



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程及其自动化专业规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

微型机继电保护基础

(第四版)

杨奇逊 黄少锋 编著

研究型



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013031775

TM77

06-4



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程及其自动化专业规划教材



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

微型机继电保护基础

(第四版)

编著 杨奇逊 黄少锋

主审 陶惠良 贺家李



TM 77
06-4



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1636557

978713031372

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材，普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系统地讲述了微机保护的基础知识，重点介绍了如何用微机保护来实现继电保护功能的各种方法。全书共分五章，包括微机保护的硬件原理、数字滤波器、微机保护的算法、提高微机保护可靠性的措施、微机保护程序流程。

本书主要作为高等院校电气工程及其自动化等相关专业的本科教材，也可作为高职高专和函授教材，以及工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

微型机继电保护基础/杨奇逊，黄少锋编著. —4 版. —北京：中国电力出版社，2012.11

普通高等教育“十二五”规划教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-3748-0

I. ①微… II. ①杨…②黄… III. ①微型计算机—继电保护装置—高等学校—教材 IV. ①TM774

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 275742 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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1987 年 10 月第一版

2013 年 3 月第四版 2013 年 3 月北京第二十次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 254 千字

定价 20.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,普通高等教育“十一五”国家级规划教材,并获得北京高等教育精品教材的称号。

本书在前三版的基础上,做了相应的修订,力图反映最新的技术成果及发展动向。虽然微机保护在我国已全面推广应用,但为了适应目前的教材体系和教学课时要求,本书的定位同第一版一样,仍为微机保护的基础知识,并不涉及种类较多的具体保护方案,重点是介绍如何用微型机来实现继电保护功能的各种基本方法,包括微机保护的硬件原理、数字滤波器、微机保护的算法、提高微机保护可靠性的措施和微机保护程序流程等,并假定读者已通过其他教材掌握了各种继电保护的原理和计算机方面的知识。

本书的基本内容也适用于电力系统测量、控制等方面的应用与研究。

本版修订工作主要由黄少锋完成,杨奇逊在确定全书的章节安排和选材方面起了重要的作用,并负责全书的最后修改和定稿。

西安交通大学陶惠良教授、天津大学贺家李教授审阅了全稿,并提出了宝贵的意见和建议,谨此致谢。

由于作者水平有限,书中难免有不当或错误之处,恳请读者批评指正。

作 者

2012年9月

于华北电力大学

目 录

前言

绪论	1
第1章 微机保护的硬件原理	4
1-1 概述	4
1-2 数据采集系统(模拟量输入系统)	5
1-3 开关量输入及输出回路	30
1-4 DSP技术的应用	35
1-5 网络化硬件电路	38
1-6 硬件技术的展望	43
第2章 数字滤波器	45
2-1 概述	45
2-2 连续时间系统的频率特性和冲激响应	47
2-3 离散时间信号的频谱	56
2-4 Z变换	59
2-5 离散时间系统的单位冲激响应和频率特性	59
2-6 非递归型数字滤波器	61
2-7 递归型数字滤波器	66
2-8 零、极点法设计数字滤波器	68
2-9 数字滤波器型式的选择	72
第3章 微机保护的算法	74
3-1 概述	74
3-2 假定输入为正弦量的算法	75
3-3 突变量电流算法	80
3-4 选相方法	83
3-5 傅里叶级数算法	89
3-6 R-L模型算法	95
3-7 故障分量阻抗继电器	102
3-8 阻抗继电器的补偿系数与按相补偿	107
3-9 减小过渡电阻影响的方法	113
3-10 最小二乘方算法	115
3-11 算法的动态特性	117

3-12 算法的选择	119
第4章 提高微机保护可靠性的措施	121
4-1 概述	121
4-2 干扰来源和窜入微机弱电系统的途径	121
4-3 抗干扰措施	124
4-4 自动检测	127
4-5 多重化和容错技术	130
4-6 电磁兼容	130
第5章 微机保护程序流程	137
5-1 概述	137
5-2 程序流程的基本结构	137
5-3 电流保护流程图	139
5-4 高压线路保护流程图	146
参考文献	161

绪 论

一、计算机在继电保护领域中的应用和发展概况

电子计算机特别是微型计算机(以下简称微型机)技术发展很快,其应用已广泛而深入地影响着科学技术、生产和生活等各个领域,使各行业的面貌发生了巨大的,往往是质的变化,继电保护技术也不例外。在继电保护技术领域,除了离线应用计算机作故障分析和继电保护装置的整定计算、动作行为分析外,20世纪60年代末期已提出用计算机构成保护装置的倡议,最早的两篇几乎同时发表的关于计算机保护的研究报告^[1,2],揭示了它的巨大潜力,引起了世界各国继电保护工作者的兴趣;在20世纪70年代,掀起了研究热潮,仅公开发表的有关论文就有200余篇^[3],在此期间提出了各种不同的算法原理和分析方法,但限于计算机硬件的制造水平以及价格过高,当时还不具备商业性地生产这类保护装置的条件。早期的研究工作以小型计算机为基础,出于经济上的考虑,曾试图用一台小型计算机来实现多个电气设备或整个变电站的保护功能。这种想法使可靠性难以得到保证,因为一旦当该台计算机出现故障,所有的被保护设备都将失去保护;同时,按照当时计算机的接口条件和内部资源来说,也无法实现这种设想。到了20世纪70年代末期,出现了一批功能足够强的微型机,价格也大幅度降低,因而无论在技术上还是经济上,已具备用一台微型机来完成一个电气设备保护功能的条件。甚至为了增加可靠性,还可以设置多重化的硬件,用几台微型机互为备用构成一个电气设备的保护装置,从而大大提高了可靠性。美国电气和电子工程师学会(IEEE)的教育委员会在1979年曾组织过一次世界性的计算机保护研究班(其讲义有中译本^[4])。这个研究班之后,世界各大继电器制造商都先后推出了各种定型的商业性微机保护装置产品。由于微机保护装置具有一系列独特的优点,这些产品问世后很快受到用户的欢迎。

