

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905193

# 高灵敏度大量程六维力传感器设计\*

韩康<sup>1,2</sup>, 陈立恒<sup>1,2</sup>, 李行<sup>1</sup>, 夏明一<sup>1</sup>, 吴清文<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033; 2. 中国科学院大学材料与光电研究中心 北京 100049)

**摘要:**为满足空间在轨组装望远镜地面装配试验的相关需求,综合考虑六维力传感器的量程、刚度和灵敏度等因素,设计了一种高灵敏度大量程六维力传感器。首先对经典十字梁六维力传感器进行数学建模,通过对比各通道单独作用时,应变梁表面应变和弹性体变形刚度的数学表达式,提出一套提高传感器灵敏度的改进方案;然后对传感器结构进行详细设计,并通过传感器的有限元仿真验证结构方案可行性;最后,对六维力传感器进行加工与标定,得到传感器线重复性误差小于0.33% FS,力通道测量灵敏度大于0.83 mV/V,力矩通道测量灵敏度大于2.6 mV/V。该六维力传感器各项性能优良,目前已应用于在轨组装望远镜地面实验当中。

**关键词:**六维力传感器;刚度;灵敏度;最小二乘法标定;维间耦合

**中图分类号:** TP212.1      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Design of a six-axis force sensor with large range and high sensitivity

Han Kang<sup>1,2</sup>, Chen Liheng<sup>1,2</sup>, Li Hang<sup>1</sup>, Xia Mingyi<sup>1</sup>, Wu Qingwen<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. College of materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To meet relevant requirements of the assemble experiment of the orbit telescope, the factors of range, stiffness and sensitivity of six-axis force sensor are considered. In this way, a six-axis force sensor with large range and high sensitivity is designed. First, the mathematical model of the classical cross beam six axis-force sensor is formulated. The mathematical expressions of the surface strain of strained beam and the deformation stiffness of elastomer are compared. When each channel acts alone, a scheme for improving the sensitivity of sensor is presented. Then, the sensor structure is designed in detail, and the feasibility of the structure scheme is verified from the finite element analysis. Finally, the six-axis-dimensional force sensor is made and calibrated. Results show that the repeatability error is less than 0.33% FS, and the measurement sensitivity of the force channel and the moment channel is larger than 0.83 mV/V and 2.6 mV/V. The designed six-axis force sensor meets the requirements of the project and has been applied in the ground assemble experiment of the on-orbit telescope.

**Keywords:** six-axis force sensor; stiffness; sensitivity; least square calibration; coupling between dimensions

## 0 引言

随着空间望远镜技术的不断发展,对超大口径光学系统的需求也越来越迫切,但受发射器尺寸的限制,单个主镜已逐渐无法适应空间望远镜大口径的需求,因此在轨组装空间望远镜技术成为未来空间观测领域重点研究方向之一<sup>[1]</sup>。为验证在轨组装望远镜可行性,必须在地面完成

在轨组装望远镜中主镜模块的智能化装配。考虑到主镜组件在抓取和装配过程中,过大的应力可能导致主镜面形变化,需要在搬运机械臂与末端执行机构之间安装一个高灵敏度大量程的六维力传感器,以便实现机械臂的力适应控制。六维力传感器能够通过测量弹性体的变形将力信号转化为电信号,实现对空间坐标系内3个方向上的力和力矩实时测量<sup>[2]</sup>。通常因应用条件的限制,对六维力传感器的体积、极限载荷、刚度、灵敏度等均有严格的要求,而

在量程一定的条件下,六维力传感器的刚度与灵敏度之间存在一定的制约关系,提高传感器的灵敏度需要增加弹性体的变形,但增加弹性体变形会降低传感器的刚度<sup>[3]</sup>。如何根据设计需求平衡传感器设计过程中各项指标之间的关系,是六维力传感器设计的重点。

根据六维力传感器将应变转化为电信号的原理不同,可以分为应变式、压电式、电容式和光电式等不同类型<sup>[4]</sup>,其中应变式输出稳定,可靠性高,应用也最广泛,因此本文采用应变原理设计六维力传感器。提高应变式六维力传感器测量性能的关键是传感器弹性体的设计。文献<sup>[3]</sup>提出一种大刚度高灵敏度并联六维力传感器,通过对 Stewart 平台结构进行改进,采用局部去耦设计方案达到提高测量精度和提升刚度的目的;姚江涛等<sup>[5-6]</sup>采用整体预紧式超静定结构达到高刚度大量程的目的,并对传感器的测量模型与动态特性进行了分析。Stewart 平台结构有利于提高传感器刚度及量程,但小型化困难。Yuan 等<sup>[7]</sup>对经典十字梁结构进行改进,设计了一种应用于机器人足部各向量程不同的六维力传感器,提高某一方面测量精度或刚度,其在竖直方向力的最大量程为 1 000 N,水平方向力矩的最大量程为 20 N·m。Sun 等<sup>[8]</sup>设计了一种四平行板梁式弹性体结构,在保证传感器灵敏度减少较低的情况下,提升传感器刚度,其最大量程分别为 500 N 和 125 N·m,对应灵敏度分别为 0.42 和 1.52 mV/V,并成功应用于空间站小臂项目。此外文献<sup>[9-11]</sup>均通过改进弹性体结构,提高传感器刚度、灵敏度及各向同性等性能,达到了良好的效果。

