

光耦在 EMCCD 电源中的应用

余 达, 刘金国, 薛旭成, 武星星, 李广泽, 周 磊, 梅 贵

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为满足 EMCCD 供电的特殊要求, 基于光耦特性设计了 EMCCD 供电电源。利用光耦的光电隔离特性实现了输入与控制信号的隔离; 利用光耦接收三极管的线性区实现输出电压的连续调整; 利用光耦接收三极管的饱和与截止特性实现了上电状态控制; 利用高速光电接收二极管及图腾柱电路的高速特性实现了 DC-DC 电源的同步控制; 对各部分光耦电路的温度特性进行了分析, 并增加了反馈电路以降低温度影响。实验结果表明, 基于光耦的 EMCCD 电源设计满足应用要求, 改进后的输出电压随温度变化率为改进前的 8.9%。

关键词: 信号探测; EMCCD 供电; 光耦特性; 光电隔离; 温度特性

中图分类号: V271.4; TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)02-0060-05

Application of Optocoupler Circuit in EMCCD Power Supply

YU Da, LIU Jin-guo, XUE Xu-cheng, WU Xing-xing, LI Guang-ze, ZHOU Lei, MEI Gui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to meet the special requirements of EMCCD, an EMCCD power supply was designed based on optocoupler's characteristics. The isolation of the input and control signals was realized by use of the photoelectric isolation characteristic of the optocoupler. The continuous adjustment of the output voltage was achieved by working in the active region of optocoupler's receiving transistor. The power-on initial state was controlled by using the saturation and cutoff characteristics of the optocoupler's receiving triode. The high-speed optical receiving diode and totem pole circuit were used to achieve the synchronous control of the DC-DC power. The temperature characteristics of optocoupler circuit were analyzed, and feedback circuits were added to reduce the temperature effects. Experiment results show that: 1) the EMCCD power supply designed based on optocoupler can meet the application requirements; and 2) the temperature caused change rate of output voltage is 8.9% of the one before improvement.

Key words: signal detection; EMCCD power supply; optocoupler characteristics; photoelectric isolation; temperature characteristics

0 引言

EMCCD 技术被称为“片上增益”技术^[1-2], 是一种比较新的微弱信号探测技术。E2V 公司的 EMCCD 具有新的优异性能, 但对驱动电路的供电电源提出了严格的要求, 要求数字连续可调, 低纹波高电源效率, 输出电压在上电时可控, 输入与输出及控制信号隔离, DC-DC 电源的开关状态能与图像信号的转移时钟同步。

无线传输增加了收发模块且对周围存在电磁干扰^[3], 而光电隔离是目前更为普遍采用的电气隔离方法^[4-5]。光耦把发光元件和光敏元件封装在同一壳体内部^[6], 是通过“电-光-电”转换来传输电信号的半导体光电子器件^[7], 实现了信号的单向传输与隔离, 具有体积小, 结构简单, 抗干扰能力强等特点, 因此获得广泛应用^[8-9]。普通光耦, 由于组成光耦输入电路的发光二极管存在非线性, 受温度影响较大, 导致电流传输比易受温度变化的影响, 在温差较大的环境中易出现输出电压不稳定或发生振荡^[10-12], 而且不适合高速应用。

针对非线性和温度敏感问题, 一种解决方法是将模拟信号转换成数字信号或调频脉冲, 再用光耦进行隔离, 此类调制解调电路和非线性补偿电路复杂而庞

收稿日期: 2013-01-22

修回日期: 2013-05-20

基金项目: 吉林省自然科学基金(201215107); 国家自然科学基金(61108066)

作者简介: 余 达(1980—), 男, 四川内江人, 博士, 助理研究员, 研究方向为 CCD 相机成像电路应用技术。

大。更好的方法是类比线性光耦器件,选择内部多光耦的普通器件作为反馈来克服其非线性、漂移特性和不稳定性^[13],提高控制精度。本文利用光耦的特性设计了满足 EMCCD 供电要求的电源,并对相关电路进行了改进,以满足应用要求。

