，螺母既作为传力部件又作为电机的转子，一体化、小型化程度高。各类行星滚柱丝杠传动是机电装置重要执行机构，常见的机电作动器可分为集成式机电作动器(I-EMA)和一体式机电作动器(C-EMA)两种⁴。典型的集成式机电作动器结构由直流无刷电机、控制器(主要包括速度、位置、扭矩控制器和功率转换器)、减速器(齿轮传动或带传动)、滚珠丝杠(或行星滚柱丝杠)四部分组成。一体式机电作动器结构主要由行星滚柱丝杠(丝杠、滚柱和螺母)、电

3 《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计_柯浩》

4 《行星滚柱丝杠传动啮合原理_刘更》

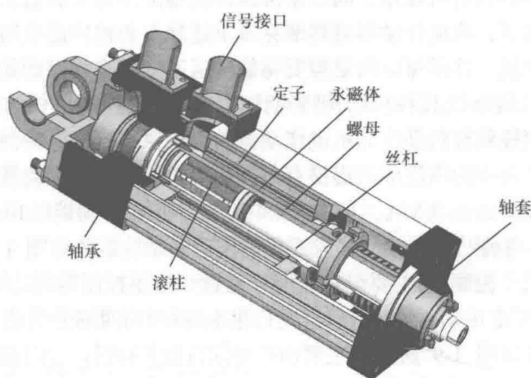
机(磁铁和线圈绕组)、控制器(控制、测量、反馈单元及对应接口)三部分组成。对于反向式行星滚柱丝杠，螺母既作为传力部件又作为电机转子，通过丝杠、滚柱和螺母三者的啮合传动实现直线伺服，是真正意义上的一体化机电作动器。

图 5: I-EMA 结构



资料来源：《行星滚柱丝杠传动啮合原理_刘更》，华金证券研究所

图 6: C-EMA 结构

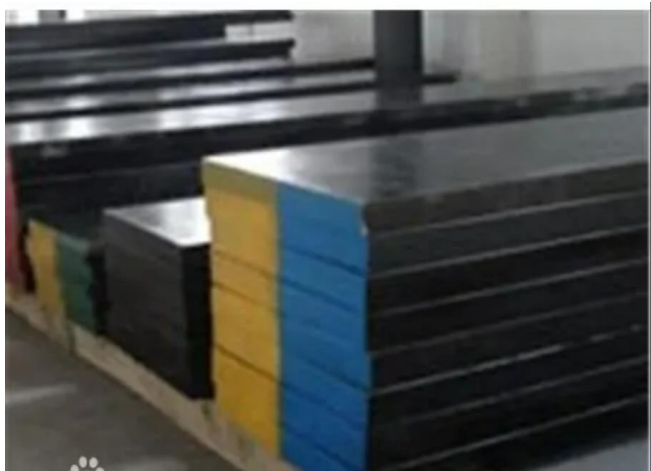


资料来源：《行星滚柱丝杠传动啮合原理_刘更》，华金证券研究所

(二) 生产难度大，磨削工艺精度最高

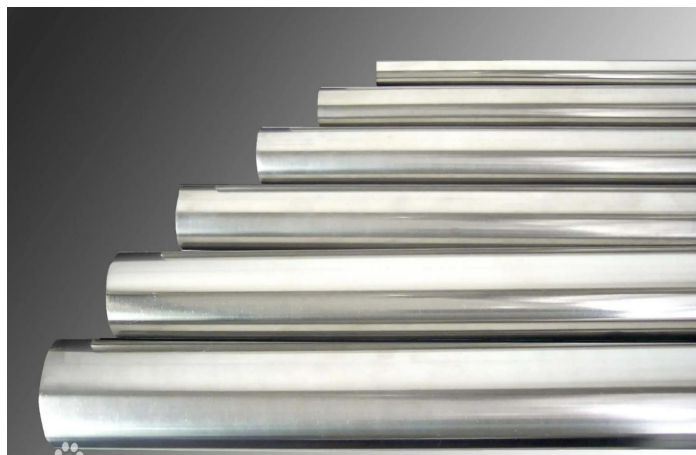
丝杠材料为合金结构钢 **42CrMo**，螺母和滚柱材料为高碳铬轴承钢，材料壁垒不高。根据 Rollvis 中国大陆核心代理商天誉科技公司官网，行星滚柱丝杠中丝杠选用的材料为合金结构钢 **42CrMo**，合金结构钢 **42CrMo** 强度和淬透性比 **35CrMo** 有所增高，调质后有较高的疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好。螺母和滚柱选用的材料为高碳铬轴承钢 **GCr15**，高碳铬轴承钢 **GCr15** 综合性能良好，淬火和回火后具有高而均匀的硬度，良好的耐磨性和高的接触疲劳寿命，热加工变形性能和切削加工性能均好。根据抚顺特钢官网，合金结构钢 **42CrMo** 价格为 9150 元/吨，高碳铬轴承钢 **GCr15** 价格 10000 元/吨。

图 7: 合金结构钢 42CrMo



资料来源：百度百科，华金证券研究所

图 8: 高碳铬轴承钢 GCr15

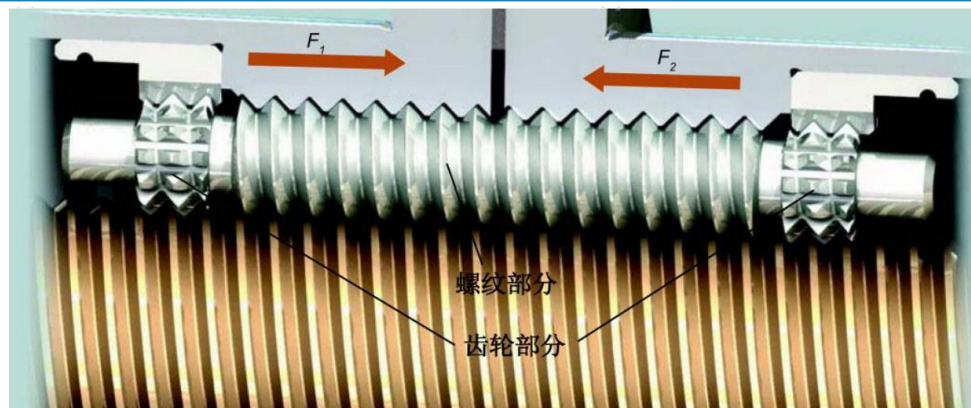


资料来源：百度百科，华金证券研究所

螺柱滚柱是传动的关键部分，成形加工工艺和产品质量直接决定行星滚柱丝杠。当行星滚柱丝杠传动机构工作时，多个螺柱滚柱共同承受载荷，避免任何一个螺柱滚柱因承载过大而造成损

伤失效。在行星螺纹滚柱中，中间的螺纹部分的主要工作是传递载荷，齿轮部分和螺母内部的固定齿圈相啮合。螺纹滚柱作为行星滚柱丝杠传动机构的关键部分，其成形加工工艺和产品质量直接决定行星滚柱丝杠传动机构的装配质量和性能。⁵

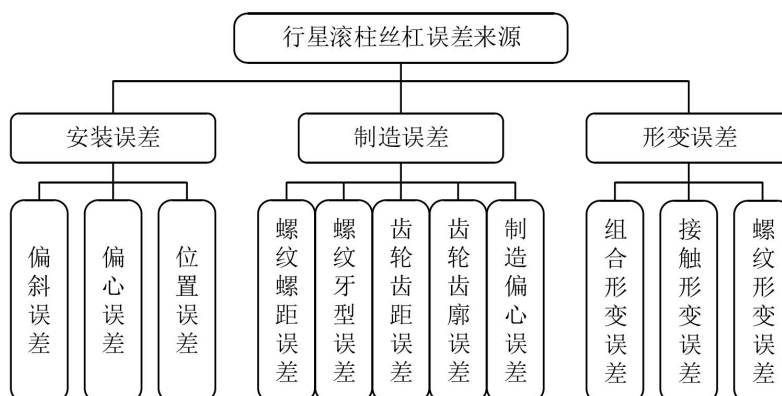
图 9：行星螺纹滚柱



资料来源：《螺纹滚柱轧制工艺研究_段体清》，华金证券研究所

行星滚柱丝杠主要有形变误差、制造误差、安装误差等，制造工艺对减小误差十分关键。其中制造环节包括螺纹螺距、螺纹牙型、齿轮齿距、齿轮齿廓、制造偏心等误差，对制造提出了非常高的精度要求。

