

静电除尘用大功率直流高压电源的电磁兼容性设计

王延安, 肖登明, 刘 帅, 李佑淮, 陈桂文

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 带高频环节的静电除尘用大功率直流高压电源的 du/dt 、 di/dt 和静电除尘器的工作方式(电晕、火花)所引起的电磁干扰对控制电路是一个严峻的挑战。为解决此问题,从电磁兼容的角度优化了控制系统的设计,并对功率电路的主要干扰源采取措施。通过在一台输出功率 60 kW、输出电压 60 kV、逆变频率 20 kHz 电源中的成功运用,证明此电磁兼容性设计方案实用、有效。

关键词: 电磁兼容; 静电除尘; 直流高压电源; 高频; 大功率

中图分类号: TM910

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0077-05

EMC Design of High Voltage High Power DC Power Supply for ESP

WANG Yan-an, XIAO Deng-ming, LIU Shuai, LI You-huai, CHEN Gui-wen

(School of Electronic, Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The du/dt and di/dt of high voltage high power DC power supply for ESP with high frequency link, as well as corona and spark from electrostatic precipitator, exert severe electromagnetic interference on the control circuit. In order to solve this problem, an optimized design of the control system with electromagnetic compatibility is conducted, and a method to suppress the main noise source of power electric circuit is proposed. The application of the design and the method in a power supply with output power 60 kW, output voltage 60 kV and switch frequency 20 kHz verifies their effectiveness.

Key words: EMC; ESP; high voltage DC power supply; high frequency; high power

0 引言

火电厂静电除尘(ESP)用大功率高压直流电源的高频化,具有节能、除尘效率高和能有效抑制反电晕等优点而倍受关注^[1,2]。高频 ESP 电源一般采用具有高频环节的负高压直流电源。此类电源电磁干扰(EMI)严重。一方面,它电压高、功率大导致高频状态时的 du/dt 、 di/dt 大,由此引起共模干扰和差模干扰^[3];另一方面,作为 ESP 电源输出端接静电除尘器,电晕是其正常工作状态而放电闪络不可避免,从而导致瞬态干扰^[4]。电磁干扰由干扰源、接受体及传播途径 3 要素组成^[5]。笔者在研发一台输出功率 60 kW、输出电压 60 kV、逆变频率 20 kHz 的负高压直流电源过程中,从这 3 方面采取了诸多措施并经过反复试验,得出除优化开关管的吸收电路^[6](降低 du/dt 、 di/dt)和功率电路的配线方式(降低导线电感)外,从电磁干扰的传播途径和接受体两方面采取措施比较有效^[7]。笔者即从电磁兼容的角度阐述了 ESP 电源

的相关设计经验,如控制回路的滤波、光电隔离、线性电源独立供电、系统接地和屏蔽,主电路的汇流排、吸收电路、滤波等。

1 系统方案

系统方案见图 1。图 1 由控制电路和功率电路组成。控制电路以 TI 公司的数字控制芯片 TMS320F2812 为核心,分 DSP 主板、采样电路、信号调理电路、IGBT 驱动电路、开入/开出继电器和控制电源,其中采样电路包括变压器油和 IGBT 的温度采样,以及负高压输出端的电流、电压采样。信号调理电路包括 4 项功能:保护闭锁 PWM 触发信号,即防止 DSP 故障时引起逆变器上下桥臂直通;IGBT 过流快速保护;把采样信号调理成适合 DSP 主板处理的电信号(0~3 V);调理开出信号使之适合各类继电器。DSP 主板的功能相对独立,主要集成了 DSP 的外围辅助电路,为加速开发进度,在该系统中采用商购 DSP 主板。

功率电路输入为三相交流 380 V,经 EMI 滤波、

收稿日期:2008-08-08; 修回日期:2008-11-23

作者简介:王延安(1976),男,博士研究生,现从事高频高压大功率直流电源的研究。

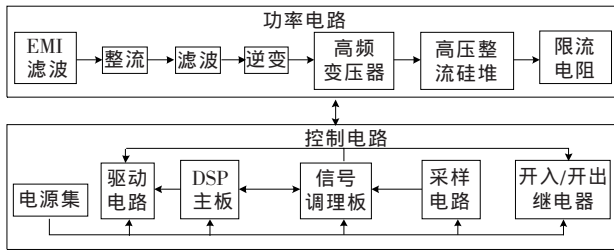


图1 系统方案框图

整流和滤波模块(LC)得到约 510 V 直流电压,由逆变模块转换为频率 20 kHz、幅值约 510 V、脉宽可调的方波电压,经高频变压器、高压整流硅堆和限流电阻输出 60 kV 负直流高压。

