

## 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



资料来源：最闻

## 首选股票

## 评级

688582.SH 芯动联科 增持-A

## 相关报告：

【山证机械】AI 超预期助力产业落地，核心零部件配套星辰大海-人形机器人系列报告一 2024.3.12

【山证 3C 设备】【山证机械】3C 设备产业链专题报告：掘金千亿级市场，折叠屏、钛合金兼具规模与高  $\alpha$  属性 2024.1.19

## 分析师：

叶中正

执业登记编码：S0760522010001

电话：

邮箱：yeyzhongzheng@sxzq.com

徐风

执业登记编码：S0760519110003

邮箱：xufeng@sxzq.com

## 研究助理：

## 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，且国产替代空间较大。** 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国产替代创造更大机会。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国产替代。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





冯瑞

邮箱: fengrui@sxzq.com

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，且国产替代空间较大.....	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，国产替代成为可能.....	21
4.2.2 当前 MEMS 惯性传感器仍被进口品牌垄断，国产替代空间较大.....	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

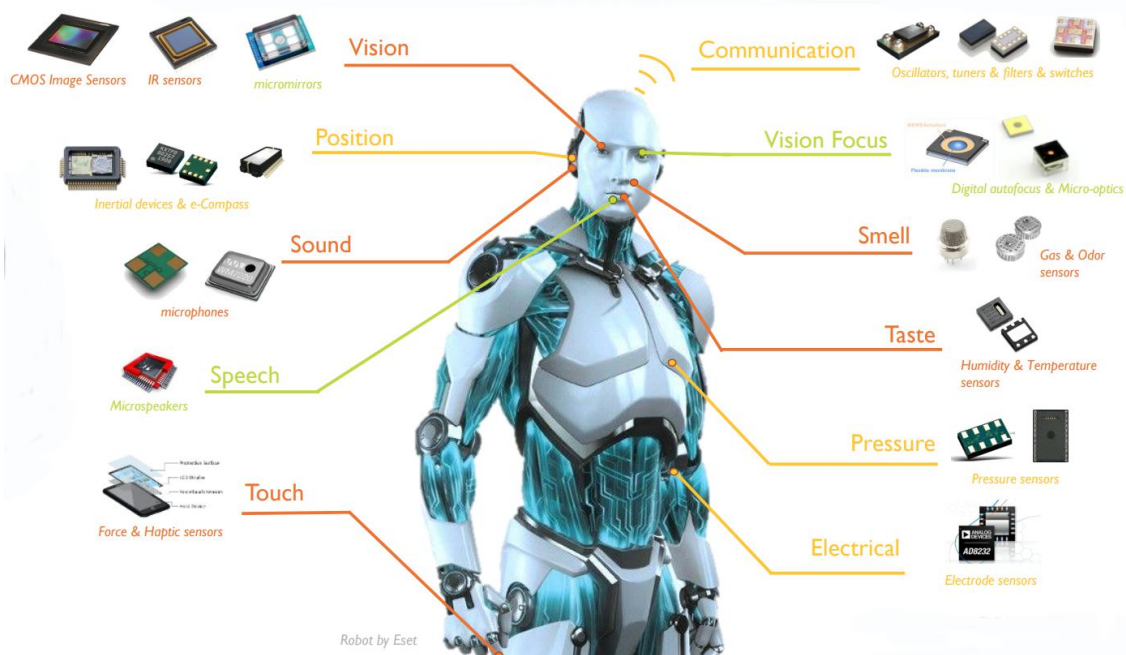


表 9: 2022 年惯性传感器中国前五大厂商及其市占率.....	25
表 10: 2021 年全球高性能 MEMS 惯性传感器市场竞争格局.....	25
表 11: MEMS IMU 及相关 A 股上市/待上市公司概况.....	26
表 12: 常见的磁力计/磁力仪产品类型概述.....	35

## 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。

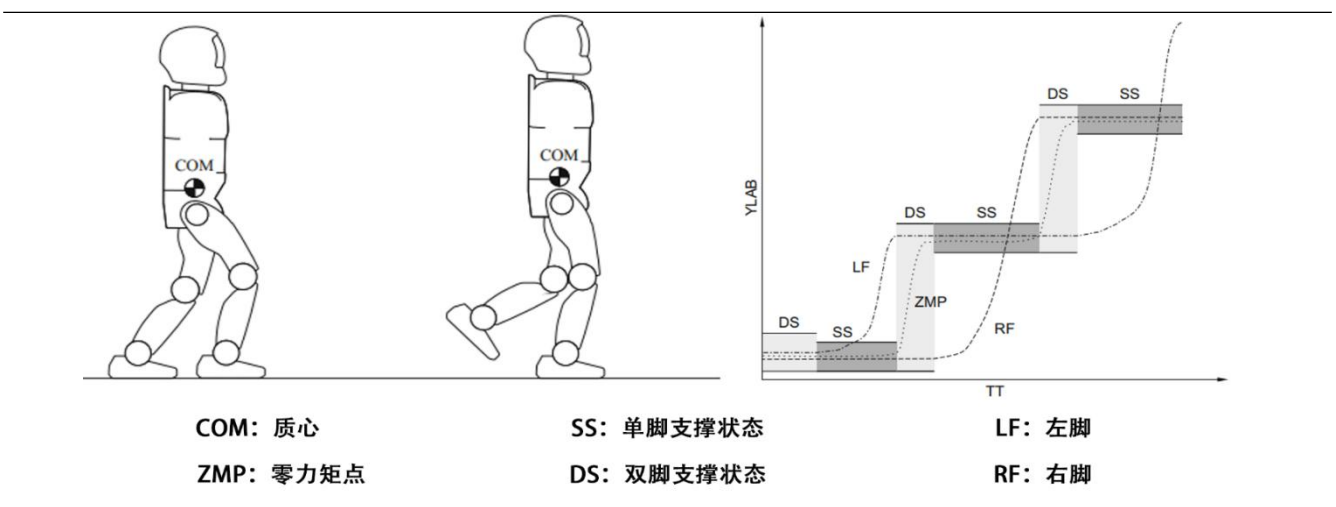
图 1：MEMS 和传感器发展推动人形机器人技术变革



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。

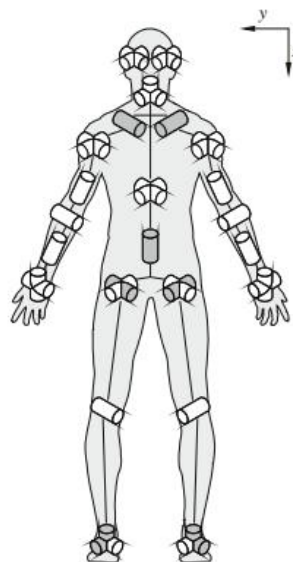
图 2：基于 ZMP 的人形机器人行走示意



资料来源：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

资料来源：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

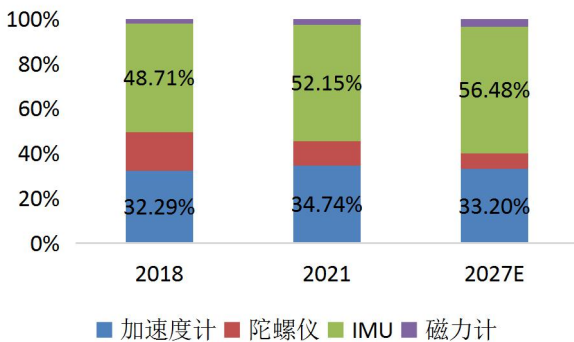
汽车品牌	模块化平台/架构	汽车品牌	模块化平台/架构
	MQB、MLB EVO、MEB、PPE、SSP		eCMP、EMP2、STLA SMALL、STLA MEDIUM、STLA LARGE、STLA FRAME
	MQB、MLB EVO、MEB、J1 平台、PPE、SSP		SPA2、CMA、吉利 SEA 浩瀚、GPA
	MLB EVO、MSB、J1 平台、PPE、SSP Sport		BSP、BMP、BLP、易四方
	UKL、FAAR、CLAR、Neue Klasse		MIP、SSA、SIGMA、珠峰、星云、星河
	MRA、MFA II、EVA、MMA、G 级纯电专属、VAN.EA		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、坦克、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

资料来源：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

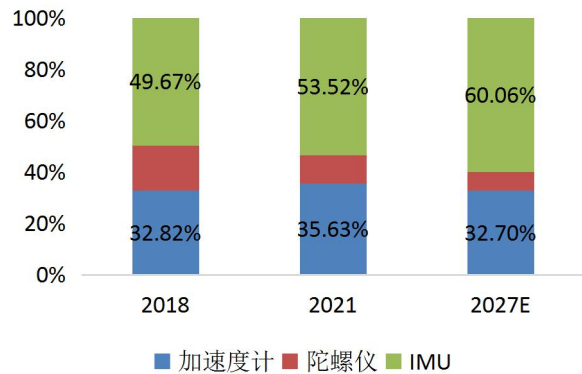
器进行替代。考虑到人形机器人与汽车有一定的技术同源性，并且未来批量化应用会产生制造端平台化、模块化的诉求，我们认为具有高度集成化特征的 MEMS IMU 更加契合人形机器人行业发展大势。

