国外激光陀螺 laser gyroscope 的发展与应用

来源：《国外惯性技术信息》2017 年第 4 期，作者：国防科技大学 张斌，罗晖，袁保伦，汪之国

激光陀螺（RLG）是一种以萨格奈克（Sagnac）效应为基础的光学陀螺，主要用于运动载体的**角运动**（运动角速度或转动角度）**测量**。

1913 年，法国科学家 Sagnac 进行了环形光路中外界转动引起干涉条纹变化的实验，并从理论上对此现象进行了解释，提出了著名的 Sagnac 效应：在环形闭合光路中，从某一观察点发出的一对光波沿相反方向运行一周后又回到该点时，这对光波的光程（或相位）将由于闭合光路相对于惯性空间的旋转而不同，其**光程差（或相位差）与闭合光路的旋转角速度成正比**。

在随后的很长一段时间里，由于没有合适的相干光源，光学 Sagnac 效应的研究基本上没有任何实用性进展。直到 1960 年，世界上的第一台激光器诞生以后，激光陀螺作为激光技术的一个重要应用而成为世界各军事强国研究的热点。

1 激光陀螺及其特点

激光陀螺是由腔体（一般采用超低膨胀系数的微晶玻璃材料）和高质量反射镜构成的环形激光器，腔内运行的顺、逆时针激光能够以不同的频率独立振荡。由于激光谐振条件的要求，Sagnac 效应产生的光程差转换成了顺、逆时针运行激光的频率差，因此极大地提高了陀螺的响应灵敏度。当激光陀螺固定在运动载体上，并相对于惯性空间以角速度 Ω 旋转时，该频率差为：$\Delta v = \frac{4A}{L\lambda}\Omega$，式中$\frac{4A}{L\lambda}$为标度因数，它由环形谐振腔的面积 A、环路长度 L 以及激光波长 λ 决定。

激光陀螺的原理光路如图 1 所示，采用合光棱镜使其输出的顺、逆时针激光以微小夹角合并，经光电转换后可得到频率为Δv 的拍频信号，从而实现载体转动角速度的测量。

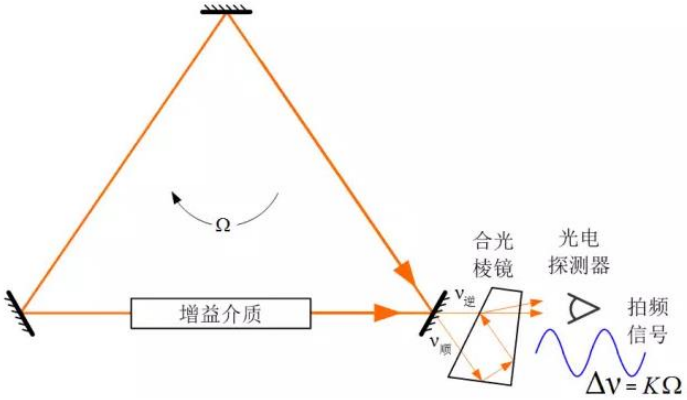

图 1　激光陀螺原理光路

在实际的激光陀螺中，顺、逆时针激光通过反射镜的**后向散射**或环路中的**非均匀损耗**发生耦合，导致陀螺输入角速度小于某阈值时，频率差Δν 为零，这种现象称为闭锁效应。为了克服闭锁效应的影响，激光陀螺需要采取偏频措施，即在两束光波之间人为引入较大的频率差，使激光陀螺的工作区远离闭锁区域或者减少处于闭锁区域的时间。具体的偏频方案有**机械抖动偏频、四频差动偏频、恒转偏频、磁镜交变偏频、纵向塞曼效应偏频**等，其中以采用机械抖动偏频和四频差动偏频方案的激光陀螺应用最为广泛。

图 2　激光陀螺惯性测量单元

激光陀螺的一个环路对应一个角速度敏感方向，将三个激光陀螺和三个加速度计正交配置组合构成图 2 所示的激光陀螺惯性测量单元（IMU），利用 IMU 测量载体运动的三维角速度和加速度，再通过惯性导航解算得到载体的位置、姿态等信息。基于激光陀螺的惯性导航系统广泛应用于导航与制导、姿态测量与控制、定位与定向、稳定与瞄准等领域。

传统机电陀螺仪利用高速转动机械转子的定向性和进动性来测定载体相对于惯性空间的转速和方位，而正是由于高速转子自身的抗冲击振动能力差、存在加速度效应、不能快速启动

等固有缺陷，使其在惯性导航中的应用受到限制，妨碍其进一步的发展。美国 20 世纪 80 年代研制的 MX“和平卫士”洲际导弹上搭载的机电陀螺仪是世界上精度最高的机械式陀螺仪，零偏稳定性达到 1.5×10^{-5}(º)/h，使该导弹可以在不依赖外部导航信息的情况下，14000km 射程的导航偏差小于 100 m，然而这套系统体积庞大，成本也极为高昂。因此，在后续研制“三叉戟”潜射弹道导弹时就改用了激光陀螺，既降低了系统成本，又大幅度缩减了导航设备的体积。

