

用于旋翼试验台的双通道六分量天平设计

赵子甲,王卫英

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:为满足旋翼试验台主轴上六分量力/力矩的高精度测量需求,设计一种可输出两组载荷的双通道六分量天平,该天平具有8个测力分支共16个拉压力传感器,可同时测量6个力/力矩分量,且各载荷分量具有2个测量通道。在ABAQUS软件中利用有限元仿真技术分析了对天平进行单分量满量程加载时传感器弹性体的应变情况,天平具有较高的测量灵敏度。基于最小二乘法原理对天平标定数据进行线性解耦,解耦后天平的I类误差小于1.32%,II类误差小于2.35%,满足旋翼试验台所用六分量天平的使用需求。

关键词:旋翼试验台;双通道六分量天平;天平标定;最小二乘法解耦

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0037-04

Design of Dual - channel Six - component Balance for Rotor Test Bed

ZHAO Zijia, WANG Weiyang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to meet the needs of high-precision measurement of six-component force / torque on the spindle of the rotor test bed, a dual-channel six-component balance outputting two sets of loads is designed. The balance has 8 force-measuring branches with 16 tension and pressure sensors with the capability of measuring six force/torque components simultaneously, and each component has two measuring channels. With ABAQUS software, the finite element simulation technology is applied to analyze the strain of the sensor elastomer when the balance is loaded with single component, indicating that the balance has high sensitivity. By the least square method, the calibration data of the balance are linearly decoupled, which shows that the type I error of the balance is less than 1.32 % and the type II error less than 2.35 %, meeting the application requirements of the six-component balance used in the rotor test bed.

Keywords: rotor test bed; dual-channel six-component balance; balance calibration; least square method decoupling

0 引言

旋翼试验台是验证直升机旋翼系统综合性能的专用试验装置,利用旋翼试验台可在地面模拟旋翼系统的运行状态,测试旋翼系统综合力学性能、旋翼动特性与耐久性等。在进行旋翼系统综合力学性能试验时,需要利用多维力/力矩测量装置获取旋翼系统承受的气动载荷。六分量天平是针对多维力/力矩进行测量的装置,在旋翼系统综合力学性能试验中应用广泛,利用六分量天平可以测量旋翼系统的推力、升力、侧向力、偏航力矩、俯仰力矩和翻滚力矩,其性能直接关系到试验数据的准确性。

国内外众多科研机构及高校针对不同类型的六分量天平进行了深入研究^[1-5]。通过综合分析,发现目前已投入使用的天平通常只能输出单通道的六分量载荷,没有考虑天平的失效保护措施,测量过程中难以发现天平的异常测量值,且天平长时间使用的可靠性与稳定性较低。

为提高天平的测量精度与可靠性,设计一种可实现双通道载荷输出的六分量天平,两组六分量载荷相互对照,便于发现异常测量值,提高天平载荷测量精度。当部分测量组件失效时,天平仍能够正常使用,可保证其工作的稳

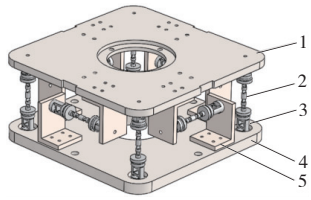
定性 & 可靠性。

1 天平结构设计

旋翼试验台主轴上的载荷根据载荷类型可分为集中力与力矩,六分量天平能够将试验台主轴上的集中力分解为3个相互正交的分力,记为 F_x 、 F_y 、 F_z ;将力矩分解为3个相互正交的分力矩,记为 M_x 、 M_y 、 M_z ,力与力矩的方向符合右手法则。根据小型旋翼试验台的功能需求,确定天平各载荷分量的量程为: $F_x = \pm 200 \text{ N}$ 、 $F_y = \pm 200 \text{ N}$ 、 $F_z = \pm 400 \text{ N}$ 、 $M_x = \pm 30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $M_y = \pm 30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $M_z = \pm 30 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

