

行业投资评级

强于大市|维持

行业基本情况

收盘点位	1448.01
52 周最高	1606.0
52 周最低	1343.43

行业相对指数表现（相对值）



资料来源：聚源，中邮证券研究所

研究所

分析师: 刘卓
SAC 登记编号: S1340522110001
Email: liuzhuo@cnpsec.com
研究助理: 傅昌鑫
SAC 登记编号: S1340123050006
Email: fuchangxin@cnpsec.com

近期研究报告

《人形机器人系列专题（二）：产业链标的梳理》 - 2023.11.19

人形机器人系列专题（三）：链条在人形机器人中的应用

● 投资要点

高精度的传动控制使得机械传动被广泛应用。传递动力主要有三种基本方式：机械传动、电力传动和流体动力传动（含气压传动及液压传动）。机械传动是通过齿轮、齿条、带、链等机件传递动力和进行控制的，其优点是传动准确可靠、传动效率高，实现回转运动的结构简单，同时可以传递较大扭矩。

链传动相较于其他传动有其特定优势区间。根据应用场景的不同需求，才能选择出最为适合的机械传动形式。通过对比各类机械传动的特点，我们能够注意到，链传动应用在传动速度低、负载/扭矩大、传动效率要求高、输入输出中心距较远、工作环境恶劣等场景下表现优异。

人形机器人应用场景天然需求灵活的运动性能。人形机器人的运动性能作为最直观的产品表现，是消费者首要关注的部分。基于此，下游应用场景对于人形机器人产品的设想中，天然包含了“能够做到像人类一样灵活运动”的潜在需求。**人形机器人所需要的运动性能应当是力大身轻、能耗小、反应快，其运动核心集中在下半身。**一个强大的执行器应当满足以下几个标准：（1）具备高的输出自重比（2）具备低的输出代价（3）具备高的力响应速度。对于人形机器人的下肢传动执行，主要有两大类实现方法，一种是以液压执行器为核心的液压驱动，一种是以电机为核心的电驱动。采用液压驱动能够使得人形机器人的运动性能强劲，但由于其成本居高不下，难以商业化。在液压方案短期内无法克服规模化问题的情况下，后续厂商如特斯拉、小米、优必选等大多转向了稳定性、性价比更高的电机驱动方案。行业内对传动部件选择各异，尚未有链传动确定方案。**我们认为，特斯拉 Optimus 主要依靠执行器的方案，希望得到的是能够规模化量产、成本可控、结构可靠、低耗能的机器人，因此对于类似波士顿动力 Atlas 的高动态、高响应速度并非核心诉求。**

链传动凭借特性可适用于高扭矩电机及高运动性能要求场景。作为力矩的根本来源，电机扭矩密度在系统中总是至关重要。在电机扭矩密度不断提升的情况下，链传动等小减速比传动部件的需求将得到拓展。小减速比传动部件一般是行星减速器、带/链传动、连杆机构等，链条相比其他传动部件，其特点在通用机器人天然需要替代的枯燥重复、危害健康等行业工况中具备优势。

链传动方案替换的切入场景：（一）为追求人形机器人优秀的运动性能，部分技术方案中将执行器置于关节远端，该情况下链传动或成为最优解。（二）链传动的替代场景还存在于机器人上半身手臂时，采用了两级链传动+手肘处肌腱传动的方案。此外，日本椿本链条预

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

计 2024 年推出世界上最小的超紧凑滚子链，应用场景为先进医疗设备
及机器人。

链传动方案可用于人形机器人的降本。行星滚柱丝杠海外产品售
价高，国产尚未规模化，仍需等待国内厂商量产降本。链条传动成本
相对较低，在满足性能及技术要求的控制成本效果显著。

● **风险提示：**

人工智能及大模型发展不及预期风险；核心零部件降本不达预期
风险；人形机器人商业化应用不理想风险；政策支持落地力度不达预
期风险。

目录

1 当前人形机器人传动执行方案比较	5
1.1 高精度的传动控制使得机械传动被广泛应用	5
1.2 链传动相较于其他传动有其特定优势区间	6
1.3 人形机器人应用场景天然需求灵活的运动性能	8
1.4 行业内对传动部件选择各异，尚未有链传动确定方案.....	11
2 链传动：特定场景下的成本优选	13
2.1 链传动凭借特性可适用于高扭矩电机及高运动性能要求场景.....	14
2.2 链传动方案替换的切入场景	14
2.3 链传动方案可用于人形机器人的降本	16
3 风险提示.....	17

图表目录

图表 1: 机械传动同电气传动、流体动力传动性能对比	6
图表 2: 常用机械传动的形式、特点及应用	7
图表 3: Atlas 灵活敏捷的运动能力展示.....	8
图表 4: 人形机器人下肢执行方案对比	9
图表 5: Atlas 的液压驱动装置	10
图表 6: Optimus 通过硬件仿真之后简化成的六种执行器	11
图表 7: Optimus 膝关节使用的连杆传动机构.....	11
图表 8: 特斯拉 Optimus 方案与链传动方案比较	12
图表 9: UCLA 人形机器人 ARTEMIS 的下肢结构图.....	15
图表 10: 傅利叶人形机器人 GR-1 实物结构图	15
图表 11: 日本椿本链条预计 2024 年推出世界上最小的超紧凑滚子链.....	16
图表 12: 全球代表性行星滚柱丝杠企业产品布局对比	17

