

提升风洞测力数据采集系统电磁兼容能力初步研究

阎 成, 邓晓曼, 贾 霜, 陈海峰, 马列波

(中国空气动力研究与发展中心 高速空气动力研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 随着风洞试验技术的不断进步, 风洞现场的电磁设备越来越多, 电磁干扰对风洞测力试验数据的准确性可靠性带来了挑战; 研究风洞测力数据采集系统电磁兼容问题是有效解决电磁干扰保障测力试验顺利进行的前提, 是提高风洞试验精度、改善测量数据质量、提升试验能力的重要手段; 文章以某主力风洞测力数据采集系统为研究对象, 从电磁干扰途径和自身电磁敏感度两个方面对采集系统进行了电磁兼容分析, 并结合分析结果通过采取合理有效的电磁兼容措施, 提高了风洞测力数据采集系统抗电磁干扰能力, 确保了测力试验数据质量的可靠性和稳定性。

关键词: 风洞; 数据采集; 电磁兼容; 电磁干扰

A Preliminary Study on Improving EMC Capability for Force Measured Data Acquisition System in Wind Tunnel

Yan Cheng, Deng Xiaoman, Jia Shuang, Chen Haifeng, Ma Liebo

(China Aerodynamics Research and Development Center, high speed Aerodynamics institute, Mianyang 621000, China)

Abstract: With more application of electromagnetic equipments in wind tunnel, electromagnetic interference has seriously affected the accuracy and reliability of force experiments. The research about electromagnetic compatible of force measured data acquisition system can solve the problems of electromagnetic interference, make tests go smoothly. The force measured data acquisition system of wind tunnel was studied as the research object in the paper. With the help of analyzing the electromagnetic sensitivity of the system and the way of electromagnetic interference, some reasonable steps were taken. In the result, the force measured data acquisition system's capability of anti-electromagnetic interference was improved, the reliability and stability of the test data were ensured.

Keywords: wind tunnel; data acquisition; electromagnetic compatible; electromagnetic interference

0 引言

在风洞中用天平测量模型所受气动载荷的试验称为风洞测力试验。风洞测力数据采集系统是完成测力试验的重要系统组成, 由天平、传感器、放大器、数采设备等构成。在风洞试验过程中, 天平把力和力矩物理量, 传感器把压力、温度等物理量转化成电信号, 再由数采设备对经过放大器的电信号进行实时采集, 完成相关试验参数的原始数据保存、计算处理和试验数据的实时显示。在试验过程中, 测力数据采集系统自身的稳定性、可靠性和抗外界干扰的能力是试验数据质量的基本保证。

随着风洞试验技术的不断发展, 越来越多的电气驱动装置应用于风洞试验, 对测力数据采集系统带来了电磁干扰, 直接影响了试验数据的可靠性和稳定性, 严重时导致试验报废。因此, 提高测力数据采集系统的电磁兼容能力成为保障试验数据质量的关键之一。

电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, EMC) 是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力^[1], 简言之, 就是

指电子、电气设备共处一个环境中能互不干扰、兼容工作的能力。

本文以中心某主力风洞的测力数据采集系统为研究对象, 开展了提高系统电磁兼容能力课题研究, 并取得了一定成效。

1 测力数据采集系统概况

中心某主力风洞测力数据采集系统由传感器、天平、放大器、VXI 数采设备、测量计算机和配套电源、线缆等组成。该数采系统具有以下特点:

- 1) 系统精度高: 放大器、数采设备精度均优于 0.05%;
- 2) 天平、传感器输出信号为模拟直流电压信号, 且信号幅值低: 压力传感器输出为 0~5 V 直流电平信号, 天平输出为毫伏级直流电平信号;
- 3) 系统设备设置分散: 传感器、天平分别设置在稳定段、试验段, 放大器设置在试验大厅, VXI 数采设备、测量计算机设置在测控间;
- 4) 信号线路传输距离远: 天平、传感器到 VXI 数采设备之间的信号线缆长度超过 10 米。

由于风洞试验现场电磁环境复杂, 系统极易受到电磁干扰从而影响试验数据质量。

收稿日期: 2019-06-01; 修回日期: 2019-06-14。

作者简介: 阎 成(1973-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 主要从事风洞测量与控制方向的研究。

