

国际惯性器件发展现状和趋势

Current Status and Development Trend of International Inertial Instrument

西北工业大学自动化学院 秦永元



秦永元

西北工业大学教授、博士生导师。研究方向为惯性导航、卡尔曼滤波和容错组合导航技术。主持基金项目及总装惯性技术预研项目等多项课题研究,发表论文 90 余篇, EI、SCI 索引 30 余篇,出版教材及科技专著 3 部,获省、部级科技成果三等奖 2 项,国防科技进步二等奖 1 项。目前承担总装、二炮预研项目、863 项目、总装预研基金及多项横向协作课题研究。

惯性器件发展概况

1 激光陀螺

1963 年斯派利公司首次成功演示了环形激光陀螺。1982 年霍尼韦尔公司批量生产 GG1342 激光陀螺;采用 GG1320 激光陀螺的捷联惯导 H-764G 被用作标准航空惯导,装备

激光陀螺是当前惯性技术中的主流产品,但光纤陀螺正逐渐成熟,在部分应用中将逐步取代激光陀螺,微电子机械系统(MEMS)陀螺也逐渐在战术级应用中取代激光陀螺和光纤陀螺,这对于战术级激光陀螺和光纤陀螺来说都是极大的挑战。专家认为,将来有可能研发纳米微机电系统(NEMS)、光学 NEMS 甚至生物 NEMS。

了 50 种型号的飞机,所集成的数学平台罗经 MK45 替代了原有的船用罗经;GG1308 则应用于 JDAM,批量很大。在欧美,激光陀螺工艺日臻完善,目前所做的努力主要是降低成本。

2 光纤陀螺(FOG)

美国在 20 世纪 70 年代起研制 FOG,1976 年犹他大学验证了干涉型光纤陀螺(IFOG)测量角速度的有效性。与激光陀螺相比,IFOG 具有光源无需高压,光源频带宽,无背向散射,所以不存在锁区,可通过增加光纤绕制长度来有效降低随机游走误差的特点。但开环型 IFOG 测量范围受限,且刻度系数精度不高,所以,为提高性能,宜采用闭环型。目前,IFOG 在军用及民用领域均得到广泛应用,如无人水下飞行器、无人飞行器、镜头和天线稳定、陆地导

航、航姿系统、陀螺罗经等。

国外很多厂商在研发 IFOG,其中最有影响的是瑞士罗珀格鲁曼,至 2003 年其总产量达 24000 只,精度为 $1^\circ/h$,生产的 LN200 IMU 系列很有名气。目前,IFOG 的性能正逐渐接近激光陀螺,研究结果表明,IFOG 能达到极高精度:漂移稳定性 $<0.0003^\circ/h$,随机游走系数 $<0.00008^\circ/\sqrt{h}$,刻度系数误差 $<0.5\mu m$,所以将适用于高精度望远镜定向、图像系统、天线定向、潜艇的战略级高精度导航等领域。国际上正在研制下一代 IFOG 光纤,即光子晶体光纤(Photonic Crystal Fibers),其特点是:弯曲损失远小于常规光纤,所以体积可做得更小,传输损耗最小达 $0.58dB/km$ 。

3 集成光学陀螺(IOG)

IOG 是做在芯片上的基于萨格

奈克效应的光波导陀螺,采用集成光学和MEMS技术制造,其精度目标是 $0.1 \sim 1^\circ/h$ 。

4 半球谐振子陀螺(HRG)

1980年,Delco(现为瑞斯罗珀格鲁曼)开始研制HRG,石英杯杯口外径30mm,壳外壁镀金属膜,杯口内外套有激振器和电容信号拾取器。石英杯处于谐振状态,当杯体沿对称轴转过某一角度时,杯缘驻波沿反方向旋转过输入角位移的分数值(常值),电容传感器拾取驻波的位移量,则该位移量正比于输入角位移,即陀螺工作在积分状态,此时,陀螺在大动态范围内的刻度系数稳定性和线性度都很好。陀螺也可工作在力反馈状态,使驻波锁定在某一特定位置上,此时陀螺成为速率传感器,在定向应用中具有极高的角分辨率。

HRG重量轻,结构紧凑,无任何活动部件,工作在真空中,Q值高,寿命可达15年,停电后仍可正常工作5min,不受辐射和电磁干扰影响,几乎不受加速度的影响。20世纪90年代中期开始应用于空间飞行器,如空间站等,最著名的是在卡西尼太阳系飞行器中的应用。

