

Abstract

The selectivity leakage protective system can give out alarming signal or cut off the fault branches selectively when the leakage fault happens, and the non-fault branches are working normally. It can reduce the power-off range and be facilitate to look far the fault, shorten the power-off time, and raise the reliability of power distribution.

Based on the actual leakage-protection system for underground low voltage distribution networks, this paper advance a new scheme which based on additional DC power supply and direction of zero sequence power, and PIC16F877A is the core. And introduce the realization of protection device based on this new scheme. This device use the principle of additional DC power supply in main feeding switch, and use the principle of direction of zero sequence power in branch feeding switch. It can improve action capability of Leakage-protection for low voltage distribution networks, consequently improve security of Underground work.

Key words: PIC16F877A, selectivity, leakage-protection, underground low voltage distribution networks, zero sequence power

(The science project of KaiLuan QianJiaying Mine)

创新点声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果：以高性能单片机 PIC16F877A 为中央控制单元，设计了一种新型选择性漏电保护装置，简化了传统保护装置的设计，可以改善井下低压电网漏电保护的動作性能。

尽我所知，到目前国内外文献未见报道。

作者：张玲玲

日期：2006 年 1 月 8 日

1 绪论

1.1 选题背景

漏电保护是保证煤矿井下安全供电的三大保护^[1](过流保护、漏电保护和保护接地)之一,是防止人身触电的重要措施。本文是针对开滦集团钱家营矿业分公司低压供电系统的漏电保护而设计的。

我国矿井下的工作环境比较潮湿,相对湿度往往高达95%以上,为此,对其使用的电气设备和电缆的绝缘提出较高的要求。尽管如此,运行中的电气设备及其供电电缆,由于工作环境恶劣,漏电现象时有发生。因此,装设漏电保护装置对矿井安全生产尤为重要^{[2][3]}。主要体现在:

(1) 防止漏电流引燃瓦斯和煤尘

当空气中的瓦斯浓度在5%~15%,氧气浓度适当,并遇上点火源时,便会引起爆炸。电缆与其他井下电气设备相比更易受损。当电缆受损后,由于绝缘被破坏,便有漏电流。漏电流就有可能成为点火源。由于瓦斯的可能点燃能量很低,仅为0.28mJ。因此,及时有效的漏电保护装置可降低漏电流引燃瓦斯、煤尘的可能性。

(2) 防止漏电流引爆电气雷管

漏电流可能会造成电气雷管的引爆,并造成重大事故。由于一般引爆电气雷管的电流(大于300mA)大于人身触电安全电流,因此,满足人身触电无伤亡要求的漏电保护必然能防止漏电流引爆电气雷管。

(3) 防止漏电流烧损电气设备

对于高压电路,由于电网分布电容大、电压高、漏电流大。因此,漏电流的长期存在可烧毁电气设备。尤其是橡胶电缆,如果单相漏电故障不及时处理,则其漏电流可能会使电缆的绝缘受损而发展成两相短路,使故障事态扩大。对低压电路,由于漏电流小,一般漏电流不能直接烧毁电气设备。但是由于漏电流长期存在,电气设备局部发热使其绝缘局部老化加剧,必将大大缩短电气设备的寿命,而漏电保护则使电网不可能长时间地存在漏电流。因此,可有效地防止漏电流烧损电气设备。

1.2 选择性漏电保护的发展现状

漏电保护的主要目的是通过切断电源的操作来防止人身触电伤亡和漏电电流引爆瓦斯煤尘。我国对漏电保护的研究是从煤矿井下低压电网的漏电保护开始的,至今已有四十余年的历史。四十年的实践证明,它对我国矿井安全供电发挥了巨大的作用。它已成为我国矿井安全供电的不可缺少的组成部分。正因为它在安全供电方面作用重大,因此,漏电保护已陆续在各行各业的供电网中安家落户。

早在 20 世纪 30 年代,英国就在磁力启动器中装设了漏电保护装置,但这种漏电保护装置只适用于变压器中性点直接接地的供电系统[4]。由于变压器中性点直接接地供电系统在供电安全方面显示出它的一些弱点,这种供电系统后来在矿井电网中被逐渐淘汰。1949 年,前苏联开始研制中性点不接地供电系统使用的漏电保护装置(PYB 型防爆漏电继电器),采用的是附加直流源的原理。同时,西德、波兰、日本等国也先后开发出适合于本国矿井供电系统的漏电保护装置。

我国在 20 世纪 50 年代初,引进了苏联的漏电保护装置,并在矿井中推广应用。同时进行了仿制,形成 JY82 型隔爆检漏继电器产品,一直延用到 80 年代末,甚至有的矿井现在还在使用。随着煤炭生产机械化程度的提高,这种产品就逐渐不能适应生产的要求。因此,60 年代我国自行设计和生产了 JL80, JL82 型隔爆检漏继电器。70 年代又研制生产了 JJKB30 型隔爆检漏继电器,随着科学技术的发展和矿井电网电压等级的升高,我国自行研制了多种类型的漏电保护装置。

选择性的漏电保护是指当电网发生漏电故障时,能够有选择地发出故障信号或切断故障支路电源。选择性漏电保护系统是漏电保护技术的发展趋势,是防止人身触电的重要保护措施。它可以保证只切除漏电故障线路和设备,非故障部分继续工作,减小故障停电范围,而且便于寻找漏电故障,缩短漏电停电时间,提高供电的可靠性。选择性漏电保护作为一门综合性学科随着科学技术的进步在不断地发展。

1.3 课题研究意义

我国煤矿井下低压电网的中性点全部为不接地方式,漏电是井下低

压电网的主要故障形式之一，约占其总故障的 70%左右，它不但会导致人身触电事故，还会形成单相接地，进而发展成为相间短路，由此引发的电弧会造成瓦斯和煤尘爆炸。

漏电保护的原理和装置的种类较多，但从适用于井下低压电网的漏电保护原理来看，目前主要有以下几种：旁路接地式保护原理、附加直流源检测保护原理、零序电压保护原理、零序电流大小及零序电流方向保护原理^[5]。前三种保护原理为非选择性漏电保护，供电电网的任何地方出现漏电故障，保护装置即动作并切除整个工作面电网，且无法确定故障支路。后两种保护原理为选择性漏电保护，可以判断出故障支路，有选择地将故障支路切除^[6]。但是，随着矿井规模的扩大，供电系统复杂性的提高，对漏电保护提出了更高的要求。

开滦集团钱家营矿业分公司煤矿井下低压供电系统中所使用的漏电保护装置，多数采用附加直流电源原理，每个采区变电所或移动变电站设一个检漏装置，无论电网中何处发生漏电故障，都能使检漏装置动作，导致整个工作面停电，无选择性，且不易寻找故障点，严重影响矿井的安全生产。

因此，研究选择性漏电保护理论与技术应用对矿井安全生产具有重要意义。

1.4 本文的主要研究内容及工作任务

本论文的研究对象是井下中性点不接地的低压电网系统，研究重点主要放在发生单相漏电故障时。通过对中性点不接地低压电网的漏电分析，提出了基于附加直流电源检测和零序功率方向的漏电保护新判据。将选择性漏电保护理论应用于漏电保护装置之中。根据实验室条件进行了漏电保护原理的实验。

本文设计了选择性漏电保护装置的硬件电路。采用模块化设计思想。分为模拟量输入输出模块、中央处理模块、开关量输入输出模块、人机接口模块、通讯模块、绝缘监视模块及外部漏电保护模块。

本装置软件部分采用层次化设计方法，是实时多任务管理系统。软件的总体结构分为应用层、基础功能层、管理调度层和硬件驱动层等四件的总体结构分为应用层、基础功能层、管理调度层和硬件驱动层等四

级。各个功能层之间功能彼此独立，由统一的调度程序来完成对各个功能模块的调度任务，并且当要求改变程序优先级时，只需对调度程序进行部分改动就可以，大大的增强了程序的灵活性。

2 井下低压电网的漏电分析

在电力系统中，当带电导体对大地的绝缘阻抗降低到一定程度，使经该阻抗流入大地的电流增大到一定程度，我们就说该带电导体发生了漏电故障，或者说该供电系统发生了漏电故障。

2.1 井下低压供电系统的基本特点

当电网发生漏电故障时，原来三相对称的运行状态就要发生变化，绝大部分情况下其对地的对称性遭到破坏，因而各相对地电压不再对称，并产生零序电压和零序电流^[7]。运用对称分量法、节点电压法及戴维南定理等理论，可以对井下低压 660V 供电系统发生漏电时的状态进行深入的定量分析，分析的结果将为设计完善可靠的漏电保护系统提供理论根据。同样的分析方法，也适用于中性点绝缘的低压 380V、1140V 和 6~10kV 高压电网。目前我国煤矿井下广泛使用的低压供电系统有以下特点：

2.1.1 变压器的运行方式

目前应用较广泛的煤矿井下低压电网中性点的接地方式有两种。中国、美国、德国等国家采用变压器中性点绝缘的运行方式，其最大特点是比较安全，漏电电流小，但对保护装置的灵敏度要求较高；英国和印度、澳大利亚等英联邦成员国，大都采用变压器中性点经高电阻接地的运行方式，其特点是漏电电流稍大，不利于安全，但对保护装置的灵敏度要求不高，因而保护装置的可靠性较高。这种接地方式发生漏电时的理论分析与结果都与中性点绝缘系统类似。一般工矿企业的地面电压，由于环境条件较好和要兼顾照明等原因，都采用中性点直接接地的运行方式。

在中性点直接接地的低压电网中，人若触及一相带电导体，人体将承受相电压，此时通过人体的电流由公式 $I_{ma} = V_{ll} / \sqrt{3} R_{ma}$ 决定。取人体电阻为 1000Ω ，对于线电压为 660V 的电网，通过人体的电流为 380mA，远远超过安全电流的规定，所以是非常危险的。

在中性点直接接地的电网中，若发生单相接地，便形成单相接地短路，短路电流很大，短路点将产生一个大电弧，如果在井下，就足以引

起瓦斯、煤尘爆炸。

鉴于以上原因，我国《煤矿安全规程》第 409 条规定：井下配电变压器不得中性点直接接地，但专供架线电机车变流设备用的专用变压器，不受此限；由地面中性点直接接地的变压器或发电机不得直接向井下供电。

2.1.2 井下低压供电单元

井下低压电网虽然要使用多台动力变压器，而且它们的高压侧必然是数台联在一起的，即由一回 6~10kV 电缆给数台动力变压器供电，但各变压器的低压侧却彼此无直接的电联系，即采用分裂运行方式。过去在特定的情况下，有采用两台变压器并联运行的，但由于这种运行方式有短路电流大、保护设置整定困难、电网对地阻抗低以及故障停电范围大等缺点，故至今已基本上被淘汰。

整个井下低压电网由多个相对独立的供电单元所组成，它们各自是一个独立的小供电系统，由一台动力变压器和若干低压馈电开关、起动机、矿用电缆、电动机等用电设备所组成。在低压的范围内，各供电单元间无任何电联系。就漏电保护而言，只要对一个供电单元能设置一完善的漏电保护系统，则整个井下低压电网的漏电保护都可类此解决。

2.1.3 矿井低压电网电压等级

其中 660V 是现今应用最广泛最普遍的电压，无论是炮采、普采、高档普采及综采都在大量使用 660V 电网供电^[8]。380V 在 60 年代以前是我国井下唯一的动力电压（低压）级，但随着 70 年代以来机械化采煤的发展和用电设备单机容量的增大，380V 电网已逐步被 660V 和 1140V 电网所替换，目前仅在一些地方煤矿和少数采用炮采工艺的国营煤矿使用。1140V 电网仅用于综合机械化采煤机组，但全矿井下要实现统一的低压 1140V 供电还有一定的困难，而且其必要性也尚有争议。

2.1.4 井下低压供电系统的电气模型

在组成低压电网的电缆中，大部分是橡套电缆，仅对长期固定不动的用电设备，才使用铠装电缆。由于电缆对地电容较大，所以在对井下低压供电单元的漏电分析中，就不能忽略对地电容这一参数。电网对地

电容越大，人身触电电流也越大。实际上电网的各相对地电容是分布电容，沿线路全长都存在但在理论分析中为了简便起见，都是将它们集中起来，作为集中性电容处理，相当于线路各相对地分别连接了一个相等的电容。线路各相对地的绝缘电阻也是同样的方法处理为集中性电阻。这种处理方法的根据是：当进入大地后，所有的分布参数便按相并联起来了，在忽略很小的大地和线路本身的阻抗后，便成为各相的集中性参数。一般用 C 和 r 来表示电网每相对地的电容和绝缘电阻，对于 660V 电网， C 的数值范围为 $0 \sim 1 \mu F$ ， r 的数值范围为 $60 \sim 300 k\Omega$ 。如图所示为钱家营矿井下低压供电单元电气模型。

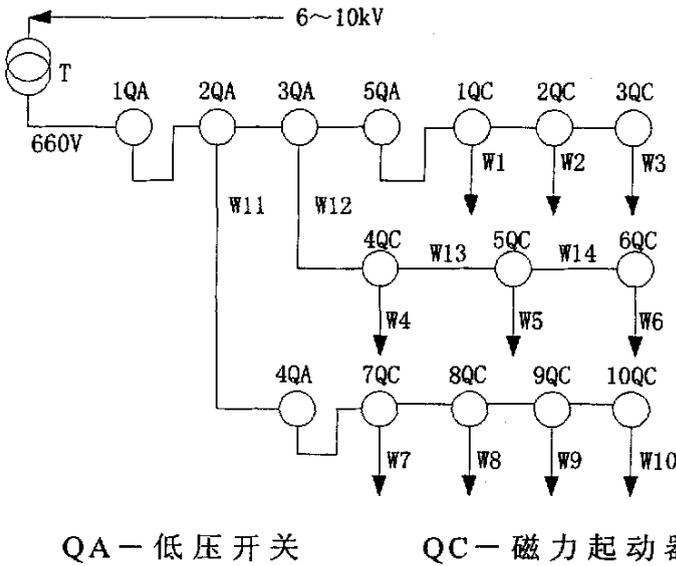


图 2-1 钱家营矿井下低压供电单元的电气模型

图中动力变压器 T 的变比为 $6 \sim 10kV/0.69kV$ ，容量约为 $50 \sim 500kVA$ ；由低压总开关 1QA 控制了三个分组开关，其中 5QA 所辖为一单纯放射式，2QA、4QA 所辖为一经干线 W11 后的放射式，3QA 所辖为一单纯干线式。整个供电单元由变压器 T、低压馈电开关 1~5QA、磁力起动器 1~10QC、各段电缆线路以及供电末端的各电动机(未画出)所构成。

2.2 井下低压电网的漏电分析

由于三相电源的中性点不接地，所以不论电网发生什么类型的漏电故障，电网的线电压将不发生变化，仍是三相对称的。单相漏电和两相

漏电均属于不对称故障，故障发生后，电网各相对地电源就不再对称，并且变压器中性点也要发生位移，产生对地电压（零序电压），如果系统中有零序回路，则在回路中有零序电流流通^[9]。

考虑到井下低压电网与其各项对地的绝缘阻抗可以构成一具有一个节点的网络，故应用节点电压法来进行漏电分析较为方便，但这种分析方法要用到的零序电压、零序电流及零序阻抗的概念，仍出自对称分量法的理论。

针对一个节点的网络，节点电压法的定义为：联到节点的各支路电动势和该支路阻抗之商的相量和，等于该节点电压与联到该节点各支路阻抗并联值之商。即

$$\dot{V}_{n0}/Z'_{n0} = \sum \left(\dot{E}_i/Z_i \right) \dots \dots \dots (2-1)$$

式中 \dot{V}_{n0} — 节点电压；

Z'_{n0} — 联到节点的所有支路阻抗并联值（理解为节点内所有支路）；

\dot{E}_i — 节点内各支路的电动势；

Z_i — 与各 E_i 同支路的阻抗。

2.2.1 单相漏电分析

井下低压供电单元发生单相漏电的情况如图 2-2。

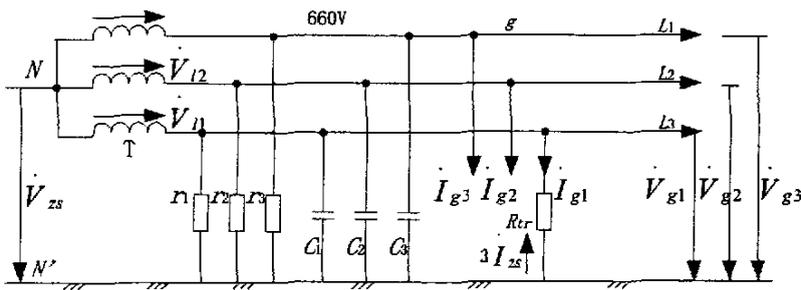


图 2-2 利用节点电压法分析单相漏电的电路图

图中，动力变压器 T 二次侧中性点不接地， R_{lr} 为 L_1 相漏电的过渡电阻，其变化范围约为 $0 \sim 11 \text{ k}\Omega$ ， $r_1 = r_2 = r_3 = r$ 为各相对地绝缘电阻，

