

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.08

角运动测量及校准方法

彭军

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 角运动测量在旋转机械、飞行器、舰船、车辆、机器人等领域应用非常广泛。本文介绍各类角运动测量仪器的基本原理与应用领域, 阐述了角运动参数计量技术现状及发展趋势, 重点介绍了角运动参数动态校准方法, 并指明了以量子陀螺为代表的新一代角运动参数测量技术成为国家战略关键技术后需要研究的问题。

关键词: 角运动; 测量; 校准

中图分类号: TB922

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0073-08

Angular Motion Measurement and Calibration Method

PENG Jun

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Angular motion measurement is widely used in rotating machinery, aircraft, ship, vehicle, robot and so on. This paper introduces the basic principle and application field of angular motion measuring instruments, expounds the present situation and development of angular motion parameter measurement technology, and emphatically introduces the dynamic calibration method of angular motion parameters.

Key words: angular motion; measurement; calibration

0 引言

刚体的运动有平移和定轴转动两种基本形式。描述平移运动的主要物理参数有位移、速度和加速度; 描述定轴转动的主要物理参数有转角、角速度和角加速度。当描述一个物体在某空间的运动时, 可将其运动分解为其质心沿空间坐标系 3 个轴的平移运动和绕 3 个坐标轴的定轴转动。

各类旋转机械的转动、地球的自转, 飞行器的航向、俯仰和横滚运动, 车辆运动过程中急速转弯, 舰船行驶过程中受巨浪的拍打而引起的俯仰及横向角度变化、机器人各关节的运动等, 都可以用角运动量进行表征。作为一种常见的运动方式, 角运动可分为匀速和非匀速两类: 其中, 非匀速角运动的角速度随时间变化, 也称为动态角运动。近年来, 动态角运动量测量的需求不断增加, 例如: 在飞行控制中, 对惯导系统动态特性要求不断提高; 在发动机和机器人领域的瞬态转动量测量需求也在增加。动态角运动测量技术迅速普及, 角加速度计已经用于飞行器和汽车的控制系统。

线运动计量技术发展的较早, 也更为成熟。线运动计量是为了解决位移、速度、加速度的溯源问题,

从激励信号类型可以分为振动(稳态)和冲击(瞬态)两类, 从量值溯源途径可以分为绝对法(一次法)和比较法(二次法)两类。目前, 国际标准化组织(ISO)已经制订了比较完备的线振动和冲击校准领域的国际标准, 包括采用激光干涉法进行振动和冲击绝对法校准, 振动、冲击比较法校准等。角运动计量是为了解决角位移、角速度、角加速度的溯源问题, 总体而言, 国际角运动的计量体系尚不完善^[1]。

1 典型角运动参数测量仪器

1.1 光栅测角仪(角度编码器)

典型的光栅测角仪采用圆光栅或柱面光栅测量角度。它们的基本结构是将光栅刻划在圆盘或圆柱体上。光栅是由大量等宽等间距的平行狭缝构成, 高精度测角光栅在 360°均布着数万甚至数十万根刻线。光电读数头用于对光栅角位移进行检测, 主要由副光栅、光源、光电转换器件组成。副光栅的刻线间距与主光栅相同, 光栅旋转时光电读数头利用主副光栅相对运动产生的莫尔条纹明暗变化测量角度参量的变化。

1997 年, 德国研制出世界上测角精度最高的光栅, 它的分辨力为 0.01", 测角误差为 0.036"。此后 Heidenhain 制造出光栅数字测角转台, 圆光栅尺寸可达

ϕ 400 mm, 栅线数可达 162000 条, 系统误差在 $\pm 0.15''$ 范围内。

圆光栅广泛应用于机器人、数控机床、航空航天等领域。德国的 Opton 和 Heidenhain、英国的 Renishaw、美国的 Itek, Micro-E 和 GRI 主要生产各类圆光栅编码器。圆光栅既可用于高准确度角位移测量, 也可用于动态角运动量测量。

1.2 转速测量仪

转速测量仪最简单的方式是利用敏感器件在旋转运动过程中每周产生一个脉冲, 通过测两个脉冲间的时间间隔计算转速。敏感器件包括光电式、磁电式、电感电容式等。利用多齿或多标记细分法可以在每周产生多个脉冲, 实现对转速的细分测量, 但其细分数量有限, 瞬时转速的时间分辨力低, 不能满足动态测量需要。转动量测量还常采用测速发电机法, 这种方法利用电磁感应原理, 其输出电压与转速成正比, 缺点是进行动态测量频响范围窄、准确度低。上述方法主要用于匀速转速测量。

