第一章 绪 论

第一节 电力系统运行与调度自动化

电力系统是由发电厂、输电线路、配电系统及负荷等组成，并由调度中心对全系统的运行进行统一的管理。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，对电能生产的需求不断增长，因而发电设备的装机容量不断增长，电网结构和运行方式越来越复杂，人们对电能质量的要求也越来越高。为了保证供电的质量和电力系统的可靠性和经济性，系统的调度控制中心必须及时而准确地掌握全面的运行情况，随时进行分析，作出正确的判断和决策，必要时采取相应的措施，及时处理事故和异常情况，以保证电力系统安全、经济、可靠地运行。

对电力系统运行的基本要求是：

(1) 保证安全可靠地供电；

(2) 要有合格的电能质量；

(3) 要有良好的经济性。

要实现这些基本要求，除了提高电力设备的可靠性水平，配备足够的备用容量，提高运行人员的素质，采用继电保护和自动装置等外，采用电网调度自动化系统也是一个极为重要的措施。

电力系统运行的可靠性及其电能的质量，与自动化系统的水平有着密切的联系。电力系统是一个大系统，电能的生产、输送及分配是在一个辽阔的区域内进行的，加上电磁过程本身的快速性，所以对电力系统运行控制的自动化系统提出了非常高的要求。

电力系统的自动化系统由信息就地处理的自动化系统和信息集中处理的自动化系统两部分组成。

信息就地处理的自动化系统的特点是能对电力系统的情况作出快速的反应。如高压输电线上发生短路故障时，要求继电保护快速而及时地切除故障，保证系统稳定；而同步发电机的励磁自动调节系统，在电力系统正常运行时，可以保护系统的电压质量和无功出力的平衡，在故障时可以提高系统的稳定水平；按频率自动减负荷装置能在电力系统出现严重的有功缺额时，快速切除一些较为次要的负荷，以免造成系统的频率崩溃。以上这些就地处理装置，其最大的优点是能对系统中的情况作出快速的反应，尤其是在电力系统发生故障时，其作用更为明显。但由于其获得的信息有局限性，因而不能以全局的角度来处理问题。如频率及有功功率自动调节装置，虽然可以跟踪负荷的变化，但不能实现有功出力的经济分配。另外，信息就地处理自动装置一般只能“事后”处理出现的事件，因而不能“事先”从全局的角度对系统的安全性作出全面而精确的评价，故有其局限性。

信息集中处理的自动化系统（即电网调度自动化系统），可以通过设置在各发电厂和变电所的远动终端(RTU）采集电网运行的实时信息，通过信道传输到设置在调度中心的主站 MS)，主站根据收集到的全网信息，对电网的运行状态进行安全性分析、负荷预

需要全本请访问 www.ertongbook.com

测、自动发电控制及经济调度控制等。当系统发生故障，继电保护装置动作切除故障线路后，调度自动化系统便可将继电保护和断路器的动作状态采集后送到调度员的监视屏幕和调度模拟屏显示器上。调度员在掌握这些信息后可以分析故障的原因，并采取相应的措施使电网恢复供电。但是由于信息的采集、传输需要一定的时间，所以目前在发生系统故障时还不可能依靠信息集中处理系统来切除故障。

信息就地处理系统和信息集中处理系统各自有其特点,互相补充而不能替代,但以往这两个系统的联系不够紧密。随着微机保护、变电所综合自动化等技术的发展,两个信息处理系统之间的相互联系必然会更加紧密,如微机保护的定值可以远方设置,并随着系统运行状态的改变而改变，可以使保护的定值总是处于最佳状态。基于 GPS(全球卫星定位系统)的新一代动态安全分析与监测系统技术、通信技术、DSP技术以及电力系统的动态电量测量和在线参数辨识等关键技术的发展，已给电力系统动态监测创造了必要的条件。可以预料，随着计算机技术和通信技术的发展，电力系统的自动化技术将发展到一个新的水平。

第二节　电网的分层调度和管理

一、电力系统的分层调度

电力系统是一个分布面广、设备量大、信息参数多的系统。电能的生产、输送、分配和消费均在一个电力系统中进行的。我国目前已建成五个大电网（华北、东北、华东、华中、西北电网）以及一些省网，并且在大网之间通过联络线进行能量交换（从葛洲坝到上海的葛沪 500kV 直流输电线将华东和华中两大电网联系起来）。随着三峡工程的完成，全国统一大电网格局亦将渐呈雏形。另外按照各省、市行政体制的划分，电力系统的运行管理本身也是分层次的，各大区电管局，各省电力局，各市、县供电局均有其管辖范围，它的运行方式和出力、负荷的分配受到上级电力部门的管理，同时又要管理下一级电力部门，以保证整个电力系统能够安全、经济、高质量地发供电。

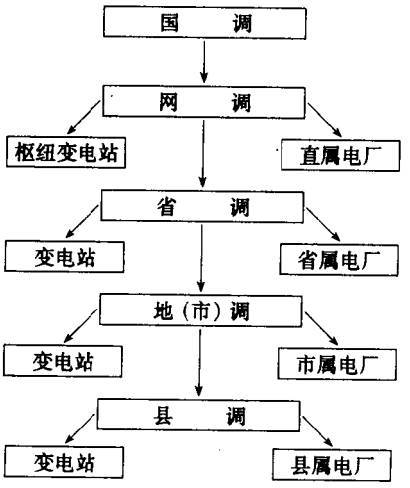


图 1-1　电网分层控制示意图

受我国现行电网运行、管理体制的制约，我国电网实行五级分层调度管理：国家调度控制中心、大区电网调度控制中心、省电网调度控制中心及地(市)、县电网调度控制中心，图 1-1 是电网分层控制的示意图。

电网调度管理实行分层管理，因而调度自动化系统的配置也必须与之相适应，信息分层采集，逐级传送，命令也按层次逐级下达。分级调度可以简化网络的拓扑结构，使信息的传送变得更加合理，从而大大节省了通信设备，并提高了系统运行的可靠性。为了保证电力系统的安全、经济、高质量地运行，对各级调度都规定了一定的职责。

