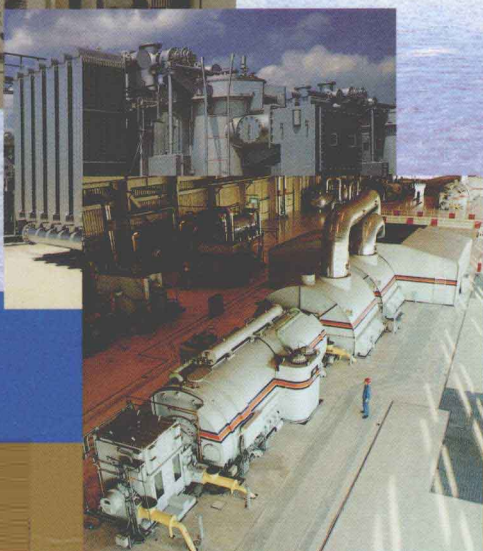




发电机 变压器 继电保护设计 及整定计算

高有权 高华 魏燕 高艳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

发电机 变压器

继电保护设计 及整定计算

高有权 高华 魏燕 高艳 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

根据现代大型发电机组发展水平和设计理念更新,并结合《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285—2006)、《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》(DL/T 684—1999)等要求和发电机—变压器组保护设计、运行实际情况,组织编写《发电机变压器继电保护设计及整定计算》一书,以满足人们对发电机—变压器组保护技术发展和实际运行经验掌握与解决问题的需要。

本书主要介绍了发电机—变压器组保护设计主要原则、微机型保护构成原理,同时针对当前电力工程设计及整定计算的实际需要介绍了发电机保护、变压器保护、发电机—变压器组保护、厂用电源保护及其整定计算、保护整定计算实例等内容。

本书可供从事电力工程电气设计,特别是电气二次和继电保护方面的设计、制造、调试和现场运行维护等技术人员阅读,也可供大专院校电力系统自动化和继电保护专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电机变压器继电保护设计及整定计算/高有权等
编著. —北京:中国电力出版社,2011.4
ISBN 978-7-5123-1598-3

I. ①发… II. ①高… III. ①发电机-继电保护
②变压器-继电保护 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 065178 号

中国电力出版社出版、发行
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)
汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

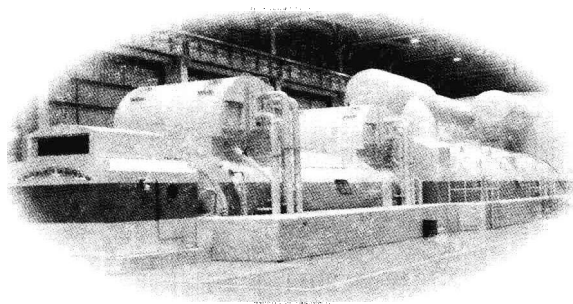
*

2011 年 7 月第一版 2011 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17 印张 383 千字
印数 0001—3000 册 定价 40.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前言



首先说明,为了全书文字符号基本统一,在本书编写过程中对不同企业参考资料的文字符号进行了必要统一,并避免文字符号与汉语拼音符号的混用。另外,为了读者使用方便,除特殊处以大写字母表示设备或电压等级一次值外,一般在公式表达中尽量采用小写字母注脚。有关文字符号可见各章节的具体文字符号说明或参见附录 D 文字符号说明。

本书是根据近几年参加《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285—2006)和《电力工程电气设计手册》修编工作及在工程中应用各种保护和继电保护整定计算积累的资料,整理编写的,可基本满足从事发电厂、变电站主设备保护的设计、制造、调试、运行维护的工程技术人员实际工作的需要。在写作中力争做到概念清晰,使读者能较快掌握保护设计的配置原则,方便地应用书中的计算步骤和保护整定计算公式,进行保护设计及整定计算,从而提高工效,减少差错,尤其对不很熟悉保护设计及整定计算的人员,能起到一定指导作用。本书与类似书籍的不同点(特点)在于注重基本概念和结论,偏重于工程实用,避免烦琐分析而不接触实际问题。

本书主要讲述发电机、变压器、发电机—变压器组、高压厂用变压器、启动/备用变压器保护的构成原理及整定计算,附录中给出了一些保护设计和整定计算需要的资料,可供从事电气二次及继电保护的设计人员,电厂继电保护整定计算及有关运行维护人员,生产制造、调试和现场服务人员,大专院校电力系统自动化及继电保护专业的师生参考。

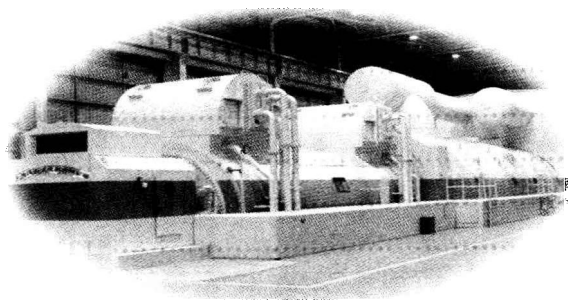
本书主编高有权(教授级高工)在西北电力设计院从事电力工程设计工作 30 多年,从 20 世纪 60~70 年代就结合西北 330kV 刘天关输变电工程在南京参加了晶体管保护的开发研究工作,经历了从机电型到整流型、晶体管型、集成电路型以至微机型各个时期继电保护技术的不断进步,并一直参与其中,不但参加过传统型发电厂元件保护的典型设计,而且也参与了发电厂和变电站微机保护的典型设计工作,还参加了《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB/T 14285—2006)的条文起草和修编工作,在工作中得到了电力系统的许多继电保护专家、大学老师和电力设计院同行,以及国电南京自动化股份有限公司、南京南瑞继保电气有限公司、许继电气股份有限公司、北京四方继保自动化股份有限公司等单位的许多专家朋友的指导和帮助,且提供了大量的技术资料,特在此表示深深的谢意。

