

# 惯性导航系统（上）：测量感知的基础，精确制导的利器

## 核心观点

惯性技术是指通过感知运动体在惯性空间的角运动、线运动，进而获取运动体的姿态、位置和速度等信息，从而实现对运动物体姿态和运动轨迹进行测量和控制的一门技术，具有隐蔽性高、覆盖范围广、短期精度高等优点。惯性导航系统核心部分为惯性测量单元，惯性测量单元则由陀螺仪和加速度计组成，二者技术路线众多，产品迭代较快。产业链中上游研发和制造难度大，因此存在较多的掌握核心技术的民营企业，产业链下游对硬件集成、算法和定制化要求较高，研发投入周期较长，故多为军工院所。

## 摘要

### 惯性技术：测量物体运动，感知物体姿态

惯性技术是以牛顿运动定律为基础的多学科交叉综合技术，其通过感知运动体在惯性空间的角运动、线运动，进而获取运动体的姿态、位置和速度等信息，从而实现对运动物体姿态和运动轨迹进行测量和控制的一门技术。惯性技术的应用以惯性仪表和惯性系统为载体，基础器件为陀螺仪和加速度计，我国在该领域正处于加速追赶的阶段。

### 惯性导航系统：惯性导航器件的载体，实现测量计算功能

惯性导航是一种自助式的导航设备，具有隐蔽性高、覆盖范围广、短期精度高等优点，可分为平台式和捷联式两类，由于捷联式具有结构简单、成本低、体积重量小、准备时间短、MTBF 长等优势，故逐渐取代平台式惯导系统成为主流。

### 核心器件决定系统性能，技术路线加速迭代

惯性导航系统核心部分为惯性测量单元，惯性测量单元则由陀螺仪和加速度计组成，陀螺仪负责测量角速度，加速度计负责测量线加速度，二者技术路线众多，产品迭代较快。军用领域当前以光纤陀螺和石英加速度计为主流，但原有技术路线仍有一定空间，同时 MEMS 和原子干涉等新技术也在逐渐渗透中。

### 细分产业链众多，发展潜力巨大

从趋势上看，惯导系统逐渐向高性能、低成本和小型化发展。产业链端，中上游研发和制造难度大，因此存在较多的掌握核心技术的民营企业，如长盈通、芯动联科、上海傲世、世维通等。产业链下游对硬件集成、算法和定制化要求较高，研发投入周期较长，故多为军工院所，如中国航天科工集团第三研究院第三十三研究所、西安现代控制技术研究所、中国兵器工业导航与控制技术研究所、航天十三所、航空六一八所等。

## 国防军工

维持

强于大市

黎韬扬

litaoyang@csc.com.cn

010-85130418

SAC 编号：S1440516090001

发布日期：2023 年 10 月 15 日

## 市场表现



## 相关研究报告

## 目录

一、惯性技术：测量物体运动，感知物体姿态 .....	1
1.1 惯性技术多学科交叉，发展历史源远流长 .....	1
1.2 我国惯性技术处于追赶阶段，相关企业不断涌现.....	2
二、惯性导航系统：惯性导航器件的载体，实现测量计算功能.....	3
2.1 自助式导航系统，不依赖外界信息输入 .....	3
2.2 两种方案并存，捷联式逐渐取代平台式成为主流.....	3
三、核心器件决定系统性能，技术路线加速迭代 .....	7
3.1 IMU：惯性导航系统核心传感器，陀螺仪和加速度计的载体.....	7
3.2 陀螺仪：角速度测量单元，技术路线快速迭代.....	9
3.3 加速度计：军用石英加计成为主流，民用 MEMS 成为主流.....	17
四、细分产业链众多，发展潜力巨大 .....	22
4.1 未来发展趋势：高精度、低成本、小体积等.....	22
4.2 产业链不同环节差别较大，下游应用市场潜力巨大.....	22
风险分析 .....	26

## 图表目录

图表 1: 惯性技术研究现状及发展趋势 .....	1
图表 2: 惯性技术国内外主要企业名单 .....	2
图表 3: 惯性系统工作原理图 .....	3
图表 4: 平台式惯性导航 .....	4
图表 5: 平台式惯性导航结构示意图 .....	4
图表 6: 捷联式惯性导航 .....	5
图表 7: 捷联式惯性导航结构示意图 .....	5
图表 8: 平台型惯导与捷联型惯导对比 .....	6
图表 9: 惯性导航工作结构图 .....	7
图表 10: Apollo IMU .....	7
图表 11: 惯性导航系统生产流程.....	8
图表 12: 六轴 IMU .....	8
图表 13: 九轴 IMU .....	8
图表 14: 自动驾驶 IMU 市场规模.....	9
图表 15: 惯性测量单元结构与工作原理 .....	9
图表 16: 陀螺仪类别 .....	10
图表 17: 各类型陀螺仪发展时期情况 .....	10
图表 18: 市场上主要陀螺仪的应用时间与组件数（件） .....	11
图表 19: 不同陀螺仪的性能比较 .....	11
图表 20: 根据精度对陀螺仪进行分类 .....	12
图表 21: 单自由度液浮陀螺仪基本结构 .....	12
图表 22: 液浮陀螺仪 .....	12
图表 23: 动力调谐陀螺仪 .....	13
图表 24: 静电陀螺仪结构示意图 .....	13
图表 25: 静电陀螺仪 .....	13
图表 26: 激光陀螺原理 .....	14
图表 27: 激光陀螺 .....	14
图表 28: 半球谐振陀螺 .....	15
图表 29: 半球谐振陀螺结构示意图 .....	15
图表 30: MEMS 陀螺仪.....	15
图表 31: 首台核磁共振量子陀螺样机 .....	16
图表 32: 核磁共振陀螺原理示意图 .....	16
图表 33: 原子干涉陀螺仪的分类 .....	16
图表 34: 连续型原子束干涉陀螺仪 .....	17
图表 35: 加速度计类别 .....	18
图表 36: 各类加速度计的技术成熟度和精度.....	18
图表 37: 加速度计类别 .....	19
图表 38: 摆式积分陀螺加速度计 .....	19
图表 39: 石英挠性加速度计机电部件结构图.....	20

图表 40: 石英振梁加速度计的工作原理 .....	20
图表 41: 电容式、压电式和压阻式加速度计的性能比较.....	21
图表 42: 国外光力学加速度计研究现状 .....	21
图表 43: 中国惯性导航行业市场规模（按销售额统计）（亿元） .....	23
图表 44: 以光纤和 MEMS 路线为例的惯性导航产业链.....	23
图表 45: 惯性导航和组合导航产业链 .....	24
图表 46: 光纤环 .....	24
图表 47: Y 波导 .....	24

# 一、惯性技术：测量物体运动，感知物体姿态

## 1.1 惯性技术多学科交叉，发展历史源远流长

惯性技术是以牛顿运动定律为基础的多学科交叉综合技术，其指通过感知运动体在惯性空间的角运动、线运动，进而获取运动体的姿态、位置和速度等信息，从而实现对运动物体姿态和运动轨迹进行测量和控制的一门技术，也是惯性仪表、惯性导航、惯性测量、惯性稳控等技术的统称。

惯性技术的应用以惯性仪表和惯性系统为载体，基础器件为陀螺仪和加速度计。其通过陀螺仪获知运动体的角速度，用以测量运动体的角度变化；通过加速度计获知运动体的线性加速度，用以测量运动体的速度变化。将此二者辅以时间维度进行自主运算后，即可实现对物体在一定期间的运动姿态、位置、速度等信息的精确感知和测量，进而在对这些信息进行综合处理的基础上实现对运动体之运动参数的有效控制。将上述感知、测量、控制的结果结合下游应用领域的具体需求，即可实现惯性技术的实际应用。

**图表 1：惯性技术研究现状及发展趋势**

时间	主要事件
1687 年	牛顿 (Newton) 提出力学三大定理，奠定了惯性技术的理论基础
1765 年	欧拉 (Euler) 发表的《刚体绕定点运动的理论》，奠定了转子式陀螺的理论基础
1835 年	哥里奥利 (Coriolis G G) 提出了哥氏效应原理，奠定了振动陀螺仪的理论基础
1852 年	傅科 (Foucault J) 利用转子式陀螺敏感装置找到了当地北向和纬度，在地球上验证了地球自转现象
1905 年	爱因斯坦 (Einstein) 提出狭义相对论，成为光学及其他新型陀螺的理论基础
1908 年	安修茨 (Anschutz H) 在德国研制成功世界上第一台摆式陀螺罗经
1909 年	斯佩里 (Sperry) 在美国研制成功舰船用陀螺罗经
1910 年	舒拉 (Schuler) 发现了“舒拉调谐原理”，并于 1923 年发表论文《运载工具的加速度对于摆和陀螺仪的干扰》，进一步阐明了舒拉调谐原理的普遍性，为现代惯性导航系统奠定了理论基础
1913 年	萨格奈克 (Sagnac) 提出 Sagnac 效应，成为光学陀螺的基本原理
1942 年	德国在 V2 导弹上率先实现简易惯性制导；同年美国德雷珀 (Draper) 实验室研制出液浮速率陀螺
1949 年	首次提出了捷联式惯性导航系统的概念
1958 年	美国 Nautilus 号潜艇依靠惯性导航系统在水下行驶 21 天，成功穿越北冰洋
1959 年	美国利顿 (Litton) 公司制造出液浮陀螺，并用于飞机与舰船惯导系统
1961 年	第一台 He-Ne 气体激光器问世，1963 年，激光陀螺诞生
1968 年	美国奥托内提克斯 (Autonetic) 公司研制出动压支承陀螺，精度水平达到 $0.005^\circ/h$
1969 年	美国阿波罗 13 号飞船使用液浮捷联惯导技术，捷联式惯导系统逐步得到广泛应用
1971 年	波特兹 (Bortz) 和乔丹 (Jordan) 首次提出用于捷联惯导的等效旋转矢量姿态更新算法，为姿态更新的多子样算法提供了理论依据
1976 年	美国犹他 (Utah) 州立大学瓦利 (ValiV) 和肖特希尔 (ShorthillR) 首次完成了光纤陀螺的试验演示
1980 年后	激光陀螺惯性系统逐步投入使用并可批量生产，微机电系统 (Micro-electro-mechanical system, MEMS) 领域的理论创新及技术突破为 MEMS 惯性器件的发展奠定了基础
1990 年后	光纤陀螺惯导系统逐步投入使用，最优数据滤波理论及算法不断改进，为惯性组合系统实现最佳数据融合创造了条件
2000 年前后	光学陀螺实现批量实用化，MEMS 惯性器件开始投入使用，之后，代表当今技术前沿的微光机电 (Micro-opto-electro-mechanical system, MOEMS) 陀螺、原子陀螺等新的陀螺仪表得到日益重视，关键技术不断取得突破

