

第1章 绪 论

电器智能化是传统电器学科的一个新的发展领域，是传统电器学科、现代电子技术、电力电子技术、微机控制技术、现代传感器技术、数字通信及计算机网络技术等多门类学科交叉和融合的结果。本章首先阐述电器智能化和智能电器的基本概念，根据智能电器和开关设备的主要特点给出它们的定义，介绍智能电器基本结构及电器智能化网络组成；从智能电器的功能、监控单元的设计技术、电器元件工作机理和操作机构的变革，以及电器智能化网络几方面，讨论电器智能化发展的现状和前景；最后介绍了本课程学习的主要内容。

1.1 电器智能化概述

电器是完成电路监测，控制电路接通或分断操作的设备，如电压、电流互感器及断路器、接触器、各类继电器等开关电器，主要用于电力传输与分配、电力系统继电保护、工业及民用用电设备供电与保护等场合。本书涉及的电器仅指开关电器及其成套设备。

电器智能化是现代化社会生产和生活向开关电器领域提出的要求，也是现代科学技术与传统电器技术相结合的产物。它融合了传统电器、计算机与数字控制、微电子技术、电力电子技术、计算机通信与网络及现代传感器技术等各门类的学科，可以说没有这些新兴学科的发展，就没有电器智能化。

1.1.1 电器智能化与智能电器

什么是电器智能化，它与智能电器有何关系，是学习这门课程首先应解决的问题。正如工业自动化与自动化工业设备之间的关系一样，应该说，电器智能化包含了智能电器的内容，但它绝对不等同于智能电器。智能电器是指智能化了的开关电器元件或成套开关设备，是一种具体的有形的产品。而电器智能化应当是一种理念，一种方法，也是一种发展和进步过程。它不仅涉及到智能电器设计中的理论和技术，还应包含与之相关的各门类学科知识的应用，如数字信号处理、计算机网络与数字通信、芯片开发、现代微机控制系统的软件设计及现代传感器技术等。同时，电器智能化还必须关注如何使智能电器产品最充分地发挥其优良性能，如何通过智能电器自身的监测、保护、记录、通信等功能实现对它们的远程管理和控制，如何有效地通过统一的、开放的通信协议把不同国籍、不同生产企业出品的智能电器产品组成适应用户要求的智能化管理和控制网络等方法。因此，可以认为电器智能化是以智能电器这种有形产品为基础建立的相关学科

知识及应用技术的系统集成。

在智能电器发展的初期，对智能电器的定义曾有过一个不很确切的认识，即“微机控制+开关电器”就是智能电器。从大多数智能电器元件和成套设备的硬件结构看，它们确实主要包含这两部分，但把这类产品称为智能电器的实质是因为微机控制和现场各类参量的数字处理技术的应用，使这类产品具有了自动识别有无故障及故障类别的能力，并能根据现场工况控制开关电器的操作机构进行不同操作，达到提高开关电器性能的目的。尽管目前还没有一个统一的有关智能电器的明确定义，但从其具有的基本特征来看，智能电器元件和智能化开关设备可分别定义如下。

智能电器元件是采用微机控制技术、现代传感器技术、模拟量数字处理技术及计算机数字通信技术，具有自动监测和识别故障类型及操作命令类型的功能，能根据故障和操作命令类别来控制电器元件操作机构动作的电器元件。这一定义给出了智能电器元件最基本的特征。

智能化开关设备由一次开关电器元件和智能监控单元组成。智能控制单元不仅可替代原有开关设备二次系统的测量、保护和控制功能，还应能记录设备各种运行状态的历史数据、各种数据的现场（当地）显示，并通过数字通信网络向系统控制中心传送各类现场参数，接受系统控制中心的远方操作与管理。此外，开关设备的一次开关电器为智能电器元件时，也可由控制中心直接进行远方的智能控制。

在本教材以后的叙述中，若无特别说明，将把智能电器元件和智能化开关设备统称为“智能电器”。

1.1.2 智能电器的基本特点

根据前面的定义，可以归纳出智能电器的基本特点。

1. 现场参量处理数字化

这是智能电器区别其他采用集成电路实现控制功能的电器设备的最重要标志。由于采用微机处理和控制技术，电器设备运行现场的各种被测参量全部采用数字处理，不仅大大提高了测量和保护精度，减小产品保护特性的分散性，而且可以通过软件改变处理算法，不需修改硬件结构设计，就可以实现不同的保护功能。

2. 电器设备的多功能化

采用微处理器或单片微机对电器设备运行现场的各种参量进行采样与处理，智能电器可以集成用户需要的各种功能，如作为数字化仪表，可以实时显示要求的各种运行参数；可以根据工作现场的具体情况设置保护类型、保护特性和保护阈值；对运行状态进行分析和判断，完成监控对象要求的各种保护；真实记录并显示故障过程，以使用户进行事故分析；按用户要求保存运行的历史数据，编制并打印报表等。

3. 电器设备的网络化

智能电器监控单元以微处理器为核心，实际上就是独立的计算机控制设备，可以把它们当做计算机通信网络中的通信节点，采用数字通信技术，组成电器智能化通信网络，完成信息的传输，实现网络化的管理、设备资源的共享。

4. 真正实现分布式管理与控制

智能电器的监控单元能够完成对电器设备本身及其监管对象要求的全部监控和保护，使现场设备具有完善的、独立的处理事故和完成不同操作的能力，可以组建成完全不同于集中控制或集散控制系统的分布式控制系统。

5. 可以组成真正的全开放式系统

采用计算机通信网络中的分层模型建立起来的电器智能化通信网络，可以把不同生产厂商、不同类型但具有相同通信协议的智能电器互连，实现资源共享，不同厂商产品可以互换，达到系统的最优组合。通过网络互连技术，还可以把不同地域、不同类型的电器智能化通信网络连接起来，实现全国乃至世界范围内的开放式系统。

