

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.01.09

一种新型的推力校准装置

沈涵¹, 齐坤¹, 晁宏远²

(1. 北京新立机械有限责任公司 检测校准实验室, 北京 100190;

2. 北京轩宇空间科技有限公司 系统研发部, 北京 100094)

摘要: 推力校准在推力测量中占有举足轻重的地位, 其校准精度直接影响测量结果。传统的校准方式精度差, 效率低, 已经无法满足当前的测量要求。本文提出了一种新型的在线推力校准系统, 通过汽缸配合伺服电机产生稳定拉力, 由压力控制系统、拉力活塞系统以及标准力传感系统形成闭环 PID 控制系统, 实现拉力的精确控制, 数据采集系统采集被校力值在上位机完成最终计算。

关键词: 推力校准; PID 控制; 伺服电机; 汽缸

中图分类号: TB931

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)01-0035-03

A New Type of Thrust Calibration System

SHEN Han¹, QI Kun¹, CHAO Hongyuan²

(1. Beijing Xinli machinery Co., Ltd, Detection and Calibration Laboratory, Beijing 100190, China;

2. Beijing Sunwise Space Technology Co., Ltd, System R & D Department, Beijing 100094, China)

Abstract: Thrust calibration plays an important role in thrust measurement, and its calibration accuracy directly affects the measurement results. The traditional calibration method has poor precision and low efficiency, which cannot meet the current measurement requirements. In this paper, a new on-line thrust calibration device is proposed. The cylinder tensioning force is generated by the cylinder with a servo motor. The closed-loop PID system is formed by the pressure control system, the tension piston system and the standard force sensing system. The precise control of the pulling force is realized, and the data acquisition system collects the calibrated value in the host computer to complete the final calculation.

Key words: thrust calibration; PID control; servo motor; cylinder

0 引言

推力测量是推力器测试的重要环节, 传统推力校准试验时需要靠人工添加或卸载砝码进行传感器校准, 操作不便且劳动强度大。如今使用的推力器放置在真空仓内, 传统的推力校准方法已经无法满足真空环境下的在线校准。为提高校准效率和校准精度, 基于计算机控制技术和数据采集系统, 设计了一种新型的真空在线推力校准装置。

1 真空在线校准装置

此新型真空在线校准装置主要由压力控制系统、拉力活塞系统、标准力测量系统、数据采集系统及校

准软件几部分组成。如图 1 所示, 校准软件位于上位机, 负责控制校准流程、发送力值控制相关指令、接受返回力值信息、采集被校力测量系统信号以及校准数据的分析、显示与储存等。压力控制系统控制器接收上位机指令通过驱动器、电机、位移机构控制活塞移动, 从而控制调压活塞系统气缸中的压力变化。拉力活塞系统接受压力控制系统的输出压力变化, 使活塞两侧压力差产生变化, 从而使拉力产生变化。标准力测量系统准确测量拉力大小, 用于反馈并最终返回上位机作为拉力真实值。由标准力值与测控计算机采集到的被校力测量系统输出信号相比较, 即可实现对整个被校力测量系统的在线校准。

