文章编号: 1671-4598(2010)06-1361-03　　中图分类号: TP211　　文献标识码: A

1MHz 模拟量高速光电隔离的研制

晁慧丽, 季振山, 王　勇
(中科院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥　230031)

摘要: 光电耦合器在隔离模拟信号时, 普遍问题是频率响应, 输入范围, 本底噪声, 线性度等特性不能好的协调; 通过对问题的分析研究, 采用模块化组合的设计思想, 利用高速光耦 6N136, 差分放大器 THS4151 和仪表放大器 INA103, 设计了一种新的可以实现模拟信号高速准确隔离传输的电路; 详细描述了设计的原理和结构; 实验结果表明, 电路的-3dB 带宽可达 1MHz, 可输入范围为-5V~+5V, 线性度误差小于 1%, 本底噪声峰峰值小于 20mV。

关键词: 光电耦合器; 模拟信号; 高速隔离; 线性度; 本底噪声

Research and Design of Analog Signal High-speed Isolation with Optical Coupler

Chao Huili, Ji Zhenshan, Wang Yong
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei　230031, China)

Abstract: When isolating the analog signal with the optical coupler, the common problem is that frequency response, input amplitude scope, background noise and linearity can't coordinate well. Through analysis and study on the problem, using modularization combination design, the paper develops a new circuit realizing analog signal high-speed isolation with the high-speed optical coupler 6N136, full differential amplifier THS4151 and instrumental amplifier INA103. The paper emphasizes designing principle and construction. The experiment result demonstrates the circuit works well with -3dB frequency width of 1MHz, input amplitude scope from -5V to 5V, linearity error less than 1%, and peak-peak amplitude of background noise less than 20mV.

Key words: optical coupler; analog signal; high-speed isolation; linearity; background noise

0　引言

工业现场中, 在计算机控制, 检测系统尤其是一些大型装置中, 一个突出问题是各个系统的地电位问题。一般来说, 各个系统的地电位是不同的。信号传输时, 如果不同的地电位连在一起, 就形成回路, 各个系统的地电位有时侯差别很大, 这样就会形成很大的回路电流, 可能造成误触发, 甚至打坏电子设备和系统, 威胁人身安全。因此必须采取措施将各系统的地电位隔离开[1]。光电耦合器以光为媒介实现电信号的传输, 输入和输出之间没有直接的电气联系, 因此具有很强的隔离作用, 而且具有体积小, 结构简单等特点, 因此获得广泛应用。

光耦传输数字信号实现相对容易, 一般只需考虑传输速率问题; 但是在传输模拟信号时, 受到光耦自身特点的限制, 存在的普遍问题就是频率响应, 线性度, 信号输入范围, 本底噪声这几方面的性能不能好的协调; 在实际应用中, 隔离模拟信号时, 一般是先进行 A/D 或者 V/F, 将其变为数字信号, 再进行数字量隔离, 在信号接收端, 进行 D/A 或者 F/V 恢复模拟信号[2]。这无疑极大增加了设计的复杂性, 提高了成本。

针对上述问题, 本文提出了一种基于高速光耦的模拟信号隔离的新方法。

1　光电耦合器的工作原理和传输特性

光耦合器一般由三部分组成: 光的发射、光的接收及信号放大。输入的电信号驱动发光二极管 (LED), 使之发出一定波长的光, 被光探测器 (如光敏三极管) 接收而产生光电流, 再经过进一步放大后输出。这就完成了电一光一电的转换, 从而起到输入、输出隔离的作用。

图 1 是光耦的典型反向应用图[3]。当有信号输入 V_i 时, 产生电流 I_F 驱动发光二极管发光, 光敏三极管导通, 其集电极就有电流 I_L 流过, 从而在负载电阻 R_L 上就会有电压信号 V_o 输出。

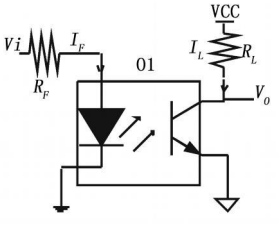

图 1　光耦典型反向工作图

对于数字量, 当输入信号为高电平 "1" 时, LED 发光, 光敏三极管导通, 输出 V_o 为低电平; 当输入为低电平 "0" 时, LED 不发光, 光敏三极管截止, 从而 V_o 为高电平, 完成了数字信号的传输。