$C_1 = C_2 = C_3 = C$ 为各相对地电容。对于漏电回路，变压器、线路及大地的阻抗均为欧姆数量级及以下，远小于 r 和容抗 X_C ，可以忽略。正常时井下低压电网的电源中性点 N 与大地 N' 之间只有三条支路并联，并分别由各相电动势与各相对地的零序阻抗 Z_{zs} 组成，故构成一具有一个节点的网络。发生单相漏电或两相漏电时，相当于在漏电相的零序阻抗上并联了过渡电阻 R_{tr} ，因而可以直接应用节点电压法求出中性点与大地的电位差 \dot{V}_{zN} ，进而根据边界条件和回路电压定律求得其它故障参数的表达式。此时的等效电路如图 2-3 所示。

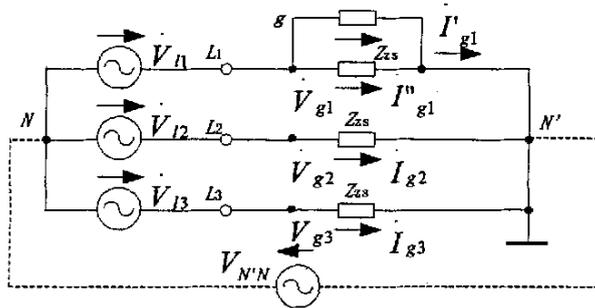


图 2-3 单相漏电的等效电路图

N 点为变压器二次侧中性点， N' 为大地，设在 L_1 相发生单相漏电，过渡电阻为 R_{tr} 。显然当未发生单相接地时，电路相当于三相对地接有一阻抗为 Z_{zs} 的三相星形对称负载，根据公式 (2-1) 可得 $\dot{V}_{NN'} = 0$ ，也就是不产生零序电压，因此也不会有零序电流，三相对地只有较小的各相泄漏电流，并在地中达到平衡^[10]。

需要说明的是电网每相对地零序阻抗 Z_{zs} 的含义。由于井下低压电网为中性点绝缘系统，入地的漏电电流 I_{gr} 必须经过非故障相的绝缘电阻 r_2 、 r_3 和对地电容 C_2 、 C_3 构成回路，故 Z_{zs} 是电网每相对地绝缘电阻 r 和电容容抗 X_C 并联以后的阻抗值（电缆线路对地感抗很小忽略）。

$$\text{即} \quad Z_{zs} = \frac{r \cdot (-jX_c)}{r + (-jX_c)} = \frac{r}{1 + j\omega rc} \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

式中 $X_c = 1/\omega C$, $\omega = 2\pi f = 314$ 。

当发生单相漏电时, 相当于在 L_1 相的零序阻抗 Z_{zs} 上又并联了一个过渡电阻 R_{lr} , 因而破坏了原由 Z_{zs} 组成的三相星形负载的对称性^[11]。根据公式 (2-1), 并令 R_{lr} 与 Z_{zs} 的并联值为 Z'_{zs} ,

$$\begin{aligned} \text{故得零序电压 } \dot{V}_{zs} &= \dot{V}_{NN'} = -\dot{V}_{N'N} \\ &= -\frac{\sum(E_i/Z_i)}{1/Z'_{n0}} = -\frac{\dot{V}_{11}/Z'_{zs} + \dot{V}_{12}/Z_{zs} + \dot{V}_{13}/Z_{zs}}{1/Z'_{zs} + 1/Z_{zs} + 1/Z_{zs}} \\ &= -\frac{Z_{zs}\dot{V}_{11} + Z'_{zs}a^2\dot{V}_{11} + Z'_{zs}a\dot{V}_{11}}{Z_{zs} + 2Z'_{zs}} \\ &= -\frac{Z_{zs}\dot{V}_{11} + \frac{Z_{zs}R_{lr}}{Z_{zs} + R_{lr}}(a^2\dot{V}_{11} + a\dot{V}_{11})}{Z_{zs} + \frac{2Z_{zs}R_{lr}}{Z_{zs} + R_{lr}}} \dots\dots\dots (2-3) \\ &= -\frac{(1+a+a^2)Z_{zs}R_{lr}\dot{V}_{11} + Z_{zs}^2\dot{V}_{11}}{Z_{zs}^2 + 3Z_{zs}R_{lr}} \\ &= -\frac{Z_{zs}\dot{V}_{11}}{Z_{zs} + 3R_{lr}} \end{aligned}$$

式中 a 、 a^2 —相量算子;

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \qquad a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

各相零序电流
$$\dot{I}_{zs} = \frac{\dot{V}_{zs}}{Z_{zs}} = -\frac{\dot{V}_{11}}{Z_{zs} + 3R_{lr}} \dots\dots\dots (2-4)$$

根据回路电压定律得故障相的对地电压

$$\begin{aligned} \dot{V}_{11} &= \dot{V}_{g1} + \dot{V}_{N'N} \\ \dot{V}_{g1} &= \dot{V}_{11} - \dot{V}_{N'N} = \dot{V}_{11} + \dot{V}_{zs} = \frac{3R_{lr}\dot{V}_{11}}{Z_{zs} + 3R_{lr}} \dots\dots\dots (2-5) \end{aligned}$$

同理, 非故障相的对地电压

$$\dot{V}_{g2} = \dot{V}_{12} + \dot{V}_{zs} = \frac{(a^2 - 1)Z_{zs} + 3a^2R_{lr}}{Z_{zs} + 3R_{lr}}\dot{V}_{11} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$\dot{I}_{zs} = \frac{\dot{V}_{zs}}{Z_{zs}} = -\frac{(1+a^2)\dot{V}_{\text{II}}}{2Z_{zs}+3R_{tr}} \dots\dots\dots (2-10)$$

$$\dot{V}_{g1} = \frac{(1-a^2)Z_{zs}+3R_{tr}}{2Z_{zs}+3R_{tr}}\dot{V}_{\text{II}} \dots\dots\dots (2-11)$$

$$\dot{V}_{g2} = \frac{(a^2-1)Z_{zs}+3a^2R_{tr}}{2Z_{zs}+3R_{tr}}\dot{V}_{\text{II}} \dots\dots\dots (2-12)$$

$$\dot{V}_{g3} = \frac{(2a-a^2-1)Z_{zs}+3aR_{tr}}{2Z_{zs}+3R_{tr}}\dot{V}_{\text{II}} \dots\dots\dots (2-13)$$

电网经 R_{tr} 入地的各相漏电电流，可据边界条件求得

$$\dot{I}_{g1} = \frac{\dot{V}_{g1}}{R_{tr}} = \frac{(1-a^2)Z_{zs}+3R_{tr}}{2Z_{zs}R_{tr}+3R_{tr}^2}\dot{V}_{\text{II}} \dots\dots\dots (2-14)$$

$$\dot{I}_{g2} = \frac{\dot{V}_{g2}}{R_{tr}} = \frac{(a^2-1)Z_{zs}+3a^2R_{tr}}{2Z_{zs}R_{tr}+3R_{tr}^2}\dot{V}_{\text{II}} \dots\dots\dots (2-15)$$

电网的总入地漏电电流

$$\dot{I}_{gr} = \dot{I}_{g1} + \dot{I}_{g2} = \frac{3\dot{V}_{\text{II}}(1+a^2)}{2Z_{zs}+3R_{tr}} = \frac{3\dot{V}_{\text{II}}e^{j300^\circ}}{2Z_{zs}+3R_{tr}} = -3\dot{I}_{zs} \dots\dots\dots (2-16)$$

比较两种漏电故障的分析结果可知：

- (1) 两种故障下零序电压与各相对地电压的相量关系是完全相似的，如图 2-4 所示。
- (2) 在相同的电网参数和故障条件 (R_{tr}) 下，单相漏电的 \dot{V}_{zs} 、 \dot{I}_{zs} 有效值大于两相漏电。
- (3) 在中性点绝缘的电网中发生单相漏电、两相漏电等不对称漏电故障时，必产生具有一定大小和相位的 \dot{V}_{zs} 和 \dot{I}_{zs} ，而故障处的各相对地电压则分别等于各相正常时的相电压与零序电压 \dot{V}_{zs} 的相量和，电网线电压仍保持其对称性。
- (4) 当两相漏电过渡电阻 $R_{tr} \rightarrow 0$ 时，电网就发生两相接地短路，成为短路加漏电的复合型故障，所以分析过程稍复杂些；当单相漏电过渡电阻 $R_{tr} \rightarrow 0$ 时，由于系统中性点绝缘，虽被称之为单相接地短路，却完全不属于短路的范围，这是一种最严重的漏电故障。

在实际的井下 660V 电网中，即使故障时 $R_{lr}=0$ ， I_{gr} 也不大于 1 A，故常称为单相接地。在前面分析中得出的公式中，令 $R_{lr}=0$ 即可得到单相接地时各参数的计算公式。

在工程实际中，井下低压电网发生两相漏电的几率远不如单相漏电高，其故障程度（仅就漏电而言）也比单相漏电轻。单相漏电故障约占漏电故障总数的 85% 左右，而且有相当一部分（约 30% 以上）单相漏电若不及时切除，将发展成更严重的短路故障，所以单相漏电是井下低压电网漏电故障的主流。在下面更进一步的故障参数变化规律的分析计算中，将以单相漏电为研究对象。

2.3 单相漏电各故障参数的变化规律

主要分析在电网单相漏电的情况下，零序电压、零序电流、漏电电流的变化规律和它们之间的相位关系，两相漏电的情况可用同样的方法研究。

2.3.1 单相漏电时零序电压的变化规律

在图 2-6 所示的放射式供电系统中，有 n 条供电线路，设第 i 条支路的对地电容为 C_i ；对地绝缘电阻为 r_i ，正常工作时^[12]，系统处于三相平衡状态，此时系统每相对地阻抗参数为：

$$r = r_1 // r_2 \cdots // r_n = \left(\sum \frac{1}{r_i} \right)^{-1}$$

$$C = \sum_{i=1}^n C_i$$

$$x_c = \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_0 = \frac{-jx_c r}{r - jx_c}$$

当线路 1 的 A 相发生漏电故障时，将导致系统中性点位移，产生零序电压 \dot{U}_0 ，设漏电电阻为 R ，则零序电压 \dot{U}_0 为：

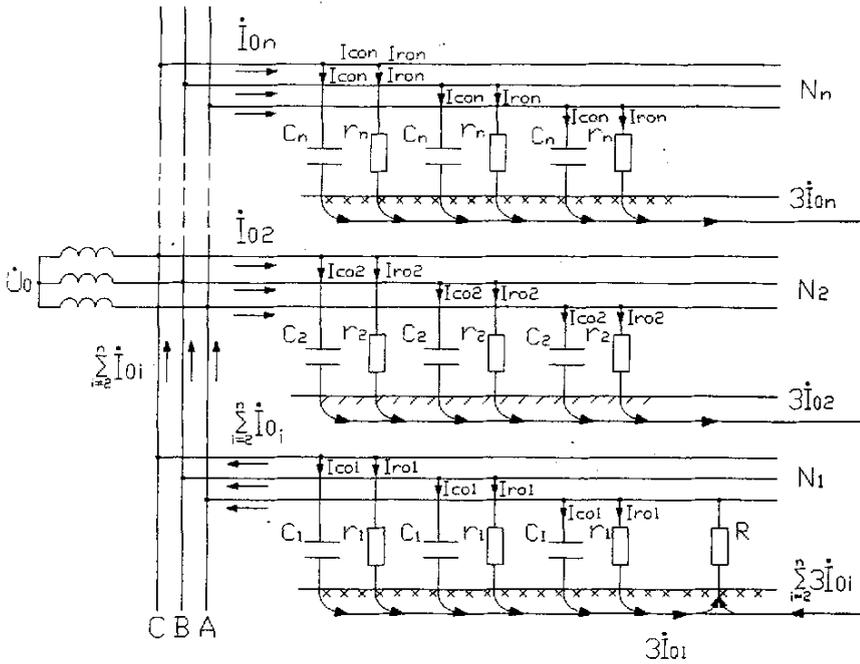


图 2-6 放射式电网参数分布图

$$\dot{U}_0 = -\frac{Z_0}{3R + Z_0} \dot{U}_A \dots\dots\dots (2-17)$$

将 Z_0 代入(1)式得：

$$\dot{U}_0 = \frac{-x_c^2 r(3R + r) + j3Rx_c r^2}{(3Rr)^2 + (3Rx_c + rx_c)^2} \dot{U}_A \dots\dots\dots (2-18)$$

\dot{U}_0 超前 \dot{U}_A $180^\circ - \theta$ 角度，其中 θ 值为：

$$\theta = \arctg \frac{3Rr}{(3R + r)x_c} \dots\dots\dots (2-19)$$

则

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{3Rr}{(3R + r)x_c} \right]^2}} \dots\dots\dots (2-20)$$

$$\sin \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{(3R + r)x_c}{3Rr} \right]^2}} \dots\dots\dots (2-21)$$

\dot{U}_0 的模为：

$$U_0 = \frac{U_A}{\sqrt{\left(\frac{3R}{x_c}\right)^2 + \left(\frac{3R}{r} + 1\right)^2}} \dots \dots \dots (2-22)$$

则 U_0 随参数 r 、 x_c 和 R 变化的规律为：

(1) 当系统对地绝缘电阻不变，即 r 和 R 为定值时

$$U_0 = \frac{rU_A}{3R+r} \cdot \frac{U_A}{\sqrt{1 + \left[\frac{3Rr}{(3R+r)x_c}\right]^2}} = \frac{rU_A}{3R+r} \cos \theta \dots \dots \dots (2-23)$$

这是一个直径为 $rU_A/(3R+r)$ ，且直径通过相量 \dot{U}_0 的圆的极坐标方程，对应不同的 r 和 R 值，圆具有不同的直径。但所有圆的直径都通过相量 \dot{U}_0 ，直径变化时产生的圆族内切于圆点。 θ 角随 x_c 变化范围为：

当 $C=0$ 时， $x_c=\infty$ ， $\theta=0^\circ$ ；

当 $C=\infty$ 时， $x_c=0$ ， $\theta=90^\circ$ ；

即当 C 由 0 至 ∞ 变化时， θ 角在 0° 至 90° 之间变化，这说明该圆为一半圆，如图 2-7 所示。

(2) 当系统对地电容不变，即 C 和 R 为定值时

$$U_0 = \frac{x_c U_A}{3R} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{(3R+r)x_c}{3Rr}\right]^2}} = \frac{x_c U_A}{3R} \sin \theta \dots \dots \dots (2-24)$$

这是一个直径为 $x_c U_A/(3R)$ ，与相量 \dot{U}_0 相切于坐标原点的极坐标方程，系统具有不同的 C 和 R 值，圆就具有不同的直径。该圆族也内切于坐标原点， θ 角随系统对地绝缘电阻 r 变化的范围为：

当 $r=0$ 时， $\theta=0^\circ$

当 $r = \infty$ 时, $\theta = \arctg \frac{3R}{x_c}$

即当 C 和 R 为定值时, r 在 0° 至 ∞ 区间变化时, θ 角在 0° 至 $\arctg \frac{3R}{x_c}$ 区间变化。这说明 U_0 的变化轨迹为部分圆弧, 最大角度为 $\theta = \arctg \frac{3R}{x_c}$ 。

同时满足 r 和 C 变化条件的 \dot{U}_0 相量的模为两圆交点至坐标原点的距离, 方向指向坐标原点, 见图 2-7。

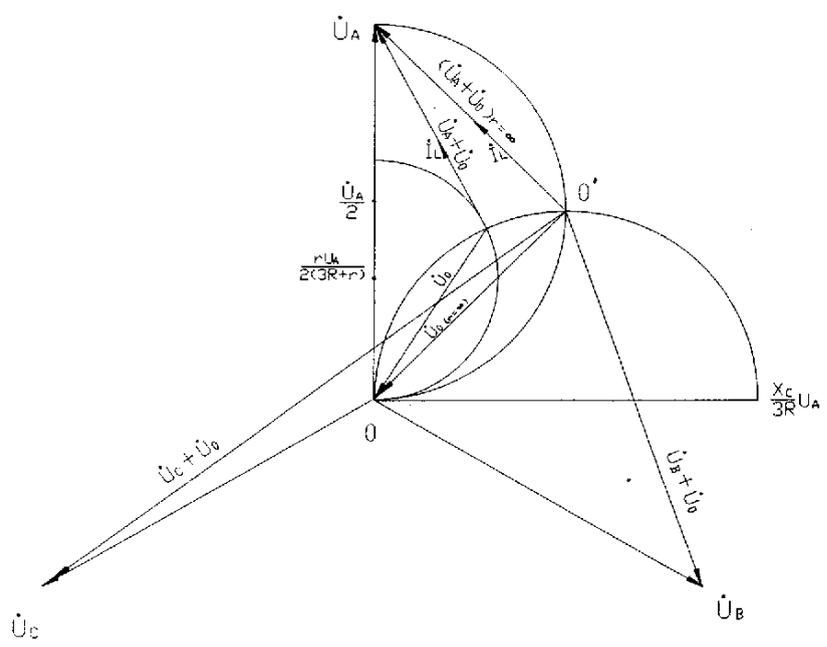


图 2-7 \dot{U}_0 及各相对地电压变化相量图

(3) 系统对地绝缘电阻和对地电容不变, 即 r 和 C 为定值时, 两圆的直径 D 都随 R 值变化, 由式 (7)、(8) 可知, D 随 R 变化的规律为双曲线, 如图 2-8 所示。直径 D 和 θ 角随 R 变化规律为:

