

光纤角速度传感器——光纤陀螺

景敏

(陕西理工学院 机械工程学院, 陕西 汉中 723003)

【摘要】 简单介绍了光纤陀螺作为光纤传导器的原理、特点及应用。

【关键词】 光纤陀螺; 制导; 惯性系统

【中图分类号】 O439 【文献标识码】 A 【文章编号】 1003-773X(2009)01-0027-02

0 引言

光纤陀螺是20世纪70年代中后期研制的一种新型光学陀螺,主要用于控制飞行器的飞行姿态;与传统机械陀螺相比,光纤陀螺具有重量轻、无可动部分、能承受强加速度的作用、启动时间短、感应度高等优点。目前光纤陀螺已成为应用最多、销售额最大、发展最快的光纤传感器。

1 光纤陀螺

1.1 工作原理^[1]

光纤陀螺是一种功能型光纤传感器,基本结构见图1;它由绕在骨架上的多匝单程光纤线圈、激光器、波束分裂器、聚焦透镜、信号检测系统组成。激光器发出的准直光束,经波束分裂器后,分裂成强度相等的两束光;分别由透镜 L_1 和 L_2 ,把它们聚集到光纤线圈的两个端头的端面上;于是这两束光分别按顺时针方向和逆时针方向沿光纤线圈传播。当此系统相对于地球惯性系统有一角速度 Ω 时,由相对论原理可知,它们传播到光纤的另一端头时,所走过的光程是不同的;于是产生了光程差 ΔL ,或相位差 $\Delta\varphi$,此即Sagnac效应。利用加速度参照系统中的广义相对论进行严格的推导可得:

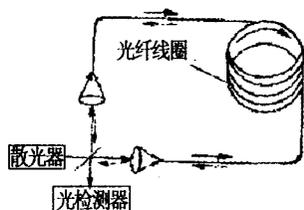


图1 光纤陀螺的原理结构示意图

光器发出的准直光束,经波束分裂器后,分裂成强度相等的两束光;分别由透镜 L_1 和 L_2 ,把它们聚集到光纤线圈的两个端头的端面上;于是这两束光分别按顺时针方向和逆时针方向沿光纤线圈传播。当此系统相对于地球惯性系统有一角速度 Ω 时,由相对论原理可知,它们传播到光纤的另一端头时,所走过的光程是不同的;于是产生了光程差 ΔL ,或相位差 $\Delta\varphi$,此即Sagnac效应。利用加速度参照系统中的广义相对论进行严格的推导可得:

$$\Delta L = LD\Omega / C \quad (1)$$

$$\Delta\varphi = 2LD\Omega / (\lambda_0 C) \quad (2)$$

式中: L 为光纤线圈的光纤总长度; D 为光纤线圈的直径, C 为自由空间光速; λ_0 为自由空间激光波长。由式(2)知,这两束光的相位差与系统的旋转角速度 Ω 成线性关系,因此只要测出相位差 $\Delta\varphi$ 就能确定角速度 Ω 。从理论上说,不断增加光纤长度和扩大光纤线圈的半径或用波长尽可能短的激光,就可不断提高光纤陀螺的灵敏度;但是实际上这是不可能的。因为激光功率是有限的,光纤的传输损耗限制了可能采用的光纤长度;封装条件又限制光纤线圈的半径,光纤本身也限制了可能采用的激光最短波长。因此,在光源、光检

测器、光纤类型已定的情况下,必定存在一个使器件有高灵敏度的最佳光纤长度。

1.2 最佳光纤长度和最小可检测角度

光纤陀螺的光路中,引入 90° 直流相位偏置时,量子噪声极限下的信噪比为:

$$S/N = F(L) \sin^2(\Delta\varphi) =$$

$$F(L) \sin^2(4\pi RL\Omega / (\lambda_0)) = F(L) \sin^2(\beta L\Omega) \quad (3)$$

