

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.02.01

# 质心测量和校准技术发展趋势

李楠, 张泽光, 骆旭

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 质心是反映物体固有属性的参数之一, 质心测量和校准技术对于导弹弹道控制和制导、飞机安全和导航、卫星姿态控制、装甲车辆机动性等性能方面至关重要。本文介绍了当前国内外质心测量和校准方法的现状, 比较了不同方法的优缺点, 并对质心测量和校准技术的发展进行了展望。

**关键词:** 质心; 测量; 校准; 发展趋势

**中图分类号:** TB932

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2016)02-0001-03

## Developing Trend of Mass Centre Measurement and Calibration Technology

LI Nan, ZHANG Zeguang, LUO Xu

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

**Abstract:** Mass centre is an inherent characteristic parameter of objects. Centre measurement and calibration technology for mass is extremely important, especially in national defense area. Ballistic control and guidance of missile, safety and navigation of aircraft, attitude control of satellite, and mobility of armored vehicle are tightly associated with their mass centre characteristic. The present home and abroad development situation of the measurement and calibration methods of mass centre is described, advantages and disadvantages of these different methods are compared, and the future trend of the development is expected in this article.

**Key words:** mass centre; measurement; calibration; developing trend

## 1 质心测量和校准的必要性

质心是由物体质量分布所决定的一个特殊的点, 它是物体一个重要的固有参数, 质心测量和校准对于建立质心坐标系、确定物体运动参数具有重要意义。

在国防领域, 质心位置关系到导弹弹道和控制、飞机飞行姿态、卫星运行姿态控制、装甲车辆的机动性等性能方面, 准确测量质心和对质心专用测量设备进行校准十分必要。

导弹的飞行轨迹取决于质心和制导系统等因素, 当导弹的质心偏离飞行平面时, 会给导弹附加一个力矩, 使其运动轨迹发生改变, 导弹径向的质心偏差会导致其产生偏航力矩, 轴向的质心偏差会导致其俯仰力矩, 因此在设计、生产装配、使用维护等阶段, 都需要对质心进行精密测量。如图 1 所示。如果没有对质心进行精密测量, 提前进行修正或补偿, 通常会使得导弹的飞行轨迹和预期不一致, 导致命中率下降, 严

重的可偏离目标脱靶。对于弹道导弹的弹头, 可以通过控制其质心的变化使其分导<sup>[1]</sup>, 因此需要对其质心控制系统定期校准, 以保证质心控制系统的有效性和可靠性。



图 1 导弹质心测量

飞机的质心影响其稳定性、机动性、操控性。例如苏 27 的气动布局和质心的设计使其可以做出“眼镜蛇”机动动作; 大型运输机质心的测量关系到其载重的分配、起飞的安全性等各个方面; 直升机质心和其尾部平衡力矩的控制关系密切; 无人机的质心对其自动飞行控制至关重要。飞机的空中姿态通过导航系统进行测量显示给飞行员, 导航系统需要在机体坐标、惯性坐标、地球坐标之间进行转换, 飞机的质心作为

**收稿日期:** 2016-01-28; **修回日期:** 2016-04-06

**作者简介:** 李楠(1985-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事质量计量及测试技术研究; 张泽光(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事力学计量及测试技术研究。

坐标原点,其对飞机的航迹、速度、方向等都有重要影响,因此需要准确测量,对测量用仪器也需要进行校准,保证量值的准确可靠。图2是对飞机质心进行现场测量的场景。



图2 飞机质心测量

质心测量对卫星、车辆等也至关重要。卫星工作在外太空,其携带的燃料有限,其姿态控制以质心位置为基准,质心位置的偏差会需要更多的燃料调整姿态,测量偏差会导致控制系统增大累计误差,严重的导致失去平衡或偏离轨道。车辆的质心关系到其转向和爬坡能力;舰载装备的质心关系到整个舰船平台的定位。图3为卫星和车辆正在进行质心测量。