当 $R=0$ 时, $D_1 = \infty$, $D_2 = U_A$, $\theta = 0^\circ$ 。此时两圆交于纵坐标 U_A 点, 即 $U_0 = U_A$, $\theta = 0^\circ$;

当 R 由零逐渐增大时, D_1 和 D_2 都按双曲线规律减小, θ 角逐渐增大, $U_0 < U_A$;

当 R 趋于 ∞ 时, D_1 和 D_2 都趋于其渐近线 $D=0$, $U_0=0, \theta = \arctg \frac{3R}{x_c}$,

此时, 系统工作再三相平衡状态, 即非故障状态。

对于一个固定的电力系统来说, 常常具有固定的 r 值和 C 值, 而漏电故障的形成往往有一个过程, 也就是说在漏电故障发生时, R 值是变化的。因此, 分析 R 值变化对漏电参数的影响是十分必要的^[13]。

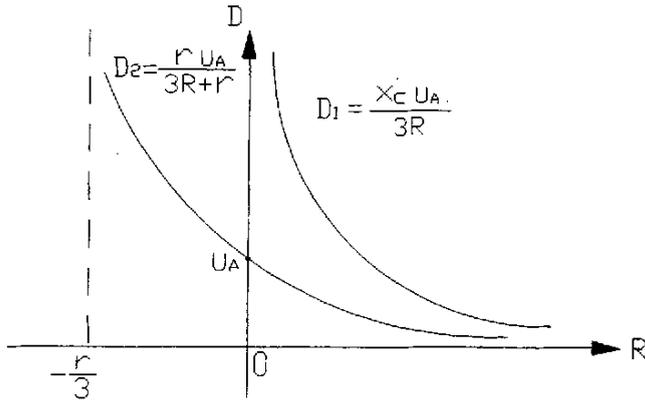


图 2-8 直径 D 随 R 变化规律

2.3.2 各相对地电压

当 A 相发生漏电故障时, 由于零序电压 \dot{U}_0 的存在, 将导致三相对地电压的不平衡。如图 2-7 所示, 其中以 C 相对地电压最高。

随着 r 和 C 的变化, 两个圆的直径及交点位置也随之变化, 当变化至某个特定范围时, C 相的对地电压将可能超过线电压。因此, C 相成为绝缘的薄弱环节。同理, 当 B (C) 相漏电时, A (B) 相的对地电压有可能超过系统线电压, 成为绝缘的薄弱环节。

2.3.3 零序电流

零序电流是选择性漏电保护中使用的重要参数之一^[14], 在图 2-6 所示的中性点不接地放射式电网中, 零序电流具有下列特征:

(1) 由于零序电流不能经变压器的中性点构成回路, 因此各支路中的零序电流都将流过漏电点;

(2) 漏电支路测得的零序电流不含该支路对地阻抗所产生的零序

电流，而非故障线路零序电流之和，即

$$\dot{I}_0 = \sum_{i=1}^n 3\dot{I}_{0i} - 3\dot{I}_{01} \dots \dots \dots (2-25)$$

非故障线路测得的零序电流为该线路自身漏阻抗所产生的零序电

流，即
$$\dot{I}'_{0i} = 3\dot{I}_{0i} \dots \dots \dots (2-26)$$

其中
$$\dot{I}_{0i} = (\dot{I}_{0ri} + \dot{I}_{0ci})$$

$$\dot{I}_{0ri} = \dot{U}_0 / r_i$$

$$\dot{I}_{0ci} = j\omega C_i \dot{U}_0$$

(3) 从方向上看，漏电支路测得的零序电流的方向为由线路流向母线，而非故障线路零序电流的方向为由母线流向线路。

(4) 零序电流与零序电压的相位关系

第 i 条支路测得的零序电流为：

$$\dot{I}'_{0i} = \frac{3\dot{U}_0}{Z_i} \dots \dots \dots (2-27)$$

其中：
$$Z_i = \frac{-jx_{ci}r_i}{r_i - jx_{ci}}$$

Z_i 的阻抗角为 $-\varphi_i$ ，则 \dot{I}'_{0i} 超前 \dot{U}_0 一个角度 φ_i 。

故障线路测得的零序电流 \dot{I}'_{01} 为 $\dot{I}'_{01} = \sum_{i=2}^n 3\dot{I}'_{0i}$ ，可表示为

$$\dot{I}'_{01} = -\frac{3\dot{U}_0}{Z_{dx}} \dots \dots \dots (2-28)$$

Z_{dx} 为第二条至第 n 条线路的对地等效阻抗。

由于 Z_{dx} 为容性，阻抗角 φ_{dx} 在 0° 至 -90° 之间，所以 \dot{I}'_{01} 滞后 \dot{U}_0 90° 。

至 180° ，如图 2-9 所示。

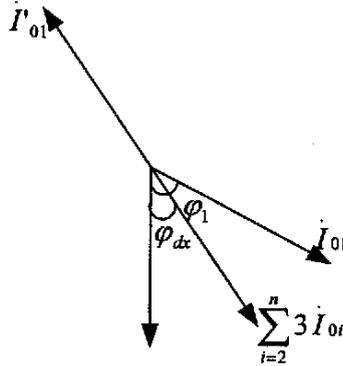


图 2-9 电压相位关系图

当 $\varphi_{dx} = 0$ 时， I'_{01} 滞后 \dot{U}_0 180° ， I_{01} 滞后 \dot{U}_0 90° ，因此， I'_{01} 滞后 \dot{U}_0 的角度随系统参数 r 和 C 的变化，在 90° 至 180° 之间变化。在选择性漏电保护装置中，正是利用其相位关系，对故障线路加以识别^[15]。

2.3.4 漏电电流

系统漏电电流的大小是影响系统安全性的重要指标，它决定了触电事故发生时，触电者的安全性，也决定了漏电时电弧能量的大小。漏电电流按下式确定。

$$\dot{I}_L = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_0}{R} \dots\dots\dots (2-29)$$

因此， \dot{I}_L 为与 $\dot{U}_A + \dot{U}_0$ 相位相同，按 $1/R$ 比例变化的量。由图 2-7 可知，在 $\dot{U}_A + \dot{U}_0$ 随 r 和 C 变化时，存在最小值，此时， I_L 也最小。在系统对地电容 C 和漏电电阻 R 为定值时， $\dot{U}_A + \dot{U}_0$ 的最小值并不出现在 $r = \infty$ 时刻，因此，不是 r 值越大， I_L 越小。所以，在电力系统 $C \neq 0$ 的条件下，不要片面追求过高的 r 值，而应将其控制在使 $\dot{U}_A + \dot{U}_0$ 的模最小的值附近，这更有利于减小系统的漏电电流。

2.4 选择性漏电保护原理

2.4.1 漏电保护的选择性

漏电保护的选择性包括两个方面：

(1) 横向选择性

横向选择性是指漏电保护系统仅切断漏电故障所在支路，并保证非漏电故障所在支路的正常供电^[16]。(如图 2-10)在 A, B, C 中都装有漏电保护装置。当 K1 点发生漏电时，漏电保护系统中只有 C4 磁力起动器或 B2 分支馈电开关中的选择性漏电保护器动作，使 C4 磁力起动器切断 K1 点漏电故障所在支路，而其他装置均不动作。

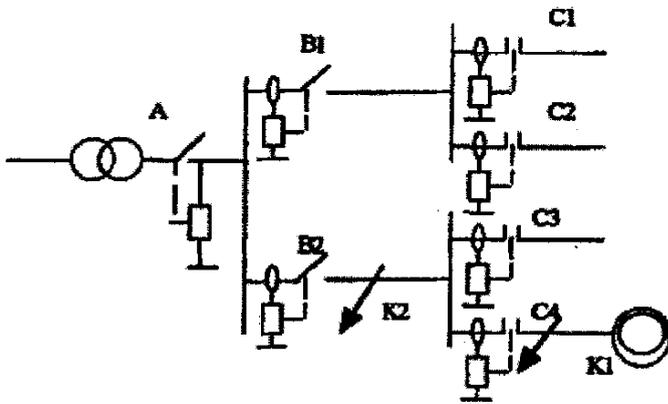


图 2-10 选择性漏电保护示意图

(2) 纵向选择性

纵向选择性是指漏电保护系统仅切断漏电故障所在段的线路，并保证非漏电故障所在段继续供电。当 K1 点发生漏电时，那么只有 C4 磁力起动器中的选择性漏电保护器动作，使 C4 磁力起动器切除漏电点，而 B2 分支馈电开关中的选择性漏电保护器则不动作。这样可以保证 B2 分支馈电开关继续向 C3 磁力起动器控制的支路正常供电。如 K2 点发生漏电故障，则只有 B2 分支馈电开关中的漏电保护器动作，与 A 总自动馈电开关配合的漏电保护装置不应动作^[17]。从而保证 A 总馈电开关继续向 B1 分支馈电开关支路供电。

目前，漏电保护的纵向选择性靠时间 Δt 延时来配合，即由负荷端向电源端，各漏电保护装置逐级延时。这样，当漏电故障发生在靠近负

荷端时，由于靠近负荷端的漏电保护器的动作速度快而首先动作，并使相应开关切断漏电故障所在支路的所在端，而靠近电源端的漏电保护器带有的延时，还没来得及动作，待漏电故障被切除后，它又返回而不动作，从而达到纵向选择性的目的。

横向选择性原理主要有三种：

- (1) 零序电流原理；
- (2) 零序功率方向原理；
- (3) 谐波电流方向原理。

由于井下低压电网的单相漏电电流并不大，对 660V 电网来说，当分布电容为 $1\mu\text{f}$ /相时，单相金属接地电流也只有 358mA，如发生人身触电或是经过过渡电阻接地时，漏电流就更小了。并且，井下低压电网的零序电流中，谐波分量也不很高，因此，井下低压电网一般不采用谐波电流方向保护原理。而单一采用零序电流式漏电保护，动作电阻值不固定、不能保护对称性漏电故障及不能补偿电容电流^[18]。

选择性漏电保护装置一般设在总馈电开关和分支馈电开关两处，而磁力起动器处一般仅设漏电闭锁保护，亦即采用二级选择性漏电保护系统。为保证选择性，上、下级漏电保护装置之间通过延时来实现动作的选择性，横向选择性多采用零序功率方向保护原理来实现，但总自动馈电开关处的漏电保护装置一般采用附加直流电源的保护原理。

2.4.2 总馈电开关的漏电保护原理

总馈电开关处的漏电保护装置负责全电网的漏电保护和总漏电后备保护作用，可采用附加直流电源的漏电保护原理。

电网若发生漏电故障，最容易检测到的是电网各相对地绝缘电阻的下降。可以设想在三相电网中附加一独立的直流电源，使之作用于三相电网与大地之间。这样，在三相对地的绝缘电阻上将有一直流电流流通，该电流大小的变化就直接的反应了电网对地绝缘电阻的变化。有效的检测和利用该电流，就可以构成附加直流检测式漏电保护。

如图 2-11 所示。附加直流电源的检测通道为：直流电源正端 → R_s → 大地 → 电网绝缘电阻 → 三相电网 → 三相电抗器 → R → 直

流电源负端。

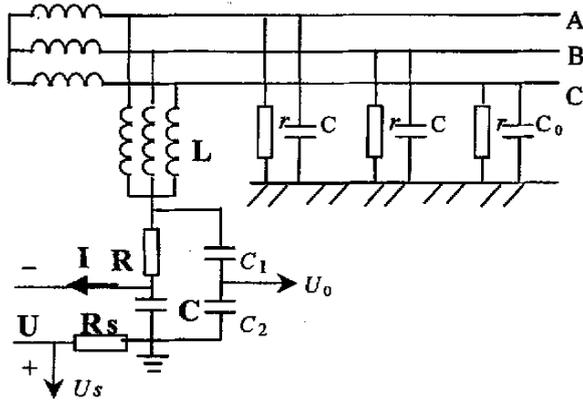


图 2-11 附加直流电源漏电保护原理

- C_0, r —各相对地电容、绝缘电阻
- L —三相电抗器
- R —限流电阻
- R_s —取样电阻
- C —隔直电容
- C_1, C_2 —零序电压取样回路
- U —外加直流电压

其检测电流 I 可由下式求得

$$I = \frac{U}{R_{(L)}/3 + R + R_s + R_E + r_\Sigma} = \frac{U}{\sum R + r_\Sigma} \dots\dots\dots (2-30)$$

式中 $R_{(L)}$ —三相电抗器每相线圈的直流电阻

R_E —接地电阻

r_Σ —三相电网对地总绝缘电阻

$$r_\Sigma = r / 3$$

式 (2-30) 中, 仅 r_Σ 为变量, 故检测电流 I 直接反映了电网的绝缘情况。取样电阻上的电压 U_s 可表示为

$$U_s = IR_s = \frac{U}{\sum R + r_\Sigma} R_s \dots\dots\dots (2-31)$$

三相电网对地的总绝缘电阻可由下式计算

$$r_\Sigma = \frac{U}{U_s} R_s - \sum R \dots\dots\dots (2-32)$$

电网正常运行时, 根据式 (2-32) 可实现对电网绝缘电阻的连续监测; 当人身触电或发生漏电故障, 使 r 达到装置动作设定值时, 迅速将电源切除。另外, 即使电网的绝缘电阻均匀下降, 仍可将此故障现象检

测出来，这是附加直流电源漏电保护原理的一大优点。

利用附加直流电源原理实现的漏电保护装置不具备选择性功能。电网中任一处发生漏电故障时该装置都要无选择性地动作。但对总馈电开关而言，已经能满足漏电保护的要求。

2.4.3 分支馈电开关的漏电保护原理

利用零序电流或零序电压的幅值大小来判断供电单元是否发生了漏电，同时，利用各支路的零序电流与零序电压的相位关系来判断故障支路，而后动作，有选择的切除故障支路的电源，这种保护方案就称为零序功率方向式漏电保护，简称方向保护^[19]。它之所以称为“零序功率”，是因为它同时利用了零序电流和零序电压两个参量（不一定是幅值相乘的关系）的缘故（借用地面功率方向过流保护的称呼）。

当电网中某支路发生漏电故障或人身触电事故时，由取样电路分别从电网中取出零序电压和各支路的零序电流信号，经放大整形后，由相位比较电路来判别故障支路，最后启动执行电路，切断故障支路的电源，从而实现了有选择性的漏电保护。简言之，就是对零序电压和零序电流进行幅值和相位综合处理以判断故障支路，进而切除故障支路的原理。

图 2-12 为图 2-10 所示电网 K2 点发生单向漏电故障零序等效网络。

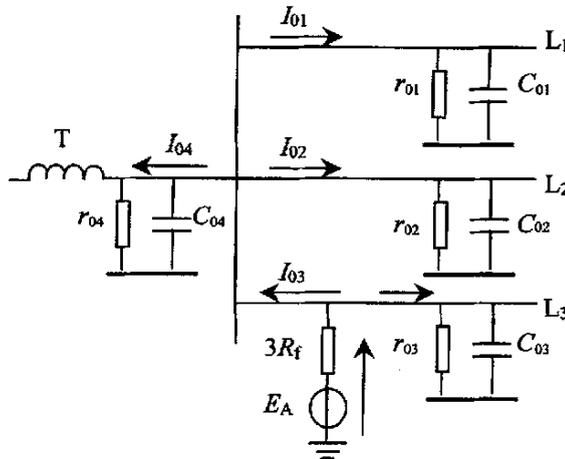


图 2-12 单相漏电故障零序等效网络

$r_{01} \sim r_{04}$ 、 $C_{01} \sim C_{04}$ 分别为线路 L1、L2、L3 和总馈电开关处线路的每项绝缘电阻和对地电容，用集中参数表示； R_f 为漏电故障点过渡电阻，故障发生在电网 A 相。

设漏电故障时电网的零序电压为 U_0 ，规定电流从母线指向线路为正方向。则由图 2-12 可得到流过非故障支路 L_1 、 L_2 、总自动馈电开关处线路首端的零序电流分别为

$$3I_{01} = U_0 \left(\frac{3}{r_{01}} + j3\omega C_{01} \right) = I_{r01} + I_{C01} \dots\dots\dots (2-33)$$

$$3I_{02} = U_0 \left(\frac{3}{r_{02}} + j3\omega C_{02} \right) = I_{r02} + I_{C02} \dots\dots\dots (2-34)$$

$$3I_{04} = U_0 \left(\frac{3}{r_{04}} + j3\omega C_{04} \right) = I_{r04} + I_{C04} \dots\dots\dots (2-35)$$

而流过故障支路 L_3 首端的零序电流则为

$$\begin{aligned} 3I_{03} &= -U_0 \left(\frac{3}{r_{01}} + \frac{3}{r_{02}} + \frac{3}{r_{04}} + j3\omega(C_{0\Sigma} - C_{03}) \right) \dots\dots\dots (2-36) \\ &= -I_r - (I_{C01} + I_{C02} + I_{C04}) \end{aligned}$$