当模拟信号输入时, 有如下关系成立,

收稿日期: 2009-12-13;　修回日期: 2010-01-20。
基金项目: 国家自然科学基金项目(10835009), 科学院知识创新工程重要方向性项目(KJCX3-SYW-N4)。
作者简介: 晁慧丽(1982-), 女, 河南漯河人, 硕士研究生, 主要从事电子技术和数据采集方向的研究。
季振山(1963-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事计算机控制和数据采集方向的研究。

中华测控网
chinamca.com
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$V_i = V_F + I_F * R_F$，$V_o = V_{CC} - R_L * I_L$，其中，V_F 为 LED 的管压降，约为 1.2V～1.5V。选择合适的阻值和电源可做到 1∶1 传输，即 $V_i = V_o$。但是实际应用时，一方面，光耦具有非线性和随温度变化的特性，必然会带来失真；另一方面，光耦自身存在分布电容 C_{CE} 和 C_{BE}，如图 2 所示，由于光耦的电流传输比 CTR (current transfer ratio)

$$CTR = \frac{I_L}{I_F}$$

一般很小，因此负载电阻 R_L 不能太小，否则输出电压幅度难以保证；但是，其值又不能太大；负载电阻 R_L 越大，由于分布电容的存在，光电耦合器的频率特性就越差，传输延时也越长。

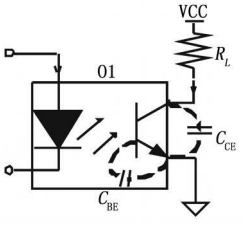

图 2 光耦分布电容

因此，在传输模拟信号时，要克服光耦的非线性，并保证足够的幅度范围，较高的频率响应和尽量小的噪声，必须合理地设计外围电路。

2 光耦实现模拟信号高速线性传输电路设计

本文采用模块化组合的设计思想，利用高速光耦 6N136，完全差分放大器 THS4151 和仪表放大器 INA103，设计了该电路。

2.1 电路结构

图 3 为电路的整体结构框图，电路共分四部分：单端转差分电路将输入信号 V_i 转成差分信号传送给光电隔离电路；光电隔离电路进行电－光－电转换；要克服其光耦非线性的影响，并尽可能提高频率响应，静态工作点设置电路是必须的；经过光电隔离后的差分信号经过差分转单端电路输出。

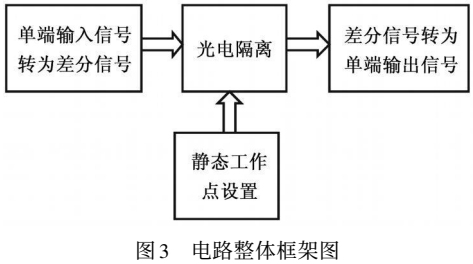

图 3 电路整体框架图

2.2 各部分电路的具体设计

现将各部分电路的具体设计详细描述。

(1) 单端信号输入转为差分信号电路：THS4151 是高速，低噪音的完全差分放大器，可以实现此部分电路的功能。采用差分思想，有诸多优点，例如可以提高共模抑制比，克服器件温度变化带来的误差等[4]。设置电阻，使得 THS4151 输出与输入信号幅度相同的差分信号，传送给光电隔离电路。

