

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.01.01

角振动校准装置激励源的现状与发展

吕华溢, 张大治, 杨军

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 针对惯性器件性能评价的需求, 说明了研究角振动校准装置的必要性。根据现有角振动校准装置的构成, 详细分析和总结了各种角振动激励源的工作原理、特点和不足, 列举了国内外部分典型系统的主要性能参数; 介绍了标准角振动测量系统的主要实现方法。根据角振动校准装置激励源的相关研究现状, 分析、探讨了其今后的若干发展趋势; 所得出的展望和结论可供该领域研究人员作为参考和借鉴。

关键词: 角振动; 角振动激励; 角振动激励源; 角振动校准装置

中图分类号: TH936

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2017) 01-0001-05

Present Status and Trend of Excitation Sources of Angular Vibration Calibration Devices

LV Huayi, ZHANG Dazhi, YANG Jun

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

Abstract: The necessity of studying angular vibration calibration device was presented based on the demand of inertia measurement unit's performance evaluation. According to the composition of the existing angular vibration calibration device, we analyzed and concluded the working principles, characteristics and drawbacks of every approach of angular vibration excitation sources in detail. The main performance indices of some typical devices in domestic and abroad were listed. The primary implementation of standard angular vibration measurement system was introduced. According to the current state of related research in excitation sources of angular vibration calibration devices, some development tendencies in future were analyzed and explored. The prospects and conclusions provided reference for researchers in this field.

Key words: angular vibration; angular vibration excitation; excitation source of angular vibration; angular vibration calibration device

0 引言

振动校准是计量科学中的一个重要部分, 其包含有线振动和角振动两大类形式。对于线振动的计量研究工作始于 20 世纪 50 年代^[1], 迄今国内外已进行了充分的研究形成了 ISO5347 和 ISO16063 系列国际标准^[2,3], 并建成多套计量标准装置用于力传感器和加速度计的动态特性校准领域^[4]。而以角度往复运动为特征的角振动校准发展则相对滞后, 工业上采用直线振动量值除以回转半径计算角振动信息的方法已不能满足高频、高精度角振动量的测量需求。随着对角加速度计、陀螺仪等惯性器件性能评价需求的发展, 角振动激励源的研究从 20 世纪 70 年代开始起步^[5,6]并日益受到重视, 目前国内外已经建成若干角振动校准装

置^[7]。本文根据目前可搜集到的资料, 主要对角振动激励源的国内外现状、实现技术等在此进行总结, 并探讨了其今后的研究趋势和发展方向。

1 国内外现状

1.1 角振动校准装置的构成

现有角振动校准装置主要是由标准角振动激励源和测量系统两大部分构成, 如图 1 所示, 其工作原理为: 将信号发生器输出的所需频率、幅值标准正弦信号经过功率放大器放大后作为激励, 驱动角振动台做旋转往复运动; 标准角振动测量系统一般采用基于光学精密测量方法的传感装置构成, 将测量系统的输出信号作为被测角振动标准信号; 通过将安装在角振动台上的被校传感器输出信号与标准信号进行比对处理, 即可得到被校传感器在特定频率正弦激励下的灵敏度和相位响应结果, 从而实现对被校传感器的角振动校准。因此, 标准角振动激励源应具有角运动幅值范围大、振动频率范围宽、波形失真度小的特点; 而标准

收稿日期: 2016-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51475060)

作者简介: 吕华溢 (1980-), 男, 工程师, 博士, 研究方向为多维力、加速度测量。

角振动测量系统应在尽量减小对被测角振动激励源扰动的基础上,具有响应频带宽、量值溯源性好、工作稳定可靠的特点。以下将详细分析和总结各种角振动激励源的原理、特点和不足,并对常用的测量装置进行介绍。