该系统的主要干扰源有功率电路的开关管

IGBT 及其反并联二极管^[8]的通断尖峰毛刺,变压器线圈间寄生电容的高频耦合和高压整流硅堆导通及反向恢复瞬态过程;控制电路的 PWM 输出及其放大整形电路和 DSP 晶振。另外,还有 ESP 工作方式所导致的放电火花等干扰。抑制这些干扰源的强度和改变它们的耦合通道特性是该系统 EMC 设计的重点。

2 控制电路部分

控制电路的框图见图 2。图 2 中实线表示电源系统(包括地),虚线表示信号系统。控制电路的电磁干扰因素主要有 3 方面:控制电路与电网之间、控制电路各个模块之间、控制电路与功率电路之间。下面分别从这 3 方面进行介绍。

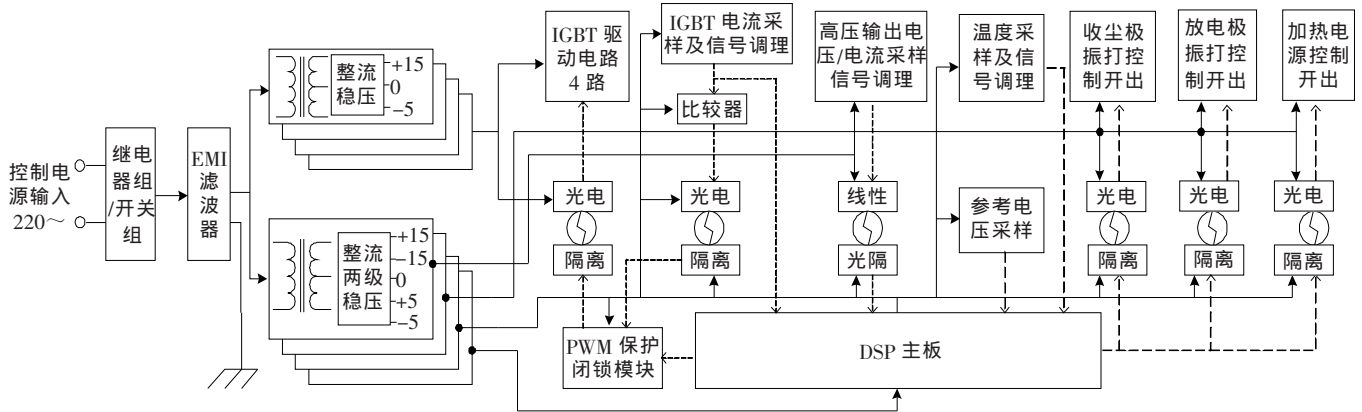


图2 控制电路图

2.1 控制电路与电网之间 EMI 抑制

控制电路与电网之间采取了两项措施来抑制 EMI。

(1)在控制电源的继电器组/开关组和整流变压器之间安装 EMI 滤波器,见图 2。EMI 滤波器的基本原理见图 3。

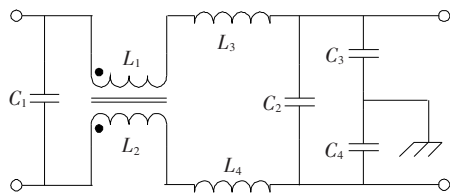


图3 EMI 滤波器图

图 3 中 L_1 、 L_2 是共模电感线圈, L_3 、 L_4 是独立的差模抑制电感, C_1 、 C_2 是差模电容, C_3 、 C_4 是共模电容。 L_3 、 L_4 和 C_1 、 C_2 构成差模滤波器, L_1 、 L_2 和 C_3 、 C_4 构成共模滤波器。它既能有效抑制电网的干扰信号传入控制系统,又能衰减控制系统本身工作时产生的传向电网的骚扰信号。在该系统中采用商购模块。要注意安装方式,否则滤波性能将降低^[8]。