由于在轨组装望远镜实验项目允许六维力传感器的安装空间有限,且具有量程大、灵敏度与可靠度要求高等特点,需要针对性的对高灵敏度大量程六维力传感器进行更深一步的研究。本文通过对经典十字梁弹性体进行力学建模与分析,指出弹性体优化方向,并通过有限元仿真和实物标定证明设计的六维力传感器各项指标均满足项目使用需求。

## 1 弹性体数学建模

### 1.1 理论模型

六维力传感器通过测量弹性体的变形实现对 3 个方向上力和力矩的测量,因此弹性体的结构形式直接关系到六维力传感器的灵敏度、刚度及维间耦合特性等指标<sup>[12]</sup>。为减少六维力传感器各通道之间结构上的维间耦合,通常选用十字梁式结构。十字梁弹性体的理论模型及各部分尺寸如图 1 所示,主要包括固定块  $Q_1 \sim Q_4$ 、浮动块  $P_1 \sim P_4$ 、应变梁  $S_1 \sim S_4$ 、浮动梁  $B_1 \sim B_8$  和加载块  $O$  等结构。为方便模型理论分析,根据实际弹性体结构特性,通常假设结构变形仅发生在应变梁  $S_1 \sim S_4$  和浮动梁

$B_1 \sim B_6$  上;浮动块  $P_1 \sim P_4$ 、固定块  $Q_1 \sim Q_4$  与加载块  $O$  均视为刚体。

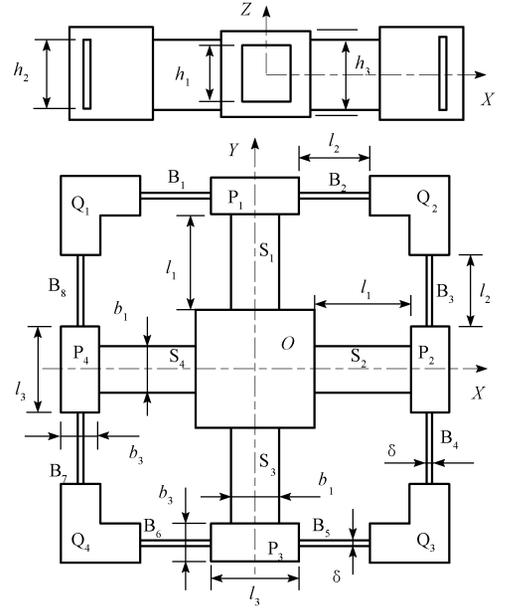


图 1 十字梁弹性体理论模型

Fig.1 Theoretical model of cross beam elastic body

### 1.2 各方向单独加载时力分析

当  $F_z$  单独作用于弹性体上时,传感器通过测量应变梁上下表面的应变,计算作用力  $F_z$  的值。由于弹性体关于  $X$  轴与  $Y$  轴完全对称,4 个应变梁的变化完全相同,计算  $F_z$  时,仅需要分析应变梁  $S_4$  和浮动梁  $B_7$ 、 $B_8$  即推测整个弹性体变形效果。 $F_z$  单独作用时,弹性体的受力如图 2 所示。

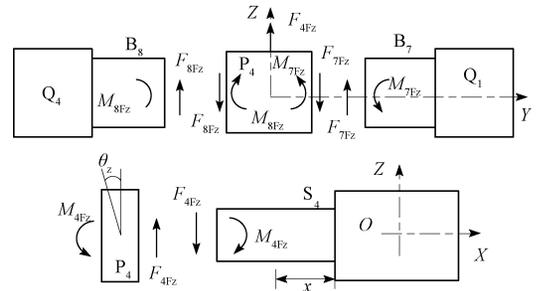


图 2  $F_z$  加载时受力示意图

Fig.2 Schematic diagram of elastic body under the force  $F_z$

根据矩形梁表面应变计算公式,可求得在  $F_z$  单独作用时,在距离加载块间距  $x$  处,应变梁下表面应变为:

$$\varepsilon_{F_z} = \frac{2F_z G h_2 \delta^3 l_1 (l_1 - 2x) + 3F_z E I_2 l_2 (2l_1 + b_3 - 2x)}{8E I_2 (6E I_2 l_2 + 4G h_2 \delta^3 l_1)} h_1 \quad (1)$$

通过计算应变梁末端挠度  $\omega_{F_z}$ , 可得  $F_z$  单独作用时

弹性体刚度为:

$$k_{F_z} = \frac{F_z}{\omega_{F_z}} = \frac{1}{\frac{l_2^3}{96EI_1} + \frac{2Gh_2\delta^3l_1^4 + 3EI_2l_2l_1^2(4l_1 + 3b_3)}{24EI_2(6EI_2l_2 + 4Gh_2\delta^3l_1)}} \quad (2)$$

式中: $E$ 为弹性体所选材料的弹性模量; $G$ 为材料的切变模量; $I_1$ 为浮动梁在 $Z$ 方向弯曲的惯性矩,根据惯性矩计算公式, $I_1 = \delta h_2^3/12$ ; $I_2$ 为应变梁在 $Z$ 方向弯曲的惯性矩, $I_2 = b_1 h_1^3/12$ ;各尺寸与力符号代表的意义如图1、图2所示。

同理可以计算当 $F_y$ 单独作用于弹性体上时,求解得到应变梁在距离加载块间距为 $x$ 处两侧的应变为:

$$\varepsilon_y = \frac{b_1}{2EI_3} \left( \frac{K}{l_1^2} - \frac{I_3 l_1 l_2^3 + I_4 b_3 l_2^3}{I_3 l_2^3 + 8I_3 l_1 l_2^2 + 12I_3 l_1 l_2 l_3 + 6I_3 l_1 l_3^2} - x \right) F_{4F_y} \quad (3)$$

