

人形机器人，开启新长征

2022年07月28日

➤ **马斯克宣布将于近期发布人形机器人原型机，一石激起千层浪。**关于人形机器人是否必要、有何价值、应用场景、放量节奏、技术方案的讨论此起彼伏。本文力图提出我们的思考和测算。

➤ **人形是机器人的最大公约数。**工业机器人推出已半个世纪，但到2019年全球人均保有量仅3.63台/万人，仍是汽车、家电、3C等标准化制造行业的“独享”。初级的智能水平、难以迁移的应用环境是制约产业规模的瓶颈。服务机器人曾点燃曙光，但其过于细分的应用场景仍不能摆脱工业机器人曾经的窄路。人形机器人以其亲和力、易接受的标准化形式，更易打破厂用、商用、家用的藩篱，实现极大规模硬件复制和长尾应用的广泛覆盖，孕育伟大公司。

➤ **人形是最自然的商业入口。**商业入口一直是平台企业的必争之地。商业地产、手机、汽车正在或者即将担当我们的商业入口，最大限度地占据我们的时间、吸吮商业价值。更加智能的人形机器人会是我们的好助理、好朋友，是最天然的商业入口，没有科技企业可以忽视。不断涌入的资金、人才、技术会加快技术的迭代演进，产业大势已不可阻挡。

➤ **首台样机，不必生而伟大。**第一度电的发出，第一列火车的启程都引发了人们对其实际用途的质疑，但逐步提升的性能提升了实用性，消弭了质疑。神经网络算法、语音语义识别、更先进的传感、执行技术都在为人形机器人诞生奠定基础。此时不应被实用性限制，而应更加宽容，允许一个有缺点的新产品诞生。

➤ **放量节奏，不宜过度乐观。**人形机器人面对开放的应用环境，难以通过简单的编程和短时间的遍历达到足够的智能，需要一定时间的完善。特斯拉 Model 系列及纯电动车的放量节奏可以作为参考，萌芽期不宜对放量节奏有过高期待。

➤ **执行机构，进入大市场，孕育新的技术变革。**人形机器人的使用，倍数放大了执行机构的市场空间，且其更有限的机构放置空间、更大的单位体积输出功率要求、更低的成本，都给执行机构的设计提出了新的挑战。新技术、新工艺有望得到应用，抓住机会的厂商有望弯道超车。

➤ **伺服系统、谐波减速器是执行机构的核心。**立足当前的技术发展现状，我们认为人形机器人会采用开源的控制系统，视觉为主的传感方案、工业塑料或铝合金等轻质材料为本体。驱动-电机-减速器组合会是执行机构的首选方案，在成本中占比最高，成为人形机器人普及的最大受益方。

➤ **投资建议：**重点推荐禾川科技、绿的谐波、双环传动。建议关注三花智控、汇川技术、鸣志电器。

➤ **风险提示：**新产品研发及拓展不及预期风险，下游需求不及预期风险，市场竞争加剧风险，宏观经济增速放缓风险

重点公司盈利预测、估值与评级

代码	简称	股价 (元)	EPS (元)			PE (倍)			评级
			2021A	2022E	2023E	2021A	2022E	2023E	
688017.SH	绿的谐波	165.99	1.12	1.65	2.42	148	100	68	推荐
688320.SH	禾川科技	52.09	0.73	1.11	1.61	72	47	32	推荐
002472.SZ	双环传动	33.28	0.42	0.69	0.96	79	48	35	推荐

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；（注：股价为2022年7月26日收盘价；）

推荐

维持评级



分析师 李哲

执业证书：S0100521110006

电话：13681805643

邮箱：lizhe_yj@mszq.com

研究助理 赵璐

执业证书：S0100121110044

电话：13472540636

邮箱：zhaolu@mszq.com

相关研究

- 1.机械行业周报 20220724：乘风破浪的碳碳热场（一）-2022/07/24
- 2.机械行业周报 20220717：风电：业绩底出现+原材料改善+海风招标量起-2022/07/17
- 3.机械行业周报 20220710：特斯拉 bot 再掀机器人热潮，关注相关投资机会-2022/07/10
- 4.机械行业 2022 年中投资策略—抓住科技发展脉搏，布局机器人、新能源设备-2022/07/05
- 5.民生机械周报 20220703：钙钛矿电池的潜力-2022/07/03

目录

1 人形机器人，产业趋势还是昙花一现？	3
1.1 特斯拉发布 Bot，掀起人形机器人	3
1.2 人形机器人，各项用途的最大公约数	3
1.3 下一代的商业入口	4
2 Optimus 的前辈们	6
3 人形机器人的可能解决方案有哪些？	8
3.1 人形机器人的成本构成与工业机器人有哪些区别？	8
3.2 驱动和执行：谐波减速器+空心杯型伺服电机	8
3.3 控制系统：独立控制器位于头部或躯干，开源系统或为多场景应用解决方案	12
3.4 本体+视觉控制等外围：本体材料轻量化，传感技术或仍以视觉为主	13
3.5 散热：风冷、散热器散热、导热材料+新兴散热解决方案	16
3.6 电池：三元锂电池或为主要解决方案	17
4 人形机器人市场空间有多大？	20
5 相关标的	21
5.1 绿的谐波	21
5.2 禾川科技	21
5.3 双环传动	22
5.4 三花智控	23
5.5 汇川技术	23
5.6 鸣志电器	24
6 风险提示	26
插图目录	28
表格目录	28

1 人形机器人，产业趋势还是昙花一现？

1.1 特斯拉发布 Bot，掀起人形机器人热潮

在 2021 年的 Tesla AI Day 上，马斯克公布了人形机器人 Tesla Bot (Optimus) 的概念。近期，马斯克又将原计划 8 月 19 日举办的特斯拉 AI 日，改为 9 月 30 日举办，因为届时将发布 Optimus (“擎天柱”) 原型机。

据官方描述，特斯拉 Optimus 机器人身高约 172CM、体重约 56KG，能够硬拉 68KG 左右，它的诞生是为了消除危险、重复和无聊的任务，以便人类可以专注于更加愉快的工作。长期以来，马斯克对人工智能发展的危险性和缺乏监管的状态直言不讳，但他向外界保证 Optimus 是友好无害的，特斯拉机器人的速度被特意设计得很慢，最高时速约为 2 米/秒，并且比人类更弱。

据称，该款人形机器人结合了特斯拉的 AI 技术，即基于视觉神经网络神经系统预测能力的自动驾驶技术，具有极强算力的 DOJO D1 超级计算机芯片，Dojo 架构拥有一个大规模计算平面，极高宽带和低延迟。作为 Dojo 架构的重要组成部分，D1 芯片采用 7 纳米制造工艺，处理能力为每秒 1024 亿次。由于每个 D1 芯片之间都是无缝连接在一起，相邻芯片之间的延迟极低，训练模块最大程度上实现了带宽的保留，配合特斯拉自创的高带宽、低延迟的连接器，算力高达 9PFLOPs (9000 万亿次)。

图1：Optimus 三维渲染图



产品名称：OPTIMUS

身高：1.72米

体重：56kg

携带能力：≤ 45磅 (20kg)

举重能力：≤ 150磅 (68kg)

运动速度：≤ 8km/h

核心设备：FSD计算机和自动驾驶摄像头

产品用途：替人类完成一些重复无聊和一些危险的工作

产品造价：预计20万元左右

上市日期：预计9月30日特斯拉AI Day原型机亮相

量产日期：预计2023年

主要硬件：屏幕（获取有用信息）；轻质材料；人级别手；2个轴脚（保持平衡）、反馈传感器；40个驱动器马达：手臂（12个）、脖子（2个）、躯干（2个）、手（12个）、腿（12个）

资料来源：快科技，Techweb，民生证券研究院

1.2 人形机器人，各项用途的最大公约数

中国电子工业学会将机器人划分为工业机器人、服务机器人、特种机器人三类。

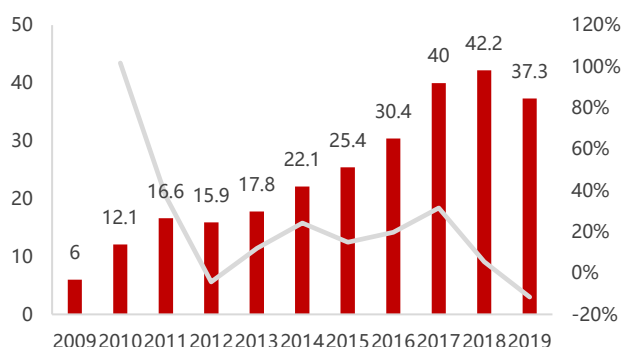
其中，1) 工业机器人指面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人，在工业生产加工过程中通过自动控制来代替人类执行某些单调、频繁和重复长时间作业；2) 服务机器人是指在非结构环境下为人类提供必要服务的多种高技术集成的先进机器人；3) 特种机器人指代替人类从事高危环境和特殊工况的机器人。

目前，全球机器人发展已有超过半个世纪，但据 IFR 数据，2019 年全球工业机器人保有量仅 272 万台，按照世界人口网数据 2019 年全球 230 个国家 75 亿人口计算，工业机器人的人均保有量仅为 3.63 台/万人。2019 年，工业机器人受全球贸易摩擦升级影响，新安装量出现下滑，据 IFR 预计，到 2022-2023 年才可能恢复至疫情前水平。相比之下，服务机器人、特种机

机器人因疫情催化“非接触”使用场景增加，发展势头迅猛。

回顾过去几十年发展历史，工业机器人发展速度迟缓，除了受宏观经济影响外，还与其初级的智能水平、难以迁移的应用环境有关。传统工业机器人主要是解决传统制造业的效率问题，在静态、结构化、确定性的无人环境中完成重复性作业，其工作特点在于空间相对隔离、与人非接触、预编程或示教再现控制、需要外部安全保障。伴随制造业本身的升级和转型，小批量、多品种、短周期、个性化将成为新兴制造业的显著特点，因此工业机器人的趋势也将是可融入人类生产与生活环境、与人优势互补、合作互助，进而成为具备可变作业能力的人类助手型机器人。

图2：工业机器人新安装量出现下滑（万台，%）



资料来源：MBA 智库，民生证券研究院

图3：全球工业机器人保有量（万台）



资料来源：eMarkete，艾媒网，Statista，民生证券研究院

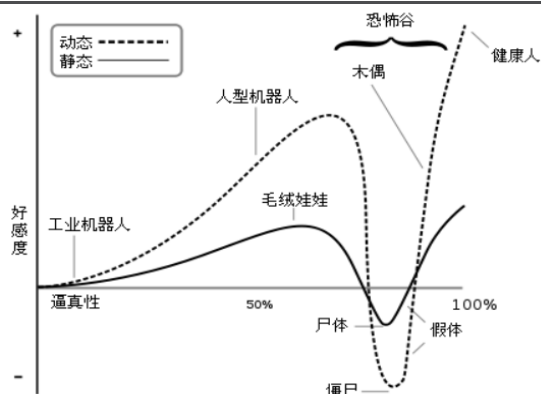
机器人最终需要在人类所处的现实环境中工作。开发人形机器人比修改整个环境显得更经济合理。现代社会的环境是为人类自身设计的，例如，走廊的宽度、阶梯的高度、扶手的位置和门把的位置等数不胜数的事物都要适合人的尺寸和运动，这些是社会建造过程中的沉没成本。因此，当机器人具有人的形状并能像人一样活动时，就不需要为机器人而改变人的环境。常见的轮式机器人使用条件苛刻，需要在一个非常平的地面上来使用，没有任何的越障能力，这种理想的工作环境其实是非常少的。如果要想满足它丰富功能的话，还是要做成一个有自主越障能力，所以人形是一个好的选择。