1.1.3 智能电器一般组成结构

如上所述，智能电器包含了元件和成套设备两类，它们完成的主要功能不同，相应地，组成结构也有所区别。

1. 智能电器元件基本结构形式

智能电器元件基本结构包含由输入、中央控制、输出和通信四大模块组成的监控单元，以及作为一次元件或执行元件的开关电器，如图 1-1 所示。从物理结构上看，智能电器元件的监控单元通常与被监控的开关电器集成为一个整体。当开关电器是断路器时，智能监控单元就是附属于它的智能脱扣器，完成脱扣器要求的各种保护和操作功能。监控单元的输入模块主要完成对开关元件各种运行状态、参数和特性的在线检测，并将检测结果送入中央控制模块。来自开关元件的输入量可分为模拟量和开关量两类，分别经过相应的变换器变成与中央控制模块输入兼容的数字量信号和逻辑量信号。为提高中央控制单元的可靠性和抗干扰能力，在变换器输出及中央控制单元输入接口间必须加可靠的隔离。

中央控制模块基本上是一个以微机 CPU 或单片微机为中心的最小系统，完成对开关电器元件运行状态和参数的处理；根据处理结果或系统控制中心下达的命令，判断开关电器当前是否进行合、分操作，是否有故障并识别故障类型。根据不同故障，按不同的方式（如反时限、短延时、瞬动等）输出保护控制信号。中央控制模块向开关电器元件发出的操作控制信号经过输出模块隔离驱动后传送至电器元件的操作机构，使其按指定的方式进行操作。

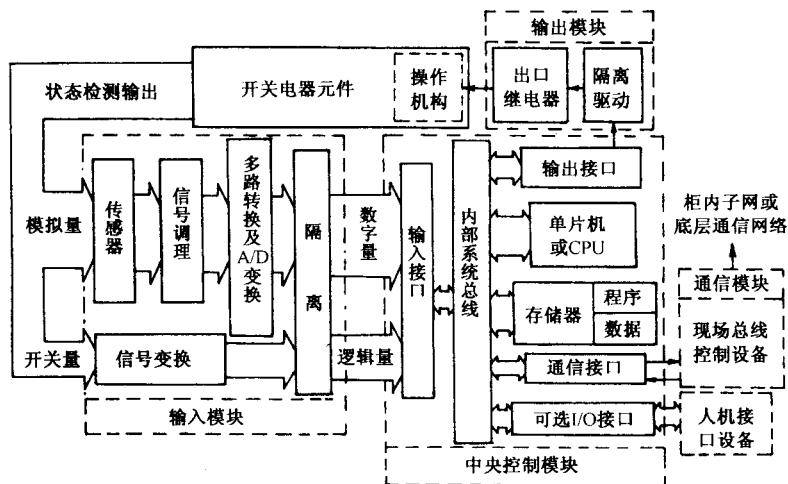


图 1-1 智能电器元件的结构组成

智能电器元件中的运行参数还可以通过现场总线、数字通信网络等上传至开关设备监控单元或系统中央控制室计算机（上位机），并接受它们发送的有关信息和指令。这种情况下，需要设置通信接口，通过现场总线或通信网络实现信息交换。不同类型的现场总线、通信网络有自己的通信协议、通信介质，需要专用的通信接口模块来完成协议转换，实现不同通信介质的相互兼容。

2. 智能开关设备

与智能电器元件不同，智能开关设备由一次电路中的开关电器元件以及一个物理结构上相对独立的智能监控单元组成，其原理结构如图 1-2 所示。

智能监控单元也含有输入、中央处理与控制、输出、监测及通信等主要模块。但与智能电器元件中的监控单元相比，无论在输入、输出端口设置，处理器完成的功能等方面都有较大的区别。迄今为止，大多数智能开关设备的输入信号主要来自开关设备控制和保护的對象，如线路、变压器、功率因数补偿装置、电动机等的运行参数，因而无论是模拟量还是开关量，输入端子数量更多，中央处理单元需要处理和记录、显示的信息量更大。为了满足开关设备通用化、标准化及组成分布式系统的要求，智能控制单元要完成传统成套开关设备中二次电路全部测量、保护和控制功能，还要能在当地完成保护特性和参数的设定，保护功能的投、退等，因此其监控模块必须配置更为完善的操作和显示。作为输、配电系统自动化的底层和现场设备，智能开关成套设备需要将大量受控设备现场记录传至系统控制室中的上位机，接受上位机传来的各种操作命令和网络重组命令，其通信模块需完成与上位机之间的信息传递。此外，作为成套开关设备，内部一次电器元件与控制单元间，同一配电系统中不同开关设备的一次元件间往往需要互相联锁，因此输出模块不仅要输出本设备执行元件的操作信号，还需要输出各种联锁信号，输出开关量信息一般比智能电器元件要多。

