

2023 年 07 月 1 日  
机械

ESSENCE

行业专题

证券研究报告

# 紧扣产业链安全，滚动功能部件国产化势在必行——机器人系列报告五

投资评级 **领先大市-A**  
维持评级

**研究背景：**《中国制造 2025》即提出要加快高档数控机床、机器人等领域的主要功能部件的产业化以及加快关键零部件的突破；在外部宏观环境不确定性因素增加背景下，党的二十大报告指出，“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”，其中要求聚焦被“卡脖子”的关键行业、核心技术，围绕核心基础零部件与基础制造工艺等，在关系国家安全的领域和节点确保自主可控。围绕 2023 年“内需+安全”的投资主线，我们注意到，以滚珠丝杠副为核心的滚动功能部件成为机械、汽车等多领域产业链上游企业布局中长期发展的关键新产品，同时以人形机器人为代表的新应用场景的出现，也引发了市场对上游关键零部件国产替代的关注。我们希望通过本文对滚动功能部件的原理、制造、应用做出详实介绍，为认识产业链未来发展趋势和竞争格局提供参考意义；同时本文亮点也在于，通过对比海外龙头制造商，希望能深入了解滚珠丝杠国产替代过程中的潜在挑战，并筛选出具备投资价值的优质国产制造企业。

**中国滚动功能部件市场规模约 330 亿元，新兴应用打开成长空间。**由两套直线导轨副和一套滚珠丝杠副组合而成的滚动功能部件是一种将旋转运动与直线运动进行双向转换的传动装置，在高速、高效率、高精度方面满足现代机械传动需求，被广泛应用于机床、工业（自动化+专用设备）、航空航天、医疗、汽车等领域。根据金属加工杂志社，2022 年预计我国滚动功能部件市场规模 330 亿，至 2025 年有望增长至 462 亿，CAGR 达 12.4%，粗略估计滚动功能部件在泛工业制造中的应用约占总需求的 70%，同时新兴应用场景的持续出现也推动了其需求的不断扩张，例如注塑机、压力机、工程机械等领域的电动化趋势，以及人形机器人商业化前景下的供应链产品升级。

**在高端应用市场仍被外资垄断的格局下，国产制造商或将在材料、设备、生产三个维度寻求国产替代突破：**滚珠丝杠制造属于技术密集型、资金密集型精密加工产业，壁垒较高。根据金属加工杂志社，在国内中、高端市场如 CNC 机床、印刷机、精密机器人等领域，外资品牌分别占据 30%、90% 的市场份额。对比海外龙头，国产替代的挑战或从以下三个维度分析：

## 行业表现



资料来源：Wind 资讯

| 升幅%  | 1M  | 3M  | 12M  |
|------|-----|-----|------|
| 相对收益 | 4.4 | 7.3 | 13.7 |
| 绝对收益 | 4.2 | 3.4 | -0.8 |

郭倩倩 分析师

SAC 执业证书编号：S1450521120004

guoqq@essence.com.cn

高杨洋 分析师

SAC 执业证书编号：S1450523030001

gaoyy3@essence.com.cn

## 相关报告

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 行业景气度分化，国企板块表现亮眼——机械行业 2022 年报及 2023 年一季报总结           | 2023-05-16 |
| 工业机器人行业筑底阶段，关注盈利能力改善——工业机器人板块 2022 年报及 2023Q1 财报总结    | 2023-05-15 |
| 行业需求筑底，板块业绩边际好转——工程机械 2022 年报及 2023 一季报总结             | 2023-05-08 |
| 整体进入估值快速消化期，新技术方向报表端延迟反映——光伏设备板块 2022 年报及 2023Q1 财报总结 | 2023-05-08 |
| 增速高位回落，盈利能力持续改善，看好锂电低渗透率                              | 2023-05-07 |

三大方向——锂电设备  
2022 年报及 2023 年一季报  
综述

①**材料端**：微量元素配方是行业壁垒之一，国产制造商和原材料供应商在高渗碳轴承钢、高强度合金钢等基础材料的研发、应用已经基本实现突破。

②**设备端**：工欲善其事必先利其器，设备作为工艺的物化，国产替代初期进口高端设备有利于国产制造商快速推出高品质滚珠丝杠产品，但进口设备价格较高、交付周期较长或成为导致国产制造商出现梯队分化的关键因素。

③**生产端**：滚珠丝杠产品同时具有定制化和标准化属性，相对一致但又繁杂的加工过程决定了产品良率控制是国产制造商需要突破的关键课题。要实现较高的产品一致性，要求制造企业对生产过程中的关键工艺，如热处理、材料切削、部件研磨、性能检测等技术均有较为熟练地掌握，深耕精密加工的企业往往具备一定优势。

■ **投资建议**：行业层面来看，国家战略大方向下，滚珠丝杠国产替代已成趋势，传统应用替代空间相对充分，新兴产业进一步打开成长空间。新玩家集中进场旨在把握国产替代窗口期，我们认为本身具备精密加工制造基因的玩家有望凭借高端设备布局 and 优质下游资源，更有利于打造自身先发优势，加速国产替代节奏。

**建议关注**：

【**恒立液压**】：高端液压件国产替代领军企业，重新瞄准滚珠丝杠市场国产化机遇，定位高端机床+工程机械，布局起点高。

【**秦川机床**】：工业母机产业国企改革典型标的，机床+零部件上下游布局协同效应强，产品已率先应用于新能源汽车领域。

【**贝斯特**】：深耕精密零部件加工，进口设备进入交付、安装期，首台套高端机床用滚动功能部件已下线，布局进度快。

【**恒而达**】：金属切削工具领先制造商，金属材料与工艺积累深厚，直线导轨副产品率先实现批量化，有望贡献收入增量。

【**江苏雷利/鼎智科技**】：子公司鼎智科技具备精密运动控制解决方案能力，和集成商三花智控紧密合作，积极参与布局特斯拉人形机器人产业链。

■ **风险提示**：宏观经济周期性波动风险、新兴应用产业化进度不及预期、市场竞争加剧影响行业盈利水平、钢材原材料价格波动风险、新产品产能释放不及预期、国产替代进度不及预期、测算/假设不及预期。

## 目 录

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 1. 滚珠丝杠：高端装备国产化之路中的关键零部件.....               | 7  |
| 1.1. 滚珠丝杠副与直线导轨副共同组成了应用广泛的机械传动装置.....       | 7  |
| 1.1.1. 滚动功能部件的组成包括滚珠丝杠副和直线导轨副.....          | 8  |
| 1.1.2. 滚珠丝杠可根据循环方式、加工工艺、特殊应用进行分类.....       | 9  |
| 1.2. 对比滚珠传动，滚柱丝杠有望凭借性能优势在诸多新兴应用领域大展拳脚....   | 12 |
| 1.3. 滚动功能部件下游应用领域众多，不同性能要求对应多元化规格产品.....    | 15 |
| 2. 行业分析：百亿级滚动功能部件市场迎国产替代机遇.....             | 17 |
| 2.1. 中国滚动功能部件市场规模估计超 300 亿元，新兴应用驱动下成长空间广阔.. | 17 |
| 2.1.1. 机床行业：成熟应用场景产品伴随产业升级，国产替代逻辑清晰.....    | 18 |
| 2.1.2. 工程机械：电动化替代液压传动，新兴应用场景正在落地.....       | 19 |
| 2.1.3. 人形机器人：新兴产业打开滚珠丝杠应用的想象空间.....         | 22 |
| 2.2. 高端应用市场仍被外资垄断，国产制造商已进入布局加速期.....        | 26 |
| 3. 对标分析：中高端龙头长期技术积累下的产品和品牌优势突出.....         | 29 |
| 3.1. 日本 NSK：全球滚珠丝杠行业龙头，技术领先，产品谱系完整.....     | 29 |
| 3.2. 台湾上银：智能化制造和机电一体化产品相对领先.....            | 32 |
| 3.3. 对标结论：以产品打造品牌，以渠道迈向全球.....              | 35 |
| 4. 重点公司.....                                | 36 |
| 4.1. 恒立液压：高端液压件国产替代进行时，多元化瞄准滚珠丝杠新产品.....    | 36 |
| 4.2. 秦川机床：国企机床老将，机床+核心零部件协同发展.....          | 38 |
| 4.3. 贝斯特：切入“工业母机”新赛道，滚动功能部件新产品已下线.....      | 40 |
| 4.4. 恒而达：积极拓宽业务边界，直线导轨副进入收入贡献期.....         | 43 |
| 4.5. 鼎智科技：微特电机领先企业强强联手，加码高景气赛道.....         | 45 |
| 4.6. 其他非上市公司.....                           | 48 |
| 4.6.1. 南京工艺：精密滚动功能部件国产替代骨干.....             | 48 |
| 4.6.2. 凯特精机：深耕精密滚动直线导轨副.....                | 49 |
| 4.6.3. 博特精工：国产滚动功能部件中坚力量.....               | 51 |
| 5. 投资建议.....                                | 53 |
| 6. 风险提示.....                                | 54 |

## 目 录

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 图 1. 滚动功能部件包括滚珠/滚柱丝杠副、滚动直线导轨副等.....   | 7  |
| 图 2. 滚珠丝杠产业链概况.....                   | 7  |
| 图 3. 滚珠丝杠内部结构图.....                   | 8  |
| 图 4. 滚珠丝杠外观图.....                     | 8  |
| 图 5. 直线导轨内部结构图.....                   | 8  |
| 图 6. 滚柱直线导轨副三维结构.....                 | 8  |
| 图 7. 行星滚柱丝杠结构图.....                   | 12 |
| 图 8. 滚珠丝杠外观图.....                     | 12 |
| 图 9. 滚柱丝杠及滚柱丝杠发展历史.....               | 14 |
| 图 10. 滚珠丝杠副应用领域及对应核心性能要求.....         | 15 |
| 图 11. 2019-2026E 全球滚动功能部件分地区市场规模..... | 17 |
| 图 12. 2022 年全球滚动功能部件按渠道划分市场规模.....    | 17 |
| 图 13. 2021-2025E 中国滚动功能部件市场规模.....    | 17 |

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| 图 14. 预期 2025 年中国滚动功能部件市场下游应用格局.....                 | 17 |
| 图 15. 滚珠丝杠属于机床的传动系统.....                             | 18 |
| 图 16. 滚珠丝杠和导轨约占机床成本的 4.98%.....                      | 19 |
| 图 17. 2025 年估计机床产业滚动功能部件需求约 90.8 亿.....              | 19 |
| 图 18. 伺服电动缸图例（例示中为轴向载荷较大的滚柱丝杠）.....                  | 20 |
| 图 19. 气动缸、液压缸和电动缸能量损耗对比.....                         | 20 |
| 图 20. 电动缸具有多维度的隐性成本优势.....                           | 21 |
| 图 21. 2021 年全球液压行业市场规模约为 304 亿欧元.....                | 21 |
| 图 22. 工程机械行业液压件需求约占总需求的 40.5%.....                   | 22 |
| 图 23. 中国液压件市场规模约占全球的 36%.....                        | 22 |
| 图 24. 特斯拉人形机器人 Tesla Bot Optimus.....                | 22 |
| 图 25. 中国和世界 65 岁以上人口占比增长迅速.....                      | 23 |
| 图 26. 中国劳动力成本快速上升，机器人替代潜力巨大.....                     | 23 |
| 图 27. 全球人型机器人市场规模预测.....                             | 24 |
| 图 28. Tesla Optimus 核心零部件分布示意图.....                  | 24 |
| 图 29. 关节执行器成本占比超 51%.....                            | 25 |
| 图 30. 电机、滚珠丝杠、减速器、传感器成本占比较高.....                     | 25 |
| 图 31. 特斯拉线性执行器剖面图 1 螺母螺杆.....                        | 25 |
| 图 32. 特斯拉线性执行器剖面图 2 滚珠.....                          | 25 |
| 图 33. 中国品牌在国内中低端市场占据一席之地.....                        | 26 |
| 图 34. 国内高端应用市场基本被欧美日系产品垄断.....                       | 26 |
| 图 35. NSK 发展历程.....                                  | 29 |
| 图 36. NSK 营业收入存在波动性.....                             | 29 |
| 图 37. 2023 财年 NSK 净利润为 9.28 亿元.....                  | 29 |
| 图 38. NSK“4+1”核心技术.....                              | 31 |
| 图 39. NSK 海外收入占比逐渐提升.....                            | 32 |
| 图 40. 台湾上银发展历程.....                                  | 32 |
| 图 41. 2012-2022 年上银主营业务收入 CAGR=9.6%.....             | 33 |
| 图 42. 2012-2022 年上银净利润 CAGR=9.1%.....                | 33 |
| 图 43. HIWIN i4.0BS 智能型滚珠丝杠.....                      | 33 |
| 图 44. 智能型滚珠丝杠远程监视功能.....                             | 33 |
| 图 45. 上银非台湾地区收入占比持续提升.....                           | 35 |
| 图 46. 恒立液压油缸、泵阀业务规模增长明显，丝杠/电缸有望开启第三成长曲线.....         | 36 |
| 图 47. 2011-2022 年恒立液压营业收入与归母净利润情况.....               | 37 |
| 图 48. 2011-2022 年恒立液压毛利率与净利率情况.....                  | 37 |
| 图 49. 2018-2022 年恒立液压专利数情况.....                      | 38 |
| 图 50. 2018-2022 年恒立液压研发支出及占比情况.....                  | 38 |
| 图 51. 公司主营业务分为机床、核心零部件、减速器等高端制造以及数控系统等智能制造等四大板块..... | 38 |
| 图 52. 2022 年汉江机床收入规模约 4 亿元.....                      | 39 |
| 图 53. 2022 年汉江机床净利润规模约 0.25 亿元.....                  | 39 |
| 图 54. 贝斯特产业布局结构.....                                 | 40 |
| 图 55. 2015-2022 年贝斯特业务结构变化.....                      | 41 |
| 图 56. 2015-2022 年贝斯特分业务收入情况.....                     | 41 |