本书第一章及第五、六章由高有权编写并任全书主编，第二章由高华和高有权编写，第三章由魏燕和高有权编写，第四章由高艳和高有权编写。

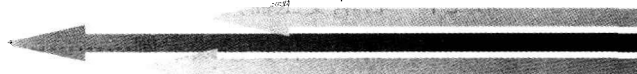
由于作者水平有限，不妥或错误在所难免，请专家和读者不吝指正。

编著者

2011年2月于西安



目 录



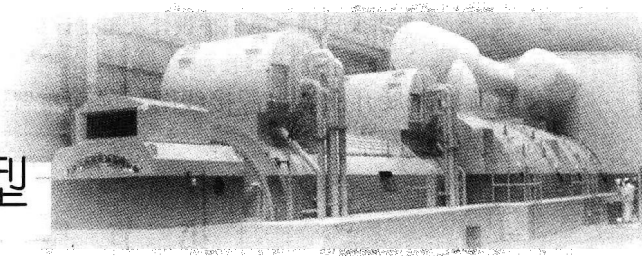
前言

第一章 保护设计原则及微机型保护基本构成原理	1
第一节 保护设计原则及内容.....	1
第二节 微机保护简述.....	2
第三节 保护选型	19
第四节 保护出口及对外接口	22
第五节 保护电源配置原则	23
第二章 发电机保护	24
第一节 发电机故障和不正常运行方式及保护装设原则	24
第二节 定子绕组回路相间短路主保护	30
第三节 定子绕组匝间短路保护	42
第四节 相间短路后备保护	47
第五节 发电机对称及不对称过负荷保护	51
第六节 定子绕组单相接地保护	59
第七节 发电机励磁回路继电保护	64
第八节 发电机低励失磁保护	71
第九节 发电机失步保护	78
第十节 发电机过电压和过激磁保护	84
第十一节 发电机逆功率保护	88
第十二节 发电机频率异常保护	89
第十三节 发电机其他几种异常运行保护	90
第三章 电力变压器保护	96
第一节 变压器故障和不正常运行方式及保护装设原则	96
第二节 变压器电流速断保护.....	106
第三节 变压器纵联差动保护.....	107
第四节 变压器瓦斯保护和其他非电量保护.....	116
第五节 变压器相间短路后备保护.....	118

第六节	变压器接地故障后备保护	125
第七节	变压器过负荷保护	128
第八节	变压器过激磁保护	130
第九节	自耦变压器几种特殊保护	132
第十节	变压器保护接线示例	134
第四章	发电机—变压器组保护	139
第一节	发电机—变压器组接线特点及继电保护概述	139
第二节	发电机—变压器组单元接线继电保护配置	145
第三节	发电机—变压器组公共保护	151
第四节	发电机—变压器组保护及其接线示例	154
第五章	厂用电源保护及其整定计算	178
第一节	高压厂用工作及启动/备用变压器保护	178
第二节	厂用工作及备用电抗器保护	188
第三节	低压厂用工作及备用变压器保护	190
第四节	厂用电源保护整定计算	194
第六章	保护整定计算实例	203
第一节	发电机—变压器组保护整定计算实例	203
第二节	联络变压器常用保护整定计算实例	237
第三节	启动/备用变压器和低压厂用工作变压器保护整定计算实例	246
附录 A	短路保护的最小灵敏系数	256
附录 B	短路电流计算常用公式、数据	257
附录 C	Yd11 接线变压器正、负序电压在三角形侧的相量转动示意图	261
附录 D	文字符号说明	262
参考文献		264

第一章

保护设计原则及微机型 保护基本构成原理



第一节 保护设计原则及内容

随着电力系统容量的增大，大机组不断增多，在电力主设备上要求装设优越完善的或者双重化的继电保护装置，这不仅对电力系统的可靠运行有着重大的意义，而且可保护重要而昂贵的主设备减少在各种故障和异常运行中所造成的设备损坏，还有着显著的经济效益。因此，在电力主设备的保护设计中应遵守的原则是符合现行的《继电保护和安全自动装置技术规程》(GB 14285—2006)，对具体的工程设计项目，则要求保护在配置、原理接线和设备选型等方面，根据电气主接线和被保护设备的一次接线及主设备的运行工况和结构特点，达到可靠性、灵敏性、速动性和选择性等四性要求。当灵敏性与选择性产生矛盾时，首先要保证灵敏性，没有灵敏性即失去了装设保护的意义；当快速性与选择性产生矛盾时，宜优先满足选择性，但特殊情况下也可以考虑快速无选择性动作并采取补救措施。

保护设计一般有以下内容：

(1) 配合电气一次专业做好电流互感器 TA 和电压互感器 TV 的配置，并根据不同保护的要求进行选型和容量校验。

(2) 在初步设计或施工图前期做好保护配置图，保护配置图要求安装的保护种类要齐全，所接 TA、TV 组别接线具体，变比准确、清楚，时间段及出口要求表示明确无误并符合现行规程规范。

(3) 在保护招标前应做好标书，国际招标应符合国际惯例，条款内容应齐全，适当写入保护性条款，特别注意供货进度、资料提供、相互配合及设计联络会、售后服务等内容。

(4) 技术协议及订货合同。技术协议通常作为订货合同的附件，一定要准确无误，如对保护的设置及动作指向、出口及信号要求，跳合闸回路对保护的触点容量及自保持电流电压的要求等都应明确无误。

