

一种 MHz 光耦隔离放大器的设计与分析

李霆霆^{1,2,3}, 张 明^{1,2}, 潘明俊^{1,2}

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北武汉 430074; 3. 国网株洲供电公司, 湖南株洲 412000)

摘 要: 本文设计了一种基于高线性度高带宽模拟光耦 HCNR201 芯片的 MHz 光耦隔离放大器电路, 主要应用于计算机数据采集系统中, 对其信号进行隔离从而实现过电压保护和提高共模抑制比. HCNR201 光耦器件具有双光电二极管结构, 使电路在输入端构成反馈环节, 消除了光耦的电流传输比对直流增益的影响, 为了方便分析建立了它的等效电路. 利用线性控制系统的理论方法建立了所设计的隔离放大器电路的数学模型, 推导出了电路的传递函数, 对电路进行了理论分析和参数优化, 并给出了分析设计结果. 同时研制了隔离电路并对其进行了实验测试, 实验结果与理论分析结果比较一致, 符合设计要求, 其理论分析方法可以为类似电路设计提供参考.

关键词: 光耦; 隔离放大器; 数学模型

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)07-1398-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.07.024

Design and Analysis of an Optocoupler Isolation Amplifier with MHz Bandwidth

LI Ting-ting^{1,2,3}, ZHANG Ming^{1,2}, PAN Ming-jun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. State Grid Zhuzhou Electric Power Company, Zhuzhou, Hunan 412000, China)

Abstract: An optocoupler isolation amplifier with MHz bandwidth is designed based on HCNR201. It is mainly used in computer data acquisition system, and isolates the signal to realize over-voltage protection and improve the common mode rejection ratio. The HCNR201 consists of double photodiodes which can form a feedback loop in the input port to eliminate the impact of current transfer ratio of the optocoupler on the DC gain. This paper presented the equivalent circuit of HCNR201 for facilitate analysis. This paper built mathematical model of the circuit, derived the transfer function, and gave theoretically analysis and optimized the parameters. We presented the analysis and design results, and the experiment test of the circuit consistent with theoretical analysis is given. The optocoupler isolation amplifier meets the requirements and the theoretical analysis method can provide reference for similar circuit design.

Key words: isolation amplifier; optocoupler; mathematical model

1 引言

对于托卡马克这类复杂的电磁装置和系统, 在运行时形成大电流、高电压、强磁场等复杂电磁环境, 其实验信号在进入计算机数据采集系统时, 故障时的过电压的窜入和空间电磁干扰可能会造成计算机采集系统或采集卡等系统部件的损坏. 因此在实验信号进入数据采集系统前需要对其进行调理和隔离, 实现对采集系统的过电压保护^[1]同时隔离电路可以切断接地环路来提高

共模抑制比. 在实践中通常采用隔离放大器来实现实验信号的隔离, 隔离放大器通常的隔离耦合方式有三种: 变压器耦合、电容耦合和光电耦合, 最大工作绝缘耐压都能达到上千伏. 变压器耦合和电容耦合的隔离放大器能够达到的最大带宽只有 120kHz^[2]. 而光耦的带宽可以达到几 MHz^[3], 用光耦设计隔离放大器, 具有体积小、单向传输信号、磁场抗干扰能力强、无触点等优点, 特别适合在复杂电磁环境下使用^[4]. 反馈技术在光耦中的应用可以解决光耦的非线性传输特性^[5], 从而使高线性度

和高带宽的同时实现成为可能. HCNR201 光耦器件具有双光电二极管结构,使电路在输入端构成反馈环节,消除了光耦的电流传输比对直流增益的影响.采用这种光耦器件设计隔离放大器电路结构在文献[6~8]中有所介绍,实现了隔离电路的基本功能,单独采用这种芯片的最大带宽不足 1MHz,而且并未对其进行数学建模和深入的理论分析.本文也采用单光源和双光电二极管型的高速光电耦合器 HCNR201 芯片设计了 MHz 光耦隔离放大器电路,对 HCNR201 芯片进行了等效,建立了隔离电路的数学建模,推导出了电路的传递函数,并给出了分析设计结果.研制了隔离放大器电路并进行了实验测试,实验结果和分析结果有较好的一致性,验证了隔离放大器电路及其分析方法的可行性,为类似电路设计提供参考.

