压电式推力矢量测试系统传感器设计

李 峥[1],任宗金[1],林 山[2],李新阳[1],张 军[1],张 巍[2]
(1.大连理工大学 机械工程学院,辽宁大连 116024; 2.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:为实现新一代发动机对于高动态推力矢量的测试需求,基于6组件的多分量卧式推力矢量测试系统,提出压电3向力传感器的矢量推力测试方法,设计3向压电传感器、刚性连接结构以及测试系统。采用理论建模与仿真计算相结合的方式分析压电式推力矢量测试系统的力传递规律,得到每个传感器3个方向的力传递系数,从理论上验证了方案的可行性。通过仿真计算对传感器位置极限受力进行分析,基于分析结果设计了压电传感器量程及尺寸。开发了压电传感器并进行了静态标定、动态标定及刚度测量试验,结果表明:各传感器3个方向线性误差及重复性误差均在1%以内,3向固有频率高达8701.1、8789.06、8457.03 Hz, 3向刚度分别为709.9、718.1、1538.4 kN/mm。传感器动静态特性好、刚度高,满足了动态推力矢量的测试需求。

关键词:推力矢量测试;压电传感器;标定;压电式测试系统;航空发动机
中图分类号:V263.4+7 **文献标识码:**A doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.06.022

Design of Piezoelectric Sensor-Based Vectored Thrust Measurement System

LI Zheng[1], REN Zong-jin[1], LIN Shan[2], LI Xin-yang[1], ZHANG Jun[1], ZHANG Wei[2]
(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: To meet the testing requirements of dynamic vectored thrust measurement in next-generation engines, a vectored thrust measurement method using piezoelectric triaxial load cells was proposed based on a six-component multi-axis vectored thrust measurement system mounted in an underslung (floor-mounted)thrust stand. Triaxial piezoelectric sensors, rigid connection structures, and the measurement system were designed. The force transmission characteristics of the piezoelectric vectored thrust measurement system were analyzed through theoretical modeling and simulation, obtaining force transmission coefficients for each sensor in three directions, theoretically verifying the feasibility of the solution. The extreme loads at sensor positions were analyzed by simulation, and the ranges and dimensions of the piezoelectric sensors were designed based on the analysis results. Piezoelectric sensors were developed and subjected to tests including static calibration, dynamic calibration, and stiffness measurement. The results show that linearity errors and repeatability errors in all three directions of each sensor are within 1%. In three directions, the natural frequencies reach 8701.1, 8789.06, and 8457.03 Hz, respectively, and the stiffness values are 709.9, 718.1 and 1538.4 kN/mm, respectively. The sensors exhibit excellent dynamic/static characteristics, as well as high stiffness, meeting the requirements for dynamic vectored thrust measurement.

Key words: vectored thrust measurement; piezoelectric sensor; calibration; piezoelectric measurement system; aeroengine

0 引言

推力矢量发动机通过调整喷管方向,改变发动机推力轴线,实现飞行器位姿的精确快速调整[1-3],已成为提升战斗机超机动性、短距起降以及隐身能力的关键技术方向,其跨学科技术整合与工程化应用正在引发航空动力领域的系统性变革。矢量发动机产生的推力参数的精确测量对于发动机性能分析、飞行器动作调整具有重要意义。推力矢量测试系统是测量发动机推力矢量的主要设备[4-6],主要由动架、定架及测力组件3部分组成。其中测力组件由2个挠性连接件及1个单向力传感器串联而成,两端分别与动架、定架连接,能够将被测推力矢量沿X、Y、Z 3向分解[7-8],测力组件刚度差,动态响应能力不足。当前矢量发动机测试系统主要测试对象为静态矢量力,而实际应用中矢量发动机的喷管方向调节速度快,推力矢量中的

收稿日期:2023-11-26 **基金项目:**国家自然科学基金(52075079)资助
作者简介:李峥(1998),男,在读硕士研究生。 **通信作者:**任宗金(1978),男,博士,教授。

引用格式:*李峥,任宗金,林山,等.压电式推力矢量测试系统传感器设计[J].航空发动机,2025,51(6):169-173.LI Zheng, REN Zongjin, LIN Shan, et al.Design of piezoelectric sensor-based vectored thrust measurement system[J].Aeroengine, 2025, 51(6):169-173.*

