



普通高等教育“十二五”规划教材



电力系统自动化

李岩松 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

电力系统自动化

主编 李岩松

编写 齐 郑 刘 君

主审 张建华 吴文传



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共分九章, 主要内容包括同步发电机的自动准同期、同步发电机励磁自动控制系统及特性分析、电力系统频率及有功功率的自动调节与控制、变电站自动化、配电网自动化、电力系统调度自动化及智能变电站与智能电网。

本书主要作为普通高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材, 也可作为函授教育、高职高专教育的教材, 还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统自动化/李岩松主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 4

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5632-0

I. ①电…* II. 李… III. ①电力系统—自动化—高等学校—教材 I. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第043942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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014年4月第一版 2014年4月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 374千字
定价 29.00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

当前,电力系统自动化已成为电气工程专业的骨干课程。本书所涉及的教学内容涵盖了从自动装置到自动化系统,从调度自动化、变电站自动化、配电自动化到智能变电站,力求将电气工程专业的其他基础课程在本课程中进行综合和发展。在编写过程中,重点强调基本概念和基本原理,结合现场实际应用情况讲述自动化装置和自动化系统的结构和应用。

本书既重视讲解电力系统自动化的传统知识,包括准同期并列、发电机自动励磁系统、发电机调速系统及有功调节等,还跟踪电力系统最新科研应用成果,包括智能电网和智能变电站、D-5000 调度自动化系统、小电流单相接地故障选线技术、配电网故障定位方法等,使学生不仅对经典知识有全面的了解,而且对最新科学知识建立起初步的认识,便于在未来的工作中可以更好地学以致用。

本书由华北电力大学李岩松、齐郑和刘君编写,由李岩松任主编并统稿。全书共九章。其中第二、四、九章由李岩松编写;第一、五、七章由刘君编写;第三、六、八章由齐郑编写。全书承华北电力大学张建华教授、清华大学吴文传教授审阅,并对本书的编写提出许多宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

在本书的编写过程中,得到了各方面的大力支持和帮助。研究生季遥遥、孟璐、曹丽欣、王小虎、杜儒剑、张景明、欧阳进、严宇恒、石云飞、饶志帮助做了大量的录入和校对等工作。在本书的编写过程中,参阅了“参考文献”所列文献,以及国内有关制造厂、研究院、设计院、高等院校编写的说明书、图纸和运行规程等技术资料。本书的编写还得到了国家自然科学基金项目(51277066)和北京市共建项目专项资助。在此,一并表示诚挚谢意!

时间和水平所限,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正,提出宝贵的意见。

编 者

2013 年 12 月

目 录

前言

第一章 概述	1
第二章 电力系统自动装置和系统的软硬件原理	3
第一节 电力系统自动装置和系统的设计方法及电磁兼容	3
第二节 电力系统自动装置和系统的硬件原理	6
第三节 电力系统自动装置和系统的软件算法原理	17
第三章 同步发电机的自动准同期并列	21
第一节 并列操作的概念及分类	21
第二节 准同期并列的基本原理	22
第三节 微机型自动准同期装置	30
第四节 电网之间的准同期并列	38
第四章 同步发电机励磁控制系统及特性分析	41
第一节 概述	41
第二节 同步发电机的励磁控制系统	49
第三节 励磁调节器	54
第四节 同步发电转子磁场的强励与灭磁	57
第五节 励磁控制系统的调节特性	60
第六节 励磁控制系统稳定性	72
第七节 低频振荡与电力系统稳定器(PSS)	81
第五章 电力系统频率及有功功率的自动调节与控制	90
第一节 电力系统的频率特性	90
第二节 调速器及频率调节特性	95
第三节 电力系统调频与自动发电控制	102
第四节 电力系统自动低频减载	106
第六章 变电站综合自动化	116
第一节 变电站综合自动化的概念	116
第二节 变电站综合自动化系统的功能	119
第三节 变电站综合自动化的结构形式	122
第四节 变电站电压、无功综合控制子系统	131
第五节 变电站备用电源自动投入装置	134
第六节 变电站故障录波装置	136
第七节 自动调谐消弧线圈控制装置	138
第八节 小电流接地故障选线装置	141

第九节 变电站综合自动化设计实例·····	144
第七章 电力系统调度自动化 ·····	152
第一节 概述·····	152
第二节 电力系统调度自动化系统·····	153
第三节 电力系统网络拓扑分析·····	158
第四节 电力系统状态估计·····	163
第五节 电力系统静态安全分析·····	172
第八章 配电网自动化系统与远程抄表计费系统 ·····	182
第一节 配电网自动化系统·····	182
第二节 配电网自动化系统的组成·····	187
第三节 配电网自动化系统的通信方式·····	194
第四节 配电网故障定位及隔离技术·····	197
第五节 配电网自动化系统实例·····	204
第六节 远程自动抄表计费系统和负荷控制·····	209
第九章 智能电网与智能变电站 ·····	213
第一节 智能电网·····	213
第二节 智能变电站·····	216
第三节 IEC 61850 标准·····	222
第四节 智能一次设备·····	230
参考文献 ·····	238

第一章 概 述

从 1882 年至今,电力系统已经发展有百余年历史了,电力系统在国民经济中的作用越来越大,已经成为社会发展的基础设施;系统规模越来越大,由最初的区域供电网发展成为全国联网和国家间联网,最终可能会实现洲际联网;新技术和新装备也越来越多地成功应用于电力系统中,使得电力系统的自动化和智能化水平得到了极大地提高。然而,电力系统出现大规模停电事故也呈现了上升趋势,停电事故造成的社会影响和经济损失也越来越大,为此,人们清醒地认识到,必须对电力系统的客观物理规律进行深入的研究,面对各种可能的状况采取有针对性的措施,建立完善的电力系统自动化系统,保证电力系统全天候健康地运行。

