

一种航空旋转密封件摩擦系数高精度测试仪^{*}

杨 忠¹ 吴惠祥² 戴 俊¹ 沈春林¹

¹(南京航空航天大学自动化学院 南京 210016)

²(南京航空航天大学航空宇航学院 南京 210016)

摘要 摩擦系数和接触电阻是检验某些航空旋转密封件(工作在滑动摩擦状态下)质量特性的关键性指标。针对航空测试的高低温(-55~+125℃)环境要求,研究设计了一种新型的航空旋转密封件摩擦系数高精度测试仪。讨论了摩擦系数测试的原理与方法,设计了摩擦系数测试台的基本结构,研究了力传感器的温度补偿及其工程实现步骤,并对测试仪的嵌入式数据采集硬件系统和 PC 软件测试系统进行了抗干扰设计。大量试验表明,整个测试仪的综合测试准确度优于 1%。

关键词 摩擦系数 高低温 温度补偿 自动测试

中图分类号 TM 93 文献标识码 A 国家标准学科分类代码 460.40

A High Precision Frictionometer for Aero Rotary Hemetic Parts

Yang Zhong¹ Wu Huixiang² Dai Jun¹ Shen Chunlin¹

¹(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

²(College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Friction coefficient and contact resistance are key parameters to the quality inspections of those aero rotary hemetic parts with sliding frictions. To counter the requirements of high and low temperatures (-55~+125℃) that aviation needs, a new-fashioned high precision frictionometer for aero rotary hemetic parts is studied and realized. Principles and methods of friction coefficient test are discussed, and a basic structure of the testing platform is designed. Following the research of temperature compensation for force sensors and its practicable approaches, an embedded data acquisition hardware system and a PC software testing system are designed for the instrument with anti-disturbances. A large number of experiments have indicated that the precision of the instrument is better than 1%.

Key words Friction coefficient High and low temperatures Temperature compensation Auto test

1 引 言

对于某些工作在滑动摩擦状态下的航空旋转密封件而言,摩擦系数和接触电阻一般不允许随工作时间的推移和环境温度的改变而发生显著的变化。此两项参数往往是检验该类产品质量特性的关键性指标,因而必须在航空要求的高低温(-55~+125℃)环境下对其进行严格测试。

常规的摩擦试验机(如销盘式、环块式等)和摩擦系数测定方法(如摩擦力矩测试法、摩擦功测试法等)技术虽较为成熟^[1~2],但在测试精度、数据处理与再现能力、机械装配特性、高低温工作特性、外形尺寸、购置与维护成本等方面,难以完全满足实际要求。为此,需要针对被测的航空旋转密封件,研究设计一种新型的摩擦系数高精度测试仪,其中要解决的问题主要有 3 个:测试原理与方法、力传感器的温度补偿、测试硬件与软件系统的抗干扰设计。

* 本文于 2004 年 6 月收到。

2 测试的原理与方法

航空旋转密封件摩擦系数的测试,一般要在高低温控制箱(或控制舱)中进行。所建造的物理测试台应与现有的实验室环境控制设备配套,并准确模拟被测零部件的工作条件(包括摩擦运动的速度、法向载荷、润滑介质、环境温度与湿度等),且这些物理量连同摩擦力应能被准确地检测出来。测试的基本原理是,在摩擦运动中直接测量法向压力、摩擦力(或扭矩)和环境温度,然后用环境温度对前二者进行补偿修正,最后通过修正值计算出摩擦系数。

