

■ 张举 编

微型机继电保护原理

WEIXINGJI JIDIAN BAOHU YUANLI



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

微型机继电保护原理

◎ 张举 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍微机型继电保护装置的构成原理。全书内容分为八章。第一章介绍了微机保护的发展历史及其特点。第二章介绍了目前在微机保护中普遍采用的两种数据采集系统的工作原理。第三章简单介绍了微机保护的硬件组成及其基本电路原理。第四章介绍了数字滤波器的设计和实现方法。第五章介绍了微机保护装置中应用的各种算法。第六章介绍了输电线路的高频保护、距离保护和零序电流方向保护。第七章介绍了发电机、变压器的微机保护原理。重点介绍了发电机、变压器的比率制动式差动保护、励磁涌流的识别方法、发电机的定子接地保护和发电机失磁保护。第八章简单介绍了微机保护的硬件和软件抗干扰技术。

本书可作为高等学校电力系统及其自动化专业以及相近专业的本科生和研究生的教材或教学参考书。也可供从事微机继电保护专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

微型机继电保护原理/张举编. —北京: 中国水利水电出版社, 2004

ISBN 7-5084-2338-0

I. 微... II. 张... III. 微型计算机—继电保护装置 IV. TP360.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 089234 号

书 名	微型机继电保护原理
作 者	张 举 编
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010)63202266(总机)、68331835(营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京安锐思技贸有限公司
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 13.5 印张 320 千字
版 次	2004 年 9 月第 1 版 2004 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	24.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

微机型继电保护装置在我国的电力系统获得了广泛的应用。自从1984年国内第一套微机保护在电力系统投入运行以来,微机保护在我国的发展已走过20多年。微机保护的研究是从高压输电线路保护开始,目前在电力系统中运行的微机保护装置已经覆盖到常规保护的各个方面。由于计算机技术的发展日新月异,大规模、超大规模集成电路技术飞速发展,各生产厂家的微机保护硬件与软件都处在不断更新换代中,因此本书对微机保护的硬件,做简单原则的介绍。对软件部分,尽量少介绍流程图,而以近年来在系统中运行的微机保护的原理介绍为主。本书是在参考国内大量运行的微机保护装置原理,并结合作者多年从事微机保护教学和科研工作的基础上编写的。全书内容分为八章。第一章为微机保护的概述。第二章介绍了微机保护的两种数据采集系统。第三章简单介绍了微机保护的硬件组成及其基本电路原理。第四章介绍了数字滤波器的设计和实现方法。重点介绍了简单滤波器及零、极点配置法设计滤波器的方法。第五章介绍了微机保护装置中应用的各种算法。第六章为输电线路的微机保护。主要介绍了输电线路的高频保护、距离保护和零序电流方向保护。第七章介绍了发电机、变压器的微机保护原理。重点介绍了比率制动式差动保护、发电机的定子接地保护和失磁保护。第八章简单介绍了微机保护的抗干扰技术。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,希望读者批评指正。

编 者

2004年7月

目 录

前 言

第一章 概述	1
第一节 微机继电保护的发展历史及研究现状	1
第二节 微机继电保护装置的特点及硬件组成	3
第二章 微机保护的数据采集系统	5
第一节 数据采集系统的作用与要求	5
第二节 模拟信号的预处理	8
第三节 采样定理	11
第四节 采用逐次逼近原理的 A/D 芯片构成的数据采集系统	17
第五节 采用积分型 A/D 芯片构成的数据采集系统	21
第三章 微机保护装置的硬件电路原理	27
第一节 概述	27
第二节 管理微机系统的硬件电路原理	28
第三节 保护微机系统的硬件电路原理	33
第四节 微机保护装置的出口和信号电路	38
第四章 微机保护中数字滤波器的设计	42
第一节 概述	42
第二节 数字滤波器的实现和分析方法	43
第三节 简单滤波器及其级联的分析方法	48
第四节 用零、极点配置法设计数字滤波器的方法	55
第五节 无限冲激响应数字滤波器的设计	60
第六节 用窗口函数法设计有限冲激响应数字滤波器	62
第五章 微机保护的算法	66
第一节 微机保护的算法概述	66
第二节 基于正弦信号的算法	67
第三节 基于信号为周期函数模型的算法	75
第四节 微机保护中的阻抗算法	83
第五节 微机保护中的比相算法	92
第六节 微机保护中与信号频率无关的算法	95
第七节 微机保护中的滤波算法和频率算法	96
第八节 微机保护中的复数求模值方法	98