(5) 保护的订货图不仅要求有保护配置图，而且对复杂的保护最好有必要的逻辑图，以保证整套保护动作的正确性。

(6) 交、直流回路展开图是施工订货设计的主要内容，关系到 TA、TV 接线的正确与否，关系到保护正确逻辑的实现，除装置内部的软硬件主要由厂家保证外，用户设计必须认真配合设计好动作出口，信号直流接线回路图以及串行通信口、故障录波等回路，应保证设计意图的准确实现。出口回路可以接线图及矩阵出口的方式表示。

(7) 保护设备选型整定计算。所选保护设备的整定功能必须满足现场运行的实际需要。

(8) 订货图一般应包括订货说明、保护配置接线图、小母线配置图、必要的逻辑图、

交直流回路展开图、电源接线图、屏面布置图、端子排图，以及与成套订货密切相关的供货方提供的图纸。

第二节 微机保护简述

过去广泛应用的继电保护装置有电磁型、整流型、晶体管型、集成电路型等几种。电磁型继电器原理接线简单、维护方便，容易掌握，且有丰富的运行经验，所以在小容量机组和小型变电站和厂用电源设备及电动机等的保护中仍有采用。

随着数字技术的飞速发展和信息化要求的提高，上述保护装置已显得力不从心，而渐渐被微机保护所代替。由于数字计算技术的进步也促进了微机保护新原理、新装置的不断出现，把继电保护技术带到了一个全新的境界。尤其是它与数字测量和控制技术、现代通信技术及远动技术的进一步结合，可以实现一些新原理的保护，并可以进一步全面实现发电厂和变电站的综合自动化。

从最近几年继电保护技术发展和使用的情况看，整流型保护，晶体管型保护和静态集成电路保护，已退居次要地位。今后若干年内大中型电厂和变电所将主要采用微机保护。目前原理较为复杂的微机保护多采用 CPU 芯片，还有些采用了具有快速计算功能的 DSP 芯片，也有的把工控机配套组成微机保护装置。对于中低压配电系统的微机保护，由于其原理一般并不很复杂，故多为由 16 位或 32 位 CPU 单片机构成的微机保护。在一定的意义上说简单才是高科技，性能价格比低也应该是追求目标之一。另外评价保护装置的优越，不应只看所用芯片的位数，而作为保护设计者更应注重保护配置的合理性及其技术性能，而且后者应该是最主要的。

由于机电型、整流型、晶体管型、集成电路型保护在大中型发电厂和变电站已逐步被微机保护所代替，从实用出发，本章不再介绍这几种保护的构成原理，而仅介绍微机保护的基本构成原理，为微机保护的应用建立一个最基本的初步概念。

一、微机保护概述

微机型保护是由数字电路实现的新型保护装置，通常在发电厂和变电站应用中常用的有各种纵差、横差、匝间、定子接地、转子接地、低励失磁、失步、逆功率、低频、过激磁、过电压、定时限过流（过负荷）、反时限过流（过负荷）、定时限负序过流（过负荷）、反时限负序过流（过负荷）、定时限励磁回路过流（过负荷）、反时限励磁回路过流（过负荷）、轴电流、轴电压、低压过流（可带记忆）、复合电压过流（可带记忆）、厂用变压器分支过流、变压器零序过流、变压器零序过电压、负序功率方向、零序功率方向、相间功率方向、断路器失灵、断路器非全相、机组误上电等微机保护，各种非电量微机保护接口器件。还可配打印机及管理机，并提供对外通信接口。微机保护品种可满足各类大小电厂汽轮发电机、水轮发电机、燃气轮机发电机、风力发电机、主变压器、高低压厂用变压器，以及变电站主设备保护的需要。

保护装置一般设有运行方式选择开关或按钮，当运行方式选择到“调试”状态时，保护装置即退出运行，调试人员可以使用键盘、显示器以及打印机等对保护装置进行各种调

试操作。整定值一般是存放在电可擦写的存储器中，仅需用键盘以十进制数键入新的定值，即可进行定值现场更新。装置应设有键盘按钮（有的在触摸屏操作），通过键盘命令可对保护进行全面检查。当运行方式选择到“运行”状态时，保护装置投入运行，对被保护设备进行故障检测，保护装置还应有在线检测功能，能自动检查出保护装置的硬件故障，并闭锁所有有关出口信号。在正常运行时，要求装置可进行自检，并设有可区别正常或故障的明确显示；通常通过“随时打印”按钮可根据需要在任意时刻打印运行参数，供运行监视。当被保护设备发生故障时，保护装置应能紧急中断判定故障，并发出相应故障信号，同时启动打印机自动打印各种有关信息，如故障类别或性质、动作的保护、故障时刻、故障前后一段时间内的有关数据或波形等，供故障分析或存档等。