图3 卫星和车辆质心测量

## 2 质心测量和校准技术现状

### 2.1 质心测量和校准方法

目前,测量质心的方法主要分为两类,一类是基于静力矩平衡原理的静态测量方法,如悬挂法、多点支撑法、不平衡力矩法、吊起法、举升法和可倾斜平台法等。悬挂法对于大型复杂产品往往难以实现,悬挂后变形大,测量精度不能保证,因此较少采用。对于质量较大的物体的质心测量,多点支撑法是现在国内最常用的一种测量方法。根据被测件测量姿态,可将多点支撑法分为卧式和立式两种。受到机械刀口影

响,使用不平衡力矩法测量质心前必须先用其他设备测得被测件质量,且测量三维质心坐标时需要将物体变换3次姿态才能得到。可倾斜平台法是利用平台水平状态时测量水平方向质心坐标值和倾斜状态时测量高度方向质心坐标值,自动化和测量准确度较高。

质心测量方法的另一类是动态测量方法,包括复摆法、转动惯量法、动平衡法等。复摆法,是被测物随复摆平台一起自由摆动,改变摆臂长测量摆动周期,计算出被测物质心,复摆法所用设备复杂,局限性大。转动惯量法通过测量被测件的扭摆周期进而测得转动惯量,通过质心-惯量关系计算出质心的位置坐标,质心测量准确度影响因素较多。

目前对于质心测量系统的校准,国外主要是通过分参数溯源、过程质量控制、标准试件的方式进行静态和动态校准。国内对静态质心测量系统的校准和国外类似,主要是分参数溯源,其中衡量仪器或者力传感器通过拆卸后送检;测量装置的几何量测量部分通过使用几何量测量仪器进行现场校准。对于质心测量系统的动态校准国内尚未开展相关研究。

由此可见,在质心测量和校准方面国外已经发展为动静态综合测试,准确度很高,并实现了现场动静态校准。国内质心测试还是以静态测试为主,校准为静态分参数送检溯源,准确度和国外还有较大差距。

### 2.2 质心测量系统

国外质心测量设备研究起步较早,技术领先,欧美发达国家大多采用综合测试设备对质心和转动惯量进行综合测试。

NASA 戈达德空间飞行中心研制出了质心/转动惯量/惯性积综合测试设备<sup>[2-3]</sup>;法国航天局研制了质心/转动惯量综合测试设备<sup>[4]</sup>;加拿大 David Florida 实验室采用装备有特殊力矩反馈补偿系统精密气浮轴承技术研制出了质量特性综合测量设备<sup>[4]</sup>;欧洲宇航防务集团(EADS)研制出质心分析软件 Systema,能实现飞行器分部件质量质心计算,但尚不能完全替代地面测试<sup>[5]</sup>。

国外生产质心测量仪器的厂家也较多,图4(a)所示是美国一家公司研制的质心特性参数测试设备,适用于不同质量和尺寸范围的产品,主要采用多点支撑法和不平衡力矩法,利用半球气浮轴承和高灵敏度力矩传感器技术,使测量准确度高达0.01 mm<sup>[6]</sup>。如图4(b)所示的是德国一家公司生产的航天器质心特性参数测量设备,采用倾斜法进行卫星质心测量<sup>[7]</sup>。



(a) 质心特性参数测试仪 (b) 航天器质心参数测试仪

图4 国外质心参数测量设备

我国从上世纪80年代开始系统地研制质心测试设备,主要研究机构有南京理工大学、西北工业大学、哈尔滨工业大学等高校。国内质心测量设备大多基于多点支撑法、不平衡力矩法及转动惯量法,测量精度上与国外高水平仪器设备还有一定差距。通常国内质量质心测量台最大测量上限可达10 t,质心最大径向偏差 $\pm 0.05$  mm,最大轴向偏差为 $\pm 0.5$  mm<sup>[8]</sup>。