二、各级调度的职责（电网调度自动化有关部分）

1. 国家调度中心的职责

（1）负责跨大区电网间联络线的调度管理。

（2）掌握、监督和分析全国各电网运行状况。

（3）审查、协调各电网的月度发、用电计划，并检查、监督其执行情况。

（4）监督各电网的计划用电和水电厂水库水位计划和执行情况。

（5）配合有关部门制定年度发用电计划及煤耗、厂用电、线损等技术经济指标。

（6）参加全国电网发展规划、系统设计和工程设计的审查。

2. 大区电网调度中心（网调）的职责

（1）负责所辖电网的安全稳定运行。

（2）制定大区主电网运行方式或核准省网与大区主网相关部分的运行方式。

（3）编制全网月发电计划或省网间联络线送电月计划和直调发电厂的月发电计划，编制下达日调度计划。

（4）核准省网计划外送电，做好全网经济调度工作。

（5）指挥管辖设备的运行操作和系统性事故处理。

（6）领导全网的频率调整和主电网的电压调整，并负责考核。

（7）监督省网间联络线的送受电力、电量计划或省网发用电计划执行情况，并指挥省网调整。

（8）参加制定年度发用电计划和各项有关技术经济指标，批准管辖范围内主要发供电设备的检修。

（9）负责全网计划用电和负荷管理工作。

（10）按要求向国调和省调或地调传送实时信息。

3. 省级电网调度中心的职责

（1）在保证全网安全经济的前提下，负责本网的安全运行。

（2）参加全网运行方式计算分析，负责编制本网运行方式，与网调管辖有关部分应报网调核准。

（3）编制本网发、供电设备检修计划。

（4）根据上级调度下达的联络线出力、电量计划和直调厂发电计划或本网的发电调度计划，编制本网和调度管辖的独立核算发电厂的发电计划。

（5）负责管辖设备的运行、操作、事故处理以及无功、电压调整。

（6）监督本网计划用电执行情况。

（7）按规定向网调、地调传送实时信息。

4. 地区电网调度中心的职责

（1）管辖范围的运行操作和事故处理。

（2）管辖范围的设备检修许可。

（3）监督本地区和用户的计划用电执行情况。

（4）管辖范围的电压和无功功率调整。

(5) 按规定向省调、县调传送实时信息。

5. 县级电网调度中心的职责

(1) 管辖范围的运行操作和运行管理。

(2) 管辖范围的设备检修许可。

(3) 监督本地区和用户的计划用电执行情况。

(4) 按规定向地调传送实时信息。

三、各级调度自动化系统的职责

1. 国家调度中心

(1) 通过计算机数据通信收集各大区电网和独立省网的重要信息，监视全国电网的运行工况。

(2) 进行大区互联系统的运行方式及经济调度计算，下达有关信息。

(3) 统计、分析全国电网运行情况。

(4) 负责或组织网、省级以上调度员和负责人岗位培训。

2. 大区电网调度中心

(1) 实现电网的数据收集、监控、经济调度以及有实用效益的安全分析。

(2) 实现自动发电控制功能。

(3) 进行运行方式以及经济调度计算，并上报、下传。

3. 省级调度中心

省级调度中心在独立网或在大区内作为一个发、供电独立控制区域，是与相邻省网实行联络线控制的省级电网调度中心。其职责是：

(1) 实现电网的数据收集、监控、经济调度以及有实用效益的安全分析。

(2) 实现自动控制发电功能。

(3) 进行运行方式及经济调度计算，并上报、下传。

(4) 监视、统计有关联络线的电力、电量。

(5) 独立省调应与国家调度、地调实现计算机数据通信。

由大区电网调度中心统一调度的省级调度中心的职责如下：

(1) 实现电网的数据收集、监控、经济调度以及有实用效益的安全分析。

(2) 进行运行方式及经济调度计算，并上报、下传。

(3) 监视、统计有关联络线的电力、电量。

(4) 省级调度应实现与大区网调、地区调度间的计算机数据通信。

4. 地区电网调度中心

(1) 实现数据采集和安全监视职责。

(2) 负责断路器的遥控操作，变压器分接头的调整，电力电容器的投切等。

(3) 负责用电负荷管理。

(4) 实现与省调、县调间的数据通信。

5. 县级电网调度中心

(1) 实现数据采集和安全监视职责。

(2) 断路器的遥控操作及电力电容器的投切。

(3) 实现负荷控制职责。

(4) 向地调传送必要的实时信息。

第三节　电网调度自动化系统功能简介

电网调度自动化是一个总称，由于各级调度中心的职责不同，因而对其调度自动化系统的功能要求也是不一样的。另外，调度自动化系统的功能也有一个层次，其高一级的功能往往建筑在某些基础功能之上。下面简单介绍各级功能的内容和含义。

一、数据采集和监控（SCADA）功能

SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）是数据采集和监控的英文缩写，它是调度自动化系统的基础功能，也是地区或县级调度自动化系统的主要功能。它主要包括以下方面：

(1) 数据采集。包括模拟量、状态量、脉冲量、数字量等。

(2) 信息的显示和记录。包括系统或厂站的动态主接线、实时的母线电压、发电机的有功和无功出力、线路的潮流、实时负荷曲线、负荷日报表的打印记录、系统操作和事件顺序记录信息的打印等。

(3) 命令和控制。包括断路器和有载调压变压器分接头的远方操作，发电机有功出力和无功出力的远方调节。

(4) 越限告警。

(5) 实时数据库和历史数据库的建立。

(6) 数据预处理。包括遥测量的合理性的检验、遥测量的数字滤波、遥信量的可信度检验等。

(7) 事故追忆PDR（Post Disturbance Review）。对事故发生前后的运行情况进行记录，以便分析事故的原因。

二、自动发电控制功能 AGC功能

自动发电控制功能 AGC（Automatic Generation Control）是以 SCADA 功能为基础而实现的功能，一般写成SCADA + AGC。自动发电控制是为了实现下列目标：

