

一种高精度冗余质量质心测试方法研究

于荣荣, 於陈程, 王晓阳, 于龙岐, 谭旭, 姜禄华

(北京卫星制造厂有限公司, 北京 100190)

[摘要] 针对传统质量质心测试方法测试精度相对不高、系统容错性差的问题,设计了一种高精度冗余质量质心测试方法。该方法对测量单元进行在线标定,软件根据传感器测量值自动选择标定系数,对系统进行质量和质心修正,从而消除传感器的非线性误差;根据精测的产品安装误差,软件自动进行质心测试结果的补偿,降低被测件安装的横移和偏斜影响,进而提高质量和质心的测量精度;通过硬件系统的备份设计和软件系统的数据共享,实现系统交叉冗余,提高系统的可靠性。最后,经实测验证,系统的质量测量误差优于0.05%,质心测量误差 $< \pm 1\text{mm}$,且冗余切换简单方便。

关键词: 高精度; 冗余; 质量; 质心; 测试

Research on High Precision Redundant Mass and Gravity Center Measure Method

YU Rongrong, YU Chencheng, WANG Xiaoyang, YU Longqi, TAN Xu, JIANG Luhua

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100190, China)

[ABSTRACT] The precision of traditional mass and gravity center measure method is relatively low and the system fault tolerance is not high. This paper presents a high precision redundant measure method for mass and gravity center. The method could make on-line calibration for the measurement unit, and the software could automatically select the calibration coefficient with respect to the measurement value of sensors to correct the mass and gravity center value, so as to eliminate the nonlinear error of the sensors. The software can automatically compensate the measurement result of the gravity center according to the installation error of the payload so that the misalignment and deflection effect of installation can be reduced and the measurement accuracy of the mass and gravity center can be improved. The system reliability is enhanced based on the realization of cross redundancy through the hardware system's redundant design and the software system data sharing. The method has passed the actual tests, its mass measurement error is better than 0.05%, and its gravity center measurement error is less than $\pm 1\text{mm}$, at the same time the mass and gravity center redundancy switching function of the system has been verified.

Keywords: High precision; Redundant; Mass; Gravity center; Measure

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.083

质量特性是物体固有的力学特性参数^[1],是高速远程运动物体自动控制即测试的关键参数^[2-3],也是众多工程领域所关心的重要参数^[4-5]。汽车、武器系统、火箭、飞机、航天器等的操纵稳定性、运行安全性、姿态准确性等均与其质量特性有关^[6-7],因此对质量质心的测试精度提出了很高的要求。很多情况下,为了更好地控制和调整运行轨道、运动姿态和运动精度,在产品生产、装配、燃料加注等过程中,要对其质量特性进行不间断测量,这就要求测量设备有高可靠性和低故障率。为了满足在线检测不间断、高精度测量的需

求,提出了一种基于质量标定和质心补偿的高精度测试方法,和一种基于硬件冗余和数据共享的冗余测试方法,从而提高当前质量质心测量系统的测试精度和可靠性^[8]。

1 工作原理

本文采用主备份测量单元进行质量质心的测量,每组测量单元采用三点测力测试法^[9]。即系统中有主和备2组传感器,每组3个,测量时根据3个传感器的测量值和传感器之间的几何关系,由力平衡和力矩平衡分

别计算出被测件质量和在测试坐标系下的质心坐标,其原理如图 1 所示。

$$\begin{cases} \sum F = F_1 + F_2 + F_3 - m = 0 \\ \sum M_y = (F_3 - F_2) \times \frac{D}{2} - m \times Z_c = 0 \\ \sum M_z = (F_2 + F_3) \times (L - R) - F_1 \times R - m \times Y_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

即:

$$\begin{cases} m = F_1 + F_2 + F_3 \\ Z_c = \frac{(F_3 - F_2) \times \frac{D}{2}}{m} \\ Y_c = \frac{(F_2 + F_3) \times (L - R) - F_1 \times R}{m} \end{cases} \quad (2)$$

式中, Y_c 为质心 C 在传感器组坐标系下的 Y 坐标, Z_c 为质心 C 在传感器组坐标系下的 Z 坐标, R 为 3 个传感器外接圆的半径, F_1, F_2, F_3 为同一组的 3 个传感器同时测得的重量, m 为被测件重量, D 为传感器 2 和 3 之间的距离, L 为传感器 1 到其对边中点的距离。

