

飞行器分段测量系统设计及误差分析

郭云城 晏祖根^{通讯作者} 孙健伟 崔基崑 齐明

(哈尔滨商业大学轻工学院 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘要: 针对多部段飞行器的质量及质心位置的高精度测量需求,为满足飞行器分段测量的设计要求,本文采用四点法的测量原理,设计出一套分段测量的自动化测量设备,并有针对性地对不同质量、长度的弹段设计出轻载和重载两套测量系统。利用 Solid works 建立三维模型,并介绍系统的结构以及工作原理。并利用蒙特卡洛法对系统进行误差评估,实验结果表明,两套测量系统的径向误差和轴向误差均小于 1.00mm,满足测量设备的精度要求。本文设计节约了设计成本,提高了飞行器测量的评估效率。这项研究对于飞行器设计、性能评估和操纵性控制具有重要的应用价值。

关键词: 多点称重法;分段检测;质量测量;质心测量

0 引言

飞行器的质量和质心位置是设计和操作飞行器时必须考虑的重要参数。准确测量飞行器的质量和质心位置对于飞行性能、稳定性和操纵性的评估和控制至关重要^[1,2]。目前关于质心测量的方法有很多,其中,多点称重法、不平衡力矩法、摆线法、悬线法等较为常用^[3]。国内在飞行器测量上的应用也很多,例如,哈尔滨工业大学王学仓等^[4]采用扭摆法加四点法设计了质量特征测量台;长春理工大学孙营营等^[5]采用利用不平衡力矩法设计出一套设备对锥形件进行质心质偏测量;重庆大学王佳昌等^[6]针对细长型飞行器,利用四点法加扭摆震动法设计了一套设备,来测量飞行器的质心及转动惯量;哈尔滨工业大学王梅宝等^[7]提出了一种坐标定位称重的方法,利用反向拟合的形式,对四点法进行优化,来对大尺寸飞行器的质量质心进行测量。结合国内外的相关设计原理,总结发现,目前对圆柱形飞行器的质量质心测量均采用多点称重法,而考虑到系统弹段定位的要求,因此本文采用了四点法。

本文利用多点称重法来设计一套自动化测量平台,旨在有针对性地解决多节飞行器分节测量质量质心时,不同质量、不同长度弹体需要的自动化设备。

1 质量质心测量原理

本文根据设计要求及测量功能的考虑,收集国内外相关的设计资料,确定以四点称重法为基础进行结构设计。下面利用简化模型对设计原理进行论述。

侧向质心测量原理图如图 1 所示,称重传感器两两对称,分布于 X 轴两侧,坐标为 (x_i, y_i) 。并根据称重传感器的测量数据 m_i ,利用力矩平衡原理,可得:

$$\begin{cases} M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4 \\ x_0 = \frac{m_1 \times x_1 + m_2 \times x_2 + m_3 \times x_3 + m_4 \times x_4}{M} \\ y_0 = \frac{m_1 \times y_1 + m_2 \times y_2 + m_3 \times y_3 + m_4 \times y_4}{M} \end{cases} \quad (1)$$

式中: M - 工件的总质量;

$m_i (i=1,2,3,4)$ - 去除空载后传感器采集的质量;

$(x_i, y_i) (i=1,2,3,4)$ - 4 个称重传感器在 X 轴, Y 轴的坐标;