(1) 对于独立运行的省网或大区统一电网，AGC 功能的目标是自动控制网内各发电机组的出力，以保持电网频率为额定值。

(2) 对跨省的互联电网，各控制区域（相当于省网） AGC 的功能目标是既要求承担互联电网的部分调频任务，以共同保持电网频率为额定值，又要保持其联络线交换功率为规定值，即采用联络线偏移控制的方式（在这种情况下，网调、省调都要承担 AGC 任务）。

三、经济调度控制功能 EDC（Economic Dispatch Control）

与AGC 相配套的在线经济调度控制是实现调度自动化系统的一项重要功能。如果说AGC功能主要保证电网频率质量的话，那么 EDC 则是为了提高电网运行的经济性。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

EDC通常都同 AGC 相配合进行。当系统在 AGC 下运行较长时间后，就可能会偏离最佳运行状态，这就需要按一定的周期（通常可设定为 5～10min），启动 EDC 程序重新分配机组出力，以维持电网运行的经济性，并恢复调频机组的调节范围。

四、能量管理系统 EMS（Energy Management System）

EMS是现代电网调度自动化系统硬件和软件的总称，它主要包括 SCADA、AGC/EDC 以及状态估计、安全分析、调度员模拟培训等一系列功能。 SCADA、AGC/EDC 在上面已作介绍，下面只简单介绍 EMS 中的一些其他功能。

1.状态估计 SE（State Estimator）

根据有冗余的测量值对实际网络的状态进行估计，得出电力系统状态的准确信息，并产生“可靠的数据集”。

2. 安全分析 SA（Security Analysis）

安全分析可以分为静态安全分析和动态安全分析两类。

（1）静态安全分析。一个正常运行着的电网常常存在着许多潜在危险因素，静态安全分析的方法就是对电网的一组可能发生的事故进行假想的在线计算机分析，校核这些事故后电力系统稳态运行方式的安全性，从而判断当前的运行状态是否有足够的安全储备。当发现当前的运行方式安全储备不够时，就要修改运行方式，使系统在有足够安全储备的方式下运行。

（2）动态安全分析。动态安全分析就是校核电力系统是否会因为一个突然发生的事故而导致失去稳定。校核因假想事故后电力系统能否保持稳定运行的稳定计算。由于精确计算工作量大，难以满足实施预防性控制的实时性要求，因此人们一直在探索一种快速而可靠的稳定判别方法。

3. 调度员模拟培训 DTS（Dispatcher Training Simulator）

调度员模拟培训系统的主要作用如下：

（1）使调度员熟悉本系统的运行特点、熟悉控制系统设备和电力系统应用软件的使用。

（2）培养调度员处理紧急事件的能力。

（3）试验和评价新的运行方法和控制方法。调度自动化系统的功能是随着电力系统发展的需要和计算机技术及通信技术提供的可能而变化的，电网调度自动化技术的发展，可以使电网运行的安全性和经济性达到更高的水平。

第四节　电网调度控制技术的发展与趋势

随着电力系统的发展，装机容量不断的增加，输电电压等级的不断升高和电网的覆盖范围的不断扩大，对电网运行管理手段的要求愈来愈高，电网调度控制技术也随着电网的发展而发展。

一、早期阶段

电力系统运行的初期阶段，由于通信设备的限制，调度人员要花很长的时间才能掌握

有限的信息，主要靠一些自动装置、电话以及运行人员的经验来调度和操作，因此不能很有效地管理电网。用电话指挥电网的运行，由于实时性差，有时会使故障得不到及时的处理而扩展，以致造成较大的经济损失。由于电话调度已不能适应电网运行的要求，从而促进了远动技术的发展。

二、远动技术的应用

我国最早的遥测装置是电子管的单路遥测发送装置（JZ-1型）和单路遥测接收装置(JZ-2 型)。遥信、遥控装置是采用继电器逻辑的 SF-58 型遥信遥控装置，这些装置曾在电网调度管理中发挥一定的作用，但由于容量小，精度低，不能满足电网发展的需要。

随着电子元器件和数字逻辑技术是发展，我国在 60 年代中期开始研制晶体管数字综合远动装置。采用了模/数转换技术，实现了数字遥测，遥测精度大为提高；采用了时分多路复用技术，遥测的路数也增多了；采用了抗干扰编码技术，使传输的可靠性也得到了提高。总之，在数字综合远动装置中，将数据通信、计算机技术引进了远动技术领域，使远动技术在原理上有了一个飞跃，这些技术原理即使在现在的微机远动中仍被继续采用。

随着集成电路技术的发展，在数字综合远动装置中也广泛采用集成电路技术，但从晶体管数字综合远动装置到集成电路数字综合远动装置只是器件上的更新替代，原理上没有发生实质性的变化。

三、以计算机技术为基础的调度自动化技术的应用

将微机技术应用于远动技术后，远动技术发生了重大的变化，原来许多不易实现的功能，采用微机技术后便迎刃而解。所以与常规远动相比，微机远动功能强、体积小、可靠性高。如在微机远动终端上，可以方便地完成事件顺序记录、主站与远动终端对时以及当地打印制表等功能。在主站可以方便地实现 $1:N$ 的接收以及转发等功能。

随着计算机技术的发展，微机远动从芯片级向板级、系统机级、网络级的方向不断地发展。远动终端已从单 CPU 向多 CPU 的方向发展，取代模拟变送器，并直接交流采样的远动终端也开始推广。

思　考　题

1. 电力系统调度自动化的任务是什么？
2. 简述我国调度管理的结构。
3. 简述电网调度自动化的功能。

第二章　电力系统数据监测基本技术

电力系统是一个分散的大系统，系统中的设备和运行状态，参数是大量多变的。为了保证电力系统最大可能地安全而经济地运行，必须实时地将各处的大量数据迅速准确地采集起来，并传送到各地调度中心去进行处理。