2 方案设计

系统中的 6 个传感器分为两组, $P_1 \sim P_3$ 为主传感器, $P_4 \sim P_6$ 为备份传感器, 2 组传感器安装于同一圆周, 分别在圆周上均布, 主传感器与其对应的备份传感器间夹角为 θ , 如图 2 所示。正常使用过程中, 仅其中一组传感器受力, 对被测件进行质量质心测量。由专用机构实现主备份切换, 保证切换前后, 各传感器的定位精度和产品安装面的水平度。

系统中的坐标系分为主坐标系和备份坐标系, 如图 2 所示。两坐标系均以传感器所在圆的圆心为坐标原点, 以竖直向上为 $X+$ 。主坐标系以 P_1 方向为 $Y+$, 备份坐标系以 P_4 方向为 $Y+$, Z 轴均由右手坐标系确定。

由式(2)中的质心坐标为主备传感器分别测得的主坐标系和备份坐标系下的坐标。为了使测试系统的坐标系统一, 以主坐标系为测试坐标系, 将备份坐标系下的质心坐标转换到主坐标系下。

C 点在备份坐标系下的坐标分为 $[Y_0, Z_0]^T$, 转换到主坐标系下的坐标为 $[Y_1, Z_1]^T$, 根据先旋转后平移的原则, 坐标转换公式为:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, θ 为转换后的坐标系统转换前的坐标系逆时针旋转的角度。

为了提高系统的可靠性, 除传感器冗余外, 进行了如图 3 所示的冗余设计。系统中有两个独立的测量单元, 每个测量单元包括 3 个称重传感器、3 个信号变送仪表、1 台工控机和 1 台打印机, 且各仪表、工控机和打

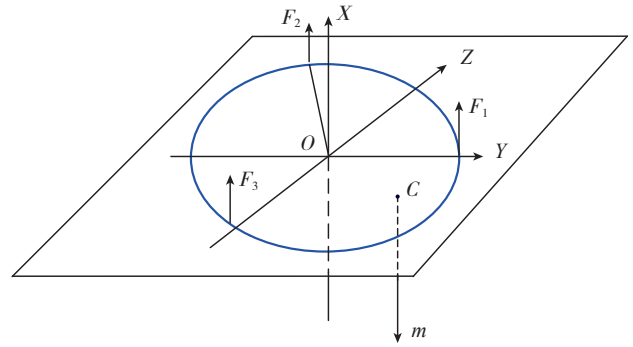


图1 三点法原理示意图

Fig.1 Principle of three points method

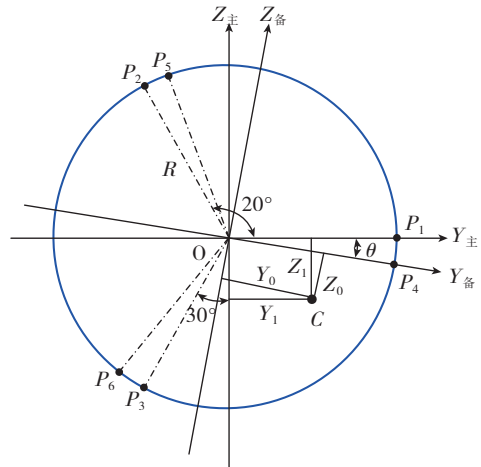


图2 传感器分布示意图

Fig.2 Distribution of the sensors

印机均有独立开关。

6 个仪表有不同的子地址, 两工控机上的测试软件分别通过 485 总线与仪表通信, 获取传感器信号。为防止主备测试软件同时向仪表发送数据, 造成数据冲突的情况, 系统中设置双通道船形开关进行信号切换。6 个仪表的信号连到同一个工控机, 船形开关可一键将信号切换至另一工控机, 实现主备的硬件切换; 测试软件根据选择的传感器, 自动设置相应的通讯子地址, 实现主备的软件切换。主备切换操作简便, 防止数据冲突, 提高整个设备的可靠性。

两个测量单元之间的测试数据共享, 进一步提高系统可靠性。一个数据库发生变化时, 软件自动通过 TCP/IP 协议通信, 更新另一数据库, 防止两次测试时运行不同的数据库造成数据紊乱、未及时更新数据库而无法继续之前试验或某台工控机损坏而丢失测试数据等情况。