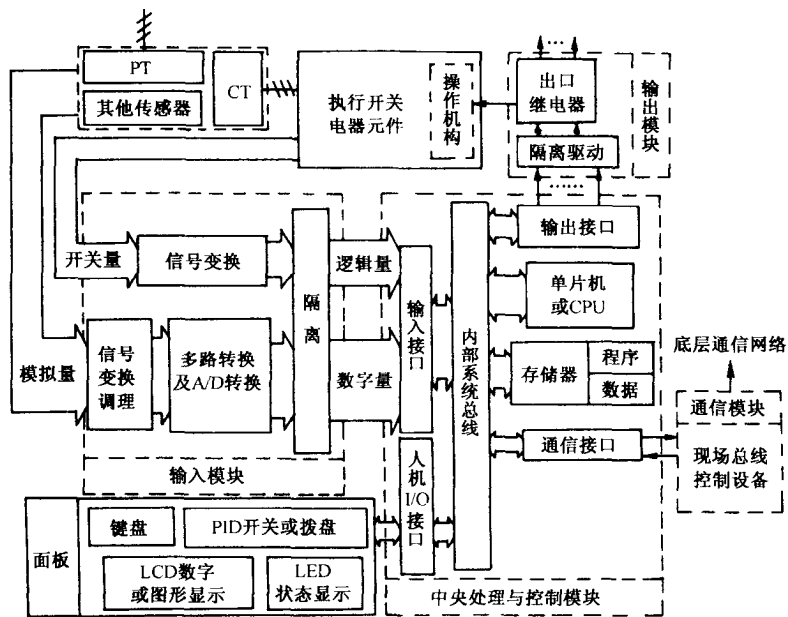


图 1-2 智能化开关设备结构图

成套开关设备一次元件应包含开关柜内所有安装在一次电路侧的电器元件，如电压互感器、电流互感器、隔离开关、执行电器（断路器、接触器、负荷开关）、接地开关等。控制单元通过电压、电流互感器取得开关设备控制和保护对象的运行参数，从接地开关和各种机械联锁开关取得相关的状态信息，用做控制单元输入模块的输入。

若开关设备中的一次开关电器本身带有智能监控单元（如带智能脱扣器的断路器），开关设备的监控单元可以通过柜内现场总线与它通信，实现对一次开关工作状态的现场监控及对各种保护特性的就地设置。

1.1.4 电器智能化网络的结构和特点

现代化大工业生产与现代社会生活要求电力系统有更高的供电质量和更完善的自动化管理。总线技术及数字化通信网络技术的应用，可以把现场输、配电设备和用电设备通过智能电器连接成类似计算机通信网络的系统，实现对设备运行、用电质量、供电质量及供电系统的智能化、自动化管理。这种采用现场总线和数字通信网络技术，由系统管理机和现场智能化开关设备组成的网络即可称为电器智能化网络。

1. 结构

电器智能化网络典型结构如图 1-3 所示。可以看出，网络可分为以下层次。

(1) 现场设备层

这是网络中的底层，由不同类型、不同生产厂商提供的智能开关元件、成套开关

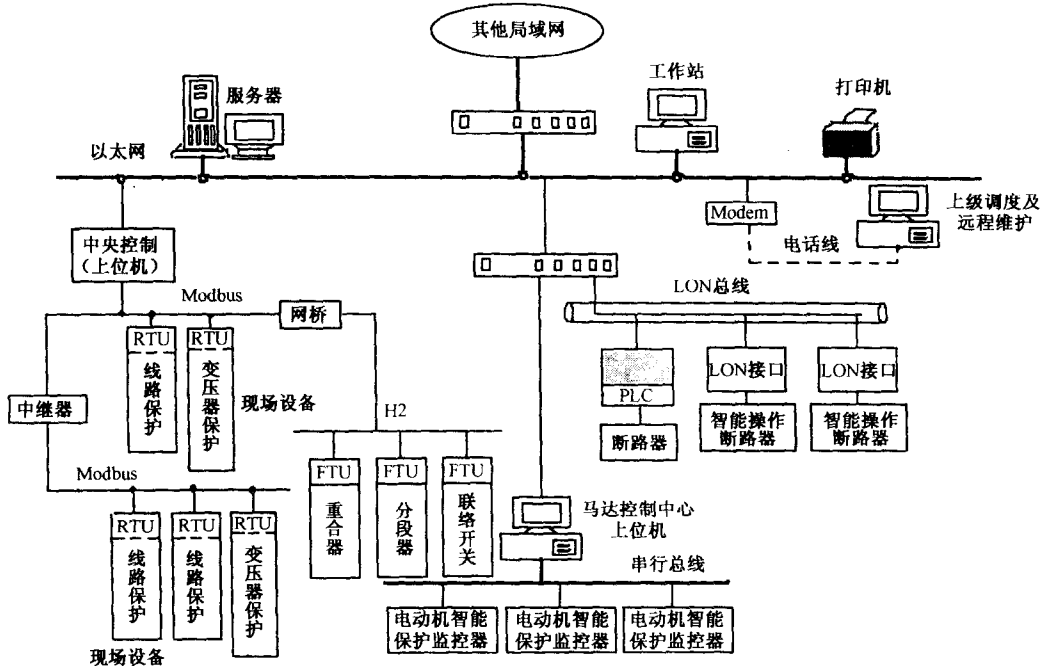


图 1-3 电器智能化网络典型结构

设备组成。现场设备由选定的现场总线，如图 1-3 中的 Modbus, LON, H2 和串行总线等连成底层网段，它由一个处于管理地位的微机或可编程逻辑控制器 PLC（Programmable Logic Controller）完成对现场设备的管理。现场设备也可直接受局域网络层的管理。底层网络还可通过中继器、HUB（集线器）、网桥连接，以扩大其覆盖范围。

（2）局域网络层

局域网络层由一些不同总线协议的现场设备层网络和具有独立的协议转换接口的现场设备与系统管理设备组成，它们之间一般采用以太网（Ethernet）连接。其底层网段可采用不同现场总线、不同通信介质和与以太网不同的通信协议。因此，必须通过通信控制器或网关与以太网连接。这一层次网络中的节点可以是现场设备，也可以是底层网段。

多个局域网经路由器连接，可组成更大的网络。也可通过网关和网络互连技术实现各局域网间的互连互访。还可通过调制解调器（Modem）用电话网或无线网与远方的高层管理系统连接。

