

# 加速度场离心试验用一体化大量程六维力传感器的研制

吴宝元<sup>1</sup>, 申 飞<sup>1</sup>, 任 阳<sup>2</sup>, 吴仲城<sup>1</sup>

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027)

**摘 要:** 鉴于离心式加速度场模拟试验系统的需要, 研制了一种大量程六维力传感器。在力传感器传统设计方法基础上, 重点分析了传感器结构优化、材料选型、加工工艺、惯性耦合补偿等控制环节的影响。利用有限元方法对所设计的六维力传感器维间耦合、加速度场惯性效应耦合及输入输出关系进行仿真分析; 借助相应的标定系统, 实现六维力耦合效应的标定测试和耦合矩阵的获取, 基于标定误差矩阵建立六维力传感器惯性效应补偿; 静/动态实验结果表明所设计的大量程六维力传感器完全满足大加速场下力测试精度和稳定性要求。

**关键词:** 离心试验; 一体化大量程六维力传感器; 惯性效应; 耦合补偿; 标定误差矩阵

**中图分类号:** TP212.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2011)09-2080-08

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2011.09.030

## Development of an Integrated Large Range Six-Axis Force Sensor for Centrifuge Test in Acceleration Field

WU Bao-yuan<sup>1</sup>, SHEN Fei<sup>1</sup>, REN Yang<sup>2</sup>, WU Zhong-cheng<sup>1</sup>

(1. Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. Dept. Automation, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** In view of the need for the simulation test system in a centrifugal acceleration field, an integrated large range six-axis force sensor is developed on the basis of traditional design method of force sensor with especial consideration of the structure optimization, material selection, processing technique and inertia coupling compensation, etc.. The coupling among channels, inertia coupling compensation, inertia effect coupling in the acceleration field and the input/output relationship are simulated by utilizing the Finite Element Method (FEM). Inertia effect compensation is achieved according to the calibration error matrix derived from the calibration test of inertia effect and the coupling matrix with the aid of a calibration system. The static and dynamic experimental results indicate that the large range six-axis force sensor designed by the principle mentioned above meets the demand for test accuracy and stability totally in the centrifugal acceleration field.

**Key words:** Centrifuge test; Integrated large range six-axis force sensor; Inertia effect; Coupling compensation; Calibration error matrix

### 0 引 言

六维力传感器可以检测三维空间 3 个方向的力和力矩信息, 自上世纪 70 年代问世以来, 首先在智能机器人领域得到应用<sup>[1]</sup>。近年来在航空航天、机

械装配与自动化制造等领域, 如航天器动力学测试<sup>[2-4]</sup>、加速度环境模拟<sup>[5]</sup>、火箭发动机推力试验<sup>[6-7]</sup>、飞机起落架结构强度测试<sup>[8]</sup>、风洞实验<sup>[9-10]</sup>等场合也获得了广泛应用。随着我国国防装备现代化的发展, 六维力测量以及实时的力反馈

是实现多装备协调操作控制、力顺应控制的基础,对大量程多维力测试装置动态精度、大过载下适应性和可靠性等方面也提出了更高的要求。大测力范围、大量程六维力传感器是目前土工技术、地震模拟和航空航天等领域中众多环境模拟试验设备的核心部件,但其关键技术仍尚不成熟。我国在航天力学环境实验方面已经建立了一整套实验手段,但对于综合离心试验中模拟导弹飞行过程中固定端面受力测试问题一直没有有效地解决,缺乏相关评估手段,其主要原因是没有适用于加速度场应用要求的大量程六维力传感器。

多维力传感器研究涉及多个学科领域,制作工艺也比较复杂,目前国内缺乏相应的标定设备,使得超大量程(大于10kN)六维力传感器的研制任务无法完成,相关研究技术至今仍在发展中。国外较有影响力的大量程力传感器生产厂家有 Industrial Automation, Inc. (ATI)、INTERFACE, Cooper Instruments & Systems 等公司,推出的单维力、二维力或三维力/力矩复合型产品在我国大量程多维力传感器市场占有绝对优势,我国的传感器市场呈现中高档产品被国外垄断的局面,真正的大量程六维力传感器及其标定系统由于技术封锁及价格昂贵等原因,在我国航空航天领域应用的还很少且受到极大限制。