第一节　电网调度自动化系统的基本结构

电网调度自动化系统按其功能可以分成如下四个子系统。

一、信息采集和命令执行子系统

信息采集和命令执行子系统是指设置在发电厂和变电所中的远动终端（包括变送器屏、遥控执行屏等）。

远动终端与主站配合可以实现四遥功能：RTU在遥测方面的主要功能是采集并传送电力系统运行的实时参数，如发电机出力、母线电压、系统中的潮流、有功负荷和无功负荷、线路电流、电度量等；RTU在遥信方面的主要功能是采集并传送电力系统中继电保护的动作信息、断路器的状态信息等；RTU在遥控方面的主要功能是接收并执行调度员从主站发送的命令，并完成对断路器的分闸或合闸操作；RTU在遥调方面的主要功能是接收并执行调度员或主站计算机发送的遥调命令，调整发电机的有功出力或无功出力。

信息采集和命令执行子系统除了完成上述四遥的基本功能外，还有一些其他功能，如事件顺序记录、当地监控等。

表2-1和表2-2分别列出了电力系统运行所需的主要信息和电力系统运行主要控制、调节命令。

表 2-1　　电力系统运行所需的主要信息

传送方向	类　别	信　息　名　称
发电厂或变电所 ↓ 调度控制中心	遥测信息	线路潮流（有功、无功功率）或电流 变压器潮流（有功、无功功率）或电流 发电机出力（有功、无功功率） 负荷（有功、无功功率） 母线电压（电压控制点） 频率（每一个可解列部分） 功角 水库水位 电能量

续表

传送方向	类　　别	信　息　名　称
发电厂或变电所 → 调度控制中心	遥信信息	断路器分、合闸状态 隔离开关分、合状态 继电保护和自动装置动作状态 发电机开、停状态
	其他信息	事件顺序记录 转发其他厂站信息 返送校核信息 RTU 工作状态信息 事故追忆信息 故障录波信息

表 2-2　　电力系统运行的主要控制、调节命令

传送方向	类　　别	信　息　名　称
调度控制中心 → 发电厂或变电所	遥控信息	断路器操作信息 电动隔离开关操作命令 机组启、停操作命令 并联电容器投切操作命令
	遥调信息	发电厂或机组有功出力给定值 发电厂或机组无功出力给定值 变压器分接头位置
	其他信息	对时信息 查询信息 RTU 远方诊断 RTU 参数设置

二、信息传输子系统

由于电网调度自动化系统中的主站和远动终端之间一般都有较远的距离，因而信息传输子系统也是一个重要的子系统。信息传输子系统按其信道的制式不同，可分为模拟传输系统和数字传输系统两类。

对于模拟传输系统(其信道采用电力线载波机、模拟微波机等),远动终端输出的数字信号必须经过调制(数字调频、数字调相)后,才能传输。模拟传输系统的质量指标可用其衰耗频率特性,相移-频率特性、信噪比等来反映,它们都将影响到远动数据的误码率。

对于数字传输系统（其信道采用数字微波、数字光纤等），低速的远动数据必须经过数字复接设备，才能接到高速的数字信道。随着通信技术的发展，数字传输系统所占的比重将不断增加，信号传输的质量也将不断提高。

三、信息的收集、处理和控制子系统

大型电力系统往往跨几个省，具有许多发电厂和变电所，为了实现对整个电网的监视

和控制，需要收集分散在各个发电厂和变电所的实时信息，对这些信息进行分析和处理，并将分析和处理的结果，显示给调度员或产生输出命令对系统进行控制。

四、人机联系子系统

电网调度自动化技术的发展，并没有使人的作用有所削弱，恰恰相反，高度自动化技术的发展要求调度人员在先进的自动化系统的协助下，充分深入和及时地掌握电力系统实时运行状态，作出正确的决策和采取相应的措施，使电力系统能够更加安全、经济地运行。为了有效的达到上述目的，应该使被控制的电力系统及其控制设备（调度自动化系统）与运行人员构成一个整体。从电力系统收集到的信息，经过计算机加工处理后，通过各种显示装置反馈给运行人员。运行人员根据这些信息作出决策后，再通过键盘、鼠标等操作，对电力系统进行控制，这就是人机联系。系统越复杂、规模越大，对人机联系子系统的要求也就越高。

人机联系子系统的常用设备一般包括 CRT 显示器、调度模拟屏、键盘和鼠标、有声报警、制表打印设备、屏幕拷贝设备、记录型仪表等。

第二节　数 据 采 集 系 统

在电网监控系统中，为了实现对电网的监视和控制，首先必须获得表征电网实时运行状态的遥测量值和遥信状态，以便对这些信息进行适当的加工处理，形成控制电网安全、稳定和经济运行的遥控、遥调命令。数据的收集与测量，在电网中主要由厂站端的 RTU 装置来完成，整个数据采集系统，如图 2-1所示。