第六章 输电线路的微机保护	101
第一节 输电线路的纵联保护	101
第二节 采用闭锁信号的高频保护	106
第三节 采用允许信号的高频保护	109
第四节 高频方向保护中的方向元件	111
第五节 输电线路的距离保护	116
第六节 故障类型判别与选相元件原理	120
第七节 微机保护中的工频变化量阻抗测量元件	128
第八节 正序电压为极化电压的阻抗元件	133
第九节 零序电抗型阻抗继电器	139
第十节 微机保护装置中振荡与故障的识别方法	141
第十一节 输电线路的零序电流方向保护	149
第七章 微机型发电机—变压器组保护	157
第一节 发电机—变压器组保护配置	157
第二节 微机型发电机差动保护	158
第三节 发电机定子绕组单相接地保护	163
第四节 发电机的失磁保护	167
第五节 变压器差动保护	175
第六节 变压器保护中励磁涌流的识别方法	182
第七节 模糊逻辑在变压器差动保护中的应用	188
第八章 提高微机保护装置可靠性的措施	193
第一节 概述	193
第二节 干扰和干扰源	194
第三节 微机保护装置的硬件抗干扰措施	198
第四节 微机保护装置的软件抗干扰措施	203
参考文献	209

第一章 概 述

第一节 微机继电保护的发展历史及研究现状

众所周知,电力系统继电保护所研究的内容包括两个方面:一是指实现继电保护的各种原理;二是指组成继电保护的各种装置。纵观继电保护的发展历史可见,继电保护原理的发展是伴随着电力系统的发展而不断发展的。由于电力系统规模的扩大及电压等级的提高,为了保证电力系统安全可靠的运行,必须研究动作快速,灵敏度高,选择性好的继电保护原理。因而继电保护原理从简单的电流保护逐步发展到复杂的距离保护和高频保护。近年来反映突变量原理的保护获得了广泛应用。目前,正在研究基于故障暂态分量的保护和将智能技术应用于继电保护中。而继电保护装置的发展则依赖于构成保护装置的元器件技术的发展。继电保护装置发展的初期,主要是由电磁型、感应型继电器构成的继电保护装置,20世纪60年代由于半导体二极管的问世,出现了整流型继电保护装置,由于半导体技术的进一步发展,70年代出现了晶体管继电保护装置,由于大规模集成电路的出现,80年代又出现了集成电路型保护装置。由于计算机技术和微型计算机的快速发展,到了80年代中期,出现了微机型继电保护装置。

自从1946年诞生了世界上第一台计算机以来,伴随着半导体技术和大规模、超大规模集成电路技术的发展,计算机的发展突飞猛进,计算机被广泛应用于科学技术、生产和生活的各个领域,在今天微型计算机更是普及到了家庭中。因此计算机被应用于电力系统继电保护中是继电保护装置发展的必然趋势。

早在1965年,英国剑桥大学的P. G. McLaren及其同事就提出用计算机构成电力系统继电保护的设想,并发表了《Sampling Techniques applied to derivation Letter》的文章。1967年澳大利亚新南威尔士大学的I. F. Morrison预测了输电线路计算机控制的前景,1969年美国西屋公司的G. D. Rockefeller发表了《利用数字计算机实现的故障保护》的文章。1972年美国西屋公司与GE公司合作研制成功一套输电线路的计算机保护装置。这是世界上第一套比较完整的用于现场的计算机保护装置,它具备了计算机保护的基本组成部分。但由于当时微型机尚未出现,因此该保护装置是用一台小型计算机实现的。

自20世纪70年代初期出现大规模集成电路后,微处理器迅速发展,从简单的4位微处理器发展为8位微处理器,例如英特尔公司的8080芯片,摩托罗拉公司的6800芯片等,70年代中期出现了单片微型计算机,微处理器和单片机的出现使计算机应用于电力系统继电保护更加成为现实。1977年日本投入了一套以微处理机为硬件的控制与继电保护装置,全部代替了原有保护,大大减少了控制室的占地面积,并于1980年发表了试运行的结果。1979年,国际电子电气工程师学会教育委员会组织了一次世界性的计算机继

电保护研究班,对 20 世纪 70 年代以来的计算机保护的科研成果进行了总结和交流。到 20 世纪 80 年代中期计算机保护在电力系统中获得了广泛的应用。

国内自 1979 年开始微机保护的研究工作。首先在各高等院校和一些科研单位开展了微机保护的研究工作,1984 年 4 月,华北电力大学研究的以 MC6809CPU 构成的 MDP—1 型微机线路保护装置在河北某电厂投入运行,这是我国研究成功的第一套微机线路保护装置。从此,微机保护的研究工作方兴未艾,如火如荼,到目前为止,微机保护装置已经涵盖了常规保护的所有领域,在 220kV 及以上电压等级的电网中,微机线路保护的普及率达到了 90%以上。

我国微机保护的发展从硬件上看大体可分为三个阶段。

第一阶段是以单 CPU 的 8 位微处理器构成的微机保护装置。其主要特点为:保护采用 8 位微处理器 MC6809 构成微机系统,由于 MC6809 仅仅是一个 CPU,因此需要在外部扩展许多硬件电路,所以总线必须引出插件,保护的存储器容量较小,程序和保护的定值均存放在 EPROM 中,定值的改写十分不方便,保护装置中仅有软件时钟,当直流电源消失后时钟便停止运行,硬件不具备数据远传功能,由于仅有一个 CPU,所有的保护功能只能集中由这个 CPU 处理,可靠性较低。其代表产品为 WXB—01 微机高压线路保护装置。