2. 主要特点

从以上分析可以看出，电器智能化网络有下述特点：

- （1）现场设备具有独立的监控、测量、保护、操作功能，并且具有通信能力。
- （2）网络应允许不同制造商、不同类型的产品互连甚至互访。

(3) 能包容采用不同传输介质、不同通信协议的网段或局域网。

(4) 必须保证各类实时数据在网络中传输的实时性、准确性。

(5) 通过数字通信和数据库管理系统,智能化网络的上位管理设备能实现对网络中各现场设备运行状态的实时监控和管理,包括对现场设备在网络中地理位置和设备功能的设置,按地理信息显示现场设备运行状态,进行网络结构形式的构建和重组等。

(6) 网络运行必须稳定、可靠,以保证现场设备安全运行。

电器智能化网络是实现电力系统变电站综合自动化、调度自动化、配电网自动化及工业设备供电智能化的基础,通过它可以真正实现现场用电设备管理的自动化和无人值守,完成用户用电质量和电力系统供电质量的全面管理,极大地提高供电系统可靠性和用电设备的安全性。

1.2 电器智能化技术的发展

电器智能化技术几乎是与微机技术(特别是单片微机控制技术)、微电子技术、计算机网络和数字通信技术同步发展的。早在20世纪70年代末和80年代初,从世界上第一片8位单片机问世起,西欧、日本和美国就开始研究通过超大规模集成电路技术,把单片机及其所需外围电路芯片制成可与电动机供电电器相结合的专用集成电路IC(Integrated Circuit)芯片,替代体积庞大的继电器控制电路,完成电动机启动、控制和多种保护功能。日本和美国在20世纪80年代中期将这类产品成功推向市场,开发出第一代智能电器产品——单片机化电动机多功能保护装置(Single-chip Microcontroller Based Multi-function Protector for Motors)。在我国,西安交通大学电器教研室在1987年采用MCS-48单片机开发出了国内第一台同类型保护装置。随着单片机功能日益完善,传感器技术、计算机网络和数字通信技术的高速发展,在短短的20多年内,智能电器已经从简单的采用微机控制取代传统继电控制功能的单一封闭式装置,发展到具有较完整的理论体系和多学科交叉的电器智能化系统,成为电气工程领域中电力开关设备、电力系统继电保护、工业供配电系统及工业控制网络技术新的发展方向。本节将从控制功能、控制技术、电器元件工作机理变革与智能化网络四方面简述电器智能化技术的现状与发展。

1.2.1 智能电器监控单元功能的完善与开发

早期的电器智能控制单元受到微处理器性能和数字通信网络技术的限制,只能针对某一特定的对象,如电动机保护与起动、停止控制来进行设计,功能比较单一,并且采用封闭式控制模式。随着微电子技术、超大规模集成电路技术和计算机通信网络的发展,各类工业控制用微处理器和单片机在处理速度、数据位数、指令功能、接口功能、通信功能等方面都有了相当大的进步,适合于这类处理器程序设计的高级语言,如PLM语言(Intel-8x96用)、C语言及其与汇编语言的接口软件包的开发,为开关电器智能控制单元功能扩展提供了十分有利的条件。为实现电力系统综合自动化,变电站无人值守,工业、

民用供配电系统及工业控制网络的自动化、智能化，对底层（现场）开关电器智能监控单元的要求不仅仅是实现电器元件的保护和分、合功能，而是要全面完成对控制对象的实时监控，并将其运行状态和数据向系统控制中心上传，接受中心下发的各类操作命令、功能投退和参数设置等信息；还需保证不同生产厂商产品在网络中可以互连，网络中设备的资源可以共享，使用户在系统配置中有更大的自主权。因此，现在投放市场的智能控制单元基本都具有以下功能。

（1）现场运行参量的监测

测量现场电压，电流，有功和无功功率，功率因数，电源频率，电能及需要监测的其他非电参量，并能本地数字化显示或上传至控制中心。

（2）保护

根据对现场运行参量的监测结果，判断有无故障及故障类型，在出现故障后完成相应的操作。

（3）故障诊断

包括对控制单元主要硬件设备的自诊断，被控对象和开关元件自身故障的诊断。

（4）就地/远方调控

现场通过键盘、面板开关，或由通信口接受控制中心的操作信息，完成智能电器功能投退、保护参数设置，以及被控开关电器的分合操作。

（5）被控开关运行状态监视及现场运行工况记录

监视开关电器的工作位置、分合闸操作回路的状态，按用户要求显示现场运行的电压，电流，功率，功率因数，线路中各电器设备的连接和工作状态；记录故障时电压、电流波形及开关电器分合闸操作次数等历史数据，经通信口上传至控制中心，或生成报表就地打印、显示。

（6）通信

这是现代电器智能控制单元最重要的功能之一，也是智能电器元件和开关设备组成全开放式电器智能化网络的基础。有了通信功能，才能保证控制中心与远方运行现场间各类信息的自动交换，实现对整个系统中各现场设备的综合监控和管理。采用统一的通信协议或协议转换技术，即可保证通信网络的开放性。

（7）一次开关电器元件的监测

在线监测是智能电器元件监控单元功能开发的一个重要内容。通过记录与开关元件工作寿命及可靠性相关的数据，如机械特性、主要部件温升、绝缘强度等，并定期上传至系统控制中心的计算机系统，中心根据这些结果对开关元件进行可靠性分析，决定开关元件是否需要维护或更换，必要时，还可将结果回传至智能电器元件的监控单元。

从未来的发展趋势看，随着现场总线技术日臻完善，各类传感器的数字化、智能化技术的提高，监控单元的功能也将高度分散，形成一个以中央处理模块为核心，由现场总线连接的通信网络。这将大大简化监控单元输入模块硬件设计和模拟量数字运算的软件设计，使中央处理器可以实现其他更新的功能。