本方案中的硬件冗余设计和数据共享方法, 使系统形成如表 1 所示的冗余形式, 两个测量单元相互作为备用单元形成冗余, 又可形成交叉冗余, 大大提高系统的可靠性。一个测量单元发生故障, 备用单元可立即启动,

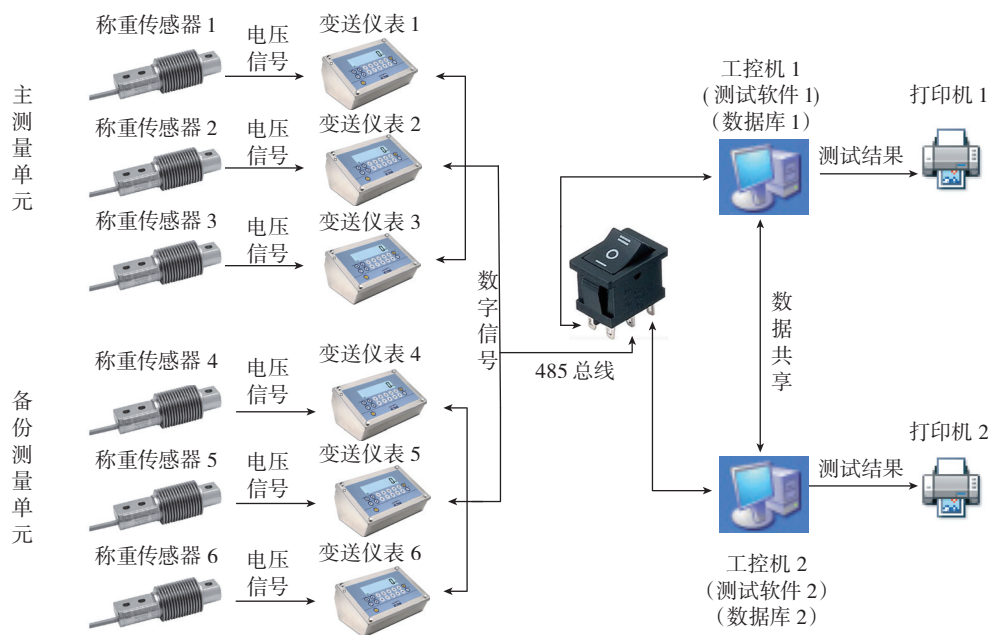


图3 测试系统组成

Fig.3 Composition of the measure system

表1 系统冗余形式

序号	工控机	传感器
1	主工控机(工控机 1)	主传感器
2	主工控机(工控机 1)	备份传感器
3	备份工控机(工控机 2)	主传感器
4	备份工控机(工控机 2)	备份传感器

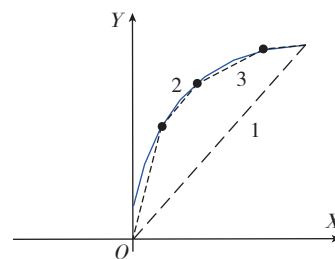


图4 传感器标定示意图

Fig.4 Calibration of sensors

不影响测试过程和测试精度,实现对被测物体质量和质心的不间断测量。

3 系统标定

本文对主传感器和备份传感器分别进行系统级在线标定,将传感器的量程分为多个区间,进行分段线性化,消除传感器在全量程范围内的非线性影响。

传感器的输出理论上与输入相同,即二者对应关系为图4中的直线1,但其实际输出与输入的对应关系:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + \dots + a_nx^n \quad (4)$$

式中, x 为输入, y 为输出, a_0 为零点输出, a_1 为理论灵敏度, $a_2 \sim a_n$ 为非线性项系数。

由于非线性项的影响,传感器的输入与输出如图4中的曲线2,即理论输出与实际输出相差较大。虽然非线性项较小,传感器的输出基本与输入呈线性关系,但在对精度要求高的应用场合,非线性项的影响不容忽视。为减小传感器的非线性度对测试结果的影响,将传