1.3 扭振测量仪

扭振亦即扭转振动, 是结构动力学行为的表现形式之一, 一般与其他振动载荷同时出现。扭振会对结构施加额外载荷(振动力矩及其伴随应力), 会引起结构疲劳、振动、噪声、舒适性等方面的问题。扭振的主要表征参数包括扭转角度、角速度、角加速度以及动态扭矩等。扭振测试仪广泛应用于舰船、航空发动机、车辆、机器人等领域, 是监测、检验装备旋转、扭振是否符合设计要求、判断设备健康状态、预测装备零部件寿命的重要手段之一。高端扭振测试仪具有全面的扭转运动学和扭转动力学分析功能。

作为第一代扭振测试仪的典型代表——盖格尔扭振测量仪为全机械结构, 通过模仿惯性速度传感器测量实现扭振拾取和记录。HBM 以及 ONOSOKKI 则直接通过高采样率、高准确度、具有扭转波动测量功能的系列化扭矩传感器实现扭矩的测量。B&K TAC15 使用线性加速度计拾取扭振信号, 来适应扭振的现场测量需求。

德国 Polytec 公司采用 OFV400 激光探头以及 OFV4000 控制器实现物体扭转和角运动的测量。其基本原理是激光干涉仪发出两束测量光束, 其距离固定、平行且已知。通过两束光测量物体表面两点的线速度, 根据两速度的差值与光束的距离之间的关系可计算出被测物体的角速度, 从而实现旋转轴角运动参数的非接触测量。

1.4 陀螺仪

陀螺仪用于角速度的测量。惯性导航系统主要由陀螺和加速度计组成, 因其自主性高、隐蔽性好、抗干扰能力强、全天候、全时空等诸多优点被广泛应用于航空、航天、航海和陆地机动等领域。现代军事装备离不开惯性导航系统。潜艇在水下长时间航行, 飞行器在空间的稳定、摄影测绘、姿态调整, 武装直升机等武器系统的瞄准线和射击线的稳定等都需要通过惯性测量系统实现。惯性导航系统具有初始对准时间长、其自身漂移导致误差积累等缺点, 一度被卫星导航系统所压制。随着国际形势的风云变幻, 卫星导航系统在安全性、可靠性等方面的缺点逐渐显现, 很难保证武器装备在战时的可靠性甚至可用性, 惯性导航系统在军事领域不可替代的地位更加凸显。

陀螺仪是惯性导航系统的核心部件, 其性能直接决定了惯性导航系统的准确度。陀螺仪的发展经历了从以牛顿经典力学为理论基础的转子陀螺仪到三浮陀螺仪, 再到以 Sagnac(萨格纳克)效应为基础的激光陀螺、光纤陀螺, 工作原理和性能指标不断进步。目前, 传统陀螺准确度最高的是静电陀螺(ESG), 其零偏稳定性在 $10^{-6} \sim 5 \times 10^{-4}^\circ/\text{h}$ 范围内; 中高精度零偏稳定性在 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-1}^\circ/\text{h}$ 范围内, 包括激光陀螺(RLG)和光纤陀螺(FOG)等。光纤陀螺发展很快, 霍尼韦尔公司研制的干涉型光纤陀螺(IFOG)零偏稳定性优于 $1 \times 10^{-4}^\circ/\text{h}$, 角度随机游走 $5 \times 10^{-5}^\circ/\text{h}^{1/2}$ [2]。受到原理限制, 传统陀螺仪很难兼顾高准确度和小体积, 其漂移所带来的误差累积也限制了它的应用。

半球谐振陀螺(Hemispherical Resonance Gyroscope, HRG)是一种利用半球壳唇缘的径向振动驻波进动效应来敏感基座旋转的新型固态谐振陀螺, 是目前准确度最高的固体振动陀螺, 具有无高速转子和活动部件、启动时间短、漂移小、过载能力强、频带宽、耐辐射以及体积小、重量轻、功耗低、寿命长、适应复杂环境等优点, 特别适合在空间飞行器上使用。美国是最早研究 HRG 的国家, 诺斯罗普·格鲁门公司的 HRG 成功应用于 MX 洲际导弹; Delco 公司为美国国家航空航天局的哈勃望远镜设计的 Hubble HRG 测量误差为 $0.00008^\circ/\text{h}$ 。2018 年法国赛峰公司的半球谐振陀螺角度随机游走达到 $0.0002^\circ/\text{h}^{1/2}$, 标度因数稳定性为 0.1×10^{-5} (有效值), 零偏稳定性为 $0.0001^\circ/\text{h}$ 。HRG 产品在航天领域应用最多, 涉及天基预警、对地观测、深空探测等。微半球谐振陀螺是半球谐振陀螺小型化的产物, 也是半球谐振陀螺的发展方向。