1 EMCCD 电源简介

EMCCD 电源结构如图 1 所示。

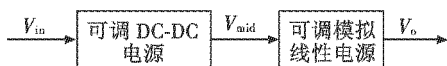


图 1 高效低纹波 EMCCD 电源结构图

Fig. 1 Structure of the high efficiency and low ripple EMCCD power supply

EMCCD 的基本结构与传统的帧转移 CCD 大致相同,但在读出寄存器和放大器之间加入了数百个增益寄存器,通过调节增益寄存器中两电极之间的电位差来调控倍增因子。EMCCD 电子倍增成像要求供电电源

效率高、纹波低、输出电压范围约 20 ~ 50 V,且数字可调、上电初始状态可控并与 CCD 读出时钟同步。

传统的 DC-DC 电源效率高,但纹波大,且输出电压固定;对于模拟可调电源,由于其输入端的电压固定而输出电压变化,当输出电压低时电源效率低。如图 1 所示,本文采用把可调的 DC-DC 电源与可调模拟线性电源结合,通过两级纹波抑止,能大大降低输出纹波;通过两级电压调整,能保证可调模拟线性电源的输入和输出压差保持在一个较低的恒定压差,实现高电源效率。图中, V_{mid} 为可调的 DC-DC 电源部分的输出电压, V_o 为可调模拟线性电源部分的输出电压, η_{DC-DC} 为可调的 DC-DC 电源效率。总的电源效率为

$$\eta = \eta_{DC-DC} \times \frac{V_o}{V_{mid}} \quad (1)$$

2 光耦在 EMCCD 供电电源中的应用

设计的 EMCCD 供电电源电路如图 2 所示。

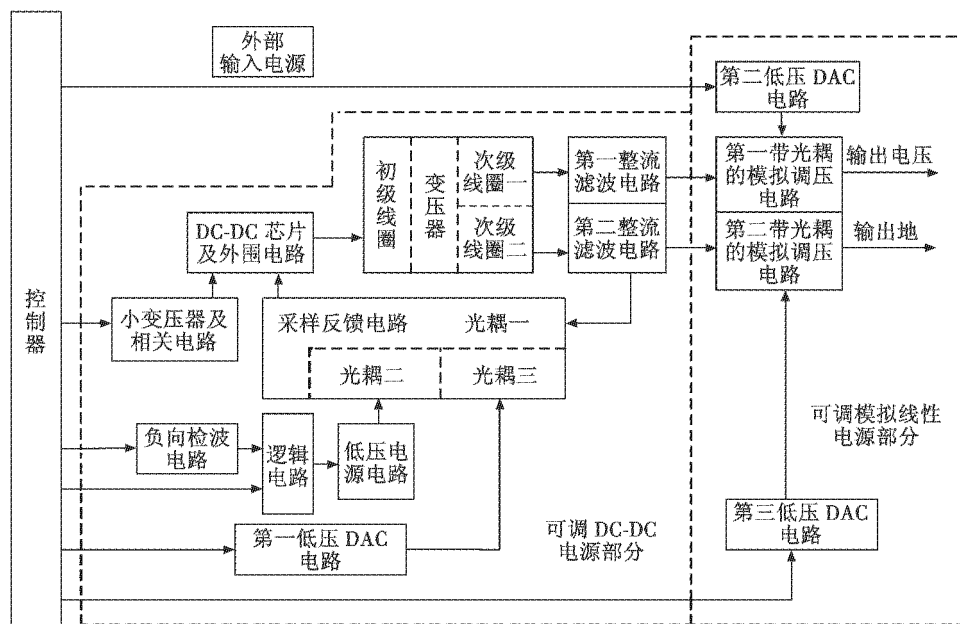


图 2 EMCCD 供电电源电路框图

Fig. 2 Diagram of EMCCD power supply circuit

EMCCD 电子倍增驱动电源主要由可调 DC-DC 电源部分、可调模拟线性电源部分和控制器及外部输入电源构成。控制器完成电源电路各部分的协调控制;外部输入电源主要为控制器、可调 DC-DC 电源部分及其余电路供电。

控制器在上电配置 3 组低压 DAC 电路参数信息前,不输出方波信号给负向检波电路,同时不输出逻辑电平信号给逻辑电路,逻辑电路使能低压电源电路输出控制电压,此时两整流滤波电路输出电压接近 DC-DC 电源芯片的参考电压;控制器配置 3 组 DAC 电路的参数信息后,控制器输出方波信号给负向检波电路