1.3 下一代的商业入口

人形机器人较其他服务机器人更容易被人们接受。参照“恐怖谷效应”，在中等程度偏上的逼真性以前，无论是静态仿真物还是动态仿真物，人们对它的好感程度是随逼真性的提高而增加。也就是说，**中等偏上程度的仿真时最受人们欢迎的，最能够赢得受众。而随着逼真性向较高程度增强，人们的好感度会陡然下降。**在“恐怖谷理论”第一段曲线上升部分，人类与人形机器人更容易产生情感上的交流。人形机器人在外形和行为设计上模仿人类，具有手部、足部、头部和躯干等，容易获得人类好感、亲近感并能满足情感认同。并且它们与人类接近程度越高，被接受和认可的程度就越高，具有人的外形是机器人成为人类伙伴并为人们带来乐趣的非常重要的因数。

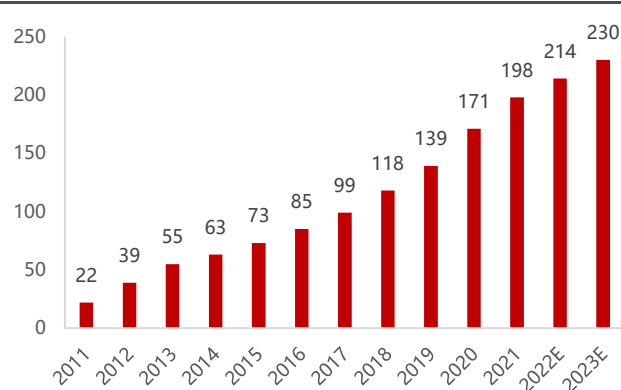
人形机器人有望成为继手机、汽车后的又一入口，商业价值巨大。手机入口整合了通话、地图、工作、娱乐等众多功能，是各功能依托的总入口。而人形机器人功能更加全面，与人互动场景多元更加多元，有望成为新的商业入口。根据艾媒网、Statista 数据，2021 年我国人均花费在手机上的时间达到 3.3 小时/天。此外，2021 年移动应用的用户支出达到 1700 亿美元（约合 1.08 万亿人民币），与去年相比增长了 19%。下载量以同比 5% 的速度继续增长，达到 2300 亿次。

图4：根据“恐怖谷”理论，人形机器人更容易赢得受众



资料来源：MBA 智库，民生证券研究院

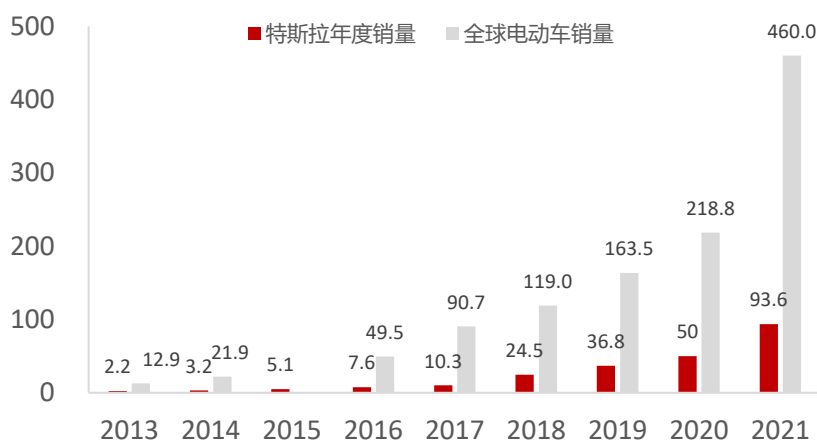
图5：人均手机使用时长（min）



资料来源：eMarkete，艾媒网，Statista，民生证券研究院

展望人形机器人的未来发展速度，我们认为可以参考特斯拉电动车的放量节奏。回溯历史，Model-S 在 2012 年推出，2013 年特斯拉电动车销量达到 2.2 万辆，2014 年达到 3.2 万辆，2015 年实现 5.1 万辆。随着 2017 年推出 Model-3 达到大规模生产，销量快速增长，从 2017 年的 10 万辆快速增长到 2021 年的近 100 万辆。我们认为，特斯拉汽车销量的绝对额增长是从 Model-3 的推出开始加速，起初走的是高端概念型路线，往往是忠实粉丝开始应用，同时搜集各种数据进行改进，然后逐步起量。我们认为人形机器人的发展过程可能也与此有相似之处。

图6：特斯拉电动车及全球纯电动汽车销量（万辆）



资料来源：中商情报网，太平洋汽车，车东西，汽车之家，真锂研究，车质网，产业信息网，参考信息网，民生证券研究院

不同的是，对于人形机器人，其他科技企业会更快地跟进，国内与国外科技企业都纷纷注意到这个赛道，在做前瞻布局。一些领先企业在做准备，明年也将推出，因而真正放量时不仅要考虑特斯拉，其他国内外企业也会放量。如果人形机器人的放量节奏类似于特斯拉汽车，那么 2023-2024 年人形机器人可以大致对应特斯拉 2013-2014 年的销量，随着其他厂商原型机推出后也逐步起量，2025 年开始人形机器人对标 2015 年全球纯电动车销量。

但对于 9 月 30 日发布的机器人，我们认为不应抱有过高的预期，原因在于人形机器人对智能化水平、通信、执行、传感等方向的要求非常高，最终较为理想的人形机器人一定是经过多次迭代，不断打磨后的产品。**而特斯拉 bot 的到来，其最重要的意义在于开启了整个产业的快速发展过程，未来一段时间，预计很多科技企业都会向人形机器人的方向努力，争夺赛道，产业趋势可能会加速来到我们面前。**

2 Optimus 的前辈们

Tesla Bot 并非首款人形机器人，从 21 世纪初本田发布首款人形机器人 AISMO 原型机开始，全球多家科技公司及高校先后发布人形机器人。从设计初衷来看，人形机器人定位多用于生活服务，与人类交互，以及专门用于科研领域。其中，较为知名的不乏有波士顿动力的 Atlas 机器人、欧洲 iCUB、软银的 Pepper、Alderbran 公司的 Nao 机器人，以及优必选 Walker 系列。研究他们的设计思路，对 Optimus 也会有所借鉴。

表1：历史上知名的人形机器人（列表 1）

	本田 ASIMO	Atlas 系列	欧洲 iCUB	POPPY
图片展示				
厂商	本田	Google 子公司波士顿动力&美国国防部	欧洲几个大学组成的联合开发组织 RobotCub	法国团队 INRIA Flowers
国家	日本	美国	欧洲	法国
首次发布时间	2000 年	2013 年 7 月	2011 年	2016 年
自由度	第一代 26 个自由度；第二代 34 个自由度；第三代 57 个自由度。	四肢共拥有 28 个自由度。	iCub 3 具有 53 个驱动自由度	25 个自由度
设计初衷及发展现状	主要用于科研，全球共 100 套左右，世界上最先进机器人之一。	基于早期 PETMAN 检测化学防护服的人形机器人，实现运动能力的提升。	验证人类认知模型的合理性	制造一款仿生的机器人
特点	太空服外形。可像人类一样完成"8"字行走，下台阶、弯腰等复杂动作，也可以完成端茶送水等任务。	可垂直起跳、跨越障碍、后空翻、舞蹈，兵逐步开启手脚均可参与的酷跑功能。	像不到 5 岁的孩子。可匍匐四肢，坐起，平衡行走，身体与环境互动，识别物体。 是世界上为数不多的具有灵敏的全身电子皮肤系统提供触觉的机器人之一。	主要部件均通过 3D 打印生产，包含 5 个电机驱动的脊柱，腿部可以弯曲，使其能像人类一样，保持一定姿态的同时更自然的运动。
配置	作动器： 伺服电机+ 谐波减速器 + 驱动单元 控制装置： 行走/操作控制单元，无线发送单元 传感器： 脚部 六轴向脚部方位传感器、躯体陀螺仪和加速传感器 电源部分： 38.4V/10AH(镍锌) 操作部分： 操纵台和便携控制器	第一版需要用电缆传输电源与信号，新一代可通过电池供电，无线控制。	iClub3 每条手臂配备了个电机、每只手 9 个、头部 6 个、躯干（腰）3 个、以及每条腿 6 个。 头部内置了可做“眼睛”的立体旋转摄像头、做耳朵的双麦克风、以及可反映嘴部与眉毛动作的 LED 线条，每个指尖有触觉传感器。	引入脊柱概念，用 5 个伺服电机构建脊柱。膝盖用弹簧连接下肢上部和下部关节。鞋子放置 5 个压力传感器。总共 16 个力传感器（FSR），2 个 PS 眼睛，1 个 IMU（9DDL），4.3" LCD 480×272 像素，立体显微镜，Raspberry Pi
身高	1.3m	1.5m	1.25m	0.84m
体重	48kg	75kg	52kg	3.5kg

资料来源：人工智能机器人联盟，MAXON，百度百科，搜狗百科，民生证券研究院整理

从配置上看，双足服务型机器人自由度均在 40 个左右，多的可以达到 50 以上，电源采用锂电池，续航时间短则 1-2h，长的可以达到数十个小时，电机均采用直流电机，全身配备数十个甚至上百个传感器，本体结构多采用碳纤维、工业塑料等轻质材料，或对质感、触感有要求的橡胶