图 3　美国 MX 洲际导弹的惯性导航舱段与陀螺仪

激光陀螺性能的主要评价指标是零偏稳定性、标度因数非线性度和随机游走系数，目前工程实用的中高精度激光陀螺对应的典型指标为：零偏稳定性 0.01~0.001 (º)/h，标度因数非线性度 10~0.1ppm，随机游走系数 0.005~0.0005 (º)/$h^{1/2}$。

与其它种类的陀螺比较，激光陀螺具有以下显著特点：

1）精度适应范围广，可满足不同应用领域的需要。**美国霍尼韦尔公司** GG1389 陀螺仪的零偏稳定性达到了 1.5×10^{-4}(º)/h，是**世界上精度最高的激光陀螺**。该公司 GG1308 陀螺的零偏稳定性为 5~1 (º)/h，是世界上体积最小的产品化激光陀螺。

2）动态范围大，动态性能好。激光陀螺可测转速的动态范围大于 108，从千分之几度/小时到超过 7200 (º)/s，而且无论转速大小都可以得到线性输出，测量偏差小。

3）标度因数的线性度和稳定性好，动态环境误差小。绝大多数激光陀螺的腔体采用微晶玻璃材料，其膨胀系数达到 10^{-8} 量级，光路的面积和长度非常稳定，在工程应用中的标度因数

非线性度可以做到 0.1ppm，而且在高低温环境下基本保持恒定，特别能适应大温变恶劣环境的应用需求。

4）抗振动、冲击和温变环境能力强。激光陀螺采用一体化结构，没有活动部件，因此可以承受很高的加速度和强烈的振动冲击，耐高低温环境能力强。特殊设计的 GG1308 陀螺甚至可以承受超过 1×104g 的冲击。

5）角分辨率高。激光陀螺可以分辨角秒甚至亚角秒量级的精细角度变化，在角度测量上可以实现高精度和高分辨率的动态测量。

6）性能稳定，在工作寿命内，仪表可以做到免校准。

7）快速启动。激光陀螺可做到瞬时启动，一般不需要预热、稳定时间。

8）功耗低、寿命长、可靠性好和易维护。激光陀螺存储寿命可达 20 万小时以上，平均无故障工作时间（MTBF）高达数万小时。

9）既是速率陀螺，也是位置陀螺，使用灵活，应用范围广。

10）对加速度不敏感，没有交叉耦合效应。

11）直接数字输出，系统构成简单。

2 国外激光陀螺的发展历程

激光陀螺的问世要追溯到 20 世纪 60 年代，其发展过程大体可分为四个阶段。

研究起步阶段（1962—1965 年）

1960 年，自世界上的第一台激光器问世以后，人们就提出利用此技术来实现光学陀螺。1961 年，美国科学家 Heer C V 在美国物理学会上发表了世界上第一篇有关激光陀螺的报道，介绍了采用测量环形激光谐振腔内运转的正反两束激光之间的频率差来感知外界输入角速率变化的方法。1962 年，美、英、法、前苏联几乎同时开始酝酿激光陀螺的研制。**美国斯佩里公司**于 1963 年 2 月研制出世界上第一台环形激光陀螺试验装置，该装置的正方形光路边长为 1m，可测量旋转速率。

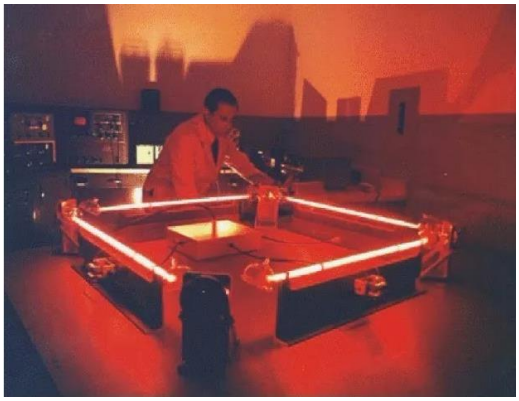

图 4　第一台环形激光陀螺试验装置

潜心研究与关键技术突破阶段（1965—1975 年）

在随后的研制过程中，激光陀螺的闭锁效应、零偏误差等给后续的工程实用研制带来了诸多困难，世界各国均陆续下马，只剩下美国以霍尼韦尔公司为代表的少数几家公司和少量科研人员还在继续努力，致力于从原理和技术上进行解决。直到 1966 年，霍尼韦尔公司提出了利用交变机械抖动偏频法来克服陀螺闭锁效应影响的技术方案，为激光陀螺的研制指明了方向，才重新在世界上掀起了激光陀螺研制的新一轮热潮。

霍尼韦尔公司于 1972 年率先研制出机械抖动偏频的单轴激光陀螺 GG1300。1974 年美国海军和空军联合制定研究计划，1975 年在战术飞机上试飞成功，1976 年在战术导弹上试验成功，标志着激光陀螺从此进入实用阶段。

批量生产技术攻关与实用阶段（1975—1984 年）

1978 年，霍尼韦尔公司的激光陀螺开始小批量生产。1982 年，其研制的 ARINC704 激光陀螺惯性基准系统正式投入民用航线实用。到 1983 年 9 月，已为波音公司提供了 216 套惯性导航系统，平均无故障工作时间达 1 万小时。但在这一段时间里，批产的激光陀螺也出现了因为使用可靠性问题而批量召回的现象。