微机保护是指将微型机、微控制器等器件作为核心部件构成的继电保护。国内在微机保护方面的研究工作起步较晚,但进展却很快。1984年国内第一套微机距离保护样机在河北马头电厂经过试运行后,通过了科研鉴定^[5]。1986年,全国第一台微机高压线路保护装置研制成功,并在辽宁省辽阳供电局投入试运行。为了检验微机高压线路保护在实际短路情况下的动作行为,河北省电力局还于1987年9月26日在邯郸供电局下属的店头变电站和王凤变电站之间进行了一次人工短路试验,试验表明:微机保护动作可靠、迅速,抗弧光电阻能力强,测距较为准确。随即,河北省电力局在石家庄、定州、保定之间的两条双回线上全部采用了微机保护。经过研究、制造人员和东北电业管理局、河北省电力局及继电保护领域许多技术人员的积极配合与共同努力下,微机保护很快就进入了推广和应用阶段,翻开了国内微机保护应用的新篇章。

经过10多年的研究、应用、推广与实践,现在新投入使用的高中压等级继电保护设备几乎均为微机保护产品,继电保护领域的研究部门和制造厂家已经完全转向进行微机保护的研究与制造,出现了百花齐放、百家争鸣的竞争与发展共存的良好局面。随后,在微机保护

和网络通信等技术结合后，变电站自动化系统、配网自动化系统也已经在全国电力系统中得到了广泛的应用，将保护、测量、控制、录波、监视、通信、调节、报表和防误操作等多种功能融为一体，进一步提高了电力系统的安全、稳定、可靠和经济运行，为电网高质量的电能传输和供电提供了更好的技术保障，也为变电站实现无人或少人值班创造了必要的条件。

预计未来几年内，微机保护将朝着高可靠性、简便性、开放性、通用性、灵活性和网络化、智能化、模块化、动作过程透明化方向发展，并可以方便地与电子式互感器、光学互感器实现连接，同时，跳出传统的“继电器”概念，充分利用计算机的计算速度、数据处理能力、通信能力和硬件集成度不断提高等各方面的优势，结合模糊理论、自适应原理、行波原理、小波技术和波形特征等，设计出性能更为优良和维护工作量更少的微机保护设备。另外，随着相量测量单元（PMU, Phasor Measurement Unit）和网络、通信技术的广泛应用，出现了研究广域信息保护（Wide Area Protection）的热潮，同时这些技术还有助于将闭环控制的多点、多种信息综合起来，应用于电力系统中。

二、微机继电保护装置特点

1. 维护调试方便

在微机保护应用之前，整流型或晶体管型继电保护装置的调试工作量很大，尤其是一些复杂的保护，如超高压线路的保护设备，调试一套保护常常需要一周，甚至更长的时间。究其原因，这类保护装置都是布线逻辑的，保护的每一种功能都由相应的硬件器件和连线来实现。为确认保护装置完好，就需要把所具备的各种功能都通过模拟试验来校核一遍。微机保护则不同，它的硬件是一台计算机，各种复杂的功能由相应的软件（程序）来实现。换言之，它是用一个只会做几种单调的、简单操作（如读数、写数及简单的运算）的硬件，配以软件，把许多简单操作组合来完成各种复杂功能的，因而只要用几个简单的操作就可以检验它的硬件是否完好，或者说如果微机硬件有故障，将会立即表现出来。如果硬件完好，对于已成熟的软件，只要程序和设计时一样（这很容易检查），就必然会达到设计的要求，不用逐台做各种模拟试验来检验每一种功能是否正确。实际上如果经检查，程序和设计时的完全一样，就相当于布线逻辑的保护装置的各种功能已被检查完毕。第四章将介绍微机保护装置具有很强的自诊断功能，对硬件各部分和程序（包括功能、逻辑等）不断地进行自动检测，一旦发现异常就会发出警报。通常只要给上电源后没有警报，就可确认装置是完好的。所以对微机保护装置可以说几乎不用调试，从而可大大减轻运行维护的工作量。

2. 可靠性高

计算机在程序指挥下，有极强的综合分析和判断能力，因而它可以实现常规保护很难办到的自动纠错，即自动地识别和排除干扰，防止由于干扰而造成误动作。另外，它有自诊断能力，能够自动检测出本身硬件的异常部分，配合多重化可以有效地防止拒动，因此可靠性很高。目前，国内设计与制造的微机保护均按照国际标准的电磁兼容试验（EMC, Electromagnetic Compatibility）来考核，进一步保证了装置的可靠性。

3. 易于获得附加功能

应用微型机后，如果配置一个打印机，或者其他显示设备，或通过网络连接到后台计算机监控系统，可以在电力系统发生故障后提供多种信息。例如，保护动作时间和各部分的动作顺序记录，故障类型和相别及故障前后电压和电流的波形记录等。对于线路保护，还可以提供故障点的位置（测距）。这将有助于运行部门对事故的分析 and 处理。