动态成分频率高，中国应用的高性能传感器和用于动态力测量的测试系统等仍然依赖于进口[9-10]。

近年来，国内外开展了大量关于发动机推力测试系统的研究，主要集中于测试系统结构的设计研发以及误差产生原因等方面。Wright等[11]设计了一种用于实验室的六自由度推力测试台架，整体刚度较小，振动对系统测试精度产生较大影响；张有等[12-13]研究测试系统的误差产生原因，并针对传统推力矢量作用点解算困难的问题提出了解决方案；黄相华等[14]设计了基于脉冲式力源的推力矢量测试系统的校准装置，可实现对推力矢量测试系统的动态现场校准，但仍然受困于测力传感器的动态性能。Daniel等[15]研制出一种卧式六维力固体火箭发动机推力测试台架，采用压电传感器作为主要测量元件，但该台架整体分为2部分，尺寸大，误差较大；于婧等[16-17]设计了基于压电测力仪的固体火箭测试系统，并对测试结果进行了补偿分析，使得误差显著降低。压电传感器具有良好的动态性能[18-19]，且在航天发动机测试领域有广泛应用，但在航空发动机测试领域还未见到[19]。

本文基于6组件布局的卧式多分量推力矢量测试系统，建立采用压电传感器的测试系统。根据理论及仿真分析验证了推力测试系统的可行性并通过试验验证了与测试系统相匹配的压电传感器的性能。

1 推力测量系统模型建立

以6组件布局的卧式多分量推力矢量测试系统为基础进行分析，测试系统输入力$\boldsymbol{F}$与每个传感器输出力$F_i(i = 1\sim6)$关系如图1所示。施力点O受力分解如图2所示。

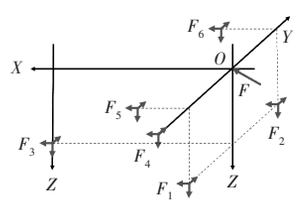


图1 测试系统输入输出关系

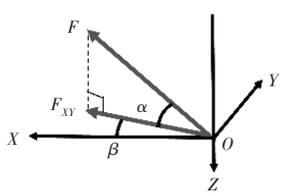


图2 施力点受力分解

应变测试系统的测试方式中各方向单向力传感器的输出之和等于输入矢量力在该方向上的分量。各传感器输出单向力值F_i与输入矢量力$\boldsymbol{F}$，俯仰偏转角α，偏航转角β之间关系为

$$|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\cos\beta = F_5 + F_6 \tag{1}$$

$$|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\sin\beta = F_4 \tag{2}$$

$$|\boldsymbol{F}|\sin\alpha = F_1 + F_2 + F_3 \tag{3}$$

应变测试系统主要依赖挠性件主向刚度大、侧向刚度小的特点，将各测力组件受到的侧向力尽量小、轴向力尽量大，从而使得各单元测力组件受到的力近似为单向力，由应变式单向力传感器进行测量并输出。通过仿真分析，对测试系统施加100 kN偏航角和俯仰角均为25 °的矢量力，进行各传感器输出力与输入力值对比，可获得测试误差，输入与输出值对比见表1。

表1 输入输出值对比

i	F_{ix}/N	F_{iy}/N	F_{iz}/N
1			−2767.6
2			23956.0
3			20713.0
4		40159	
5	41259		
6	47550		
∑	88809	40159	41901.4
输入力值	90631	42262	42262
误差/%	2.01	4.98	0.85

由仿真结果可知，测试系统输出力值与输入力值存在最大误差接近5%。分析误差产生原因为单元测力组件的弹性单元会发生侧向变形，该变形较小，多个弹性单元变形累计下测试系统的动架整体易产生偏斜，从而导致测试系统的轴线发生偏斜，测量结果矢量角度出现误差。由此可知，传统应变测试系统的挠性单元组件的输出结果存在2方面误差：将实际受到的多向力变为单向力；单向力的方向与实际测量方向存在偏差。同时由于测试系统中存在大量挠性件，导致测试系统整体动态响应速度变慢，在动态力测量方面存在缺陷。