1.2.2 监控单元设计技术的现状与发展

1. 智能监控单元的硬件设计

智能监控单元硬件是智能电器完成各种功能的物理设备，其主要元件的选择、电路的设计直接影响到产品的功能、可靠性、通用性等综合指标。

早期智能监控单元的设计基本上按照图 1-1 所示结构，针对单元内不同功能的部件选用相应的集成电路或功能器件，制成不同的印刷电路插件卡，通过微处理器总线把它们连接成一个完整的整体。这种结构的各部件间连线多，电路元件多，印刷电路板布线复杂，可靠性差，电磁敏感性 EMS (Electro Magnetic Sensitivity) 很高，极易受干扰。近年来，随着微处理器、单片微机自身硬件集成规模和外围电路集成规模及功能的扩大，中央处理单元的硬件设计已越来越趋于简化。例如，国内许多开发商常采用低价位的 16 位单片机与可在线编程的外围系统器件 PSD (Programmable System Device) 结合，利用 PSD 内部大容量的 Flash ROM 和 RAM 及可编程逻辑阵列，使中央处理模块电路元件大大减少。采用具有工控功能的数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor) 不仅可以提高数据处理速度和精度，而且可以进一步减小控制单元体积，简化硬件设计，这是当前国内电器设备智能控制单元设计中最先进的技术之一。

多处理器技术是监控单元设计中的一种发展趋势。传感器的数字化和智能化，主令电器及输出控制继电器无触点化和网络功能的开发和应用，已把现场参量的变换和数字计算功能、开关量输出驱动功能，从监控单元中彻底分离出来。采用多处理器技术，则更进一步使监控单元的其他各种功能分散，形成更加独立和完善的功能模块。各处理器间，处理器与输入、输出通道间采用双端口 RAM 连接，甚至采用数字通信网络互连，可组成一个功能高度分散，管理高度集中的新型监控单元。

专用集成控制芯片的开发与推广应用，是智能监控单元硬件结构发展的最具应用价值的途径。由于使用专用芯片，所有的数字处理功能全部通过硬件实现，处理速度极大提高，许多要求实时性非常高，用软件无法实现的处理可以很容易地完成。把监控单元中的中央处理模块（包括各种 I/O 接口电路）、通信模块、输出驱动电路等全部集成于一块芯片中，不仅线路简单，体积小，价格低，而且有很强的抗干扰能力。目前，国外各大智能电器生产厂商均已将这类芯片推向市场。我国也正在进行自己的专用芯片研究与开发。

2, 监控单元软件设计

早期的智能控制单元功能比较单一，无通用性要求，因此软件设计多按传统的过程程序模式进行。用这种方法编制程序必须了解设备的硬件配置和功能，一旦硬件配置需要改变，软件也必须重新设计。另一方面，当设备要完成较多的功能时，这种软件编制方法得到的程序结构复杂，不仅编写代码十分困难，而且很难甚至无法满足某些重要功

能的实时性要求，程序可靠性很低，用户也无法进行二次开发。

随着智能电器在电力系统自动化，供电系统和工业控制系统智能化应用领域的发展，监控单元的硬件基本已标准化、通用化，为智能化网络系统嵌入式设计奠定了基础。为此，软件设计方法也必须适应这种变化，以满足系统灵活多变的配置要求。

（1）模块化设计

根据监控单元完成的功能，把软件划分成不同的模块，每一模块对应一种功能，或者说每一个程序模块完成一种指定的工作任务。这种模块化的设计方法使程序结构清晰，易于同时由多个程序员独立编制，缩短程序开发周期。另一方面，可以用不同的软件设计平台，如实时任务操作系统 RTOS（Real-time Tasking Operation System）、组态式软件设计方法等，在不改变监控单元软件基本结构的条件下，方便地配置智能化系统中各底层设备的控制功能。

（2）面向用户的设计方法

嵌入式系统软件设计的一个重要特征是用户不必直接对底层现场设备的硬件配置和数据资源等进行操作和访问。在用户与底层现场设备内部的硬件和数据资源之间有一个软件管理系统，用户对这些设备硬件资源的操作和对内部数据的访问，都经过这个软件管理系统来完成。这样，用户不必了解其硬件配置的细节，就可以按智能化系统配置要求，对各底层现场设备进行二次开发。

为了使用户的二次开发更加简单、方便，软件的用户接口除与 C 语言兼容以外，近年来国内外智能电器领域的开发商正尝试采用可编程逻辑控制器 PLC 的编程思想和蓝牙技术，开发出更适合用户使用的二次开发平台。

有关嵌入式系统软件设计的基本方法，本教材第 5 章将做简单讨论。更详细的设计，读者可参阅有关软件工程的教科书和专著。

3. 现场参量测量和保护信息的处理技术

作为电力系统、供电系统和工业控制系统主要设备的开关电器，其智能监控单元不仅要完成电器元件的分、合操作，而且必须完成对现场运行参量的测量，并根据测量结果判断系统是否出现故障。现代电力系统和供电系统对测量和保护精度要求很高，为保证测量和保护精度，在测量通道中，每一个环节的精度都必须精确控制，主要采取以下一些措施。

（1）提高传感器变换的精度和线性度

传感器用于把现场高电压、大电流的电参量或非电参量变为与监控单元采样通道兼容的电量，其变换的线性度和精度直接影响测量精度。为减小这一环节对测量精度的影响，首先必须开发高精度、高线性度的电压电流互感器和各类非电量传感器。例如，系统中故障电流与正常运行电流的比值非常大，传统的电流互感器铁心非线性，无法同时满足测量和保护的要求。近年来已开发出一种复合型电流互感器，内部集成了一个铁心互感器和一个空心互感器，分别用于故障电流和正常运行电流信号的变换，以满足保护

和测量精度要求。此外，传感器信号通常需要经过调理电路才能进行采样。用户设计的调理电路受所用元件的分散性、电路分布参数等因素影响，很难保证其线性度和精度的一致性。因此开发商开发了把传感器和信号调理电路集成为一体的信号变送器，按平均值或有效值输出可供中央处理器直接采样的模拟电平信号，减小了模拟量调理电路的分散性。

