

一种信号隔离电路设计及故障模式分析

韩雨桐, 黄晨, 王晓鹏

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 隔离电路是工业生产现场智能监测设备、显示仪表等之间连接不可或缺的组成部分, 能够去除共模电压和外界电磁干扰, 对整个系统的测量精度和运行状态有着至关重要的作用; 首先研究现有的隔离电路, 并设计一种将 1 路 4~20 mA 输入信号转换为 2 路 1~5 V 输出信号的高可靠隔离电路; 该电路由 1 路输入、单片机、2 路输出以及隔离电源组成; 其中, 输入电路负责将输入的电流信号转换为电压信号并进行滤波; 单片机负责对 AD 转换、误差补偿以及输出组态选择; 输出电路负责光耦隔离、信号整形和 DA 转换; 经过上述处理, 输出 2 路相同的电压信号; 该电路能够将干扰源和易干扰部分隔离, 从而保证设备与操作安全; 典型故障模式下的评估结果表明, 该隔离电路能够有效消除串扰和降低外部干扰, 能够满足不同监测平台隔离要求, 适用于高精度测控系统。

关键词: 信号隔离; 设计; 故障分析

A Signal Isolation Circuit Design and Fault Mode Analysis

Han Yutong, Huang Chen, Wang Xiaopeng

(Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Isolation circuit is an essential part of the connection between intelligent monitoring equipment and display instrument in industrial production site. It is able to reject the common-mode voltage (CMV) and external electromagnetic interference (EMI), and therefore is significant to the measurement accuracy and the performance of the whole system. Firstly, we investigate the current work and design a high reliable isolation circuit to change one 4~20 mA input to two 1~5 V outputs. The isolation circuit is mainly consisted of four parts, including isolated power, one input, MCU, and two outputs, where the isolated power is used to supply the system energy; the input circuit is responsible for transforming the input current signal into voltage signal and filtering; MCU is responsible for AD conversion, error compensation and output configuration selection; the output circuit is responsible for optocoupler isolation, signal shaping and DA conversion. After the above procedure, it outputs two identical voltage signals. The designed circuit can isolate the interference source from the vulnerable part, so that to ensure the safety of equipment and operation. Evaluation with typical fault modes demonstrates that the proposed isolation circuit is more effective in eliminating crosstalk and reducing external interference. Therefore, the proposed isolated circuit is able to satisfy the isolation requirement of different monitoring platform and is applicable to measuring and controlling system with high measurement accuracy.

Keywords: signal isolation; design; fault analysis

0 引言

工业信号为什么需要隔离? 由于工业现场的环境条件太过复杂, 各种干扰(电气设备的频率干扰、电晕电火花放电的干扰、天体放电的干扰、感应干扰等), 通过不同的耦合方式(电磁耦合、电容耦合、共阻抗耦合、漏电流耦合等)进入到测量功能电路。另外, 有些信号需要长距离传输, 传输过程中会引入很强的干扰, 而输出电路常需要放大, 这就会使输出信号的准确度下降, 严重的情况下干扰信号可能会覆盖原信号, 这些都会使测量的结果据标称值产生误差, 严重时可能会由于误差是控制系统产生误判断, 从而执行机构误动作, 导致功能实现异常, 严重的会造成设备损坏、人员受伤。所以为了对工业生产中的干扰进行抑制隔离, 保证整个检测系统的准确性, 使系统能够安全、平稳、准确无误地运行, 信号和仪表或系统之间采取一定

的防范措施是非常有必要的, 最常采用的便是电隔离方法, 信号隔离变换电路就派上用场了。在自动化仪表应用系统的组建过程中, 信号隔离起着十分关键的作用。

由于电气系统的各部分的电气特性有着很大差别, 在发送数字信号或者模拟信号的过程中极可能在发送端和接收端产生电流连接, 信号隔离电路的最主要的功能就是能够把输入信号和输出信号隔离开来, 很好的解决环路和设备之间的相互干扰信号隔离电路能, 隔离变换电路的第二个功能就算去除系统与外界的共模电压, 消除线路传输过程中外界的一些电磁干扰。此外工业生产需要电源为多台设备供电, 若功率较大需要多台电源, 则可能会造成冲突, 大大影响系统的正常工作, 使用信号隔离电路之后就可以有效的解决这个问题, 使得各个设备有条不紊的工作。信号隔离电路可以对一些设备进行信号隔离分配。很多设备

收稿日期: 2020-12-06; 修回日期: 2021-01-19。

作者简介: 韩雨桐(1989-), 女, 辽宁营口人, 工程师, 主要从事运载火箭信息应用与网络测控系统设计方向的研究。

引用格式: 韩雨桐, 黄晨, 王晓鹏. 一种信号隔离电路设计及故障模式分析[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 70-73, 96.