在 $F_y$ 单独作用时,传感器弹性体的刚度为:

$$k_y = \frac{12E(12A_2I_3I_4l_2 + 4A_1A_2I_3K + 24A_1I_3I_4l_1 + A_1A_2I_4l_2^3)}{72I_3I_4l_2^2 + 3A_2I_4l_2^4 + 24A_1I_3I_2K + A_1A_2l_2^3K} \quad (4)$$

其中:

$$K = \frac{8I_3l_1l_2^4 + 12I_3l_1^4l_2l_3 + 6I_3l_1^4l_2^2 + 4I_3l_1^3l_2^3 + 3I_4b_3l_1^2l_2^3}{2I_3l_2^3 + 16I_3l_1l_2^2 + 24I_3l_1l_2l_3 + 12I_3l_1l_3^2}$$

式中: $A_1$ 为浮动梁截面积, $A_1 = h_2\delta$ ; $A_2$ 为应变梁截面积, $A_2 = h_1b_1$ ; $I_3$ 为浮动梁在 $X$ 方向弯曲的惯性矩, $I_3 = h_2\delta^3/12$ ; $I_4$ 为应变梁在 $Z$ 方向弯曲的惯性矩, $I_4 = h_1b_1^3/12$ 。

当 $M_z$ 单独作用在弹性体上时,求解得到距离加载块 $x$ 处应变梁两侧的应变为:

$$\varepsilon_{M_z} = \frac{b_1(l_1 - J - x)}{2EI_3(4l_1 + 2b_4 - 4J)} M_z \quad (5)$$

$M_z$ 单独作用时,弹性体刚度为:

$$k_{M_z} = \frac{EI_3(6l_2^3 + 12l_2l_3 + 8l_2^2)(8l_1 + 4b_4 - 8J)}{(l_2^2 - 2Jl_2)(6l_2^3 + 12l_2l_3 + 8l_2^2) - (b_3 + J)l_2^2} \quad (6)$$

其中:

$$J =$$

$$\frac{\left( 3b_4l_2^2 + 2l_2^3 - \frac{6I_3}{A_1} \right) (3l_2^3 + 6l_2l_3 + 4l_2^2) - \frac{b_3}{2}(6l_2^4 + 3b_4l_2^3)}{(6l_2^4 + 3b_4l_2^3) + (6b_4l_2 + 6l_2^2)(3l_2^3 + 6l_2l_3 + 4l_2^2)}$$

当 $M_y$ 单独作用于弹性体上时,求解应变梁下表面距离加载块距离为 $x$ 处的应变为:

$$\varepsilon_{M_y} = \frac{h_1(l_1 - Q_1 - x)}{2EI_2(2l_1 + b_4 + 2Q_2)} M_y \quad (7)$$

$M_y$ 单独作用时,弹性体刚度为:

$$k_{M_y} = \frac{12EI_1I_2(2l_1 + b_4)(2l_1 + b_4 + 2Q_2)}{Q_2(8l_1^3 + I_2l_2^3 + 12Q_1l_1^2)} \quad (8)$$

式中:

$$Q_1 = \frac{Gh_2\delta^3I_2l_1l_2^3 + 24I_1b_3l_2l_1^2 + I_1b_3b_4l_1l_2 - 4Gh_2\delta^3I_1b_4l_1^3}{12I_1Gh_2\delta^3l_1^3 + 144I_1l_1^2l_2 + 72I_1b_4l_1l_2}$$

$Q_2 =$

$$\frac{G\beta h_1b_1^3(4l_2^2 + 6l_2l_3 + 3l_2^3)(8I_1l_1^3 + I_2l_2^3 + 12Q_1I_1l_1^2)}{12I_2\left(l_1 + \frac{b_4}{2}\right)(8EI_1l_1l_2^2 + 12EI_1l_1l_2l_3 + 6EI_1l_1l_3^2 + G\beta h_1b_1^3l_2^3)}$$

由于弹性体结构关于 $X$ 、 $Y$ 轴完全对称,故 $F_x$ 单独作用时弹性体产生的应变与刚度和 $F_y$ 单独作用时相同, $M_x$ 单独作用时弹性体产生的应变与刚度与 $M_y$ 单独作用时相同。

### 1.3 增加灵敏度方式

分析式(1)、(3)、(5)和式(7)可知,增加弹性体灵敏度的方式主要有以下3种:1)减小应变片粘贴位置到加载块之间的距离 $x$ ;2)降低应变梁的惯性矩 $I_2$ 、 $I_4$ ;3)增加浮动梁长度 $l_2$ 或减少浮动梁宽度 $\delta$ 。

根据式(2)、(4)、(6)和(8)可知,降低应变梁的惯性矩和增加浮动梁的浮动效果,会造成弹性体刚度下降。为在增加灵敏度的同时,尽量减少对弹性体刚度的影响,可在贴应变片位置减少弹性体的惯性矩。通过在应变片粘贴位置开槽的方式减少该位置的惯性矩,使应力在应变片粘贴位置集中。同时使用全桥电路对弹性体应变进行测量。改进后的十字梁传感器模型如图3所示。

