Research on Calibration Method of Stewart Six-Component Force Sensor*

ZHANG Tao, YANG Dehua, XIAO Xinyi, WU Changcheng*
(*College of Automation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing Jiangsu* 210016, *China*)

Abstract: Type I and II errors are the main factors affecting the measurement accuracy of the Stewart-Type Six-Component force sensor. The measurement principle of the Stewart-type six-component force sensor and the reason for error introduction are briefly introduced in the article. To improve the actual measurement accuracy of the sensor and reduce the measurement error, a calibration scheme based on the calibration rod was proposed. The feasibility of the scheme was verified through theoretical analysis and the static calibration experiment of the sensor was completed by the finite element simulation software ANSYS. The comparison of sensor measurement accuracy before and after calibration proves that the scheme can effectively improve the actual measurement accuracy of the sensor and reduce the type I and II error.

Key words: Stewart; six-component force sensor; static calibration; simulation; ANSYS
EEACC: 7230 **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2020.09.008

Stewart 型六维力传感器的标定方法研究*

张 韬, 杨德华*, 肖心怡, 吴常铖
(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: I、II 类误差是影响 Stewart 型六维力传感器测量精度的主要因素, 对 Stewart 型六维力传感器的测力原理和误差引入原因做了简要的介绍。为提高传感器的实际测量精度, 减小测量误差, 提出了一种基于标定杆的标定方案。通过理论分析验证了该方案的可行性并通过有限元仿真软件 ANSYS 完成了 Stewart 型六维力传感器的静态标定仿真实验。标定前后传感器测量精度的对比证明该方案可有效提高传感器的实际测量精度, 降低 I、II 类误差。

关键词: Stewart; 六维力传感器; 静态标定; 仿真; ANSYS
中图分类号: TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2020)09-1274-05

自 20 世纪 70 年代以来, 机器人关节用六维力传感器成为国内外学者的研究热点[1], 发明了多种不同类型的六维力传感器用于检测三维空间全力信息, 后来被广泛应用在了风洞测力试验、火箭发动机推力测试及医疗等诸多领域[2-3]。在六维力传感器的研究中, 弹性体结构的设计是研究的核心问题, 因为结构一定程度上决定了传感器性能的优劣[4]。目前使用较多的弹性体结构有三垂直筋结构[5]、盒式结构、双环形结构等[6]。但是基于此类弹性体设计的六维力传感器通常结构复杂、尺寸太大、刚度较低、应变灵敏度低、解耦复杂等等。因此, 国内外学者尝试引入并联结构作为六维力传感器的弹性元件。Stewart 机构作为一种典型的并联机构, 不仅可以提供六个自由度的输出, 同时承载能力强, 力映射关系明确, 依靠自身机构便可以实现输出解耦, 克服了其他结构多维力传感器采用贴片组桥解耦的缺点[7], 自 1983 年 Gaillet 和 Reboulet 提出后, 被广泛应用在多维力传感器领域[8]。

理论上讲六维力传感器每一通道的输出只与该分量作用力/力矩的大小有关, 但是由于传感器的结构设计, 机械加工精度等方面的原因, 几乎每一维作用到传感器上的力/力矩都会对传感器的各路输出信号产生影响, 这就是维间耦合[9], 又称其为六维力传感器的 II 类误差。II 类误差实际上是某分量

项目来源: 南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20190308); 中央高校基本科研业务费专项资金项目
收稿日期: 2020-06-09 **修改日期**: 2020-08-26

输入对其他分量的影响,是影响传感器测量精度的一个主要因素。除 II 类误差之外,评价六维力传感器测量精度的指标还有 I 类误差:I 类误差是指某分量输入输出曲线的一致度。I 类误差和 II 类误差[10]共同决定了传感器的实际测量精度。在完成结构优化设计前提下,为尽量减小 I、II 类误差,一般选择对传感器进行标定实验,重新建立输入与输出的映射关系,提高传感器的实际测量精度。基于此本文提出了一种基于标定杆的标定方案并建立了一套标定系统,通过理论分析验证了该方案的可行性,通过有限元仿真软件 ANSYS 完成了传感器的标定仿真实验,实验结果验证了该标定方案可有效提高传感器实际测量精度。