常常会带有一些负载,这就不可避免的要使用到电阻和导线等,可是一般情况下导线长度往往会影响设备的电阻,电阻一改变又会影响整个设备的电压,使用信号隔离电路后就能解决好以上各种问题。

本文介绍一种有效的信号隔离电路,具备将 1 路 4~20 mA 电流输入信号转换为 2 路相同 1~5 V 电压输出信号功能,将输入、输出、电源三端相互电气隔离,并通过仿真进行该电路的一种故障模式分析。

1 信号隔离电路原理

在复杂的工业现场环境中,有相当多的信号干扰源会对传感器、仪器仪表正常工作造成危害,最严重的是电网尖峰脉冲干扰,信号在传输过程中会遇到各种各样的干扰,隔离就是要破坏干扰的途径,切断干扰耦合的通道,从而实现输入、输出、电源之间的电气三端隔离,抑制干扰的一种技术措施。实现保护下级控制电路、削弱环境噪声对测试电路的影响和抑制公共地等不明脉冲对设备的干扰。

信号隔离变换电路的作用有以下 3 条。

1) 变换作用: 信号隔离器是将一种形式的信号转换为另一种形式的信号,如将温度信号转换为 4~20 mA 电流信号、标准转换 4~20 mA 转 1~5 V;

2) 放大、远传作用: 为方便长距离传输,将一些微弱的 mV 级的信号放大至易处理的标准信号,将易收到干扰的电压信号转换为电流信号,比如 4~20 mA 电流信号就可以传输 1 000 m;

3) 保安全作用: 隔离变换电路可以保护上位更重要器件的安全,比如工控机、PLC 等,隔离作用可以保护其免受损坏。

本次设计的信号隔离电路是由电流输入电路、单片机、输出电路 1、输出电路 2 以及隔离电源电路组成。其中输入电路的主要作用是将输入的电流信号转换为电压信号,且包含滤波电路,对信号进行滤波;单片机的功能是实现将对经输入电路转换后的电压信号进行 AD 转换、误差补偿以及对输出组态进行选择;输出电路 1、2 将输出的数字信号分别通过 PC900V 光耦进行隔离,隔离后的信号通过脉冲整形、DA 转换输出两路相同的电压信号;隔离电源将 24 V 直流转换为输入电路、单片机和光耦需要的电压信号为其供电。下面详细的介绍一下输入电路的硬件设计。

2 硬件电路设计

电流输入电路的详细设计见图 2。

使用两个精密电阻 R3、R4,并联形成 I-U 转换电阻,4~20 mA 的输入电流 I_{in} 经过转换电阻后变为 0.2~1.0 V DC 的电压信号,使用两个电容 C1、C2 并联形成滤波电路对转换的电压信号进行滤波,得到电压 U_d 。 U_d 经过运放 U1A 形成电压 U_O , U_O 最终进入单片机的 AD0 通道进行 AD 采集。电路输入输出关系为(忽略 30 mV 偏移电压):

$$U_O = \frac{I_m \times 50 \Omega}{10 \text{ k}\Omega} \times 38.9 \text{ k}\Omega$$

