

# 高精度质心测量方法研究

卢志辉, 孙志扬, 李祥云, 薄悦, 张磊乐

(郑州机械研究所, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 质心测量对于空间飞行器至关重要, 新型武器的研制对质心测量精度的要求不断提高。将传统的天平原理与旋转轴结合, 利用传感器技术, 设计了一种新型质心测量机构, 提出了一种能够明显提高质心测量精度的测量方法。描述了具体测量机构的主体结构, 给出了机构的测量原理、测量方法, 并进行了机构对于质心测量的误差分析。结合测量设备研制, 进行了误差估算, 理论估算的结果最大误差为 0.023 mm。采用标准样件的方法进行了实验验证, 具体测量数据显示, 最大误差为 0.020 mm。结果表明此测量方法理论分析计算与实验结果具有较好的一致性, 并达到了较高的测量精度。已采用该方法成功地研制出系列高精度测量设备, 配用于相关领域。

**关键词:** 仪器仪表技术; 质心; 质心测量; 天平; 测量方法; 测量精度

**中图分类号:** TG156      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2009)12-1748-05

## Research on High Precision Measurement of Centroid

LU Zhi-hui, SUN Zhi-yang, LI Xiang-yun, BO Yue, ZHANG Lei-le

(Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, Zhengzhou 450052, Henan, China)

**Abstract:** The measurement of centroid is very important for aircrafts, and higher measurement precision is needed for the development of new weapons. With the combination of rotational axis, traditional balance and sensor technology, a new measurement mechanism of centroid was designed and a new measurement method was put forward, which can improve the measurement accuracy obviously. The structure, the measurement principle and method were presented and the measurement error was also analyzed theoretically, in which the maximum error of theoretical estimating is 0.023 mm for the developed mechanism. The actual maximum measurement error for a standard sample is 0.02 mm, which is very close to the theoretical value. The experimented results show that the measurement precision of this mechanism is very high. Using the mechanism and method proposed, a series of measurement equipments were developed and used in related fields.

**Key words:** instrument and meter technique; center of gravity; measurement of center of gravity; balance; measuring method; measurement precision

## 0 引言

飞行物体的质心位置影响自身飞行轨迹, 质心的精确测量在飞行器研究领域有着重要的意义。文献[1]给出了不平衡力矩与多支点称量两种有效的

测质心方法, 对精度要求不高的质心测量简单适用, 是国内外质心测量领域比较常用的方法。不平衡力矩法采用天平原理即刀口结构称量并计算质心偏离刀口的距离, 由于受到偏心力矩测量传感器测量精度与定位精度的影响, 测量精度受到一定的限制, 不

能满足高精度需要。多质点称量法采用 3 个传感器(或多个传感器)直接称量,由于每个传感器要承载约 1/3 的重量,需量程较大传感器,大传感器最小分度值数据相应较大,质心测量精度达到一定值后难以继续提高。同时,该方法测量基准是通过多个传感器承力顶尖的几何形心的重力轴,这样对机构加工提出了高精度要求。由于无法对相关尺寸进行精确测量,也导致没有稳定的测量基准而使测量精度无法提高。而且传统的质心测量均以重力轴为基准,使得质心坐标位置的基准是一个理论概念,难以实际测量。

文献[2]提出了固结于旋转轴的 3 个传感器支撑的测量结构,能够参照轴系进行重力轴与 3 点支撑平面的几何关系进行调整,以提高实际基准与理论基准的重合度。

本文在不平衡力矩法的天平刀口结构的高灵敏度基础上,分别采用十字分布传感器等效刀口结构和刚性刀口直接支撑结构,汲取了上述两种方法的优点,形成新型测量机构与方法,可以明显提高质心测量精度,并在工程实践中得到了应用。

十字分布传感器等效刀口结构采用两个大量程传感器同轴线布置,作为刀口承载了被测物体的主要重量,与其垂直布置的小量程传感器测量质心引起的偏量。其优点是采用传感器支撑,可以实现质量质心同步测量。缺点是大量程传感器作为等效刀口,其刚性仍然低于真实刀口,测量灵敏度稍低。而刚性刀口结构则进一步提高了测量灵敏度。