1 当前人形机器人传动执行方案比较

1.1 高精度的传动控制使得机械传动被广泛应用

传递动力主要有三种基本方式：机械传动、电力传动和流体动力传动（含气压传动及液压传动）。一般需要根据每种传动方式的基本特点来正确地选择适合的传动方式。

电力传动是利用电力设备并调节电参数来传递动力和进行控制的。其主要优点是能量传递方便，信号传递迅速，标准化程度高，易于实现自动化等。其缺点是运动平稳性差，易受外界负载的影响，惯性大，起动及换向慢，成本较高，受温度、湿度、振动、腐蚀等环境因素影响较大。为了改善其传动性能，有些场合往往与机械（机电传动）、气压或液压传动结合使用。

气压传动是用压缩空气作为工作介质进行能量传递和控制的。其优点是结构简单，成本低，易于实现无级调速，阻力损失小，防火防爆，对工作环境适应性好。其缺点是由于空气易压缩，负载对传动特性的影响较大，工作压力低，只适用于小功率传动。

液压传动是以液体作为工作介质进行能量转换、传递和控制的。其优点是功率/质量比及力/质量比大，控制灵活，响应速度快，能实现无级调速，控制方便容易实现自动化，液压元件易于通用化、标准化，使用寿命长等。其缺点是作为工作介质的液体泄漏导致污染，液体的可压缩性、温度影响及管路弹性变形等导致难以实现严格的传动比、传动效率较低，液压元件制造精度高价格贵，且在封闭系统内工作故障难以处理。

机械传动是通过齿轮、齿条、带、链等机件传递动力和进行控制的，能够转变原动机输出的动力及运动形式以满足工作机的需求，实际运用中常见多种基本传动机构组合使用以构成机械传动系统。其优点是传动准确可靠、传动效率高，实现回转运动的结构简单，同时可以传递较大扭矩，制造容易、操作简单、维护方便等。其缺点是一般不能进行无级调速，远距离传动较困难，结构复杂成本高等。因此，机械传动主要用于中低速、传动比要求精确的工作场景中。

图1：机械传动同电气传动、流体动力传动性能对比

传动特性→ 传动方式↓	机械传动	机电传动	电力传动	流体动力传动	
				气压传动	液压传动
功率/质量比	小	小	小	中等	大
转矩-转动惯量比	小	小	小	中等	大
响应速度	低	中等	中等	低	高
可控性	差	中等、好	中等	中等	好
负载刚度	中等	差	差	差	大
调速范围	小	中等、大	中等	小	大

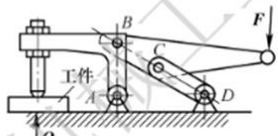
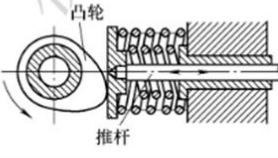
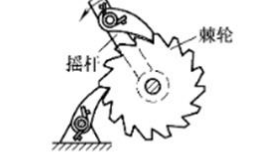
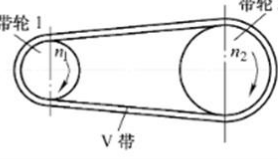
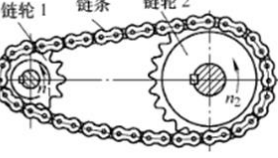
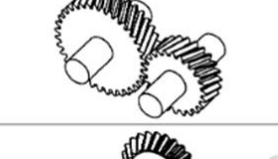
资料来源：《液压元件与系统（第4版）》（刘银水、李状云），中邮证券研究所

根据传动原理的差异，可将机械传动分为摩擦传动、啮合传动、推压传动三类。其中，摩擦传动包括带传动、绳传动等；啮合传动包括齿轮/齿轮机构传动（圆柱齿、锥齿、行星齿等）、蜗杆传动、螺旋传动、链传动、同步带传动等；推压传动包括凸轮/棘轮/槽轮机构、连杆机构等。

1.2 链传动相较于其他传动有其特定优势区间

根据应用场景的不同需求，才能选择出最为适合的机械传动形式。最主要需要考虑的是执行系统中驱动力的情况、传导到各关节点之后需要实现的运动形式/方向/速度、运转工况等核心方面。其他还需考量的有工作传递的功率大小（齿轮传动>带/链传动>蜗杆传动），传动效率，结构布置与外廓尺寸（传动尺寸紧凑：齿轮传动、蜗杆传动，传动距离较远：带/链传动），传动部件运转环境（工作环境恶劣一般用链传动），输出运动的精度，位置结构和尺寸等。各主要传动形式的特点及应用场景选择如下表。

图2：常用机械传动的形式、特点及应用

类型	运动形式变换	实例简图	功率/kW	传动比	效率(%)	应 用
平面连杆机构	回转、摆动、往复移动→回转、摆动、往复移动		大、中、小		较高	结构简单、制造方便；行程较大；连接处为面接触，磨损较轻，能承受较大载荷；一般不宜高速运动。 常用于重型机械、轻工机械、农业机械及机床、仪表等
凸轮机构	回转→往复移动、摆动		小		较低	可实现从动件的任意运动规律；但凸轮制造复杂；高速时冲击较大。 常用于自动机床的进给机构、印刷机、内燃机、纺织机等
棘轮机构	摆动→间歇回转或移动		中、小		较低	结构简单，角位移调节方便；平稳性较差；高速时噪声大；传递动力不宜过大。 常用于间歇转动角度很小或常需调节转角大小的场合。如牛头刨床工作台的进给机构
槽轮机构	回转→间歇回转		中、小		较高	结构较简单，工作可靠；运动较平稳；间歇运动转角不可调；每次槽轮转角不小于45°。 多用于不需经常调节转角的转位运动。如自动机床上的转动刀架
V带传动	回转→同向回转（两轴平行）		≤100	≤7~10	94~97	能远距离传动；工作平稳；能吸振缓冲；过载打滑起保护作用；结构简单、成本低。但传动比不准确。 常用于机床、输送机、农业机械、纺织机械等。通常置于传动系统的高速级
链传动	回转→同向回转（两轴平行）		≤100	≤8	92~97	可在高温、油、酸等恶劣环境下工作；远距离传动；瞬时传动比有波动。 常用于农业、化工、石油、矿山机械以及运输机械和起重机械等。通常置于传动系统的低速级
圆柱齿轮传动	回转→回转（两轴平行）		≤750 (直齿) ≤50000 (斜齿)	≤8 单级	95~98 (直齿) 96~99 (斜齿)	适用的功率和速度范围广；寿命长；效率高；传动比准确。但噪声大，制造精度要求高。 常用于各类机床、冶金矿山机械、起重机械、汽车、船舶、轻工机械、化工机械、仪表等
锥齿轮传动	回转→回转（两轴垂直相交）		≤500	≤5	95~98	传动比大而尺寸小；传动平稳。但效率低；因摩擦大，有时蜗轮需用价格较贵的青铜制造。 常用于车床溜板箱、铣床分度头、手动锯床等
蜗杆传动	回转→回转（两轴垂直交错）		≤50	<80	70~82	工作平稳；运动精度较高；尺寸紧凑；减速、增力效果好。但效率低、易磨损。 常用于机床的进给机构和机械的调速装置、起重升降装置等
滑动螺旋传动	回转→移动		中、小		30~60	