二、保护基本构成原理

（一）硬件构成简介

微机保护装置硬件系统大致如图 1-1 所示，其输入量是根据所装设保护的项目、与所

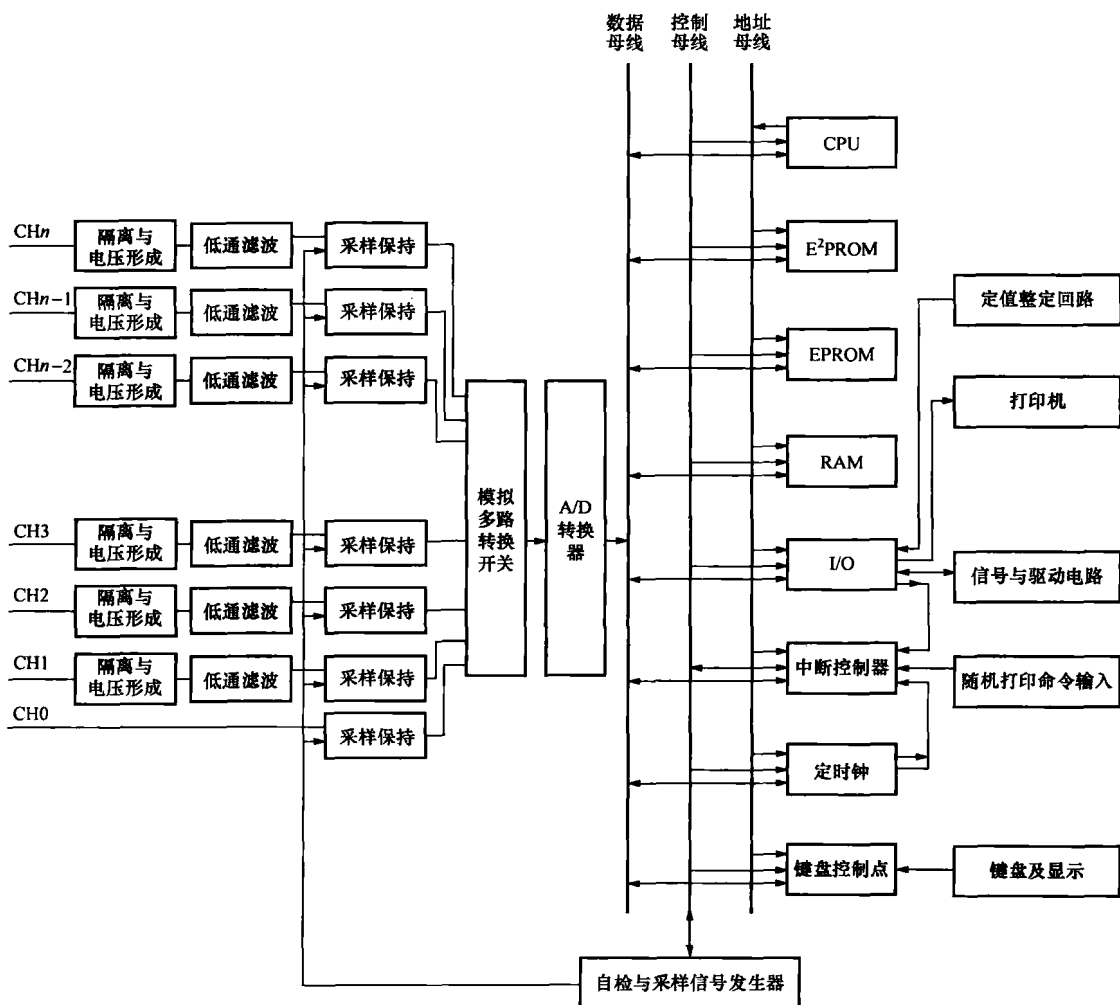


图 1-1 微机保护装置硬件系统框图

采用的保护原理和算法决定的。不同的保护对输入量的要求不同。如电动机差动保护要求输入机端和中性点侧电流互感器的二次电流 i_{Ta} 、 i_{Tb} 、 i_{Tc} 和 i_{Na} 、 i_{Nb} 、 i_{Nc} 计 6 个电流量。当所采用的保护原理要用到电压量和开关量时, 还需引入所需的电压量和开关量, 另外还有标准直流电压信号 u_{sc} 等。通道输入均由中间隔离变流器或中间隔离变压器形成所需要的适当大小的电压量, 通常要求正常额定情况下为 5V 左右, 但要兼顾到故障情况下保护的精度要求和装置元器件的承载能力, 即不会被损坏。模拟量通常再经过低通滤波器送到采样保持器进行保持。分时转换同时采样的采样保持信号均由采样发生电路发出的采样脉冲控制, 以保证微机分时读到的数据是同一时刻的数值。其采样保持的信号通过模拟多路转换开关逐步分别送到模数转换器进行模数转换, 转换后的数据由缓冲锁存电路保存, 以备微机读入。多路转换开关、模/数 (A/D) 转换器均由计算机经地址总线和控制总线进行选址和控制, 将读入模数变换后的数据进行计算和判断, 并将有关数据及故障处理信号和命令送给相应的外设驱动电路控制执行跳闸、重合或切换、减载等相关的命令或发出报警信号。微机保护配有小型的键盘、显示器及打印机用于实现人机对话, 以便对相关微机保护进行调试、整定和监视检查等。为便于在运行中需了解被保护设备的运行情况时, 能随时打印出被保护设备的有关运行参数, 微机保护装置应设有随即打印命令输入按键。

微机中央处理器 CPU 常采用 8 位、16 位或 32 位以至 64 位的芯片。为降低造价, 往往另外设有紫外线可擦除电可编程的只读存贮器 EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) 芯片存放程序及其他数据和参数。常用电可擦除电可编写存贮器 E²PROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) 存放保护定值, 可根据需要通过键盘予以更改。随机存贮器 RAM (Random Access Memory) 用于存放采样数据中间计算结果或一段时间内的某些计算结果, 且记数单元及标志也用 RAM 来存储。

采样信号发生电路根据保护原理及算法需要常采用 600Hz 或 1200Hz 的脉冲, 或其他适当频率的采样脉冲。此脉冲信号除用以控制采样保持器外, 还作为向 CPU 申请执行保护功能程序的中断请求脉冲信号。

可编程中断控制器 (可为单独芯片), 用于管理各中断源所产生的中断请求, 其主要任务是确定哪一个中断请求的优先权最高, 然后向 CPU 发出中断申请。

可编程输入/输出 (I/O) 接口用来管理外围设备与 CPU 之间数据和信号的传输。

微机保护的自检电路用以检查微机的工作是否正常, 不正常时即闭锁保护并发出报警信号。

1. CPU 主系统

(1) CPU 主系统主要包括微处理器 MPU、存放程序的只读存贮器 (常用光可擦电写的 EPROM) 及存放数据的随即存贮器 RAM 等, 往往还包括实时时钟, 并行输入输出电路或串行通信接口等, 具有键盘管理、中断管理、定值管理等功能。CPU 按步骤执行存放在 EPROM 中的程序, 对数据进行处理, 可完成不同保护要求的继电保护功能。关于 CPU 的基本原理篇幅所限在此不作详述。这里简要介绍微机保护装置中 CPU 主系统的选择原则。