(2)控制系统辅助电源采用线性电源。线性电源具有 50 Hz 的低频噪声,而小功率开关电源一般采

用 MOSFET 作为开关器件,具有高频噪声。在大功率开关电源的控制系统中,低频噪声对控制系统的稳定性影响很小,而与之开关频率相近的高频噪声则极有可能造成控制系统的不稳定。另外,小功率的开关电源本身就是一个干扰源。线性电源比开关电源电磁兼容性好^[9]。因此,在条件允许的情况下,优先选用线性电源作为开关电源控制系统的辅助电源,但是线性电源有体积大的缺点。该系统是大功率开关电源,并且它的控制系统电源功率要求很小,相比辅助线性电源体积的增大部分可忽略不计。

为进一步防止控制系统的共模噪声向电网传播,线性电源变压器需要在变压器初级绕组和各次级绕组之间加屏蔽层来相互隔离,各屏蔽层要接至各个次级绕组的 0 电位点,从而截断传递路径。为取得较好的屏蔽效果,连接时要保证“零阻抗”,如采用具有长宽比小于 5 且没有任何缝隙、通孔的单一金属导体^[4]。图 4 是 IGBT 驱动电路的电源变压器。

图 4 中,输入为单相 220 V 交流;输出为 4 路,每路有中间抽头,分别为 20 V 交流、0.3 A 和 9.5 V 交流、0.3 A。虚线表示屏蔽层。

2.2 控制电路各个模块之间 EMI 抑制

该电源控制电路分数字电路和模拟电路。数字

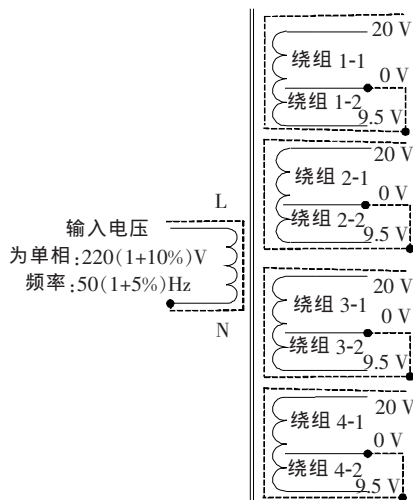


图4 IGBT驱动电源变压器

电路分PWM触发信号模块和开关量输出信号模块。模拟电路分高压输出采样模块和非高压输出采样模块。另外商购DSP主板是高速数字电路(如晶振)及模拟电路的组合,已通过相关EMC测试。除DSP主板外,其它电路制作在一块PCB板上。为防止它们相互之间的电磁干扰,主要采取两项措施。

(1)相互隔离。如图3所示,为防止继电器动作产生的 du/dt 噪声向控制系统传导,在控制继电器动作的放大电路与控制系统电路之间采用光耦;为防止高压输出端发生击穿故障对控制系统的损坏,在高压采样电路和控制系统电路之间采用线性光耦;为防止数字电路对模拟电路的干扰,IGBT电流采样电路的比较输出动作信号与PWM保护闭锁电路之间也采用光耦隔离;DSP输出的PWM信号与PWM驱动电路之间也采用光耦隔离实现控制系统地平面的稳定。

(2)独立电源和单点接地。一个有着良好地平面的PCB,不但可以降低流过共模电流产生的压降,同时也是减小环路的重要手段。电源系统如图3中的实线所示。Protel格式的电路层次原理图的总图见图5。图5中,每一个方块代表一张子电路图。为突出接地系统,隐去了信号线。