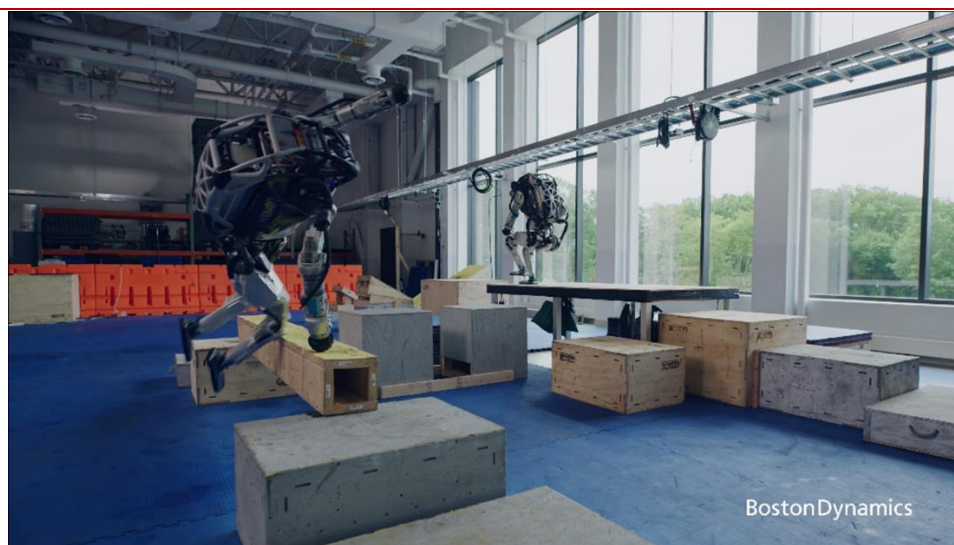
资料来源：《机械分析应用基础（第2版）》（李会文、皮云云），中邮证券研究所

通过对比各类机械传动的特点，我们能够注意到，链传动应用在传动速度低、负载/扭矩大、传动效率要求高、输入输出中心距较远、工作环境恶劣等场景下表现优异，而在安装空间较小、需求传动平稳性高（链传动瞬时传动比不固定）、需要输出直线运动等场景则不甚合适。

1.3 人形机器人应用场景天然需求灵活的运动性能

人形机器人的运动性能作为最直观的产品表现，是消费者首要关注的部分。人形机器人未来的具体应用场景虽尚未明晰，但能够讲人类从枯燥、肮脏或危险的环境中解放出来的通用型机器人，被许多人视为机器人领域的最终目标。从装配线上的机械臂，到空中漫游的送货无人机，专用机器人在过去几十年间彻底改变了各行各业，为人们的生活带来了巨大便利，然而多功能的通用型机器人依旧不见踪迹。基于此，下游应用场景对于人形机器人产品的设想中，天然包含了“能够做到像人类一样灵活运动”的潜在需求。事实上，人形机器人的发展也正向着追求更灵活、更敏捷的运动性能努力，用以替代特定生产线特定环节的工业机器人普遍是四轴 SCARA 或是六轴机器人，即有 4 个、6 个自由度，特斯拉展示的 Optimus 工程样机身体上有 28 个关节自由度，手部还有 11 个自由度，而真实的人体光手部就有 27 个自由度，全身自由度超过 200 个，目前的人形机器人在灵活度上还望尘莫及。对于运动敏捷方面，我们看到例如波士顿动力（Boston Dynamics）的 Atlas 由液压驱动，能够跑酷、360° 后空翻等极限运动，身手敏捷大幅向人类靠近。