资料来源：《惯性技术研究现状及发展趋势》，中信建投证券

## 1.2 我国惯性技术处于追赶阶段，相关企业不断涌现

全球惯性技术开发分为四个层次，目前我国居第三层次，具备部分研发能力。根据美国国防部的统计数据，美国国防部把从事惯性技术领域研究和开发的国家分为 4 个层次：属于第一层次的有美国、英国和法国，完全具备自主研究和开发惯性技术能力；属于第二层次的有俄罗斯、德国、以色列和日本，具备大部分自主研发能力；属于第三层次的有中国、澳大利亚、加拿大、瑞典、乌克兰，具备部分研发能力；属于第四层次的有韩国、印度、巴西、朝鲜、瑞士、意大利等，具备较为有限的惯性技术研发能力。

美国的霍尼韦尔（Honeywell）、诺格（Northrop Grumman）和法国的赛峰（SAFRAN）为全球惯性技术领域顶尖公司。目前，美国主要的惯性导航技术公司包括：霍尼韦尔、诺格公司、大西洋惯性系统、亚诺德半导体（ADI）和吉尔福特等；法国主要的惯性导航技术公司包括赛峰、iXblue、泰雷兹集团等。其他国家主要的惯性技术公司包括：英国 BAE 系统公司；德国博世公司；俄罗斯物理光学、陀螺仪光学、拉明斯克仪表厂和 Optolink；日本航空电子工业、三菱精密；挪威 Sensoror 等。

国内具备惯性传感器制造能力的企业主要有航天三十三所、航天电子等，多为军工企业，具备惯导系统制造能力的企业包括航天三十三所、航天电子、晨曦航空、星网宇达、北方导航、西安现代控制技术研究所、中国兵器工业导航与控制技术研究所等。

**图表 2：惯性技术国内外主要企业名单**

区域	产品类型	主要企业
全球	惯性传感器	Honeywell、Northrop Grumman、SAFRAN、BAE
	惯性导航系统	Honeywell、SAFRAN、BAE
	组合导航系统	Honeywell、SAFRAN
中国	惯性传感器	航天三十三所、航天电子、中国兵器工业导航与控制技术研究所等
	惯性导航系统	航天三十三所、航天电子、晨曦航空、星网宇达北方导航、西安现代控制技术研究所、中国兵器工业导航与控制技术研究所等
	组合导航系统	航天三十三所、航天电子、晨曦航空、星网宇达、北方导航、西安现代控制技术研究所等

资料来源：理工导航招股书，中信建投证券

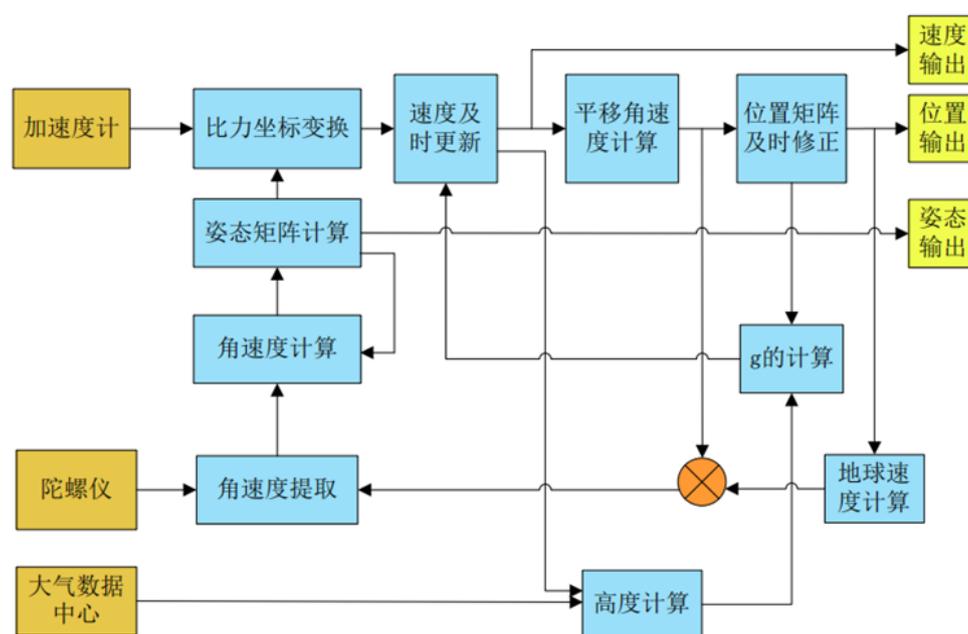
## 二、惯性导航系统：惯性导航器件的载体，实现测量计算功能

### 2.1 自助式导航系统，不依赖外界信息输入

惯性系统以惯性器件为核心，利用集成技术实现导航、姿态稳定、测量等功能，其中惯性导航应用最为广泛。惯性导航是一种自助式的导航设备。其基本工作原理是利用陀螺仪和加速度计（统称为惯性仪表）测量载体在惯性参考系下的角速度和加速度，并通过计算机对时间进行积分、运算得到速度和相对位置，且把它变换到导航坐标系中，这样结合最初的位置信息，就可以得到载体现在所处的位置。

惯性导航具有隐蔽性高、覆盖范围广、短期精度高等优点。相对于卫星导航系统需要依靠卫星完成导航工作，惯性导航依靠自身搭载的惯性器件完成导航工作，不依靠外界信息同时也不向外部辐射能量，因此具备较高的隐蔽性；惯性导航系统可以全天候工作于高空、地表、水下等各种环境，导航覆盖范围较广；惯性导航系统可以依靠惯性器件输出角（加）速度、线（加）速度、航向和姿态等数据，与卫星导航系统相比数据提供更为丰富；同时，惯性导航系统可以进行实时、连续工作，数据更新频率快、短期精度高。

图表 3：惯性系统工作原理图



数据来源：星网宇达招股书，中信建投证券

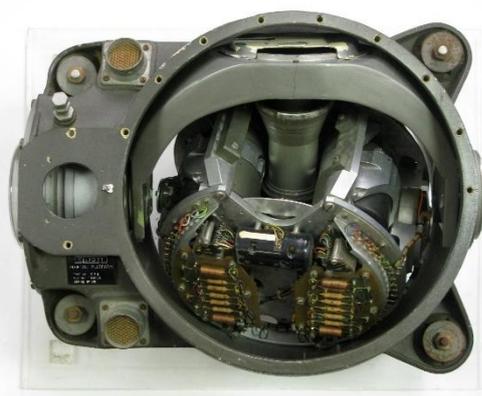
### 2.2 两种方案并存，捷联式逐渐取代平台式成为主流

惯性导航系统有平台式和捷联式两类实现方案。前者有跟踪导航坐标系的物理平台，惯性仪表安装在平台上，对加速度计信号进行积分可得到速度及位置信息，姿态信息由平台环架上的姿态角传感器提供；惯导平台可隔离载体角运动，因而能降低动态误差，但存在体积大、可靠性低、成本高、维护不便等不足。

平台式惯导将惯性敏感器（陀螺仪和加速度计）安装在惯性平台的台体上。根据建立坐标系的不同，平台

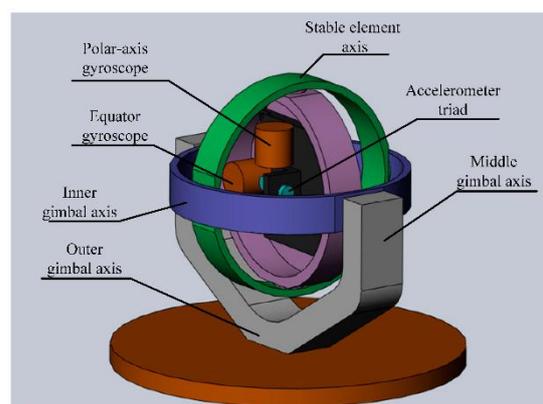
式惯导可分为空间稳定平台式惯导和当地水平式惯导两类。空间稳定平台式惯导的台体相对惯性空间稳定，用以建立惯性坐标系，地球自转、重力加速度等影响由导航计算机加以补偿，这种系统多用于运载火箭的主动段和一些航天器上。当地水平式惯导的特点是台体上的两个加速度计输入轴所构成的基准平面能够始终跟踪载体所在点的水平面，因此加速度计不受重力加速度的影响，这种系统多用于沿地球表面运动的载体，如飞机、船舶等。

图表 4：平台式惯性导航



数据来源：rochesteravionicarchives，中信建投证券

图表 5：平台式惯性导航结构示意图



数据来源：《Error Analysis of the K-Rb-21Ne Comagnetometer Space-Stable Inertial Navigation System》，中信建投证券

激光陀螺仪技术的成熟，使捷联惯导系统逐步取代了平台惯导系统。捷联惯导系统除了具有结构简单、成本低、体积重量小、准备时间短、MTBF 长等优点外，捷联惯导可供利用的信息比平台式惯导多，这对传递对准及火控系统来说十分重要。因此捷联惯导系统取代平台式惯导系统是必然趋势，事实上美国在 15 年前就从挠性平台惯导的生产转向了激光捷联惯导的生产。捷联惯导系统的物理结构简化实际上是用算法和软件的复杂设计换取的，而当前计算机水平的飞速提高为这种复杂设计提供了实现保障，所以算法是捷联惯导的核心，在惯性器件等硬件配置已定的情况下，算法决定了捷联惯导系统的性能。

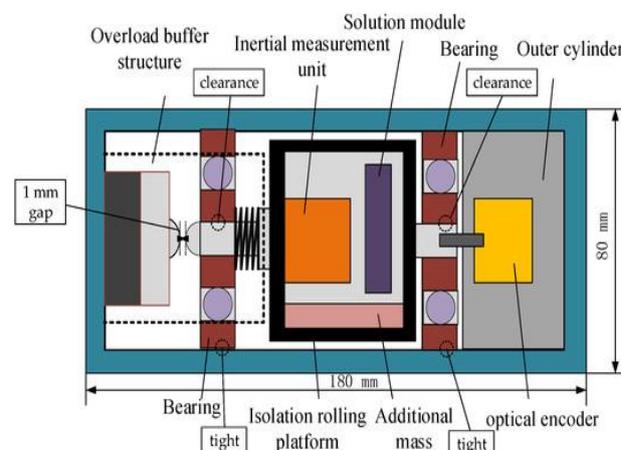
捷联式惯导系统没有物理平台，惯性仪表与载体直接固连，惯性平台功能由计算机软件实现，姿态角通过计算得到，也称为“数学平台”。由于捷联系统中惯性仪表要承受载体角运动的影响，故要求其动态范围大、频带宽、环境适应性好等，对导航计算机的速度与容量要求较高。捷联系统具有结构紧凑、可靠性高、质量轻、体积小、功耗低、维护方便、成本低等优点，也便于与其他导航系统或设备进行集成化、一体化设计，已成为现代惯性系统技术发展的主流方案。