等。

表2：历史上知名的人形机器人（列表 2）

	ROMEO	Pepper	Nao	Walker
图片展示				
厂商	Alderbran 公司	日本软银集团和 Alderbran 公司	Alderbran 公司	优必选
国家	法国	日本	法国	中国
首次发布时间	2012 年	2015 年	2008 年	2018 年
自由度	37 个自由度（眼睛 2 个，每只脚 1 个，后背 3 个，每只手 1 个）	20 个自由度（头部 2 个，手臂 5*2，手 1*2，腿 3 个）	25 个	第二代 36 个自由度，Walker X 有 41 个自由度
设计初衷及发展现状	用于个人护理。目前已经可以在实验室完成行走，观察周围 3D 环境，听、说等。	定位是与人类交互。全球有超过 2000 家企业采用 Pepper，服务零售、金融、健康护理、教育等众多行业。	定位为开发平台。开发给所有高教项目。是一款应用遍及全球教育市场的双足人形机器人。	在家庭场景和办公场景自由活动和服
特点	看起来像一个小男孩，面部表情柔和，可以识别人的情绪，并调整自己的行为。	可根据人类的表情、声音等判断人类的心情，从而选择不同的谈话内容。有一个显示屏，可以展示自己的心情。	拥有与人类一样自然的肢体语言，能够听、看、说，也能与人互动，或 NAO 之间彼此进行互动。NAO 能提供一个独立、完全可编程、功能强大且易用的操作应用环境。	集六大 AI 技术于一身，搭载高性能伺服关节以及多维视觉、多目立体视觉、全向听觉和惯性、测距等全方位的感知系统。
配置	有 39 台来自瑞士的直流电机，其中 RE 40 和 RE 25 各有十台。还使用了不同规格的 RE-max 系列款型以及五台 DCX 电机（特点在于高效，并便于在线配置）。 所有驱动器均为有刷电机，配备特殊的无铁芯绕组，调节性极佳。 为了降低重量，主要结构采用碳纤维与橡胶材料。	锂电池： 容量 30.0Ah/795Wh 运行时间：约超过 12 小时 头： Mic x 4、扬声器 x 2、2 x 500 万像素摄像头，3D 摄像头、触控传感器 x 3 胸： 陀螺仪传感器 x 1、惯性传感器 手： 触控传感器 x 2 腿： 声纳传感器 x 2、激光传感器 x 6、红外传感器 x 2、全向轮 x 3、触碰传感器 x 3	机体材料：工业塑料 可抓握的双手 充电器：AC 90-230 V/DC 24 V 电池能量：持续时间约 90 min 两个扬声器及噪音合成 四个扩音器，以及语言分析和识别系统 视觉：两个 CMOS 摄像头 联接类型：无线网际网络（IEEE 802.11g）和以太网端口。 支持很多种编程环境	负载：伸展状态单臂 1.5kg； 视觉&导航：定位精度 10cm，导航精度 20cm，精定位精度 1cm 电源：锂电池 54.6V/10Ah/ 3.6 kg；充电：2h； 处理器：Intel i7 8665U 频率 1.9Ghz *2；NVIDIA GT1030 显卡，384 核心； 软件框架：ROSA； 操作系统：Ubuntu+ Linux RT Preempt+Android
身高	1.46m	1.2m	0.58m	第二代 1.45m，WalerX 1.3m
体重	40kg	28kg	5.4kg	第二代 77kg，WalkerX 63kg

资料来源：MAXON，百度百科，搜狗百科，cnBeta，民生证券研究院整理

3 人形机器人的可能解决方案有哪些？

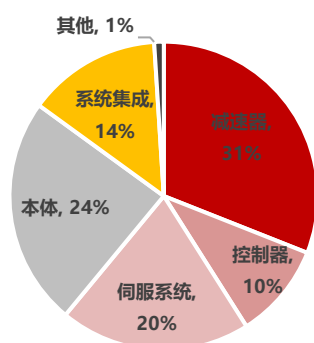
3.1 人形机器人的成本构成与工业机器人有哪些区别？

从外形上看，人形机器人采用的是 L 型结构，每个关节紧密连接，其集成度要比传统的工业机器人更加紧凑，也更加灵活。而从成本上构成上看，二者也有一定的差异。

传统的工业机器人产业链，包括上游零部件供应商、中游本体供应商、下游系统集成和服务提供商，以及终端应用市场。其中有减速器、控制器、伺服系统分别占 31%、10%、20%。本体占比在 24%，系统集成约占比 14%。

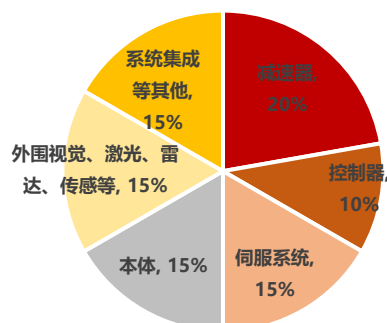
相比之下，根据我们的产业链调研，**人形机器人的本体在成本中占比要低于工业机器人**。由于工业机器人对负载的要求更高，通常需要用到铸铁、高强度钢等金属材料制作，而人形机器人通常采用密度更小的金属材料，或者复合材料制作，其本体在整个生产中的占比通常在 15% 左右，而工业机器人本体在生产成本中占比通常在 20% 以上。在传感方面，**人形机器人全身需要多处传感器，因此在生产成本中也占有较高的比重**。

图7：工业机器人生产成本构成



资料来源：OFweek 机器人网，民生证券研究院

图8：人形机器人生产成本构成



资料来源：OFweek 机器人网，民生证券研究院

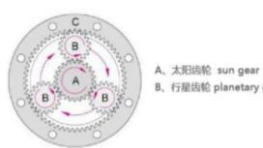
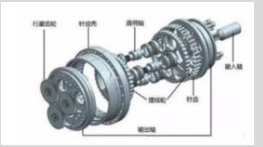
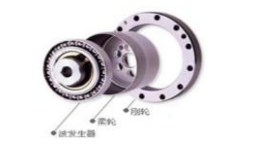
3.2 驱动和执行：谐波减速器+空心杯型伺服电机

3.2.1 减速器：谐波减速器或为主要解决方案，数量或在 45-50 个

从外形上看，人形机器人采用的是 L 型结构，每个关节紧密连接，其集成度要比传统的工业机器人更加紧凑，也更加灵活。而从成本上构成上看，二者也有一定的差异

减速器是常用作原动件与工作件之间的减速传动装置，在二者之间起到匹配转速、传递扭矩的作用。其原理在于，把高速运转的动力通过减速机输入轴上齿数少的齿轮啮合输出轴上的大齿轮，以此来达到减速的目的，原因在于绝大多数工作件负载大、转速低，不适宜用原动机直接驱动，需通过减速机来降低转速、增加扭矩。常见的减速器有行星齿轮减速机、RV 减速机、谐波减速机等。

表3：几种常见减速器的特点及适用领域对比

类型	特点	速比	维护	适用环节	图片展示
行星齿轮 减速机	体积小、传动效率高、减速范围广、精度 高，用途广泛。	微型最大 在 15-20	常规场合 免维护	起重、挖掘、运 输、建筑	
RV 减速 机	优点：疲劳强度高、刚度大、寿命长， 同时可以保证高精度；缺点：是重量、 外形尺寸都比较大。	85-200	常规场合 免维护	腿部、腰部、肘部	
谐波减速 机	优点：零部件数目少，体积小、重量 轻、承载能力较大、运动精度高、单级 传动也比较大；缺点：动态特性抗冲击 能力差。	30-260	2000h 换 油脂	小型机器人或大型 机器人末端的几个 轴	

资料来源：苏州君熠精密传动，成都双创时代科技有限公司，机器人在线，民生证券研究院整理

工业机器人大多使用 RV 减速器，主要原因在于 RV 减速器具有疲劳强度大、刚度大，同时可以保持高精度等特点，但其缺点是重量大、体积大。另外，部分末端会用到谐波减速器，谐波减速器的负载能力略低于 RV 减速器，在力矩输出要求不是特别高的末端可以满足要求，其优点是体积小、重量轻。

人形机器人关节处的减速器需要具有传动链短、体积小、功率大、质量轻、易于控制等特点。根据公开报道，Tesla Bot 体重约为 125 磅（56.7 千克），负载 20kg，也可可通过剧中硬拉姿势举起 150 磅的重物（约 68 千克），**考虑到人形机器人的集成度要求较高，以及其负载要求，谐波减速器基本可以满足人形机器人的要求。**根据我们的产业链调研，一般的谐波减速器减速比在 85-160 之间，更大一些的可以达到 200，而减速比直接决定了输出力的大小，减速比越高，电机相同转速下输出力越大。体积方面，手指部分可以使用直径 20mm 的减速器，放置于手掌中，肘部可以使用 30-40mm 减速器，肩部可以使用 50-60mm 减速器。目前，国内谐波减速器基本可以满足要求。

事实上，在机器人移动一个物体的过程中，真正需要输出力较大的地方主要在于肩部、肘部、腕部等关节，手指等末端关节对力的要求有限，因此**部分末端可以使用行星齿轮减速器替代。**根据我们的产业链调研，行星齿轮减速器的转速比通常在 15-20 之间，如果要想实现更大的力，只能将齿轮缩小，但齿轮过小时很容易损坏。因此，在体积很小的机器人中，通常可以使用行星齿轮减速器，但要做到消费级机器人，仅可以在末端使用行星齿轮减速器替代谐波减速器。体积方面，谐波减速器由于其结构通常是由三个行星齿轮，以及中间的一个太阳轮组成，因此最小的也只能达到 30-40mm。

对消费级机器人而言，其负载通常不会过大。因为负载较高的情况下，其肩关节、肘关节需要做到很大。另外，机器人本身也需要保持平衡，机器配重不足的情况下很容易倾倒，考虑到其在运动过程中还要加上力和惯性，所以一般要保证机器人静态下的负重是动态负重的 2 倍左右。

另外，在精度方面，消费级机器人的精度不会像工业机器人那么高，在加入编码器的情况下可以达到 0.01mm，只要执行到位即可，相比之下，工业机器人，比如加工机床精度需要达到 0.002-0.005mm。

那么，机器人全身需要多少个减速器？

根据我们的产业链调研，人形机器人的减速器一般不少于 40 个。具体数量主要取决于手指数量、手腕弯曲度、腿部弯曲度等。一般，指关节可以通过拉线、编码器来完成，一根手指

最多需要一个减速器，每只手 5 个手指则需要 4-5 个减速器。因此，一般**两只手臂、一个脊、每只手 5 个手指的机器人其减速器数量大约在 45-50 个**。

减速器的价格一般与其体积有关，一般直径越大的减速器价格越高。由于机器人的自由度较高，全身的减速器数量也较多，因此在总成本中，减速器的占比也要略高于工业机器人。

3.2.2 伺服系统：电机驱动是主流解决方案

机器人自由度的运动，可能依靠**舵机、电机、推杆、气或者液压的伸缩杆**，控制器可以对这些部件进行控制。

从过往人形机器人的伺服解决方案可以看出，Atlas 采用了**液压驱动**，其优点在于可以承受高负载。例如在 Atlas 完成后空翻动作时，落地时冲击力会非常大，如果采用电机方案，可能会导致爆炸，而液压结构更加稳定，除了油压自身的可压缩性，如果使用蓄能器，还能起到减震作用，使肌体更有弹性。但液压肢体结构的问题在于可能会漏油。此外，**Poppy 机器人则选择了舵机驱动**，实际上，舵机也相当于一个完整的伺服系统，里面包含了电机、传感器、伺服控制器等部件，其优点是价格低廉、结构紧凑，但缺点是精度很低，位置镇定能力较差，只能满足一些机器人的初级功能需求。因此除此之外，**历史上对于负载没有过高要求的人形机器人，大部分都采用了电机驱动方式**。

从数量上看，按照历史上已经发布的几款人形机器人，头部自由度一般至少有 2-3 个，每只手臂有 4-7 个自由度，每只手 1-5 个自由度，每条腿 3-6 个自由度，躯干（腰部）2-3 个自由度。根据澎湃新闻报道，预计**特斯拉 Optimus 人形机器人的脖子、胳膊、手、腿、躯干累计搭载了 40 个机电传动器**。基本与 Walker 和 ROMEO 的自由度数量相当。