随着现代物理学的发展,原子冷却、原子操控、激光等技术飞速进步,诞生了以原子物理和量子力学为理论基础的新型陀螺仪:量子陀螺^[3-4]。量子陀螺以碱金属原子、电子和惰性气体原子等为工作介质,具有体积较小和超高准确度等优点,在惯性导航、姿态控制等领域表现出巨大的潜力,一经问世便成为国内外的研究热点。量子陀螺仪可分为自旋式和干涉式两大类,自旋式包括核磁共振陀螺仪(NMRG)、无自旋交换弛豫陀螺仪(SERF)和金刚石 NV 色心陀螺仪;干涉式主要为原子干涉陀螺仪(AIG)。上述的四种量子陀螺仪中,发展最为成熟的是核磁共振陀螺仪,其准确度高、体积小,具有芯片化的前景,美国在二十世纪 70 年代已开展相关技术研究。在美国国防部高级研究计划局(DARPA)对微小型、高准确度陀螺的需求牵引下,诺斯罗普·格鲁门公司近年来取得了积极的进展,研制的陀螺样机零偏稳定性为 $0.02^{\circ}/\text{h}$,标度因数稳定性为 5×10^{-6} ,在此基础上,该公司拟实现零偏稳定性为 $1 \times 10^{-4}/\text{h}$ 、标度因数稳定性为 1×10^{-6} 的惯性测量单元。航天科工集团 33 所自主研发出核磁共振陀螺原理样机,使我国成为全球为数不多的掌握这项技术的国家之一。SERF 陀螺的研究起步稍晚,2011 年,普林斯顿大学的第二代 SERF 研究装置实现了零偏稳定性 $0.0005^{\circ}/\text{h}$ 。北京航空航天大学、北京航天控制仪器研究所等单位也在开展 SERF 陀螺的研究。金刚石 NV 色心陀螺仪利用氮空位中的核自旋或者电子自旋结构和多种荧光辐射体系引起的微弱自旋信息来敏感载体转动信息,近年来进展较慢。原子干涉陀螺仪理论上具有超高准确度,零偏稳定性可以达到 $10^{-10}/\text{h}$,但研究起步较晚、技术难度大。近年来美国斯坦福大学、法国巴黎天文台、德国汉诺威大学等均开展了原子干涉陀螺仪研究。法国巴黎天文台首次实现采用冷原子干涉进行三个方向的加速度以及三个方向的角速度测量。国内中科院武汉物数所、清华大学和北京航天控制仪器研究所等单位也在开展原子干涉陀螺仪研究。

全球卫星导航系统(GPS)存在易受干扰、欺骗及在某些环境下不可用等缺陷,美国一直在寻求 GPS 替补方案,以打破对其高度依赖。由于量子导航系统具有准确度高、抗干扰能力强等特性,具有不依赖于 GPS 实现自主定位的潜力。DARPA 布局开展定位、导航和授时(PNT)相关技术研究,包括适应型导航系统(ANS)、微小型化 PNT(Micro-PNT)、量子辅助感测和读出(QuASAR)、超快激光科学与工程项目(PULSE)以及对抗环境下时空和方向信息(STOIC)等。未来有

望实现不依赖于 GPS,可以达到 GPS 系统定位准确度的微型化量子惯性导航与定位系统。

1.5 角加速度计

角加速度计采用不同的工作原理,获得与角加速度成比例的电信号,目前主要有液环式、压阻式和压电式角加速度计。

分子型液环式角加速度计利用液体双层理论来敏感输入轴方向的角加速度,并输出与该角加速度信号成正比的电信号,它主要由液环及放大器组成。液环内的工作液体作为惯性质量相对于转换器运动时,液体的流动转移“转换器—液体”界面处的电荷,由于“Quincke”效应,液体的惯性运动直接转换为与角加速度相对应的电信号。

压阻式角加速度计中,硅谐振梁式角加速度计是通过位于硅谐振梁上压敏电阻的阻值变化测量角加速度值。当角加速度产生时,压敏电阻阻值的变化与加载在谐振梁上的力成比例。压电式角加速度计其压电陶瓷会在垂直于轴的环向产生一个与角加速度成比例的电荷。

角加速度计可用于惯导系统中,角加速度信息与惯性导航装置所采集的其它信息相互结合,可以使得系统的动力学系数辨识和制导控制一体化设计成为可能;同时,由于角加速度信息在相位上超前于角速度反馈,因此引入角加速度信息的反馈可以提升飞行器/水下航行器抗未知瞬发干扰的能力。