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| 图 57. 2011-2022 年贝斯特营收与归母净利润情况.....           | 41 |
| 图 58. 2011-2022 年贝斯特毛利率与净利率情况.....            | 41 |
| 图 59. 贝斯特子公司宇华精机滚动功能部件核心产品及应用领域.....          | 42 |
| 图 60. 2017-2022 年贝斯特研发支出及占比情况.....            | 42 |
| 图 61. 2019-2022 年恒而达业务结构变化.....               | 43 |
| 图 62. 2017-2022 年恒而达营收与归母净利润情况.....           | 43 |
| 图 63. 2017-2022 年恒而达毛利率与净利率情况.....            | 43 |
| 图 64. 鼎智科技 2022 年营收增速达 64%.....               | 45 |
| 图 65. 鼎智科技 2022 年归母净利润增速达 103%.....           | 45 |
| 图 66. 2018-2022 年鼎智科技研发支出及占比情况.....           | 47 |
| 图 67. 南京工艺发展历程.....                           | 48 |
| 图 68. 凯特精机发展历程.....                           | 50 |
| 图 69. 凯特精机导轨精度及摩擦力展示机.....                    | 51 |
| 图 70. 博特精工发展历程.....                           | 52 |
| 图 71. 博特精工国际销售网络.....                         | 53 |
| 表 1: 滚珠丝杠按循环方式分类.....                         | 9  |
| 表 2: 滚珠丝杠按加工方式分类.....                         | 10 |
| 表 3: 磨削滚珠丝杠机械加工工艺复杂.....                      | 10 |
| 表 4: 冷轧滚珠丝杠机械加工工艺更为简单.....                    | 10 |
| 表 5: 滚珠丝杠按特殊用途分类.....                         | 11 |
| 表 6: 行星滚柱丝杠分类.....                            | 13 |
| 表 7: 行星滚柱丝杠和滚珠丝杠性能对比.....                     | 14 |
| 表 8: 滚珠丝杠国际标准精度等级.....                        | 15 |
| 表 9: 各种机械适用滚珠丝杠精度等级.....                      | 16 |
| 表 10: 电动缸产品在工程机械中的具体应用.....                   | 19 |
| 表 11: 工程机械电动缸与液压缸应用情况对比.....                  | 20 |
| 表 12: GCr15 高渗碳轴承钢化学元素成分含量 (%).....           | 27 |
| 表 13: 50CrMo4 超高强度合金结构钢微量化学元素成分含量 (%).....    | 27 |
| 表 14: 高端磨削滚珠丝杠生产制造步骤较多, 良率控制难度高.....          | 28 |
| 表 15: 滚动功能部件主要国产制造商梳理.....                    | 28 |
| 表 16: MSK 产品矩阵.....                           | 30 |
| 表 17: 台湾上银主要产品矩阵(接下表).....                    | 33 |
| 表 18: 台湾上银主要产品矩阵(接上表).....                    | 34 |
| 表 19: 恒立液压定增募投项目进展情况.....                     | 37 |
| 表 20: 秦川“新能源汽车滚动功能部件研发与产业化建设项目”产能明细及收入贡献..... | 40 |
| 表 21: 恒而达主要产品介绍.....                          | 44 |
| 表 22: 恒而达三大核心技术介绍.....                        | 44 |
| 表 23: 丝杠是鼎智科技的线性执行器的核心部件.....                 | 45 |
| 表 24: 鼎智科技线性执行器及丝杠、螺母性能均有能力与国外产品对标.....       | 46 |
| 表 25: 鼎智科技 ipo 募投项目情况.....                    | 47 |
| 表 26: 鼎智科技战略投资者超额配售股票和资金交付情况.....             | 48 |
| 表 27: 南京工艺产品矩阵.....                           | 49 |
| 表 28: 南京工艺滚珠丝杠代表性产品.....                      | 49 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 表 29: 凯特精机产品矩阵.....            | 50 |
| 表 30: 凯特精机代表性产品.....           | 50 |
| 表 31: 博特精工产品矩阵.....            | 52 |
| 表 32: 博特精工代表性产品.....           | 52 |
| 表 33: 2023-2025 年重点公司盈利预测..... | 54 |

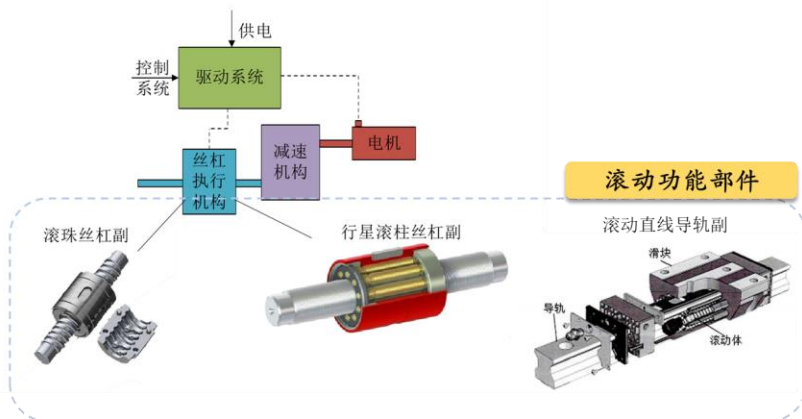
## 1. 滚珠丝杠：高端装备国产化之路中的关键零部件

### 1.1. 滚珠丝杠副与直线导轨副共同组成了应用广泛的机械传动装置

滚动功能部件是通过滚动体在接触滚道中的滚动，将传统的滑动摩擦传动形式转换为滚动摩擦传动，从而大大提高传动效率和运动精度的精密关键部件。滚动功能部件主要包括滚动丝杠副、滚动直线导轨副、滚柱花键、滚动直线运动装置等，其应用广泛，从数控机床行业逐渐拓展到医疗器械、新能源汽车、机器人等智能化行业，其中滚珠丝杠副和滚动直线导轨副的组合技术发展最快、产业化程度最高、应用领域最广。

其中核心部件滚动丝杠副（滚珠、滚柱两大类滚子）是一种可以将旋转运动与直线运动进行双向转换的传动元件，相较传统的滑动丝杠副传动效率更高。滚动丝杠副构件间的可动联接不借助于运动副本身，而是通过在丝杠和螺母之间的中间元件滚珠来实现，从而以滚动摩擦代替了滑动摩擦。与传动的滑动丝杠副相比，滚珠丝杠副只需要原来的三分之一动力即可达到同一水平的传动效果，其能够减少传动副摩擦、提高传动效率，能够更好满足现代机械传动在高速度、高效率、高精度等方面的要求。

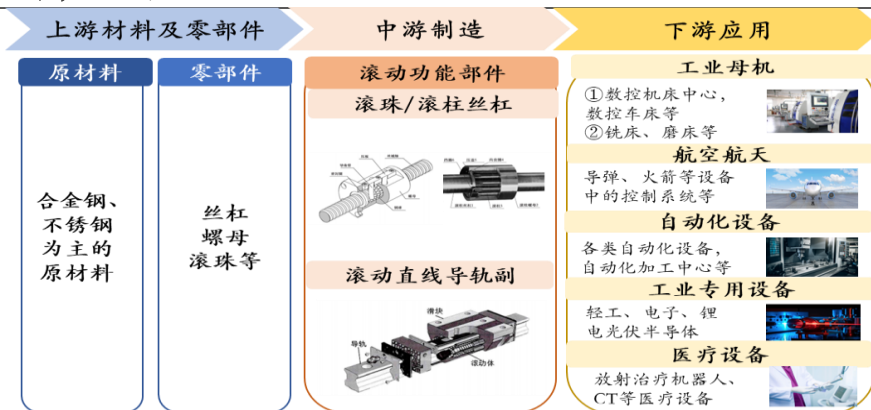
图1. 滚动功能部件包括滚珠/滚柱丝杠副、滚动直线导轨副等



资料来源：《考虑误差影响的行星滚柱丝杠副啮合与接触特性分析与研究》，《滚动功能部件预紧力与刚性的关联性研究》，安信证券研究中心

滚珠丝杠上游材料端直接影响产品性能，下游应用领域广泛。从产业链上游来看，滚珠丝杠上游主要为滚珠丝杠的零部件，即丝杆、螺母和滚珠等，其原材料主要为钢铁等原材料。构件所选用的材料影响滚珠丝杠副的刚度、强度、耐磨性等，良好的微量元素配比能够减少加工流程中的畸变和裂纹，在提高加工效率的同时，能够提高滚珠丝杠的耐磨性和解除疲劳强度以及使用寿命，因此滚珠丝杠存在材料配方壁垒，厂家通常选用综合性能良好的轴承钢、合金钢等作为滚珠丝杠副的原材料。从产业链下游来看，滚珠丝杠是众多机械设备不可或缺的传动元件，其产业链下游应用广泛，包括机床、航空航天、汽车、冶金、医药等多种领域。

图2. 滚珠丝杠产业链概况



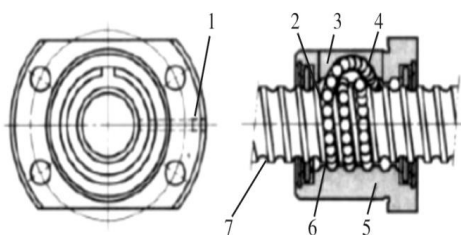
资料来源：《行星滚柱丝杠副的研究》，安信证券研究中心整理

### 1.1.1. 滚动功能部件的组成包括滚珠丝杠副和直线导轨副

(1) 滚珠丝杠为工具机械和精密机械上常用传动元件。滚珠丝杠副是由滚珠丝杠、滚珠螺母和滚珠组成的部件，可以将旋转运动转变为直线运动，也可以将直线运动转变为旋转运动，具备高精度、可逆性和高效率的特点。滚柱丝杠副行业伴随机床工业发展而发展起来，目前已广泛应用于机床、汽车、航空航天、医疗器械、建筑、包装印刷等领域。滚珠丝杠主要的零部件及作用如下：

- ①丝杠：转动部件，直线度高，具有半圆形螺旋槽的螺纹；
- ②螺母：用来固定需要移动的负载；
- ③滚珠：作为承载体、中间传动元件，以滚动方式传递运动；
- ④防尘片：密封丝杠、螺母，防止外部污染物进入螺母内部；
- ⑤油孔：用于加润滑油，保持滚柱丝杠结构运行时良好的润滑。

图3. 滚珠丝杠内部结构图



1 - 油孔; 2 - 曲折式防尘片; 3 - 树脂;  
4 - 滚珠回流管; 5 - 螺母; 6 - 滚珠; 7 - 丝杠

资料来源：《加工中心滚珠丝杠的应用》，安信证券研究中心

图4. 滚珠丝杠外观图

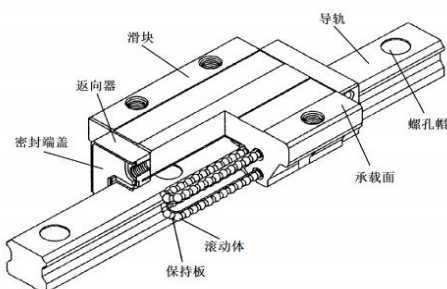


资料来源：上银官网，安信证券研究中心

(2) 滚动直线导轨副为滚动功能部件的组成部分，具有导向、承载、定位等功能。滚珠直线导轨副由滑块、滚动体、导轨、反向端盖以及保持架等部分组成，因滚动直线导轨副具备运动灵敏度高、定位精度高、牵引力小、磨损小、润滑维修简便等优点，其在高档数控机床中应用广泛。其主要零部件及作用如下：

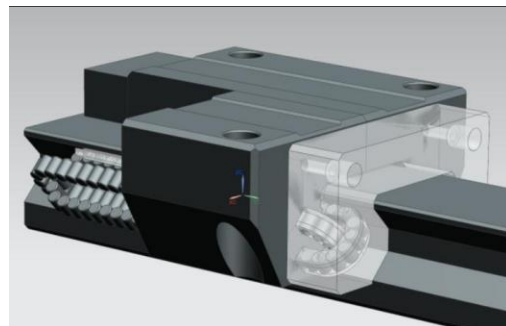
- ①滑块：与机床运动部件相连，通过滚动体滚动实现与导轨的相对滑动；
- ②导轨：固定在基座上，起运动导向作用，其加工精度直接决定了滚珠导轨副精度；
- ③滚动体：直线导轨副的承载部件，常用类型包括滚珠和滚柱两种，其中滚珠具有摩擦小、自调心能力强与误差均化优点，但承载能力较小；滚柱有较大承载能力，但摩擦力较大；
- ④反向器：用于实现滚动体循环运动；
- ⑤密封端盖：起到密封及防尘作用，同时端盖内密封有润滑油，保持滚道润滑；
- ⑤保持架/板/链：用于隔离滚动体，防止滚动体之间碰撞和摩擦，有效降低直线导轨副噪声。