其中: $F(L) = (\eta h\nu B_0) P_{cw}^2 / 4(P_{cw} + P_N)$, $\beta = 4\pi RL / \lambda_0$

式中: h 为普朗克常量; ν 为激光频率; B_0 为光检测器的带宽; P_N 为光纤中总散射功率; P_{cw} 为光纤线圈中沿顺时针方向传输的光功率:

$$P_{cw} = 0.25P_0 \exp(\alpha L) \quad (4)$$

由式(3)可得:

$$\Omega = \sin^{-1}\{(S/N) [1/F(L)]\}^{1/2} / \beta L \quad (5)$$

由 $(d\Omega/dL)_{L=L_0} = 0$,就可求出 $S/N=1$ 的极限条件下,可用光纤的最佳长度 L_0 。

当光纤中的散射可略去不计时,理想信噪比为:

$$S/N = (\eta P_{cw} \sin(\beta L\Omega) / 4h\nu B_0) \quad (6)$$

因此,当 $S/N=1$ 时,最小可测角速度为:

$$\Omega_{min} = [4h\nu B_0 / \eta P_p(0)]^{1/2} \exp(0.5\alpha L) / \beta L \quad (7)$$

式中: α 为光纤损耗; $P_p(0)$ 为光纤环输入端的初始光功率,由式(5)和(7)可求得最佳光纤长度及 $S/N=1$ 的条件下的最小可测角速度。

2 光纤陀螺的分类

可分为Sagnac干涉型和谐振型两大类。根据解调方式不同,Sagnac干涉型光纤陀螺又可分为开环式和闭环式。

2.1 Sagnac干涉型光纤陀螺(IFOG)

这种光纤陀螺的基本结构是用光纤线圈做成的Sagnac干涉仪,关键在于检测由光纤线圈旋转而引起的非互易相移。

1) 开环干涉型光纤陀螺。这是最简单、最便宜、精度最低的光纤陀螺,主要用作角速率传感器,主要缺点是输出信号不能精确地同它的旋转速率成比例,即所谓的非线性状态。2) 闭环干涉型光纤陀螺。这是较精密、较复杂的光纤陀螺,不久将用于中等程度的惯性导航系统。随着加工工艺的进展,精度更高的传感

器已经设计出,主要问题是制造集成光学系统的技术开发,包括所需的成本适中的相移传感器。

2.2 谐振型光纤陀螺(RFOG)

这是技术上最不成熟的光纤陀螺,有些研究人员认为它能提供最大的潜在精度;它的工作原理比干涉仪型光纤陀螺更接近于激光陀螺的工作原理,技术困难之一在于获得能够提供足够相干辐射的半导体二极管光源。

3 光纤陀螺的应用^[2]

由于光纤陀螺与传统陀螺相比具有许多重要特征(例如启动时间短、重量轻、稳定可靠、宽动态范围、功耗小、成本低)等,在航空、航海、宇航、空中运载器、交通运输、机器人等军用民用的许多领域有着广泛的应用前景。

3.1 光纤陀螺在军事领域的应用

1) 军用直升机、运输机、战斗机、战略轰炸机、以及军用人造卫星等的惯性导航系统。要求用高性能陀螺,容许漂移误差在 $(10^{-2}\sim 10^{-4})\%/h$ 的范围。光纤陀螺不仅能满足捷联系统的大动态范围、高线性度、高稳定度、数字输出的要求,而且价格低廉。2) 战术武器制导和飞行姿势方位基准装设用陀螺。不少空军战术武器系统,诸如改进的中近程空对地导弹、空对空导弹、大面积扫装甲弹等都需要惯性参考系统。3) 战略巡航导弹用陀螺。要求陀螺具有高精度性能要求(容许漂移误差一般为 $0.01\%/h$ 左右),而且要求其体积小、重量轻。一个小而精确的捷联惯性系统将能给战略巡航导弹提供制导、自动驾驶、以及其它参考功能所必须的一切惯性信息。4) 对陆军来说,陀螺主要用于陆地惯性导航系统、惯性大地测量系统。在海军方面,陀螺主要用于一般军舰、攻击型核潜艇和弹道导弹核潜艇的惯性导航系统。