式中 $C_{0\Sigma}$ — 全电网一相对地电容之和，

$$C_{0\Sigma} = C_{01} + C_{02} + C_{03} + C_{04}$$

$$I_r = I_{r01} + I_{r02} + I_{r04}$$

观察式 (2-33) ~ (2-36) 与图 2-12 可知，流过故障支路 L_3 首端的零序电流分两部分：非故障支路绝缘电阻产生的有功电流之和 $-I_r$ ，其相位与零序电压差 180° ；非故障支路零序电容电流之和 $-(I_{C01} + I_{C02} + I_{C04})$ ，相位滞后于零序电压 90° 。而流过非故障支路首端的零序电流也包括两部分：本支路绝缘电阻产生的有功电流，与零序电压同相位；本支路对地电容产生的容性电流，相位超前零序电压 90° 。

由于故障支路和非故障支路的零序无功电流分量相反，因此可利用此特点来实现选择性漏电保护。

2.4.3.1 零序功率方向漏电保护实验

根据实验室条件对零序功率方向漏电保护原理进行了实验室实验。对于漏电保护的实验是通过数字移相器来模拟零序电压和零序电流信号，因为零序电流互感器本身具有电流/电压变换器，因此可以直接用电压信号来模拟零序电流信号。在本系统中，零序电压的整定值为 10V，

零序电流转换后的整定值为 100mV。其试验电路如图 2-13 所示：

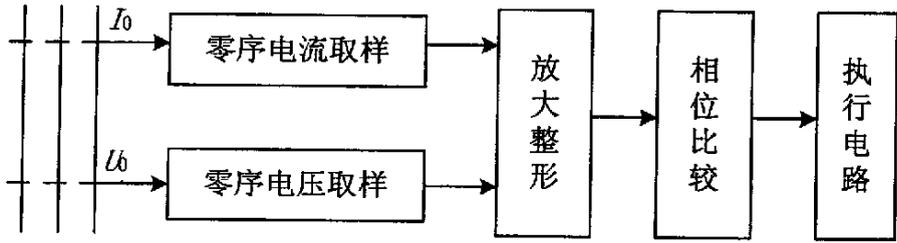


图 2-13 零序功率方向漏电保护原理图

在漏电保护系统零序电压、零序电流端子排处接入移相器输出的模拟交流电压，用示波器观察并记录故障状态下零序电压与零序电流的相位关系的波形，其波形如图 2-14、2-15 所示：

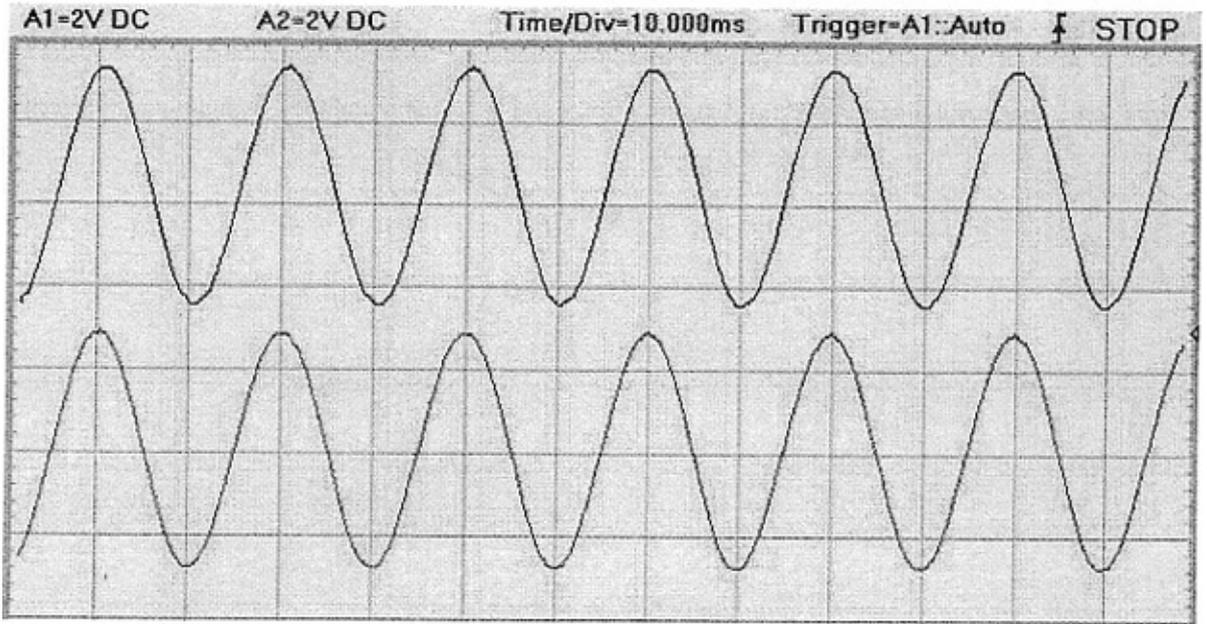


图 2-14 故障状态下零序电流、零序电压同相位波形

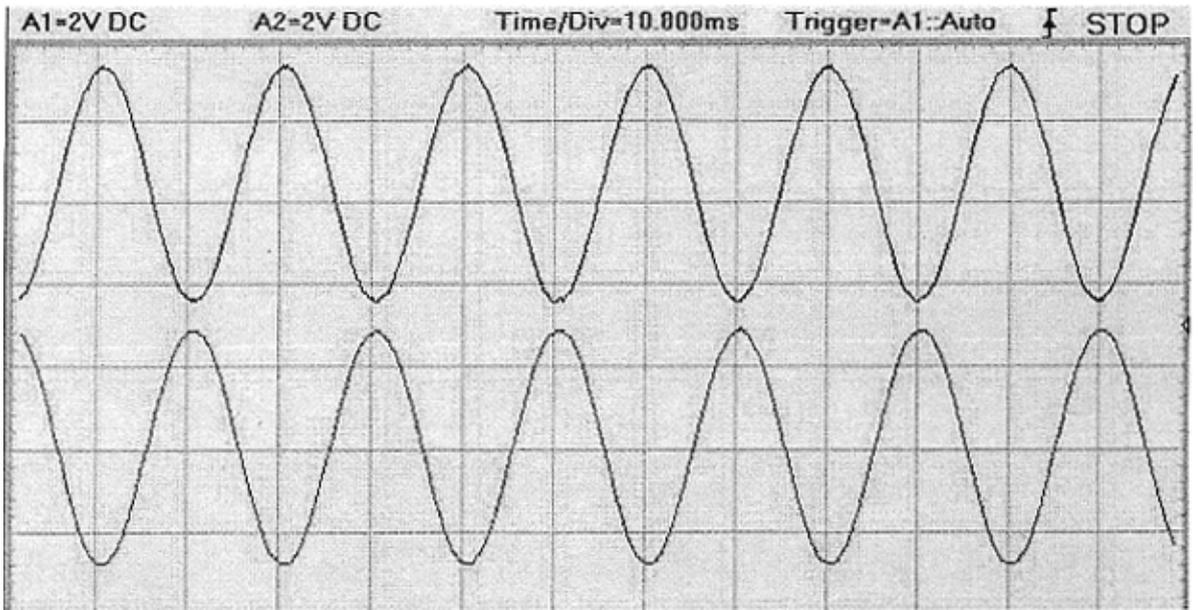


图 2-15 故障状态下零序电流、零序电压反相位波形

从实验波形我们可以看到故障状态下零序电压和零序电流不同的相位波形。通过实验进一步论证了漏电保护的理论。

2.4.4 选择性漏电保护的选线判据

传统的漏电保护装置采用比相电路来设计，采用模拟电路构成，抗干扰能力差，无法实现装置的智能化^[20]。为了实现保护装置的智能化，应该寻找新的保护算法。

设电网零序电流 I_0 、零序电压 U_0 的相位角分别为 ϕ_I 、 ϕ_U ，根据傅里叶算法可求得其值为

$$\phi_I = \arctg \frac{I_{0I}}{I_{0R}} \quad \phi_U = \arctg \frac{U_{0I}}{U_{0R}}$$

令 $\phi = \phi_U - \phi_I$ ，则有

$$\sin \phi = \frac{1}{\sqrt{(I_{0I}^2 + I_{0R}^2)(U_{0I}^2 + U_{0R}^2)}} \cdot (I_{0R}U_{0I} - I_{0I}U_{0R}) \dots \dots \dots (2-37)$$

上述各式中， U_{0I} 、 U_{0R} 、 I_{0I} 、 I_{0R} 分别为 U_0 、 I_0 的虚部和实部。

将零序电流 I_0 超前移相 90° ，以基波零序电压 U_0 为基准，将 I_0 投影到与 U_0 平行的平面上，构造下列漏电保护选线判据方程

$$P_r = U_{0I} I_{0I} \cos(\phi + 90^\circ) \dots \dots \dots (2-38)$$

式中 U_{01} 、 I_{01} 分别为 U_0 、 I_0 的模值，且有

$$U_{01} = \sqrt{U_{0R}^2 + U_{0I}^2}, \quad I_{01} = \sqrt{I_{0R}^2 + I_{0I}^2}$$

由式 (2-37) 进一步化简式 (2-38) 得

$$P_r = I_{01} U_{0R} - I_{0R} U_{01} \dots \dots \dots (2-39)$$

根据式 (2-33) ~ 式 (2-36) 可知，对故障支路 L3

$$P_r = U_0 I_{c\Sigma}$$

对非故障支路 L1 (其他非故障支路与此类似)

$$P_r = -U_0 I_{c1}$$

式中 $I_{c\Sigma} = -I_{c01} + I_{c02} + I_{c04}$ 的模值

$I_{c1} = -I_{c01}$ 的模值

显然，对应于故障支路总有 $P_r > 0$ ，而对非故障支路则总有 $P_r < 0$ ，且故障支路的 P_r 值较非故障支路大得多。从而可以利用式 (2-39) 准确、可靠地判断出故障支路。

3 选择性漏电保护装置硬件电路设计

本章首先介绍了选择性漏电保护的设计方案,根据设计方案提出了保护系统的硬件电路原理图。并详细介绍了系统硬件的各部分功能的实现。

3.1 选择性漏电保护方案设计

本文设计了基于附加直流电源检测和零序电流方向的矿井低压电网选择性漏电保护装置,系统由总馈电开关和分支馈电开关联合构成,总开关采用附加直流电源检测原理,分开关采用零序电流方向检测原理。系统既可完成井下低压电网单相漏电时的横向选择性和纵向选择性保护功能,又能保证电网对称漏电时保护动作电阻值的稳定性^[21]。

根据矿井低压电网情况,选择性漏电保护系统的组成结构如图 3-1 所示。

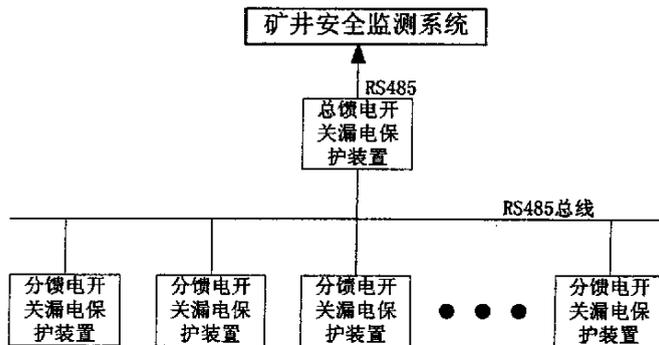


图 3-1 漏电保护系统结构图

该系统采用两级分布式结构,总自动馈电开关处的漏电保护装置为主站,其设有两个 RS485 通信接口,除与分支馈电开关处的下级漏电保护装置通信外,还可通过另一个接口与矿井安全监测系统相联,便于地面调度系统实时地了解井下低压电网的绝缘变化和漏电情况。分支馈电开关漏电保护装置通过 RS485 构成现场总线。可以挂接 127 个保护装置(实际电网的分支出线数远小于这个数量,一般不大于 10);另外,总自动馈电开关与分支馈电开关间的距离一般不超过 100m,故 RS485 的通信距离完全能满足要求。

3.2 保护系统硬件电路

漏电保护系统的硬件电路主要完成电网绝缘监测、零序电流方向判

断、漏电闭锁、漏电跳闸等功能。当电网绝缘电阻低于保护动作值时，总漏电保护单元向各分支漏电保护单元发出中断信号，分支漏电保护单元接到中断信号后，立即对本支路的零序电流方向作出判断。判断方法是以移相后的 U_0 为基准，若 I_0 与 U_0 同相位，则判定本支路发生漏电，断路器跳闸，否则，本支路正常运行。总漏电保护单元在发出中断信号 150ms 后，若漏电现象仍还存在，则判定是分开关拒动或漏电点在总开关和分开关之间，发出跳闸信号，实现纵向选择性漏电保护。

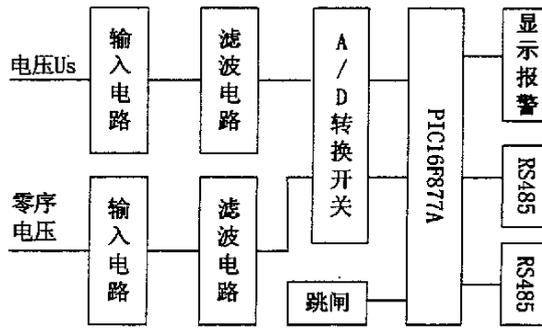


图 3-2 总馈电开关漏电保护装置原理图

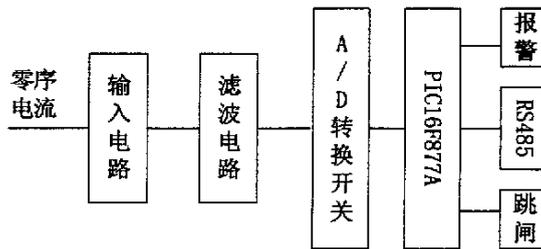


图 3-3 分支馈电开关漏电保护装置原理图

图 3-2，图 3-3 分别是总馈电开关和分支馈电开关保护装置的原理框图。本系统 CPU 选择微芯公司生产的 PIC16F877A 芯片，这款单片机内含 10 位的 A/D 转换器，外围电路简单，转换精度高^[22]。并且其存储器组织体系结构为“哈佛”结构，其程序存储器和数据存储区在物理空间上完全独立，读取指令的总线和存取数据的总线也完全分开。由于总线独立，读取指令和存取操作就可以同时进行，可以提高单片机内的数据流量，提高代码的运行效率。

总馈电开关保护装置完成对直流取样信号 U_S 、零序电压 U_0 的实时采集, 电网正常时, 根据上一章中的公式 $r_\Sigma = \frac{U}{U_S} R_S - \sum R$ 实时显示电网的绝缘情况; 而分支馈电开关保护装置则完成所在支路零序电流信号的采集。

根据煤矿安全规程要求, 漏电保护动作电阻值有固定要求, 如对 660V 系统, 规程要求动作电阻值为 $11\text{k}\Omega$, 对 1140V 系统则为 $22\text{k}\Omega$ 。因此当电网绝缘电阻降到动作值后, 总馈电开关保护装置立即将 U_0 的 U_{0I} 和 U_{0R} 值发送给各个分支馈电开关保护装置, 各分支馈电开关保护装置则根据式 $P_r = I_{0I}U_{0R} - I_{0R}U_{0I}$ 判断出故障支路, 并据此发出起动或闭锁出口继电器的动作信号。

当然, 若参照变电站自动化系统中常用的集中选线方法, 即当电网发生漏电故障时, 各分支馈电开关保护装置立即将零序电流值上传给总馈电开关保护装置, 再由分支馈电开关保护装置进行集中选线, 并可采用群体比幅、比相的方法判断出故障支路。但这将增加总馈电开关漏电保护装置的计算负担, 不利于快速保护的实现。另外, 根据算法模型式 (2-39) 已完全能满足选择性的要求^[23]。

该漏电保护系统的动作过程如下: 对于图 2-10 所示的电网, 当 K1 点发生漏电故障时, 总馈电开关保护装置接收到各分支馈电开关保护装置的闭锁信号后, 总馈电开关保护装置无延时地动作于跳闸; 当分支出线的任一处发生漏电故障时(如 K2 或 K3 点), 则各分支馈电开关保护装置根据式 $P_r = I_{0I}U_{0R} - I_{0R}U_{0I}$ 确定出故障支路后, 无延时地动作于跳闸, 同时向总馈电开关保护装置发出故障信息; 总馈电开关保护装置收到故障信息后闭锁其出口信号, 若经过预定的延时后(200ms), 尚未收到分支馈电开关保护装置的动作信号, 则其无选择地动作于跳闸, 从而起后备保护作用。

由此可见, 该选择性漏电保护系统中的各级保护装置皆为瞬动型, 可以实现无级差的漏电保护, 使漏电保护系统的纵向选择性更合理、更完善。

另外,传统分支馈电开关处的选择性漏电保护装置如要加设零序电压取样电路,既复杂又影响开关安全性能;为了保证动作电阻值,还需采用复杂的附加直流信号取样环节^[24]。本文设计的选择性漏电保护系统,零序电压的取样和动作电阻值的保证皆由总馈电开关保护装置通过通信线路来完成,大大简化了保护系统,提高了可靠性。