1.1 压力控制系统

1.1.1 系统原理与结构

压力控制系统包括控制器、电机驱动器、旋转电机、位移机构、调压活塞系统等部分, 如图 2 所示。

收稿日期: 2016-11-20; 修回日期: 2017-01-10

作者简介: 沈涵(1987-), 女, 吉林磐石人, 工学学士, 主要研究方向为计测量。

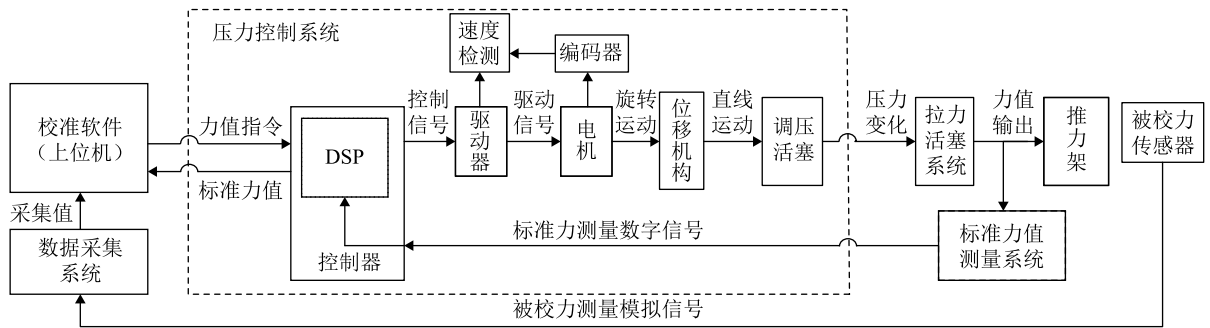


图1 全系统结构原理图

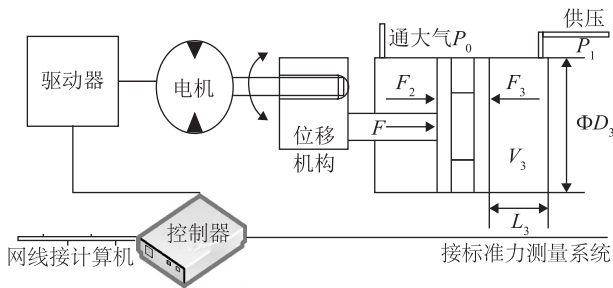


图2 压力控制系统结构原理图

控制器是压力控制系统的核心，接受上位机指令，控制驱动器与电机产生旋转运动。位移机构丝杠把电机的旋转运动转化为直线运动，通过活塞杆带动活塞移动。

调压活塞系统有杆侧气腔连通大气，无杆侧气腔 V_3 通过管路 V_2 (长 2 m 的 $\Phi 4$ mm 的管路容积约 $25.1 \times 10^{-6} \text{m}^3$ 与拉力活塞系统(如图 3 所示)受控气腔 V_1 连接形成密闭气腔 ($V_A = V_1 + V_2 + V_3$)。活塞移动时将引起 V_3 和 V_A 的变化，使 V_A 内气压 P_1 产生变化。

从图 2 可以看到驱动器与电机(包括编码器)之间形成一个运动控制闭环系统。驱动器接受控制器模拟量控制指令，使用速度/转矩控制模式，编码器测量旋转运动用于反馈。 P_1 的变化在拉力活塞系统中将使力 F 产生变化，标准力测量系统测量 F 并反馈给控制器，最终形成拉力的大闭环控制，实际力值将在设定值附近上下微小波动，波动值在力值控制分辨力以内。

1.1.2 设计准则

使调压活塞系统中活塞初始位置处于行程最远处 $L_{2\text{max}}$ ，密闭腔内初始气压为大气压力 P_0 。电机带动活塞改变容积变化缓慢，气体状态变化基本遵循等温过程

$$P_1 = \frac{V_1 + V_2 + V_{3\text{max}}}{V_1 + V_2 + V_3} P_0 = \frac{V_{A\text{max}}}{V_A} P_0 = \frac{V_{A\text{max}}}{V_{A\text{min}} + S_3 \cdot L_3} P_0 \quad (1)$$

式中： $S_3 = \frac{\pi}{4} D_3^2$ 为调压活塞有效作用面积； D_2 为调压气缸内径。

由于活塞两侧压差所形成的活塞杆上的力为

$$f = F_3 - F_2 = (P_1 - P_0) \cdot S_3 \quad (2)$$

设位移机构直线位移灵敏度为 ℓ ，单位为米/转，则电机负载扭矩

$$T_l \approx \frac{f\ell}{2\pi\eta} + T_f \quad (3)$$

式中：电动机轴的摩擦转矩 T_f 无从查取，在此计算中忽略；效率 η 一般为 0.85~0.95，为留有余量我们计算中取 0.8。

当 L_3 产生微小变化 ΔL_3 ，造成的气压 P_1 的变化为

$$\Delta P_1 \approx -\frac{S_3 \cdot \Delta L_3}{V_A} P_1 \quad (4)$$

电机负载扭矩变化

$$\Delta T_l \approx \frac{\Delta f \ell}{2\pi\eta} = \Delta P_1 \cdot S_3 \cdot \frac{\ell}{2\pi\eta} \quad (5)$$

控制器基于 DSP 开发，控制器接受上位机控制指令、采集反馈力值信号、控制电机运动等，以完成设置力值的闭环控制。PID 控制算法在控制器内部实现，控制器在接受力值设置指令后脱离上位机独立运行完成闭环控制，控制可靠，不受上位机影响。

为了提高力值控制速度，减小控制时间，而又防止力值过冲，力值控制采用分段控制。在前部分使用直接比例控制，在力值接近目标值的后部分使用比例微分控制。

1.2 拉力活塞系统

1.2.1 系统原理与结构

如图 3 所示，拉力活塞系统为一单杆双作用气缸，主要有缸体、活塞、活塞杆组成。活塞杆一侧腔内气压 P_1 高于无杆侧腔内气压(通大气， P_0)使活塞杆产生一个向无杆侧的拉力 F 。 P_1 受压力控制系统控制改变