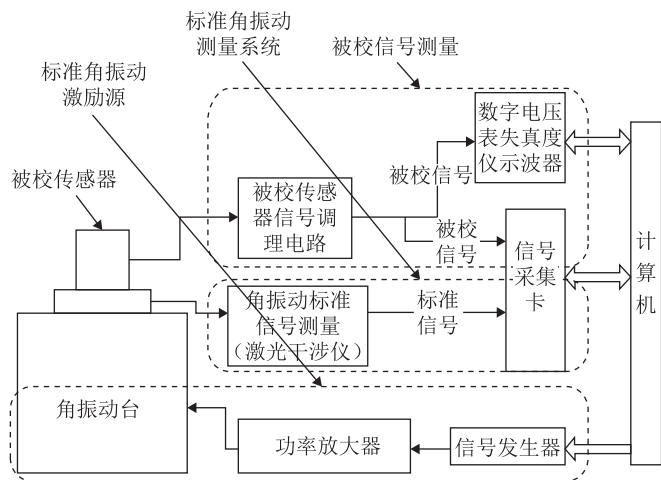


图 1 角振动校准装置的构成

1.2 角振动激励源

标准角振动激励源是构成角振动校准装置的关键技术,其提供了角运动往复激励,目前已有的研究分别从计量校准装置和振动试验台两大方向进行展开。由于角振动表现为圆周往复运动的形式,因而对于角振动激励的产生方法最初以力矩电机作为驱动源,并且衍生出非电机结构的电磁力驱动方式;而振动实验台和多维角振动激励系统则采用液压装置作为驱动源。

1.2.1 力矩电机驱动方式

力矩电机是最易也是最先被采用作为角振动激励源的驱动方式,其本身具有响应速度快(机电时间常数约为 15 ms)、输出力矩恒定、输入电流控制线性度好及可直接联接负载等优点,因此适用于低转速、大力矩的场合。Wuilfert 公司、航空精密机械研究所、航天控制仪器研究所、九江精密测试技术研究所等单位都采用力矩电机开发了工作频率在 250 Hz 以下的低频角

振动激励转台、摇摆台等产品。表 1 列出了典型产品的主要性能参数。由于力矩电机旋转结构的静摩擦扰动、换向装置的电气干扰以及电机本身的过零“死区”现象,这些都使得力矩电机作为角振动激励源时会产生低频段的输出力矩不平稳,导致闭环控制出现滞滑、爬行等现象^[8,9]。因此,对采用力矩电机驱动方式的标准角振动激励源在运动精度提升和波形失真的控制上提升较为困难。

1.2.2 电磁力驱动方式

鉴于力矩电机驱动方式存在的不足,国内学者经过论证后认为其不适用于工作频率超过 500 Hz 的高频角振动台开发^[6],需要引入非电机驱动方式。根据线振动校准装置所采用的基于洛伦兹效应的电磁驱动方式工作原理,目前主要有盘式结构、杯式结构和框式结构三种非电机结构的电磁力驱动方式角振动激励源被提出^[7,10,11]。

盘式结构为德国联邦物理技术研究院(PTB)和韩国国家计量院(KRISS)所采用^[7],其结构设计为在四个垂直分布的邻接极性相异磁场上方放置有一个平板型动圈,在动圈上以多层印刷电路板工艺制作了驱动线圈;当线圈上通有正弦变化的电流时,动圈受到洛伦兹力的推动实现往复圆周运动,进而通过中心轴带动安装台面产生正弦角振动激励。盘式结构具有装置实现简单、工作频率范围宽、波形失真小的优点;但受限于动圈盘式平板结构难以增加导线数量,使得负载能力较小,并且盘式动圈和中心轴系的整体扭转刚度不易提高,进而限制了角振动激励源工作频率的进一步提升。

杯式结构为 Derritron 公司和长城计量测试技术研究所电磁力驱动式高频角振动台中所采用^[6,11],其结构形式为套在主轴上的杯式动圈沿圆周方向垂直安装有内外两组驱动导线组,并通过软导线将二者相互串联以实现内圈和外圈所有驱动导线的电流方向一致;磁场方向为指向或背向主轴的径向;当驱动导线组内流过正弦变化的电流时,在洛伦兹力作用下杯式动圈

表 1 单轴激励转台的主要性能参数

生产厂家	型号	负载能力/kg	工作频率/Hz	最大角加速度/(°·s ⁻²)	幅值/(°)	波形失真度/%
航空 303 所	TDC	10	0.1~150	20000	20	<10
船舶 6354 所	TZ-300	15	≤200	45000	—	5
航天 13 所	TBL-SV1103-A	15	≤250	8000	10	<10
	TBL-SV1103-D	50	≤100	2000	10	<10

将通过主轴带动安装台面产生正弦角振动激励。杯式结构克服了盘式结构的一些不足，但实现较盘式结构复杂；软导线对于角振动激励波形存在非线性影响，使得杯式结构不适宜应用在大位移幅值(大于 1°)和小角加速度情况的角振动激励场合^[11,12]。