鉴于此,本文基于稳态加速度模拟试验离心机系统建设的背景,开展大量程六维力传感器的研究,用于离心加速度试验系统中模拟航天器、飞机、导弹等内部设备和装置在运动中受到加速度和振动过载作用的复杂力学环境。结合六维力传感器的使用环境和性能指标要求,采用有限元方法对所设计的六维力传感器维间耦合、加速度场惯性效应耦合及输入输出关系进行仿真分析;并针对传感器自身耦合和加速度场惯性效应耦合,为传感器结构、尺寸优化设计提供依据;利用相应的标定系统,实现六维力耦合效应的标定测试,获取耦合矩阵,基于标定误差矩阵进行六维力传感器惯性效应补偿;静/动态实验结果和后续使用情况表明:设计的大量程六维力传感器性能要求完全满足预期设计指标。

## 1 传感器结构设计

在多维加速度场环境下的六维力测试主要面对

的是维间耦合问题,解决耦合问题一方面是采取电路或信号处理方法,另一方面是从传感器自身结构上采取措施。从根本上讲,后者是传感器维间耦合程度的主要影响因素。在结构上力求达到力解耦及灵敏度高静态特性要求外,还要满足特定使用情况下动态特性即实时测量的需求。因此传感器结构设计的好坏直接影响到传感器的精度、稳定性及可靠性,也是能否提高传感器性能以满足不断发展的多维力测试技术需要的关键<sup>[11]</sup>。

国外对六维力传感器结构方面的研究较早,迄今为止出现的六维力传感器主要结构形式有:美国 Draper 研究所提出并联式结构<sup>[12]</sup>; Nguyen 和 Ferraresi 等人提出的 Stewart 结构<sup>[13]</sup>;美国 V. Scheinman 提出平面十字梁结构<sup>[14]</sup>;德国 Dr. R. Seitner 公司提出二级重叠并联结构型传感器;其他典型结构还有平板结构<sup>[15]</sup>和非径向结构<sup>[16]</sup>等。

针对本传感器的性能指标和特殊使用要求,综合比较目前各种结构类型的六维力传感器的性能,择优选择三梁均布浮动型结构,主要是出于以下考虑:与浮动梁、十字梁、膜片式、圆筒式、并联式等结构的六维力传感器相比,三梁均布浮动型结构的传感器虽然存在结构耦合,但各维向刚度大且力/力矩项一致性好,可以在弹性结构梁优化、合理组桥方式、信号处理等各环节来减小结构耦合带来的误差,既满足灵敏度和精度要求前提下,获得各维向大刚度值,对于在离心式加速度场使用要求下,优先选择三梁均布浮动型结构。

多维加速度场作用时可等效为空间坐标系统的三维线加速度  $(a_x, a_y, a_z)$  和三维角加速度  $(\ddot{\omega}_x, \ddot{\omega}_y, \ddot{\omega}_z)$ 。在  $Z$  轴向载荷  $F(a_z, \ddot{\omega}_z)$  的作用下时,以主梁为研究对象,硬中心部分相对主梁来说可假定为刚体,由其质量块惯性力作用,  $a_z$  存在时,等同于  $F = ma_z$  施加到主梁上,  $m$  为硬中心质量;  $\ddot{\omega}_z$  存在时,根据质量—转动惯量等效原理<sup>[17]</sup>,主梁受绕  $Z$  轴的力矩作用:  $M_{\omega_z} = J_z \ddot{\omega}_z$ ,  $J_z$  为硬中心对  $Z$  轴转动惯量;  $M_{\omega_x}$  为  $\ddot{\omega}_z$  作用到硬中心的等效力矩,同样,  $a_x, a_y, \ddot{\omega}_x, \ddot{\omega}_y$  作用分别等效为  $ma_x, ma_y, M_{\omega_x}, M_{\omega_y}$  作用边界条件均等效为浮动梁两端固定。因此,在多维加速度场下可由这6种不同工况单独或进行线性组合就可以表示作用于弹性体上的任意形式和方向的外力。

## 2 有限元仿真分析

由于弹性梁的应变分布比较复杂,力学模型的建立与求解困难。而采用有限元法(FEM)对复杂结构和边界条件进行静力和模态分析则可以得到较为理想的结果。下面通过有限元方法对三梁均布浮动型六维力传感器进行仿真分析。

为能够对传感器弹性体结构进行静、动态特性分析,需要对弹性体结构进行有限元实体单元建模、网格划分、加载等步骤完成仿真分析。浮动梁两端自由度全部约束,由传感器量程确定的6种典型工况下计算模型约束处理均相同。该弹性体材料为合金结构钢(弹性模量  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ,泊松比  $\mu = 0.3$ ,密度  $\rho = 7820 \text{kg/m}^3$ )。优化后的弹性体主要结构参数为:主梁长 64mm,宽 36mm,高 50mm;浮动梁长 122mm,宽 7mm,高 50mm;内径 180mm,外径 460mm,厚 78mm。 $F_x/F_y, F_z, M_x/M_y, M_z$  应变变量有限元分析图解分别如图 1 中(a)~(d)所示。

