

doi: 10.7690/bgzdh.2021.06.005

多部段飞行器质量质心全冗余测量系统

武艺泳, 杨洪涛, 郑国良, 张磊乐, 游广飞

(郑州机械研究所有限公司智能装备事业部, 郑州 450052)

摘要: 针对多部段飞行器装配、测试持续时间长, 过程不可间断且不可逆的问题, 设计一种质量质心全冗余测量系统。基于主、备 2 个系统的构成及功能, 利用三点支撑称重法进行质量质心测量, 提出一种皮重等效换算方法简化测量流程, 对称重传感器差异性系数和非线性系数进行在线标定, 通过分析系统误差来源, 采用标准样件对系统进行质量质心实验测试。实验结果表明: 该设计测量结果一致性好, 可有效提高测量系统可靠性。

关键词: 飞行器; 质量; 质心; 冗余

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Fully Redundant Measuring System for Mass and Centroid of Multi-segment Aircraft

Wu Yiyong, Yang Hongtao, Zheng Guoliang, Zhang Leile, You Guangfei

(Intelligent Equipment Division, Zhengzhou Research Institute of
Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Aiming at the problems of long assembly and test duration of multi-segment aircraft, the process is uninterrupted and irreversible, a fully redundant measurement system for mass and centroid is designed. Based on the structure and function of the main and standby systems, the 3-point support weighing method is used to measure the mass and centroid, a tare equivalent conversion method is proposed to simplify the measurement process, and the difference coefficient and nonlinear coefficient of the load cell are calibrated online. By analyzing the source of system error, using standard samples to test the system's mass and centroid. The experimental results show that the design measurement results have good consistency and can effectively improve the reliability of the measurement system.

Keywords: aircraft; mass; centroid; redundancy

0 引言

随着我国航空航天、武器装备事业快速持续发展, 空间飞行器的品种迅速增加, 为了提高其飞行稳定性、保证姿态调整及控制入轨精度, 飞行器在总体设计时, 对于质量质心参数测量提出了明确的技术指标^[1-3]。一些飞行器在生产、装配、加注等过程中, 需要对多个部段及状态分别进行质量质心在线测量^[4-5], 质量质心测装平台在进行质量质心测量的同时, 还作为飞行器装配平台使用。飞行器从第一个部段或状态安装到测装平台上开始测试, 到多个部段完全组装测试完成, 可能持续数天时间。由于测量过程的不可间断及不可逆性, 为了保证任务顺利进行, 就需要质量质心测量系统具有极高的可靠性。

目前, 质量质心测量采用的主要方法有多点支撑称重法、不平衡力矩法、旋转配平法等^[6-8], 但测量系统基本都不具备冗余测量功能, 无法保证测量过程的可靠性。

笔者设计了一种针对多部段、大体积、大质量飞行器的质量质心全冗余测量系统, 在满足质量质心高精度测量的前提下, 采用主、备 2 个系统的在线交叉切换与数据共享实现系统主体结构、测试软件、数据的全冗余功能; 同时, 为了简化冗余测量过程, 提出并验证了一种皮重等效换算方法。

1 组成及结构

系统采用三点支撑称重法进行质量质心的测量^[9-10], 为了实现全冗余功能, 测量系统由 2 个相对独立的子系统构成, 其中一个系统称为主系统, 另一个系统称为备系统。主、备系统主要包含: 系统主体、称重传感器及称重仪表、上位机及测量软件等。系统主体结构如图 1 所示。

系统主体主要包含: 主测量称体(A1、A2、A3)、备测量称体(B1、B2、B3)、安装平台、直立测装平台、样件托盘、标准样件等。分置式测量称体上安装称重传感器、定位锥销、支撑组件、保护装置等, 是系统主要的支撑及称量单元; 直立测装平台用于

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-04-28

作者简介: 武艺泳(1986—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事机电与测控技术研究。E-mail: wuyiyong1@163.com。

连接飞行器或样件托盘，作为飞行器或样件的安装测试平台。主、备系统各包含 3 个沿圆周呈 120° 均布的称重传感器，安装于分置式测量称体上，6 个分置式测量称体呈 60° 分布，主、备系统共用一个测装平台。