1982 年，霍尼韦尔公司开始批量生产 GG1342 陀螺，并采用该陀螺为美国海军研制了第一个专门用于舰船的高精度激光陀螺导航仪（SLN），并于 1984 年在海军导航试验船上试验成功。

1984 年，霍尼韦尔公司以 H-726 型激光陀螺动态基准装置为基础，采用纯捷联编排方式，研制出适用于战车和自行火炮的组件式**定位定向系统**，1985—1987 年在各种战车和自行火炮上进行了试验，1989 年被选为美军的标准地面导航系统。

1977 年 12 月，美国斯佩里公司在海军的资助下，以该公司的 MK16 机电陀螺稳定系统为基础改装研制成 MK16 Mod Ⅱ 型捷联式激光陀螺稳定装置工程样机，为舰载火炮控制系统提供

舰船的纵、横摇姿态数据，并于 1978 年 2 月在美国海军塞勒斯号（DDG-11）导弹驱逐舰上进行了首次海上试验，其性能远优于原有的 MK16 型机电陀螺稳定系统。1980 年，在 MK16 Mod Ⅱ型的基础上，斯佩里公司增加了一个**方位分度器**并对**卡尔曼滤波器**作了相应修改，研制成功了水面舰艇捷联式激光陀螺导航仪，其性能参数优于当时海军的规范要求。

1982 年，霍尼韦尔公司为美国海军研制了第一个专门用于美国海军水面舰艇的高精度激光陀螺导航仪，即 SLN 舰用激光陀螺导航仪。该系统采用双轴转位方案，使用霍尼韦尔公司已经批量生产的 GG1342 激光陀螺和森德斯坦数据控制公司的 Q 型挠性加速度计构成惯性测量组件，1984 年在海军导航试验船上进行了试验。同期，罗克韦尔公司研制了 RLGN 激光陀螺导航仪，其惯性测量装置由 3 个 G16B 激光陀螺和 1 个 MOD Ⅷ A 型三轴加速度计组成，系统采用单轴旋转方式，惯性组件绕舰船龙骨轴连续旋转，于 1985 年进行了海上试验和鉴定。

1982 年 8 月，美国航空发展中心与霍尼韦尔公司签订了合同价款共 120 万美元的合同，研制攻击型核潜艇用的三个高精度 GG1389 激光陀螺，为进一步研制定位精度优于 0.1 n mile/h 的舰艇用激光陀螺导航系统做准备。

1984 年，利顿公司开始研制激光陀螺船用惯性导航仪，经初样、正样和试验样机阶段，于 1991 年提供了两套试验样机进行了实验室和海上试验，1993 年定型为 AN/WSN-5L，导航定位精度（CEP）为 1 n mile/6h，并首先装备“伯克”级导弹驱逐舰（DDG-64）。

大批量生产与拓展应用阶段（1984 年至今）

激光陀螺应用初期主要集中于航空与航海领域，但由于其独特的优点，很快就向其它领域拓展，并迅速发展起来。

***3* 国外激光陀螺的生产现状**

01 美国霍尼韦尔公司

霍尼韦尔公司是世界激光陀螺研究的先驱者，长期以来一直领跑国际激光陀螺领域的最新进展、最高水平与应用研究，也是世界上激光陀螺产量最大、应用水平最高的厂家。

霍尼韦尔公司研制的激光陀螺以三角形光路的二频机械抖动陀螺为主，典型型号有 GG1308、GG1320、GG1328、GG1330、GG1342、GG1389 等，其性能可以满足不同精度惯性系统的要求。

GG1308 是小体积、低成本激光陀螺的最典型代表，该**陀螺三角形光路**的边长仅 2cm，采用 BK_7 光学玻璃（相当于中国的 K_9 玻璃）为腔体，陀螺镜片和电极采用低熔点玻璃烧结密封，总体积小于 32.8cm³，质量为 60g，*每支售价仅为 1000 美元*，零偏稳定性为 5~1 (º)/h。采

用该陀螺的惯导系统型号主要有 HGI500 IMU 和 HGI700 IMU（包含 3 个 GG1308 陀螺和 3 个 RBA-500 石英振梁加速度计）两种，主要用于美军 JDAM 联合直接攻击炸弹和制导多管火箭发射系统等装备，是霍尼韦尔公司乃至全世界产量最大的激光陀螺。

图 5　霍尼韦尔公司 HG1700 IMU 及其内部的三个 GG1308 陀螺

图 6　霍尼韦尔公司的 GG1320 陀螺

霍尼韦尔公司另一种低成本陀螺为 GG1320，前期产品的零偏稳定性为 0.1~0.03 (º)/h。2007 年初，霍尼韦尔公司发布了该型陀螺的升级产品：军用数字激光陀螺 GG1320AN（零偏稳定性 0.0035 (º)/h）和民用数字激光陀螺 GG1320AN01（零偏稳定性 0.04~0.01 (º)/h），这两种产品都是将配套电路系统和陀螺封装成简单易用的独立单元，提供数字化的 I/O 单元。霍尼韦尔公司应用于航天领域的导航级 HG9848 IMU 和代表激光陀螺惯性器件最新发展水平的 HG9900 IMU 均采用 GG1320AN 陀螺作为姿态测量传感器，该型陀螺在全世界激光陀螺产品序列中可称得上是低成本、高性能的典范。