1　Stewart 型六维力传感器的力学模型及标定原理

1.1　Stewart 型六维力传感器的力学模型

基于 Stewart 机构的六维力传感器依靠其自身结构便可实现输出解耦,这是因为在忽略传感器本身自重和摩擦力的前提下,施加在 Stewart 力传感器上平台中心的广义力 F 通过映射矩阵映射为传感器六条支路上的轴向拉压力 $\boldsymbol{f}$[11],用数学公式表达如下:

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{f} \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{F}=\{F_x\ F_y\ F_z\ M_x\ M_y\ M_z\}$ 为作用在上平台的广义力;$\boldsymbol{f}=\{f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6\}$ 为映射到六条支路上的轴向拉压力;$\boldsymbol{G}$ 为转换矩阵,又称其为一阶静力影响系数矩阵,矩阵内元素仅由传感器结构参数决定[11]。

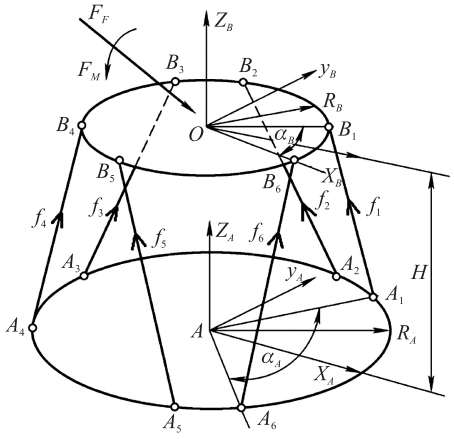

图 1　Stewart 六维力传感器结构示意图

1.2　标定原理

由于 $\boldsymbol{G}$ 矩阵只与并联机构的结构参数有关,因此,当完成了传感器的优化设计工作之后,即可求取转换矩阵 $\boldsymbol{G}$[11],进一步只需要通过应变效应或单维拉压力传感器测得外力作用下六条支路相应的输出 $\boldsymbol{f}$,便可通过式(1)完成外力的解算。但是由于 I、II 类误差的存在,此时传感器的实际测量精度根本无法达到使用要求。因此为了提高传感器的实际测量精度,一般选择对传感器进行静态标定。所谓静态标定,是将 Stewart 力传感器视为标准线性系统的前提下进行的:通过对传感器各维依次加载已知大小的标定载荷 F_1,识别并采集对应的六路输出 f_1,通过拟合等方法找到与理论输入曲线最接近的标定矩阵 C。标定矩阵精度越高,该传感器测量精度也越高[12-14]。用数学公式表达如下:

$$\boldsymbol{F}_1=\boldsymbol{C}\cdot(\boldsymbol{f}_c-\boldsymbol{B}) \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{C}$ 为所求标定矩阵;$\boldsymbol{B}$ 为本底输出矩阵;$\boldsymbol{f}_c$ 为标定实验中测得的轴向力;由于 $\boldsymbol{C}$ 矩阵一般为非奇异矩阵,不能直接求逆,因此需要利用伪逆矩阵来求解。令 $\boldsymbol{A}=(\boldsymbol{f}_c-\boldsymbol{B})$,求解公式为:

$$\boldsymbol{C}=\boldsymbol{F}_1\cdot\boldsymbol{A}^- \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{A}^-=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{A}\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}})^{-1}$ 为矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的伪逆矩阵[15]。

由式(3)可知,标定载荷 $\boldsymbol{F}_1$ 的精度将直接影响到矩阵 $\boldsymbol{C}$ 的精度[16],从而进一步影响到传感器的实际测量精度。在实际的标定实验中,标定装置除本身精度需要满足要求外,必须能提供 12 个方向的加力功能。因此对于传感器而言,往往需要制造与之配套的标定加载装置。例如特制的加载平台或龙门加载架以实现高精度的标定载荷的加载,但是此类设备大多体型庞大,造价高,制造周期长。基于此,本文提出一种基于标定杆的标定方案,在满足了中小量程六维力传感器加载精度要求的同时有效解决了上述问题。

具体加载方式如图 3 所示,将标定杆 1 通过固定螺纹 3 与传感器上平台固定,便可通过在相应刻度处悬挂相应重量的高精度砝码 2 实现传感器三个方向力矩的加载。更具体地说:F_x 和 F_y 分量的加载方式如图 2 左所示;F_z 分量的加载方式如图 2 右所示;M_x 和 M_y 分量的加载方式如图 3 上所示;M_z 分量的加载方式如图 3 下所示;坐标信息以图内标注为准。