框式结构为 IMV 公司和长城计量测试技术研究所 在电磁力驱动式高频角振动台研究中采用^[6,10]，其结构形式采用驱动导线环绕安装在圆柱型主轴的框式结构上，并置于同一磁场中；以主轴对称，两侧驱动导线垂直部分的电流方向相反；当驱动导线内流过正弦变化的电流时，受洛伦兹力作用框式结构将通过主轴带动安装台面产生正弦角振动激励。框式结构的整体装置实现简单、驱动导线绕制方便，工作磁场分布均匀，波形失真小于杯式结构；驱动导线和中心轴系的整体扭转刚度高，有利于大负载高频角振动激励的实现。

以上对采用电磁力驱动方式作为角振动激励源的三种不同结构进行了分析和比较，在表 2 中列出了这几种结构的主要性能参数。

表 2 不同结构电磁力驱动方式的主要性能参数

结构类型	负载能力/kg	工作频率/kHz	最大角加速度/(°·s ⁻²)	幅值/(°)	波形失真度/%
盘式结构(PTB)	0.05	0.3~1	80000	—	<2
杯式结构	1	0.7	—	<1	<5
框式结构	1	0.6	100000	15	2

表 3 航天 13 所研制的多维角振动台主要性能参数

结构类型		负载能力/kg	工作频率/Hz	最大角加速度/(°·s ⁻²)	波形失真度/%
二维角振动台	TBL-DS 2202-A	30	100, 50 (内, 外)	6000, 2000 (内, 外)	—
	TBL-DS 2202-D	50	40, 20 (内, 外)	1500, 1000 (内, 外)	—
三维角振动台	TBL-TV 3303-A	35	100, 50, 40 (内, 中, 外)	8000, 4000, 2500 (内, 中, 外)	10
	TBL-TV 3303-C	60	40, 30, 15 (内, 中, 外)	2000, 1500, 1000 (内, 中, 外)	10

1.2.3 液压装置驱动方式

采用力矩电机驱动方式的角振动激励源其负载能力一般为几十千克，而电磁力驱动方式则更小，因而这两种驱动方式很难满足多维角振动激励系统和大负载能力的需求。而液压装置做为一种成熟的伺服技术

具有体积小、负载能力强、控制方便的特点^[13]，目前用于角振动激励源的液压驱动方式主要有低速液压马达和电液推杆两大类。

低速液压马达与力矩电机的工作方式类似，作为角运动激励源，具有输出力矩大、低速工作稳定、可直接联接负载等优点，主要用于为多维角振动台提供驱动源。国内的航空精密机械研究所和航天控制仪器研究所等单位都开发了采用液压马达驱动的多维角振动转台、摇摆台等产品用于惯性器件性能的测试和校准。表 3 列出了航天 13 所研制的几种典型多维角振动台的主要性能参数。由于多维角振动台的运动实现机构复杂、各轴负载能力不同，且各维之间在运动时存在耦合干扰，使得这类角振动台的各维工作频率并不相同，一般外轴最低而内轴最高。

以电液推杆产生运动激励的角振动激励源通常采用 Stewart 结构的实现方式，该种并联机构的每个支腿由电液推杆构成，并通过 Stewart 结构的位姿逆解控制每个支腿的位移量进而带动安装台面产生位移或角度转动变化；当对电液推杆施加正弦变化的信号时，安装台面也将产生相应的正弦振动激励。Stewart 结构具有可同时实现 6 个自由度的线振动与角振动多维激励复合加载，负载能力达数千千克的优点；但受限于并联机构的空间结构形式，此类角振动激励源的工作频率不高(小于 500 Hz)，主要应用于大负载、大体积和中低频的振动激励场合；并且六个电液推杆支腿的精确同步控制也是技术难点。MTS 公司、航空精密机械研究所和航天控制仪器研究所等单位都开发了采用 Stewart 结构的多维振动激励装置，表 4 列出了此类多维振动台的主要性能参数。

以上对目前角振动激励源采用的几种主要驱动方式进行了工作原理和结构的说明，并总结了相应的优势和不足。根据各种驱动方式的特点从频率和负载能力两方面性能要求出发在表 5 中对不同驱动方式激励源的适用场合进行了梳理归纳。

1.3 测量装置

标准角振动测量系统用于实现对正弦角运动激励的测量，可采用包括测速发电机、旋转编码器等设备的电学测量方法，也可采用基于光学手段的角度编码器、衍射光栅和激光干涉仪等设备^[6]。由于采用光学方法可直接溯源至长度和时间基本量实现绝对校准，因此对于角振动测量现在主要以光学方法为实现手段。