2 角运动参数计量标准

角运动参数可分为静态参数和动态参数。静态参数主要有角位置和匀速旋转运动的转速,其中低转速的发生装置主要为速率转台,主要用于陀螺和惯导系统的测试与校准;动态参数是指随时间变化的量,主要有动态角速度和动态角加速度,主要发生装置有角振动台、摇摆台、角冲击台、突停台、仿真转台等。

2.1 角位置计量标准

角位置计量标准主要有分度台、位置转台或棱体及光电自准直仪组成的测角系统等,可实现对角度分度及角位置定位的计量测试。

多齿分度台是检测角度的一种精密仪器,主要由两个具有相同外径、齿形、齿距的端面齿盘组成的精密角度测量工具,它的检测角度基数为 $360^{\circ}/n$, n 为一周的齿数,常用的有 360 齿、391 齿和 720 齿等,最大分度误差为 $0.2'' \sim 0.5''$ 。

位置转台主要由台体、控制系统、角度测量系统、

控制计算机等组成。目前高准确度位置转台的角位置定位误差小于 $1''$ 。按转台的轴数可分为单轴、双轴和三轴转台。在三轴转台上校准惯性系统,一次安装即可完成航向角、俯仰角和横滚角的校准。对陀螺进行校准时,利用三轴转台提供的精确姿态信息,以地球的重力加速度和自转角速度作为输入量,将转台按照设定的轨迹转动到不同的位置,通过观测陀螺的输出,根据已经建立的数学模型,对陀螺标定因数进行校准,一般有八位置法和十六位置法。

棱体及光电自准直仪组成的测角系统则可以对角度发生装置进行测量与校准,棱体常见的有 23 面棱体和 24 面棱体,分度误差小于 $1''$,光电自准直仪则在小角度范围内误差小于 $0.1''$ 。

2.2 转速计量标准

速率转台是陀螺和惯导系统在设计、研制、生产过程中常用的计量标准之一。按其转轴的数目分有单轴、双轴、三轴。速率转台对陀螺校准是根据转台提供的一系列标准角速度,与陀螺的输出进行比较,由陀螺的误差模型,得到其标度因数(灵敏度)和安装误差角。常用的速率转台的范围为 $0.0001 \sim 1000^\circ/\text{s}$,角速率准确度和稳定性为 5×10^{-5} (360° 角度间隔)。可以满足机械陀螺仪和微机械陀螺仪的计量测试需求。

俄罗斯全俄门捷列夫计量科学研究院(VNIM)建立的角速度标准角速度范围为 $0.00006 \sim 600^\circ/\text{s}$,角速误差为 1×10^{-5} 。

航空工业计量所建有低转速计量标准^[5-6]如图 1 所示,超低速转速标准转台采用气浮轴系支撑,分体式力矩电机驱动,高准确度光栅测角系统反馈控制,实现速率范围 $0.00001 \sim 1000^\circ/\text{s}$,角速率准确度和稳定性优于 2×10^{-6} (360° 角度间隔)。



图 1 超低速转速标准台

2.3 动态角运动计量标准

对角运动量的动态计量需求主要有:陀螺或惯导系统产品的幅频特性、相频特性、带宽、启动时间延迟等,主要的工作计量标准有角振动台、仿真转台、突停台等。ISO 制定的角运动标准有 ISO 16063 - 15 2006《Methods for the calibration of vibration and shock transducers —Part 15: Primary angular vibration calibration by laser interferometry》。我国的动态角运动计量技术规范有 GB/T 20485.15 - 2010/ISO 16063 - 15: 2006《振动与冲击传感器校准方法第 15 部分激光干涉法角振动绝对校准》,GJB/J 6205 - 2008《角振动传感器校准规范》,JJF 1453 - 2014《角运动传感器(角冲击法)校准校准规范》,JJG(军工)184 - 2019《标准角振动传感器》。以下简要介绍各类角运动动态校准方法,并对各种方法的特点进行比较。

2.3.1 角振动标准

角振动标准通过控制角振动激励台产生标准的正弦角运动信号,同时采集标准输出与被校传感器的输出,经过正弦拟合或 DFT 等处理,比较标准信号的幅值与被校传感器输出信号的幅值,得到传感器的灵敏度,比较标准输出信号初始相位角与被校传感器输出信号的初始相位角,得到相位差,实现对传感器幅频特性和相频特性的校准。

德国 PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) 系列角振动标准可实现的频率范围为 $0.4 \sim 1000 \text{ Hz}$,幅值测量不确定度为 $0.3\% \sim 0.5\%$ 。韩国 KRISS (Korea Research institute of standard and science) 系列角振动标准可实现的频率范围为 $1 \sim 800 \text{ Hz}$,幅值测量不确定度为 $0.3\% \sim 0.8\%$ 。