图5. 直线导轨内部结构图



资料来源：《数控车床滚动直线导轨副结合部动态特性研究》，安信证券研究中心

图6. 滚柱直线导轨副三维结构



资料来源：《滚柱直线导轨副刚度及性能试验研究》，安信证券研究中心

### 1.1.2. 滚珠丝杠可根据循环方式、加工工艺、特殊应用进行分类

滚珠丝杠分类方式众多，①根据滚珠循环方式：可分为内循环、外循环、端盖式外循环以及螺母旋转式滚珠丝杠；②根据加工工艺：可分为磨削、冷轧滚珠丝杠；③根据特殊应用场景：可分为高负荷、自润式、静音式、高速化滚珠丝杠。

#### (1) 根据循环方式：

根据滚珠的返回循环回路是否脱离丝杠的滚道，滚珠丝杠可分为内循环式、外循环式和螺母旋转式，其中外循环一般指插管式外循环和端盖式外循环。

**内循环：滚珠循环时不脱离丝杠表面。**内循环式滚珠丝杠装有接通相邻滚道的返回器，滚珠在翻越螺纹滚道牙顶后，借助返回器上回珠槽的作用重新回到初始滚道。采用内循环方式的滚珠丝杠的螺母外径小，可微型设计，满足最小空间安装，并且制作简单、成本低。内循环式丝杠适用于中小导程、中低速度场景，如 3D 打印机、中小型医疗扫描仪等。

**外循环：滚珠循环返回离开丝杠表面。插管式外循环：适用范围广，多作为标准产品。**插管式外循环滚珠丝杠将部分的成形弯管插入螺旋滚道，以弯管端部舌形斜口作为挡珠器来引导滚珠进出弯管以构成循环通道。其结构简单，工作可靠，工艺性好，易于批量生产，与内循环相比可以实现更大导程、更强承载能力。插管式外循环应用广泛，能适用于重载高速的驱动系统和精密定位系统，能实现大、小导程。

**端盖式外循环：可为多线螺纹，应用于多牙口设计。**端盖式外循环滚珠丝杠在螺母端部配置滚珠返回器，在螺母内设置贯通孔，滚珠通过端盖和螺母滚道内部的贯通孔实现循环。其螺母径向、轴向尺寸小，滚珠循环部的加工复杂，可实现多线螺纹、承载能力大。端盖式外循环式适用于多线、高承载、低转速、低精度传动行业的应用场景。

**螺母旋转式：螺帽和支撑轴承一体成型，丝杠固定，螺母旋转。**螺母旋转式滚珠丝杠是采用驱动元件带动螺母做旋转运动，通过螺母内部滚珠的移动，使丝杠和螺母产生相对位移。在丝杠固定的情况下，螺母相对丝杠产生直线相对运动，完成传动过程。螺母旋转式可以有效提高大导程丝杠传动的稳定性和传动机构的刚性，优化各种直线轴进给结构。螺母旋转式适用于长行程、重载、高速领域，应用于半导体机械、产业用机器人、搬送装置等。

表1：滚珠丝杠按循环方式分类

| 分类方式    | 种类     | 特点                                     | 应用场景                                 | 示意图                                                                                   |
|---------|--------|----------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 按循环方式分类 | 内循环    | 螺母外径小，可微型设计，满足最小空间安装，并且制作简单、成本低        | 适用于中小导程、中低速度场景，如 3D 打印机、中小型医疗扫描仪等    |  |
|         | 插管式外循环 | 结构简单，工作可靠，工艺性好，能够批量生产，可以实现较大导程、承载能力较大  | 应用广泛，能适用于重载高速的驱动系统和精密定位系统，能实现大、小导程   |  |
|         | 端盖式外循环 | 螺母径向、轴向尺寸小，滚珠循环部的加工复杂，可实现多线螺纹、承载能力大    | 适用于多线、高承载、低转速、低精度传动行业的应用场景           |  |
|         | 螺母旋转式  | 螺帽和支撑轴承一体成型，有效提高大导程的稳定性和刚性，优化各种直线轴进给结构 | 适用于长行程、重载、高速领域，应用于半导体机械、产业用机器人、搬送装置等 |  |

资料来源：上银官网，《滚珠丝杠建模综述》，安信证券研究中心

#### (2) 根据加工方式：

**滚珠丝杠生产环节多，良率控制为生产难点。**滚珠丝杠结构复杂，加工工序较多，除了复杂的冷加工部分，还有前期的预热处理、螺纹滚道部分淬火处理，中期的时效处理等热处理工序，一件滚珠丝杠的制作大约需要 20 多道工序，于是控制良率成为生产中的难点。滚珠丝杠

下游应用多元、产品性能要求各有不同，但整体来看加工流程较为标准化，只在材料端和关键工艺上略有区别。从工艺角度来看，滚珠丝杠整体可分为磨削滚珠丝杠和冷轧滚珠丝杠两类：

①磨削滚珠丝杠加工工艺复杂，精度更高。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，制造精度高达 P1 级，非常适合给高精度设备做定位部件，同时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。

②轧制滚珠丝杠自动化程度更高，制作周期短，精度较低。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，但制造精度较低，停留在 P7 级左右，只能在设备中做传动部件。

表2：滚珠丝杠按加工方式分类

| 分类方式    | 种类  | 特点                        | 应用场景                               | 示意图                                                                                 |
|---------|-----|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 按加工方式分类 | 轧制级 | 冷轧挤压成型，精度较低，但供货迅速，价格低廉    | 适用于低摩擦、运转顺畅等机械传动场景                 |  |
|         | 研磨级 | 制作工艺复杂，精密研磨机床磨制而成，精度高，交期慢 | 应用于 CNC 机械，精密工具机，产业机械，电子机械，航天工业等领域 |  |

资料来源：THK，上银官网，南京春信自动化设备网站，安信证券研究中心

表3：磨削滚珠丝杠机械加工工艺复杂

| 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 | 磨削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》，安信证券研究中心

表4：冷轧滚珠丝杠机械加工工艺更为简单

| 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》，安信证券研究中心

### （3）根据特殊用途：

为满足下游应用需求，适应各行各业的工作环境，根据丝杠的功能、特点和特殊用途不同，滚珠丝杠也可以划分为高负荷、自润式、静音式和高速化等。

**高负荷：承受较大的轴向负荷。**重负荷滚珠丝杠采用特殊的几何牙沟与回流系统设计，降低丝杠牙沟所承受的轴向负荷，提升滚珠丝杠所能承受的最大负载力。相较于一般标准滚珠丝

杠，其额定负荷大幅提升约 2-3 倍以上，于高负载应用下可以提供更长的使用寿命。广泛应用于全电式射出成形机、半导体制造装置、重负荷制动器、产业机械、锻压机械等领域。

**自润式：保持最佳润滑效果，延长保养周期。**自润式滚珠丝杠具有可拆换储油装置，不需要润滑管路系统与设备，同时储油装置也易于自行拆换、补充，无需对滚珠丝杠及机台做拆解、重组，节省了维修及保养的时间，减少了换油和废油处理成本。广泛应用于印刷机械、自动化机械、医疗设备、X-Y 工作台等工业机械和电子机械领域。

**静音式：大幅降低滚珠运行阻力和冲击产生的噪音。**静音式滚珠丝杠优化了滚珠的回流路径设计，滚珠沿切线脱离螺纹沟槽进入回流道，震动小且运行平顺。特殊沟型的滚珠间隔环，可以抑制住滚珠之间碰撞所产生的噪音。其广泛应用于 CNC 机械、精密工具机械、产业机械、电子机械、高速化机械等领域。

**高速化：瞬时加减速超过 1.5g。**高速化滚珠丝杠一般具有大导程滚珠丝杠副，采用特有回流组件的路径与强度设计，具有高传动效率、高加速、高速进给的特点，适用于高速的应用场合。广泛应用于工具机的快速进给，磨具高速切削中心机、高速纵荷切削中心等领域。

**相比滚珠丝杠，（行星）滚柱丝杠在部分特殊用途方面展现多方面优势，具备承载能力强、高强度等优点。**滚珠丝杠副具有传动效率高等优点，但同时也具备寿命短、承载能力和刚度差等缺点，当导程很小时承载能力非常有限，因此在某些场景下不能够满足需求。滚柱丝杠副具备较大接触半径的滚动体，导程小时仍可获得较高承载能力，同时强度高、可靠性好，能够更加适应对结构紧凑、轻巧、承载能力、速度和刚度要求高的场合。

**表5：滚珠丝杠按特殊用途分类**

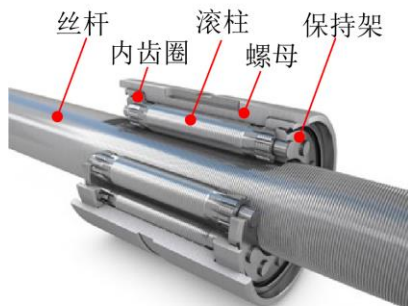
| 分类方式    | 种类  | 特点                                               | 应用场景                                           | 示意图                                                                                   |
|---------|-----|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 按特殊用途分类 | 高负荷 | 能够承受较大的轴向负荷，额定负荷大幅提升约 2-3 倍以上，于高负载应用下可以提供更长的使用寿命 | 应用于全电式射出成形机、半导体制造装置、重负荷制动器、产业机械、锻压机械等领域        |  |
|         | 自润式 | 具有可拆换储油装置，不需要润滑管路系统与设备，减少了换油和废油处理成本              | 应用于印刷机械、自动化机械、医疗设备、X-Y 工作台等工业机械和电子机械领域         |  |
|         | 静音式 | 具有特殊的回流路径，滚珠间隔环，滚珠运动震动小且平顺，产生噪音小                 | 应用于 CNC 机械、精密工具机械、产业机械、电子机械、高速化机械等领域           |  |
|         | 高速化 | 特有回流组件的路径与强度设计，瞬时加速度超过 1.5g，高传动效率、高加速、高速进给       | 适用于高速的应用场合。广泛应用于工具机的快速进给，磨具高速切削中心机、高速纵荷切削中心等领域 |  |

资料来源：上银官网，安信证券研究中心

## 1.2. 对比滚珠传动，滚柱丝杠有望凭借性能优势在诸多新兴应用领域大展拳脚

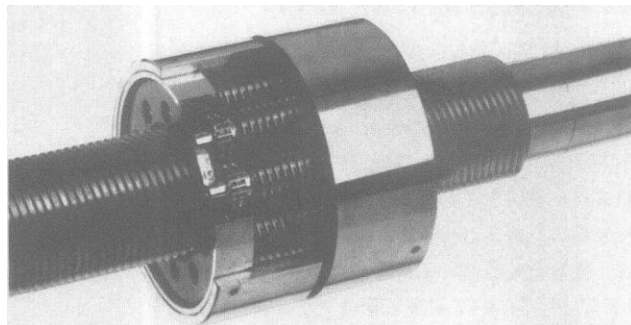
滚柱丝杠为使用滚柱进行传动的传动机构，类似行星传动体系，因而又得名行星滚柱丝杠。其基本结构主要包括丝杆、滚柱、内齿圈、保持架和螺母等，其原理为丝杠旋转带动滚柱绕丝杆轴向公转同时绕自身轴线自转，然后滚柱带动螺母做轴向运动。其中，三大构件（丝杠、滚柱、螺母）的牙型角皆为  $90^\circ$ ，丝杠与螺母为直廓牙型，滚柱采用弧形牙型。

图7. 行星滚柱丝杠结构图



资料来源：《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究》，安信证券研究中心

图8. 滚珠丝杠外观图



资料来源：《滚珠丝杠》，安信证券研究中心

根据滚柱相对于丝杠和螺母的运动关系，行星滚柱丝杠可以分成 5 类，分别为标准式、反向式、循环式、轴承环式和差动式。

①**标准式行星滚柱丝杠**：适用于高负载、大行程、高速等场合，应用广泛。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，丝杠为主动件，螺母为输出构件。其能够实现较大行程，适用于环境恶劣、高负载、高速等场合，主要应用于精密机床、机器人、军工装备等领域，是目前应用最广泛的类型，其他 4 种类型均为适应不同应用环境而在其基础上演变而来。

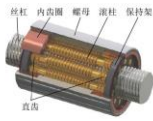
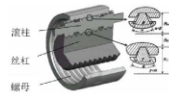
②**反向式行星滚柱丝杠**：适用于中小负载、小行程、高速场合。与标准式不同在于有内齿圈，丝杠两端加工有直齿与滚柱两端的齿轮啮合，螺母作为主动件，丝杠为输出构件，滚柱、丝杠之间无相对轴向位移。其主要用于中小负载、小行程和高速的应用场景，可用于航空、航天、船舶、电力等领域，主要缺点为行程受到螺母内螺纹长度的限制。

③**循环式行星滚柱丝杠**：适用于高刚度、高承载、高精度场合。相比于标准式，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，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。同时增加了参与啮合的螺纹数量，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，如医疗器械、光学精密仪器等领域。缺点在于其凸轮环结构会产生振动冲击，存在噪音问题。

④**差动式行星滚柱丝杠**：适用于传动较大、承载能力较高场合。与标准式相比，去掉了内齿圈，滚柱上无齿轮段。其结构特点使其导程更小，适用于传动较大，承载能力较高的应用场合。但在运动过程中，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。

⑤**轴承环式行星滚柱丝杠**：适用于高承载、高效率场合。相比于标准式，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。推力圆柱滚子轴承提高了其承载能力，同时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。但其存在着结构复杂，径向尺寸大，制造成本高等缺点。