图 10：行星滚柱丝杠误差来源



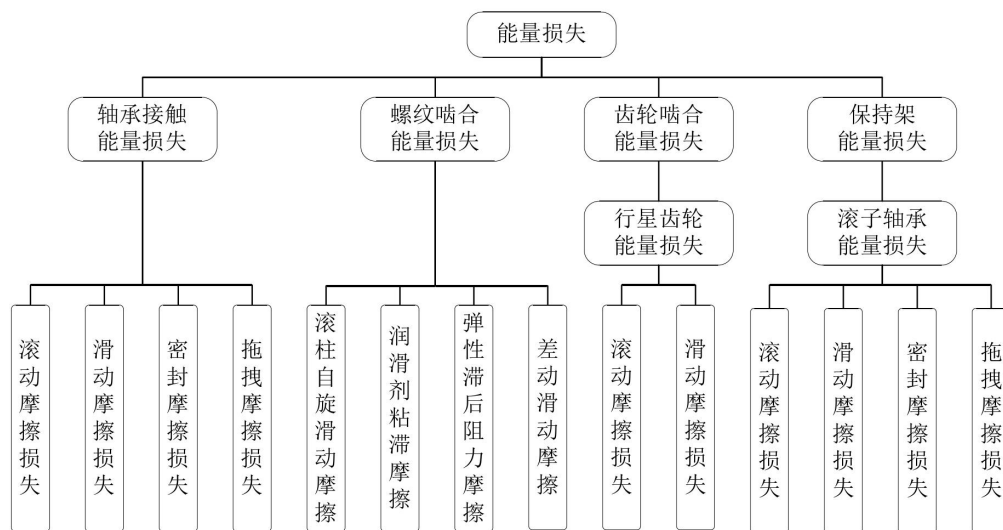
资料来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计_柯浩》，华金证券研究所

行星滚柱丝杠传动系统的能量损失主要来源于其关键部件的摩擦阻力。主要包括角接触轴承(或圆锥滚子轴承)接触摩擦、丝杆与滚柱侧螺纹啮合摩擦、滚柱与螺母侧螺纹啮合摩擦、滚柱齿与内齿圈摩擦以及保持架和滚柱、螺母间的转动摩擦损失。⁶

⁵ 《螺纹滚柱轧制工艺研究_段体清》

⁶ 《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究_杜兴》

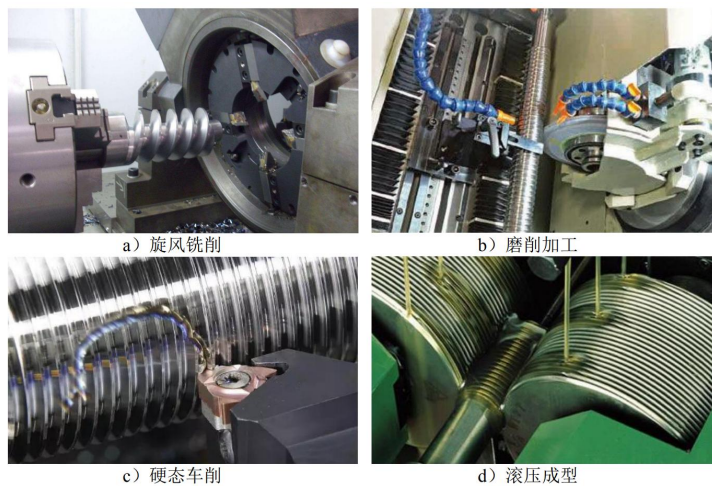
图 11：行星滚柱丝杠能量损失



资料来源：《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究_杜兴》，华金证券研究所

行星滚柱丝杠通过螺纹啮合实现传动，螺纹的加工方式有旋风铣削、磨削加工、硬态车削、滚压成型等。行星滚柱丝杠依靠零件间的螺纹啮合实现传动功能，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。行星滚柱丝杠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。⁷

图 12：行星滚柱丝杠螺纹副的加工工艺方法



资料来源：《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究_陈晖》，华金证券研究所

现有的轧制成形加工工艺有两种轧制成形方法：(1)在一台设备上安装螺纹和齿轮两种模具，按加工工艺顺序在不同的时间内先后轧制成形螺纹和齿轮；(2)在多台设备上分别安装螺纹和齿轮两种模具，按加工工艺顺序在不同的时间内先后轧制成形螺纹和齿轮。⁸

表 2：同一个轴上成形螺纹和齿轮的加工工艺的比较

成形方法	设备数量	设备复杂程度	成形过程	成形时间
减材/切削加工	≥2	普通设备	按先后顺序切削成形螺纹和齿轮	比较长

⁷ 《行星滚柱丝杠螺纹的硬态车削加工技术研究_陈晖》

⁸ 《螺纹滚柱轧制工艺研究_段体清》

等材/轧制成形	≥ 2	普通设备	按先后顺序轧制成形螺纹和齿轮	长
等材/轧制成形	1	设备比较复杂	按先后顺序轧制成形螺纹和齿轮	短

资料来源：《螺纹滚柱轧制工艺研究_段体清》，华金证券研究所

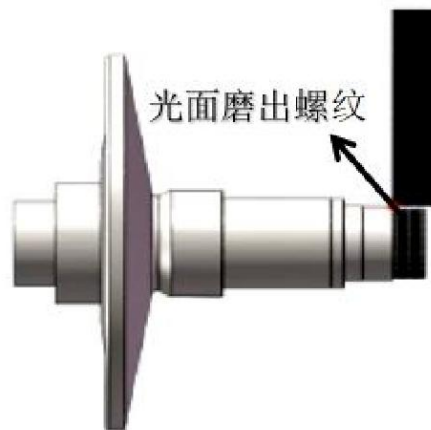
磨削是加工螺纹精度最高的工艺，可达到 **P1** 级。磨削是高精度丝杠螺纹的主要加工方法，磨削的实质是砂轮的表面很多磨粒划擦、刻划和切削工件表面，使用螺纹磨床高速旋转的成型砂轮对加工工件表面进行高速切削，使用磨削加工的滚珠丝杠最高可达到 **P1** 级。⁹

图 13：螺纹磨床



资料来源：《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》，华金证券研究所

图 14：砂轮磨削原理



资料来源：《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》，华金证券研究所

表 3：砂轮磨削、硬车削、旋风铣削三种加工工艺对比

工艺	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

资料来源：《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究_郑红》，华金证券研究所

磨削的核心设备是高精度磨床。根据中金企信国际咨询，磨床属于精度较高的加工机床，通常在工件加工的后端工序使用，使工件得到更高的加工精度和更低的表面粗糙度，提升下游机械的运行平稳性、使用精度等性能。不同类别金属切削工艺的加工精度、表面粗糙度范围也不同。

表 4：各类加工工艺介绍

加工工艺	概念	加工精度		表面粗糙度	
		一般范围	其他说明	一般范围(μm)	其他说明
车削	车刀在平面内作直线或曲线移动的切削加工	IT8-IT7	“镜面车削”可达 IT7-IT5	1.6-0.8	“镜面车削”可达 0.04-0.01 μm
铣削	使用旋转的多刃刀具切削工件的加工	IT8-IT7		6.3-1.6	

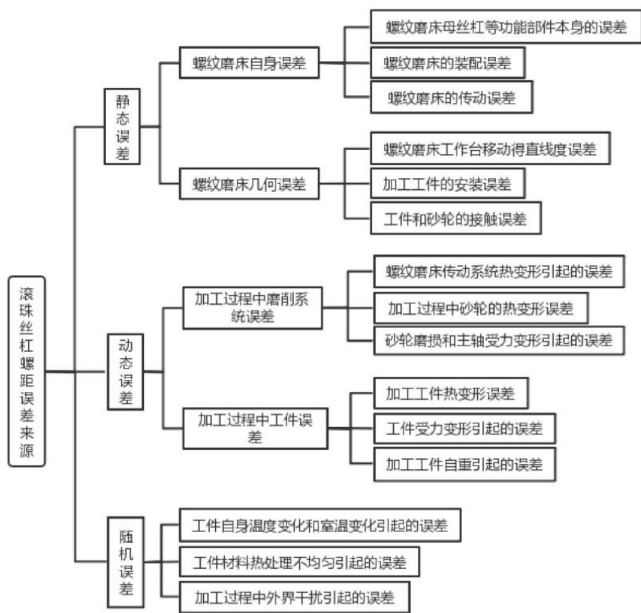
⁹ 《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》

