

火箭发动机测试系统热电偶通路抗干扰技术

刘超¹, 冯斌², 王立欣¹, 张近民¹

(1 哈尔滨工业大学 电气工程及其自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2 北京航天试验技术研究所, 北京 100074)

摘 要: 热电偶温度采集通道是火箭发动机测试系统中重要的一部分, 研究其抗扰技术有助于提高整个系统的电磁兼容性能。介绍了热电偶温度采集通路的系统结构, 分析了通路中容易受干扰的部位。并针对热电偶通路中比较容易受到的 EFT 干扰提出了混合接地策略、加入 EMI 滤波器和线性光耦隔离模块等三种有效的抑制措施。最后, 对热电偶通路中一些通用的抗干扰措施及需要注意的事项进行了论述。通过应用这些抗干扰措施, 提高了整个系统抗扰度的作用。

关键词: 热电偶通路; 混合接地; EMI 滤波器; 隔离模块

中图分类号: V416.6

文献标识码: A

文章编号: (2009) 03-0055-06

The anti-interference technology of thermocouple channel used in rocket engine test system

Liu Chao¹, Feng Bin², Wang Lixin¹, Zhang Jinmin¹

(1 School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2 Beijing Aerospace Test Technology Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: The thermocouple data collection channel, used for temperature measuring, is an important part of rocket engine test system. Researching its immunity technology is helpful to improve the electromagnetic compatibility of the whole system. The structure of the thermocouple data collection channel, the analyses on the sensitive points of the channel are introduced in this paper. The generating mechanism and characteristic of EFT interference which is easily coupled into the thermocouple channel are also presented in this paper. Three methods including mixed-ground, adding EMI filter, adding isolation module, are used to reduce the intensity of core-wired coupling EFT interference, and the system anti-interference capability is improved. At last, some other anti-interfer-

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-04-20。

作者简介: 刘超 (1982—), 男, 博士, 研究领域为电磁兼容。

ence measures and attention points are also introduced. All of these provide some valuable references for anti-interference design of thermocouple channel.

Key words: thermocouple channel; mix-earth; EMI filter; isolation module

0 引言

随着新技术、新材料在火箭发动机上的应用，作为衡量其性能的体系——火箭发动机测试系统也变得更加重要。测试系统的主要功能是对火箭发动机的温度、压力、推力及振动等参数进行采集，并通过对采集到的数据进行分析计算，得到一系列对火箭发动机性能的评价。热电偶温度采集通路是测试系统中重要的一部分。传统的测试系统中热电偶通路由于受到外界干扰的影响，测量精度较低，不能满足越来越高的测试要求。所以研究火箭发动机测试系统的热电偶通路抗干扰技术就显得愈加重要。

1 系统介绍及所受干扰分析

1.1 系统介绍

火箭发动机测试系统热电偶数据采集通路的原理如图 1 所示^[1]。

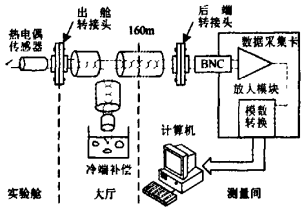


图 1 热电偶数据采集通道系统框图

Fig.1 Block diagram of thermocouple data collection channels

前端热电偶对实验舱内各关键点的温度进行测量，将温度转化成电压信号后经出舱转接头由电缆向后传输。出舱后，还需经过温度补偿模块对所采样的温度信号进行校正。再将现场信号经

双绞屏蔽电缆进行 160m 长距离的信号传输，传回测量间内。再经后端转接头将这一电压信号传入数据采集卡内，经放大、模数转换等环节后将其转化为可供计算机识别的数字信号进行软件处理，从而得到该点实时的温度信号。

1.2 系统所受干扰分析

根据前面的介绍，可知实验舱内部各点温度信号是通过热电偶采集的。而热电偶输出的电压信号通常比较低，只有毫伏量级。这样一个小电压信号在长距离传输过程中非常容易受到外界的干扰，引入不必要的误差，从而对温度信号的测量结果产生影响。通过现场考察得知，容易受到干扰的几处敏感点为：