(x_0, y_0) - 弹体质心的 X, Y 轴坐标。

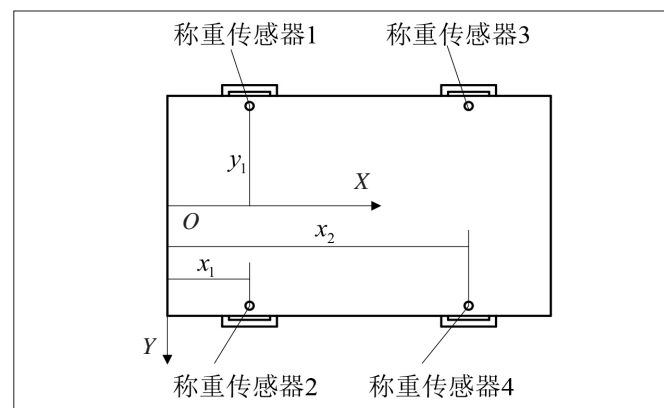


图 1 侧向质心测量原理图

纵向质心测量原理图如图 2 所示,柱体旋转一定角度 α 后,进行再次测量^[8],代入公式 (1),得到新一组的质心坐标 x_{02} 、 y_{02} 。

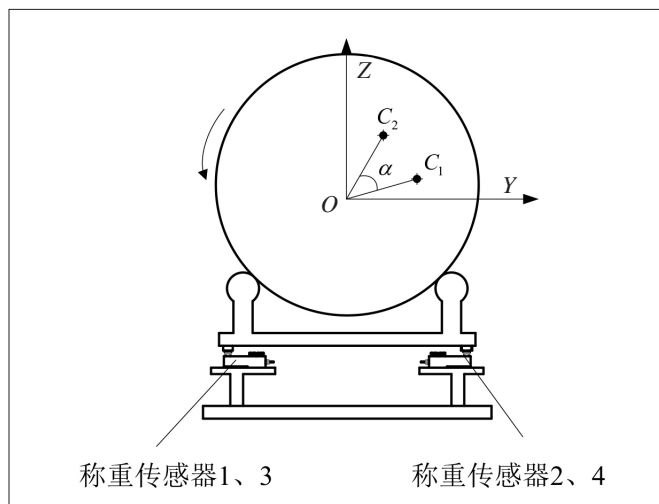


图2 纵向质心测量原理图

利用三角函数关系，求得质心在Z轴的坐标 z_0 的公式如下所示：

$$z_0 = \frac{y_{01} \times \cos \alpha - y_{02}}{\sin \alpha} \quad (2)$$

式中： α - 旋转角度。

由此可知，质心在Z轴的坐标精度受到旋转角度的精度及Y轴的质心的精度影响。

2 系统构成

根据设计要求及工作原理设计系统结构。系统用于多部段弹体的质量质心测量，整体由液压升降平台、夹持旋转机构、测量平台构成。测量系统整体结构示意图如图3所示。

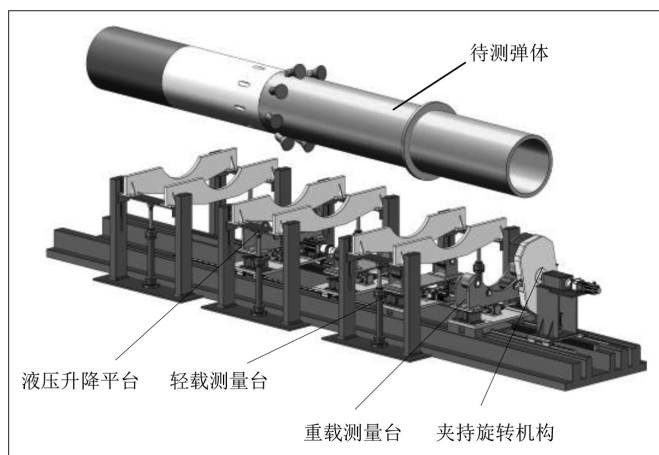


图3 测量系统整体结构示意图

整机要求测量不同长度、不同质量的多段弹体。考虑到称重传感器的量程选择，且弹体部段的质量相差过大，所以系统采用两套称重测量平台，分别对应轻载测量和重载测量。

2.1 轻载测量系统分析

考虑到系统测量精度要求，针对质量较小弹段的测量，本文设计出轻载测量平台，如图4所示。测量系统通过位置传感器控制运动电动机带动测量台移动，来测量不同长度的弹段；在弹体支撑方式上，采用一个主动轮和一个辅助轮的方式对弹体进行定位支撑；轻载系统的姿态调整模块是采用电动机带动主动轮的方式，来调整弹段的旋转角度。称重传感器的型号参数如表1所示。

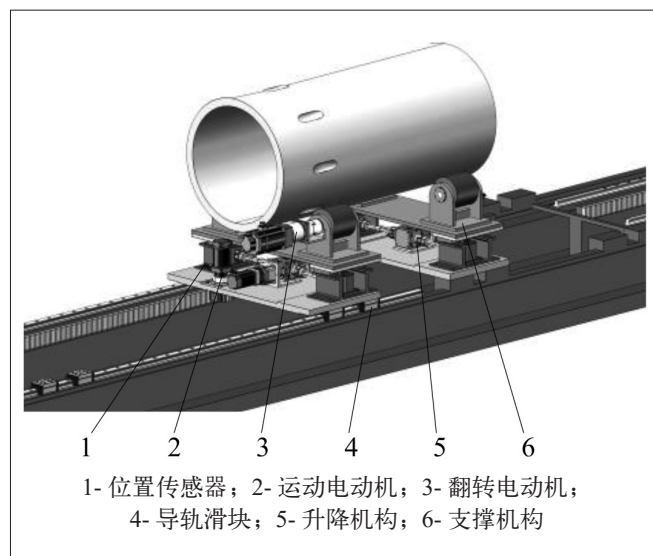


图4 轻载测量台示意图

表1 称重传感器参数表

型号	额定载荷	精度等级
SLB215 传感器	220kg	0.0167% R.C.