4. 灵活性大

由于微机保护的特性主要由软件决定（不同原理的保护可以采用通用的硬件），因此只要改变软件就可以改变保护的特性和功能，从而可灵活地适应电力系统运行方式的变化。

5. 保护性能得到很好改善

由于微型机的应用，使很多原有型式的继电保护中存在的技术问题，可找到新的解决办法。例如，对接地距离保护的允许过渡电阻的能力，距离保护如何区别振荡和短路，大型变压器差动保护如何识别励磁涌流和内部故障等问题，都已提出了许多新的原理和解决方法。可以说，只要找出正常与故障特征的区别方案，微机保护基本上都能予以实现。

第1章 微机保护的硬件原理

1-1 概 述

微机保护的硬件一般包括以下三大部分。

(1) 数据采集系统(或称模拟量输入系统)。数据采集系统包括电压形成、模拟滤波、采样保持(S/H)、多路转换(MPX)以及模数转换(A/D)等功能块,完成将模拟输入量准确地转换为微型机能够识别的数字量。

(2) 微型机主系统。微型机主系统包括微处理器(MPU)、只读存储器(ROM)或闪存单元(FLASH)、随机存取存储器(RAM)、定时器、并行接口以及串行接口等。微型机执行编制好的程序,对由数据采集系统输入至RAM区的原始数据进行分析、处理,完成各种继电保护的测量、逻辑和控制功能。

(3) 开关量(或数字量)输入/输出系统。开关量输入/输出系统由微型机的并行接口(PIA或PIO)、光电隔离器件及有触点的中间继电器等组成,以完成各种保护的出口跳闸、信号、外部触点输入、人机对话及通信等功能。

图1-1为一种典型的微机保护硬件结构示意图。

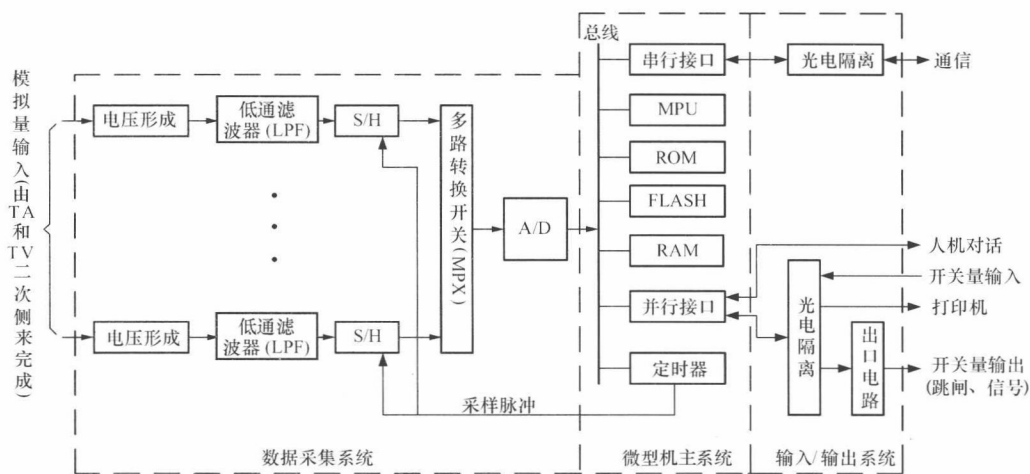


图1-1 典型的微机保护硬件结构示意图

目前,随着集成电路技术的不断发展,已有许多单一芯片将微处理器(MPU)、只读存储器(ROM)、随机存取存储器(RAM)、定时器、模数转换器(A/D)、并行接口(PIO)、闪存单元(FLASH)、数字信号处理单元(DSP, Digital Signal Processor)、通信接口等多种功能集成于一个芯片内,构成了功能齐全的单片微型机系统,为微机保护的硬件设计提供了更多的选择。其中,还出现了芯片对外连线没有任何数据总线、地址总线和控制总线的微型机,实现了“总线不出芯片”的设计,这种芯片的应用将有利于提高微机保护设备的可靠性和抗干扰性能。

在集成电路技术飞速发展、单一芯片功能越来越强的情况下,本书不对微型计算机、单片机、微控制器等几个概念进行界定,而统一称为微型机,或沿用CPU的简称。

由于介绍微型机方面的书籍很多,读者可自行参考,所以本书只分别介绍除微型机主系统以外的各子系统的电路构成原理及其设计原则。

1-2 数据采集系统(模拟量输入系统)

一、电压形成回路

微机保护模拟量的设置应以满足保护功能为基本准则,输入的模拟量与计算方法结合后,应能够反应被保护对象的所有故障特征。以高压线路保护和三绕组变压器差动保护为例,由于高压线路保护一般具备了全线速动保护(如高频保护或光纤电流纵联差动保护)、距离保护、零序保护和重合闸功能,所以模拟量一般设置为 I_a 、 I_b 、 I_c 、 $3I_0$ 、 U_a 、 U_b 、 U_c 、 U_x 共8个模拟量,其中 I_a 、 I_b 、 I_c 、 $3I_0$ 、 U_a 、 U_b 、 U_c 用于构成保护的功能, U_x 为断路器的另一侧电压,用于实现重合闸功能;对于三绕组变压器的差动保护,至少应该接入三侧的三相电流,共9个模拟量。

微机保护要从被保护的电力线路或设备的电流互感器、电压互感器或其他变换器上取得信息,但这些互感器的二次侧数值、输入范围对典型的微机电路却不适用,故需要降低和变换。在微机保护中,通常根据模数转换器输入范围的要求,将输入信号变换为 $\pm 5V$ 或 $\pm 10V$ 范围内的电压信号。因此,一般采用中间变换器来实现以上的变换。交流电压信号可以采用电压变换器;而将交流电流信号变换为成比例的电压信号,可以采用电抗变换器或电流变换器,且两者各有优缺点。