另外,一个好的PCB板可以解决大部分的电磁干扰问题,因此制作PCB板时,合理地布置各种走线和旁路、去耦电容以及敷铜等也非常重要。

2.3 控制与功率电路之间EMI抑制

控制与功率电路的EMI传播途径主要有4种:电网、高压采样回路、接地系统和空间辐射。前两种途径的抑制已采取滤波和隔离措施。

2.3.1 信号线

为了降低功率电路对控制系统的干扰,把控制电路和IGBT触发电路(仅靠IGBT模块安装)离开一定距离。因此需要传递触发信号的较长信号线。信

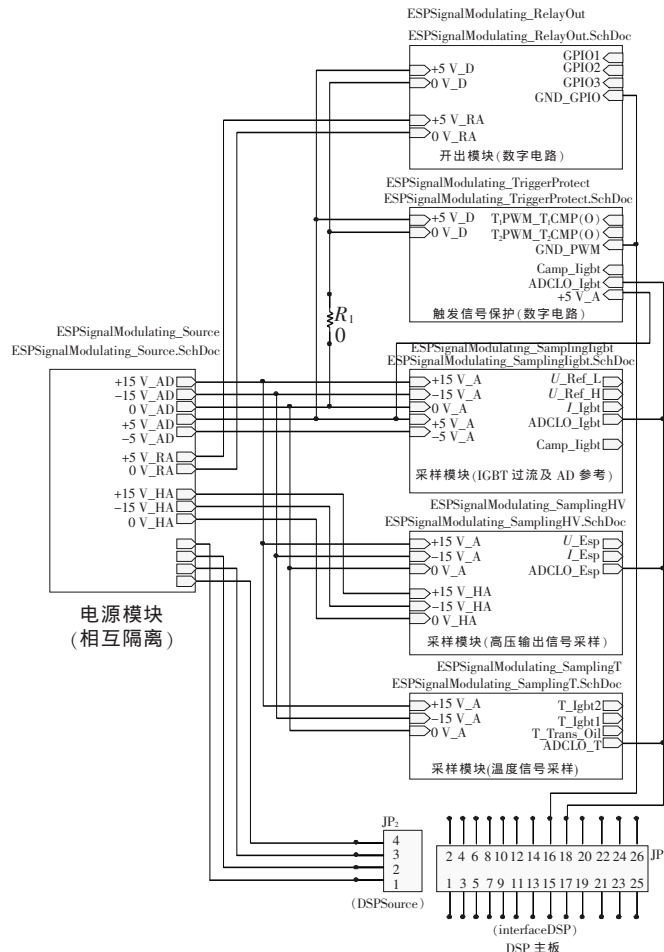


图5 接地系统

号线有普通信号线、双绞线、屏蔽线等几类。图6所示曲线即同一信号在相同电磁干扰环境下,经不同信号线输出的信号波形(用Tek公司的TDS3012录制成excel文件,再在MATLAB下画出波形)。

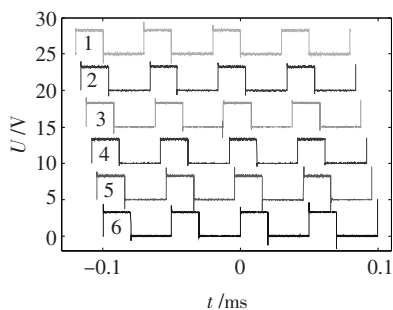


图6 经不同信号线输出的信号波形

图6中,波形1代表DSP输出的原信号,频率为系统运行的额定频率20kHz。其他波形是此信号经平行信号线、双绞线、屏蔽线的输出波形。这些导线的长度相等,均为1m。双绞线是经并行信号线拧制而成。屏蔽线是由屏蔽铝箔包括的双股导线。波形2、3、4代表经屏蔽线后的输出波形,但它们的接法不同。2代表的接法为利用两根导线传递信号,只是在输出端把信号地线和屏蔽层连接。3代表的接法

为只利用两根导线传递信号,屏蔽层悬空。4 代表的接法为利用一根导线和屏蔽层(作为信号地)传递信号,另一根导线悬空。5、6 分别代表经双绞线和平行线后的输出信号。

由图 6 可见,4 号波形的尖峰最小。因此在 20 kHz 下采用屏蔽线且屏蔽层作为信号线的地传递信号效果最好,并具有一定的尖峰抑制作用。

2.3.2 其他措施

为防止空间辐射对控制电路的直接干扰,控制系统主板采用铜质屏蔽罩屏蔽。为防止 ESP 放电时浪涌地线电流对控制系统的影响,整个控制系统采用浮地方案。但为了人身安全,机壳须可靠接大地。

还有,在高压采样电路光耦的原边,为防止放电

引起的浪涌电流对调理电路的破坏,采取了压敏电阻+屏蔽线+瞬态抑制二极管+跟随器+稳压二极管的复合保护方案。ESP 高压直流侧电流采样电路见图 7。

3 功率电路部分

功率电路见图 8。由左到右分别是 EMI 滤波模块、整流模块、滤波模块(LC)、逆变模块、高频变压器、高压整流硅堆、限流电阻 R_5 、电压采样电阻 R_6 和 R_7 、电流采样电阻 R_8 。其中 T_1 - T_4 是 IGBT 器件,采用 SEMIKRON 公司的 SKM 300GB125D(1 200 V, 300 A)。 D_1 、 C_1 、 D_5 和 R_3 是开关器件 T_1 的缓冲电路。功率电路是该直流高压电源的主要干扰源。笔