刨削	用刨刀对工件作水平相对直线往复运动的切削加工	IT9-IT7		6.3-1.6	
钻削	用钻头等进行钻孔的加工	可达 IT10		12.5-6.3	
镗削	用刀具扩大孔或其它圆形轮廓的内径切削加工	IT9-IT7	“精密镗削”可达 IT7-IT6	2.5-0.16	“精密镗削”可达 0.63-0.08 μm
磨削	用磨料、磨具切除工件上多余材料的加工	IT8-IT5		1.25-0.16	“镜面磨削”可达 0.01 μm 以下

资料来源：中金企信国际咨询，华金证券研究所

滚珠丝杠磨削加工精度的主要标准是螺距误差。在实际生产过程中，由于各方面原因共同作用的结果，丝杠旋转一周，而工作台并非恰好行进一个螺距，这样就会形成螺距误差。滚珠丝杠螺距误差来源大致可以分为静态误差、动态误差和随机误差，这三种误差又包括很多种，其中机床误差座、砂轮磨损和弹性变形以及热变形误差以及热变形误差对螺距误差影响较大。¹⁰

图 15：滚珠丝杠螺距误差



资料来源：《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》，华金证券研究所

表 5：滚珠丝杠螺距误差主要来源

主要误差类型	说明
机床误差	砂轮磨削的实质是一种特殊的高速度切削，因此，砂轮磨削过程对机床的精度和稳定性都有很大的要求。机床母丝杠本身就存在螺距误差，并且对工件的加工误差影响最大；机床的定位精度以及运动精度等等也会影响到工件的加工误差。
砂轮磨损和弹性变形造成的螺距误差	在磨削过程中，由于砂轮存在磨损，那么实际进给量就会低于理论进给量。
热变形引起的螺距误差	滚珠丝杠在磨削过程中的热误差主要包括机床本身运动件接触摩擦发热引起的热变形误差、砂轮磨削过程中产生的磨削热引起的工件变形误差。虽然在加工过程中会使用冷却液，但是仍会有大量磨削热通过螺旋线传入工件，尤其是高精度丝杠的磨削加工过程中发生的热变形是不容忽视的。

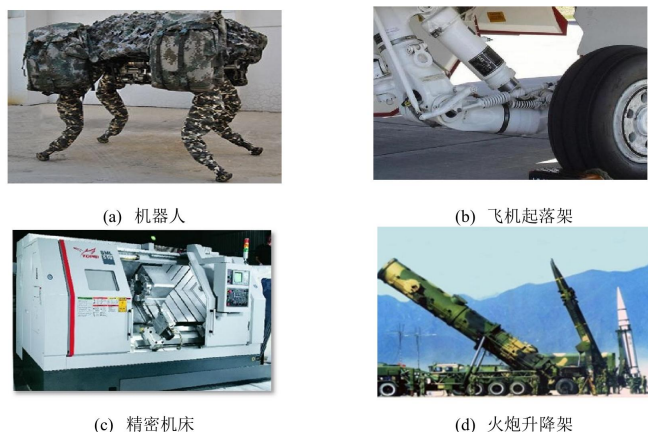
资料来源：《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》，华金证券研究所

（三）瑞士 Rollvis 全球市占率 40%，国内处于起步阶段

¹⁰ 《精密滚珠丝杠磨削加工精度及其测试方法研究_牛星》

Rollvis 公司在行星滚柱丝杠市占近 40%，国内起步较晚以国防领域为主。根据中船重工智海创新中心，国外已有多家公司具备制造多种结构形式行星滚柱丝杠的能力，如德国 LTK，瑞士 Rollvis，英国 Power Jacks、瑞典 SKF、美国 Moog 和 Exlar 以及日本 NSK 等。其中瑞士 Rollvis 是世界上著名的行星滚柱丝杠专业生产厂家，该公司市场占有率近 40%。根据《行星滚柱丝杠电动缸应用现状_邓琦》，国内行星滚柱丝杠电动缸的应用刚刚起步不久，应用领域主要集中在国防、汽车和冶金等领域。国防工业方面，主要应用在航天飞行器姿态控制、导弹发射架姿态控制、坦克炮杆随动系统和起落架收放等方面。

图 16：行星滚柱丝杠应用领域



资料来源：《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究_杜兴》，华金证券研究所

图 17：战斗机起落架-电动作动器

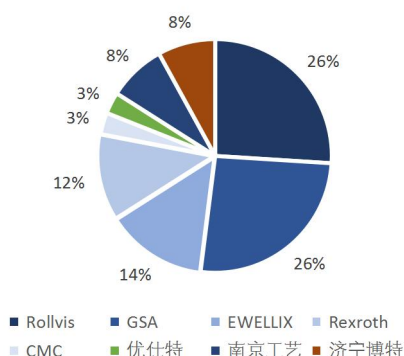


资料来源：《行星滚柱丝杠电动缸应用现状_邓琦》，华金证券研究所

国内市场集中度高，原材料成本约 60%。目前国内市场中，EWELLIX、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。EWELLIX 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%。2022 年 EWELLIX 产能 2.5 万根，产能利用率 85%。

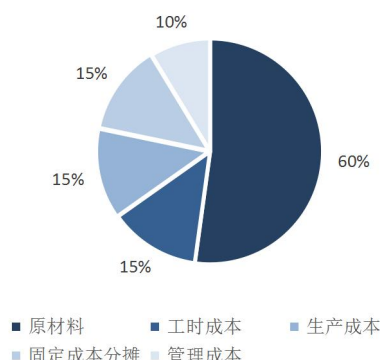
11

图 18：滚柱丝杠国内市场份额（2022 年预测）



资料来源：《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究_王有雪》，华金证券研究所

图 19：EWELLIX 行星滚柱丝杠成本构成



资料来源：《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究_王有雪》，华金证券研究所

磨制生产效率低，扩大产能需投入更多设备和人员。研磨工艺下，由于滚柱丝杠上的每一个螺纹都需要具有高导程精度，同时精度的一致性要求高，致使生产一根合格的丝杠往往需要几天

11 《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究_王有雪》

的时间。这意味着如果需要扩大产能，就必须投入更多的机器设备。目前滚柱丝杠的加工还无法实现自动化，如果扩大产能也就必须同时增加必要的生产人员。由于轧制丝杠的制造成本低于研磨丝杠，Rexroth 在国内的售价也比 EWELLIX 低 10%-20% 左右的水平。

表 6：各品牌行星滚柱丝杠产品介绍

品牌	制造工艺	尺寸系列	产品应用	价格水平
EWELLIX	研磨	齐全	工业	标准
Rollvis	研磨	齐全	军工和工业	低 10%-15%
GSA	研磨	齐全	军工和工业	低 20%-25%
Rexroth	轧制	较齐全	工业	低 10%-20%

