



# 大尺寸柱状物体质量质心测量装置的结构优化

王在铎<sup>1</sup> 王庆<sup>2</sup>

(1. 海军驻中国运载火箭技术研究院军事代表室, 北京 100076; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)



**摘要:** 介绍了物体质量、质心测量的原理, 叙述一种能满足大尺寸柱状物体质量、质心位置测量要求的测量装置, 提出了提高质量、质心测量精确度的结构方案, 并对该种结构的测量不确定度进行了分析。

**关键词:** 质量质心; 结构优化; 不确定度

## Structural Optimization of Mass and Centroid Measuring Device for Large Cylindrical Objects

Wang Zaiduo<sup>1</sup> Wang Qing<sup>2</sup>

(1. Navy Representative Office in China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076;

2. Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

**Abstract:** This paper introduces the measuring principle of center of mass and puts forward a scheme of a measuring device for high-precision centroid deviation measure of large cylindrical objects, and analyses the uncertainty of measurement about this method.

**Key words:** center of mass; structural optimization; uncertainty

### 1 引言

为了满足弹道飞行精确性的要求, 导弹类飞行器对其质量、质心位置的要求较高。因此, 在制造过程中, 需对质量、质心进行测量、调整, 以达到精确控制质量、质心的要求。目前已有的质量、质心测量装置大多结构复杂, 对使用环境要求高, 且多数只适用于小型物体的测量。本文介绍的质量、质心测量装置适用于大型柱状物体。

### 2 质量质心三点法测量原理

测量装置采用的是三点式支撑称重测量法。由于测量地的重力加速度 $g$ 为常值, 故其质心和重心重合一致。测量装置的三点支撑方式如图1所示。

设物体的质量为 $P$ , 三个支撑点处传感器测到的力分别为 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 。则有:

$$P = F_1 + F_2 + F_3 \quad (1)$$

根据静力矩平衡原理可得轴向质心位置为:

$$X_p = L_o + L_p = L_o + \frac{F_1 \cdot L_2 + F_3 \cdot L_1}{P} \quad (2)$$

在测量径向质心位置时, 先在被测物体上做好I、II、III、IV方位标记, 转动被测物体, 分别测得物体在 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ 四个位置时传感器3的测量值 $F_{31}$ 、 $F_{32}$ 、 $F_{33}$ 、 $F_{34}$ , 根据静力矩平衡原理可得径向质心位置为:

$$e = \frac{H_1}{4P^2} [(F_{31} - F_{33})^2 + (F_{32} - F_{34})^2] \quad (3)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{1 - F_{31} \cdot H_2 / P}{e}\right) \quad (4)$$