捷联惯导系统采用数学平台，即在计算机中实时计算出姿态矩阵，建立起数学平台，姿态更新计算、导航计算是捷联惯导系统的算法核心，也是影响其精度的主要因素。传统的姿态更新算法有欧拉角法、方向余弦法和四元数法。其中四元数法算法简单，计算量小，因而在工程实际中经常采用。由于刚体转动的不可交换性，在姿态更新计算中不可避免地引入了不可交换误差，但这种误差属于算法误差，因此它是能够通过算法的改进而得以减小的。

图表 6：捷联式惯性导航



图表 7：捷联式惯性导航结构示意图



数据来源：华微中测，中信建投证券

数据来源：《Optimized Design of an Anti-Rotation and Anti-Overload Structure Based on Missile-Borne Semi-Strap-Down Inertial Navigation System》，中信建投证券

平台式惯导系统和捷联式惯导系统的主要区别是：前者有实体的物理平台，陀螺和加速度计置于陀螺稳定的平台上，该平台跟踪导航坐标系，以实现速度和位置解算，姿态数据直接取自于平台的环架；后者的陀螺和加速度计直接固连在载体上作为测量基准，它不再采用机电平台，惯性平台的功能由计算机完成，即在计算机内建立一个数学平台取代机电平台的功能，其飞行器姿态数据通过计算机计算得到，故有时也称其为“数学平台”，这是捷联惯导系统区别于平台式惯导系统的根本点。

陀螺动态范围要求不同。平台惯导系统陀螺安装在平台台体上，陀螺感测台体偏离导航坐标系的偏差，平台通过稳定回路消除这种偏差，其作用是隔离掉运载体的角运动，使陀螺的工作环境不受运载体角运动的影响。同时，平台通过修正回路使陀螺按一定要求进动，控制平台跟踪导航坐标系的旋转运动。而导航坐标系的旋转仅由运载体相对于地球的线运动和地球的自转引起，这些旋转角速度都十分微小，所以对陀螺的指令施矩电流是很小的。这就是说平台惯导陀螺的动态范围可设计得较小。但捷联惯导陀螺直接安装在运载载体上，陀螺必须跟随运载载体的角运动，施矩电流远比仅跟踪导航坐标系的施矩电流大，即捷联惯导所用陀螺的动态范围远比平台惯导所采用的大。

惯导器件的工作环境不同，惯导器件动态误差和静态误差的补偿要求也不同。在平台惯导系统中，平台对运载载体的角运动起隔离作用，安装在平台上的惯导器件只需对线加速度引起的静态误差作补偿。而捷联惯导系统中的惯性器件除补偿静态误差以外，还需要对角速度和角加速度引起的动态误差作补偿。因此必须在实验室条件下对捷联陀螺和加速度计的动、静态误差系数作严格的测试和标定。

计算量不同。平台惯导中，平台以物理实体形式存在，平台模拟了导航坐标系，运载载体的姿态角和航向角可直接从平台框架上拾取或仅通过少量计算获得。但在捷联惯导中，平台并不实体存在，而以数学平台形式存在，姿态角和航向角都必须经过计算获得，计算量庞大。

图表 8：平台型惯导与捷联型惯导对比

	平台惯导	捷联惯导
平台	物理平台	数学平台
陀螺动态范围	较小	大
误差补偿要求	只需对线加速度引起的静态误差作补偿	对线加速度引起的静态误差、角速度和角加速度引起的动态误差作补偿
计算量	少量	庞大

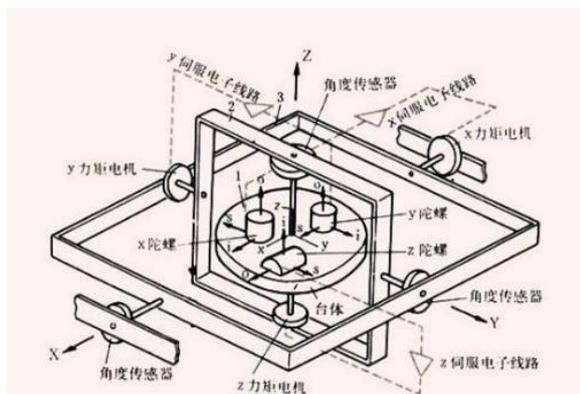
资料来源：晨曦航空招股书，中信建投证券

### 三、核心器件决定系统性能，技术路线加速迭代

#### 3.1 IMU：惯性导航系统核心传感器，陀螺仪和加速度计的载体

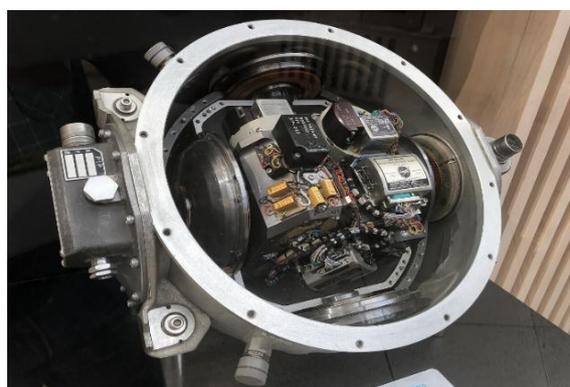
惯性导航系统通常由惯性测量装置、计算机、控制显示器、专用电路模块等组成。惯性测量单元（Inertial Measurement Unit, IMU）是惯性导航系统的核心传感器，通常由 3 轴陀螺和 3 轴加速度计组成，主要用来检测和测量加速度、倾斜、冲击、振动、旋转和多自由度运动。

图表 9：惯性导航工作结构图



数据来源：青岛微科机器人公司官网，中信建投证券

图表 10：Apollo IMU



数据来源：wikimedia，中信建投证券

惯性导航系统专用电路模块包括导航计算机电路、I/F 转换电路和母板电路等。由于陀螺仪、加速度计输出的电流属于模拟信号，计算机无法处理，因此需要经过 I/F 转换电路将电流信号转换为数字信号。导航计算机采集陀螺仪和加速度计信号，完成误差补偿、初始对准和导航解算，得到运载体在导航坐标系上的速度、位置和航向、姿态信息，并发送到运载体的制导控制系统；然后由制导控制系统结合卫星、图像、红外等信息完成综合解算、制导控制算法，生成舵机指令，实现精确制导。

图表 11：惯性导航系统生产流程



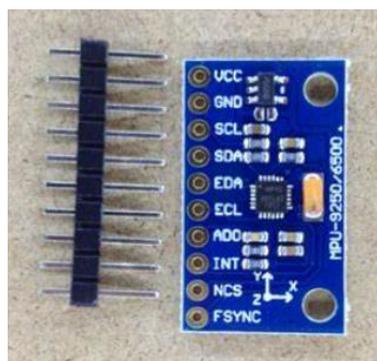
数据来源：理工导航招股书，中信建投证券

狭义上，一个 IMU 内在正交的三轴上安装陀螺仪和加速度计，共 6 个自由度，来测量物体在三维空间中的角速度和加速度，这就是我们熟知的“6 轴 IMU”；广义上，IMU 可在加速度计和陀螺仪的基础上加入磁力计，可形成如今已被大众知晓的“9 轴 IMU”，可用于提升航向角的测量精度。

图表 12：六轴 IMU

图表 13：九轴 IMU

Industry-smallest  
6-axis Automotive IMU



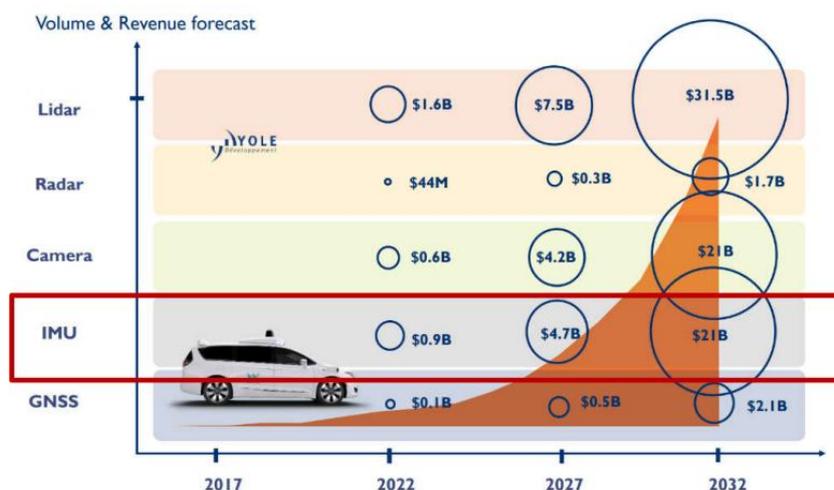
数据来源：意法半导体，中信建投证券

数据来源：A2D Electronics，中信建投证券

据 Yole development，IMU 约占惯导系统成本的 20%，2018 年全球规模约 1.6 亿美元，预计 2022、2027、2032 年全球 IMU 市场规模分别达到 9 亿美元、47 亿美元、210 亿美元，2022-2032 年 CAGR 高达 37%，对应 2032 年惯导系统全球市场空间有望超千亿美元。据 mordorintelligence 预测，高性能惯性测量单元（IMU）市场在 2020 年价值 151.4 亿美元，预计到 2026 年将达到 227.2 亿美元，在预测期间（2021-2026 年）的复合年增长率为 6%。

请务必阅读正文之后的免责条款和声明。

图表 14：自动驾驶 IMU 市场规模

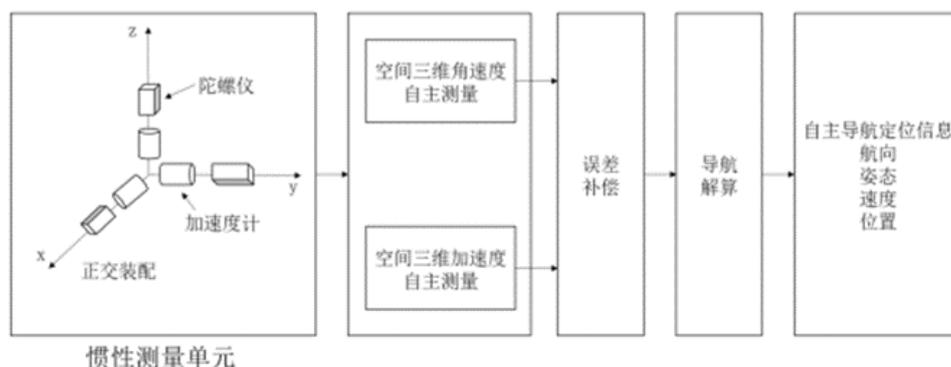


数据来源: xilinx.eetrend, 中信建投证券

### 3.2 陀螺仪：角速度测量单元，技术路线快速迭代

陀螺和加速度计等惯性传感器是惯性导航系统的核心器件，对系统的精度起决定性作用。其中陀螺用以获取运动的角速度并测量其角度变化，通过角速度获取方向信息，在惯性导航中起到姿态解算、辅助定位的作用。