3.3 保护系统总体设计

选择性漏电保护系统的硬件结构是根据以上对保护的要求而设计的,其原理框图如图 3-4 所示。整个系统由以下几部分构成:

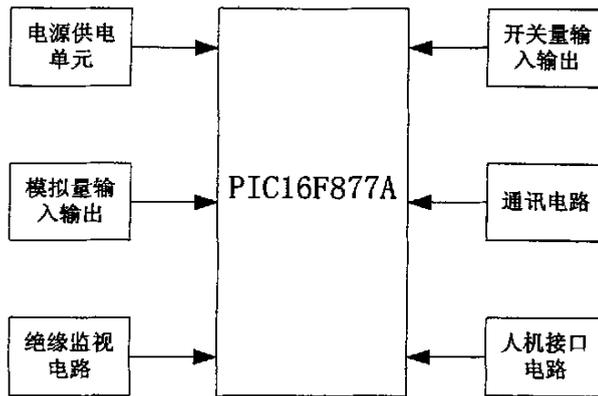


图 3-4 保护系统硬件框图

- (1)CPU 控制单元:用于实现数据采集、计算、逻辑判断、定时等功能。
- (2)模拟量输入、输出单元:用于采集计算电网 A、B、C 三相电压, A、C 两相电流及零序电压。
- (3)人机接口单元:用于定值的输入,操作方式的确定,电网工作参数、工作状态、故障类型的显示。
- (4)开关量输入、输出单元:开关量输入单元取自相应设备的辅助常开接点,用于识别现场开关的状态。需要输入的开关量有:真空断路器的合闸、分闸情况,开关量输出单元包括用于控制真空断路器的开关量和保护发生故障时的报警信号。
- (5)绝缘监视保护单元:采用附加直流电源检测原理,被测信号经压频转换完成对双屏蔽电缆屏蔽线及接地线之间断路或短路故障保护。
- (6)通讯单元。实现远方信号传输或信息参数的共享。
- (7)电源部分:将 220V AC 电源变为系统所需的 5 V, ± 12V, 24V 直

流电源。

3.3.1 中央处理单元

微机控制单元是测控系统的核心部分，它承担着数据采集、计算、逻辑判断、定时、存储等工作。它主要包括：中央处理单元(CPU)、晶振电路、复位电路等。

3.3.1.1 微处理器的选择

在单片机应用系统的设计中，首先要考虑的就是 CPU 的选择。目前市场上的单片机机型多种多样，各有特点，由于保护系统必须在系统出现故障时及时判断出故障点并能及时切断故障电流^[25]；系统正常工作时，必须有能力处理大量的实时动态数据，因此单元对硬件的实时性、快速性、准确性和多功能性要求很高，硬件设计时选用了实时性和快速性都比较好的 PIC16F877A 作为中央微处理器。

“PIC”是美国微芯公司所生产的单片机，它的硬件系统设计简洁，指令系统设计精炼，它具有以下一些优越之处：

- (1) 数据总线和指令总线分离的哈佛总线结构。
- (2) 只有 35 条指令的精简指令集，而 MCS-51 单片机的指令系统共有 111 条指令。
- (3) PIC 系列单片机只有 4 种寻址方式，而 MCS-51 单片机则为 7 种寻址方式，68HC05 单片机为 6 种。
- (4) 代码压缩率高 1K 字节的存储器空间，对于像 MCS-51 这样的单片机，大约只能存放 600 条指令，而对于 PIC 系列的单片机能够存放的指令数可达 1024 条。
- (5) 驱动能力强。I/O 端口驱动负载能力较强，能够直接驱动发光二极管 LED、光电耦合器或者微型继电器等。
- (6) PIC 系列单片机的程序、堆栈、数据三者各自采用互相独立的寻址（或地址编码）空间，寻址空间设计简洁。
- (7) PIC 系列单片机内集成了上电复位电路、I/O 引脚上拉电路、看门狗定时器等，可以最大程度地减少或免用外接器件。
- (8) 开发方便。对于 PIC 系列中的任一款单片机的开发，都可以借助

于一套免费软件综合开发环境，实现程序编写和模拟仿真，在用任意一种廉价的烧写器完成程序的固化烧写，便形成一套最经济实用的开发系统。

鉴于以上优点，本文选用 PIC16F877A 作为系统的控制器。

3.3.1.2 复位电路设计

PIC16F877A 的复位可以归纳成四类：人工复位、上电复位、看门狗复位、欠压复位。

以下是两种常用的外接复位电路如图 3-5 所示：

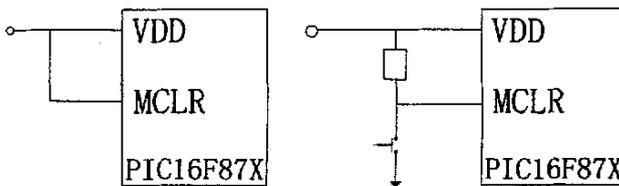


图 3-5 (a) 接 VDD (b) 接按钮

下图为本设计所采用的复位电路原理图，如图 3-6 所示：

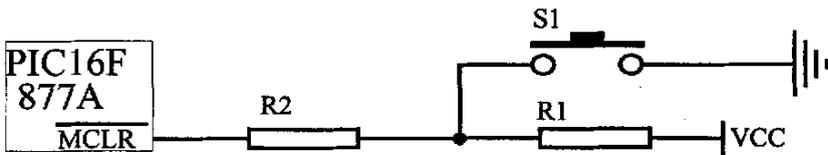


图 3-6 复位电路原理图

如图所示，复位电路由电阻 R1、R2 及复位按钮组成。其作用：(1) 上电复位功能。当复位按钮未被按下情况下，给单片机加电，当 VCC 上升到规定值 1.6~1.8V 时，就会产生一个复位信号，需经 $72ms + 1024$ 个时钟周期的延时，才会使单片机复位。此时电阻 RESETEI 对于引脚内部电路起到保护作用。(2) 人工复位功能。无论是单片机在预定的正常顺序运行程序，还是出现单片机进入不可预知的某一个死循环(形成死机现象)，都得认为单片机在执行程序。单片机在执行程序期间，只要在人工复位端加入一个低电平信号，就会令其复位。当按钮按下时，在复位端就会产生一个低电平的复位信号。

单片机复位端在强烈的干扰下会出现尖峰电压干扰，虽然不会造成

复位干扰，但可能会部分改变寄存器的状态，因此在复位端配以 $0.1\mu\text{F}$ 的电容。

3.3.1.3 晶振电路的设计

时钟系统是维持系统正常运转的一种必不可少的关键器件。作为时基发生器的时钟振荡电路，为整个单片机芯片内部各个部分电路的工作提供系统时钟信号，也为单片机与其他外接芯片之间的通信以及与其他数字系统或者计算机系统之间通信，提供可靠的同步时钟信号。

PIC 单片机设计了 4 种类型的时基振荡方式可供选择：

- (1) 标准的晶体振荡器/陶瓷谐振器振荡方式 XT；
- (2) 高频的晶体振荡器/陶瓷谐振器振荡方式 HS (4MHz) 以上；
- (3) 低频的晶体振荡器/陶瓷谐振器振荡方式 LP (32.768kHz)；
- (4) 外接电容元件的阻容振荡方式 RC。

下图 3-7 给出了最常用的 XT 模式和 RC 模式两种振荡器所需的外接电路。其中 RC 振荡器需外接一条阻容支路，来构成一个自激多谐振荡器。如图 3-7(a) 所示。当电阻 R 和电容 C 分别取值 $4.7\text{K}\Omega$ 和 22pF 时，振荡器频率约为 4MHz 。XT 模式振荡器需要外接一个石英晶体和两个电容，共同构成的一个自激多谐振荡器，如图 3-7(b) 所示，其工作频率取决于晶体的固有频率。当石英晶体为 4MHz 时，电容 $C1$ 和 $C2$ 均选为 15pF 。本设计采用的就是标准的 XT 模式。其电路原理图如图 3-8 所示。

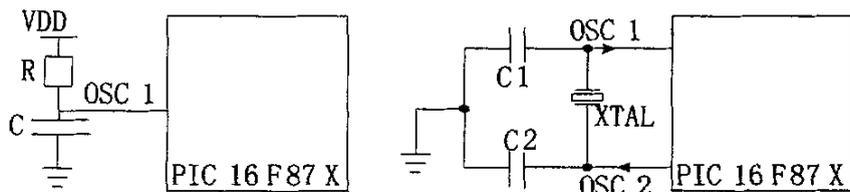


图 3-7(a) 接 RC

(b) 接晶体

陶瓷谐振器与晶体振荡器相比更具鲁棒性(即能够耐受更强的物理振动)，其不足之处是其精确性较晶体振荡器差，一般精确度是 0.5% ，而晶体振荡器的精确度是 0.02% 到 0.1% 。

同时考虑到通信时的波特率的设置和相对误差值，所以在本设计中

选用能产生较精确时钟的晶体振荡器(C4MHz)。

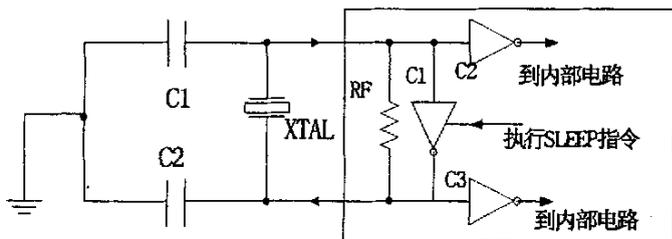


图 3-8 晶振电路原理图

3.3.2 模拟量输入单元

模拟量输入对于选择性漏电保护系统来说是非常重要的，系统正确采集电网的物理参量，通过运算来判断电网目前的运行状况，以发出正确的控制信息。本设计中需要监测的模拟量信号有：电压、电流、漏电。模拟量输入原理如图 3-9 所示。

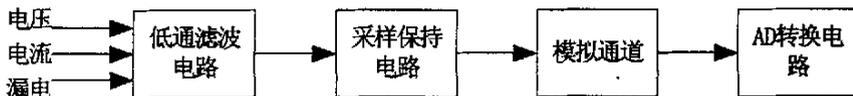


图 3-9 模拟量输入原理框图

3.3.2.1 低通滤波器

电力系统在故障的暂态期间，电压和电流含有较高的谐波成分，如果要对所有的高次谐波成分均不失真地采样，那么其采样频率就要取得很高，这就对硬件速度提出很高要求，使成本增高，这是不现实的^[26]。实际上，目前大多数微机保护原理都是反映工频分量的，故可以在采样之前将最高信号频率分量限制在一定频带之内，即限制输入信号的最高频率，以降低 f_x 。这样一方面降低了对硬件的速度要求，另一方面，根据香农(Shannon)采样定理，为防止出现频谱“混叠效应”，信号的最高频率不能超过采样频率的 1/2，低通滤波器的作用就是要滤除输入信号中高于 1/2 采样频率的高频成分。设对每周期工频信号采样 12 点，则此低通滤波器的截止频率最高为 300Hz。低通滤波器采用有源二阶低通滤波器，其电路图如图 3-10 所示。

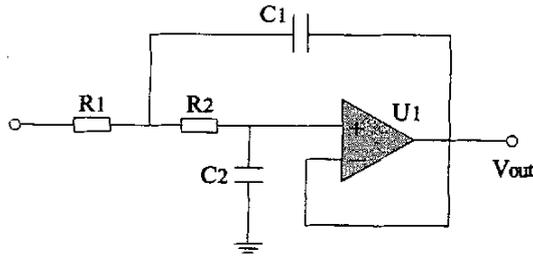


图 3-10 低通滤波电路

3.3.2.2 系统采样保持器电路

实际电路中采用 LF398 采样保持器，其模拟信号范围为一 11.5V~+11.5V，捕捉时间为 25us(精度为 0.01%时)，CH 采用聚四氟乙烯电容。图 3-11 采样保持器电路原理图。

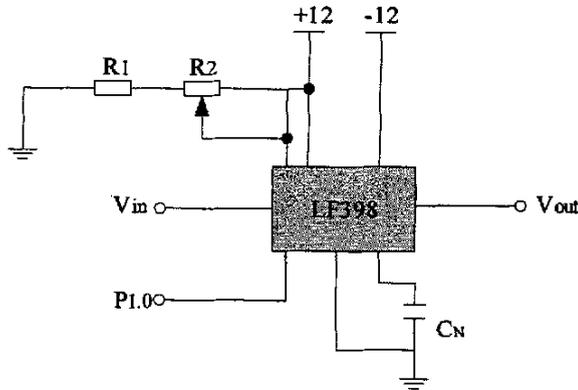


图 3-11 采样保持电路原理图

模拟通道采用 CD4051 芯片，它采用 DIP16 封装，由采用三个控制端来选通 8 路输入信号的一路^[27]。

PIC16F877A 单片机集成了 10 位结果的 A/D 转换模块，转换精度高，因此为了简化硬件电路我们采用内部集成的 ADC 模块作为 A/D 转换器。PIC16F877A 单片机共有 8 路 A/D 转换通道，由于我们使用模拟通道选通的方法，因此在设计中我们只使用第一路 A/D 转换通道，由于端口都是复用的，这样其它七路的 A/D 转换通道我们只使用它普通 I/O 的功能。

3.3.3 人机接口单元

单片机应用系统中，通常都要有人机对话功能，它包括操作人员对应用系统状态的干预、数据输入以及应用系统向操作人员报告运行状态

与运行结果，包括键盘和显示两部分。

使用 4×4 键盘和 OCMJ4×8B_2 液晶显示模块。

LCD 与 CPU 的连接方式有两种，一种是直接访问方式，另一种是间接访问方式。直接访问方式就是将液晶显示模块的接口作为 I/O 设备直接挂在计算机总线上，计算机以访问 I/O 设备的方式操作液晶显示模块的工作。间接控制方式是计算机通过扩展的并行接口与液晶显示模块连接。本文采用 8255 芯片间接访问方式，CPU 可以通过对 8255 的操作以达到对液晶显示模块的控制，这种接法电路简单，控制时序可以通过软件来实现，另外用 8255 扩展可以增加端口，供其它功能使用。

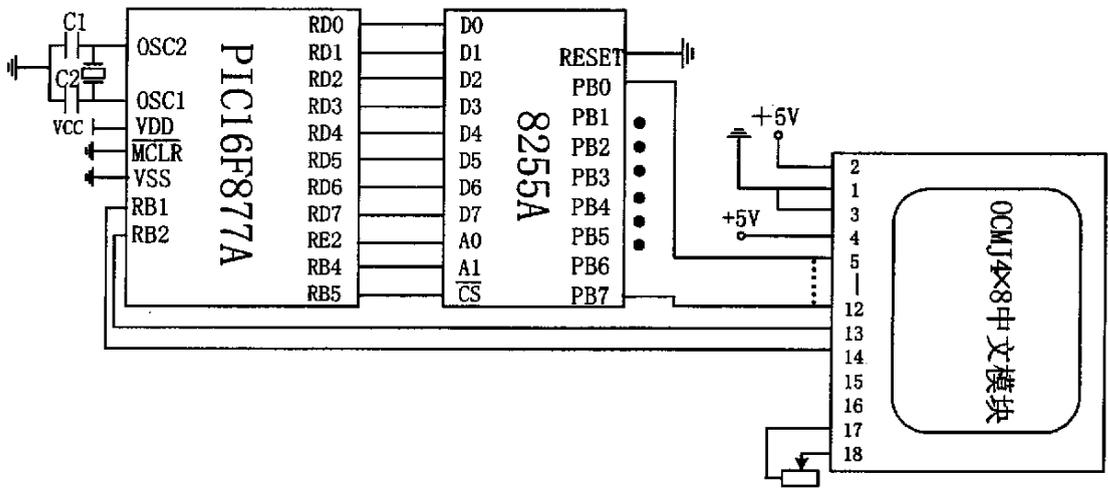


图 3-11 液晶显示模块与单片机的连接

图 3-11 给出了 PIC16F877A 单片机与 OCMJ4×8B_2 显示器硬件接法。图中 8255A 选择工作方式 0，PB0~PB7 与液晶显示控制器的数据总线相连，OCMJ4×8B_2 显示器的 BUSY 与 PIC16F877A 的 RB1 口相连接，OCMJ4X8B_2 显示器的 REQ 与 PIC16F877A 的 RB2 口相连接。由于 PIC 系列单片机的 I/O 端口具有方向选择和读写选择控制寄存器，就可以方便的使用软件对液晶显示模块进行控制。这是 51 系列单片机所不具备的功能。OCMJ4×8B_2 的引脚说明如表 3-1 所示。

表 3-1 OCMJ4×8B_2 引脚说明

引脚	名称	方向	说明	引脚	名称	方向	说明
1	LED-	I	背光电源负	10	DB5	I	数据 5

2	LED+	I	背光电源正	11	DB6	I	数据 6
3	VSS	I	地	12	DB7	I	数据 7
4	VDD	I	模块电源	13	BUSY	O	应答信号
5	DB0	I	数据 0	14	REQ	I	请求信号
6	DB1	I	数据 1	15	RES	I	复位信号
7	DB2	I	数据 2	16	NC		空脚
8	DB3	I	数据 3	17	RT1		灰度调整
9	DB4	I	数据 4	18	RT2		灰度调整