(1) 电抗变换器。电抗变换器具有阻止直流、放大高频分量的作用,因此当一次侧流过非正弦电流时,其二次侧电压波形将发生严重的畸变,这是不希望的。电抗变换器的优点是线性范围较大,铁芯不易饱和,有移相作用;另外,其抑制非周期分量的作用在某些应用中也可能成为优点。

(2) 电流变换器。电流变换器最大优点是,只要铁芯不饱和,则其二次侧电流及并联电阻上的二次侧电压的波形可基本保持与一次侧电流波形相同且同相,即它的传变可使原信息不失真。这点对微机保护是很重要的,因为只有在这种条件下作精确的运算或定量分析才是有意义的。至于移相、提取某一分量或抑制某些分量等,在微机保护中,根据需要可以容易地通过软件来实现。电流变换器的缺点是,在非周期分量的作用下容易饱和,线性度较差,动态范围也较小,这在设计和使用中应予以注意。

综合比较电抗变换器和电流变换器的优缺点后,在微机保护中,一般采用电流变换器将电流信号变换为电压信号,当然也有采用电抗变换器的。采用电流变换器时,连接方式如图1-2所示,其中 Z 为模拟低通滤波器及A/D输入端等回路构成的综合阻抗,在工频信号条件下,该综合阻抗的数值可达 $80k\Omega$ 以上; R_{LH} 为电流变换器二次侧的并联电阻,数值为几欧姆到十几欧姆,远远小于 Z 。因为 R_{LH} 与 Z 的数值差别很大,所以由图1-2可得

$$u_2 = R_{LH} i_2 = R_{LH} \frac{i_1}{n_{LH}} \quad (1-1)$$

于是,在设计时,相关参数应满足下列条件

$$R_{LH} \frac{i_{1\max}}{n_{LH}} \leq U_{\max} \quad (1-2)$$

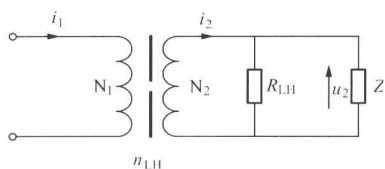


图 1-2 电流变换器的连接方式

式中 R_{LH} ——并联电阻；

n_{LH} ——电流变换器的变比；

$i_{1\max}$ ——电流变换器一次电流的最大瞬时值；

$U_{\max}$ ——A/D 转换器在双极性输入情况下的最大正输入范围，如 A/D 的输入范围为 $\pm 5V$ ，则 $U_{\max} = 5V$ 。

通常，在中间变换器的一次侧和二次侧之间，应设计一个屏蔽层，并将屏蔽层可靠地与地网连接，以便提高交流回路抗共模干扰的能力。在存在共模干扰情况下（差模和共模干扰的示意图参考图 4-1）的等效电路如图 1-3 所示，其中 C_1 、 C_2 为变换器两侧与屏蔽层之间的等效电容； Z_L 为交流输入传输导线的等效阻抗； Z_t 为设备对地的等效阻抗； Z_n 为接地阻抗（一般要求 $Z_n < 0.5\Omega$ ）。由于 Z_g 很小，所以由电路的基本分析可以知道，共模干扰信号对变换器二次侧的影响得到了极大的抑制。这样，这些中间变换器还起到屏蔽和隔离共模干扰信号的作用，可提高交流回路的可靠性。

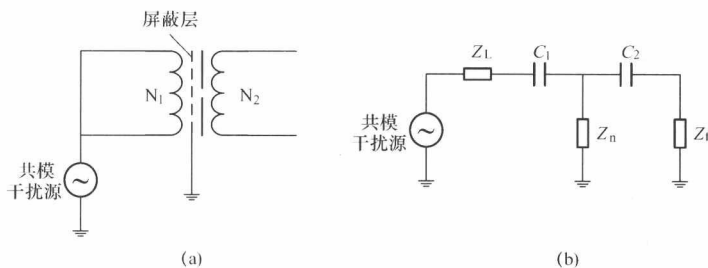


图 1-3 屏蔽层作用的等效电路

(a) 共模干扰及屏蔽层示意图；(b) 屏蔽层作用的等效电路图

顺便指出，在一些需要采集直流信号的场合，通常采用霍尔元件实现变换和隔离。

二、采样保持电路和模拟低通滤波器

(一) 采样保持电路的作用及原理

采样保持电路，又称 S/H (Sample/Hold) 电路，其作用是在一个极短的时间内测量模拟输入量在该时刻的瞬时值，并在模拟—数字转换器进行转换的期间内保持其输出不变。利用采样保持电路后，可以方便地对多个模拟量实现同时采样。S/H 电路的工作原理可用图 1-4 (a) 来说明，它由一个电子模拟开关 AS、保持电容器 C_h 以及两个阻抗变换器组成。模拟开关 AS 受逻辑输入端的电平控制，该逻辑输入就是采样脉冲信号。

在逻辑输入为高电平时 AS 闭合，此时电路处于采样状态。 C_h 迅速充电或放电到 u_{in} 在采样时刻的电压值。AS 的闭合时间应满足使 C_h 有足够的充电或放电时间即采样时间，显然希望采样时间越短越好。这里，应用阻抗变换器 I 的目的是它在输入端呈现高阻抗，对输入回路的影响很小；而输出阻抗很低，使充放电回路的时间常数很小，保证 C_h 上的电压能迅速跟踪到在采样时刻的瞬时值 u_{in} 。