本文主要针对刚性刀口直接支撑结构进行分析研究,等效刀口结构另文介绍。

## 1 刀口支撑质心测量机构

提高质心测量精度的关键是尽可能提高测量设备中机构与传感器的灵敏度,通过新结构、高灵敏度的传感器的联合应用,可以使灵敏度得以明显提高。

提高质心测量可靠性的关键是测量基准的建立,即质心测量坐标系的建立。传统方法是以重力轴系为基准建立的,包括通过按照一定几何关系分布的测量传感器几何中心重力轴系、通过刀口尖点的重力轴系。这些轴系虽然理论上客观存在,却难以实际测量。这就导致了质心测量结果的不确定性,对于测量数据的影响可能会远大于测量本身产生的误差。

本文提出了一种新型机构和方法,即显著提高了测量灵敏度,又建立了一个客观的可测量的测量

基准,即系统的旋转轴线。

该机构原理图见图 1 所示。采用刀口承载被测物体全部重量,用小量程传感器承载其质心偏离刀口产生的偏心力矩。被测物体安装在承物盘上,承物盘与旋转轴系同轴心刚性连接,旋转轴系通过轴承固定在轴承座上,轴承座上连接有呈十字分布的支臂,其中一组较短的支臂下是刀口副,整个测量系统的重量将由刀口副支承,较长的一组支臂下连接两个小量程传感器,该组传感器测量偏心力矩。

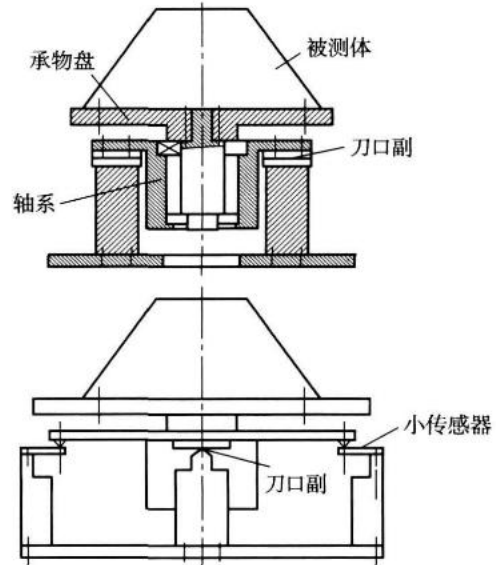


图 1 质心测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of measuring system of the centroid

由于刀口尖端滚转摩擦阻力矩很小<sup>[3]</sup>,同时偏心力矩对传感器施加的作用力远小于总重量,使得测量数据小一个量级,这两个因素将使得灵敏度明显提高。

## 2 测量原理与计算方法

被测物体由旋转轴系驱动做同步旋转,角位移传感器测量对应位相,测量精度可以达到角秒级。若被测物体质心位置不在旋转轴线上,质心将绕旋转轴线作圆周运动,此时质心相对于刀口母线的方位在规律地改变。由于刀口副滚转阻力矩很小,整个系统将绕刀口母线摆动。随着摆动传感器测出的偏载力数值将呈周期性变化,完成一周测量后将得到最大值与最小值及对应的角度,利用静力平衡公式计算出其质心位置。

计算公式推导如下,计算坐标系见图 2。

$O_z$  为旋转轴系中心轴线,轴系连同承物盘带动被测物体转动并沿刀口母线摆动, $G$  为被测物体

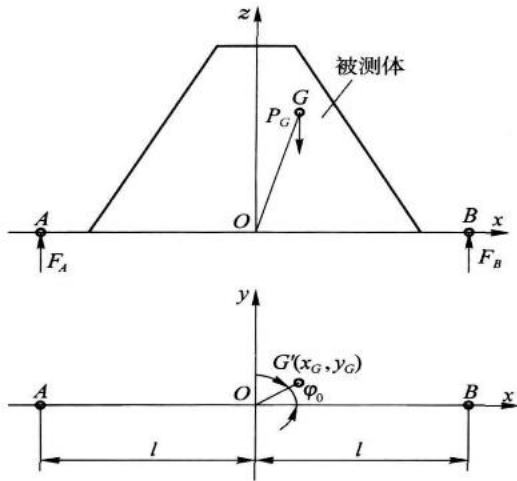


图2 计算坐标系

Fig. 2 Coordinate system of calculating the centroid position

质心,  $P_G$  为被测物体重量,  $A$ 、 $B$  为两个传感器支点, 机构设计要求  $\overline{OA} = \overline{OB} = l$ , 对刀口轴线取静力平衡得到