图 4：全球 MEMS 惯性传感器市场结构（%）



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

图 5：中国 MEMS 惯性传感器市场结构（%）



资料来源：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

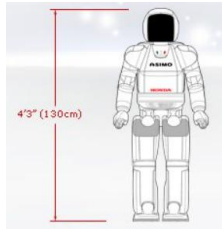
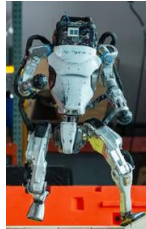
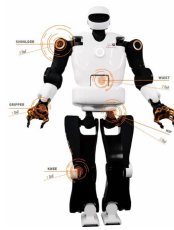



												
	HG1125 IMU	HG1126 IMU	i300 IMU	HG4930 IMU	HG1930 IMU HG1930 INS	HG1936 RATE SENSOR	HG1900 IMU	HG1700AG IMU	HG1700SG IMU	HG5700 IMU HG5720 INS HG5710 INS	HG9900 IMU	
TYPE	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High Performance MEMS IMU	High 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	




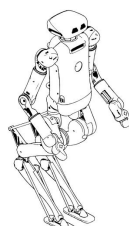

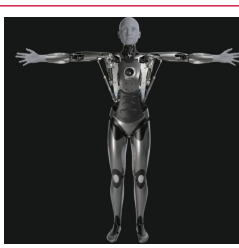
资料来源：霍尼韦尔官网，山西证券研究所

### 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，字数官网，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，且国产替代空间较大

### 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%

资料来源：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

们测算得到 2024、2029、2031、2032、2033、2034、2035 年全球人形机器人出货量分别为 0.10、14.89、123.20、234.53、381.47、407.87、760.92 万台。

### （三）人形机器人用 MEMS IMU 价格及用量预测

在人形机器人产业化初期其技术方案大概率会沿用实验室阶段的成果，然后在实际应用过程中逐步进行优化和改善，因此我们认为人形机器人用 MEMS IMU 价格会逐步下降且呈现速度由快到慢并趋于稳定态势，而人形机器人用 MEMS IMU 的数量可能会逐步增加以优化人形机器人运动及平衡性能。基于此，我们给出假设：①由于国产厂商在人形机器人的开发进程中慢于国外，因而在对 MEMS IMU 价格进行假设时我们将参考国外优势厂商霍尼韦尔的产品 i300 IMU，选择 i300 IMU 的原因是：人形机器人与汽车有一定的技术同源性，预期其所需的 IMU 性能与汽车一致或略高于汽车，故选择霍尼韦尔中等水平的 i300 IMU 作为参考。根据 Octopart 数据，2024 年 4 月 9 日霍尼韦尔 i300 IMU 的价格为 2074.02 美元/个，假定 2024 年人形机器人用 MEMS IMU 的价格与之相同，且 2024 到 2029 年价格降幅为 80%、2029 到 2031 年价格降幅为 50%、此后年降幅分别为 30%、20%、10%、10%；②“Multi-IMU Proprioceptive State Estimator for Humanoid Robots”一文研究发现，在人形机器人身体结构中放入 5 个 IMU 能够改进运动学模型，比单个 IMU 性能更好，所获得的轨迹估计更为精确，并且可以构建相对于地面实况几乎没有失真的高程图，故假定人形机器人到 2035 年 IMU 使用数量为 5 个，2024、2029、2031、2032、2033、2034 用量分别为 1、3、5、5、5、5 个。

### （四）中国人形机器人市场占全球的比例预测

新能源汽车是传统燃油车“油改电”的一次升级，在此过程中中国始终保持较为领先的进度，因此 2016-2022 年中国新能源汽车销量占全球的比例大致维持在 50%。而在人形机器人的研究和开发上，中国厂商进度落后于国外，因此我们认为即便进入成熟期，中国人形机器人销量占全球的比例较新能源汽车仍会存在明显缺口。基于此，我们给出假设：①假定到 2035 年中国人形机器人销量占全球的比例为 25%，2024、2029、2031、2032、2033、2034 的比例分别为 1%、10%、13%、16%、19%、22%。

基于此，通过测算我们可以得到 2024、2029、2031、2032、2033、2034、2035 年全球人形机器人用 MEMS IMU 市场规模分别为 2.07、185.27、1277.58、1702.47、2215.29、2131.73、3579.29 百万美元，中国人形机器人用 MEMS IMU 市场规模分别为 0.02、18.53、166.09、272.40、420.91、468.98、894.82 百万美元。

表 6：人形机器人用 MEMS IMU 市场空间测算

指标	2024	2029	2031	2032	2033	2034	2035
全球人形机器人数量（万台）	0.10	14.89	123.20	234.53	381.47	407.87	760.92
单台人形机器人 MEMS IMU 用量（个）	1	3	5	5	5	5	5
MEMS IMU 单价（美元）	2074.02	414.80	207.40	145.18	116.15	104.53	94.08
全球人形机器人用 MEMS IMU 市场规模（百万美元）	2.07	185.27	1277.58	1702.47	2215.29	2131.73	3579.29
中国人形机器人市场占全球的比例	1%	10%	13%	16%	19%	22%	25%
中国人形机器人用 MEMS IMU 市场规模（百万美元）	0.02	18.53	166.09	272.40	420.91	468.98	894.82

资料来源：Octopart, Multi-IMU Proprioceptive State Estimator for Humanoid Robots, 山西证券研究所

## 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
































人形机器人虽未实现产业化应用，但历经多年研发已有许多款产品面世。其中，本田、波士顿动力、PAL Robotics、优必选、小米、傅利叶等明确表示其技术方案中有 IMU 或惯性器件应用，但尚未披露供应 IMU 或惯性器件的厂商信息。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，譬如本田 ASIMO 机器人早在 2000 年 10 月就已正式面世。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国产替代创造更大机会。

### 4.2.1 MEMS 技术快速发展带来行业玩家数量显著增加，国产替代成为可能

MEMS 已成为惯性传感领域主要的技术路线，得益于此，惯性传感器行业玩家数量显著增加。根据 High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace and Industrial Applications 2020 列明的全球主要玩家惯性传感产品布局情况，目前全球主要厂商中拥有 MEMS、光纤、激光、半球谐振、动力调谐技术的厂商数量分别为 29、21、12、5、9 家（其中，拥有硅基 MEMS 技术的厂商有 27 家，拥有石英 MEMS 技术的厂商有 5 家，同时拥有硅基 MEMS 技术和石英 MEMS 技术的厂家有 3 家），MEMS 已成为惯性传感领域主要的技术路线。在拥有 MEMS 技术的 29 家厂商中：①专注于 MEMS 技术路线的共有 21 家，典型厂商包括 ADI、NXP、Sensoror、Silicon Sensing、美泰科技、芯动联科等；②在光纤、激光等技术路线上有显著优势然后切入 MEMS 技术路线的共有 8 家，典型厂商包括 Emcore、Honeywell、Northrop Grumman/Litef、Safran 等。

得益于 MEMS 技术快速发展，惯性传感器行业玩家数量显著增加，国产厂商开始在惯性传感器领域崭露头角，实现国产替代的可能性进一步增强。

表 7：全球主要玩家惯性传感产品布局

公司	产品类别				技术路线				性能等级					
	加速度计	陀螺仪	惯性单元	惯导系统	硅基 MEMS	石英 MEMS	光纤	激光	半球谐振	动力调谐	工业	战 术	导 航	战 略
		✓	✓				✓					✓	✓	
	✓	✓	✓		✓						✓			
		✓	✓	✓			✓	✓		✓		✓	✓	
		✓	✓	✓			✓					✓	✓	
			✓	✓	✓							✓		
		✓	✓	✓			✓					✓	✓	
		✓	✓	✓		✓	✓					✓	✓	
					✓	✓					✓	✓		
		✓	✓			✓					✓	✓		
		✓	✓				✓				✓	✓		
		✓					✓				✓	✓	✓	
	✓				✓						✓			
		✓	✓	✓			✓					✓	✓	
		✓	✓	✓	✓						✓	✓		
	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓	✓
		✓	✓	✓	✓		✓	✓				✓	✓	
			✓	✓			✓	✓	✓			✓	✓	
	✓	✓								✓	✓	✓		
		✓	✓	✓			✓					✓	✓	
			✓	✓	✓		✓	✓			✓	✓	✓	
	✓	✓	✓				✓	✓					✓	✓
		✓	✓	✓			✓				✓	✓		
			✓	✓					✓			✓	✓	
		✓	✓	✓			✓	✓					✓	✓
			✓	✓	✓						✓	✓		
			✓		✓						✓			
		✓	✓	✓	✓						✓			
	✓				✓						✓	✓		
		✓	✓	✓			✓	✓			✓	✓		
	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓	✓		✓	✓	✓
	✓				✓						✓	✓		