双通道六分量天平结构如图1所示,天平外形尺寸为长200 mm,宽200 mm,高94 mm,主要部件包括固定框、浮动框、L型支座与8个测力分支。天平在竖直方向和水平方向各布置4个测力分支,其中竖直方向的4个测力分支上端与浮动框相连,下端与固定框相连;水平方向的测量分支通过其两端的L型支座与浮动框、固定框相连。各测力分支通过弹性连杆传递载荷,弹性连杆两端的十字铰链结构可提供径向自由度,保证其主要传递沿轴向的拉压力载荷。浮动框与固定框中心开孔,旋翼试验台主轴从中心孔穿过,主轴上的载荷经浮动框传递

到各测力分支上。



1—浮动框;2—弹性连杆;3—拉压力传感器;
4—固定框;5—L型支座。

图1 双通道六分量天平结构

天平的测力分支由拉压力传感器和弹性连杆组成,其结构如图2所示。为防止拉压力传感器应变片粘贴不牢、数据采集系统线路故障等因素导致整个天平失效,天平采用双通道式结构,亦即天平设置有两组传感器,分别记为A组传感器和B组传感器。每个测力分支的两端各布置一个拉压力传感器,其中一个传感器编入A组,另一个编入B组,天平内部共布置了16个拉压力传感器。同一测力分支上的两个拉压力传感器结构相同,弹性体布置方向相互垂直。正常情况下天平可输出两组六分量载荷,测量过程中两组传感器的数据可以相互对照,便于发现异常的测量数据,提高天平的测量精度;当测力分支上的一个拉压力传感器失效,另一个传感器可以正常进行测量,保证天平长期使用的可靠性与稳定性。

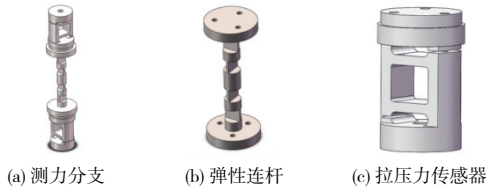


图2 测力分支组成与结构

双通道六分量天平采用的拉压力传感器的弹性体材料为马氏体时效钢 00Ni18Co8Mo5TiAl,其弹性模量 $E = 187 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,屈服极限 $\sigma_s = 1\ 754 \text{ MPa}$ 。弹性体为平行梁式结构,4个金属箔式应变片粘贴在弹性体上下横梁上,用于检测横梁在应变片粘贴处的平均应变。4个应变片组成惠斯通电桥全桥电路,通过对电桥施加激励电压 U_0 ,将传感器的输出应变转换为电桥的输出电压 U_{out} 。拉压力传感器测力原理如图3所示。

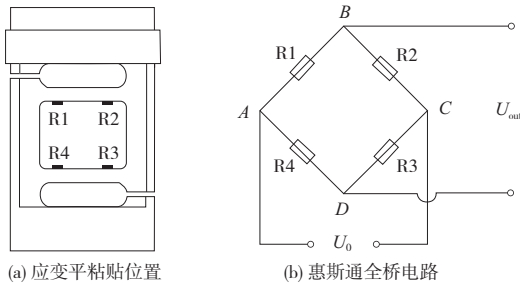
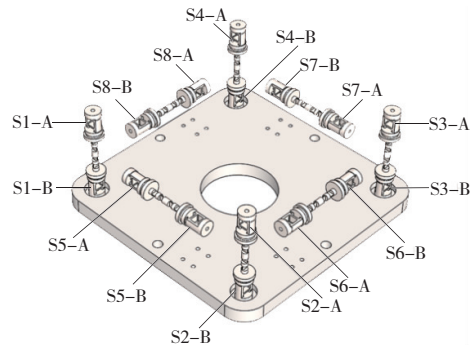