2 光耦隔离放大器的设计

2.1 HCNR201 光耦简介

HCNR201 光耦的结构如图 1 所示,它由一个发光二极管 LED 及两个光电二极管 PD1、PD2 构成,非线性度为 0.01%,频带 > 1MHz.两个光电二极管 PD1、PD2 产生的电流均与发光电流线性相关.定义电流传输比 $K = i_{PD1}/i_{LED}$,典型值为 0.48%,同时两个光电二极管严格匹配,有 $i_{PD1} = i_{PD2}$,其中忽略两者的微小差异^[3].

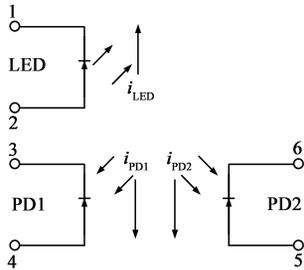


图1 HCNR201光耦的结构图

2.2 光耦隔离放大器

本文设计的光耦隔离放大器的电路原理图如图 2 所示,隔离栅将整体电路分为输入端和输出端.输入端

将 PD1 检测 LED 的发光通量产生的光电流作为反馈信号,经 I-V 转换电路处理后,回流到信号输入端,从而构成反馈电路.输出端则是一个典型的光电检测电路,将光电流经 I-V 转换电路转换成电压后,再经同相比例放大器,输出电压信号.

电路的静态工作点的设置,是电路能否正常工作的前提.由于光耦的 LED 只能由正向电流驱动工作,要使得隔离电路能传输双极性信号,增加电流源 I_1 设置 LED 的静态工作电流 I_{LEDQ} .在没有输入信号时,可以计算得到:

$$I_{LEDQ} = \frac{R_2}{R_3} \times \frac{I_1}{K} + \frac{I_B}{K} \quad (1)$$

其中, $I_B = 3.3\mu A$ 是运放 AD847 的输入偏置电流, $I_1 = 4.25mA$, K 是光耦的电流传输比,这样得到 $I_{LEDQ} = 9.51mA$.由此看出,由于反馈的作用,LED 的静态工作电流只与电阻 R_2 和 R_3 的比值和电流源 I_1 相关, V_{CC1} 和 R_4 只是起到提供电源的作用.值得一提的是,即使没有信号输入,光耦也是在工作中.此时 PD2 上产生静态光电流由电流源 I_2 来抵消,以消除输出信号的直流误差.

而当有输入信号 V_{IN} 时,将 $(I_1 + V_{IN}/R_1)$ 代入 I_1 ,可以得到:

$$I_{LED} = \frac{R_2}{R_1 R_3 K} V_{IN} + I_{LEDQ} \quad (2)$$

根据式(2),当 $-10V \leq V_{IN} \leq +10V$ 时,可以得到 $5.4mA \leq I_{LED} \leq 13.6mA$,这是隔离电路可以不失真工作的条件.由此得出,式(2)可以用来验证静态工作点设置是否合适.

同时,计算得到整体电路的直流传输增益为:

$$A_o = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) \frac{R_2 R_f}{R_1 R_3} \quad (3)$$

根据本文设计的电阻值,可得 $A_o = 1.01$.由式(3)看出,反馈环节的增加消除了光耦的电流传输比 K 对直流增益 A_o 的影响.直流增益只与六个电阻有关,也即只与电路的固有性能有关.

