

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.08

某型固体火箭发动机试车台推力 测量分析及优化设计

徐正红, 刘子虚

(安徽省长江计量所, 安徽 合肥 230088)

摘 要: 根据发动机试车台轴向推力测量和推力偏心测量要求, 对试车台的台架结构进行了设计与分析。通过增加台架的动态特性, 减小台架结构对测量准确度的影响; 采取增加动架的轴向刚度和减小横向刚度设计, 提高动架的固有频率, 消除发动机启动时动架的振动影响等, 满足了某型小推力火箭发动机测试要求。

关键词: 火箭发动机; 试车台; 测量; 结构设计

中图分类号: TB9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2018)06-0033-04

Thrust Measurement Analysis and Optimization Design of a Solid Rocket Engine Test Bench

XU Zhenghong, LIU Zixu

(Anhui Changjiang Institute of Metrology & Measurement, Hefei 230088, China)

Abstract: According to the requirements of axial thrust measurement and thrust eccentricity measurement of engine test bench, the structure of the test bench is designed and analyzed. The design enhances the dynamic characteristics of the bench to reduce the influence of the bench structure on the measurement accuracy. It increases the axial stiffness and reduces the lateral stiffness of the movable frame to raise the natural frequency of the frame and eliminates the vibration effect of the movable frame when starting the engine. The test bench has met the test requirements of a small thrust rocket engine.

Key words: rocket engine; test bench; measurement; constructional design

0 引言

推力是衡量火箭发动机性能的重要参数, 推力的准确度及其时域变化规律, 直接反映出火箭发动机的技术指标, 影响火箭发动机的性能。在准确测量推力的基础上, 可以通过推力曲线算出发动机的其他参数, 如平均推力、总冲、比冲等。在火箭制造和装配过程中, 不可避免地会出现非对称结构偏差, 导致火箭发动机在工作时会产生推力偏心, 直接影响火箭飞行性能和发射精度。因此, 火箭发动机试车台主要性能参数为轴心推力和推力偏心。

1 试车台结构设计

试车台主要由试验台架、测试系统和辅助设备构成, 结构如图 1 所示。其中, 定架作为试车台位置调整基准, 为其他部件提供安装基础; 前、后龙门架安装在定架上, 龙门架上安装调整装置、动架和推力偏心测量单元, 用以实现被测火箭的安装、位置调整及推力偏心的测量; 推力墩作为受力墙, 当发动机工作

时, 发动机的推力通过传力装置、推力测量传感器作用到推力墩上, 通过推力测量传感器即可测量发动机轴向推力。推力偏心测量采用六组测量单元进行测力, 计算得到偏心矢量。

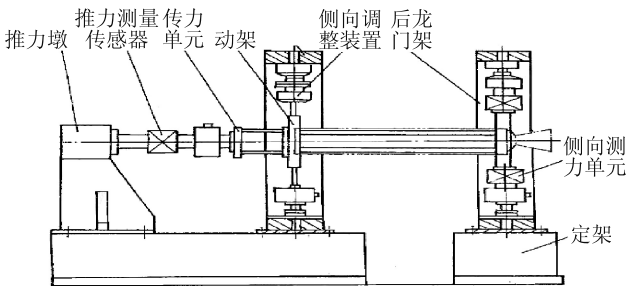


图 1 试车台结构图

2 轴向推力测量

通过结构设计尽可能地提高定架和动架的静态和动态特性, 减小台架结构对测量准确度的影响。定架设计成刚性很强的结构, 动架通过螺栓与定架相连接, 在定架与动架之间装有测力传感器, 实现动架与定架

之间的唯一刚性连接,将发动机安装于动架上。对于轴向推力测量,主要误差来源包括测力传感器与火箭发动机机体位置误差、轴向推力作用下受力墙微小变形引起的传感器与发动机机体轴心线偏离和测力系统本身的误差。

为保证主推力测量的准确可靠,测力传感器应尽可能与火箭发动机轴心共线,在实际试验过程中通过微调装置细微调节发动机机身的位置,保证测力传感器与火箭发动机机体轴线的同轴度。在调节发动机体与轴向推力共线的条件下,随着主推力的增加,传感器受力逐渐增大,可能引起标准传感器所在的受力墙发生微小形变,引起标准传感器与火箭发动机轴心线