AS 打开时，电容器 C_h 上保持住 AS 闭合时刻的电压，电路处于保持状态。为了提高保持能力，电路中应用了另一个阻抗变换器 II，它在 C_h 侧呈现高阻抗，使 C_h 对应充放电回路

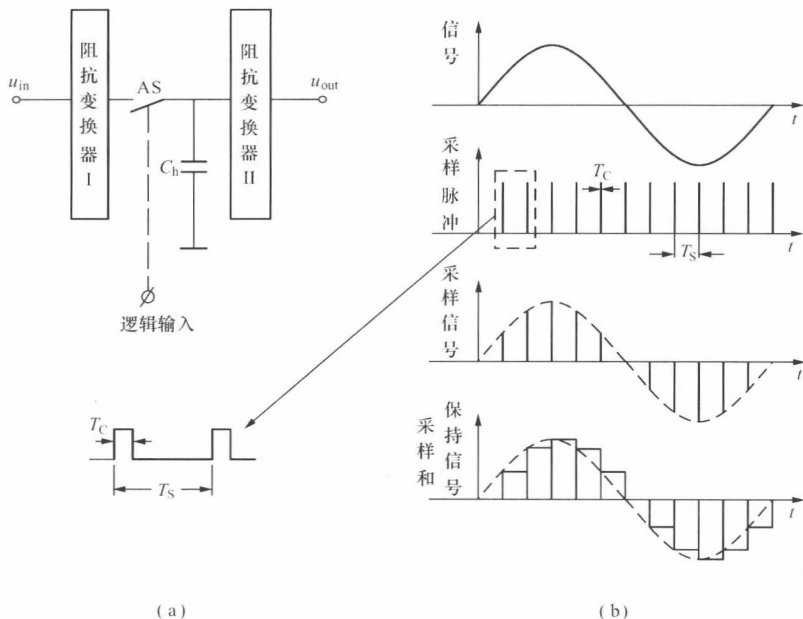


图 1-4 采样保持电路工作原理图及其采样保持过程示意图

(a) 采样保持电路工作原理图；(b) 采样保持过程示意图

的时间常数很大，而输出阻抗（ u_{out} 侧）很低，以增强带负载能力。阻抗变换器 I 和 II 可由运算放大器构成。

采样保持的过程如图 1-4 (b) 所示。图 1-4 (b) 中， T_c 称为采样脉冲宽度， T_s 称为采样间隔（或称采样周期）。由微型机控制内部的定时器产生一个等间隔的采样脉冲，如图 1-4 (b) 中的“采样脉冲”，用于对“信号”（模拟量）进行定时采样，从而得到反映输入信号在采样时刻的信息，即图 1-4 (b) 中的“采样信号”，随后，在一定时间内保持采样信号处于不变的状态，如图 1-4 (b) 中的“采样和保持信号”，这样，在保持阶段，无论何时进行模数转换，其转换的结果都反映了采样时刻的信息。

(二) 对采样保持电路的要求

高质量的采样保持电路应满足以下几点。

(1) C_h 上的电压按一定的精确度（如误差小于 0.1%）跟踪上 u_{in} 所需要的最小采样宽度 T_c （或称为截获时间），对快速变化的信号采样时，要求 T_c 尽量短，以便可用很窄的采样脉冲，这样才能更准确地反映某一时刻的 u_{in} 值。

(2) 保持时间要长，通常用下降率 $\frac{\Delta u}{T_s - T_c}$ 来表示保持能力。

(3) 模拟开关的动作延时、闭合电阻和开断时的漏电流要小。

上述 (1) 和 (2) 两个指标一方面决定于图 1-4 (a) 中所用阻抗变换器的质量，另一方面也和电容器 C_h 的容量有关。就截获时间来说，希望 C_h 越小越好，但必须远大于杂散电容；就保持时间而言， C_h 大一些更有利。因此设计者应根据使用场合的特点，在二者之间权衡后，选择合适的 C_h 值，同时要求选择漏电流小的电容器 C_h 。

下面通过图 1-5 所示的一种典型采样保持器的特性曲线，进一步说明采样保持电路的性能与电容 C_h 大小的关系。

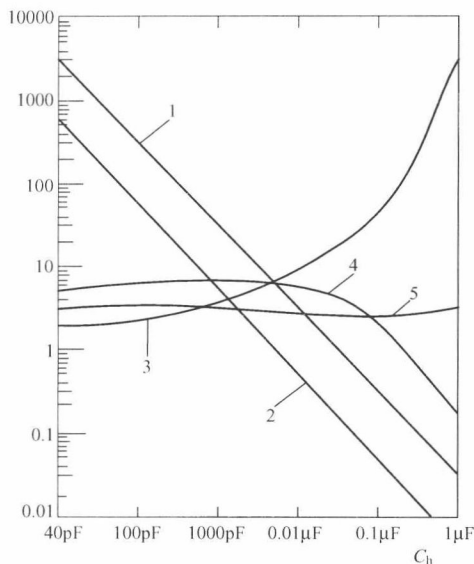


图 1-5 采样保持电路的性能与电容 C_h 大小的关系曲线

- 1—保持下降率 (mV/s); 2—保持跳变误差 (mV);
3—0.1%误差的截获时间 (μ s); 4—充电速率 (V/ μ s);
5—频带 (MHz)