第二个阶段是以多个 8 位单片机组成的多微机系统。其主要特点为:具有多个 8 位单片机,由于采用了单片机,需要外部扩展的硬件电路较少,因此可以作到总线不引出插件,保护装置的定值存放在 EEPROM 中,定值的修改十分方便。设有硬件时钟芯片,依靠备用电源的支持,装置直流电源消失后,硬件时钟可继续运行,硬件上设计了数据远传的串行接口,由于硬件由多个单片机系统组成,因此一条输电线路的多种保护的功能可分散于不同的单片机系统,增加了保护装置的可靠性。其代表产品为 WXB—11 系列微机保护装置。

第三个阶段是以 16 位单片机构成的多微机系统。例如以英特尔公司的 80C196KB 构成的微机系统。有些单片机内部资源丰富,具有较大容量的 RAM 和 EPROM,因而可做到不需在芯片外部扩展存储器,可以做到总线不引出芯片。例如以日本三菱公司的 M77 芯片构成的微机系统。单片机内部有 2~4K 的 RAM 容量,32~120K 的 EPROM 或闪烁存储器和 8 个定时器,两个串行口,因此不需要用总线扩展外部存储器。保护装置的硬件设计除了有硬件时钟外,装置还具备接受 GPS 全球定位系统的秒脉冲的接口,具备较完善的通信网络,可应用于变电站综合自动化系统中,其代表产品为 CSL 系列微机保护装置和 LFP—900 系列微机保护装置。

从 20 世纪 80 年代中期开始,到目前为止,我国的微机保护已经历了近 20 年的发展历史。输电线路的微机保护从用于 500kV 系统的保护装置到用于 10kV 线路的微机保护装置均有相应的产品,近年来,发电机、变压器以及大型发电机变压器组和母线的微机保护也相继研究成功,已投入使用。据 2001 年全国电力系统继电保护动作情况的统计数据,2001 年我国 220kV 以上电网的继电保护的正确动作率达到了 99.13%,元件保护的正确动作率也达到了 90.3%。这些成果无疑与微机保护的成功应用分不开。

第二节 微机继电保护装置的特点及硬件组成

一、微机保护装置的特点

微机保护与常规保护相比具有以下特点。

(1) 常规保护是布线逻辑的, 保护的功能完全依赖于硬件, 而微机保护装置则除硬件外, 还必须具备相应的软件, 因此微机保护可以实现智能化。

(2) 常规保护的完好性是依赖于定期检验时发现的, 在正常运行时保护装置的隐患不能及时发现, 一旦系统发生故障, 将产生严重的后果, 而微机保护装置可利用程序对其硬件进行在线自检, 一旦发现问题, 可立即报警。对于软件的异常及干扰的影响, 可自动识别并排除。因而, 与常规保护相比, 微机保护装置的可靠性大大提高了。

(3) 常规保护装置的功能单一, 仅仅是保护功能, 而微机保护装置除了能够做到与常规保护完全相同的功能外, 还可以提供一些附加功能, 例如距离保护的故障类型判别, 故障测距, 故障录波, 事件记录, 零序电流方向保护的开口三角电压的极性判断。电压互感器的二次是否发生断线等信息。

(4) 与常规保护相比, 微机保护具有调试维护方便的特点。例如, 晶体管型集成电路型距离保护、高频保护由于其构成复杂, 调试工作量很大, 而微机型保护装置由于具备友好的人机界面, 依靠软件可在较短的时间内完成调试工作, 特别是某些保护具有专用的调试仪器, 除交流变换器部分, 可自动对保护的功能进行快速检查。

(5) 微机保护具有完善的网络通信功能, 可适应无人值守或少人值守的自动化变电站。

(6) 利用微机的智能特点, 可以采用一些新原理, 解决一些常规保护难以解决的问题。例如, 采用模糊识别原理或波形对称原理识别判断励磁涌流, 利用模糊识别原理判断振荡过程中的短路故障, 采用自适应原理改善保护的性能等。

(7) 对于同一类型的保护对象, 微机保护装置可采用相同的硬件结构, 不同的保护功能体现在软件上, 缩短了新产品的研制和开发周期。

(8) 微机保护装置本身消耗功率低, 降低了对电流互感器和电压互感器的要求。另外, 正在研究的数字式电压、电流传感器更便于与微机保护实现接口。

二、微机保护装置的硬件构成框图

微机保护装置的基本硬件构成如图 1-1 所示。包括数据采集系统 DAS, 保护微机系统和管理微机系统, 输入输出部分, 逆变稳压电源等。

数据采集系统完成把电压互感器和电流互感器二次的电压、电流信号变换为数字信号, 供微机系统使用。保护微机系统实现具体的继电保护功能, 由不同的软件实现不同的继电保护功能。管理微机系统主要作为人机对话的手段。对保护微机系统除模拟信号的输入(经 DAS 变为数字信号)外, 还有开关量信号的输入, 这些信号通常为外部继电器的接点、保护屏上的投退压板、操作把手的接点等, 一般是经光电隔离后输入微机系统。保护系统通过开关量输出驱动电路使继电器动作。这些继电器包括跳闸出口继电器、信号继电器、硬件故障的告警继电器等。