作者简介: 王在铎(1967-), 工程师, 机械设计与制造专业; 研究方向: 武器装备生产过程质量监督和检验验收。

收稿日期: 2010-07-12

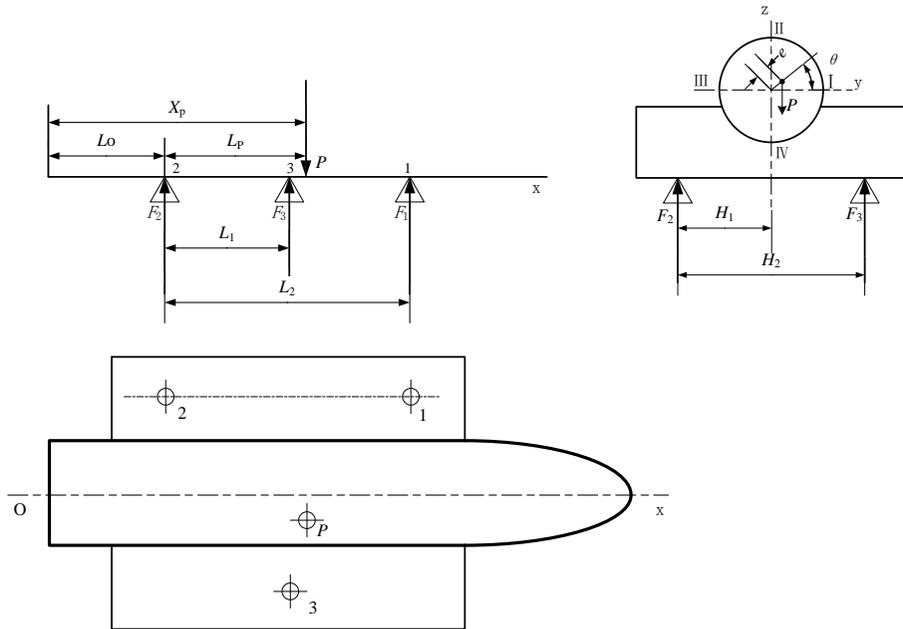


图1 三点测量法示意图

### 3 质量质心测量装置结构优化

对小型物体来说，三点测量法能够获得较好的测量精度，但对大尺寸的物体则难以满足测量精度要求。例如，某飞行弹直径为2m，径向质心测量精度要求小于1mm，若采用三点测量法，就必须采用高精度的测重仪器，并结合更高精度的几何尺寸测量。经初步分析，在忽略几何尺寸测量误差的前提下，即使采用精度为0.3%的高精度测重仪器，相应的质心位置误差精度也已达3mm。因此，为了满足大尺寸柱状体对质心测量的高精度要求，需要对上述支撑测量结构进行优化设计。

通过对式(3)径向质偏e的测量不确定度u(e)的分析，可推导出：

$$u(e) = \frac{u(F)}{F} H_1 \quad (5)$$

式中u(F)为测力F引起的测量不确定度。

式(5)说明，u(e)与H<sub>1</sub>成正比，当H<sub>1</sub>趋近0时，则由力测量引起的对质偏e的不确定度u(e)理论上也趋近于0。据此，提出一种优化的结构，即将被测物体置于支撑点1和2的正上方，测点3可采用拉压力双向测力传感器（或双边各配置一个测力传感器），如图2所示。该结构的测量装置可以减小测量不确定度。

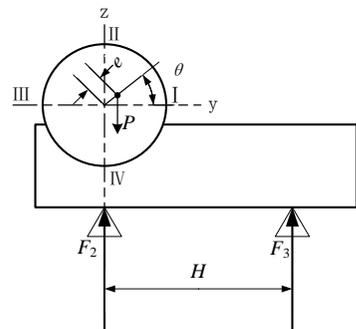


图2 结构优化后的测量示意图

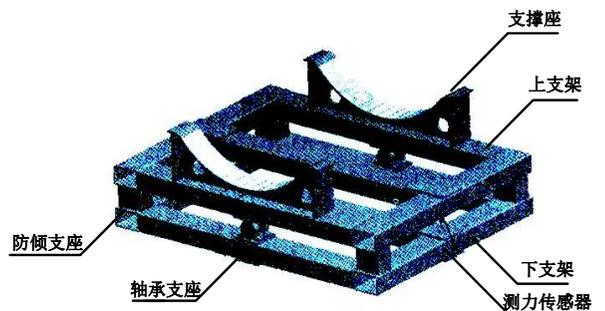


图3 质量、质心测量装置结构示意图

对于飞行物体，其径向质偏测量精度要求高于轴向质心位置的测量精度要求。优化后的质量、质心测量装置结构如图3所示。该装置主要由支撑座、上支架、下支架、轴承支座、防倾支架等部分组成。支撑座可根据被测物体的测量需求将支撑面设计为斜面式或可调式，并可在支撑座下面增加导轨，以调节支撑间距；采用轴承支座可减小上支架转动的摩擦阻

力；防倾支座与上支架间留有适当的间隙。

测量时，先将测量装置调平，并在被测物体上做好I、II、III、IV方位标记。将被测物体水平放置（I-III方位为水平），测得 $F_1$ ，再将物体转 $90^\circ$ （II-IV方位为水平），测得 $F_2$ ，根据力矩平衡原理得出：

$$F_1 \cdot H = P \cdot e \cdot \cos \theta \quad F_2 \cdot H = P \cdot e \cdot \cos(\theta + 90^\circ) \quad (6)$$

得到质偏：

$$u(e) = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial e}{\partial H} \right) u(H) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial e}{\partial P} \right) u(P) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial e}{\partial F_1} \right) u(F_1) \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial e}{\partial F_2} \right) u(F_2) \right]^2} \quad (8)$$

将以上各式代入（8），可得出：

$$u(e) = \frac{H}{P} \sqrt{(F_1^2 + F_2^2) \left[ \left( \frac{u(H)}{H} \right)^2 + \left( \frac{u(P)}{P} \right)^2 \right] + \frac{u^2(F_1)F_1^2 + u^2(F_2)F_2^2}{F_1^2 + F_2^2}} \quad (9)$$