并输出逻辑电平信号给逻辑电路,逻辑电路禁止低压电源电路输出控制电压,两整流滤波电路输出电压受第一低压 DAC 电路控制;两整流滤波电路输出的电压分别传送至两带光耦的模拟调压电路,第二低压 DAC 电路和第三低压 DAC 电路分别控制两带光耦的模拟调压电路输出的电压,两电路输出的电压串联后作为最终输出电压。

2.1 光耦在模拟输出调压中的应用

如图 3 所示,在传统的模拟部分输出调压电路中,输出电压 V_o 与参考电压 V_{ref} 及电阻 R_1 和 R_2 的关系为

$$V_o = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (2)$$

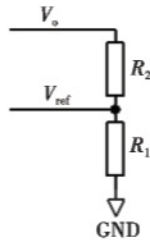


图3 传统的模拟输出调压电路原理图
Fig. 3 Diagram of traditional analog output voltage regulation circuit

通过改变电阻 R_1 和 R_2 的阻值比例关系即可改变输出的电压。为实现输出电压的调整,如图4所示,可在两串联电阻中的一只上并联光耦内部的光接收三极管,光耦中发光二极管的电压采用 DAC 供电实现数控调压。

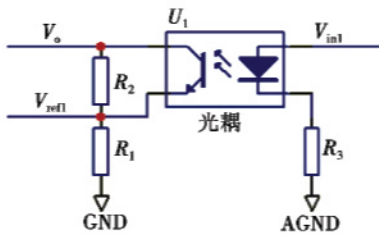


图4 带光耦的模拟输出调压电路图
Fig. 4 Diagram of optocoupler analog output voltage regulation circuit

光耦 U_1 中的发光二极管的正向电流为 I_F , 正向导通电压为 V_T , 感光三极管集电极电流为 I_C , 电流传输比为 β , 则输出电压 V_o 与参考电压 V_{ref} 、输入电压 V_{in} 及电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的关系为

$$V_o = V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - \beta \times \frac{V_{in} - V_T}{R_3} \times R_2, \quad (3)$$

$$V_T \leq V_{in} \leq V_T + \frac{R_3 \times V_{ref}}{R_1 \times \beta} \quad (4)$$

从式中可看出,输出电压的最大值为 $V_{ref} \times (1 + \frac{R_2}{R_1})$, 最小值为 V_{ref} ; 当输入电压 V_{in} 大于二极管正向导通电压 V_T 后,输出电压随输入电压的增加而减小。当输入电压 V_{in} 由 DAC 芯片控制,则可实现输出数控功能。由于光耦内部三极管的线性区有限,且发光二极管电流传输比易受温度变化的影响,其带补偿的改进电路如图5所示,采用两只光耦,一只作为输出调压,一只作为反馈回路,不仅能大大拓宽调压电路的线性区,而且还能改善光耦的光电特性受温度影响的特点,其输入电压 V_{in} 、调整端电压 V_{adj} 和输出端电压 V_o 的关系如下式所示。

$$V_o = V_{adj} \times \left(1 + \frac{R_4}{R_3}\right) - \frac{V_{in} \times R_4}{R_2} \quad (4)$$

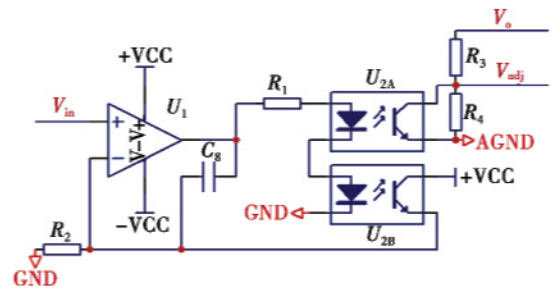


图5 带光耦补偿的模拟输出调压电路图
Fig. 5 Diagram of analog output voltage regulation circuit with optocoupler compensation