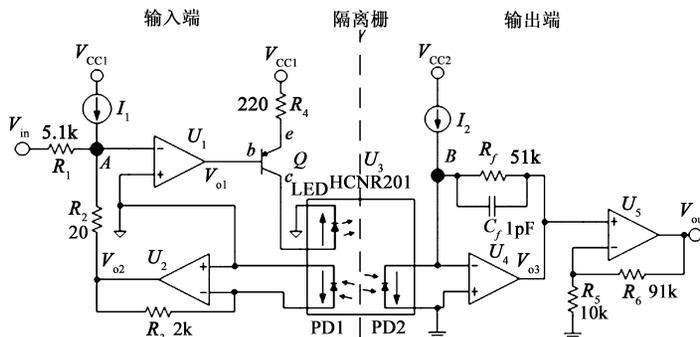


图2 光耦隔离放大器的电路原理图

3 数学模型

3.1 光耦 HCNR201 的等效电路

光耦器件的特性是设计光耦隔离放大器的关键,建立光耦的等效电路能够有效描述光耦这种光电器件的动态响应.本文分别建立 LED 和 PD 的等效电路来得到光耦的等效电路如图 3 所示,以受控电流源的形式保持它们之间光的联系.光耦 HCNR201 的隔离电阻为 $10^{13}\Omega$,隔离电容为 0.4pF .当分析电路在 10MHz 以下的动态特性时,可以忽略这两个隔离参数的影响.如图 3 所示为 HCNR201 的等效电路,LED 等效为一个电阻 (RES) 串接一个理想稳压二极管^[9],PD 等效为一个受控电流源并接一个固有电容^[10].根据 LED 输入电流与前向电压的关系图,取点计算得到参数 $R_{ES} = 2.8\Omega$, $V_Z = 1.522\text{V}$.LED 结电容仅有 80pF ,并联电阻 R_{ES} 产生的频率响应对电路影响太小,因而在等效电路中忽略 LED 结电容.技术资料中给出,当 $V_{PD} = 0\text{V}$ 时, $C_{PD1} = C_{PD2} = 22\text{pF}$.

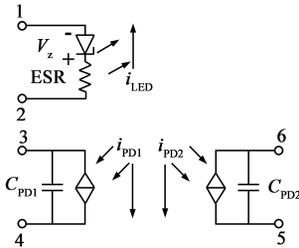


图3 HCNR201的等效电路图

为验证 HCNR201 的等效电路的正确性,搭建如图 4 所示的实验电路进行测试,主要测试其动态特性.用信号发生器输入 100kHz 的方波,低电平为 0V ,高电平为 10V ,串接一个 510Ω 电阻驱动 LED.用 PD2 作为输出,以并接电阻 R_f 的方式,通过测量 V_i 的值来获得电流值.值得注意的是,在增大 R_f 阻值的同时,直流电压 V_{DC} ,也要相应增加,确保 PD2 的反向电压保持在 1V 左右,使光电二极管的结电容保持恒定.

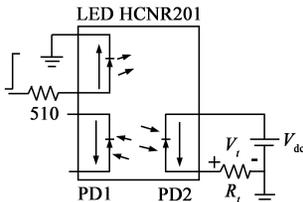


图4 HCNR201等效电路的测试电路

多次测试结果表明, V_i 波形是一阶系统阶跃响应波形.根据一阶系统阶跃响应的特点^[11],在一个时间常数 τ 内输出可达到其终值的 63% ,在实际测试中将这一时间记为 $t_{63\%}$.结合图 3 所示的等效电路,可以得到

τ 值的数学表达式为 $R_f C_{PD2}$,将这两者列于表 1 中.

表1 HCNR201 等效电路测试结果

R_f/Ω	$t_{63\%}/\text{ns}$	$\tau = R_f C_{PD2}/10^{-9}$
10k	245	220
20k	499	440
30k	726	660
39k	885	858
51k	1102	1122

从表 1 中的数据可以看出, $t_{63\%}$ 与 τ 值相差很小,由此证明图 3 所示的等效电路可以基本准确反映光耦 HCNR201 的动态特性.

通过光耦的等效电路,可以认为在考虑电路动态特性时,隔离栅的两边只有光的联系,而忽略电参数关系,这为建立光耦隔离放大器的数学模型时光耦部分的建模提供了便利.

3.2 隔离电路数学模型的建立

本文建立光耦隔离放大器的数学模型,有利于分析动态特性,也为电路参数的选择提供理论参考.在分析隔离电路的动态特性时,采用线性控制系统的理论计算各部分电路的传递函数.

本文定义如下参数

A_{OL} : 运放 AD847 的开环增益,

A_{PD1} : PD1 的 I-V 转换电路的增益,

A_{PD2} : PD2 的 I-V 转换电路的增益,

A_{non} : 同相放大电路的增益.

其中,AD847 是单极点运放,其开环响应传递函数 $A_{OL} = \omega_c/s$ ^[12,13],其中 $f_c = 50\text{MHz}$, $\omega_c = 3.14 \times 10^8 \text{rad/s}$.

在电流求和节点 A 处,可以得到:

$$\frac{v_{in}}{R_1} - \left(-\frac{1}{R_2}\right)v_{o2} = \frac{v_A}{R_2} \quad (4)$$

$$-A_{OL} \times v_A = v_{o1} = -i_{LED} \times R_4 \quad (5)$$

两个 PD 均接在运放两端,处于零偏状态,总的输入电容是 PD 的固有电容、运放的差分 and 共模电容之和,即 $C_i = C_{PD1} + C_{id} + C_{icm} = 23.5\text{pF}$.根据文献^[9]的理论,可以得到:

$$A_{PD1} = \frac{R_3}{R_3 C_i s^2 / \omega_c + s / \omega_c + 1} \quad (6)$$

$$A_{PD2} = \frac{R_f}{\frac{R_f C_f + R_f C_i s^2 + (R_f C_f + \frac{1}{C_f})s + 1}{\omega_c}} \quad (7)$$

其中,反馈电容 C_f 取值公式为 $C_f = \sqrt{\frac{C_i}{2\pi R_f f_c}} = 1.2\text{pF}$,实际取值 $C_f = 1\text{pF}$,主要通过补偿相位来消除振荡^[6,10].