公司	产品类别				技术路线				性能等级					
	加速 度计	陀螺 仪	惯 性 单 元	惯 导 系 统	硅基 MEMS	石英 MEMS	光 纤	激 光	半 球 谐 振	动力 调谐	工 业	战 术	导 航	战 略
Raytheon Anschütz		✓	✓	✓				✓	✓	✓			✓	✓
		✓	✓				✓					✓		
SAFRAN Sagem Colibry	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SBG		✓	✓	✓	✓						✓			
sensoror		✓	✓		✓						✓	✓		
SDI	✓				✓						✓	✓		
SILICON SENSING	✓	✓	✓		✓						✓	✓		
星网宇达 StarHemo		✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	✓	✓	
TDK tronics	✓	✓			✓						✓			
THALES		✓	✓	✓	✓			✓		✓		✓		✓
KEIKI		✓								✓	✓	✓	✓	
UTC Aerospace Systems Collins Aerospace	✓	✓	✓		✓	✓						✓		
VECTRONAV			✓		✓						✓			
		✓	✓	✓	✓					✓	✓			
		✓	✓	✓	✓						✓			
<b>芯动联科</b>	✓	✓	✓		✓						✓	✓	✓	

资料来源：Yole Intelligence, High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, 芯动联科招股书, 山西证券研究所

#### 4.2.2 当前 MEMS 惯性传感器仍被进口品牌垄断，国产替代空间较大

全球 MEMS 惯性传感器市场集中度较高，博世、TDK、意法半导体、ADI、Honeywell 等国际巨头占据主导地位。MEMS 产业是典型的技术、资金及智力密集型行业，技术、资金和人才等壁垒较高，从全球竞争格局来看，目前少数国际巨头企业占据市场主导地位，市场集中度较高。根据 Yole Intelligence 的统计数据，2021 年度 MEMS 惯性传感器市场仍主要由国际大厂占据，其中：①MEMS 加速度计市场的前五大厂商为 Robert Bosch、ST、Murata、NXP、ADI，CR5 为 84%；②MEMS 陀螺仪市场的前五大厂商为 TDK、ADI、Honeywell、Robert Bosch、ST，CR5 为 83%；③IMU 市场的前五大厂商为 Robert Bosch、ST、TDK、Honeywell、ADI，CR5 为 88%。④根据 KBV Research 数据，在磁力计领域 Honeywell 是行业先行者，VectorNav Technologies、Lake Shore Cryotronics、Metrolab Technology SA 等公司是关键创新者，与头部厂商 Honeywell 仍存在较大差距。

表 8：惯性传感器全球市场竞争格局

序号	MEMS 加速度计		MEMS 陀螺仪		MEMS IMU		磁力计
1	ROBERT BOSCH	32%	TDK	24%	ROBERT BOSCH	35%	
2	ST	21%	ADI	18%	ST	20%	
3	MURATA	13%	HONEY WELL	19%	TDK	20%	
4	NXP	11%	ROBERT BOSCH	12%	HONEY WELL	6%	
5	ADI	7%	ST	10%	ADI	7%	
总计	-	84%	-	83%	-	88%	

资料来源：Yole Intelligence, 明皜传感招股书, KBV Research, 山西证券研究所（注：MEMS 加速度计、陀螺仪、IMU 三项时间为 2021 年，磁力计该项未明确时间）

中国 MEMS 惯性传感器市场份额主要被博世、ST、TDK 等巨头占据，但国产厂商的竞争力也在持续提升。得益于国内智能手机、智能穿戴、物联网及汽车电子市场的快速发展和对传感器日益提升的需求，国内的 MEMS 惯性传感器公司也得到了快速的发展，目前主要的国内市场参与者包括上海矽睿、美新半导体、士兰微等公司。但由于国内的 MEMS 惯性传感器行业起步较晚，整体的销售规模相比国外龙头企业仍有较大差距。①国内 MEMS 加速度计市场份额主要被国际厂商占据，2022 年中国 MEMS 加速度计市场排名前三的厂商为博世、意法半导体和 Murata，份额分别为 28%、18%和 12%。相比国际领先企业，本土企业营收规模小、技术积累少、客户资源少，市场占有率较低，但国产厂商通过加大投入、加强自主创新持续提升市场竞争力。其中，士兰微和美新半导体在本土厂商中份额最大，在中国整体市场中位列第五、第六，占比分别为 9%、7%，其余前五大本土厂商为明皜传感、矽睿科技和敏芯股份，市场份额分别为 4%、1%和<1%。②国内 MEMS 陀螺仪市场主要厂商为博世、意法、TDK 等国际巨头，国内企业有深迪半导体、美新半导体、矽睿科技等，但市场较为细分、各厂商销售额较小。③国内 MEMS IMU 市场格局相对集中，国际厂商占据垄断地位，CR3 将近 80%，CR5 超过 90%。其中，博世以 33%的市场份额排名第一，ST 和 TDK 分别以 25%和 21%的市场份额紧随其后。相较于 MEMS 加速度计市场，国内 MEMS IMU 市场的国产厂商更少且市场份额更低：2022 年中国 IMU 市场最大本土厂商为矽睿科技，市场份额占比为 2%；其余厂商如深迪半导体等，市场份额占比均小于 1%。但考虑到国产厂商在本地化服务、供应链整合等方面具有明显的优势，随着 MEMS IMU 在智能化、自动化等领域渗透率不断提升，国产厂商的竞



争力有望进一步增强。④在国内磁力计市场中，除 Honeywel、VectorNav Technologies 等国外厂商以外，国内厂商多维科技、深迪半导体等也开始崭露头角。

表 9：2022 年惯性传感器中国前五大厂商及其市占率

序号	MEMS 加速度计（整体市场）		MEMS 加速度计（本土企业）		IMU	
1	BOSCH	28%	士兰微	9%	BOSCH	33%
2	ST	18%	美新半导体	7%	ST	25%
3	MURATA	12%	明皜传感	4%	TDK	21%
4	NXP	11%	矽睿科技	1%	ADI	7%
5	士兰微	9%	敏芯股份	<1%	HONEYWELL	7%
总计	-	78%	-	22%	-	93%

资料来源：芯谋研究《中国 MEMS 惯性传感器市场分析》，山西证券研究所

就高性能 MEMS 惯性传感器而言，全球核心供应商是 Honeywell、ADI、Northrop Grumman/Litef，CR3 在 50% 以上。根据 Yole Intelligence 统计，2021 年全球高性能 MEMS 惯性传感器市场规模约 7.1 亿美元（按照 2021 年 12 月 31 日 1 美元兑换 6.37 元人民币的汇率换算为 45.23 亿元），占全球高性能惯性传感器市场规模的比例为 22.90%。全球高性能 MEMS 惯性产品市场份额集中在 Honeywell、ADI、Northrop Grumman/Litef 等行业巨头手中，合计占有 50% 以上的份额。与国际巨头相比，国产厂商整体规模较小，仍处于快速发展期。

表 10：2021 年全球高性能 MEMS 惯性传感器市场竞争格局

排名	厂商	销售额（亿元）	市占率
1	Honeywell	15.38	34%
2	Analog Devices	5.88	13%
3	Northrop Grumman/Litef	3.62	8%
--	其他公司	20.35	45%
总计		45.23	100%

资料来源：Yole Intelligence, High-End Inertial Sensing 2022, 芯动联科招股书，山西证券研究所

### 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

AI 大模型入局加速人形机器人产业化进程，国产惯性器件/模组厂商有望加速替代。2023 年 AI 大模型及人形机器人均取得“跨越式”突破，2024 年“AI 大模型+人形机器人”趋势日渐明朗：①3 月英伟达发布了人形机器人通用基础模型 Project GR00T 并且表示正在为领先的

人形机器人公司开发一个综合的 AI 平台；②3 月 Figure 公司宣布其 Figure 01 机器人接入 OpenAI 大模型；③4 月优必选公司宣布其人形机器人 Walker S 接入了百度文心大模型。AI 大模型接入使得人形机器人在多模态感知方面的能力进一步增强，并且 AI 平台简化设计、优化集成等优势也进一步加快了人形机器人的产业化进程，在此情况下，国产厂商有望发挥高效、高性价比等优势从而加速国产替代。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。