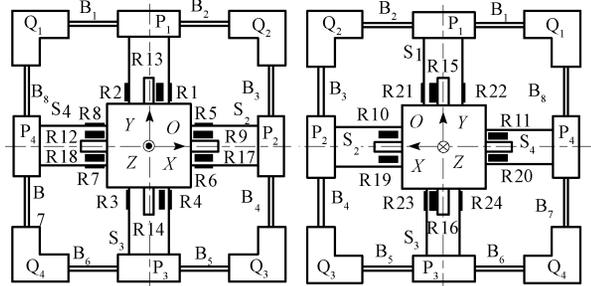


图3 优化后的弹性体模型

Fig.3 The optimized elastomer model

改进后的弹性体依然为对称式结构,使用全桥惠斯顿电路对应变片的电阻进行测量,其中R1~R4测量 $F_x$ 方向作用力;R5~R8测量 $F_y$ 方向作用力;R9~R12测量 $F_z$ 方向作用力;R13~R16测量 $M_x$ 方向作用力;R17~R20测量 $M_y$ 方向作用力;R21~R24测量 $M_z$ 方向作用力。

## 2 弹性体结构设计与分析

### 2.1 弹性体结构设计

为顺利完成在轨组装望远镜的地面实验,将六维力传感器安装在搬运机械臂与末端执行器之间,采用机械臂法兰盘与搬运机械臂相连,末端执行器法兰盘与末端执行器相连,六维力传感器安装方式如图4所示。为满足六维力传感器空间限制和安装需求,将六维力传感器弹性体的固定块与加载块均设计为圆弧形。同时在固定块与加载块上设计安全销孔并安装阶梯销,防止弹性体产生塑性变形。综合考虑六维力传感器量程、刚度、灵敏度及加工能力限制,六维力传感器选择高强度合金钢40Cr加工,各参数为 $l_1 = 16 \text{ mm}$ ;  $l_2 = 9 \text{ mm}$ ;  $l_3 = 20 \text{ mm}$ ;  $b_1 = 12 \text{ mm}$ ;  $\delta = 3 \text{ mm}$ ;  $b_3 = 6 \text{ mm}$ ;  $h_1 = h_2 = h_3 = 18 \text{ mm}$ 。最终得到六维力弹性体结构如图5所示。

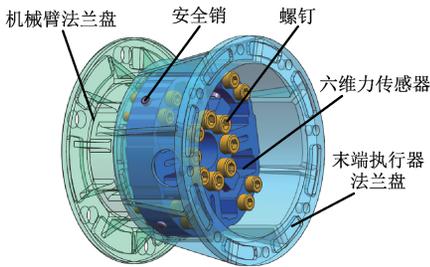


图4 六维力传感器结构

Fig.4 The structure of six-axis force sensor

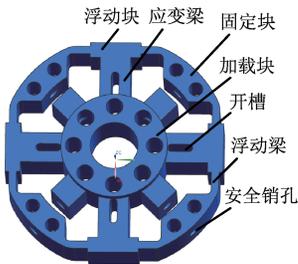


图5 传感器弹性体模型

Fig.5 The elastomer model of the six-axis force sensor

### 2.2 弹性体有限元分析

将传感器模型导入 MSC Patran 软件中进行网格划分,使用有限元法对传感器进行分析,得到弹性体有限元模型如图6所示。在对模型施加边界条件时,约束固定块上螺钉孔位置节点的位移,并在加载块螺纹孔处利用节点耦合 MPC 单元,分别单独施加各方向相应的单位载荷,3个方向的力为1 N,3个方向的力矩为1 N·m。对模型赋相应的材料属性,其中弹性模量为206 GPa,泊松比

为0.28。在 MSC Nastran 软件中进行计算,得到弹性体在不同载荷条件下的应变云图和变形情况如图7所示。由于弹性体结构对称, $F_x$ 、 $M_x$  应变及变形情况与  $F_y$ 、 $M_y$  相同,故仅分析  $F_y$ 、 $F_z$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  即可。

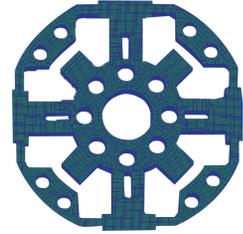


图6 弹性体有限元模型

Fig.6 The FEM model of the elastic body

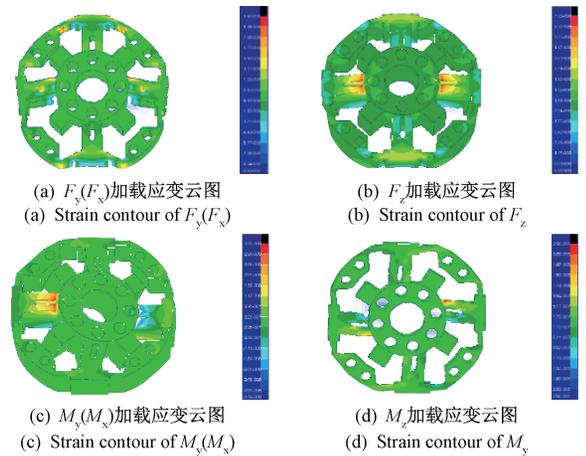


图7 弹性体应变云图

Fig.7 Deformation of the FEM model under each single load

分别提取应变片粘贴位置处节点的应变,求解该处应变的平均值。根据六维力传感器作用原理,可得在不同力和力矩作用下传感器的应变柔顺矩阵为<sup>[13-14]</sup>:

$$A_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} 0.42 & 0 & 0 & 0 & 1.32 & 0 \\ 0 & 0.42 & 0 & -1.32 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0.3 & 0.28 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14.78 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 14.78 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18.7 \end{bmatrix} \quad (9)$$