(2) 光电隔离电路：光耦采用 6N136。6N136 是安捷伦公司生产的高速光耦。其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，使得 6N136 的速度比传统光耦提高了数个数量级，其速度可达高速 1 MBit/s；并且 6N136 带有内部噪音屏蔽，提供优越的共模抑制。图 4 右边虚线框内为光电隔离电路。因为光耦的光敏电流一般很小，所以在 6N136 的输出三极管之后接有三极管组成的发射极跟随电路，以放大电流。此处，为了稳定的电流，并使电路的带宽尽可能的大，通过 R_F 引入电流负反馈，隔离之后的电压信号从反馈电阻 R_F 上获取，阻值越大，所得信号的幅度越大。此阻值的设置至关重要。这要受电路的本底噪声和光耦频率响应两个条件的限制。首先从本地噪声特性来说，R_F 上获取的信号主要是有用信号，但是还有一小部分噪声信号。它们将被送到差分信号转单端信号电路放大以恢复输入信号。也就是说，噪声将和有用信号一起被放大。为了使本底噪声尽可能的小 (一般在 20mV 以内)，R_F 必须足够大，以获取足够大的有用信号，这样差分信号转单端信号电路的放大倍数才不会太大，噪声幅度才会被控制在一定范围内。但是，R_F 与光耦频率响应密切相关，R_F 越大，其频率响应越差[5]，这决定了 R_F 不能太大，经过理论分析和反复的实际试验，确定 R_F 取 50k 时可以兼顾噪声特性和频率响应。

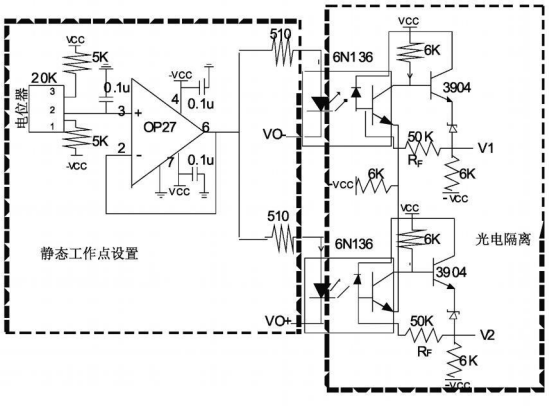

图 4 光电隔离电路和静态工作点设置电路

(3) 静态工作点设置电路：如上所述，光耦器件具有非线性传输特性。传输模拟信号时，必须合理设置静态工作点，使信号尽量落在光耦的线性工作区内。图 4 的左侧虚线框内为静态工作点设置电路，由运放 OP27，电位器和电阻构成电压跟随器，通过调节其中的电位器，可以获得合适的静态工作点电压，进而得到合理的静态工作点驱动电流。

(4) 差分信号转单端信号电路：此部分使用 INA103 实现。INA103 是低噪音，增益可调的仪表放大器，其共模抑制比很高，可有效抑制共模噪声信号，提高信噪比；并且其频带很大，在增益设为 1000 时，带宽仍可达 100MHz。调节外部电位器使输出信号的幅度与输入相同。

2.3 测试结果

经过测试，可知：(1) 该电路可以对－5V～＋5V，频率在 400KHz 以下的电压信号进行 1∶1 传输，如图 5 是输入小号的测试图；图 6 是大信号的测试图；(2) －3dB 带宽可达

中华测控网
chinamca.com
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2MHz，如图 7 所示为－3dB 带宽测试图；（3）本底噪声峰峰值在 20mV 以内，如图 8 所示；（4）线性度较好；在－5V ~ +5V 的电压信号中取样，通过信号发生器给电路直流电压信号 V_i，然后用万用表测量输出信号 V_O。具体数据如表 1 所示。通过计算可知，在有效的输入范围内，线性误差小于 1%。注：图 5~ 图 7 中，通道 1 所示为输入信号图，通道 2 为输出信号图。