偏离,如图 2 所示。为减小受力墙变形引起的误差,在受力墙背面设计加强筋结构,增大受力墙的强度,加强筋结构设计尺寸,如图 3 所示。

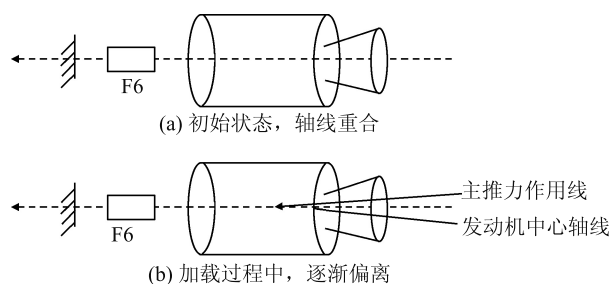


图2 主推力偏离轴心加载示意图

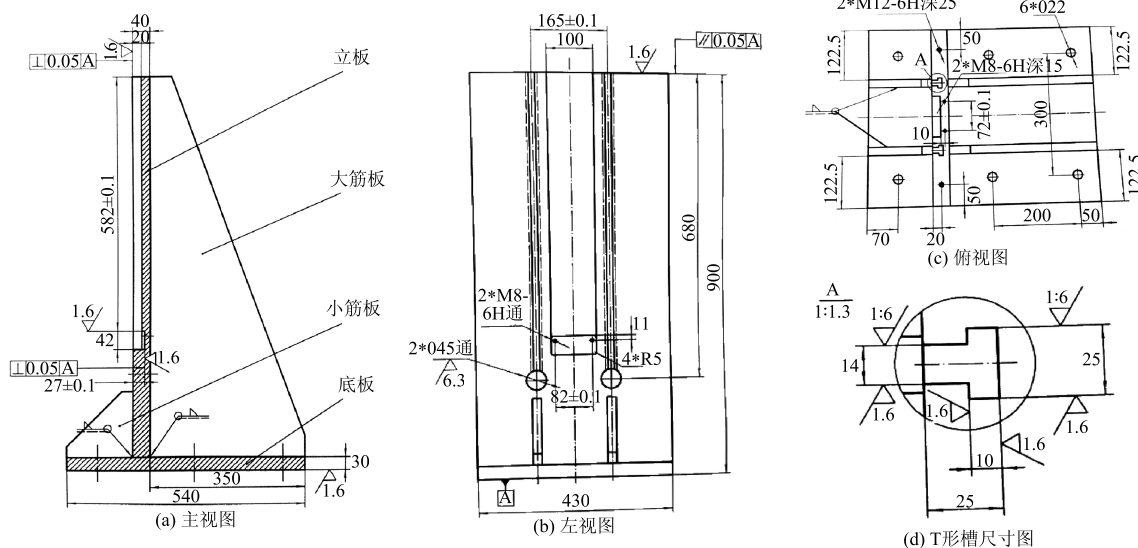


图3 加强筋推力墙设计尺寸图

在火箭发动机推力测量时,推力的上升时间为几十毫秒,为满足轴向推力的动态测试要求,选用满足测试准确度要求、高频率响应特性好的应变式传感器,使得测试系统具有较高固有频率。火箭发动机工作时,受环境温度的影响,要求传感器的热防护性能好,能很好地降低热传导和热辐射对测量准确度的影响,尽量减小温漂。

3 推力偏心测量

采用六分力法实现推力偏心的测量试车台六分力测量测力传感器模型如图 4 所示。六分力测量误差来源主要包括传感器测量误差、动架的安装位置误差、发动机质量变化与质心漂移、发动机安装位置误差、动架与传感器连接方式影响等。