柔顺矩阵中对角线元素为各通道对应的输入与输出的比值,同一列非对角线元素与对角线元素的比值为传感器结构引起的维间干扰。设计大量程六维力传感器力通道最大量程为3 000 N,力矩通道最大量程为200 N·m。分析得到各通道之间的灵敏度及维间干扰如表1所示。

表 1 传感器灵敏度与结构维间干扰

Table 1 The sensitivity and dimensional of the six-axis force sensor

通道	灵敏度/ (mV/V)	维间耦合/%					
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$F_x$	1.26	-	0	0	0	8.9	0
$F_y$	1.26	0	-	0	8.9	0	0
$F_z$	0.9	0	4.8	-	1.9	0	0
$M_x$	2.96	0	0	0	-	0	2.1
$M_y$	2.96	0	0	0	0	-	2.1
$M_z$	3.74	0	0	0	0	0	-

理论上十字梁式弹性体六维力传感器结构完全解耦,各通道之间不存在耦合,但在实际的结构模型中,由于存在传感器定位止口等结构,影响传感器的对称性,故个别通道之间存在一定的维间耦合,特别  $M_x$  与  $F_y$  之间和  $M_y$  与  $F_x$  之间。造成上述现象的主要原因是测量相互耦合的全桥电路应变片,粘贴在同一根应变梁上。因此六维力传感器在使用前需要标定求解解耦矩阵,消除因结构引起的维间干扰对测量结果的影响。

### 3 实验标定

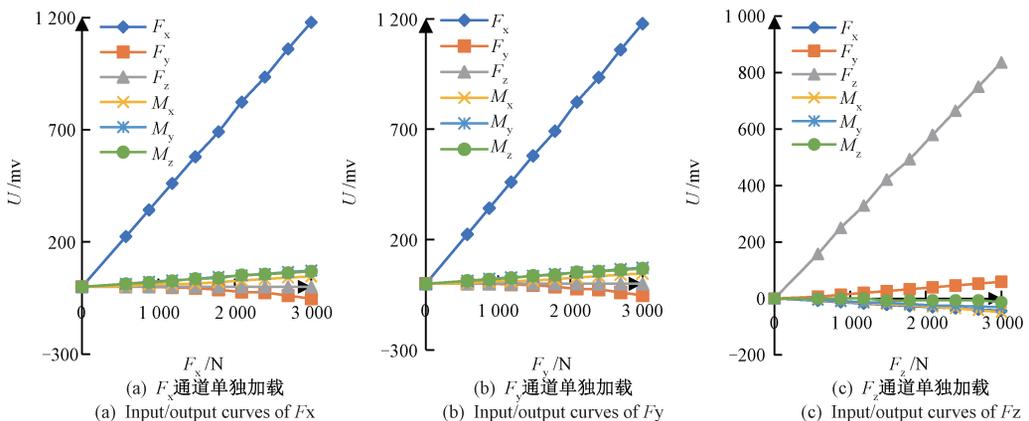
#### 3.1 标定平台设计

按照上述设计模型加工六维力传感器弹性体及连接法兰盘,并按分析得到的最优位置粘贴应变片,组合后的六维力传感器如图 8 所示。



图 8 六维力传感器实物

Fig.8 The picture of designed six-axis force sensor



六维力传感器加工完成后,需要对其进行标定试验,以了解传感器的性能并求解相应的解耦标定矩阵。六维力传感器标定需要设计相应的标定平台对各个通道力进行单独加载<sup>[15]</sup>。标定系统实物如图 9 所示。

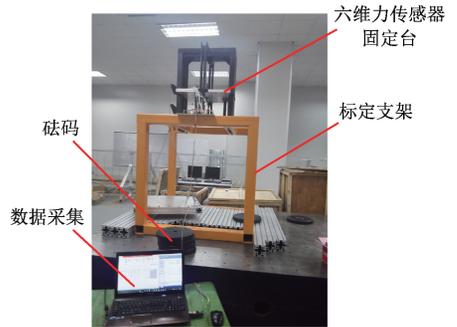


图 9 标定系统

Fig.9 The picture of calibration system

当对六维力传感器进行标定时,分别在 6 个通道相应的量程内均匀的选取 10 个加载点,反复进行 3 次循环加载与卸载实验,相应的每个通道在同一个载荷情况下,得到 6 个测量数据。对比相同通道同一测量点的 6 组数据,可以求得六维力传感器各通道重复性误差如表 2 所示。对各通道每个加载点的 6 个数据求平均值作为该点的输出,绘制各方向力或力矩与各通道电桥输出值之间的关系,得到各通道加载时的标定曲线如图 10 所示。

表 2 六维力传感器重复性误差

Table 2 The repeatability error of the six-axis force sensor

参数	重复性误差/(%F·S)
$F_x$	0.16
$F_y$	0.17
$F_z$	0.29
$M_x$	0.23
$M_y$	0.22
$M_z$	0.33