02 美国利顿公司（已被诺格公司并购）

利顿公司研制的激光陀螺以正方形光路的机抖陀螺和异面腔四频差动陀螺为主。

早期，利顿公司采用机械抖动偏频方案研制的激光陀螺产品主要有 LG2717（零偏稳定性优于 0.05 (°)/h）和 LG8028（零偏稳定性优于 0.01 (°)/h），分别应用于航空导航系统和中高精度导航系统。

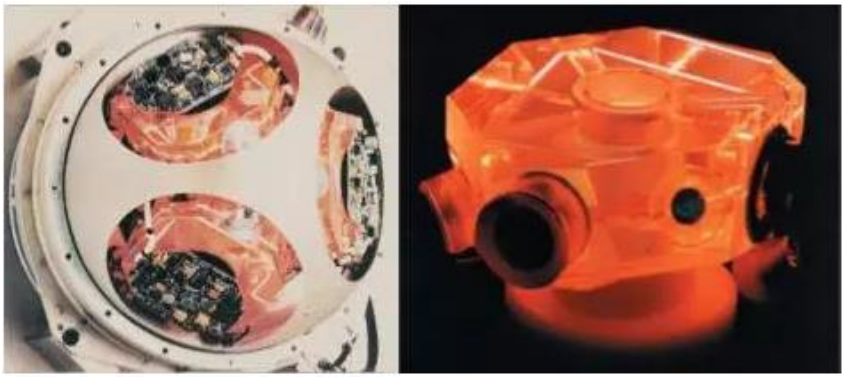

图 7　利顿公司 LG8028 激光陀螺惯性组合体和 ZLG 激光陀螺

1985 年，利顿公司购买了雷锡恩公司异面腔四频差动激光陀螺的专利，开始了该陀螺的批生产研发，突破关键技术后于 1991 年正式开始批产（注册商标为 Zero-Lock™ Laser Gyro，简称 ZLG），该陀螺以较小的尺寸获得了优于 0.01 (º)/h 的精度，在各项指标上能与同等尺寸的机抖陀螺相媲美。利顿公司公开报道的 ZLG 有五种，其中三种为单轴陀螺（腔长分别为 18.4cm、25cm 和 40cm），另两种为空间三轴陀螺（腔长分别为 11cm 和 9cm），其产品中以腔长 18.4cm、型号为 S18-4 的单轴 ZLG 应用最为广泛，大批量生产的 LN 100 系列、LN 120G 和 LTN 101 惯导系统都采用了该陀螺。

目前，ZLG 以其全固态、无抖动部件的“安静型”特有优势在航空、航天、导弹、侦察等领域获得了广泛应用，并可为轻型和中型运载器发射提供导航和制导功能，如引导空间载荷进入低地轨道、地球同步轨道、从轨道返回地面等。LN 100S 被用在美国新一代导弹防御系统的预警卫星中，据项目负责人称该组件是“当今世界上唯一能够满足天基红外系统要求的激光陀螺系统”。LN 120G 是恒星/惯性/GPS 组合导航系统，2007 年用于升级 RC-135 电子侦察机的导航系统。

03 美国 Singer’s Kearfott 公司

为满足小型卫星和航天器的需要，该公司在其原有三角形光路机抖陀螺的基础上，主要研制了两种三轴激光陀螺仪 T16（用于 KN-5051 惯导系统，0.8n mile/h）和 T22（用于 N-5053 惯导系统），主要用于战术武器。

图 8　Kearfott 公司 T22 和 T16 空间三轴陀螺

04 法国 **Sextant** 公司

Sextant 公司从 1972 年开始激光陀螺研究，相关产品于 1979 年成功应用于“美洲虎”直升机。1981 年，该公司研制的 33 cm 光路激光陀螺（Single33）在 ANS 超声速导弹项目中标，1983 年初开始为欧洲的“阿利亚娜”Ⅳ型运载火箭研制使用该陀螺的“Quasar”激光陀螺捷联惯性制导装置，并于 1988 年 6 月 15 日成功用于火箭发射，这也是世界上运载火箭发射中首次采用激光陀螺惯性系统。

该公司的 Pixyz14 型（零偏稳定性 10~0.1 (°)/h）和 Pixyz22 型（零偏稳定性优于 0.01 (°)/h）激光陀螺是两种共用反射镜的一体化空间三轴陀螺，前者主要适用于飞机、直升机以及战术导弹、反舰导弹、战术反导等的中段制导和控制系统，后者主要用于中远程导弹和陆基系统的中高精度惯性组合。

图 9　Sextant 公司 Single33 激光陀螺和空间三轴激光陀螺

05 法国萨基姆公司

萨基姆公司从 1977 年开始涉足激光陀螺领域，目前是欧洲最大的激光陀螺生产厂家。该公司生产的第一种激光陀螺是 GLS-32 机抖陀螺，主要用于航空及潜艇的捷联惯导系统，采用该陀螺的西格玛 40 惯导系统的导航定位精度为 0.8 n mile/8h（或 1.5n mile/24h）；GLC-l6 型陀螺（零偏稳定性 0.01(°)/h）是一种方形光路的机抖陀螺，主要用于直升机、小型运载火箭和陆用捷联惯导系统；GLC-8 型陀螺腔长仅为 8cm，零偏稳定性 10~0.1(°)/h，主要用于射程 60~100km 的战术导弹。