第二章 微机保护的数据采集系统

第一节 数据采集系统的作用与要求

一、数据采集系统的作用

数据采集系统的作用是将电流互感器二次、电压互感器二次的模拟信号转换为数字信号，供保护微机系统进行分析计算，以确定系统是否发生故障。如发生故障，须判断故障参数是否在保护的動作范围内，以便作出跳闸与否的判断。目前微机保护的数据采集系统主要有两种方案。一种是采用逐次逼近原理的 A/D 芯片构成的数据采集系统；另一种是采用 VFC 芯片构成的积分式数据采集系统。

二、数据采集系统的设计要求

在设计一个数据采集系统时应考虑的因素主要有以下几个方面。

1. 模拟量

包括模拟量的数量、模拟量的性质、模拟量的动态范围，即有多少个模拟信号，模拟信号那些是电压信号那些是电流信号，在元件保护中还会遇到直流信号。信号的动态范围是指模拟信号的最小值到最大值的变化范围。例如电流信号一般应考虑从 $0.08I_e \sim 20I_e$ 。（有些保护装置可达 $25I_e$ ），电压信号一般应考虑从 $0.01U_e \sim 1.2U_e$ 。（ I_e 和 U_e 分别为电流互感器二次和电压互感器二次的额定电流和额定电压）。通常对于电流互感器二次额定电流为 5A 的情况，动态范围为 $0.4A \sim 100A$ ，对测量相电压的电压变换器，动态范围为 $0.5 \sim 65V$ ，对测量线电压的变换器和测量零序电压的变换器，动态范围为 $1 \sim 120V$ 。要求在最小信号到最大信号之间保证有足够的精度。

2. 数据采集系统的数据传送方式选择

数据采集系统完成将模拟信号转换为数字信号后应将其存入指定的循环存储区的某个地址单元。如何实现这一过程，就有一个数据传送方式的问题。一般有三种方式。

(1) 程序查询方式。该方式是在 A/D 转换期间，CPU 不作任何事情，不断询问 A/D 转换是否结束，当 A/D 转换正在进行时，CPU 只能等待，当 A/D 转换完成，CPU 立即将转换结果读取，并存入指定地址单元。而在微机保护中，数据采集的工作必须在一次采样中断中完成。所以，查询方式占用中断的时间为： $N \cdot (T_{ad} + T_{rd})$ 。N 为模拟量的路数， T_{ad} 为每路模拟信号转换所用的时间， T_{rd} 为读取数据并启动下一路转换所花的时间。显然该方式在一个采样中断里占用 CPU 的时间多，严重时如果在一个采样中断中不能完成全部模拟量的处理，下一次中断又产生，这就产生所谓数据积压现象。此时，微机保护将无法正常工作。因此在现有的微机保护中不采用这种方式。除非采用快速的 A/D 芯片，且采样频率较低，保护中的模拟量路数较少的情况。程序查询方式的流程图如图 2-1 所示。

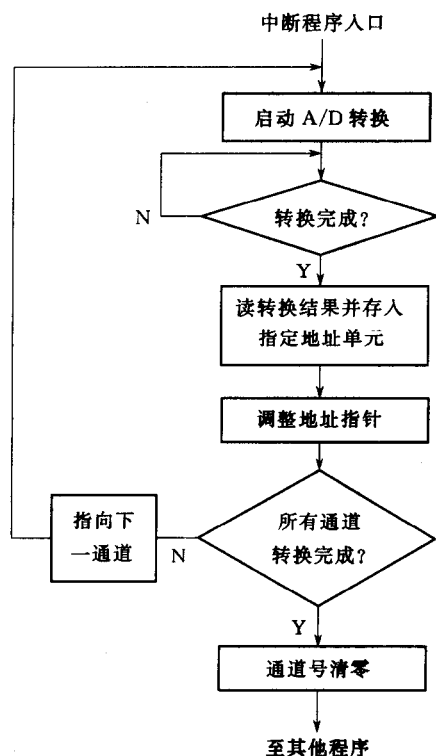


图 2-1 程序查询方式的流程图

(2) 中断方式。当微机保护的数据采集系统采用 A/D 方式时, 采用中断方式下应设有两个中断。一个是数据采样中断, 另一个是 A/D 转换结束中断。且后者的优先级高于前者。在采样中断中, CPU 发出启动第一路模拟量 A/D 转换的指令后就可以执行其他程序, 而不必等待 A/D 转换是否结束。一旦 A/D 转换结束, 立即由 A/D 转换结束中断向 CPU 申请中断, CPU 响应中断后读取转换结果并将数据存入指定的地址单元, 然后启动下一路模拟量转换, 本次 A/D 中断结束。当下一路模拟量转换结束后又立即产生 A/D 转换结束中断, CPU 再次响应中断后读取转换结果并将数据存入下一地址单元。如有 N 个模拟量, 则在一次采样中断里会有 N 次 A/D 中断, 重复以上过程直至将所有模拟量全部完成模拟量到数字量的转换。因此, 采用中断方式时在一个采样中断中 CPU 所花的时间为 $N(T_{in} + T_{rd})$ 。 N 为模拟量的路数, T_{in} 为响应 A/D 中断的时间, T_{rd} 为读取数据并启动下一路转换的时间。显然该方式占用的

