

机械

人形机器人系列报告（二） 领先大市-A(维持)

MEMS IMU 或为人形机器人实现两足运动平衡的最佳方案

2024年4月9日

行业研究/行业专题报告

机械板块近一年市场表现



资料：最闻

首选股票

评级

688582.SH 芯动联科 增持-A

投资要点：

➢ **IMU 是辅助人形机器人实现双足运动最为可行的解决方案。** 惯性传感器是人形机器人本体感觉传感器的重要组成部分，也是辅助人形机器人修正预定步行模式的重要方案，对于防止人形机器人跌倒以及产生动态稳定的步行运动有重要意义。相较于光学/机器视觉进行动作捕捉、被动外骨骼和手动引导等技术路线，惯性测量单元（IMU）能够有效规避障碍物遮挡问题和复杂运动的执行问题，是辅助人形机器人实现双足运动的解决方案中可行性最高的。

➢ **MEMS IMU 或为人形机器人实现两足运动平衡的首选技术方案。** 基于类人化的设计考虑，人形机器人相比工业机器人重量更轻、体积更小、应用场景更广泛，其对减重降本有着更为明确的诉求；基于人形机器人产业化应用的最终诉求，参考市场竞争日趋激烈的汽车行业，我们认为人形机器人批量制造最终也会走向平台化、模组化，其对集成化的诉求预期也会提升。在此背景下 MEMS IMU 或为最佳的技术解决方案，原因是：①MEMS 技术在低成本、小体积、易于批量化生产上有与生俱来的优势；②IMU 产品形态具有尺寸小、功耗低、高集成化等优势。

➢ **MEMS IMU 已在两足人形机器人技术方案中有较为广泛的应用，并承担导航、测量、稳控等功能。** 惯性感知能力对于人形机器人完成两足运动功能具有重要意义，并且大多数两足人形机器人厂商/研究机构明确采用了 MEMS IMU 技术方案，如本田、波士顿动力、PAL Robotics、优必选、小米、傅利叶等。MEMS IMU 可以承担两足人形机器人的导航、测量、稳控等功能。

➢ **人形机器人用 MEMS IMU 空间广阔，且 空间较大。** ①惯性测量单元（IMU）在人形机器人领域有较大的应用空间，通过测算，我们预计到 2035 年全球及中国人形机器人用 MEMS IMU 市场规模将分别接近 36、9 亿美元。②从 MEMS 惯性传感器的市场格局来看，国际厂商如 Honeywell、ADI、BOSCH 等长期占据市场主要份额，相较国产厂商领先优势更加明确；从人形机器人的发展历程来看，国外研究机构及相关厂商在人形机器人的开发上较国内起步更早。按此推断，人形机器人用 IMU 此前应主要由国际厂商供应，预计人形机器人浪潮爆发会为 创造更大机会。③AI 大模型入局加速人形机器人产业化进程，国产厂商有望发挥高效、高性价比等优势从而加速 。考虑到目前尚未有国产惯性传感厂商称已在人形机器人领域实现批量应用，建议关注在汽车自动驾驶领域进展更快的中游模组、下



游系统厂商以及具有自主研发设计能力的上游器件厂商。

**风险提示：**人形机器人产业化不及预期的风险；人形机器人技术方案仍存在不确定性的风险；人形机器人下游应用拓展不及预期的风险；MEMS 技术升级或迭代失败的风险。

## 目录

1. IMU 是辅助人形机器人实现双足运动最为可行的解决方案.....	6
2. MEMS IMU 或为人形机器人实现两足运动平衡的首选技术方案.....	9
2.1 MEMS 技术发展加速减重降本，为人形机器人惯性器件应用奠定基础.....	9
2.2 IMU 高集成化等优势显著，有利于人形机器人批量应用及性能优化.....	11
3. 在现有两足人形机器人方案中，MEMS IMU 已有较为广泛的应用.....	14
4. 人形机器人用 MEMS IMU 空间广阔，且                    空间较大.....	18
4.1 人形机器人用 IMU 空间广阔，全球及中国市场或将接近 36、9 亿美元.....	18
4.2 国际厂商在人形机器人用 IMU 上有领先优势，国产厂商有望加速替代.....	21
4.2.1 MEMS 技术快速发展带来行业玩家数量显著增加，                    成为可能.....	21
4.2.2 当前 MEMS 惯性传感器仍被进口品牌垄断，                    空间较大.....	23
4.3 AI 入局加速产业化进程，MEMS IMU 及相关业务国内公司或将受益.....	25
5. 风险提示.....	27
6. 附录：惯性传感核心器件基本情况概述.....	28
6.1 陀螺仪：MEMS 技术日趋成熟，预期将逐步替代激光/光纤陀螺.....	28
6.2 加速度计：MEMS 领域最为成熟的器件之一，市场份额有望持续扩大.....	31
6.3 磁力计：MEMS 技术进步背景下趋于小型化，应用场景进一步扩展.....	33
6.4 IMU：MEMS IMU 性能持续提升，逐步渗透至光学 IMU 的优势领域.....	36

## 图表目录

图 1： MEMS 和传感器发展推动人形机器人技术变革.....	6
图 2： 基于 ZMP 的人形机器人行走示意.....	7
图 3： 人形机器人运动学结构示意图.....	8
图 4： 全球 MEMS 惯性传感器市场结构（%）.....	13