图 10　萨基姆公司 GLS-32 型和 GLC-l6 型激光陀螺

06 俄罗斯和乌克兰

俄罗斯 Polyus 研究所和电子光学公司（Electrooptika Corp）、乌克兰阿森纳工厂（Arsenal factory）等是前苏联研制生产激光陀螺的主要机构，主要产品有机械抖动偏频的全反棱镜式陀螺、仿利顿公司 LG8028 型激光陀螺、空间三轴陀螺、ZLK 系列塞曼效应偏频激光陀螺、法拉第恒定偏频激光陀螺等，零偏稳定性优于 0.01(°)/h。

图 11 俄罗斯二频机抖陀螺惯性组合体

07 日本

1978 年，日本宇宙开发事业团（NASDA）、国家宇航实验室和日本航空电子工业有限公司（JAE）开始联合从事激光陀螺研发。1985 年，NASDA 和 JAE 采用两家联合研制的 34cm 光路激光陀螺开始为日本的 H-Ⅱ型运载火箭研制激光陀螺惯性导航系统。1994 年 2 月、8 月和 1995 年 3 月，日本 H-Ⅱ型运载火箭先后发射成功。目前，激光陀螺系统已彻底取代了原来使用的动力调谐陀螺惯导系统。

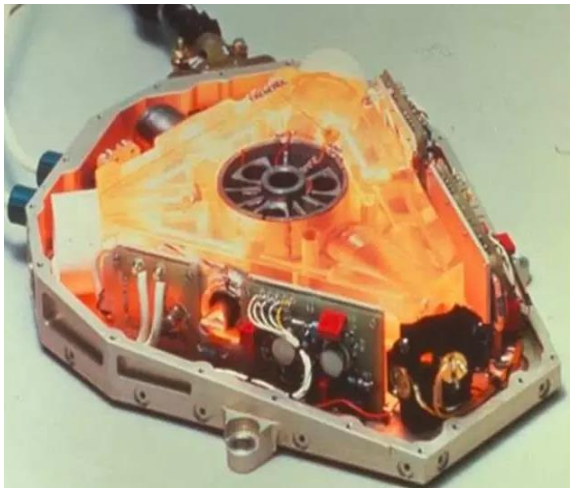

图 12 日本 JAE 公司激光陀螺

除以上国家和公司以外，以色列航空工业有限公司（IAI）也具有一定的激光陀螺研发与批产能力。据印度媒体报道，印度自行研制的激光陀螺已应用于 Agni“烈火”系列弹道导弹和 Shaurya“太阳”中短程弹道导弹。

***4* 国外激光陀螺应用情况**

与卫星导航、天文导航等手段相比，惯性导航与姿态测控技术不依赖于外部信息，是各种运载平台和机动装备导航定位、制导控制、稳瞄稳向、姿态测量和过载传感的核心技术，是唯

一同时具有自主、实时、连续、隐蔽、不受干扰，无时间、地点、环境限制的运动信息感知技术，不仅是海、陆、空、天各领域远程攻击和精确打击武器的核心信息源，而且在民用航空、石油勘探、煤矿采掘、卫星通信等领域也有广泛的用途。

作为惯性导航与姿态测控系统的核心器件，陀螺主要用于测量运动载体相对于惯性空间的角运动，其性能差异直接决定系统精度。与传统的机电陀螺相比，激光陀螺具有精度高、动态范围大、瞬时启动、耐冲击振动能力强、可靠性高、直接数字输出等一系列优点，被称为捷联式惯性导航/制导系统的理想部件，目前已在越来越多的领域得到广泛应用。

航海领域

陀螺仪最早就是用作海洋航行的关键导航仪器，各种舰船广泛应用的陀螺罗经（罗盘），就是一种能自动寻北的导航仪器，它不仅可为舰船提供位置、姿态、速度等数据用于导航和航向基准确定，而且能为舰船的火炮控制、导弹和鱼雷发射等提供武器系统方位基准，同时还能通过实时测量舰船的横摇和纵摇并反馈控制，为舰船的武器发射系统提供稳定平台。

目前，各国生产的各类中高精度激光陀螺已广泛应用于各种航海惯导系统与姿态控制系统，如斯佩里公司 MK39/49 系列激光陀螺惯导系统、霍尼韦尔公司的 SLN 舰用激光陀螺导航仪、罗克韦尔公司的 RLGN、美国诺格公司的 PL41 MK4 Mod1（1n mile/8h）以及法国萨基姆公司的西格玛 40 系列激光陀螺惯导系统等。其中，萨基姆公司的西格玛 40 系列激光陀螺惯导系统已应用于“凯旋”、“梭鱼”、“红宝石”和 AIP 潜艇、“戴高乐”号航母、阿联酋的阿布扎比级反潜护卫舰等。