根据电力系统正常运行和故障及其影响,可以按照故障后时间将电力系统分为:电磁暂态、暂态稳定、小扰动稳定、长期稳定和系统稳态运行等过程,如图 1-1 所示。针对上述不同过程,电力系统建模和研究方法也有很大的不同,考虑的侧重点也各不同。面向这些过程所采取的自动化手段也不尽相同。

我们知道,电力系统自动化的目的就是为电力系统安全、可靠和经济地运行而服务的。从装备上看,电力系统主要包括电力系统自动装置和电力系统自动化系统,这两类装备是针对电力系统不同的故障动态行为而应用。从图 1-1 可以看出,电力系统电磁暂态过程主要研究故障后的 100ms 以内的电力系统行为,对应的系统装备就是继电保护。电力系统暂态稳定过程主要研究故障后的 10s 以内的电力系统行为,对应的系统装备主要是

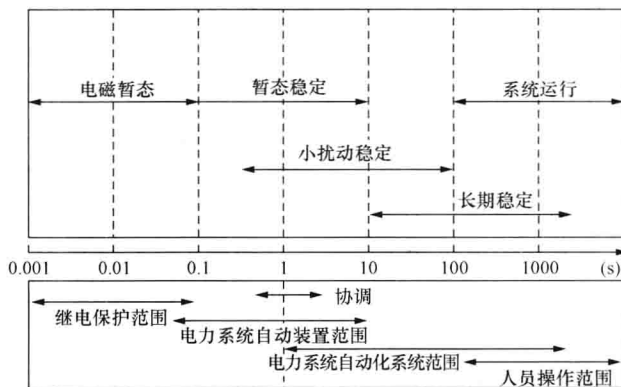


图 1-1 电力系统过程

电力系统自动装置和电力系统自动化系统。面对电力系统小扰动稳定和长期稳定问题,可以通过电力系统自动化系统加以控制。电力系统故障后 10min 以上的电力系统调度工作是调度人员通过调度电力系统自动化系统而完成的。从这里可以看出,电力系统自动化实际上涵盖了除继电保护以外的各类电力系统自动装备。本书的主要内容包括了电力系统自动装置和电力系统自动化系统,从准同期并列、发电机自动励磁、发电机调速系统、低频减载,到调度自动化、变电站自动化、配电自动化和智能变电站等,力求通过学习对电力系统自动化的知识体系有一个完整认识,在将来的实际工作中可以学以致用。

根据教学大纲的要求,本书的主要内容共分为八章。

第二章主要讲述电力系统自动装置和系统的硬件和软件基础知识。结合本科电子技术等其他基础课程,讲述了电力系统自动装置和系统的设计方法;结合计算机技术和典型应用,

讲述了电力系统自动装置和系统的硬件结构和电路；结合信号与系统课程，讲述了电力系统自动装置和系统的软件算法。这章的软硬件知识可以应用于各种自动装置和系统中。

第三章主要讲述了同步发电机的自动准同期并列。介绍了同期并列的基本概念，讲述了准同期的基本原理和整定方法，分析了微机准同期的结构和实现方法，讲述了电网间的同期装置和方法。

第四章主要讲述发电机自动励磁系统。介绍了发电机自动励磁系统在电力系统中的作用；从励磁系统的发展过程讲述了励磁系统的分类和结构；从电力系统应用的角度分析了发电机自动励磁系统的调节特性；结合第二章的电力系统自动装置的软硬件知识，讲述了励磁调节器的结构与算法；应用自动控制理论课程知识，详细分析了自动励磁系统的动态特性及其稳定性；结合电力系统分析课程，分析了含励磁的电力系统动态过程和低频振荡，讲述了电力系统稳定器的作用与实现。

第五章主要讲述了电力系统频率及有功功率的调节和控制。分析了电力系统频率特性；讲述应用广泛的电气—液压调速系统的结构及其调节特性；分析了电力系统的调频方法和自动发电控制；结合电力系统标准，讲述了低频减载原理和整定方法，最后给出了低频减载的整定实例。

第六章主要讲述了变电站综合自动化。分析了变电站综合自动化系统的概念、功能和结构形式；讲述了变电站综合自动化系统中的电压和无功综合控制系统、备用电源自动投入装置、故障录波装置、自动调谐消弧线圈控制装置和小电流接地故障选线装置等，最后讲述了变电站综合自动化设计实例。

第七章主要讲述了电力系统调度自动化。分析了调度自动化的作用和电力系统各级调度的主要分工；讲述了最新的调度自动化系统 D-5000；结合应用实例，讲述了电力系统网络拓扑分析的方法和实现；从数学的角度推导了状态估计的基本方法，结合实例给出了电力系统状态估计方法；讲述了电力系统静态安全分析。

第八章主要讲述了配电网自动化系统与远程抄表计费系统。介绍了配电网自动化系统的组成和通信方式；讲述了配电网故障定位及隔离技术；分析了配电网自动化系统实例；讲述了远程自动抄表计费系统和负荷控制。

第九章主要讲述了智能电网和智能变电站。讲述了智能电网的架构和作用；结合电力系统行业标准，介绍了国内现有的智能变电站的结构；讲述了智能变电站的核心—IEC 61850 标准；讲述了现有电子式互感器的原理和结构，介绍了智能断路器和智能变压器。