由图 1-5 可见, C_h 不宜用太小的值, 这不仅因为保持能力随 C_h 下降而下降 (图中曲线 1), 还因为 C_h 和采样脉冲输入电路之间不可避免地会通过一定的分布电容产生耦合。因而, 从采样状态转到保持状态的瞬间, 采样脉冲由高电平变到低电平, 这种电平的跳变可能要通过分布电容的耦合影响 C_h 的保持值, 由于这种原因造成的误差叫保持跳变误差 (holdstep)。不难理解, C_h 值越小, 保持跳变误差越大 (图中的曲线 2)。对微机保护来说, 一种选择方案是取 $C_h = 0.01\mu\text{F}$, 此时从曲线 1 可见, 保持下降率约为 2mV/s , 完全可以忽略 (以后将看到保护系统的采样间隔一般不大于 2ms), 而达到 0.1% 的采样跟踪精确度所需的最小截获时间约为 $20\mu\text{s}$, 仅相当于工频电气角度的 0.36° , 这是完全允许的。应当说, 随着集成电路技术的发展, 最小截获时间可以大大缩小。

目前, 已有将整个采样保持电路集成在一块芯片上的器件, 但其中不包括采样电容器 C_h (需外接)。这一方面是因为用集成电路构成电容器困难; 另一方面是为了增加设计的灵活性, 可根据不同的应用场合, 选用不同容量的电容器 C_h 。

图 1-6 (a) 就是 LF-398 型采样保持电路芯片 (采样保持器) 的原理图。其他型号采样保持器的工作原理大同小异。电路主要由两只高性能的运算放大器 A1、A2 构成的跟随器组成。其中 A2 是典型的跟随器接法, 其反相端直接与输出端相连。由于运算放大器的开环放大倍数极高, 两个输入端之间的电位差实际上为零, 所以输出端对地电压能跟踪上输入端对地电压, 也就是保持电容器 C_h 两端的电压。A1 的接法和 A2 实质相同, 在采样状态 (AS 接通时), A1 的反相输入端从 A2 输出端经电阻器 R 获得负反馈, 使输出跟踪输入电压。在 AS 断开后的保持阶段, 虽然模拟量输入仍在变化, 但 A2 的输出电压却不再变化, 这样, A1 不再从 A2 的输出端获得负反馈, 为此, 在 A1 的输出端和反相输入端之间跨接了两个反向并联的二极管, 直接从 A1 的输出端经过二极管获得负反馈, 以防止 A1 进入饱和区, 同时配合电阻器 R 起到隔离第二级输出与第一级的联系。

跟随器的输入阻抗很高 (达 $10^{10}\Omega$), 输出阻抗很低 (最大 6Ω), 因而 A1 对输入信号 u_{in} 来说是高阻; 而在采样状态时, 对电容器 C_h 为低阻充放电, 故可快速采样。又由于 A2 的缓冲和隔离作用, 使电路有较好的保持性能。

AS 为场效应晶体管模拟开关, 由运算放大器 A3 驱动。A3 的逻辑输入端 $S/\overline{H}$ 由外部电路 (通常可由定时器) 按一定时序控制, 进而控制着 C_h 处于采样或保持状态。符号 $S/\overline{H}$ 表示该端子有双重功能, 即 $S/\overline{H} = "1"$ 电平为采样 (Sample) 功能, $S/\overline{H} = "0"$ 电平为保持 (Hold) 功能。某个符号上面带一横, 表示该功能为低电平有效, 这是数字电路的习惯表示法。

图 1-6 (b) 中的端子 2 用于调零。实际上, 零漂一般很小, 在要求不是特别高的情况

下,可将端子2开路。

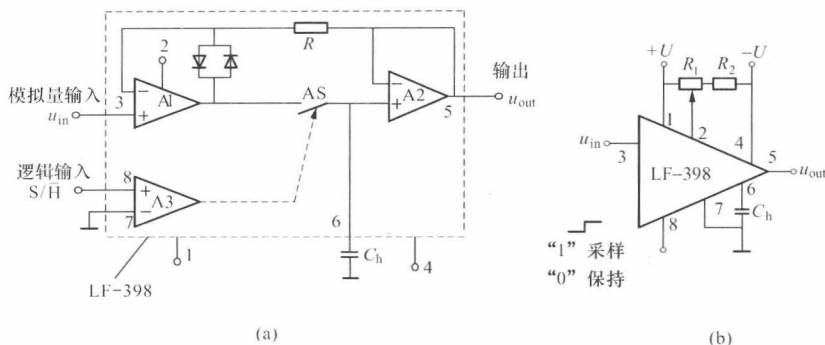


图 1-6 LF-398 型采样保持电路芯片原理图及实用接线图

(a) 原理图; (b) 实用接线图

(三) 采样频率的选择和模拟低通滤波器的应用

由于电网频率的波动较小,所以通常按照时间等间隔来设计采样间隔 T_s , 完全满足工程的实际要求, 这种方法的 T_s 控制方式很简单。另外, 在测量正常运行参数等场合, 为了进一步提高计算精确度, 还有按照电气角度等间隔的方法设计采样间隔, 此时需要跟踪电网的基波周期来调整采样间隔, 通常采用跟踪电压信号周期的方法, 以避免电流太小时 (如轻载) 无法实现正确地跟踪。