时, 拉力 F 也随之改变, 从而控制 F 的大小。

1.2.2 设计准则

为了便于试验完后拉力活塞复位完全卸除拉力, 在力加载上时, 应使活塞到有杆侧端面留有行程 L_1 。

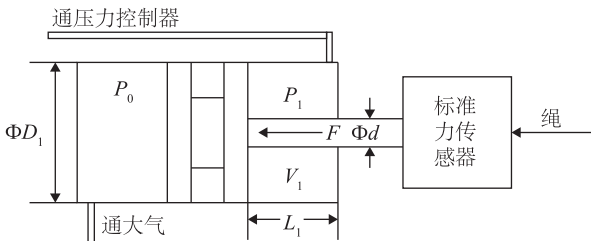


图3 拉力活塞系统结构原理图

设气缸内径 D_1 , 活塞杆直径 d 。活塞内腔截面积为

$$S_0 = \frac{\pi}{4} D_1^2 \quad (6)$$

活塞杆侧气压有效作用面积为

$$S_1 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - d^2) \quad (7)$$

活塞杆侧气腔容积为

$$V_1 = S_1 \cdot L_1 \quad (8)$$

忽略摩擦力与真空气压对活塞杆的轴向力, 可得活塞杆上拉力为

$$F = P_1 \cdot S_1 - P_0 \cdot S_0 \quad (9)$$

由式(4), (5)与式(9)可得调压活塞微小移动引起的拉力 F 的变化 ΔF 为

$$\Delta F = \Delta P_1 \cdot S_1 = -\frac{S_1 \cdot S_3 \cdot P_1}{V_A} \Delta L_3 = \frac{2\pi\eta \cdot S_1}{S_3 \cdot l} \Delta T_l \quad (10)$$

1.3 标准力测量系统

标准拉力传感器与拉力活塞系统活塞杆刚性连接测量当前产生的拉力值, 并通过调理放大器放大后传输给控制器与上位机用于反馈与显示。放大器通过 RS232 与电机控制器通讯, 反馈力值测量信号。标准拉力传感器与被校拉力传感器的连接用细尼龙拉绳, 具有足够强度, 且易于更换。

1.4 被校力采集与校准软件

校准软件运行于上位机, 基于 LabVIEW 平台开发。校准软件独立于测控软件单独运行。通过校准软件可设定控制力值, 获取被校力测量系统(数据采集系

统)电压输出、自动计算校准公式、线性度、迟滞、灵敏度、精度等各项校准指标并保存校准结果。

2 校准结果

在真空环境下进行了完整的校准实验, 控制力值包括 0, 5, 10, 15, 20 N 等五个点, 正反各三个行程, 拉力实际控制过程如图 4 所示。

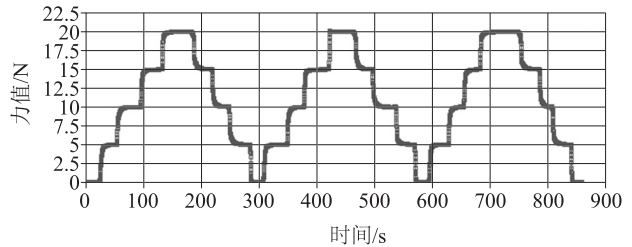


图4 拉力控制曲线

由图 4 可见, 系统完全的进行了多个力值的正反三个行程校准, 最高力值达到 20 N, 力值稳定时间都小于 45 s, 基本无过冲, 超调量小、稳定时间快, 实验结果证明稳定后力值波动均在 ± 0.01 N 以内, 软件使用标准的校准精度计算算法, 最终的校准精度均在 0.5 % 以内, 且具有良好的线性度和迟滞性。

3 结论

本文从系统构成和实现方式两方面详细阐述了在线推力校准装置的工作原理及实现方式, 真空实验结果表明系统响应速度快、校准精度高、工作稳定, 大大提高了推力校准的精度和效率。

参考文献

- [1] 张重雄, 张思维. 虚拟仪器技术分析与设计[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5版. 北京: 科学出版社, 2007: 243-281.
- [3] 张伟. 小力值推力测试系统动态校准装置的研究[D]. 大连理工大学, 2008.
- [4] 朱子环, 耿卫国, 陈锋. 液体火箭发动机试验推力校准控制系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1575-1577.
- [5] 赵自文. 动态推力校准系统设计[J]. 自动化仪表, 2007, 28(S1): 228-230.