图表3: Atlas 灵活敏捷的运动能力展示

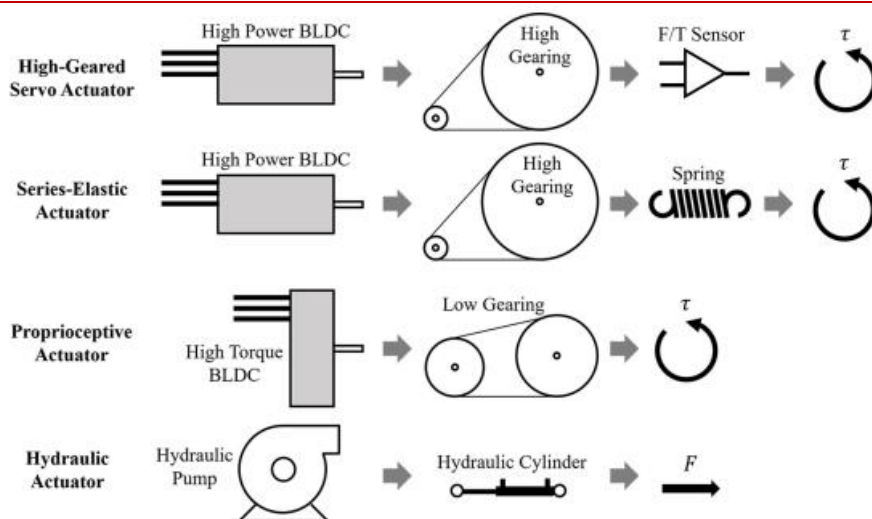


资料来源：Boston Dynamics 官网，中邮证券研究所

人形机器人所需要的运动性能应当是力大身轻、能耗小、反应快，其运动核心集中在下半身。波士顿动力研发的 Atlas 展现出来的运动能力令人叹为观止，甚至可以说树立了人形机器人的业界标杆。类似于人类身体中大脑控制肌肉，对于复杂的人形机器人系统来说，就是将复杂的控制算法通过执行器来体现，其中“大脑”是控制算法，而“肌肉”则是执行器，想要达到优秀的运动能力二者缺一不可。我们这里仅讨论执行器相关，一个强大的执行器应当满足以下几个标准：（1）具备高的输出自重比，即输出同样的力，执行器的重量越轻越好；（2）具备低的输出代价，即输出同样的力，执行器需要的能量消耗越少越好；（3）具备高的力响应速度，即执行器能够快速的根据需求输出力，响应延迟越低越好。一般来讲，考虑到人的下肢力量是远大于上肢力量的。健康的人都能毫不费力地站立，通过下肢支撑起整个身体的重量，但大多数普通人不经训练是很难倒立的，主要原因就是因为人类的上肢力量比下肢弱很多，所以人形机器人的运动核心通常也集中在下半身。

对于人形机器人的下肢传动执行，主要有两大类实现方法，一种是以液压执行器为核心的液压驱动，一种是以电机为核心的电驱动。根据 UCLA 的近期发表的论文《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》(Zhu, Taoyuanmin)，在研究开发 UCLA 的人形机器人 ARTEMIS 的过程中，将人形机器人下肢设计实现的方案做了大致分类，具体如下：

图表4：人形机器人下肢执行方案对比



资料来源：《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》(Zhu, Taoyuanmin)，中邮证券研究所

采用液压驱动能够使得人形机器人的运动性能强劲，但由于其成本居高不下，难以商业化。液压驱动方面目前主要是波士顿动力，其效果及影响力均走在前列，其他诸如 Moog 和 IIT 共同研发的液压执行器系统等。波士顿动力 Atlas 选用了功率大的液压驱动，能够以极低的损耗输出相当大的力，执行器重量较低，且单一动力源可以拓展接多个液压执行器，本身就是中低速执行机构也符合人形机器人的输出速度。波士顿动力通过在液压驱动方面积累的大量专利，制造出一个非常紧凑的液压驱动装置，重 5kg、功率 5kW，里面有电动泵储液罐、电池、过滤器、电子设备和一个冷却系统，凭借 28 个液压驱动器完成各种爆发力强的杂技动作。以旧版 Atlas 为例，其输出最大的关节是腿部的膝关节和髋关节，分别达到了 890Nm 和 840Nm，转速大约是 115rpm。但是，即便液压驱动拥有前述诸多优点，也存在无法回避的缺点：（1）液压系统能量效率不高；（2）系统零件数量多，且对于超高集成度的液压执行器，常规机加工切削已无法满足要求，需要使用 3D 打印；（3）实现液压力的高响应比较复杂，液压的伺服控制需要独立的电机伺服泵和力传感器。这些因素导致液压方案制造成本居高不下，难以走出实验室、走向商业化。

图表5: Atlas 的液压驱动装置



资料来源：智东西，中邮证券研究所

在液压方案短期内无法克服规模化问题的情况下，后续厂商如特斯拉、小米、优必选等大多转向了稳定性、性价比更高的电机驱动方案。在电机驱动方案中，伺服驱动器将位置、速度、扭矩告诉伺服电机，伺服电机将接收到的电压信号转换为扭矩及转速，减速器可以增加扭矩，优化低速运动的平稳性。虽然扭矩密度远低于液压驱动，但电机驱动可以通过搭配高减速比的减速器来加以补足，其现有技术已能满足机器人的多数运动需求，同时拥有能量转化效率、易维护、低成本、零件规整等优势。这一驱动方式通过位置、速度、力矩

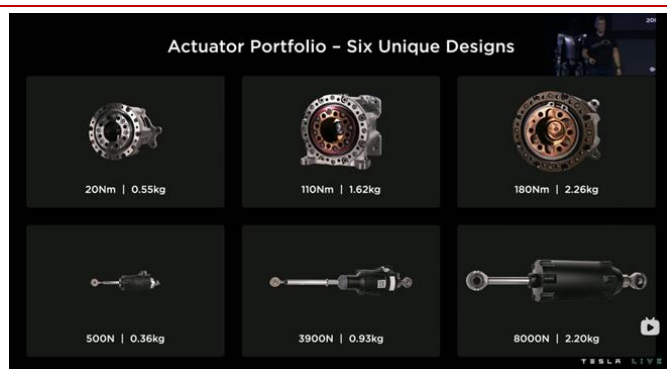
来实现对机器人的闭环控制，使精度更高。在机器人系统中，伺服电机能做到“说停就停、说走就走”，让执行系统能够“绝对服从”控制系统的命令。