感器进行多级标定,将量程分多段分别线性化,将各段直线作为传感器的输入和输出的理论关系,提高系统的测试精度。

对主备份传感器分别标定时,标定砝码的加载位置不变,即各级标定中,在3个主传感器正上方分别加载标定砝码。其中标定砝码经过动平衡校准,其质心在几何中心附近,并经计量机构精测质量。根据砝码质量标定值与传感器测量值,对传感器进行各量程区间线性系数的在线标定。

由于主传感器和备份传感器的位置有差异,而标定砝码的加载位置相同,故加载相同的力时,各个传感器的受力也不相同,下面以一级标定为例分别阐述主、备份传感器的标定算法。

3.1 主传感器标定

对主传感器进行标定时,传感器受力分析如图5所示。为了简化计算,计算力矩平衡时,选择过坐标原点

O 和其中一个主传感器的轴,则该传感器对轴的力矩为 0。根据力的平衡,和对 Y 轴(OP_1)、轴 OP_2 的力矩平衡,有:

$$\begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 = m_1 + m_2 + m_3 \\ F_2 - m_2 = F_3 - m_3 \\ F_1 - m_1 = F_3 - m_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中: m_1, m_2, m_3 为加在传感器 1、传感器 2、传感器 3 正上方的砝码重量, F_1, F_2, F_3 为砝码加在 3 个主传感器上的重量。

经计算:标定时,主传感器所承受重量的理论值即为加在该传感器上方的砝码重量。

由于对测量单元进行在线标定,不可避免受传感器安装精度、系统平面度、系统安装误差等的影响,传感器实际测得的重量与理论重量有差异,此时各传感器的标定系数分别为:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{m_1}{m_{1test}} = \frac{F_1}{m_{1test}} \\ k_2 = \frac{m_2}{m_{2test}} = \frac{F_2}{m_{2test}} \\ k_3 = \frac{m_3}{m_{3test}} = \frac{F_3}{m_{3test}} \end{cases} \quad (6)$$

式中, k_1, k_2, k_3 为传感器 1、传感器 2、传感器 3 的标定系数, $m_{1test}, m_{2test}, m_{3test}$ 为标定时,3 个传感器分别测得的重量。

3.2 备份传感器标定

对备份传感器标定时,传感器受力分析如图 6 所示。砝码与传感器之间有一定的角度,选取过 O 点和其中一个备份传感器的轴计算力矩平衡,亦可简化计算,使该传感器对轴的力矩为 0,而另外两个备份传感器与该轴的力臂为 $R \times \sin 60^\circ$, $P_1 \sim P_3$ 处力的力臂可根据几何关系得到,与 60° 和 θ 有关。根据力的平衡及对轴 OP_5 和轴 OP_4 的力矩平衡,有:

$$(F_4 \ F_5 \ F_6 \ m_1 \ m_2 \ m_3) \times \begin{pmatrix} 1 & \sin 60^\circ & 0 \\ 1 & 0 & \sin 60^\circ \\ 1 & -\sin 60^\circ & -\sin 60^\circ \\ -1 & -\sin(60^\circ + \theta) & -\sin \theta \\ -1 & \sin \theta & -\sin(60^\circ - \theta) \\ -1 & \sin(60^\circ - \theta) & \sin(60^\circ + \theta) \end{pmatrix} = (0 \ 0 \ 0) \quad (7)$$

式中, m_1, m_2, m_3 为加在传感器 1、传感器 2、传感器 3 正上方的砝码重量, F_4, F_5, F_6 为砝码加在 3 个备份传感器上的重量。

式(7)可解算出传感器受力的理论值与砝码重量及 θ 的等式关系,并根据标定时传感器的实际测量值,按照式(6)中的方法,计算备份传感器的标定系数,对备份传感器进行在线标定。

