



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统仿真与 继电保护实验指导书

焦彦军 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统仿真与 继电保护实验指导书

主编 焦彦军

编写 杨明玉 李秀琴 梁 旭

主审 李永丽



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是针对通用型电力系统仿真与继电保护实验系统的实验指导用书。利用该系统可以进行电力系统继电保护原理、微机继电保护课程的教学实验,也广泛应用于研究生论文工作、本科毕业设计、课程设计、综合性实验等。

本书阐述了通用型电力系统仿真与继电保护实验系统的构成原理、使用方法及实验内容。为了便于读者使用,对微机保护的硬件构成原理、基本算法及相关的保护原理也进行了论述。全书共分6章。第1章介绍了ZPT-100继电保护实验装置的构成原理;第2章介绍了DDRTS数字动态实时仿真系统的建模方法、离线及闭环实验方法;第3章介绍了ZPT后台监控、DPS3000故障录波分析及继电器静态特性测试等辅助实验教学软件;第4章介绍了利用该实验系统进行继电保护程序设计的环境、规则,并给出进行程序设计的实例;第5章给出了微机保护实验教学设计的一些范例;第6章给出了电流保护、距离保护及差动保护等保护原理的实验设计范例。

本书可作为高等学校电气工程专业的教师、学生参考用书,同时也可作为电力职工培训的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统仿真与继电保护实验指导书/焦彦军主编. —北京:
中国电力出版社, 2014. 11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-6303-8

I. ①电… II. ①焦… III. ①电力系统—系统仿真—实验—
高等学校—教材②电力系统—继电保护—实验—高等学校—教
材 IV. ①TM7-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第181582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

*

2014年11月第一版 2014年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 230千字

定价 19.00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

电力系统继电保护作为保证电力系统安全稳定运行的第一道防线,发挥着不可替代的重要作用。采取各种继电保护措施和电力系统控制技术等可以有效地提高电力系统安全稳定水平,增强输电能力。继电保护技术是电子技术、计算机技术和通信技术的综合应用,其综合运用了电工理论、电机学、电力系统故障分析、数字信号处理的基本理论以及现代数学理论的最新研究成果,具有多种理论和多种技术综合运用的鲜明特色。“电力系统继电保护原理”是电气工程及其自动化专业的专业主干课程,是电气工程专业领域知识构成的重要支撑。从事电力生产的各专业人员必须掌握基本的继电保护知识,把握继电保护动作行为对电力生产各个环节的影响。

微机保护的应用在继电保护领域带来了革命性变革,围绕微机保护的科学研究异常活跃,许多新的保护原理得以应用。所有这些都要求我们不断改革课程内容,删减陈旧的内容、增加微机保护新原理,以保证教学内容的先进性和前沿性。针对课程的理论体系及特点,建立完善的实践教学环境进行实践教学,可促进学生对理论知识的二次理解,并解决理论教学中没有能够解决的一些问题。实践教学同时也检验理论教学的成果,丰富和完善理论教学的内容。鉴于此,华北电力大学和清华大学于2011年共同开发了通用型继电保护实验教学平台。该平台是针对电气工程及其自动化专业领域教师及科研人员、高等院校在校学生及电力系统在职员工开发的一套功能相对完善的电力系统仿真与继电保护实验系统。它可以完成理论验证性试验、自主研究型实验,可结合课堂教学进行实验设计,也可广泛应用于研究生论文工作、本科毕业设计、课程设计、综合性实验等。为了方便广大师生利用实验教学平台进行实验和研究,特编写《电力系统仿真与继电保护实验指导书》。

本书共分6章。第1章、第5章由焦彦军编写;第2章的第1、2、3节由梁旭编写;第2章的第4、5节,第3章及第6章的4、5节由李秀琴编写;第4章及第6章的1、2、3节由杨明玉编写。全书由焦彦军统稿。

天津大学李永丽教授对本书进行了审阅,并提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

电力系统实时数字仿真采用的是殷图公司开发的DDRTS实时仿真软件,ZPT-100继电保护实验装置由保定中力科技公司制造,两家公司全程参与了实验系统的研发工作。教研组的李翀、戴志辉、贾文超、王雪、王艳、刘青等参与了本书实验设计及校核工作。在此对他们所付出的努力表示衷心感谢!

由于本系统尚处于初期应用阶段,可能存在这样或那样的不足之处,希望使用单位多提宝贵意见,批评指正。

编者

2014年7月于华北电力大学

目 录

前言

1 通用型继电保护实验系统概述	1
1.1 系统介绍	1
1.2 ZPT-100 继电保护实验装置简介	3
2 数字动态实时仿真系统	18
2.1 数字动态实时仿真系统概述	18
2.2 构建电力系统仿真模型	20
2.3 仿真系统创建实例	26
2.4 离线数字仿真及其应用	30
2.5 闭环测试及其应用	35
3 继电保护辅助教学软件简介	43
3.1 数字动态谐波测试软件	43
3.2 ZPT 后台监控软件	45
3.3 DPS3000 故障录波分析软件	49
3.4 继电器静态特性测试软件	53
4 保护程序设计指南	55
4.1 ARM 程序结构及开发环境	55
4.2 保护程序设计规则	59
4.3 程序设计实例	66
5 微机保护实验设计	84
5.1 数据采集系统实验	84
5.2 数字量输入/输出回路检查实验	91
5.3 数字滤波器程序设计	92
5.4 微机保护算法程序设计	93
5.5 继电保护程序设计	96
6 电力系统继电保护原理实验设计	99
6.1 电流保护(带功率方向)实验	99
6.2 零序电流保护(带零序功率方向)实验	108
6.3 三段式距离保护实验	116
6.4 输电线路差动保护实验	130
6.5 变压器纵差保护实验	139
参考文献	147