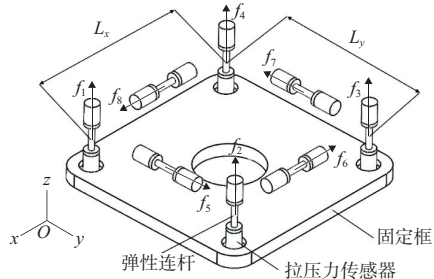
图3 拉压力传感器测力原理

双通道六分量天平传感器及测力分支编号如图4所示。各测力分支两端的传感器用于测量其承受的拉压力

载荷,记为 $f_i (i=1,2,\dots,8)$,其中沿 z 向的4个测力分支受到的拉压力载荷为 f_1, f_2, f_3, f_4 ;沿 x 向2个测力分支受到的拉压力载荷为 f_5, f_7 ;沿 y 向2个测力分支受到的拉压力载荷为 f_6, f_8 。 F_x, F_y, F_z 由载荷所在方向的拉压力传感器的测量值叠加得到。当载荷分量 M_z 为正时, f_6, f_8 为拉力, f_5, f_7 为压力;当 M_z 分量为负时, f_6, f_8 为压力, f_5, f_7 为拉力。当载荷分量 M_x 为正时, f_1, f_4 为压力, f_2, f_3 为拉力;当 M_x 为负时, f_1, f_4 为拉力, f_2, f_3 为压力,载荷分量 M_y 与 M_x 测量原理相同。力矩大小根据其对应的测力分支形成的力偶及力偶臂确定。测力分支 f_1 与 f_4, f_2 与 f_3, f_5 与 f_7 的距离相等,均为 L_x ;测力分支 f_1 与 f_2, f_3 与 f_4, f_6 与 f_8 的距离相等,均为 L_y 。根据天平六分量载荷与各测力分支所承载荷的关系,确定天平六分量载荷输出矩阵如式(1)所示。



(a) 传感器编号



(b) 测力分支编号

图4 天平传感器及测力分支编号

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{L_y}{2} & \frac{L_y}{2} & \frac{L_y}{2} & -\frac{L_y}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{L_x}{2} & -\frac{L_x}{2} & \frac{L_x}{2} & \frac{L_x}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{L_x}{2} & -\frac{L_y}{2} & \frac{L_x}{2} & -\frac{L_y}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ f_6 \\ f_7 \\ f_8 \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 天平弹性体应变分析

为提高双通道六分量天平载荷测量的灵敏度,在满足结构强度要求的前提下,需保证拉压力传感器应变片粘贴处具有较大的应变。根据天平的六分量载荷输出矩阵,可计算出给定载荷下各拉压力传感器承受的载荷大小,通过解析计算可得到各传感器应变片粘贴处的平均应变 $\varepsilon_{R1}, \varepsilon_{R2}, \varepsilon_{R3}, \varepsilon_{R4}$ 。各拉压力传感器的输出应变 $\varepsilon_{f_i}^A$ 与 $\varepsilon_{f_i}^B (i=1,$

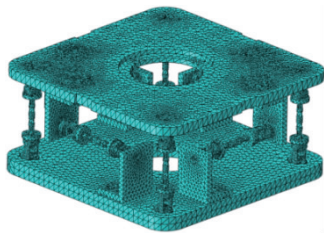
2, ..., 8; ε_{fi}^A 为 A 组传感器输出应变; ε_{fi}^B 为 B 组传感器输出应变) 的计算方法如式(2)所示。对双通道六分量天平施加载荷时, 依据天平六分量载荷输出矩阵与各传感器的输出应变, 可以计算出天平在载荷 F (F 为广义力, 包括 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z) 作用下各分量的输出应变如式(3)所示, 其中 ε_{fi} 为 ε_{fi}^A 与 ε_{fi}^B 的平均值。

$$\varepsilon_{fi}^A = \varepsilon_{fi}^B = \frac{\varepsilon_{R1} - \varepsilon_{R2} + \varepsilon_{R3} - \varepsilon_{R4}}{4} \quad (2)$$