角度编码器是基于莫尔条纹干涉原理实现对角运动的测量，随着对圆光栅刻线数的提高，目前编码器

表 4 Stewart 结构振动台的主要性能参数

生产厂家	型号	负载能力/kg	工作频率/Hz	最大角加速度/(°·s ⁻²)	幅值/(°)
MTS	353.10	500	0.8~500	—	4,6,4,1,3,5 (R,P,Y)
	354.20	2000	0.8~100	—	9,8,6 (R,P,Y)
航天13所	TBL-HE	1000	—	200,200,200 (R,P,Y)	23,23,25 (R,P,Y)
	6602-A				(R,P,Y)
	TBL-HE 6602-C	15000	—	160,160,160 (R,P,Y)	25,25,28 (R,P,Y)

注：R 为滚转；P 为俯仰；Y 为偏航。

表 5 不同驱动结构激励系统的适用范围

负载能力/kg	频率范围/Hz	驱动结构激励系统
<1	<100	力矩电机/电磁力方式
	100~500	力矩电机/电磁力方式
	>500	电磁力方式
1~10	<100	力矩电机
	100~500	力矩电机
	>500	—
10~100	<100	液压马达
	100~500	—
	>500	—
>100	<100	电液推杆
	100~500	电液推杆
	>500	—

的角度分辨率可达到 0.02"，其主要适用于测量由中心轴带动实现角振动激励的驱动装置。衍射光栅方式是由贴在角振动校准装置安装台旋转面上的光栅和外置激光器构成，已经逐步成为角度位移测量的主流方法^[14]；激光干涉仪将激光波长作为长度测量基准，采用基于分光干涉原理的测量干涉条纹数量方法或基于多普勒效应的频移测量方法。后两种光学测量方式可用于前述各种驱动结构的角振动激励源。虽然这几种光学装置已经具有相当的测量精度，但是针对高频小幅值角振动、中心轴的横向振动影响等还需进行新的测量技术和方法研究。

2 发展趋势展望

通过对角振动校准装置激励源的研究现状调研，可以发现角振动校准装置从研究初衷到性能提升都是

伴随着惯性传感器标定、振动测试等需求而逐步发展的；各种激励源结构的不断发展、先进测量方法的应用二者共同推动了角振动校准性能的提升。由于角振动中物体惯性的影响，不难发现激励源负载能力大小和工作频率高低二者之间存在着矛盾，负载能力决定了角振动校准装置所能提供的最大角加速度和最大被校传感器重量，工作频率决定了角振动校准装置所能提供的传感器幅、相频特性动态校准范围，这二者之间的矛盾关系一直是角振动激励源研究和突破的基本出发点和目标。由于角振动校准装置本身的激励和测量两部分涉及到机械、电磁、光学等多学科交叉领域，又和被校准传感器的研究发展相关联。因此，对角振动校准装置激励源今后的发展趋势应关注以下几点：

1) 与被校准传感器的发展趋势相结合。当今惯性器件在引入 MEMS 工艺后，使得其发展呈现体积、质量微小化趋势^[15,16]，这对于角振动激励源的负载能力要求将有所降低，从而为提高工作频率范围提供了有利条件。Actronic 公司已针对 MEMS 工艺惯性器件的测试推出桌面单轴角振动台，可实现最大 60000°/s² 角加速度，2.5 kHz 的最高工作频率，负载能力为 0.9 kg^[17]。

2) 针对特别测试需求进行更有效的激励装置设计。目前角振动激励源研究主要针对惯性器件测试和计量基准展开，对于负载能力或工作频率有特殊要求的应用领域还需进一步研究。北京强度环境研究所针对大尺寸、大质量物体设计了采用两个电磁驱动方式线振动台实现角振动激励的多激励单轴实验形式^[18]；中国地震局工程力学研究所开发了用于地震转动加速度计校准的双磁路伺服式低频角振动台，可实现最大 20000°/s² 角加速度和 0.0623~40 Hz 的工作频率范围，负载能力达到 17.5 kg^[19]。

3) 针对现有角振动校准装置所采用激励源存在的不足之处进行改进。角振动激励源能够产生波形失真小、频率准确的标准正弦激励是实现角振动校准的关键和保障校准精度的前提。但是现有的几种激励源实现方式存在力矩电机低频输出不平稳、杯式电磁力结构低频波形失真大、多维角振动台的运动维间耦合干扰等问题，这些都是提高角振动校准装置精度所必须关注和解决的。