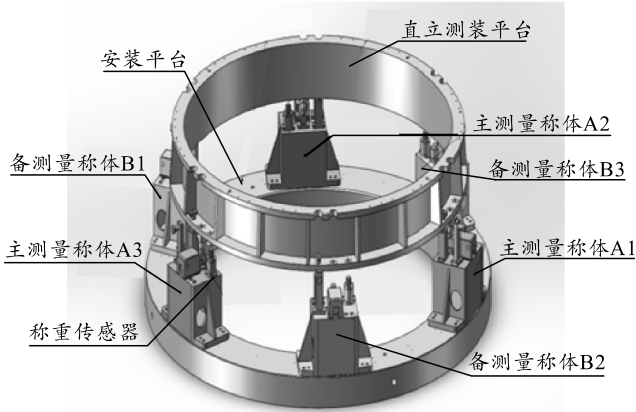


图 1 系统主体结构

直立测装平台通过可升降式称重顶尖支撑于称重传感器上。正常使用过程中，只使用主系统进行测量，在主系统发生故障时，能够在线切换至备系统继续进行测量。主、备系统称重顶尖保持适当高度差，在实际操作过程中，保持备系统称重顶尖高度位置不变，通过升降主系统称重顶尖高度实现主、备系统称重切换。

2 测量原理

主系统 3 个称重传感器为 A1、A2、A3，备系统 3 个称重传感器为 B1、B2、B3，以称重传感器分布圆圆心为原点定义直角坐标系，系统传感器分布及坐标定义如图 2 所示。

6 个称重传感器分布圆半径为 R 。根据力平衡及力矩平衡原理，被测物体质量质心计算公式如下：

主系统：

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{A1} + M_{A2} + M_{A3} \\ Y_p &= R(2M_{A1} - M_{A2} - M_{A3})/M \\ Z_p &= \sqrt{3}R(M_{A2} - M_{A3})/(2M) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

备系统：

$$\left. \begin{aligned} M &= M_{B1} + M_{B2} + M_{B3} \\ Y_p &= R(M_{B2} + M_{B3} - 2M_{B1})/M \\ Z_p &= \sqrt{3}R(M_{B3} - M_{B2})/(2M) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： M 为被测物体质量； M_{A1} ， M_{A2} ， M_{A3} 为主系统称重传感器 A1，A2，A3 的质量测量值； M_{B1} ， M_{B2} ， M_{B3} 为备系统称重传感器 B1，B2，B3 的质量测量值； (Y_p, Z_p) 为被测物体质心坐标。

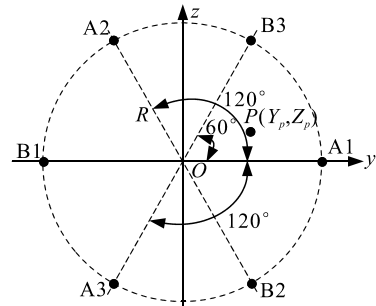


图 2 传感器分布及坐标定义

3 系统设计

3.1 冗余功能

系统冗余功能结构如图 3 所示，具有实时、在线、可交叉的全冗余功能。主、备系统组成基本相同，均包含称重传感器、称重仪表、工控机、打印机、系统电源、开关指示灯等，称重仪表可同时采样 3 个称重传感器数据，并通过 Profibus-DP 通信方式与上位机进行数据通信，由上位机软件处理并计算测量结果。