图 5: 中国 MEMS 惯性传感器市场结构 (%) .....	13
图 6: 霍尼韦尔 MEMS IMU 性能显著提升并逐渐对标光学 IMU.....	14
图 7: 陀螺仪技术演进路径.....	28
图 8: 陀螺仪基本分类概述.....	29
图 9: 陀螺仪应用情况概述.....	29
图 10: MEMS/集成光学微机械陀螺仪将逐步占据绝大部分市场.....	30
图 11: 加速度计基本分类概述.....	31
图 12: 微加速度计分类情况概述.....	31
图 13: 各类型微加速度计原理及结构.....	32
图 14: MEMS 加速度计将逐步占据机械摆式加速计现有市场份额.....	33
图 15: 磁传感器主要技术路线.....	34
图 16: MEMS 磁力计的主要分类.....	36
图 17: IMU 产品构成示意.....	36
图 18: 机械 IMU、光学 IMU、MEMS IMU 产品示意.....	37
表 1: 相较于工业用机器人, 人形机器人重量更轻、体积更小、应用场景更广泛.....	9
表 2: MEMS 技术在小型化、轻量化、易于批量化生产方面更具优势 (以陀螺仪产品为例) .....	11
表 3: 知名汽车品牌车型模块化平台/架构.....	12
表 4: 两足人形机器人 IMU/惯性器件应用情况.....	15
表 5: 新能源汽车历史情况概述.....	19
表 6: 人形机器人用 MEMS IMU 市场空间测算.....	21
表 7: 全球主要玩家惯性传感产品布局.....	22
表 8: 惯性传感器全球市场竞争格局.....	24

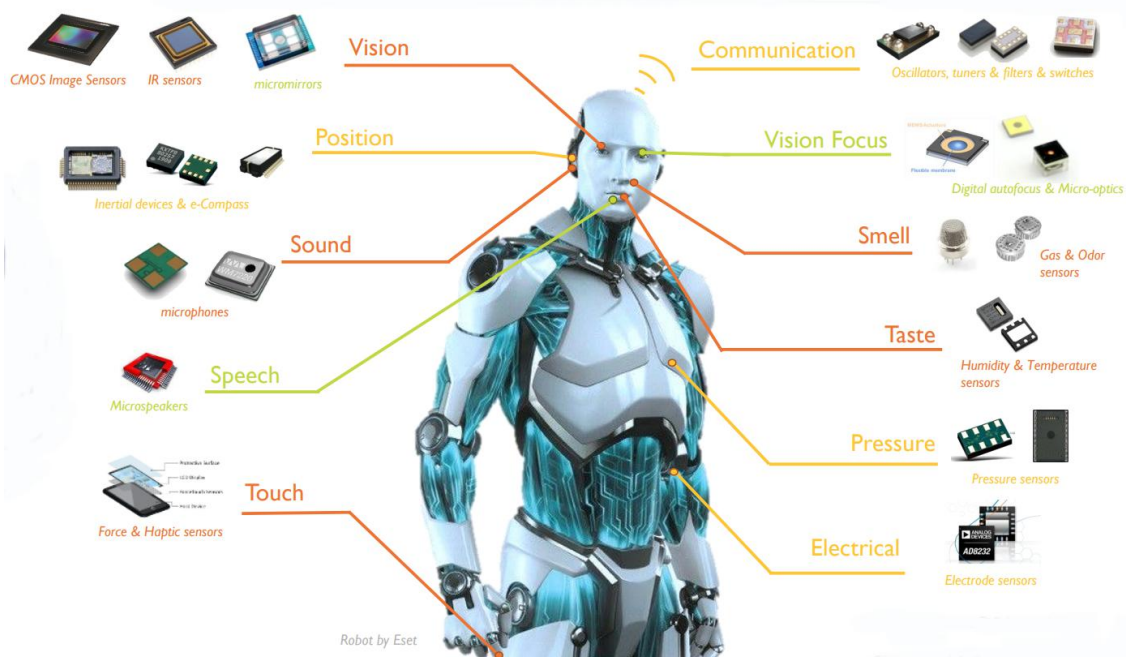


表 9: 2022 年惯性传感器中国前五大厂商及其市占率.....	25
表 10: 2021 年全球高性能 MEMS 惯性传感器市场竞争格局.....	25
表 11: MEMS IMU 及相关 A 股上市/待上市公司概况.....	26
表 12: 常见的磁力计/磁力仪产品类型概述.....	35

## 1. IMU 是辅助人形机器人实现双足运动最为可行的解决方案

为实现获取信息和进行物理工作的基本功能，人形机器人通常配备诸多传感器。人形机器人通常被定义为一种可以模仿人类的动作和外观的可编程机器，其主要功能是：①从周围环境中获取信息；②进行物理工作，如移动或操纵物体。经过多年的研究和发展，目前可用的人形机器人具有不同的尺寸、重量和高度，并且根据不同的应用人形机器人还具有情绪感知及表达、人类行为模拟、新事物学习等能力，而其功能实现是基于各类型的传感器及人工智能等技术。人类的感官系统包括视觉和听觉、动觉（运动、力和触摸）、味觉和嗅觉，这些感官系统将感知到的信号传递给大脑，大脑利用感觉信息建立自己的环境图像，并做出进一步行动的决定。与之类似，人形机器人也需要感知和处理信息并作为行动的依据，但受制于传感器现有技术条件有限且人形机器人整体解决方案还不够成熟，人形机器人要达到像人类一样高效准确地感知还有较大差距，但 MEMS 技术和传感器技术的发展正推动着人形机器人领域的变革。目前，人形机器人传感器主要有两大类：①本体感觉传感器，用于评估机器人机构的内部状态，如机器人关节中的位置、速度和扭矩传感器；②将关于机器人环境的信息传递给控制器的外部感受传感器，如力、触觉、接近和距离传感器以及机器人视觉等。