表 11: MEMS IMU 及相关 A 股上市/待上市公司概况

产业链环节	公司名称	公司简介	产品类型	产品情况
上游器件	688582.SH	芯动联科	主要从事高性能硅基 MEMS 惯性传感器芯片的研发、测试与销售	MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计
	A23224.SH	明皜传感	主要从事 MEMS 加速度计芯片产品的研发、设计和销售	MEMS 加速度计
	600460.SH	士兰微	目前国内为数不多的 IDM 模式综合型半导体产品公司	MEMS 陀螺仪和 MEMS 加速度计
	002829.SZ	星网宇达	致力于惯性技术开发与产业化的领军企业	MEMS 陀螺仪
	688282.SH	理工导航	主要从事惯性导航系统及其核心部件的研发、生产和销售	MEMS 陀螺仪
	688286.SH	敏芯股份	以 MEMS 传感器研发与销售为主的半导体芯片设计公司	MEMS 加速度计
	688061.SH	灿瑞科技	智能磁传感器、模拟及数模混合集成电路的领先供应商之一	磁传感器
	688052.SH	纳芯微	聚焦高性能、高可靠性模拟集成电路研发和销售的集成电路设计企业，具有过硬的车规级芯片开发能力和丰富的量产、品控经验	磁传感器
中游模组	688582.SH	芯动联科	主要从事高性能硅基 MEMS 惯性传感器芯片的研发、测试与销售	IMU
	688071.SH	华依科技	从事汽车动力总成智能测试设备的研发、设计、制造、销售及提供相关测试服务	IMU
	600460.SH	士兰微	目前国内为数不多的 IDM 模式综合型半导体产品公司	IMU
	002829.SZ	星网宇达	致力于惯性技术开发与产业化的领军企业	IMU
	688282.SH	理工导航	主要从事惯性导航系统及其核心部件的研发、生产和销售	IMU
	300177.SZ	中海达	公司专业从事高精度卫星导航定位系统(GNSS)软硬件产品的研发、生产、销售	IMU
下游系统	688071.SH	华依科技	从事汽车动力总成智能测试设备的研发、设计、制造、销售及提供相关测试服务	惯性导航系统/组合导航系统
	002829.SZ	星网宇达	致力于惯性技术开发与产业化的领军企业	惯性导航系统/组合导航系统
	688282.SH	理工导航	主要从事惯性导航系统及其核心部件的研发、生产和销售	惯性导航系统/组合导航系统
	300177.SZ	中海达	公司专业从事高精度卫星导航定位系统(GNSS)软硬件产品	惯性导航系统/组合

产业链环节	公司名称	公司简介	产品类型	产品情况
			的研发、生产、销售	导航系统
	300627.SZ	华测导航	国内高精度卫星导航定位产业的领先企业之一	惯性导航系统/组合导航系统
	688326.SH	经纬恒润	专注于为汽车、高端装备、无人运输等提供电子产品、研发服务及解决方案和高级别智能驾驶整体解决方案	惯性导航系统/组合导航系统

资料来源：Wind，各公司官网，山西证券研究所（注：上游器件环节仅列示设计类公司，生产及封测相关公司暂未列示）

## 5. 风险提示

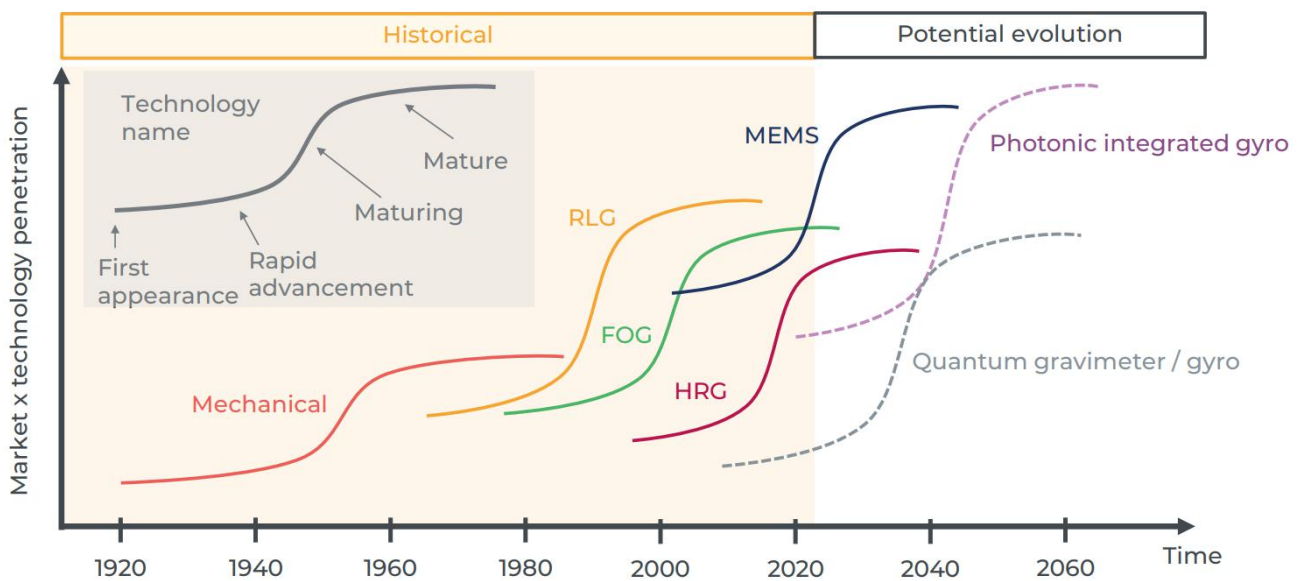
人形机器人产业化不及预期的风险；人形机器人技术方案仍存在不确定性的风险；人形机器人下游应用拓展不及预期的风险；MEMS 技术升级或迭代失败的风险。

## 6. 附录：惯性传感核心器件基本情况概述

### 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

陀螺仪是惯性传感器的基础核心器件之一，主要用于感知物体运动的角速率。陀螺仪是测量载体相对空间角速率的传感器，可以感知和测量载体的角运动状态和变化。从陀螺仪技术演进的路径来看，大致可以分为四个阶段：①基于牛顿经典力学原理的以静电陀螺以及动力调谐陀螺为代表的机械陀螺，其特点是种类多、精度高、体积质量大、系统组成结构复杂、性能受机械结构复杂性和极限精度制约、产品制造维护成本昂贵；②基于萨格奈克效应的以激光陀螺和光纤陀螺为代表的光学陀螺，其特点是反应时间短、动态范围大、可靠性高、环境适应性强、易维护、寿命长；③基于哥氏振动效应和微纳加工技术的是半球谐振陀螺和 MEMS 陀螺，其中，半球谐振陀螺受限于结构及制造技术市场上可规模化生产的企业较少，而 MEMS 陀螺的特点是体积小、重量轻、环境适应性强、价格低、易于大批量生产；④基于现代量子力学技术的核磁共振陀螺、原子干涉陀螺等，其特点是可实现高精度、高可靠、小型化和更广泛应用，但是目前仍处于早期研究阶段。目前 MEMS 陀螺仪的技术逐步成熟，随着精度和稳定性持续提升，其在陀螺仪市场中占据了重要的位置。

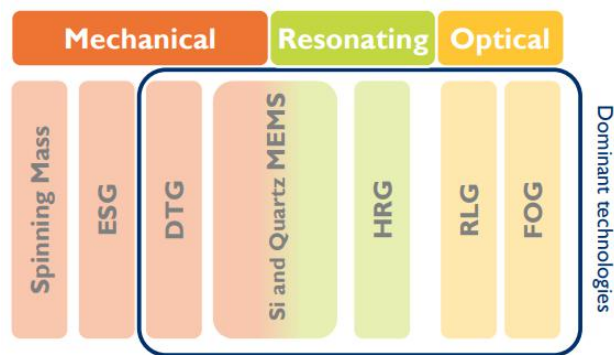
图 7：陀螺仪技术演进路径



资料来源：Yole Intelligence, High-End Inertial Sensors 2022, 山西证券研究所

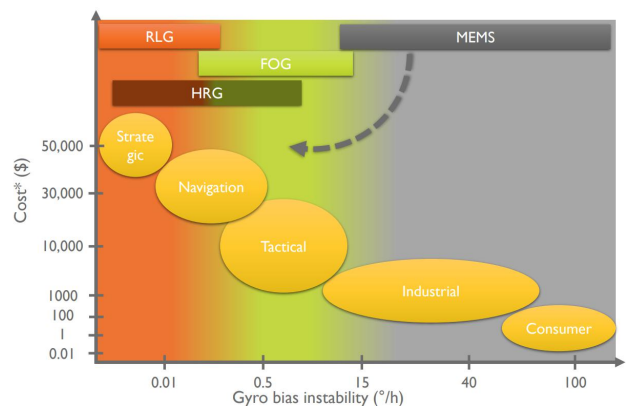
得益于低成本、小体积，MEMS 陀螺仪相比机械陀螺和光学陀螺在批量化生产方面更有优势。按照基本技术原理，陀螺仪可划分为机械陀螺、谐振陀螺、光学陀螺三大类，并可进一步细分为机械/旋转质量陀螺仪、电悬架（静电）陀螺仪（ESG）、环形激光陀螺（RLG）、光纤陀螺仪（FOG）、半球谐振陀螺仪（HRG）、石英陀螺仪（非 MEMS）、微机械陀螺仪（MEMS，石英或硅）、机械动态调谐陀螺仪（DTG），其中，MEMS 陀螺仪也是目前的主流技术之一。与传统的机械陀螺仪相比，MEMS 陀螺仪的优势在于：①比机械陀螺仪更小、更轻，在限制尺寸和重量的领域有非常重要的意义；②得益于微细加工工艺，MEMS 陀螺仪在生产过程中比传统陀螺仪更具成本效益；③MEMS 陀螺仪比机械陀螺仪功耗更低，对于供电设备和节能系统的压力更小；④MEMS 陀螺仪比机械陀螺仪损耗更小，具有更高的可靠性和更长的使用寿命。与激光和光纤陀螺仪相比，MEMS 陀螺仪的优势在于低成本、小体积、高可靠、易批产，得益于此，MEMS 陀螺仪除在消费级、工业级领域实现广泛应用以外，也已逐步切入激光和光纤陀螺仪的优势领域（如无人系统、高端工业、高可靠等）。