2 数据采集系统电磁兼容性分析

电磁兼容包括两个方面的含义: 一是电子设备或系统内部的各个部件和子系统、一个系统内部的各台设备乃至相邻几个系统, 在它们自己所产生的电磁环境及在它们所处的外界电磁环境中, 能按原设计要求正常运行。设备或系统均具有一定的电磁敏感度, 电磁敏感度越高, 设备或系统的电磁抗扰度越低, 越容易受到电磁干扰。二是该设备或系统自己产生的电磁噪声必须被限制在一定的电平, 使由它所造成的电磁干扰不对它周围的电磁环境造成严重的污染和影响其他设备或系统的正常运行。

从风洞运行实际看, 测力数据采集系统是被干扰对象, 因此测力数据采集系统电磁兼容研究主要目的是提高系统自身的抗电磁干扰能力。

2.1 电磁敏感度测试

在风洞测力数据采集系统中, 放大器和天平是其重要组成部分, 由于设置在试验现场大厅, 直接处于恶劣的电磁环境中, 因此放大器和天平的电磁敏感度直接反映了系统整体电磁敏感度。为此, 课题组在陕西海泰电子有限公司电磁兼容实验室对风洞所用的 70 A 放大器和 47 A 天平进行了电磁敏感度测试。

2.1.1 测试方案

电磁敏感度 (EMS) 测试根据耦合方式的不同分为传导敏感度 (Conducted Susceptibility, CS) 测试和辐射敏感度 (Radiated Susceptibility, RS) 测试两种。传导敏感度是指当引起设备不希望有的响应或造成其性能降级时, 对在电源、控制或信号引线上的干扰信号电流或电压的度量。辐射敏感度是指对造成设备降级的辐射干扰场的度量。国军标 GJB 151A—1997 (《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求》) 和 GJB 152A—1997 (《军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》)^[5] 对电磁敏感度 (EMS) 测试的要求和测量方式进行了明确规定。按照军标, 电磁敏感度 (EMS) 测试包含 12 项测试内容, 其中传导敏感度测试分为: CS101 (25 Hz~50 kHz 电源线传导敏感度)、CS103 (15 kHz~10 GHz 天线端子互调传导敏感度)、CS104 (25 Hz~20 GHz 天线端子无用信号抑制传导敏感度)、CS105 (25 Hz~20 GHz 天线端子交调传导敏感度)、CS106 (电源线尖峰信号传导敏感度)、CS109 (50 Hz~100 kHz 壳体电流传导敏感度)、CS114 (10 kHz~400 MHz 壳体电流传导敏感度)、CS115 (电缆束注入脉冲激励电流传导敏感度) 和 CS116 (10 kHz~100 MHz 电缆和电源线阻尼正弦瞬变传导敏感度) 9 项, 辐射敏感度测试分为: RS101 (25 Hz~100 kHz 磁场辐射敏感度)、RS103 (10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度) 和 RS105 (瞬变电磁场辐射敏感度) 3 项。

根据放大器和天平在风洞试验中的用途和实际使用工况, 结合军标规定的敏感度测试项, 最终确定主要进行四个测试项, 分别是 RS101 (25 Hz~100 kHz 磁场辐射敏感度)、RS103 (10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度)、CS101

(25 Hz~50 kHz 电源线传导敏感度) 和 CS106 (电源线尖峰信号传导敏感度) 测试。

测试过程是在确认数采系统正常工作条件下, 由海泰电磁兼容实验室参照《GJB 152A—1997 军用设备和分系统电磁发射和敏感度测量》中相关测试项方法对数采系统施加干扰, 当数采系统读数发生跳变时, 记录相关测试参数。考虑到放大器与天平属于敏感设备, 为保护其在测试过程中不受到损毁, 故测试过程中施加的干扰幅值有时会小于标准规定值。

2.1.2 受测试设备

受测设备为风洞用太平洋 70 A 放大器以及 47 A 天平。配置笔记本、HTLX4387B 多功能数据采集仪和 DH1718D-4 双路跟踪直流稳压稳流电源组成了一个完整的被测数据采集系统, 如图 1 所示, 其中天平、放大器、信号线缆及供电电源线组成被测试件 (Equipment Under Test, EUT)。