1.4 行业内对传动部件选择各异，尚未有链传动确定方案

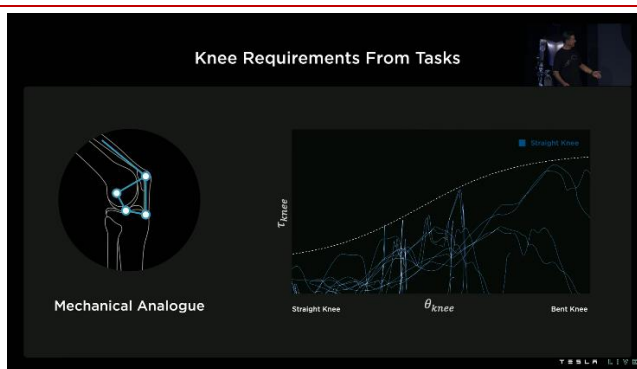
由于产品应用定义不同、作用关节位置不同，执行器在物理指标、执行任务强度和功率等方面均不相同。为了探索最优的执行器方案，入局机器人的厂家多选择定制执行器的路线。

➤ 特斯拉（Optimus）

图表6: Optimus 通过硬件仿真之后简化成的六种执行器 图表7: Optimus 膝关节使用的连杆传动机构



资料来源：特斯拉 AI Day，中邮证券研究所



资料来源：特斯拉 AI Day，中邮证券研究所

特斯拉 Optimus 共有 28 个运动关节，针对每个关节都有最优的执行器方案，但考虑到规模化生产的成本控制，又对全部关节做了拟合优化，最终得到了不同规格的 3 种旋转执行器和线性执行器。旋转执行器（永磁电机+谐波减速器）主要分布于肩髋等需要大角度旋转的关节，线性执行器（无框电机+行星滚柱丝杠）分布于膝肘等摆动角度不大的单自由度关节和腕踝两个双自由度但是体积紧凑的关节。这样的设计安排或许同 Optimus 实用化的设计理念相吻合，我们认为，特斯拉希望得到的是能够规模化量产、成本可控、结构可靠、低耗能的机器人，充一次电工作一整天，因此对于类似波士顿动力 Atlas 的高动态、高响应速度并非核心诉求。

Optimus 的下肢基本采用线性执行器，提供支撑和承力，其优势主要有以下两点：（1）空间利用率高。线性执行器可以纵向布局，最大限度地利用大腿内部空间，布置体积更大的电机同时提供更大推力，Tesla AI Day 上展示了单台执行器轻松吊起一台钢琴；（2）线性执行器的螺杆传动机构通过合理设计可以具备自锁能力，下半身不动时可以自动锁定姿态，不耗能，形成一个低功耗且稳定的底部支架。最终的执行器方案将得到的是传动精度高、输出力强、低

能耗高负载，但响应速度慢、高动态运动能力欠佳的产品类型，后续期待通过规模化生产、减少零部件类型等方式降低成本。

图表8：特斯拉 Optimus 方案与链传动方案比较

	特斯拉 Optimus 方案	链传动可能的方案
下肢使用的传动部件	旋转执行器（谐波减速器）、线性执行器（梯形丝杠/行星滚柱丝杠）、四连杆机构	高扭矩电机+部分执行器位置远离关节，加入链条替代其他小减速比传动部件
优势之处	1) 垂直状态下可自锁，节能 2) 空间利用率更高，能够选取更大的电机 3) 传动精度高，工作稳定性好	1) 减小腿部末端惯性，有效提升运动性能 2) 降低单台成本 3) 恶劣工况下正常运转
存在弊端	1) 行星滚珠丝杠单价昂贵 2) 下半身惯性过大难以灵活行动	1) 只能用于两个旋转运动之间的传动 2) 工作过程中可能有噪音
最终目标	能够规模化量产、结构可靠、低耗能、满足日常需求的家用机器人	能够做到像人类一样灵活运动、高动态响应的类人机器人

资料来源：中邮证券研究所

➤ 1X Technologies (NEO)

作为 OpenAI 领投的人形机器人厂商，自 2014 年成立开始，就专注于开发具有高度灵活性和可扩展性的人形机器人。1X Technologies 的旗舰产品是 EVE，一款拥有两臂、两眼和四轮底盘的机器人，可以在各种环境中执行多种任务，如巡逻、监控、搬运等。1X Technologies 目前在研发一款名为 NEO 的双足机器人，预计将于 2024 年发布。

1X 对于执行器系统的创新点在于坚持研发无齿轮的方案。公司认为机器人复制人类的灵活性和效率的巨大难点在于齿轮传动的使用，尽管齿轮提供动力，但是它们也会增加重量、降低自然动力、阻碍敏捷性。人形机器人如果采用传统技术（齿轮比约为 80：1），其惯性可能相当于脚上负重 24kg，而 1X 的无齿轮系统能够降低惯性至 0.5kg，同时 1X 还成功开发出无需使用齿轮即可实现约 80%人类肌肉力密度的电机。

➤ 智元机器人（远征 A1）

2023 年 8 月，智元机器人发布其首款人形机器人远征 A1，远征 A1 身高 175cm，重量 55kg，整体为类人造型。在硬件设计上，全身有超过 49 个自由度，搭载了谐波一体关节、直线推杆、无刷行星伺服、空心杯电机等驱各类执行器。这些执行器让它就像有了人类关节一样，具有做各种动作的灵活性。该

机器人搭载的 Power Flow 关节电机，峰值扭矩 350Nm，重量 1.6kg，配有水冷循环散热。腿部采用反曲膝设计，相对于正曲膝设计，可以帮助机器人有更多操作空间，更适合干活。灵巧手的设计，拥有 12 个主动自由度，5 个被动自由度，采用驱动内置。另外还有配有基于视觉的指尖传感器，可以分辨操作物的颜色、形状、材质等。远征 A1 不止是足式的，还可以轮式的。机器人灵巧手，也支持自主更换。