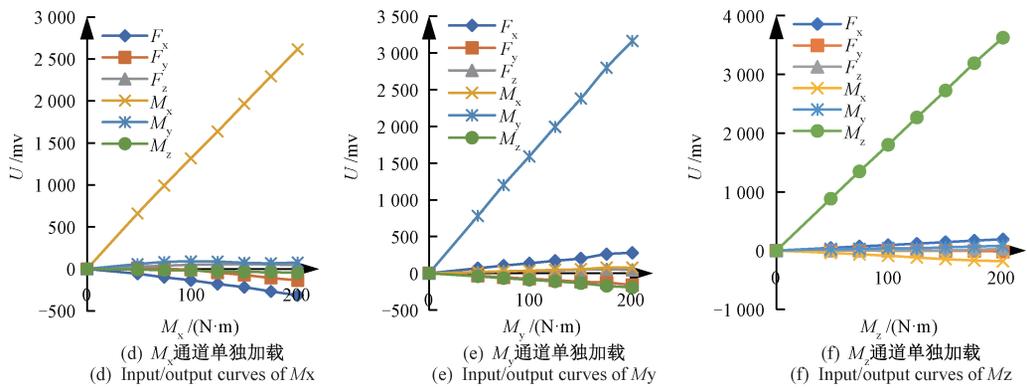


图 10 各通道标定加载曲线

Fig.10 The calibration curves for each signal load

3.2 标定结果

根据标定得到的多组载荷和电压输出的关系,使用

最小二乘法求得六维力传感器的柔顺矩阵 **A** 和修正矩阵 **B** 分别为<sup>[16]</sup>:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.392\ 9 & 0.009\ 9 & -0.014\ 6 & -0.753\ 7 & 1.417\ 7 & 0.970\ 0 \\ -0.017\ 6 & 0.372\ 9 & 0.020\ 6 & -1.581\ 0 & -0.773\ 7 & -0.068\ 6 \\ 0 & -0.020\ 9 & 0.277\ 7 & 0.236\ 8 & -0.270\ 8 & 0.120\ 6 \\ 0.016\ 2 & 0.022\ 7 & -0.016\ 2 & 13.014\ 0 & -0.407\ 2 & -0.957\ 1 \\ 0.024\ 2 & 0.020\ 0 & -0.010\ 9 & 0.276\ 9 & 13.830\ 9 & 0.380\ 2 \\ 0.023\ 5 & 0.024\ 2 & -0.004\ 1 & -0.239\ 9 & 0.968\ 2 & 18.160\ 6 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 4.086\ 3 \\ 18.932\ 6 \\ 3.267\ 2 \\ -7.194\ 7 \\ 28.074\ 9 \\ 9.784\ 0 \end{bmatrix}$$

最终得到六维力传感器的标定方程为:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.566\ 8 & 0.088\ 1 & 0.125\ 2 & 0.159\ 5 & -0.274\ 0 & -0.123\ 4 \\ 0.095\ 6 & 2.646\ 5 & -0.166\ 6 & 0.327\ 6 & 0.133\ 3 & 0.020\ 5 \\ 0.016\ 1 & 0.208\ 3 & 3.581\ 4 & -0.038\ 1 & -0.060\ 7 & -0.024\ 6 \\ -0.003\ 5 & -0.004\ 6 & 0.004\ 6 & 0.076\ 1 & -0.001\ 9 & 0.004\ 2 \\ -0.004\ 4 & -0.003\ 6 & 0.002\ 7 & -0.002\ 3 & -0.072\ 5 & -0.001\ 4 \\ -0.003\ 7 & -0.003\ 8 & 0.001\ 1 & 0.000\ 2 & 0.004\ 0 & 0.055\ 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 4.086\ 3 \\ 18.932\ 6 \\ 3.267\ 2 \\ -7.194\ 7 \\ 28.074\ 9 \\ 9.784\ 0 \end{bmatrix} \tag{10}$$

根据标定得到的柔顺矩阵 **A** 计算六维力传感器的各通道的灵敏度与维间干扰如表 3 所示。

由表 3 可知,实际加工六维力传感器测量力灵敏度为 0.83 mV/V,测量力矩灵敏度为 2.60 mV/V。对比表 1 和表 3 可知,标定得到的六维力传感器灵敏度略低于有限元分析结果,而由结构和应变片粘贴引起的维间耦合略大于有限元分析结果,造成上述现象的主要原因如下:

表 3 六维力传感器灵敏度与直接耦合误差

Table 3 The sensitivity and dimensional of the six-axis force sensor

通道	灵敏度/ (mV/V)	直接耦合误差/%					
		$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$F_x$	1.18	-	2.65	5.26	5.79	10.25	5.34
$F_y$	1.12	4.48	-	7.42	12.14	5.59	0.38
$F_z$	0.83	0	5.61	-	1.82	1.96	0.66
$M_x$	2.60	4.12	6.09	5.83	-	2.94	5.27
$M_y$	2.77	6.16	5.36	3.93	2.13	-	2.09
$M_z$	3.63	5.98	6.49	1.48	1.84	0.7	-

1) 由于弹性体加工存在误差,实际弹性体不能关于坐标轴严格对称,造成同一组粘贴应变片位置处的应变值存在差异,引起维间干扰增加;

2) 由于贴片工艺限制,实际应变片的粘贴位置和角度与理论位置和角度存在一定误差,造成应变桥路测量到的应变值低于理论值,并引起维间干扰误差增加;

3) 实际标定过程中,力的加载方向与理论方向存在误差,也在一定程度上造成传感器标定灵敏度小于分析结果,而维间干扰大于分析值;

上述维间耦合主要由传感器结构和应变片粘贴引

起,因此即便是十字梁式六维力传感器,依然需要标定解耦之后使用,通过标定矩阵消除维间干扰对测量结果的影响。分别对 6 个通过进行随机加载测试,输出结果经过式(10)标定方程解耦后,得到传感器解耦后的残余维间耦合误差小于 1.2%,满足使用需求。

