

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.04.09

# 高精度质心测量系统设计与分析

李楠, 骆旭, 王丽, 赵静

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 为了解决航空、航天、兵器及其他武器装备中对质心位置的高精度测量问题, 本文设计了一种基于质量反应法的高精度质心测量系统, 介绍了其测量原理, 描述了该系统结构组成和测量方法, 并对实验数据及其溯源性进行了分析, 结果表明系统最高能达到轴向 0.05 mm 的测量不确定度较高的测量精度, 对武器装备的研制、试验和生产起到保障作用, 并由此得出了利用该装置建立质心量值溯源体系的可行性。

**关键词:** 质心测量; 质量反应法; 回转体

**中图分类号:** TB932

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)04-0044-05

## Design and Analysis of High Accuracy CG Measuring Instrument

LI Nan, LUO Xu, WANG Li, ZHAO Jing

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

**Abstract:** In order to solve the problem of high accuracy center of gravity(CG) measurement in aviation, astronaut, armaments areas and air vehicle. A kind of centroid measurement system based on mass reaction method is designed for the weapons systems in the developing, testing and manufacturing. This paper introduces the measurement principle, describes the structure composition and measurement method of the system, and analyzes the measurement data and its traceability. The results show that high accuracy of the center of gravity (CG) location can be delivered by using it.

**Key words:** centroid measurement; mass reaction; aviation; revolving body

## 0 引言

质心是物体质量中心的简称, 指物质系统上被认为质量集中于此的一个假想点。质心位置参数直接影响着精准打击、机动性能和姿态控制等武器装备的核心问题。其测量分析是武器装备设计、研制、试验、生产的重要内容<sup>[1-2]</sup>。

目前国内外主流的质心测量方法有多点称重法和不平衡力矩法<sup>[3]</sup>。

多点称重法是国内最常见的测量方法。质心测量设备一般是用 3 个或者多个传感器共同支承测量台。通过传感器相对测量台中心求矩计算质心位置, 这种方法主要依赖于标校体标定出传感器坐标位置, 但标校体的质心位置是假设其材料密度绝对均匀的理论值, 质心位置对材料均匀性的依赖性大, 且准确度无法再向上溯源<sup>[4-5]</sup>。

不平衡力矩法测量设备的内部有一个枢轴, 枢轴与测量台有一个连接点, 若被测件质心相对于连

接点存在一定偏移, 则会对平台产生一个不平衡力矩, 其值为质心偏矩力臂长度与被测件所受重力的乘积。被测件所受重力易于获得, 且可通过力矩传感器获得不平衡力矩, 进而换算出质心偏矩。美国 Space Electronics 公司(现为 Raptor Scientific)研发的 SE 系列和 KSR 系列均以此为基础进行制造, 主要适用于航空航天领域对高精度质心参数测量有需求的回转体<sup>[6-7]</sup>。

目前各武器装备中生产研制单位质心测量仪众多, 在使用中缺少科学的校准方法, 同时缺少更高准确的校准装置。

本文介绍了一种基于质量反应法的高精度二维质心测量装置。该装置脱胎于机械天平, 利用杠杆平衡原理获得样件坐标位置。在原有一维机械天平的基础上通过拓宽横梁、增加 X 轴、Y 轴支撑机构和测量机构等方式对原机械结构进行改进, 形成了二维的杠杆平衡机械结构。装置的负载范围为 100 ~ 3000 kg, 可对长度不大于 1.5 m、直径不大于 0.6 m 的被测样件进行高精度测量。

### 1 测量原理

高精度质心测量系统主要以杠杆原理为基础的机械天平进行设计, 杠杆原理如图 1 所示。

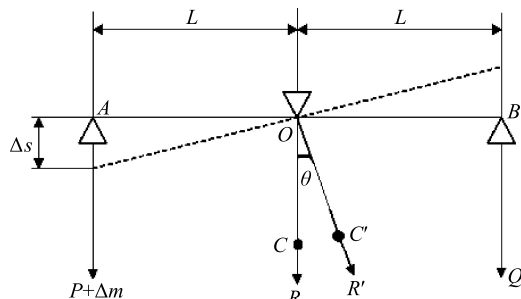


图 1 杠杆原理图

横梁上的三处支撑结构处于同一水平面, 设臂长  $OA = OB = L$ , 两吊挂系统的质量分别为  $P$  和  $Q$ , 且  $P = Q$ 。横梁自重为  $R$ , 质心位于点  $C$ ,  $OC = h_c$ , 当机械部分处于平衡状态时, 则  $PL = QL$ 。若增加质量为  $\Delta m$ , 则横梁偏转  $\theta$  角, 点  $C$  偏至点  $C'$ , 此时力矩方程为