表6：行星滚柱丝杠分类

| 分类方式             | 种类  | 特点                                                                                    | 应用场景                                                             | 示意图                                                                                 |
|------------------|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 按滚柱相对于丝杠和螺母的运动分类 | 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，内齿圈固定在螺母两端并与滚柱两端的直齿轮啮合                               | 适用于 <b>环境恶劣、高负载、高速</b> 等场合，主要应用于精密机床、机器人、军工装备等领域，是目前应用最广泛的类型     |  |
|                  | 反向式 | 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，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                             | 主要用于 <b>中小负载、小行程和高速</b> 的应用场合，用于航空、航天、船舶、电力等领域                   |  |
|                  | 循环式 | 去掉了内齿圈，增加了凸轮环结构，滚柱上无螺纹、齿轮结构，为环槽状，具有较高的刚度和较大的承载能力                                      | 主要应用于要求 <b>高刚度、高承载、高精度</b> 的场合，如医疗器械、光学精密仪器等领域                   |  |
|                  | 差动式 | 无内齿圈及齿轮段，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                                 | 获得更小的导程，适用于 <b>传动比较大，承载能力较高</b> 的应用场合。在重载情况下，容易产生磨损，导致精度丧失，可靠性降低 |  |
|                  | 轴承式 | 滚柱为环槽结构，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。推力圆柱滚子轴承提高了其承载能力，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 <b>高承载、高效率</b> 等场合，如石油化工、重型机械等领域                          |  |

资料来源：《行星滚柱丝杠传动精度分析与设计》，安信证券研究中心

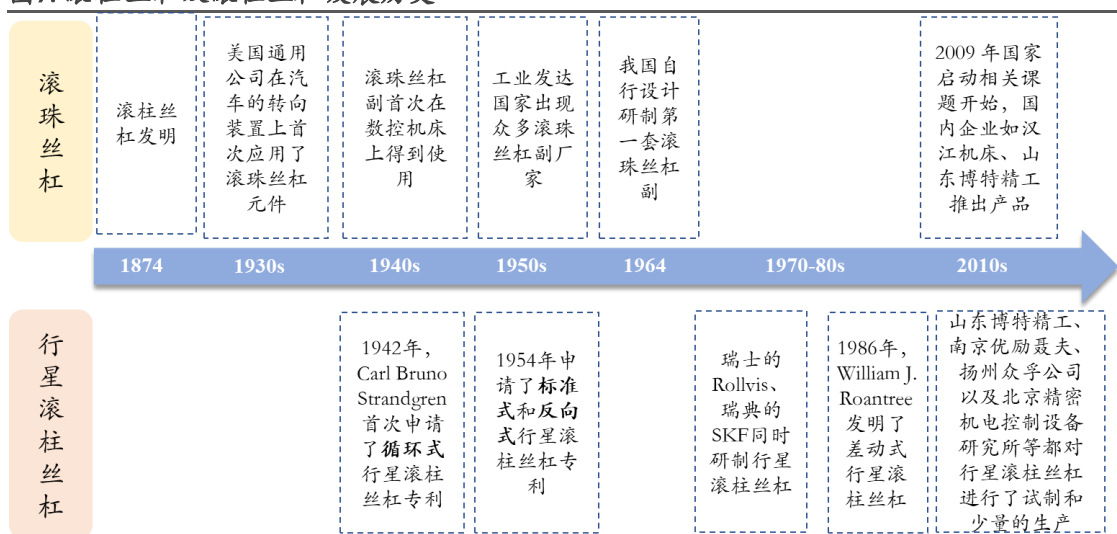
从滚珠丝杠与滚柱丝杠对比的角度来看，①**发展历史**：滚珠丝杠发展历史更长，但滚柱丝杠结构同样经历了较长时间验证；②**性能比较**：行星滚珠丝杠在承载能力、刚度、传动速度、导程范围等方面更具优势。

行星滚柱丝杠也并非新兴产品，其发展历史可追溯至 1942 年。

（1）**滚珠丝杠**：滚珠丝杠发明于 1874 年，20 世纪 30 年代，美国通用公司在汽车的转向装置上首次应用了滚珠丝杠元件，20 世纪 40 年代，滚珠丝杠副首次在数控机床上得到使用，并成为了数控机床的理想进给元件；伴随机床和自动化设备的发展，对滚珠丝杠副的研究和生产得到推进，50 年代开始在工业发达国家出现众多滚珠丝杠副厂家，如英国 ROTAX、日本 NSK 等。我国研制用于数控机床的滚珠丝杠副起步于 20 世纪 50 年代，1964 年我国自行设计研制第一套滚珠丝杠副，自 2009 年国家启动相关课题开始，国内企业如汉江机床、山东博特精工等已经取得了许多优秀的成果，但目前我国在高性能产品上与世界先进企业相比仍有进步空间。

（2）**行星滚柱丝杠**：1942 年，瑞典人 Carl Bruno Strandgren 首次申请了循环式行星滚柱丝杠专利，1954 年申请了标准式和反向式行星滚柱丝杠专利，1986 年，William J. Roantree 发明了差动式行星滚柱丝杠，之后 Oliver Saari 发明了轴承环式行星滚柱丝杠。1970 年，瑞士的 Rollvis 公司开始研制行星滚柱丝杠，瑞典的 SKF 也同时研制行星滚柱丝杠，美国的 Moog、德国的 Ortlieb 和英国的 Power Jacks 等都有各自成熟的行星滚柱丝杠产品；美国的 Exlar 和德国的 Rexroth 都将行星滚柱丝杠运用到各自的机电作动器中。目前我国研制行星滚柱丝杠副的企业仍较少，且大多数处于结构设计阶段，与国外企业存在差距。

图9. 滚柱丝杠及滚珠丝杠发展历史



资料来源:《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究》,《行星滚柱丝杠设计》, 安信证券研究中心整理

行星滚珠丝杠较滚柱丝杠具备高承载能力、高刚度、高传动速度、更大的导程范围等优势。行星滚柱丝杠与滚珠丝杠的最大区别在于载荷传递元件为螺纹滚柱, 因此大幅度增加了丝杠的受力接触面, 从而使得承载能力和刚性比普通滚柱丝杠更高, 同时用滚柱替代滚珠, 解决了滚珠直径取值范围小, 空间和承载能力有限的问题。行星滚柱丝杠副具有以下特点:

- ①高承载: 相同长度下的滚柱和滚珠, 滚柱相比滚珠提供了更多的接触点(线接触), 因此滚柱具有更高的承载能力和刚度;
- ②小体积: 相同承载能力下, 滚珠的体积比滚柱大 2/3;
- ③高速: 在滚柱运动过程中, 保持架使相邻滚柱之间不相互碰撞, 而滚珠在运动过程中, 相邻滚珠之间没有间隙, 滚珠会在滚道发生碰撞, 因此滚柱丝杠的工作速度更高;
- ④高精度: 滚柱丝杠中丝杠螺旋升角较小, 牙型轮廓为 90° 的三角形, 这种结构形式的导程精度较高, 进给量可以精确到毫米以下;
- ⑤长寿命: 根据生产厂商 GSA 进行的寿命试验, 相同工况下的滚柱丝杠是滚珠丝杠实际寿命的 15 倍。

表7: 行星滚柱丝杠和滚珠丝杠性能对比

| 项目     | 滚动体 | 滚动体循环运动方式     | 滚动体受力状态                    | 最高精度         | 相对承载能力 (滚珠丝杠为 1) | 相对旋转速度 (滚珠丝杠为 1) | 相对寿命 (滚珠丝杠为 1) | 导程              | 场景                                                       |
|--------|-----|---------------|----------------------------|--------------|------------------|------------------|----------------|-----------------|----------------------------------------------------------|
| 行星滚珠丝杠 | 滚柱  | 滚柱围绕丝杠轴心做行星运动 | 滚动体受载面积大、任何时候都同时受载、无循环交变应力 | 进给量可以精确到毫米以下 | $\geq 3$         | 2                | 15             | 可小于 0.5mm 或更小   | 需要高精度、高承载、高刚度、恶劣环境, 在精密数控机床、重型机械、医疗器械、武器装备、航空航天等领域具备应用前景 |
| 滚珠丝杠   | 滚珠  | 借助反向机构实现循环滚动  | 滚柱受载面积小, 且轮流受载, 产生循环交变应力   | -            | 1                | 1                | 1              | 受滚柱直径限制大于 0.5mm | 广泛应用于数控机床、汽车制造、航空航天、石油钻井等高精尖领域                           |

资料来源:《航天精密传动机构行星滚柱丝杠的设计与研究》,《行星滚柱丝杠承载与摩擦特性研究》,《循环式行星滚柱丝杠副的设计及运动连续性研究》, 安信证券研究中心

### 1.3. 滚动功能部件下游应用领域众多，不同性能要求对应多元化规格产品

滚珠丝杠及行星滚柱丝杠下游应用众多，在高精尖等领域发展空间广阔。滚柱丝杠下游应用领域广阔，包括高档数控机床、普通机械、工业机器人、人形机器人、航空航天、医药、模具加工等领域。

滚珠丝杠的主要性能参数包括：精度等级、轴向间隙、额定负载、导程、丝杠轴外径和长度等。

①**精度等级（导程精度）**：滚珠丝杠的JIS等级可分为C0、C1、C2、C3、C5、C7、C10级，精度表示方法为无论滚珠丝杠的长度为多长，任取300mm的误差都在等级代表的精度之内，如精度等级为7级时，任意300mm行程内行程变动量为0.050mm，即C7=0.05。根据使用场合的不同，滚珠丝杠可分为压轧制滚珠丝杠（转造级滚珠丝杠）和精密滚珠丝杠（研磨级滚珠丝杠）；压轧制滚珠丝杠主要用于传送，用于位置精度要求不高的场合，常用经济精度有C7、C10。精密滚珠丝杠主要用于定位精度要求高的场合，精度等级为（C0-C5级），常用精度等级为C3、C5、C7。

②**轴方向间隙**：滚珠丝杠的螺母与丝杠轴轴向的间隙值，一般在0-0.12mm左右，轴向间隙影响物体移动的重复精度；

③**容许轴向负载**：容许轴向负载时指相对于可能使丝杠轴发生屈曲的负载，确保其安全性的负载，施加于丝杠轴的最大轴向负载须小于容许轴向负载；

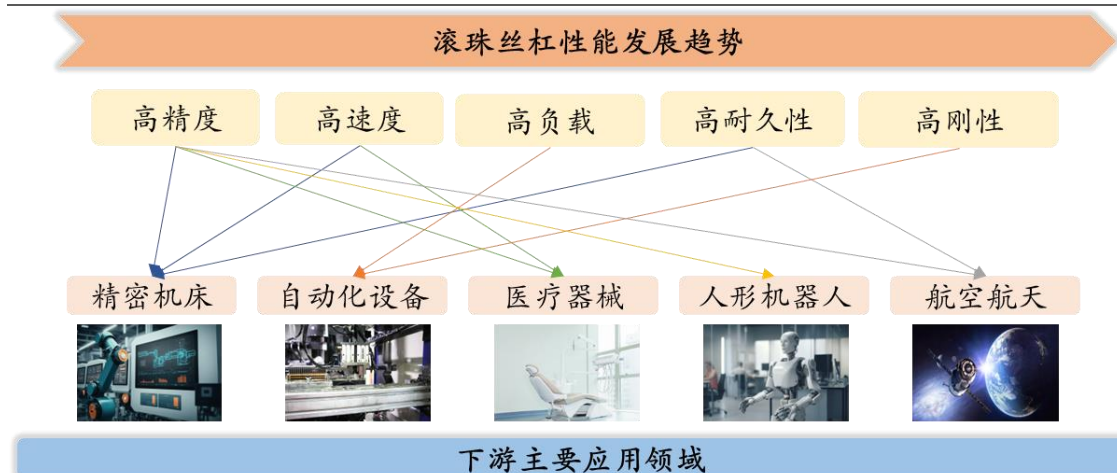
④**容许转速**：滚珠丝杠的转速取决于必要的进给速度和滚珠丝杠的导程，且须小于容许转速，滚珠丝杠的容许转速小于与丝杠轴固有振动一致的危殆速度的80%。

⑤**寿命**：滚珠丝杠的寿命是指滚珠滚动面或任一滚珠因交变应力而产生疲劳，直至开始产生剥落现象时的总旋转次数、时间、距离。

⑥**导程**：导程为滚珠螺母相对滚珠丝杠旋转一周的行程；常见丝杠导程有：4、5、6、8、10、12、16、20、32、40、50、60、80、100mm等。

⑦**丝杠外径**：主要有：12、15、16、20、25、31、32、38、40、48、50、61、63、77、80、96mm等。

图10. 滚珠丝杠下游应用领域及对应核心性能要求



资料来源：安信证券研究中心整理

表8：滚珠丝杠国际标准精度等级

| 等级             | 研磨级 |    |    |    |    |     |    |    |    |     |
|----------------|-----|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|
|                |     |    |    |    |    | 轧制级 |    |    |    |     |
| 任意 300mm 行程内误差 | C0  | C1 | C2 | C3 | C4 | C5  | C6 | C7 | C8 | C10 |
| ISO, DIN       |     | 6  |    | 12 |    | 23  |    | 52 |    | 210 |
| JIS            | 3.5 | 5  |    | 8  |    | 18  |    | 50 |    | 210 |