$$F_A l + P_G \overline{OG}' \cos \varphi_0 - F_B l = 0. \quad (1)$$

整理得

$$F_B - F_A = \frac{P_G \overline{OG}' \cos \varphi_0}{l}. \quad (2)$$

设测量时轴系以起始角  $\varphi_0$  开始旋转, 转过任一个转角  $\varphi$  后, 对应有一个  $F_B - F_A$ , 记此时  $F_B - F_A = F(\varphi)$ , 有

$$F(\varphi) = F_B - F_A = \frac{P_G \overline{OG}' \cos(\varphi + \varphi_0)}{l}. \quad (3)$$

显然当  $\varphi + \varphi_0 = \alpha = 0^\circ, 180^\circ$  时有极值, 通过测出  $F_B - F_A$  的极值与位相角即可求得质心相对于旋转中心偏离量的大小与方位。

上述计算原理是一种理论上直接计算的方法, 包含有两方面误差: 一是机构复杂、机械加工与装配难以保证各几何参数与理论值完全相同; 二是传感器刚度影响, 即质心偏离后, 将使  $A$  (或  $B$ ) 处的传感器向下变形, 该变形导致整个轴系产生偏斜, 即绕刀口摆一个角度, 这样质心偏离量将增加一个增加量, 结果是小传感器的变形使得被测物体产生倾斜, 导致小传感器测量结果增加了一个附加增量, 如果直接采用上述公式计算, 小传感器变形引起附加增量将等值迭加到测量结果中。

为克服上述不足, 实际采用的是基于减小质心偏离量的配平法。所谓的配平法就是依据测量结果, 将等力矩的重块放置在和原质心相反的方位, 最终使其被测产品与配重形成的合成质心位于旋转轴

上, 从而消除了小传感器刚性引起的附加误差。由于采用配重的数据即可计算被测物体的质心, 最终质心不再按(3)式计算, 其复杂的机械加工与装配引起的几何尺寸方面的误差将同时被消除。具体计算为静力平衡公式, 此处从略。

### 3 质心测量误差分析

影响该方法测量精度的因素有测力传感器刚度及剩余不平衡量、机构初始不平衡、刀口副的摩擦力矩、旋转轴系回转精度。

#### 3.1 传感器刚度及剩余不平衡量影响

传感器刚度及剩余不平衡量的影响, 包括二方面: 一是剩余不平衡量  $\Delta W_P$  使得质心计算时产生相应误差  $\Delta_1$ , 但在测量时, 尽量减小剩余不平衡量, 并且通过计算时将其作为实际配重参与计算, 其误差被消除, 此时  $\Delta_1$  可以忽略不计。

另一方面是由于传感器的变形, 由前面的叙述可知偏心力矩引起传感器变形, 增加一个附加偏量, 设被测物体质心高  $h_G$ , 传感器满量程位移  $\omega$ , 量程为  $P_\omega$ , 则该项引起的误差为  $\Delta_2 = \frac{h_G}{l} \cdot \frac{\Delta W_P}{P_\omega} \cdot \omega$ 。

#### 3.2 机构初始不平衡量影响

该机构的测量原理要求机构本身平衡, 即机构自身的质心应与旋转轴线重合, 实际上由于机构不可能绝对平衡, 将给最终结果带来误差。其不平衡量包括 3.1 节中涉及的剩余不平衡量和传感器的刚度。即  $\Delta_3 = \Delta_1 + \Delta_2$ , 计算  $\Delta_1$  时采用机构自身重量替代被测物体重量。