图表 15：惯性测量单元结构与工作原理



数据来源: 理工导航招股书, 中信建投证券

陀螺仪种类多种多样，按陀螺转子主轴所具有的进动自由度数目可分为二自由度陀螺仪和单自由度陀螺仪；按支承系统可分为滚珠轴承陀螺，液浮陀螺、气浮陀螺、磁浮陀螺，挠性陀螺和静电陀螺；按物理原理分为利用高速旋转体物理特性工作的转子式陀螺和利用其他物理原理工作的半球谐振陀螺、微机械陀螺、环形激光陀螺和光纤陀螺等。

**图表 16：陀螺仪类别**

类型	具体内容
主轴进动自由度数目	二自由度、单自由度
支承系统	滚珠轴承、液浮、气浮、磁浮，挠性、静电
物理原理	转子式、半球谐振、微机械、环形激光、光纤

资料来源：《惯性导航技术的新进展及发展趋势》，中信建投证券

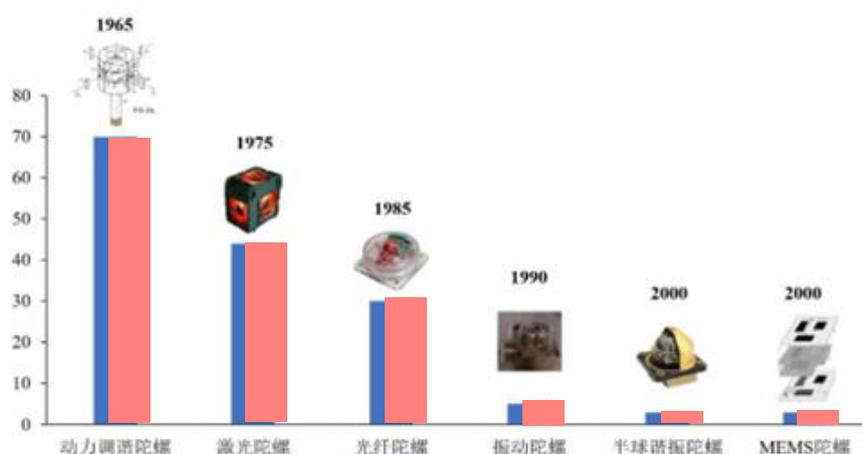
按照陀螺仪发展历程，陀螺仪由最初的转子陀螺仪逐渐发展为如今广泛应用的光学陀螺仪，以及仍在进一步研发推广中的振动陀螺仪、原子陀螺仪等。

**图表 17：各类型陀螺仪发展时期情况**

陀螺分类	陀螺类型	发展时期
转子陀螺仪	液浮陀螺仪	20 世纪 50 年代，美国麻省理工学院的查尔斯斯塔克德雷珀实验室采用液浮支承技术，研制出单自由度液浮陀螺仪（fluidfloated gyroscope, FFG），使得陀螺仪的精度达到了导航级要求
	动力调谐陀螺仪	20 世纪 60 年代初，美国人罗伯特克雷格研制出了动力调谐陀螺仪（dynamically tuned gyroscope, DTG），埃卡尔福特公司研制的 SKN-2416、SKN-2610、MOD II 等型号产品，在战术导弹及军用飞机等平台进行了成功应用
	静电陀螺仪	1964 年，美国最先研制出静电陀螺仪（electrically suspended gyroscope, ESG），并于 1979 年首次为“三叉戟”弹道导弹核潜舰装备了静电陀螺仪监控器，使得潜艇的导航能力出现了质的飞跃
光学陀螺仪	激光陀螺仪	1963 年，美国斯佩里公司最先研制出激光陀螺仪（ring laser gyroscope, RLG）。随后经过十余年的不懈努力，美国霍尼韦尔公司于 1975 年和 1976 年分别将激光陀螺仪应用到飞机和战术导弹；1982 年，该公司利用 GG-1342 型激光陀螺仪，为美国海军研制出了第一台用于舰艇的高精度导航设备
	光纤陀螺仪	光纤陀螺仪（fiber optical gyroscope, FOG）是出现稍晚于激光陀螺仪的另一类光学陀螺仪，与激光陀螺仪相比，光纤陀螺仪具有体积更小、成本更低、便于批量生产等显著优势，迅速获得了各大陀螺仪生产商的青睐
振动陀螺仪	MEMS 陀螺仪	进入 20 世纪 90 年代，随着微机电和量子技术的不断发展，以微机电系统（micro electromechanical system gyroscope, MEMS）陀螺仪、半球谐振陀螺仪（hemispherical resonator gyroscope, HRG）
原子陀螺仪	半球谐振陀螺仪	为代表的振动陀螺仪和以核磁共振陀螺仪（nuclear magnetic resonance gyroscope, NMRG）、原子
	核磁共振陀螺仪	干涉陀螺仪（atomic interference gyroscope, AIG）为代表的原子陀螺仪等新型陀螺仪得到了快速发展，掀开了陀螺仪技术的崭新篇章
	原子干涉陀螺仪	

资料来源：火箭惯性招股书，中信建投证券

图表 18：市场上主要陀螺仪的应用时间与组件数（件）



数据来源：芯动联科招股书，中信建投证券

图表 19：不同陀螺仪的性能比较

陀螺类型	精度（零偏稳定性）/（ $^{\circ}$ ） $h^{-1}$	精度潜力	稳定时间	体积	成本	抗干扰能力
原子干涉陀螺仪	0.00001	超高	/	/	/	/
静电陀螺仪	0.0001	高	慢	大	高	弱
半球谐振陀螺仪	0.0001	高	快	小	中	强
液浮陀螺仪	0.001	中	慢	大	高	弱
激光陀螺仪	0.001	中	快	中	中	中
光纤陀螺仪	0.001	中	快	中	低	中
动力调谐陀螺仪	0.01	中	中	中	低	中
MEMS 陀螺仪	0.1	中	快	小	低	中

资料来源：火箭惯性招股书，中信建投证券

不同应用领域对陀螺仪的性能具有不同的要求，根据陀螺仪核心指标零偏稳定性（衡量陀螺仪在一个工作周期内，当输入角速率为零时，陀螺仪输出值围绕其均值的离散程度，数值越小表示性能越高），一般将陀螺仪分为战略级、导航级、战术级、商业级。

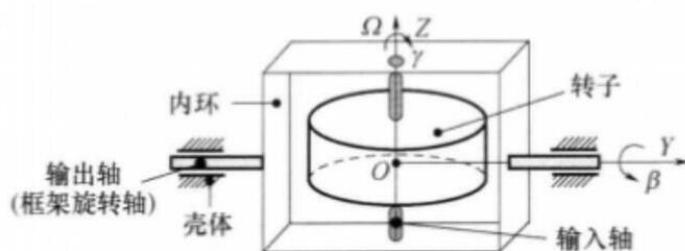
战略级应用场景集中于航天和航海领域，包括战略导弹核潜艇、航空母舰或者洲际导弹等，精度要求高水平，多使用激光陀螺仪；导航级应用场景多为飞机、中远程导弹武器等，精度要求中高水平，多使用激光陀螺仪、光纤陀螺仪；战术级应用场景包括装甲车辆、中短程制导武器等，精度要求中低水平，多使用光纤陀螺仪和动力调谐陀螺仪；商业级应用场景为民用，常用领域包括汽车导航、消费电子产品等，精度要求较低，多使用 MEMS 陀螺仪。不同运用领域对陀螺仪的性能要求不同，通常需要综合考虑精度、体积与成本等因素。例如小型化制导武器对精度要求适中，但需要小体积、低成本与高稳定性的特性，而战略级运用则追求极致的精度特性，体积与成本则可以适当放松要求。

**图表 20：根据精度对陀螺仪进行分类**

类别	战略级	导航级	战术级	商业级
应用领域	航天、航海	航空、长航时无人系统	地面武器、短航时无人系统	汽车及消费电子
零偏稳定性（%h）	<0.01	0.01-0.15	0.15-15	>15
陀螺仪主要应用情况	激光陀螺仪、静电陀螺仪、光纤陀螺仪	激光陀螺仪、光纤陀螺仪、动力调谐陀螺仪	光纤陀螺仪、动力调谐陀螺仪、MEMS 陀螺仪	MEMS 陀螺仪、光纤陀螺仪、动力调谐陀螺仪
应用领域	航天，航海，自校准	航空，长航时无人系统，陆地巡航	高端工业（如测绘，资源勘探）、车辆和飞行体	消费电子
零偏稳定性（ $\mu\text{g}$ ）	<5	5-50	50-1000	>1000
标度因数精度（ppm）	<10	<500	<1000	>1000
加速度计主要技术	机械摆式加速度计、石英加速度计	机械摆式加速度计、石英加速度计、MEMS 加速度计	MEMS 加速度计、石英加速度计	MEMS 加速度计
代表厂商	Honeywell、Northrop Grumman	Honeywell、Safran、公司	Honeywell、ADI、Safran、Silicon Sensing、美泰科技、公司	Bosch、TDK

资料来源：火箭惯性招股书，芯动联科招股书，中信建投证券

转子陀螺仪可分为液浮陀螺仪、动力调谐陀螺、静电陀螺仪等，相对于光学陀螺仪，其应用场景相对较窄。液浮陀螺仪是利用液体的静浮力将陀螺仪组件悬浮起来的陀螺仪，制造工艺较为复杂，成本较高且寿命较短，因此国外在 20 世纪 80 年代就被激光陀螺仪和光纤陀螺仪所取代，目前国内少部分高精度军用领域还在使用。

**图表 21：单自由度液浮陀螺仪基本结构**

**图表 22：液浮陀螺仪**


数据来源：维库电子通，中信建投证券

动力调谐陀螺仪相比于液浮陀螺仪结构简单、精度中等、成本较低，在 20 世纪 70 年代开始广泛用于多种军用领域，但随着光学陀螺仪的发展，动力调谐陀螺仪在导航级应用领域中开始逐步被替代，目前主要用于战

**术级应用。**相较于大多光学陀螺仪，动力调谐陀螺仪在结构尺寸、成本方面具有一定优势；而相对于大多 MEMS 陀螺仪，动力调谐陀螺仪在环境适应性方面上具有一定优势。特别是在小型化制导武器导引头稳定平台系统方面，微型化动力调谐陀螺仪是较好选择，并在我国现役多型国家重点武器装备上使用。