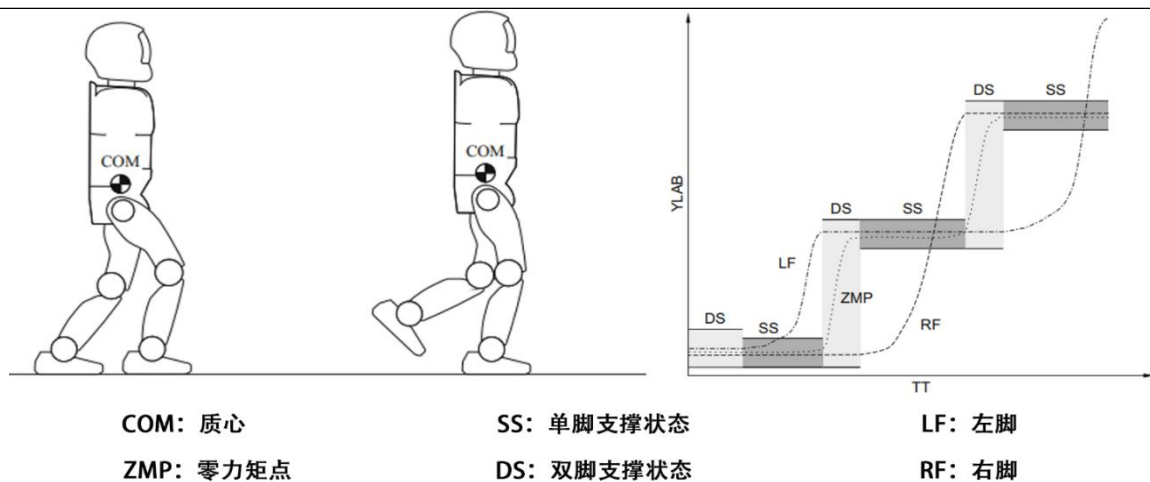
图 1：MEMS 和传感器发展推动人形机器人技术变革



资料来源：Yole Intelligence, Sensors for Drones & Robots, 山西证券研究所

区别于其他类型机器人，人形机器人需要额外解决两足运动的平衡问题以及自由度非常高的问题，其中保持平衡是人形机器人完成任何任务的先决条件。在运动学、动力学、运动控制、轨迹规划和传感器设置等方面，开发人形机器人与开发工业机器人等其他类型相比并无二致；但人形机器人需要额外解决两足运动的平衡问题以及自由度非常高的问题，其中两足运动状态下保持平衡尤为重要。人形机器人保持平衡所涉及的一个关键概念是零力矩点（ZMP），该概念由 Miomir Vukobratovic 于 1968 年提出，其定义是地面反作用力的垂直分量与地面相交的点。与人的行走类似，人形机器人在行走过程中会形成与地面接触的支撑面：①若单足落地，则支撑面为足底对应的区域；②若双足落地，则支撑面为连接双脚对应区域所形成的多边形。ZMP 落在支撑面内是人形机器人行走的必要条件，单足支撑与双足支撑不断交替就产生了稳定的步行运动。在执行两足运动过程中，由于运动速度存在差异，人形机器人质心（COM）的投影往往会偏离零力矩点（ZMP）：①在人形机器人处于静止状态时，质心（COM）的投影与零力矩点（ZMP）重合；②缓慢运动状态下，质心（COM）的投影会落在支撑面内且非常接近零力矩点（ZMP）；③快速运动状态下，质心（COM）的投影可能会落在支撑面之外，其偏离零力矩点（ZMP）的幅度拉大。由于噪声等因素存在，在实践中很难构建精确的机器人模型来使双足步行可以通过简单地遵循预定的步行模式来实现，因而在人形机器人中加入稳定器（如陀螺仪、加速度计、力传感器、相机等）来修正预定的步行模式对于防止人形机器人跌倒以及产生动态稳定的步行运动有重要意义。