采样中断时间比查询方式短得多, 微机系统的数据处理效率就会提高。目前, 由于芯片集成度的提高, 多路采样和一个 A/D 可集成在一个芯片上, 例如 AD7874 芯片在一片上可实现四路模拟信号的转换。当启动 A/D 转换后, 可对四路模拟信号同时采样/保持, 然后逐一进行转换, 四路模拟信号都转换完成后产生 A/D 中断。所以, 一旦产生 A/D 转换结束中断, 可连续四次将转换结果读取并存入相应地址单元。这种情况下, 中断方式的效率会更高。

(3) 直接内存存取方式 (DMA 方式)。在模拟量路数较多, 且采样频率较高的情况下, 必须采用更为快速的采样数据的传送方法, 否则就会使整套微机保护的运行效率大大降低, 甚至无法工作。实际上 CPU 通过软件实现的对于数据采集系统的控制大都可以通过硬件逻辑电路实现。这样就可以节省 CPU 的时间。但 A/D 转换完成后的数据存储工作必须由 CPU 来完成。采用 DMA 方式就是用硬件电路代替 CPU 完成采样数据的存储工作。该方式必须在硬件上设有一片 DMA 芯片, 当 A/D 转换完成后, 向 DMA 申请中断, 然后 DMA 芯片向 CPU 发出总线请求, CPU 释放总线后暂停, DMA 获得总线控制权后, 由 DMA 完成采样数据的存储, 之后 DMA 再将总线的控制权交给 CPU。此种方式的硬件电路较复杂, 在国内第一套微机保护装置中采用了该方式。目前由于快速的 A/D 芯片很多, 且价格也较便宜, 高性能的 CPU 或单片机处理速度比较快, 所以目前大部分微机保护装置都采用中断方式。

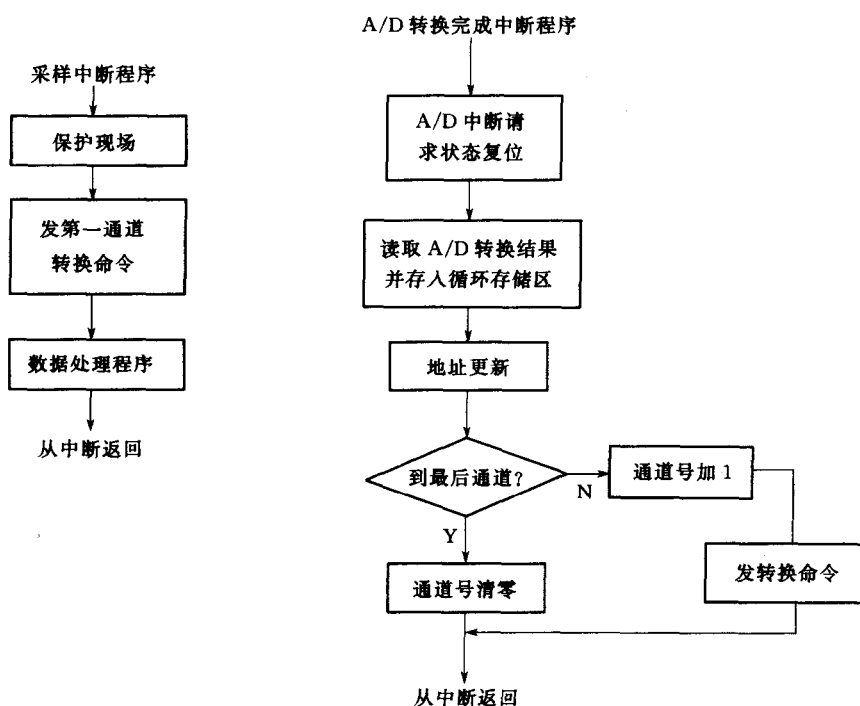


图 2-2 中断方式的程序框图

3. 采样频率的选择

微机保护装置中采样频率的选择须考虑的因素有以下几方面。

(1) 采样频率的选择必须满足采样定理。

(2) 采样频率的选择与保护原理和采用的算法有关。例如在变压器保护中为防止过励磁时变压器差动保护误动，应采取五次谐波闭锁方式，为此必须能从信号中提取五次谐波，则采样频率至少应大于 500Hz。另外在微机保护中大多在采用富氏算法，如果选择采样频率为 600Hz，采用富氏算法时的滤波系数就变得十分简单。