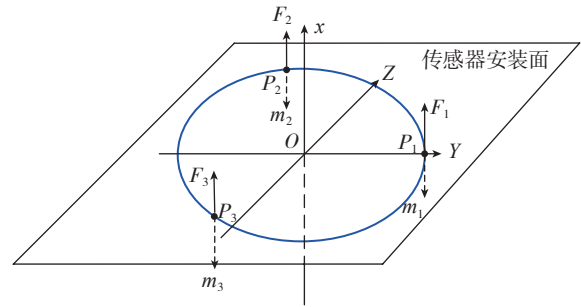


图5 主传感器标定受力分析

Fig.5 Force analysis of main sensors when calibrated

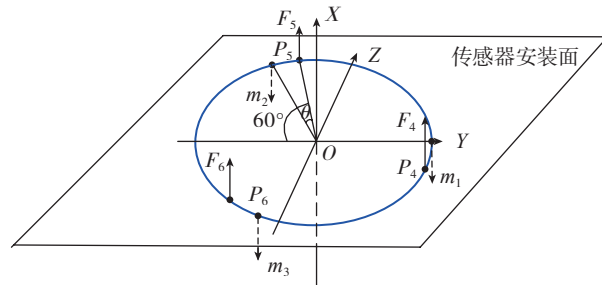


图6 备份传感器标定受力分析图

Fig.6 Force analysis of redundant sensors when calibrated

4 质测修正

为了提高系统的质量和质心测试精度,分别对主测量单元和备份测量单元的传感器测量值进行修正,并对被测件的安装误差进行补偿。

4.1 质量修正

进行质量和质心测试时,软件根据各传感器测得的重量,自动选择其对应的标定系数,进行质量修正:

$$m_{modify} = m_{test} \times k \quad (8)$$

式中, m_{modify} 为修正后的质量, m_{test} 为传感器的实际测量值, k 传感器的测量值所在的标定区间,对应的标定系数,见式(6)。

经过质量修正后,系统的测试值更接近被测件的真实重量,其后,据式(2)和选用的传感器分别计算被测件的质量和主坐标系或备份坐标系下的质心坐标,并据式(3)将备份坐标系下的坐标转到主坐标系下。

4.2 质心补偿

被测件的形状不规则,安装过程中难免出现误差,即被测件的安装轴线和理论的基准线不一致^[10]如图 7 所示。为消除安装误差对测试结果的影响,产品安装后,将精测的安装误差输入测试软件界面中,软件自动对质心测试结果进行补偿,以提高设备的测试精度。测量项目如表 2 所示。

图 7 中,横移距离 r 为被测件上端框外圆圆心与基准坐标系原点连线在 YOZ 平面投影的长度。横移方向

θ 为被测件上端框外圆心与基准坐标系原点连线在 YOZ 平面投影与 $+Y$ 方向的夹角(绕 X 轴逆时针为正, 范围 $0^\circ \sim 360^\circ$)。偏斜夹角 α 为被测件上端面法线矢量与 YOZ 平面的夹角(范围 $0^\circ \sim 90^\circ$)。偏斜方向 β 为被测件上端面法线矢量在 YOZ 平面的投影与 $+y$ 方向的夹角(绕 X 轴逆时针为正, 范围 $0^\circ \sim 360^\circ$)。 $O'N$ 为上端面法向, $O'N' \parallel O'N$ 。

被测件理论质心高度 H_0 表示: 被测件的理论质心(或设计质心)到底面的距离。当被测件为组合体时, 该值应为组合体综合质心到组合体底面的理论高度。

4.2.1 横移计算

若安装无误差, 上端面圆心 O' 应在 OX 轴上; 横移后, O' 在坐标系中的投影为 O'' , 且 OO'' 长度为 r , 与 Y 轴夹角为 θ , 如图 8 所示。

则被测件横移对 Y 向质心的影响为:

$$\Delta Y_1 = r \cdot \cos \theta \quad (9)$$

被测件横移对 Z 向质心的影响为:

$$\Delta Z_1 = r \cdot \sin \theta \quad (10)$$

4.2.2 偏斜计算

若安装无误差, 被测件的理论质心 M 应在 O 点正上方, 且 OM 长度为 H_0 ; 偏斜后, 由图 9 所示可知 OM

与 YOZ 面的夹角为 α , M 点在 YOZ 面的投影为 M' , OM' 与 Y 轴之间夹角为 β , 如图 9 所示。

M' 与 O 点距离 d 为 $(H_0 \cdot \cos \alpha)$, M' 在 YOZ 坐标系的坐标为 $(d \cdot \cos \beta, d \cdot \sin \beta)$, 即为 $(H_0 \cdot \cos \alpha \cos \beta, H_0 \cdot \cos \alpha \sin \beta)$ 。