- (1) 传感器头部芯材裸露部分；
- (2) 长距离传输过程中的电缆；
- (3) 数据采集卡的输入端。

在现场实测过程中发现，实际干扰类型主要以 EFT 干扰为主。所谓 EFT 干扰，是指电快速脉冲群干扰（electrical fast transient），在实际系统中它是由电力电子设备，如开关电源、发电机、电动机、继电器等，在启动和关闭过程中，感性负载所产生的感应电磁能量由于没有泄放通路，击穿空气，产生的一个由电场和磁场共同组成的复杂干扰。由于这种干扰的频谱范围很宽，一般为 0~100MHz，瞬间的电磁能量大，一般可从几伏到几十伏，所以这种类型的干扰对系统的危害是比较大的^[2]。对于火箭发动机测试系统这样一个要求测量精度比较高的场合，这种干扰能够引起采样系统某些采样点严重偏离真实值，影响测量精度。在某些特殊的测量点，由于测量值偏差过大，将导致控制开关误动作，影响整个测试系统正常工作。所以研究如何抑制 EFT 干扰，是抑制火箭发动机测试系统干扰的一个十分重要的方面。

2 接地

在信号传输过程中, 电缆屏蔽层接地形式与接地点的选择将影响到屏蔽效果的好坏, 从而影响整个火箭发动机测试系统测量的精确度。传统的对于电缆屏蔽层接地形式的描述为: 当传输低频信号时, 屏蔽层采用单点接地, 当传输高频信号时, 屏蔽层采用双端接地^[9]。这一描述, 对信号通路中既有低频成分干扰又有高频成分干扰的情况就不再适用了。

热电偶温度采集通道正是这样一个情况。所以在考虑屏蔽层接地时不能简单的采用单端接地或双端接地。为解决这一问题, 采用了混合接地的策略, 即电缆屏蔽层前端直接接地, 后端通过一个较小的电容在采集板上接地。前面提到了 EFT 干扰是由电场和磁场共同组成的一种比较复杂的干扰。对于电场耦合进来的干扰, 屏蔽层采用单端接地即可很好的实现屏蔽作用, 采用混合接地不会影响其接地效果, 但注意要尽量缩短电缆两端裸露在外面的芯线长度, 其目的是减小芯线与干扰源之间的等效寄生电容, 减小耦合进电缆芯线上的电场能量。此外还要尽量缩短屏蔽层与地线连接线之间的长度, 以避免猪尾效应。而

对磁场耦合进来的干扰, 频率较高时, 由于后端接地电容容抗减小, 相当于形成了一个屏蔽层电流回路, 在屏蔽层上产生一个感应电流, 这一电流又形成与干扰磁场相反的磁场, 抑制了耦合进芯线上的磁场能量, 达到比较好的屏蔽效果。而且, 混合接地还避免了在低频范围内由于双端接地产生的地线回路引起的附加干扰。起到了一举两得的作用。

为验证混合接地的有效性, 进行了实验, 采用 EFT 发生器向电缆内耦合干扰。在触发电平设置相同的情况下, 采用泰克公司的 TCP312 型电流探头对电缆屏蔽层及芯线上的 EFT 干扰响应电流进行测量, 对所得到的电流波形进行频谱分析。如图 2 所示, 为单点接地与混合接地对 EFT 干扰的电流响应对比波形图。

如图 2 (a)所示, 为单端接地时屏蔽层上感应出来的电流波形。2(b)中为采用混合接地时屏蔽层上感应出来的电流波形。可以看出当单端接地时, EFT 干扰中 5MHz 高频磁场成分没有耦合到屏蔽层上, 而是直接穿透屏蔽层进入到了芯线中。而如图 2(c)、2(d)所示, 采用混合接地时, 这一干扰频率出现在电缆屏蔽层上, 而没有耦合进芯线中。可见混合接地对于高频磁场干扰起到了比较好的抑制效果, 验证了前面分析的正确性。