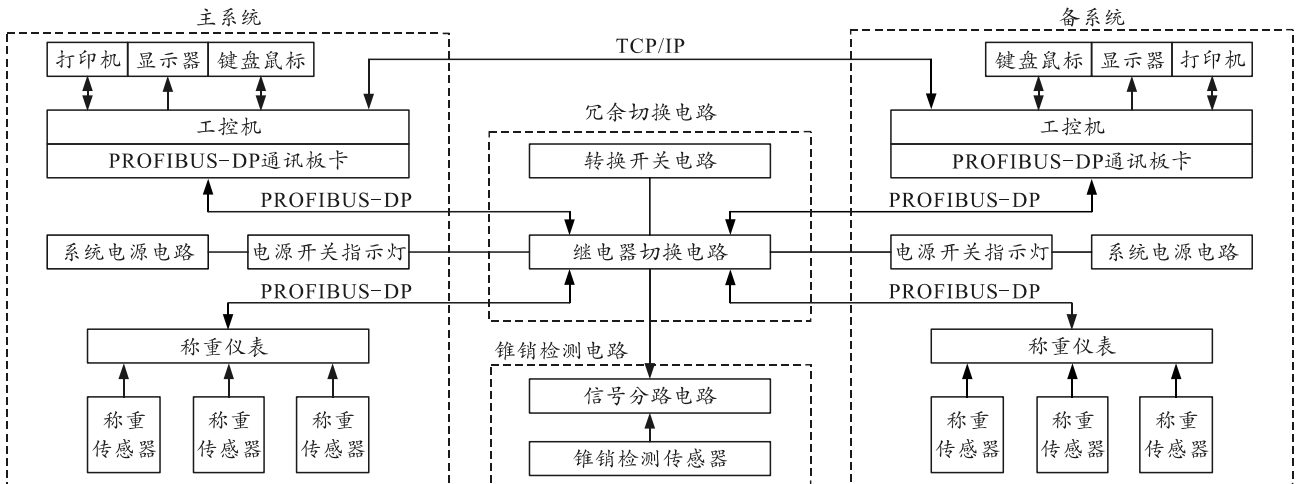


图 3 系统冗余功能结构

主、备系统可独立进行测量，同时通过系统设置的切换电路开关，主、备系统可实现交叉冗余。在操作台上设置旋钮开关，当打开旋钮开关时，系统自动检测开关状态，上位机与称重仪表可实现交叉通信，选择测量软件的交叉冗余功能，主系统上位机及测量软件可使用备系统的称重仪表及称重传感器进行测量，备系统上位机及测量软件可使用主系统的称重仪表及称重传感器进行测量。

为防止数据丢失，主、备系统上位机之间采用以太网通信接口实现通信，测量数据及系统参数可同步共享，并在 2 个系统上相互备份保存，实现数据的实时冗余。

在测量过程中，系统一处或多处发生故障时，均可在线进行快速切换并继续测量，保证任务顺利进行。系统测量冗余策略如表 1 所示，可根据故障发生的类型和位置选择合适的切换策略。

表 1 系统测量冗余策略

序号	上位机	称重仪表	测量结果输出	交叉冗余开关
1	主上位机 A	主称重仪表 A	主或备打印机	关
2	备上位机 B	备称重仪表 B	主或备打印机	关
3	主上位机 A	备称重仪表 B	主或备打印机	开
4	备上位机 B	主称重仪表 A	主或备打印机	开

从上表可以看出：系统冗余功能强大，从硬件、软件、数据多方面实现冗余，有效提高了系统的可靠性。

3.2 皮重等效换算

在进行质量质心测量过程中，空称即皮重值作为基础值需要在第一步称量保存下来，后续对飞行器多个部段及状态测量时均需要调用皮重值参与计算。主、备系统可采取直接称量的方法分别读取并保存各自的皮重值，但该方法需要在每次测量任务时进行一次主、备系统称重传感器的切换。切换主、备系统称重传感器的操作不仅费时费力，而且频繁操作还可能会降低系统使用寿命，增加系统称量状态发生变化的风险。

笔者提出一种皮重等效换算方法，在测量过程中只读取主系统称重传感器皮重值，并通过换算方法得到备系统称重传感器皮重值。空称在主、备系统称量时质量和位置保持不变，又根据图 2 主、备系统称重传感器分布，可得：

$$\left. \begin{aligned} P_{B1} + P_{B2} + P_{B3} &= P_{A1} + P_{A2} + P_{A3} \\ R(P_{B2}/2 + P_{B3}/2 - P_{B1}) &= R(P_{A1} - P_{A2}/2 - P_{A3}/2) \\ R(\sqrt{3}/2 P_{B3} - \sqrt{3}/2 P_{B2}) &= R(\sqrt{3}/2 P_{A2} - \sqrt{3}/2 P_{A3}) \end{aligned} \right\} (3)$$