被测件偏斜对 Y 向质心的影响为:

$$\Delta Y_2 = H_0 \cdot \cos \alpha \cos \beta \quad (11)$$

被测件偏斜对 Z 向质心的影响为:

$$\Delta Z_2 = H_0 \cdot \cos \alpha \sin \beta \quad (12)$$

4.2.3 质心综合影响

由于安装误差引起的质心测量偏差为被测件横移和被测件偏斜的综合影响。未进行质心修正时, 质心测量坐标为 (X, Y) , 横移和偏斜对 Y 向质心的影响为:

$$\Delta Y = \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = r \cdot \cos \theta + H_0 \cdot \cos \alpha \cos \beta \quad (13)$$

横移和偏斜对 Z 向质心的影响为:

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 = r \cdot \sin \theta + H_0 \cdot \cos \alpha \sin \beta \quad (14)$$

修正后的质心坐标应为:

$$\begin{cases} X_{\text{modify}} = X - (r \cdot \sin \theta + H_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta) \\ Y_{\text{modify}} = Y - (r \cdot \sin \theta + H_0 \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta) \end{cases} \quad (15)$$

5 试验验证

按照表 3 中的试验矩阵分别用主备测量单元进行了 7.2t、10t 和 13t 砝码的交替质量特性测试, 验证系统的功能和性能。即测试顺序为主测试系统测空载状态,

表2 被测件偏移参数

名称	符号	单位
横移距离	r	mm
横移方向	θ	($^\circ$)
偏斜夹角	α	($^\circ$)
偏斜方向	β	($^\circ$)
被测件理论质心高度	H_0	mm

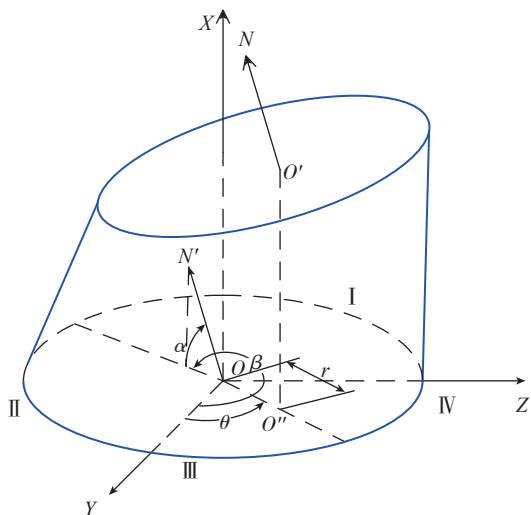


图7 被测件安装示意图

Fig.7 Installation of the product for measurement

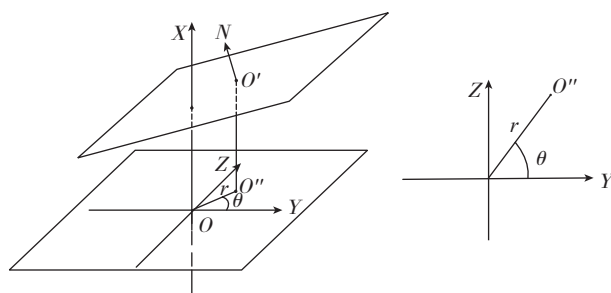


图8 横移几何关系示意图

Fig.8 Misalignment geometry

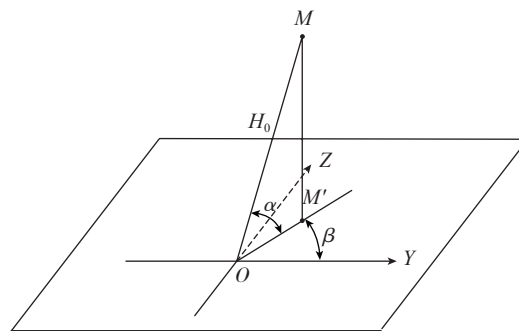


图9 偏斜几何关系示意图

Fig.9 Deflection geometry

其后切换到备测试系统分别测空载状态和 7.2t 负载,再切换至主测试系统分别测 7.2t 负载和 10t 负载,然后切换至备测试系统分别测 10t 负载和 13t 负载,最后切换至主测试系统测 13t 负载。测试过程中不断进行主备切换,结果如表 4 所示,验证设备的质量、质心测试精度及冗余切换功能对测试精度的影响。设备实物(测试台和控制机柜)如图 10 所示。