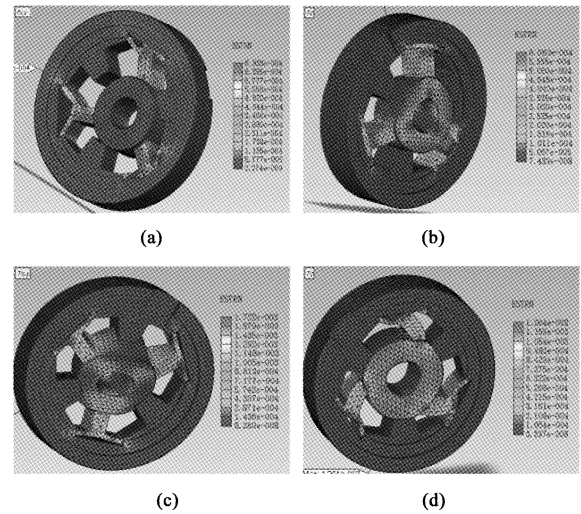
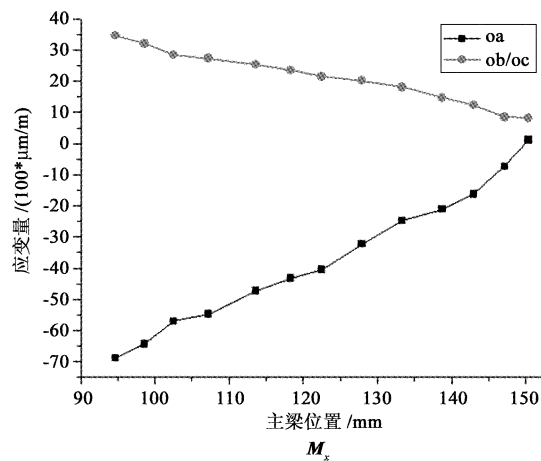
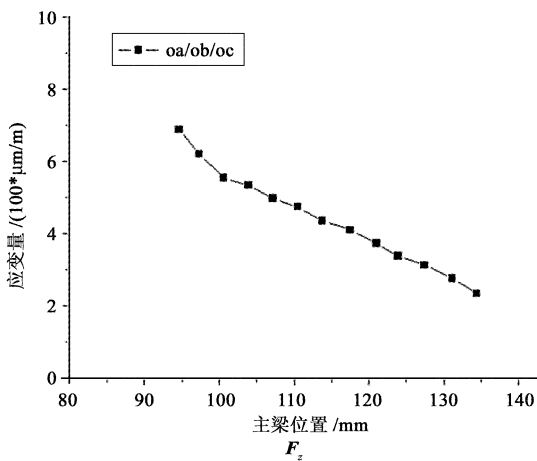
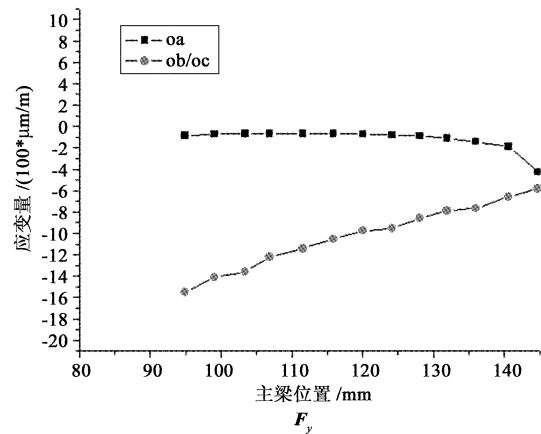
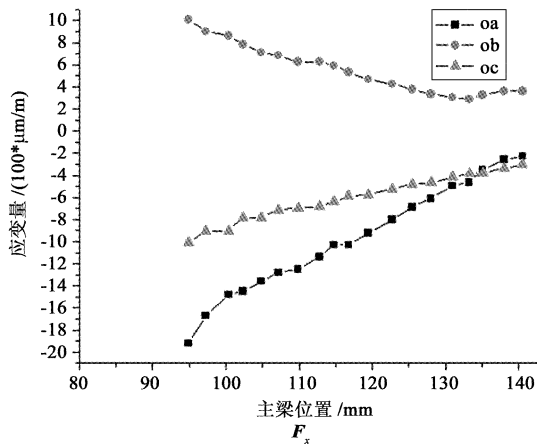


图 1 有限元分析模型图解

Fig. 1 Simulation model of FEM

不同加载工况 ( $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ ) 在额定载荷作用下,弹性主梁的应变变量沿 oa, ob, oc 三梁轴线分布如图 2 所示。