#### 3.3 刀口副摩擦力矩影响

由于刀口副产生一定摩擦力, 将形成一定摩擦力矩, 设刀口半径  $R_1$ , 摩擦系数  $f$ , 则可能对  $\overline{OG}$  所产生的最大误差为

$$\Delta_4 = \frac{P_G f R_1}{P_G} = f R_1. \quad (4)$$

#### 3.4 旋转轴系回转精度影响

该项对质心测量的精度至关重要, 因为旋转轴线就是质心的测量基准, 如果旋转过程中轴线不能为理想直线, 其摆动量将对测量结果产生影响。设旋转轴系两支承轴承跨度为  $h_z$ , 由于轴承侧隙及加工装配引起的回转精度造成的轴端跳动为  $D$ , 被测物体质心高为  $h_G$ , 则此项造成的最大误差为

$$\Delta_5 = \frac{1}{2} D \cdot \frac{h_z + h_G}{h_z}. \quad (5)$$

#### 3.5 计算中各分量产生的误差

即具体计算公式产生的误差, 与各分量(配重分

布半径  $R$ 、被测物体重量  $P_G$  和配重  $\Delta W_P$ ) 误差之和组成, 由误差分析可知最大误差为

$$\Delta_6 = \left[ \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta P_G}{P_G} + \frac{\Delta \Sigma W_P}{\Sigma W_P} \right] \times \overline{OG}. \quad (6)$$

空间飞行器的测量一般都属于小样本测量, 为安全起见, 取其绝对值之和作为误差评估数据, 最大的质心误差将不大于上述几项之和即  $\Delta \leq \sum_{i=1}^6 \Delta_i$ .

对于被测产品, 质心测量误差还应考虑产品质心基准与设备测量基准不重合引起的误差。因文中主要描述质心位置测量, 关注的是测量设备基于自身测量基准的测量精度, 这里仅讨论设备自身测量误差。

### 4 机构的误差估算与实验验证

以某型号武器的质量特性测量设备为背景, 设计了综合质量特性参数测量设备, 其中质心测量采用该机构进行设计。按照上述误差分析进行误差估算, 并与实际设备采用标准样件的测量结果进行了对比。

#### 4.1 测量机构的设计参数与测量数据

与误差估算相关联的机构参数见表 1。主要的几何参数是由设备的结构和测量对象及精度要求综合决定的。其中摩擦系数  $f$  是根据动态滚动碾子摩擦系数确定的, 由机械设计手册查得, 因为该机构的测量过程是旋转一周动态测量, 与碾子与平板之间的滚动摩擦物理状态一致。配平剩余不平衡量  $\Delta W_P$  是实际测量值, 测量时可以做到 0.04 N 以下, 如果不参与质心计算, 该数值将引起相应误差。由于数值较小, 同时参与最终计算, 其误差忽略不计。被测产品重量  $p_{G1}$ , 轴系结构件重量为  $p_{G2}$ 。被测物体质心高  $h_G$ , 包括刀口到产品支撑面的高度。  $D$  来源于机构设计时的精度要求, 装配后的径向跳动不大于 0.005 mm, 其实该数值还包括转轴本身的误差, 轴系精度高于此数值, 故取 0.003 mm。

表 1 设计参数

Tab. 1 Design parameters of the measuring system of the centroid

参数	$l/\text{mm}$	$R/\text{mm}$	$f$	$\Delta W_P/\text{N}$	$p_{G1}/\text{N}$	$p_{G2}/\text{N}$
数据	300	400	0.008	0.04	5 000	3 500
参数	$h_G/\text{mm}$	$h_z/\text{mm}$	$P/\text{N}$	$\omega/\text{mm}$	$R_1/\text{mm}$	$D/\text{mm}$
数据	1 200	450	5 000	0.5	2	0.003

#### 4.2 测量机构的误差估算

剩余不平衡量  $\Delta W_P$  产生的误差, 由上述分析

可知:  $\Delta_1 = 0$ .

传感器的变形项引起的误差为  $\Delta_2 = 1\ 200 \times 0.04 \times 0.5 / (300 \times 5\ 000) = 0.000\ 02\ \text{mm}$ .

同理计算得到机构本身不平衡产生的误差, 注意这里计算  $\Delta_1$  时应采用机构自身重量  $P_{G2}$ .  $\Delta_2 = \Delta_1 + \Delta_2 = 0 + 0.000\ 02 = 0.000\ 02\ \text{mm}$ .

