

压电式推力测试系统动态性能分析与改善

张 军¹, 杜昌雄¹, 张学军², 孙树江²

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024; 2. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 姿控火箭发动机推力测试系统的动态性能对于推力测量的准确性具有重要影响。采用方形脉冲力模拟发动机推力, 对压电式推力测试系统进行了动态标定, 根据频响特性曲线建立了测试系统的高阶传递函数模型并获得了动态性能指标。针对测试过程中的超调和振荡, 基于高阶传递函数模型, 采用阻尼补偿法对推力测试系统的输出进行补偿。结果表明, 经过补偿后误差减小, 改善了压电式推力测试系统的动态性能。

关键词: 压电; 推力测试; 动态标定; 动态性能; 阻尼补偿

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A

Analysis and Improvement of the Dynamic Performance of Piezoelectric Thrust-Test System

ZHANG Jun¹, DU Changxiong¹, ZHANG Xuejun², SUN Shujiang²

(1. Key Lab. for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: The dynamic properties of the thrust test system for the attitude-control rocket motor have great influence on the accuracy of the thrust measurement. The piezoelectric thrust-test system was dynamically calibrated by using square impulse to simulate the engine thrust. Based on the frequency response curve, a high order transfer function model was established to obtain the dynamic performance indexes of the measurement system. Aiming at the overshooting and the vibration occurred in the process of the thrust measurement, the damping compensation was used to compensate the output of the thrust test system, according to the high order transfer function model. The results showed that the error could be decreased by the damping compensation, and the dynamic performance of the piezoelectric thrust-test system was improved.

Key words: piezoelectric; thrust measurement; dynamic calibration; dynamic performance; damping compensation

0 引言

姿控火箭发动机主要用于航天器的轨道控制、姿态调整等, 发动机推力作为一项重要性能指标, 直接影响航天器空间位置的精确控制^[1]。姿控发动机的推力值较小, 且为快速变化的脉冲力, 故要求推力测试系统不仅具有较高的灵敏度, 还必须有良好的动态特性^[2-4]。

本文采用方形脉冲力模拟发动机推力, 对研制的压电式推力测试系统进行了动态标定, 建立了测试系统的高阶传递函数模型并获得了动态性能指标。针对推力测量中的超调和振荡现象, 本文基于动态补偿原理对压电式推力测试系统的输出进行了

阻尼补偿, 有效减小了系统输出信号的误差, 改善了系统的动态性能。

1 测试系统动态标定及误差

1.1 动态标定

动态标定的目的是给测试系统施加一个与实际发动机推力接近的脉冲力, 采用阻抗头输出对测试系统的输出进行标定。动态标定试验原理如图1所示, 压电测力仪安装在特殊设计的大刚性基座和台架上, 发动机模型通过法兰固定在测力仪上, 采用激振器在发动机模型后端产生动态推力, 将测力仪的输出信号与阻抗头的输出信号进行对比较准。

收稿日期: 2011-12-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475152, 50675026)

作者简介: 张军(1969-), 男, 吉林省长春市人, 副教授, 博士, 主要从事压电传感器与执行器技术的研究。

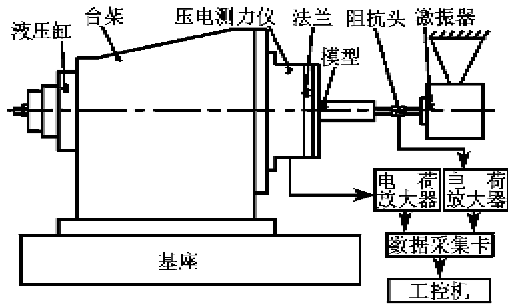


图 1 压电式推力测试系统动态标定试验

考虑动态力的幅值、频率及安装等方面,选用电动式激振器作为执行器,再配以信号发生器和功率放大器来模拟发动机的动态推力。激振器选用江苏联能公司的 JZK-5 型电动式激振器,最大激振力为 50 N,工作频率为 10~5 000 Hz。利用构建的动态激振装置,产生频率 50 Hz、力的幅值为 10 N 的方波作为激振力源来模拟发动机脉冲推力,对测试系统进行动态标定,结果如图 2 所示。