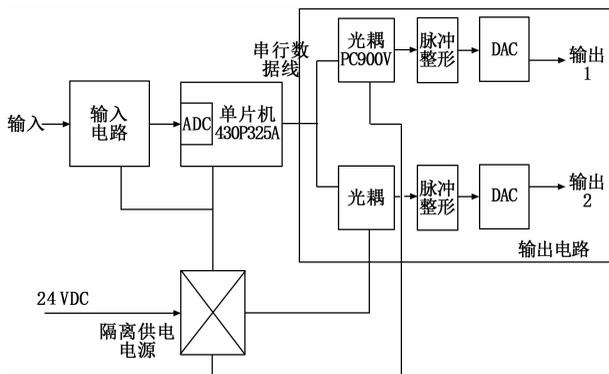


图 1 信号隔离电路原理框图

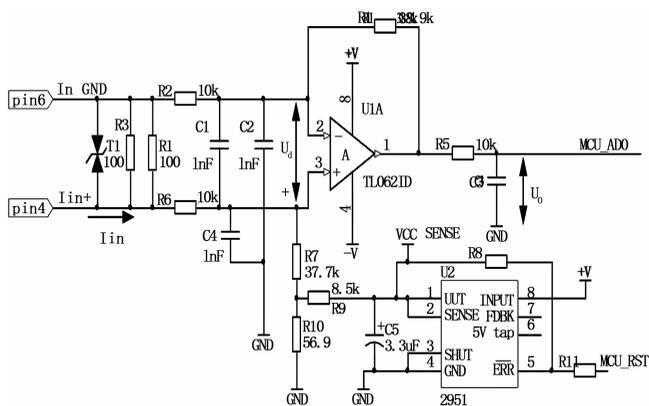


图 2 电流输入电路原理图

U1A 为差分比例放大电路, +V 和 -V 为隔离供电电源的 24 V 转换电压(提供的输入电路供电电源), +V 为 7.0 VDC, -V 为 -7.4 VDC。

U2 是线性稳压器,可以为单片机提供 VCC 供电 5 V,同时经过 R9、R10 分压,能够为运放提供一个直流偏移电压(约 30 mV),起到改善 AD 采集精度的作用。

3 故障模式分析

3.1 故障现象

在信号隔离电路批量调试过程中发现一块电路板输出电路 1 和输出电路 2 测得数据均偏差较大,详见表 1。测试结果显示故障模块的转换精度超出 0.15% 的标称范围。

表 1 故障电路板测试结果

模拟输入 电流值/mA	输出理 论值/V	两路输出电压	
		输出电路 1 测 试值/V	输出电路 2 测 试值/V
4	1.00	1.248	1.248
8	2.00	2.175	2.175
12	3.00	3.066	3.065
16	4.00	3.953	3.953
20	5.00	4.86	4.86

3.2 故障排查及定位

故障出现时两路输出信号均为误差过大,且输出值较

为一致，结合电路原理可知输出部分电路故障，即输出电路 1 和输出电路 2 同时发生故障的可能性较小。为了验证单片机电路和输出电路功能未出现故障，采用本次故障电路板与正常电路板对比的方式测量单片机输入信号与模块输出信号的关系，测试点如图 3 所示。

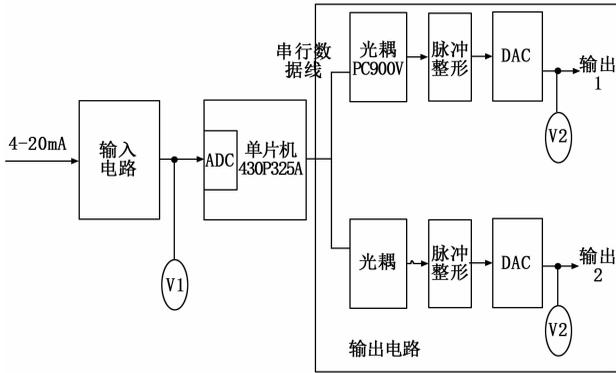


图 3 输出电路、单片机故障排查测试点

如图 3 所示，分别测量正常模块和故障模块的单片机输入端电压 V1 和模块输出端电压 V2（V2 取输出 1 电压值，输出 2 电压值与输出 1 一致），测量结果如表 2 所示。

表 2 正常电路与故障电路测试结果对比

正常电路			故障电路		
输入电流/ mA	V1 电压 (直流)/V	V2 电压 (直流)/V	输入电 流/mA	V1 电压 (直流)/V	V2 电压 (直流)/V
4	0.809 0	1.009 0	4	1.036 0	1.291 0
8	1.585 8	2.008 0	8	1.740 0	2.195 0
12	2.362 0	3.007 0	12	2.430 0	3.081 0
16	3.138 4	4.010 0	16	3.123 0	3.973 0
20	3.914 6	5.010 0	20	3.800 0	4.840 0
拟合曲线	$y = 1.2885 x - 0.0347$		拟合曲线	$y = 1.2843 x - 0.0395$	

经过测试和分析，故障模块的 V1-V2 转换关系与正常模块的 V1-V2 转换关系一致，故可排除单片机故障和输出电路故障，而输入电流-V1 转换关系与正常电路的转换关系不同，因此可以排除故障定位于电流-V1 转换环节，即输入电路部分。

对输入电路（如图 2）进行分段测试，分别测量故障模块和正常模块输入电路中的 U_d 和 U_o 信号，发现故障模块与正常模块的 U_d 信号有差别，如表 3。

表 3 正常电路与故障电路测试结果对比

正常电路			故障电路		
输入电 流/mA	U_d 电压 (直流)/mV	U_o 电压 (直流)/mV	输入电 流/mA	U_d 电压 (直流)/mV	U_o 电压 (直流)/mV
0	-0.4	28.9	0	-109	287
20	-6	3.920	20	40	3.80