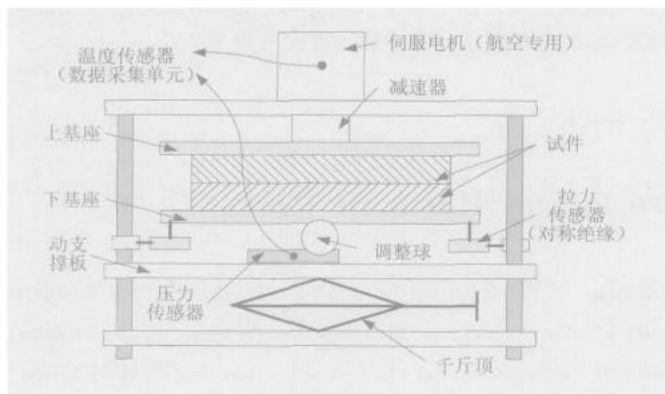


图1 摩擦系数测试台

文中设计的摩擦系数测试台具有图1所示的基本结构。测试件分别同上下基座紧固连接,法向载荷由可调节的千斤顶(1500kg规格)产生,并通过动支撑板、压力传感器、调整球和下基座传递施加。上基座设计为运动件,由伺服电机减速驱动;下基座为静止件,由一对拉力传感器提供平衡并施加旋转运动的切向约束。为减小伺服电机和减速器的轴向载荷,上基座与减速器之间用平面推力球轴承联接。在旋转摩擦运动中,调整球被上下球窝(曲率较小)约束,它在传递法向压力的同时,能动态调整自身在球窝中的支撑点以确保下基座工作时的平稳。

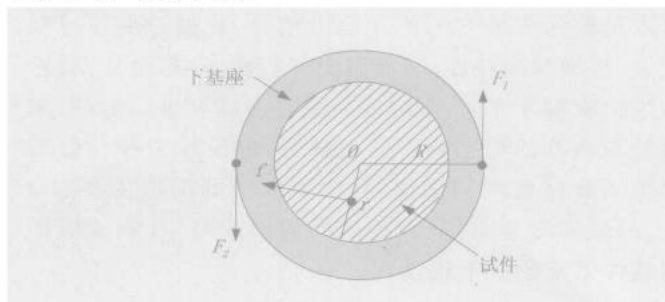


图2 试件摩擦受力分析

在摩擦测试中,试件承受的法向载荷由应变式压

力传感器测量;上下试件间的摩擦力由一对拉力传感器测得;接触电阻通过从上基座(经铂金炭刷,接触电阻 $\leq 0.01\Omega$)和下基座分别引线进行测量。此外,两个数字式温度传感器分别贴于压力传感器和伺服电机的表面,用于感测环境温度与电机温度,以实现力传感器的温度补偿和电机温度的实时监测。

参考图2,设试件为圆形(半径为 r),通过机械装配工艺保证与上下基座(半径为 R)同轴,摩擦力为切线方向且处处相等(除圆心 O 点外),则可认为总的摩擦力 f 作用在 $r/2$ 处。在上下基座发生匀速的相对转动时,有扭矩平衡方程:

$$f \cdot r/2 = (F_1 + F_2) \cdot R = T \quad (1)$$

则摩擦系数为:

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{2(F_1 + F_2) \cdot R}{N \cdot r} = \frac{2T}{N \cdot r} \quad (2)$$

式中: N 为去除重力和法向压力补偿值, F_1 和 F_2 为补偿后的拉力值。当试件非圆形时,只要能对称布置,也可参照上述方法进行测试。

3 力传感器的温度补偿

电阻应变式力传感器的误差主要有两类:非线性误差和温度误差^[3]。目前,产品化的应变式力传感器已对非线性误差进行了很好的修正,无须二次补偿。该类误差一般不随温度改变,修正后传感器的输出与载荷之间为良好的线性关系^[3~5],如图3所示。

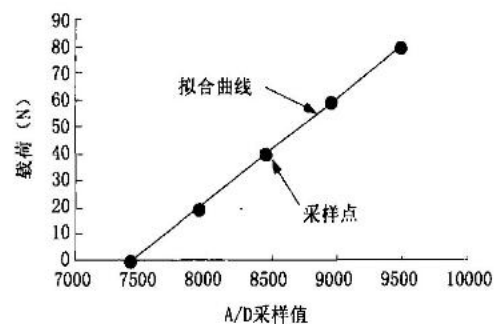


图3 常温下拉力传感器的输入输出特性

常规的大载荷压力或拉力传感器多采用电阻应变桥式结构,其输出随航空环境的高低温剧烈变化会发生严重漂移,并表现出较强的非线性,如图4所示。这一误差的产生有两个主要因素:(1)电阻的固有温度系数;(2)电阻丝与基座材料的线膨胀系数不一致。传统的修正补偿方法是通过材料、电路等物理手段进行自补偿或桥路补偿^[3]。