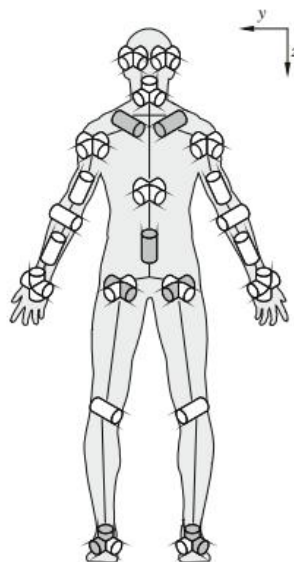
图 2：基于 ZMP 的人形机器人行走示意



资料：Robotics，山西证券研究所

IMU 是辅助人形机器人实现双足运动的解决方案之一，并且也是可行性最高的方案。辅助人形机器人实现类人体双足运动的技术有很多种，按照不同的技术路线可大致分为三类：①使用光学/机器视觉进行动作捕捉，其基本原理是在模型中添加所有相关的关节角度，从而使机器人可复刻人体运动。该方案的优势在于可以准确估计人体在世界坐标系中的绝对位置和方向，劣势在于外部摄像头的性能容易受到障碍物遮挡的影响。②被动外骨骼和手动引导，其基本原理是通过人形机器人的关节角度传感器记录人类演示者的各项运动数据，从而使其复刻人体运动。该方案的虽可以快速将人体运动转化为机器人运动，但是在实际操作过程中需要按照人类演示者打造特定尺寸的被动外骨骼，并且人类演示者很难演示复杂的运动，这可能会导致人形机器人的动作与人类演示者存在较大差距。③惯性测量单元（IMU），其基本原理是利用加速度计、陀螺仪、磁力计等内置的传感器估计 IMU 的位置和方向，从而得到安装了 IMU 的各个身体部位的位置和方向。该方案的优势在于不需要外部摄像头来测量 IMU 的运动因而不会受到遮挡的影响，劣势在于内置的加速度计、陀螺仪等传感器本身存在漂移问题从而会损失部分精确性。通过比较三种解决方案可知，惯性测量单元（IMU）的可行性最高，该方案能够有效规避障碍物遮挡问题和复杂运动的执行问题，虽在精确性上有一定不足，但可以通过开发适当的滤波器来减少漂移、提高精确性。

图 3：人形机器人运动学结构示意图



资料来源：Robotics，山西证券研究所

## 2. MEMS IMU 或为人形机器人实现两足运动平衡的首选技术方案

基于人形机器人减重、降本及批量化生产的诉求，MEMS IMU 或为最佳的技术解决方案。在特斯拉 Optimus 人形机器人面世之前，人形机器人技术长期处于产业化发展前夕，一个核心的原因是单台造价成本高昂。根据新战略咨询的统计，在人形机器人领域布局较早的本田公司（ASIMO 人形机器人）、波士顿动力（Atlas 人形机器人）制造成本分别为 250 万美元、200 万美元，虽经过多年升级迭代但仍未实现商业化；而特斯拉（Optimus 人形机器人）在降本方面虽已取得了卓越成效，但目前单台成本仍在 10 万美元左右，还需降本 80% 才能达到单台 2 万美元的目标成本。目前减重、降本及批量化生产已经成为人形机器人实现产业化的必经之路，在此背景下 MEMS IMU 或为最佳的技术解决方案，原因是：①MEMS 技术在低成本、小体积、易于批量化生产上有与生俱来的优势；②IMU 产品形态具有尺寸小、功耗低、高集成化等优势。

### 2.1 MEMS 技术发展加速减重降本，为人形机器人惯性器件应用奠定基础

基于类人化的设计考虑，人形机器人相比工业机器人重量更轻、体积更小、应用场景更广泛，其对减重降本有着更为明确的诉求。一方面，人形机器人设计的初衷是形状和尺寸与人类类似、能够模仿人类的运动、表情和动作并在日常工作中与人类形成密切的关系，因此相比工业用机器人，人形机器人天然具有重量轻、体积小、行动灵活、可感知交互等特征，这就要求各项设计更加小型化、轻量化、智能化。另一方面，与工业用机器人相对特定的应用场景不同，人形机器人可广泛应用于教育、娱乐、康养、物流等领域，并且伴随技术进步其应用场景还在进一步拓展，而当前人形机器人高生产成本和高研发费用阻碍了市场快速增长，要想实现多场景拓展和商业化应用，人形机器人降本势在必行。

表 1：相较于工业用机器人，人形机器人重量更轻、体积更小、应用场景更广泛

指标	工业机器人	协作机器人	人形机器人
安全特性	通过安全屏障与人类隔开，配备紧急停止按钮等安全功能，但仍存在由于速度和功率导致的风险	通过力和扭矩传感器、圆润边缘和柔软衬垫设计，可以进行安全的人机交互	可以进行人机交互，也可以独立工作，无需采用安全屏障与人类隔开
灵活性和适应性	灵活性较差，专为特定任务而设计，通常更大，更难移动。	高度灵活、易于重新配置、重量轻、占地面积小。	灵活性更好，可模仿人类运动和行为，重量更轻、占地面积更小
易于编程和集成	需要专门的编程语言、额外的硬件和软件、更陡峭的学习曲线、	用户友好的编程，适应性强，学习曲线低，快速重新编程能力	内置复杂算法，包含感知交互、运动控制、轨迹规划等多个方面

指标	工业机器人	协作机器人	人形机器人
	更长的设置时间		
成本和投资回报率	在高精度/高速应用中，前期成本更高，投资回报率更高。安全基础设施、编程和集成的额外成本	降低前期成本，降低设置和培训成本，提高投资回报率	处于发展初期，研发制造等成本均较高，因尚未实现产业化应用，无法评估投资回报率
有效载荷和速度能力	更高的速度，更高的有效载荷能力	速度较慢，有效载荷能力较低	速度较慢，有效载荷能力较低
环境要求	需要特定的环境条件，包括安全外壳	可以在适合人类的广泛环境中运行	可以在适合人类的广泛环境中运行
专业程度	高度专业化，以高精度和速度执行特定任务	通用实用程序，易于重新编程，用途广泛	通用性更强，更多地用于社交、娱乐和服务领域
耐用性和寿命	坚固耐用，专为重型应用而设计，使用寿命更长	经久耐用，应用环境不是非常恶劣	应用环境更加人性化，使用寿命仍待产业化应用后评估
法规和合规注意事项	法规可能不那么严格，在孤立的环境中运行	遵守人际交往的安全规定	遵守人际交往的安全规定