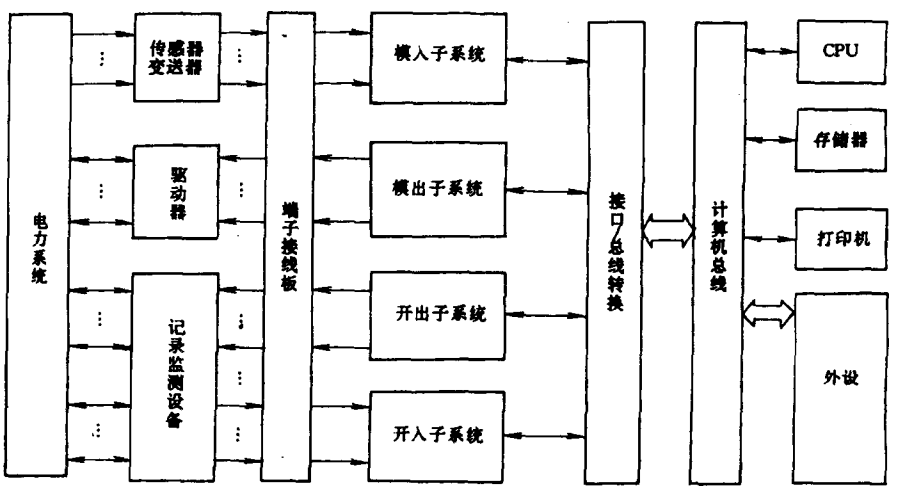


图 2-1　数据采集系统图

图 2-1 中输入/输出子系统又称输入/输出通道，其主要任务是实现对现场信号的采集处理。按其功能可分为模拟量输入/输出子系统和数字量输入/输出子系统。

模拟量子系统使计算机对电网现场的模拟量进行采集，该子系统将传感器送来的模拟信号经过信号调节，有的要经放大、滤波、多路开关分时采样后，经模/数转换进入计

算机。

模拟量输出子系统主要用来由计算机对控制设备进行调节控制，通过数/模转换，有的还要经过适当放大后，再去控制对象。

数字量输入通道用于处理生产过程中的数字信号，如数字式传感器信号、开关信号、状态开闭、限值的高低或脉冲信号等。这些信号的共同特点是一个信号只有两种状态或多值状态的复合，可以用二进制的“1”或“0”表示。数字式传感器的输出，根据位数可并行（成组）引入子系统，各个分离的开关或状态信号，也都成组引入子系统。通过适当的信号处理电路，将各位状态通过接口接入计算机。脉冲信号是通过特殊的信号处理电路，测量脉冲的频率，周期或宽度。

数字量输出系统是为控制对象提供数字信号或控制其动作。

在电网现场一些重要的开关或状态发生变化时，要计算机立即处理，一般将这种状态量接入中断处理。

上述输入／输出通道都有自己的接口电路，从而实现 CPU 对各通道的控制。以下重点介绍输入、输出技术。

一、模拟量输入通道

模拟量输入通道由变送器或传感器、多路模拟开关、放大器、采样保持器（S/H）、A/D 转换器以及接口和控制逻辑电路构成，如图 2-2 所示。以下简要介绍各部分的作用：

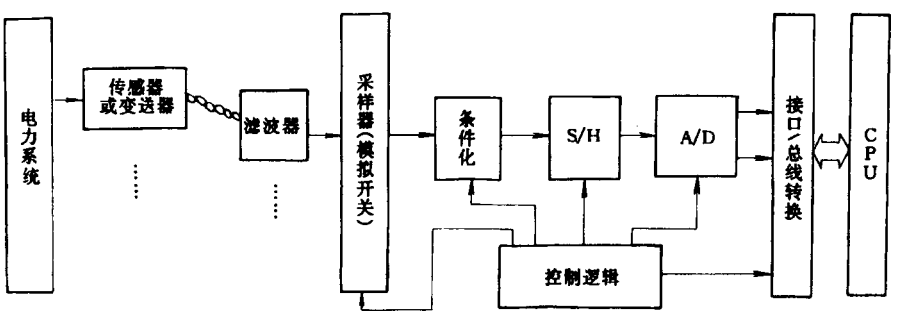


图 2-2 模拟量输入通道图

(一)传感器或变送器

它的作用就是将电力系统的电压、电流、功率、电量、温度等量转换成计算机可以统一处理的信号。就电流、电压变送器而言，目前相当的系统采用将 TA、TV 二次信号降低，而后整流成直流的形式来测量。这种电路简单可靠，但整流不能立即反映电网变化情况，响应性较差。

新的霍尔测量技术大大改善了传统电力变送器的性能，无论在性能、精度上均优于传统变送器，下面给以重点介绍。

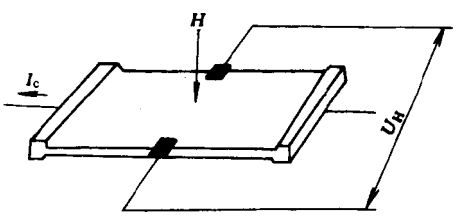


图 2-3 霍尔元件工作原理

图2-3 是一个霍尔元件工作原理图。当外加一个磁场 H 时，当一个金属片上通有电流 I_c 时，在它的横向上会产生一个霍尔电压

需要全本请访问 www.ertongbook.com

U_H，它们之间的关系如下

$$U_H = K\left|H \times I_c\right|$$

式中 U_H——霍尔电压；

H——磁场；

I_c——控制电流；

K——霍尔系数。

一般霍尔元件采用半导体材料制作，因为半导体的霍尔效应比金属的明显。用霍尔元件进行非接触式电流测量是众所周知的，当电流通过一根长的直导线时，在导线周围产生磁场，磁场的大小与流过导线的电流成正比。这一磁场可以通过软磁材料来聚集，然后用霍尔元件进行测量。由于磁场与霍尔元件的输出有良好的线形关系，因此，可以利用霍尔元件测量信号大小，直接反映出电流的大小，即