键盘采用贴片式 4×4 键盘操作简单方便，它与 8255 的连接如图 3-12 所示，J1 为键盘接口，R1~R4 为 5KΩ 下拉电阻。

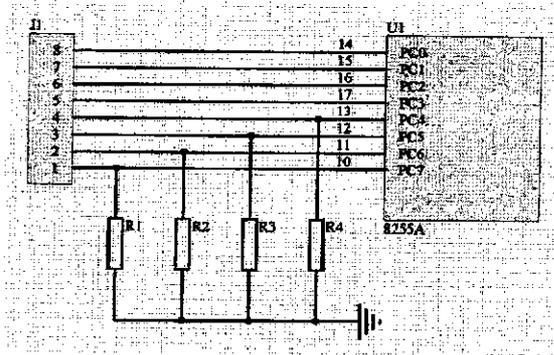


图 3-12 8255 与键盘接口的连接

3.3.4 开关量输入输出单元

开关量输入电路比较简单，如图 3-13 所示：



图 3-13 开关量输入电路

根据实际需要，总开关设计了 5 路开关量信号，包括：合闸信号、分闸信号、断路器状态信号、复位信号、报警信号；分开关中除了这 5 路信号外，还有一路总开关发来的漏电中断信号。

3.3.5 绝缘监视电路

为防止高压窜入而烧毁综合保护系统^[28]，传统的设计方法是在监视电路的输入端设置压敏电阻并采用单独电源和光电耦合电路，使监视单元与其他单元完全隔离，经过隔离的直流量送入 AD 转换器。由于线性光电隔离电路线性度的限制，经光电隔离以后的直流量不一定完全反

2	LED+	I	背光电源正	11	DB6	I	数据 6
3	VSS	I	地	12	DB7	I	数据 7
4	VDD	I	模块电源	13	BUSY	O	应答信号
5	DB0	I	数据 0	14	REQ	I	请求信号
6	DB1	I	数据 1	15	RES	I	复位信号
7	DB2	I	数据 2	16	NC		空脚
8	DB3	I	数据 3	17	RT1		灰度调整
9	DB4	I	数据 4	18	RT2		灰度调整

键盘采用贴片式 4×4 键盘操作简单方便，它与 8255 的连接如图 3-12 所示，J1 为键盘接口，R1~R4 为 5KΩ 下拉电阻。

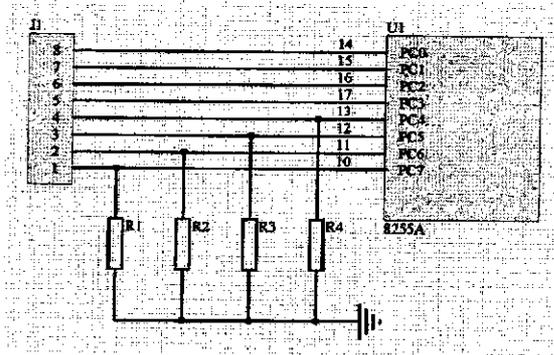


图 3-12 8255 与键盘接口的连接

3.3.4 开关量输入输出单元

开关量输入电路比较简单，如图 3-13 所示：



图 3-13 开关量输入电路

根据实际需要，总开关设计了 5 路开关量信号，包括：合闸信号、分闸信号、断路器状态信号、复位信号、报警信号；分开关中除了这 5 路信号外，还有一路总开关发来的漏电中断信号。

3.3.5 绝缘监视电路

为防止高压窜入而烧毁综合保护系统^[28]，传统的设计方法是在监视电路的输入端设置压敏电阻并采用单独电源和光电耦合电路，使监视单元与其他单元完全隔离，经过隔离的直流量送入 AD 转换器。由于线性光电隔离电路线性度的限制，经光电隔离以后的直流量不一定完全反

2	LED+	I	背光电源正	11	DB6	I	数据 6
3	VSS	I	地	12	DB7	I	数据 7
4	VDD	I	模块电源	13	BUSY	O	应答信号
5	DB0	I	数据 0	14	REQ	I	请求信号
6	DB1	I	数据 1	15	RES	I	复位信号
7	DB2	I	数据 2	16	NC		空脚
8	DB3	I	数据 3	17	RT1		灰度调整
9	DB4	I	数据 4	18	RT2		灰度调整

键盘采用贴片式 4×4 键盘操作简单方便，它与 8255 的连接如图 3-12 所示，J1 为键盘接口，R1~R4 为 5KΩ 下拉电阻。

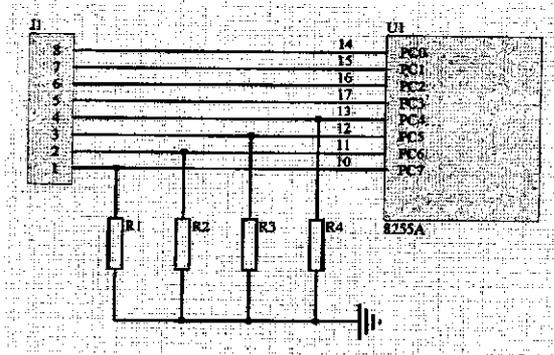


图 3-12 8255 与键盘接口的连接

3.3.4 开关量输入输出单元

开关量输入电路比较简单，如图 3-13 所示：



图 3-13 开关量输入电路

根据实际需要，总开关设计了 5 路开关量信号，包括：合闸信号、分闸信号、断路器状态信号、复位信号、报警信号；分开关中除了这 5 路信号外，还有一路总开关发来的漏电中断信号。

3.3.5 绝缘监视电路

为防止高压窜入而烧毁综合保护系统^[28]，传统的设计方法是在监视电路的输入端设置压敏电阻并采用单独电源和光电耦合电路，使监视单元与其他单元完全隔离，经过隔离的直流量送入 AD 转换器。由于线性光电隔离电路线性度的限制，经光电隔离以后的直流量不一定完全反

映光电隔离前的模拟量，线性光电隔离存在一定的“死区”，所以直流量经光耦到 AD 转换，影响准确性。为提高整个系统的可靠性，本系统采用 V/F 变换器（电压频率转换），它既兼顾了传统方法的优点又克服了线性光电隔离所存在的缺点。电路示意框图如图 3-13 所示。

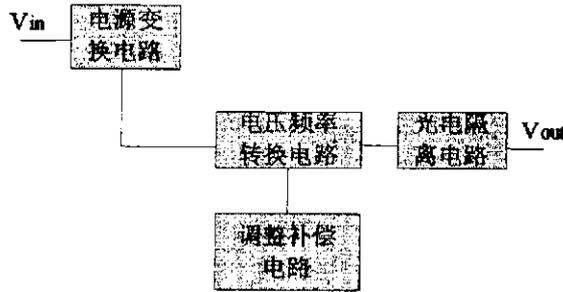


图 3-13 绝缘监视保护电路图

3.3.6 通讯接口

为了实现远方信号传输或信息参数的共享，本系统还设置了通讯电路。

本设计通讯部分选用可远距离传输数据的 RS-485，通过 RS-485 将现场参数送往矿局域网，网内用户可以在任意时刻浏览电气设备的运行情况。

通信的基本方式分为并行通信和串行通信。并行通信的优点是传输速度快。缺点是需要同时连接的线数多，尤其是在通信距离较长时传输线的成本会急剧增加。串行通信的缺点是传送速度较慢，突出的优点是仅仅需要数量很少的传输线，特别适合远距离传输。且对单片机而言，串行通信需要占用的引脚资源较少。在数据通信、计算机网络以及工业上的分布式控制系统中，经常需要采用串行通信来达到远程信息交换的目的，所以本设计采用串行通信。

目前常用的总线接口种类繁多，从传统的通用外围电路、RS-232, RS-422/485, MODEM 到现在的 USB, IEEE 1394, Internet 网络芯片等，它们在不同的领域得到了广泛的应用。因此通信接口(interface)的协议也很多。可用于串行通信的接口标准，主要包括 RS-232, RS-422, RS-423 和 RS-485，因此在设计中采用了 RS-485 串行通信方式。

(1) RS-485 通信接口标准

1) RS-485 的电气特性：逻辑“1”以两线间的电压差为 + (2-6) V 表示；逻辑“0”以两线间的电压差为 - (2-6) V 表示。接口信号电平比 RS-232-C 降低了，就不易损坏接口电路的芯片，且该电平与 TTL 电平兼容，可方便与 TTL 电路连接。

2) RS-485 的数据最高传输速率为 10Mbps。

3) RS-485 接口是采用平衡驱动器和差分接收器的组合，抗共模干扰能力增强，即抗噪声干扰性好。

4) RS-485 接口的最大传输距离标准值为 4000 英尺，实际上可达 3000 米，另外 RS-232-C 接口在总线上只允许连接 1 个收发器，即单站能力。而 RS-485 接口在总线上是允许连接多达 128 个收发器。即具有多站能力，这样用户可以利用单一的 RS-485 接口方便地建立起设备网络。因 RS-485 接口具有良好的抗噪声干扰性，长的传输距离和多站能力等上述优点就使其成为首选的串行接口。因为 RS485 接口组成的半双工网络，一般只需二根连线，所以 RS485 接口均采用屏蔽双绞线传输。RS485 接口连接器采用 DB-9 的 9 芯插头座，与智能终端 RS485 接口采用 DB-9 (孔)，与键盘连接的键盘接口 RS485 采用 DB-9 (针)

5) 从通信距离来讲，RS-485 在波特率为 1200bps 的条件下，最远传输距离可达 1500m，但更远的距离则需借助专门的 MODEM 芯片利用电话线或电力线进行远程数据传输。

(2) MAX485 简介

MAX485 传输方式采用差动方式，下面是 MAX485 的内部结构图和传输原理图。

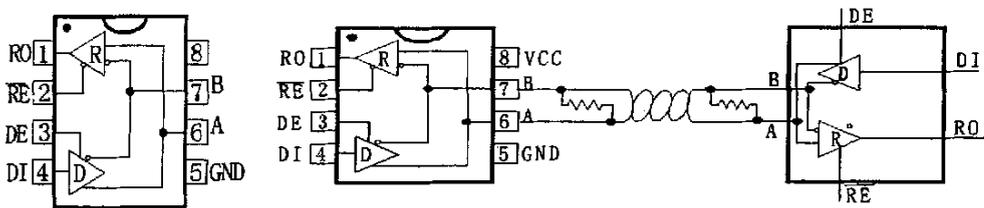


图 3-14 MAX485 内部结构图和通信原理图

MAX485 的管脚说明

R0:接收器输出 DI:驱动器输入

\overline{RE} :接收器输出使能(低电平有效)

DE:驱动器输出使能

A:接收器输入和驱动器输出

B:接收器反相输入和驱动器反相输出

VCC:+5 伏电源

GND:接地端

因为 MAX485 采用两线制，通过它的信号被传送出去时会先分成正负的两条线路，当到达接受方后，再将信号相减还原成原来的信号。所以它的输入与输出信号所经过的线路相同，这就决定了它的通信方式只能是半双工的。

3.4 本章小结

本章根据测控系统保护功能的要求，分别设计了中央处理控制单元、开关量输入电路、模拟量输出电路、人机通道接口电路、绝缘监视电路、通讯电路等，阐述了硬件电路的工作原理，构成了一个完整的保护系统。

4 选择性漏电保护装置软件设计

软件是系统的指挥中心，性能优良的软件是保证系统高效、可靠、安全工作的技术保障。本章根据保护系统的控制原则和技术要求，使用 PIC 单片机的汇编语言，它具有精简的指令集（35 条指令）、寻址方式简单、采用 4MHz 的晶振每条指令执行时间仅为 $1\mu\text{s}$ 运行速度快等优点，这些给软件设计带来了极大的便利。应用模块化程序设计方法设计了保护系统的主控程序和各功能模块程序，并给出了程序框图。试验表明，采用模块化结构程序设计方法设计调试方便，编程效率高^[29]。

4.1 软件设计原则

目前单片机控制系统的软件设计，可以使用汇编语言或高级语言，虽然汇编语言比高级语言繁琐，但它能最充分地发挥指令系统的功能与效率，可获得最简练的目标程序。该软件设计就是采用 PIC 汇编语言^[30]。软件设计包括拟定程序的总体方案并画出程序流程图、编制具体程序、程序的检查修改、程序调试等步骤。

(1) 程序的总体设计

程序设计首先要拟定设计的总体方案，由于一个实际的控制系统功能复杂、信息量大、程序较长，因此需要选用切实可行的程序设计方法。该系统使用结构化程序设计方法，把一个较大的程序划分为若干个具有独立功能的子程序，各子程序分别进行编译、调试，最后链接成一个统一的整体。在设计过程中，应确定出具体功能模块的数学模型和算法，并转换成计算机可以处理的形式，最后绘制出各功能模块和总体设计的流程图。

(2) 程序的编制

程序流程图绘制成功后，整个程序的轮廓和思路已十分清楚。设计者就可以进行编制程序。首先要统筹考虑和安排一些全局问题，如：程序地址空间分配、工作寄存器安排、数据结构、端口地址和输入/输出格式等。然后就可以依照程序流程图来编出目标程序。

(3) 程序的检查和修改

实际的应用程序编好后，往往会有不少潜在隐患和错误，这是不足

为奇的。但如果这些隐患和错误不加排除和修改很容易产生并发症，使得本来很好的程序陷入不可收拾的地步。因此，源程序编好后在上机调试前进行静态检查是十分必要的。

(4) 程序的调试

程序经过检查直到没有错误后，就可以进入调试过程，调试过程的主要目的是检验编制的程序是否符合实际功能，各模块子程序之间配合是否协调，是否存在漏洞以及程序优化等，最后完成系统的总体程序设计。

4.2 软件开发环境

本设计的程序的编写调试均在 Microchip 公司推出的 Mplab IDE V7.10 环境下完成的。它与在线调试器 MPLAB ICD2 配合使用可以实现程序的调试在线调试和程序的单独烧写。作为在线调试器，它可以在线观测并修改文件寄存器的内容，可以在计算机上直观的观测到文件寄存器内容的变更，可以设置一个断点，断点的功能是可以让程序执行到断点处便停止，这为程序的调试带来极大的方便，利用这一点加上我们软件模块化的设计思想可以在调试时很轻松的找到程序出错的地方；它支持软件的单部运行、和块单步运行。单步运行 (Step Into) 的功能可以观察到语句的执行效果。利用单步功能可以实现多种调试目的，例如，可以使用该功能来观察程序分支的跳转方向，或者用来观察数据的转移、运算等。块单步 (Step Over) 在使用这个功能时系统将跳过子程序的调用过程，直接执行到调用的下一语句，这样用户在遇到“CALL”语句时就可以利用这个功能直接看到调用的结果了。假如语句的调用是没有必要进行分析的延时子程序，那么使用此功能就可以避免陷入单步执行烦琐的循环过程的麻烦。另外，运行、停止、复位等功能其它在线调试器中都具备此项功能就不再赘述。作为烧写器它支持芯片程序的直接写入，并且可以进行加密处理，ICD2 的加密功能较市场上同类烧写器的加密功能更为强大，使用户的知识产权得到充分的保护。

4.3 功能模块程序设计

保护系统软件采用模块化结构设计方法，循环扫描工作方式。整套

程序分为主控模块、选择性漏电保护选线模块、初始化及自检模块、整定参数检测计算模块、电压检测模块、绝缘电阻检测模块、合闸后故障检测模块、液晶显示模块、RS-232 通讯模块、标准信号输出模块等几部分。将这些功能模块分别进行独立设计、编程、查错和调试，最后链接在一起进行综合调试。这样设计的优点是程序结构清晰、单个模块容易编写和查错、调试和维护方便，而且便于修改、更新和扩充，某些功能模块也可供其他程序调用。

4.4 软件设计方案

4.4.1 程序构成

程序主要由数据采集、数字滤波、故障判断及控制信号输出、报警报表等部分组成。

数据采集主要将 A/D 转换的数据读入计算机，A/D 转换触发工作方式采用软件触发，即在软件操作下，选通某一输入通道，将该通道模拟输入信号送至采样保持器，然后再通过单稳电路启动 A/D 转换开始。当 A/D 转换完成时，转换完成位寄存器被置为“1”。当软件查询到这个状态位为“1”时，即将 12Bit 数据读入到计算机内存中。

数字滤波功能，由于采集到的信号到计算机的模拟量入口，有相当一段距离，信号在传输过程混入了干扰信号，这些干扰是随机产生的。它们必然会串入计算机中，造成随机误差。为了滤掉这些干扰，减少误差，在 A/D 转换后再进行数字滤波。它是通过对输入数据进行必要的处理运算，用软件来实现的滤波^[31]。

故障判断及控制信号输出，该部分程序主要实现故障的判断功能，即通过检测到的各信号判断是否漏电，若漏电发生，指出那个分支漏电并发出控制信号切断漏电分支，同时发出报警。

报警报表功能主要记录每次报警的时间、地点及测量值，实现报警的汇总，便于查询和分析故障。

4.4.2 数字滤波方法的选取

常用的数字滤波方法有以下几种：

(1) 算术平均值法

算术平均值法是对同一采样点连续采样 N 次，然后取其平均值，其

算式为：
$$y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_k \dots\dots\dots (4-1)$$