近年来,中国计量科学研究院(NIM)也进行了角振动的研究工作,目前角振动标准可实现的频率范围为 $0.05 \sim 1200 \text{ Hz}$ 。

航空工业计量所建有系列角振动标准,其频率范围为 $0.005 \sim 1000 \text{ Hz}$,幅值灵敏度校准(如图 2)不确定度为 $0.5\% \sim 2\%$,相位测量不确定度为 $0.5^\circ \sim 2^\circ$ 。计量所低频角振动标准采用基于气浮轴系激励源、基于分体式永磁电机的低失真动态角运动反馈控制、通过对光栅信号的解调、非线性补偿将角振动量值直接溯源到角度和时间两个基本量。通过同时采集角振动标准输出并对其进行解算,得到角位移序列 $\varphi_M(t_i)$,与被校传感器在激励作用下产生输出 $u(t_i)$ 进行正弦拟合得到。

$$u(t_i) = A_u \cos \omega t_i - B_u \sin \omega t_i + C_u \quad (1)$$

$$\varphi_M(t_i) = A_\varphi \cos \omega t_i - B_\varphi \sin \omega t_i + C_\varphi \quad (2)$$

由式(1)和式(2)联立求解得到式(3)和式(4)。

$$\hat{u} = \sqrt{A_u^2 + B_u^2} \quad \varphi_u = \arctan \frac{B_u}{A_u} \quad (3)$$

$$\hat{\varphi}_M = \sqrt{A_\varphi^2 + B_\varphi^2} \quad \varphi_s = \arctan \frac{B_\varphi}{A_\varphi} \quad (4)$$

式中: $\hat{u}$ 为角振动传感器输出的幅值, φ_u 为角振动传感器输出在采集时刻的相位角, $\hat{\varphi}_M$ 为标准角位移幅值, φ_s 为标准角位移采集时刻的相位角。



图2 低频角振动台

被校传感器可以是角位移、角速度或角加速度传感器, 标准测量通道为位移信号, 为了用同一标准完成对不同角振动传感器的校准, 需要对角位移、角速度和角加速度依据式(5)~(10)进行换算。

角位移过程为

$$\hat{d} = \hat{\varphi}_M \quad \phi_d = \phi_s \quad (5)$$

角速度过程为

$$\hat{v} = 2\pi f \hat{\varphi}_M \quad \phi_v = \phi_s + \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

角加速度过程为

$$\hat{a} = (2\pi f)^2 \hat{\varphi}_M \quad \phi_a = \phi_s + \pi \quad (7)$$

得到角振动传感器的幅值灵敏度和相位角延迟分别为

角位移传感器

$$S_d = \frac{\hat{u}}{\hat{d}} \quad \Delta\phi = \phi_d - \phi_u \quad (8)$$

角速度传感器

$$S_v = \frac{\hat{u}}{\hat{v}} \quad \Delta\phi = \phi_v - \phi_u \quad (9)$$

角加速度传感器

$$S_a = \frac{\hat{u}}{\hat{a}} \quad \Delta\phi = \phi_a - \phi_u \quad (10)$$

由此, 可以获得各类传感器的幅值灵敏度和相移^[7]。

2.3.2 角冲击标准

角冲击标准通过控制角冲击激励台产生一定脉冲持续时间和峰值的半正弦激励, 由激光干涉仪与柱状圆光栅组成的标准测量系统, 利用高速数采模块同时采集标准测量信号与被校传感器信号, 解算出标准信号波形和被校传感器输出波形, 比较两信号的峰值得到传感器的幅值灵敏度。

德国 PTB 从上世纪九十年代开始一直在进行角冲击标准研究, 但目前的能力和指标没有公开的报道。其他国家计量机构也未见相关报道。

航空工业计量所角冲击标准如图3, 其技术指标峰值角加速度为 $500 \sim 15000^\circ/\text{s}^2$, 脉冲宽度为 $5 \sim 30 \text{ ms}$, 测量不确定度为 2% 。角冲击标准激励源由台面、空气轴承、光栅、电机等组成。控制系统以计算机为核心, 主要有两条控制线路: 一路是由主控制器、主轴电机、光栅主控系统; 另一路是由从控制器、滑环电机、编码器组成的跟随系统。激光干涉仪与柱状圆光栅组成标准测量系统, PXI 总线数据采集系统对标准测量系统输出信号和被校传感器输出信号进行采集, 将角冲击量值溯源到角度和时间两个基本量^[8]。