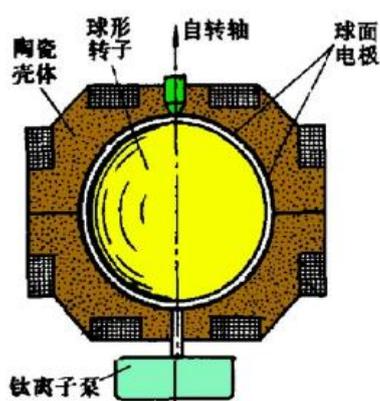
图表 23：动力调谐陀螺仪



数据来源：现代豪方仪器仪表科技有限公司官网，中信建投证券

静电陀螺仪是利用球形转子与电容极板之间的强电场产生的静电吸力将空心或实心球形转子悬浮起来的陀螺仪。静电陀螺仪内部被抽成高真空，精度高，目前通常被用在弹道导弹、核潜艇和航空母舰等高精度军用领域。

图表 24：静电陀螺仪结构示意图



数据来源：sensorexpert，中信建投证券

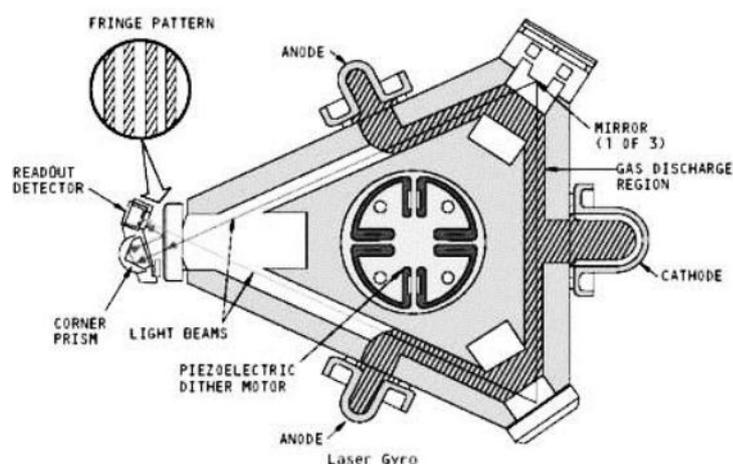
图表 25：静电陀螺仪



数据来源：清华大学科学博物馆，中信建投证券

光学陀螺仪可分为激光陀螺与光纤陀螺，原理基于萨格奈克效应，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。光学陀螺技术较为成熟，精度高，随着产品迭代，光学陀螺及其系统应用从战术级应用逐步拓展到导航级应用，在陆、海、空、天等多个领域中得到批量应用。

图表 26：激光陀螺原理



数据来源：《The principle of laser gyroscope works》，中信建投证券

激光陀螺，是指利用激光光束的光程差测量物体角位移的装置。例如，一个三角形环状激光器，其中放置激光发生器，产生氦氖激光在三角形三个顶端放置反射镜形成闭合光路，使分光镜将一束激光分为正反两向传播的两束激光。当物体（激光器）没有角位移时，两束激光没有光程差，它们会聚在一起时不干涉。如果物体移动产生角位移，两束激光相遇时就会产生干涉，利用光的干涉条纹测出物体的角位移，以此计算出物体的角速度，从而完成机械式陀螺同样的任务。

激光陀螺集光、机、电、算等尖端科技于一身，广泛覆盖陆海空天多个领域。激光陀螺是衡量一个国家光学技术发展水平的重要标志之一。它的精度大大高于机械式陀螺，没有运动部件，易于维护，可靠性高，寿命长，从而取代机械式陀螺，成为大中型飞机惯性基准系统的核心部件。在航海方面，作为导航仪器，激光陀螺导航系统是当今美国海军水面舰船和潜艇的标准设备。

图表 27：激光陀螺



数据来源：霍尼韦尔，中信建投证券

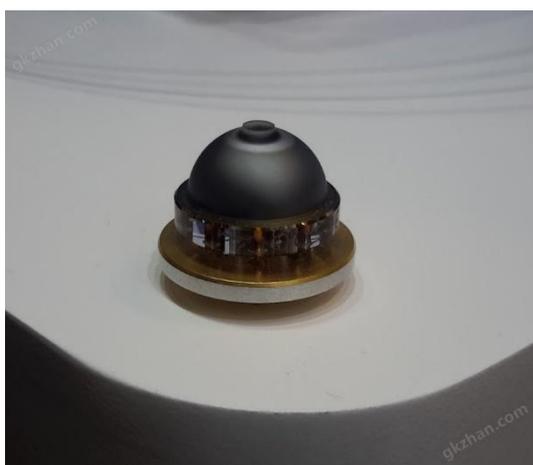
光纤陀螺仪与传统的转子陀螺仪相比，不使用机械转动件，灵敏度更高，与环形激光陀螺仪相比，不需要光学腔的精密加工、机械偏置和高压电源，制造工艺更为简单，使用寿命更长；与 MEMS 陀螺仪相比，在技术

请务必阅读正文之后的免责条款和声明。

性能和环境适应性上具有优势。因此光纤陀螺仪是目前国内惯性技术领域应用范围最广的陀螺仪。

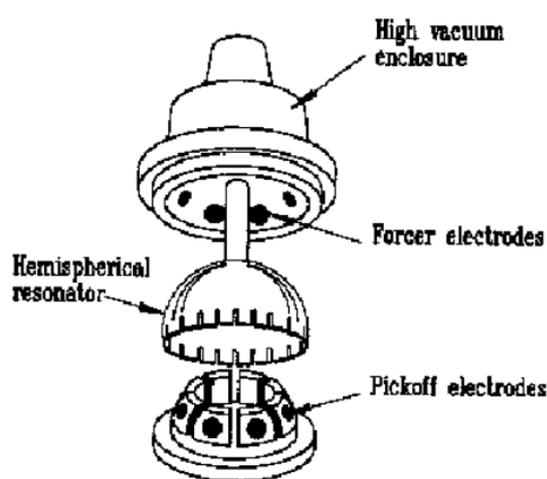
振动陀螺仪基于哥氏振动效应和微纳加工技术，典型代表是半球谐振陀螺和 MEMS 陀螺。半球谐振陀螺是哥氏振动陀螺仪中的一种高精度陀螺仪，正逐步在空间、航空、航海等领域开展应用，但受限于结构及制造技术，市场上可规模化生产的企业较少，现阶段主要应用于高精度的空间领域。

图表 28：半球谐振陀螺



数据来源：safran，中信建投证券

图表 29：半球谐振陀螺结构示意图



数据来源：《The Hannay-Berry Phase of the Vibrating Ring Gyroscop》，中信建投证券

振动陀螺仪中的 MEMS 陀螺仪具有体积小、质量轻、集成化程度高、功耗低、成本低等优点，相比光学陀螺仪和机械转子陀螺仪，现阶段其精度还相对较低，环境适应性能力较低。在消费类电子方面，低精度 MEMS 陀螺仪应用领域不断拓展，主要用在手机、游戏机、音乐播放器等手持设备上，使得人机互动达到一个新的高度；中级 MEMS 陀螺仪主要用于汽车电子稳定系统、GPS 辅助导航系统、精密农业、工业自动化、大型医疗设备等；在军工领域，现阶段高精度的 MEMS 陀螺仪还不够成熟，应用较少。

图表 30：MEMS 陀螺仪

Advanced OIS gyro  
for mobiles, drones & IoT



数据来源：意法半导体，中信建投证券

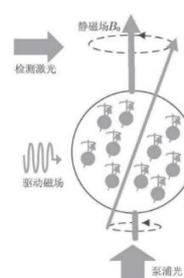
原子陀螺仪基于现代量子力学技术。典型代表为核磁共振陀螺、原子干涉陀螺。其目标是实现高精度、高可靠、小型化和更广泛应用领域的导航系统，核磁共振陀螺仪和原子干涉陀螺仪则分别处于工程样机阶段和原理样机阶段。

图表 31：首台核磁共振量子陀螺样机



数据来源：FAS，中信建投证券

图表 32：核磁共振陀螺原理示意图



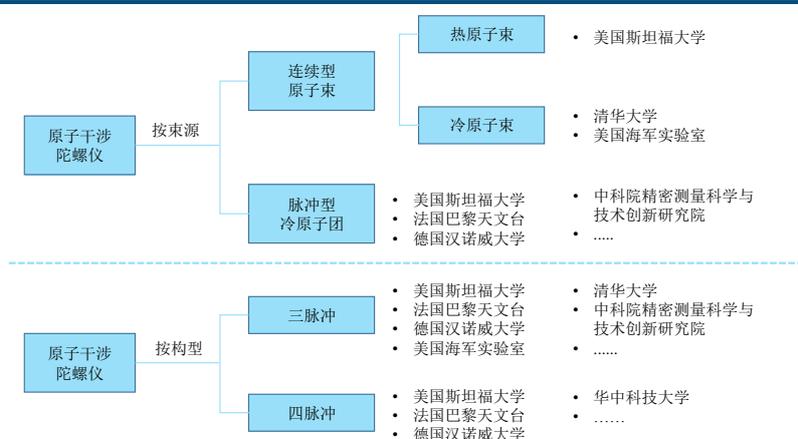
数据来源：《核磁共振陀螺仪研究进展》，中信建投证券

随着物理学、新材料、高度专业化制造以及其他相关技术的发展，核磁共振陀螺有望在 5 到 10 年内以捷联方式应用于无人机、水下潜航器、地面车辆、临近空间飞行器以及单兵装备等任何需要小尺寸和低功率高精度导航的民用和军事领域。

光脉冲原子干涉陀螺仪经过近 30 年的研发努力和技术尝试，逐渐形成了一些较为成熟的技术方案或者构型。若按照所采用的原子束源的类型来分类，可以分为连续型原子干涉陀螺仪和脉冲型原子干涉陀螺仪，二者的原子波源分别为连续出射的原子束和脉冲式抛射的冷原子云团。若按照 Raman 光与原子相互作用的构型进行分类，则分为上述的三脉冲和四脉冲构型。

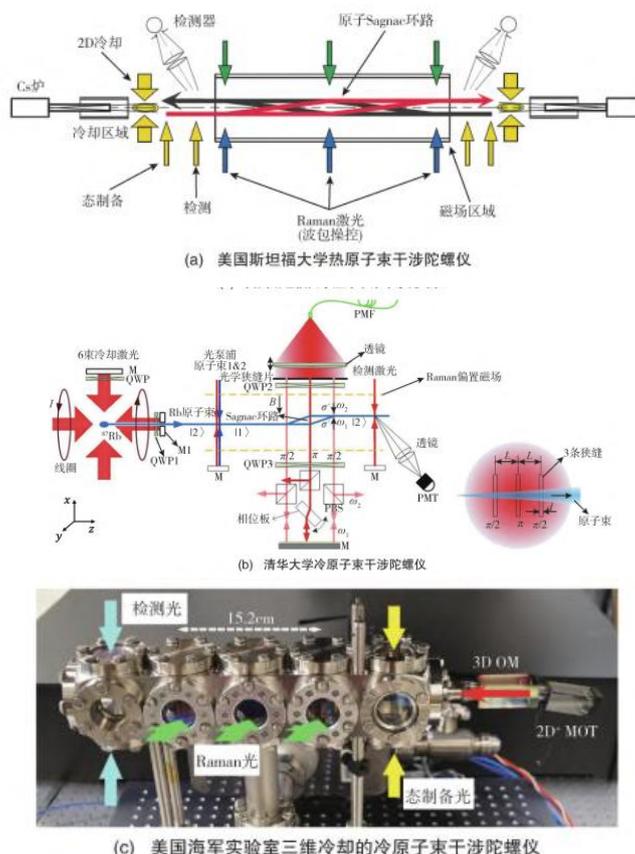
凭借其灵敏度高、长期稳定性好、扩展性强的技术特点，原子干涉陀螺仪成为当前超高精度陀螺仪研制的一种主流方案。经过 30 余年的迭代，原子干涉陀螺仪历经第一代原理验证与第二代高性能实验室演示的发展，其零偏不稳定性达到了纳弧度每秒（nrad/s）量级。