4) 多维线角振动一体化校准装置的研究。Stewart 结构的多维振动激励装置既可实现六自由度的线和角振动单独激励又可实现线、角振动的多维复合激励加载，目前 Stewart 结构的振动试验台已经较为成熟，将其作为校准装置振动激励源并配合相应的测量装置有

望在一台设备上实现对多维运动传感器的全部线、角振动校准功能。

3 结论

本文对角振动校准装置激励源当前的研究现状进行了分析、总结,并展望了今后的发展趋势,得出以下主要结论:

1)角振动激励源是构成角振动校准装置的两大关键部分之一,角振动激励源目前主要由三种驱动方式实现,其决定了角振动校准装置的负载能力和工作频率范围。

2)角振动激励源负载能力大小和工作频率高低二者之间存在着矛盾,其一直是角振动校准装置激励源研究与突破的基本出发点和目标。

3)根据角振动校准装置的应用目的并结合惯性器件的体积、质量微小化发展趋势,可将提高工作频率范围作为角振动激励源今后的一个研究重点。

参考文献

- [1] 杨晓伟. 振动校准现状及发展综述[J]. 宇航计测技术, 2000, 20(6): 41-47, 51.
- [2] ISO 5347-14: 1993 Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups -- Part 14: Resonance frequency testing of undamped accelerometers on a steel block[S].
- [3] ISO 16063-15: 2005 Methods for calibration of vibration and shock transducers -- Part 15: primary angular vibration calibration by interferometer[S].
- [4] 蔡晨光. JJG 298-2015《标准振动台检定规程》解读[J]. 中国计量, 2016(7): 123-126.
- [5] 郎需英, 李亚军. 惯性器件动态性能测试方法及其设备[J]. 航空精密机械工程, 1989(1): 5-10.
- [6] 薛景锋. 高频角振动校准方法与技术研究[D]. 北京: 北京

理工大学, 2014.

- [7] Cheung W, Licht T. Progress in development of calibration systems for angular vibration pickups [C] //IMEKO XIX World Congress-Fundamental and Applied Metrology, Budapest, Hungary, 2009.
- [8] Brian A H, Pierre D, Carlos C D W. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083-1138.
- [9] 黄科. 力矩电机动力学性能测试研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [10] 薛景锋, 赵维谦, 邵新慧. 高频角振动激励源设计及关键技术[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(6): 840-844.
- [11] 薛景锋, 赵维谦, 邵新慧. 杯式结构磁电式高频角振动台实现关键技术[J]. 航空制造技术, 2014(11): 64-67.
- [12] 薛景锋, 彭军, 李新良, 等. 角振动校准装置研究[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 962-969.
- [13] 王鹏飞. 三轴液压角振动台及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [14] 尚平, 夏豪杰, 费业泰. 衍射式光栅干涉测量系统发展现状及趋势[J]. 光学技术, 2011, 37(3): 313-316.
- [15] 赵文静. 基于 SOI 技术的 MEMS 惯性加速度计的设计与优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [16] 成宇翔, 张卫平, 陈文元, 等. MEMS 微陀螺仪研究进展[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(5): 277-285.
- [17] Actronic Inc. Angular Vibration Table 105-AVT - I/M [EB/OL]. (2012-03-16) [2016-12-05]. <http://www.actronic.com/us/products/detail/view/1-axis-angular-vibration-table-105-avt.html>.
- [18] 苏华昌, 姜虹, 胡亚冰. 飞行器末制导系统线角振动环境模拟试验技术[J]. 现代防御技术, 2014, 42(3): 47-52.
- [19] 杨学山, 高峰, 匙庆磊, 等. 双磁路伺服式低频角振动台[J]. 地震工程与工程振动, 2015(2): 132-137.

欢迎订阅《化学分析计量》

邮发代号 24-138

《化学分析计量》为国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 双月刊, 大 16 开本, 单月 20 日出版。国际刊号: ISSN 1008-6145, 国内刊号: CN37-1315/O6。《化学分析计量》是中国科技核心期刊、美国《化学文摘》(CA) 千种表收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 中国石油和化工行业优秀期刊、中国兵器工业优秀期刊、山东省优秀期刊。2017 年单价 15 元, 全年 90 元。您可通过邮局或银行汇款向《化学分析计量》杂志社办理订阅手续, 欲订阅过刊或合订本、合订本光盘的读者直接向杂志社订阅。

地址: 山东省济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031 电话: (0531)85878132, 85878148, 85878224

E-mail: anameter@126.com 网址: www.cam1992.com