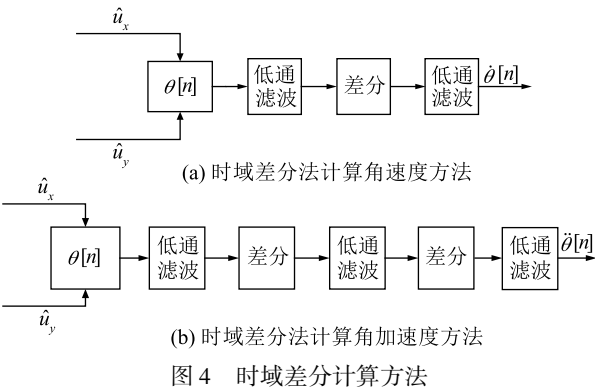
图3 角冲击标准

角冲击标准在不同的半正弦波脉冲持续时间和峰值状态下, 对角运动传感器进行校准^[9]。被校角运动传感器刚性安装在角冲击台台面上, 标准装置控制系统根据校准的要求, 控制角冲击台给出相应的半正弦激励。采用光栅作为角运动量测角元件, 其输出的电压信号 $\hat{u}_x$ 和 $\hat{u}_y$ 被数据采集系统数字化后形成 2 个离散信号系列 $\hat{u}_x[n]$ 和 $\hat{u}_y[n]$ 。被测角位移可由公式(11)计算得到^[10]。

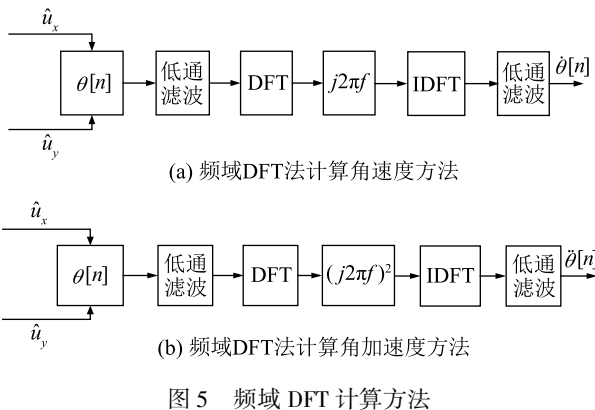
$$\theta[n] = \frac{g}{2\pi} \left(\arctan \frac{\hat{u}_y[n]}{\hat{u}_x[n]} + k\pi \right) \quad (11)$$

式中: $\theta[n]$ 为角位移, rad; $\hat{u}_x[n], \hat{u}_y[n]$ 为光栅读数头输出信号, V; n 为 $0, 1, 2, 3, \dots$, 离散信号系列变量; g 为光栅栅距, rad; k 为整数。可采用时域差

分法对角位移信号一次差分得到角速度，数据处理过程如图 4(a)所示；对角位移信号两次差分得到角加速度，数据处理过程如图 4(b)所示。



也可用频域 DFT 法计算得到角速度，数据处理过程如图 5(a)所示；用频域 DFT 法计算角加速度数据处理过程如图 5(b)所示。



比较被校传感器的输出与标准装置的输出，得到被校角运动传感器的灵敏度。

公式(12)可计算出角加速度传感器灵敏度。

$$S_{\ddot{\theta}} = \frac{\hat{u}_{\ddot{\theta}}}{\ddot{\theta}} \tag{12}$$

式中： $S_{\ddot{\theta}}$ 为角加速度传感器的角冲击灵敏度， $V/(\text{°} \cdot \text{s}^{-2})$ ； $\hat{u}_{\ddot{\theta}}$ 为角加速度传感器输出的电压峰值， V ； $\ddot{\theta}$ 为输入角加速度峰值， $\text{°}/\text{s}^2$ 。

公式(13)可计算出角速度传感器灵敏度。

$$S_{\dot{\theta}} = \frac{\hat{u}_{\dot{\theta}}}{\dot{\theta}} \tag{13}$$

式中： $S_{\dot{\theta}}$ 为角速度传感器的角冲击灵敏度， $V/(\text{°} \cdot \text{s}^{-1})$ ； $\hat{u}_{\dot{\theta}}$ 为角速度传感器输出的电压峰值， V ； $\dot{\theta}$ 为输入角速度峰值， $(\text{°})/\text{s}$ 。

公式(14)可计算出角位移传感器灵敏度。

$$S_{\theta} = \frac{\hat{u}_{\theta}}{\theta} \tag{14}$$

式中： S_{θ} 为角位移传感器的角冲击灵敏度， $V/(\text{°})$ ； $\hat{u}_{\theta}$ 为角位移传感器输出的电压峰值， V ； θ 为输入角位移峰值， (°) 。

3 采用不同激励信号对陀螺进行校准

不同类型的激励信号可以获得被校传感器的不同的计量特性，可以根据用户的测试需求选择激励信号的类型及角运动计量标准装置。本文采用超低转速标准装置、角振动标准装置、角冲击标准装置对同一支光纤陀螺进行校准。