使用示波器查看输入输出信号波形，发现故障电路运放的输入输出信号上叠加了很大幅度的交流振荡信号，如图 4，而正常模块运放输入输出端信号波形为直流，不含交流信号。

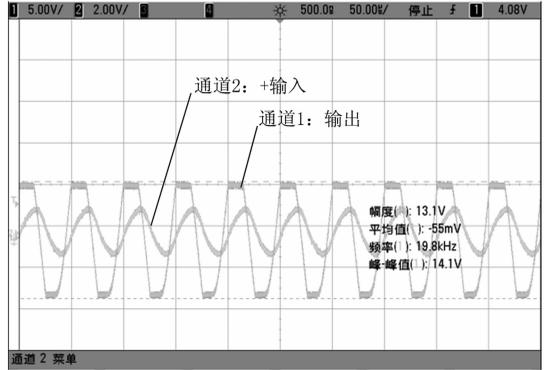


图 4 故障电路运放输入输出信号波形

图 4 是输入电流为 0 mA 时运放输出端与输入端信号的波形，可见运放输出端信号幅度接近运放的正负供电电源电压，而正常电路的运放输出端信号为直流。进一步对输入电路的其他点进行测试，发现其他点的输出波形均为直流，未叠加交流信号，因此可以确定输入电路中的 U_d 信号异常是由于故障电路板的运放电路产生了自激振荡造成的。

3.3 机理分析

3.3.1 运放电路原理

将运放的输出与运放的反相输入端连接起来，这样的方式被称为负反馈，负反馈运放电路会很快达到一个稳定状态，输出电压的幅值会很准确的维持运放两个输入端之间的压差，这个压差反过来会产生准确的运放输出电压的幅值。这是使系统达到自稳定的关键。

信号隔离电路输入运放电路可简化为如下形式（省略了与分析无关的部分元件）：

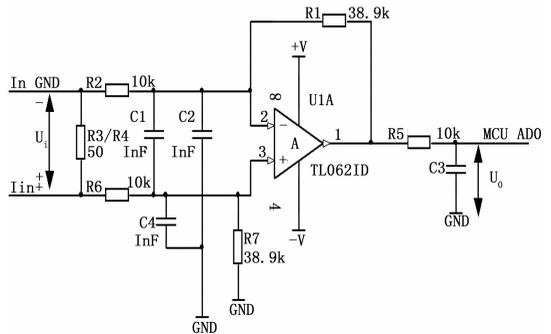


图 5 运放负反馈放大电路

该电路为典型的负反馈放大电路，根据负反馈电路分析方法，正常工作时电路输入输出的增益 G 为：

$$G = \frac{U_o}{U_i} = \frac{A}{1 + FA}$$

其中： A 为运放电路开环增益， F 为反馈系数， AF 为环路增益，即 $R2/R1$ ，由于理想情况下运放开环增益 $A \gg$

1, 因此电路增益, 即实现比例放大作用。

$$G \approx \frac{1}{F} = \frac{R1}{R2}$$

3.3.2 运放电路自激振荡原理

使用负反馈会改善线性度、增益稳定、输出阻抗、增益的精度, 但使用负反馈同样也会带来一个严重的问题, 那就是降低系统的稳定性。

理论上当电路中 $1+FA$ 趋近于 0 时, $|G|$ 为无穷, 即没有信号输入也会有波形输出, 于是就产生了自激振荡。自激振荡的引起, 主要是因为集成运算放大器内部是由多级直流放大器所组成, 由于每级放大器的输出及后一级放大器的输入都存在输出阻抗和输入阻抗及分布式电容, 这样在级间就存在 R-C 相移网络, 当信号每通过一级 R-C 网络后, 就要产生一个附加相移。此外, 在运放的外部偏执电阻和运放输入电容、运放输出电阻和容性负载反馈电容、一级多级运放通过电源的公共内阻、甚至电源线上的分布电感、接地不良等耦合, 都可形成附加相移。结果, 运放输出的信号, 通过负反馈回路再叠加增到 180 度的附加相移, 且若反馈量足够大, 终将使负反馈转变成正反馈, 从而引起振荡。

由于实际电路中, 运放的增益和相移会随信号频率变化 (即频率响应), 当信号频率变化时, 输出信号和反馈信号会产生附加相移。如果附加相移达到 $\pm 180^\circ$, 则此时反馈信号与输入信号同相, 负反馈就会变成正反馈, 反馈信号加强, 当反馈信号大于净输入信号时, 即使去掉输入信号也有信号输出, 于是就产生了自激振荡。因此自激振荡产生的条件为电路附加相移达到 $\pm 180^\circ$ 时, 环路增益 $|FA| > 1$ 。