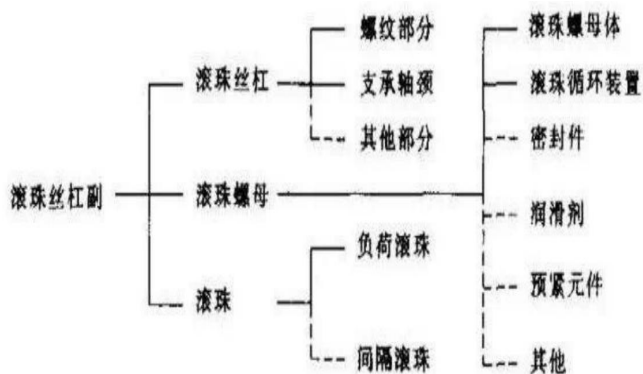
资料来源：《E 公司滚柱丝杠产品营销策略研究_王有雪》，华金证券研究所

二、行星滚柱丝杠性能优势显著，为 Optimus 直线关节方案

（一）滚珠丝杠与行星滚柱丝杠结构类似，部分设备工艺通用

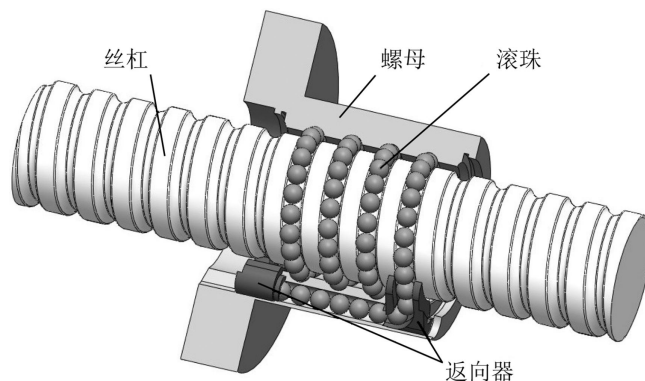
滚珠丝杠由螺杆、螺母、钢球、预压片、反向器、防尘器组成。是工具机械和精密机械上最常用的传动元件，是将回转运动转化为直线运动，或将直线运动转化为回转运动的理想的产品，同时兼具高精度、可逆性和高效率的特点。由于具有很小的摩擦阻力，滚珠丝杠被广泛应用于各种工业设备和精密仪器。

图 20：滚珠丝杠副构成



资料来源：中捷众创，华金证券研究所

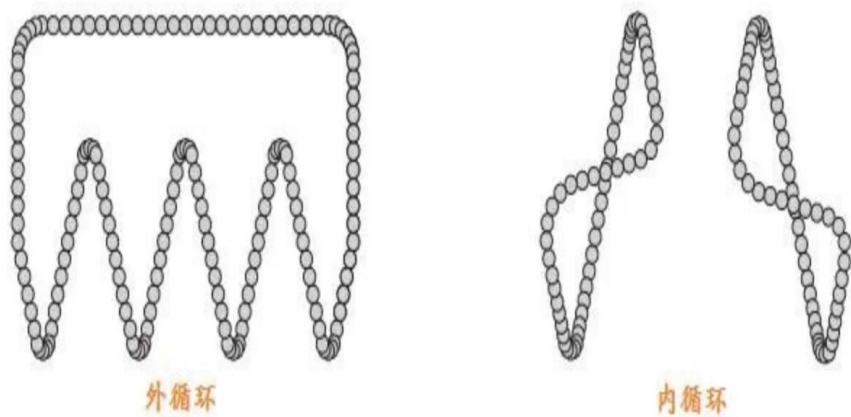
图 21：滚珠丝杠示意图



资料来源：《滚珠丝杠副发展及研究现状_汤文成等》，华金证券研究所

滚柱丝杠磨制精度和成本高，轧制精度和成本较低。根据中捷众创公司官网公众号，滚珠丝杠根据精度等级分为：轧制和研磨级丝杠，轧制丝杠的精度相对低一点，适用于精度要求不是很高的场合；而研磨级丝杠，精度比较高，适合精度要求高的场合。根据螺母中的滚珠循环方式，可以分为外循环、内循环、端盖式。端盖式是比较早期的结构，缺点比较明显，现在应用较少。

图 22：滚珠丝杠螺母中的滚珠循环方式



资料来源：中捷众创，华金证券研究所

根据中捷众创公司官网公众号，滚珠丝杠选型包括：**1、丝杆轴径 2、导程 3、精度 4、预压等级**。丝杠选型过程，首先根据应用场景选择合适的丝杠类型，确定精度等级和预压等级。然后根据负载的大小，确定滚珠丝杆的轴径。第三步根据负载需要的移动速度，确定导程，最后确定导程之后，再根据推力和导程的关系式，确定驱动电机要提供的转矩。

表 7：滚珠丝杠选型指标

滚珠丝杠选型指标	说明
丝杆轴径	常见的规格有（单位：mm）：8、10、12、14、15、20、25、32。一般是轴径越大，负载越大。
导程	导程指的是丝杆旋转一周，螺母直线运动的距离。常见的导程有（单位：mm）：2、4、5、8、10、20、25、32。
精度	丝杠精度按国内等级划分有 P1、P2、P3、P4、P5、P7、P10，日本、韩国采用 JIS 等级，即 C0、C1、C2、C3、C5、C7、C10，依次递减。一般普通机械采用 C7、C10 级，数控设备一般采用 C5、C3 级。航空制造设备等精密设备采用 C3、C2 精度。C7、C10 级一般采用轧制方法制造，C5 级及以上采用研磨方法制造。
预压等级	预压等级越高，螺母与螺杆配合越紧；反之，等级越低越松

资料来源：中捷众创，华金证券研究所

根据 HIWIN 上银，滚珠丝杆精度参数表示主要是 2 个，1.任意取有效螺纹 300mm 的最大幅度导程误差容许值。2.一般则是用丝杆螺纹长度内任取 300mm 的累积导程误差。

图 23：滚珠丝杠精度等级（单位：0.001mm）

等级		研磨级									
		C0					转造级				
		C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C10
V ₃₀₀	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：HIWIN 上银，华金证券研究所

图 24：各种机械适应的精度等级

用 途		轴 别	精密等级										
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C N C 工 具 机	车床	X	●		●	●	●	●					
		Z				●	●	●					
	铣床、镗床	X		●	●	●	●	●					
		Y		●	●	●	●	●					
	综合加工机	Z			●	●	●	●	●				
		X		●	●	●	●	●					
	治具镗床	Y		●	●	●	●	●					
		Z	●	●									
	钻床	X				●	●	●					
		Y				●	●	●					
	磨床	Z					●	●	●	●			
		X	●	●	●								
	放电加工机	Y		●	●	●	●	●					
		Z		●	●	●	●	●					
	线切割机	X		●	●	●	●	●					
		Y		●	●	●	●	●					
	镭射加工机	U		●	●	●	●	●					
		V		●	●	●	●	●					
	高速冲床	X			●	●	●	●					
		Y			●	●	●	●					
一 般 机 械	专用机			●	●	●	●	●					
	木工机								●	●	●	●	●
	机械手臂(精密级)			●	●	●	●	●					
	机械手臂(一般级)								●	●	●	●	●
	三次元量测机		●	●	●								
	传统机械					●	●	●					
	搬送装置						●	●	●	●	●	●	●
	X-Y 平台			●	●	●	●	●					
	线性制动器							●	●	●	●	●	●
	航空负载齿轮							●	●	●	●	●	●
	翼面控制器							●	●	●	●	●	●
	阀门								●	●	●	●	●
	动力转向器								●	●	●	●	●
	玻璃研磨机				●	●	●	●					
	表面研磨机						●	●					
	感应热处理								●	●	●	●	●
	半导体设备			●	●	●	●	●					
	全电式射出成型机								●	●	●	●	●

资料来源：HIWIN 上银，华金证券研究所

磨制滚柱丝杠精度高达到 P1 级，非常适合给高精度设备做定位部件。冷轧滚珠丝杠生产效率，但精度低，总停留在 P7 级左右，只能在设备中做传动部件。根据创威达公司官网，轧制滚珠丝杆交货期快捷。研磨滚珠丝杆特点是加工精度高，交货期缓慢，同品牌相比较，比轧制丝杠单价高。¹²

表 8：轧制滚珠丝杠和磨制滚珠丝杠对比

	轧制滚珠丝杠	磨制滚珠丝杠
精度等级	C7,C8,C10（德国力士乐可以达到 C5）	C0,C1,C2,C3,C4,C5
导程误差	0.05mm	4-23 μm
轴向间隙	0.05-0.17mm（根据直径变化），可以预紧减少间隙	0.01-0.03mm（根据直径变化），可以预紧减少间隙
直径范围	12-50mm	6-150mm
导程范围	4-40mm	4-40mm
DN 值（丝杠直径 x 输入转速）	小于 50000	小于 70000，重载达到 130000
噪音指标	高，适合低速转动	低，适合中高速转动
输入转速	低于 900rpm 为佳	比轧制提高 30%
交货期	2 周，不能非标制造螺母，否则交货期长	较长

资料来源：创威达公司官网，华金证券研究所

¹² 《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究_郑红》

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。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。¹³