推力偏心加载控制,是在轴向推力加载的基础上,通过调整主推力的加载姿态,使主推力作用线与模拟

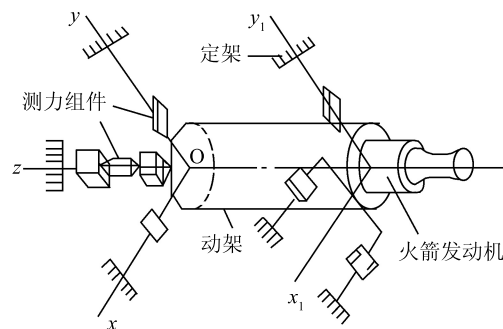


图4 六分力测量模型图

弹体轴线产生一微小偏角(不大于 5°)，模拟火箭发动机产生的推力偏载,具体方法是,将主推力加载油缸前端的加载部分位置固定,通过调节油缸尾部位置,使主推力与模拟弹体轴线产生偏角,实现在不同象限、不同位置角度偏转。加载长度 838 mm 时,不同方向调整加载油缸位置产生偏心角度值如表 1 所示。

表 1 偏转角度理论值对照表

y 向 位移调整/mm	x 向 位移调整/mm	偏转角理论值/(°)
0	0	0.000
	5	0.342
	15	1.025
	25	1.709
	35	2.394
	45	3.078
5	0	0.342
	5	0.483
	15	1.081
	25	1.743
	35	2.418
	45	3.097
15	0	1.025
	5	1.081
	15	1.451
	25	1.994
	35	2.604
	45	3.245
25	0	1.709
	5	1.743
	15	1.994
	25	2.418
	35	2.942
	45	3.522
35	0	2.304
	5	2.418
	15	2.604
	25	2.942
	35	3.386
	45	3.901
45	0	3.078
	5	3.097
	15	3.245
	25	3.522
	35	3.901
	45	4.355

以模拟弹体轴线方向为竖轴(Z 轴),与竖轴垂直水平方向为横轴(X 轴),与竖轴垂直竖直方向为纵轴(Y),建立空间直角坐标系。各传感器测出轴向推力和侧向力,根据空间力系平衡条件得到推力偏心角 $\gamma = \arctan(\frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z})$, 其中, F_x 为 X 轴方向合力, F_y 为 Y 轴方向合力, F_z 为主推力。

利用各传感器测得力值计算主推力偏心角度与理

论偏转角度的比对,实现推力偏心的测量。

为克服挠性连接动架固有频率低、容易引起台架振动的缺陷,针对小推力火箭发动机测试特点,在满足测试时台架结构稳定的前提下,采取增加动架的轴向刚度和减小横向刚度设计,提高动架的固有频率,消除发动机启动时的动架的振动影响。采取 6 个侧向分力传感器刚性安装在动架上,六分力测量传感器安装位置如图 5 所示,在 6 个测力传感器顶端各安装一个沿弹体轴向的滚动轴承,以减小沿弹体方向的侧向摩擦力,传感器滚动轴承装置如图 6 所示。为保障滚动轴承运动方向与弹体平行,对传感器连接轴的安装采取导向槽的方法精确处理,通过控制导向槽、导向连接杆的结构尺寸、加工精度和材质,可有效降低发动机、动架位置误差对于测量准确度的影响,导向连接杆设计尺寸如图 7 所示。同时,由于发动机安装时与动架之间近似于刚性约束,发动机工作过程中质量变化和质心漂移的影响也可忽略不计。刚性约束受力产生的微小变形会引起约束之间的相互干扰,降低分力的测量准确度,需要对约束互扰进行理论分析建立修正方程,再通过原位校准获得互扰修正系数,从而消除互扰带来的测量误差。