运放电路的设计通过适当设计电路参数保证电路附加相移达到 $\pm 180^\circ$ 时环路增益 $|FA| < 1$, 电路不会产生自激振荡。

当印制板线路失效或其他原因导致线路阻抗参数发生变化时, 可能出现电路附加相移达到 $\pm 180^\circ$ 时, 环路增益 $|FA| > 1$ 的情况, 引起自激振荡。使用电路仿真软件对上述电路进行仿真, 电路见图 6, 在运放同相输入端对 GND 的电容接地端串入 10 M 电阻 (RX1) 模拟印制板线路故障的情况, 电路输入输出波形见图 7, 可见输出波形幅度接近供电电源电压, 验证了故障信号隔离电路确实产生了自激振荡。

3.4 故障模式分析

用手按压电路板 C2、C3 电容位置, 模拟印制板线路故障的情况, 使用示波器对输出波形就行实时监测, 发现输出波形会跟随手按压电容的力度不同而变化, 故可定位于运放电路 C2、C3 电容管脚接触性向导致运放电路产生了自激振荡, 最终造成信号隔离电路输出超差。

在运输、振动等状态下信号隔离电路发生输出超差的故障概率会增大, 故对于振动环境要求比较严苛的工况, 体积较大的元器件或工装在振动条件严苛的工况下更容易

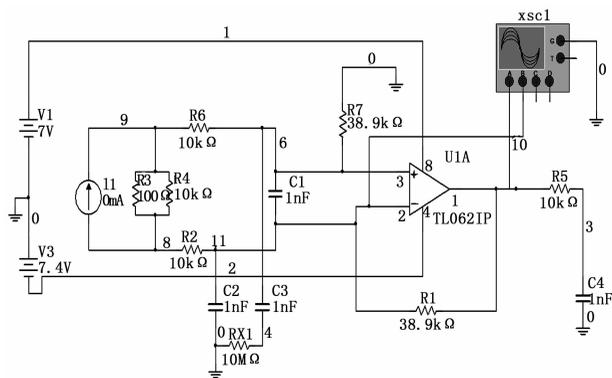


图 6 运放负反馈放大电路仿真电路

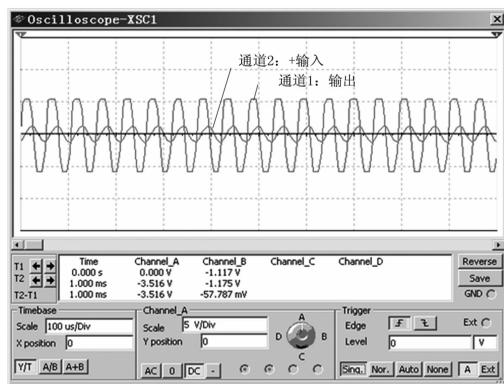


图 7 运放负反馈放大电路故障模拟仿真结果

发生损坏, 故可通过减小元器件和电路板的大小来增加电路的抗震能力, 也可整机装入减震机箱减少振动干扰, 建议对信号隔离电路板进行一定量级的振动试验筛选出质量较差的电路板。

4 结束语

信号隔离变换电路在工业环境中, 特别是在实时精确控制和精密测量系统中的应用越发广泛。经过信号隔离变换电路处理过的信号可以将大部分的干扰滤掉, 避免测量误差及误差导致的误操作, 使得测量结果更加精确。林挂电磁干扰的客观存在, 使信号在传输过程中难免因受到干扰而失真。如果现场采集的信号有强脉冲, 信号隔离变换电路用于隔离现场设备采集到的信号和计算机处理的信号, 能够起到缓冲的作用, 避免设备受到强脉冲冲击而损坏, 这就使得信号隔离变换电路的存在更有意义。

本文提出了一种信号隔离电路设计方法, 信号隔离电路由电流输入电路、单片机、输出电路 1、输出电路 2 以及隔离电源电路组成。此电路设计简单可靠, 实用性强, 能够从电路上把干扰源和易干扰的部分隔离开来, 切断干扰通道, 实现输入、输出、电源之间的电气三端隔离, 保证设备与操作人员安全, 并基于此信号隔离电路, 通过仿真验证给出了一种故障模式的机理分析和故障应对策略措施, 对于工业中信号隔离设计具有一定借鉴意义^[1-9]。

(下转第 96 页)