$$(P + \Delta m)L \cdot \cos\theta = Q \cdot L \cdot \cos\theta + R \cdot h_c \cdot \sin\theta \quad (1)$$

$$P \cdot L \cdot \cos\theta = Q \cdot L \cdot \cos\theta$$

$$\Delta m \cdot L \cdot \cos\theta = R \cdot h_c \cdot \sin\theta$$

当  $\theta = 0$  时,  $\cos\theta = 1$ ;  $\sin\theta = \Delta s/L$

则  $\Delta m \cdot L = R \cdot h_c \cdot \Delta s/L$

$$L^2 = [R \cdot h_c] \cdot [\Delta s/\Delta m]$$

式中:  $[R \cdot h_c]$  为机械恢复力矩系数;  $[\Delta s/\Delta m]$  为灵敏度;  $[R \cdot h_c]$  为成正比于稳定性。

高精度质心测量系统由杠杆平衡测量系统和电磁力自动测量系统构成, 测量原理如图 2 所示。

杠杆平衡测量系统中,  $O$  为支点;  $R$  为被测样件质心;  $R'$  为质心在水平方向的投影;  $M$  为被测样件质量;  $L$  为系统平衡盘力臂长;  $m$  为平衡质量。测量时, 被测样件直接加载在横梁上, 通过  $O$  点(支点刀)支撑, 以  $O$  点为旋转中心, 此时被测样件质心位置在  $R$  点, 形成力矩  $OR'$ , 被测样件质量为  $M$ , 质心偏移形成的偏心矩为  $Mg \cdot OR'$ 。

电磁力自动测量系统中,  $K_s$  为位移传感器;  $K_v$  为速度传感器;  $K$  为运算放大器;  $R_0$  为采样电阻;  $F$  为力矩器。称量时通过电磁补偿力矩的作用而达到杠杆平衡。Es 为位移误差,  $E_r$  为速度误差, 通过计算得到被测样件质心位置  $OR'$ 。

当被测样件加载在横梁上时, 偏心所形成的力矩会使横梁向一方倾斜, 位移传感器  $K_s$  测量出转角  $\Delta\theta$ , 然后位移传感器将位移信号变成电信号, 经位移放大

器放大, 再经运算放大器  $K$  的放大, 负反馈给力矩器  $F$  以电流使力矩器产生力矩(即电磁恢复力矩), 从而使横梁向反向倾斜, 最终使得电磁力矩与偏心力矩平衡。此时电磁力矩与质心偏心所产生的不平衡力矩大小相等方向、相反, 形成一一对应关系, 由于电磁力矩与力矩器  $F$  中的电流为唯一对应关系, 在被测样件质量不变的情况下, 其质心相对于支点  $O$  的水平位置  $OR'$  与力矩器中的电流  $I$  形成唯一对应关系。电流通过采样电阻  $R_0$ , 便可通过 A/D 转换成所需的数字信号。

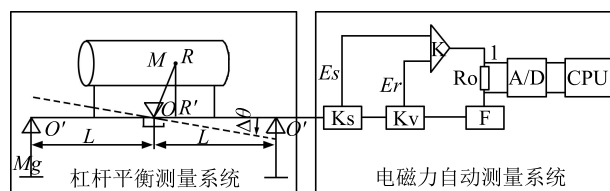


图 2 质心测量原理示意图

### 2 系统结构与测量方法

高精度质心测量系统在精密电磁天平原有的一维杠杆基础上对横梁进行拓宽, 形成具有两套正交支点刀支撑机构的二维杠杆平衡结构, 如图 3 所示。为了提高系统的稳定性并保证测量精度, 系统在  $X$  方向和  $Y$  方向分别设有支撑机构实现  $x$  轴和  $y$  轴的质心测量。