### 4 实验应用

本文设计的六维力传感器安装在机械臂末端,满足系统要求的安装接口条件,并应用于在轨组装望远镜地面实验当中。在轨组装望远镜地面实验系统如图 11 所示。主要由于机械臂、六维力传感器、手眼相机、抓取机构、子镜模块和电控系统等组成。试验主要目的为通过力及视觉传感器的反馈,实现机械臂对子镜模块的自动抓捕、转运及安装。其中六维力传感器主要在子镜模块抓捕与安装过程中,测量机械臂末端所受到的力,并反馈给控制系统,实现力顺控制。同时六维力传感器可以监测机械臂在转运过程中是否遇到障碍,防止发生磕碰事故。图 12 所示为实验抓捕阶段实物图。图 13 所示为子镜模块抓捕、搬运及安装整个试验过程中六维力传感器反馈作用力曲线。

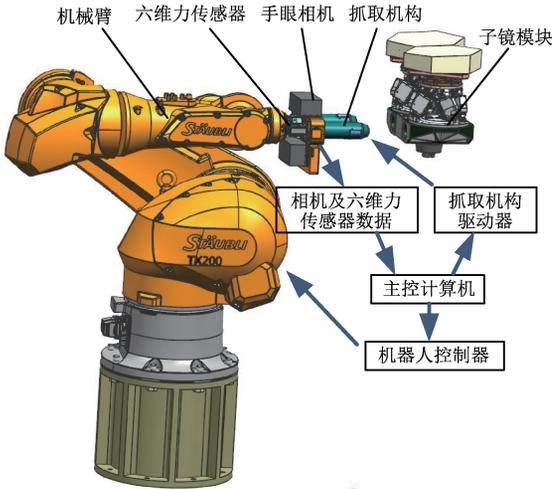


图 11 在轨组装望远镜地面试验系统

Fig.11 The schematic diagram of ground test system for on-orbit assembly telescope

在图 13 中,0~600 s 为抓取机构自动抓捕阶段,600~1 380 s 为机械臂抬起转运阶段,1 380~1 680 s 为子镜与基座定位安装阶段。自动抓捕过程主要分为抓捕机构插入子镜搬运孔和抓捕机构胀紧固定两个步骤<sup>[17-18]</sup>。插入过程中由于抓捕机构与子镜模块搬运孔之间有间隙,机械臂操作相对顺利。胀紧固定过程中机械臂需要不断调整角度,确保实现力适应性控制,防止破坏子镜组件,六维力传感器起到了很好的反馈效果。子镜搬运过

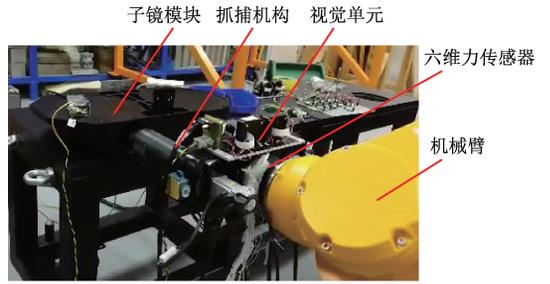


图 12 在轨组装望远镜地面试验系统实物

Fig.12 The picture of ground test system for on-orbit assembly telescope

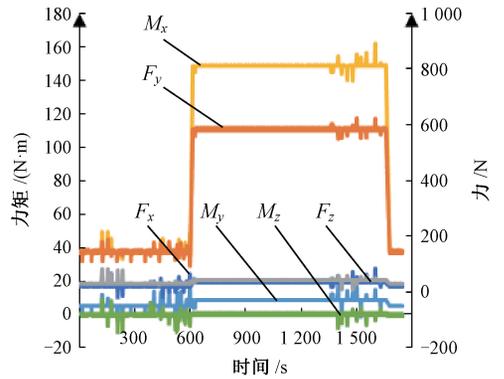


图 13 试验过程中六维力传感器测量曲线

Fig.13 The measuring curves of six-axis force sensor during the test

程中,机械臂运行平稳,六维力传感器输出稳定。在子镜组件安装过程同样包括子镜组件定位和锁紧两个阶段,子镜组件采用锥形孔定位,定位过程需要机械臂根据六维力传感器反馈信息不断调整子镜姿态,此过程也可以看到六维力传感器明显的反馈结果。

在轨组装望远镜地面实验表明,本文设计的高灵敏度大量程六维力传感器,能够满足实验各阶段机械臂末端力与力矩信息的测量与反馈,测量精度稳定可靠,量程能够满足子镜模块搬运及安装需求,达到了项目要求指标。

### 5 结 论

针对空间在轨组装望远镜地面实验对搬运机械臂末端六维力传感器的特殊需求,本文通过理论分析得到了传统十字梁结构弹性体的优化方向,并设计了一种高灵敏度六维力传感器,同时使用有限元法验证了设计方案的可行性。在指标允许的范围内,牺牲部分弹性体刚度,提高六维力传感器的灵敏度并控制传感器的结构耦合。最终得到传感器力通道最大量程为 3 000 N,测量灵敏度

大于 0.83 mV/V,力矩通道最大量程为 200 N·m,测量灵敏度大于 2.6 mV/V,解耦后传感器的残余维间耦合误差小于 1.2%。满足在轨望远镜地面实验对六维力传感器的各项指标要求,并配合地面实验的其他单元,圆满完成在轨组装望远镜模拟装配实验。