1 通用型继电保护实验系统概述

1.1 系统介绍

通用型电力系统仿真与继电保护实验系统包括硬件部分和软件部分。硬件构成包括计算机（内置高速并行通信和信号转换及输入输出卡）和 ZPT-100 继电保护实验装置，如图 1-1 所示。计算机中集成了电力系统数字动态实时仿真软件 DDRTS、DPS3000 电力系统故障录波分析软件、ZPT 后台监控软件、IAR EWARM 程序开发及调试环境、继电保护辅助教学软件。

计算机和 ZPT-100 继电保护实验装置的连接关系如图 1-2 所示。



图 1-1 通用型继电保护实验系统硬件组成



图 1-2 计算机和 ZPT-100 继电保护实验装置的连接

通用型继电保护实验系统的主要功能如下。

- (1) 电力系统数字动态实时仿真软件 DDRTS 离线应用。电力系统数字动态实时仿真软件 DDRTS 借助图形建模系统，搭建电力系统仿真模型，可以模拟电力系统的电磁暂态和机

电暂态过程，其仿真结果可以用波形的方式输出，也可以用数据文件的形式输出。通过观察电压或电流波形，可以对电力系统故障时的电磁暂态过程产生感性认识；利用其输出的数据文件，可以验证某些保护原理对故障识别的正确性。详见第2章。

(2) 进行继电保护实验及培训。继电保护实验总的来说有两方面内容：一是继电器或某些元件工作原理的学习，例如功率方向继电器，加入电压和电流到继电器，调节它们之间的相位，观察继电器的动作边界，可以测量出动作范围及灵敏角；二是分析继电保护的动作为，例如针对一个特定的电力系统，确定保护的配置，给定其定值，当电力系统发生某种故障时，分析故障特征，认识保护动作行为的必然性。

进行继电器工作原理的实验，有两种方案可采用：一是利用室内电源，借助调压器、移相器、电位器及相关的测量仪器，搭建实验电路，给继电器输入电压或电流，它们的幅值及相位均可以调节，观察继电器的动作情况，测量某些参数；二是利用继电保护测试仪，调节电压、电流的幅值和相位，将对应的数字信号经 D/A 转换为模拟信号，再经过功率放大器输出到继电保护装置，观察继电保护的动作为，记录某些参数。

对继电保护动作行为的分析，必须将继电保护接入电力系统中，在电力系统中进行各种短路实验。考察及分析继电保护的动作为，同样有两种方案可以采用：一是搭建物理模拟系统（如电力系统动态模拟实验室），采用和实际系统类似的方法，继电保护装置经过电压互感器和电流互感器接入模拟量，其继电器的空触点接入跳合闸控制回路，实现对断路器的控制；二是建立电力系统数字仿真模型，可以进行各种故障仿真，其仿真结果经过 D/A 转换成模拟量，再经过功率放大器接入到继电保护装置，保护的动作为以开关量的形式输入到仿真系统，改变开关状态，从而改变仿真进程，整个过程必须是实时闭环控制的。

本实验系统是完全基于数字仿真构建的，通过 DDRTS 仿真软件或其他测试软件产生数字信号，该信号经 D/A 转换为模拟信号，直接输入到 ZPT-100 继电保护实验装置。本实验系统和实际的微机继电保护装置相比，内部缺省了电压及电流变换器，将经 D/A 转换的弱电模拟信号直接送入试验装置。这一缺省，无碍对保护原理的认识，却节省了在功率放大器方面的投资，也只有这样，试验装置才具有通用性。

ZPT-100 继电保护实验装置的有关内容介绍详见 1.2 节，继电保护闭环实验有关内容介绍详见第 2 章。

(3) 继电保护程序设计。微机保护之前的继电保护装置遵循“布线逻辑”原则，将继电保护的动作为方程和实际电路有机结合为一个整体，分析继电器的动作为总是从分析电路入手，因此可以借助万用表或示波器等仪器仪表进行测试，掌握了电路的工作原理就能明白继电器的基本原理，也能分析和发现继电器存在的故障隐患。微机保护出现以后，情况发生了变化，无论硬件和软件，都被“隐藏”了起来，学生几乎无法深入到微机保护内部，从而给深入学习和掌握继电保护知识带来了一定困难。

本实验系统硬件装置是基于 ARM+DSP 的双核系统。其中，DSP 负责模拟量的采集和采样数据的处理，提供原始的采样值和基于傅里叶算法的相量值；DSP 中的程序不对用户开放，用户若想集成新的算法，则需和专门开发人员共同完成。ARM 负责通信功能和保护功能逻辑的实现，其中的程序代码对用户完全开放，遵循一定的编程规则，用户可以开发自己的保护程序，经过编译、链接及下载，程序就可以在装置中运行了。

有关程序设计的内容详见第4章。

(4) 进行继电保护辅助教学。本实验系统提供了较为完善的继电保护辅助教学手段,包括数字动态谐波测试软件、ZPT 后台监控软件、DPS3000 电力系统故障录波分析软件及继电保护辅助教学软件。

实验教学与培训的主要内容包括:对实验系统的分析与研究,进行预设条件下的实验,观察实验现象,记录有关的实验结果,对实验数据或结果的分析,对理论的再认识。

本实验系统产生的实验结果包括继电保护装置动作行为及动作报告、DDRTS 系统的电力系统数字仿真结果。通过 ZPT 后台监控系统可以调取装置的实时数据、查询保护动作报告及故障前后的录波数据及保护动作的事件记录。DDRTS 系统的电磁暂态计算提供的数据是计算步长(可以设定)为微秒级的离散数据,基于该数据可以进行行波特性方面的分析、谐波分析。研究微机保护的算法,可以采用抽取样值的方法,以满足对采样频率的需求。

计算机通过以太网与 ZPT-100 继电保护实验装置相连,实现对继电保护装置的后台监控,具有类似综合自动化系统后台的部分功能,可实现功能浏览、报告查询、系统配置和传动命令。

DPS3000 软件是针对电力系统故障录波数据分析而开发的通用软件,可读取/保存符合 IEEE COMTRADE 标准的录波数据(*.cfg, *.dat),保存为文本格式的录波数据(*.txt),以便于用户直接浏览、分析,对录波数据进行分析计算。