(3) 采样频率还与模拟量的数量，数据传送方式有关。因为如果选择的采样频率过高，则采样间隔就越小，而当模拟量路数相对较多时就会占用大量的中断时间，留给主程序的时间就会变短，使保护的运行效率降低。甚至影响保护的动作速度。

4. 数据采集系统的精度

对于 A/D 式数据采集系统，精度与 A/D 芯片的位数有关，A/D 芯片的位数通常称为分辨率，采用分辨率越高的 A/D 芯片，数据采集的精度越高。而对于 VFC 式数据采集系统，数据的计算精度除了与 VFC 芯片的最高转换频率有关外，还与软件中的计算间隔有关。早期的采用 A/D 芯片的微机保护装置中，大多数采用 12 位的 AD574 芯片，近年来，为进一步提高数据采集系统的精度，有些微机保护装置中采用了 14 位或 16 位的 AD 芯片。采用 VFC 芯片构成的微机保护装置中 VFC 的最高转换频率也从 500kHz 变化到 1MHz，4MHz。从而使数据采集系统的精度大大提高。

第二节 模拟信号的预处理

电力系统中的电量信号都是在时间和数值上连续变化的信号，因此，都属于模拟信号。而微机继电保护装置是对数字信号进行处理的，所以必须把模拟信号转变为计算机能够处理的数字信号。

数字信号是在时间上离散在数值上量化的一种信号，为了把模拟信号变换为数字信号，首先要对模拟信号进行预处理。这包括信号幅度的变换、利用模拟低通滤波器滤除信号中频率大于采样频率一半的信号、采样/保持等环节。经过预处理的信号才可以输入到 A/D 转换芯片进行模拟信号到数字信号的变换。对于一个采用逐次逼近 A/D 芯片构成的典型数据采集系统，其方框图如图 2-3 所示。本节介绍采样信号预处理过程中各部分的作用。

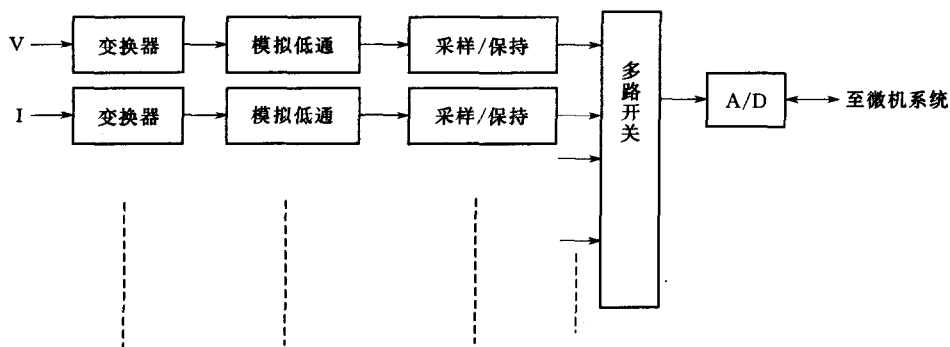


图 2-3 A/D 式数据采集系统的框图

一、电压、电流变换器

电压、电流变换器的作用有以下几点：

(1) 将电压互感器二次的电压、电流互感器二次的电流进一步变换为适合 A/D 芯片量程的信号。例如，AD574 芯片的模拟信号最大输入值有 10V、20V 两个引脚。如我们选择 10V 引脚，则应保证在模拟信号为最大值时，输入 A/D 芯片的信号最大值（包括偏值信号）不超过 10V。因此，对电流变换器可设计为 $20I_e \cdot \sqrt{2}/5V$ ，对电压变换器可设计为 $1.2U_e \cdot \sqrt{2}/5V$ 。

(2) 变换器可起到隔离的作用。有利于防止干扰从二次回路侵入微机系统。

(3) 在变换器的原、副边可加一屏蔽层。有利于抗干扰。

二、模拟低通滤波器

采样频率的选择是微机保护数据采集系统中硬件设计的重要内容。需要综合考虑多种因素。首先，采样频率的选择必须满足采样定理的要求，即采样频率必须大于原始信号中最高频率的二倍，否则将造成频率混叠现象，采样后的信号不能真实代表原始信号。其次，采样频率的高限受到 CPU 的速度、被采集的模拟信号的路数、A/D 转换后的数据与存储器的数据传送方式的制约。如果采样频率太高，而被采集的模拟信号又特别多，则在一个采样间隔内难以完成对所有采样信号的处理，就会造成数据的错误。微机系统无法正

常工作。

在电力系统发生故障时，故障初瞬电压、电流中往往含有频率很高的分量，为了防止频率混叠，必须选择很高的采样频率，这就会对硬件提出相当高的要求，而目前绝大多数微机保护的原理都是基于反映工频信号的，因此为了降低采样频率，可在采样之前先用一个模拟低通滤波器将频率高于采样频率一半的信号滤掉。例如我们选择采样频率为 600Hz，则模拟低通滤波器应将 300Hz 及其以上频率的信号滤除。