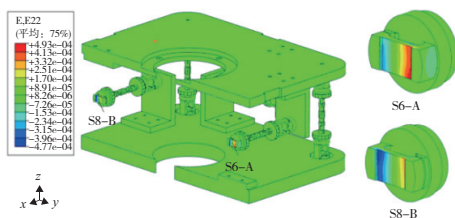
$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{M_x} \\ \varepsilon_{M_y} \\ \varepsilon_{M_z} \end{bmatrix} = \begin{cases} \varepsilon_{j6} - \varepsilon_{j8} \\ \varepsilon_{j5} - \varepsilon_{j7} \\ \varepsilon_{j1} + \varepsilon_{j2} + \varepsilon_{j3} + \varepsilon_{j4} \\ \varepsilon_{j2} + \varepsilon_{j3} - \varepsilon_{j1} - \varepsilon_{j4} \\ \varepsilon_{j3} + \varepsilon_{j4} - \varepsilon_{j1} - \varepsilon_{j2} \\ \varepsilon_{j5} + \varepsilon_{j7} - \varepsilon_{j6} - \varepsilon_{j8} \end{cases} \quad (3)$$

为分析天平整体应变分布情况及拉压力传感器的输出应变, 利用有限元仿真技术对天平单分量满量程加载状态进行仿真。建立双通道六分量天平的装配模型, 并将其导入 ABAQUS 软件中进行有限元分析。为模拟天平的实际工作状态, 约束天平固定框底面的 6 个自由度, 在天平测量中心点(0, 0, 47) 建立参考点 RP1, 参考点 RP1 与浮动框中心孔面建立耦合约束, 根据天平量程在 RP1 上依次施加单分量满量程载荷。天平浮动框与固定框材料为 45 钢, L 型支座与弹性连杆材料为 0Cr17Ni4Cu4Nb。采用四面体线性单元 C3D4 对天平进行网格划分, 浮动框与固定框网格尺寸为 6 mm, L 型支座网格尺寸为 4 mm, 弹性连杆网格尺寸为 2 mm, 拉压力传感器网格尺寸为 0.5 mm, 天平模型节点数为 541 393, 单元数为 335 330, 网格划分结果如图 5(a) 所示。在载荷分量 F_x 、 F_z 、 M_z 作用下, 天平及弹性体的应变情况如图 5(b)~图 5(d) 所示。

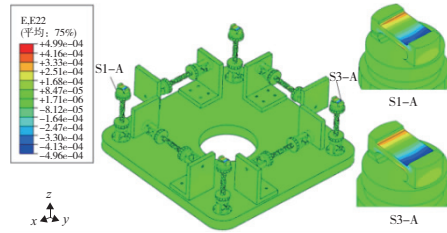
利用式(2)与式(3)计算天平在单分量满量程加载时的输出应变。在集中力 F_x 、 F_y 、 F_z 满量程作用下, 天平的输出应变依次为 443.3 $\mu\varepsilon$ 、438 $\mu\varepsilon$ 、883.3 $\mu\varepsilon$; 在力矩 M_x 、 M_y 、 M_z 满量程作用下, 天平的输出应变依次为 828.3 $\mu\varepsilon$ 、823.1 $\mu\varepsilon$ 、830.0 $\mu\varepsilon$ 。根据有限元仿真结果可知, 双通道六分量天平在单分量满量程载荷作用下, 天平有较大的输出应变, 测量灵敏度符合使用要求。



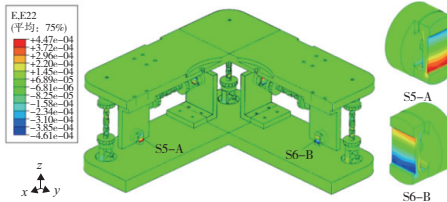
(a) 天平网格划分结果



(b) 天平及传感器弹性体应变云图($F_x=200$ N)



(c) 天平及传感器弹性体应变云图($F_z=400$ N)



(d) 天平及传感器弹性体应变云图($M_z=30$ N·m)

图 5 天平及弹性体应变分布

3 天平标定与解耦

双通道六分量天平各零部件分别加工, 最终装配在一起使用, 天平实物如图 6 所示。利用天平进行旋翼试验台主轴载荷测量前, 需要对天平进行标定。双通道六分量天平的标定实验采用地轴系标定装置, 载荷施加方法为单元加载法, 利用砝码作为力源, 对天平依次施加单分量载荷, 记录各载荷分量的标定数据。双通道六分量天平共输出 16 路电压信号, 天平配备的数据采集系统利用 OP07 芯片对多路电压进行信号放大, 滤波后采用 AD7606 芯片进行 AD 转换, 将电压模拟信号转变为数字信号并发送至计算机, 计算机端采用 LabView 软件实现电压信号采集、电压-力/力矩转换、双通道六分量载荷显示与记录等功能。