表 9：磨削滚珠丝杠机械加工工艺过程

序号	工艺内容	备注	序号	工艺内容	备注
1	下料	GCr15	12	粗磨 90°v 形槽	两顶尖
2	球化退火热处理并检验校直	降低硬度	13	磁力探伤	
3	加工端面，钻中心孔		14	时效处理并检验	去应力
4	粗车		15	研磨中心孔	
5	高温时效并检验	去应力	16	半精磨滚道	两顶尖
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	两顶尖	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	两顶尖
11	研磨中心孔		22	装配——跑合——检验——防锈包装——检验——入库	
备注	磨制滚珠丝杠的加工工艺周期约为 30-45 天，周期长，效率低，成本高。				

资料来源：《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究_郑红》，华金证券研究所

表 10：冷轧滚珠丝杠机械加工工艺过程

序号	工艺内容	备注	序号	工艺内容	备注
1	轧制滚珠丝杠	GCr15	4	滚道抛光	——
2	检验校直	——	5	加工轴端	——
3	端部退火	降低硬度	6	装配——跑合——检验-防锈包装——检验——入库	——
备注	轧制滚珠丝杠的加工工艺周期约为 1-3 天，周期短，效率高，成本低。				

资料来源：《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究_郑红》，华金证券研究所

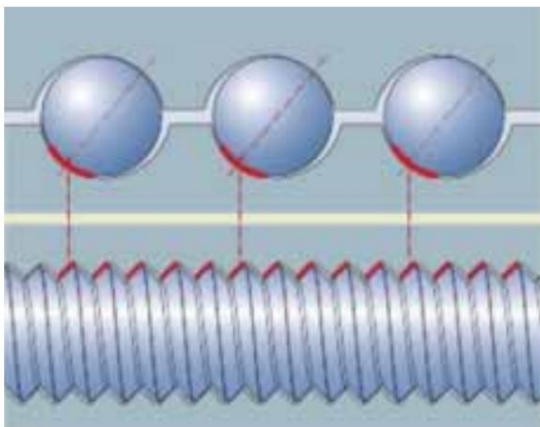
（二）行星滚柱丝杠核心优势是高承载，高承载带来一系列优势

行星滚柱丝杠在承载、刚度、精度、小型化方面均优于滚珠丝杠。由于螺纹传动结构的存在，使得行星滚柱丝杠副具备以下优势。(1) 高承载能力、高刚度。安装空间相同时，滚珠丝杠副由于滚珠直径的限制，滚珠与丝杠滚道之间的啮合点数量远小于行星滚柱丝杠副中滚柱螺纹与丝杠

¹³ 《精密滚珠丝杠机械加工工艺规程研究_郑红》

螺纹间的啮合点数量，而啮合点数量增多会使得丝杠副承载能力变强。(2) 实现小导程精密传动。(3) 所需工作空间小。¹⁴

图 25：行星滚柱丝杠和滚珠丝杠受力承载面积比较



资料来源：《行星滚柱丝杠副小螺距螺纹数控磨削工艺研究_董超》，华金证券研究所

行星滚柱丝杠具备多副、多体、多点优势，性能优于滚珠丝杠等一系列传动装置。相比于传统的滚珠丝杠传动，行星滚柱丝杠传动呈现多副(螺纹副和齿轮副)、多体(多个零件参与啮合传递运动和动力)、多点(螺纹副多点接触)的啮合特征，故在相同丝杠直径下，行星滚柱丝杠比滚珠丝杠的承载能力提高 6 倍，相同负载下节省 1/3 空间，寿命提高 14 倍，工作环境温度范围提高 2 倍。采用行星滚柱丝杠作为传动机构的 EMA 与采用滚珠丝杠的 EMA 相比，相同推力下重量减少 30%，相同重量下推力提升 50%。根据亿诚欧特官网，标准滚柱丝杠驱动可实现超过 130 吨力的动态负载能力（单驱动能力超过液压缸）。¹⁵

表 11：行星滚柱丝杠和滚珠丝杠比较

	相对承载能力	相对旋转速度	相对寿命	导程	滚珠/滚柱受力状态	离心力
滚珠丝杠	1	1	1	受滚珠直径限制大于 0.5mm	受载面积小轮流受载	高速转动产生较大离心力
行星滚柱丝杠	≥3	2	15	可小于 0.5mm 或更小	受载面积大同时受载	行星机构阻止离心力

资料来源：《行星滚柱丝杠副滚柱塑性成形的探讨_张大伟等》，华金证券研究所

表 12：各类传动产品性能对比

	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

¹⁴ 《行星滚柱丝杠副小螺距螺纹数控磨削工艺研究_董超》

¹⁵ 《行星滚柱丝杠传动啮合原理_刘更》

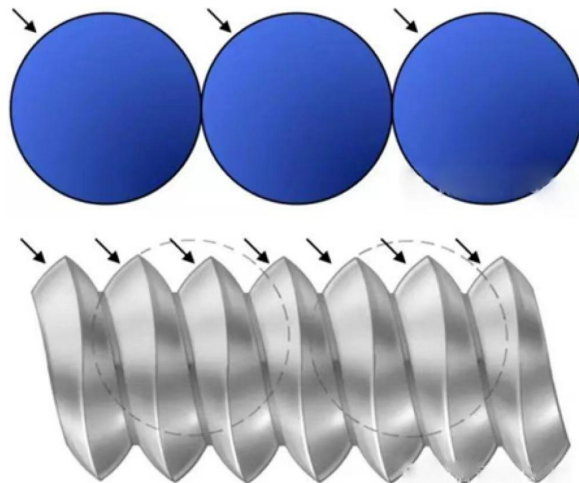
相对体积	小	大	大	大	中等	小
摩擦	小	中等	小	小	小	小
效率	——	中等	中等	很高	很高	较高
安装	简单	复杂	复杂	简单	简单	简单

资料来源：《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究_杜兴》，华金证券研究所

（三）加工精度主要影响寿命，疲劳破坏主要在滚柱

丝杠寿命与额定载荷正相关，与实际工作载荷、转速负相关。根据勃曼工业官网，滚珠丝杠寿命计算公式为： $L_{10} = (C/P)^3 \times [1/(60 \times n)] \times 10^6$ 其中， L_{10} 为滚珠丝杠的寿命，单位为米； C 为额定基本动载荷，单位为牛顿（N）； P 为实际工作载荷，单位为牛顿（N）； n 为转速，单位为转每分钟（RPM）。根据天誉科技官网，单螺母行星滚柱丝杠理论寿命为 $L_{10} = (C/F)^3 \times 10^6$ ， C 为额定动载， F 为单螺母含齿隙的加权平均负载，单位均为 N， L_{10} 为理论寿命的转数。

图 26：滚珠丝杠和滚柱丝杠受力示意图



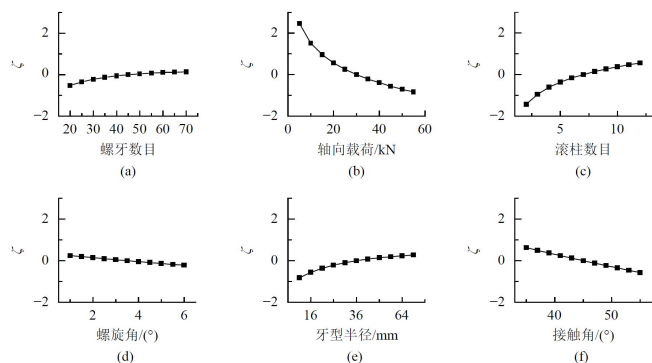
资料来源：上海诣儒信息科技有限公司，华金证券研究所

加工精度差会导致载荷分布不均，进而导致寿命降低，其中主要发生在滚柱上。由于反向式行星滚柱丝杠（IPRS）上所有螺纹同时参与啮合，接触点多，在承受轴向载荷时会产生载荷分布不均的问题。当 IPRS 载荷分布不均现象严重时，会导致其传动精度及使用寿命大大降低。IPRS 的失效形式分为 3 种：偶然失效，磨损失效及疲劳失效。在润滑良好的情况下，接触表面疲劳失效是机构失效的主要原因。从断裂力学的角度来看，表面疲劳破坏通常经历裂纹萌生和裂纹拓展两个阶段。通常裂纹的萌生寿命是构成接触面全寿命的主要部分。IPRS 的接触疲劳破坏主要发生在滚柱上，其次发生在丝杠上。¹⁶