本书在讲述中注重与其他课程的衔接，通过学习力求使所涉及的基础知识在本书中可以融会贯通，为将来的工作打好基础。

第二章 电力系统自动装置和系统的软硬件原理

第一节 电力系统自动装置和系统的设计方法及电磁兼容

随着电力系统自动化的快速发展,先进的电子和计算机技术大量应用于电力系统自动化系统中。无论是自动准同期装置、励磁自动控制系统和同步发电机电气液压调速系统,还是变电站综合自动化、配电自动化和智能变电站都是基于先进、成熟的电子系统来实现相应的电力系统自动化功能的。因此,掌握电力系统自动装置和系统的设计、开发和实现方法是很必要的。

一、电力系统自动装置和系统的设计方法

设计一个电力系统自动装置和系统,首先必须要明确系统的设计任务和要求,并以此为基础进行系统方案的比较和选择,然后对方案中的各部分进行单元电路的设计、参数计算和元器件的选择,再利用 EDA 技术对所设计的单元电路进行仿真,最后将各单元电路进行连接,绘制出一个符合设计要求的系统电路图,最后进行系统整体组装和调试。

1. 明确系统的设计任务和要求

要对电力系统自动装置和系统的设计任务以及该系统的工作环境进行深入具体的分析,充分了解系统的性能、指标、内容及技术要求,对于系统的关键技术指标一定要量化,明确系统必须完成的任务和设计过程中必须注意的问题,最后要将各项设计内容和技术要求落实到设计文档中。

2. 方案的比较和选择

在充分了解系统工作任务和环境的基础上,进行任务分解,把系统要完成的任务分配给若干个单元电路,绘制出能表示出各单元的系统原理框图。必须指出,实现同一任务的方案并不是唯一的,可以进行多个方案的设计比较。方案选择的重要任务是基于所掌握的知识、资料和经验,针对系统的任务、要求和条件完成系统的功能设计,争取使设计的方案达到设计合理、可靠、功能齐全、技术先进和性价比高的效果。在对系统方案不断进行可行性和优缺点分析的基础上,最终确定系统方案,设计出完整的系统框图。

3. 单元电路的设计、参数计算和元器件选择

根据系统指标和框图,进行单元电路设计、参数计算和元器件选择。

(1) 单元电路的设计。必须明确本单元电路的任务,详细拟订出单元电路的性能指标,与前后级电路的关系,分析电路的实现形式。具体设计时,可以参考成熟的先进电路,也可在其基础上进行改进和创新,但前提是必须保证满足单元电路性能和指标的要求。在这个过程中,仅考虑单元电路本身的合理性是不够的,必须考虑与相邻电路之间的配合,注意各部分的输入信号、输出信号和控制信号之间的关系。

(2) 电路参数计算。为了保证单元电路到达功能指标要求,需要应用电子技术知识对参数进行计算,如放大电路的增益、滤波器中各元件参数、振荡器中各元件数值和频率等。只要很好地理解和掌握电路的工作原理,正确地应用计算方法,计算参数才能满足要求。需要指出的是,参数计算时,同一个电路可能会有多组数据,这时要注意选择一套既能满足电路

要求，又能在实际中可行和易于实现的参数。

(3) 元器件的选择。在所设计电路中，最常见的元器件就是电阻和电容。电阻和电容的种类非常多，电阻有碳膜、金属膜、线绕型以及半导体型等类型，电容有云母、陶瓷、聚酯薄膜、聚苯乙烯、聚四氟乙烯、聚丙烯、钽电容、电解质电容等类型，正确选择电阻和电容对于实现电路功能至关重要。不同的电路对电阻、电容的要求也不尽相同。如滤波电路中常用大容量电解电容，为了滤除高频信号，通常还需要并联小容量的陶瓷电容。在精密仪器中通常采用漏电很小的钽电容。要根据电路要求选择性能和参数都合适的电阻、电容，并注意精度、功耗、容量、频率和耐压范围满足电路要求。此外电路中可能还有半导体分立元件，如二极管、三极管、场效应管、光电二极管、光电三极管、晶闸管等，要根据具体用途进行选择。如选择三极管时，要注意选择 PNP 管还是 NPN 管，是高频管还是低频管，是大功率管还是小功率管等。在所设计电路中通常会用到集成电路，集成电路分为模拟集成电路和数字集成电路。器件的型号、功能、电特性都可从厂家官方网站上下载的相关手册中查得。选择集成电路不仅要在功能和特性上实现设计方案，而且要满足功耗、电压、速度、价格等多方面的要求。

4. 电路仿真

利用 EDA 软件对所设计的系统进行仿真分析，不但能克服实验室在元器件品种、数量和规格上的限制，还能避免原材料的消耗和使用中仪器损坏等不利因素，因此，电路仿真已经成为系统设计的必要方法和手段。运用 EDA 软件对设计的单元电路进行实物模拟和调试，以分析检查所设计的电路是否达到设计要求的技术指标，如果检查结果不理想，可通过改变电路参数甚至电路结构，使整个单元电路的性能达到最佳。通过对单元电路的连接，可以对系统进行仿真，直至得到一个最佳方案。常见的电路仿真软件有 EWB、Protel、Orcad、PSPICE、Multisim 等。

5. 电路原理图和线路板图的绘制

系统的电路原理图和线路板图是最重要的设计文件，要求设计文件完全实现前面所进行的设计内容，主要在计算机电路设计软件中进行。目前应用比较广泛的电路绘制软件有 Protel、Cadence、Altium Designer⁶ 等。

在设计电路原理图时，要求布局合理、排列均匀、图面清晰、有利于原理图的理解，可以按照电路单元功能进行分页绘制。要注意信号的流向，一般是从输入端或者信号源画起，按照信号从左到右、从上到下的方向依次绘制电路。图形符号要标准，在图中适当添加标注。注意运行 ERC（电气规则检查）对设计的原理图进行检查，以防止各种物理或逻辑冲突。