表3 试验矩阵

测试系统	负载状态 /kg
主	空载
备	空载
备	7228.717
主	7228.717
主	10155.137
备	10155.137
备	13080.465
主	13080.465

该系统冗余切换简单方便,质量和质心测试精度高,且冗余切换功能不影响设备的测量精度,两测量单元之间的一致性较好。主测量单元的质量测量误差优于 0.01%,质心测量误差 $< \pm 1\text{mm}$; 备份测量单元的质量测量误差优于 0.05%,质心测量误差 $< \pm 1\text{mm}$; 对同一被测件,主备份测量单元之间的质量测量误差优于 0.05%,质心测量误差 $< 0.5\text{mm}$ 。

6 结论

本文提出了一种高精度冗余质量质心测试方法,根据该方法设计了相应的设备,并对设备的性能进行了验证。

(1) 系统采用硬件备份和数据共享机制,设备的冗余功能有效保证了产品动态不间断测量,大大提高系统可靠性。

(2) 系统对测量单元进行在线标定,消除了传感器非线性度的影响,并根据标定系数进行质量修正;软件自动对被测件质心测试结果进行补偿,消除安装误差的影响,提高了质量和质心的测试精度。

(3) 设备的质量测量误差优于 0.05%,质心测量误

表4 质量特性测试数据表

测试系统	标定质量 / kg	测试质量 / kg	质心 Y/mm	质心 Z/mm	质心 R/mm	标定质心 R/mm	质量测试值与真实值差值 /kg	质量相对误差 /%	质心误差 / mm
备	7228.717	7229.0432	4.2386	-2.5200	4.9312	4.7250	-0.3262	0.0076	-0.7062
主		7229.0064	3.6601	-2.6677	4.5291		-0.2894	0.0067	-0.3041
备	10155.137	10154.7067	4.3477	-0.0687	4.3482	4.0913	0.4303	0.0042	-0.7569
主		10154.7838	3.8344	-0.0304	3.8853		0.3532	0.0082	-0.2940
备	13080.465	13079.4745	2.6377	-0.9596	2.8063	2.6652	0.9905	0.0230	0.3589
主		13080.8223	2.3094	-1.0250	2.5267		-0.3573	0.0083	0.6385

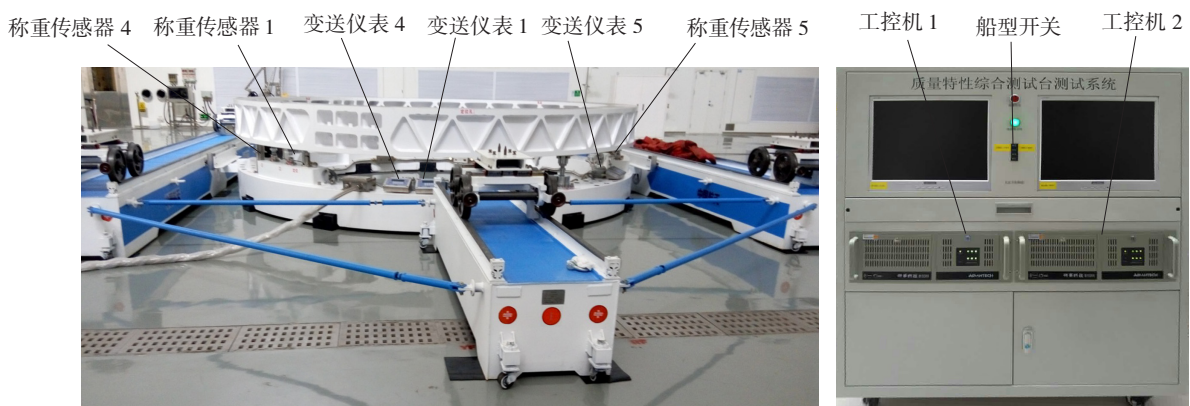


图10 设备实物图

Fig.10 Photo of the equipment

差 $< \pm 1\text{mm}$, 且主备份之间的质量和质心误差较小, 主备份切换不影响测试精度, 实现了大型被测件(可承载 20t)质量、质心的高精度不间断测量。