继电保护辅助教学软件能很好展示继电保护原理及微机保护的基础理论,能利用实验数据实现继电器动作特性演示、算法演示及数字滤波器设计等多种操作。有关内容详见第3章。

本实验系统配合电力系统继电保护课程教学,可以完成继电器,如电流继电器、方向继电器、阻抗继电器、比率制动差动继电器等的静态特性测试;进行电力系统继电保护原理验证性试验——搭建仿真系统,计算保护定值并在装置中进行整定;进行各种故障情况下的闭环仿真测试,观察保护的動作行为,分析保护动作报告,以加深对保护原理的理解和把握。本实验系统可以开发保护程序,并在实际装置中运行;可进行继电保护综合性试验——建立较复杂的系统。针对该系统进行继电保护配置及定值计算,设置各种简单故障和复杂故障,观察各种故障下的电压和电流波形,通过对故障电压和电流的定量分析,验证保护配置的合理性,定值整定计算的正确性及继电保护动作的可靠性。

1.2 ZPT-100 继电保护实验装置简介

1.2.1 ZPT-100 继电保护实验装置原理及构成

ZPT-100 继电保护实验装置(简称 ZPT-100 实验装置)主要用于电力系统继电保护原理、微机保护实验教学及培训。该装置原理框图如图 1-3 所示。

该实验装置采用 ARM+DSP 的双核系统。ARM 与 DSP 采用双端口存储器 DRAM 进行数据交换。具有 32 路模拟量输入通道,采用 AD 公司 16 位同步采集模数转换芯片进行模数转换。除基于 A/D 的数据采集系统外,还提供了 1 路压频转换(VFC)电路。大容量的静态随机存储器 SDRAM 和 Flash 存储器可以保存多次故障数据记录、事件记录,铁电存储器 FRAM 用于保存保护的定值。具有以太网接口,类似变电站综合自动化系统中对保护的监控,能上送模拟量、动作报告、查看和设置定值以及对装置进行诸如采样频率和模拟通道

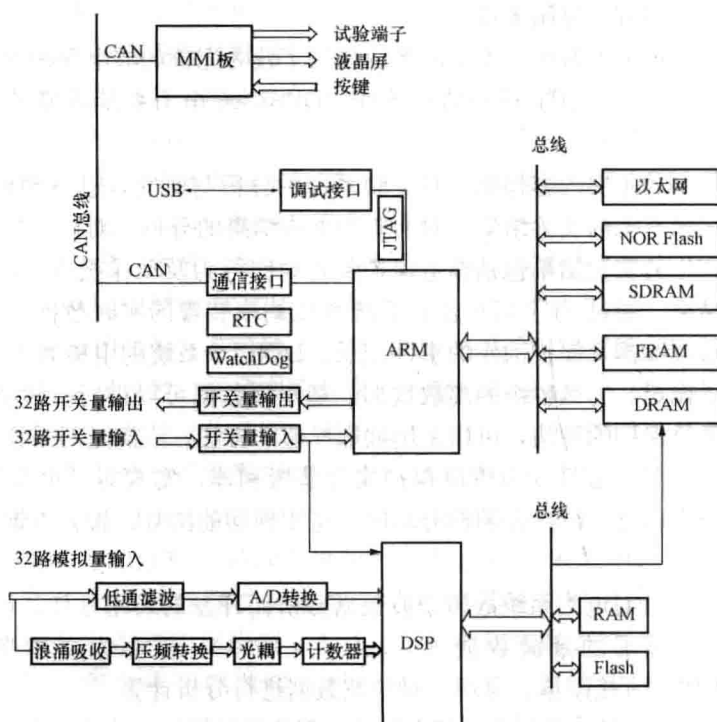


图 1-3 ZPT-100 继电保护实验装置原理框图

的设置。该实验装置内部集成了 JTAG 调试接口，通过 USB 接口与计算机连接，完成继电保护程序的开发与调试。装置具有 32 路模拟量接口、32 路开关量输入接口及 32 路开关量输出接口，与电力系统数字仿真主机相连，构成闭环实验系统。

ZPT-100 实验装置通常由数据采集系统、数字量输入/输出系统和微机主系统构成。

1.2.1.1 微机主系统

采用 ARM+DSP 的双核系统，可以为复杂的数值计算和保护逻辑提供硬件支撑。DSP 芯片负责模拟量的采集和采集数据的处理，提供基于差分+傅氏算法的相量值（基波、二次谐波、三次谐波、五次谐波的实部和虚部）和实时采样值。模拟量的采样频率可设定，DSP 自动转换相应计算方法。ARM 负责保护功能逻辑的实现和通信。ARM 与 DSP 之间采用共享存储器的方式交换数据。

本装置选用的 DSP 芯片是德州仪器公司生产的 TMS320F28335-176QFP 数字信号处理器，其主要特点包括：

(1) 处理能力强。芯片最高工作频率可达 150MHz，指令周期为 6.67ns，芯片为高性能的 32 位 CPU，具有 IEEE-754 单精度浮点单元，其先进的哈佛结构允许对数据与指令的操作同时进行，提高了数据的吞吐率以及指令的执行速度。

(2) 片内具有 256K×16bit 的 Flash 存储器和 32K×16bit 的 SDRAM。利用 Flash 存储器存储程序，降低了成本，也给系统软件升级提供了便利条件。

(3) 资源丰富。TMS320F28335-176QFP 具有两个同步串行外设接口模块 SPI，3 个异步串行接口模块 SCI。6 通道的动态内存存取 DMA，可以改善芯片的实时性能，片内还有 3

个软件可编程定时器 (TIMER) 以及大量中断资源和 JTAG 调试接口等。

本装置的保护逻辑及控制采用 ARM 7TDMI-S 内核的 32 位微控制器 LPC2468, 其主要特点包括:

(1) LPC2468 微控制器具有 512kB 片内高速 Flash 存储器, 该 Flash 存储器具有特殊的 128 位宽度的存储器接口以及加速器架构, 可以使 CPU 以高达 72MHz 的系统时钟速度按顺序执行 Flash 存储器的指令。