在设计好原理图后可以在同一软件（也可以在不同软件）中进行线路板图的设计，这样可以实现原理图到线路板的完全导入。在设计电路板图时，要注意各种连接线的线宽和线距等。如信号线的线宽与电源线的线宽不一样，总线间的线距与输入 I/O 的线距不一样等。元器件的摆放既要考虑连接线绘制的方便，也要考虑电磁兼容等问题。在设计过程中可以使用软件中具有优化功能，注意运行 DRC（设计规则检查）进行设计错误的检查。

6. 系统的组装和调试

一个性能优良、可靠性高的系统，除了先进合理的设计，高质量的组装和调试也是非常关键的环节。组装主要包括电路板的焊接技术和系统组装技术。组装系统要求高度认真和细

心,任何马虎都会给后续的调试工作留下后患,甚至会危及整个系统的性能指标。通常调试方法有两种:边组装边调试的方法和整个系统总体调试的方法。常用的调试步骤有:①通电前检查。主要检查电路各部分接线是否正确,电源、地线和信号线之间是否短路等。②通电检查。确认电源是否符合要求,接通电源后各部分器件是否有异常,包括有无冒烟、异味等。③分模块调试。按照模块的性能指标,运行各种仪器和仪表测试电路的性能和观察波形等。④系统联调。观察各模块连接后的信号关系,检查系统的性能参数,分析测量数据和波形是否符合设计要求等。

二、电力系统自动装置和系统的电磁兼容技术

我们所设计的电力系统自动装置和系统最终是要应用于变电站、发电厂等现场实际环境中。这些应用场所的电磁环境非常恶劣,因此,要求电力系统自动装置和系统具有电磁兼容(EMC)能力;也就是这些自动装置和系统既不受周围电磁环境的影响,又不给环境以这种影响,它们不会因为电磁环境导致性能变差或者产生误动作,可以完全可以按照原设计可靠地工作。我国电力系统强制规定:安装在变电站的继电保护装置和自动装置等必须满足快速瞬变干扰试验、脉冲群干扰试验、静电放电试验和辐射电磁场骚扰试验等多项电磁兼容检测。可见,电磁兼容技术对于自动装置和系统的可靠性是至关重要的。

在研究电磁干扰时,要分析形成干扰的三个要素。所有形成的电磁干扰都是由这三个基本要素组合而产生的。它们是:电磁干扰源、对该干扰能量敏感的接收器、将电磁干扰源传输到接收器的媒介即传输通道。相应的抑制措施也是由这三个要素着手解决。

自动装置和系统常见的干扰是电源干扰、电磁场干扰和通道干扰。需要指出的是,对于自动装置和系统而言,电磁干扰源不仅仅是来自于装置外部,在装置内部的电子系统也存在相互影响的电磁干扰源。

电磁兼容的解决措施一般用在传输通道的末端或中间,用以消除或减弱干扰源的辐射或系统对干扰噪声的灵敏度。抑制措施加在电磁干扰源、接收器还是传输通道上,主要取决于技术上的限制和成本。

1. 在电磁干扰源处采取措施

考虑到一个单独的电磁干扰源可能会影响多台邻近的许多电子设备或系统,通常会把抑制电磁干扰源的设备或措施加到电磁干扰源或者靠近电磁干扰源的位置,这种方法对于固定或可控的电磁干扰源是很有效的。一般是首先找到电磁干扰源,然后分析电磁干扰源的特性以及采取相应的抑制措施。

寻找电磁干扰源的基本原则之一就是,电流和电压发生突变的位置通常就是电磁干扰源。一般而言,电流变化大或者大电流工作场合,就是产生电感性耦合噪声的主要根源;电压变化大或者大电压工作场合就是电容性耦合噪声的主要根源;公共阻抗耦合噪声也是由于变化剧烈的电流在公共阻抗上所产生的压降所造成的。这里所说的大电流和大电压是指相对于电子系统工作环境而言相对比较大的。

在自动装置中会大量应用大规模数字集成电路,这种器件的工作电流变化很大,很容易形成噪声电流。例如:HYM71V16635HCT8P 动态 RAM 工作时会产生 120mA 的冲击电流,如果 16 片这样的芯片一起工作时冲击电流就可能会达到 1.92A,而这个冲击电流的变化是 20ns,这种电流突变是很陡峭的。对于这种电流变化,稳压电源是很难稳定跟踪调节的。对于这类噪声电流,可以在集成电路附近加上旁路电容进行抑制。通常,在每一片集成

电路的电源处并联一个 $0.10\mu\text{F}$ 的陶瓷电容, 在电路板的电源处并联一个 $100\mu\text{F}$ 电解电容和一个 $0.05\mu\text{F}$ 陶瓷电容。

2. 在接收器上采取措施

接收器所接受到的噪声大致有: 导线传导的耦合噪声、经公共阻抗的耦合噪声和电磁场的耦合噪声。通常可以采取切断噪声通道或者削弱噪声的方法, 以达到抑制噪声的目的。

(1) 抑制由导线传导的噪声, 最常用的方法就是串接滤波器。滤波器有 RC 或 LC 无源滤波器和基于运算放大器的有源滤波器, 滤波器类型有巴特沃斯型、契比雪夫型和贝塞尔型, 可以根据具体电路要求设计不同的滤波器。设计滤波器时首先要明确滤波器的技术指标, 如截止频率、通频频宽等, 之后参考相关的设计公式和计算曲线进行设计和计算, 设计完成后可以在 EDA 软件上进行仿真, 以检验是否符合设计要求。