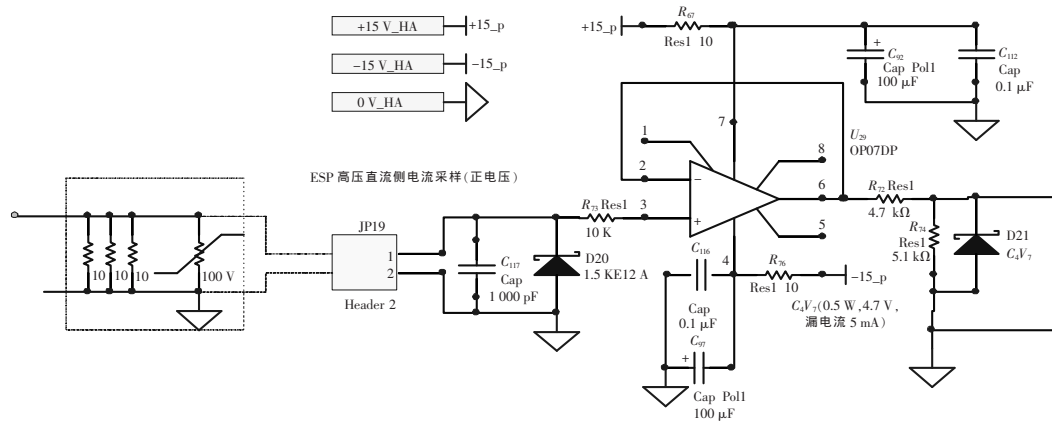


图 7 高压输出电流采样

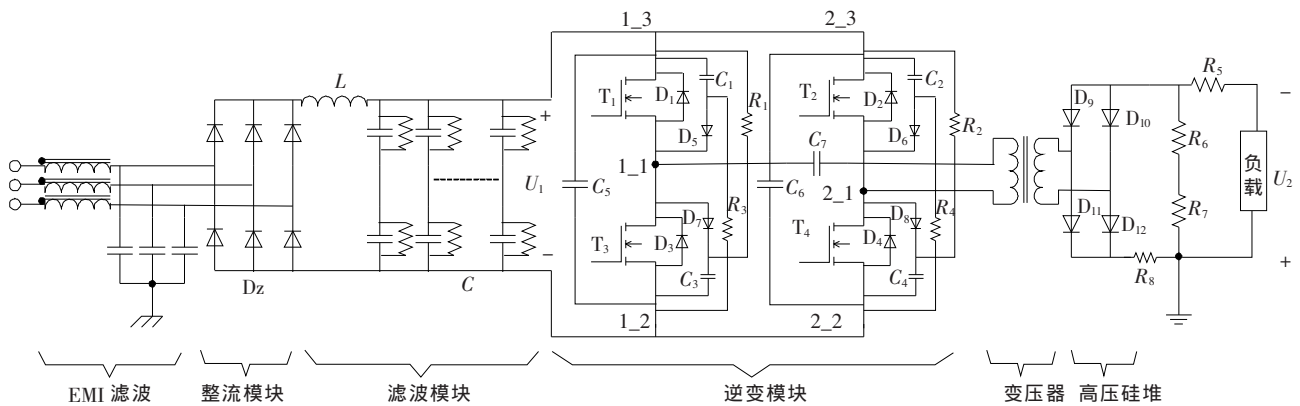


图 8 功率电路图

者主要在配线与器件选型、阻尼电磁干扰的传播途径、缓冲电路与控制方式 3 方面采取措施抑制电磁干扰。

3.1 配线与器件选型

电路配线长时,配线电感上的压降 $L \times di/dt$ 形成关断浪涌电压^[1]产生较强电磁干扰。要减小配线电感,应使回路面积尽可能小,材料结构最好采用相互平行的铜板-绝缘层-铜板-绝缘层的三明治结构走线。电容引线要尽量短。缓冲电路的电容电阻要选用无感(或低感)电容电阻。电解电容要选用低

阻抗电容,并配合薄膜电容使用。

3.2 阻尼传播途径

采用 EMI 滤波器,抑制因 IGBT 开关动作引起的共模干扰和差模干扰向电网传播。为进一步减小开关噪声的环路面积,靠近 IGBT 安装薄膜电容 C_5 和 C_6 ,从而减小射频干扰。

3.3 缓冲电路与控制方式

采用图 8 的缓冲电路来抑制开关管的 du/dt 、 di/dt 。高频电容 C_7 具有隔直和谐振补偿两项功能。适当选择 C_7 的容值调整开关频率可达到 ZCS (零