传感器未来的发展方向是数字化、智能化、网络化。通过现场总线，被测模拟参量以数字量形式输入中央处理器，不仅可以保证同一类型参数变换的线性度和精度，也简化了监控单元输入通道的设计和调试，是智能电器监控功能网络化的重要基础之一。

(2) 提高 A/D 转换器采样精度与速度

A/D 转换器的变换线性度、输出数字量位数及中央控制器处理周期内的采样点数都直接影响到被测参量的最终测量结果。现在的 A/D 转换器数字量输出已达 16 位以上，线性度可达 0.01%，采样周期可做到纳秒数量级，完全满足智能电器使用要求。为进一步简化电路设计，减小电路中附加元件，如多路转换开关和分布参数的影响，工业控制用的微处理器和单片机大多集成了 10 位以上的多通道 A/D 转换器，基本保证了各通道采样精度的一致性。智能传感器的开发，将把 A/D 转换器集成到传感器中，使模拟量的采样和转换控制功能与监控功能分离。

(3) 提高中央处理器数据位数和处理速度

处理器直接处理数据的位数越多，处理速度越高，数据处理时就可以通过增加采样点数，采用更加精确的算法，以提高测量和保护动作的精确度。当前市场流行的智能控制单元的中央处理器大多是 16 位的，在高压输、配电系统继电保护中，已采用 32 位的数字信号处理器 DSP。但在一些要求功能比较单一的低压断路器控制单元中，为了降低成本，在保证性能要求的前提下，仍然采用一些高性能的 8 位微处理器芯片。如前所述，采用多处理器技术，可把用于数据处理的处理器与完成其他功能的处理器分开，并用现场通信方法进行协调和管理。这样可以使用价格较低的处理芯片，获得较高的测量和保护精度。

(4) 合理选择数据处理的算法

在对运行参量采样后，中央处理模块必须把离散化的采样结果处理成对应的测量结果。不同的算法需要不同的处理时间，也带来不同的误差。对电器智能控制单元而言，正常显示的实时数据是运行现场各种电量的有效值（电量）或平均值（非电量）；在故障发生时，由于电流波形畸变，必须提取波形基波有效值，根据基波有效值大小决定开关电器分断操作方式（速断或延时）。当前对正常运行参量有效值的处理算法一般采用复化梯形算法，这种算法是复化求积算法中最简单的一种，但其截断误差较大。为减小截断误差，可以采用增加采样点数（减小计算步长）的方法，也可在相同计算步长条件下采用其他复化求积算法，如复化辛普森算法。目前较流行的方法是，采用提高 A/D 转换速率和 CPU 速度并可增加采样点数的复化梯形算法。

在编制算法程序时，可采用定点运算和浮点运算。定点运算比较简单，程序执行时间较短，但处理精度较低，且必须自行编制程序。浮点运算精度高，通常 CPU 供应商提供

的软件中都带有浮点运算子程序，可供直接调用。但这种方法的程序执行时间长，目前的16位处理器采用浮点运算很难完成处理智能电器数据的任务。但在使用DSP作为处理器或使用具有DSP处理功能的专用控制芯片的智能监控单元中，采用浮点运算很有效。

为处理故障电流和实现电能质量EQ（Energy Quality）监控，需要对采样的电流信号进行频谱或谐波分析。快速傅里叶变换FFT（Fast Fourier Transform）是处理这类问题的最常用方法。这种算法成熟，而且是DSP器件的基本工具之一，在现有智能电器监控单元开发中，几乎无一例外地采用这种算法处理频谱分析和谐波问题。近年来，小波变换WT（Wavelet Transform）在信号处理领域受到越来越多的关注。与快速傅里叶变换相比，WT具有在时、频两域都能表征信号局部特征的能力，因此在检测信号的瞬态或奇异点方面有特殊的优越性。由于电力系统故障电流是瞬态过程，而影响电力系统运行质量的负载，如大功率电力电子装置、电弧炉等，使电压、电流产生的畸变常常表现为瞬态且具有奇异点，因此采用小波变换处理故障电流，进行EQ监控有更好的应用前景。

当前，中、低电压等级的智能电器测量和保护算法已基本成熟，但在超高电压等级的智能电器中，由于故障过渡过程快，要求判断的准确度高，保护算法还存在许多的问题有待解决。

4. 监控单元的电磁兼容性技术

作为在电力系统和供、配电系统环境中运行的电子产品，智能电器监控单元工作在高电压、大电流的现场环境中，受到不同能量、不同频率的电磁干扰，因此对它的电磁兼容性EMC（Electro Magnetic Compatibility）设计是保证其可靠工作的关键问题之一。EMC包括电磁敏感性EMS（Electro Magnetic Sensitivity）和电磁干扰EMI（Electro Magnetic Interference）两方面的内容。在智能电器监控单元的设计中，最关心的是如何降低电磁敏感性，提高其抗外部环境电磁干扰的能力。

近年来，有关电子产品，特别是与电力系统相关的各类电子产品的电磁兼容性设计，已经成为产品研发过程中必须高度重视的问题，国际电器工程师学会IEC和国内有关部门都制定了严格的标准。为此，科技工作者已采取许多措施，开发符合标准的产品，保证产品开发适应产业化要求。目前采用的降低智能电器监控单元电磁敏感性的主要措施有：

（1）科学地布置印刷电路板线路，减少因布线不合理，由电路分布参数耦合产生的干扰。

（2）合理选择和配置线路滤波器，这是抑制电磁干扰最有效的措施之一。由于滤波器元件的选择和布置不合理会影响干扰抑制效果，甚至带来不可预见的附加干扰，科技工作者已开发出专用的线路滤波器模块，可以根据现场情况选用。