$$I \propto B \propto U_H \qquad \text{或 } I = KU_H$$

式中 I——导线通过的电流；

B——导线通过电流后产生的磁场；

U_H——霍尔元件在磁场 B 中产生的电压；

K——某一常数，表示 I 与 U_H 成线性关系。

霍尔模块是由一次电路、聚磁环、二次线圈、放大电路、霍尔元件组成的，其原理如图 2-4 所示。

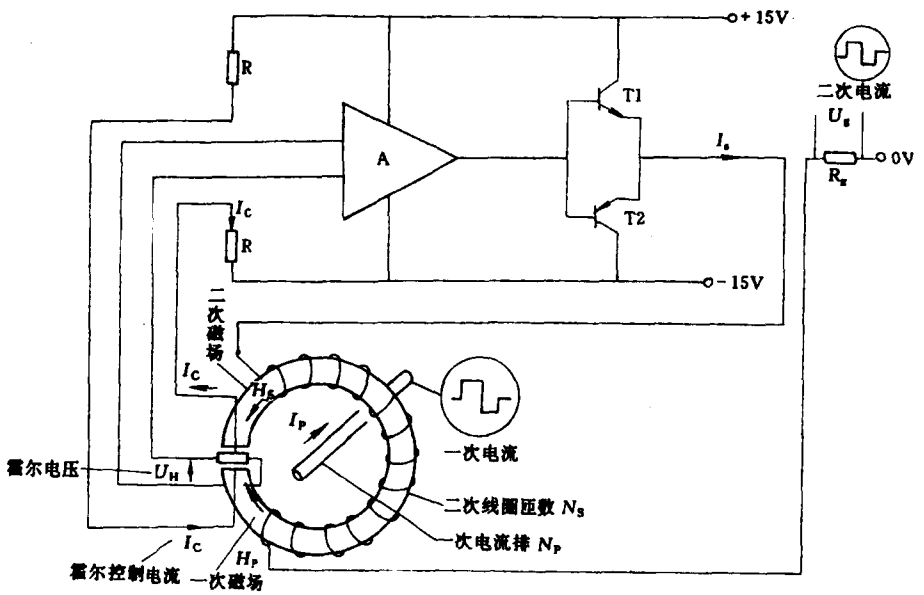


图 2-4 霍尔模块测量原理图

1. 霍尔模块的工作原理

模块的工作原理是磁势平衡原理，即二次回路的磁势与二次所感生磁势相等，霍尔元

件始终处于检测零磁通的工作状态。

当一次回路有一电流 I_P 流过时，在导线周围产生一个强磁场，这一磁场被磁环聚集，给霍尔元件施加一个磁场，使其有一感应电压信号输出。该信号经放大器放大后，再经功放管后获得一电流 I_s，此电流在磁环上感生一个磁势 I_sN_s，这一磁势与一次电流所感生的磁势 I_PN_P 方向相反，使霍尔元件达到零磁通检测的作用。

上述过程是在极短的时间内产生的，平衡建立的时间为 $1\mu s$ 之内。一次任何的变化，二次立即会予以补偿，始终处于 $N_PI_P = N_sI_s$ 之中。其中 N_P、I_P 为一次线圈匝数和电流，N_s、I_s 为二次线圈匝数和电流。若已知 N_P、N_s、I_s，即可求得 I_P。

2. 霍尔模块的特点

(1) 一、二次完全绝缘，绝缘电压一般在 2～12kV，特殊情况可达 20～50kV。

(2) 响应速度非常快，一般小于 $1\mu s$，相位差几乎为零。这一点它比一般互感器 10～$20\mu s$ 要高得多。

(3) 由于它是磁势平衡反馈式，故不管一、二次电流，一、二次电压为任何波形，均可测量。工作频率范围在 0～100kHz，在 0～50kHz 之内，精度达 0.5%，在 50～100kHz 时达 1%。

(4) 过载能力强，过载达 20 倍，仍不损坏。一、二次之间电容很弱，共模影响可以忽略。

(5) 它既可以测电流，也可以测电压、功率，比较方便。这主要取决于磁场与电流的关系。

(二)滤波器

滤波器的作用是消除掉输入信号中的干扰，保存有用信号，相对提高输入信号的信／噪比。滤波器一般多采用简单而有效的一级或二级、单或双向 π 型 RC 低通滤波器。滤波器同时还作浪涌电压保护，防止浪涌电压进入通道内部，破坏通道正常工作。

滤波器可以用硬件和软件两种方法实现。对电网信号常用 RC 低通滤波器，其电路图如图 2-5 所示。

由图 2-5 可知，$y(t)$ 与输入 $x(t)$ 之间的传递函数为

$$y(s) = \frac{x(s)}{RCs + 1} = \frac{x(s)}{Ts + 1} \tag{2-1}$$

其中 $T = RC$，为滤波器的时间常数，其频率特性为

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{1}{1 + Tj\omega} \tag{2-2}$$

它的对数幅频特性如图 2-6 所示。在 $\omega > \frac{1}{T}$ 处，可以近似地用一条斜率为 −20dB/10 倍频的直线来代表。该滤波器对 ω_1 的信号增益为 −20dB，即在 $\omega = \omega_1$ 的信号通过滤波后，幅值

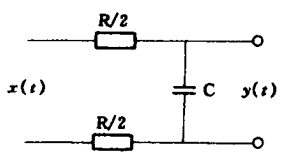


图 2-5 RC滤波器

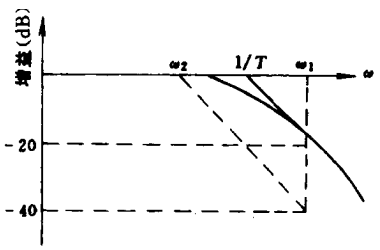


图 2-6 RC滤波器的对数幅频特性

降为原来的 1/10。如果需要它降为 1/100，则增益为 −40dB 只要使幅频特性左移即可。设所求滤波器的频率特性的渐进线与水平轴交点为 ω_2，则滤波器时间常数 $T=\frac{2\pi}{\omega_2}$，由 T 可确定电阻 R、电容 C 的大小。由此可知，RC滤波器的时间常数取决于需要该滤波器对某个频率以上的信号抑制到什么程度而定。由式（2-1）可得

$$T\frac{\mathrm{d}y(t)}{\mathrm{d}t}+y(t)=x(t)$$

令 $\mathrm{d}y(t)=y(n)-y(n-1),\mathrm{d}t=T_0$（$T_0$为采样周期）

式中，n是采样时刻。于是有

$$T\frac{y(n)-y(n-1)}{T_0}+y(n)=x(n)$$

$$y(n)\left(\frac{T}{T_0}+1\right)-\frac{T}{T_0}y(n-1)=x(n) \tag{2-3}$$

$$y(n)=(1-Q)y(n-1)+Qx(n)$$

$$Q=\frac{1}{T/T_0+1}$$

根据式(2-3) 就可编制相应一阶滤波器，它完全可以代替图 2-5 的 RC 电路功能。从RC滤波器来看，当噪声或干扰频率很低时，需要较大电容量，在实际中有时难以办到，此时采用数字滤波用软件很容易实现，这种滤波方法称惯性滤波。