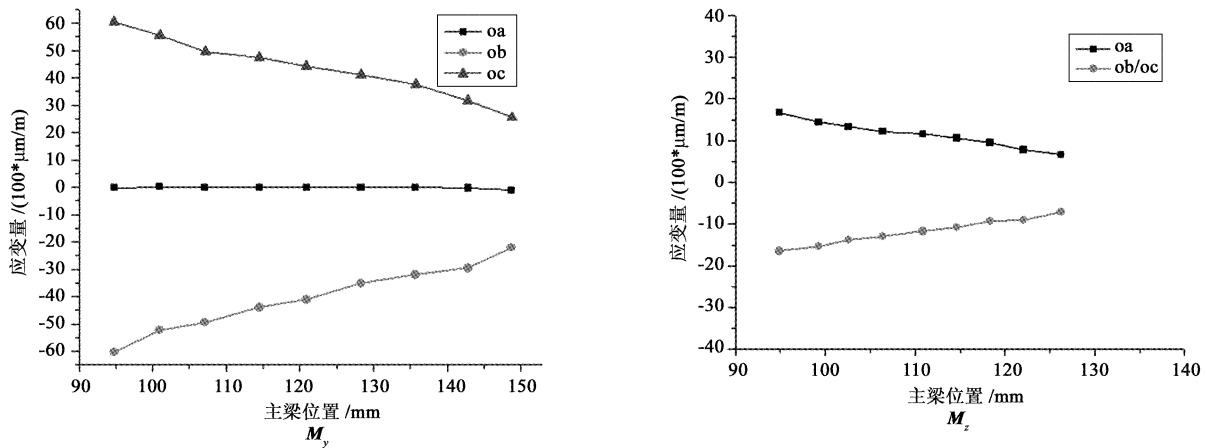


图 2 弹性主梁沿 oa, ob, oc 三梁轴线的应变分布

Fig. 2 Strain distribution along the axial lines (oa, ob, oc) of the main beams

结合图 2 所示的应变沿梁轴线的分布情况,在三个主梁的上、下面及侧面选择 12 个敏感单元位置,分别对应敏感元件的中心,其分布如图 3(a) 所示。

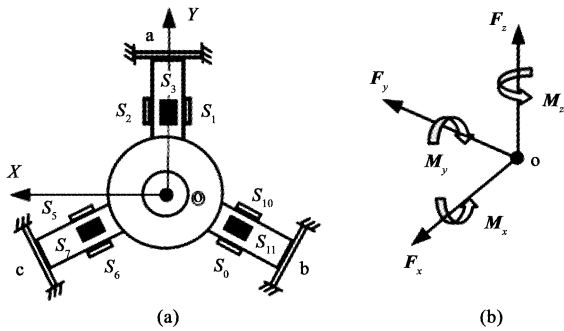


图 3 弹性体结构与参考坐标系

Fig. 3 Structure of elastomer and reference coordinate system

其中  $S_i (i = 1, 2, \dots, 12)$  为各分析节点位置的应变,  $S_4, S_8, S_{12}$  位于图示梁的背面, 分别与  $S_3, S_7, S_{11}$  相对。当主梁某一面受拉时, 该面节点的应变为正; 受压时, 节点应变为负。对应图的节点分布, 当传感器各维力 / 力矩互不干扰时, 其表达式与节点应变的关系为

$$F = (F_x \ F_y \ F_z \ M_x \ M_y \ M_z)^T$$

$$= \begin{bmatrix} k_1(s_1 + s_{10} - s_2 - s_5) \\ k_2(s_6 + s_9 - s_5 - s_{10}) \\ k_3(s_3 + s_{11} - s_4 - s_{12}) \\ k_5(s_4 + s_7 + s_{11} - s_3 - s_8 - s_{12}) \\ k_4(s_7 + s_{12} - s_8 - s_{11}) \\ k_6(s_2 + s_6 + s_{10} - s_1 - s_5 - s_9) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $k_i > 0 (i = 1, 2, \dots, 6)$  是六维力传感器静态标

定时确定的常数。三梁均布式弹性结构虽然维间耦合较大, 须通过解耦计算来消除维间耦合误差, 但是其各轴向刚度差异较小, 整体动态特性和稳定性较好。

### 3 信号采集与处理

在弹性体的 12 个敏感单元位置粘贴应变片, 以及传感器固支端粘贴具有相同温度系数的应变片用于温度补偿, 结合 (1) 式组成半桥电路,  $F_x$  通道如图 4 所示, 六个通道数据采集流程均相同,  $R_z$  为温度补偿电阻,  $R_L$  为非线性补偿电阻。信号融合处理模块对采集的六通道信号实现解耦和惯性耦合效应的补偿。