为提高测试系统动态性能，应从传感器选择与连接方式两方面进行改进。传感器选择压电3向力传感器。压电传感器的测量原理为压电效应，改变石英晶片的切型能够实现不同方向受力的精确测量，通过多种切型晶片的叠加就能实现3向力的精确测量。压电传感器的刚度极大、动态响应好，符合对于动态推力矢量测量的需求[14]。同时设计用于连接压电传感器的刚性连接结构，从而提高测试系统的整体刚度及测试系统整体的动态性能。传感器通过刚性连接结构直接连接动架及定架两端。

压电式测试系统的各传感器各向输出力值之和等于输入矢量力在该方向上的分量。由此可得出各传感器输出的3向力值F_{ix}、F_{iy}、F_{iz}与输入矢量力$\boldsymbol{F}$,俯仰偏转角α,偏航转角β之间关系

$$|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\cos\beta=\sum_{i=1}^{6}F_{ix} \tag{4}$$

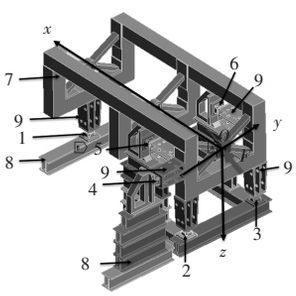
$$|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\sin\beta=\sum_{i=1}^{6}F_{iy} \tag{5}$$

$$|\boldsymbol{F}|\sin\alpha=\sum_{i=1}^{6}F_{iz} \tag{6}$$

使用刚性连接结构的压电式测试系统对于矢量力的测量更加全面,且测试系统整体刚度更大,动态特性更好,理论上能够提高测试系统的性能。为此,需要设计符合测试系统需求的压电3向力传感器。

2　推力测试系统力传递分析

为获得各传感器所需量程,需对整体推力矢量测试系统进行力传递分析。虽然更换为压电式测试系统后,测试系统整体刚度较大,但测试系统动架为非刚体结构,根据理论力学计算各传感器力传递关系并不准确。因此采用仿真分析的方法进行力传递分析。压电式推力矢量测试系统仿真模型如图3所示。



1~6—传感器;7—测试系统动架;8—测试系统定架;9—刚性连接结构。

图3　压电式推力矢量测试系统仿真模型

每个传感器的输出矢量力$\boldsymbol{F}$、力传递系数矩阵A_i与输入矢量力$\boldsymbol{F}$的关系方程为

$$\boldsymbol{F}_i=A_i\cdot\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}a_{ix} & b_{ix} & c_{ix}\\ a_{iy} & b_{iy} & c_{iy}\\ a_{iy} & b_{iy} & c_{iz}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\cos\beta\\ |\boldsymbol{F}|\cos\alpha\sin\beta\\ |\boldsymbol{F}|\sin\alpha\end{bmatrix} \tag{7}$$

对测试系统依次施加俯仰角为0°偏航角为±25°、±20°、±15°、±10°、±5°、0°的100 kN矢量力以及偏航角为0°俯仰角变化的矢量力,导出各传感器处输出力值。通过线性回归分析,确定力传递系数矩阵A_i的具体数值,见表2。

经计算,各传感器力传递系数之和为3×3的单位矩阵

表2　力传递系数矩阵A_i的具体数值

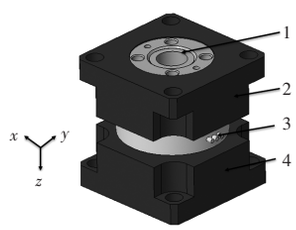
系数	i						
	1	2	3	4	5	6	Σ
a_{ix}	0.0059	0.056	0.024	−0.003	0.438	0.427	1
b_{ix}	−0.006	0.007	0	0.001	−0.062	0.061	0
c_{ix}	−0.020	−0.021	0.007	0.001	0.018	0.018	0
a_{iy}	0.005	−0.006	0.001	0	−0.015	0.016	0
b_{iy}	0.250	0.228	0.006	0.492	0.012	0.013	1
c_{iy}	0.023	−0.012	0	−0.012	0	0	0
a_{iz}	0.024	−0.197	0	0.177	0.024	−0.028	0
b_{iz}	0.146	0.140	−0.014	0	−0.138	−0.134	0
c_{iz}	0.516	0.499	−0.008	−0.001	−0.002	−0.003	1

$$\sum_{i=1}^{6}\boldsymbol{F}_i=\sum_{i=1}^{6}A_i\cdot\boldsymbol{F}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}|\boldsymbol{F}|\cos\alpha\cos\beta\\ |\boldsymbol{F}|\cos\alpha\sin\beta\\ |\boldsymbol{F}|\sin\alpha\end{bmatrix}=\boldsymbol{F} \tag{8}$$