式中： P_{A1} 、 P_{A2} 、 P_{A3} 分别为主系统称重传感器皮重值； P_{B1} 、 P_{B2} 、 P_{B3} 分别为备系统称重传感器皮重值； R 为称重传感器分布半径。由式(3)可得：

$$\left. \begin{aligned} P_{B1} &= (2P_{A2} + 2P_{A3} - P_{A1})/3 \\ P_{B2} &= (2P_{A1} + 2P_{A3} - P_{A2})/3 \\ P_{B3} &= (2P_{A1} + 2P_{A2} - P_{A3})/3 \end{aligned} \right\} (4)$$

由于受称重传感器安装位置精度及各称重传感器特性影响，且主、备系统水平度无法保证完全一致，备系统称重传感器皮重换算值和实际值存在一定误差，具体实验数据如表 2 所示。

表 2 皮重实际值和换算值对比

主系统皮重 称量值/kg	备系统皮重称量值与实际值对比		
	备系统换算值/kg	备系统实际值/kg	误差/%
$P_{A1}=893.80$	$P_{B1}=887.52$	$P_{B1}=887.35$	0.019
$P_{A2}=889.26$	$P_{B2}=892.07$	$P_{B2}=891.98$	0.010
$P_{A3}=888.93$	$P_{B3}=892.40$	$P_{B3}=892.54$	-0.016
$P_{\Sigma}=2\ 671.99$	$P_{\Sigma}=2\ 671.99$	$P_{\Sigma}=2\ 671.87$	0.005

由上表可以看出：备系统称重传感器皮重换算值和实际值误差不大于 0.02%，可以满足系统测量要求。

3.3 称重传感器系数标定

称重传感器在全量程范围内具有非线性特性，且传感器个体灵敏度也存在差异^[11-12]，为了提高质量质心测量精度，笔者结合该系统结构和测量方法，对称重传感器差异性系数和非线性系数进行在线标定。主、备系统称重传感器系数标定方法相同，下面以其中一组传感器为例进行阐述。

由于称重传感器灵敏度的差异性，同一组 3 个称重传感器差异性系数分别为 K_1 、 K_2 、 K_3 。笔者采用一种偏置放置砝码并求解系数矩阵的方法，标定称重传感器的差异性系数，具体方法如下：样件托盘放置于测装平台上用于承载砝码，将已知质量为 M_F 的砝码分别向 3 个传感器偏置，使 3 个传感器尽量呈偏载状态，记录每个传感器称量值为 $M_{ij}(i=1,2,3; j=1,2,3)$ ， i 表示传感器标号， j 表示放置位置，可得：

$$\begin{bmatrix} M_{11} & M_{21} & M_{31} \\ M_{12} & M_{22} & M_{32} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} = M_F \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} (5)$$

由上式可得：

$$K_1 = (M_F \begin{vmatrix} 1 & M_{21} & M_{31} \\ 1 & M_{22} & M_{32} \\ 1 & M_{23} & M_{33} \end{vmatrix}) / \begin{vmatrix} M_{11} & M_{21} & M_{31} \\ M_{12} & M_{22} & M_{32} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{vmatrix}$$

$$K_2 = \left(M_F \begin{vmatrix} M_{11} & 1 & M_{31} \\ M_{12} & 1 & M_{32} \\ M_{13} & 1 & M_{33} \end{vmatrix} \right) / \begin{vmatrix} M_{11} & M_{21} & M_{31} \\ M_{12} & M_{22} & M_{32} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{vmatrix},$$

$$K_3 = \left(M_F \begin{vmatrix} M_{11} & M_{21} & 1 \\ M_{12} & M_{22} & 1 \\ M_{13} & M_{23} & 1 \end{vmatrix} \right) / \begin{vmatrix} M_{11} & M_{21} & M_{31} \\ M_{12} & M_{22} & M_{32} \\ M_{13} & M_{23} & M_{33} \end{vmatrix}。 (6)$$