常用的数字滤波方法还有：

（1）算术平均滤波算法

$$y_n=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i \tag{2-4}$$

式中 y_n——第 n 次滤波器输出；

x_i——第 i 次采样值；

n——采样次数。

此方法适用于干扰是周期性的情况，n越大输出 y 也越稳定，但灵敏度也下降了。

（2）加权平均滤波算法

$$y_n=\sum_{i=0}^{k}\alpha_i x_{n-i} \tag{2-5}$$

其中，$0\leqslant a_i\leqslant 1,\sum_{i=0}^{k}a_i=1$。

这种方法突出最近几次采样值在平均值中的比重，以提高系统对当前所受干扰的灵敏度，对不同时刻的采样值，赋以不同加权因子。它适用于纯延迟时间常数 τ 较大采样周期较短的过程。

（三）采样保持与多路转换器

经滤波器后的连续信号，要经过采样被离散化。采样过程实际上是由 CPU 和时钟控制开关，每隔 ΔT 时间即采样时间短时闭合一次，将连续的模拟信号输入回路接通完成一

次采样，采样值就是与采样频率（$f_s = \frac{1}{\Delta T}$）相对应时刻的输入信号瞬时值，如图 2-7 所示。

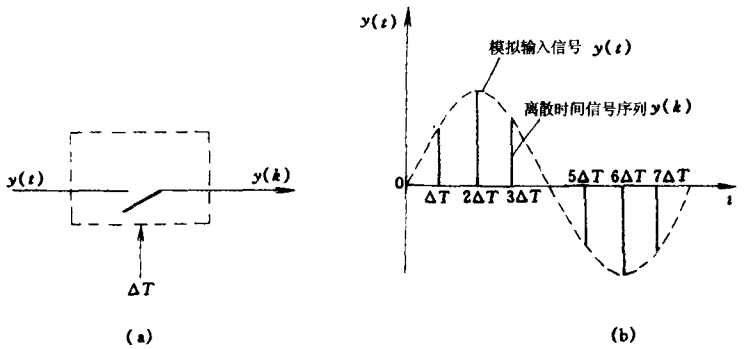


图 2-7　采样原理示意图

(a) 采样开关；(b) 模拟与离散信号

由采样定理可知，采样频率 f_s 必须大于原信号频率 f_0 两倍时，才有可能通过截频率为 f_0 的理想低通滤波器恢复原信号的频率成分，故一般工程上取（5～10）f_0 为 f_s。电力系统一般 $f_0 = 50\text{Hz}$，考虑到计算的方便，故取 $f_s = 12f_0$。

多路采样开关是用于切换多路输入信号的开关，目前多用 CMOS 开关，像 AD7501 就是多达 32 路模拟开关。最近由于光电技术的发展，有取代 MOS 的趋势。

信号条件化电路又称信号缓冲器、标度放大器，其作用是把输入信号调整到后续的采样保持器 S/H、A/D 所要求的最佳输入状态。它主要对信号起到缓冲、放大、校正的作用。

信号被采样后，被保持一段时间，以便于后续的 A/D 处理，这就是采样保持 S/H 的作用，它的原理如图 2-8 所示。工作分两个阶段，首先采样，然后保持。

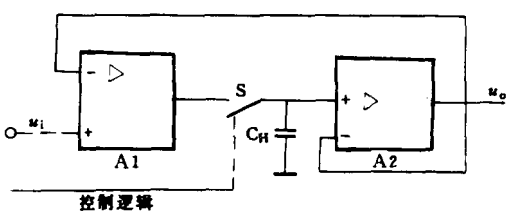


图 2-8　S/H 电路原理图

采样期间，逻辑输入高电平，电子开关 S 被接通，输入信号对电容 C_H 快速充电，同时电压跟随放大器 A2 输出，准确地跟随 u_i 的变化。保持状态期间，控制逻辑输入低电平，C_H 对 A2 放电。因 A2 的输入阻抗很大，C_H 保持充电时的电压值，使输出 u_o 的数值得以保持一段时间。

单片集成 S/H 片型号有 LF198、298、398，其内部结构一样，精度不同。LF398 精度最高，当作单位增益跟随器用时，DC 增益精度可达 0.002～0.019FSR（满刻度）。输入阻抗很高，可达 $10^{10}\Omega$，输出阻抗 0.5～4Ω，具有较高采样速度和捕捉时间。当达到满刻度（FSR = 10V）的 ±0.01% 时，而且 $C_H = 1000\text{pF}$ 时，响应时间达 4μs，当 $C_H = 0.01\text{pF}$ 时，响应时间为 20μs。具有低的输出电压下降率，当 $C_H = 1\text{pF}$ 时，可达 5mV/min。

使用中应注意以下几点：

(1) 保持电容的选择，电容必须用介质吸收较低的电容器。所谓介质吸收是指对电容充电时，吸收到介质的电荷不能立即进入或放出。因此，当采样/保持器用于多通道数据

采集系统中，每次采样不同通道的信号，其电压变化大。由于电容介质吸收效应，来不及快速响应，其结果会出现误差。一般采用聚苯乙烯、聚丙烯或聚四氟乙烯电容。

（2）接地。许多数据采集系统的部件，常具有 2 个或多个接地脚，电路内部并没连接在一起，这些点必须接在某点上。连接时必须注意接地线存在着电阻、电感，应该使电流返回地线分开，使得敏感点到系统的接地点之间的路径上流过的电流最小，否则会有误差。

（四）模拟/数字转换器

模拟/数字转换器就是 A/D 转换器。A/D 转换器的种类很多，分类方法也不统一。有按转换成数字量分的，如并行、串行、 BCD 等，有按转换速度分的，如低速（ms 级）、中速（μs 级）、高速（ns 级）等。下面仅说明一下当前电力工业中常用的一种逐位逼近式电压反馈比较法。