表4：几款人形机器人的执行机构解决方案

	本田 ASIMO	Atlas 系列	欧洲 ICUB	POPPY	ROMEO	Pepper	Nao	Walker
图片展示								
伺服电机	第三代 57 个自由度（电机驱动）： 头部 3 手臂 7×2 手部 13×2 腰部 2 腿部 6×2	28 个自由度（ 液压驱动 ）： 腿部 3*2 脚踝 2*2 腹部 2 手臂 6*2 腕部、机械手：2*2	54 个自由度（电机驱动）： 手臂 7*2 手部 9*2 头部 6 腰部 3 腿部 6*2	25 个自由度（ 舵机驱动 ）： 头部 2 手臂 5*2 手部 1*2 腿部 3*2 脊柱 5	39 台直流电机： RE 40 十台 RE 25 十台 RE-max 系列以及 DCX 电机 五台（高效，便于在线配置）	20 个自由度（电机驱动）： 头部 2 手臂 4*2 手部 2*2 腿部 3 底座 3 个全向轮	25 个自由度（电机驱动）： 头部 2 手臂 5*2 胯部 1 腿部 5*2 手部 1*2	41 个自由度（电机驱动）： 腿 6*2 臂 7*2 手 6*2 颈*3

资料来源：HONDA，静液压，千家智客，TPOLY，MAXON，百度百科，搜狗百科，民生证券研究院

机器人的伺服系统，包括**伺服电机、伺服驱动器、指令机构**三大部分。其中，**伺服电机（server motor）**是执行机构，指在伺服系统中，控制机械元件运转的发动机，是一种补助马达间接变速装置。伺服电机可使控制速度，位置精度非常准可以将电压信号转化为转矩和转速以驱动控制对象。**伺服驱动器（server drives），又称为“伺服控制器”、“伺服放大器”，**是用来控制伺服电机的控制器，其作用类似于变频器作用于普通交流马达，伺服驱动器主要用于高精度的定位系统，一般通过位置、速度、力矩三种方式对伺服电机进行控制，属于传动技术的高端产品。**指令机构**是发脉冲或者给速度用于配合驱动器正常工作的。

伺服驱动器向电机线圈供应电压、电流，然后通过监控反馈来闭环伺服环路，为伺服电机供电。多数情况下，伺服驱动器含有三个嵌入式伺服环路：电流环（扭矩环、内部环）、速度环、位置环，三个环路相互作用，实现精准的运动控制。

人形机器人的伺服系统解决方案是怎样的？

从外观上看，工业机器人的伺服系统体积较大，有部分机器人伺服系统外置，因此其集成度不比人形机器人。另外，工业机器人通常使用交流伺服电机，对精度要求更高、体积更大，而人形使用的是直流无刷力矩电机，可以在较小体积下输出较大的力，而且没有外框，只有一个转子、定子。

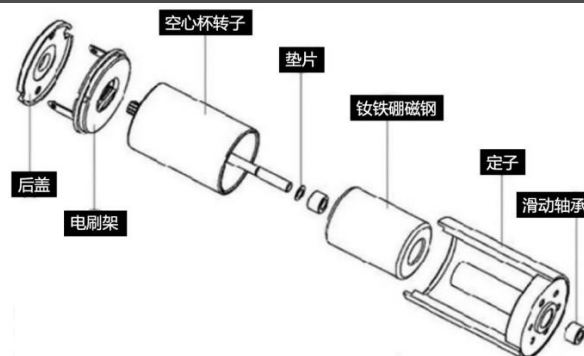
从组成上看，人形机器人的伺服电机、驱动器、编码器、减速器等集成在一起，整体组成一个“空心杯”形状的集合，整个杯形的集合体有输入端、输出端，通过一根总线、一根电源线，跟控制器联系在一起。由于人的手臂、躯干都是圆形，因此做成杯形更利于本体的安装。一般，人形机器人每个关节都要一个杯形的集合体，一个手指上面需要一个电机，手指上各关节可以通过拉线的方式，利用杠杆原理实现弯曲。此外，人形机器人各伺服系统之间是采用串联方式，工业机器人一般采用并联方式。

图9：空心杯伺服电机



资料来源：北京博创兴盛机器人技术有限公司，民生证券研究院

图10：空心杯伺服电机内部结构



资料来源：找磁材，民生证券研究院

伺服系统的设计一般根据机器人应用场景而定，例如机器人的身高、体重、负载等。由于驱动器是围绕关节设计，因此需要根据机器人的需要的力反过来进行推算。另外，电力系统的功率输出最后决定了力的输出，因此执行电机的电流也要据此进行设计。

根据我们的产业链调研，一般驱动器和后端输出的力的比值应在 1.2-1.5 倍，之所以保证一定的余量，主要是防止机器人的某个部位被卡住时，电机继续执行，电流达到最大可能会对电机、驱动器造成的伤害。一般解决的方式可以采用逆反馈、电流的反馈，加入一些智能算法，反馈给控制器，保证机器人某个部位被卡住是不会烧坏电机和驱动器。

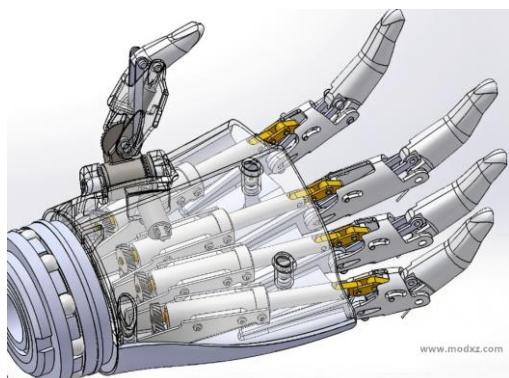
伺服系统的难点主要在于，从驱动器上看，其上端需要对接控制器，下端需要对应电机，由于各厂家控制器参数不同，且后端驱动功率、应用范畴、便长城、执行选项等参数较多，如何实现通用性、兼容性，并通过让客户能够快速选项是一个挑战。另外，人性格机器人由于对集成度的要求较高，刹车、编码器等都在电机中，是通过总成的形式插入到减速器中，进而连接成一个本体。因此，数量庞大的部件中任何一个出现问题，或者母线出现问题，执行机构就无法正常运转，进而影响整机的性能。

特别需要注意的是，对于颈关节、肩关节、肘关节、腕关节、腰关节、膝关节、踝关节等大关节来说，可采用标准的电机组合形式。对于手部关节，空间狭小、要求较高，可选方案较多：

- 1) 双手 28 个关节均采用微机电系统；
- 2) 双手 10 根手指均采用微型电缸控制，电缸可放在手掌空间；

3) 无名指、小指、中指联动，采用微型电缸控制。

图11：机器人手部结构图



资料来源：机器人模型设计，民生证券研究院

总体上看，采用微型电机进行控制精度更高，一般额定转速能达到 2000-3000mm 转，及时性更好，加减速都较快，普遍在几十毫秒以下，且可承受三倍余额定转矩的负载，但电机没有防油防水功能，无法在高湿度和油浸严重环境下使用，相比之下，电缸的耐腐蚀性比较好，但其精度不如电机。

图12：电机、电缸控制优劣势对比

	电机控制	电缸控制
材质	传动链的弹性变形、摩擦和磨损以及反向间隙引起的运动滞后提高了传动刚度。	外壳是由铝合金锻造，光滑美观；伸缩杆采用高合金钢，耐腐蚀，抗氧化。
精度	由于没有中间传动环节，消除了机械摩擦时的能量损失	电机并联会因为中间经过同步带齿轮而降低精度。
速度	速度快，加减速过程短	高速运动(大于200mm/s)时，应特别考虑使用寿命。
形成	行程长度不限。通过在导轨上串联直线电机，行程长度可以无限延长。	伺服电缸行程比实际大20-50mm，是推杆碰到限位开关后减速停流，离开空间的速度与空间成正比。

资料来源：联华电动缸，民生证券研究院

3.3 控制系统：独立控制器位于头部或躯干，开源系统或为

多场景应用解决方案

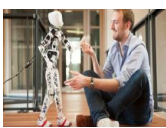
运动控制器的作用,是对来自伺服回路的各种反馈信息进行处理,并据此对电机进行换向。运动控制器与伺服驱动器是经常被混淆的两个概念,实际二者在自动化领域有着微妙的差异。简言之,运动控制器相当于人的“大脑”,伺服驱动器相当于“神经”,而伺服电机相当于人的“手”执行由大脑、神经传递过来的命令。

作为基于微处理器的设备,运动控制器具有生成脉冲宽度调制(PMW)波形的复杂算法。而伺服驱动器内的功率晶体管,通过传输电流和电压波形,来为伺服电机供电。因此,二者之间的配合原理是,控制器是将特定命令应用于驱动器中位置、速度或电流环等元件,伺服驱动器再根据控制器的命令向电机提供电压和电流。

此外,控制器通常具有编程的功能,可以存储和运行程序员提供的代码,其中有大量安全元件,可用于组件发生故障时防止过载,或停止运动控制。相比之下,驱动器往往专注于接收控制器输入的命令,并负责功率晶体管的开关,使产生的电流、电压满足命令的要求。

工业机器人的驱控一体在人形机器人中很难实现。原因在于人形机器人的伺服驱动器数量高达数十个,因此,如果所有驱动器都配有一个控制器,整个机器人的体积将会非常大,很难实现。因此,人形机器人一般有一个单独的控制器(独立于伺服电机、伺服控制器),也被称作“上位”。通常人形机器人的控制器会被放在头部,如果视觉、激光雷达、听觉传感器等占用空间过大,控制器也可能被放置在躯干中,因为躯干中除了电池之外,还有很大空间可以利用。

表5：几款人形机器人的控制解决方案

	本田 ASIMO	Atlas 系列	欧洲 ICUB	POPPY	ROMEO	Pepper	Nao
图 片 展 示							
控 制 解 决 方 案	P2：控制计算机放置在躯体里，由四个运行着 VxWorks 实时操作系统的处理器构成，分别控制手、腿、关节、视觉。与输入输出控制板之间通过总线连接。	使用集成 IMU、联合位置和力传感器来控制自身的肢体动作。模型预测控制器（MPC）使用机器人动力学模型来预测机器人未来的动作，优化行为，随时间推移产生最佳动作。	动作指定并非基于系统本身，而是远端控制，使用名为 ARCHER 的学习型算法体系。用一台相机捕获并处理标的图像，对失败的尝试分析，并找出最佳的射击角度、轨迹等。	项目使用 GPL v3 开源 ，设计 CAD 都是开源	在基于 LPPA 所制的控制图表功能上，提出了中心控制，架构，可以获得高质量的被动步态模式。	支持通过 Wi-Fi 接入云端服务器，这能够令其表现和各类识别系统更加智能。为了扩展其应用实现，厂商也 公开发布了 SDK，开发者可个性化设定 。	使用网线或 WIFI 连接 NAO 与电脑，并通过 Mitek 智慧大脑软件控制。一个 CPU 位于头部，运行一个 Linux 内核，并支持厂商自行研制的专有中间件（NAOqi）。第二个 CPU，位于机器人躯干内。