（3）采取合理的接地措施，通过接地线把经电路引入的干扰旁路。

（4）设计可靠的电磁屏蔽，避免空间电磁场对监控单元的干扰。此外，在监控单元本身的物理结构设计中，也必须考虑把电源模块、继电器输出模块等可能产生电磁干扰的部分与中央控制模块分别安装，并加装电磁屏蔽。

(5) 在软件中设计可靠的自检程序模块, 采用软件冗余技术, 重要数据设置要备份, 配置看门狗 (Watchdog) 等, 提高监控单元软件的抗干扰能力。

有关监控单元的电磁兼容性设计, 本教材第 4 章有较详细的说明。更深入的探讨请参阅有关专著, 这里不再讨论。

从未来的智能电器监控单元结构发展看, 其功能模块将高度地集成化、专用芯片化, 各功能模块间的连接也将网络化, 这种结构上的变化将极大地提高其抗干扰能力, 也可以使电磁兼容性设计大为简化。

1.2.3 电器元件工作机理的变革

智能电器给开关电器领域带来的最大影响是电器元件在工作机理上、结构设计上的变革。

1. 控制电器无触点化、数字化、网络化

传统电器领域中的控制 (二次) 电路, 是由各种不同功能的电器元件构成的。这些电器元件都带有物理上可接通和分断的电气接点, 接点的通断由机械驱动的 (如主令电器) 或电磁驱动的 (如各种电磁式继电器) 操作机构来控制。在智能电器开关设备中, 全部的控制功能是由监控单元的中央控制模块对输入信号的分析 and 处理来完成的。对各类输入继电器的接点状态、主令电器操作控制等开关量输入信息, 都可以采用相应的变换电路变成逻辑量 (0, 1) 或数字量输入中央控制模块。控制继电器的接点输出状态, 则由中央处理模块处理成相应的逻辑量 (0, 1) 输出, 经过电力电子开关或继电器放大后, 对被控的一次开关电器进行操作。在这里, 传统控制电器的工作机理和结构已发生了根本的变化, 没有了操作机构, 也没有可以看见的电气接点。随着现场总线和数字通信网络应用的深入, 未来的输入电器、智能监控单元的输出模块都将逐步变成具有独立控制和通信功能的智能元件, 成为智能监控单元底层网中的一个节点。

2. 一次开关电器操作机构设计思想的变革

如前所述, 智能电器元件不仅仅是开关电器元件与智能监控单元的简单组合。通过对开关电器元件运行状态的在线监测, 监控单元必须能够分辨不同的运行状态, 输出不同的操作控制命令, 使开关电器的操作机构能按最佳的分、合闸特性进行操作, 即实现所谓的智能操作, 提高元件的工作性能和寿命。

开关电器元件实现智能操作, 是智能电器元件发展的方向。要求从事元件设计与开发的科技工作者彻底改变操作机构的设计思想, 开发出能根据智能监控单元的智能操作命令自动调整开关动作方式的新型开关操作机构。

由于传统开关电器操作机构的机械结构十分复杂, 只能按设计要求进行一种形式的合闸或分闸操作, 机构的动作时间长, 分散性大, 而且随运行时间、操作次数增加而变化。要完成智能操作功能, 其操作机构必须从设计思想上进行根本的变革。 20 世纪末期

出现的真空断路器永磁操作机构，首先打破了中、低电压等级断路器采用的操作机构用弹簧储能、机械扣锁和解扣的传统设计方法，操作机构简单，动作快，一致性、稳定性好，机构动作速度易于控制，已成为当前智能化中、低压断路器的一种较理想的操作机构。将永磁操作机构用于接触器的工作也已开始，但它无法用于采用液压传动操作的超高压断路器。超高压断路器操作机构实现智能控制的研究已经开展，相信在不久的将来会得到可以投入实际应用的结果。

1.2.4 电器智能化网络的现状与发展趋势

电器智能化网络最普遍的结构形式是现场总线局域网和工业以太网。现场总线网可采用自定义的现场总线，也可采用当前流行的几种现场总线，如 Modbus, LonWorks, PROFIBUS, CAN-bus 等。这些底层网络通过通信控制器和自己带有独立协议转换接口的现场智能设备，即可组成基于工业以太网的局域网。最典型的应用是变电站综合自动化、各种电压等级的配电网自动化、马达控制中心等。在现场总线局域网应用中，网络基本上采用主—从方式。各现场设备控制单元作为下位机，在网络中为从设备；底层小型变电站、配电室中的监控、管理计算机为上位机，在网络中为主设备。从设备只能各自与主设备交换信息，而且只有在上位机发出召唤时，下位机才可以与上位机通信。基于工业以太网的局域网则应用于管理层次较高、系统规模较大、覆盖范围较宽的系统。最初，这些局域网是各自独立的，不同网络中的信息资源封闭，各变电站、配电网之间的资源不能共享，而且同一网络中的各种现场设备只能由同一个开发商提供，用户也不能进行最优化配置。

现代电力系统综合自动化管理，要求对不同地区的电网、不同发电站的电能进行统一管理和调度，各地区电网的电能质量要进行集中监控。同时，希望各地区电网的某些资源，如可以公用的管理系统软件、某些事故发生前运行参数变化的历史数据、对事故分析处理的措施等可以共享，这些都要求电器智能化网络更加开放，功能更加完善。随着计算机网络硬、软件技术的日臻完善，局域网不仅可以互连成覆盖范围很大的广域网，而且近年来已将网络互连技术引入电器智能化网络，不同类型的现场网络互连问题也得到了根本解决。采用面向对象的软件设计模式来设计网络的系统软件，大大提高了网络的开放性、灵活性、可靠性。