➤ 宇树科技 (H1)

2023 年 8 月中旬，宇树科技发布旗下首款通用机器人产品 H1，采用轻量化材料设计，整体重量只有 47kg，整身拥有 19 个自由度，行走姿态轻盈稳健，为适配大负载，高密度，大功率的需要，宇树专门为 H1 人形机器人设计了扭矩密度更高的 M107 关节电机，峰值扭矩达到了 360Nm，而髋关节电机扭矩则为 220Nm，踝关节为 45Nm，手臂关节则为 75Nm。目前 H1 人形机器人行走速度可以达到 1.5m/s，潜在运动能力可达 5m/s。在续航方面，H1 人形机器人搭载 15Ah 电池，最大电压 67.2V，可满足连续 1 小时的运动续航标准。

➤ 达闼科技 (XR4)

2023 年 8 月，达闼机器人在世界机器人大会上发布了人形双足机器人 XR4（七仙女）。XR4 是一款达闼云端大脑赋能的、面向全场景应用的全尺寸、全能通用机器人，高 165cm，重 65kg，全身采用轻质高强度的碳纤维复合材料，拥有 60 多个智能柔性关节，采用并联驱动结构和高扭矩密度电机，峰值扭矩高达 600Nm。

➤ 傅利叶智能 (GR-1)

2023 年 7 月 6 日，傅利叶智能在 2023 世界人工智能大会上发布 GR-1 通用机器人，该机器人采用自研 FSA 高性能一体化执行器，拥有强大且灵活的运动性能。与传统概念型产品不同，傅利叶智能表示，本次发布的 GR-1 通用机器人已具备商业化落地的能力。GR-1 身高 1.65 米，体重 55 公斤，全身自由度达 40 个，最大关节模组峰值扭矩可达 300Nm，步行速度可达到 5km/h，负重 50kg。GR-1 采用电驱动技术，能够满足机器人的运动需求，具备高度的精确性和灵活性。傅利叶方面表示，相较液压驱动，电驱技术性价比更高，有着商业规模化量产优势，同时在节能和资源利用方面也具有优势。在 GR-1 通用机器人上，傅利叶智能采用了自主研发的 FSA 高性能一体化执行器系列，能够确保 GR-1 通用机器人在行动过程当中的灵活性，在落地的商业化任务场景下，具备力量、稳定性、负载适应能力以及安全性与可靠性。

2 链传动：特定场景下的成本优选

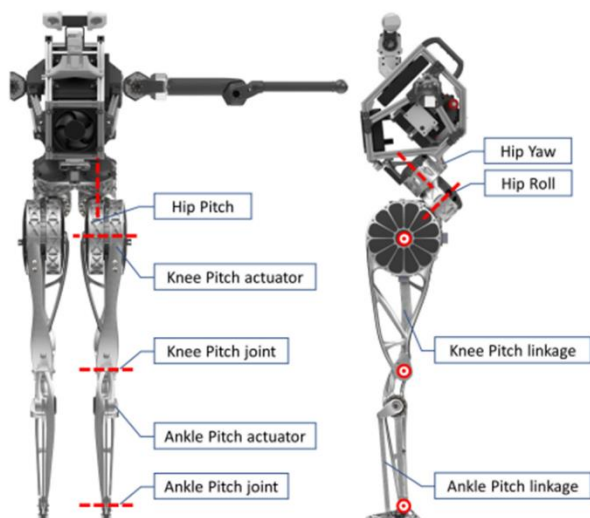
2.1 链传动凭借特性可适用于高扭矩电机及高运动性能要求场景

人形机器人下肢传动执行存在多种方案。UCLA 近期发表的论文《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》(Zhu, Taoyuanmin) 中将人形机器人下肢设计实现的方案做了大致分类 (见图 4)，第一种是高减速比伺服执行器 (High-Gear Servo Actuator)，由高功率直流无刷电机+大减速比传动部件+力矩传感器构成。第二种是串行弹性执行器 (Series-Elastic Actuator)，把第一种末端的力矩传感器换成了弹簧以保护对于驱动系统的冲击。第三种是本体感觉执行器 (Proprioceptive Actuator)，由高扭矩电机+小减速比传动部件构成。第四种则是由液压泵+液压缸组成的液压驱动方案，由于输出速度基本与机器人运动速度匹配，所以几乎用不到传动部件。大减速比传动部件一般是谐波减速器或 RV 减速器等，小减速比传动部件一般是行星减速器、带/链传动、连杆机构等，并没有哪种传动部件适用于所有场景。采用第三、四种技术方案的人形机器人通常具备更高的运动性能。

国内外各厂商的执行器方案显示出电机扭矩密度有望不断提升，链传动等小减速比传动部件的需求将得到拓展。电机产生扭矩的代价是电流以及电流引起的铜损 (欧姆损耗)，而持续的大功率铜损又会导致电机温度上升而达到上限无法再维持扭矩，这便是制约电机扭矩的主要原因。高扭矩的密度电机，能以更低铜损产生更高的扭矩，因此同样铜损下，在达到温升极限时具有更大的扭矩能力。当一个电机扭矩密度高时，电机在极限情况下的爆发力更强，产生同样扭矩所消耗的铜损更小。如果专注于人形机器人等以输出扭矩为主导的工况之下，将具有更高的效率、更好的续航以及更低的发热。从前文中盘点的国内外各厂家执行器方案中也能看出，行业普遍追求人形机器人产品下肢的输出扭矩提高以增强其机动性能。而链条相比其他传动部件，更适合负载大速度低的情况，可以用在较远距离的传动，在高温、油、酸等恶劣条件下工作稳定，对轴和轴承的损耗小。这些特点在通用机器人天然需要替代的枯燥重复、危害健康等行业工况中具备优势。