资料来源：DFROBOT，搜狗百科，NAO 机器人，百度百科，民生证券研究院

对于人形机器人的控制器而言，其关键主要在于了解客户的应用场景，以及对相关工艺的要求。由于终端对精度要求，每向上一级叠加都需要留出一定的余量，因此驱动器对于最终精度的实现有至关重要的作用。此外，工业机器人一般只有一个固定底座，只有末端有一些视觉识别过程，相比之下，人形机器人的传感器众多，数据来源有多个口径，需要处理的数据也很庞大和复杂，难度较大。另外，由于机器人对每个场景的学习和训练过程也需要一定时间，因此，单独一家厂商还很难将人形机器人做到各个场景的通用。

一种可能的解决方案是，厂商主要负责生产本体，将控制部分做成开源系统，让不同的人对应用场景进行二次开发，这样特斯拉人形机器人就有可能成为一个标准版的本体，在其能力范围内，由后端的多样化算法来支持多个客户应用场景，例如 Poppy 机器人、Pepper 机器人。

3.4 本体+视觉控制等外围：本体材料轻量化，传感技术或仍以视觉为主

3.4.1 本体：轻量化的复合材料、金属材料为首选，对触感要求高的部位或采用硅胶

本体在整个机器人中属于辅助部分，主要起到支撑、连接各个关节的作用，在整个机器人成本占比中也是最低的，原因在于相比内部的核心部件，外部的损伤是较易于修复的。

人形机器人本体在成本中比重要低于工业机器人。由于负载的要求，工业机器人的本体一般需要由铸铁、高强度钢制成。相比之下，人形机器人的本体一般采用密度更小的复合材料，或密度更小的金属材料，如铝硅、铝镁等，其密度比合金钢更小，但强度、支撑能力也能够满足负载的要求，关键是材质相对更软，可塑性更好。除此之外，有些机器人的本体也会采用碳纤维，在保证横端拉力的情况下，质量也较轻。而在手指等末端、对质感和触感要求较高的部

位也会采用硅胶作为材料。

表6：几款人形机器人的本体结构材料解决方案

	本田 ASIMO	Atlas 系列	POPPY	Nao
图片展示				
本体结构材料	结构：镁合金 外壳：复合树脂	外壳：航空级铝和钛 核心部件：3D 打印	肢体：采用 PA 材料（尼龙）和选择性激光烧结技术，3D 打印零件	工业塑料

资料来源：DFROBOT，搜狗百科，NAO 机器人，民生证券研究院

此外，一些机器人的关键零部件，可能会采用工业级 3D 打印技术。如历史上法国 INRIA Flowers 研发的 Poppy 机器人就是一种 3D 打印机器人，3D 打印可以降低机器人本体重量，并减轻伺服电机等关键部件的压力，从而降低成本，并实现快速制作。另外，像波士顿动力的 Atlas 机器人关键结构件也是使用工业级 3D 打印制作，驱动器和液压管路是被嵌入结构当中，所有的动态平衡、传感、过滤、排污阀、动力装置所需的一切零件，都集成在一个 3D 打印部件中而非由单独的组件制成。

图13：Poppy 机器人主要零部件通过 3D 打印完成



资料来源：DFROBOT，民生证券研究院

图14：Atlas 机器人的腿部结构



资料来源：Boston Dynamics，民生证券研究院

3.4.2 传感：仍以视觉传感为主，或引入工业级双目/多目相机

与人相同的是，人形机器人也需要很多传感器。根据检测对象的不同，可以分为内部传感器、外部传感器。内部传感器一般用来检测机器人本身状态，多为检测位置和角度的传感器。

外部传感器一般用来检测机器人所处环境状况，如物体识别传感器、物体探伤传感器、接近觉传感器、距离传感器、力觉传感器、听觉传感器等。

表7：机器人传感器及核心部件

传感器	检测内容	应用目的	传感器件
位置觉	物体的位置、角度、距离	物体空间位置、判断物体移动	光敏阵列、CCD
明暗觉	是否有光、亮度多少	判断有无对象，得到定量结果	光敏管、光电断续器
色觉	对象的色彩及浓度	利用颜色识别对象的场合	彩色摄像机、滤波器、彩色 CCD
形状觉	物体的外形	提取物体轮廓及固有特征，识别物体	光敏阵列、CCD
接触觉	与对象是否接触、接触的位置	确定对象位置，识别对象形态，控制速度，安全保障，一场停止，寻径	光电传感器、微动开关、薄膜特点、压敏高分子材料
压觉	对物体的压力、握力、压力分布	控制握力、识别握持物，测量物体弹性	压电元件、导电橡胶、压敏高分子材料
力觉	有关部件（如手指）所受外力及转矩	控制手腕移动，伺服控制，正解完成作业	应变片、导电橡胶
接近觉	对象物是否接近，接近距离，对象面的倾斜	控制位置，寻径，安全保障，异常停止	
滑觉	垂直握持面方向物体的位移，重力引起的变形	修正握力，防止打滑，判断物体重量及表面状态	球形接点式、光电旋转传感器、角编码器、震动检测器
听觉	感受和解释在气体、液体、固体中的声波	对连续自然语言中的单独语音和词汇进行辨别	电容式驻极体话筒、驻极体振动膜（负责声电转换）、场效应管

资料来源：YGI Themes，机器人传感器概述，民生证券研究院整理

从已经发布的几款人形机器人来看，视觉、语音、触觉、力觉、测距、姿态等需要基本都需要配备相应的传感器，传感器的数量少则十数个，多则上百个（如 Nao 机器人）。一般视觉传感多采用双目或多目的高清摄像头、立体摄像机，姿态传感器采用陀螺仪，探测器包括激光雷达、声纳、超声波感应器等，语音识别多以麦克风形式。

表8：几款人形机器人的传感器解决方案

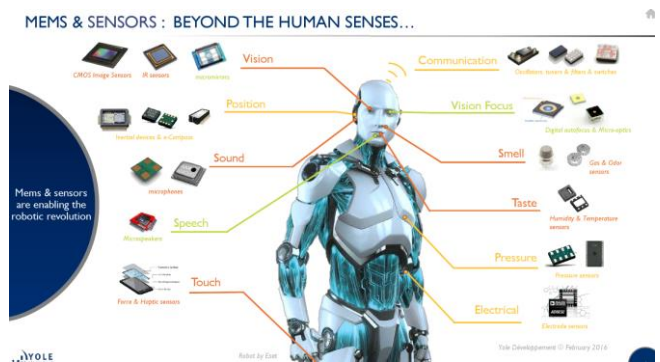
	本田 ASIMO	Atlas 系列	欧洲 ICUB	POPPY	ROMEO	Pepper	Nao	Walker
图片展示								
传感器	6 轴向脚步方位传感器 躯干陀螺仪 加速度传感器 视觉：眼部摄影机 水平感应：红外线感应器、CCD 摄像机 超声波感应器：测量 3m 范围内的物体（可在黑暗中行走）	视觉：激光雷达定位器+立体摄像机（TOF 深度相机） 姿态传感器：陀螺仪	视觉：头部为旋转立体摄像头 语音：双麦克风作为耳朵 触觉：每个指尖装有触觉传感器	2 个高清摄像头 1 个麦克风 1 个惯性测量单元 16 路力传感器，（鞋子）上有 5 个压力传感器	视觉：植入前庭系统，稳定视觉图像 语音：使用 16 路的语音天线实现	触摸传感器 麦克风 3d 摄像头 惯性单元 扬声器 激光 声纳	视觉：2 个摄像头 语音：4 个麦克风、1 个声纳 距离：2 个红外线发射器和接收器 姿态：陀螺仪 触觉：9 个传感器 力传感器：8 个 加速度传感器	视觉：多目立体视觉 全向听觉和惯性、测距等感知系统

资料来源：传感器专家网，百度百科，NAO 机器人，优必选官网，鑫明科技，民生证券研究院整理

据中国传动网，特斯拉即将推出的“擎天柱”人形机器人运用了特斯拉最先进的 AI 技术，

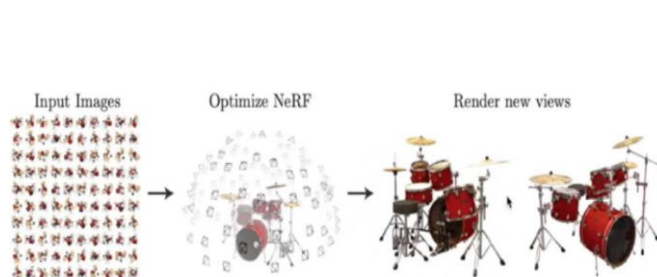
其头部配备了与特斯拉汽车相同的智能驾驶摄像头，内置 FSD 芯片，并基于视觉神经网络神经系统预测能力的自动驾驶技术驱动，与汽车共用 AI 系统。这意味着，**特斯拉人形机器人延续了以视觉为主的传感技术路线。特斯拉最著名的 AI 算法是其机器视觉中的纯视觉解决方案，预计该算法在人形机器人的制造中将延续。**

图15：人形机器人需要多个传感器



资料来源：YOLO，民生证券研究院

图16：特斯拉 2D 到 3D 物体识别的过程示意图



资料来源：传感器技术，面包板社区，民生证券研究院

由于人形机器人不仅需避障、路径规划，还需要准确识别目标，因此若要完成类似人手的精密操作，**机器人视觉系统定位精度需达毫米级，需引入工业级双目/多目相机，单机价值量相对普通服务机器人较高。预计人形机器人的 3D 传感器成本将远高于普通的服务机器人，但要略低于工业机器人。**此外，激光雷达通常会作为视觉传感的辅助，因为在机器人工作过程中，很多物体都是“眼见为虚”的，需要借用激光雷达对景深进行验证。

除视觉之外，人形机器人还需要加入力传感器，例如对于一个玻璃制成的物体输出的力，不能等同于对一个气球输出的力，而力的大小最终由电流决定，因此加入力学传感和反馈也是必要的。相同的，还有对温度、位置的感知。

3.5 散热：风冷、散热器散热、导热材料+新兴散热解决方案

由于要面对大量信息，大量的动作，**人形机器人运算量非常大，其所有的元件都在发热，因此，散热也是研制人形机器人需要解决的最重要问题之一。**

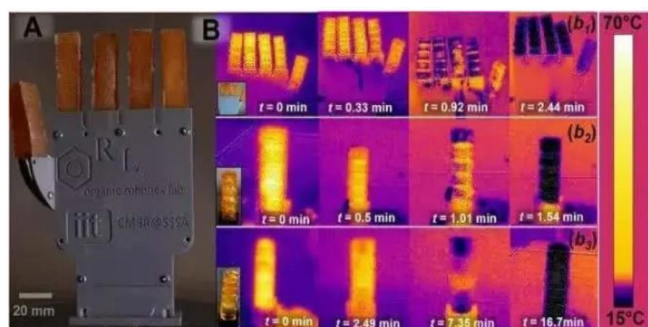
在设计机器人时，通常需要通过各种软件的模拟来实现，尽可能让其少发热，或发热相对更集中、更易于散热，这就需要用到一些工程软件。此外，在散热方面，一般有**风冷、液冷、散热器、导热材料**等方式。