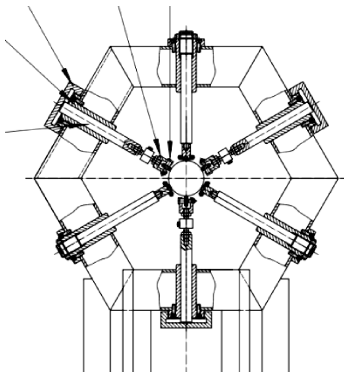


图 5 六分力测量传感器安装示意图



图 6 传感器轴承装置图

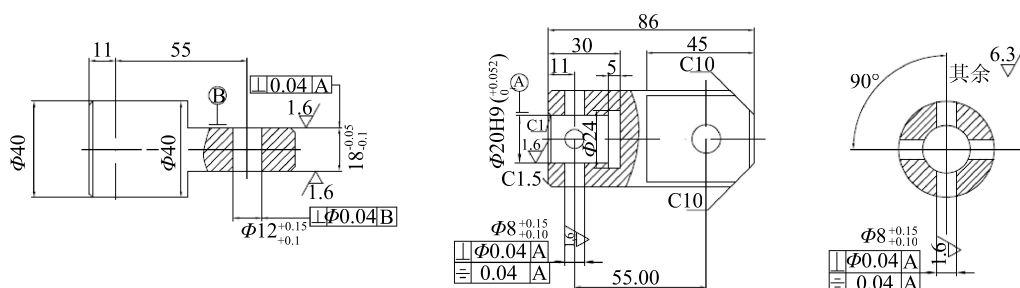


图7 导向连接杆设计尺寸图

4 自动校准软件设计

校准软件采用 VC 进行开发, 包括数据采集处理部分和生成检测报告部分。前者包含对轴向推力、偏载力值等参数的采集与处理; 后者主要提供试车台检测报告的信息输入、数据提取, 从而实现报表的自动生成; 利用数据库管理检测报告, 提供信息查询、导出、打印等功能。轴向推力采集界面如图 8 所示, 主要包含轴向推力、六分力的采集, 轴向主推力加载控制, 偏心角的计算等。轴向力的采集曲线绘制如图 9 所示, 可根据测试条件的不同选取加载时间-力值、加载位移-力值、形变-力值等不同的曲线模式。



图8 轴向推力采集界面

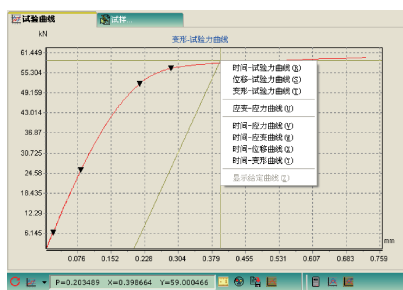


图9 轴向推力采集曲线绘制区

5 结束语

本文所述试车台装置针对某型小推力固体火箭发动机测试, 采用加强台架刚度, 提高台架静态、动态

特性; 设计位置细微调整装置、采取六分力传感器与动架刚性连接及精确设计, 保证火箭发动机机体与测量传感器之间的位置精度; 采取增加动架的轴向刚度和减小横向刚度设计, 提高动架的固有频率, 消除发动机启动时的振动对测量准确度的影响, 实现了小推力火箭发动机试车台推力的准确测量, 满足了某型小推力火箭发动机技术指标测试要求。

参考文献

- [1] 董洪强. 小推力液体火箭发动机试车台设计研究[D]. 北京: 国防科学技术大学, 2006.
- [2] 刘海峰, 邢耀国, 等. 固体火箭发动机高精度试车台设计研究[J]. 海军航空工程学院学报, 2002, 17(2): 207-209.
- [3] 耿文忠. 新型液体火箭发动机试车台启动试验系统方案设计[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 49-53.
- [4] 吴惠明, 焦献瑞. 发动机试车台推力测量系统中心加载现场校准技术研究[J]. 计测技术, 2009, 29(1): 28-30.
- [5] 王辰辰, 李新良, 李程, 等. 航空矢量发动机试车台推力校准技术综述[J]. 计测技术, 2015(4): 10-14.
- [6] 刘子虚, 吴国昌. 轻型固体火箭发动机试车台校准技术研究[J]. 计测技术, 2017, 37(s1): 141-145.

收稿日期: 2018-10-16

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(JSJC201345C003)

作者简介



徐正红(1976-), 男, 正高级职称, 硕士, 主持完成国防科工委“‘十一五’计量技术基础条件建设项目”, 国防科工局军工重点计量科研项目, 机载氧浓缩器性能测试系统在线校准技术研究、军用集成电路专用键合机综合参数校准技术研究、70 mm 火箭发动机试车台校准技术研究等多个国防科工局技术基础科研项目。1997年毕业于北京理工大学材料科学与工程专业, 后分配至安徽省长江计量所工作至今, 历任热电室计量检定员、热电室副主任、副总工程师、热电室主任、总工程师、党委委员, 现任安徽省长江计量所所长、党委书记。