2.2 光耦在 DC-DC 输出调压和上电过程控制中的应用

DC-DC 输出调压和上电过程控制电路见图6。

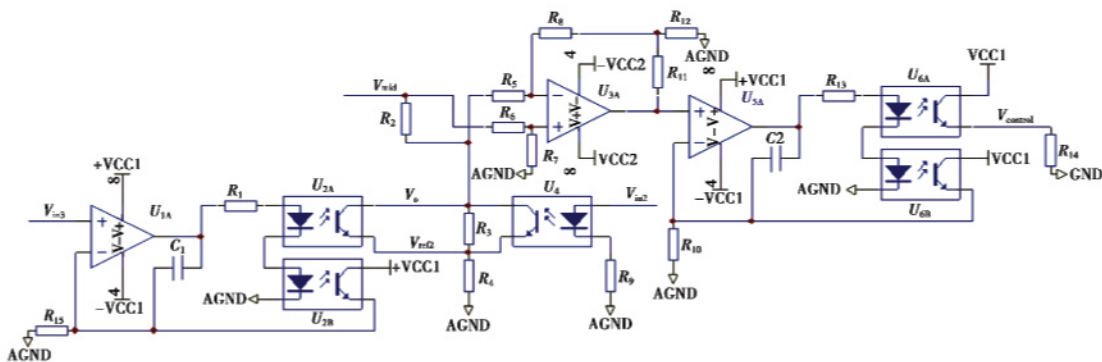


图6 DC-DC 输出调压和上电过程控制电路图
Fig. 6 Diagram of output voltage and power-on initial state regulation

如图6所示,设光耦 U_4 中的发光二极管的正向电流为 I_{F1} , 正向导通电压为 V_{T1} , 感光三极管集电极电流为 I_{C1} , 电流传输比为 β_1 , 则输出电压 V_{mid} 与电路基准电压 V_{ref} 、光耦 U_1 和 U_2 的集电极电压 V_o 、DC-DC 电源芯

片的参考电压 $V_{control}$ 、输入控制电压 V_{in1} 、输入电压 V_{in2} 及电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 的关系为

$$V_{mid} = \frac{V_{control} \times R_{10}}{R_{14}} + V_{ref} \times \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) - \beta_1 \times \frac{V_{in2} - V_{T2}}{R_9} \times$$

$$R_3 - \frac{V_{in3}}{R_{15}} \times R_3, V_{in2} < V_{T1} \text{ 或 } V_{in2} = V_{T1} + \frac{R_9 \times V_{ref}}{R_3 \times \beta_1} \quad (5)$$

从式中可看出,输出电压的最大值为 $\frac{V_{control} \times R_{10}}{R_{14}} + V_{ref} \times (1 + \frac{R_3}{R_4})$, 最小值为 $\frac{V_{control} \times R_{10}}{R_{14}} + V_{ref}$; 当输入 V_{in2} 为 $V_{T1} + \frac{R_9 \times V_{ref}}{R_1 \times \beta}$ 时, 输出为 $\frac{V_{control} \times R_{10}}{R_{14}} + V_{ref}$; 当输入 V_{in2} 小于 V_{T1} 时, 输出由输入 V_{in3} 决定; 当输入电压 V_{in2} 由外部带使能端的电源芯片提供, 则可保证上电的初始状态; 当输入电压 V_{in3} 由 DAC 芯片控制, 则输入电压受 DAC 芯片内的数字参数值控制, 实现输出数控功能。

2.3 光耦在 DC-DC 电源同步控制中的应用

对于 DC-DC 电源, 部分芯片如 LT3958, 采用时钟沿同步, 其控制只需加入一个满足规定电平、规定频率的时钟信号即可; 部分芯片如 UC3845, 为电平触发同步, 理想信号为锯齿波, 若采用矩形波触发则要求脉冲宽度尽量窄, 在高频率下同步工作时对同步电路提出了极高的要求。

普通光耦由于其自身存在分布电容, 不适合高速应用。采用普通光耦 TLP521 来进行如图 7 所示的开关实验, 在 49.8 kHz 时的开关波形如图 8 所示, 畸变严重, 远不能满足 DC-DC 电源开关频率要求, 特别是电平触发的 DC-DC 电源电路。