在激光陀螺的航海应用上，美国斯佩里公司的成就尤其令人瞩目。20 世纪 80 年代末期，北大西洋公约组织专门成立了 NATO-SINS 计划办公室，为北约组织成员国选择厂家研制并提供舰船惯性导航系统。该项目最终由美国斯佩里公司和霍尼韦尔公司联合承担，使用了霍尼韦尔公司 3 个 GG1342 激光陀螺和**森德斯坦数据控制公司 3 个 QA-2000 石英挠性加速度计**。系统采用双轴旋转调制方案，外形尺寸为 495mm×541mm ×1707mm，质量 317.5kg，对准时间 4h，早期产品的导航定位精度(CEP)为 1n mile/24h，后据 20 世纪 90 年代初报道，该系统可达到 0.39 n mile/30h 的定位精度。从 1993 年起，斯佩里公司开始向荷兰、西班牙、英国、澳大利亚等国提供产品，是北约国家舰船和潜艇的标准舰用导航设备。该系统被北约组织称为船用环形激光陀螺惯性导航仪（MARLIN），而斯佩里公司则沿袭了公司的顺序排号，称其为 MK49 Mod0 型。

图 13　西格玛 40XP 和 PL41 MK4 Mod1 激光陀螺航海惯导系统

MK49 系统经进一步改进后，于 1995 年被美国海军列装应用，其标准型号为 AN/WSN-7A。WSN-7A 系统的结构与 MK49 系统类似，但技术更先进，可靠性更高，成本更低，体积也更小。该系统导航精度可以达到 1n mile/14 天，超出了除静电陀螺系统以外的所有其它类型惯导系统，被美国誉为“世界上精度最高、最先进的光学陀螺惯导系统”。WSN-7A 系统已经替代了一部分达到服役期限的静电陀螺系统，成为美军水面舰艇和攻击型核潜艇（包括 SSGN 俄亥俄级巡航导弹核潜艇）的新一代惯导系统，只有战略导弹核潜艇仍在使用**静电陀螺系统**。由于军事技术保密的需要，WSN-7A 只装备美国海军，严格禁止向其它国家出售。

图 14　MK49 双轴旋转激光陀螺

惯导系统 IMU

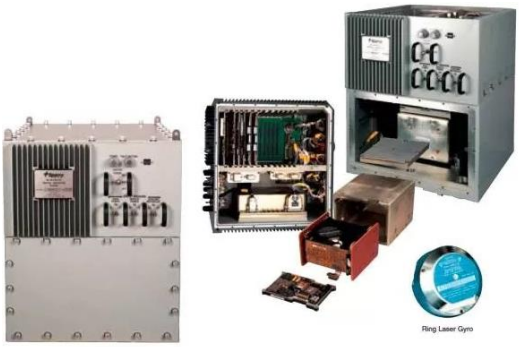

图 15　MK39 Mod3A 系统

从 20 世纪 90 年代初期，斯佩里公司推出了 MK39 系列激光陀螺惯导系统。其中，MK39 Mod3A 系统采用捷联方案，使用霍尼韦尔公司的 3 个 DIG-20 激光陀螺和 QA-2000 石英挠性加速度计，对准时间 4h，导航定位精度 1 n mile/8h。MK39 Mod3C 系统采用单轴旋转调制方案，对准时间 16h，导航定位精度提高到了 1 n mile/24h。该系统已被美国海上补给司令部、海岸警备队和超过 24 个国家的海军选用，主要用于为舰艇平台和火控系统提供位置、姿态、速度和方向数据。在 MK39 Mod3C 基础上发展而来的 AN/WSN-7B 单轴旋转激光陀螺惯导系统改用了霍尼韦尔公司的 3 个 GG1320 激光陀螺，依旧采用 QA-2000 石英挠性加速度计，是 MK39 Mod3C 系统的美军自用型，该系统是美国海军全部水面舰船和潜艇的标准导航装备，早在 2001 年就已经完成了全部航母的换装工作。

航空领域

在航空上，除了惯性制导以外，惯性系统还可以用来测量飞机的**姿态角**（俯仰角、横滚角、航向角）和**角速度**，以它为核心构成的惯导系统和捷联航向姿态系统可以为飞机提供姿态、航向、速度和位置等导航所需的所有参量，也是飞机姿态和航向的测量中心，可以为飞机自动驾驶和自动稳定提供实时信息。

图 16　AN/WSN-7B 单轴旋转激光陀螺惯导系统

图 17　AN/WSN-7 系列船用激光陀螺旋转惯导系统发展图

激光陀螺的快速启动特性决定了它特别适用于军用飞行器的惯性制导，可以充分满足战争环境下各类机型快速反应的需要。从公开的文献报道中可以看到，西方发达国家空军的现役装备大量采用了各种激光陀螺惯导系统，表 1 列出了典型军用机载激光陀螺惯导系统的主要性能指标和应用装备。

表 1　典型军用机载激光陀螺惯导系统的主要性能指标和应用装备

系统型号	装备机型	研制厂商
H-423/E (RLG/GPS)	C-130“大力神”运输机、F-111“土豚”战斗轰炸机、F-16 战斗机、JAS39“鹰狮”战斗机、F-117A 隐身战斗机等	霍尼韦尔公司
LN-93 (RLG/GPS)	F-16“战隼”战斗机、B-2 隐身战略轰炸机、B-52H 轰炸机、“台风”战斗机、F-4“鬼怪”战斗机、F-111“土豚”战斗轰炸机、A-7“海盗Ⅱ”攻击机、C-130“大力神”运输机、MH-53 重型运输直升机、MH-60“黑鹰”特种直升机等	诺格公司
H-764G (RLG/GPS)	F-35 隐身战斗机、F-14“雄猫”多用途舰载战斗机，F-1 战斗机，F-16“战隼”战斗机、AH-64“阿帕奇”武装直升机、AH-64D“长弓阿帕奇”武装直升机等	霍尼韦尔公司
LN-100G (RLG/GPS)	F/A-22“猛禽”隐身战斗机、F/A-18“大黄蜂”多用途舰载战斗机、“全球鹰”无人机、AH-64“阿帕奇”武装直升机、T-45A“苍鹰”高级教练机、EA-6B 电子侦察机、C-130“大力神”运输机、P-3“猎户座”反潜机等	诺格公司
Totem3000 (RLG/GPS)	“幻影”2000 战斗机、米格-21 战斗机、C-130“大力神”运输机、“美洲虎”直升机、“阵风”战斗机等	法国泰雷兹