(2) 抑制经公共阻抗的耦合噪声的方法主要有两种: 一种是采取一点接地, 另一种是尽可能降低公共阻抗。一点接地方法是把各回路的接地线集中到一点接地, 这样既保证系统有统一的地电位, 又避免地线形成公共阻抗。降低公共阻抗的方法是在设计印刷电路板时将地线尽可能地做短做粗, 必要时可用大面积的铜箔作为地线来降低阻抗。

(3) 抑制电容性耦合噪声的最基本方法就是减少与噪声源之间的分布电容。电容性耦合噪声是由于电力线的作用, 从一个方向向另一个方向传送静电变化而形成的。通常采用静电屏蔽的方法, 可以采用屏蔽罩、屏蔽板或者屏蔽线等手段。

(4) 抑制电感性耦合噪声的方法就是采用电磁屏蔽。电感性耦合噪声是两根导线通过磁力线耦合而形成的。电磁屏蔽主要是利用低阻抗的金属屏蔽材料内流过的电流来防止频率较高的磁通干扰。它与静电屏蔽的区别在于电磁屏蔽必须没有缝隙地包围受屏蔽体, 而静电屏蔽则没有这么严格, 所用的金属材料只要求导电性能好。

3. 在传输通道上采取措施

电压或电流的变化通过导体传输时有两种形态, 即“差模”和“共模”。设备的电源线、信号线等通信线、与其他设备或外围设备相互交换的通信线路等, 至少有两根导体, 这两根导体作为信号传输的往返线路。但是在这两根导线之外通常还有“第三导体”, 这就是“地线”。干扰电压或电流分为两种: 一种是在两根导体之间往返传输, 这就是“差模”电压或电流; 另一种是两根导体作为去路, 地线作为返回路传输, 这就是“共模”电压或电流。在电子信号的长线传输过程中, 由于发送端和接收端之间存在接地的电位差, 所以会产生差模干扰噪声。为了保证信号传输的可靠性, 采用绝缘隔离的传输方式, 常见的方法有变压器耦合隔离和光电耦合隔离等措施。这些方法的优点是能够抑制尖峰脉冲及其各种噪声的干扰, 具有很强的抗干扰能力。

第二节 电力系统自动装置和系统的硬件原理

电力系统自动装置和系统的应用对象各有不同, 不过, 从硬件结构上基本上大同小异, 所不同的是面向应用对象的软件及硬件结构的规模与性能不同, 不同的应用对象采用不同的控制软件来实现, 不同的使用场合可以选择不同的硬件规模和性能。电力系统自动装置和系统的典型的硬件结构如图 2-1 所示, 主要包括模拟量输入/输出回路、微机系统、开关量输入/输出回路、人机对话接口回路、通信回路和电源等。

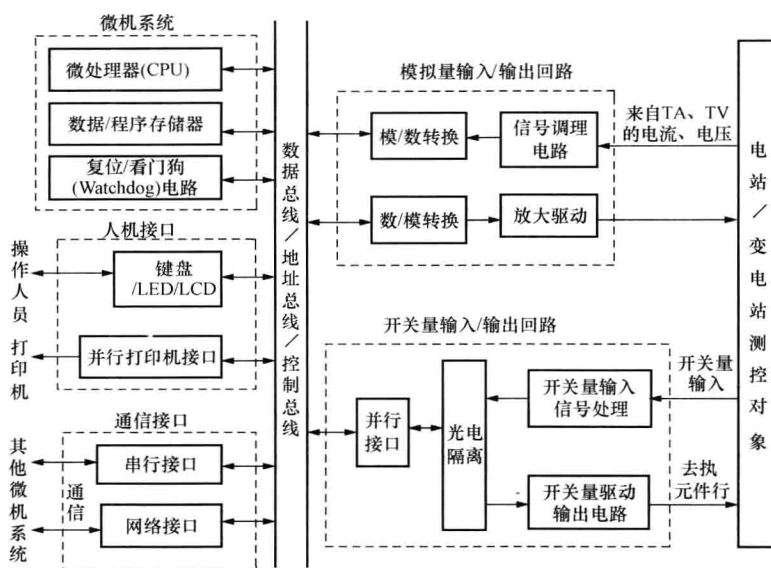


图 2-1 电力系统自动装置和系统的典型的硬件结构图

一、微机系统

电力系统自动装置和系统的硬件系统是基于数字核心部分而构成的。目前电力自动化装置市场上呈现多种多样的微机系统，但它们具有一定的共性，一般由微处理器（CPU）、存储器、定时器/计数器、Watchdog 等组成。微处理器就是集成在一片大规模集成电路上的运算器和控制器。从功能上讲，微处理器是微型机的核心部件，但它本身不能当计算机使用。用微处理器作 CPU 的计算机就是微型机，当然它还需配备一定容量的存储器、输入/输出设备的接口电路及系统总线，才能组成一台计算机。把 CPU、存储器和某些 I/O 接口电路集成在一块大规模集成芯片上的微型机称为单片微型机，简称单片机。在电力系统自动化系统的发展过程中，不断有各种装置推向市场，按数字核心部分来分有三种类型：以单片机为核心、DSP 为核心和以工业控制机（简称工控机）为核心。

1. 基于单片机的微机系统

单片机自身集成有 CPU、随机存储器、只读存储器、定时器/计数器、I/O 接口等主要部件，因此可以认为单片机是一台完整的微型计算机，通过执行指令完成一些具体的功能。