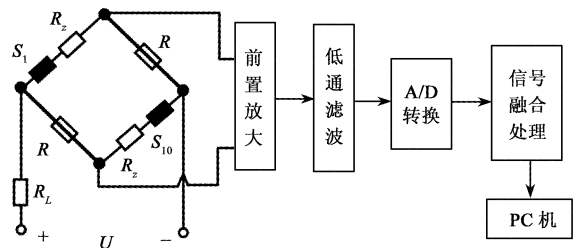


图 4 信号采集与处理框图

Fig. 4 Block diagram of signal acquisition and processing

### 4 传感器标定实验

为了保证系统加载位置与方向精度, 实际采用二组液压加载系统进行静态标定实验。水平方向安装的一组用于  $F_z$  独立加载, 借助 L 型梁实现  $F_z$  与  $M_x, F_x$  与  $M_y$  复合加载, 垂直安装的一组液压加载系

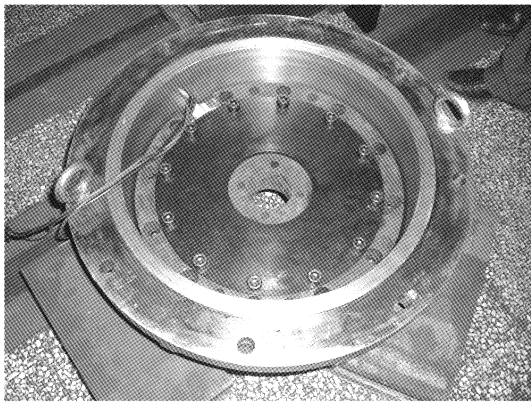


图 5 一体化大量程六维力传感器

Fig. 5 Prototype of the integrated large range 6-axis force sensor

标准单维力传感器进行加载力控制,如图 7 所示。

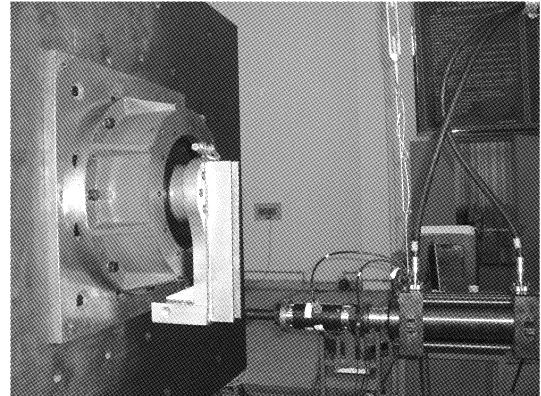


图 7 标定/测试装置

Fig. 7 Calibration/test set up

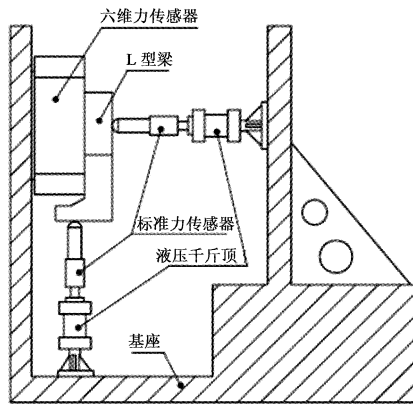


图 6 标定/加载示意图

Fig. 6 Calibration/loading diagram

统用于实现  $F_x$ 、 $F_y$  独立加载和  $F_y$  与  $M_z$  或  $F_x$  与  $M_z$  复合加载,如图 6 所示,这种加载方法及组和形式易于实现,加载设备操作简单,能够实现对被标定传感器全量程范围内的等间隔标定,选择 6 组线性无关的力与力矩矢量作为标定力,采用计算机和高精度

在完成对传感器各个受力状态标定基础上,传感器六个方向分别得到对应的输出。对传感器各种标定状态进行组合,得到六维力传感器的加载力矩阵  $F_s$  和输出六维矩阵  $V$ ,通过解耦计算得到传感器输入输出关系矩阵。其中传感器加载矩阵为六组线性无关输入力/力矩:

$$F_s = \begin{bmatrix} F_x & 0 & 0 & 0 & 0 & F_x \\ 0 & F_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -F_z & -F_z & -F_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用传感器输入输出关系:  $V = CF_s$ ,解耦计算得到传感器特征矩阵,经过标定测试,计算本六维力传感器的特征矩阵  $C$  为:

$$C = \begin{bmatrix} 11859.88 & 6060.628 & -210.445 & 744.7338 & -169.229 & -696.256 \\ 544.7147 & 10454.6 & -114.269 & 223.1271 & -93.463 & -443.686 \\ -48.6846 & 523.3633 & 11801.41 & -30910.1 & -532.182 & 98.11824 \\ 17.56616 & 70.55612 & -1082.6 & -5362.41 & -41.4916 & -0.14038 \\ -213.826 & -85.5115 & 40.44341 & 37.43262 & -1745.73 & 13.57841 \\ 571.8712 & -435.319 & 50.64346 & 45.6297 & -134.662 & -1934.75 \end{bmatrix}$$