采样间隔 T_s 的倒数称为采样频率 f_s 。采样频率的选择是微机保护硬件设计中的一个关键问题, 为此要综合考虑很多因素, 并要从中作出权衡。采样频率越高, 要求微型机的运行速度越高。因为微机保护是一个实时系统, 数据采集系统以采样频率不断地向微型机输入数据, 微型机必须要来得及在两个相邻采样间隔时间 T_s 内, 处理完对每一组采样值所必须做的各种操作和运算, 否则微型机将跟不上实时节拍而无法工作。相反, 采样频率过低, 将不能真实地反映被采样信号的情况。由采样定理 $f_s > 2f_{\max}$ 可以知道, 如果被采样信号中所含最高频率成分的频率为 $f_{\max}$, 则采样频率 f_s 必须大于 $f_{\max}$ 的 2 倍。采样频率的设置, 在满足采样定理后, 才能通过一定的计算方法, 从采样信号中获取连续时间信号的有关信息。当然, 还应考虑采样信号量化的影响。

这里仅从概念上来说明采样频率过低造成频率混叠的原因。设被采样信号 $x(t)$ 中含有的最高频率为 $f_{\max}$, 现将 $x(t)$ 中这一频率成分 $x_{f_{\max}}(t)$ 单独画在图 1-7 (a) 中。从图 1-7 (b) 可以看出, 当 $f_s = f_{\max}$ 时, 采样所看到的为一直流成分; 而从图 1-7 (c) 看出, 当 f_s 略小于 $f_{\max}$ 时, 采样所看到的是一个差拍低频信号。这就是说, 一个高于 $f_s/2$ 的频

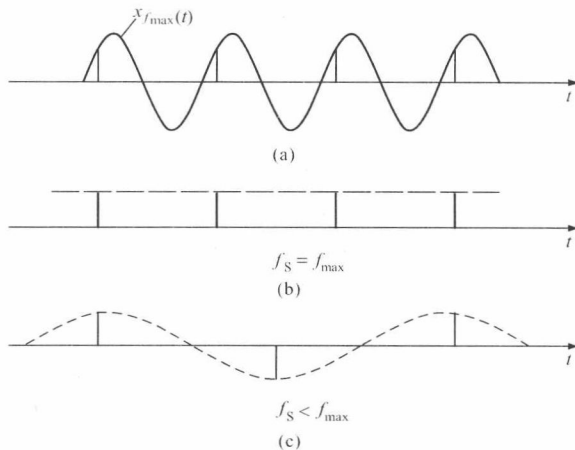


图 1-7 频率混叠示意图

(a) $x_{f_{\max}}(t)$ 波形; (b) $f_s = f_{\max}$ 采样波形;

(c) $f_s < f_{\max}$ 采样波形

率成分在采样后将被错误地认为是一低频信号,或称高频信号“混叠”到了低频段。显然,满足采样定理 $f_s > 2f_{\max}$ 后,将不会出现这种混叠现象。工程中一般取 $f_s = (2.5 \sim 3)f_{\max}$ 。

对微机保护系统来说,在故障初瞬,电压、电流中可能含有相当高的频率分量(如 2kHz 以上),为防止混叠, f_s 将不得不取很高值,从而对硬件速度提出过高的要求。但实际上,目前大多数的微机保护原理都是反映工频量的,在这种情况下,可以在采样前用一个低通模拟滤波器(LPF, Low Pass Filter)将高频分量滤掉,这样就可以降低 f_s ,从而降低对硬件提出的要求。实际上,在第 2 章将看到,由于数字滤波器有许多优点,因而通常并不要求图 1-1 中的模拟低通滤波器滤掉所有的高频分量,而仅用它滤掉 $f_s/2$ 以上的分量,以消除频率混叠,防止高频分量混叠到工频附近来。低于 $f_s/2$ 的其他暂态频率分量,可以通过数字滤波来滤除。还应当提出,实际上电流互感器、电压互感器对高频分量已有相当大的抑制作用,因此不必对抗混叠的模拟低通滤波器的频率特性提出很严格的要求,如不一定要求

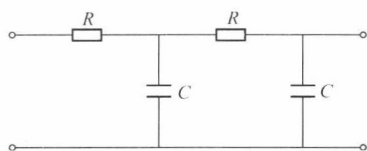


图 1-8 RC 低通滤波器

很陡的过渡带,也不一定要求阻带有理想的衰减特性,否则高阶的模拟滤波器将带来较长的过渡过程,影响保护的快速动作。最简单的模拟低通滤波器如图 1-8 所示,其中的一种参数设计为 $R=4.3\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$ 。

采用低通滤波器消除频率混叠问题后,采样频率的选择在很大程度上取决于保护的原理和算法的要求,同时还要考虑硬件的速度问题。例如,一种常用的采样频率是使采样间隔 $T_s=5/3\text{ms}$,这正好相当于工频 30° ,因而可以很方便地实现 30° 、 60° 或 90° 移相,从而构成负序过滤器等。考虑到硬件目前实际可达到的速度和保护算法的要求,绝大多数微机保护的采样间隔 T_s 都在 $0.1 \sim 2\text{ms}$ 的范围内。

三、模拟量多路转换开关

对于反映两个量以上的继电保护装置,如反映阻抗、功率方向等的继电保护装置,都要对各个模拟量同时采样,以准确地获得各个量之间的相位关系,因而图 1-1 中要对每个模拟输入量设置一套电压形成、抗混叠低通滤波和采样保持电路。所有采样保持器的逻辑输入端并联后,由定时器同时供给采样脉冲。但由于模数转换器价格相对较贵,通常不是每个模拟量输入通道设一个 A/D,而是公用一个,中间经多路转换开关 MPX (Multiplex) 切换,轮流由公用的 A/D 转换成数字量输入给微机。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,它们被集成在一个电路芯片中。以 16 路多路转换开关芯片 AD7506 为例,其内部电路组成框图如图 1-9 所示。因为要选择 16 路输入量,所以它有 $A0 \sim A3$ 四个路数选择线,以便由微型机通过并行接口或其他硬件电路给 $A0 \sim A3$ 赋以不同的二进制码,选通 $AS1 \sim AS16$ 中相应的一路电子开关 AS,从而将被选中的某一路模拟量接通至公共的输出端,供给 A/D 转换器。