2.2 重载测量系统分析

考虑到系统测量精度要求，针对质量较大弹段及整体飞行器的测量，本文设计出重载测量平台，重载测量台示意图如图5所示。弹体支撑台采用两个称重轮、两个辅助轮两两对称布置的方式进行布置。测量系统包含一个固定测量台、一个移动测量台，采用电动机带动齿轮齿条在导轨上移动的运动方式，对不同长度的弹段进行测量。弹体的姿态调整机构采用外加夹持装置的方式，夹持弹体进行角度翻转。称重传感器型号参数如表2所示。

3 测量设备误差分析

在弹体的制造中，弹体质量及质心的位置对弹体的飞行稳定性、轨迹调整及打击精度都是至关重要

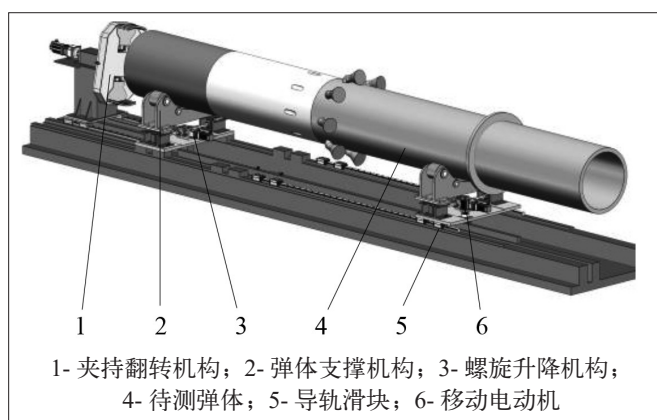


图5 重载测量台示意图

表2 称重传感器参数表

型号	额定载荷	综合误差
SLB215 传感器	550kg	0.0167% R.C.

的。所以对测量设备进行误差分析也是系统设计的重要一环。因为该系统采用了两套测量系统，所以两套测量系统要分别进行测量误差分析。

3.1 质量测量误差分析

本系统质量的测量比较简单，可以采用GUM方法进行分析。此处分析质量的测量误差，在上文中介绍了质量测量基本原理，结合实际测量情况，被测件质量的计算公式如下：

$$M = \sum_{i=1}^n K_i m_i \quad (3)$$

分析质量误差时，不考虑称重传感器斜率系数的影响，所以令 $K_i=1$ 。对每个 m_i 的标准不确定度 $u_i(y)$ ，在实际测量中，各个称重传感器的测量结果是不相关的，根据《测量不确定度评定与表示》中的不相关公式：

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2(y)} \quad (4)$$

设 u_m 为质量测量数据的误差， u_i 为传感器的不确定度，且传感器的选型一致，所以带入公式(4)中可得：

$$u_m = \sqrt{k \cdot u_i^2} \quad (5)$$

式中： k —系统内称重传感器的个数。

根据选型要求，称重传感器型号为SLB215，分别选择量程250kg和550kg的两款传感器对应测量系统的轻载和重载测量。在称重传感器SLB215的技术手册中，查到传感器的综合误差为0.018%

R.C.，由此可知，单个传感器误差分别为0.039kg和0.198kg，设 $u_{重}$ 为重载质量误差， $u_{轻}$ 为轻载质量误差，可得：

$$u_{重} = \frac{u_m}{g_{重}} = 0.015\% \quad (6)$$

$$u_{轻} = \frac{u_m}{g_{轻}} = 0.025\% \quad (7)$$

式中： $g_{重}$ —重载系统的工件质量，取最小值 $g_{重}=3800\text{kg}$ ；

$g_{轻}$ —轻载系统的工件总质量，取最小值 $g_{轻}=450\text{kg}$ 。

由此可知，质量的测量误差满足测量要求。

3.2 质心测量误差分析方法

对质量误差的分析比较简单，而进行质心误差分析时，考虑到模型求导的难度，传统公式计算的方法难以进行，因此，采用蒙特卡洛法(Monte Carlo method)对设备进行分析。