参考文献

- [1] 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.
- WANG Qiuxiao, WANG Ying. A new measurement method for mass property parameters[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(12): 23-28.
- [2] BOGDANOV V V, VESELOV N V, PANCHENKO I N, et al. Test rig for measuring the object's mass, center of gravity coordinates and inertia tensor[J]. Automation and Remote Control, 2011, 72(2): 425-434.
- [3] LOKTIONOV A P. A principle of constructing the system for measuring the FV takeoff weight and center-of-mass position on the basis of measurement reduction[J]. Russian Aeronautics, 2007, 50(2): 178-185.
- [4] MICHAEL E L. Tool for calculating the center of mass and moment of inertia of small arms weapons[R]. Unite Statues: Army Research Lab, 2008.
- [5] BULATOVIC Z M, TOMIC M V, KNEZEVIC D M, et al. Evaluation of variable mass moment of inertia of the piston-crank mechanism of an internal combustion engine[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2011, 225(5): 687-702.
- [6] 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.
- WANG Chao. Research on key technologies of mass property measurement for large-size aircraft[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] 郝晶莹, 李军. 质量质心转动惯量测试系统的应用与改进[J]. 航天制造技术, 2009(3): 54-57.
- HAO Jingying, LI Jun. Application and improvement of mass centroid and moment of inertia testing system[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009(3): 54-57.
- [8] 卢志辉, 孙志杨, 薄悦, 等. 一种具有冗余功能的质量质心测量系统: 201310650098.0[P]. 2013-12-06.
- LU Zhihui, SUN Zhiyang, BO Yue, et al. Having a redundant function of mass centroid measurement system: 201310650098.0[P]. 2013-12-06.
- [9] GJ2258-92. 卫星质量特性测试方法[S].
- GJ2258-92. Test method of mass property of spacecraft[S].
- [10] 孔波. 用于质量特性参数测量的新型扭摆台的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- KONG Bo. Study on new kind of gas bearing torsion pendulum used for mass property parameter measurement[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

通讯作者: 于荣荣, 硕士、工程师, 研究方向为星船及相关地面设备设计和研究, E-mail: yurongrong087@163.com。

(责编 大漠)

(上接第82页)

- [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- HE Zhi. Effect of ultrasonic impact on the properties of arc additive manufacturing of titanium alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [21] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 595-606.
- [22] ADDISON A, DING J L, MARTINA F, et al. Manufacture of complex titanium parts using wire+arc additive manufacture[C]// Proceedings of Titanium Europe 2014. Birmingham, 2015.
- [23] SINGH P, DUTTA D. Multi-direction slicing for layered manufacturing[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1(2): 129-142.
- [24] RUAN J Z, SPARKS T E, PANACKAL A, et al. Automated slicing for a multiaxis metal deposition system[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2006, 129(2): 303-310.
- [25] DWIVEDI R, KOVACEVIC R. An expert system for generation of machine inputs for laser-based multi-directional metal deposition[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1811-1822.
- [26] DING D H, PAN Z X, CUIURI D, et al. Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37: 139-150.
- [27] OUYANG J H, WANG H, KOVACEVIC R. Rapid prototyping of 5356-aluminum alloy based on variable polarity gas tungsten arc welding: process control and microstructure[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2002, 17(1): 103-124.
- [28] KWAK Y M, DOUMANIDIS C C. Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2002, 4(1): 28-41.
- [29] BONACCORSO F, CANTELLI L, MUSCATO G. An arc welding robot control for a shaped metal deposition plant: modular software interface and sensors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3126-3132.
- [30] 胡晓冬. 基于弧焊的直接金属成形技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- HU Xiaodong. Research on directly metal forming based on arc welding[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [31] 徐建宁. 智能金属结构熔焊成型技术研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2009.
- XU Jianning. Research on welding prototyping of smart metal structure[D]. Nanchang: Nanchang University, 2009.
- [32] 熊俊. 多层单道 GMA 增材制造成形特性及熔敷尺寸控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- XIONG Jun. Forming characteristics in multi-layer single-bead GMA additive manufacturing and control for deposition dimension[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

通讯作者: 王福德, 博士、研究员、首都航天机械有限公司总工艺研究员, 研究方向为航空航天结构激光增材制造技术、电弧熔丝增材制造技术等, E-mail: wangfude66@hotmail.com。

(责编 逸飞)