证明该测试系统能够完整还原施加力值,实际试验中的矢量力可使用式(4)~(6)进行测量。

3　压电传感器设计

压电传感器模型如图4所示。从图中可见,压电传感器由预紧螺栓、上板、传感器晶盒以及下板装配而成。根据传感器量程,计算传感器内石英晶片尺寸以及预紧螺栓规格。



1—预紧螺栓;2—传感器上板;3—传感器晶盒;4—传感器下板。

图4　压电传感器模型

将力传递系数代入式(7)中,获得每个位置3向力传感器的受力情况。对测试系统分别施加俯仰、偏航角下100 kN推力矢量,获得各传感器压向量程f_{z+}、拉向量程f_{z-}、侧向量程f_x及f_y,传感器量程需求见表3。从表中可见,6个位置3向力传感器中最大压向量程为45 kN、拉向量程为21 kN、侧向量程为15 kN。

表3　传感器量程需求　　kN

i	f_{z+}	f_{z-}	f_x	f_y
1	35.04	8.575	11.00	6.249
2	33.79	8.364	10.21	5.959
3	1.644		0.2470	0.2827
4	20.82	20.74	7.484	3.415
5	44.20		14.06	1.881
6	43.11		13.66	1.988

以5号传感器为例,设计压电传感器石英晶片尺寸。为保证晶片的频率响应及强度足够大,选取1 mm

厚度的石英晶片。晶组的最大载荷F_l与预紧力F_p可根据经验公式计算[14]

$$F_l = 1.2 \times 45 + 10 \times 15 + 0.3 = 204.3\ \text{kN} \quad (9)$$

$$F_p = 10 \times 15 = 150\ \text{kN} \quad (10)$$

可选择8.8级的M24螺栓作为预紧螺栓，选择石英晶片内径d=28 mm。石英晶片外径D、石英晶片内径d、晶组的最大载荷F_l与石英抗压极限强度σ_p间的关系为

$$\frac{F_l}{\sigma_p} \leqslant \frac{\pi\left(D^2 - d^2\right)}{4} - \frac{\pi D^2}{180}\arccos\left(\frac{D-2}{D}\right) + 2(D-2)\sqrt{D-1} \quad (11)$$

取石英抗压极限强度σ_p=120 MPa，计算得

$$D \geqslant 51.62\ \ mm \quad (12)$$

综上，选取M24的预紧螺栓，石英晶片尺寸为内径24 mm、外径52 mm、厚度1 mm。

将$x0°$、$y0°$石英晶组及传感器壳体组装，如图5所示。

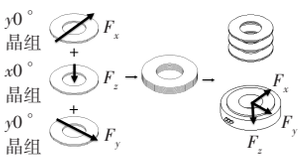


图5 石英晶组及传感器壳体组装

4 压电传感器性能评估

为评估压电传感器的性能需要对传感器进行静态、动态标定以及刚度测量试验。

4.1 静态标定试验

静态标定试验主要目的是获取3向力压电传感器的3向静态性能，包括灵敏度、线性度及重复性等指标[18]。试验采用高精度高刚度标定测试系统进行。主要包括标准力传感器、电感式位移传感器、电荷放大器、采集卡、位移信号采集卡、计算机及信号处理软件等，高精度高刚度标定测试系统如图6所示。

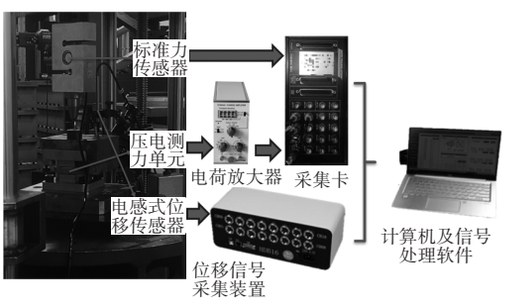


图6 高精度高刚度标定测试系统

试验时采用阶梯加载的方式沿传感器3个特征方向分别反复加载3次，对传感器Z方向按照10、20、30、40、45 kN施加单向力并依次卸载，X、Y方向施加3、6、9、12、15 kN单向力并依次卸载。加载力值由标准力传感器输出至计算机内。采用最小二乘法处理试验数据，将输出电荷与输出电压进行拟合，获得1~6号传感器静态性能，见表4~9。