式中：y—N 次测量的平均值；

X_k —第 k 次测量值；

N—测量次数；

这是用得最多和最简单的方法，对周期性波动的信号具有很好的平滑作用，其平滑程度取决于输入的数值。N 太小时，效果不明显，特别是对于脉冲性干扰更是如此。N 太大及采样点较多时，则实时性差，N 的取值视生产环境而定。

(2) 加权平均值法

加权平均值算式为：

$$y = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N a_k X_k \quad (0 \leq a_k \leq 1, \sum_{k=1}^N a_k = 1) \dots\dots\dots (4-2)$$

式中： a_k —第 k 次测量值的加权系数。

由于加权系数要在现场反复进行调整，花费时间长，所以这种方法在实际使用中不太普遍。

(3) 抑制脉冲算术平均法

从上述的讨论中看出，算术平均值对周期性波动信号有良好的平滑作用，但对脉冲干扰的抑制能力较差。抑制脉冲算术平均值法是对测量点的若次连续采样值，先去其最大值和最小值，然后再取算术平均值。本系统采用第三种数字滤波方法对采集数据进行处理。

4.5 主控模块

主控模块即主程序，它是整个系统软件的“总指挥”，通过对各功能模块的合理调用来完成参数的检测、分析、判断从而实现系统的整体功能，主程序流程图如图 4-1 所示。

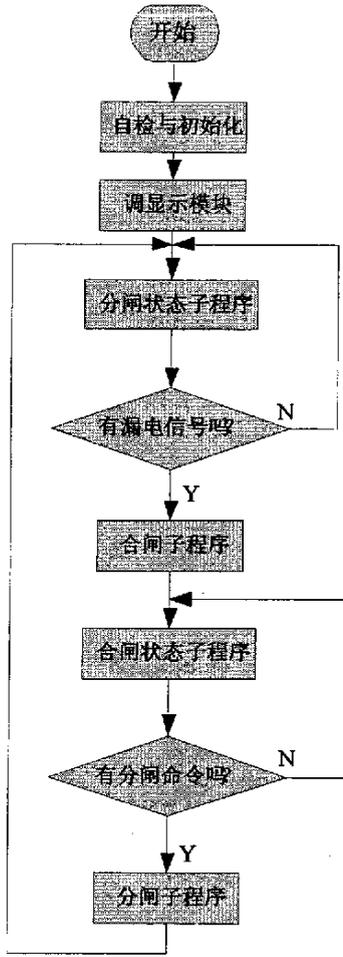


图 4-1 主程序流程图

4.6 选择性漏电保护选线模块

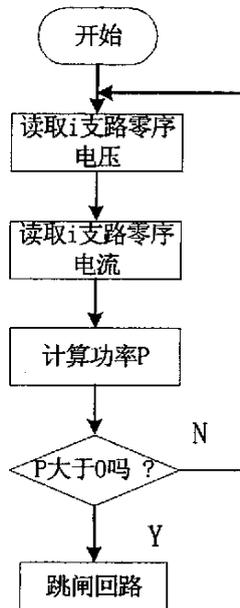


图 4-2 选择性漏电保护选线模块

根据选择性漏电保护的选线判据，给出选择性漏电保护选线模块。读取各支路的零序电压和零序电流值，计算功率，功率大于 0 的为故障支路，功率小于 0 的为非故障支路。

4.7 初始化与自检模块

初始化模块的作用是对系统资源进行初始化，需要初始化的对象有 PIC16F877 内部 RAM，I/O 口、工作寄存器区、堆栈指针、中断系统、定时器及扩展 8255 的 I/O 口、RAM 和定时器等，这为系统以后的工作准备条件。自检是指系统上电后自动检测工作是否正常，包括整定值是否正确、工作电压是否正常、绝缘电阻值是否正常等^[32]。初始化与自检模块程序框图如图 4-3 所示。

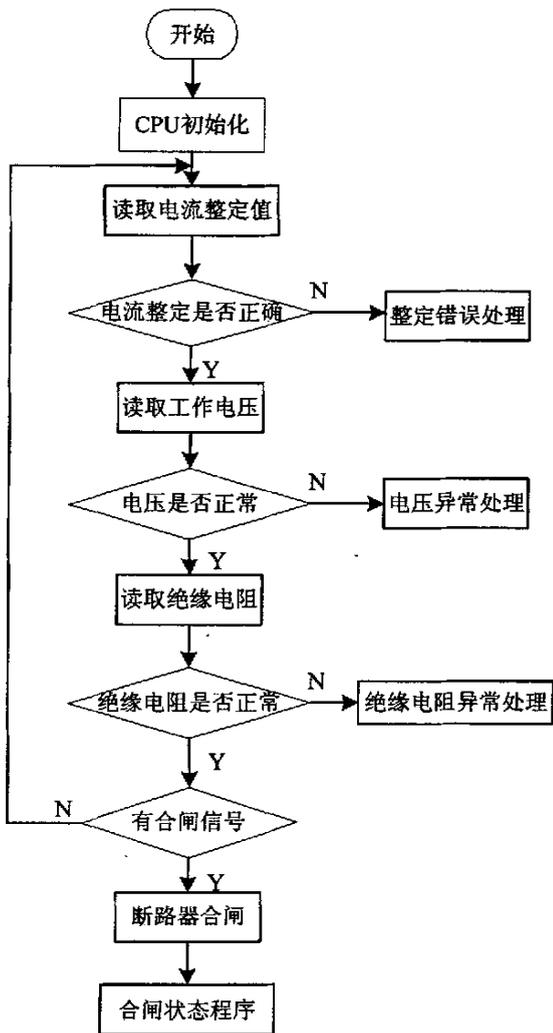


图 4-3 初始化与自检模块

4.8 额定参数检测计算模块

在断路器合闸前需要对系统的额定电流、短路电流倍数进行整定，并将整定值存入相应的 RAM 单元，作为系统的额定工作电流和判断短路故障的依据。

4.9 电压检测模块

系统要实时的检测工作电压，以确保工作电压正常，并完成对应的电压显示功能，程序框图如图 4-4 所示。

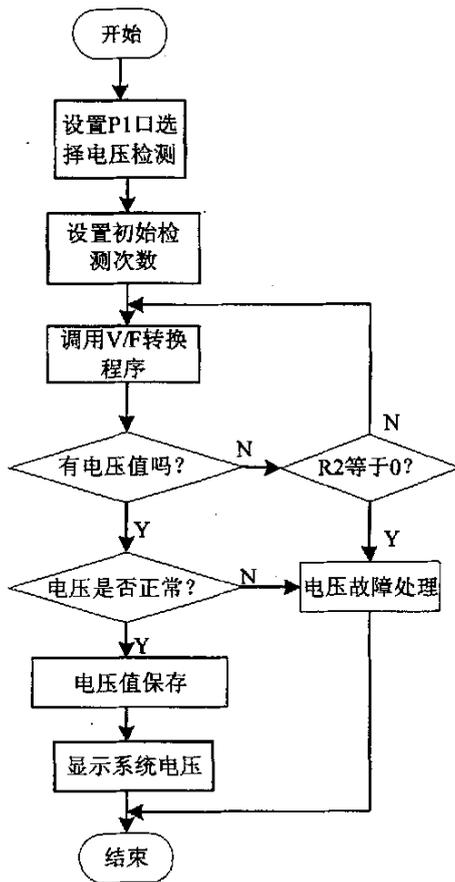


图 4-4 电压检测模块框图

4.10 绝缘电阻检测模块

为了实现漏电保护功能，总开关要不断地检测电网对地绝缘电阻，从而判断系统是否发生了漏电故障，分开关在合闸前也要进行漏电闭锁试验，同样需要检测电网对地绝缘电阻，绝缘电阻检测模块程序框图如图 4-5 所示。

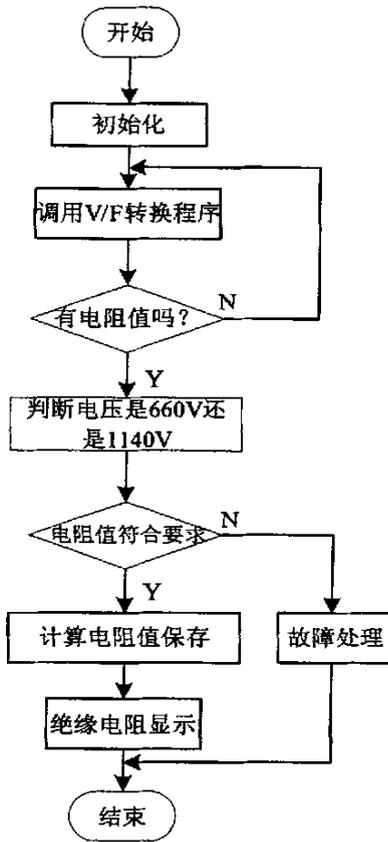


图 4-5 绝缘电阻检测模块框图

4.11 RS-485 通讯模块

由单片机的串行口扩展的 RS-485 通讯接口可以和 PC 机的 RS-485 串口直接相连，实现单片机和 PC 机双向通讯，通讯程序分两部分，单片机发送程序和单片机接收程序。要实现正确通讯首先要制定通讯协议。

RS485 协议：

RS485 总线是一种广泛应用的半双工总线，RS485 总线是一个主站对从站的点对多点网络，RS485 总线通过一对双绞线将现场所有的 RS485 设备以总线型结构从头到尾连接起来。在 19.2kbps 的速率下，RS485 接口可以将数据传至 1200m 的距离。RS485 接口采用一对平衡差分信号线，为半双工信号传送模式，它可以很方便地实现多站互联。每个站的 RS485 同名信号端互联起来后，在选定的某一时刻只有其中一个站的使能端接收到发送信号后才可以发送数据，而其他的站只能接收。

RS485 接口的互联性能不仅可以大为简化数据传输线的电气构成，而且每个站只有自己唯一的地址标识，利用它，每个站或设备只接收包含其专有地址标识的信息，从而使主站与分散子站间的数据通信得以有序、可靠地进行。在本设计中采用 MAX458 芯片来实现数据以 RS485 协议进行传输。串行口工作在方式一，8 位异步通信接口，一帧信息为 10 位，一位起始位 (0)，8 位数据位 (低位在先) 和一位停止位，没有校验位。波特率为 9600，定时器 I 用做波特率发生器，在 $f=1.0592\text{MHz}$ 的晶振下，定时器的值为 FDH。

4.12 本章小结

本章详细地介绍了该保护系统软件总体设计和各功能模块子程序设计，并给出了各部分的程序框图，主要包括主控模块、自检与初始化模块、额定参数检测计算模块、电压检测模块、绝缘电阻检测模块、电流保护模块、故障处理模块、RS-485 通讯模块、标准信号输出模块等，试验运行表明：各功能模块子程序能够实现设计的要求，能够正确处理系统运行中发生的各种故障情况，参数显示准确，证明所设计的程序正确可行。

5 选择性漏电保护装置抗干扰设计

微机系统的工作可靠性是由多种因素决定的,其中系统的抗干扰性能是系统可靠性的重要指标,而煤矿井下工作环境非常恶劣,存在着大量干扰信号,各种干扰信号直接威胁着保护系统工作的可靠性和稳定性。因此,抗干扰设计是计算机应用系统研制中不可忽视的一个重要环节。本章分析了工业生产环境存在的干扰源及所产生干扰信号的特性,针对不同特性的干扰信号,制定了相应的抗干扰措施,提高了保护系统的工作可靠性和稳定性^[33]。

5.1 干扰的主要来源及危害

在电路中,所谓噪声就是对有用信号进行干扰,对信息传输进行阻碍。由于噪声在一定条件下干扰电子设备、通信电路的正常工作,所以也把这种噪声称为电磁干扰(Electro-Magnetic Interference 简称 EMI),简称干扰。干扰可分为外部干扰和内部干扰两种,外部干扰是由使用环境和工作条件造成的,内部干扰是由系统本身及电路布局所决定的。

5.1.1 干扰的主要来源

保护系统工作在煤矿井下,而煤矿井下环境恶劣,不仅空间小、潮湿、淋水、易冒顶,而且供电系统中存在变频器、大功率整流器、真空器件等,所以存在大量干扰源。干扰信号可以沿供电线路侵入单片机控制系统,也可以场的形式从空间辐射到单片机控制系统。

干扰的主要来源有以下几点:供电线路是电网中各种浪涌电压入侵的主要途径;系统接地不良也是引入干扰的主要原因;电压、电流互感器、输入输出线路的绝缘不良等,均有可能引入干扰;操作隔离开关等设备时,系统的主接线形式及参数发生变化,在系统中形成电磁暂态过程,易造成高频电磁场干扰;在高电压、大电流附近,也存在高频电磁场干扰,它们可以通过静电感应、电磁感应等方式耦合到单片机控制系统中。

5.1.2 干扰的主要危害

干扰对保护系统的危害主要有三个部位:

第一部位是系统的输入通道。它能使模拟信号失真,或输入的开关

量和数字量出错。保护系统根据这种失真的、错误的输入信息进行运算和处理，必然会给保护系统带来不可设想的后果。

第二部位是系统的输出通道。干扰会使输出的各个控制信号发生混乱，不能实现准确地输出，造成控制失常或失灵。

第三部位是系统的主机(微机的最小系统)。干扰会使地址或数据总线上的信号发生错乱，如果 CPU 得到错误的数据信息，可能导致运算结果出错，并形成随后程序执行的一系列错误。如果 CPU 得到错误的地址信息，则会引起程序计数器出错，甚至将操作数当作操作码来执行，于是程序脱离正常轨道，导致程序失控，还有可能使程序进入死循环，整个系统处于瘫痪状态。

由此可见，一旦系统在某一瞬间受到干扰信号的作用，导致程序失控，被破坏的不仅仅是该瞬间的数据和指令，而且很容易引起一系列无法预料的结果，最后还可能导致系统瘫痪。因此，保护系统必须从硬件和软件两方面采取有效的抗干扰措施，以提高系统的工作可靠性。

5.2 硬件抗干扰设计

硬件抗干扰具有效率高、实时性强等优点，考虑到现场环境和系统设计原理，硬件抗干扰设计主要从电源系统抗干扰、空间电磁波辐射抗干扰和过程通道抗干扰三个方面来考虑。

5.2.1 电源系统抗干扰

为了防止从电源系统引入干扰，本系统中采用了图 5-1 所示的保护措施，各组成部分的功能如下。

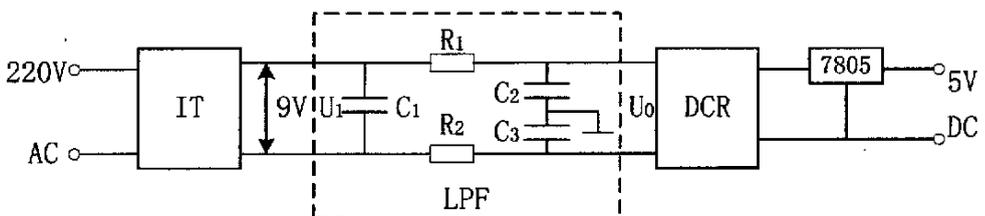


图 5-1 电源系统抗干扰供电配置

(1) IT 是隔离变压器。考虑到高频噪声主要是通过初、次级间寄生电容耦合进入变压器的，而不是通过初次级线圈间的互感耦合进入的。因此，隔离变压器的初级和次级之间均用屏蔽层隔离，减少其分布电容，

以提高抗共模干扰的能力。

(2)低通滤波器(LPF)。用于抑制由交流电源引入的高频干扰,电源系统所产生的干扰信号大部分是高次谐波,因此采用低通滤波器滤去高次谐波,以改善波形;同时也可以防止微机系统对其它电子设备的干扰。

(3)DCR指的是整流桥,用来将交流电压转变为直流电压^[34]。

(4)采用分散独立功能模块供电。在每一系统功能模块上用三端稳压集成块如7805,7812,7824等组成稳压电源。每个功能模块单独对电压过载进行保护,不会因某块稳压电源故障而使整个系统遭到破坏,而且也减少了公共阻抗的相互耦合以及公共电源的相互耦合,大大提高了供电的可靠性。

5.2.2 空间电磁辐射抗干扰

微机控制系统中,空间干扰主要是指电磁波辐射对控制系统的影响,针对电磁波干扰信号的特点,空间抗干扰设计主要是地线设计和系统屏蔽设计。

(1)良好的接地系统。微机系统中地线结构大致可分为系统地、机壳地、数字地和模拟地等,正确接地是抑制干扰的重要方法,具体措施有:①尽量使数字地和模拟地分开,两者不要混接;②地线应尽量加粗,若地线过细,接地电位会随电路的变化而变化,抗噪声性能差;③电源线、地线的走向与数据传输的方向应该一致,以增强系统的抗噪声能力;④将接地线接成闭环路可以明显提高系统抗噪声能力。