假设样件质心位置在仪器坐标系下  $X$  轴方向的位置为  $\Delta x$ , 在  $Y$  轴方向的位置为  $\Delta y$ , 则根据力矩平衡原理  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  可分别由公式(2)和公式(3)得到。

$$\Delta x = \frac{\Delta m_x \times L_x}{m_j} \quad (2)$$

$$\Delta y = \frac{\Delta m_y \times L_y}{m_j} \quad (3)$$

式中:  $\Delta m_x$  为二维质心测量系统测得的由样件质心与中刀位置在  $X$  轴方向不重合而引起的质量变化量;  $\Delta m_y$  为二维质心测量系统测得的由样件质心与中刀位置在  $Y$  轴方向不重合而引起的质量变化量;  $L_x$  为二维质心测量系统  $X$  轴臂长;  $L_y$  为二维质心测量系统  $Y$  轴臂长;  $m_j$  为标准样件质量值。

通过坐标转换系统将样件轴向质心位置由仪器坐标系下转换到样件坐标系下坐标值, 如图 4 所示。首先确定仪器坐标系和样件坐标系的相对位置, 以二维质心测量系统  $X$  向边刀位置为基准点, 设  $X_1$  为样件坐标系原点与二维质心测量系统基准点距离, 则

$$X = L_x - X_1 + \Delta x \quad (4)$$

式中:  $X$  为样件坐标系下质心轴向坐标位置。

进行径向坐标转换时, 其坐标系原点所在  $X$  轴线

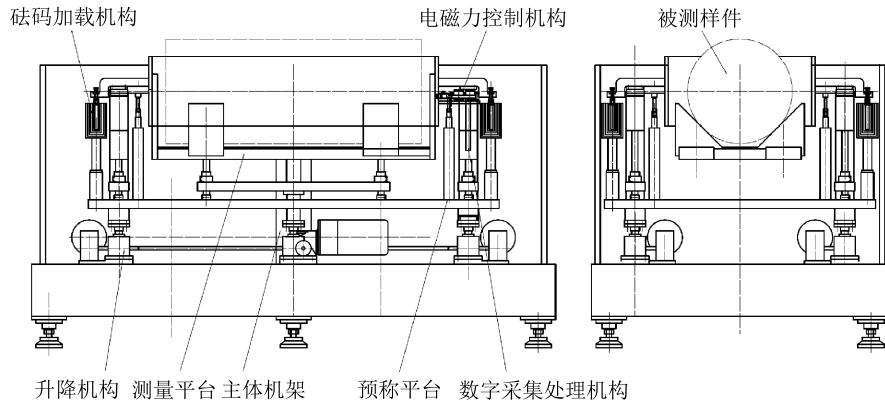


图3 二维质心测量系统结构图

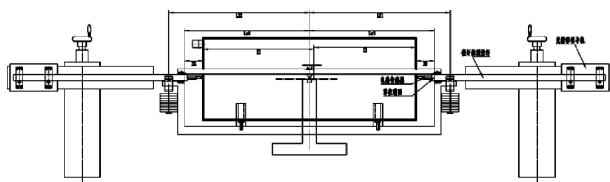


图4 坐标转换示意图

(支点刀位置)与仪器坐标系  $X$  轴可能呈平行(不重合)关系。此时装夹误差影响如下:假设样件径向坐标与其坐标原点位置重合,如图5所示,记录此时径向质心位置为  $y_0$ ,按图示旋转方向旋转  $\alpha$  度后径向质心位置记为  $y^+$ ,返回到初始  $0$  度位置,按图示旋转方向反转  $\alpha$  度后测量径向质心记为  $y^-$ ,设在初始  $0$  度位置时轴向质心的极坐标表示为  $(\rho, \theta)$ ,则有

$$0^\circ \text{时}, \quad \rho \cos \theta + d = l^0 \quad (5)$$

$$+ \alpha \text{度时}, \quad \rho \cos(\theta - \alpha) + d = l^1 \quad (6)$$

$$- \alpha \text{度时}, \quad \rho \cos(\theta + \alpha) + d = l^2 \quad (7)$$

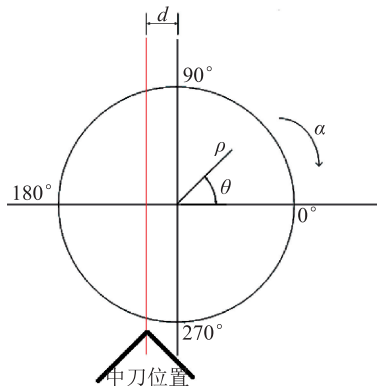


图5 样件装夹误差示意图

通过改进测量方法,可以消除装夹误差的影响。将样件置于质心测量系统上,如图6所示,其中,  $a$  为样件坐标系下径向质心位置,  $d$  为样件坐标系原点相对于支点刀所在平面的距离(装夹误差)。将样件置于