资料来源：Wevolver, OFweek 机器人网, 山西证券研究所

**MEMS 技术具有与生俱来的小型化、轻量化、易于批量化生产优势，已逐步成为惯性传感器领域主流技术趋势，为人形机器人惯性器件应用奠定了基础。**与光纤、激光等其他技术路线相比，MEMS 技术小型化、轻量化、易于批量化生产的优势尤为明显。以陀螺仪产品为例，根据芯动联科招股说明书列示的公开数据显示，其陀螺仪 33 系列性能优于 Honeywell 激光陀螺仪 HG1700 型号和 Emcore 光纤陀螺仪 EG200 型号，性能接近 Honeywell 激光陀螺仪 HG5700 型号和 Emcore 光纤陀螺仪 EG1300 型号，但产品体积、重量和价格数据明显偏低。得益于上述优势，目前 MEMS 已逐步成为惯性传感器领域主流技术路线，分产品来看：①陀螺仪领域 MEMS 技术逐步成熟，随着精度和稳定性持续提升，预期中长期 MEMS 陀螺仪与光学陀螺仪并存的态势还将持续，并且远期有可能主导绝大部分市场；②MEMS 加速度计已经是主流加速度计产品之一，伴随微机电系统（MEMS）和微光机电系统（MOEMS）技术快速发展，未来有望主导绝大部分市场；③MEMS 技术进步使磁力计趋于小型化，除勘探、军事等传统应用以外，其在微型罗盘、智能手机、平板电脑等领域也有广泛应用；④相比光学 IMU，MEMS IMU 体积更小、成本更低、功耗更小、应用场景更为丰富，伴随技术改进和工艺优化，MEMS IMU 逐步渗透至光学 IMU 的优势领域。各惯性器件向小型化、轻量化、易批产方向发展顺应了人形机器人减重降本的需求，一定程度上加速了人形机器人产业化落地进程。

表 2：MEMS 技术在小型化、轻量化、易于批量化生产方面更具优势（以陀螺仪产品为例）

性能指标	Honeywell HG1700 (激光陀螺仪)	Emcore EG200 (光纤陀螺仪)	Honeywell HG5700 (激光陀螺仪)	Emcore EG1300 (光纤陀螺仪)	芯动联科 33 系列 (MEMS 陀螺仪)
零偏稳定性 (° /h)	0.25	1	0.02	0.01	≤0.1
角度随机游走 (° /√h)	0.125	0.04	0.012	0.002	≤0.05
标度因数精度 (ppm)	150	100	10	50	≤100
产品体积 (立方毫米)	--	83.8*83.8*20.3	--	83.8*83.8*20.3	11*11*2
产品重量 (克)	--	127	--	380	1
平均价格（单 轴） (美元)	--	12,554	--	28,129	1,100

资料：芯动联科招股书，山西证券研究所

## 2.2 IMU 高集成化等优势显著，有利于人形机器人批量应用及性能优化

基于人形机器人产业化应用的最终诉求，参考市场竞争日趋激烈的汽车行业，我们认为人形机器人批量制造最终也会走向平台化、模组化，其对集成化的诉求预期也会提升。从汽车行业的发展历程可知，平台化、模块化是汽车行业追求规模效应、实现成本控制的必经之路，其中：平台化通常指由若干通用部件组合成一种载体，模块化通常指具有某种特定结构和功能的通用部件组合。平台化和模块化模式相比传统的开发模式而言具有更为显著的优势，具体表现在：①能够最大限度地节约采购、开发、制造成本；②通过匹配不同的模块和平台，能够更快开发新产品并落地；③减少了长流程中可能出现的偏差，在质量稳定性和一致性上更有保障；④生产效率更高，能够满足批量化生产的要求等。根据佐思汽研相关信息，大多数知名汽车品牌均具备车型模块化平台/架构。考虑到人形机器人未来要实现商业化生产和产业化应用的诉求，我们认为在完成设计端材料、结构等方面的减重降本之后，批量制造端成本优化的重要性也会日益凸显，平台化、模组化预期也会成为人形机器人制造领域的大趋势。

表 3：知名汽车品牌车型模块化平台/架构

汽车品牌	模块化平台/架构	汽车品牌	模块化平台/架构
	MQB、MLB EVO、MEB、PPE、SSP		eCMP、EMP2、STLA SMALL、STLA MEDIUM、STLA LARGE、STLA FRAME
	MQB、MLB EVO、MEB、J1 平台、PPE、SSP		SPA2、CMA、吉利 SEA 浩瀚、GPA
	MLB EVO、MSB、J1 平台、PPE、SSP Sport		BSP、BMP、BLP、易四方
	UKL、FAAR、CLAR、Neue Klasse		MIP、SSA、SIGMA、珠峰、星云、星河
	MRA、MFA II、EVA、MMA、G 级纯电专属、VAN.EA		FMA、FME
	BEV1、BEV2、Ultium 奥特能		GPMA、i-GPMA
	CD4/D4、GE1、GE2、TE1、共享大众 MEB 平台		SPA、BMA、CMA、FE、SEA 浩瀚
	TNGA、e-TNGA		Pei、柠檬、咖啡、ME
	CGP、e:N Architecture F、e:N Architecture W		P3、方舟、五岳、EPA、SDA
	CMF、CMF-BEV、CMF-EV		CMF、EMP、EMA-E、DSMA、M TECH 猛士、量子
	i-GMP、E-GMP、IMA		BMFA、星空、BE21、IMC