3.1 超低转速标准

采用超低转速标准对光纤陀螺校准，校准结果如表 1，光纤陀螺在不同角速度下的标定曲线如图 1 所示。

表 1 某光纤陀螺静态输出校准结果表

标准角速率/ ($\text{°} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测传感器 输出值/mV	灵敏度/ ($\text{mV} \cdot (\text{°} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$)	标准角速率/ ($\text{°} \cdot \text{s}^{-1}$)	实测传感器 输出值/mV	灵敏度/ ($\text{mV} \cdot (\text{°} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$)
1	6.6669	6.67	-1	-6.5627	6.56
5	33.1273	6.63	-5	-33.0025	6.60
10	66.1962	6.62	-10	-66.0415	6.60
50	330.049	6.60	-50	-329.9434	6.60
100	655.833	6.56	-100	-655.3775	6.55
150	972.9317	6.49	-150	-972.7992	6.49
200	1277.945	6.39	-200	-1278.065	6.39
250	1567.376	6.27	-250	-1567.476	6.27
300	1837.557	6.13	-300	-1837.694	6.13

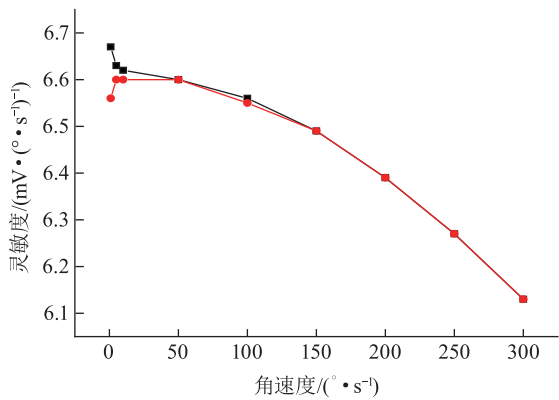


图6 光纤陀螺静态标定曲线图

从表1与图6中可以看出：随着角速度的提高，该传感器输出灵敏度有所下降，在角速率小于50°/s时传感器灵敏度为6.6 mV/(°·S⁻¹)，最高角速率时，其输出灵敏度系数为6.1 mV/(°·S⁻¹)，正反转的对称性除1°/s，其余可达0.45%。

3.2 低频角振动标准

采用低频角振动台对该光纤陀螺进行校准，校准结果见表2所示，其幅频特性和相频特性曲线见图7所示。

表2 某光纤陀螺不同频率下正弦激励校准结果表

序号	给定频率/ Hz	灵敏度系数/ (mV·(°·s ⁻¹) ⁻¹)	相移/ (°)
1	1	6.61	0.05
2	2	6.60	0.22
3	5	6.58	0.40
4	8	6.58	0.69
5	10	6.59	0.89
6	16	6.59	1.48
7	20	6.63	2.01
8	30	6.61	2.84
9	40	6.63	3.68
10	49	6.70	5.32
11	60	6.59	5.62
12	70	6.57	6.00
13	80	6.68	7.00
14	90	6.73	8.14
15	100	6.62	9.08

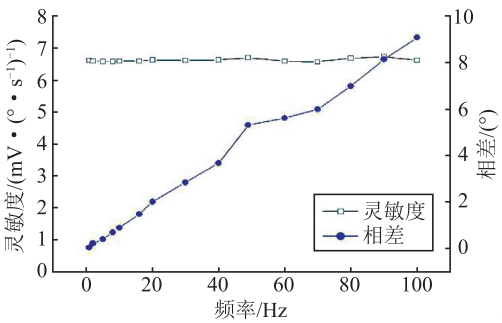


图7 某光纤陀螺幅频与相频特性

从表2和图10中可以看出，由于该传感器的频带足够宽，在被校频率点上其灵敏度系数没有明显衰减。校准时各频率点的最大速度一般在20~100°/s之间，其输出的灵敏度系数在6.6 mV/(°·S⁻¹)附近，与静态校准时得到的灵敏度系数有较好的一致性。陀螺的相移随频率增加而增大，在100 Hz时，相移达到9°。

3.3 角冲击标准

用角冲击标准对该光纤陀螺进行校准，校准结果见表3和图8所示。

表3 某光纤陀螺不同脉宽下对的校准结果

序号	脉宽/ms	灵敏度系数/(mV·(°·s ⁻¹) ⁻¹)
1	5	6.646
2	10	6.611
3	20	6.537
4	30	6.527
5	50	6.521
6	80	6.513
7	100	6.515
8	150	6.502