(2)屏蔽。加强屏蔽可将干扰源与控制系统隔离开来,有效地削弱空间电磁辐射干扰。

5.2.3 过程通道抗干扰

过程通道是前向通道、后向通道与CPU之间进行信息传输的桥梁。在过程通道中长线传输的干扰是影响系统可靠运行的重要因素。

微机应用系统中,传输线上的信息多为脉冲信号,它在传输线上传输时会出现延时、畸变、衰减与通道干扰。为了保证长线传输的可靠性,主要措施有光电耦合隔离、双绞线传输、阻抗匹配等。本课题设计中采用了光电耦合隔离措施^[35]。如图5-2所示。

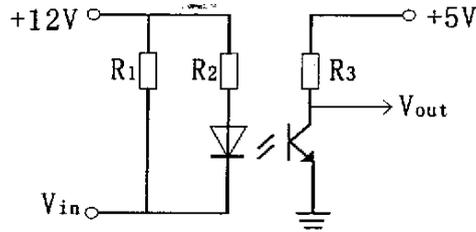


图 5-2 光电耦合电路

采用光电耦合器可以切断主机与前向、后向通道之间的电路联系，能有效地防止干扰从过程通道进入主机，抑制尖峰脉冲及各种噪声干扰，从而使过程通道的信噪比大大提高，光电耦合器具有如下特点：

(1)光电耦合器的输入阻抗很小，而干扰源内阻很大，因此能分压到光电耦合器输入端的噪声很小。

(2)干扰信号虽有较大的电压幅度，但能量小，只能形成微小电流，而光电耦合器输入部分的发光二极管是在电流状态下工作的，即使有很高电压幅值的干扰，由于不能提供足够的电流而被抑制掉。

(3)光电耦合器是在密封条件下实现输入回路与输出回路的光耦合，不会受到外界光干扰。

(4)输入回路与输出回路之间的分布电容很小，而绝缘电阻很大，因此回路一边的干扰很难通过光电耦合器馈送到另一边去。

5.2.4 印刷电路板抗干扰

印刷电路板是保护系统中集元器件、信号线、电源线于一体的高密度集合体。它的设计合理与否，直接影响整个系统的工作可靠性。因此印刷电路板的设计不仅要满足电路的逻辑与原理要求，而且还必须符合抗干扰设计的要求^[36]。印刷电路板抗干扰设计主要采取以下措施：

1)妥善布置印刷板上的器件

首先应根据板上器件布置的需要来决定电路板的大小和形状，尺寸过大会加长印制导线，增加阻抗，降低噪声容限，提高成本；尺寸过小又不利散热，邻近的导线间易发生感应。在器件布置方面，应将相互有关的器件尽量靠得近一些；而易产生噪声的器件、小电流电路、大电流电路等应尽量远离计算机逻辑电路，如有可能放置在另外的电路板上；在发热量大的器件如稳压块周围，应留有一定空间或加装散热器件。

2) 妥善布置导线

布线对于电路的性能以及电磁兼容性具有举足轻重的作用, 因为导线在实际的电气连接时绝对不能被视为短路或零阻抗, 而且处处存在分布参数, 所以布线力求路径短捷, 以减少连接阻抗; 主要信号线最好汇集在电路板的中央; 导线拐弯处尽量为圆弧形或近似圆弧形; 采用双面板时, 两相邻面的印制导线应相互垂直、斜交或弯曲走线, 尽量避免相互平行, 以减少寄生耦合。

3) 去耦电容配置

为了抑制电源线和地线阻抗引起的振荡, 应在印刷电路板的关键部位配置去耦电容, 这些关键部位有:

(1) 印刷电路板电源输入端与地之间跨接 $10 \sim 100 \mu\text{F}$ 的钽电容器。

(2) 原则上每个集成电路芯片都应安置一个 $0.01 \mu\text{F}$ 的陶瓷电容器, 如遇印刷电路板空隙小布置不下时, 可每 $4 \sim 10$ 个集成芯片安置一个 $1 \sim 10 \mu\text{F}$ 的钽电容器。

(3) 对于抗噪声能力弱、关断时电流变化大的器件和 ROM, RAM 等存储器件, 应在芯片的电源线和地线间接入去耦电容。

(4) 电容引线不能太长, 特别是高频旁路电容不能带长引线。

此外, 从有利于散热的角度出发, 印刷电路板最好是直立安装, 板与板之间的距离一般不应小于 2cm 。

5.3 CPU 抗干扰

单片机系统应用于煤矿井下时, 由于环境恶劣, 电压高, 电流大, 真空接触器吸合频繁, 以致地线中的杂散电流会产生较强的干扰信号。当干扰信号通过三总线作用到 CPU 本身时, CPU 将不能按照正常状态去执行程序, 从而引起混乱。采用 CPU 抗干扰措施就是要及时发现 CPU 受到的干扰, 拦截失去控制的程序流向, 恢复系统的正常工作状态。常用的 CPU 抗干扰措施有人工复位、程序运行监视、指令冗余、软件陷阱等。实践证明, 这些措施能够有效地保证系统可靠工作。CPU 抗干扰主要采取以下措施:

1) 人工复位

对于失控的 CPU，最简单的方法是使其复位，程序自动从 0000H 开始执行，为此在单片机的 RESET 端接复位电路，如图 5-3 所示。图中，电容 C 和接地电阻 R4 组成一个上电复位电路，使程序一送电即从 0000H 单元执行。复位按钮 FA 和电阻 R3 组成人工复位电路。上电复位电路和人工复位电路均能为 RESET 端提供大于 10ms 的高电平复位信号，从而能够使系统可靠复位。

2)程序运行监视系统(WATCHDOG)

人工复位虽然可以强迫 CPU 走上正轨，但有一个最大的缺点就是不及时，往往系统已经瘫痪，在无可奈何的情况下才按下复位按钮。因此本系统设置了程序运行监视系统(WATCHDOG)，如图 5-3 所示，其中 X25045 即是来完成此任务的。该芯片内部具有一个看门狗定时器和电压监视器，可对微处理器提供独立的保护，当看门狗定时器达到其定时时限，RESET 引脚立即会自动产生高电平复位信号；当电源电压 Vcc 降至最小极限值以下，芯片的 RESET 引脚也会自动产生复位信号；在系统电源上电或掉电时也会自动产生复位信号。这样，当系统程序陷入死循环或电源电压突然发生变化时，不会造成死机、数据读写错误或误动作等现象发生。

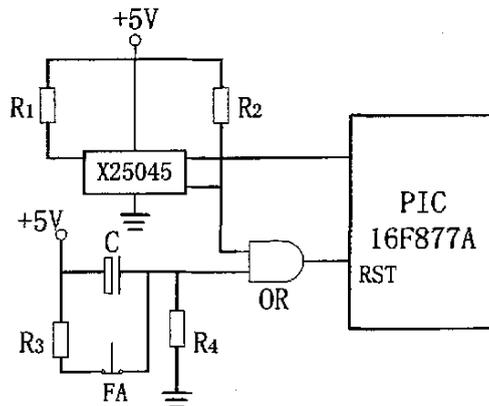


图 5-3 复位电路和看门狗电路

3)软件陷阱(Trap)

若计算机内部出现了意外事件(如溢出、除零等)，就会自动转移到一个特定的程序去处理，这种转移称为俘获，俘获的手段就是设置陷阱。在本系统中，可在程序存储器中所有连续的空白单元都填上 LJMP

0000H 指令的操作码，它们是 0200 00，当失控的程序进入这些地址时，将转移到主程序入口处^[37]。如在 6000H 开始的一段空白存储器中连续填上 LJMP0000H 指令 02 00 00 02 00 00，则不论程序进入这些地址的那一单元，都将捕获失控程序，使它直接转移到主程序入口，程序进入初始状态。

5.4 软件抗干扰

微机系统的抗干扰不可能完全依靠硬件解决，软件抗干扰措施作为抗干扰的第二道防线是必不可少的。系统对作用在 I/O 通道上的干扰采用以下软件抗干扰措施：

1) 开关量输入信号抗干扰

干扰信号一般都是很窄的脉冲，而开关量信号持续的有效时间较长。根据这一特点，可以对同一开关量连续多次采样，连续两次或两次以上采集的结果完全相同才认为有效，若多次采集后，信号总变化不定，则停止采集，给出出错标志。

2) 开关量输出信号抗干扰

单片机用于工业控制时，用开关量输出电路来控制继电器、接触器等器件。它们动作时，所产生的电弧会引发较强的干扰信号，这些干扰信号会通过公用线路反馈到输出接口，可能改变输出寄存器的内容，造成误动作。最有效的软件解决方法是重复输出相同的数据给外部负载。如有可能，重复周期尽可能短，使外部设备在受到干扰信号还来不及做出反应时，正确的输出信号又送到了，这样就可以防止误动作。

3) 模拟量输入信号抗干扰

系统所检测的电压、电流、漏电等信号都属于模拟信号，这些模拟量只有经过 V/F 转换成数字量后，才能为单片机所接受。干扰信号作用于模拟量输入通道后，使 V/F 转换结果偏离真实值，如果仅仅采样一次，无法确定其结果是否可信，必须多次采样，对采样序列值经过比较和处理后，才能得到一个较为可信的转换值。这种软件处理过程称为数字滤波，它不需要增加硬件费用，并可供多个通道使用，缺点是占用 CPU 机时，但对于本系统来说，采用这一方法后能够满足实时性的要求。

5.5 本章小结

本章分析了煤矿井下各种干扰源的作用机理，并制定了相应的抗干扰措施。光电耦合器可以有效地抑制尖峰脉冲及各种噪声干扰，防止干扰信号从通道进入微机系统。印刷电路板的合理设计可以降低传输信号的误差。对作用于 CPU 的干扰信号采取人工复位、“WATCHDOG”及软件陷阱等措施，大大提高了系统工作的可靠性。软件抗干扰能有效地减少数据采样误差、屏蔽输入的干扰信号，消除了硬件电路无法抑制的干扰信号。实践证明，上述抗干扰措施是行之有效的。

6 结论

本装置以单片机 PIC16F877A 为控制核心,提出的附加直流电源与零序功率方向选择性漏电保护新判据,可以提高井下低压电网漏电保护的動作性能;根据这些保护判据设计的各级漏电保护装置为瞬动型,缩短漏电故障存在时间,且装置结构大为简化,提高了井下供电的安全性。

本文通过对矿井低压电网选择性漏电保护的研究,得出以下结论:

(1) 针对中性点绝缘的矿井低压电网漏电故障的规律和电气特征,提出了附加直流电源与零序功率方向选择性漏电保护新判据,并基于此方法,以高性能单片机 PIC16F877A 为中央控制单元,设计了一种新型漏电保护装置系统。

(2) 采用模块化结构程序设计方法,设计了系统的监控程序和各功能模块程序,具有编程简单、结构清晰、调试方便、设计效率高等优点。

(3) 研究了保护装置中主要干扰源的特征,对应不同的干扰信号制定了相应的硬件和软件抗干扰措施,提高了保护装置的工作可靠性。

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1]基于 DSP 电动摩托车用三相变压变频转换器, 辽宁工程技术大学学报, 2005 年第 2 期 (vol.24 No.2) .
- [2]The mechanisms of cracks formation of silver-based contact materials under arc and making pressure, Journal of Coal Science & Engineering, June 2004(vol.10 No.2).
- [3]矿井低压电网选择性漏电保护原理及其应用的研究, 煤矿机电, 2005. No.12.
- [4]基于 DSP 电动车电池管理系统的研究, 电池工业, 2006.No.3.

致 谢

本文是在导师郭凤仪博士的精心指导下完成的，从论文的选题、思路形成直至最后成文，每一个环节都凝结着老师的智慧和心血。三年来，在导师的悉心指导和不断勉励下，我不但学到了丰富的专业知识，而且导师广博的学识，严谨求实的治学态度，一丝不苟的工作精神和对青年人孜孜不倦的教诲，将使我铭记心间，这些崇高的品德必将激励我在今后的工作和学习。在此，谨向我的导师表示衷心的感谢和致以崇高的敬意！

在论文完成期间，曾得到张国军老师的指导，得到李鑫、王国强、张兴、蒙杰成、李春光、周建伟同学的大力帮助，在此向他们表示衷心的感谢！

感谢辽宁工程技术大学电气工程系！同时也向给予我关心和帮助的所有老师、同学和朋友表示衷心的感谢！

感谢我的父母在我学习期间对我的支持、鼓励和关怀。多年来他们无私的奉献是我最大的鼓励和鞭策。谨以此文表达我深深的感激之情！

感谢各位专家、教授在百忙中评审本文，并衷心希望得到各位专家、教授的指导和帮助！

参考文献

- [1]刘延续.煤矿井下供电的三大保护.北京:煤炭工业出版社.1999.5
- [2]赖昌干,张金程,邹有明.矿山电工学.北京:煤炭工业出版社.1991.11
- [3]胡天禄.矿井电网的漏电保护.北京:煤炭出版社.1987.3
- [4]唐轶.选择性漏电保护.北京:煤炭工业出版社.1995
- [5]杨伟.新型直流系统绝缘监察装置.中国矿业大学第四届研究生优秀论文集
- [6]宋建成,翟生勤,范世民等.矿井低压电网漏电保护技术的发展.电网技术.2001,25(10)
- [7]顾永辉等.煤矿电工手册.北京:煤炭工业出版社.1999.2
- [8]顾永辉等.工矿企业660V供电.北京:煤炭工业出版社.1997
- [9]高建平.带电查找故障点的直流接地检测方法.电世界.2000.12
- [10]袁振海.低压电网安全运行上的矛盾及其辨证法.南京建筑工程学院学报.2001.5
- [11]金兆民.直流牵引电网漏电(人身触电)保护装置的研究.硕士研究生论文.2000.12
- [12]要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地.北京.中国电力出版社.2000.7
- [13]唐轶,陈奎,吕良.矿井低压配电网中性点接地方式的研究.煤炭科学技术.2002.7
- [14]张文勤.电力系统基础(第2版).华北电力大学.1998.11
- [15]宋建成,谢恒堃,杨同敏等.基于零序电流方向的选择性漏电保护系统的研究.电网技术,1998,22(9)
- [16]沈祥云.自然直流选择性漏电保护原理的研究.南京工业大学硕士研究生论文.2004.5.
- [17]宋建成.矿井低压电网选择性漏电保护性能的改进方法.继电器.1998,26(5)
- [18]朱安宏,程淑莲.煤矿井下电网选择性漏电保护原理.煤矿机电.2001.6
- [19]霍育川,李长禄.井下直流架线电网漏电保护装置的研究.煤炭科学研究总院论文集.1992
- [20]牟龙华.接地保护与故障点定位.徐州:中国矿业大学出版社,2000
- [21]牟龙华,孟庆海,刘建华.可通信式智能选择性漏电保护系统的研究.电工技术报.2003.1
- [22]路萍,庞彬,李华.基于PIC单片机的多选择性漏电保护.仪器仪表学报.2004.1
- [23]王安,赵永强.井下电网选择性漏电保护装置研究与设计.内蒙古煤炭经济.2002.1
- [24]聂文龙.应用低压选择性检测继电器的优越性.煤炭科学技术,1990,19(10)

- [25]宋建成,石宗义,师文林等.单片机在矿用隔爆型真空馈电开关中的应用.煤炭科学技术,1995,23(1)
- [26]莫正康.半导体变流技术.北京:机械工业出版社.2000.5
- [27]聂文龙,宋建成,耿太荣.具有选择性漏电保护的隔爆型真空馈电开关.煤炭科学技术.1991,20(9)
- [28]张效陶.6(10)kV高压电网绝缘监视及单相接地新途径.煤炭科学技术,1996(10)
- [29]Wolfgang Hofheuz, Schutztechnik mit Isolation suber wachiung.Vde-Verlag gmbh Berlin.offen bach.1993
- [30]郭凤仪,李鑫等.基于PIC16F877A的矿用隔爆馈电开关智能保护器的研究[J],第八届全国“智能化电器及其应用”学术年会暨“2005年配网自动化和变电站自动化”论坛论文集2005.6
- [31]刘延续.直流架线电网漏电保护研究.中国矿业大学博士论文.1995.12
- [32]宋建成,石宗义.单片机在矿用隔爆型真空馈电开关中的应用.煤炭科学技术.1995(1)
- [33]J,Arrillage.D.A.Bradley.D.S.Bodger,容纪纲、张文亮译.电力系统谐波.华东理工大学出版社.1994.6
- [34]袁振海,胡天禄.变流技术设备的自然漏电流装置.电工技术.2000.5
- [35]袁振海,胡天禄.IT系统复合漏电流保护装置研究.电工技术.2000.8
- [36]李光琦.电力系统暂态分析.北京.水利电力出版社,1995
- [37]王彦文.矿井电网快速断电理论与技术的研究.中国矿业大学博士论文.1993.12
- [38]Curtis D. Johnson. Process Control Instrumentation Technology. Beijing:Pearson Education Publishing Group,2002
- [39]Microchip Technology Inc.PIC16F87XData Sheet:28/40-Pin 8-Bit CMOS FLASH Microcontrollors.2001
- [40]Luis Vazquez, Leandro Rojas, Samuel Glaceran and Antoni Sundria. Simplified CANopen application layer model for educational proposals. ETFA 2001:8TH IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation, PROCEEDINGS.Vol.1,OCT.2001 P255-260