图 1-9 中的 EN (Enable) 端为芯片选择线,也称为允许端,只有在 EN 端为高电平时多路开关才接通,否则不论 $A0 \sim A3$ 在什么状态, $AS1 \sim AS16$ 均处于断开状态。设置 EN 端是为了便于控制 2 个或更多的 AD7506,以扩充多路转换开关的路数。

MPX 中的模拟电子开关 AS 在 D/A、A/D、S/H 电路中应用甚广,现作简单介绍。它是用电子逻辑(数字)控制模拟信号通、断的一种电路,通常有双极型晶体管(BJT)、结型场效应晶体管(J-FET)或金属氧化物半导体场效应管(MOS-FET)等类型组成的电子

开关。BJT 模拟电子开关是用得最早的一种，电路原理图如图 1-10 所示，这是一种反接晶体管模拟开关，该电路可直接用 TTL 数字逻辑电路控制。

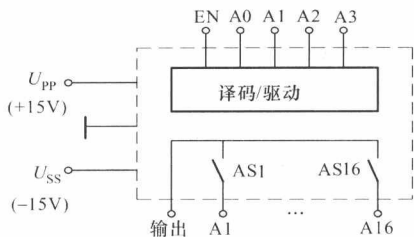


图 1-9 AD7506 的内部电路组成框图

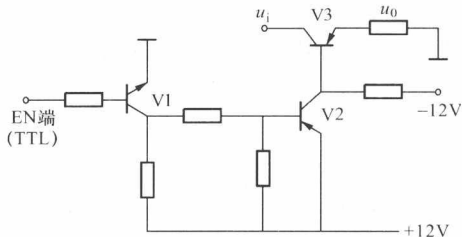


图 1-10 BJT 模拟电子开关电路原理图

当控制信号为低电平时，V1、V2 截止，V3 导通。当控制信号为高电平时，V1、V2 导通，V3 截止。这种电路导通误差电压大约为 $1\sim 2\text{mV}$ ，精确度不高。为了提高精确度，还可以采用并联互补、串联补偿等电路。

J-FET 组成的模拟电子开关性能更好，导通电阻小，截断时只有极微小的漏电流，因此应用广泛。其电路原理如图 1-11 所示。

这是一个互补双路开关。当 u_c 为高电平时，V1、V2 导通，V3 截止，V4 导通， $u_o = u_{i2}$ ；当 u_c 为低电压时，V1、V2 截止，V3 导通，V4 截止， $u_o = u_{i1}$ 。

MOS-FET 组成的模拟电子开关性能和 J-FET 类似，但它更容易制成集成电路，成本低，因此使用越来越广泛。其电路原理如图 1-12 所示。

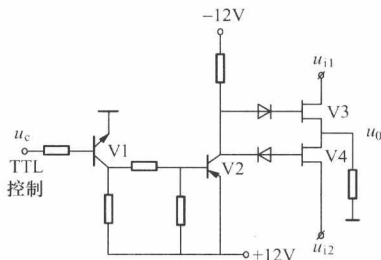


图 1-11 J-FET 模拟电子开关电路原理图

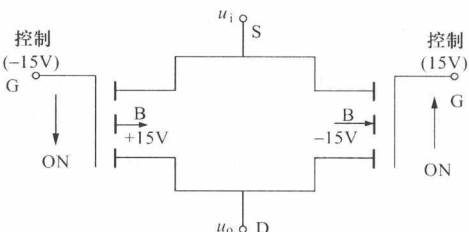


图 1-12 MOS-FET 模拟电子开关电路原理图

这是一个互补型 MOS-FET 的模拟电子开关 AS 电路（简称 CMOS-FET AS），用两个增强型的 MOS-FET 并联，一个是 P 沟道，一个是 N 沟道。为使开关导通，要求 PMOS（P 沟道的 MOS-FET）的控制电压为负值，同时要求 NMOS（N 沟道的 MOS-FET）的控制电压为正值，图 1-12 中分别用向下及向上的箭头表示。当输入电压 u_i 为零时，PMOS 的 $u_{GS} = -15\text{V}$ ，NMOS 的 $u_{GS} = +15\text{V}$ ，故 PMOS 与 NMOS 两者均导通。开关导通电阻为两个 FET 的电阻并联，电阻很低。当输入电压 $u_i = -15\text{V}$ 时，PMOS 的 $u_{GS} = -30\text{V}$ ，NMOS 的 $u_{GS} = 0\text{V}$ ，此时 PMOS 导通，NMOS 截止，有一个 FET 导通，电阻也很低。当输入电压 $u_i = +15\text{V}$ 时，PMOS 的 $u_{GS} = 0\text{V}$ ，NMOS 的 $u_{GS} = +30\text{V}$ ，此时 NMOS 导通，PMOS 截止，电阻也很低。因此不论输入电压如何变化，导通时，导通电阻基本不受输入电压 u_i 变化的影响。

在应用中，不论是哪种电路构成的模拟电子开关，一般分成电压开关和电流开关两种。电流开关比电压开关的工作速度高得多。