刀口副产生摩擦力引起的误差  $\Delta_4 = 0.008 \times 2 = 0.016\ \text{mm}$ .

旋转轴系回转精度造成的最大误差为  $\Delta_5 = \frac{1}{2} \times 0.003 \times (450 + 1\ 200) / 450 = 0.005\ 5\ \text{mm}$ .

计算公式各分量产生的误差由误差分析可知取决于配重位置、传感器精度和配重的相对误差, 同时与测量的质心偏量成正比。高精度传感器对于质心测量经过标定后高于 0.01%, 则  $\Delta P_G / P_G$  不大于 0.01%, 同理, 采用高精度天平称量后  $\Delta \Sigma W_P / \Sigma W_P$  不大于 0.01%,  $\overline{OG}$  是被测物体质心偏离量, 一般小于 5 mm,  $\Delta R$  设计要求小于 0.02 mm. 则有  $\Delta_6 = (0.02 / 400 + 0.000\ 1 + 0.000\ 1) \times 5 = 0.001\ 2\ \text{mm}$ .

采用各误差之和作为最大误差, 则有  $\Delta = 0.023\ \text{mm}$ .

这是各种不利因素同时出现的结果, 实际误差要小一些。采用传感器直接测量, 一般误差在 0.10~ 0.20 mm 之间, 该方法对于质心测量精度明显提高。

#### 4.3 实验验证

在研制的综合质量特性测量设备上采用标准样件进行了实际测量, 标准样件质心位置的理论值为 0, 对于标准样件测量得到质心值, 即为设备质心测量的绝对误差。

标准样件经过动平衡校验, 其质心位置(偏离量)小于 0.001 mm, 非常接近理论值, 所以测量结果就可以认为是设备的测量误差。质心测量结果见表 2。

表 2 质心测量误差数据

Tab. 2 Data of errors of measuring the centroid

测量序号	1	2	3	4	5
测量误差/mm	0.013	0.007	0.003	0.018	0.020
测量序号	6	7	8	9	10
测量误差/mm	0.008	0.008	0.016	0.011	0.013

由表中数据可以看出, 最大误差在 0.020 mm, 与估算结果相一致。

该类设备已经批量配备武器装备研制单位和部队基地,测量数据表明,其测量精度与采用样件的测量精度在数据重复性上高度一致。

## 5 结论

1) 本文提出了一种新型质心测量机构和方法,描述了主体机构和测量原理。

2) 给出了影响该方法精度的几个主要因素,并进行了误差分析,采用该分析方法对研制的设备进行了误差估算。

3) 该测量机构和方法在实际设备中获得应用,采用标准样件进行了测量对比,具有较好的一致性。

4) 本文为质心测量设备的研制提供了新的技术手段,测量精度明显提高,申报的国家发明专利获得授权。在此基础上结合已有的形心测量技术,开发出系列弹头质量特性参数测量设备,其质心位置测量精度已达 0.02 mm,已配用于多种战略战术型

号武器。

## 参考文献(References)

- [1] 刘建营. 固体火箭发动机质心测量技术评述[J]. 固体火箭技术, 1991, (4): 75- 86.  
LIU Jian-ying. Technical discussion on measurement of solid propellant engine's center of gravity[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1991, (4): 75- 86. (in chinese)
- [2] 卢志辉, 孙志扬, 陈惠南, 等. 旋转体质心、形心和质心横偏量的测量机构设计及精度分析[J]. 机械设计, 2001, (4): 25- 27.  
LU Zhi-hui, SUN Zhi-yang, CHEN Hui-nan, et al. Mechanism design and precision analysis for center of gravity centroid and lateral eccentricity of center of gravity measurement of a rotative body[J]. Mechanical Design, 2001, (4): 25- 27. (in chinese)
- [3] 薄悦. 提高质心测量灵敏度的关键技术研究[D]. 郑州: 郑州机械研究所, 2002.  
BO Yue. Research on the key technique of improving precision in measurement of center of gravity[D]. Zhengzhou: Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering, 2002. (in chinese)