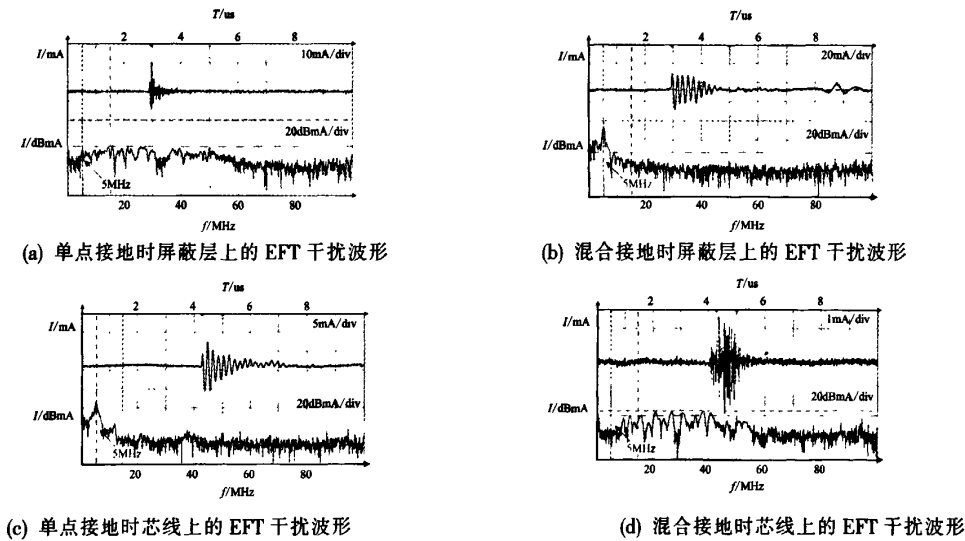


图 2 两种接地方式电缆屏蔽层电流、芯线电流对比图
Fig.2 Shield and core-wire current comparison of two grounding modes

表 1 中记录了 120 秒内不同接地形式条件下, 相同触发电平时, 电缆屏蔽层和芯线电流的峰峰值和出现的次数, 四种情况下采样时的触发电平均设置为 2.5mA。

表 1 两种不同接地方式引入干扰对比

Tab.1 Introducing interference comparison between two grounding modes

	位置	峰峰值平均值/mA	次数
单点接地	屏蔽层	22.4	47
	芯线	11.6	145
混合接地	屏蔽层	30.5	158
	芯线	4.6	83

为更好地说明问题, 引入电流强度的概念, 即将单位时间内的产生干扰电流峰峰值的平均值乘以单位时间内感应出来的干扰次数。它反映了单位时间内耦合进热电偶通道的干扰电流大小。将表中的数据绘制到图 3 中, 可以更直观地看到, 采用混合接地时, 单位时间内耦合到电缆屏蔽层上的干扰电流增大为单点接地时的 4.58 倍, 而耦合进电缆芯线的干扰电流强度下降了 77.3%, 屏蔽层可以起到更好的屏蔽作用, 而芯线受到的干扰大大减小。实验结论说明, 混合接地更适用于既有高频成分干扰又有低频成分干扰的场合。

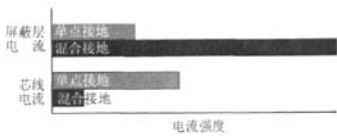


图 3 电流强度对比图

Fig.3 Comparison of current intensity

3 滤波和隔离

3.1 滤波

在采用了混合接地模式的基础上, 在采集卡入口处增加了 EMI 信号滤波器^[9], 其结构如图 4 所示。图中由 Ld1、Ld2、Cd1、Cd2 构成差模信号

滤波通路, 对平衡电缆上的差模干扰进行滤除。而由 Lc、Cc1、Cc2 组成的共模信号滤波通路则主要对平衡电缆上的共模干扰进行滤除。该滤波器进一步减小了 EFT 干扰的耦合程度。

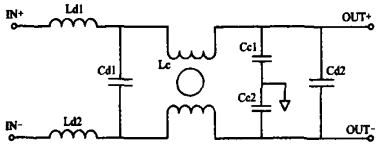
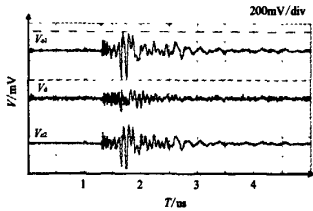