$0^\circ$ 位置时测量可得  $\Delta y_0 = -a - d$ ,将样件旋转  $180^\circ$ 后再次测量可得  $\Delta y_{180} = a - d$ 。

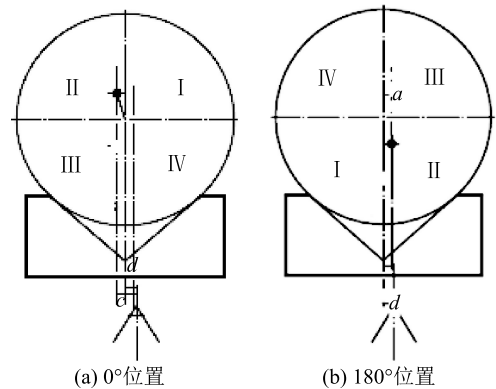


图6 样件  $0^\circ$ 位置和  $180^\circ$ 位置测量示意图

由上述测量可得

$$Y = a = \frac{\Delta y_0 - \Delta y_{180}}{2} \quad (8)$$

同理可得在样件坐标系下质心位置的  $Z$  坐标。

$$Z = b = \frac{\Delta y_{270} - \Delta y_{90}}{2} \quad (9)$$

### 3 实验结果

利用高精度质心测量系统(如图7)对质量  $991.09$  kg、总长  $1300.04$  mm 的质心样件进行测量。



图7 高精度质心测量系统

系统 X 轴臂长  $L_x$  为 999.95 mm, Y 轴臂长  $L_y$  为 500.06 mm, 均溯源至激光跟踪仪。通过系统配备的坐标转换设备, 可得样件坐标系原点与二维质心测量系统基准点距离  $X_1$  为 351.34 mm。经测量得样件在其自身坐标系下的质心坐标为 (650.47 mm, 0.00 mm, 0.04 mm)。对该试验结果进行不确定度分析, 其数学模型分别如式 (4) 和式 (8) 所示。以轴向质心测量时,  $L_x, X_1, \Delta x$  三者之间均不相关, 相关系数视为 0, 由  $u_c^2 = \sum \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$  可得

$$u_x = \sqrt{u_{L_x}^2 + u_{X_1}^2 + u_{\Delta x}^2} \quad (9)$$

其中,  $u_{\Delta x}^2 = \Delta x^2 \times (u_{rel}^2(\Delta m_x) + u_{rel}^2(L_x) + u_{rel}^2(m_J))$ 。

各分量引入的不确定度如表 1 所示<sup>[8-10]</sup>。

取  $k=2$ , 此测量结构的轴向质心测量结果可以表示为  $X=650.47 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ 。

同理可得径向质心测量结果的扩展不确定度为 0.02 mm; 径向质心的测量结果可表示为  $Y=0.00 \text{ mm} \pm 0.02 \text{ mm}$ ;  $Z=0.04 \text{ mm} \pm 0.02 \text{ mm}$ 。

表 1 质心样件测量结果不确定度合成

不确定度分量	不确定度来源	数值/mm	标准不确定度/mm
$u_{L_x}$	测量系统误差引入的不确定度	0.021	0.024
	温度变化引起的臂长变化引入的不确定度	0.012	
$u_{X_1}$	测量系统误差引入的不确定度	0.0004	0.003
	温度变化引起的位移系统位移量变化引入的不确定度	0.0025	0.003
	重复性引入的不确定度	0.002	0.002
	测长机构与样件坐标轴不同轴引入的不确定度	/	/
$u_{\Delta x}$	样品质心偏离中刀位置引起的质量变化量引入的不确定度	0.0016	0.005
	二维质心测量系统臂长测量误差引入的不确定度	0.002	
	标准样件质量值测量误差引入的不确定度	0.001	
合成标准不确定度			0.025