(2) LPC2468 包括 1 个 10/100 以太网媒体访问控制器 MAC、1 个带 4kB 终端 RAM 的 USB 全速 Device/Host/OTG 控制器、4 个通用异步收发传输器 UART、2 路控制器局域网 CAN 通道、1 个 SPI 接口、2 个同步串行端口 SSP、3 个 I²C 接口和 1 个 I²S 接口。98kB 的 RAM 以及 1 个外部存储器控制器 EMC 来支持上述的各种串行通信接口。

(3) LPC2468 具有先进的相量中断控制器 (VIC), 支持多达 32 个相量中断; SD/MMC 存储卡接口; 160 个通用 I/O 管脚, 带有可配置的上拉/下拉电阻; 4 个通用定时器/计数器; 2 个 PWM/定时器模块, 支持三相电机控制, 每个 PWM 有 1 个外部计数输入; 具有标准的 ARM 测试/调试接口。

微机主系统的其他资源及用途如下:

1) DSP 处理器外扩的 256K×16 静态 RAM——IS61LV25616AL, 用于保存采样值、DSP 处理的中间变量等;

2) ARM 处理器外部扩展的动态 RAM——KS561632H-UC75, 用于记录保护动作事件及故障录波数据;

3) 4K×16 双端口 RAM——IDT70V24, 用于 DSP 与 ARM 处理器进行数据交互;

4) 64Kb 铁电存储器 (FRAM)——FM24CL64 存储器, 用于保存保护的定值;

5) 时钟芯片 DS3231 提供年、月、日、时、分、秒时间信息;

6) DSP 与 ARM 构成的保护主系统与人机交互部分 (MMI) 通过 CAN 总线进行通信。

1.2.1.2 数据采集系统

在微机保护中, 数据采集系统把经电压互感器和电流互感器输入的二次电压、电流模拟信号转换为数字信号。通常要求数据采集系统能够实现对多个模拟量的同时采样。数据采集系统可以采用逐次比较式的模数转换器构成, 也可以采用压频转换器构成。

用逐次比较式的模数转换器构成的数据采集系统的一个实例框图如图 1-4 所示。它包含电压形成电路、模拟低通滤波器 (LF)、采样保持器 (S/H)、多路转换开关 (MUX) 和模数转换器 (A/D)。电压形成电路把从电压互感器和电流互感器引入到保护装置的电压和电流转换成与模数转换器的输入范围 (量程) 相匹配的电压信号。采用的器件为电压变换器和电流变换器, 如图 1-5 所示。因此, 它们还起到了隔离作用, 在一次侧、二次侧之间加一屏蔽层, 有利于提高装置的抗干扰水平。

继电保护装置接入哪些模拟量由保护的构成原理确定。输入信号的动态范围是指模拟量的最小值到最大值的变化范围, 在这个范围内, 对装置的精度提出要求。输入电流的动态范围一般为 $(0.08 \sim 20)I_n$, 电压的动态范围一般为 $(0.01 \sim 1.2)U_n$ 。其中 I_n 和 U_n 分别为电流互感器和电压互感器的二次额定电流和额定电压。

变换器变比的选取要保证在可能的最大输入时, 其二次侧的输出电压不超过 A/D 允许输入的最大值。例如, 对于量程为 $\pm 5V$ 的 A/D, 当电压取自电压互感器二次相电压时, 电

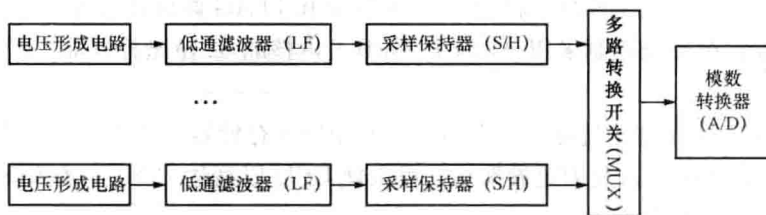


图 1-4 数据采集系统构成的一个实例

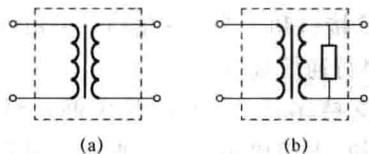


图 1-5 电压变换器和电流变换器的构成示意图

(a) 电压变换器；(b) 电流变换器

压变换器的变比可选取 100/3.53；当电流互感器的二次额定电流为 5A 时，电流变换器的变比可选取 100/3.53。

在电力系统发生故障时，故障后的电压、电流信号中除含有 50Hz 的工频分量外，通常还含有衰减的直流分量和其他频率成分的分量。为了满足采样定理，在进行模数转换之前，需设置模拟低通滤波器对信号进行预处理。对于反应工频量的保护原理，实际应用中采样频率通常为 600~4800Hz 范围内。图 1-6 是微机保护中采用的无源二阶阻容

低通滤波器原理电路。该二阶阻容低通滤波器的传递函数为

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

模数转换器对模拟量的转换不是瞬间完成的，需要一定的时间，在进行模数转换过程中，模拟信号要保持不变，否则会产生误差。要防止这种误差的产生，必须在 A/D 转换开始前将输入信号的电平保持住，而在 A/D 转换结束后又能跟踪输入信号的变化。能完成这种功能的器件叫采样/保持器，在保持阶段相当于一个“模拟信号存储器”。另外，在用一个模数转换器实现对多个模拟量的同时采样时，利用采样保持器可以实现多个模拟量的同时保持，再通过多路转换开关控制，进行逐一转换。采样保持器的原理电路如图 1-7 所示。