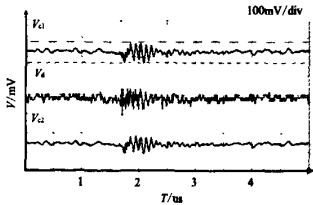
图 4 EMI 滤波器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of EMI filter

图 5 (a)所示, 为加入滤波器之前采集卡输入端的差模、共模电压信号。可以看出干扰信号的差模峰峰值为 119mV, 共模信号干扰峰峰值可达到 400mV~500mV。经过滤波器滤波后, 可以从图 5 (b)看到, 干扰信号的差模峰峰值降到了 28.2mV, 而共模信号干扰的峰峰值也降到了 100mV 量级。差模干扰信号减小了 76.3%, 共模信号减小了 75%左右。所以, EMI 滤波器对 EFT 干扰有明显的抑制作用。



(a) 加入信号滤波器之前的波形图



(b) 加入信号滤波器之后的波形图

图 5 加入 EMI 滤波器前后的电压波形对比图

Fig.5 Comparison diagram of input voltage pre-and-post adding EMI filter

3.2 隔离

输出信号与输入信号成线性比例的光耦合器

称线性光耦合器⁹。实际操作过程中在 EMI 滤波器前加入一级线性光耦隔离模块,该隔离模块能够将热电偶输出的毫伏级电压信号调节为 0~5V 的标准信号,并对于 EFT 干扰有一定的隔离作用,从而提高采集通道的信噪比。如表 2 所示为加入隔离模块和不加入隔离模块时热电偶通道内耦合进 EFT 干扰的对比。分别记录放大器输出端 20 组 EFT 干扰电压峰峰值的平均值以及 120 秒内产生干扰脉冲的次数。

表 2 不加隔离模块与加入隔离模块时引入 EFT 干扰对比
Tab.2 The comparison of introduced EFT interference pre-and-post adding isolation module

	不加入隔离模块	加入隔离模块
20 组 EFT 输出电压平均值/mV	139.6	141.7
120 秒内脉冲数	100	59

加入隔离模块后,放大器输出的 EFT 峰峰值没有减小反而稍有增大,但单位时间内的干扰脉冲个数却减小了 41%。分析这一现象的原因是由于隔离模块对 EFT 干扰有一定的抑制作用,使某些脉冲峰值减到滤波器滤波的范围内,这些脉冲就可以被滤波器滤掉,所以单位时间内所采集到的干扰个数减少的比较明显。而另一些强度大的脉冲,没有被抑制到滤波器完全滤掉的范围,这些脉冲经滤波器只能衰减到 140mV 左右,这样看上去脉冲的峰值没有减小。同样地,引入电压强度的概念,即将单位时间内的产生干扰电压峰峰值的平均值乘以单位时间内感应出来的干扰次数。可见加入隔离模块前的干扰电压强度为 13,960mV/120s,加入隔离模块后为 8,360.3 mV/120s,干扰电压强度减小了 40.1%。所以,从干扰能量的角度来说,隔离模块起到了抗干扰作用。

对于稳态信号,如图 6 所示。下方是没有加入隔离模块时放大器输出的电压波形,上方是加入隔离模块后放大器输出的电压波形,可见纹波电压从 57.5mV 减小到了 41.9mV,减小了 27.1%。说明隔离模块对于稳态的电压也有一定作用的。

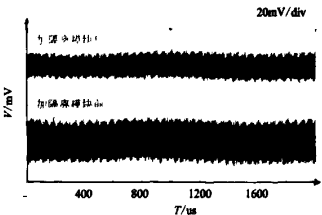


图 6 加入隔离模块前后直流电压信号的对比图

Fig.6 Comparison of DC voltage pre-and-post adding isolation module

总结隔离模块的作用有如下三条:

- (1) 提高了通道的信噪比;
- (2) 降低了单位时间内耦合进热电偶通道的干扰能量;
- (3) 提高了稳态时波形的精确度。说明在热电偶通路中采用线性光耦隔离模块是起到了比较明显的作用的。