2.2 链传动方案替换的切入场景

图表9: UCLA 人形机器人 ARTEMIS 的下肢结构图



资料来源:《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》(Zhu, Taoyuanmin), 中邮证券研究所

图表10: 傅利叶人形机器人 GR-1 实物结构图

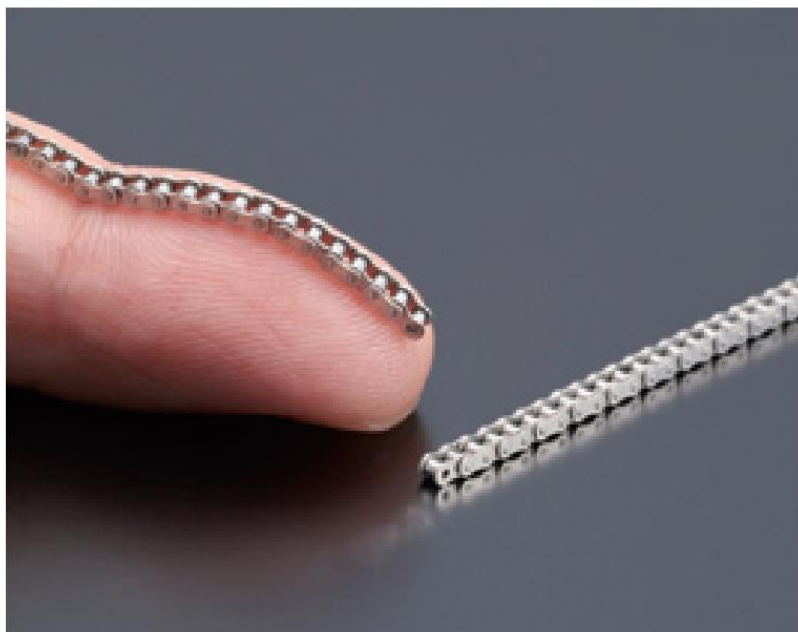


资料来源: 傅利叶官网, 中邮证券研究所

为追求人形机器人优秀的运动性能, 部分技术方案中将执行器置于关节远端, 该情况下链传动或成为最优解。《Design of a Highly Dynamic Humanoid Robot》(Zhu, Taoyuanmin) 中设计分析的 UCLA 机器人 ARTEMIS, 还有傅利叶的新品人形机器人 GR-1, 均采用这种技术设计, 即在需要大负载的下半身设计中, 考虑到关节之间相互干扰, 以及机器人运动平衡的问题, 他们将执行器从原本直接安装在相应关节位置, 关联膝关节的执行器改换到向近端移动至髋部, 关联踝关节的执行器转移至膝部。这样处理之后, 机器人腿部末端的部件减少惯性减少, 更有利于快速步行和节能。而当执行器放置在髋部/膝部但控制膝/踝关节时, 输入点与输出点之间的中心距较长, 齿轮传动、丝杆传动无法满足需求, 之间的传动部件使用连杆机构或者带/链传动就更为合适。其中, 关节旋转角度在 180° 之内的话可以考虑使用连杆机构, 但角度过大时连杆机构可能会遇到奇点问题失灵, 所以角度过大时需要链传动。

链传动的替代场景也不仅仅局限于前面说到的, 执行器与控制关节之间距离较长的情况。例如, 根据 IEEE 上刊登的文献《Design of a Myoelectric Transhumeral Prosthesis》(Daniel A. Bennett et al.), 在设计机器人上半身手臂时, 采用了两级链传动+手肘处肌腱传动 (tendon drive) 的方案。目前各类技术方案均处于试探性的阶段, 故未来或有其他新增链传动替代场景。

图表11：日本椿本链条预计 2024 年推出世界上最小的超紧凑滚子链



资料来源：日本椿本年报，中邮证券研究所

日本椿本链条预计 2024 年推出世界上最小的超紧凑滚子链，应用场景为先进医疗设备及机器人。根据日本椿本链条 2023 年报中称，公司正在开发世界上最小的超紧凑滚子链，目标是在 2024 年发布。该链条节距仅有 1.905 毫米，每米重量不到 20 克，但将达到难以想象的强度，其中凝聚了椿本积累多年的技术精华。材料预计会采用不锈钢材质的链条，适用于腐蚀及温度变化大的作业环境，目标应用领域为先进的医疗设备及机器人技术。

2.3 链传动方案可用于人形机器人的降本

行星滚柱丝杠海外产品售价高，国产尚未规模化，仍需等待国内厂商量产降本。海外市场行星滚柱丝杠龙头厂商产品单价在 2 万左右，以特斯拉 Optimus 的技术方案为例，单台机器人全身共计 14 个线性执行器，其中小臂上的 4 个线性执行器使用的是梯形丝杠，腿部等其余位置的 10 个线性执行器中应用行星滚柱丝杠，这样大致估算下，即便海外产品有一定幅度的降价，仅丝杠部分的成本就已经超过特斯拉 Optimus 的量产目标价 2 万美元了。考虑到执行器部分的成本占人形机器人硬件总成本的 80% 左右，而执行器中包含电机、编码器、控制器等诸多其他零部件，采用行星滚柱丝杠的技术方案未来成本压缩的空间仍较大，静待国产厂商达到量产阶段。