电流开通和零电流关断)工作方式。在某实验条件下,逆变器输出电压电流及其触发信号波形见图9(用Tek公司的TDS3012录制成excel文件,再在MATLAB下画出波形)。

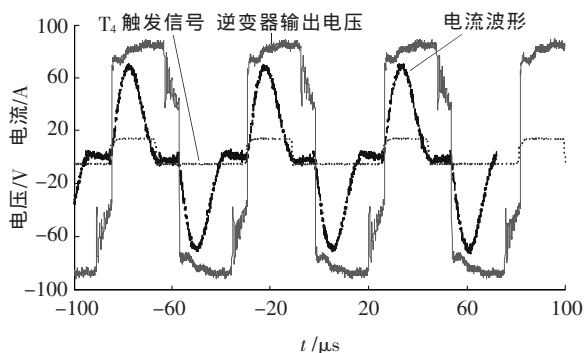


图9 逆变器输出电压电流及其触发信号波形

4 结语

结合的高压直流电源的系统方案,从功率电路和控制电路两方面分析了电磁干扰的主要成因。在控制电路中,从电网、控制电路及其各个模块之间的电磁干扰的传播途径入手,分别采取了EMI滤波器、线性辅助电源、光电隔离、单点接地、总体浮地、屏蔽电缆、屏蔽罩体等措施来抑制电磁干扰。另外高压采样回路采用压敏电阻+屏蔽线+瞬态抑制二极管+跟随器+稳压二极管的复合保护方案。功率电

路则通过合理配线与器件选型,阻尼电磁干扰的传播途径,缓冲电路与控制方式等方面来抑制电磁干扰。通过电源产品的运行,证实了给出的电磁干扰设计方案实用有效。

参考文献:

- [1] GRASS N, HARTMANN W, KLÖCHNER M. Application of Different Types of High-voltage Supplies on Industrial Electrostatic Precipitators [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2004, 40(6): 1 513-1 520.
- [2] 周好斌, 钟桂香, 王毅. 静电除尘器用智能高压直流电源的研制[J]. 高压电技术, 2005, 31(5): 61-63.
- [3] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 开关电源变换器传导干扰分析及建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 49-54.
- [4] 郑军奇. EMC(电磁兼容)设计与测试案例分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [5] 米切尔·麦迪圭安. 电磁干扰排查及故障解决的电磁兼容技术[M]. 刘萍, 魏东兴, 臧瑞华, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] JAI P AGRAWAL. 电力电子系统——理论与设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [7] 郑琼林, 郝荣泰. 机车用 50 kV·A IGBT 逆变器的电磁兼容性设计[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(5): 34-36.
- [8] 刑岩, 蔡宣三. 高频功率开关变换技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [9] 李洪春, 苗立江, 王玉峰. 一种高电磁兼容性高压开关电源[J]. 高压电技术, 2006, 32(3): 60-61.

(上接第 76 页)

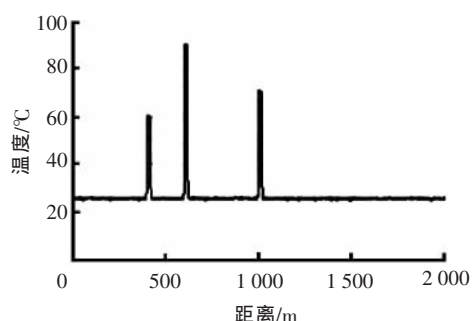


图5 解调后的温度信号

温度与实际预设温度有明显的线性关系,而且具有较好的空间位置一致性。

4 结语

依据分布式光纤温度传感器系统被测信号的特殊性,系统在常规的微弱信号检测的基础上,采用软硬件结合的方案,能够在强噪声下有效地提取微弱

信号,以求得尽可能大的信号噪声比,而所需的器件与设备极为通用,相对成本较低,检测整个过程完成的时间也较短,具有较高的实用值。不足之处是由于该系统对分布式光纤温度信号的处理方法主要采用软件的累加平均除噪法,其降低了系统的响应速度。为了提高性能,改进型可使用新的信号处理方式,即引入相关函数与小波分析对信号进行处理,则可大大提高系统分辨率,缩短系统响应时间。

参考文献:

- [1] 王惠文. 光纤传感技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [2] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [3] 张岩红. 分布式光纤温度传感器信号处理系统的研究与设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- [4] 刘星. 计算机接口技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [5] 简小林, 蒋耀林. 现代数值分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.