资料来源：上银官网，安信证券研究中心

表9：各种机械适用滚珠丝杠精度等级

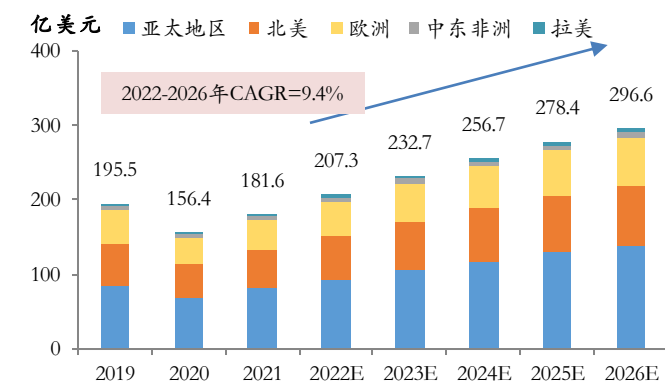
| 用途   |           | 轴别 | 精密等级 |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|------|-----------|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|      |           |    | 0    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
| 精密机床 | 车床        | X  | √    | √ | √ | √ | √ |   |   |   |   |    |
|      |           | Z  |      |   |   | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      | 铣床、镗床     | X  |      | √ | √ | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      |           | Y  |      | √ | √ | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      |           | Z  |      |   | √ | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      | 钻床        | X  |      |   |   | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      |           | Y  |      |   |   | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      |           | Z  |      |   |   |   | √ | √ | √ |   |   |    |
|      | 磨床        | X  | √    | √ | √ |   |   |   |   |   |   |    |
|      |           | Y  |      | √ | √ | √ |   |   |   |   |   |    |
| 一般机械 | 高速冲床      | X  |      |   |   | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      |           | Y  |      |   |   | √ | √ | √ |   |   |   |    |
|      | 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：上银官网，安信证券研究中心

## 2. 行业分析：百亿级滚动功能部件市场迎国产替代机遇

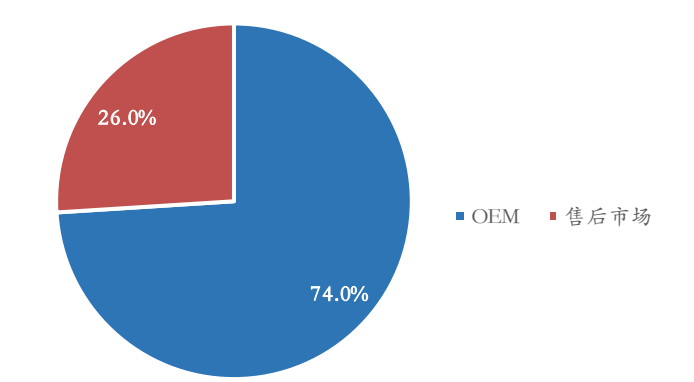
**2.1. 中国滚动功能部件市场规模估计超 300 亿元，新兴应用驱动下成长空间广阔**  
滚动功能部件 2022 年全球市场规模预计超 200 亿美元，前装市场占据约 3/4。滚珠丝杠自 1874 年诞生以来，其功能从最初“省能传动”发展到“精密定位”，从“大行程快速驱动”发展到“高速精密驱动”，随着高速、精密、大负荷等各种特殊用途的创新与发展，推动了滚珠丝杠及配套直线导轨的市场规模的持续扩张。根据 Value Market Research 数据，预计 2022 年滚动功能部件全球市场规模为 207.3 亿美元（约合 1451 亿人民币），预计 2022-2026 年 CAGR 为 9.4%（我们认为，Value Market Research 报告中所提及的“滚珠丝杠”应属于广义上的滚动功能部件，即包含了滚珠丝杠副及直线导轨副配套，并囊括了下游工业制造、航空航天、石油管道等各类或大或小的下游应用）。分渠道来看，前装 OEM 市场、售后市场分别占据约 74%、26%，相对稳定；分市场来看，中国、印度等亚洲国家工业化进程推动了滚动功能部件市场的增长，预计 2022-2026 年，亚太地区市场份额在全球占比有望从 44.9% 增长至 46.6%。

图11. 2019-2026E 全球滚动功能部件分地区市场规模



资料来源：Value Market Research，安信证券研究中心

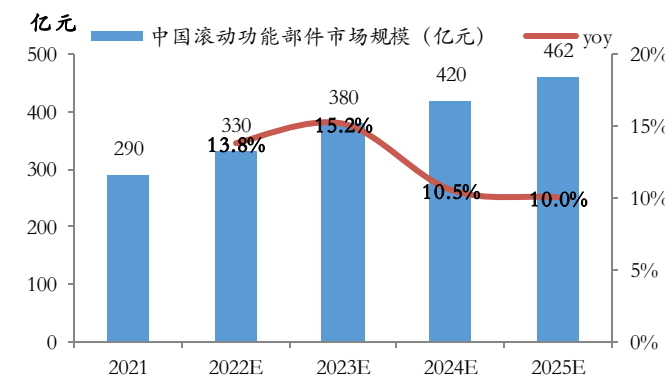
图12. 2022 年全球滚动功能部件按渠道划分市场规模



资料来源：Value Market Research，安信证券研究中心

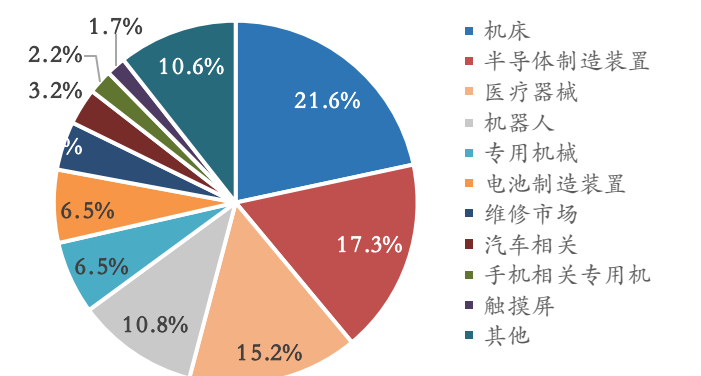
中国市场规模约占全球的 20%，得益于制造业快速发展，预期 2022-2025 年滚动功能部件复合增速高于海外市场。根据金属加工杂志社，2022 年预计我国滚动功能部件市场规模 330 亿，至 2025 年有望增长至 462 亿，CAGR 达 12.4%（对比全球 2022-2025 年市场规模 CAGR 为 10.33%）。其中机床为第一大单一下游应用领域，约占总市场规模的 21.6%，对应 2025 年需求规模约 100 亿，其次在专用设备领域（包含半导体、电池制造及其他专用设备）、工业自动化（机器人）、医疗器械、汽车领域也有着广泛应用，预计 2025 年分别占总市场规模的 30.3%、10.8%、15.1%、3.2%。粗略估计 2025 年滚动功能部件在泛工业制造中的应用约占总需求的 70%，同时新兴应用场景的持续出现也推动了滚动功能部件需求的持续扩张，例如注塑机、压力机、工程机械等领域的电动化趋势，以及人形机器人商业化前景下的供应链产品升级。

图13. 2021-2025E 中国滚动功能部件市场规模



资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

图14. 预期 2025 年中国滚动功能部件市场下游应用格局



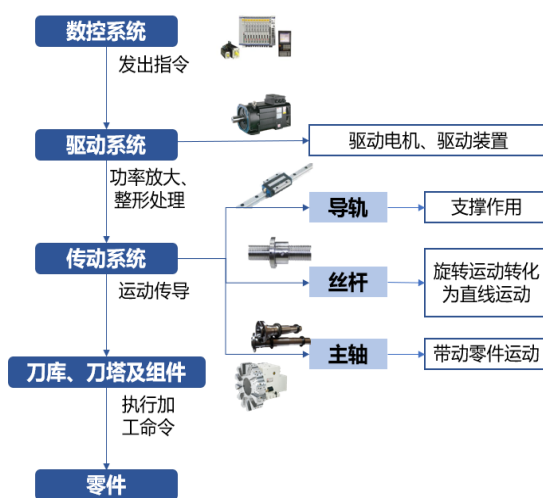
资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

### 2.1.1. 机床行业：成熟应用场景产品伴随产业升级，国产替代逻辑清晰

滚珠丝杠在机床中主要位于传动系统中，与导轨、主轴共同带动刀具等组件的运动传导。滚柱丝杠在机床中的主要功能为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。一套滚珠丝杠副由一根丝杠、一根螺母、多个钢球组合。一般情况下，在机床中的一整套运行机构由两道滚动直线导轨及一根滚珠丝杠副组成，驱动运动部件实现精确移动。

滚珠丝杠在机床中应用主要朝向高精、高速、重载及低噪音方向发展。在机床中使用滚珠丝杠而非液压进行传导的主要原因在于其传动效率高（滚动摩擦）、精度好（多为螺纹磨削或模具连续轧压）、精度保持性强（因为其为滚动摩擦，所以可以采用优质钢材如轴承钢等按硬对硬接触方式提高了耐磨性和整体刚度）。随着机床逐步向高端化、复合化方向发展，未来滚珠丝杠的重点发展方向在于维持产品性能并减少体积和通过热处理延长产品寿命。

图15. 滚珠丝杠属于机床的传动系统

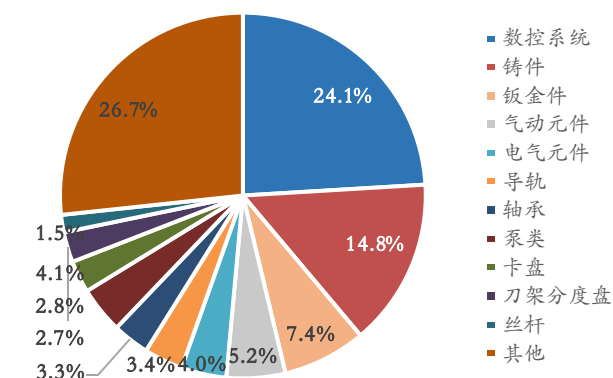


资料来源：捷众机器人，恒兴隆机电官网，机床商务网，安信证券研究中心

保守估计机床行业滚珠丝杠单套价格约 1100 元，国产替代逻辑清晰。根据秦川机床定增公告显示，目前滚珠丝杠在机床应用领域的单价约 980 元/件，与之相配套的螺母单价约 102 元/件，一套滚珠丝杠副的价格约为 1100 元，考虑到机床产品品类繁多，高端设备应用零部件可能相对更高。国家已在《（中国制造 2025）重点领域技术路线图》针对高端机床用滚珠丝杠明确提出国产替代的要求：到 2025 年，高档数控机床与基础制造装备国内市场占有率超过 80%；主轴、丝杠、线轨等中高档功能部件国内市场占有率达到 80%，国产替代逻辑非常清晰。

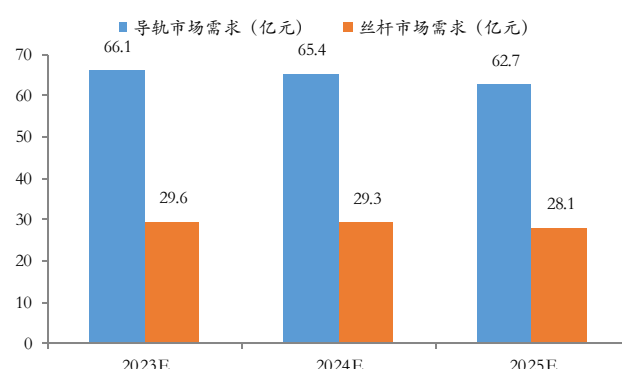
随着机床行业的景气度提升，滚动功能部件有望每年带来约 90 亿的市场空间。机床的市场需求主要来自于机床每 10 年左右的更新需求以及下游应用领域高景气带来的新增机床的需求，而根据浙海德曼招股说明书显示，滚珠丝杠、导轨约占机床成本的 1.54%、3.44%。因此我们基于中国工具工业协会机床历史销量数据来测算更新需求，根据模具行业销量数据来测算新增需求（假设模具行业应用的机床数量占比保持不变）。针对国内市场，我们预计 2023/2024/2025 年机床的市场需求有望分别达到 1921 亿元/1900 亿元/1823 亿元，则滚珠丝杠的市场需求有望分别达到 29.6 亿元/29.3 亿元/28.1 亿元，导轨市场需求有望分别达到 66.1 亿元/65.4 亿元/62.7 亿元。

图16. 滚珠丝杠和导轨约占机床成本的 4.98%



资料来源：浙海德曼招股说明书，安信证券研究中心

图17. 2025 年估计机床产业滚动功能部件需求约 90.8 亿



资料来源：机械工程学报，中国机床工具工业协会，海天精工招股书，祥鑫科技招股书，安信证券研究中心

### 2.1.2. 工程机械：电动化替代液压传动，新兴应用场景正在落地

在工程机械电动化发展趋势下，推动电动缸对传统液压缸的替代，电动缸里核心部件之一即滚动功能部件（其中核心元件包括滚珠、滚柱丝杠等不同种类）。类比电动化发展较快的注塑机行业，根据机械工业信息研究院，电动式注塑机已占到注塑机总量 75%，注塑机中注塑和合模部分要求滚珠丝杠较高的负荷承受能力，3000 吨以上大型电动化注塑机额定动载荷基本在 3000kN（300t）以上，要求把粘度较高的塑性材料以高速射出，并加以保持，滚珠丝杠通常以 20-150mm 的行程（导程范围），以 100-250mm/s 比较慢的速度，在高负荷的状态下反复运动。NSK 公司也开发了处于世界领先水平的注塑机专用滚珠丝杠（HTF 系列）。在工程机械应用中，产品品类、应用环境多元化的特点也决定了电动缸的多规格、多结构的需求特点，例如：高频电动缸应用于打桩机；伸缩旋转式电动缸应用于旋挖钻机；缓冲式电动缸应用于推土机等。