(2) 选择 CPU, 首先要考虑的是 CPU 能否在两个相邻采样间隔时间内完成它必须完



成的工作，即 CPU 的速度问题。衡量 CPU 速度的一个重要指标就是字长。字长越长，一次所能处理的数据位数越多，处理速度越快。另外，CPU 的速度还与其所采用的主工作频率有关，主频越高，CPU 速度越快。选择 CPU 时另一个需要注意的问题是，CPU 与微机保护装置内其他各子系统之间的协调配合，不能片面追求 CPU 字长和主频高。

CPU 主系统涉及以下几方面的问题：

(1) CPU 字长应与 A/D 转换器的位数相配合。如目前许多微机保护装置，出于精度上的考虑，采用 16 位 A/D 转换器，如采用 32 位或 64 位 CPU 即可一次读取数据，速度较快。

(2) 与微机保护装置算法上的配合。由于微机保护的算法一般都需要以相当数目的采样值为基础，过高地追求速度将会增加 CPU 处于等待状态的时间，而并不能缩短保护的动作时间。因此微机保护装置只要选用速度合适的 CPU 就可以了，不必选用速度很高的 CPU 系统。

(3) 微机保护装置采用专用的定时控制系统，它需要的内存容量有限，不需要很多的地址线位数。目前已使用在同一芯片上，集成了 A/D 转换器、定时器、接口等功能的高性能的芯片，以及 DSP 芯片等，更简化了装置，提高了保护的動作速度和可靠性。随着技术进步，根据保护的复杂程度和组态需要，可以采用多 CPU 单片机—数字信号处理 DSP (Digital Signal Processing) 硬件系统、可编程逻辑器件 (FPGA/CPLD)，使保护更具集成度高、高速度、高抗干扰能力、性能稳定、设计灵活、电路简化等特点。硬件平台要灵敏、可靠，尽可能减少误动和拒动，并具有很好的网络通信能力；能支持多种通信方式，如现场总线方式、以太网通信等，方便实现与厂站监控系统交换信息，更加友好的人机界面，如汉化、图形化显示，甚至采用彩屏液晶等；能根据要求提供很好的辅助功能，如 GPS (Global Positioning System) 校时、故障录波、打印等。此外，硬件模块化设计，核心模块如采集计算模块与外设模块宜相对独立。

2. 模拟量输入及数字转换系统

模拟量输入系统也称数据采集系统 (DAS)，由电压形成、模拟滤波、采样保持、多路转换、模/数转换、数据总线组成，如图 1-2 所示。

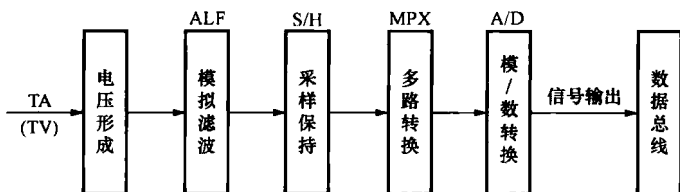


图 1-2 模拟量输入系统示意图

(1) 电压形成回路。通常把电力设备电流互感器 TA (或电压互感器 TV) 送来的电信号，经过保护装置内部的中间电压互感器、小型电流互感器或辅助电流互感器 (电流信号通过其二次接适当电阻变换为电压信号) 转变为符合微机保护要求的电压信号，必要时需采取限压保护措施。

(2) 模拟滤波电路。通常采用较为简单的 RC 滤波回路，使用模拟滤波可防止频率混叠。采样频率用的太高，将对硬件速度提出更多的要求。微机保护常常是反应工频量或二

次谐波分量、三次谐波分量等,因此通常采样频率并不需要很高(除某些特殊原理的保护,如间断角原理差动保护要求采样频率较高)。在这种情况下可以在采样前用模拟低频滤波器(ACF)将高频分量滤除,降低采样频率 f_s ,以消除频率混叠。从而降低对硬件的要求。模拟滤波只要求能滤除 $f_s/2$ 以上的分量即可。低于 $f_s/2$ 的暂态频率分量,可通过数字滤波器消除。

(3) 采样保持电路。

1) 采样方式:输入保护装置的是连续时间信号量,而微机保护装置所需的是有代表性的离散时间信号。理论和实践证明,采样频率必须大于被采样信号(带限信号)包含有用频率中最高频率的2倍,即 $f_s > 2f_{\max}$,才能保证不发生频率混叠现象,保证采样得到的信号真实可用。

采样方式常用同时采样,有时用顺序采样。同时采样有一种是同时采样,同时A/D转换(每个通道都设A/D转换器),另一种是最为常用的是利用多路开关对各个通道同时采样,依次进行A/D转换,如图1-3所示。

顺序采样如图1-4所示,它只设一个公用的采样保持器,电路更为简化,较为经济,但是破坏了多路输入信号离散化的同时性,会给各通道采样值造成时间差,因此适用于采样速度高及A/D转换速度快,且算法对同时性要求不高的保护,如某些低压配电系统的小电流接地进线保护装置等。