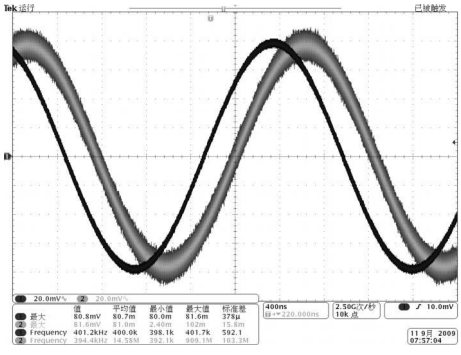

图 5　小信号测试　f = 400kHz

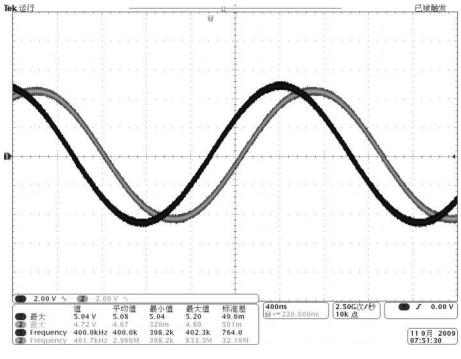

图 6　大信号测试　f = 400kHz

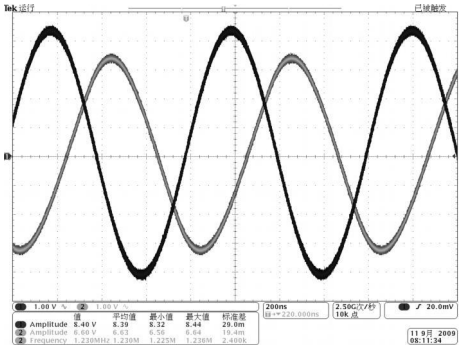

图 7　－3dB 带宽测试　f = 1.2MHz

3　结束语

本文的创新点在于：采用差分思想，输入信号经差分变换，分两路隔离以克服温漂和共模噪声；在光耦后加三极管射级跟随器以增大光敏器件感应的微弱电流；运用负反馈获取隔离之后的信号，稳定光敏电流，拓宽光耦的频带，并且两路对称隔离，可以减弱光耦的非线性影响。

实验结果表明，该电路比较好地解决了模拟信号隔离传输时频率响应，输入范围，线性度和本底噪声不能好的协调问题，电路结构简单，成本较低，对模拟信号的高速准确隔离有很强的推广价值。

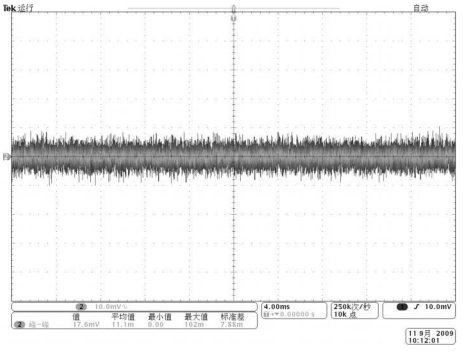

图 8　本底噪声

表 1　输入 V_{in}，输出 V_o 和输出误差 ΔV 测试

V_i(V)	V_o(V)	$\Delta V = V_o - V_i$	$(\lvert \Delta V \rvert / V_i)$%
0	0.308	\	\
0.012	0.320	0	0
0.115	0.422	－1	0.86
0.312	0.618	－2	0.64
0.415	0.720	－3	0.72
0.528	0.834	－2	0.38
1.139	1.440	－7	0.61
1.860	2.100	－8	0.43
2.918	3.216	－10	0.34
3.866	4.162	－12	0.31
4.305	4.586	－27	0.63
－0.011	0.296	－1	0.91
－0.114	0.195	1	0.88
－0.320	－0.010	2	0.63
－0.528	－0.216	4	0.76
－0.837	－0.523	5	0.60
－1.041	－0.726	7	0.67
－2.016	－1.700	8	0.50
－3.014	－2.696	10	0.33
－3.620	－3.298	14	0.39
－4.336	－4.008	20	0.46

参考文献：

[1] 沈　洁．基于 NetBox 的远程控制信号调理器及高压线性光电隔离的研制［D］．中国科学院等离子体物理研究所，2005.

[2] 吕勇军．数据采集系统中的隔离技术［J］．国外电子测量技术，2003，(s)：67-68.

[3] 后　鹏，丁国清．模拟量线性光电隔离的新设计［J］．电子测量技术，2009，32（1）：11-12.

[4] 华成英，童诗白．模拟电子技术基础第四版［M］．北京：高等教育出版社，2006，159.

[5] 张邵华，施红军，林言方．光电耦合隔离放大器的频率响应研究［J］，半导体光电，2003，24（1）：58-59.

中华测控网
chinamca.com
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net