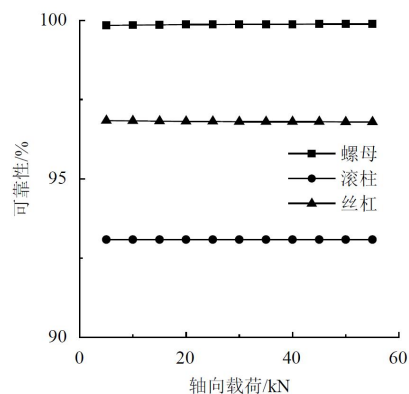
图 27：各参数对接触疲劳寿命的影响

图 28：丝杠、螺母及滚柱的可靠性

16 《反向式行星滚柱丝杠承载分布及寿命分析_殷国富等》



资料来源：《反向式行星滚柱丝杠承载分布及寿命分析_殷国富等》，华金证券研究所



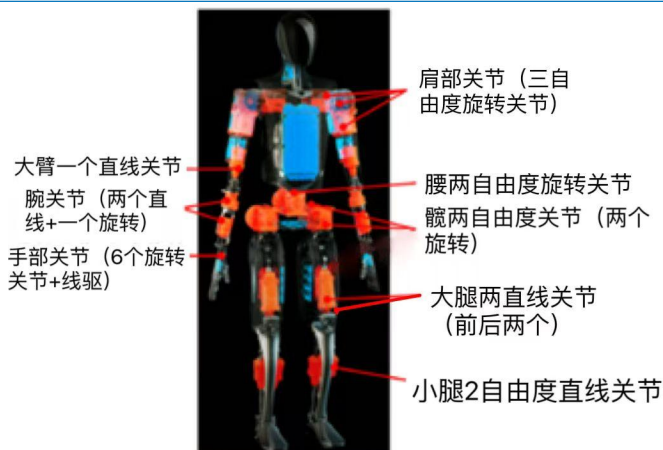
资料来源：《反向式行星滚柱丝杠承载分布及寿命分析_殷国富等》，华金证券研究所

(四) Optimus 直线关节为反式行星滚柱丝杠，核心优势是小型化

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。每个关节对应一个执行器，此外手部有 **12** 个执行器。根据 2022 年特斯拉 AI Day 直播显示，我们对 28 个执行器位置和数量进行预计，大臂关节相当于“肱二头肌”，共 2 个，腕关节共 4 个，每条大腿前后侧各一个，共 4 个，每个小腿各 2 个，共 4 个。机器人能拿起约 9 公斤重物，可以使用工具，实现精准抓取小部件。

图 29: Optimus 躯干共 28 个关节

图 30: Optimus 手部有 6 个执行器



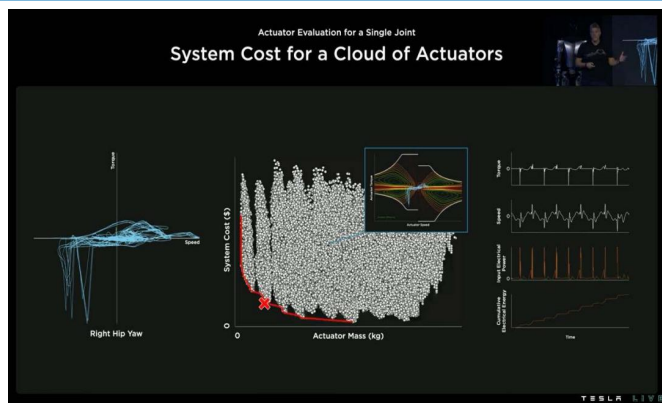
资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所整理



资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所整理

通过仿真模拟，考虑成本和重量两个因素，选出每个关节执行器最优解。根据 2022 年特斯拉 AI Day 直播显示，在设计关节驱动器时，最重要的事情就是确定驱动器的工作范围。首先对于机器人的工况做了假设，针对这些工况进行了仿真，在仿真中模拟出了机器人在各种情景下关节的输出力矩。之后将输出力矩投影到了关节驱动器的效率图中，采用的是市面上可以买的标准品电机+减速机，之后根据不同的电机和不同减速比减速机组合，最终组合出十几万种结果，红色的曲线就是系统成本和重量的最优曲线，再选出最合适的电机与减速比方案。之后将全身所有关节都做这样的分析，可以得到全身关节的最优组合。

图 31：考虑成本和重量选出最优执行器



资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所

图 32：28 个关节选出各自最优执行器



资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所

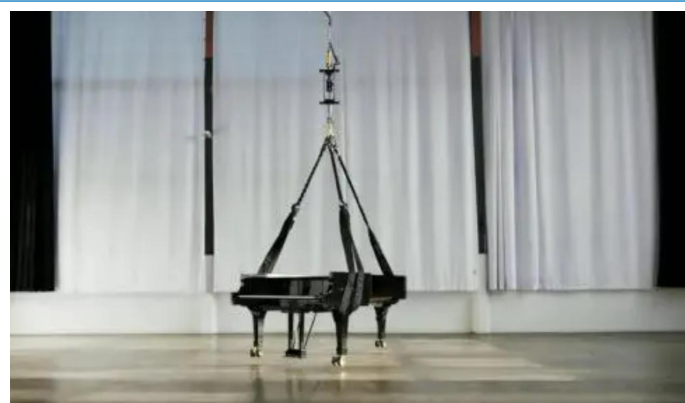
从局部最优进一步到整体最优，28 个躯干关节最终选出 6 款执行器。为了降低生产成本，对执行器数量进行了精简，即从局部的成本与重量最优，到全身的成本与重量最优。最终特斯拉选择出了三款旋转关节，三款直线关节，旋转关节的扭矩为 20、110、180Nm，直线关节的推力为 500、3900、8000N，其中最大的线性执行器可平稳吊起半吨重的钢琴。

图 33：Optimus 躯干用到共 6 个关节执行器



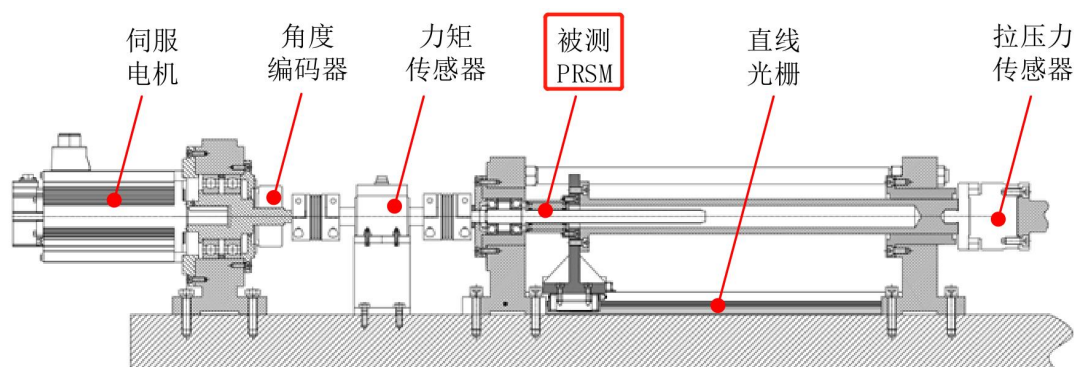
资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所