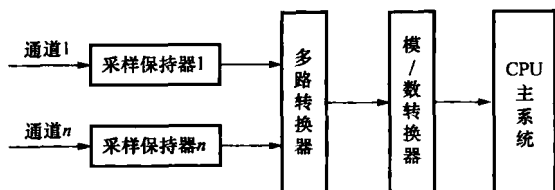


图 1-3 同时采样,依次 A/D 转换

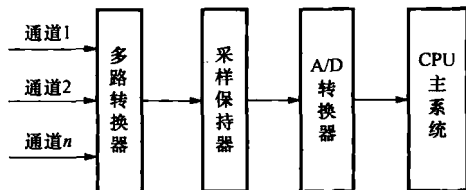


图 1-4 顺序采样

采样按通道可分为单通道采样和多通道采样,按采样频率和被采样频率的关系可分为异步采样和同步采样。 $f_s/f_1=C$ 的为同步采样,微机保护通常用多通道同步采样。

2) 采样保持电路:采样保持是把采样时刻得到的模拟量的瞬时值完整地记录下来,并按需要准确地保持一段时间。通过采样保持可将连续时间信号变成离散时间信号序列。采样保持电路每隔一个采样周期 T_s 就测量一次模拟输入信号在该时刻的瞬时值,然后将该瞬时值存放在保持电路里以待A/D转换器使用。

采样保持电路的型式很多,其工作原理可用图1-5所示。它由一个受逻辑输入控制的

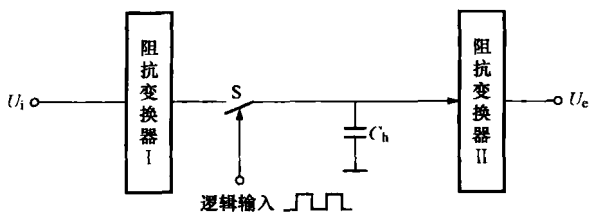


图 1-5 采样保持电路基本工作原理

模拟电子开关S、电容器 C_h 和两个阻抗变换器组成。阻抗变换器I为低输入阻抗、高输出阻抗,低输入阻抗的作用是尽量缩短采样时间 τ ,高输出阻抗的作用是防止漏电以达到保持时间。阻抗变换器II为高输入阻抗、低

输出阻抗，低输出阻抗可增强带负荷的能力。当逻辑输入为高电平时，开关S闭合，电路处于采样状态， C_h 被迅速充电或放电到被采样信号在该时刻的电压值；当逻辑输入为低电平时，S断开，电容 C_h 上保持住 S 断开瞬间的电压，电路处于保持状态。

显然，在采样过程中，人们希望开关S闭合时间越短越好。因为S闭合的时间越短，电容器 C_h 上的电压值就越接近被采样时刻信号的瞬时值。但实际上 C_h 的充电是需要时间的，因此开关S必须有一个足够的闭合时间（称为采样脉冲宽度），这段时间也可称为采样时间 τ 。在这种情况下，采样保持电路的输出是一串周期为 T_s 而宽度为 τ 的脉冲，该脉冲的幅度重现了在时间 τ 内信号的幅值，如图 1-6 所示。

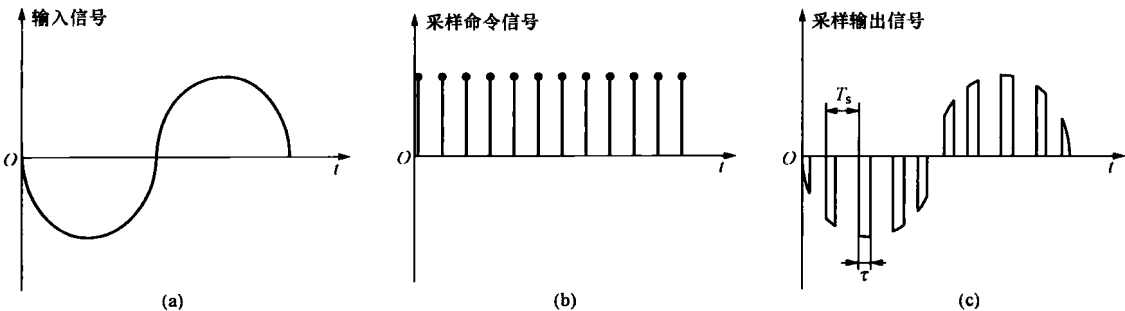
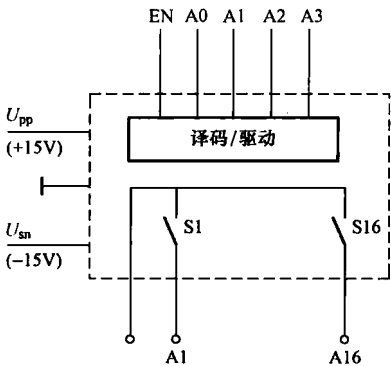


图 1-6 采样保持过程示意图
(a) 输入信号；(b) 采样命令信号；(c) 输出信号

(4) 模拟量多路转换开关（MPX）。为了获得合理的性能价格比，通常不是每个模拟量输入通道都设一个 A/D 转换器，而是公用一个 A/D 转换器，即多通道共享 A/D 转换器，中间经多路开关（MPX）切换轮流由公用的 A/D 转换器转换成数字量输入给微机。

模拟量多路转换开关包括选择接通路数的二进制译码电路和由它控制的各路电子开关，它们被集成在一个集成电路芯片中。

图 1-7 示出了微机保护装置中常用的 AD7506 内部电路组成框图，芯片通过对 A0~A3 共 4 回路由选择线赋以不同的二进制码，选通 S1~S16 共 16 路模拟电子开关中的某一路，从而将该路接通，使之连至公共的输出端以供给 A/D 转换器。EN 端为片选。当超过 16 路以上时可以增加片数，实现更多路采样的目的。



1) A/D 转换器的主要性能指标是：①输入极性，即仅允许输入单极性信号，还是可以输入双极性信号。②量程，即所能转换的电压范围，如 5、10、±5、±10V。③分辨率，是衡量对输入量的微小变化反应灵敏程度的指标，通常用数字量的位数表示，如 8 位、10 位、12 位、16 位等。分辨率为 n 位，表示它可以对满量程的 $1/2^n$ 的增量作出反应。④精度，有绝对精度与相对精度两种表示方法。绝对精度是指对应于某个数字量的理论模拟输入值与实际模拟输入值之差。将理论模拟输入值与实际模拟输