图 8：陀螺仪基本分类概述



资料来源：Yole Intelligence，High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, 山西证券研究所

图 9：陀螺仪应用情况概述

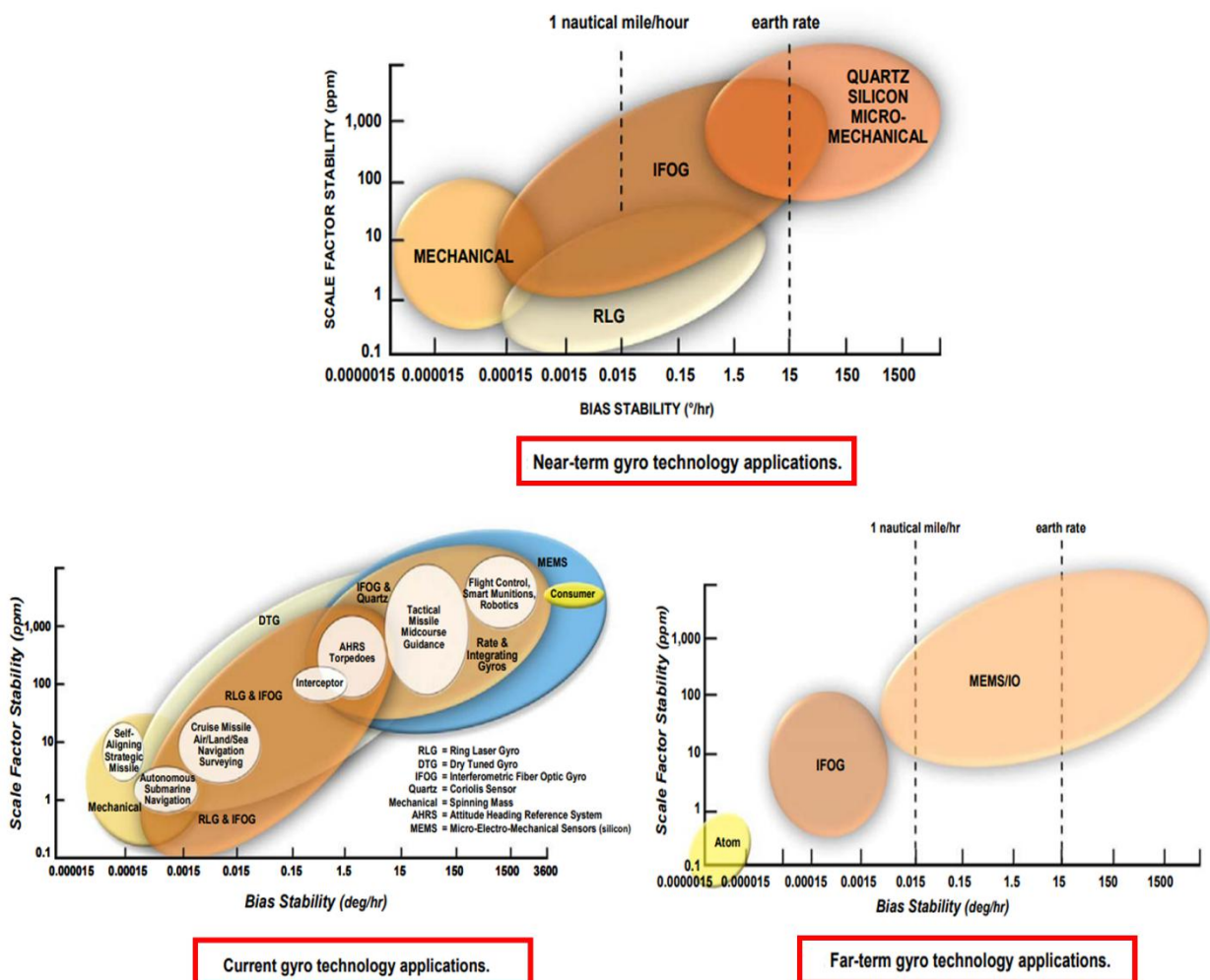


资料来源：Yole Intelligence，High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, 山西证券研究所

中长期 MEMS 陀螺仪与光学陀螺仪并存的态势仍将持续，远期 MEMS/集成光学微机械陀螺仪或将逐步占据绝大部分市场。根据不同的精度范围，陀螺仪可以划分为消费级、工业级、战术级、导航级、战略级五大类：①在消费级领域，MEMS 陀螺仪几乎占据全部市场份额，具体应用场景包括手机、AR/VR 等；②在工业级领域，MEMS 陀螺仪应用较为广泛，占据了 86% 的市场份额，具体应用场景包括资源勘探、测量测绘、光电吊舱等；③在战术级和导航级

领域，两光陀螺应用比较广泛，分别占据 78%和 92%的市场份额，具体应用场景包括无人系统、卫星姿态控制系统、动中通等；④在战略级领域，激光陀螺仪的适用性较强，占据了 72%的市场份额，具体应用场景为航天航海等领域。中长期来看，随着高性能 MEMS 陀螺仪技术的进一步成熟，MEMS 陀螺仪在高端工业、无人系统和高可靠领域的具体应用场景也将逐渐丰富，在工业级陀螺仪的主导地位将进一步强化，可进一步应用到两光陀螺的战术级应用领域，并逐渐渗透到导航级应用领域。远期来看，MEMS/集成光学微机械陀螺仪或将主导绝大部分市场，并将倒逼光学陀螺仪与原子干涉陀螺仪等新技术共同竞争更高精度市场。

图 10: MEMS/集成光学微机械陀螺仪将逐步占据绝大部分市场

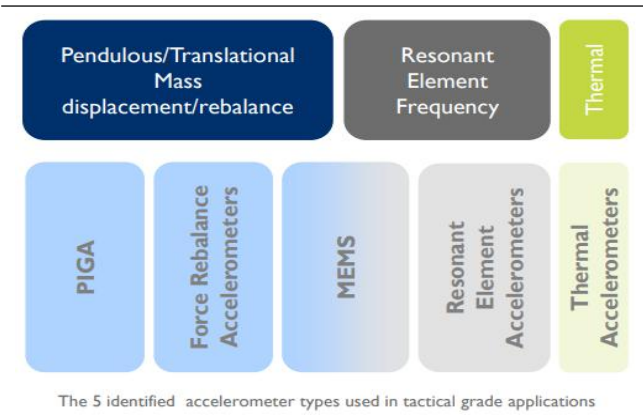


资料来源: INS/GPS Technology Trends, 山西证券研究所

## 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

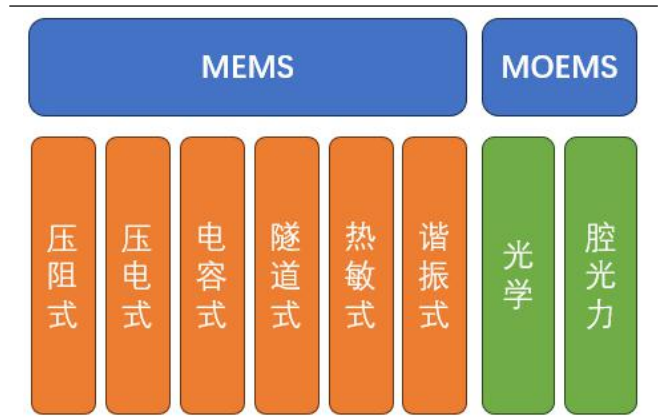
加速度计是惯性传感器的另一基础核心器件，主要用于感知物体运动的线加速度。按照基本技术原理，加速度计可划分为悬移/平移质量位移/再平衡加速计、谐振元件加速度计、热能加速度计三大类，并可进一步细分为悬吊式再平衡加速度计（特别是 PIGA）、力平衡加速度计、谐振元件加速度计、热加速度计、MEMS 加速度计。就微加速度计而言，微机电系统(MEMS)和微光机电系统(MOEMS)技术快速发展使得微加速度计日趋成熟，按照敏感原理微加速度计可以进一步划分为压阻式、压电式、电容式、隧道式、热敏式、谐振式、光学式等多种类型。加速度计是 MEMS 领域最早研究、最成熟、最常见的器件之一，主要用于测量物体线加速度，通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件和适调电路等部分组成。加速度计的理论基础是牛顿第二定律，传感器在加速过程中，可通过对质量块所受惯性力的测量计算出加速度值。如果初速度已知，就可以通过加速度对时间积分得到线速度，再次通过线速度对时间积分可计算出直线位移。