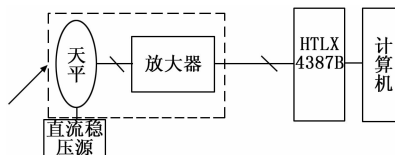


图 1 被测数据采集系统框图

测试过程中, 放大器放大倍数为 200 倍, 选用 1Hz 进行滤波, 数据处理时, 每个通道读数除以 200 倍。天平由铝制保护罩保护, 尾部导线长约 3 米, 共 24 根。所有导线采用热缩管包裹, 热缩管外部无屏蔽层, 导线尾部连接 19 芯标准插件。从 19 芯标准插件至放大器的 6 组通道线均为屏蔽双绞线, 放大器输出至 HTLX4387B 多功能数据采集仪信号线也采用屏蔽双绞线。图 2 为 EUT 线缆连接示意图。

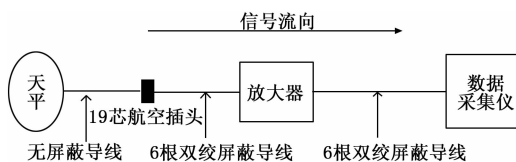


图 2 EUT 线缆连接示意图

2.1.3 测试结果

电磁敏感度测试结果如下:

1) 放大器与天平对由电源线耦合进的传导型干扰敏感度较高。在所进行的传导敏感度测试项目中, 放大器与天平均出现了不同程度的敏感现象。

2) 放大器和天平对于 25 Hz~100 kHz 磁场辐射敏感度较低。

3) 放大器和天平对于 10 kHz~40 GHz 电场辐射敏感度值约为 2 V/m。

2.2 现场电磁环境测试

电磁干扰有 3 个要素, 即: 骚扰源、传输途径及敏感设备^[2]。构成一个电磁干扰现象的产生必需同时具备上述 3 个要素。从对干扰发生的时机和现象分析, 基本明确干扰

源为现场的某伺服驱动装置。因此,进行现场电磁环境测试的主要目的是明确干扰耦合进数据采集系统的传输途径。

2.2.1 测试方案

分别在以下 3 个工作状态下,利用电流探头、手持式天线和频谱分析仪对数据采集系统附近电磁干扰和其供电电源线缆传导干扰情况进行测试。

工作状态 1:断开伺服驱动装置电源,数据采集系统运行。在此工况下进行传导测试与辐射测试,同时数据采集系统连续采集并记录 60s 时长的天平、压力传感器数据;

工作状态 2:仅给伺服驱动装置上电,但未使能,数据采集系统运行。在此工况下进行传导测试与辐射测试,同时数据采集系统连续采集并记录 60s 时长的天平、压力传感器数据;

工作状态 3:伺服驱动装置使能,数据采集系统运行。在此工况下进行传导测试与辐射测试,同时数据采集系统连续采集并记录 60s 时长的天平、压力传感器数据。

2.2.2 测试结果

1. 数据采集系统附近的伺服驱动装置是干扰源,其在上电使能状态下对数据采集系统产生电磁干扰。

2. 电磁干扰主要以传导方式通过电源线、信号线耦合进入数据采集系统。

3. 放大器柜、天平机柜处电场强度远低于 2 V/m。

3 改进措施及效果

要解决电磁兼容性问题,就得针对电磁干扰 3 个要素进行处理,即抑制骚扰源、切断传输途径或提高敏感设备抗扰能力^[8]。根据测试结果,课题组着重从传输途径进行改进^[6]。

电磁干扰的传输途径有两条,即通过导线传导和通过空间辐射^[1,3]。导线传导,是指电磁干扰通过信号线、地线、电源线等各种线路传入系统。本文中涉及的测力数据采集系统由导线传导进入的干扰主要包含供电电网噪声干扰、大功率电器设备产生的高次谐波等。空间辐射传导,是指电磁干扰通过空间感应进入系统,包括磁场辐射干扰、电场辐射干扰等辐射干扰。本文中涉及的测力数据采集系统由空间辐射传导进入的干扰主要是大功率电器设备运行时产生的电场、磁场辐射等。