模拟低通滤波器一般为一阶或两阶的 RC 阻容滤波器。如图 2-4 所示。

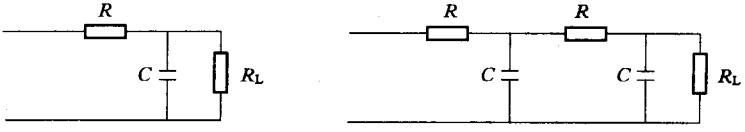


图 2-4 阻容式模拟低通滤波器

当负载 R_L 开路时，一阶 RC 滤波器的截止频率为：

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2-1)$$

当滤波器接有负载时，一阶 RC 滤波器的截止频率为：

$$f_{c'} = f_c \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (2-2)$$

其中

$$\alpha = \frac{R_L}{R}$$

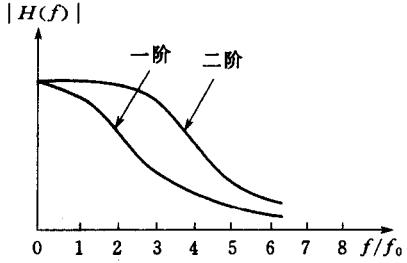


图 2-5 低通滤波器的幅频响应特性

二阶 RC 低通滤波器的传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{[1 + 3RC + (RC)^2]} \quad (2-3)$$

滤波器的幅频响应特性如图 2-5 所示。

三、采样保持电路

采样保持电路的作用一方面是在采样时刻把模拟信号的瞬时值记录下来，另一方面是在 A/D 转换期间使被采样的信号保持不变。其硬件电路如图 2-6 所示。

图 2-6 中，A1，A2，A3 为运算放大器，As 为受控电子开关，Ch 为外接的采样保持电容。当加在逻辑输入端的控制信号为高电平时，电子开关 As 闭合，模拟信号对保持电容充电，由于运算放大器 A1 的输出阻抗很低，所以充电速度非常快。从而实现了模拟信号的跟踪采样。当加在逻辑输入端的控制信号为低电平时，电子开关 As 断开，Ch 上所充的电荷只能经运算放大器 A2 放电，由于运算放大器 A2 的输入阻抗很大，因此放电极慢，电路进入保持状态。对于 LF398 采样保持芯片，其典型的参数如下：

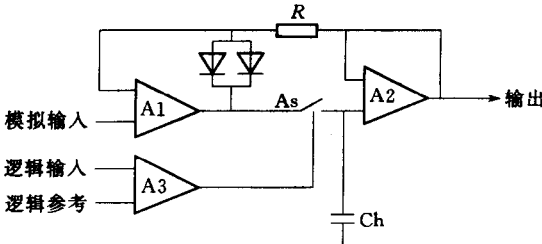


图 2-6 采样保持电路原理图

运算放大器的输出阻抗不大于 6Ω ，输入阻抗高达 $10000M\Omega$ ，在保持期间，电压下降率为 $2mV/s$ ，在采样期间，使 Ch 上的电压按误差小于 0.1% 的精度跟踪输入信号所需要的最小采样脉冲宽度（或称为截获时间）大约为 $20\mu s$ 。

目前采用的有些 A/D 芯片中已将 S/H，多路开关和 A/D 转换功能集成在一个芯片内，例如 AD7874 芯片，其内部含有 4 路 S/H，多路开关和 12 位的 A/D 转换部分，所以用一片 AD7874 可实现对 4 路模拟信号的采集。在一套输电线路保护装置中，可采用 2~3 片 AD7874 芯片。

四、多个模拟通道的采样方式

1. 等间隔采样和不等间隔采样方式

相邻两次采样所经过的时间称为采样间隔，通常用 T_s 表示。如果在采样过程中的采样间隔处处相等，则称为等间隔采样，反之，如果采样过程中的采样间隔不相等则称为不等间隔采样。目前，在微机保护装置中绝大多数采用等间隔采样方式。

2. 跟踪采样和定位采样

采样间隔 T_s 的倒数为采样频率 f_s 。在微机保护装置中，被采样的信号主要是工频交流信号，通常采样频率选择为工频频率的整数倍。采用定时采样方式时，当电网频率发生变化时，采样频率将不再是工频频率的整数倍关系，这对于某些算法将带来一定误差。为此，可采用跟踪采样方式，即采样频率不是固定不变的，而是跟踪电网频率的变化，始终保持在一个采样间隔中对应的工频电角度为常数。因此，这种采样方式是不等间隔采样方式。采用跟踪采样方式后，数字滤波及一些算法如富氏算法、滤序算法、最小二乘算法等能彻底消除由于频率变化引起的计算误差。但需要有测频方法。

定位采样是不仅要保证在电网频率发生变化的情况下始终保持采样频率为工频频率的整数倍，而且要求采样点始终位于基波信号的固定时刻，即采样过程与基波交流信号的给定相位严格同步。这一点对于输电线路纵差动保护具有重要意义。