入值之差用满量程的百分值表示,则称相对精度,如 $\pm 0.05\%$ 。⑤转换时间和转换率。完成一次 A/D 转换所需的时间称为转换时间。而转换率是转换时间的倒数。如转换时间是 50ns,则转换率为 20MHz。

2) A/D 转换器简称 ADC。ADC 的一般工作原理是由于微机只能对数字量进行运算,所以模拟电量如电压、电流等,经采样电路变成离散的时间序列后,还需采用 A/D 转换器将其变为数字量。

A/D 转换器可以认为是一种编码电路,它将输入的模拟量 U_A 相对于模拟参考量 U_R 经一编码电路转换成数字量输出,即

$$D = U_A / U_R \quad (1-1)$$

假定式 (1-1) 中的数字量 D 是小于 1 的数,则可用二进制数表示为

$$D = B_1 2^{-1} + B_2 2^{-2} + \cdots + B_n 2^{-n} \quad (1-2)$$

于是

$$U_A \approx U_R (B_1 2^{-1} + B_2 2^{-2} + \cdots + B_n 2^{-n}) \quad (1-3)$$

式中, $B_1 \sim B_n$ 均为二进制数,其值只能为“1”或“0”。

式 (1-3) 即为 A/D 转换器中模拟信号量化的表示式,从此可看出,编码电路是有限的,即 n 位。而实际的模拟量 U_A / U_R 却可能是任意值。因而对连续的模拟量用有限长位数的二进制数表示时,不可避免的要舍去比最低有效位 (LSB) 更小的数,从而引入一定的误差。显然这种量化误差的绝对值最大不会超过与 LSB 相当的值。因而 A/D 转换器编码的位数越多即数值分的越细,所引入的量化误差越小,分辨率越高。

3) D/A 转换器简称 DAC。因为 A/D 转换器一般要用到 D/A 转换器,所以这里先介绍一下 D/A 转换器。

D/A 转换器的作用是将数字量 D 经一解码电路 (T 形电阻解码网络下面介绍,) 变成模拟电压输出。数字量是用代码按位的权组合起来表示的,每一位代码都有一定的数,即代表一具体数值。因此为了将数字量转换为模拟量,必须将每一位代码按其权的值转换成相应的模拟量,然后将代表各位的模拟量相加,即得与被转换数字量相当的模拟量,亦即完成了数模转换。图 1-8 为按上述原理构成的一个 4 位 D/A 转换器的原理图及等效电路。图中电子开关 $S_0 \sim S_3$ 分别受输入四位数字量 $B_4 \sim B_1$ 控制,在某一位为“0”时,其对应开关倒向右侧,即接地;而为“1”时,开关倒向左侧,即接至运算放大器 A 的反相输入端,流向运算放大器反相端的总电流 I_2 反映了四位输入数字量的大小,它经过带负反馈电阻 R_F 的运算放大器,变成电压输出。运算放大器 A 的反相输入端的电位实际上也是地电位,即放大器的虚地,因此不论图中各开关倒向哪一边,对图中电阻网络的电流分配是没有影响的,这种电阻网络有一个特点,从图中 $-U_R$ 端、a、b、c 四点分别向右看网络的等效电阻都是 R 。等效电路图 1-8 (b) 中已做了分析。因而 a 点电位必定是 $\frac{1}{2}U_R$, b 点电位则为 $\frac{1}{4}U_R$, c 点电位则为 $\frac{1}{8}U_R$ 。相应的各电流为: $I_1 = U_R / 2R$, $I_2 = \frac{1}{2}I_1$, $I_3 = \frac{1}{4}I_1$, $I_4 = \frac{1}{8}I_1$, 各电流之间的相对关系正是二进制数各位的权的关系,因而图 1-8 中的总电流