图表 33：原子干涉陀螺仪的分类



数据来源：《原子干涉陀螺仪研究现状及分析》，中信建投证券

图表 34：连续型原子束干涉陀螺仪



数据来源：《原子干涉陀螺仪研究现状及分析》，中信建投证券

### 3.3 加速度计：军用石英加计成为主流，民用 MEMS 成为主流

加速度计是惯性测量和导航系统的主要惯性元件之一，它的输出与运载体的运动加速度成比例。其作用原理是基于牛顿的经典力学定律。加速度计测量出运载体的线加速度，经一次积分可获得运动速度，经两次积分便获得位置数据。因此，在惯性测量和导航系统中，对加速度计的精度指标要求相当高，通常要求加速度计的灵敏度极高，各种性能系数的稳定性也极高。

线加速度计的种类很多，由发展时间的先后依次为：三四十年代的摆式积分陀螺加速度计和宝石轴承摆式加速度计；60年代中期开始发展起来的液浮摆式加速度计、挠性加速度计、压电加速度计、电磁加速度计等，以后是静电加速度计、激光加速度计；70年代以后，除了上述各类加速度计不断改进提高之外，多功能传感器和其他基于新支承形式、新材料、新工艺的加速度计蓬勃发展。尤其是硅基集成式微加速度计，近10年来成为竞相研制的热点。

根据加速度计的核心性能参数情况，一般将加速度计分为战略级、导航级、战术级、消费级。

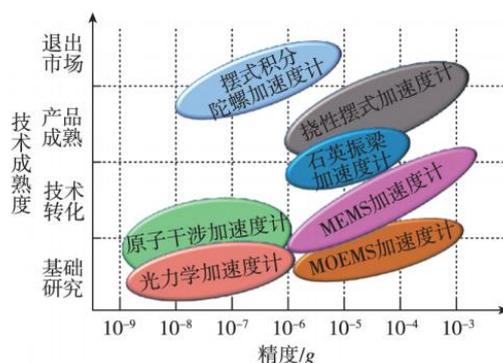
图表 35：加速度计类别

类别	战略级	导航级	战术级	消费级
应用领域	航天, 航海, 自校准	航空, 长航时无人系统, 陆地巡航	高端工业 (如测绘, 资源勘探)、车辆和飞行体	消费电子
零偏稳定性 (pg)	<5	5-50	50-1000	>1000
标度因数精度 (ppm)	<10	<500	<1000	>1000
加速度计主要技术	机械摆式加速度计、石英加速度计	机械摆式加速度计、石英加速度计 MEMS 加速度计	MEMS 加速度计、石英加速度计	MEMS 加速度计
代表厂商	Honeywell、Northrop Grumman	Honeywell、Safran、公司	Honeywell、ADI、Safran、Silicon Sensing、美泰科技、公司	Bosch、TDK

资料来源：芯动联科招股书，中信建投证券

加速度计有各种分类方法。通常综合几种不同分类法的特点来命名一种加速度计，目前，加速度计的类型主要有摆式积分陀螺加速度计、挠性摆式加速度计、石英振梁式加速度计、硅微机械加速度计、微光学加速度计、原子加速度计和光力学加速度计等。目前，成熟的加速度计产品精度从高到低依次是积分陀螺加速度计、石英振梁加速度计、挠性摆式加速度计和 MEMS 加速度计，已经覆盖了目前绝大部分的应用场景。

图表 36：各类加速度计的技术成熟度和精度



资料来源：《国外光力学加速度计研究现状及发展趋势》，中信建投证券

按检测质量的运动方式可分为线位移加速度计和摆式加速度计，前者是测量检测质量沿导轨方向的直线位移量，后者是测量检测质量绕支承摆动而产生的角位移量。

按测量系统形式分，有开环式和闭环式两类。开环式加速度计又称为简单加速度计，被测的加速度值经敏感元件、信号传感器、放大器变成电信号直接输出。闭环式加速度计又称为力平衡式加速度计（又称力反馈加速度计或伺服加速度计），被测的加速度变成电信号后，加到力矩器上，使活动机构恢复平衡位置。

按输出信号分，有加速度计、积分加速度计和双重积分加速度计，分别提供加速度、速度和距离信息。按测量的自由度分，有单轴、双轴、三轴加速度计。

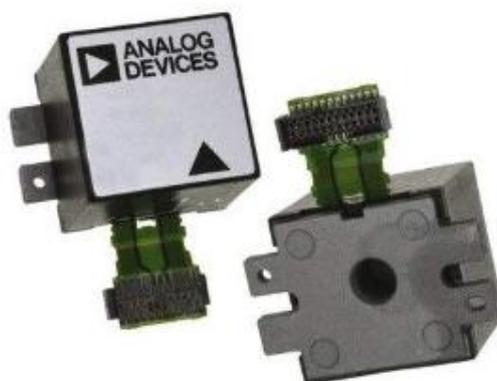
按测量加速度的原理分，有压电、振弦、振梁、光学和摆式加速度计。按支承方式将其分为宝石支承、挠性支承、气浮、液浮、磁悬浮和静电悬浮等。

**图表 37：加速度计类别**

分类方法	类别
检测质量的运动方式	线位移加速度计、摆式加速度计
测量系统形式	开环式加速度计、闭环式加速度计
输出信号	加速度计、积分加速度计、双重积分加速度计
测量的自由度	单轴加速度计、双轴加速度计、三轴加速度计
测量加速度的原理	压电加速度计、振弦加速度计、振梁加速度计、光学加速度计和摆式加速度计
支承方式	宝石支承加速度计、挠性支承加速度计、气浮加速度计、液浮加速度计、磁悬浮加速度计、静电悬浮加速度计

资料来源：《国外光学加速度计研究现状及发展趋势》，中信建投证券

**摆式积分陀螺加速度计**是利用在自转轴上有一定摆性的积分陀螺来测量比力的装置。多用于导弹制导系统，由积分陀螺、伺服电机和单轴转台等组成。在陀螺的自转轴上，有一个偏离输出轴一定距离的不平衡质量，形成摆。当沿输入轴有加速度作用时，惯性力矩使摆绕输出轴转动，角度传感器即产生一个正比于框架转角的电压信号，经放大后送入伺服电机、使装有陀螺的转台转动而在陀螺框架上产生一个陀螺力矩来平衡惯性力矩，使陀螺转子轴趋向于零位。单位时间内转台的转角即加速度的量度的精度为  $10^{-8}g \sim 10^{-5}g$ （量级），是技术成熟且精度最高的机械式加速度计，但其结构复杂、体积及质量大、成本高，目前应用于远程战略导弹和大型运载火箭的惯性制导系统。

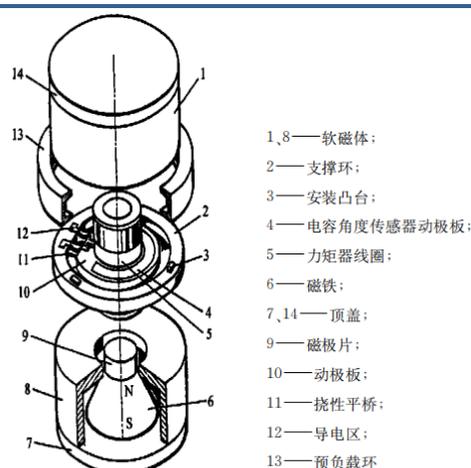
**图表 38：摆式积分陀螺加速度计**


资料来源：digikey，中信建投证券

**挠性摆式加速度计**和**石英振梁加速度计**是目前主流的工程应用加速度计，挠性摆式加速度计包括石英、金属和硅基挠性加速度计，具有体积小和精度高的优点，精度为  $10^{-6}g \sim 10^{-3}g$ （量级），主要应用于海陆空导航和战术级至导航级导弹制导等领域。

**石英挠性加速度计**是机械摆式加速度计的主流产品，精度可达  $10^{-6}g$  水平，技术已成熟且应用最广。当有加速度作用于检测石英摆敏感质量时，摆质量因惯性而偏离平衡位置，电容检测器差动地检测摆质量的位移量，并输出与此位移量成正比的电信号，经伺服电路放大处理，向力矩器线圈提供电流，该电流与永久磁铁作用的结果是产生一平衡力，以平衡作用于摆质量的惯性力，使摆质量处于新的平衡位置。力矩器线圈所施加的电流大小代表输入加速度的大小，电流方向代表输入加速度的方向。

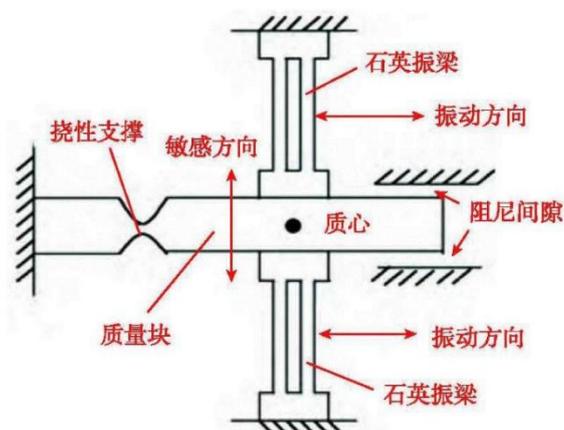
图表 39：石英挠性加速度计机电部件结构图



资料来源：《惯导加速度计技术综述》，中信建投证券

石英振梁加速度计是一种基于石英振梁力频特性的新型高精度固态传感器。激振电路对石英振梁进行压电激励，使其在谐振频率点处形成弯曲振动，质量块将外界的输入加速度转换成作用在振梁上的轴向力。结合振梁的力频特性，通过改变振梁的刚度使其谐振频率发生变化，检测两个振梁的频率差获得加速度的大小和方向信息。石英振梁加速度计抗环境噪声能力较强，精度较石英挠性加速度计稍高，可应用于导航级惯性系统。体积小巧的中低精度石英振梁加速度计利用谐振器的力频率特性来测量加速度，在国外已有大量应用。