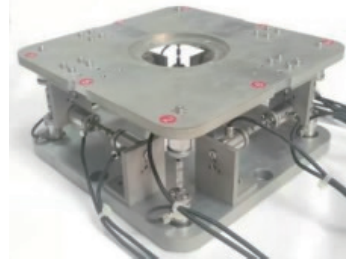


图 6 双通道六分量天平实物

双通道六分量天平标定实验采用 I 类误差与 II 类误差对天平性能进行量化。I 类误差反映实测载荷与标定载荷的偏离程度, 也可称为主方向的非线性误差。天平载荷分量 i ($i=1, 2, \dots, 6$) 的 I_e (I 类误差) 可以表示为

$$I_e = \frac{|F_i - F_{ci}|_{\max}}{|F_{i,FS}|} \times 100\% \quad (4)$$

式中: F_i 为载荷分量 i 实测值; F_{ci} 为载荷分量 i 标定值; $F_{i,FS}$ 为载荷分量 i 的量程。

II 类误差反映天平在受到单分量载荷作用时其余分量的干扰程度, 也称为耦合误差。对天平载荷分量 j 施加载荷时, 载荷分量 i 的 II_e (II 类误差) 可以表示为

$$\Pi_e = \frac{|F_{j,\max}|}{|F_{i,FS}|} \times 100\% \quad (5)$$

式中 $F_{j,\max}$ ($i, j=1, 2, \dots, 6; j \neq i$) 为天平受到载荷分量 j 作用时, 载荷分量 i 输出力/力矩最大值。

根据标定数据计算天平各载荷分量的测量误差, 结果如表 1 所示。计算天平测量误差时, 各载荷分量实测值为 A、B 两组传感器所测六分量载荷的平均值。由表 1 可知双通道六分量天平的 I 类误差小于 2.13%, II 类误差小于 2.96%。天平标定实验的误差来源主要包括天平加工装配误差、应变片粘贴误差、数据采集系统误差、标定载荷加载误差等。在进行天平标定实验时上述误差难以完全消除, 需要对标定数据进一步处理来降低天平的测量误差。

表 1 双通道六分量天平测量误差 单位:%

(力/力矩)/ (N/N·m)	测量误差					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	2.13	0.45	2.00	0.82	2.66	2.18
F_y	0.58	1.34	1.51	1.42	1.67	1.70
F_z	1.99	1.05	0.64	2.60	2.39	1.67
M_x	1.67	1.64	0.77	0.40	2.73	2.96
M_y	0.95	1.05	0.63	2.61	0.41	2.73
M_z	1.08	0.62	1.16	1.87	2.62	0.63

理想的六分量天平各载荷分量的测量值仅取决于该载荷分量上施加的力/力矩, 然而由于耦合误差的存在, 天平在受到单分量载荷作用时会对其其他载荷分量的输出信号产生影响。为提高天平的测量精度, 可根据天平的标定数据进行解耦计算从而降低耦合误差。天平标定数据解耦是一个非线性问题, 但通过变换可按线性问题来处理。对双通道六分量天平标定数据进行线性解耦时, 可根据最小二乘法原理求解天平的解耦矩阵, 进而对各载荷分量的测量值进行修正。

在进行双通道六分量天平标定实验时, 基于 LabView 的数据采集软件能够实现电压-力/力矩转换, 并记录各载荷分量的标定载荷值与实测载荷值, 标定完成后可得到天平的标定载荷矩阵与实测载荷矩阵。天平标定载荷矩阵与实测载荷矩阵的关系为 $G=C \cdot F$ (G 为 $6 \times n$ 标定载荷矩阵; F 为 $6 \times n$ 实测载荷矩阵; C 为 6×6 解耦矩阵; n 为标定实验次数, $n > 6$)。 F 为列满秩矩阵, 其广义逆矩阵 $F^+ = F^T (FF^T)^{-1}$ 。因此可知天平的解耦矩阵 $C = GF^+$ (GF^+)⁻¹。