文中测试仪采用灵活的软件方法对力传感器进行温度补偿。具体的补偿与标定步骤概括为:

(1) 将传感器置于高低温箱中, 调节箱内温度 t , 采样零载荷时的输出值 S_0 。取 5~20 个特征测试点, 每个特征点的温度保持时间 $\geq 30\text{min}$ 。试验结果用 4 阶多项式拟合, 得到系数 $a_0 \sim a_4$:

$$S_0(t) = a_0t^4 + a_1t^3 + a_2t^2 + a_3t^1 + a_4 \quad (3)$$

其拟合曲线如图 4 所示。由 (3) 式可求出常温 ($t = 20^\circ\text{C}$) 下的零载荷采样值 $S_0(20)$ 。

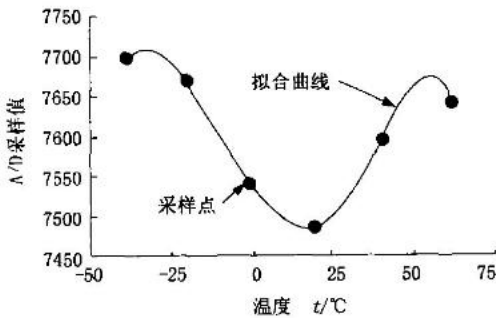


图 4 拉力传感器的输出与温度关系

(2) 在常温 ($t = 20^\circ\text{C}$) 下, 改变载荷 5~15 个点, 测出传感器输出值 x 相对于载荷的变化特性, 如图 3 所示。用最小二乘法进行线性拟合, 求出 K 与 B , 有:

$$y = Kx + B \quad (4)$$

(3) 在实际测试时, 设当前环境温度为 t , 传感器采样值为 S , 先将 S 修正折算到 $t = 20^\circ\text{C}$ 时的采样值 x , 即:

$$x = S + S_0(20) - S_0(t) \quad (5)$$

然后将 x 代入 (4) 式即可求出力的补偿值 y 。

为验证上述方法的有效性, 设计时又用标准砝码对力传感器加载, 并置于高低温环境下。待设定的温度稳定保持 30min 后, 采集传感器的输出并计算力的补偿值 y 。将补偿值与真实值进行比较, 所得相对误差全部低于 0.25%, 如压力传感器在 $10\text{kg}/-49.7^\circ\text{C}$ 的相对误差为 0.173%, 拉力传感器在 $5\text{kg}/+99.0^\circ\text{C}$ 的相对误差为 0.219%。

4 测试硬件与软件的抗干扰设计

力传感器的输出信号一般为毫伏级, 在放大、转换和传输过程中极易受到外部干扰, 故应从硬件和软件两方面对整个测试系统进行抗干扰设计^[6]。

4.1 数据采集硬件系统设计

文中测试仪的数据采集硬件结构如图 5 所示。其中的数据采集单元 (DAU, data acquisition unit) 是一个小型的嵌入式 (Embedded) 测控前端^[7], 用于四路模拟信号 (1 路压力、2 路压力、1 路接触电阻) 和 2 路数

字信号 (环境温度与电机温度) 的实时采集与传输。所有被采集数据的补偿、滤波、处理及显示由上位 PC 完成。采用这一体系结构有利于硬件与软件的模块化, 提高整个系统的抗干扰能力。