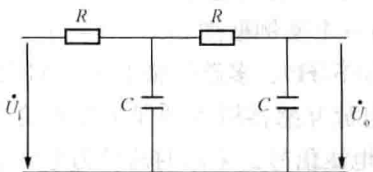


图 1-6 无源二阶阻容低通滤波器原理电路图

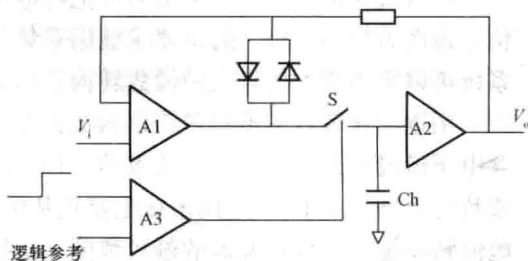


图 1-7 采样保持器原理电路图

当加在逻辑输入端的控制信号为高电平时，电子开关 S 闭合，模拟信号对保持电容 C_h 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 S 断开， C_h 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。

利用多路转换开关 (MUX) 实现多路信号的切换，用一个模数转换器对多路输入信号进行依次转换。

模数转换器可以认为是一种编码电路，它可以实现将模拟的输入量 U_i 相对于参考电压 U_{ref} 经过一个编码电路转换成数字量 D 。 D 用二进制数表示为

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

式中： B_1 、 B_2 、 $\cdots$ 、 B_n 为二进制数的 0 或 1； D 是一个小于 1 的数， $D = U_i / U_{\text{ref}}$ 。

从而，模拟信号可表示为

$$U_i = D \cdot U_{\text{ref}} \quad (1-3)$$

模数转换器的种类有许多，微机保护中常用的是逐次比较式模数转换器，其功能结构如图 1-8 所示。采用逐次比较式原理的模数转换实现方法是，首先将最高位设为 1，其余位设为 0，将该数字量经过一个 D/A 转换电路变为与其对应的模拟量，再将该模拟量与输入的模拟量进行比较，由比较的结果修改设定的数字量。如果设定的数字量经 D/A 转换后的模拟量小于待转换的模拟信号，则保留设定的数字量最高位的 1，再将次高位设为 1，经 D/A 转换后再与待转换的模拟信号比较；如果设定的数字量经 D/A 转换后的模拟量大于待转换的模拟信号，则将设定的数字量最高位变为 0，将次高位设为 1，经 D/A 转换后再与待转换的模拟信号比较。重复这一过程直至将数字量的所有位确定下来，转换过程结束。

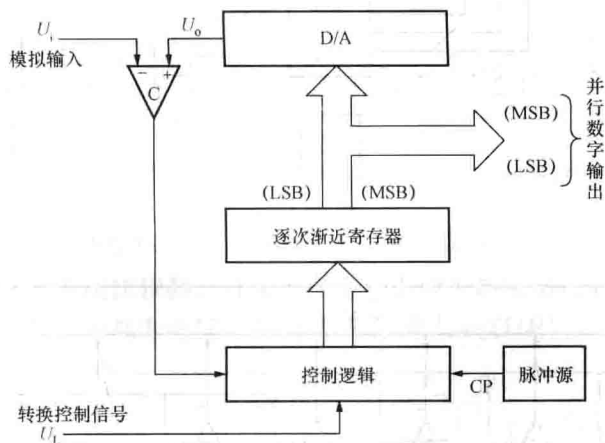


图 1-8 逐次比较式模数转换器的功能结构图

模数转换结果的二进制位数又称为 A/D 的分辨率，位数越多分辨率越高。由于 A/D 芯片的位数总是有限的，而模拟信号的值是一个无限连续量，因而用有限的数字代表无限连续的模拟信号总会产生误差。数字量的最高位通常用 MSB 表示，最低位用 LSB 表示，在进行 A/D 转换时，比最低位更小的量将被舍去，这就是量化误差。显然，A/D 芯片的分辨率越高，量化误差越小。在微机保护装置中，目前大多数产品选择 12~16 位的 A/D 芯片。

本实验装置采用的 A/D 转换器是 AD7606-6，其内部功能框图如图 1-9 所示。AD7606-6 是 16 位、8 通道同步采样数据采集系统（DAS）。该器件内置模拟输入箝位保护、二阶抗混叠滤波器、跟踪保持放大器、8 选 1 多路转换开关、16 位电荷再分配逐次逼近型 ADC、2.5V 基准电压源、基准电压缓冲以及高速串行和并行接口，采用 5V 单电源供电，可以处理 $\pm 10\text{V}$ 和 $\pm 5\text{V}$ 真双极性输入信号，采样速率最大为 200kHz。输入箝位保护电路可以耐受电压最高达 $\pm 16.5\text{V}$ 。无论以何种采样频率工作，AD7606-6 的模拟输入阻抗均为 $1\text{M}\Omega$ ，无需驱动运算放大器和外部双极性电源。