在同相放大电路处,有:

$$A_{\text{non}} = \frac{1 + \frac{R_6}{R_5}}{1 + \left(\frac{R_6}{R_5}\right)s/\omega_c} \quad (8)$$

运放 AD847 的单增益频率为 50MHz,根据带宽增益积不变的原理,当放大倍数为 10 时,同相放大器的带宽在 5MHz,这样起到一定的低通滤波作用。

结合式(4)~(8),得到如图 5 所示光耦隔离放大器的数学模型。

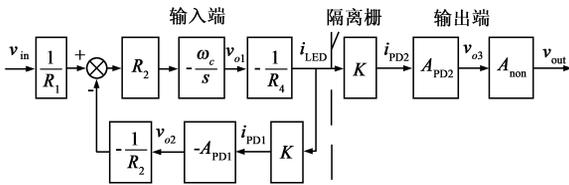


图5 光耦隔离放大器的数学模型

4 仿真和实验结果

利用 matlab 对如图 5 所示的数学模型进行仿真,将器件的参数代入各传递函数中,计算其阶跃响应和频率响应。同时根据图 2 所示电路图制作 PCB 板后,进行实验测试,对比两者所得结果。

在 matlab 中对数学模型进行阶跃响应仿真,得到如图 6(a)所示结果。实际的阶跃响应实验中,给定 100kHz 的输入方波,高电平为 +5V,低电平为 -5V,用示波器采集到结果数据,然后导入 matlab 中再绘制成如图 6(b)所示的结果。从图 6 中可以得到,仿真得到的上升和下降时间为 0.22μs,实验测试得到的是 0.31μs,波形的终值都相等。然而在响应曲线的波峰处,略有差别,实际电路的超调电压要大 0.5V 左右。

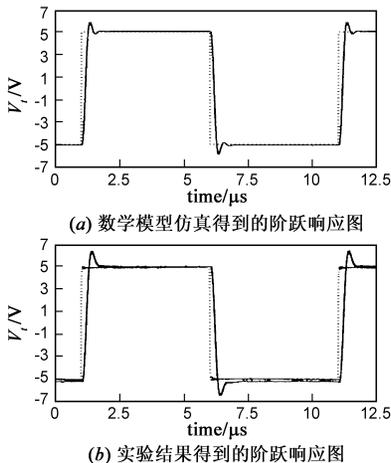


图6

带宽是隔离电路的重要性能之一,实验中采用逐

点测量的方法,记录输出信号的幅值和相位,用 matlab 将实验数据绘制成曲线。图 7 给出两种方式下电路的频率特性曲线,根据数学模型仿真得到的带宽为 2.5MHz,而实验测试得到的带宽为 2.2MHz。同时从两者的幅频曲线可以看到,带宽频率以下的频率部分,两特性曲线基本重合,在 6MHz 之后的频率特性差异较大,主要是由于输入端反馈部分引入的零点作用。分析传递函数,仿真结果在 10.5MHz 处产生振荡。由于忽略了寄生电容的影响和在实际测试过程产生的误差,实际测试在大约 7MHz 的频率处产生振荡。考虑到此时的信号下降很快,幅值较小,实际产生影响较小,同时此频段不是本文研究的重点,因而不展开讨论。

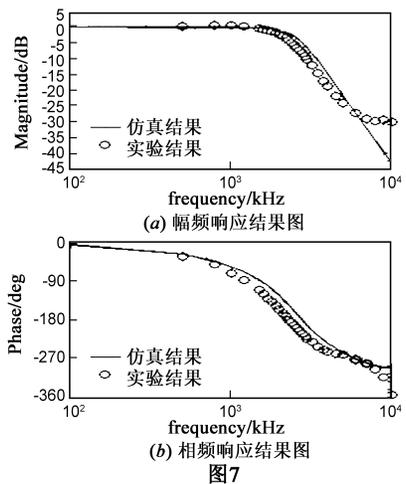


图7

由于三极管的结电容数^[14]量级在 pF,在数学模型的建立过程中,为简化计算,忽略了三极管的结电容对电路动态特性的影响。同时考虑到三极管的放大倍数很大,忽略了三极管基极电流可能产生的影响。隔离放大器的输入电阻值偏小,信号输入端的寄生电容情况比较复杂,未能考虑其带来的影响。这些都可能是造成仿真和实验测试结果差异的来源。