以 8051 为代表的 MCS-51 系列单片机最早由 Intel 公司推出，其后多家公司购买了 8051 内核，使得以 8051 为内核的 MCS 系列单片机在世界产量最大，应用也最广泛。Atmel 公司的 AT89 系列单片机是在 8051 单片机的基础上内置 Flash 存储器，用户可以随时编程和修改，设计更加容易和方便升级。关于 8051 单片机的有关内容已经有专门的课程进行讲述，这里就不再重复。除了 MCS-51 单片机以外，还有其他类型的单片机可以应用于不同场合。

TI 公司 MSP430 系列单片机是一种超低功耗的 16 位单片机，内置有 A/D 转换器、串行通信接口、硬件乘法器、LCD 驱动电路，具有很高的抗干扰能力，比较适合智能仪表、便携式设备等方面的应用。

Motorola 是世界上著名的单片机厂家，其典型的代表产品有：8 位单片机 M6805、

M68HC05 系列, 8 位增强单片机型 M68HC11、M68HC12, 16 位单片机 M68HC16, 32 位单片机 M683XX。Motorola 单片机的特点之一就是在同样计算速度下所使用的时钟频率较其他单片机要低, 因而具有高频噪声低和抗干扰能力强的特点, 适合于环境比较恶劣的工业控制领域。

Micro Chip 单片机的主要产品有 PIC16C 和 PIC17C 系列的 8 位单片机, 该单片机采用 RISC 结构, 指令简单, 采用 Harvard 双总线结构, 运算速度快, 工作电压低, 功耗低, 具有较大的输入/输出直接驱动能力, 体积小, 比较适合于用量大、档次低、价格敏感的产品。此外, 还有一些单片机, 如: EPSON 的 SMC62、SMC63、SMC60 和 SMC88 等系列单片机, 华邦 W77、W78 系列单片机, 东芝单片机等。

2. 基于 DSP 的微机系统

计算机的总线结构可以分为两种, 一种是冯·诺依曼结构。这种结构的特点是程序和数据共用一个存储空间, 统一编址, 依靠指令计数器提供的地址来区分是指令数据还是地址, 如图 2-2 所示。由于对数据和程序进行分时读写, 执行速度慢, 数据吞吐量低。不过, 半导体工艺的飞速发展克服了这一缺陷; 同时, 由于这一结构使计算机结构得到简化, 已经成为了计算机发展的一个标准, 以 MCS-51 单片机为代表的单片机就是这种计算机结构。然而, 这种结构并不适用于高度实时要求的数字信号处理。尤其是电力系统越来越要求自动装置和系统具有快速实时处理能力, 单片机显然不能担任实现这种要求的主处理器, 这就需要 DSP 处理器。

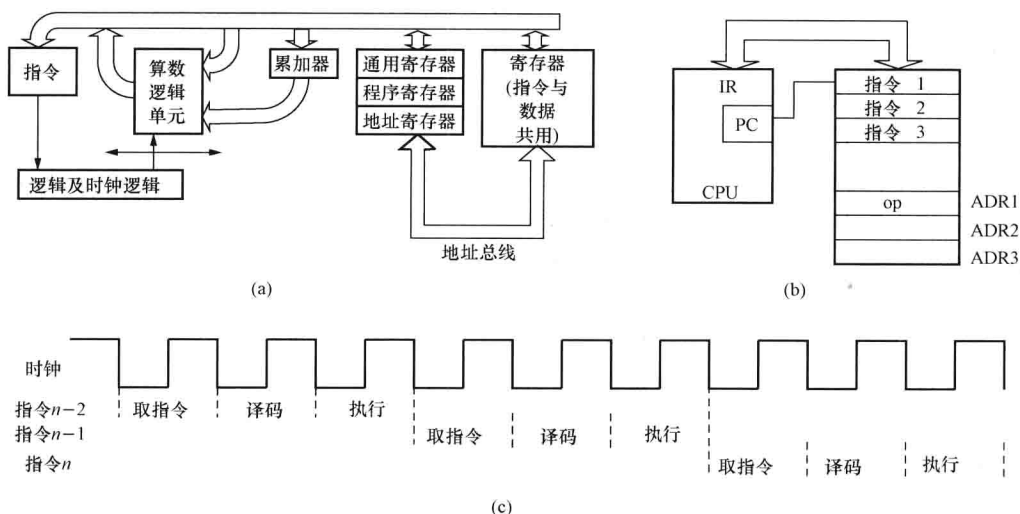


图 2-2 冯·诺依曼结构

(a) 采用冯·诺依曼结构的处理器; (b) 从存储器取指令的过程; (c) 指令流的定时关系

DSP 处理器在计算机总线上采用另一种结构—哈佛结构。与冯·诺依曼结构相比, 其主要特点是程序和数据具有独立的存储空间, 有着各自独立的程序总线 and 数据总线, 如图 2-3 所示。显然这使得计算机结构变得复杂, 但由于可以同时为数据和程序进行寻址, 大大提高了数据处理能力, 非常适用于实时信号处理。

DSP 主要特点可以概括为以下八项:

(1) 哈佛结构和改进哈佛结构。DSP 从哈佛结构发展到改进哈佛结构, 它提供四条总线的能力, 即在一个指令周期中, DSP 可以取下一条指令, 完成两个数据的传输, 并把数据移入或移出内部存储器, 而这些均不占用 CPU 计算时间, 且在一个指令周期内完成, 减少了访问冲突, 从而获得高速运算能力。

(2) 流水线技术。取指令操作和执行指令操作重叠进行。一般 DSP 都具有二到三级流水线以及相对快速的中断时间。

(3) 硬件支持的运算指令。DSP 直接支持硬件乘法器, 使得乘除法运算指令在单指令周期内完成。这有利于完成大负荷的复杂数学运算。通常 DSP 的指令周期从几纳秒到几十纳秒不等。