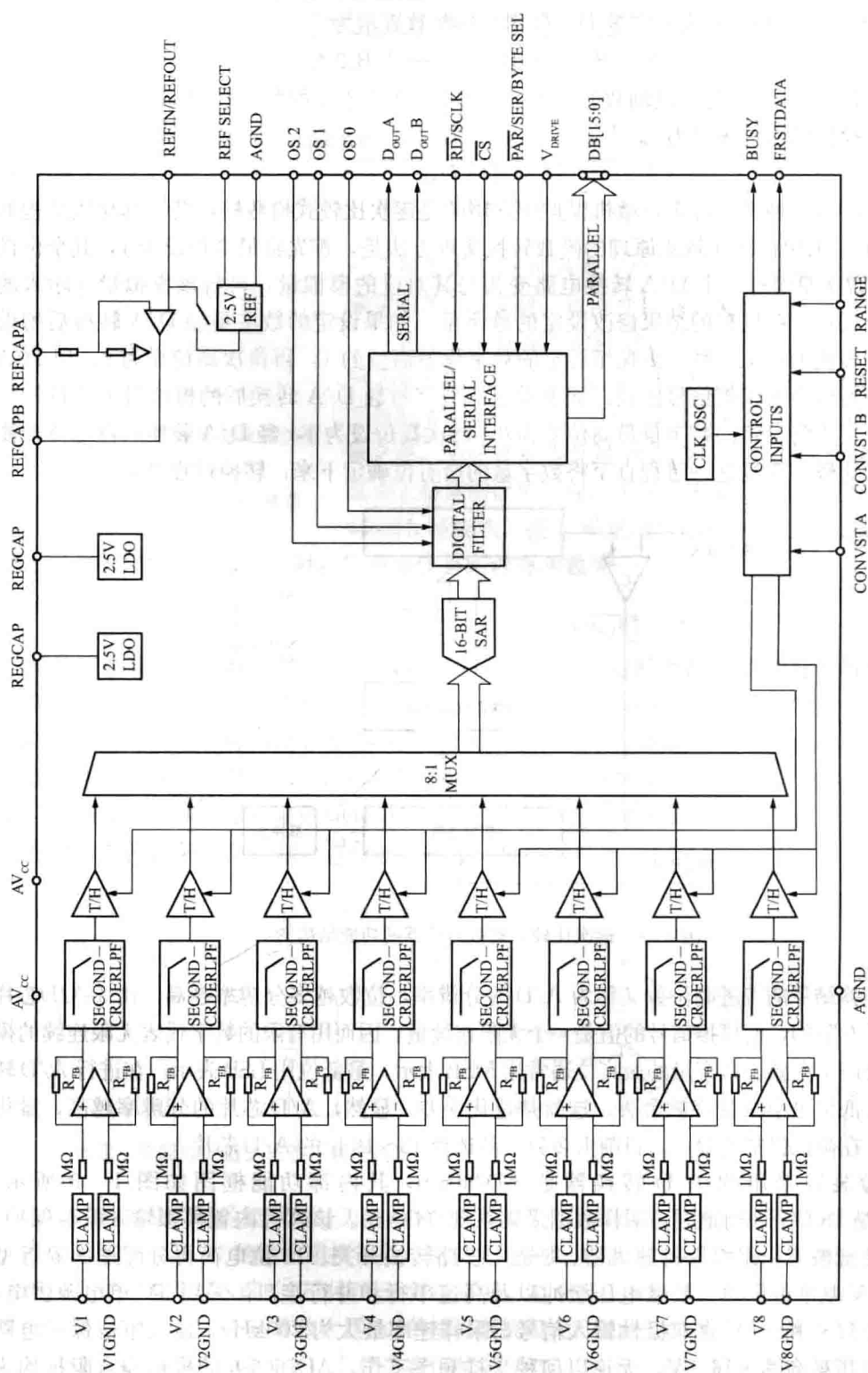


图 1-9 AD7606-6 内部功能框图

本实验装置采用 4 片 AD7606-6 并行工作, 实现 32 路模拟信号的同步采样, 简化了外部电路设计, 降低用于控制数据采集的软件成本。

需要说明的是本实验装置内部并未使用电压变换器、电流变换器, 而是将计算机内置的 D/A 卡输出的电压信号 (输出为 $\pm 10\text{V}$) 直接引入继电保护实验装置, 既降低了成本又实现了通用性设计思想。

在微机保护中也可以采用电压-频率转换 (VFC) 器件构成的数据采集系统。图 1-10 是采用 VFC 构成微机保护数据采集系统的原理框图。电压变换器、电流变换器的作用是将电压、电流互感器的二次电压、电流变换成与 VFC 的输入信号相匹配的电平, 另外起到隔离屏蔽的作用。浪涌吸收器由 RC 网络构成, 吸收高频干扰信号。电压-频率变换器 VFC 芯片将模拟量变换成具有一定频率脉冲信号, 频率的大小和模拟量电压的大小成比例。光电隔离器实现模拟系统与数字系统的隔离, 具有抗干扰的作用。计数器通常采用 16 位的可编程计数器芯片, 记录一定时间间隔内 VFC 产生的脉冲数, 从而实现模拟量到数字量的转换。

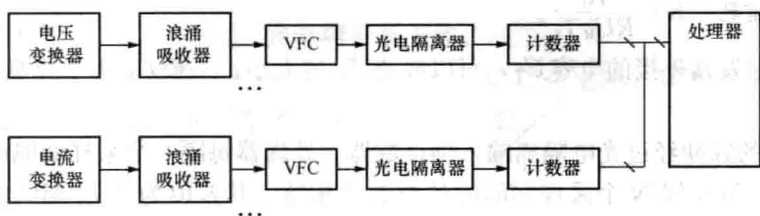


图 1-10 采用 VFC 构成的微机保护数据采集系统原理框图

VFC 器件的构成原理如图 1-11 (a) 所示。图中运算放大器 A1、 $R(R_f)$ 、C 组成一个积分器。运放 A2 为过零电压比较器。开关 S 受单稳态触发器输出控制。U 为被采集的模拟信号, U_{ref} 为与 U 极性相反的基准电压, 且满足 $|U_{ref}/R_f| > |U/R|$ 。