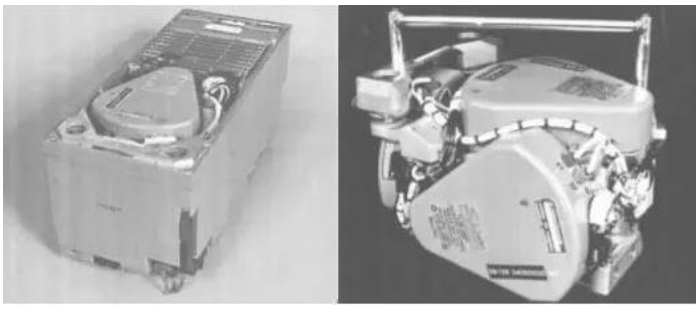

图 18　H-423 激光陀螺惯导系统及其惯性传感器组件（采用 GG1342 陀螺）

除表中型号以外，F-15“鹰”战斗机、B-1“枪骑兵”战略轰炸机、AH-1W“超级眼镜蛇”系列武装直升机、SH-60“海鹰”系列直升机、KC-135 空中加油机、RC-135“铆接”电子侦察机、MC-130E/H“战爪”特种作战飞机、EF-111A“渡鸦”电子战飞机、“灰鹰”无人机、俄罗斯的 Su30MKI 战斗机、印度的 LCA“光辉”战斗机等也都采用了激光陀螺惯导系统。

图 19　LN 100 激光陀螺惯导系统及其惯性传感器组件（采用 ZLG 陀螺）

民用航空主要依赖地面和卫星导航，机载惯导系统只是辅助导航手段，主要用于飞机的航姿测量以满足自动驾驶、起飞和降落的操控，更关注的是惯导系统的经济性（低寿命周期成本）和可靠性。基于激光陀螺惯导系统可靠性高、寿命长、易维护的特点，也使其在民用航空领域得到了广泛应用。表 2 列出了典型民用机载激光陀螺惯导系统及其主要应用机型，波音 B737 和空客 A300 以后几乎所有型号的大中型民航客机都采用了激光陀螺惯性导航与管理系统。

表 2　典型民用机载激光陀螺惯导系统及其应用机型

系统型号	研制厂商	装备机型
LTN 90 (RLG)	诺格公司	A310、A300-600 等
LTN 101 (RLG/GPS)	诺格公司	A380/319/320/321/330/340、RJ100/700、伊尔-96、图 204-200、Saab2000 等
Laseref 系列 IRS (RLG)	霍尼韦尔公司	A300-600、A310/320/330/340、B787/757/767、B737-300/400/500、Embraer170/175/190/195
BINS-85 (RLG)	俄罗斯 Aviapribor 公司	图-204/214/334、伊尔 96-300 等

陆用领域

在陆用领域，惯性系统主要应用于陆用惯导系统、定位定向系统和陆用武器平台的姿态测量与反馈控制，用于各种主战坦克、火炮、火箭炮、防空系统和卫星跟踪站的瞄准与定向，以及为装甲车、前线观察车和炮瞄雷达车等提供三维组合导航和姿态基准。与其它陆用惯导系统相比，**激光陀螺**的可靠性更好，抗冲击、振动、大范围温变的能力更强，可以满足野外复杂地形和恶劣环境的应用需求；在相同的精度下系统的尺寸可以做得更小，而且启动时间短，可维护性好；还可以与里程计等进行组合导航，进一步提高精度，装备的适用性好。

目前，西方发达国家陆用装备使用的激光陀螺惯性系统已经实现了标准化、系列化。美国霍尼韦尔公司的 H-726 型地面导航系统，法国萨基姆公司的西格玛 30、ORION 陆用导航系统等均采用激光陀螺作为核心的姿态敏感元件，属于陆用武器装备的标准惯性系统。已广泛应用于美军的“帕拉丁”自行榴弹炮、“布雷德利”战车、M270 火箭炮、“悍马”测地车、轮式步战车、各种精密测量侦察车等装备。法国的凯撒 155mm 火炮、瑞典的 FH-77B 型牵引榴弹炮和以色列的 M109 式自行榴弹炮也都采用了激光陀螺系统。