工程机械电动化所需滚珠丝杠产品具有典型的低精度、高负载的特点。类比机床应用领域，滚珠丝杠精度要求一般在微米级别，工程机械行业精度要求不高，一般在毫米级别；类比注塑机领域，注塑部分的滚珠丝杠副要求能在小行程下运动并具有良好的承受高负荷能力的主要特征。和工程机械电动化应用类似，滚珠丝杠副部件需要保证设备作业效率、较高的耐磨性以及具备高负载能力，而注塑机领域电动化的成功应用一定程度上证明了——工程机械电动化在关键的滚动功能部件性能端具备可行性。

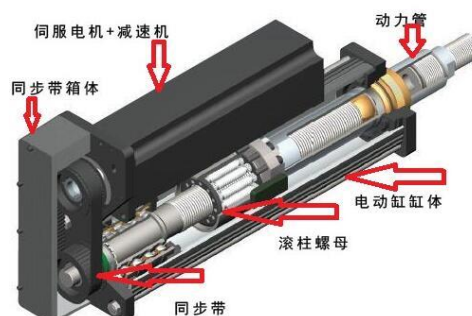
表10：电动缸产品在工程机械中的具体应用

| 产品类型     | 特点                                              | 应用   |
|----------|-------------------------------------------------|------|
| 高频电动缸    | 采用螺旋机构通过缸筒限位转化为直线运动，电动缸输入轴转动一圈电动缸可往返一个行程，具有高频特性 | 打桩机  |
| 伸缩旋转式电动缸 | 既可以前后伸缩往返运动，同时能 360° 任意旋转的电动缸，将推杆与钻头连接完成旋钻      | 旋挖钻机 |
| 缓冲式电动缸   | 启动、冲击等过程中的瞬间冲击载荷作用降低，能增加举升推土铲作动器的寿命             | 推土机  |

资料来源：方元明科技官网，安信证券研究中心

从电动缸结构来看，该产品是将伺服电机与滚珠丝杠一体化设计的模块化产品，与液压缸、气动缸相比，电动缸具有传动效率高、应用成本低等优势。电动缸以电力作为直接动力源，电机带动丝杠旋转，通过螺母将旋转运动转化为直线运动，带动负载做往复直线运动，具有结构紧凑简单、定位精度高、传动效率高、适应性与可靠性高、后期运维成本低等特点，例如电动缸可在极端温度下运行，性能影响小，只需要定期润滑就可以保持高稳定输出；电动缸作为动力执行机构，也不存在污染、泄露等隐患。此外，电动缸也可以更简易地集成到可编程控制系统中，系在一定功率范围内代替液压缸、气动缸的高端产品。

图18. 伺服电动缸图例（例示中为轴向载荷较大的滚柱丝杠）



资料来源：广宏自动化，安信证券研究中心

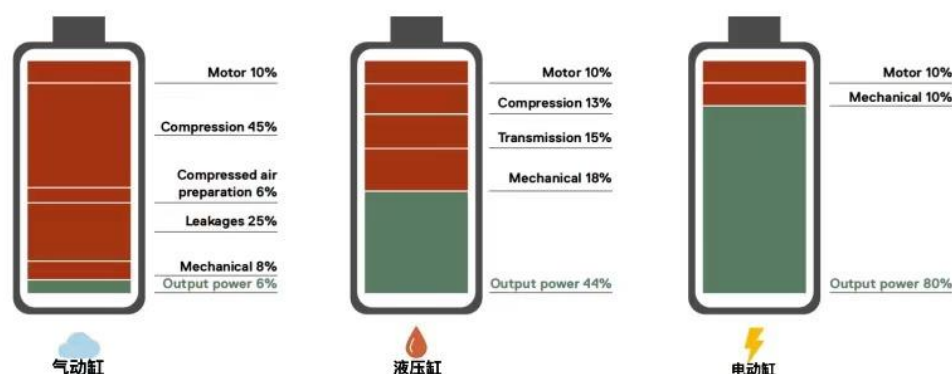
表11：工程机械电动缸与液压缸应用情况对比

|      | 电动缸                                                                                | 液压缸                                                                                        |
|------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 传动效率 | 电动缸在运转时仅有约 20% 的发热等损耗，最终作用到油缸上的效率高达 70%-80%                                        | 传统液压缸利用发电机做功，经过泵阀、管路，由于发热和管路变化带来压力损失，最终作用在马达、油缸的效率约为 27%                                   |
| 可靠性  | 结构简单紧凑；高可靠性的接近开关控制电动缸伸缩，行程控制可靠；电动缸的伸出通过电动机转动控制，可精准控制，位置锁止可靠。                       | 系统组成较为复杂，其中包括液压管路、液压泵、液压阀、缸体等，液压缸的行程由电磁阀接收开关信号控制，位置锁止由锁止阀控制，若液压系统存在漏油，液压缸的行程精度、位置保持精度下降。   |
| 测试   | 电动缸设计时，需要合理选择测试的方式、方法，合理划分产品单元并设置测试点，方便调试与维修。                                      | 液压系统出现故障难以诊断，主要是由于压力测试点的选择较为复杂，液压系统的测试和维修困难。                                               |
| 维修   | 电动缸将电机、减速器、齿轮减速箱、缸体一体化设计，故障时易隔离、排查。集成性较高、零部件较少，故障点低，维修概率较小，基本只需进行常规注脂保养。           | 液压缸的维护分为密封件的检查与维护、缸筒的检查与维护、活塞杆/导向套的检查与维护、缓冲阀的检查与维护。                                        |
| 安全性  | 电动缸具有位置锁定功能、限流功能，电动缸在运行过程中发生断电的情况下，电动缸进行自锁；在电动缸发生故障时开启限流，保证负载及缸的安全性。               | 在日常工作中，液压系统不时出现安全事故，轻者人员伤亡、重者有生命之忧，甚至导致工作场所的严重破坏。                                          |
| 适应性  | 具有良好的温度适应性，工作温度范围约为-40-80 摄氏度；当电动缸安装面采用橡胶或铜箔进行密封，推杆伸出端面进行防水防尘处理时，可在水中、砂尘工况下进行可靠作业。 | 液压油粘度容易受外界温度影响，低温时液压油粘度变大导致液压油摩擦力变大，液压缸效率降低；液压缸在砂尘工况下作动时，若砂尘进入到液压系统内，会减小液压阀门、液压泵、液压管路使用寿命。 |

资料来源：方元明科技官网，安信证券研究中心

从传动效率来看，电动缸传动能量损失少，传递能量高达 80%。在执行元件工作过程中，往往伴随着各类发热损耗，包括电机、压缩过程、传输过程、其他机械损耗、泄露损失。根据瑞典 Ewellix（滚珠丝杠制造商，全球线性驱动器解决方案领先企业）官网，气动缸、液压缸、电动缸能量输出效率分别为 6%、44%、80%，电动缸传动效率优势明显，意味着其更加节能。

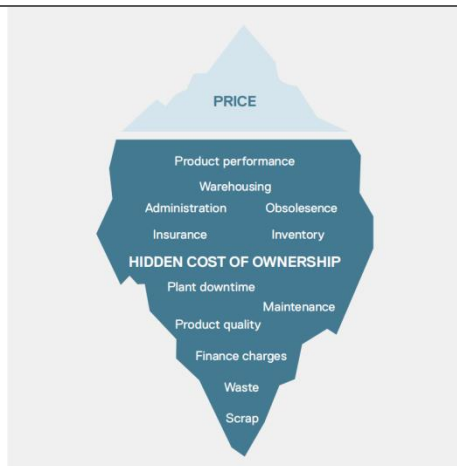
图19. 气动缸、液压缸和电动缸能量损耗对比



资料来源：Ewellix 官网，安信证券研究中心

从应用成本来看，电动缸具备全生命周期成本优势。工程机械电动缸应用初期阶段，其价格或许要高于已经大规模应用的成熟的液压缸产品，但从使用角度来看，电动缸具备一定隐形成本优势：①易损件少，易于维修保养，因故障导致对正常运行时间的影响小；②无周期性费用支出，系用户不必购买机油、过滤器或密封件备用；③能源利用率高，且闲置时功耗为零；④低库存费用，无需处理泄漏和溢出事故；⑤保险、财务等其他费用支出少。

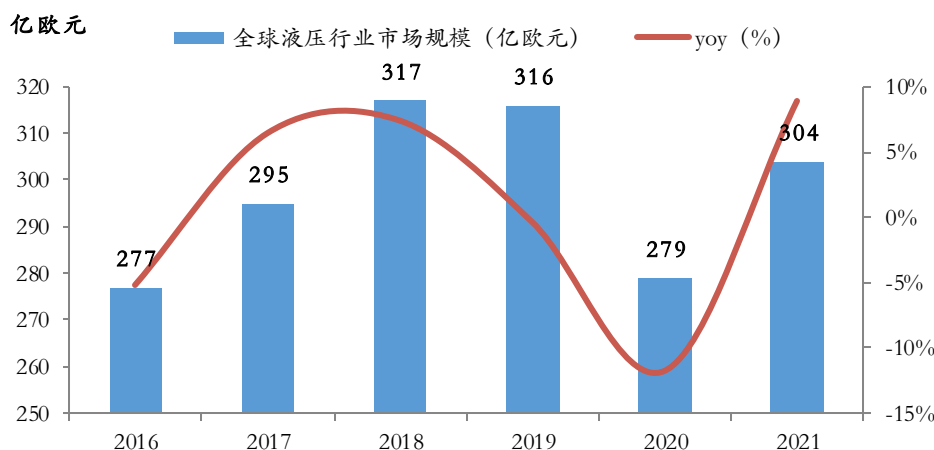
图20. 电动缸具有多维度的隐性成本优势



资料来源：Ewellix 官网，安信证券研究中心

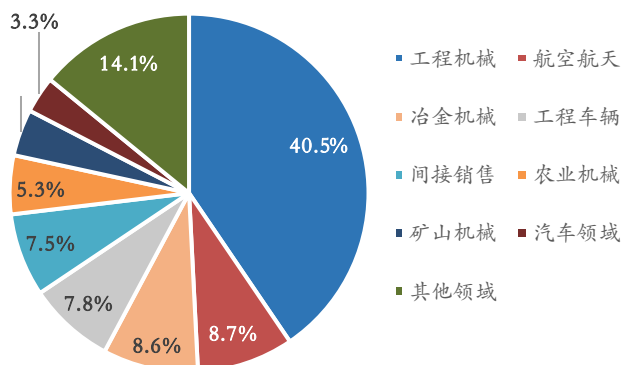
我国工程机械电动缸可替代空间或达 60 亿人民币。根据华经产业研究院，2021 年全球液压件行业市场规模约为 304 亿欧元（约合 2370 亿人民币），其中工程机械液压件应用规模约占全球的 40.5%，对应约 960 亿人民币，而我国液压件需求约占全球的 36%；根据智研咨询数据，我们若以挖掘机为例，其液压系统中油缸的价值占比约 18%；我们粗略推算工程机械液压油缸全球市场规模约 173 亿人民币（ $2370 \times 40.5\% \times 18\%$ ），我国约 62 亿人民币（ $173 \times 36\%$ ）。进一步地，我们同时考虑以下因素：①我国作为全球工程机械为数不多的重要制造基地以及相对较快的工业制造发展速度，我国液压件需求占比或许有所低估；②电动缸相比同规格液压缸具有价值量溢价；③电动缸或许并不能够 100%对液压缸实现替代。综合以上，我们仍认为，我国工程机械电动化趋势下，电动缸可替代空间或达 60 亿人民币级别；工程机械属于单一应用行业，但细分品类较多，滚珠丝杠作为电动缸核心部件之一，我们估计其在电动缸中的价值量占比处于 10-20% 区间，则工程机械领域电动化替代，对应国内市场滚动功能部件规模增量估计在 6-12 亿元。类似具备电动替代液压趋势的行业还包括注塑机、航空航天、海工海事等领域。

图21. 2021 年全球液压行业市场规模约为 304 亿欧元



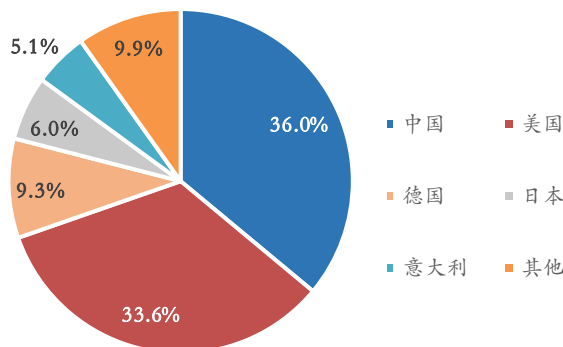
资料来源：国际流体动力协会，华经产业研究院，安信证券研究中心

图22. 工程机械行业液压件需求约占总需求的 40.5%



资料来源：国际流体动力协会，华经产业研究院，安信证券研究中心

图23. 中国液压件市场规模约占全球的 36%

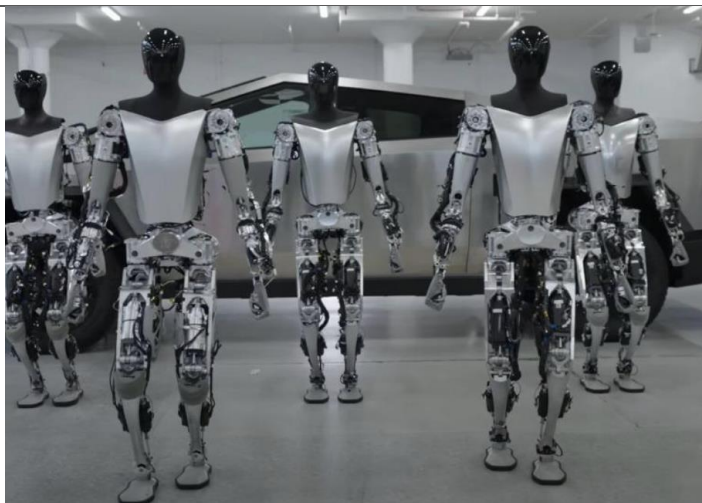


资料来源：国际流体动力协会，华经产业研究院，安信证券研究中心

### 2.1.3. 人形机器人：新兴产业打开滚珠丝杠应用的想象空间

人形机器人是一种模仿人类外貌和运动能力的机器人。人形机器人具有高度通用性，通过多层次、精密设计，极大提升了机器人应用场景的灵活性，其终极目标是让机器人“解放人类劳动力”。人形机器人的设计是基于人类功能，同时性能又能超越人类，从替人类搬运、搜救、排爆、驾驶，到拥有高智能后甚至可以成为人类的陪伴提供情绪价值，其发展存在无限可能。近年来随着 AI 大模型的超预期发展，以及产业资本的密集投入，人形机器人产业发展加速。一方面，随着人工智能和机器学习的发展，人形机器人在感知、决策和执行能力方面取得了巨大进步。另一方面，产业资本关注度提升，多方入场加速布局，各家企业机器人性能亦在不断完善。比如，Tesla 在 2023 年 5 月的股东大会上发布其人形机器人最新视频，我们可以看到其性能更加稳定、形态也更加自然。Tesla Optimus 机器人预计量产售价低于 2 万美金，若能实现该价格，将对人形机器人市场化放量带来标志性时刻。