(4) 支持灵活的寻址方式。DSP 支持如循环寻址、位翻转寻址等适合数字信号处理算法的特殊寻址方式。采用这些寻址方式可大大简化数字信号处理算法的实现, 加快运算速度。

(5) 特殊的 DSP 指令。在 DSP 器件中, 通常有些针对数字信号处理算法的特殊指令, 例如: 在单指令周期中完成加载寄存器、移动数据同时进行累加操作。

(6) 针对寄存器文件和累加器的优化。与前面提到的普通微控制器不同, DSP 是使用多种专用寄存器文件, 为高速运算提供优化。许多 DSP 还提供很大的累加器, 并可对数据溢出等异常情况进行处理。

(7) 拥有简便的内存接口。很多 DSP 为了避免使用大型缓冲器以及复杂的内存接口, 以尽可能简化电路设计, 减少内存访问。许多 DSP 还有较大的片上内存和片内快闪存储器, 进一步加快存储器访问速度, 减少外围电路的复杂程度。

(8) 可灵活构成并行处理系统。并行处理是计算机技术发展的一个重要方向, 现在许多 DSP 都提供了用于直接进行并行处理器连接的端口。还有一些 DSP 处理器提供了高速并行处理所需的独立总线的支持, 使其非常容易构成多 DSP 并行处理系统。

由于 DSP 具有先进的内核结构、高速运算能力以及与实时信号处理相适应的寻址方式等许多方面的优良特性, 使许多过去由于微处理器性能等因素而无法实现的电力系统应用算法可以通过 DSP 来轻松完成。目前国际著名的 DSP 厂家及其典型 DSP 有: 美国德州仪器公司 TI (Texas Instruments) 的 TMS320 系列 DSP 芯片, 包括 TMS320 C2000、TMS320 C3000、TMS320 C5000、TMS320 C6000, 视频 PSD 芯片 DM642、DM6437、DM6467, 双核处理器 OMAP3530 等; ADI 公司的定点 DSP 有 ADSP2101/2103/2105、ADSP2111/2115、ADSP2126/2162/2164 以及 Blackfin 系列, 浮点 DSP 有 ADSP21000/21020、AD-

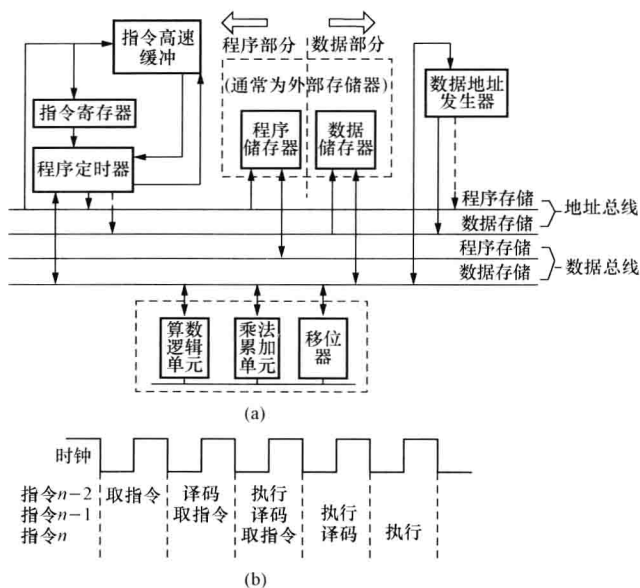


图 2-3 哈佛结构

(a) 采用哈佛结构的 DSP 处理器; (b) 指令流的定时关系

SP21060/21062 系列等; Freescale 公司的 DSP 芯片有 MC56001、MC96002、DSP53611、DSP56800、DSP563XX 和 MSC8101 等; Motorola 公司的 DSP 芯片有 MC56001、MC96002 和 MC56002 等。

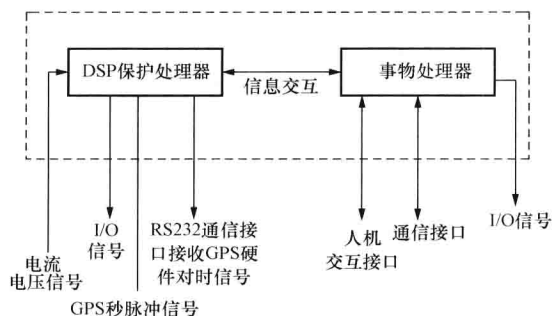


图 2-4 DSP 典型应用结构

国内很早就开始研究将 DSP 应用到继电保护中去, 已有不少微机装置的生产厂家相继推出以 DSP 为核心所构成的微机保护和自动装置, 其典型结构如图 2-4 所示。

在这种结构中, DSP 主要承担实时数据的采集以及实现装置功能, 而将人机接口、网络通信、历史数据追忆等功能均交给监控管理 CPU 如单片机来完成。这样, 将装置功能和其他扩展功能分离, 一方面可以使 DSP 更专注于完成装置算法, 降低

软件设计的复杂程度以减少不必要的失误。另一方面, 扩展功能可由更擅长于网络通信、人机接口等功能的单片机等来完成, 做到各施所长。

3. 基于工控机的微机系统

工控机是具有一个国际通用标准总线并能构成集散控制系统 (DCS) 的工业控制微机。在这种工控机的插槽里可以插入适合自己总线 (如 ISA、PCI 等总线) 系统的 CPU、存储器、I/O、通信及电源模板等。因此它本身就可以构成一个测控单元, 同时具有开放式扩展功能, 能与其他工控机、主机等构成一个集散控制系统。