3. 多模拟通道的采样方式

在电力系统中，绝大多数的继电保护装置是反应多个模拟信号的。例如，输电线路保护通常需引入九个模拟量： i_a 、 i_b 、 i_c 、 $3i_0$ ； u_a 、 u_b 、 u_c 、 $3u_0$ ； V_x 。在有多模拟量的系统中，每个采样间隔中对所有信号的采样时间如何安排，可有三种方式。

(1) 多通道同时采样方式。该方式是在每一个采样周期对各模拟信号在同一时间进行采样，这种采样方式需要在每一个模拟信号通道中设有采样/保持器，由单片机发出统一

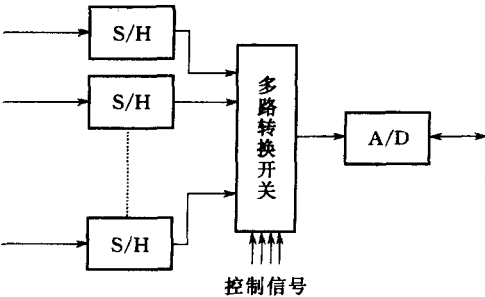


图 2-7 多通道同时采样方式的硬件电路图

的采样脉冲使各通道在同一时刻采样。这种采样方式可以保证各模拟信号之间的相位关系不变。为简化电路通常用一片（或多片）A/D 芯片，对采样后的信号逐一进行转换。这是目前微机保护装置中广泛采用的一种方式。其硬件电路构成如图 2-7 所示。

(2) 顺序采样方式。该方式是在每一个采样周期内对各模拟信号顺序进行采样的方式。即在每个采样周期中首先对第一路模拟信号进

行采样，然后再对其进行 A/D 转换，接下来再对第二路模拟信号进行采样和 A/D 转换，直到将所有模拟信号转换完成。显然，这种方式会带来各通道之间的相位误差。设有 n 个模拟信号通道，每一个通道的采样时间为 T_c ，每一个通道的 A/D 转换时间为 T_z ，则第一个通道与第 n 个通道之间产生的相位差为：

$$\theta = (n - 1)(T_c + T_z) \frac{18}{1000} (^{\circ}) \tag{2-4}$$

式中： T_c 和 T_z 的单位为 μs 。

该方式的硬件电路构成如图 2-8 所示。

(3) 分组顺序采样方式。该方式是将模拟信号分组，在一个采样周期内，分为一组的模拟信号同时采样，各组之间则顺序采样。显然，这种方式也会带来一定的相位误差，但与第二种方式相比产生的相位误差小得多。例如

有 n 个模拟信号被分成 m 组，则第一组模拟信号与第 m 组得模拟信号之间的相位误差为

$$\theta = (m - 1)(T_c + XT_z) 18 / 1000 (^{\circ}) \tag{2-5}$$

式中 X ——每组内模拟信号的数量。

该方式的硬件电路如图 2-9 所示。

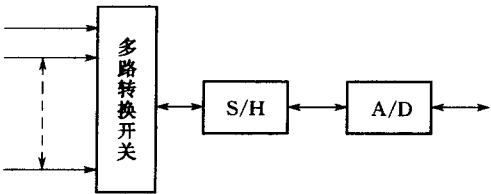


图 2-8 多通道顺序采样的硬件电路图

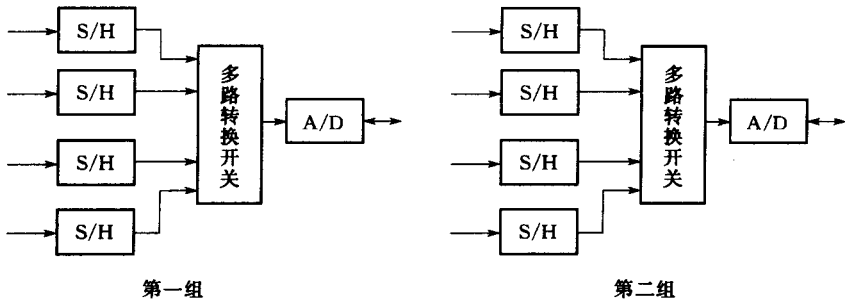


图 2-9 多通道分组顺序采样方式电路图

五、多路转换开关

多路转换开关是将多个采样/保持后的信号逐一与 A/D 芯片接通的控制电路。它一般具有多个输入端，一个输出端和几个控制信号端。例如 AD7506 有 16 个输入端，一个输出端和四个控制端。根据控制端的二进制编码决定哪一个输入端与输出端接通。在有多个采样保持电路而公用一片 A/D 的系统中必须设有多路开关。

第三节 采 样 定 理

为了便于微机系统对信号进行分析处理，必须将时域连续信号经过采样和模数转换变为离散的数字信号。那么就有一个问题，对时域连续信号的采样频率（即每秒采样次数）为多大，离散的数字信号就能完全代表原始的时域连续信号？这就是本节介绍的采样定理