称重传感器非线性系数采用分段法进行标定。将系统总量程合理划分为 N 个连续的量程段，在每个量程段内对传感器系数进行线性化，每个量程段的传感器系数为 $K_{Di}(i=1,2,\dots,N)$ 。选取各量程段内已知质量为 $M_{Di}(i=1,2,\dots,N)$ 的砝码进行称重，每个传感器的称重值为 $G_{ij}(i=1,2,\dots,N; j=1,2,3)$ ， i 表示量程段， j 表示传感器标号，可得：

$$K_{Di}(K_1 G_{i1} + K_2 G_{i2} + K_3 G_{i3}) = M_{Di}(i=1,2,\dots,N)。 (7)$$

由式(7)可得：

$$K_{Di} = M_{Di} / (K_1 G_{i1} + K_2 G_{i2} + K_3 G_{i3})(i=1,2,\dots,N)。 (8)$$

4 系统误差分析

4.1 质量测量误差

质量测量误差主要来源于称重传感器的精度误差，为随机误差。假设传感器的精度误差为 $u_i(i=1,2,3)$ ，根据质量计算公式可得被测物体的质量误差 u_m 为：

$$u_m = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}。 (9)$$

系统选用的称重传感器量程为 3 t，精度等级为 C6，则有： $u=u_1=u_2=u_3=(3\ 000/6\ 000)\text{kg}$ ，代入式(9)可得：

$$u_m = \sqrt{3}u = \frac{\sqrt{3}}{2} \text{ kg}。$$

系统被测飞行器最小质量为 2 t，质量测量最大相对误差 $\sigma_m = u_m / 2\ 000 = 0.043\%$ 。

4.2 质心测量误差

质心测量误差主要跟称重传感器的精度误差以及测装平台水平度有关。

4.2.1 称重传感器精度引起质心误差

以主系统为例，称重传感器精度引起的 Y 向质心误差：

$$u_{Y_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y_p}{\partial M_{A1}} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_p}{\partial M_{A2}} u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial Y_p}{\partial M_{A3}} u_3 \right)^2}。 (10)$$

由式(1)和式(10)可得：

$$u_{Y_p} = \frac{3R}{2M^2} u \sqrt{(M_{A2} + M_{A3})^2 + 2M_{A1}^2}。 (11)$$

系统传感器分布半径 R 为 1 480 mm，传感器精度误差 u 为 0.5 kg，被测飞行器最小质量 M 为 2 t，对式(11)取极值可得：

$$u_{Y_p} \leq (\sqrt{6}R/2M)u = 0.45 \text{ mm}。 (12)$$

同理可得 Z 向质心误差：

$$u_{Z_p} = \sqrt{\left(\frac{\partial Z_p}{\partial M_{A1}} u_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial Z_p}{\partial M_{A2}} u_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial Z_p}{\partial M_{A3}} u_3 \right)^2} =$$

$$\frac{\sqrt{3}R}{2M^2} u \sqrt{(M_{A2} - M_{A3})^2 + (M_{A1} + 2M_{A3})^2 + (M_{A1} + 2M_{A2})^2} \leq$$

$$\frac{\sqrt{6}R}{2M} u = 0.45 \text{ mm}。 (13)$$

4.2.2 测装平台水平度引起质心误差

测装平台水平度采用水平仪进行测定，系统调节测装平台水平度 h 小于 0.1 mm/m，假定被测物体质心高度 L 不大于 2 m，测装平台水平度引起的质心误差 Δ 为：

$$\Delta = h / \sqrt{(1 + h^2)} L \leq 0.2 \text{ mm}。 (14)$$

5 试验测试

采用标准样件对系统进行质量质心试验测试。如图 4 所示，系统共设计 2 个圆柱形标准样件，分别为样件 1 和样件 2，标准样件质量经计量部门计量认证，样件 1 质量为 2 213.31 kg，样件 2 质量为 2 229.88 kg；并采用动平衡方法保证样件横向质心小于 0.05 mm(可认为标准样件理论质心为 0)。样件放置于样件托盘正中心位置，放置精度通过精密加工保证。