图24. 特斯拉人形机器人 Tesla Bot Optimus



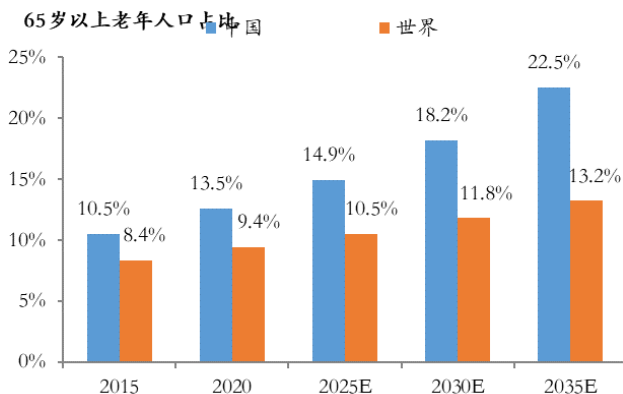
资料来源：Tesla Youtube，安信证券研究中心

此外，人口老龄化和劳动力短缺问题催生了对机器人的需求。

人口加速老龄化，劳动力出现缺口。据中国卫健委统计，2015 年中国 65 岁以上人口比例达 10.5%，高于世界平均水平 8.4%。2020 年间，中国 65 岁以上人口比例快速攀升至 13.5%，增速亦高于同期世界平均水平。据联合国经社部预测，2035 年中国 65 岁以上人口比例将达高达 22.5%，进入超老龄化社会。同期，全球平均水平亦将上升至 13.2%，接近严重老龄化。据此，全球均面临着日益严峻的人口老龄化问题，劳动力供给将面临严重短缺。

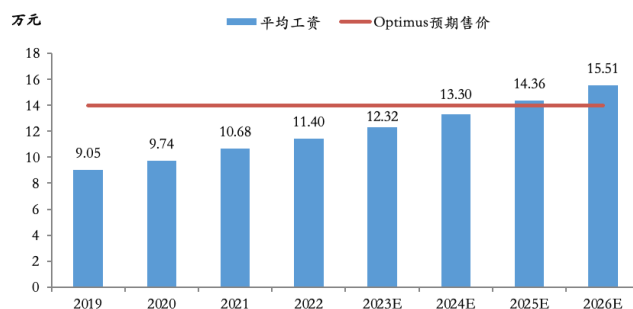
**人均工资逐年上升，用工成本水涨船高。**据国家统计局数据显示，中国人均工资从 2019 年的 9.05 万迅速上升至 2022 年的 11.4 万，复合增长率达 8%，用工成本压力快速上升，假定未来中国人均工资年增长率仍为 8%，2025 年预期中国人均工资将达 14.4 万元。同期，Optimus 预期将投入量产，据马斯克宣称售价约为 2 万美元，约合 14 万元，与中国人均工资基本持平。据此，人形机器人有望占据成本优势，在工业和服务业中实现快速渗透。

图25. 中国和世界 65 岁以上人口占比增长迅速



资料来源：中国卫健委，联合国经社部，世界银行，安信证券研究中心

图26. 中国劳动力成本快速上升，机器人替代潜力巨大



资料来源：国家统计局，Tesla AI day，安信证券研究中心

**理想情形下，2025-2035 年人形机器人销量增速有望达 94%，两年投资回收期。**根据哈默纳科官网公告显示的高盛预测：

**①最乐观情形：**2035 年人形机器人市场规模可达 1540 亿美元，与 2021 年电动汽车市场规模相近，2025-2035 年复合增速达 94%。为了达到最乐观情形，技术必须有革命性的突破：比如机器人的电池需支持长达 20 小时的连续工作；机器人需要兼具敏捷性和智能性；运动规划算法的效率和算力需大幅提升；机器人需自主学习并适应工作环境；机器人制造成本需年均降低 15%-20%。此外，消费者对机器人进入生活的接受度也需要大幅提升。高盛认为，上述技术突破虽然看似难以实现，但考虑到机器人的发展速度已然超乎公众想象，最乐观情形亦有可能达成。

**②乐观情形：**若参照全球电动汽车发展历程，预计 2025-2035 年人形机器人销量 CAGR 可达 40%左右。乐观状态下，若人形机器人发展速度快于电动汽车发展进程，则预计 2025-2035 年人形机器人销量 CAGR 可达 59%。

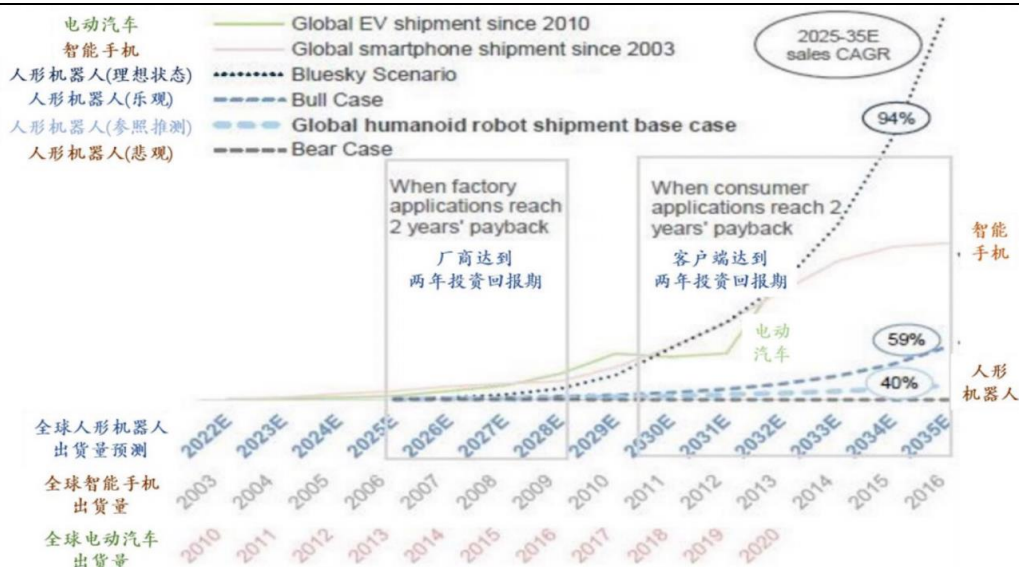
**③中性情形：**预计未来 10-15 年内人形机器人市场有望达到 60 亿美元；

**④极悲观情形：**人性机器人技术发展遇到瓶颈而停滞，预计 2025-2035 年人形机器人销量 CAGR 可能为 0%；

从劳动力替代角度来看，预计 2025 年-2028 年厂商达到两年投资回收期，2030 年-2035 年客户端达到两年投资回收期。

此外，特斯拉 CEO 马斯克在 AI DAY 以及股东大会上表示其人形机器人量产目标售价预计能够达到 2 万美元，销量有望达百万台级别。

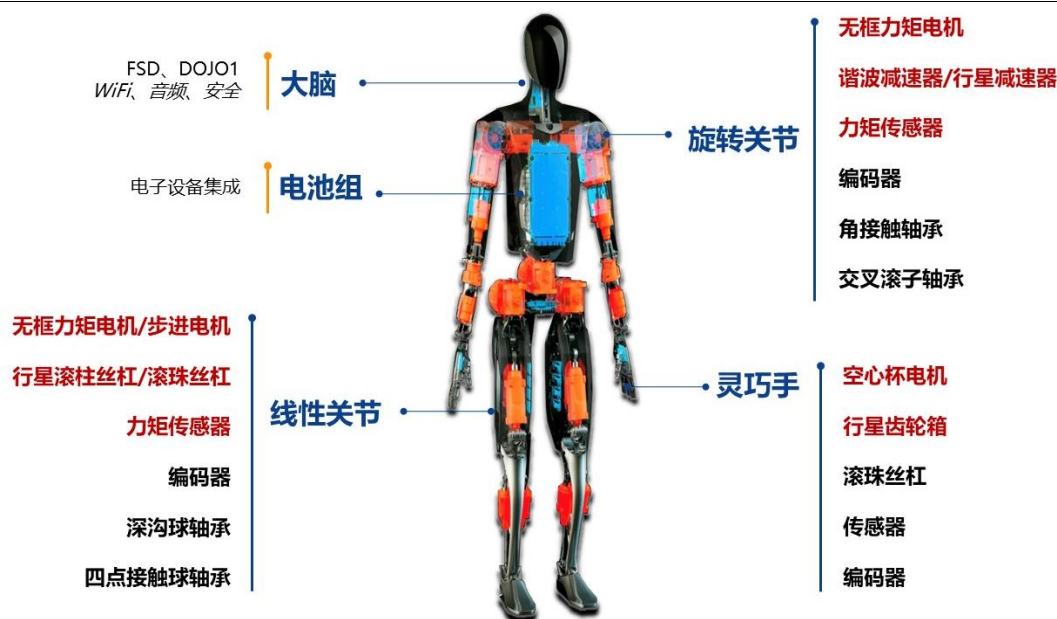
图27. 全球人型机器人市场规模预测



资料来源：高盛，哈默纳克，安信证券研究中心

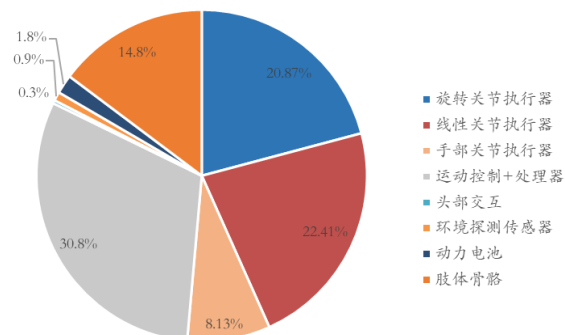
人形机器人中关节成本占比过半，滚珠丝杠是直线执行器中的重要零部件。关节是人形机器人身体各个部分的连接点，用于实现运动和姿态调整。人形机器人关节中主要由执行器驱动，执行器包括旋转执行器、线性执行器和手关节执行器，其中滚珠丝杠主要应用在直线执行器中，保证了机器人的稳定性和可靠性，以及关节传动的精准控制，为人形机器人的运动控制和姿态调整提供了可靠的传动解决方案，进而能够执行更复杂和精细的任务。根据我们对 Tesla Optimus 的成本拆分，可以得到滚珠丝杠占到机器人总制造成本的 12.07%，其中行星滚柱丝杠占比 9.85%，滚柱丝杠占比 2.22%，仅次于电机的成本占比，成为诸多零部件中价值量较高的一环。根据上文做粗略估计，在中性情境下未来 10-15 年人形机器人 60 亿美元的全球市场，有望为滚珠丝杠带来约 7 亿美元（约合人民币 50 亿元）新增需求（全球市场口径）。

图28. Tesla Optimus 核心零部件分布示意图



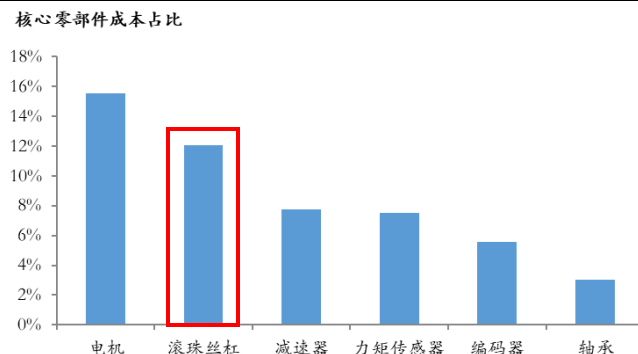
资料来源：Tesla AI Day 2022，安信证券研究中心

图29. 关节执行器成本占比超 51%



资料来源: Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

图30. 电机、滚珠丝杠、减速器、传感器成本占比较高

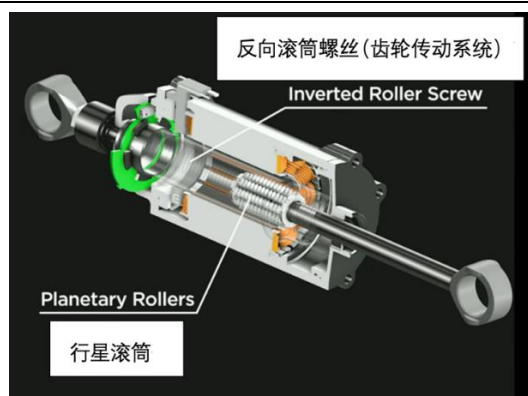


资料来源: Tesla AI Day, Ebay, 各公司官网, 安信证券研究中心

在人形机器人的运用中, 行星滚柱丝杠可以以更高的负载、更小的摩擦力、与更长的寿命对滚珠丝杠进行替代。行星滚柱丝杠在主螺纹丝杠的周围, 行星布置了 6-12 个螺纹滚柱丝杠, 与普通滚珠丝杠的结构相似, 区别在于行星滚柱丝杠载荷传递元件为螺纹滚柱, 是典型的线接触; 而滚珠丝杠载荷传递元件为滚珠, 是点接触。主要优势是有众多的接触点来支撑负载, 能够提供高于滚珠丝杠的额定动载和静载, 螺纹滚柱替代滚珠将使负载通过众多接触线迅速释放, 从而能有更高的抗冲击能力。