上式中，注意到 $F_1$ 、 $F_2$ 在不确定度传播的意义上是等价的，即：

$$\frac{u(F_1)}{F_1} = \frac{u(F_2)}{F_2} \quad (10)$$

故上式可进一步简化为：

$$u(e) \leq \sqrt{\left( \frac{u(H)}{H} \right)^2 + \left( \frac{u(P)}{P} \right)^2 + \left( \frac{u(F)}{F} \right)^2} \quad (11)$$

#### 4.2 分度不准确引起的不确定度

若分度不准确，转动角度为 $90^\circ + \Delta\alpha$ ，显然有 $\Delta\alpha \leq u(\alpha)$ ，由于机构分度很容易达到 $u(\alpha) \leq 1^\circ$ ，因此式（5）可变化为：

$$\begin{aligned} F_2 \cdot H &= P \cdot e \cdot \cos(\theta + 90^\circ + \Delta\alpha) \\ &\approx -P \cdot e \cdot (\sin \theta + \Delta\alpha \cdot \cos \theta) \end{aligned} \quad (12)$$

将上述公式左右移项可得到：

$$(F_2 + P \cdot e \cdot \Delta\alpha \cos \theta / H) \cdot H = -P \cdot e \cdot \sin \theta \quad (13)$$

故可假设： $u_1(F) = P \cdot e \cdot u(\alpha) / H$ ， $u_1(F)$ 与力传感器本身的不确定度相合成，从而估计分度不准确的情形下径向质偏的测量不确定度。

$$\begin{aligned} u(e) &\leq e \cdot \left[ \left( \frac{u(H)}{H} \right)^2 + \left( \frac{u(P)}{P} \right)^2 + \left( \frac{u(F)}{F} \right)^2 + \left( \frac{u_1(F)}{F} \right)^2 + \left( \frac{u_2(F)}{F} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \\ &15 \times \left[ \left( \frac{0.1}{1500} \right)^2 + 0.005^2 + 0.005^2 + \left( \frac{34.8}{4000} \right)^2 + \left( \frac{2}{4000} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 0.17 \text{mm} \end{aligned} \quad (16)$$

## 5 结束语

优化后的质量、质心测量装置结构简单，使用方便。从原理上优化了测量装置的结构，能够满足导弹等大型柱状物体的质量、质心测量的要求。

$$e = \frac{H}{P} \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \quad \theta = \arccos \left( \frac{F_2}{F_1} \right) \quad (7)$$

## 4 测量不确定度分析

### 4.1 $F$ 、 $P$ 及 $H$ 引起的不确定度

由式（6）可得 $F$ 、 $P$ 及 $H$ 带来的不确定度 $u(e)$ 的公式：

### 4.3 测量支架引起的不确定度

实际工程中，测量支架的重量以及测量支架对称轴与支点之间的距离偏差也会带来不确定度。假定测量支架重为 $W$ ，对称轴线与支点之间的距离为 $\Delta l$ ， $\Delta l \leq u(l)$ ，对于测量仪器很容易达到 $u(l) \leq 0.1 \text{mm}$ 。因此，式（6）可进一步改变为：

$$F_1 \cdot H - W \cdot \Delta l = P \cdot e \cdot \cos \theta \quad (15)$$

上式左项可进一步演变为：

$$(F_1 - W \cdot \Delta l / H) \cdot H \geq (F_1 - W \cdot u(l) / H) \cdot H \quad (16)$$

故可以设： $u_2(F) = W \cdot u(l) / H$ ， $u_2(F)$ 与力传感器本身的不确定度相合成，从而估计测量支架给径向质偏带来的测量不确定度。

### 4.4 计算举例

设 $P=4 \times 10^5 \text{N}$ ， $W=3 \times 10^4 \text{N}$ ， $H=1500 \text{mm}$ ， $u(\alpha) = 0.5^\circ \approx 0.0028\pi$ ， $u(l)=0.1 \text{mm}$ ， $u(H)=0.1 \text{mm}$ ，测重及力传感器的准确度为0.5级，质心偏移的最大预计估计值15mm，则可得 $u_1(F)=34.8 \text{N}$ ， $u_2(F)=2 \text{N}$ 。因此，径向质偏测量的不确定度为：

## 参考文献

- 1 郑宾，侯文，杨瑞峰. 大尺寸柱状结构质量、质心测试方法[J]. 测试技术学报，2002