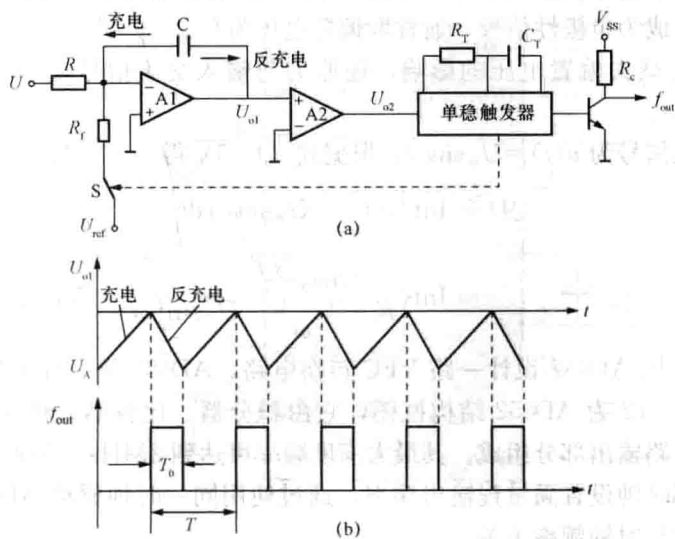


图 1-11 VFC 的构成原理和工作原理

(a) 构成原理; (b) 工作原理

设输入电压 U 为一负电压。当单稳触发器在稳态期间, S 打开。在 U 作用下, 电容器 C 充电, 使 $A1$ 的输出电压 U_{o1} 上升, 当上升至 $U_{o1}=0V$ 时, 过零电压比较器 $A2$ 发生跳变, 触发单稳电路, 使之产生一个宽度为 T_0 的脉冲。此脉冲控制开关 S , 使其与 U_{ref} 接通 T_0 时间。在 T_0 期间, C 反充电, 从而使 U_{o1} 线性地下降到某一电压值。当 T_0 结束时, S 断开, 在负的输入电压作用下, 电容器 C 再次充电, U_{o1} 上升, 当上升至零时, 过零比较器 $A2$ 发生跳变, 触发单稳电路, S 再次闭合, C 再次反充电。如此反复进行下去, 振荡不止。于是可将输入的模拟电压变换为一串等幅脉冲输出, 如图 1-11 (b) 所示。

显然, 其他参数不变时, 当输入电压 U 越大, 积分电容 C 充电越快, 从而使输出脉冲的频率越高。

理论分析得到 VFC 输出脉冲的频率和输入电压的关系为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{R_f}{R U_R T_0} U = KU \quad (1-4)$$

式中: K 为一常数, $K = \frac{R_f}{R U_R T_0}$ 。

改变单稳触发器外接的电容 C_T , 可以改变 T_0 的大小。一般 C_T 用于控制 VFC 的最高工作频率。

VFC 输出的脉冲经过光电隔离输入到计数器。处理器每隔一个采样间隔时间 T_s 读取计数器的计数值, 取相邻 N 个采样间隔的计数数值相减, 其差值为 NT_s 期间的脉冲个数 D , 显然 D 只能取整数。 D 与 NT_s 期间模拟信号的积分值具有对应关系, 即

$$D = \text{Int} \left\{ K \int_{NT_s} U dt \right\} \quad (1-5)$$

当输入的电压为恒定的直流分量时, 根据式 (1-5), 显然有

$$D = \text{Int} \{ K U N T_s \}$$

当输入交流电压信号时, 由于 VFC 是采用单极性工作方式, 为此必须对输入信号叠加一偏置电压, 使之成为单极性信号, 通常取偏置电压为 $U_{\max}/2$ 。当然, 引入偏置电压后, 所读取计数器的值应减去偏置电压的影响, 还原为与输入交流信号大小、符号相对应的采样值。

设输入的电压信号为 $u(t) = U_m \sin \omega t$, 根据式 (1-5) 得

$$\begin{aligned} D &= \text{Int} \left\{ K \int_{t-NT_s}^t U_m \sin \omega t dt \right\} \\ &= \text{Int} \left\{ K \frac{2 \sin \omega \frac{NT_s}{2}}{\omega} U_m \sin \left(\omega t - \frac{NT_s}{2} \right) \right\} \end{aligned}$$

本实验装置采用 AD652 设计一路 VFC 转换电路, AD652 是一种单片集成电荷平衡型 V/F 转换器。图 1-12 为 AD652 结构框图, 它由积分器、比较器、精密电源、D 触发器、锁存器及集电极开路输出部分组成。其最大满度频率可达到 2MHz。AD652 具有以下特点:

(1) 使用外部时钟设置满量程输出频率, 通过使用同一时钟驱动 AD652 并设置计数时间闸门, 转换精度与时钟频率无关。

(2) AD652 在工作时所需的外围器件很少, 仅需一个积分电容器和几个电阻即可。

(3) AD652 内部有一个由缓冲器输出的精密 5V 基准电压, 可供外电路使用。

(4) 时钟输入与 TTL、CMOS 兼容, 输出级为宽范围的开路式集电极 (OC) 输出, 可

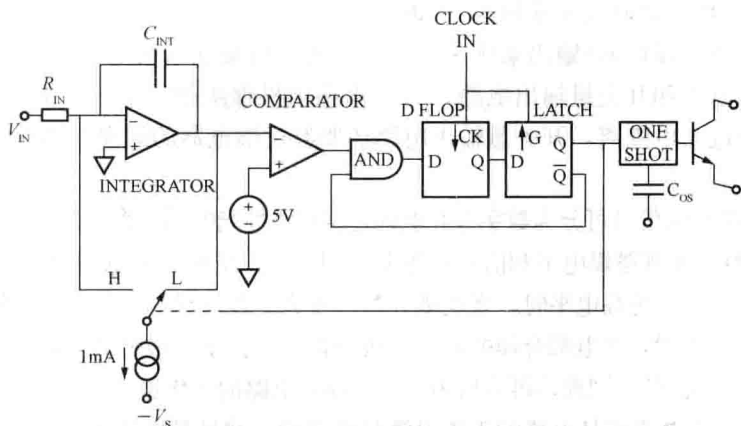


图 1-12 AD652 结构框图

提供足够的电流使 TTL、CMOS、光电耦合器工作。

图 1-13 是本实验装置设计的采用 AD652 的 VFC 转换电路。其频率输出 (VFCFRE) 输入到 DSP 芯片, 利用内部设计计数器记录产生的脉冲数。