3.1 采取的改进措施

根据对电磁干扰传输途径和设备电磁敏感度的分析及测试结果,对数采系统采取了以下改进措施。

3.1.1 提高系统电能质量

消除或减弱通过电源线路传导到系统电源的噪声,在系统供电电源接入端配置超级隔离变压器,其结构示意图如图 3 所示。

从图中可以看出,超级隔离变压器的初级和次级绕组分别安装在各自的法拉第屏

蔽盒内,屏蔽盒既不能短路又要有良好的接地。另外,在超级隔离变压器初级与次级线圈之间又插进“磁场屏蔽板”,专门用来隔离初级与次级线圈之间的泄漏电感,以防

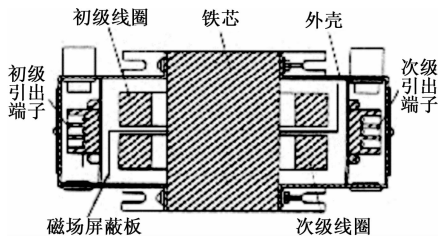


图 3 超级隔离变压器结构示意图

止泄漏电感将初级这一侧的干扰感应至次级这一侧。因此,超级隔离变压器可以实现设备间的电气隔离,消除电源传导而来的噪声,同时还兼有抗共模和差模干扰的能力^[3]。系统供电按照超级隔离变压器、UPS 和交流稳压器的顺序接入数据采集系统。

3.1.2 改善系统接地

测力数据采集系统主要由 70 A 放大器和 VXI 数采设备组成,设备是通过电源地线方式接地,整个数据采集系统没有独立的测控接地装置。而可靠接地是常用的抗干扰措施^[1,4]:

- 1) 制作测控系统接地装置,并确保接地电阻小于 0.4 Ω ;
- 2) 系统各设备采用单点并连接地方式;
- 3) 改进超级隔离变压器接地方式。单相超级隔离变压器接线示意图如图 4 所示。

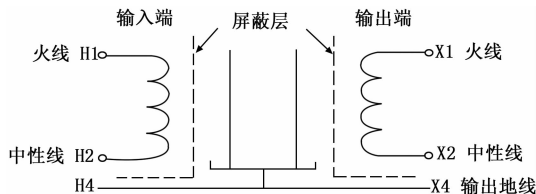


图 4 单相超级隔离变压器接线示意图

风洞的低压配电系统采用的是 TN-C 制式,即中性线与保护导体合一。TN-C 系统中用电设备外壳与中线 N 搭接,从而整个供配电系统中线多点重复接地^[7,9]。因此这种接线方式导致隔离变压器未起到隔离地环路的作用,输入端的电源噪声依然可以通过 H4 与 X4 之间的路径传导到隔离变压器的输出端。因此,在改善系统测控接地基础上,课题组对超级隔离变压器的接线方式进行了改进,如图 5 所示。这样就彻底隔断了输入端电源的噪声传导路径,提高了进入数据采集系统的电能品质。

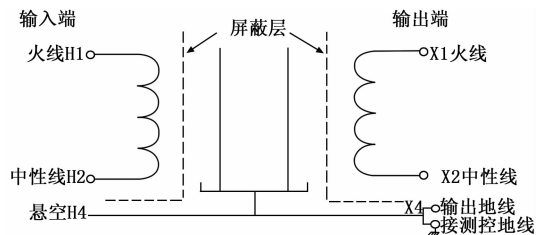


图 5 改进后的单相超级隔离变压器接线示意图

3.1.3 安装电源滤波器

电源滤波器是安插在电源和设备之间的一个专门用来抑制传导电磁骚扰的器件。它的作用实际上是双向性的,既能有效阻止外界的电磁干扰经电源线进入设备,又能阻挡设备自身工作中产生的电磁骚扰经电源线进入电网,传送到其它敏感设备。

针对实际情况,在放大器、天平直流稳压电源和数采设备供电入口处安装了单相交流滤波器,抑制电磁干扰通过电源线窜入数据采集系统。

安装电源滤波器时要特别注意:

1) 应选用带金属外壳的滤波器。滤波器应尽量安装在机柜进线入口处,不允许输入电源线过长,避免该线辐射噪声。

2) 滤波器必须良好接地。对于金属外壳的滤波器,不宜以单根导线接地,而要通过滤波器外壳与设备作大面积导电性连接方式接地,然后设备机箱再以粗而短的导线与大地连接。

3) 滤波器的输入与输出线要最大限度的相互隔离,不能靠近和并行走线,更不能捆扎在一起。

3.1.4 改进天平信号线缆接线方式

天平信号是毫伏量级的微弱信号,本身极易受到电磁干扰。图 6 为原天平接线示意图。原天平信号线为 24 芯屏蔽电缆,长度较长(约 10 米),其中 70% 的线路布置在现场。在天平信号进入放大器之前,天平信号线分别经过天平柜内两次转接以及放大器柜一次转接。