4 其他措施

除了上述提到的几种抗干扰措施外,还有几点措施是值得注意:

- (1) 在信号电缆外部套上磁环,磁环的选型要注意在成本允许的条件下,应尽量选择内径小、外径大、长度长的磁环。对于热电偶通道来说,磁环添加的位置应选择尽量靠近前端;
- (2) 选用电线的时候要注意屏蔽层编制得要尽量密实,双绞线单位扭绞次数要尽量多;
- (3) 在各搭接点处要注意使裸露部分的屏蔽层尽量短,避免产生猪尾效应;
- (4) 在整个系统接地过程中,要注意将信号接地与保护接地分开,不得混接,以避免引入更多的干扰电流;
- (5) 在敷设电缆时要注意将传输弱信号的电缆与其他传输高电平或者传输功率的电缆隔开尽量远的距离,这样能够减小电缆之间的串扰能量。

5 结束语

采用混合接地的方法,解决了火箭发动机热电偶通路中受 EFT 干扰影响的问题,使单位时间

内耦合到电缆屏蔽层上的干扰电流增大为单点接地时的 4.58 倍，而耦合进电缆芯线的干扰电流强度下降了 77.3%，实验结论验证了这种接地方法的有效性。而后通过加入信号滤波器以及隔离模块等抗干扰措施，使得测试系统的热电偶数据采集通道的干扰强度有明显的下降，起到了提高整个系统抗干扰性的作用。最后提出了测试系统热电偶通路中其他抗干扰措施和一些注意事项。

参考文献：

[1] 赵万明. 液氧/煤油发动机试车主要参数测量方法研究. 火箭推进[J]. 2006, 32(5): 24-31.

[2] Sun Jiping, Ma Fengying, Li Chen. Improved Complex Filter Applied in Enhancing EFT/B Immunity at a Coal Mine Monitoring Substation, Journal of China university of Mining & Technology[J]. 2008, 18(1): 22-26.
[3] 史银建, 袁春, 刘云鸽. 通信电缆屏蔽层 EMC 接地设计分析. 电力系统通信[J]. 2005, 26(157): 72-74.
[4] 白云同. 电磁骚扰滤波器设计与安装, EMC 认证与电磁兼容卷[J]. 2006, 13(3): 68-71.
[5] J Basilio Simoes, M C Rui, Silva. The optical coupling of analog signals, IEEE transactions on nuclear science [J]. 1996, 43(3): 1672-1674.

(编辑：马 杰)

(上接第 54 页)

将数据代入 (4) 式得： $t \approx 62s$ 。实际情况下，由于 DN80 管路没有冷透，管道中流量达不到 52.8kg/s，因此实际排放时间大于 62s。根据试车数据，排放时间为 90~120s。

5 试验验证

从某次试车开始采用上述工艺方法进行发动机预冷，保证发动机起动前推进剂入口温度满足要求。表 2 为改进后 5 次试车的实测数据。

表 2 改造后试车发动机起动前推进剂入口温度

Tab.2 Propellant inlet temperatures prior start with modified process

试车代号	I	II	III	IV	V
起动前入口温度/℃	-180.0	-181.5	-181.4	-180.6	-180.9

6 结束语

通过对试验系统的改造，采用推进剂强迫排放方式解决了发动机试车台试验系统长期存在的推进剂入口温度过高的问题，保证了发动机起动前入口温度满足试验要求，为发动机正常起动及提高发动机起动品质创造了良好条件。

参考文献：

[1] 华绍曾, 杨学林, 编译. 实用流体阻力手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
[2] 耿文忠. 新型液体火箭发动机试车台起动试验系统方案设计[J]. 火箭推进, 2008, 34(3): 53-57.
[3] 王永忠, 王宁. 低温阀在液体火箭发动机试验中的应用[J]. 火箭推进, 2004, 30(1): 35-40.
[4] 王占林. 小流量推进剂系统低温试验技术[J]. 导弹与航天运载技术, 2000(5): 37-39.

(编辑：陈红霞)