图 11：加速度计基本分类概述



资料来源：Yole Intelligence，High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications, 山西证券研究所

图 12：微加速度计分类情况概述

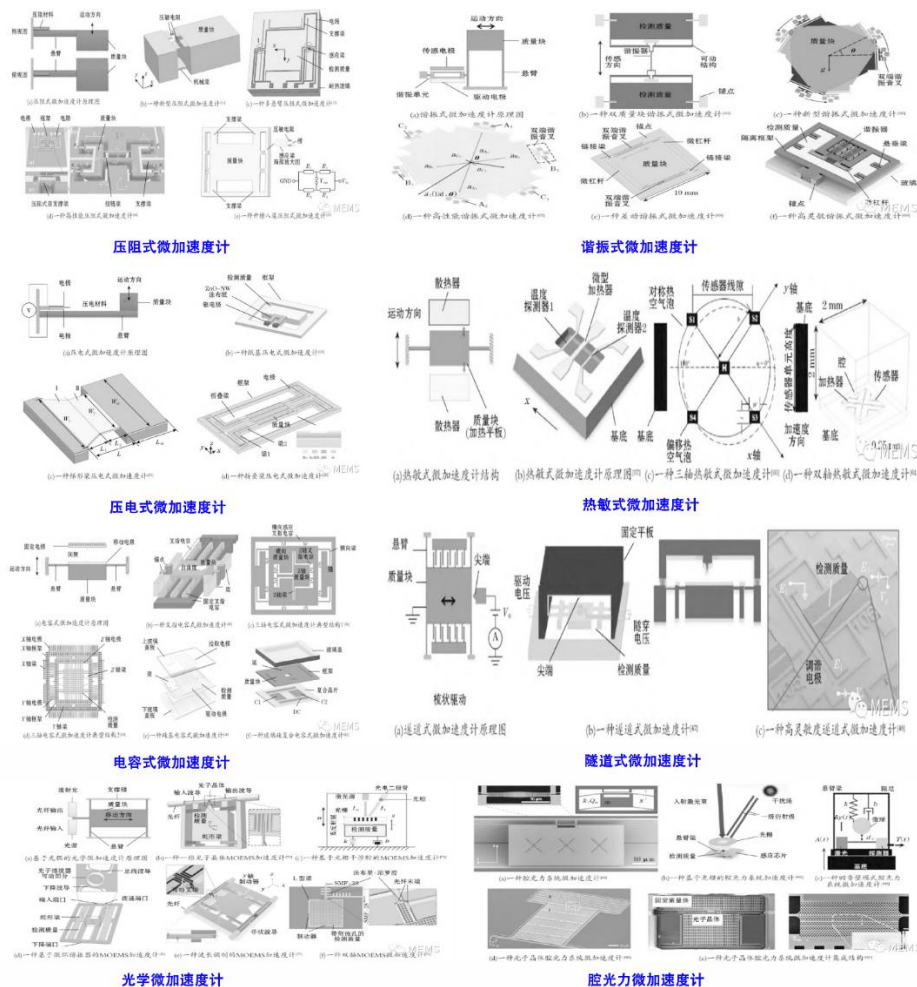


资料来源：麦姆斯咨询《综述：新型微加速度计研究进展》，山西证券研究所

不同类型的微加速度计均有各自的优缺点，其中电容式 MEMS 加速度计是目前应用最多的类型。各类 MEMS 加速度计在探测灵敏度、精度、测量范围、稳定性等性能指标上，以及在加工成本、器件质量和体积、环境适应性等方面有着各自的优缺点，且相互制约：①压阻式微加速度计结构简单，制作相对简易，但其对温度敏感，且灵敏度较低、蠕变和迟滞效应较大；

②压电式微加速度计工作频带宽、功耗低、抗摔性好、温度稳定性高，但低频噪声性能差；③电容式微加速度计结构简单、漂移率低、温度敏感性低，但抗电磁干扰性差；④隧道式微加速度计灵敏度高，但温度依赖性高，制造工艺复杂、工作电压高；⑤热敏式微加速度计不需要大体积的运动质量块，但灵敏度较低、工作带宽较窄；⑥谐振式微加速度计测量谐振频率信号的准确度和精度高，但只能应用于随时间缓慢变化的加速度量值测量；⑦光学微加速度计结合光学测量和微机电系统的优点，可实现高精度、高灵敏度、小体积和抗电磁干扰的加速度测量；⑧腔光力微加速度计灵敏度高、精度高、稳定度高、动态范围大，但也存在散粒噪声、量子反作用噪声等噪声源影响探测精度的问题。目前，电容式 MEMS 加速度计仍是应用最多的类型，被广泛应用于消费电子、汽车、工业、高可靠等各个领域。

图 13：各类型微加速度计原理及结构

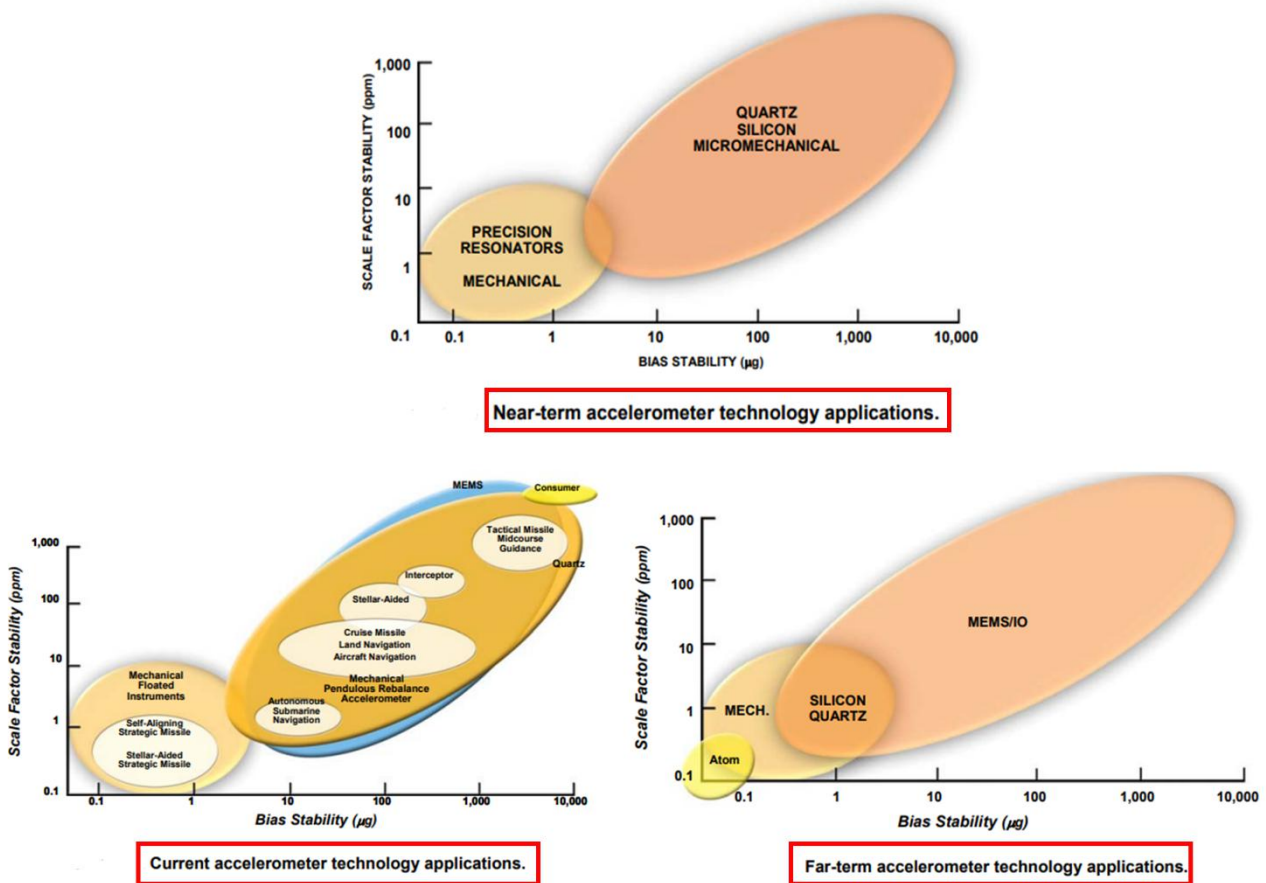


资料来源：麦姆斯咨询《综述：新型微加速度计研究进展》，山西证券研究所



目前 MEMS 加速度计已经是主流加速度计产品之一，随着技术持续升级，MEMS/集成光学微加速度计的市场份额还将继续扩大。根据不同的精度范围，加速度计可以划分为消费级、战术级、导航级、战略级四大类：①机械摆式加速度计及高精度石英谐振加速度计按照性能主要归类为战略级和导航级，主要应用于航天、航海陆地巡航等领域；②MEMS 加速度计和石英加速度计主要属于战术级和导航级加速度计，主要用于航空、长航时无人系统及高端工业领域。目前 MEMS 加速度计已经是主流加速度计产品之一，并且其精度范围及应用场景与石英加速度计重合度较高。未来，MEMS/集成光学微机械加速度计有望主导绝大部分市场，伴随原子加速度计等新技术涌现，传统的机械摆式加速度计市场份额将被进一步压缩。