经过以上分析,本文所建立的数学模型能够良好的反映光耦隔离电路在 DC 至 10MHz 频率之间的动态特性。

5 总结

本文给出了一种带宽达 2.2MHz 的光耦隔离放大器的详细设计和分析,这种具有反馈结构的光耦隔离放大器,消除了光耦的电流传输比对直流增益的影响,并将隔离放大器的带宽拓宽至 2.2MHz。本文首次给出了光耦 HCNR201 的等效电路,通过电路测试验证其正确性,同时也给建立光耦的等效电路和建立数学模型提供了一种方法。本文还建立了光耦隔离放大器的数学模型,给出隔离放大器的数学模型的仿真分析结果

和实验测试结果,给出了它们的时间响应和频率响应的对比曲线,验证了隔离放大器数学模型的合理性,可以为类似隔离放大器电路设计提供理论参考.

参考文献

- [1] 朱孟周. J-TEXT 托卡马克边缘静电涨落和湍动运输的实验研究[D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2011.
Zhu Meng-zhou. Experimental studies of electrostatic fluctuations and turbulent transport in the boundary of J-TEXT tokamak[D]. Wuhan, Hubei: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] The Data Sheets of AD215[OL]. <http://www.analog.com/en/index.html>.
- [3] The Data Sheets of HCNR201[OL]. <http://www.avagotech.com/pages/home/>.
- [4] 李应辉, 陈春霞, 蒋城, 刘永智. 光电耦合器总剂量辐照的噪声表征[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1707 - 1711.
LI Ying-hui, CHEN Chun-xia, JIANG Cheng, LIU Yong-zhi. 1/f noise denoting for radiation total dose of optocoupler[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1707 - 1711. (in Chinese)
- [5] Hou A S. A wide bandwidth isolation amplifier design using current conveyors[J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2004, 40(1): 31 - 38.
- [6] Skolnik H L. Design considerations for linear optically coupled isolation amplifiers[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1982, 17(6): 1094 - 1101.
- [7] Simoes J B, Silva R, Morgado A, et al. The optical coupling of analog signals[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1996, 43(2): 1672 - 1674.
- [8] Camin D V, Pessina G. Differential optocoupler amplifier with low noise, low power and balanced output[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 47(6): 2039 - 2044.

- [9] Winder S. Power Supplies for LED Driving[M]. Boston, USA: Newnes, 2009.
- [10] Graeme J G. Photodiode Amplifiers: Op Amp Solutions[M]. NK, USA: McGraw-Hill Professional, 1995.
- [11] Driels M. Linear Control Systems Engineering[M]. NK, USA: McGraw-Hill College, 2003.
- [12] 李名复. 非理想运算放大器[J]. 电子学报, 1979, 7(4): 1 ~ 14.
- [13] 周宁华. 运放的有限增益与带宽对开关电容滤波器特性的影响[J]. 电子学报, 1984, 12(6): 48 - 55.
Zhou Ning-hua. Effects of the op amp finite gain and bandwidth on the performance of switched-capacitor filters[J]. Acta Electronica Sinica, 1984, 12(6): 48 - 55. (in Chinese)
- [14] 沈浩明. 准零阻放大器[J]. 电子学报, 1980, 8(1): 9 - 21.

作者简介



李霆霆 男. 1987年6月出生, 江西新余人. 2010年和2013年在华中科技大学分别获得工学学士和工学硕士学位, 研究生期间主要从事数字和模拟信号隔离放大器方面的研究. 目前在国网株洲供电公司从事电力工作.
E-mail: tliihust@163.com



张明 男. 1980年出生, 河南光山人. 博士, 副教授, 硕士生导师. 2002年、2005年和2008年在华中科技大学分别获得工学及管理学学士、工学硕士和工学博士学位. 主要从事聚变装置大功率电源系统设计及控制技术、聚变装置辅助加热技术等聚变相关工程技术的研究.
E-mail: zhangming@hust.edu.cn