通过上述方法可实现 F_1 的加载,进一步只需要测得 f_c 便可反求标定矩阵 $\boldsymbol{C}$[17-18]。本标定方案在

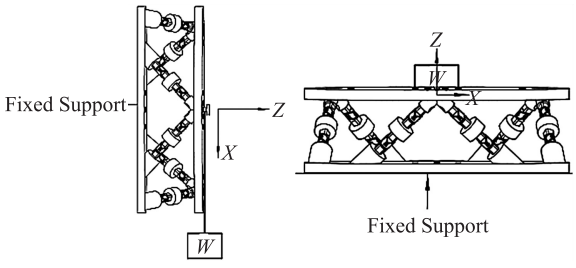

图 2　力加载方式示意图

原理上是可行的。下一部分将对笔者自制 Stewart 六维力传感器进行标定仿真实验,通过比较标定前后传感器的 I、II 类误差,验证该标定方案的可行性。

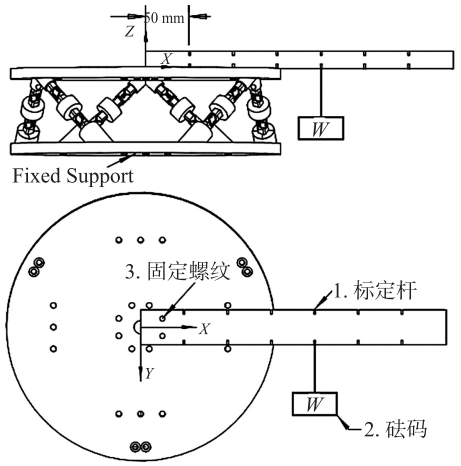

图 3 力矩加载方式示意图

2 静态标定仿真实验

2.1 传感器有限元模型建立

笔者自制的 Stewart 型六维力传感器(图 4)的结构参数如表 1 所示。

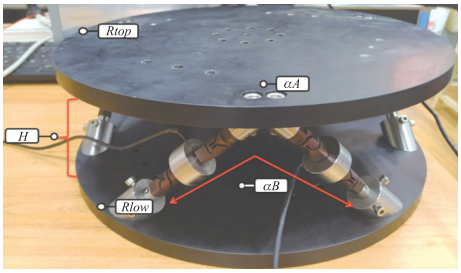

图 4 笔者自制 Stewart 六维力/力矩传感器

表 1 Stewart 平台尺寸参数

	尺寸参数
上平台半径 R_{top}	138.1 mm
下平台半径 R_{low}	138.1 mm
上平台定位角 α_A	5°
下平台定位叫 α_B	75°
上下平台垂直高度 H	74 mm

基于表 1 所示参数建立传感器的 3D 模型并导入仿真软件 ANSYS。在仿真之前设置传感器各零部件的材料属性(密度、泊松比、杨氏模量),完成网格划分。如图 5 所示。

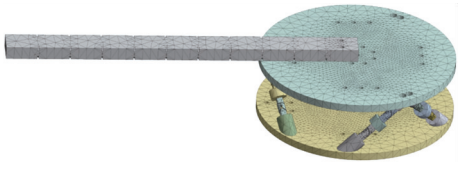

图 5 传感器有限元模型

2.2 传感器原始测量精度仿真分析结果

基于表 1 可计算出传感器的原始转换矩阵 G[19]。对传感器各分量完成从小到大的单维力/力矩加载,记录相应输出,基于 G 矩阵完成输入力的解算。通过误差计算式(4)计算传感器未经标定前的原始解算精度。仿真结果列于表 2,其中对角线元素为 I 类误差,其余元素为 II 类误差

$$E=\frac{\max|F_s-F'_s|}{\max|F_s|} \tag{4}$$

式中:F_s 为加载力/力矩值,F'_s为解算力/力矩值。

表 2 传感器原始测量精度

加载方向	解算方向					
	F_x/%	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	0.288	0.42	0.14	0.10	0.07	0.97
F_y	0.220	0.15	1.98	0.10	0.12	0.12
F_z	5.620	5.62	5.62	5.68	5.67	5.62
M_x	0.090	8.95	0.14	0.26	0.11	0.13
M_y	8.990	0	0.03	0.07	0.28	2.32
M_z	0.460	0.01	0.03	0.07	0.51	0.12