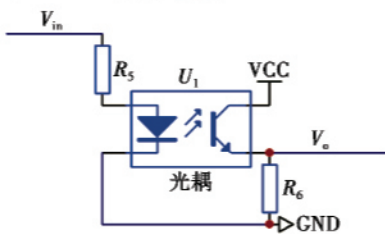


图 7 普通光耦同步电路图

Fig. 7 Diagram of common optocoupler synchronization circuit

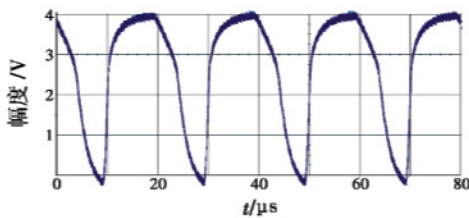


图 8 普通光耦在频率为 49.8 kHz 时的开关波形

Fig. 8 Real waveform of ordinary optocouplers at the frequency of 49.8 kHz

一种改进器件如图 9 所示, 内部采用光敏二极管替代光接收三极管, 采用高速施密特整形后, 再经图腾柱结构的电路输出, 器件内部的光电接收部分包含一个光敏二极管, 该二极管光耦合到一个高速光电晶体管探测器。与传统光耦的光电接收部分直接采用光敏三极管相比, 这种设计为该光敏二极管偏置建立了单

独的连接, 降低了输出晶体管的基极 - 集电极容抗, 使其速度最高可达 1 MHz。

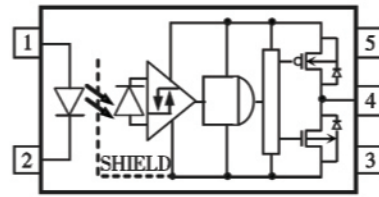


图 9 高速光耦内部结构图

Fig. 9 Structure of high-speed optocoupler

3 测试结果

实验中, 采用某公司生产的红外测温仪测温, 加热光耦使其温度从室温的 25 °C 升高到 70 °C。对于光耦模拟调压输出部分, 当光耦二极管未串联电阻输入端无电压时, 在加热的整个过程中, 输出电压保持不变; 当未串联电阻输入端加 1.20 V 时, 二极管供电的电流升高 26 mA; 当管串 470 Ω 电阻加 1.20 V 时, 在持续加热过程中, 二极管的电流始终小于 1 mA, 输出电压从 24.41 V 变为 18.02 V; 采用双光耦加运放的温度补偿电路, 在持续加热过程中, 输出从 24.41 V 变为 23.84 V, 其变化为改进前的 8.9%。当使用高速光耦 ACPL-P480 进行 DC-DC 电源芯片 UC3845 电路同步实验时, 在加入同步信号后开始输出指定的电压, 输入信号和 DC-DC 电路开关信号波形如图 10 所示; 当改变光耦温度时, 光耦输出信号的上升沿有抖动, 下降沿无变化。针对以上特性, 设计的 MCCD 供电电源系统采用双光耦加运放的温度补偿电路, 采用反相输出的 ACPL-P481 产生同步信号, 受温度影响小, 输出电压随输入控制数据的变化如图 11 所示, 满足设计要求。

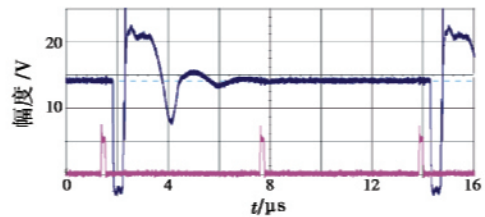


图 10 DC-DC 电路在外部信号下的同步波形图

Fig. 10 Real synchronization waveform of DC-DC circuit under the external signal

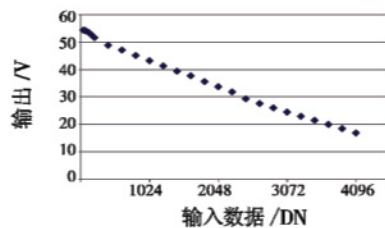


图 11 输出电压随输入数据的变化图

Fig. 11 Diagram of output voltage changes with the input data

4 结 论

为满足 EMCCD 电源输入与输出及控制部分隔离、供电效率高、纹波低、输出数字可调、上电初始状态可控且与 CCD 读出时钟同步要求,基于光耦特性设计了 EMCCD 供电电源。利用光耦的光电隔离特性,实现了输入与控制信号的隔离;利用光耦接收三极管的线性区,实现输出电压的连续调整;利用光耦接收三极管的饱和截止特性,实现了上电状态控制;利用高速光电接收二极管及推拉电路的高速特性实现了 DC-DC 电源的同步控制;针对各部分电路的受温度影响特性进行了电路改进。实验结果表明,光耦发光二极管串电阻有降低温度影响和改进线性区的作用;光耦接收三极管结构仅能在线性或者低频开关状态下应用,高频应用需采用光接收二极管加推拉结构;基于光耦的 EMCCD 电源设计满足应用要求,改进后输出电压随温度变化率为改进前的 8.9%。