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



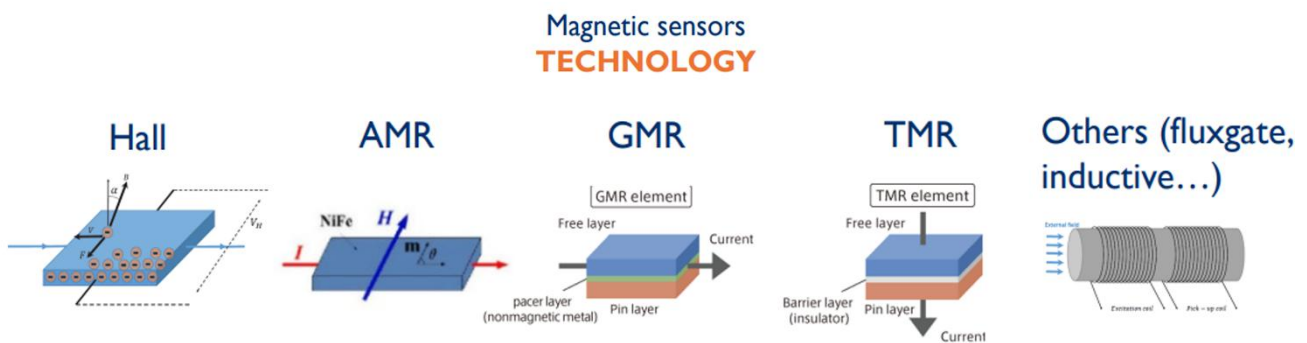
资料来源：INS/GPS Technology Trends，山西证券研究所

### 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

磁力计隶属于磁传感器，其核心技术原理是霍尔效应。磁传感器是一种把磁场、电流、应

力应变、温度、光等外界因素引起的敏感元件磁性能变化转换成电信号，以此来检测相应物理量的器件。按照不同的技术路径，磁传感器可以划分为霍尔效应传感器和磁阻传感器两大类：①霍尔效应传感器主要利用霍尔效应，即当电流垂直于外磁场通过半导体时，垂直于电流和磁场的方向会产生附加电场，从而在半导体的两端产生电势差，来检测磁场的强度。霍尔效应（Hall Effect）传感器的历史最悠久、应用最广泛，按照不同的产品形态，霍尔效应传感器可进一步划分为线性型霍尔传感器、开关型霍尔传感器等；②磁阻传感器主要是在器件内构造薄膜，即给通以电流的材料加以与电流垂直或平行的外磁场，其电阻值会有所增加或减少。通过应用上述物理效应，磁阻传感器芯片能够精确测量电流、位置、方向、角度等物理信号。磁阻传感器按不同原理可分为各向异性磁阻（AMR）传感器、巨磁阻（GMR）传感器和隧穿磁阻（TMR）传感器。目前霍尔效应传感器仍在实际应用中占据更高的市场份额，AMR、GMR、TMR 等磁阻传感器虽尚存一些问题但有望凭借高灵敏度等特点在未来得到进一步发展和推广。

图 15：磁传感器主要技术路线



资料来源：Yole Intelligence, Magnetic Sensor Market and Technology Report 2022, 山西证券研究所

磁力计/磁力仪的基本功能是测量外界磁场的大小和极性，随着技术发展已逐步向微型化、集成化演进。磁力计是指用于测量磁场方向和磁场强度大小的仪器，也称为磁力仪或高斯计。磁力计/磁力仪经历了从简单到复杂、从机械式到电子式再到超导式的发展历程，其体积和成本也在逐步减小。从磁力计/磁力仪技术演进的路径来看，大致可以分为三个阶段：①基于永久磁铁与地磁场之间相互力矩作用原理的第一代产品，通常利用感应线圈以及辅助机械装置实现，如机械式磁力仪、感应式航空磁力仪等；②基于核磁共振特性，利用高导磁率软磁合金以及专门电子线路的第二代产品，如质子磁力仪、光泵磁力仪、磁通门磁力仪等；③基于约瑟夫

逊效应，用超导材料制成的第三代产品，如超导磁力仪等。目前，常见的磁力计/磁力仪类型主要有标量、矢量、梯度等。

表 12：常见的磁力计/磁力仪产品类型概述

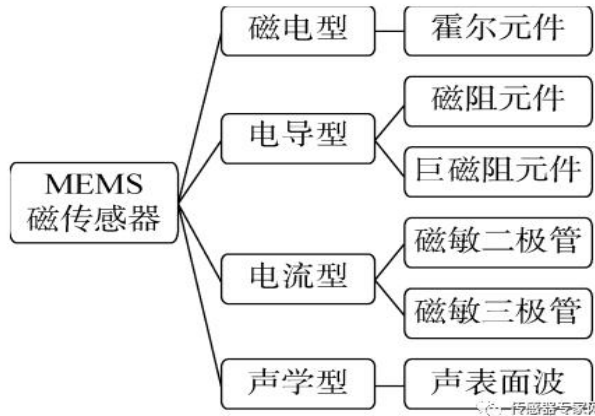
类型	分类	特点
标量磁力计	霍尔效应磁力计	感应施加磁场时电导体上感应的电压可以完美地用于测量磁场
	质子旋进 (PPM)磁力计	利用核磁共振测量磁场中质子的共振，测量线圈中由于其重新定向而产生的电压
	Overhauser 磁力计	类似于霍尔效应和质子进动磁力计，但使用射频信号来极化电子自旋
矢量磁力计	电感磁力计	通过测量样品在变化的磁场中在某些检测线圈中感应的电流来测量某些粒子的偶极矩
	磁通门磁力计	由磁环芯和至少两个线圈绕组组成（驱动绕组和感应绕组）
	霍尔效应磁力计	产生与磁场成正比的电压，并提供有关其模块和方向的信息；广泛用于传感应用而不是表征磁性材料
	微机电系统（MEMS）磁力计	使用光学手段在微观尺度上检测共振结构的运动
梯度磁力计	梯度磁力计	①需要一个设备来产生一个已知的磁场，该磁场可以是交替的，也可以是恒定的。②梯度磁力计需要交替梯度场的源。③需要电子或光学手段来检测和测量合力。④具有谐振操作，当达到最大振幅时，磁性样品会围绕其谐振频率移动
	振簧式磁力计	Zijlstra 于 1970 年推出了第一台交替梯度磁力计，Zijlstra 的磁力计与以前的磁力计之间最显著的区别是灵敏度以及完全表征磁性材料的能力
	振动样品磁力计 (VSM)	Foner 于 1959 年发明的振动样品磁力计 (VSM) 引入了样品运动垂直于外加磁场的颖性。Foner 降低了设置的复杂性，避免了对磁场的硬性修改
	组合式交变磁场磁力计	马德里技术大学的研究人员于 2015 年发明了组合式交变磁场磁力计，仍然使用两个磁场但是是应用两个交变场。与仅限于直流场的 VSM 或其他磁力计相比，最大的优点是在交流和直流中对样品进行表征。

资料来源：加速度传感器网《磁力计的类型》，山西证券研究所

除勘探、军事等传统应用以外，MEMS 技术进步使磁力计趋于小型化，因而可广泛应用于微型罗盘、智能手机、平板电脑等领域。现代磁力计是采用 CMOS 工艺的平面器件，工艺相对一般 IC 更为简单：通常在 P 型衬底上 N 阱形成传感器件，通过金属电极将传感器与其他电路（如放大器、调节处理器等）相连，由此形成只能感知垂直于管芯表面磁场变化的单轴磁力计；在单轴磁力计的基础上增加磁通集中器（即在原来的管芯上增加一层坡莫合金）可实现对平行于管芯方向磁场的检测，从而形成三轴磁力计。磁力计功能多样，可用来测量生物磁场（如用于医疗保健等）、测量地球磁场（如用于矿物或石油勘探、指南针、罗盘等）、测量周围磁场的扭曲（如用于国防、安全、交通监控等）等。基于霍尔效应、磁阻效应、电磁感应效应等不同的技术原理可以制成多种 MEMS 磁力计，其体积更小并且可以以非常低的成本集成到集成电路中，因而也广泛应用于微型罗盘、智能手机、平板电脑等领域。按照输出信号形式不