由表 2 可知,由于加工精度和装配误差的存在,传感器在未经标定前无法实现外部力的高精度解算,I、II 类误差均较大。其中 I 类最大达到 5.62%(F_z),II 类误差最大达到了 8.99%(F_x-M_y)。因此为进一步提高传感器的实际测量精度,同时验证本文所提出方案的可行性,对传感器进行标定仿真实验。

2.3 基于标定杆的标定仿真实验

传感器的标定仿真实验采用各分量单独标定的标定方法,具体标定步骤如下[20]:

①首先按图 2 所示加载方式对 F_x 分量进行加载,在 F_x 全量程范围内选择 5 个~8 个加载点,包括零点和满量程点,沿+F_x 方向加载,将载荷按加载点从零点逐步增加到满量程点,记录对应的轴向拉压力输出;然后沿-F_x 方向加载,依旧是将载荷按加载点从零点逐步增加到满量程点,记录对应的轴向拉压力输出。

②按上述步骤完成其他分量的加载和记录。

③将输入数据和输出数据分别整理成输入矩阵和输出矩阵,导入 MATLAB 求取标定矩阵。

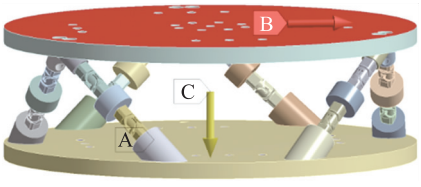

图 6 F_x 加载前处理阶段载荷/约束示意图

基于 ANSYS 的标定仿真实验分为前处理阶段和后处理阶段。其中前处理阶段负责添加约束和载荷,后处理阶段负责求解六路轴向拉压力的输出。以 F_x 分量为例说明前后处理阶段所完成的工作。前处理阶段所添加的约束和载荷包括:①下表面固定约束;②+F_x 方向载荷;③标准重力,方向与实际重力方向相同。

后处理阶段通过 Force Probe 求取六路轴向拉压力输出,定义拉力为正,压力为负。

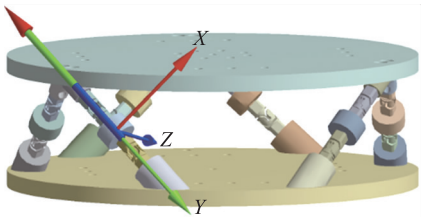

图 7　F_x 分量后处理阶段示意图

值得注意的是,通过前处理阶段约束和标准重力方向的改变,可仿真实际标定实验中各分量的加载方式(如图 2 所示)。按上述步骤完成六个分量的全部仿真加载,数据记录,检查,汇总工作,最终将输入输出矩阵导入 MATLAB,通过 MATLAB 的 $C=F*\mathrm{pinv}(f)$ 指令完成标定矩阵的计算。

完成标定矩阵的求取后,分别沿 X、Y、Z 轴从零点到满量程点选 3 个~5 个点加载力/力矩并记录拉压力输出,基于刚求得的标定矩阵求得相应的解算力。基于误差计算式(式(4))计算传感器标定后的 I,II 类误差,结果列于表 3。显然,标定后显著提高了传感器的测量精度:I 类误差降至 0.248%、II 类误差降至 2.794%。

表 3　标定后传感器测量精度

解算方向	加载方向					
	F_x/%	F_y/%	F_z/%	M_x/%	M_y/%	M_z/%
F_x	0.160	0.001	0.012	0.011	0.050	0.016
F_y	0.001	0.131	0.004	0016	0.004	0.019
F_z	0.160	0.018	0.224	0.020	0.039	0.023
M_x	0.008	2.794	0.008	0.248	0.038	0.008
M_y	0.800	0.003	0.001	0.08	0.072	0.024
M_z	0.005	0.001	0.005	0.002	0.027	0.009

3　结论

基于文章提出的一种标定方案,结合笔者自制 Stewart 六维力传感器,完成了传感器的标定仿真实验,实验结果表明,该标定方案可有效降低六维力传感器的 I、II 类误差:I 类误差由 5.62%降至 0.248%;II 类误差由 8.99%降至 2.794%。对 Stewart 六维力传感器的标定实验具有一定的指导意义和参考价值。

参考文献:

[1] 高波,王晨,屈文轩,等. 基于局部去耦的重载 Stewart 六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.