在 DAU 中, A/D 选用 Cirrus Logic 公司的新型 4 通道 24-bit 高精度 $\Delta-\Sigma$ 模数转换器 CS5524。其内部集成了一套斩波稳定仪表放大器和可编程增益放大器 (PGA), 可接收 $25\text{mV}/55\text{mV}/100\text{mV}/1\text{V}/2.5\text{V}/5\text{V}$ 等输入信号范围。这样, 由恒流源激励的三个力传感器和接触电阻的输出信号可被 CS5524 直接采样, 省掉了传统的信号放大与调理环节, 极大地抑制了外部干扰。温度测量选用 Dallas 的数字式温度传感器 ($\pm 0.5^\circ\text{C}$ 精度), 采样后的数据经 1-Wire 串行总线直接送入微控制器 (MCU), 提高了温度采集的可靠性。

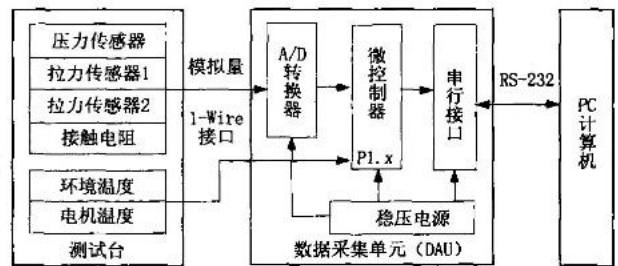


图 5 数据采集硬件系统结构

除此之外, 该测试仪还采取一系列有效的抗干扰措施, 如: 传感器输出的模拟信号采用耐高低温屏蔽线传输; 每个传感器通道由独立的低噪声高精度稳压电源模块供电; DAU 尽可能地靠近传感器, 以缩短模拟信号的传输距离; DAU 与 PC 之间通过隔离的 RS232 总线进行数字信号传输等。

在实际测试中, 测试台工作于高低温控制箱内, DAU 固定在箱体外部, 处于 $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ 的工业温度下, 因而工作稳定可靠。

4.2 测试软件系统设计

与硬件结构相对应, 摩擦系数测试仪的软件系统分为 DAU 软件与上位 PC 测试软件两个部分。二者之间的数据通信基于主从查询模式: PC 定期向 DAU 发出主动的数据请求, DAU 收到后立即将最新的采集数据发送给 PC, 由此完成一次通信。在波特率 9600bps 下, 测试仪的综合采样与通信速率不低于 10 次/秒, 完全满足了系统实时性要求。

DAU 中的数据采集采用循环扫描方式, 6 路信号的扫描周期 $\leq 10\text{ms}$; 数据的传送取决于 PC 软件的周期刷新请求。在软件控制上, MCU 先对各部件和端口进行初始化, 然后开辟一个数据预备区, 用于保存最新

采集的数据。当有PC发出请求时,MCU即将该区的数据顺序发送出去。

PC软件运行于Windows 2K/XP平台,采用C++ Builder^[8]开发。其主要的软件功能模块包括:

(1)基本数据库的配置。包括前述6个被测物理量的名称、修正补偿系数($a_0 \sim a_4$ 和 $K、B$)、上下限幅、报警幅值、工程单位等参数的配置。

(2)实时数据采集。开始试验后,PC软件系统立即启动一个数据采集线程^[8]。该采集线程定时向DAU发送数据请求,待接收到DAU的返回数据后,利用基本数据库对原始采样数据进行转换、滤波和修正,然后存入测试数据库。

(3)动态数据显示。采集线程完成一次数据采集后,即通知主线程以数值和曲线的形式动态显示补偿后的被测物理量和摩擦系数。

(4)越限报警。当电机温度等物理量越限时,通过指示灯、数值变色闪烁等方式进行报警。

(5)报表生成与打印。主要内容有:项目名称、测试类型、试件名称、操作人、采集速率、开始与结束时间、备注、特征测试数据与计算结果等。

(6)系统设置。包括用户口令、通信配置、测试定时等参数的设置。

图6所示的人机界面是某旋转密封件摩擦系数的测试实例。试件摩擦运动的转速从5~900r/min规律变化,载荷从100~500N分档设置,温度在-45~+110℃内定点变化,每个温度点保持30min以上,数据采集频率 ≥ 5 次/秒,全部测试时间 ≥ 8 h。