### 5 仿真分析与实测结果对比

通过有限元分析得到传感器空载(未加 L 型梁)情况下各通道输出总应变变量,利用

$$\frac{u}{U} = \frac{k}{4} \varepsilon \quad (3)$$

计算传感器额定输出与实测值的比较结果如表 1 所示,式中  $\varepsilon$  为桥路总应变输出, $k$  为应变片灵敏系数

$k = 1.94$ , 桥压激励  $U = 10V$ , 可以看出,  $M_x$  通道误差最大为  $-8.87\%$ , 归结原因主要受机械加工误差、贴片位置和取向、信号处理误差以及软件误差等环节影响。

表 1 传感器额定输出下仿真值与实测值的比较

Table 1 Comparison of the results from simulation and measured values by rated output

额定输出 $\mu V/V-kN(kNm)$			
通道	仿真值	实测值	误差 (%)
$F_x$	8.730	8.752	0.25
$F_y$	9.482	9.670	1.99
$F_z$	5.568	5.615	0.85
$M_x$	16.783	15.294	-8.87
$M_y$	53.981	57.405	6.34
$M_z$	47.853	44.631	-6.73

### 6 标定误差分析

特征矩阵表征了传感器输入/输出的对应关系, 这种对应关系涉及机械加工、贴片、信号调理、标定等过程误差的影响, 还不能真实反映实际的传感器输入输出关系, 这种差异如果导致传感器不能满足预期设计精度指标, 则需经定量分析后并进行相应

$$E = \begin{bmatrix} 0.0024 & 0.0016 & 0.0025 & -0.0023 & -0.0003 & -0.0003 \\ -0.0008 & 0.0005 & 0.0010 & -0.0013 & 0.0 & 0.0007 \\ -0.0088 & -0.0038 & 0.0034 & -0.0017 & 0.0027 & 0.0003 \\ 0.0043 & 0.0081 & -0.0028 & 0.0087 & -0.0097 & -0.0093 \\ -0.0014 & -0.0008 & -0.0005 & -0.0003 & 0.0003 & -0.0077 \\ -0.0069 & -0.0011 & 0.0076 & -0.0037 & 0.0007 & -0.0020 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式 5 可知, 本六维力传感器的 I 类误差为  $0.87\% F.S$ , II 类误差为  $0.97\% F.S$ 。同时, 测得传感器的重复性误差  $0.47\% F.S$ 。

导致标定误差的因素较多, 主要来源于: 传感器本体结构存在的耦合误差、应变片粘贴工艺、机械加工和装配过程中误差、加载系统的加载位置误差、标准力传感器精度的影响等。这些环节当中存在的误差无法完全消除, 只能通过改善工艺条件或补偿方法减小耦合误差的影响。因此, 通过标定误差矩阵采取如下补偿方法得到的修正特征矩阵:

$$C_E = a(V - E)F_f F^{-1} \quad (6)$$

上式中  $a$  为修正系数。由于上述无法完全消除的误

补偿和修正。在此我们引入标定误差矩阵: 将施加标准的  $6 \times 6$  标定力矩阵和通过耦合矩阵计算所得出的施加力矩阵之差与传感器相应各维力/力矩满量程的比值定义为标定误差矩阵。标定误差矩阵  $E$  的表达式如下:

$$E = (F_s - F)F_f^{-1} \quad (4)$$

式中:  $F_s$  为实际加载标准的力矩阵,  $F$  为通过耦合特征矩阵计算得出的力矩阵,  $F_f = \text{diag}(F_{fx}, F_{fy}, F_{fz}, M_{fx}, M_{fy}, M_{fz})$  为  $6 \times 6$  的对角矩阵, 其中,  $F_{fx}, F_{fy}, F_{fz}, M_{fx}, M_{fy}, M_{fz}$  分别为各维力/力矩的满量程值。传感器的标定误差矩阵是传感器精度和耦合度的综合度量。该矩阵对角线元素分别表征六维力/力矩各分量的测量精确程度, 亦称为 I 类误差; 而其他元素则代表不同维力或力矩之间的维间耦合程度, 亦称为 II 类误差。

利用液压加载系统对六维力传感器进行间隔加载测试, 施加的标准力信息由标准力传感器提供数据, 六维力传感器 6 路输出信号经过解耦计算后得到的力/力矩信息, 求得本六维力传感器的标定误差矩阵为:

差影响, 经补偿后的耦合误差可以减小  $50\%$  左右。

针对力传感器的具体使用环境, 应全面考虑力传感器的综合性能指标的优化设计, 尤其对于本文提到的用于加速度场中离心力测试的大量程六维力传感器来讲, 在满足一定测试精度要求下, 传感器各维向具有的动刚度和动态测试精度以及重复性也是重要设计指标, 动态加载实验显得尤为重要。

### 7 动态加载实验

在加速度场环境下, 航天器固定端界面受力监测是综合离心试验需要解决的核心问题之一。由于测力精度受到空间环境、电磁场扰动、安装及配合误

差等耦合因素的影响较大,高精度测量难以实现。针对实际使用工况,耦合及测量误差控制在 2% 左右基本可满足试验需求。本文设计的六维力传感器进行了在变化的离心式加速度场下的动态测试,动态测试验证流程如下:

(1) 将六维力传感器安装在离心机实验台上,六维力传感器的安装面垂直于地面,  $-F_x$  指向地面,  $-F_z$  向外,  $+F_z$  向内指向离心机的中心,空载和安装 L 型梁两种工况下,进行六维力传感器加速度实验 ( $g$  一单位加速度);

(2) 按照 10g、20g、30g、40g、50g 的间隔加载;

(3) 记录、处理六维力传感器的输出数据;

(4) 利用六维力传感器的耦合矩阵对上述数据进行解耦运算,得到六维力传感器在不同加速度状态下的受力信息;

(5) 将带 L 型梁的六维力传感器在不同加速度状态下的受力信息减去空载转动时六维力传感器相应的加速度状态下的受力信息;

(6) 得到 L 型梁在进行离心机实验时,不同加速度状态下的受力信息。

在六维力传感器空载和带 L 型梁两种工况下,离心机以加速度 10g ~ 60g 间隔加载分析传感器输出的力/力矩信息。空载时,传感器弹性体中心台视为负载;带 L 型梁时,负载为中心台和 L 型梁的质量之和。L 型梁作为附加的质量块,重量 50.5kg,形状不规则,固定后在传感器坐标系中的重心坐标为 (0,140,60)。下表列出动态验证过程的部分数据,通过数据融合处理分析,可以看出,本六维力传感器在动态验证测量 L 型梁受力信息时,其误差均小于 1% F. S,设计的大量程六维力传感器完全满足大加速场下多维力动态测试精度要求,且稳定性较好。

表 2 离心机实验六维力传感器空载时输出

Table 2 The output of six-axis force sensor in no-load experiment on centrifuge

加速度 /g	$F_x$ /kN	$F_y$ /kN	$F_z$ /kN	$M_x$ /kN	$M_y$ /kN	$M_z$ /kN
9.65	-0.45	-0.40	-1.07	-0.05	0.05	-0.01
20.07	-0.29	-0.26	-2.29	-0.04	0.05	-0.01
30.04	-0.02	-0.06	-3.47	-0.04	0.05	0.00
40.10	0.61	0.37	-4.73	0.00	0.02	0.00
51.60	1.09	0.69	-6.12	0.03	0.01	0.00

表 3 离心机实验六维力传感器带 L 型梁时输出

Table 3 The output of six-axis force sensor mounted with L-beam in no-load experiment on centrifuge

加速度 /g	$F_x$ /kN	$F_y$ /kN	$F_z$ /kN	$M_x$ /kN	$M_y$ /kN	$M_z$ /kN
9.65	0.31	0.31	-4.55	0.66	-0.02	-0.01
20.07	0.69	0.43	-10.06	1.41	-0.05	-0.03
30.04	0.76	0.44	-15.02	2.10	-0.07	-0.05
40.10	0.98	0.48	-20.40	2.81	-0.11	-0.06
51.60	1.19	0.48	-26.41	3.63	-0.15	-0.09

## 8 结 论

大量程多维力传感器在航空、航天、军事等领域的广泛应用,对完善和改变我国航天器力学环境试验的现状将起到十分重要的作用。地面环境试验和结构试验的主要目的是验证设计和消除潜在的缺陷,获得高置信度以实现航天任务。大量程多维力传感器是力学试验系统的核心部件,其特殊的使用环境和指标要求使得大量程多维力传感器不同于小量程多维力传感器,由于其体积大,成本高,加工周期长的特点,加工样件测试并针对问题整改设计和加工方案不现实,因此,大量程多维力传感器在传统设计方法基础上,应重点考虑传感器结构优化、材料选型、加工工艺、惯性耦合补偿等环节,制定详细的实施方案和工艺路线,确保传感器各种性能指标满足预期指标要求。同时,总结大量程多维力传感器设计经验,也是为航空航天领域中其它应用场合的宽范围大量程多维力测试做好技术铺垫。