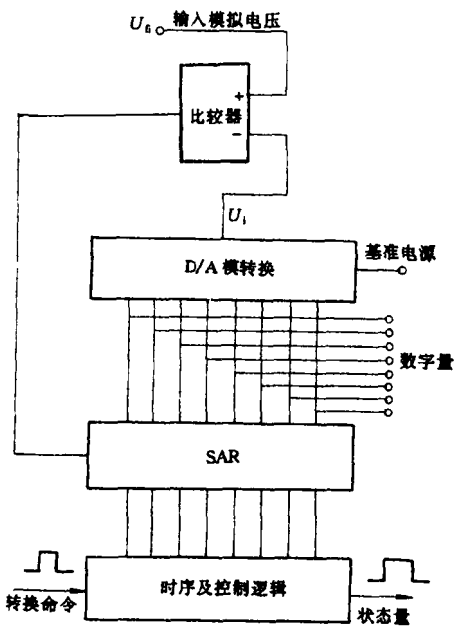


图 2-9　逐位比较 ADC 电路

逐位比较法是模仿天平秤称重方法，利用自然二进制数位权值从 $MSB \rightarrow LSB$ 倍减规律的对分搜索法，实现快速转换的方法。逐位比较 ADC 电路原理图如图 2-9 所示。它主要由逐位逼近寄存器 SAR、时序及控制逻辑、D/A 转换器、高性能比较器等组成。其工作原理：当控制接收到转换开始命令时，立即将 SAR 清零。从最高位 MSB 开始，逐位进行试探、比较、确定，直到最低位 LSB 为止。每一位的工作过程是：控制逻辑将该位 D_i 试探预置 1，产生 SAR 新的数码，经 D/A 正比例地转换成标准的比较电压 U_{fi}，与输入电压 U_i 比较。若 $U_{fi} \leqslant U_i$，比较器输出高电平，表示试探预置的数字量不够大，控制逻辑就使刚预置的数字量过大，比较器输出低电平，控制逻辑就使刚才预置的 1 清为 0，即令 $D_i = 0$，从而确定 D_i 位为 1 还是 0。

例如 D/A、A/D 转换器为 10 位，D/A 基准电压为 10.24V，则 D/A 输入数字量从全 0 到全 1 共 1024 个数码，一个码 $LSB = \dfrac{10.24}{2^{10}} = 10\text{mV}$，就是 D/A 输出的电压值。设 $U_i = 5.0\text{V}$，转换开始，$D_9 = 1$，D/A 输出为 5120mA，因 $U_{f9} = 5120\text{mV} > U_i$，则使 D_9 改为 0，下一次再使 $D_8 = 1$，得 2560mV，因 $U_{f8} < U_i$，故保留 $D_8 = 1$。以次逐位比较，最终得 01111100B。

单片式集成 A/D 转换器 AD574A 就是逐位比较型的。分辨率 12 位、8 位，转换时间 12 位 25μs，输入电压：单极性 0～10V（20V），双极性 −5～5V（−10～10V），输出单极性原码，双极性为偏移二进制码。

二、数字量输入输出系统

在电力系统中，除模拟量信号外，还有以二进制数字变化为特点的信号，如开关的闭

合、断开，限内或越限，高或低等，计算机传送的数据也是以二进制形式出现的。

(一)开关输入子系统

开关输入系统的基本功能就是将电力系统的状态信号，引入计算机内，像线路开关状态、继电保护信号等。为了将外部过程的开关量信号输入到计算机，必须将实际现场的状态信号换成计算机逻辑电平信号，这就需要信号调节电路和逻辑控制电路。图 2-10是开关量输入子系统配置图。

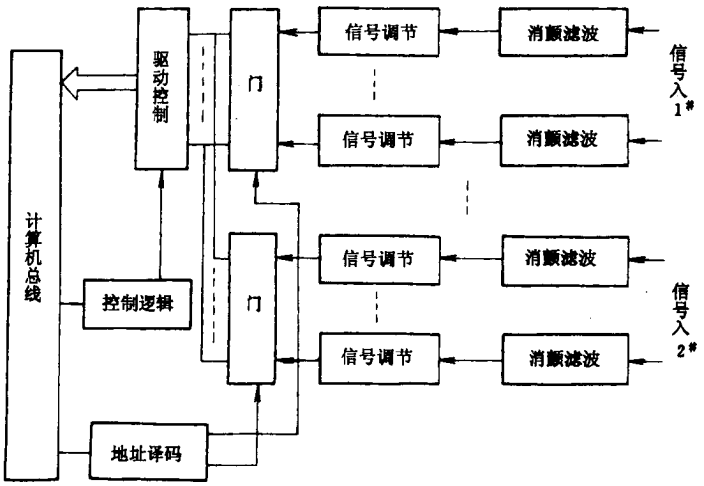


图 2-10 开关输入子系统配置图

由图 2-10 可见，开关量输入子系统由信号调节电路、控制逻辑电路、驱动控制、地址译码电路等组成。信号调节电路的作用是将现场的实际开关量、数字量信号，转换成计算机可接收的逻辑信号。开关量信号都是成组并行输入计算机，每组一般为计算机的字节，即 8、16 或 32 位。

实际开关量信号可能是电压、电流或电阻信号，都要通过调节电路转换成统一电平信号，并将信号进行滤波、消除噪声等处理后引入计算机。其构成如下：

1. 信号转换电路

(1) 电压、电流信号转换电路如图 2-11 所示。图中 R1、R2 组成分压电路。根据门槛电平分压设计，U 为非门电路。

(2) 接点电平转换电路如图 2-12所示，当接点 S 闭合后，输出为低电平。

2. 滤波消除电路

当开关量作为输入信号，因长线及空间产生干扰信号时，可能会使状态发生错误。为

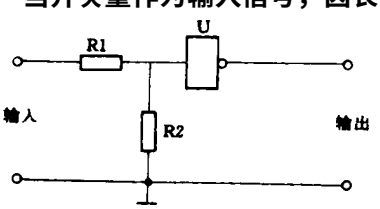


图 2-11 电压、电流转换电路

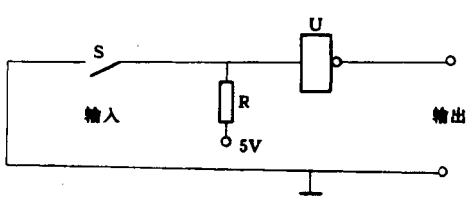


图 2-12 接点电平转换电路

需要全本请访问 www.ertongbook.com