工控机与普通的微机很类似, 工控机为了适应工业测控要求, 取消了微机中的大主板, 改成通用的底板总线插槽系统, 将大主板分为几块插件, 如 CPU、存储器等插板, 改换工业用电源, 密封机箱, 加上内部正压送风, 配上相应的工业用软件, 并在可靠性、抗干扰能力及模板设计等方面采取相应措施, 如机箱采用全金属结构, 如图 2-5 所示。

工控机具有如下六个主要优点:

(1) 具有丰富的过程输入/输出功能。

工控机必须具有与工业监控系统紧密结合的, 面向控制应用且有与各种生产工艺过程相匹配的组成部分, 才能完成各种设备和工艺装置的监控任务。因此除了计算机的基本部分如存储器外还必须丰富的过程输入/输出功能的插板 (或称接口板)。对于工控机而言, 总线不在于理论上有多先进, 而在于为这种总线研制的各种输入/输出功能模板的数量和种类的丰富程度。

(2) 实时性。工控机应具有时间驱动和事件驱动的能力, 要能对生产过程工况变化实时地进行监控, 当过程参数出现偏差甚至故障时能迅速响应、判断, 并及时处理。为此, 需配

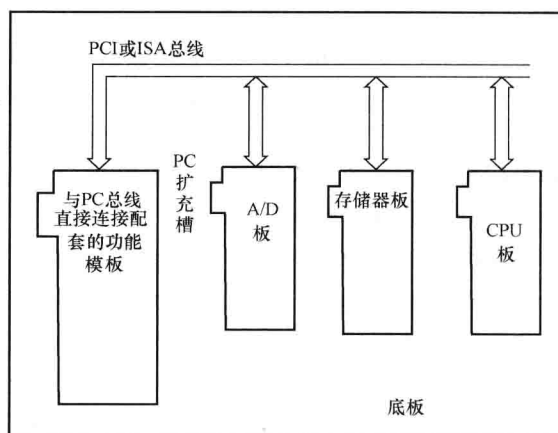


图 2-5 PCI 和 ISA 总线工控机的示意

有实时操作系统、过程中断系统等,否则工控机就无法很好地执行工业控制任务。

(3) 高可靠性。一般工业监控机是连续不停地工作,因此要求工控机可靠性尽可能地高,故障率低,即平均无故障工作时间(MTBF)不应低于数千至上万小时;短的故障修复时间(MTTR)运行效率高,一年时间内运行时间所占比率为99%以上。

(4) 环境适应性。工控机必须适应恶劣的工业环境,如适应高温、高湿、腐蚀、振动冲击、灰尘等环境。要求工控机有极高的电磁兼容性、高抗干扰能力和共模抑制能力。

(5) 丰富的应用软件。目前工控机软件正向模块化、组态化发展,而这就要求正确建立反映生产过程规律的数学模型,建立模型和标准控制算法。

(6) 技术综合性。工控机原本就是一个系统工程问题,除了计算机的基本部分外,需要解决如何与被测控对象建立接口关系,如何适应复杂的工业环境及如何与工艺过程结合等一系列问题。这里涉及专业多,例如过程知识、测量技术、计算机技术、通信技术和自动控制技术等,因此工控机综合性强。

由于工控机内部采用标准结构,内部各功能模块一般采用如STD、VME以及CompactPCI等国际标准总线来连接。这种结构的优点在于产品的开发周期短,通用性和互换性强,很容易升级换代。而且,由于所采用工业控制机通常为专业厂家生产,其可靠性电和可维护性均能很好地满足工业现场的要求。另外,采用工控机作为数字核心微机装置紧跟世界计算机技术的发展趋势,充分利用计算机技术飞速发展所带来的好处。

二、模拟量输入回路

电力系统自动装置和系统所采集的电力系统测控对象的电流、电压、有功功率、无功功率、温度等都属于模拟量。模拟量的输入电路是自动化装置中很重要的电路,自动装置的动作速度和测量精度等性能都与该电路密切相关。模拟量输入电路的主要作用是隔离、规范输入电压及完成模数变换,以便与CPU接口完成数据采集任务。

根据模数转换原理的不同,自动装置中模拟量输入电路有两种方式,一是基于A/D转换方式,它是直接将模拟量转变为数字量的转换方式;二是利用电压频率变换(VFC)原理进行模数转换方式,它是将模拟量电压先转换为频率脉冲量,通过脉冲计数转换为数字量的一种变换方式。

1. 基于A/D转换的模拟量输入电路

一个模拟量从测控对象的主回路到微机系统的内存,中间要经过多个转换环节和滤波环节。典型的模拟量输入电路的结构框图如图2-6所示,主要包括电压形成电路、低通滤波电路、采样保持、多路转换开关及A/D转换芯片五部分。

(1) 电压形成电路。自动化装置常从电流互感器(TA)和电压互感器(TV)取得信息,但这些互感器的二次侧电流或电压量不能适应A/D转换器的输入范围要求,故需对它们进行变换,其典型原理图如图2-7所示。

一般采用中间变换器将由一次设备电压互感器二次侧引来的电压进一步降低,将一次设备电流互感器二次侧引来的电流进一步降压并变成交流电压。再经低通滤波器及双向限幅电路将经中间变换器降低或变换后的电压变成后面环节中A/D转换芯片所允许的电压。一般模数转换芯片要求输入信号电压为 $\pm 5\text{V}$ 或 $\pm 10\text{V}$,由此可以确定上述各种中间变换器的变比。

电压形成电路除了起电量变换作用外,另一个重要作用是将一次设备的TA、TV的二