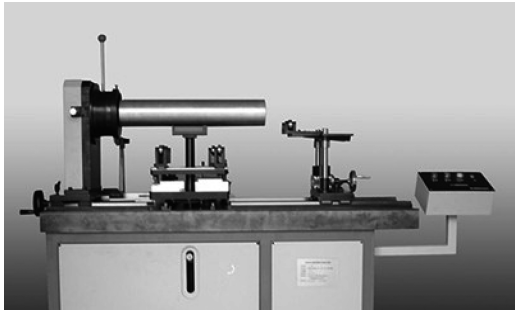


图5 国内质心测量设备

### 3 质心测量和校准技术发展趋势

质心测量方法众多,由于受到不同物体质量、外形和测量准确度要求的影响,因此在实际测量中通常使用不同的方法。例如大型飞机多采用多点支撑法、车辆多采用倾斜平台法、导弹等多采用不平衡力矩法。无论是哪种方法,质心的测量都取决于重力和空间位置的测量。未来要提高质心测量设备的准确性,需要从这两方面着手。

首先,在力值测量方面,目前采用的多台衡量仪器或者测力传感器都是通过重力进行力值量值传递的。要提高质心测量中力值的准确度,减小不确定度,最好的方式是通过直接溯源到质量量值的方式,而不是通过间接的力值测量。

其次,对于空间位置的测量,目前国内多采用卡尺、千分尺等长度测量设备,这些都是一维测量手段。

质心是个空间位置,通过一维测量和改变被测件的位置,会引入误差。为了提高准确度,最好的方式是通过空间三维测量的方式,采用引入三维坐标测量设备的质心柔性测量方法,利用其整平功能和精确测量空间目标位置的优势来保证几何量值的准确可靠<sup>[9]</sup>。

另外,影响质心测量设备准确度的因素还有:测量物和质心测量设备之间的连接、机械结构导致的摩擦力、连接点之间空间位置等。国外在解决这些问题上采用了空气轴承减小摩擦,采用球形轴承减小支撑点空间测量误差,提高了测量准确度,国内受到精密加工能力的限制,在这些方面还有待提高。

在质心测量设备的校准方面,目前国内的静态分参数溯源存在以下不足:

首先,不同的质心测量装置几何量测量部分的原理和支撑方式存在不同,通过使用几何量测量仪器进行现场校准,会存在由于人员的不同和对几何支撑位置测量点确定的不同导致的几何量测量误差。

其次,衡量仪器或测力传感器的校准需要将测量系统拆卸后进行,重复拆卸难以保证空间位置的一致性以及测量结果的重复性。

第三,虽然目前国内一些质心测量设备生产厂商也提供自制的单一质心标准件来对其测量装置进行核查,但是其自行生产的质心标准件通常只有固定质量和理论质心,可以实现对质心测量系统进行核查的目的,不存在溯源性,无法满足校准的要求。

通过以上的分析可见,质心测量和校准未来的发展趋势表现在:

1)使用直接质量溯源的方式代替测力溯源方式。目前质量国际基准最有可能实现量子溯源的是瓦特天平<sup>[10]</sup>,未来可以使用溯源到新的质量自然基准。

2)质心测量时空间位置的测量会向着三维测量的方向发展。激光作为长度溯源的关键设备,未来激光跟踪仪等三维设备会逐渐应用到质心测量中。

3)精密质心测量为了减小摩擦力引入的不确定度,可向着磁悬浮等非接触支撑方向发展。

4)质心测量设备的校准会从分参数静态溯源到力值量和长度量,向着类似砝码的标准质心实物溯源,直接通过标准质心实物对质心测量设备进行现场校准。

### 4 结束语

质心测量技术的发展已经经历了很长的历程,未来还会有更广阔的发展空间。本文对质心测量和校准

(下转第7页)

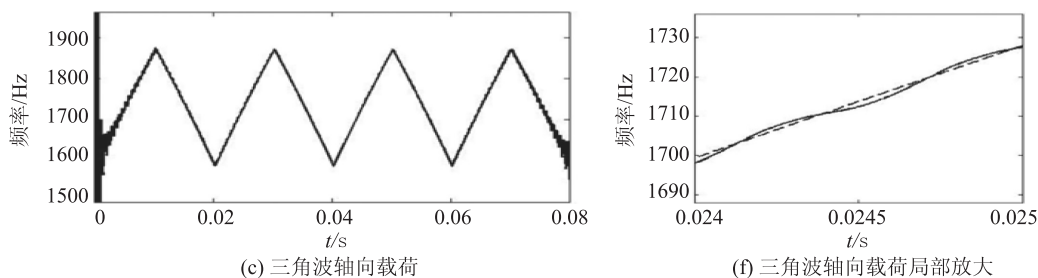


图2 谐振梁瞬时频率的理论值与计算值

一种基于希尔伯特变换的频率测量方法。仿真实验表明,该算法对于动态信号瞬时频率的测量具有很高的精度。但是信号变换的边缘具有一定的波动性,对算法进行优化,补偿变换边缘的误差,将是进一步工作的重点。