图表12：全球代表性行星滚柱丝杠企业产品布局对比

公司	制造工业	尺寸系列	产品应用	价格水平
Ewellix (schaeffler)	研磨	齐全	工业	行业基准
Rollvis	研磨	齐全	军品和工业	低 10%-15%
GSA	研磨	齐全	军品和工业	低 20%-25%
Rexroth	轧制	较齐全	工业	低 10%-20%

资料来源：前瞻产业研究院，中邮证券研究所

链条传动成本相对较低，在满足性能及技术要求的条件下控制成本效果显著。如果后续终端产品采用高扭矩电机+小减速比传动部件的方案，或者将执行器与控制关节设置较远，链条传动将能打开应用空间。以 RS online 上经销的日本椿本链条代表产品 RS80 的售价来看，平均单价约为 97.58 元/个，与行星滚柱丝杠价格相去甚远，即便椿本 2024 年的新产品售价上涨，仍可预见到较大的成本控制空间。

3 风险提示

人工智能及大模型发展不及预期风险；

核心零部件降本不达预期风险；

人形机器人商业化应用不理想风险；

政策支持落地力度不达预期风险。

中邮证券投资评级说明

投资评级标准	类型	评级	说明
报告中投资建议的评级标准： 报告发布日后的 6 个月内的相对市场表现，即报告发布日后的 6 个月内的公司股价（或行业指数、可转债价格）的涨跌幅相对同期相关证券市场基准指数的涨跌幅。 市场基准指数的选取：A 股市场以沪深 300 指数为基准；新三板市场以三板成指为基准；可转债市场以中信标普可转债指数为基准；香港市场以恒生指数为基准；美国市场以标普 500 或纳斯达克综合指数为基准。	股票评级	买入	预期个股相对同期基准指数涨幅在 20%以上
		增持	预期个股相对同期基准指数涨幅在 10%与 20%之间
		中性	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		回避	预期个股相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	行业评级	强于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		中性	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%与 10%之间
		弱于大市	预期行业相对同期基准指数涨幅在-10%以下
	可转债评级	推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 10%以上
		谨慎推荐	预期可转债相对同期基准指数涨幅在 5%与 10%之间
		中性	预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%与 5%之间
		回避	预期可转债相对同期基准指数涨幅在-5%以下

分析师声明

撰写此报告的分析师（一人或多人）承诺本机构、本人以及财产利害关系人与所评价或推荐的证券无利害关系。

本报告所采用的数据均来自我们认为可靠的目前已公开的信息，并通过独立判断并得出结论，力求独立、客观、公平，报告结论不受本公司其他部门和人员以及证券发行人、上市公司、基金公司、证券资产管理公司、特定客户等利益相关方的干涉和影响，特此声明。

免责声明

中邮证券有限责任公司（以下简称“中邮证券”）具备经中国证监会批准的开展证券投资咨询业务的资格。

本报告信息均来源于公开资料或者我们认为可靠的资料，我们力求但不保证这些信息的准确性和完整性。报告内容仅供参考，报告中的信息或所表达观点不构成所涉证券买卖的出价或询价，中邮证券不对因使用本报告的内容而导致的损失承担任何责任。客户不应以本报告取代其独立判断或仅根据本报告做出决策。

中邮证券可发出其它与本报告所载信息不一致或有不同结论的报告。报告所载资料、意见及推测仅反映研究人员于发出本报告当日的判断，可随时更改且不予通告。

中邮证券及其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头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或者计划提供投资银行、财务顾问或者其他金融产品等相关服务。

《证券期货投资者适当性管理办法》于 2017 年 7 月 1 日起正式实施，中邮证券客户中的专业投资者使用，若您非中邮证券客户中的专业投资者，为控制投资风险，请取消接收、订阅或使用本报告中的任何信息。本公司不会因接收人收到、阅读或关注本报告中的内容而视其为专业投资者。

本报告版权归中邮证券所有，未经书面许可，任何机构或个人不得存在对本报告以任何形式进行翻版、修改、节选、复制、发布，或对本报告进行改编、汇编等侵犯知识产权的行为，亦不得存在其他有损中邮证券商业性权益的任何情形。如经中邮证券授权后引用发布，需注明出处为中邮证券研究所，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节或修改。

中邮证券对于本声明具有最终解释权。

公司简介

中邮证券有限责任公司，2002 年 9 月经中国证券监督管理委员会批准设立，注册资本 50.6 亿元人民币。中邮证券是中国邮政集团有限公司绝对控股的证券类金融子公司。

公司经营范围包括：证券经纪；证券自营；证券投资咨询；证券资产管理；融资融券；证券投资基金销售；证券承销与保荐；代理销售金融产品；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问。此外，公司还具有：证券经纪人业务资格；企业债券主承销资格；沪港通；深港通；利率互换；投资管理人受托管理保险资金；全国银行间同业拆借；作为主办券商在全国中小企业股份转让系统从事经纪、做市、推荐业务资格等业务资格。

公司目前已经在北京、陕西、深圳、山东、江苏、四川、江西、湖北、湖南、福建、辽宁、吉林、黑龙江、广东、浙江、贵州、新疆、河南、山西、上海、云南、内蒙古、重庆、天津、河北等地设有分支机构，全国多家分支机构正在建设中。

中邮证券紧紧依托中国邮政集团有限公司雄厚的实力，坚持诚信经营，践行普惠服务，为社会大众提供全方位专业化的证券投、融资服务，帮助客户实现价值增长，努力成为客户认同、社会尊重、股东满意、员工自豪的优秀企业。

中邮证券研究所

北京

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：北京市东城区前门街道珠市口东大街 17 号

邮编：100050

上海

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：上海市虹口区东大名路 1080 号邮储银行大厦 3 楼

邮编：200000

深圳

邮箱：yanjiusuo@cnpsec.com

地址：深圳市福田区滨河大道 9023 号国通大厦二楼

邮编：518048