资料：佐思汽研《2023 年全球及中国车企模块化平台和技术规划研究报告》，山西证券研究所（注：加粗平台/架构是车企新增的纯电专属平台/架构）

IMU 具有高度集成化特征，已逐步成为 MEMS 惯性传感器领域主流产品形态，与人形机器人制造端平台化、模块化的诉求更为契合。从 MEMS 惯性传感器的市场结构来看，IMU 占比将持续增大（全球占比由 2021 年的 52.15% 增至 2027 年的 56.48%；中国占比由 2021 年的 53.52% 增至 2027 年的 60.06%），陀螺仪和加速度计的占比逐步缩小，主要原因系独立的 MEMS 陀螺仪在高端消费电子和汽车电子市场中逐渐被 IMU 所替代：①在消费电子领域，单个 IMU 配备辅助 SPI 接口可以实现手机定位算法功能，替代了过去采用加速度计与磁力计结合实现的应用，一定程度上会限制加速度计的增长。②在汽车电子领域，由于 IMU 集成了多种 MEMS 惯性传感器的功能，且在功耗、尺寸和信号处理上更有优势，将被更多地用于主动转向、翻滚检测、ESC 以保障 ADAS/AV 高度自动化和完全自动化驾驶，从而对独立的 MEMS 惯性传感

器进行替代。考虑到人形机器人与汽车有一定的技术同源性，并且未来批量化应用会产生制造端平台化、模块化的诉求，我们认为具有高度集成化特征的 MEMS IMU 更加契合人形机器人行业发展大势。

图 4：全球 MEMS 惯性传感器市场结构（%）

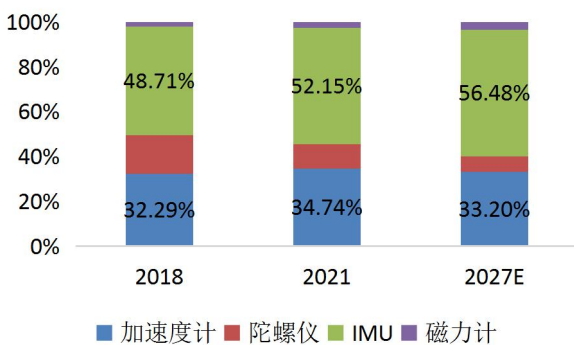
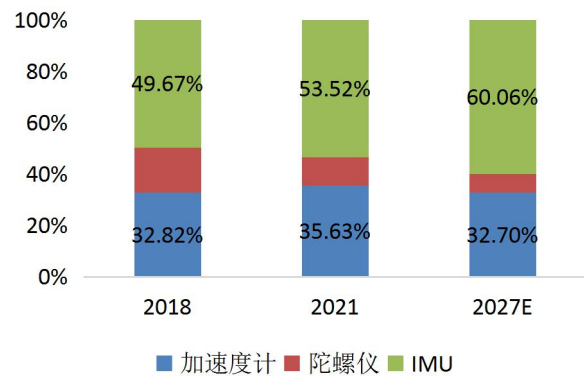


图 5：中国 MEMS 惯性传感器市场结构（%）



资料：Yole Intelligence, 明皜传感招股书, 山西证券研究所

资料：芯谋研究《中国 MEMS 惯性传感器市场分析》, 山西证券研究所

**MEMS IMU 产品性能持续提升，已逐步渗透至光学 IMU 的优势领域。**从行业发展态势来看，MEMS 惯性传感器已被广泛应用于工业与通信、高可靠、汽车电子、医疗健康、消费电子等多个领域，随着 MEMS 惯性技术的持续进步，高性能 MEMS 惯性传感器应用逐渐拓展到无人系统、自动驾驶、高端工业、高可靠等领域。与之类似，随着 MEMS IMU 产品性能持续提升，也已逐步渗透至光学 IMU 的优势领域：①光学 IMU 和 MEMS IMU 是当前市场上比较常见的 IMU 产品类型。由于技术原理存在差异，光学 IMU 在准确度、精度等方面具有显著的优势因而主要应用于航空航天、国防、海上导航和其他高精度领域，而 MEMS IMU 更多应用于体积要求更小、成本要求更低、功耗要求更小的消费电子、汽车及工业等领域。②随着 MEMS IMU 产品性能持续提升，其应用场景已逐步渗透至光学 IMU 的优势领域。以霍尼韦尔产品演进情况为例，从 HG1125、HG1126 到 HG1930、HG1900 再到 HG4930，MEMS IMU 的各主要性能指标均实现优化和提升。其优势 MEMS IMU 产品 HG4930 的部分性能已达到甚至超越光学 IMU 产品 HG1700SG，并且在其官方产品介绍中被认为是体积更小、能耗更低、成本更优的 FOG 替代品。