表4 1号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.725	0.186	0.327
X	7.977	0.039	0.908
Y	7.949	0.039	0.678

表5 2号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.743	0.081	0.112
X	7.728	0.054	0.241
Y	7.654	0.104	0.371

表6 3号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.688	0.055	0.287
X	7.773	0.115	0.262
Y	7.738	0.157	0.084

表7 4号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.706	0.037	0.145
X	7.816	0.082	0.131
Y	7.821	0.139	0.203

表8 5号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.709	0.043	0.276
X	7.465	0.137	0.217
Y	7.534	0.074	0.271

表9 6号传感器静态性能

方向	灵敏度/(pC/N)	线性度误差/%	重复性误差/%
Z	3.744	0.056	0.177
X	7.897	0.137	0.495
Y	7.919	0.007	0.777

从表中数据可见，传感器静态性能良好，线性度误差及重复性误差均在1%以内，可实现静态3向力的高精度测量。

4.2 刚度测试试验

静态标定同时，使用电感测微仪测量传感器各向位移，可获得各向受力$F_{X/Y/Z}$与各向变形$\delta_{X/Y/Z}$之间的关系曲线，如图7~9所示，进行线性回归分析，可获得拟合直线斜率为传感器各向刚度$k_{X/Y/Z}$的倒数。

计算获得传感器X、Y、Z向刚度分别为709.9、

718.1、1538.4 kN/mm。传感器刚度极大,可运用于提升测试系统刚度。

4.3　动态标定试验

在标定测试系统(图6)基础上,使用锤击法获得传感器的固有频率,得到传感器X、Y、Z 3向固有频率分别为8701.1、8789.06、8457.03 Hz,如图10所示。从图中可见,动态特性良好,可用于后续动态力的测量。

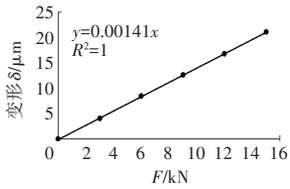


图7　X向加载力值与变形拟合曲线

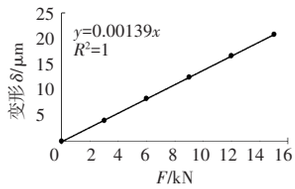


图8　Y向加载力值与变形拟合曲线

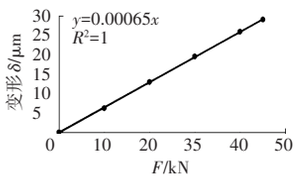


图9　Z向加载力值与变形拟合曲线

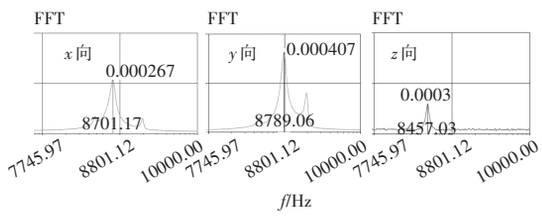


图10　3向固有频率

5　结论

(1)设计的压电式推力矢量测试系统,使用刚性连接结构的压电3向力传感器替换传统挠性连接结构的电桥应变式单向力传感器,可有效满足推力矢量测试系统对于动态推力矢量的测试需求。

(2)根据测试系统的测量需求,设计了压电传感器,动静态特性良好、各向刚度大。

后续探究可将压电传感器放入实际测试系统,得出实际应用中的测试系统精度;并进行外界工作环境温度、湿度等因素对于测试系统的影响研究。

参考文献:

[1] 林左鸣,战斗机发动机的研制现状和发展趋势[J].航空发动机,2006,32(1):1-8.
LIN Zuoming. The current development and future trends of fighter engines[J].Aeroengine,2006,32(1):1-8.(in Chinese)

[2] Holzwarth M, Serbest E, Rogall H. Qualification test for the Ariane 5 attitude control system 400N thruster[R].AIAA-2003-4779.