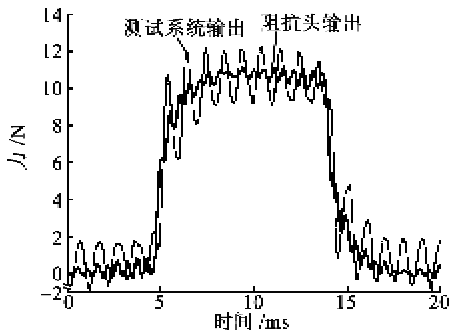


图 2 动态标定结果

1.2 动态标定误差

由图 2 可看出,测试系统动态响应迅速,滞后较小,但存在一定的振荡和超调现象。以阻抗头峰值的平均值为参考,计算得测试系统输出信号的最大幅值偏差为 14.5%。必须对测试系统的动态性能进行分析改善,提高动态推力测试的准确性。

2 系统动态性能分析

测试系统动态性能分析的主要目的是获得系统的频率响应特性曲线和阶跃响应性能,一般通过实验模态分析方法识别出各阶模态参数,建立系统的传递函数模型并获得动态性能指标^[5]。

2.1 模态参数辨识

模态参数辨识过程中,各模态参数与频响函数成非线性关系,一般采用预估参数初值,多次循环迭代的非线性优化方法进行辨识。这种方法辨识高,但当系统阶数较高时,迭代初值的微小误差,往往造成迭代过程发散^[6]。

对频响函数表达形式进行分析发现,只要求得系统的各阶固有频率和阻尼比,则通过解线性方程组便可求得传递函数的各个参数,不需经过迭代。基本过程是提取频响曲线的波峰波谷为特征点,计算各阶固有频率和阻尼比,通过解方程求得传递函数的各个参数,并将理论模型的频响曲线与实测曲线进行对比验证。

不考虑剩余模态影响时,频响函数表达式为

$$H(s) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{A_i}{s-s_i} + \frac{A_i^*}{s-s_i^*} \right) \quad (1)$$

式中: A_i, A_i^* 为 $H(s)$ 在极点 s_i 的留数,“*”表示共轭, $A_i = u_i + jv_i, A_i^* = u_i - jv_i; s_i, s_i^*$ 为极点, $s_i = -\alpha_i + j\beta_i, s_i^* = -\alpha_i - j\beta_i; i = 1, 2, \dots, n; n$ 为模态阶数。

令 $s = j\omega$, 则式(1)写为

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{u_i + jv_i}{\alpha_i + j(\omega_i - \beta_i)} + \frac{u_i - jv_i}{\alpha_i + j(\omega_i + \beta_i)} \right] \quad (2)$$

需要辨识的参数有极点的实部 α_i 、虚部 β_i 和留数的实部 u_i 、虚部 v_i , 如果模态阶数为 n , 则需要辨识的参数共 $4n$ 个, 写成向量形式:

$$X = (u_1, v_1, \alpha_1, \beta_1, \dots, u_n, v_n, \alpha_n, \beta_n)^T \quad (3)$$

$$\begin{cases} \alpha_i = \xi_i \omega_i \\ \beta_i = \sqrt{1 - \xi_i^2} \omega_i \end{cases} \quad (4)$$

待辨识参数和频响函数为非线性关系,当计算出各阶固有频率 ω_i 和阻尼比 ξ_i 后, α_i, β_i 的值可由式(4)确定,则式(2)转换为线性方程,求解可得到频响函数表达式的各参数。

首先对测试系统采用脉冲锤击法进行频响试验,获得主推力方向的频率响应特性曲线,如图 3 所示。系统各阶固有频率可由频响曲线波峰点直接读出,阻尼比按照半功率点法求得^[7],各阶固有频率和阻尼比如表 1 所示。

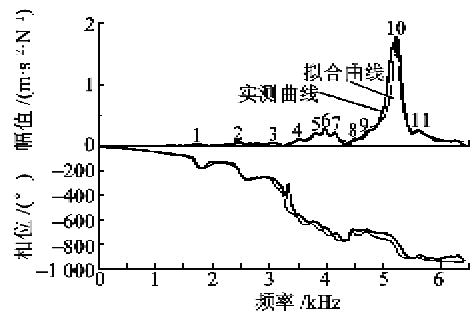


图 3 实测幅相频特性曲线与拟合曲线的比较

表1 系统各阶固有频率和阻尼比

阶数	固有频率/Hz	阻尼比
1	1 717	0.047
2	2 417	0.032
3	3 073	0.028
4	3 530	0.021
5	3 809	0.019
6	3 972	0.011
7	4 139	0.012
8	4 428	0.012
9	4 703	0.019
10	5 221	0.011
11	5 611	0.013