图 6：霍尼韦尔 MEMS IMU 性能显著提升并逐渐对标光学 IMU

												
	HG1125 IMU	HG1126 IMU	i300 IMU	HG4930 IMU	HG1930 IMU HG1930 INS	HG1936 RATE SENSOR	HG1900 IMU	HG1700AG IMU	HG1700SG IMU	HG5700 IMU HG5720 INS HG5710 INS	HG9900 IMU	
TYPE	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	MEMS Based Tactical Grade IMU	MEMS Based Tactical Grade IMU	RLG Based Tactical Grade IMU	RLG Based Navigation Grade IMU	RLG Based Navigation Grade IMU	
BIAS PERFORMANCE (In-run Gyro, Accel; Turn-on Gyro, Accel)	7deg/hr, 0.35mg, 120deg/hr, 1.5mg	7deg/hr, 0.35mg, 120deg/hr, 1.5mg	Typical Performance: 3deg/hr, 0.02mg, 65deg/hr, 2mg	Typical Performance: 0.25deg/hr, 0.0025mg, 7deg/hr, 1.7mg	1deg/hr, 0.3mg, 20deg/hr, 5mg	1.5deg/hr, 20deg/hr	1deg/hr, 0.3mg, 10deg/hr, 1mg	0.25deg/hr, 0.05mg, 1deg/hr, 1mg	0.25deg/hr, 0.05mg, 1deg/hr, 1mg	0.01deg/hr, 0.035mg, 0.035deg/hr, 0.2mg	0.0006deg/hr, 0.010mg, 0.004deg/hr, 0.025mg	
ANGULAR RANDOM WALK	0.300°/√hr	0.300°/√hr	Typical Performance: 0.15°/√hr	Typical Performance: 0.04°/√hr	0.125°/√hr	0.125°/√hr	0.060°/√hr	0.125°/√hr	0.125°/√hr	0.006°/√hr	0.002°/√hr	
EXPORT CLASSIFICATION	Non-ITAR (7A994)	Non-ITAR (7A003.d)	Non-ITAR (7A994)	Non-ITAR (7A994)	Non-ITAR (7A003.d) HG1930 INS ITAR	Non-ITAR (7A003.d)	Non-ITAR (7A003.d)	Standard: Non-ITAR (7A003.d) Radiation Tolerant: ITAR	Standard: Non-ITAR (7A003.d) Radiation Tolerant: ITAR	5700: Non-ITAR (7A003.d) 5720: Non-ITAR (7A003.d) 5710: ITAR	Non-ITAR (7A003.d)	
SWAP	0.6in <sup>3</sup> 0.06lbs 0.5W	0.6in <sup>3</sup> 0.06lbs 0.5W	1in <sup>3</sup> 0.08lbs 0.5W	5in <sup>3</sup> 0.31lbs 2W	5in <sup>3</sup> 0.35lbs 3W	5in <sup>3</sup> 0.31lbs 3W	17in <sup>3</sup> 1.1lbs 3W	33in <sup>3</sup> 2lbs 5W	27in <sup>3</sup> 1.5lbs 5W	45in <sup>3</sup> 3lbs 10W	103in <sup>3</sup> 6lbs 10W	
STATUS	Production	Development	Production	Production	Production	Production	Production	Production	Production	Production (IMU) Development (INS)	Production	




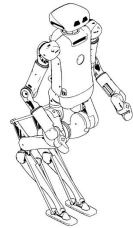

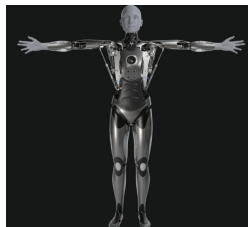
资料：霍尼韦尔官网，山西证券研究所

### 3. 在现有两足人形机器人方案中，MEMS IMU 已有较为广泛的应用

MEMS IMU 已在两足人形机器人技术方案中有较为广泛的应用，并承担导航、测量、稳控等功能。通过梳理可追溯的两足人形机器人技术方案可知，惯性感知能力对于其完成两足运动功能具有重要意义，并且大多数两足人形机器人厂商/研究机构明确采用了 MEMS IMU 技术方案，如本田、波士顿动力、PAL Robotics、优必选、小米、傅利叶等。MEMS IMU 可以承担两足人形机器人的导航、测量、稳控等功能：①在惯性导航方面，MEMS IMU 不借助外源信息，也不向外发送任何信号，从而可不用借助其他设备、免受外界干扰影响而实现动态确定自身位置变化、确定自身移动轨迹以实现导航功能；②在惯性测量方面，MEMS IMU 可以利用陀螺仪、加速度计等惯性敏感元件和电子计算机测量载体相对于地面运动的角速率和加速度，以确定载体的位置和地球重力场参数的组合系统；③在惯性稳控方面，MEMS IMU 可以通过连续监测系统姿态与位置变化，利用伺服机构动态调整系统姿态，使被稳定对象与设定目标保持相对稳定，因其可以隔离载体干扰，在保持运动平台稳定以及提高平台设备性能等方面具有重要优势。

表 4：两足人形机器人 IMU/惯性器件应用情况

厂商	型号	身高 (cm)	重量 (kg)	走路速度	自由度 (DOF)	IMU/惯性器件应用	图示
本田	ASIMO	130	48	2.7 km/h	57	有应用	
波士顿动力	Atlas	150	89	2.5 m/s	28	有应用	
PAL Robotics	TALOS	175	95	3 km/h	32	有应用	
理工华汇	Haribit	170	55	3.5 km/h	24	未明确	
University of Zurich	Roboy	142	--	--	28	未明确	
KAIST 、 Rainbow Robotics	DRC-Hubo+	170	80	1.5 km/h	32	有应用	

厂商	型号	身高 (cm)	重量 (kg)	走路速度	自由度 (DOF)	IMU/惯性器件应用	图示
RoboCub Consortium and IIT	iCub	104	25	--	54	有应用	
AIST	HRP-4C	160	46	1.8 km/h	44	有应用	
KIST	Kibo	120	42	0.54 km/h	44	有应用	
Agility	Digit	155	42.2	--	16	有应用	
Figure	Figure-01	168	60	1.2 m/s	--	未明确	
Engineered Arts	Ameca	187	49	--	61	未明确	