图 34：Optimus 线性执行器吊起半吨重钢琴



资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所

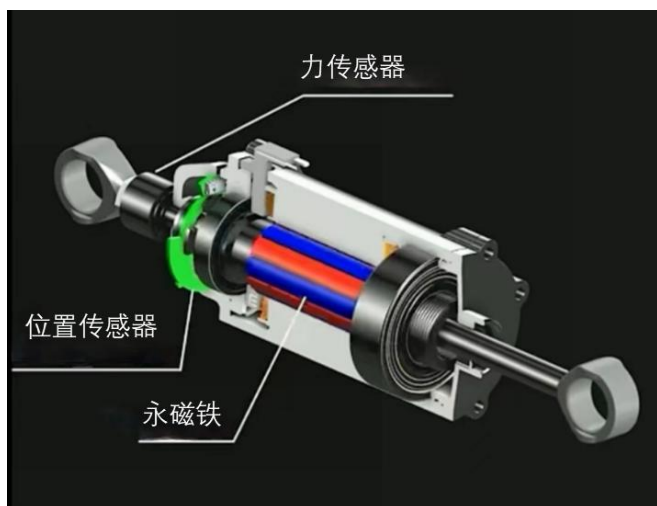
图 35：行星滚柱丝杠直线执行器示意图



资料来源：《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究_杜兴》，华金证券研究所

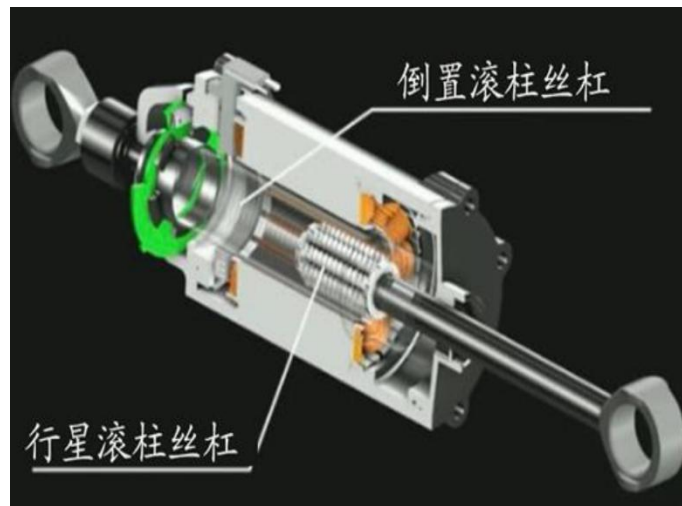
直线关节采用倒置行星滚柱丝杠，满足高承载、小型化需求。在高速端，直线关节部分采用了内转子电机和普通的球轴承。在低速端，直线关节部分采用了倒置行星滚柱丝杠，相比于传统的滚珠丝杠，可以承受更大的负载，相比于正置的行星滚柱丝杠优势是小型化。在传感器方面，关节在高速端和低速端都配备了位置传感器以及力和力矩传感器。

图 36: Optimus 直线关节传感器



资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所整理

图 37: Optimus 直线关节采用行星滚柱丝杠

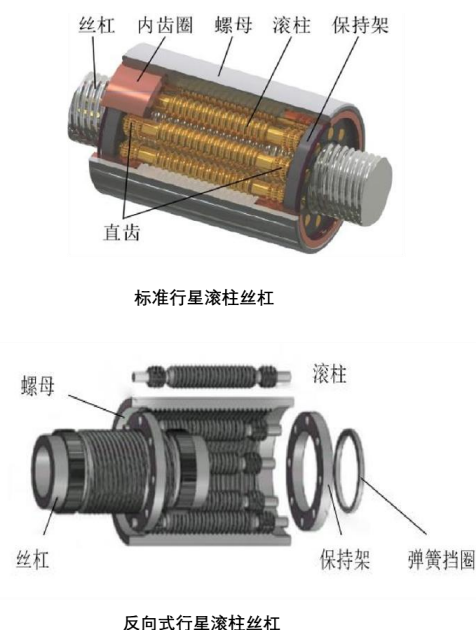


资料来源：特斯拉 2022 年 AI Day，华金证券研究所整理

根据方元明科技公司官网，行星滚柱丝杠电动缸的体积和重量仍然无法和传统的液压缸和气缸比较，原因在于其仍然需要“背”着伺服电机来驱动丝杠。从内到外的结构是：螺纹—滚柱组—套筒滑块。如果将这个结构顺序反过来，从内到外为：推杆滑块—滚柱组—螺纹，这就是反置式行星滚柱丝杠。

螺母反置式行星滚柱丝杠的推杆是通过外部的内螺纹套筒旋转驱动的，所以只要能够让套筒旋转就可以推动推杆的直线运动。只需要将套筒外部贴上永磁体，即可让内螺纹套筒作为伺服电机的转子，在定子线圈的磁场作用下，就可以让套筒旋转了，省去了原来在伺服电机和缸体之间的传动机构，提升了传动效率的同时，还极大地减少了电缸的体积和重量，但价格和质量要求也更高。

图 38：标准型和反向式行星滚柱丝杠对比



资料来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计_柯浩》，华金证券研究所

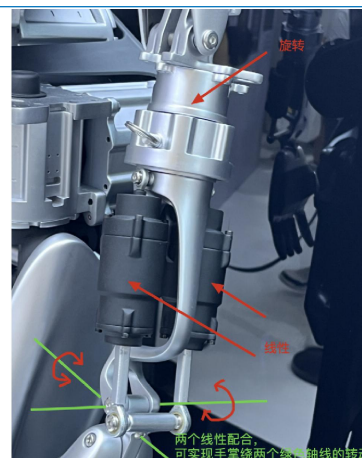
根据不同关节承载力需求和体积大小，特斯拉小、中、大三种型号线性执行器中，我们预计大腿 4 个为大型号，大臂为 2 个中型号，小腿和腕部共 8 个小型号。

图 39：Optimus 大臂执行器



资料来源：2023 世界人工智能大会（禹合资产整理图片），华金证券研究所

图 40：Optimus 腕部执行器



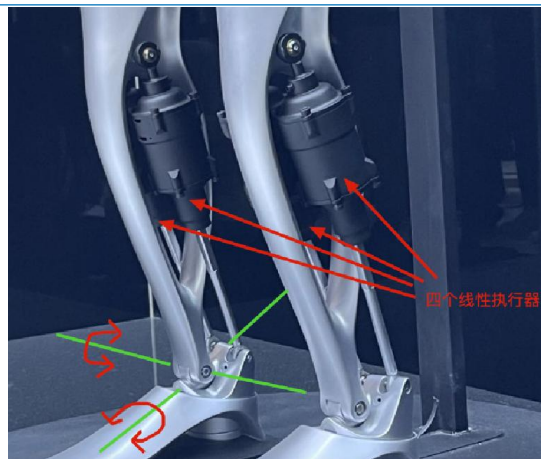
资料来源：2023 世界人工智能大会（禹合资产整理图片），华金证券研究所

图 41: Optimus 大腿执行器



资料来源: 2023 世界人工智能大会 (禹合资产整理图片), 华金证券研究所

图 42: Optimus 小腿执行器



资料来源: 2023 世界人工智能大会 (禹合资产整理图片), 华金证券研究所

三、投资建议

根据特斯拉 2022 年 AI Day, 我们推测 Optimus 中共用到 14 个线性执行器, 均采用倒置行星滚柱丝杠。当前行星滚柱丝杠单价约 2 万元, 倒置的工艺更复杂, 价值量更高, 因此不考虑量产后降本因素, 行星滚柱丝杠在单台机器人价值量近 30 万元。由于工艺复杂, 国内行星滚柱丝杠执行器的应用起步不久, 主要集中在德国 LTK、瑞士 Rollvis、瑞典 SKF 等公司, 其中 Rollvis 全球市占率达 40%。目前滚柱丝杠的加工还无法实现自动化, 扩大产能就必须同时增加必要的生产人员, 欧洲高昂的人力成本、俄乌冲突带来的能源危机等问题下, 欧洲有色金属协会甚至提出欧洲面临“永久去工业化”的风险, 我们认为欧洲厂商很难成为特斯拉长期大批量生产零部件的选择。

我们认为特斯拉在选择行星滚柱丝杠厂商时可能的要求: 1) 能够突破技术壁垒, 实现应用 2) 长期具有大幅降低成本的可能 3) 具备大规模量产的能力 4) 初期降低性能要求, 逐步优化迭代。由于行星滚柱丝杠原有市场小, 壁垒高, 生产此类产品的性价比较低, 因此国内厂商在行星滚柱丝杠领域起步较晚。而特斯拉 Optimus 为代表的人形机器人将带来较大增量, 国内多家厂商现已开始布局, 我们认为相关厂商有望长期受益。

(一) 恒力液压: 21 年定增布局线性驱动器, 兼具滚珠丝杠与行星滚柱丝杠

2021 年 9 月公司发布非公开发行股票预案, 恒立墨西哥项目、线性驱动器项目、通用液压泵技改项目等项目, 22 年底募集资金 20 亿元, 截至公司 2022 年年报, 项目均在稳步推进中。