为减少标定实验中随机误差和非线性的影响, 天平标定实验次数要远大于天平维数。根据多次标定实验记录的数据, 在 MATLAB 软件中导入矩阵 G 与矩阵 F , 计算得到双通道六分量天平的解耦矩阵 C 为

$$C = \begin{bmatrix} 1.004 & 0.035 & 0.089 & -0.058 & 0.012 & 0.042 \\ 0.033 & 0.997 & -0.006 & -0.106 & -0.047 & -0.074 \\ -0.010 & 0.063 & 1.010 & -0.042 & 0.005 & -0.023 \\ 0.055 & 0.007 & 0.035 & 0.994 & -0.016 & -0.070 \\ -0.003 & -0.020 & -0.008 & -0.023 & 0.989 & -0.058 \\ 0.026 & -0.019 & 0.012 & -0.011 & 0.016 & 0.988 \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据 C, F 计算各载荷分量的解耦后的输出值。解耦后天平各载荷分量的 I 类误差与 II 类误差如表 2 所示。采用最小二乘法解耦后, 天平的 I 类误差小于 1.32%, II 类误差小于 2.35%。根据最小二乘法原理对标定数据进行解耦可有效降低天平的测量误差, 解耦矩阵 C 可用于双通道六分量天平实际测量过程。

表 2 最小二乘法解耦后天平测量误差

(力/力矩)/ (N/N·m)	测量误差					
	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
F_x	1.32	0.22	1.82	0.52	1.38	0.69
F_y	0.53	1.19	1.24	0.98	0.98	0.69
F_z	0.72	0.92	0.51	0.68	1.87	0.82
M_x	0.81	0.94	0.52	0.41	0.55	2.35
M_y	0.76	0.52	0.59	1.24	0.28	2.17
M_z	0.64	0.58	0.53	1.03	1.56	0.35

在求解解耦矩阵 C 时, 实测载荷矩阵 F 中各载荷分量为 A 组与 B 组传感器实测载荷的平均值。为进一步提高双通道六分量天平的测量精度, 可根据 A 组传感器与 B 组传感器的标定数据分别计算解耦矩阵 C_A 与 C_B , 根据解耦后 A 组传感器与 B 组传感器六分量载荷测量精度, 对两组传感器各载荷分量输出值加权处理得到六分量载荷。

4 结语

双通道六分量天平可同时输出两组六分量载荷, 在进行旋翼试验台主轴载荷测量时, 两组载荷值相互对照, 便于发现异常测量数据, 提高天平载荷测量精度与可靠性。利用有限元仿真技术对天平性能进行评估, 在单分量满量程载荷作用下天平具有较大的输出应变, 天平测量灵敏度性能符合旋翼试验台使用要求。根据最小二乘法原理对天平标定数据进行解耦计算, 可有效降低天平的 I 类误差与 II 类误差, 提高天平的测量精度。

参考文献:

- [1] KIM D, LEE C H, KIM B C, et al. Six-axis capacitive force/torque sensor based on dielectric elastomer [C]//Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2013. Washington: International Society for Optics and Photonics, 2013, 8687: 688-696.
- [2] KIM U, LEE D H, KIM Y B, et al. A novel six-axis force/torque sensor for robotic applications [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(3): 1381-1391.
- [3] 于常安, 王罗, 何显中, 等. 航空矢量喷管测试平台用六分量盒式天平结构设计 [J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 23-30.
- [4] 任宗金, 张亚娟, 张军, 等. 大长径比模型多维气动力测量天平设计 [J]. 传感器与微系统, 2019, 38(2): 56-58.
- [5] MIRZAMOAMADI S, SHEIKHI M M, KARAFI M R, et al. Novel contactless hybrid static magnetostrictive force-torque (CHSMFT) sensor using galferol [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 553: 168969.

收稿日期: 2022-02-18