### 参考文献

- [1] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 2版. 北京:北京航空航天大学, 2010.
- [2] Seshia A A, Howe, R T, Montague S. An integrated microelectromechanical resonant output gyroscope [C]//Proc., The Fifteenth IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical System (MEMS 2002). Las Vegas: IEEE, 2002: 722-726.
- [3] Sun J H, Fan S C, Shi H C, et al. Design and optimization of a resonant output frequency gyroscope for robust sensitivity and bandwidth performance[J]. Microsystem Technologies, 2015: 1-22. DOI: 10.1007/s00542-015-2730-1.
- [4] 卢喜丰. 实验模态分析与激光测振技术研究[D]. 成都:西南交通大学, 2007.
- [5] 张合富, 朱振宇, 朱国勤. 激光测振仪校准技术评述[J]. 计测技术, 2014, 34(6): 5-8.
- [6] 李琰, 李森林. 应用于硅微谐振式传感器的等精度频率计

(上接第3页)

的必要性、技术发展现状进行了综述,并对未来质心测量和校准技术的发展趋势进行了展望,提出了一些见解,这些见解对提高国内质心测量设备的准确性、研究质心测量设备的校准方法、开展质心现场动态校准研究具有一定的借鉴作用。

### 参考文献

- [1] 张敏专, 张合新. 弹道导弹变质心控制入轨研究[J]. 控制工程, 2008, 15(4): 426-428.
- [2] Ross B P, McLeod C. Upgrade of the Goddard Space Flight Center's mass properties measuring facility[J]. Dupad. hku. h k, 2004, 129(3360): 1415-1416.
- [3] Hull R A, Gilbert J L, Klich P J. Computer program for determining mass properties of a rigid structure[R]. NASA T M 78681. 1978.
- [4] Hahn H, Niebergall M. Development of a measurement robot for

设计[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(4): 80-82.

- [7] 杨竟清. 用单片机实现精密测频的方法[J]. 山东大学学报(工学版), 2003, 33(5): 534-537.
- [8] 郭日修. 弹性力学与张量分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [9] Fan S C, Li Y, Guo Z S, et al. Dynamic characteristics of resonant gyroscopes study based on the Mathieu equation approximate solution[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(5): 58-65.
- [10] 倪振华. 振动力学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1989.
- [11] 王曙光, 曾向阳, 王征, 等. 水下目标的 Gammatone 子带降噪和希尔伯特-黄变换特征提[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1704-1709.
- [12] 王青华, 沈润杰, 任涛, 等. 基于 HHT 的风力发电机塔筒振动信号处理算法[J]. 中国科技信息, 2015(6): 25-27.
- [13] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.

identifying all Inertia parameters of a rigid body in a single experiment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001, 9(2): 416-423.

- [5] 张烈山. 多组舱段质量质心测量设备关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [6] Space Electronics LLC. CG measurement[EB/OL]. [2015-11-20]. <http://www.space-electronics.com/Products/se8913>.
- [7] IABG. Determination of Inertia Characteristics[EB/OL]. [2015-12-10]. <http://www.iabg.de/en/business-fields/space/determination-of-inertia-characteristics-mpm/>.
- [8] 南京理工大学. 全自动弹箭质量质心偏心测试仪[EB/OL]. [2015-12-10] <http://www.zxgl.cn/goods/show-176.html>.
- [9] 王超. 大尺寸飞行器质量特性测量关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 宗华. 重新定义千克试验经多年努力达成一致[EB/OL]. (2015-10-20) [2015-12-10]. <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/10/328964.shtm>.