#### 4 质心测量系统溯源方法

利用本文所提出的高精度质心测量系统, 可建立如图 8 所示质心量值溯源系统。

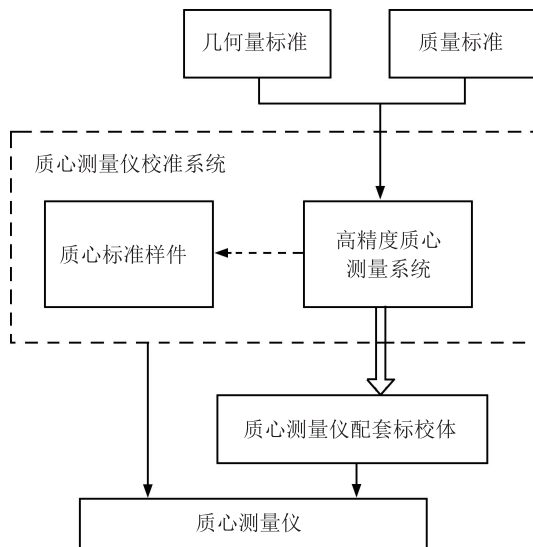


图 8 质心量值溯源系统

其中, 高精度质心测量系统分别溯源至几何量标准和质量标准; 质心标准样件作为传递标准与其一同构成质心测量仪校准系统, 用于保存质心标准量值并对质心测量仪进行校准; 对于配备标校体的质心测量仪可直接将标校体溯源至高精度质心测量系统。

本文所提出的高精度质心测量系统, 其臂长可溯源至激光跟踪仪或三坐标测量机; 质偏引起的测量平台质量变化量相当于机械天平的不等臂误差, 溯源至砝码。

#### 5 结论

高精度质心测量系统可测量质量范围 100 ~ 3000 kg 的回转体质心样件, 与基于多点支撑法的质心测量系统相比, 克服了其称重传感器位置定位不准确的缺点, 减小了测量不确定度<sup>[11]</sup>; 与基于不平衡力矩法的质心测量系统相比, 克服了倾覆力矩的限制, 提高了系统安全性, 降低了系统对于进口高精度力矩传感器

的依赖<sup>[12]</sup>。该测量系统在安全性、可靠性和测量准确性方面都达到了较高水平。该系统的溯源性明确,可进一步与标准样件一起构成质心测量仪校准系统,解决武器装备生产研制部门质心测量仪的溯源问题<sup>[13-14]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 王洪鑫, 徐在峰, 赵科, 等. 航天器质量特性测试技术新进展[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(2): 171-174.
- [3] 刘明勇, 罗锋, 徐健. 质量质心测量方法及实例分析[J]. 制造技术与机床, 2019, (04): 138-141.
- [4] 陈平, 邓高福, 吴海瀛. 飞行器模型质量特性参数一体化测量装置研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(12): 1891-1895.
- [5] Raptor. Product Details [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://raptor-scientific.com/products/>.
- [6] Richard Boynton. How to calculate mass properties [EB/OL]. [2021-09-03]. <https://raptor-scientific.com/content/uploads/2020/10/2001-How-to-calculate-mass-properties-web-page.pdf>.
- [7] 施晓云. 回转体质量特性参数精密测量研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2006.
- [8] G. Wagoner. 几种碳纤维的弹性系数和热膨胀系数[J]. 新型炭材料, 1990, (01): 32-34.
- [9] 崔建军, 高思田. 线位移传感器校准及不确定度分析[J]. 计量学报, 2010, 31(z2): 169-173.
- [10] 王梅宝, 张晓琳, 唐文彦, 等. 柔性质心测量方法及不确定度评定[J]. 光学精密工程, 2019, 27(07): 1500-1507.
- [11] 梁彦, 张驰, 梁明. 弹体质量质心测量系统的设计实现及其误差分析[J]. 战术导弹技术, 2012, (03): 29-35.
- [12] 李楠, 张泽光, 骆旭. 质心测量和校准技术发展趋势[J]. 计测技术, 2016, 36(02): 1-3, 7.
- [13] 郭建麟, 余润喜, 彭军, 等. 质量质心校准装置的应用与改进[J]. 计测技术, 2015, 35(S1): 64-66.
- [14] 王丽, 张泽光, 马晓苏. 可变质心标准样件的研究与应用[J]. 计测技术, 2018, 38(S1): 114-118.

收稿日期: 2021-05-28; 修回日期: 2021-06-02

基金项目: “十三五”国家技术基础科研项目(JSJL2015205B003)

引用格式: 李楠, 骆旭, 王丽, 等. 高精度质心测量系统设计与分析[J]. 计测技术, 2021, 41(4): 44-48.