表 13：恒力液压募投项目介绍

项目名称	拟投入募集资金（亿元）	项目内容	进展（截至 22 年报）	未来规划
恒立墨西哥项目	2.50	达产后将形成工程机械用油缸 20 万根、延伸缸和其他特种油缸 6.27 万根以及液压泵和马达 15 万台的生产能力	处于基建之中	预计厂房于 2023 年 5 月交付使用，2023 年第四季度投产
线性驱动器项目	14.00	达产后将形成年产 10.4 万根标准滚珠丝杆电动缸、4500 根重载滚珠丝杆电动缸、750 根行星滚柱丝杆电动缸、10 万米标准滚珠丝杆和 10 万米重载滚珠丝杆的生产能力	处于基建之中	预计 2024 年第一季度投产
恒立国际研发中心项目	0.00	集研发创新、小批量试验制造、产品性能检测为一体的研发基地	处于前期设计阶段	预计 2024 年第四季度完工并投入使用
通用液压泵技改项目	0.00	达产后企业原有年产 9000 台通用液压泵的产能将扩至年产 7 万台	处于建设之中	预计 2023 年第四季度投产
超大重型油缸项目	1.00	达产后将形成年产 2800 吨非标定制超大重型油缸的生产能力	处于基建之中	预计 2023 年第四季度投产

资料来源：恒力液压公司公告，华金证券研究所

（二）秦川机床：滚珠丝杠已量产，行星滚柱丝杠的“卖铲人”

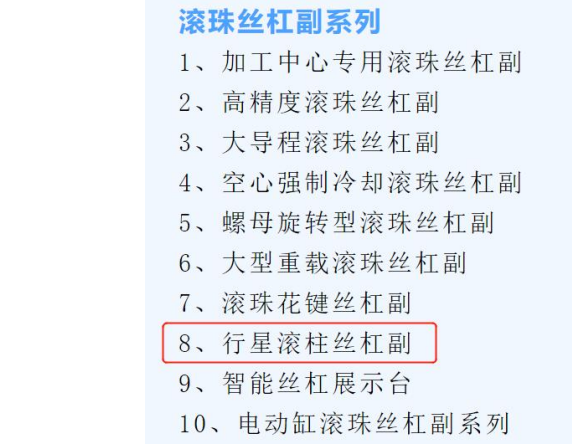
公司精密磨床包括螺纹磨床、蜗杆磨床、外圆磨床等，其中螺纹磨床可用于滚珠丝杠副、螺杆副、精密蜗杆等产品的加工，多项产品填补了国内空白，磨削精度可稳定达到 P1 级。秦川机床所属汉江机床生产 2 级、3 级精度的滚珠丝杠、直线导轨，有较高的精度保持性，完全可以满足中高档数控机床的要求，其滚动功能部件包括高精度滚珠丝杠副、行星滚柱丝杠副等近十种产品。近年来公司通过自主研发及制造，对螺纹磨床系列产品的高效升级改造，公司丝杠产品精加工水平得到有效的改善，丝杠产品由 P1 级提升到 P0 级，精度水平达到国际先进水平。子公司汉江机床的丝杠产品精加工全部为其自主研发制造的螺纹磨床。

图 43：汉江机床高精度磨床介绍



资料来源：汉江机床官方公众号，华金证券研究所

图 44：汉江机床滚珠丝杠副系列产品



资料来源：汉江机床官方公众号，华金证券研究所

（三）鼎智科技：微型行星滚柱丝杆里程碑式达成，线性执行器市占率全球第二

公司线性传动产品包括滑动丝杆、滚动丝杆，行星滚柱丝杆。公司在微型行星滚柱丝杆的研发与生产上已有里程碑式达成。在线性执行器方向公司最主要的竞争对手是美国海顿科克，目前公司在全球市场占有率排名第二，在国内市占率已经超过对方成为第一。公司的丝杆螺母目前完全自主生产，包括设计、工艺、模具、注塑等。

对于高效率、高精度、更长寿命的应用场合，鼎智可以根据客户能接受的合理费用为电机选配不同规格的滚珠丝杆，C7 是标准精度等级，有 C5/C3 精度等级可选。

图 45：鼎智科技滑动丝杆线性执行器



资料来源：鼎智科技官网，华金证券研究所

图 46：鼎智科技滚珠丝杠线性执行器



资料来源：鼎智科技官网，华金证券研究所

（四）贝斯特：特斯拉汽车供应商，已布局高精度滚珠丝杠

公司表示于 2020 年 2 月份正式取得特斯拉供应商代码，成为特斯拉合格供应商，且双方已签订相应的《汽车零部件产品及服务框架合同》，公司向特斯拉供货的产品为部分汽车零部件精密小件。

宇华精机成立于 2022 年初，是贝斯特全资子公司，其承载了落实公司“高端装备核心滚动功能部件研发及产业化项目”的战略使命，该项目将引进生产及检测等进口设备约 300 台套（其中研发设备 70 台），配套软件及系统、公辅设施等 30 余套。项目建成后，主营产品包括高精度滚珠丝杠副、高精度滚动导轨副等，将瞄准高端机床领域、半导体装备产业、自动化产业三大市场进行大力开拓。

（五）长盛轴承：特斯拉二级供应商，具备人形机器人滚珠丝杠生产能力

根据公司投资者关系活动记录表，公司滚珠丝杠产品主要应用于商用车变速箱，乘用车制动、转向及驻车系统，暂未应用在人形机器人上，但具备相关的生产能力，将把开发机器人市场提到重要工作日程上。2022 年 9 月，公司发布定增预案，拟募集资金不超过 4.46 亿元，其中包括扩建年产自润滑轴承 1.67 亿套、滚珠丝杠 3 万套项目。

公司在互动易表示公司产品已在工业减速器中广泛应用，了解到滑动轴承产品在人形机器人的精密减速器中的应用机会，计划开发对应的产品以拓展相关业务。

四、风险提示

1、人形机器人发展进度不及预期风险：人形机器人作为一种新兴前沿科技，当前处于发展初期阶段，后续可能有发展不及预期的风险。

2、人形机器人需求不及预期风险：人形机器人作为一种新兴产物，下游各个场景需求的确定性尚未得到验证，存在需求量不及预期的风险。

3、产能不及预期风险：人形机器人大规模放量需要产业链各个环节具备相应产能，可能存在部分环节产能不足的风险。

行业评级体系

收益评级：

领先大市—未来 6 个月的投资收益率领先沪深 300 指数 10%以上；

同步大市—未来 6 个月的投资收益率与沪深 300 指数的变动幅度相差-10%至 10%；

落后大市—未来 6 个月的投资收益率落后沪深 300 指数 10%以上；

风险评级：

A —正常风险，未来 6 个月投资收益率的波动小于等于沪深 300 指数波动；

B —较高风险，未来 6 个月投资收益率的波动大于沪深 300 指数波动；

分析师声明

刘荆声明，本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，勤勉尽责、诚实守信。本人对本报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规、研究方法专业审慎、研究观点独立公正、分析结论具有合理依据，特此声明。

本公司具备证券投资咨询业务资格的说明

华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司及其投资咨询人员可以为证券投资人或客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或间接的有偿咨询服务。发布证券研究报告，是证券投资咨询业务的一种基本形式，本公司可以对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向本公司的客户发布。

免责声明：

华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因为任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但本公司不保证该等信息及资料的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映本公司于本报告发布当日的判断，本报告中的证券或投资标的价格、价值及投资带来的收入可能会波动。在不同时期，本公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，本公司将随时补充、更新和修订有关信息及资料，但不保证及时公开发布。同时，本公司有权对本报告所含信息在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以本公司向客户发布的本报告完整版本为准。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务，提请客户充分注意。客户不应将本报告为作出其投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代客户自身的投资判断与决策。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，无论是否已经明示或暗示，本报告不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证。在任何情况下，本公司亦不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、转发、篡改或引用本报告的任何部分。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“华金证券股份有限公司研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

华金证券股份有限公司对本声明条款具有惟一修改权和最终解释权。

风险提示：

报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价或询价。投资者对其投资行为负完全责任，我公司及其雇员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。

华金证券股份有限公司

办公地址：

上海市浦东新区杨高南路 759 号陆家嘴世纪金融广场 30 层

北京市朝阳区建国路 108 号横琴人寿大厦 17 层

深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 10 楼 05 单元

电话：021-20655588

网址： www.huajinsec.cn