## 参 考 文 献

- [1] Gab-Soon Kim, Hi-Jun Shin, Jungwon Yoon. Development of 6-axis force/moment sensor for a humanoid robot's intelligent foot[J]. *Sensors and Actuators A*, 2008, 141: 276-281.
- [2] 曲修铭. 航天器力学试验回顾、启发与展望[J]. *航天器环境工程*, 2009, 26(3): 201-205. [Qu Xiu-ming. A historical review of mechanical tests for spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, 26(3): 201-205.]
- [3] 马兴瑞, 苟兴宇, 李铁寿, 等. 航天器动力学发展概况[J]. *宇航学报*, 2000, 21(3): 1-5. [Ma Xing-rui, Gou Xing-yu, Li Tie-shou, et al. Development generalization of spacecraft dynamics[J]. *Journal of Astronautics*, 2000, 21(3): 1-5.]
- [4] Stephen C, Bradford A, Neal, et al. Flight testing the linear aero spike SR - 71 experiment (LASRE) [R]. The NASA STI Program Office, NASA/TM - 1998 - 206567, Reno, USA, Sep. 1998.

- [5] 向树红. 航天器力学环境试验技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 第1版, 2010: 55-60.
- [6] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机设计[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 247-266. [Jia Pu-zhao. Steady state acceleration simulation test equipment-centrifuge design [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 247-266.]
- [7] 刘洪刚, 魏鹏飞, 谢廷峰, 等. 液体火箭发动机地面试车过程的实时故障检测方法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1660-1688. [Liu Hong-gang, Wei Peng-fei, Xie Ting-feng, et al. Research of real-time fault detection method for liquid propellant rocket engines in ground test [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6): 1660-1688.]
- [8] 李海涛. 火箭发动机推力矢量测量理论、方法与自动测试技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005. [Li Hai-tao. Research on the theory & method of trust vector measurement and the automatic test technology in rocket engine ground test [D]. Changsha: College of Aerospace and Material Engineering, 2005.]
- [9] Preusser T, Polansky L. External 6-component wind tunnel balances for aerospace simulation facilities [C]. International Congress on Instrumentation in Aerospace Simulation Facilities, Göttingen, Germany, 488-495, 1989.
- [10] 吴伟, 张书明, 滕启, 等. 起落架载荷测量与标定试验研究[J]. 机械强度, 2003, 2(1): 48-51. [Wu Wei, Zhang Shu-ming, Teng Qi, et al. Study on load measurement and calibration test for airplane landing gear [J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 2(1): 48-51.]
- [11] 吴宝元, 吴仲城, 申飞. 多维加速度场中六维力传感器惯性耦合特性研究[J]. 传感技术学报, 2008, 21(10): 1686-1690. [Wu Bao-yuan, Wu Zhong-cheng, Shen Fei. Study on inertia coupling characteristics of 6-axis force sensor in multi-dimensional acceleration field [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(10): 1686-1690.]
- [12] Watson, Paul C, Drake, Samuel H. Method and apparatus for six degree of freedom force sensing; US, 4094192 [P]. 1978-06-13.
- [13] Charles C, Nguyen, Sami C, Antrazi, et al. Analysis and implementation of a 6 DOF Stewart platform-based robotic wrist [J]. Computers & Electrical Engineering, 1991, 17(3): 191-203.
- [14] Scheinman V. Design of a computer controlled manipulator [D]. Stanford: Mechanical Engineering Department of Stanford University, 1969.
- [15] Eguchi H, Yamazaki H, Takahashi J, et al. Multi-axis sensor using pizo-resistors and a plate-like structure [C]. IEEE International Workshop on Intelligent Robots, Tokyo, Japan, 563-567, 1988.
- [16] Yoshikawa T, Miyazaki T. A six-axis force sensor with three-dimension cross-shape structure [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, USA, 249-255, 1989.
- [17] 钱敏, 吴仲城, 戈瑜, 等. 多维角加速度传感器静态标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(3): 286-315. [Qian Min, Wu Zhong-cheng, Ge Yu, et al. Study on static calibration of multi-dimensional angular accelerometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(3): 286-315.]

作者简介: 吴宝元(1976-), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为多维力传感器、机器人传感测试技术, 人机交互等。  
通信地址: 安徽合肥市蜀山湖路350号强磁场科学研究中心(230031)  
电话: (0551)5592303  
E-mail: bywu@iim.ac.cn

(编辑: 沃云峰)