同，MEMS 磁力计可以分为磁电型、电导型、电流型、声学型四类。

图 16: MEMS 磁力计的主要分类



资料来源：传感器专家网《MEMS 惯性传感器研究现状与发展趋势》，北京遥测技术研究所，山西证券研究所

## 6.4 IMU: MEMS IMU 性能持续提升，逐步渗透至光学 IMU 的优势领域

IMU 是陀螺仪、加速度计、磁力计等惯性器件的组合，目前 6 轴和 9 轴 IMU 是常见的产品形态。惯性测量单元（即 IMU）由陀螺仪、加速度计、磁力计、气压计等器件组合而成，其中陀螺仪和加速度计是最为核心的器件：6 轴 IMU 通常包含一个三轴陀螺仪和一个三轴加速度计；9 轴 IMU 是在 6 轴 IMU 的基础上叠加一个三轴磁力计；10 轴 IMU 是在 9 轴 IMU 的基础上叠加一个气压计。目前，市场上常见的 IMU 产品形态为 6 轴和 9 轴，能够满足不同应用场景下高精度测量的需求。

图 17: IMU 产品构成示意



资料来源：巨视安防《IMU 贯穿我们的生活》，山西证券研究所

按照技术原理划分，惯性测量单元包括机械类 IMU、光学类 IMU、MEMS 类 IMU 等。由于惯性器件种类繁多，组合而成的惯性测量单元（即 IMU）也有不同的技术指标和产品性能。按照技术原理不同，IMU 可以划分为机械类、光学类、MEMS 类等：①机械类 IMU 是最早的 IMU 产品。以采用摆动积分陀螺加速度计（PIGA）和陀螺仪组合成的机械 IMU 为例，PIGA 具有所有加速度计中最高的线性度、精度、灵敏度、稳定性和动态范围因而性能也是最优的，但在尺寸、重量、功率、复杂性、成本和维护等方面存在严重的缺陷，目前机械 IMU 的应用已较少。②光学类 IMU 又可划分为激光（RLG）IMU、光纤（FOG）IMU 等。其中，FOG IMU 使用基于光纤盘绕传播光束的固态技术，该产品在角随机游动、偏置偏移误差和偏置不稳定性等重要参数上表现优异，且对冲击和振动不太敏感，并可提供极好的热稳定性，但其缺陷在于容易受到磁干扰并且比 MEMS IMU 体积更大、价格更高；RLG IMU 的技术原理与 FOG IMU 类似，该产品使用密封的环形腔代替光纤，RLG IMU 是当前常用 IMU 中最昂贵的，体积也比其他替代方案大得多。③MEMS 类 IMU 又可以划分为石英 MEMS IMU 和硅基 MEMS IMU 等。其中，石英 MEMS IMU 基于石英微加工技术，通过将石英振动转变为可感知的信号来测量物体的偏转，该产品在不同温度下均有高可靠性和高稳定性，并且战术级石英 MEMS IMU 在尺寸、重量、功率和成本等方面可与 RLG IMU 和 FOG IMU 相竞争；硅基 MEMS IMU 基于微型传感器，通过将质量块振动转变为可感知的信号来测量物体的偏转，相较于 FOG IMU，MEMS IMU 尺寸更小且成本更低，但是具有更高的噪声、振动灵敏度和不稳定性参数，随着技术的不断发展 MEMS IMU 的精度也在不断提升。

图 18：机械 IMU、光学 IMU、MEMS IMU 产品示意



资料来源：Unmanned Systems Technology 官网，Sensor Tips 官网，霍尼韦尔官网，山西证券研究所

**MEMS IMU 目前主要应用于消费级、工业级场景，随着精度提升也逐步切入光学 IMU 的优势领域，其应用范围进一步扩大。**根据精度低到高，IMU 应用场景可以划分为消费级、工业级、战术级、导航级、战略级等。目前市场上常见的产品类型是光学 IMU 和 MEMS IMU，其中：①光学 IMU 因其具有更高的准确度和精度而广泛应用于航空航天、国防、海上导航和其他高精度领域；②MEMS IMU 因其体积更小、成本更低、功耗更小而具有丰富的应用场景，伴随技术改进和工艺优化，MEMS IMU 性能显著提升并逐步渗透到更高性能要求的应用领域。按照精度不同，目前 MEMS IMU 可以大致划分为三种类型，其中：①低精度 MEMS IMU 主要用于消费电子类的产品，如手机、游戏机、音乐播放器、无线鼠标、数码相机、硬盘保护器、智能玩具、计步器、防盗系统等；②中精度 MEMS IMU 主要用于汽车级及工业级产品，在汽车领域可用于 GPS 辅助导航系统、车身稳定系统、汽车安全气囊、车辆姿态测量等，在工业领域可用于精密农业、工业自动化、大型医疗设备、机器人、仪器仪表、工程机械等；③高精度 MEMS IMU 主要用于军用级和宇航级产品，如通讯卫星无线、导弹导引头、光学瞄准系统等稳定性应用，飞机和导弹飞行控制、姿态控制、偏航阻尼等控制应用，中程导弹制导、惯性 GPS 导航等制导应用，以及远程飞行器、船舶仪器、战场机器人等。

### 分析师承诺：

本人已在中国证券业协会登记为证券分析师，本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告。本人对证券研究报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规，研究方法专业审慎，分析结论具有合理依据。本报告清晰地反映本人的研究观点。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点直接或间接接受到任何形式的补偿。本人承诺不利用自己的身份、地位或执业过程中所掌握的信息为自己或他人谋取私利。

### 投资评级的说明：

以报告发布日后的 6--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。

无评级：因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见的结果的重大不确定事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。（新股覆盖、新三板覆盖报告及转债报告默认无评级）

### 评级体系：

#### ——公司评级

- 买入： 预计涨幅领先相对基准指数 15%以上；
- 增持： 预计涨幅领先相对基准指数介于 5%-15%之间；
- 中性： 预计涨幅领先相对基准指数介于-5%-5%之间；
- 减持： 预计涨幅落后相对基准指数介于-5%- -15%之间；
- 卖出： 预计涨幅落后相对基准指数-15%以上。

#### ——行业评级

- 领先大市： 预计涨幅超越相对基准指数 10%以上；
- 同步大市： 预计涨幅相对基准指数介于-10%-10%之间；
- 落后大市： 预计涨幅落后相对基准指数-10%以上。

#### ——风险评级

- A： 预计波动率小于等于相对基准指数；
- B： 预计波动率大于相对基准指数。

### 免责声明：

山西证券股份有限公司(以下简称“公司”)具备证券投资咨询业务资格。本报告是基于公司认为可靠的已公开信息，但公司不保证该等信息的准确性和完整性。入市有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，公司不对任何人因使用本报告中的任何内容引致的损失负任何责任。本报告所载的资料、意见及推测仅反映发布当日的判断。在不同时期，公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。公司或其关联机构在法律许可的情况下可能持有或交易本报告中提到的上市公司发行的证券或投资标的，还可能为或争取为这些公司提供投资银行或财务顾问服务。客户应当考虑到公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突。公司在知晓范围内履行披露义务。本报告版权归公司所有。公司对本报告保留一切权利。未经公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯公司版权的其他方式使用。否则，公司将保留随时追究其法律责任的权利。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此声明，禁止公司员工将公司证券研究报告私自提供给未经公司授权的任何媒体或机构；禁止任何媒体或机构未经授权私自刊载或转发公司证券研究报告。刊载或转发公司证券研究报告的授权必须通过签署协议约定，且明确由被授权机构承担相关刊载或者转发责任。

依据《发布证券研究报告执业规范》规定特此提示公司证券研究业务客户不得将公司证券研究报告转发给他人，提示公司证券研究业务客户及公众投资者慎重使用公众媒体刊载的证券研究报告。

依据《证券期货经营机构及其工作人员廉洁从业规定》和《证券经营机构及其工作人员廉洁从业实施细则》规定特此告知公司证券研究业务客户遵守廉洁从业规定。

### 山西证券研究所：

#### 上海

上海市浦东新区滨江大道 5159 号陆家嘴滨江中心 N5 座 3 楼

#### 太原

太原市府西街 69 号国贸中心 A 座 28 层  
电话：0351-8686981  
<http://www.i618.com.cn>

#### 深圳

广东省深圳市福田区林创路新一代产业园 5 栋 17 层

#### 北京

北京市丰台区金泽西路 2 号院 1 号楼丽泽平安金融中心 A 座 25 层