根据测量原理，同时考虑到传感器Z轴定位的误差过小，且在质心测量过程中Z轴的位置默认保持水平，所以在这里不考虑Z轴的影响，建立质心测量模型如下：

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(m_i, x_i, y_i, \alpha) \\ f_2(m_i, x_i, y_i, \alpha) \\ f_3(m_i, x_i, y_i, \alpha) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： m_i —称重传感器的测量值；

x_i, y_i —称重传感器的坐标；

α —姿态角度。

评估步骤如下：

(1) 在模拟开始之前，要定义输入量和误差数据，输入量数据从仿真软件中获得，误差数据要根据实际情况确定。

(2) 设置实验次数，本文统一设为10000次。

(3) 根据输入量的误差分布，提取 N 个随机数，将其与输入量相加代入测量模型中，利用Matlab对其进行计算，得到质心坐标的散点图，以及各个坐标的直方图。

(4) 根据得到的数据对仿真结果进行分析，利用贝塞尔公式确定其不确定度。

3.3 测量台质心误差分析

根据上文可知，轻载测量台采用的测量及传感器的型号，因此根据技术手册和结构变形量等相关经

验,可确定输入量误差如表3所示。

表3 轻载系统测量误差分布

输入量误差	概率分布
δ_m/kg	$N(0, 0.039)$
δ_x/mm	$N(0, 1.25)$
δ_y/mm	$N(0, 0.5)$
$\delta_\alpha/^\circ$	$N(0, 0.05)$

设定参数之后代入 Matlab 软件进行运算,得出结果。质心坐标分布图和 X、Y、Z 轴向质心测量误差直方图分别如图 6、图 7 所示。

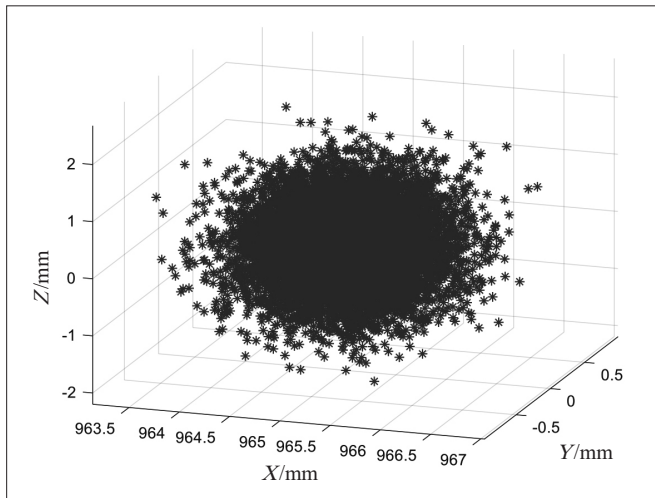


图6 质点坐标分布图

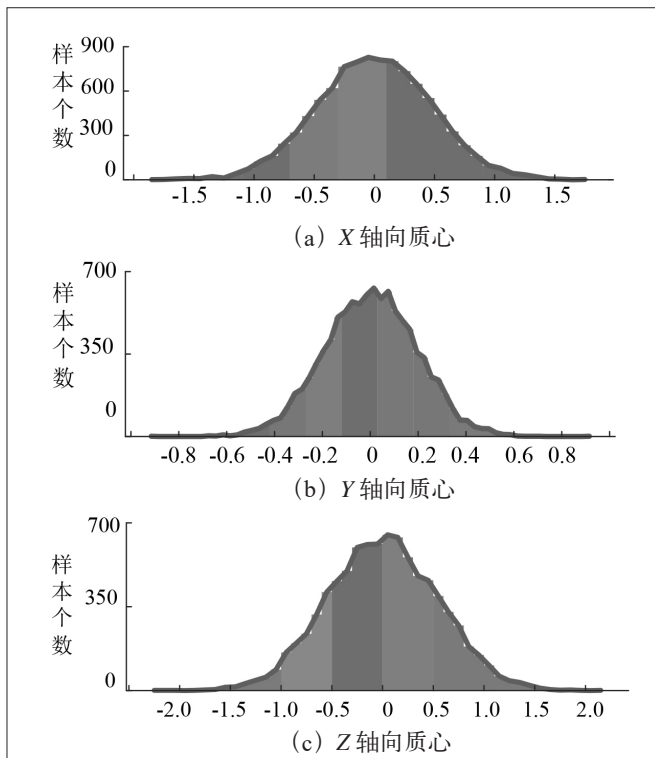


图7 X、Y、Z 轴向质心测量误差直方图

根据模拟系统的结果,可得到质心的误差区间以及标准差,仿真实验结果如表4所示。由此可知,轻载系统的误差精度满足系统要求。

表4 仿真实验结果

测量参数	95%误差区间/mm	标准差/mm
X轴质心	[-0.94,0.93]	0.48
Y轴质心	[-0.38,0.37]	0.19
Z轴质心	[-1.04,1.06]	0.54