图表 40：石英振梁加速度计的工作原理



资料来源：《导航与控制》，中信建投证券

MEMS 加速度计是一种能够测量物体线加速度的器件，通常由质量块、阻尼器、弹性元件、敏感元件和调电路等部分组成。按工作原理划分，MEMS 加速度计可以分为以下类型：电容式、压电式、热感式、谐振式等。其中，电容式 MEMS 加速度计是目前应用最多的类型。电容式 MEMS 加速度计具有检测精度高、受温度影响小、功耗低、宽动态范围、以及可以测量静态加速度等优点，被广泛应用于消费电子、汽车、工业、高可靠等各个领域。高精度的 MEMS 加速度计已有成熟产品的精度为  $10^{-4}g \sim 10^{-3}g$ （量级），可基本满足战术级需求，已在海外武器系统中广泛应用。MEMS 谐振式加速度计的精度已经达到  $10^{-6}g$ （量级），还处于实验室研究阶段。

**图表 41：电容式、压电式和压阻式加速度计的性能比较**

技术指标	电容式	压电式	压阻式
尺寸	大	小	中等
温度范围	非常宽	宽	中等
线形度误差	高	中等	低
直流响应	有	无	有
灵敏度	高	中等	中等
冲击造成的零位漂移	无	有	无
电路复杂程度	高	中等	低
成本	高	高	低

资料来源：《MEMS 传感器现状及应用》，中信建投证券

欧美多国仍在大量投入研发具有更高精度潜力的下一代加速度计，主要是基于光学效应、量子效应（物质波干涉）和光力耦合效应等的新型高精度加速度计。光力学加速度计具有前所未有的测量精度，可接近甚至突破标准量子极限，是与原子干涉加速度计精度相当的下一代高精度加速度计，发展潜力巨大。

随着硅光集成技术的快速发展，融合光学效应传感和微加工技术的微光学加速度计（MOEMS）获得了快速发展。与传统加速度计相比，微光学加速度计具有体积小、精度高和抗电磁干扰的优点，主要分为微纳光纤环式、亚波长谐振式、光波导光强检测式、微结构光栅式和光纤 F-P 腔式等，有望用于中、高精度惯性导航领域。原子干涉（量子）加速度计是利用物质波干涉技术的新型惯性器件，利用激光冷却操控原子分束、合束发生干涉，通过冷原子团自由落体时间测量加速度。原子干涉加速度计具有超高的长期稳定性，精度可以达到  $10^{-9}g$ 。近年来，有学者提出基于光力悬浮微球介质的悬浮光力学加速度计和基于光场、机械结构相互耦合的腔光力学加速度计。

**图表 42：国外光力学加速度计研究现状**

类型	研究团队/单位	年份	加速度噪声/ ( $\mu g/Hz^{1/2}$ )
光阱悬浮	David LaGrange Butts & Shao ul Ezekiel/美国麻省理工学院	2008	119
	Fernando Monteiro/美国耶鲁大学	2017	0.4
	Charles P. Blakemore/美国斯坦福大学	2018	7.5
光子晶体	Oskar Painter/美国加州理工学院	2012	10
	Suraj Bram ha var/美国麻省理工学院	2016	6
微球腔	Juha-Pekka Laine/美国麻省理工学院	2001	100
	Yin gLiaLi i & P. F. Barker/伦敦大学学院	2018	4.5
法布里-珀罗腔	F. G. Cervantes/美国国家标准与技术研究院	2014	0.1
	J. J. Gorman & T. W. LeBrun/美国国家标准与技术研究院	2019	0.2
	J. J. Gorman & T. W. LeBrun/美国国家标准与技术研究院	2020	0.03

资料来源：《国外光力学加速度计研究现状及发展趋势》，中信建投证券

## 四、细分产业链众多，发展潜力巨大

### 4.1 未来发展趋势：高精度、低成本、小体积等

为不断提升竞争力，惯性系统正向着高精度、小体积、抗恶劣环境、快速启动、标准化、货架式方向发展，关键技术包括系统的数字化、集成化、通电快速热稳定及动态快速对准（含自主对准和传递对准）等技术。平台式惯性系统需充分利用最新控制理论和控制技术来进一步改善其稳定回路的性能；捷联式系统将越来越多地采用数字化固态惯性仪表和系统集成一体化、先进数据滤波等技术，使其综合性能不断提高。另外，随着深空探测任务的逐步实施和惯性技术水平的不断提高，今后的研究还包括月球、火星等地外星球表面和行星际航行的惯性导航理论、误差模型及工程实现技术。

另一方面，惯性仪表则正不断向更高精度（如原子陀螺）、更小型化（如 MEMS 陀螺）等方向发展。现有转子式、光学陀螺等惯性仪表及配套元器件的精度、可靠性等性能还需要进一步提高。新概念惯性仪表不断提出，如光子晶体光纤陀螺、MEMS 陀螺、集成光学/MOEMS 陀螺、原子干涉/自旋陀螺及多类新型加速度计等，研究重点是新原理、新方法、新工艺。

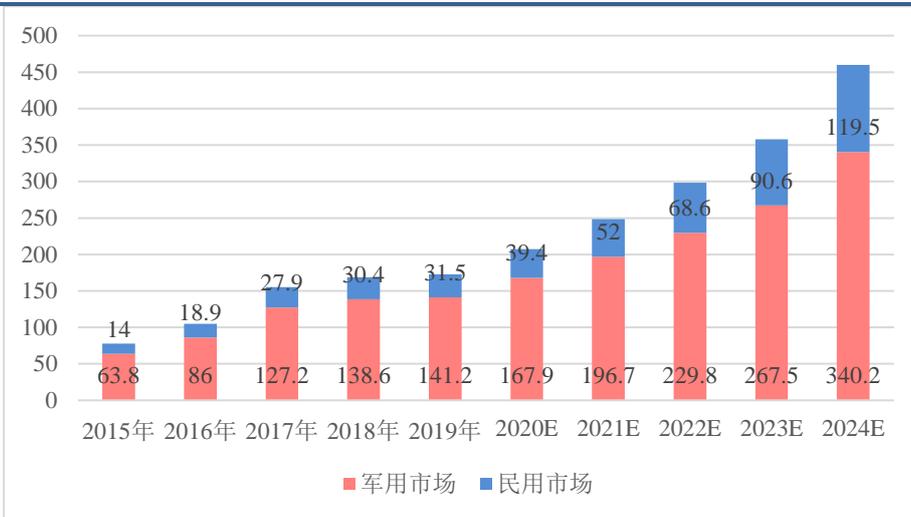
惯性导航技术自身的发展主要依靠三方面科技发展水平的支撑：新型的测量原理、惯性器件及先进的制造工艺技术、计算机软硬件技术。早期惯性导航系统是以机械陀螺为核心、以模拟电路为主要硬件实现形式的机械框架平台式惯性导航系统。随着计算机硬件技术发展，硬件计算速度大幅度提高、存储容量进一步扩大，逐渐发展出机械陀螺的捷联式惯性导航系统，而且捷联式惯性导航系统的计算速度和功能不断提高。关键器件的陀螺则由机械式陀螺发展到光学陀螺（即光纤陀螺和激光陀螺），这是惯性技术发展的一大革命，与以前的机械陀螺器件有着本质的区别。光学陀螺测量角速度的传感器已经没有机械转子，因此使得捷联式惯性导航系统的测量范围足够大，且系统的数字化程度大幅提高。目前，激光捷联惯导系统和光纤捷联惯导系统分别占据高、中精度的应用领域。在可预见的未来，光纤陀螺惯导系统将向高精度方向发展，而激光陀螺惯导系统将向小型化方向发展。

总体而言，随着惯性技术不断发展，惯性仪表与惯性系统技术主要向着高性能、低成本和小型化方向发展，分别满足战略武器的高精度需求、各种常规运载体导航及稳定平台的高动态与高可靠性需求、民用市场的低成本与大批量需求等不同需求。

### 4.2 产业链不同环节差别较大，下游应用市场潜力巨大

惯性导航系统 2024 年市场规模预计达 459.7 亿元，军用市场为主要下游应用场景。根据头豹研究院预测，2024 年中国惯性导航军用市场规模为 340.2 亿元，民用市场规模为 119.5 亿元，其中军用市场占比为 74%，是中国惯性导航的主要下游应用场景。