参 考 文 献

- [1] 苏学征. EMCCD 技术——单光子水平的成像探测[J]. 现代科学仪器, 2005(2): 51-53.
SU X Z. EMCCD technology—single photon imaging detection[J]. Modern Scientific Instruments, 2005(2): 51-53.
- [2] 韩露,熊平. EMCCD 工作原理及性能分析[J]. 传感器世界, 2009(5): 24-28.
HAN L, XIONG P. The analysis of operating principle and performance of EMCCD[J]. Sensor World, 2009(5): 24-28.
- [3] 肖诗满. 光电耦合器封装及相关失效机理[J]. 半导体技术, 2011, 36(4): 328-331.
XIAO S M. Package and corresponding failure mechanism of optical couplers[J]. Semiconductor Technology, 2011, 36(4): 328-331.
- [4] 张伟,任勇峰,孙涛,等. 基于 FPGA 的多通道数据隔离采集电路设计[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(10): 1209-1211.
ZHANG W, REN Y F, SUN T, et al. Design of isolated multi-channel data acquisition hardware system based on FPGA[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(10): 1209-1211.
- [5] 张涛. 线性光耦器件 IL300-F-X009 原理及其应用[J]. 山西电子技术, 2011(2): 42-43.
ZHANG T. The principles and applications of linear optocoupler IL300-F-X009[J]. Shanxi Electronic Technology, 2011(2): 42-43.
- [6] 孙德刚,孙光. 光耦线性化与线性光耦器件的应用[J]. 现代电子技术, 2004(1): 28-30.
SUN D G, SUN G. Optocoupler linearization and linear optocoupler's application[J]. Modern Electronic Technique, 2004(1): 28-30.
- [7] 胡培东,张春晓. 光耦 GH3202Z 在某型导弹电池电压检测中的应用[J]. 微计算机信息, 2011, 27(4): 62-64.
HU P D, ZHANG C X. The application of optocoupler GH3202Z for battery voltage detecting in one missile electrical source[J]. Microcomputer Information, 2011, 27(4): 62-64.
- [8] 晁慧丽,季振山,王勇. 1 MHz 模拟量高速光电隔离的研制[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(6): 1361-1363.
CHAO H L, JI Z S, WANG Y. Research and design of analog signal high-speed isolation with optical coupler[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(6): 1361-1363.
- [9] 沙占友,安胜彪. 光耦合器及光耦反馈电路的设计[J]. 电源技术应用, 2010, 13(4): 34-37.
SHA Z Y, AN S B. Optical couplers and the design of feedback circuits based on optical couplers[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2010, 13(4): 34-37.
- [10] 付丽娟,杨景芝. 光耦合器组成的模拟信号放大电路分析与设计[J]. 电子测试, 2008(3): 79-82.
FU L J, YANG J Z. Analysis and design of analog signal composed optical coupler[J]. Electronic Test, 2008(3): 79-82.
- [11] 沈霞,李红伟,许瑾. 基于无光耦反激变换器的 LED 驱动电源设计[J]. 电测与仪表, 2012, 49: 97-100.
SHEN X, LI H W, XU J. Design of LED driver power supply based on flyback converter without photocoupler[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49: 97-100.
- [12] 孟宪磊,吕长志,谢雪松. DC/DC 电源模块高温失效原因[J]. 现代电子技术, 2011, 34(4): 135-140.
MENG X L, LÜ C Z, XIE X S. Measurement and analysis on temperature characteristics of DC/DC power module[J]. Modern Electronic Technique, 2011, 34(4): 135-140.
- [13] 邓醉杰,叶丽花,黄守道. 复合励磁永磁同步发电机端电压采样隔离电路线性光耦 HCNR200 的应用[J]. 防爆电机, 2006, 41(2): 36-38.
DENG Z J, YE L H, HUANG S D. Terminal voltage sampling and isolating circuit of compound excitation permanent magnet synchronous generator—The application of linear optical coupler HCNR200[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2006, 41(2): 36-38.