重载系统与轻载系统的模拟过程相同,只需确定误差范围即可,重载系统测量误差分布如表5所示。

表5 重载系统测量误差分布

输入量误差	概率分布
δ_m/kg	$N(0, 0.198)$
δ_x/mm	$N(0, 1.5)$
δ_y/mm	$N(0, 0.7)$
$\delta_\alpha/^\circ$	$N(0, 0.1)$

根据上文可知,在设定相关参数后,进行模拟运算,得到测量系统的模拟结果。重载系统质心坐标分布图如图8所示。

根据模拟系统的结果,可得到质心的误差区间以及标准差,如表6所示。由此可知,重载系统的误差精度满足系统要求。

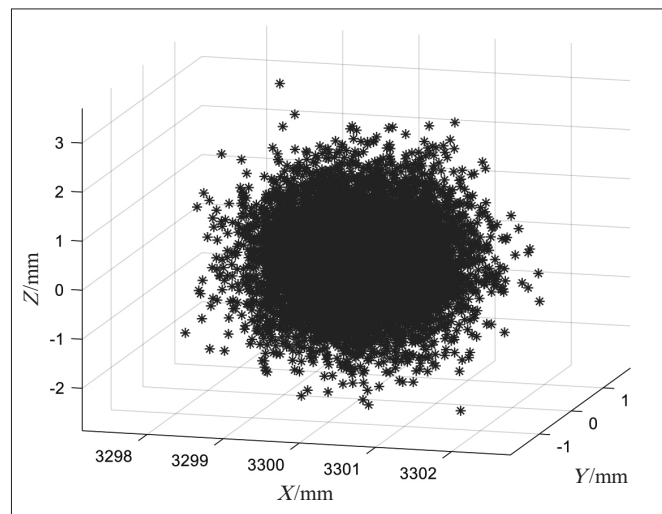


图8 重载质点坐标分布图

4 结语

为满足飞行器多部段弹体的分段以及整体质量质心的检测要求,本文研制出一套质量特征测量设备。首先,介绍了测量原理以及根据原理设计的系统结

表6 重载系统仿真实验结果

测量参数	95%误差区间/mm	标准差/mm
X轴质心	[-1.19,1.21]	0.62
Y轴质心	[-0.53,0.52]	0.27
Z轴质心	[-1.50,1.46]	0.75

构,并分别介绍了轻载测量部分及重载测量部分的结构构成;然后根据测量原理在 Matlab 中搭建实验平台,利用蒙特卡洛法对设备进行误差分析。仿真结果得出,轻载和重载测量平台的测量误差,径向误差均小于 1.00mm,轴向误差均小于 1.00mm,满足设备的精度要求。这套设计流程不仅可以提高生产效率和质量控制,还减少了实验仿真的步骤,提高了实验效率。

参考文献:

- [1] 郭峰. 运载火箭多功能对接架车研究 [J]. 电子机械工程, 2020, 36(03): 53-56.
- [2] 侯悦民, 季林红, 金德闻. 小卫星动平衡研究——质心偏差对姿态控制精度的影响 [J]. 导弹与航天运载技

术, 2003(04): 12-16.

- [3] 张晓琳, 赵子娟, 张斌, 等. 大尺寸带翼飞行器质心测量新方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(08): 93-100.
- [4] 王学仓. 导弹质量特性参数测量系统设计及分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] 孙营营. 锥柱形件质心质偏测试的研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2015.
- [6] 王佳昌. 弹箭模型质量特性参数一体化测量技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [7] 王梅宝. 大尺寸飞行器质心柔性测量关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [8] 张鹰华, 樊新华, 张雷雨, 等. 基于四点支撑法的导弹质量质心测量系统设计及误差分析 [J]. 机械设计与研究, 2016, 32(03): 96-99.

作者简介: 郭云城 (1999.12-), 男, 汉族, 河南开封人, 硕士研究生, 研究方向: 自动化技术。

通讯作者: 晏祖根 (1973.03-), 男, 汉族, 江西宜春人, 博士研究生, 教授, 研究方向: 机器人技术。