[3] 赵景芸,金捷.推力矢量技术的研究与发展[J].燃气涡轮试验与研究,1999,12(1):51-54.
ZHAO Jingyun, JIN Jie. Development and investigation of thrust-vectoring technology[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 1999, 12(1):51-54.(in Chinese)

[4] Capone F, Smereczniak P, Spetnagel D, et al.Comparative investigation of multi-plane thrust vectoring nozzles[R].AIAA-1992-3263.

[5] Ashley S.Thrust vectoring: a new angle to air superiority[J].Mechanical Engineering,1995,117(1):58-64.

[6] Severt G, Loos K, Kerl J.Advanced nozzle test facility at NASA Glenn research center's engine research building(invited)[R]. AIAA-2002-3245.

[7] Runyan R B, Rynd I P, Seely I F. Thrust stand design principles[R]. AIAA-1992-3976.

[8] 湛华海.航空发动机矢量喷管六分量测力系统研制[D].重庆:重庆大学,2009.
ZHAN Huahai. Development of aero engine vector nozzle six-component force measurement system[D]. Chongqing: Chongqing University,2009.(in Chinese)

[9] Wrenn M, Jackson A, Nalin J. Modification to AEDC C-1 thrust stand for improved measured thrust uncertainty[R].AIAA-2009-5371.

[10] 刘兴松,王坤东,巩哲.航空发动机及测试技术研究进展[J].自动化与仪器仪表,2022(1):1-6.
LIU Xingsong, WANG Kundong, GONG Zhe. Composition and development of aeroengine test technology[J]. Automation and Instrumentation,2022(1):1-6.(in Chinese)

[11] Wright A M, Wright A B, Born T, et al. A six degree-of-freedom thrust sensor for a labscale hybrid rocket[J]. Measurement Science & Technology,2013,24(12):125104.

[12] 张有,张斌山,吴锋等.六分力台架设计与矢量推力定位[J].航空动力学报,2019,34(11):2324-2330.
ZHANG You, ZHANG Binshan, WU Feng, et al.Six-component stand design and vector thrust positioning[J]. Journal of Aerospace Power, 2019,34(11):2324-2330.(in Chinese)

[13] 张有,吴锋,何培垒.航空发动机推力测量台架原理误差分析[J].航空发动机,2016,42(4):76-80.
ZHANG You, WU Feng, HE Peilei. Principle errors analysis of thrust measurement test bench system for aeroengine[J]. Aeroengine, 2016, 42(4):76-80.(in Chinese)

[14] 黄相华,杨海生,江峰等.基于脉冲式力源的发动机试车台矢量推力校准装置设计及仿真[J].宇航计测技术,2021,41(5):75-81,86.
HUANG Xianghua, YANG Haisheng, JIANG Feng, et al. Design and simulation of engine test bench vectorial thrust calibration system based on pulsed excitation[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement,2021,41(5):75-81,86.(in Chinese)

[15] Daniel K, Brimhall Z, Divitotawela N, et al.Design and validation of a six degree of freedom rocket motor test stand[R].AIAA-2008-5051.

[16] 于婧.固体火箭发动机卧式推力测试系统研究[D].辽宁大连:大连理工大学,2022.
YU Jing. Research on horizontal thrust test system for solid rocket engines[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2022.(in Chinese)

[17] Jun Z, Akbar A M, Lei X W, et al.Optimization of design and measurement principle of six-components force/thrust measurement stand[J]. Journal of Engineering Design and Technology, 2020, 18(5): 1371-1379.

[18] 钱敏,孙宝元,张军.整体式三维压电测力平台的研制[J].大连理工大学学报,2000(5):570-572.
QIAN Min, SUN Baoyuan, ZHANG Jun.Investigation and manufacture of unitary 3D piezoelectric force-measuring platform[J]. Journal of Dalian University of Technology,2000(5):570-572.(in Chinese)

[19] 孙宝元,张贻恭.压电石英力传感器及动态切削测力仪[M].北京:计量出版社,1985:89-91.
SUN Baoyuan, ZHANG Yigong. Piezoelectric quartz force transducer and dynamic cutting force tester[M]. Beijing: Metrology Press, 1985: 89-91.(in Chinese)

(编辑:孙明霞)