厂商	型号	身高 (cm)	重量 (kg)	走路速度	自由度 (DOF)	IMU/惯性器件应用	图示
Tesla	Optimus	173	73	8 km/h	200+	未明确	
优必选	Walker	130	63	3km/h	41	有应用	
宇数	H1	180	47	>1.5 m/s	18	未应用	
小米	Cyberone	177	52	3.6 km/h	21	有应用	
乐聚	KUAVO	--	45	最快 4.6km/h	26	有应用	
开普勒	先行者 K1	178	85	--	40	未明确，但有采用姿态传感器	

厂商	型号	身高 (cm)	重量 (kg)	走路速度	自由度 (DOF)	IMU/惯性器件应用	图示
Appttronik	Apollo	173	72.5	--	--	未明确	
智元	远征 A1	175	55	7 km/h	49+	有应用	
傅利叶	Fourier GR-1	165	55	5 km/h	44	有应用	

资料来源：ASIMO 官网，波士顿动力官网，PAL Robotics 官网，理工华汇官网，Agility 官网，Figure 官网，Ameca Gen Brochure，Tesla 官网，优必选官网，宇数官网，小米官网，欧菲光微信公众号，乐聚官网，广东粤港澳大湾区研究院，开普勒官网，Appttronik 官网，智元官网，傅利叶官网，wevolver，robots guide，山西证券研究所

## 4. 人形机器人用 MEMS IMU 空间广阔，且 空间较大

### 4.1 人形机器人用 IMU 空间广阔，全球及中国市场或将接近 36、9 亿美元

惯性测量单元（IMU）在人形机器人领域有较大的应用空间，预计到 2035 年全球及中国人形机器人用 MEMS IMU 市场规模将分别接近 36、9 亿美元。为测算人形机器人用 MEMS IMU 市场空间，我们将参考新能源汽车行业给出关键假设：

#### （一）新能源汽车行业发展概况

新能源汽车产业化浪潮开始于 2015 年，由于此前传统燃油车已经形成了较为完备的产业化基础，在“油改电”的过程中更多表现为升级和优化，因此新能源汽车销售放量的速度更快、产业化落地之后降价的节奏也更为缓和，同时得益于国家政策大力支持及产业化起步较早，中

国新能源汽车市场在全球占据了重要地位：①根据 IEA 数据，2016-2022 年全球新能源汽车销量分别为 75、118、205、208、297、650、1020 万辆，中国新能源汽车销量分别为 33.9、58、109、106、114、325、590 万辆，中国新能源汽车销量占全球的比例分别为 45.20%、49.15%、53.17%、50.96%、38.38%、50.00%、57.84%；③为获取新能源汽车价格变动趋势，我们基于“全球新能源汽车居民支出/全球新能源汽车销量”进行简单测算，2016-2020 年全球新能源汽车居民支出分别为 320、390、750、910、1330、2570、3650 亿美元，由此计算得到新能源汽车均价分别为 4.27、3.31、3.66、4.38、4.48、3.95、3.58 万美元。

表 5：新能源汽车历史情况概述

指标	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
全球新能源汽车居民支出（亿美元）	320	390	750	910	1330	2570	3650
全球新能源汽车销量（万辆）	75	118	205	208	297	650	1020
全球新能源汽车销量 CAGR （以 2016 年为基数）		57.33%	65.33%	40.50%	41.07%	54.02%	54.50%
新能源汽车均价（万美元）	4.27	3.31	3.66	4.38	4.48	3.95	3.58
新能源汽车均价 yoy		-22.54%	10.69%	19.58%	2.36%	-11.71%	-9.49%
中国新能源汽车销量（万辆）	33.9	58	109	106	114	325	590
中国新能源汽车销量占全球的比例	45.20%	49.15%	53.17%	50.96%	38.38%	50.00%	57.84%

资料：IEA, Our world in data, 山西证券研究所

## （二）人形机器人出货量预测

自特斯拉 Optimus 惊艳亮相以来，人形机器人产业化进度加快，越来越多的厂商开始进入这一市场。但与汽车行业“油改电”的升级换代不同，人形机器人虽在技术上与新能源汽车有一定同源性，但在设计、制造、应用等方面都存在巨大差异。基于此，我们给出假设：①通常情况下产业化初期出货量处于比较低的水平，故我们假定 2024 年全球人形机器人出货量为 1000 台；②2016-2017 全球新能源汽车销量 CAGR 为 57.33%，考虑到人形机器人发展阶段显著慢于新能源汽车并且基数更低，我们假设到 2029 年人形机器人可达到新能源汽车 2017 年的发展状态并且 CAGR 为新能源汽车的 3 倍；③受新能源汽车补贴退坡及新冠疫情影响，2019、2020 年全球新能源汽车销量 CAGR 下降较为明显（分别为 40.50%、41.07%），在人形机器人的预测中我们暂不考虑政策扶持及突发疫情的影响，故按照平滑后的 2019、2020 年全球新能源汽车销量 CAGR（分别为 63%、60%）进行假设，即 2031 年 CAGR 为 2018 新能源汽车 CAGR 的 2.7 倍、2032 年 CAGR 为 2019 新能源汽车 CAGR 的 2.6 倍，以此类推。基于上述假设，我

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/598047107073006055>