### 参考文献

- [1] 沈晓凤,曾令斌,靳永强,等.在轨组装技术研究现状与发展趋势[J].载人航天,2017,23(2):228-235,244.  
SHEN X F, ZENG L B, JIN Y Q, et al. Status and prospect of on-orbit assembly technology [J]. Manned Spaceflight, 2017, 23(2): 228-235,244.
- [2] 刘岩,武俊峰,夏科睿,等.机械臂腕力传感器负载端重力补偿算法与仿真[J].哈尔滨理工大学学报,2018,23(2):78-85.  
LIU Y, WU J F, XIA K R, et al. Design and verification of gravity influence compensation algorithm on load end[J]. Journal of harbin university of science and technology, 2018, 23(2): 78-85.
- [3] 高波,王晨,屈文轩,等.基于局部去耦的重载 Stewart 6 维力传感器精度与刚度的综合优化设计[J].机器人,2017,39(6):838-843.  
GAO B, WANG C, QU W X, et al. The accuracy and stiffness comprehensive optimal design of the heavy load stewart six-axis force sensor based on partial decoupling method[J]. Robot, 2017, 39(6): 838-843.
- [4] 钟晓玲,张晓霞.面向机器人的多维力/力矩传感器综述[J].传感器与微系统,2015,34(5):1-4.  
ZHONG X L, ZHANG X X. Review of multi-dimensions force /torque sensor for robots [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2015, 34(5): 1-4.
- [5] 姚建涛,李立建,许允斗,等.超静定六维力传感器静定测量模型及标定方法[J].仪器仪表学报,2013,34(9):1927-1933.  
YAO J T, LI L J, XU Y D, et al. Statically determinate measurement model and calibration method of statically indeterminate six-axis force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9): 1927-1933.
- [6] 姚建涛,孙锐,李立建,等.整体预紧式六维力传感器动态特性分析[J].仪器仪表学报,2014,35(5):1037-1043.  
YAO J T, SUN K, LI L J, et al. Dynamic characteristic analysis of pre-stressed parallel Stewart structure six-axis force sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5): 1037-1043.
- [7] YUAN C, LUO L P, YUAN Q, et al. Development and evaluation of a compact 6-axis force/moment sensor with a serial structure for the humanoid robot foot [J]. Measurement, 2015, 70: 110-122.
- [8] SUN Y, LIU Y, ZOU T, et al. Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot[J]. Measurement, 2015, 65: 135-148.
- [9] LIU S A, TZO H L. A novel six-component force sensor of good measurement isotropy and sensitivities [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 100(2-3): 223-230.
- [10] KANG M K, LEE S, KIM J H. Shape optimization of a mechanically decoupled six-axis force/torque sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 209: 41-51.
- [11] WU B, LUO J, SHEN F, et al. Optimum design method of multi-axis force sensor integrated in humanoid robot foot system [J]. Measurement, 2011, 44(9): 1651-1660.
- [12] KIM G S, KANG D I, RHEE S H. Design and fabrication of a six-component force/moment sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1999, 77(3): 209-220.
- [13] MA J, SONG A. Fast estimation of strains for cross-beams six-axis force/torque sensors by mechanical modeling[J]. Sensors, 2013, 13(5): 6669-6686.
- [14] 陈望隆,杨述焱,胡权,等.面向运动力学测量的无线六维力传感器[J].仪器仪表学报,2019,40(4):129-136.  
CHEN W L, YANG S Y, HU Q, et al. Wireless six-dimensional force sensor for motion mechanics measurement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(4):129-136,.
- [15] 赵延治,牛智,焦雷浩,等.新型过约束正交并联六维力传感器测量模型与静态标定试验[J].机械工程学报,2016,52(18):16-23.  
ZHAO Y ZH, NIU ZH, QIAO L H, et al. Measurement model and calibration experiment of new over-constrained and orthogonal parallel six-dimensional force sensor[J]. Journal of mechanical engineering, 2016, 52(18): 16-23.
- [16] 韩康,王智,李昂,等.大量程六维力传感器设计与标定研究[J].传感器与微系统,2016,35(5):87-90.  
HAN K, WANG ZH, LI ANG, et al. Design of big-scale six-axis force sensor and study on calibration test [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(5): 87-90.
- [17] 许德章,葛运建,高理富.机器人多维力传感器标定

Kalman 滤波[J].电子测量与仪器学报,2006,20(1):92-97.

XU D ZH, GE Y J, GAO L F. Kalman filter for the multi-component force/moment sensor of robot calibration[J]. Journal of electronic measurement and instrument, 2006,20(1):92-97.

- [18] 朱嘉琦,韩哈斯敖其尔,于鹏,等.在轨组装机器人抓取机构设计与控制系统研究[J].机械传动,2019,43(2):79-84.

ZHU J Q, HAN H, YU P, et al. Research of design and control system of grab mechanism of on-orbit assemblyrobot[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019,43(2):79-84.

## 作者简介



**韩康**,2011年于西北农林科技大学获得学士学位,2014年于西北工业大学获得硕士学位,现为长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要研究方向为空间运动机构及多维力传感器。

E-mail: hankang\_1988@126.com

**Han Kang** received his B. Sc. degree from Northwest A&F University in 2011, and M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2014. He is currently an assistant professor at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics. His main research interests include space motion mechanism and multi-axis force sensing.



**陈立恒**(通信作者),2002年、2005年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,现为长春光学精密机械与物理研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为空间光学遥感器力学及热控技术。

E-mail: chenliheng3@163.com

**Chen Liheng** (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Jilin University in 2002 and 2005, respectively. He received his Ph. D. degree from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics in 2008. He is currently a professor at Changchun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics. His research interests include space optical remote sensor mechanics and thermal control technology.