以**风冷**为例，机器人的散热结构呆滞包括，表面的机器外壳、内部排气扇，**外壳下部设置有进气孔，外壳的上部设置有排气孔**，排气扇用于使空气由进气孔进入外壳内部，并由排气孔排出。由于进气孔接近散热结构的最低处，排气孔位于散热结构的最高处，热空气由排气孔排至散热结构外。在此情况下，散热结构内形成低压，外部的空气经进气孔进入散热结构内。冷空气接触设置于外壳内部的电路板组件，达到散热效果。

除了空冷之外，机器人的散热也需要配合其他方式。一般，**主板控制器结构上会根据发热源位置安装散热器**，但是，由于发热源于散热器间会出现空袭，因此必须**将导热界面原材料弥补在其中传导热量**，目的是清除空隙中的气体、增加换热范围、降低传热系数、提升散热性能。**导热硅胶片**是常见的导热界面原材料之一，一般将其组装在机器人处理芯片与散热器或机壳中间。导热硅胶片具有高导热性、质地绵软、有延展性、压缩率等特点，因此可以密切迎合在芯片和散热器中间，增加换热效率。此外，导热硅胶片还有优良的绝缘性、使用方便、不易损耗

等特点。

图17：水凝胶材料制造的软体机器人手掌



资料来源：Scientific American, Science Robotics, 民生证券研究院

除了传统的散热方式之外，目前也有科研机构在不断探索更加类人的散热机制，比如“**排汗**”。康奈尔大学的谢菲德研究团队开发了一种更利于柔性机器人的散热方式。由于柔性机器人很多部件都是由复合材料制成，其散热性能不如金属，而风扇灯内部散热技术占空间较大，重量也较大，因此，谢菲德发明了机器人的“**排汗系统**”。

研究团队通过多材料立体光刻技术，发明机器人“排汗”所必须的**纳米聚合物材料**，该技术可以通过光将树脂类材料固化为设计好的形状。研究团队利用两种**水凝胶材料**开发制造了手指形状的驱动器，这种水凝胶具有**蓄水功能**，而且可以根据温度来调节水分，相当于一个“**智能海绵**”。当温度达到 30 摄氏度以上时，由水凝胶制成的驱动器底层会随着温度上升而收缩，从而将水挤压到顶层，顶层由聚丙烯酰胺支撑，密布着微米级的小孔，与地层相同，当温度高于 30 摄氏度时，为孔会自动打开，开始“排汗”。该研究团队表示，该排汗系统可让驱动器表面在 30 秒之内下降 21 度，散热效率比人体排汗系统高三倍，若由风扇灯外置风冷设备，其散热效率还可提升六倍。但该机器人也有一定的缺陷，即移动性较差，而且补水也是一个问题。

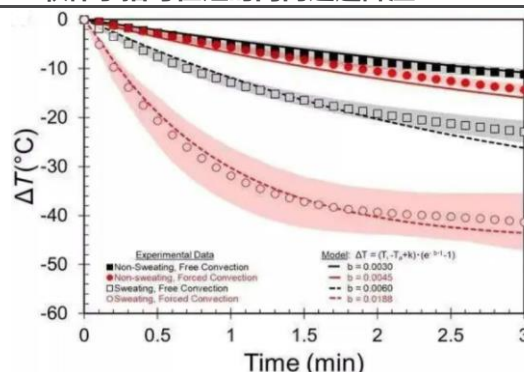
3.6 电池：三元锂电池或为主要解决方案

机器人的电池主要有**镍氢电池**、**锂电池**、**铅酸蓄电池**三类。其中，镍氢电池主要用于成本控制严格，不需要大容量和大电流放电、安全性要求较高的玩具机器人、扫地机器人等领域。铅酸蓄电池技术较锂电池更为成熟，但由于比较笨重，移动不方便，基本用于不需要移动的机器人领域，由于污染较为严重，正在逐渐被锂电池取代。

锂电池主要应用于**智能服务机器人**、**娱乐经纪机器人**、**探险排爆等特种用途机器人领域**。一般，对于成本不敏感的机器人，切要求电池较轻、可提供大电流放电、保障长使用寿命的机器人一般会选择**聚合物锂电池**，如**竞技机器人**、**特种机器人**。

磷酸铁锂在不需要电池大电流放电、低温性能的**AI 服务机器人**、**工业较大型机器人**领域应用较多。**三元锂电池**相比聚合物电池成本更低，且能量密度较磷酸铁锂电池更大，在机器人领域应用较为广泛，尤其是 18650 锂电池。

图18：软体手指可在短时间内迅速降温



资料来源：Scientific American, Science Robotics, 民生证券研究院

表9：机器人电池解决方案

指标	镍氢电池	聚合物锂电池	三元锂电池	磷酸铁锂电池	铅酸蓄电池
图片					
优点	成本低、安全性较好	能量密度大、可大电流放电、低温性能好、尺寸灵活	能量密度较大，一致性较好，适用范围广	循环使用寿命长，耐高温，安全性能好、生产成本较低	一般用作备用电源，安装应用成本比较低，单体一致性比较好，技术相对成熟。
缺点	无法满足大容量、大电流放电	成本高	循环使用寿命、热稳定性不如磷酸铁锂电池	能量密度、低温性能不如聚合物锂电池，一致性不如 18650 锂电池	比较笨重，在可移动机器人上安装非常不方便；污染严重
适用领域	低档玩具类机器人、扫地机器人	娱乐竞技机器人、探险排爆等特种用途机器人	适用范围广	AI 服务机器人、工业大型机器人	不需要移动的机器人，在工业领域有一定应用。

资料来源：锂电池百科，格瑞普电池，广州高胜电子科技，民生证券研究院整理

人形机器人电池的配重和续航市场如何？

从发展历史上看，几款较为知名人形机器人主要经历了**外部供电、电池供电**两个发展阶段。**电池供电普遍采用锂电池组，其安装的位置最初普遍采用“背包”形式，后逐渐将电池内置。**从续航时间上看，大部分双足的人形机器人的连续工作时间都在 2 小时以内。然而，根据我们的产业链调研，目前机器人的价格主要停留在展示和实验阶段，若实现大规模商业化，其续航时间应达到 3-10 个小时不等。

表10：历史上几款人形机器人的电池解决方案

	本田 ASIMO	Atlas 系列	欧洲 ICUB	Pepper	Nao	Walker X
图片展示						
电池	51.8V 的可充电锂离子电池 (Li-ION)	第一版：外部供电 第二版：板载 3.7 千瓦时的锂离子电池组	电池背包：锂离子电池组 36V-9.3Ah。 BMS 板、电池状态监视板	锂电池 容量：30Ah/795Wh 额定电压：25.46V 循环寿命：1000 次后仍保持 70% 容量	锂离子电池 21.6V-2.25Ah 48.5Wh	锂电池 54.6V/10Ah
续航时间	1 小时	第二版：持续 1h		连续工作 12h 以上	1-1.5 小时	充电：2h 续航（综合工况）：2h
安装位置	背包位置，近 6kg 重	背包位置	初代装于背部，iCub3 装于躯干		躯干	

资料来源：搜狗百科，鑫珥科技，AI 星球，EDN，Tektronix，天聚机器人，百度百科，民生证券研究院整理

目前，**人形机器人普遍采用三元锂电池**。相比汽车主要采用的磷酸铁锂电池，三元锂电池的电流密度更高。由于人形机器人需要在有限空间和体重情况下满足更大的动力续航。寿命方

面，虽然三元锂电池的循环使用寿命不如磷酸铁锂电池，但目前已有多款消费级人形机器人，如 Nao，Walker X 均可实现电池的拆卸和组装，因此电池的更换已经可以实现。

图19：欧洲 iCub 机器人的电池背包



资料来源：Tektronix，民生证券研究院

图20：欧洲 iCub 机器人使用的锂电池组



资料来源：Tektronix，民生证券研究院

除了最基本的供电功能之外，人形机器人还要考虑到**电池的配重问题，保证身体的平衡**。以 48 千克的本田 ASIMO 机器人为例，其电池重量约为 6kg，约为体重的 1/8 左右，优选 Walker X 机器人的电池重量约为 3.6kg，约为体重的 5.7%。

但前文提到，目前的几款知名人形机器人主要停留在展示和实验阶段，因此电池做到月清越好。而根据我们的产业链调研，**若要实现大规模商业化，其带电量和续航可能有更高的要求，相对应地，一般电池重量应占到人形机器人重量的 1/3 左右**。根据 OFweek 锂电网，目前磷酸铁锂电池的能量密度一般为 150Wh/kg，三元电池的能密度约为 200Wh/kg。**假设特斯拉人形机器人 68kg，电池重量占比 1/3 计算，则其锂电池重量约为 22.7 千克，若采用三元锂电池，则带电量约为 4.54kWh，续航时长在 3.54-9.08 小时，若采用磷酸铁锂电池，带电量约为 3.41kWh，续航时间在 3.41-6.81 小时。**

表11：对特斯拉人形机器人可能电池解决方案的测算

指标	三元锂电池方案	磷酸铁锂电池方案
机器人重量 (kg) b	68	68
电池重量(kg) b/3	22.7	22.7
重量能量密度 (Wh/kg)	200	150
带电量 (kWh)	4.54	3.41
功率 1 (Wh)	500	500
续航 1 (h)	9.08	6.81
功率 2 (Wh)	750	750
续航 2 (h)	6.05	4.54
功率 3 (Wh)	1000	1000
续航 3 (h)	4.54	3.41

资料来源：锂电网，民生证券研究院测算

此外，由于目前所有的人形机器人都是直流驱动，用 48V、24V、12V 的总线将电机、控制器串起来，通过电源分配器分配电流，因此，还要**考虑电池的动态管理问题**。有些人形机器人由于没有刹车，在电量耗尽的时候会倒下，因此当电量快要耗尽的时候需要预留一些余电在其中，以供机器人回到原位。

4 人形机器人市场空间有多大？

对人形机器人销量的假设：关于人形机器人市场规模，我们认为可以参考特斯拉电动车的放量节奏。回溯历史，Model-S 在 2012 年推出，2013 年特斯拉电动车销量达到 2.2 万辆，2014 年达到 3.2 万辆，2015 年实现 5.1 万辆。随着 2017 年推出 Model-3 达到大规模生产，同时达到平价水平，销量快速增长，从 2017 年的 10 万辆快速增长到 2021 年的近 100 万辆。我们认为，特斯拉汽车销量的绝对额增长是从 Model-3 的推出开始加速，起初走的是高端概念型路线，往往是忠实粉丝开始应用，同时搜集各种数据进行改进，然后逐步起量。我们认为人形机器人的发展过程可能也与此有相似之处。

不同的是，其他科技企业跟进地会更快，国内与国外科技企业都纷纷注意到这个赛道，在做前瞻布局。一些领先企业在做准备，明年也将推出，因而真正放量时不仅要考虑特斯拉，其他国内外企业也会放量。

这里，我们假设 2023-2024 年人形机器人对应特斯拉 2013-2014 年的销量，随着其他厂商原型机推出后也逐步起量，2025 年开始人形机器人对标 2015 年全球纯电动车销量。由于 2015 年全球纯电动车销量数据的确实，这里我们假设 2025 年人形机器人的销量为 30 万台，2026-2030 年对应 2016 年全球纯电动车销量。