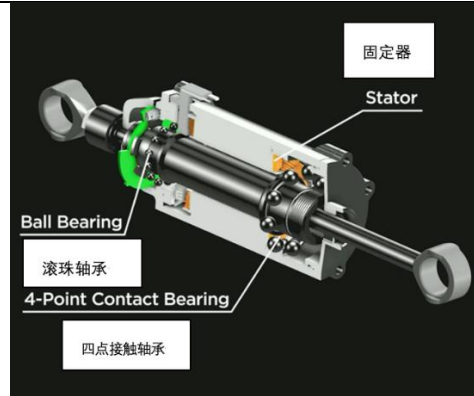
行星滚柱丝杠也特斯拉人形机器人应用方案中有所涉及, 但其与常规方案略微不同。特斯拉行星滚柱方案称为反向 (inverted) 行星滚柱丝杠, “反向”意为将螺杆、螺母角色互换。非反向方案为电机带动螺杆旋转, 螺母与主体固定, 螺母沿螺纹被螺杆带动将其旋转运动变换为直线运动。反向方案变为螺母旋转, 螺杆与主体固定, 此时螺母旋转带动螺杆运动, 螺杆将螺母的旋转运动转换为直线运动。剖面图可以看到伺服电机转子直接带动螺母旋转。该方案特点是行星滚子与螺母多点咬合滚动配合, 承载能力极强, 寿命超长, 比常规滚珠丝杠提升一个数量级, 但难点是滚子及螺母磨制工艺复杂耗时, 装配时需要匹配不同滚子的相位, 操作难度大, 需要通过设计和工艺在保证性能的前提下将成本降低。

图31. 特斯拉线性执行器剖面图 1 螺母螺杆



资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

图32. 特斯拉线性执行器剖面图 2 滚珠



资料来源: Tesla AI Day 2022, 安信证券研究中心

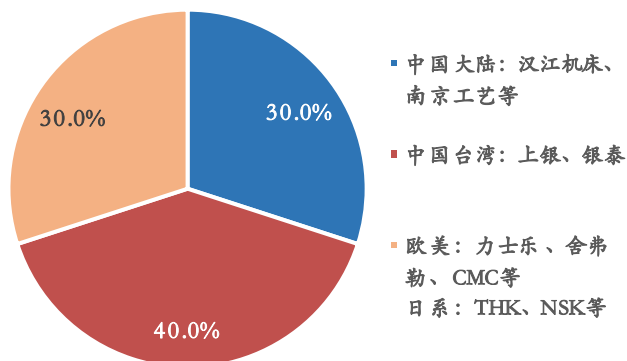
## 2.2. 高端应用市场仍被外资垄断，国产制造商已进入布局加速期

滚动功能部件市场根据需求可以分为高端市场、中低端市场，本质区别在于不同应用场景下，对其性能指标的要求不同。高端产品往往意味着：①**精度**：满足定位精度更高、重复精度更好的机械运动需求；②**可靠性**：采用更高质量的材料和更精密的制造工艺，以提供更长的使用寿命和更高的稳定性；③**结构设计**：采用更加紧凑、精密的设计，例如更小的滚珠、更高的丝杠螺距，以获得更高的运动精度和更高的刚性；④**检测与保养**：更严格的检验标准以及相对更频繁的检查与维护。分别来看：

- **中低端市场**：主要以生产率高、价格低廉，并能保持机械效率高、耐磨性好的产品为主，下游应用精度要求不高，因此其代表性产品多为轧制型丝杠。下游主要为一般机械设备如工程机械、普通机床、打包机、注塑机等领域，也包括医院病床、手术台、千斤顶、小型起重机、阀门开关等应用场景。
- **高端市场**：主要分为精密、高速、重载型滚动功能部件，以及为满足特殊应用场景的特殊功能产品，代表性产品多高精度研磨工艺。对应下游市场主要为高精度切割、高速加工和高速定位的 CNC 机床、印刷机、精密机器人、航空航天、电动汽车、3C 装备等重点领域。

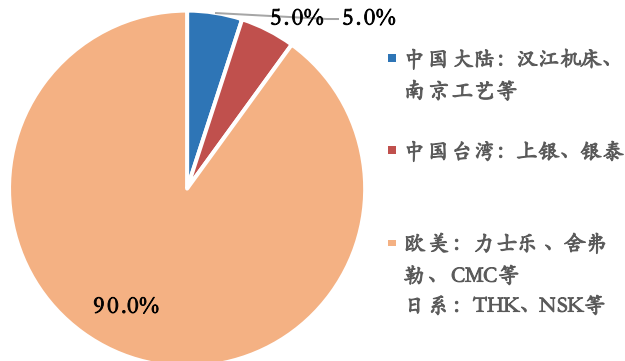
从市场格局来看，欧美系、日系、台系占据我国滚动功能部件中高端市场主导，大陆制造商产品竞争力不足。根据金属加工杂志社数据，在国内高端市场，欧美日企业市场占有率高达 90%，中国大陆、中国台湾制造商市场份额各约 5%，高端市场格局相对集中；在国内中低端市场，大陆制造商拥有过约 30%，中低端市场格局相对分散。

图33. 中国品牌在国内中低端市场占据一席之地



资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

图34. 国内高端应用市场基本被欧美日系产品垄断



资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

我国滚动功能部件生产制造水平相对外资品牌仍有差距。我国虽是滚珠丝杠制造厂商较多的国家，但生产不集中，总产值有限，除少数重点骨干企业的部分产品达到或接近国外水平外，多数企业只能生产中低档产品，产品品类相对单一，整体国产品牌影响力较弱。海外龙头企业往往拥有数十年技术积累，其产品的持续迭代往往也引领了行业的发展，根据机械工业信息研究院官微，以加工中心为例，工作台的移动速度在 20 世纪 80 年代为 15-20m/min，加速度 0.5g 左右，至 90 年代后期已提升至 60-80m/min，加速度 1.5g 以上，海外龙头企业如日本 NSK、德国力士乐先后开发的第一代精密高速滚珠丝杠副产品，总体水平基本可以达到 Dn 值（代表额定载荷下的最高速度）13-15 万，速度 70-100m/min，加速度 1-1.5g，精度为 C3 以上；近年来新开发的超高速静音第二代滚珠丝杠副品性能还有进一步提升，Dn 值可达 20 万，速度 200m/min，加速度 1.5-2.5g。

我们认为，可以从材料、设备、生产三个角度去分析滚动功能部件产品的国内海外差距：

**(1) 材料端：配方 KnowHow 是行业壁垒之一，国产制造商和原材料供应商在基础材料端的研发、应用已经实现突破。**滚珠丝杠原材料主要以不锈钢或各类合金钢为主，特种合金钢基本包含碳、硅、锰、硫、磷、铬、钼等元素，根据不同微量元素的配比，以实现针对不同应用场景的特性要求，例如用来制造滚子、套圈的材料多为高渗碳轴承钢，要求具有一定耐磨性、韧性；用来制造丝杠的材料多为超高强度合金钢，要求温度系数低、耐久性好等。海外制造商在中国建立生产制造基地后，同时考虑原材料质量和成本节约，也基本认可了国产原材料供应链。

**表12：GCr15 高渗碳轴承钢化学元素成分含量 (%)**

| 成分  | C    | Si   | Mn   | S     | P     | Cr   |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|
| 最小值 | 0.95 | 0.15 | 0.20 | —     | —     | 1.30 |
| 最大值 | 1.05 | 0.35 | 0.40 | 0.020 | 0.027 | 1.65 |

GCr15 高渗碳轴承钢，是用来制造滚珠、滚柱和轴承套圈的钢。  
有高而均匀的硬度和耐磨性，以及高的弹性极限。

资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

**表13：50CrMo4 超高强度合金结构钢微量化学元素成分含量 (%)**

| 成分  | C    | Si   | Mn   | S     | P     | Cr   | Mo   |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|
| 最小值 | 0.46 | 0.10 | 0.50 | —     | —     | 0.90 | 0.15 |
| 最大值 | 0.54 | 0.40 | 0.80 | 0.035 | 0.035 | 1.20 | 0.30 |

50CrMo4 超高强度合金结构钢，调质处理后有较高疲劳极限和抗多次冲击能力，低温冲击韧性良好。高温时有高蠕变强度和持久强度。

资料来源：金属加工杂志社，安信证券研究中心

**(2) 设备端：设备投资较大，进口高端设备可能是国产制造商要快速推出高品质滚珠丝杠产品，把握国产替代窗口期的关键。**滚动功能部件制造属于资金密集型产业，设备投资占比较重，以恒立液压为例，其 2022 年定增募投的线性驱动器项目显示，总计划投资约 15.3 亿元，其中设备采购约 10.8 亿元，占比约 70.5%。海外高端机床技术相对成熟，设备稳定高效优势显著，海外滚珠丝杠制造商经过长期积累和产品迭代，所使用的设备也经历了自研升级、改造的过程，进一步加强了其产品护城河。对于国产制造商来说，采用自制设备的路线或能在使得产品、工艺、设备三者互相促进、逐步成熟，有利于生产成本控制，但要付出一定时间成本。短期来看，我们认为若要在高端滚动功能部件产品端率先实现国产替代，则应在设备端优先考虑相对成熟的进口设备。

**(3) 生产端：滚珠丝杠产品同时具有定制化和标准化属性，相对一致但又繁杂的加工过程决定了产品良率控制是国产制造商需要突破的关键课题。**我们认为，产品的定制化体现在多元化的下游应用决定了产品性能、规格参数的多样化，但作为精密加工产品，其生产流程与品控标准的相对一致，反映了其标准化的特点。以研磨工艺加工的高端产品为例，其整套生产步骤约有 22 步，加工工艺周期约 30-45 天，因此生产过程中的管理控制尤为关键，每一步加工步骤要实现较高良率，才能保证一定的整体良率水平，实现较高的产品一致性。这要求制造企业对生产过程中的关键工艺，如热处理、材料切削、部件研磨、性能检测等技术均有较为熟练地掌握。

**表14：高端磨削滚珠丝杠生产制造步骤较多，良率控制难度高**

| 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》，安信证券研究中心

国际竞争环境日益激烈，国家战略支持重大技术装备国产化节奏加快。自“增强制造业核心竞争力”2022 年首次被写入政府工作报告后，推进重大技术装备国产化、推进关键零部件国产化是落实国家战略的需要，也是中国高端制造业“走出去”的重要突破点；进一步，党的二十大报告指出“着力提升产业链供应链韧性和安全水平”，即重在补链、强链、组链和造链，其中所谓“补链”即补齐短板，聚焦被“卡脖子”的关键行业、核心技术，围绕核心基础零部件与基础制造工艺等，在关系国家安全的领域和节点确保自主可控。滚动功能部件作为多项重要下游领域关键零部件，国产制造商正处于布局加速阶段，定位高端以及新兴应用领域，如高端机床、新能源汽车、人形机器人等。

**表15：滚动功能部件主要国产制造商梳理**

| 分类          | 公司名称              | 股票代码                     | 生产线设备  | 目标应用领域                    |
|-------------|-------------------|--------------------------|--------|---------------------------|
| 已具备成熟产品生产能力 | 秦川机床<br>(子公司汉江机床) | 000837.SZ                | 自制为主   | 机床、新能源汽车                  |
|             | 南京工艺              | 未上市                      | ——     | 机床及其他一般设备                 |
|             | 凯特精机              | 未上市                      | 拥有进口设备 | 机床及其他一般设备                 |
|             | 博特精工              | 未上市                      | ——     | 机床及其他一般设备、新能源汽车           |
| 正在进行产品布局    | 恒立液压              | 601100.SH                | 进口为主   | 工程机械、高端机床、人形机器人           |
|             | 贝斯特               | 300580.SZ                | 进口为主   | 高端机床、新能源汽车、人形机器人          |
|             | 恒而达               | 300946.SZ                | 自制为主   | 机床、工业自动化                  |
|             | 长盛轴承              | 300718.SZ                | ——     | 新能源汽车                     |
| 特斯拉人形机器人产业链 | 拓普集团              | 601689.SH                | ——     | 目标主要为人形机器人新兴需求提供多元化配套解决方案 |
|             | 三花智控              | 002050.SZ                | ——     |                           |
|             | 江苏雷利<br>(子公司鼎智科技) | 300600.SZ<br>(873593.BJ) | ——     | 医疗、工业、人形机器人配套解决方案         |

资料来源：各公司公告，各公司官网，安信证券研究中心整理

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/288032050134006072>