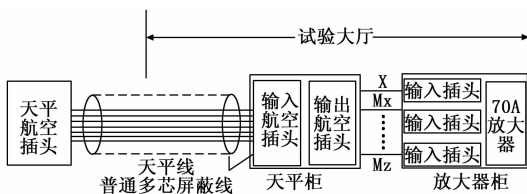


图 6 风洞天平输出线路接线示意图

从电磁兼容角度看,天平信号进入放大器的信号传输路径上存在如下问题:

1) 信号传输线路转接点多。由于天平信号为毫伏级的微弱模拟信号,对信号线路的可靠性要求很高。而实际上整个信号传输线路存在 3 处转接,大大降低了信号传输的可靠性,为电磁干扰进入信号传输线路提供了可能。

2) 信号线屏蔽层不完整。由电磁屏蔽原理可知,屏蔽线要达到较好的电磁屏蔽效果,必须保证屏蔽层的完整性。实际上,天平线在进入天平柜转接后,由于未处理好航空插头之间的屏蔽连接,破坏了整个信号线路屏蔽层的完整性。

3) 未采用合适的线缆作为天平信号线。由于有 70% 长度的天平线布置在试验大厅中,而其中一台大功率伺服电机就安装在天平柜上方 2 米处。而现场采用多芯单屏蔽线作为天平线,其抗电磁干扰的能力并不满足实际工况需求。因此,虽然现场电场强度远低于 2 V/m,但伺服电机产生

得电磁辐射依然不可避免的会通过屏蔽缺损处耦合至天平线缆,从而对天平信号产生干扰。

针对以上几点不足,课题组遵循电磁兼容原则,综合应用接地、屏蔽原理,采取了以下措施改进了天平接线方式,图 7 为改进后天平接线示意图:

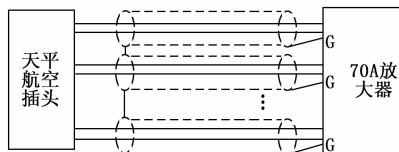


图 7 改进后的天平输出线路接线示意图

1) 采用多芯屏蔽双绞线作为天平信号线。双绞线是进行磁场屏蔽的重要手段,既可以用在主动磁场屏蔽,又可用在被动磁场屏蔽。而且增加双绞线单位长度的绞合能提高绞合线的自屏蔽效能。此外,双绞线外的金属屏蔽层既有电磁屏蔽作用又可实现电场屏蔽。

2) 减少天平信号传输中的转接环节。改进后,天平信号从风洞洞内 19 芯航空插头直接经由屏蔽双绞线接入 70A 放大器,减少了中间转接环节,既保证了线路的可靠性,又确保了信号传输路径屏蔽层的完整性,提高了电磁屏蔽效能。

3) 规范屏蔽层接地方式。由于属于低频电路,因此采用单端接地,屏蔽电缆的屏蔽层也单端接地,如图 8 所示。

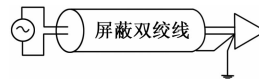


图 8 屏蔽层接地方式

3.2 改进后效果

通过改进,风洞测力数据采集系统在复杂电磁环境工况下运行的稳定性大幅提高。表 1 为在某大功率伺服驱动设备使能/未使能状态下,对 47 A 天平放大 200 倍后进行 150 秒的连续采集数据。从表中数据结果可以看出,天平各元在放大 200 倍后的最大波动量均小于 1 mV。

表 1 47 A 天平信号放大 200 倍 150 秒连续采集数据 mV

天平分量	伺服驱动器状态					
	使能状态			未使能状态		
	最大值	最小值	差量	最大值	最小值	差量
Y	617.3096	617.0654	0.2442	617.7979	617.4316	0.3663
Mz	63.3545	62.9883	0.3662	63.5986	63.2324	0.3662
X	-260.132	-260.498	0.366	-260.01	-260.376	0.3662
Mx	41.9922	41.626	0.3662	41.5039	41.1377	0.3662
Z	302.2461	301.8799	0.3662	302.8564	302.3682	0.4882
My	842.2852	841.9189	0.3663	842.7734	842.4072	0.3662

表 2 为在某大功率伺服驱动设备使能状态和未使能状态下对 47A 天平进行加载的结果。从表中可以看出加载误差小于 0.3%,满足试验要求。