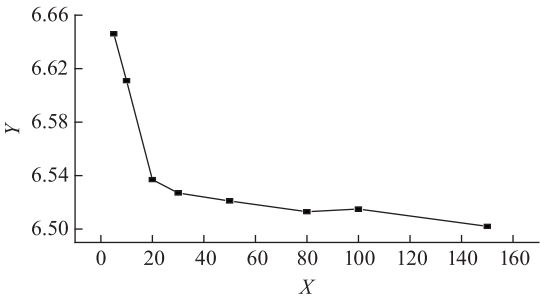


图8 不同脉宽下传感器的输出灵敏度曲线图

图9给出了陀螺在8 ms脉宽下的校准波形图，可以看出陀螺的输出波形比标准装置的输出波形在时间上有一滞后，滞后时间2.1 ms。

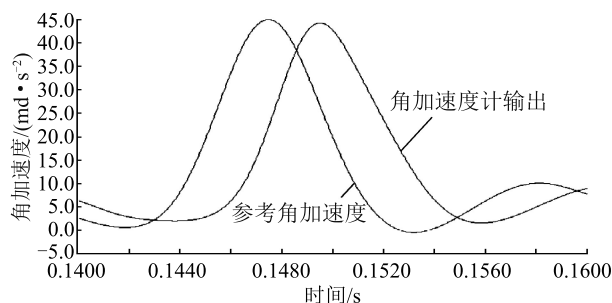


图9 陀螺角冲击校准测试图

通过利用不同的校准装置、采用不同的激励方法对同一只传感器的输出特性进行分析比较,不难看出:在不同的激励方式下,传感器的输出有不同的表现形式;在陀螺的输出频带足够宽的情况下,几种激励下得到的灵敏度系数相近。通过校准,获得陀螺灵敏度的变化规律、不同频率下传感器的幅频和相频特性、不同脉宽下的输出滞后特性,对陀螺的研制及使用有着极为重要的作用。

4 结束语

近年来角运动参数测量的需求不断增加,重要性更加凸显。深空探测、飞行器长航时飞行、不依赖于卫星导航系统(GNSS)的自主导航等需要提高角运参数测量水平;自动驾驶、高铁、机器人等对角运动参数测量系统的动态特性要求不断提高。以量子陀螺为代表的新一代角运动参数测量技术已经成为国家战略关键技术,需要研究角运动参数校准新原理、新方法,满足科学技术发展和国防安全的需要。

参 考 文 献

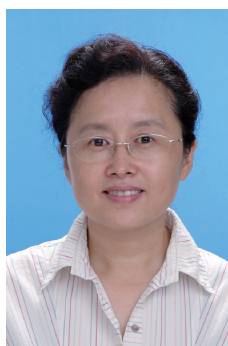
- [1] 彭军,何群,孙丰甲. 动态角运动校准技术综述[J]. 计测技术, 2008, 28(5): 1-4, 9.
- [2] 薛连莉,陈效真. 2016 年国外惯性技术发展回顾[J]. 导航与控制, 2017.

- [3] 邵哲明. 磁导引型原子干涉陀螺仪现状和发展趋势[J]. 光学与光电技术, 2018, 16(06): 82-88.
- [4] 张淋,高伟,李倩. 冷原子干涉陀螺仪实现及其性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(07): 11-18.
- [5] 彭军,何群,薛景峰,等. 低频标准角振动台[J]. 计测技术, 2005(06): 46-48.
- [6] 薛景峰,彭军,李新良,等. 角振动校准装置研究[J]. 航空学报, 2015, 36(03): 962-969.
- [7] 国防科学技术工业委员会. GJB/J 6205-2008 角振动传感器校准规范[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2008.
- [8] Li Z, Peng J. Development of a Primary Angular Shock Calibration System[C]//10th International Conference On Vibration Measurements By Laser and Noncontact Techniques, Italy, 2008.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1453-2014 角运动传感器(角冲击绝对法)校准规范[S]. 北京: 中国质检出版社, 2014.
- [10] Li Z, Peng J. Calibrating Angular Transducer Using Sinusoidal and Shock Excitation[C]//10th International Conference On Vibration Measurements By Laser and Noncontact Techniques, Italy, 2008.

收稿日期: 2021-03-20

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJL2014205A005)

作者简介



彭军,女,研究员,专业总师,角运动校准试验室负责人。主要从事角运动、惯性/卫星导航、转动惯量等计量测试领域技术研究、测试仪器设备研制等工作。主持完成多个重点项目以及横向课题的科研工作。主持建立了多项最高标准装置,多项研究成果填补了国内空白,在动态角运动计量测试、卫星导航系统动态校准领域具有国际一流水平。获多项科学进步奖,获发明专利授权

12 项,主持完成多项计量技术规范及标准,发表论文 20 余篇,培养硕士研究生 9 名。享受政府特殊津贴。