3.2 光纤陀螺在民用领域的应用^[3]

1) 由于作为旋转角速度传感器之一的光纤陀螺具有无可动部分、结构简单,启动时间短,小型,重量轻,功耗低,动态范围宽等特征,适用于汽车工业,并且应用广泛。目前,主要用于在汽车自动导航系统、汽车姿态控制系统、汽车控制仪器。2) 光纤陀螺在列车导航中也有应用。以光纤陀螺为基础的定位系统能够给出列车远行平面轨迹及列车前进过程中的速度、加速度、方位角,方位角速度、侧滚角、俯仰角等信息。这些

信息通过天线发射到漏泄波导,再传输到列车指挥中心,经中心计算机综合性的实时处理,然后传至各次列车、供司机参考执行;从而增加行车的安全度,缩短行车间隔时间,提高车速和运输能力。这就是以光纤陀螺为基础的智能化指挥系统。3) 光纤陀螺还广泛地用于民用运输机、客机、商船、客轮、深井钻探、隧道开掘机、机器人、农用无人驾驶直升机、自动草坪整修机、惯性大地测量系统中。

4 光纤陀螺的优点及发展方向

光纤陀螺之所以受到人们的广泛重视,因为它是一种轻便的固体元件(低损耗光纤及半导体光源)组成的全固态器件,且具有耐振动、耐冲击、工作寿命长、响应速度快、重量轻、成本低等优点,与传统的激光陀螺相比,有过之而无不及。它能检测运动物体的姿态、位置、角度,在宇航、潜艇、车船、机器人等军民领域中都拥有较强的竞争力和广阔的潜在市场。如今,光纤陀螺的性能已有很大改进,与20世纪80年代初相比,角速度的灵敏度提高了上百万倍,并出现了不同类型的光纤陀螺,例如分立元件光纤陀螺,全光纤陀螺、集成光纤陀螺。目前,光纤陀螺已从实验室进入实用阶段,漂移为 $10\sim 100\%/h$ 的短程制导用光纤陀螺和 $1\sim 10\%/h$ 低性能战术用光纤陀螺已投入市场。惯性导航用的高精度光纤陀螺(漂移为 $0.01\sim 0.001\%/h$)的实用化,还有待于光纤中的瑞利散射、克尔效应、温度效应、地磁法拉第等问题的解决。目前,实验室最高水平为漂移 $0.005\%/h$ 。光纤陀螺的研制正向两个方向发展,一种是出于军事目的的惯性导航用高精度光纤陀螺,将漂移降到 $0.01\sim 0.001\%/h$;另一种是一次制导用、漂移大于 $1\%/h$ 的低成本军民两用光纤陀螺。在技术和结构上,共同目标是向长波长、全光纤、集成化方向发展,以利于批量生产、降低成本、提高性能、增强竞争力。光纤陀螺在导航领域市场中的应用潜力很大,随着集成光学、单模光纤、光源、其他元器件技术以及性能的提高,光纤陀螺的应用也会越来越广。

参考文献

- [1] 张志鹏.光纤传感器原理[M],北京计量出版社,1991.
- [2] 张炎华,等.光纤陀螺的研究现状及发展趋势[J],上海交通大学学报,1998,32(8):126-129.
- [3] 张兴周.Sagnac效应光纤陀螺[J],传感器技术,1998,17(1):59-62.

Optical Fiber Palstance Sensor—Optical Fiber Peg-top

JING Min

(College of Mechanical Engineering, Shanxi Institute of Technology, Hangzhong 723003, Shanxi)

[Abstract] This paper briefly introduces the principle, characteristic and application of optical fiber peg-top.

[Key words] Sensor; Optical Fiber Peg-top; Inertial guidance