对人形机器人单价的假设：据观察者网报道，马斯卡在接受采访时表示，预计擎天柱量产，其成本比汽车要更低，售价约为 2.5 万美元（约合人民币 16.74 万元）。这里我们假设 2023 年价格为 25 万元，每年降低 2 万元，到 2027 年价格降低至 17 万元。**预计到 2025 年人形机器人市场规模将达到 630 亿元，到 2030 年达到 3720 亿元。**

对各个零部件市场规模的测算：按照前文提到的，减速器、伺服系统、控制器在人形机器人中的占比计算，可以分别测算出三个对应的市场规模，**预计到 2025 年人形机器人减速器、伺服系统、控制器市场规模分别达到 126 亿元、95 亿元、63 亿元，到 2030 年，市场空间分别达到 744 亿元、558 亿元、372 亿元。**

对人形机器人电池市场规模的测算：根据我们的产业链调研，一般 1kWh 对应锂离子电池成本约为 1800-2500 元，根据前文我们测算，预计在三元锂电池解决方案下，特斯拉机器人的带电量约为 3.41kWh，假设以成本加成定价，起初毛利率在 100%，则预计 2023 年擎天柱对应电池单价约为 1.47 万元，假设此后每年价格下降 10%。**预计到 2025 年，人形机器人电池市场规模约为 36 亿元，到 2030 年约为 153 亿元。**

表12：对人形机器人市场空间的测算

指标	2023E	2024E	2025E	2026E	2027E	2028E	2029E	2030E
人形机器人销量（万个）a	2.23	3.17	30.00	49.50	90.70	119.00	163.50	218.80
单价（万元/个）	25.00	23.00	21.00	19.00	17.00	17.00	17.00	17.00
人形机器人市场规模（亿元）	44.60	72.81	630.00	940.50	1541.90	2023.00	2779.50	3719.60
减速器占比	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
减速器市场规模（亿元）	8.92	14.56	126.00	188.10	308.38	404.60	555.90	743.92
伺服系统占比	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
伺服系统市场规模（亿元）	6.69	10.92	94.50	141.08	231.29	303.45	416.93	557.94
控制器占比	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%
控制器市场规模（亿元）	4.46	7.28	63.00	94.05	154.19	202.30	277.95	371.96
电池单价	1.47	1.32	1.19	1.07	0.96	0.87	0.78	0.70
电池市场规模（亿元）	3.27	4.18	35.63	52.91	87.26	103.03	127.41	153.45

资料来源：Ofweek 机器人网，锂电网，中商情报网，太平洋汽车，车东西，汽车之家，真锂研究，车质网，产业信息网，参考信息网，民生证券研究院测算

5 相关标的

5.1 绿的谐波

公司是一家专业从精密传动装置研发、设计、生产和销售的高新技术企业，产品主要包括谐波减速器、机电一体化执行器及精密零部件。公司的产品广泛用于**工业机器人、服务机器人**、数控机床、医疗器械、半导体生产设备、新能源装备等高端制造领域。

经过多年持续研发投入，公司在**国内率先实现了谐波减速器的工业化生产和规模化应用**，打破了国际品牌在国内机器人谐波减速器领域的垄断。凭借多年来在精密传动领域的积累，公司在行业内已经建立了较强的品牌知名度，成为国内领军企业之一。我国谐波减速器行业处于成长期阶段，市场成长迅速，虽然我国已成为全球最大的工业机器人市场，但以精密谐波减速器产品为代表的核心零部件总体供给量存在较大缺口，随着行业内企业规模化生产的实现与下游工业机器人等产业的快速发展，未来行业规模将持续扩大。

投资建议：预计公司 2022-2024 年实现归母净利润 2.79、4.09、5.60 亿元，对应 EPS 分别为 1.65、2.42、3.32 元/股，维持“推荐”评级。

风险提示：产品研发不及预期风险，技术泄密风险，核心技术人员不足或流失风险

表13：绿的谐波盈利预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	443	680	994	1,373
增长率（%）	104.8	53.4	46.2	38.1
归属母公司股东净利润（百万元）	189	279	409	560
增长率（%）	130.6	47.4	46.5	37.0
每股收益（元）	1.12	1.65	2.42	3.32
PE（现价）	148	100	68	50
PB	15.2	13.7	12.0	10.3

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2022 年 7 月 26 日收盘价）

5.2 禾川科技

公司是一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要从事工业自动化产品的研发、生产、销售及应用集成。一家技术驱动的工业自动化控制核心部件及整体解决方案提供商，主要从事工业自动化产品的研发、生产、销售及应用集成。

工业控制自动化新星，深耕 OEM 市场多年，多领域市占率领先。公司多年来深耕 OEM 市场，服务广大 OEM 客户厂商，获得了极佳的产品方案性能口碑，在光伏、3C、锂电与机器人等行业具备极高的占有率，通过多年来的高速发展，禾川科技已赫然进入国产自动化一线品牌方阵。

伺服系统头部企业，国产替代领导者。伺服系统是当前禾川科技的核心产品，产品包括伺服系统内的伺服驱动器、伺服电机和编码器，广泛应用于机器人及机械手、3C、光伏、物流、包装、纺织等多个行业。2021 年伺服系统营收共计 6.59 亿元，占禾川科技主营业务 89.72%。PLC 产品 2021 年营收 3996.28 万元，占主营业务收入 5.44%。

投资建议：预计公司 2022-2024 年实现归母净利润 1.67、2.43、3.37 亿元，对应 EPS 分别为 1.11、1.61、2.23 元/股，维持“推荐”评级。

风险提示：市场竞争加剧风险，宏观经济些下滑风险，技术研发或市场推广不及预期风险

表14：禾川科技盈利预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	751	1,070	1,427	1,995
增长率（%）	38.1	42.4	33.4	39.8
归属母公司股东净利润（百万元）	110	167	243	337
增长率（%）	3.0	52.1	45.1	38.9
每股收益（元）	0.73	1.11	1.61	2.23
PE（现价）	72	47	32	23
PB	12.4	9.8	7.5	5.7

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2022 年 7 月 26 日收盘价）

5.3 双环传动

公司专注于齿轮传动产品制造，目前产品主要为乘用车齿轮、商用车齿轮、工程机械齿轮、减速器及其他产品。齿轮产品应用领域非常广泛，其市场规模主要取决于下游应用领域的市场需求。

紧抓成长赛道，优化业务结构。随着新能源汽车渗透率的不断提升，相关齿轮的需求迎来了快速增长。公司提前战略布局，产品已应用在下多种新能源汽车中，覆盖了纯电动汽车、混合动力汽车等。经过多年耕耘，公司已与全球领先电动车制造企业、比亚迪、广汽集团、蔚然动力、日电产、舍弗勒、汇川、博格华纳等重点新能源车企和电驱动制造厂商形成战略合作并实现批量出货。

机器人产业保持增长态势，中国芯引领国产替代。得益于久经市场检验、完善的产品谱系、合理的市场策略以及及时的保障服务，公司子公司环动科技与国内主流机器人企业保持稳定的战略合作关系，机器人高精密减速机业务获得高速发展。环动科技密切地关注国内外重点新客户、新领域所需产品的开发与导入，全方位加速新产品的验证速度。针对中大负载工业机器人所需，提前布局设备与产线以满足多方客户所需，目前已逐步实现 6-1000KG 工业机器人所需精密减速器的全覆盖，产品谱系得到进一步完善，获得了核心客户的认可并持续批产增量，从而实现减速机产销连续两年创历史新高。

投资建议：预计公司 2022-2024 年实现归母净利润 5.39、7.48、10.42 亿元，对应 EPS 分别为 0.69、0.96、1.34 元/股，首次覆盖，给予“推荐”评级。

风险提示：市场竞争加剧风险，宏观经济些下滑风险，技术研发或市场推广不及预期风险

表15：双环传动盈利预测与财务指标

项目/年度	2021A	2022E	2023E	2024E
营业收入（百万元）	5,391	7,025	8,945	11,172
增长率（%）	47.1	30.3	27.3	24.9
归属母公司股东净利润（百万元）	326	539	748	1,042
增长率（%）	537.0	65.0	38.8	39.3
每股收益（元）	0.42	0.69	0.96	1.34
PE（现价）	79	48	35	25
PB	5.3	4.8	4.2	3.6

资料来源：Wind，民生证券研究院预测；（注：股价为 2022 年 7 月 26 日收盘价）

5.4 三花智控

公司是全球最大的制冷控制元器件和全球领先的汽车热管理系统控制部件制造商。目前主要产品包括四通换向阀、电子膨胀阀、电磁阀、微通道换热器、Omega 泵、括热力膨胀阀、电子膨胀阀、电子水泵等，广泛应用于空调、冰箱、冷链物流、新能源汽车等领域。

立足热管理产品，拓展业务边界。公司坚持“专注领先、创新超越”的经营战略，以热泵技术和热管理系统产品的研究与应用为核心，专注于冷热转换、温度智能控制的环境热管理解决方案开发。公司制冷电器零部件空调电子膨胀阀、四通换向阀、电磁阀、微通道换热器等产品市场占有率全球第一。近年来，新能源车的发展已成为确定的趋势，这对热管理产品提出了更高更多更新的需求。公司定位于新能源汽车热管理系统领域，由零部件切入并逐渐向组件和子系统发展，已成为法雷奥、大众、奔驰、宝马、沃尔沃、丰田、通用、吉利、比亚迪、上汽、蔚来等客户的合作伙伴。

人形机器人即将来临，三花智控有望突破。特斯拉将于推出 9 月份推出人形机器人，得益于公司在新能源汽车上同特斯拉的合作，公司有望突破人形机器人产业。由于人形机器人需要大量重复的运动，因而其电机功率较高。而机器人工作电压在 20-40V 之间，需要更高的电流以实现功率的增加。随着电流的增大，电机放出的热量将成指数级上涨，如果不能进行良好的热管理，电池、电机、关节的寿命都将受到极大的影响。公司三花汽零注入后，充分发挥与业务间协同效应，深耕汽车新能源车热管理系统部件研发，并积极布局热管理组件和子系统在汽车领域更深层次应用，车用电子膨胀阀、新能源车热管理集成组件、Omega 泵等产品市场占有率全球第一。未来公司有望在人形机器人领域复刻公司在新能源汽车业务中的发展，成为全球知名的人形机器人热管理系统供应商。

5.5 汇川技术

汇川技术是国内伺服电机的领军企业。主要为设备自动化/产线自动化/工厂自

自动化提供变频器、伺服系统、PLC/HMI、高性能电机、传感器、机器视觉等工业自动化核心部件及其工业机器人产品，为新能源汽车行业提供电驱&电源系统，为轨道交通行业提供牵引与控制系统。公司产品可应用于工业领域各行各业。根据睿工业数据统计，2021 年公司通用伺服系统在中国市场份额达到 16.3%，首次超越外资品牌，获得市场份额第一名（前四名厂商及市占率分别是：汇川，16.3%；安川，10.5%；松下，9.6%；三菱，8.8%）。