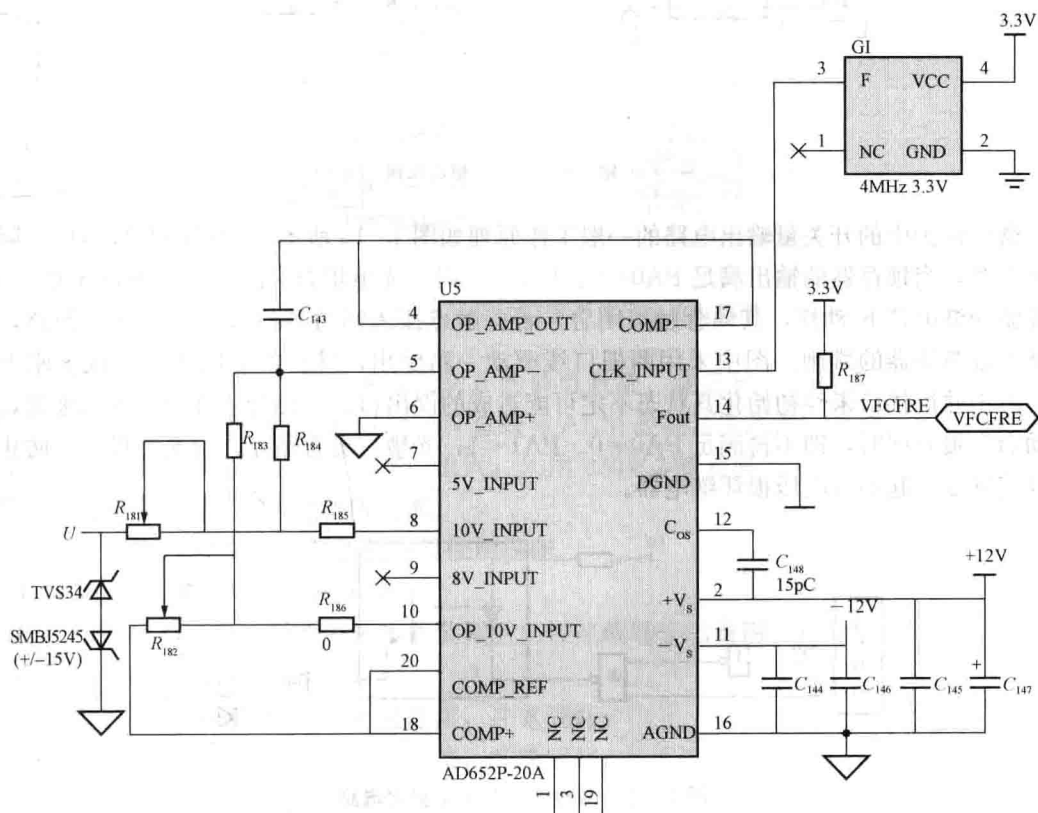


图 1-13 采用 AD652 的 VFC 转换电路原理图

1.2.1.3 微机保护的数字量输入/输出系统

微机保护的数字量输入/输出系统主要包括实现人机交互（按键、LCD 和打印机）功能的电路、开关量输入和开关量输出电路。为了提高微机保护的可靠性，对外连接的输入/输出电路一般都经过光电隔离，开关量输出电路还要经过继电器的隔离，由其提供的空触点驱动跳闸或发信号。

光电耦合器按传输信号可分为数字型光电耦合器和线性光电耦合器。数字型光电耦合器体现在器件的开关特性，实现逻辑电平和信号的控制。图 1-14 是此类光电耦合器的一种典型应用。图 1-14 (a) 中，当 S_1 为高电平时，光电耦合器的发光二极管导通，光敏三极管导通， S_2 为高电平；当 S_1 为低电平时，光电耦合器的发光二极管截止，光敏三极管截止， S_2 为低电平。因此其输出与输入是同相位的。同理，可分析图 1-14 (b) 电路的工作原理，其输出与输入是反相位的。该光电耦合器 A 电路和 B 电路的工作电源是独立的，并且其电压值也可以不相同，因此 A 电路和 B 电路没有电的联系，从而实现了电气隔离，但仍然能够实现信号的传输。

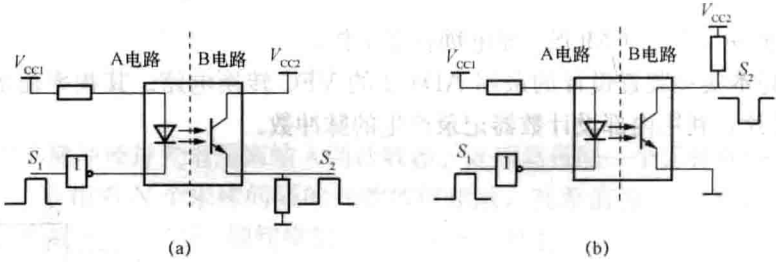


图 1-14 数字型光电耦合器的应用
(a) 输出同相；(b) 输出反相

微机保护中的开关量输出电路的一般工作原理如图 1-15 所示。微机的并行接口实际为一锁存器，当锁存器的输出满足 $PA0=0$ 、 $PA1=1$ 时，光电耦合器的光敏三极管导通，24V 电源驱动继电器 K 动作，其动合触点闭合。若此触点接入断路器控制回路的跳闸回路，则能够实现断路器的跳闸。图中采用两根线驱动一路输出，其目的是防止微机保护刚上电时，由于并行接口未经初始化其状态不定可能造成的误出口。二极管被称为续流二极管，当驱动命令被收回时，即不再满足 $PA0=0$ 、 $PA1=1$ ，光敏三极管截止，续流二极管可防止由于电流突变引起的过电压损坏继电器。

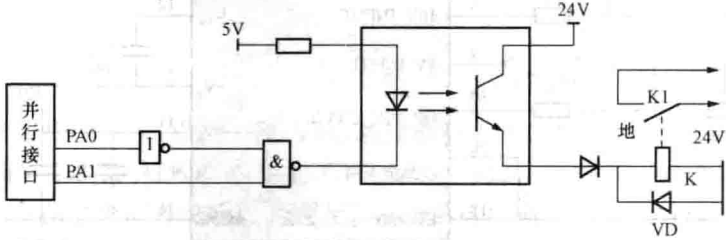


图 1-15 微机保护开关量输出电路

由于 ZPT-100 继电保护实验装置的输入和输出与计算机的内置 I/O 卡相连，在电路设计时，和实际的微机保护装置有所不同。计算机内置 I/O 卡的输出为经过光电耦合器的空触点（对实验装置为开关量输入），同样要求实验装置的输出也为空触点（对计算机系统为