图 20　LTN 101 激光陀螺惯导系统（采用 ZLG 陀螺）

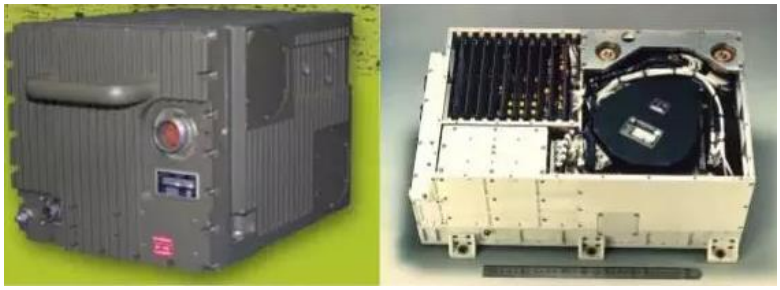

图 21　西格玛 30 和 H-726 型陆用激光陀螺惯导系统

弹用领域

在各种近、中程战术导弹和部分远程战略导弹中，广泛采用激光陀螺来测量导弹的俯仰角、**横滚角**和偏航角，进行导航控制或提供弹体的姿态信息。

在该领域，各种不同精度的激光陀螺惯导系统和姿态测量系统已在数十种应用装备中得到了广泛应用，其中包括：美国公路机动型“侏儒”洲际弹道导弹、“三叉戟”Ⅰ型和Ⅱ型潜射弹道导弹、“战斧”系列巡航导弹（Block Ⅱ和 Block Ⅲ采用诺格公司的 LN-100G 激光陀螺捷联惯导系统，Block Ⅳ采用霍尼韦尔公司的 HG9848 激光陀螺捷联惯导系统）、AGM-86 战略空射巡航弹、ASM-135“阿萨特”反卫星导弹、AGM-65 战术空地导弹、AGM-88“哈姆”高速反辐射导弹、AIM-120 中/远距空空弹、JDAM 联合直接攻击弹药等，欧洲最新的 KEPD350 型巡航导弹、法国的 ANS 超声速反舰导弹也使用了激光陀螺系统。

JDAM 联合直接攻击弹药采用了霍尼韦尔公司的 HGI700 惯性组合单元，内含三个 GG1308 陀螺和加速度计，该陀螺精度不高，但体积小、质量轻，三角形光路的边长只有两厘米，而且价格非常便宜，因此在很多精度要求不高但对体积限制比较苛刻的场合得到了大量应用。

图 22　HGI700 惯性组合单元内部电路结构

航天领域

在该领域，惯导系统主要用于运载火箭和飞船的惯性制导，以及卫星、飞船等航天飞行器的姿态测量与控制。在满足导航定位精度和可靠性的前提下，还需要从体积、质量、功耗等各个方面减轻运载火箭和航天飞行器的负担，特别是在卫星应用上，还有长寿命和免维护要求。

自从 1988 年激光陀螺首次成功应用于运载火箭发射以来，多种激光陀螺惯导系统已在“阿利亚娜”Ⅳ型和Ⅴ型运载火箭、日本的 H-Ⅱ型运载火箭等得到了广泛应用。在美国新一代导弹

防御系统的预警卫星上，利顿公司的**异面腔四频差动陀螺**被用于卫星红外扫描传感器和辅助凝视传感器的稳定系统。在对地定向的卫星中，激光陀螺被用来测量卫星的俯仰角和横滚角，以稳定卫星的运行姿态。在对地成像侦察卫星中，激光陀螺可以适时监测成像系统和卫星的微振动状态，其振动参数和图像同时发送回地面，可以通过后期处理进一步提高图像分辨率。

其它领域

激光陀螺可以为望远镜和卫星通讯天线的瞄准与跟踪控制提供角坐标参数，用于对望远镜和天线**进行姿态控制以便实时跟踪目标**，精度可达亚角秒量级。

基于角分辨率高的特点，激光陀螺可以实现高精度、高分辨率动态测角，可用于光学多面体和光学编码器的校准、旋转体的外部角度测量，还可以在舰船或其他载体的不同位置设置多套测量系统，实现大型水面舰船或载体的细微形变测量。

在航天测量船上，激光陀螺捷联惯导系统可以为船上的各种测控雷达提供高精度的船姿船位信息，用于运载火箭和卫星等空间飞行器的精确跟踪和定轨，完成航天测控任务。

激光陀螺惯性测量单元还在很多需要对载体的姿态进行精确测量与控制的场合得到成功应用，美国波士顿动力公司的 BigDog“大狗”机器人和双足轮式机器人“Handle”都采用了激光陀螺姿态测量系统，用于实现机器人三维姿态的适时精确测量以达到操控躯体运动平衡的目的。

激光陀螺惯性测量单元还可用于深水探测器的自动操控，长距离隧道、地铁、石油钻探与煤矿采掘的定向挖掘控制，地震的分析与探测等。采用超大激光陀螺（如新西兰和德国联合研制的 UG-2 型超大激光陀螺，其环路面积达 834m²)还可以观察微小的地震效应和固体地面潮汐效应，并有望用于测量引力波等几种相对论效应，用于基础物理研究等领域。

结束语

回顾历史，激光陀螺以其独特的优点已经在军事、民用和科研等领域得到了广泛的应用，虽然目前随着惯性技术及其新器件的发展开始面临**光纤陀螺、微机电陀螺、新型原子陀螺**等的竞争，但在海、陆、空、天各应用领域中，激光陀螺仍有广阔的市场，特别是借助多传感器信息融合的组合导航、零速修正和旋转调制等技术，可以大幅度提高激光陀螺惯性系统的导航定位精度，在中高精度应用领域仍然占据了不可替代的地位。