根据公司 2021 年年报，公司在工业机器人领域产品包括 SCARA 机器人、六关节机器人、视觉系统、高精密丝杠、控制系统等整机及零部件解决方案，下游行业涵盖 3C 制造、锂电、硅晶、纺织等。SCARA 机器人是一种圆柱坐标型的特殊类型的工业机器人，适用于平面定位、垂直方向装配等作业。六关节机器人是一种六个关节都可以转动的机器人，适用于诸多工业领域的自动装配、喷漆、搬运、焊接等作业。

公司在 SCARA 机器人领域的主要竞争对手为 EPSON、YAMAHA 等，在六关节机器人领域的主要对手为安川、ABB 等。公司的工业机器人核心部件除减速机外，电控系统、伺服系统、丝杠、本体均已实现自制，具有较好的成本控制和定制化能力。凭借对下游行业工艺的深刻理解以及“核心部件+整机+工艺”解决方案的竞争优势，公司工业机器人产品在手机制造、锂电、硅晶等行业已实现大批量销售，形成了较好的品牌影响力。根据睿工业统计数据，2021 年公司 SCARA 机器人在中国市场的份额为 14%，排在第三名，且为内资品牌第一名。在机器替人的大趋势下，公司工业机器人业务有望充分受益，目前公司该项业务已实现盈利，属于成长型业务。

5.6 鸣志电器

公司专注于运动控制领域和 LED 智能照明控制领域核心技术及系统级解决方案，生产产品主要包括传感器、步进电机、直流电机、仪动传感装置等。

深耕控制电机及驱动系统业务，布局新兴高附加值应用领域。根据国外市场研究机构 IMARC Services Private Limited 的调研报告，全球工业自动化服务 2021 年的市场规模为 1,816 亿美元，预计 2027 年可达到 3,091 亿美元，期间的年复合成长率约为 9.09%。2021 年我国工业自动化行业市场规模约为 1,920 亿元。公司的控制电机及其驱动控制系统在 3C 制造设备、半导体加工设备、PCB/PCBA 制造设备、特种机床、工业机器人、激光设备及数字化制造等工业自动化领域中运用广泛。

公司移动机器人（商用及消费）类应用领域业务进一步快速增长，全年营业收入较上年同期增长约 99%。近年来，全球及我国的服务机器人市场规模高速增长。根据国外市场研究机构 Interact Analysis 的统计数据，2020 年全球 AGV 销售额为 12.684 亿美元，AMR 销售额为 10.903 亿美元。公司及子公司安浦鸣志、美国 AMP、美国 LIN、瑞士 T Motion、鸣志派博思均深度布局于移动机

器人行业，业务覆盖商业移动机器人、AGV、AMR 等。

发布首款运动控制器产品，进一步完善产品线。公司通过增强对海外子公司的一体化建设和赋能，发挥海外研发机构美国 AMP、瑞士 T Motion 的技术研发优势，强化产品的研发及技术迭代，进一步完善了步进系统、步进伺服系统、伺服系统和通用无刷驱动系统等平台化产品线。公司在 2021 年发布了公司的第一款运动控制器产品，进一步拓展了公司在运动控制领域的产品平台的外延和夯实了公司运动控制解决方案级供应商的实力。

6 风险提示

1) 新产品研发及拓展不及预期的风险。机器人产业中很多产品的基础研发周期较长，且研发成果的产业化具有不确定性，产品推广方面也可能不及预期，公司也面临因疫情开工延后，产能及产能利用率不足等问题。若新产品拓展不及预期，会给公司带来不及预期的经营风险和收益风险。

2) 下游需求不及预期的风险。受国内外宏观经济环境变化和国际贸易摩擦加剧的影响，下游行业投资放缓，机器人行业的发展环境和市场需求可能会因此受到不利影响，若机器人下游行业发展不及预期，则公司的盈利能力会下降。

3) 市场竞争加剧的风险。目前工业机器人市场逐渐回暖、服务机器人产业迎来快速发展机遇、特种机器人市场规模稳定增长，机器人行业未来的增长空间十分庞大。国内外机器人厂商纷纷建立研发和生产基地，积极参与到市场竞争中，国内外市场将日趋激烈，存在行业整体利润下降的风险。

4) 宏观经济增速放缓的风险。受疫情影响，中高风险地区防疫政策对相关企业的生产经营活动影响较大，虽国内疫情防控整体形势较为良好，但疫情反复的风险仍然存在，可能会造成宏观经济增速放缓，下游资产投资增速也可能会放缓，行业在短期内将会受到一定的影响。

双环传动报表数据预测汇总

利润表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
营业总收入	5,391	7,025	8,945	11,172
营业成本	4,338	5,639	7,118	8,816
营业税金及附加	33	32	40	50
销售费用	70	63	81	101
管理费用	229	246	313	391
研发费用	214	268	345	431
EBIT	508	778	1,047	1,383
财务费用	124	114	135	136
资产减值损失	-37	-37	-37	-37
投资收益	-4	0	-1	-2
营业利润	377	695	963	1,319
营业外收支	2	0	0	0
利润总额	379	695	963	1,319
所得税	25	59	69	99
净利润	354	636	894	1,220
归属于母公司净利润	326	539	748	1,042
EBITDA	966	1,369	1,717	2,131

资产负债表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
货币资金	463	384	443	700
应收账款及票据	1,301	1,801	2,282	2,832
预付款项	105	219	271	318
存货	1,531	2,109	2,616	3,240
其他流动资产	361	560	664	793
流动资产合计	3,761	5,074	6,277	7,882
长期股权投资	102	93	84	77
固定资产	4,425	4,968	5,434	5,829
无形资产	259	272	287	303
非流动资产合计	6,062	6,501	6,876	7,194
资产合计	9,823	11,574	13,153	15,076
短期借款	1,892	2,442	2,492	2,492
应付账款及票据	1,480	1,980	2,503	3,083
其他流动负债	607	699	791	893
流动负债合计	3,979	5,121	5,786	6,468
长期借款	524	524	524	524
其他长期负债	328	328	328	328
非流动负债合计	852	852	852	852
负债合计	4,831	5,972	6,637	7,320
股本	778	778	778	778
少数股东权益	119	216	363	541
股东权益合计	4,993	5,602	6,516	7,756
负债和股东权益合计	9,823	11,574	13,153	15,076

资料来源：公司公告、民生证券研究院预测

主要财务指标	2021A	2022E	2023E	2024E
成长能力 (%)				
营业收入增长率	47.13	30.31	27.33	24.90
EBIT 增长率	113.23	53.16	34.68	32.03
净利润增长率	536.98	65.03	38.82	39.33
盈利能力 (%)				
毛利率	19.53	19.73	20.42	21.09
净利率	6.57	9.06	10.00	10.92
总资产收益率 ROA	3.32	4.65	5.68	6.91
净资产收益率 ROE	6.70	10.00	12.15	14.44
偿债能力				
流动比率	0.95	0.99	1.08	1.22
速动比率	0.53	0.54	0.59	0.67
现金比率	0.12	0.07	0.08	0.11
资产负债率 (%)	49.18	51.60	50.46	48.55
经营效率				
应收账款周转天数	87.26	93.28	92.78	92.03
存货周转天数	128.80	137.63	135.03	134.86
总资产周转率	0.55	0.61	0.68	0.74
每股指标 (元)				
每股收益	0.42	0.69	0.96	1.34
每股净资产	6.27	6.93	7.91	9.28
每股经营现金流	1.02	0.74	1.54	1.89
每股股利	0.06	0.10	0.14	0.19
估值分析				
PE	79	48	35	25
PB	5.3	4.8	4.2	3.6
EV/EBITDA	29.16	21.05	16.78	13.39
股息收益率 (%)	0.18	0.30	0.42	0.57

现金流量表 (百万元)	2021A	2022E	2023E	2024E
净利润	354	636	894	1,220
折旧和摊销	459	591	669	748
营运资金变动	-214	-832	-561	-698
经营活动现金流	794	572	1,196	1,467
资本开支	-1,016	-1,040	-1,056	-1,076
投资	-12	9	9	7
投资活动现金流	-1,024	-1,031	-1,047	-1,071
股权募资	58	0	0	0
债务募资	355	550	50	0
筹资活动现金流	250	379	-89	-140
现金净流量	4	-79	60	256

插图目录

图 1: Optimus 三维渲染图	3
图 2: 工业机器人新安装量出现下滑 (万台, %)	4
图 3: 全球工业机器人保有量 (万台)	4
图 4: 根据“恐怖谷”理论, 人形机器人更容易赢得受众	5
图 5: 人均手机使用时长 (min)	5
图 6: 特斯拉电动车及全球纯电动汽车销量 (万辆)	5
图 7: 工业机器人生产成本构成	8
图 8: 人形机器人生产成本构成	8
图 9: 空心杯伺服电机	11
图 10: 空心杯伺服电机内部结构	11
图 11: 机器人手部结构图	12
图 12: 电机、电缸控制优劣势对比	12
图 13: Poppy 机器人主要零部件通过 3D 打印完成	14
图 14: Atlas 机器人的腿部结构	14
图 15: 人形机器人需要多个传感器	16
图 16: 特斯拉 2D 到 3D 物体识别的过程示意图	16
图 17: 水凝胶材料制造的软体机器人手掌	17
图 18: 软体手指可在短时间内迅速降温	17
图 19: 欧洲 iCub 机器人的电池背包	19
图 20: 欧洲 iCub 机器人使用的锂电池组	19

表格目录

重点公司盈利预测、估值与评级	1
表 1: 历史上知名的人形机器人 (列表 1)	6
表 2: 历史上知名的人形机器人 (列表 2)	7
表 3: 几种常见减速器的特点及适用领域对比	9
表 4: 几款人形机器人的执行机构解决方案	10
表 5: 几款人形机器人的控制解决方案	13
表 6: 几款人形机器人的本体结构材料解决方案	14
表 7: 机器人传感器及核心部件	15
表 8: 几款人形机器人的传感器解决方案	15
表 9: 机器人电池解决方案	18
表 10: 历史上几款人形机器人的电池解决方案	18
表 11: 对特斯拉人形机器人可能电池解决方案的测算	19
表 12: 对人形机器人市场空间的测算	20
表 13: 绿的谐波盈利预测与财务指标	21
表 14: 禾川科技盈利预测与财务指标	22
表 15: 双环传动盈利预测与财务指标	23
双环传动报表数据预测汇总	27

分析师承诺

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师，基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰地反映了研究人员的研究观点，结论不受任何第三方的授意、影响，研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

评级说明

投资建议评级标准		评级	说明
以报告发布日后的 12 个月内公司股价（或行业指数）相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中：A 股以沪深 300 指数为基准；新三板以三板成指或三板做市指数为基准；港股以恒生指数为基准；美股以纳斯达克综合指数或标普 500 指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅 15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅 5% ~ 15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅 5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5% ~ 5%之间
		回避	相对基准指数跌幅 5%以上

免责声明

民生证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用，并不构成对客户的投资建议，不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，客户应当充分考虑自身特定状况，不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期，本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告，但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务，本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告，则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记，除非另有说明，均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。

民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路 8 号财富金融广场 1 幢 5F； 200120

北京：北京市东城区建国门内大街 28 号民生金融中心 A 座 18 层； 100005

深圳：广东省深圳市福田区益田路 6001 号太平金融大厦 32 层 05 单元； 518026