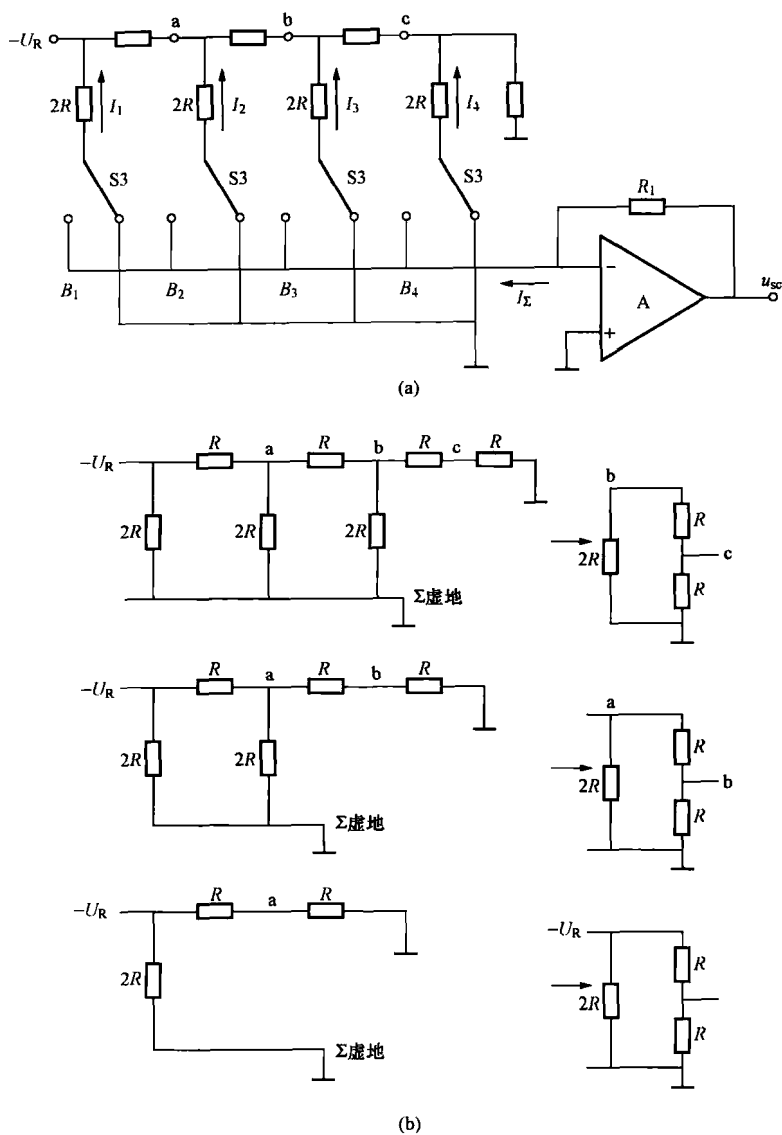


图 1-8 4 位 D/A 转换器原理图及等效电路

(a) 原理图; (b) 等效电路图

I_{Σ} 必然正比于数字量 D 。式 (1-2) 已给出

$$D = B_1 2^{-1} + B_2 2^{-2} + \cdots + B_n 2^{-n}$$

由图 1-8 得

$$\begin{aligned} I_{\Sigma} &= B_1 I_1 + B_2 I_2 + B_3 I_3 + B_4 I_4 \\ &= \frac{U_R}{R} (B_1 2^{-1} + B_2 2^{-2} + B_3 2^{-3} + B_4 2^{-4}) = \frac{U_R}{R} D \end{aligned}$$

而输出电压为

$$u_{sc} = I_{\Sigma} R_F = \frac{U_R R_F}{R} D \quad (1-4)$$

可见输出模拟电压比例于输入数字量 D ，比例常数为 $\frac{U_R R_F}{R}$ ，其中 R_F 、 R 集成电阻可以做得很精确，而 D/A 转换器的精度主要取决于参考电压或称基准电压 U_R 的精度。在很多芯片的内部设有一个温度补偿的齐纳二极管稳压电路，将外加给芯片的电源电压经过进一步稳压后提供 U_R ，因而精度很高。微机选线系统用 D/A 转换器是为了实现 A/D 转换而在实际应用中都选用包含有 D/A 转换部分的 A/D 转换芯片。

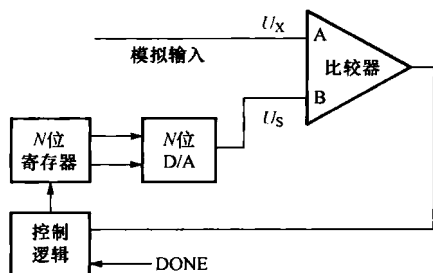


图 1-9 逐次逼近式 A/D 转换器逻辑框图

4) 逐次逼近式 A/D 转换器。其逻辑框图如图 1-9 所示，其中控制逻辑能实现类似于对分搜索的控制，它先使最高位（二进制） $D_{N-1} = 1$ ，经 D/A 转换后得到一个整个量程一半的模拟电压 U_s ，与输入电压 U_x 相比较若 $U_x > U_s$ 则保留这一位，若 $U_x < U_s$ 则使这一位清零。然后使下一位 $D_{N-2} = 1$ ，加上上一次的结果一起经 D/A

转换后与 U_x 相比较……，重复这样的过程直至使最低位 $D_0 = 1$ ，加上前面各位数的结果，再与 U_x 相比较，由 $U_x > U_s$ 还是 $U_x < U_s$ 来决定是否保留这一位（ D_0 ）。这样经过 N 次比较后， N 位寄存电路的状态即为转换后的数据。由此可见，这是一种高速的 A/D 转换电路，因而也是在与计算机接口时应用得最广、最普遍的一种电路。从逻辑框图分析中可以看出逐次逼近法寄予每个二进制位加权以后进行试算的，即从最高有效位（MSB）到最低有效位（LSB）。这种方法只要极少几步试算就能得到该未知数，因此人们将假定比较器对于指明“大于”或“小于”情况仍然是适用的。

用二进制加权的方法来完成各次测试，根据每次加权后的总值与未知量的比较情况决定是否把二进制权加到总数上。表 1-1 给出了由 8 位转换器把一个十进制数 115 转换成对应的二进制数，由于在逐次逼近法中应用了二进制位的权，因此表 1-1 提供的资料很容易把十进制数 115 转换成一个正确的二进制数，其方法是：把权加入总和的那一位的位置置于“1”，而把权不加入总和的那一位的位置置“0”。

十进制数 115 被转换成二进制数为 01110011。

逐次逼近法把 115 转换成相应的二进制数只需要做 8 次，因此对于一个 12 位的 A/D 转换器，使用逐次逼近法技术仅需要 12 次就能得到 0~4096 之间的任何一个整数值。

在逐次逼近法转换中，利用一个 D/A 转换器，为在每次加权时提供一个试验电压，为提高速度，D/A 转换器一般是由硬件完成的。

显而易见，这种转换器的工作原理原则上只适用于单极性输入电压，而交流电压、电流均是双极性的。为了实现对双极性模拟量的模/数变换，需要设置一个直流偏移量，其值为最大允许输入量的一半。将此直流偏移量同交变的输入量相加变成单极性模拟量后再接到比较器。但这种接法允许的最大电压输入值将比单极性时缩小一半，而且这种接法中 A/D 转换器的输出必须减去所加的偏移分量才能还原成真实的结果。这可由软件实现，也可由 A/D 转换器的最高输出位接反相器来实现。