5 结 论

基于自行设计的摩擦系数测试台、力传感器的温度补偿以及数据采集硬件与软件的抗干扰设计,本测试仪实现了摩擦系数在高低温环境下的高精度测试。大量的试验结果表明:在整个高低温段内,摩擦系数与接触电阻的综合测试准确度优于1%。目前,该测试仪已被国内某大型研究单位用于相关航空产品在高低温

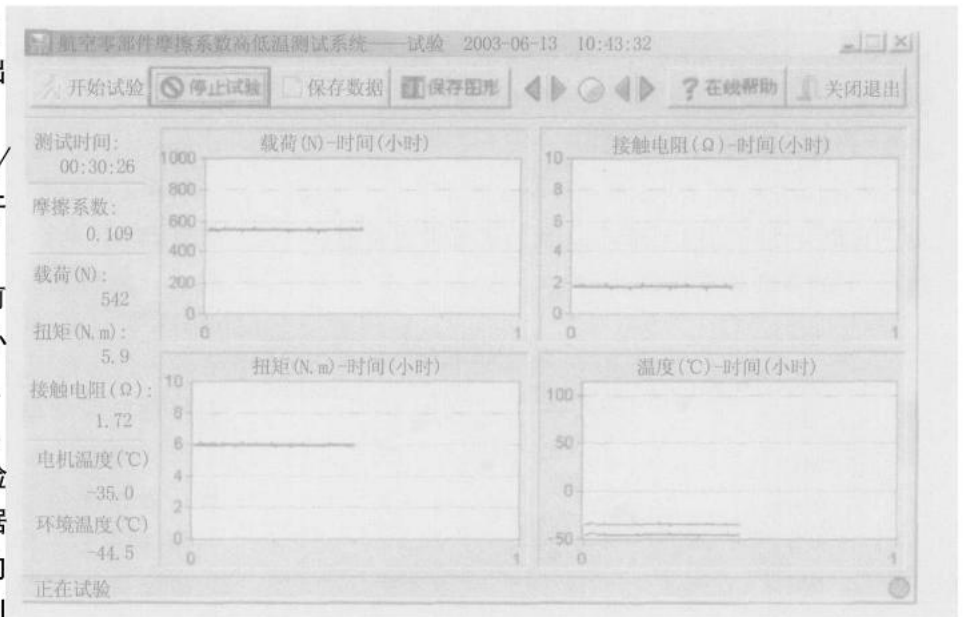


图6 摩擦系数测试仪的PC软件人机界面

环境下的摩擦系数与接触电阻测试,为系列产品的研发和更新提供了强有力的支持。

参考文献

- 1 张双科,吴晓春 MM-200摩擦磨损试验机摩擦系数动态测试系统的实现[J] 理化检验(物理分册),2003,39(2).
- 2 陈兆荣,陆成东,钟扬扬,等 钢丝绳摩擦传动摩擦系数的动态测试[J] 昆明理工大学学报,1995,20(5).
- 3 单成祥 传感器的理论与设计基础及其应用[M] 北京:国防工业出版社,1999 97~111.
- 4 陶宝祺 电阻应变式传感器[M] 北京:国防工业出版社,1993.
- 5 王志敏 压力传感器的温度补偿[J] 自动化与仪表,2002,17(3).
- 6 孙传友,孙晓斌,汉泽西 测控系统原理与设计[M] 北京:北京航空航天大学出版社,2002 198~243.
- 7 申睿,赵伟 嵌入式系统及其在测量领域的应用[J] 电测与仪表,2003,40(9).
- 8 Jarrod Hollingworth. C++ Builder 5 程序设计大全[M] 北京:机械工业出版社,2002.

作者简介

杨忠 男 1969年生 副教授 博士后 主要研究方向为计算机测控 飞行控制 工业过程控制 智能故障诊断等

E-mail: YangZhong@nuaa.edu.cn