由各阶固有频率和阻尼比计算 α_i, β_i , 进而可得频响函数的全部待辨识参数。将各参数代入式(2)可得测试系统理论传递函数, 将实测的幅相频特性曲线与理论模型的幅相频特性曲线进行比较, 结果如图3所示。由图可看出, 拟合曲线与实测曲线基本一致, 表明所建立的传递函数模型正确。根据该传递函数模型对系统的动态性能进行研究。

2.2 系统阶跃响应性能

根据测试系统的传递函数模型, 以单位阶跃为输入, 在 MATLAB 中进行仿真, 得到系统的动态响应性能指标为: 测试系统的上升时间 1.59×10^{-5} s, 峰值时间 3×10^{-5} s, 调整时间 1.24×10^{-2} s, 最大超调量 371%。

从测试系统的方波动态标定及阶跃响应性能可看出, 压电式推力测试系统动态响应迅速, 但是测量快速变化的动态力时振荡较大。这是因为发动机推力测试环境恶劣, 所以测试平台全部由阻尼系数较低的不锈钢制造, 各部件之间刚性连接, 系统阻尼比小, 易引起振荡和超调。对于实际测试系统, 在保证高固有频率的同时增加有效阻尼较难, 为此采用后处理补偿法对压电式推力测试系统的动态性能进行改善。

3 阻尼补偿

典型的位移应变式推力测试系统由于传感器特性的原因, 系统的固有频率较低, 工作频带窄, 测量动态推力时, 一般采用串联补偿滤波器使频带扩展、阻尼比提高的方法减小误差^[3]。但采用此方法使频带拓宽的同时也会使高频噪声增加, 降低了信噪比^[9]; 而压电式推力测试系统固有频率高, 工作频带宽, 只是由于阻尼比小造成幅值超调量增大, 因此针

对压电式推力测试系统进行阻尼补偿, 减小输出误差。

3.1 阻尼补偿原理

阻尼补偿的原理是基于压电式推力测试系统的高阶传递函数模型, 在原测试系统上增加补偿环节, 使等效系统的阻尼比达到理想值, 改善原系统的动态性能, 减小测量误差。

压电式推力测试系统可看作由若干二阶系统组成:

$$G = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (5)$$

对于其中的每个二阶系统都串联阻尼补偿环节:

$$H_i = \frac{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2}{s^2 + 2\xi'_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (6)$$

式中: i 为模态阶数; ω_i, ξ_i 分别为各阶固有频率和阻尼比; ξ'_i 为理想的阻尼参数, 二阶系统最佳阻尼比取 0.707, 则串联后的等效系统为

$$G_d = G \cdot H_i = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\xi'_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (7)$$

压电式推力测试系统的直接输出值为被测推力与系统传递函数的乘积。将输出值通过阻尼补偿后的数据, 相当于被测推力与等效系统的传递函数的乘积。等效系统的固有频率与原系统相同, 远大于被测推力频率, 并且阻尼比为最佳阻尼比, 因此补偿后的等效系统具有良好的动态性能, 通过阻尼补偿, 理论上可减小压电式推力测试系统输出的超调和振荡, 复原被测推力信号。