[2] Yao J,Hou Y,Wang H,et al. Spatially Isotropic Configuration of Stewart Platform-Based Force Sensor[J]. Mechanism & Machine Theory,2011,46(2):142-155.

[3] Friedrich C,Kauschinger B,Ihlenfeldt S. Spatial Force Measurement Using a Rigid Hexapod-Based End-Effector with Structure-Integrated Force Sensors in a Hexapod Machine Tool[J]. Measurement,2019(145):350-360.

[4] 安巧联. 并联结构六维力与力矩传感器的标定原理与关键技术研究[D]. 河北:燕山大学,2006.

[5] Waston P C,Drake S H. Pedestal and Wrist Force Sensors for Automatic Assembly[C]//Proc of the 5th Int.Symp on Industrial Robots. Chicago:1975. 501-511.

[6] 熊雅晴,虞伟建. 一种新型自解耦六维力/力矩传感器结构设计与优化[J]. 传感器与微系统,2015,34(11):106-108,115.

[7] Jean-Pierre Merlet. Parallel Robots[M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers,2002.

[8] Gaillet A,Reboulet C. An Isostatic Six Component Force and Torque Sensor[C]//Proc of the 13th International Symposium on Industrial Robotics. Chicago, USA: Robotics International of SME, 1983: 102-111.

[9] 刘晓宇,盖广洪. Stewart 六维力传感器解耦算法优化[J]. 传感技术学报,2018,31(12):1858-1861,1868.

[10] Yao J,Hou Y,Chen J,et al. Theoretical Analysis and Experiment Research of a Statically Indeterminate Pre-Stressed Six-Axis Force Sensor[J]. Sensors & Actuators A Physical,2009,150(1):1-11.

[11] 姚建涛,侯雨雷,毛海峡,等. Stewart 结构六维力传感器各向同性的解析分析与优化设计[J]. 机械工程学报,2009,45(12):22-28.

[12] 李军,聂红,熊琪,等. 一种新型的六维力传感器静态标定系统设计研究[J]. 机械设计与制造,2016(5):68-70,74.

[13] Uchiyama M,Bayo E,Palma-Villalon E. A Systematic Design Procedure to Minimize a Performance Index for Robot Force Sensors [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control,1991,113(3):388-394.

[14] 陈雄标,袁哲俊,姚英学. 机器人用六维腕力传感器标定研究[J]. 机器人,1997(1):8-13.

[15] 茅晨,宋爱国,高翔,等. 六维力/力矩传感器静态解耦算法的研究与应用[J]. 传感技术学报,2015,28(2):205-210.

[16] 李军,聂红,熊琪,等. 一种新型的六维力传感器静态标定系统设计研究[J]. 机械设计与制造,2016(5):68-70,74.

[17] Hou Y,Zeng D,Yao J,et al. Optimal Design of a Hyperstatic Stewart Platform-Based Force/Torque Sensor with Genetic Algorithms [J]. Mechatronics,2009,19(2):199-204.

[18] Wang Z,Li Z,He J,et al. Optimal Design and Experiment Research of a Fully Pre-Stressed Six-Axis Force/Torque Sensor[J]. Measurement,2013,46(6):2013-2021.

[19] Dwarakanath T A, Bhaumick T K, Venkatesh D. Implementation of Stewart Platform Based Force-Torque Sensor[C]//Proc of the 1999 IEEE International Conference on Multisensor Fusion & Integration for Intelligent Systems. Taiwan: 1999. 32-37.

[20] Wang, Hang, Yao, et al. Task-Oriented Design Method and Research on Force Compliant Experiment of Six-Axis Wrist Force Sensor[J]. Mechatronics the Science of Intelligent Machines, 2016(35): 109-121.

张 韬(1996—),男,山西吕梁人,南京航空航天大学自动化学院研究生,主要研究多维力传感器的优化设计和标定,15911636090@163.com;

杨德华(1973—),男,教授,硕士生导师。主要研究方向为并联机构的精密驱动与设计,dhyang@nuaa.edu.cn。