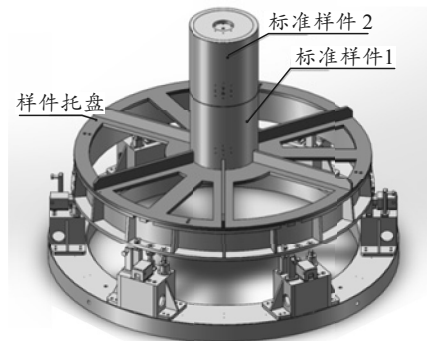


图 4 标准样件质量质心试验

具体测试过程如下：

- 1) 在主系统状态下测量皮重值；
- 2) 将样件 1 放置于样件托盘中心位置，进行质

量质心测量；

3) 切换至备系统状态，通过主系统皮重值等效换算备系统皮重值，进行样件 1 质量质心测量；

4) 将样件 2 放置于样件 1 上，进行质量质心测量；

5) 切换至主系统状态，进行质量质心测量。

分别进行 5 次试验，记录测量结果，图 5 为质心测量数据统计，图 6 为质量测量相对误差统计。

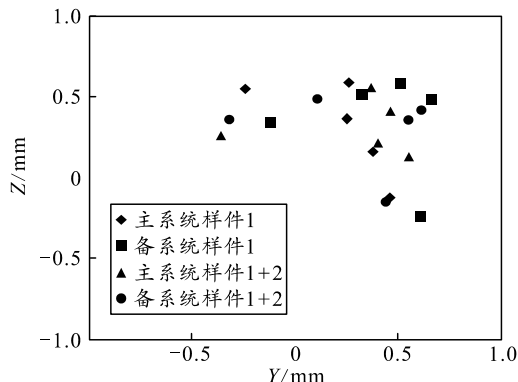


图 5 质心测量数据统计

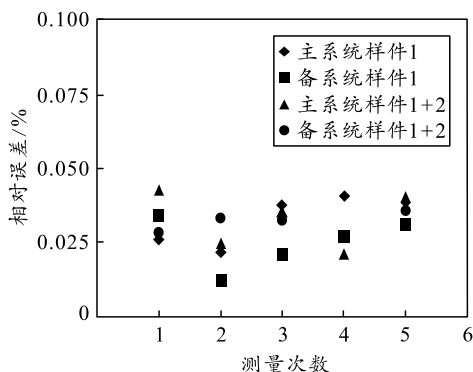


图 6 质量测量相对误差统计

由试验数据可看出：该系统质量测量精度 $\leq 0.05\%$ ，质心测量精度 $\leq 1\text{ mm}$ ；系统对多个部段物体的质量质心测量均能达到较高的测量精度，且主、备冗余系统切换后测量结果具有较好的一致性。

6 结束语

笔者采用三点支撑法设计的质量质心测量系

统，从硬件、软件、数据等方面实现了实时、在线、可交叉的全冗余功能，具有极高的可靠性，适用于多部段飞行器长时间、不间断的质量质心高精度测量任务。皮重等效换算方法简化了系统测量流程，便于人员操作；称重传感器差异性系数和非线性系数相结合的标定，可以提高系统质量质心测量精度。通过质量质心测量误差分析及样件试验测试结果表明：该系统主、备冗余切换后测量结果一致性好，系统质量测量精度 $\leq 0.05\%$ ，质心测量精度 $\leq 1\text{ mm}$ 。

参考文献：

- [1] 温晶晶, 邓聃, 吴斌. 无人机质量特性参数一体化测量系统的研究[J]. 计量学报, 2018, 39(2): 145-150.
- [2] 满益明, 吴俊辉, 康军, 等. 空天飞行器质量特性设计方法研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(4): 22-27.
- [3] 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.
- [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] 蒋超, 王兆魁, 范丽, 等. 卫星筒式偏心在轨分离动力学分析[J]. 飞行力学, 2010, 28(1): 76-79.
- [6] 侯振东, 王兆魁, 张育林. 基于推力器的组合航天器质量特性辨识方法研究[J]. 航天控制, 2015, 33(1): 54-60.
- [7] 刘明勇, 罗锋, 徐健. 质量质心测量方法与实例分析[J]. 制造技术与机床, 2019(4): 138-141.
- [8] 卢志辉, 孙志扬, 李祥云, 等. 高精度质心测量方法研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(12): 1748-1752.
- [9] 王秋晓, 王迎. 飞行器质量特性参数测量[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(12): 23-28.
- [10] 李鹏, 陈艳, 白彦伟, 等. 航天产品质量质心测试精度评估分析[J]. 航天制造技术, 2016, 12(6): 44-47.
- [11] 王有贵, 吴双双, 陈红江. 称重传感器蠕变误差的神经网络补偿方法[J]. 计量学报, 2018, 39(4): 510-514.
- [12] 林海军, 王震宇, 林亚平, 等. 基于导数约束的称重传感器非线性误差补偿方法[J]. 传感技术学报, 2013, 26(11): 1537-1542.