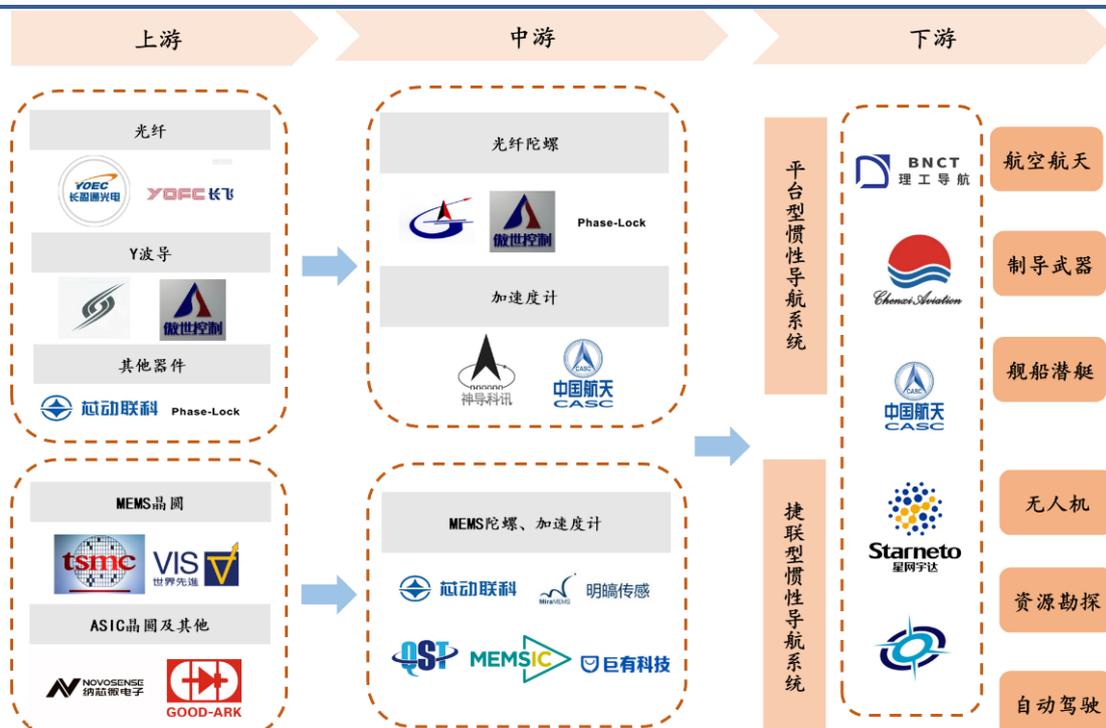
图表 43：中国惯性导航行业市场规模（按销售额统计）（亿元）



资料来源：火箭惯性招股书，中信建投证券

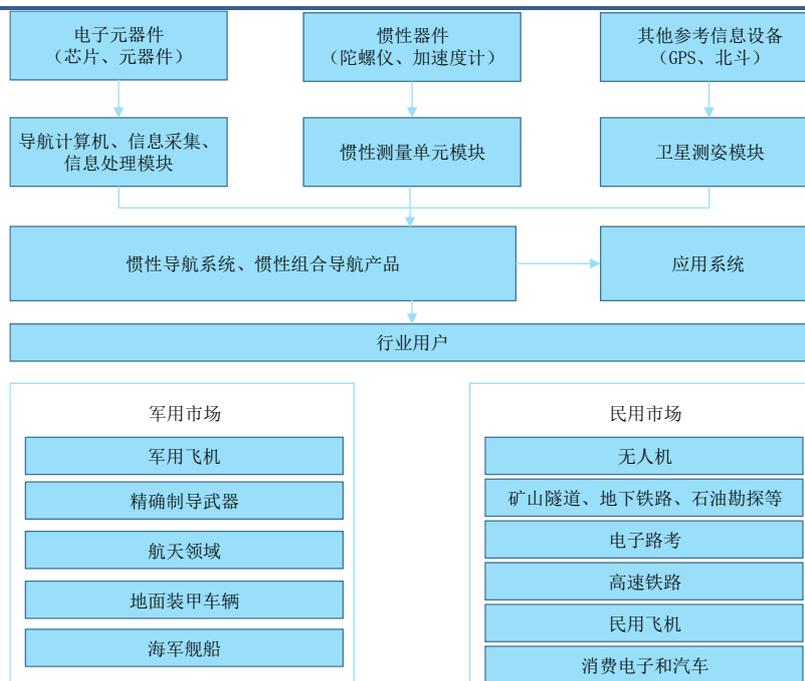
惯性导航产业链分为上游元器件及材料层、中游惯性器件层和下游系统层三个环节。其中产业链上游参与主体为元器件及材料供应商，主要包括光纤、晶圆、电子元器件等；产业链中游为惯性器件生产企业，主要包括陀螺仪和加速度计等；产业链下游为惯性组合导航系统成商，其主要产品包括信息采集处理模块、测量单元模块，以及对各模块进行系统集成和软件设计；下游应用则为各类型军用车、导弹、舰船、航天等军工单位及消费电子、无人机、自动驾驶等相关行业民用企业。

图表 44：以光纤和 MEMS 路线为例的惯性导航产业链



资料来源：长盈通招股书，芯动联科招股书，中信建投证券

图表 45：惯性导航和组合导航产业链



资料来源：理工导航招股书，中信建投证券

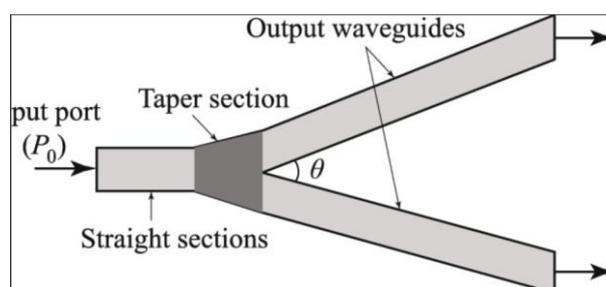
产业链中上游研发和制造难度大，催生“专精特新”小巨人的诞生。惯性器件对惯性导航起到决定性作用，且其技术门槛高，是产业链的核心部分，而不同技术路线核心壁垒环节有所不同，以光纤陀螺和 MEMS 陀螺为例，前者核心环节更偏上游，光纤环、Y 波导等核心零部件为主要壁垒，后者核心环节更偏中游，MEMS 陀螺的设计和制造能力为主要壁垒。因此有较多掌握核心技术的民营企业参与，如长盈通、芯动联科、上海傲世、世维通等。

图表 46：光纤环



数据来源：长盈通招股书，中信建投证券

图表 47：Y 波导



数据来源：《Estimation of the performance of a 3-dB Y-junction optical coupler with a channel profile of proton-exchanged lithium niobate》，中信建投证券

产业链下游对硬件集成、算法和定制化要求较高，研发投入周期较长，故多为军工院所。产业链下游主要根据应用端客户的需求，对上游器件厂商生产的标准化惯性器件进行惯性技术测试等相关工序，根据参数及目标工作环境调整惯性技术系统以对惯性器件进行纠偏、补偿等，集成相关功能性芯片、基础元器件等工序，并

请务必阅读正文之后的免责条款和声明。

选用适当算法、参数，开发适合客户行业及工作特点的软件，最终集成为能够让下游终端用户直接应用的惯性技术产品。由于下游企业需要长期跟随武器型号进行预研，故研发周期较长，多为军工核心院所，如中国航天科工集团第三研究院第三十三研究所、西安现代控制技术研究所、中国兵器工业导航与控制技术研究所、航天十三所、航空六一八所等，民营企业市场份额较小，如理工导航、星网宇达等。

## 风险分析

1、技术迭代不及预期：由于陀螺和加速度计技术路线众多，不同技术路线原理差异较大，产业成熟度也大相径庭，故无法准确判断未来哪种技术路线能够成为主流以及技术迭代的进展速度。

2、下游应用场景拓展不及预期：由于惯性导航系统存在成本和精度的相互制约，故很多场景对高精度的需求却无法用低成本进行满足，从而导致应用场景拓展不及预期。

3、竞争格局变化：由于惯性导航系统核心器件技术路线众多，且下游应用场景多样，新的应用载体不断涌现，故产业链各环节现有企业的市场份额和竞争格局可能会发生变化。

## 分析师介绍

### 黎韬扬

研发部执行总经理、军工与新材料团队首席分析师，北京大学硕士。2015-2017 年新财富、水晶球、Wind 军工行业第一名团队核心成员，2018-2022 年水晶球军工行业上榜，2018-2020 年 Wind 军工行业第一名，2019-2022 年金牛奖最佳军工行业分析团队，2018-2022 年新财富军工行业上榜、入围

## 研究助理

**孙旭鹏**：军工及新材料行业研究员，ACCA，清华大学能源与动力工程系硕士，西安交通大学过程装备与控制工程学士，2022 年入职中信建投证券。

**评级说明**

投资评级标准		评级	说明
报告中投资建议涉及的评级标准为报告发布日后6个月内的相对市场表现，也即报告发布日后的6个月内公司股价（或行业指数）相对同期相关证券市场代表性指数的涨跌幅作为基准。A股市场以沪深300指数作为基准；新三板市场以三板成指为基准；香港市场以恒生指数作为基准；美国市场以标普500指数为基准。	股票评级	买入	相对涨幅 15% 以上
		增持	相对涨幅 5%—15%
		中性	相对涨幅-5%—5%之间
		减持	相对跌幅 5%—15%
		卖出	相对跌幅 15% 以上
	行业评级	强于大市	相对涨幅 10% 以上
		中性	相对涨幅-10-10%之间
		弱于大市	相对跌幅 10% 以上

**分析师声明**

本报告署名分析师在此声明：（i）以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，结论不受任何第三方的授意或影响。（ii）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而直接或间接收到任何形式的补偿。

**法律主体说明**

本报告由中信建投证券股份有限公司及/或其附属机构（以下合称“中信建投”）制作，由中信建投证券股份有限公司在中华人民共和国（仅为本报告目的，不包括香港、澳门、台湾）提供。中信建投证券股份有限公司具有中国证监会许可的投资咨询业务资格，本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格证书编号已披露在报告首页。

在遵守适用的法律法规情况下，本报告亦可能由中信建投（国际）证券有限公司在香港提供。本报告作者所持香港证监会牌照的中央编号已披露在报告首页。

**一般性声明**

本报告由中信建投制作。发送本报告不构成任何合同或承诺的基础，不因接收者收到本报告而视其为中信建投客户。

本报告的信息均来源于中信建投认为可靠的公开资料，但中信建投对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。本报告所载观点、评估和预测仅反映本报告出具日该分析师的判断，该等观点、评估和预测可能在不发出通知的情况下有所变更，亦有可能因使用不同假设和标准或者采用不同分析方法而与中信建投其他部门、人员口头或书面表达的意见不同或相反。本报告所引证券或其他金融工具的过往业绩不代表其未来表现。报告中所含任何具有预测性质的内容皆基于相应的假设条件，而任何假设条件都可能随时发生变化并影响实际投资收益。中信建投不承诺、不保证本报告所含具有预测性质的内容必然得以实现。

本报告内容的全部或部分均不构成投资建议。本报告所包含的观点、建议并未考虑报告接收人在财务状况、投资目的、风险偏好等方面的具体情况，报告接收者应当独立评估本报告所含信息，基于自身投资目标、需求、市场机会、风险及其他因素自主做出决策并自行承担投资风险。中信建投建议所有投资者应就任何潜在投资向其税务、会计或法律顾问咨询。不论报告接收者是否根据本报告做出投资决策，中信建投都不对该等投资决策提供任何形式的担保，亦不以任何形式分享投资收益或者分担投资损失。中信建投不对使用本报告所产生的任何直接或间接损失承担责任。

在法律法规及监管规定允许的范围内，中信建投可能持有并交易本报告中所提公司的股份或其他财产权益，也可能在过去12个月、目前或者将来为本报中所提公司提供或者争取为其提供投资银行、做市交易、财务顾问或其他金融服务。本报告内容真实、准确、完整地反映了署名分析师的观点，分析师的薪酬无论过去、现在或未来都不会直接或间接与其所撰写报告中的具体观点相联系，分析师亦不会因撰写本报告而获取不当利益。

本报告为中信建投所有。未经中信建投事先书面许可，任何机构和/或个人不得以任何形式转发、翻版、复制、发布或引用本报告全部或部分内容，亦不得从未经中信建投书面授权的任何机构、个人或其运营的媒体平台接收、翻版、复制或引用本报告全部或部分内容。版权所有，违者必究。

**中信建投证券研究发展部**

北京  
 东城区朝内大街2号凯恒中心B座12层  
 电话：(8610) 8513-0588  
 联系人：李祉瑶  
 邮箱：lizhiyao@csc.com.cn

上海  
 上海浦东新区浦东南路528号南塔2103室  
 电话：(8621) 6882-1600  
 联系人：翁起帆  
 邮箱：wengqifan@csc.com.cn

深圳  
 福田区福中三路与鹏程一路交汇处广电金融中心35楼  
 电话：(86755) 8252-1369  
 联系人：曹莹  
 邮箱：caoying@csc.com.cn

**中信建投（国际）**

香港  
 中环交易广场2期18楼  
 电话：(852) 3465-5600  
 联系人：刘泓麟  
 邮箱：charleneliu@csci.hk