5 MEMS 惯性器件

微电子机械系统(MEMS)惯性器件的制造基于集成电路成熟的制造工艺,研发者遍布全球,研发积极性如此高的原因是:可大规模大批量生产,成本控制得很低,低功耗,耐用,更改设计十分灵活。但是由于尺寸微小,所以仪表的灵敏度低,噪声大,温度变化引起的误差大,其影响系数高达 $100 \mu m/^\circ C$ 。2006年达到的精度是,陀螺漂移为 $1^\circ/h$,加速度计偏置误差为 $0.01g$ 的几十倍,这对战术级激光陀螺和光纤陀螺的应用来说是不能满意的。

MEMS陀螺和加速度计有多种结构形式。加速度计主要有:质量摆型、侧向质量位移型、谐振型、隧道

型、静电悬浮型;陀螺主要有:振动梁(调音叉式)型、振动平板(梳式)型、谐振轮型。其中静电悬浮型器件具有悬浮质量和电极,当悬浮质量受静电力驱动旋转产生角动量时,惯性器件即为MEMS静电陀螺。

振动板型陀螺采用平面振动模式来测量角速度,这类陀螺的关键点是如何减小驱动与信号感测间的耦合。Draper/Honeywell联合研制的TFG系列采用折叠梁结构,达到的漂移为 $3 \sim 50^\circ/h(3\sigma)$,温度工作范围 $-40^\circ C \sim +85^\circ C$,耐12000g的冲击,用于增程制导炮弹的制导系统,2005年完成了试射试验。JPL与Boeing Space Systems联合研制的MEMS陀螺则采用四叶苜蓿叶形结构,人称傅科摆陀螺,该陀螺的目标是漂移 $< 0.01^\circ/h$,IMU体积 $< 164cm^3$,重量 $< 0.23kg$,单价 < 2500 美元。瑞斯罗珀格鲁曼采用扭杆支承结构,样机达到的漂移 $< 36^\circ/h$ 。加州大学Berkeley分校采用梳式结构,使驱动与信号测量间的耦合达到最小。

谐振轮式陀螺的振动轮受径向

为 $7.2^\circ/h$,噪声为 $10.4^\circ/h/\sqrt{Hz}$ 。BAE SYSTEMS在1999年试生产,月产量3000只,并应用于MR-TRIGAT反坦克导弹的姿态参考系统,2000年6月作了成功试飞。

6 原子陀螺

原子陀螺的工作原理基于原子干涉仪,也称冷原子传感器。由于典型原子的德波罗意波长比可见光波长短3万倍,并且原子具有质量和内部结构,所以原子干涉仪具有极高的灵敏度、加速度、角速度、电磁场,与其他原子的相互作用将引起原子干涉纹的改变。这意味着原子干涉仪可用来制作最高精度的陀螺、加速度计、重力梯度仪、时间基准等。据称,由原子陀螺构造的惯导纯惯性导航精度可达 $5m/h$ 。

惯性器件的未来应用趋势

表1列出了惯性器件的应用现状和未来趋势。激光陀螺是当前惯性技术中的主流产品,但光纤陀螺正逐渐成熟,在部分应用中将逐步取代激光陀螺,MEMS陀螺也逐渐在战术级应用中取代激光陀螺和光

表1 惯性器件的应用现状和未来趋势

适用对象	陀螺选用	加速度计选用
超高精度导航	原子陀螺,干涉型光纤陀螺	原子加速度计,机械式
远程导航	原子陀螺,干涉型光纤陀螺,半球谐振子陀螺,光波导陀螺	原子加速度计,机械式MEMS
1nm/h 导航系统	光波导陀螺,光量子晶体纤维陀螺	MEMS
战术武器	MEMS	MEMS
民用	MEMS, NEMS	MEMS, NEMS

静电力驱动作椭圆变形振动,当沿轮轴方向存在角速度时,谐振轮沿对称轴作角振动并处于谐振状态,振幅含有输入角速度信息。这类陀螺的优点是激振和信号拾取在同一平面内,缺点是振动质量小,致使刻度系数很小,影响灵敏度。密歇根大学已研制出此类陀螺,刻度系数为 $132mV/(\circ)/s$,角速度分辨率

纤陀螺,这对于战术级激光陀螺和光纤陀螺来说都是极大的挑战。专家认为,将来有可能研发纳微米机电系统(NEMS)、光学NEMS甚至生物NEMS。今后手持式惯性导航仪将成为日用品,而军用惯性系统仍需要高性能惯性器件,在攻克技术难关及成本降低方面将面临更大的挑战。

(责编 依然)