3.2 阻尼补偿结果

为验证阻尼补偿的效果, 对动态标定试验中测试系统的输出信号进行阻尼补偿, 补偿环节的阻尼比取理想值为 0.707, 结果如图4所示。

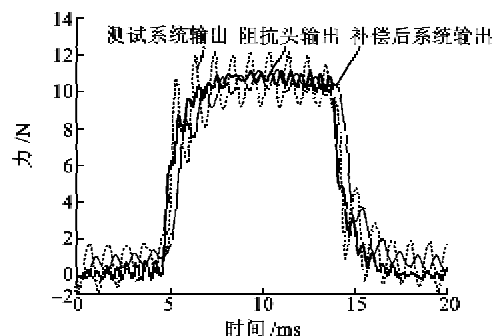


图4 阻尼补偿结果

由图4可看出, 对测试系统的输出进行阻尼补偿后, 推力信号虽然有一定的时间滞后, 但超调量减

小,与阻抗头的输出信号更吻合。补偿后最大幅值偏差由 14.5% 下降到 1.9%,有效减小了系统的输出误差。

经过阻尼补偿后,原压电推力测试系统的传递函数模型成为等效系统的模型,对补偿前后系统的阶跃响应性能进行比较,如表 2 所示。

表 2 补偿前后系统阶跃响应性能

阶跃性能	补偿前	补偿后
上升时间/s	6×10^{-5}	9×10^{-5}
峰值时间/s	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-4}
调整时间/s	1.2×10^{-2}	3.3×10^{-4}
最大超调量/%	374.00	8.78

补偿后,压电式推力测试系统的上升时间和峰值时间虽略有增大,但调整时间和超调量降低,测试系统的动态性能指标得到了改善。说明了针对压电式推力测试系统固有频率高但阻尼比低的动态特性上的不足,采用阻尼补偿法可有效减小动态推力测试时的误差。如果将补偿环节设计成模拟电路形式,还可实现动态推力的实时在线准确测量。

4 结束语

采用方形脉冲模拟发动机推力,对压电式推力测试系统进行了动态标定,且基于频响曲线建立了测试系统的高阶传递函数模型,获得了阶跃响应性能指标。动态性能分析结果表明,压电式推力测试系统固有频率高但阻尼比小,测量快速变化的动态推力时出现超调和振荡现象。针对压电式推力测试系统的特点,基于高阶传递函数模型,采用阻尼补偿法有效减小了动态测量误差,最大幅值偏差由 14.5% 下降到 1.9%,改善了压电式推力测试系统的动态性能,提高了推力测试准确性。

参考文献:

[1] 沈赤兵,王克昌,陈起智. 国外小推力液体火箭发动机的最新进展[J]. 上海航天, 1996, 6(3): 41-45.

SHEN Chibing, WANG Kechang, CHEN Qizhi. The latest progress in small thrust liquid rocket engines a-broad[J]. Aerospace Shanghai, 1996, 6(3): 41-45.

[2] 翟怡,孙宝元,钱敏,等. 压电石英推力与推力矢量传感器的研制[J]. 压电与声光, 2007, 29(2): 164-169.

ZHAI Yi, SUN Baoyuan, QIAN Min, et al. Development of the piezoelectric quartz thrust and thrust vector sensor[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2007, 29(2): 164-169.

[3] DIMITRI T, STEFAN Z G, ADAM G, et al. Pulse performance evaluation for orbital propulsion thrusters [C]//Sacramento, California: 42st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2006.

[4] MARQUART E J, COULTER S M. Impulse measurement technology development at the arnold engineering development center (AEDC) [C]//Reno, Nev: 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1998.

[5] 黄俊钦. 测试系统动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

[6] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

[7] 刘礼华,欧珠光. 动力学实验[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.

[8] 陈琳,李建勋,陈杰,等. 动态推力测量数字补偿器设计[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 1154-1158.

CHEN Lin, LI Jianxun, CHEN Jie. Design of digital compensator for dynamic thrust measurement [J]. Journal of Astronautics, 2009, 30(3): 1154-1158.

[9] 孙海波,孔德仁,何英,等. 传感器动态误差修正方法探讨[J]. 南京理工大学学报, 2000, 24(4): 330-333.

SUN Haibo, KONG Deren, HE Ying, et al. Transducer's dynamic error correction method[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2000, 24(4): 330-333.

(上接第 935 页)

[11] SCHICKERT M. Progress in ultrasonic imaging of concrete[J]. Materials and Structures, Special issue on Concrete Science and Engineering, 2005, 38(9): 807-815.

[12] HOSSEINI Z, MOMAYEZ M, HASSANI F. Detection of inclined cracks inside concrete structures by ultrasonic SAFT[A]//Review of progress in quantita-

tive nondestructive evaluation[C]//Colorado, USA: The 34th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 2008.

[13] SHI Lihua, CHEN Bin, GAO Cheng. Design and modeling of signals by using wavelets for the Pulse-echo NDT Approaches [A]//Proc of SPIE-Int Soc Opt Eng[C]//Washington: SPIE, 2001, 4336(5): 146-153.