1.3 本课程的学习内容

本课程涉及到智能电器元件、智能开关设备及电器智能化网络设计、开发等相关知识，为此本课程将系统介绍完成智能电器监控功能所需的各种现场参量及其使用的传感器，完整的智能电器监控单元中各硬件功能模块常用的电路元件及典型电路设计方法，被测参量信号处理及其数字算法和误差分析，包括正常运行参数的测量和各类故障参量的信号调理、保护算法及故障类型的识别与处理对策。在了解常用电路元件和现场参量

信号处理方法的基础上，从三个方面学习智能电器监控单元的基本设计方法，① 硬件电路中主要电路元件的选用原则、电路结构设计；② 控制单元常用的软件设计结构，软件的模块化设计，实时多任务调度操作系统 RTOS 的基本概念；③ 控制单元的电磁兼容性（EMC）问题、降低电磁干扰（EMI）与控制单元电磁敏感度（EMS）的主要方法。为使读者了解电器智能化网络的基本设计原理，在简单介绍数字通信原理、计算机通信网络基础和现场总线基本概念的基础上，根据电器智能化通信网络传送信息的特点，讨论了网络基本类型、结构、设计原则，并对网络互连技术在电器智能化网络中的应用进行了初步的分析。最后，以配电网自动化为例，介绍配电网中各种智能电器设备的功能及其在网络中的地位，以及这些智能设备间的配合关系，使读者初步建立起最简单、直观的电器智能化网络的概念。

本章小结

电器智能化和智能电器是传统电器学科与现代电子技术、微机控制技术、现代传感器技术、数字通信及计算机通信网络技术相互融合的产物，是传统电器学科一个新的发展方向。它不仅改变了传统电力开关设备的系统运行方式，而且影响到传统开关电器的上作机理和设计方法。但是无论是智能电器元件，还是智能开关设备，都不是开关电器与微机控制的简单组合。本章根据智能电器和开关设备的主要特点给出了它们的一般定义，说明了它们的基本结构组成；分别从智能电器的功能、监控单元的设计技术、电器元件工作机理和操作机构的变革，以及电器智能化网络等方面，讨论了智能电器的现状及发展趋势；最后介绍了本课程学习的主要内容。

思考练习题

- 1-1 简述智能电器元件与智能开关设备的结构组成。
- 1-2 智能电器元件与智能开关设备在结构和工作原理上有何区别？
- 1-3 智能电器的主要特点是什么？
- 1-4 试述智能电器监控单元在硬件和软件设计方面的发展趋势。
- 1-5 什么是电器智能化网络？电器智能化网络有哪些基本类型？
- 1-6 为什么说电器元件的智能化将会影响其工作机理和设计思想的变革？

第 2 章 现场参量及其检测

智能电器监控单元需要在运行现场对不同类型、不同物理属性的参量进行测量，并根据测量结果对开关电器进行操作控制，完成对现场设备和开关电器自身的控制和保护。因此，现场参量的输入和数据采集是智能电器监控单元设计中一个十分重要的环节。可以说，没有对现场参量的检测，智能电器的功能便不能实现。本章讨论的内容主要涉及与智能电器相关的各种模拟量（电量、非电量）和开关量的检测及其输入通道设计方法，介绍常用传感器、信号调理电路、信号变换器及其与处理器的接口技术和常用电路芯片，并分析所用的各类电路元件对测量精度的影响。

2.1 智能电器现场参量类型及数字化测量方法

智能电器的核心是监控单元。完成现场参量的转换、调理和采集是监控单元的主要任务。图 2-1 揭示出从现场参量输入到将其转换为中央处理模块可直接处理的信号的整个过程。

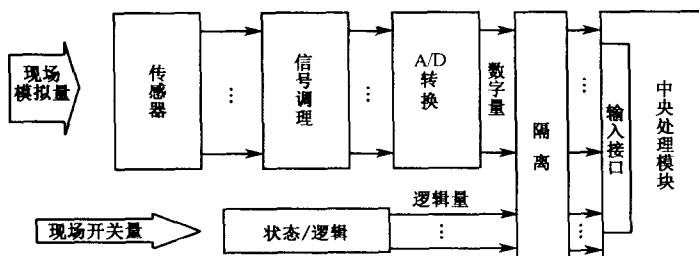


图 2-1 智能电器现场参量的采集、调理和转换过程示意图

由图 2-1 可以看出，智能电器监控单元所要采集的现场参量可以分为两大类：模拟型现场参量和开关型现场参量。

1. 模拟型现场参量

这类参量是指随时间连续变化的信号，如电压、电流、温度、压力、速度等。这些信号需要专门的传感器将其变换成可与后级电路输入端兼容的电压信号，以便进行调理和 A/D 转换。

模拟型现场参量又可分为电量和非电量两种：

(1) 电量信号

这种信号指原始信号，就是电量形式的信号，主要是智能电器运行现场的电压、电

流和频率，其他如有功功率、无功功率、功率因数、电能等都可以通过这两个基本参量计算出来。

(2) 非电量信号

指原始信号不是电量形式的物理信号，主要包括运行现场需要检测的温度、湿度、压力、位置、速度、加速度等，需要通过与被测物理量相对应的传感器将其变换为电量信号。

2. 开关型现场参量

这种参量本身只存在两种状态，如断路器触点的分与合，继电器的开与闭，脉冲式电度表的输出脉冲有和无等。这些信号需要通过信号的变换、隔离成为逻辑变量，才能经 I/O 通道由 CPU 处理。

一般来说，运行现场的各种参量都不能直接送入监控单元。如前所述，测量直接取自运行现场的各种被测参量时，它们或在物理属性上，或在电压幅值上不能与智能监控单元的输入端兼容。此外，运行现场的各种干扰信号不经处理，还将直接影响中央处理模块的处理结果，造成测量不准确，甚至使开关电器误操作。因此，如图 2-1 所示，现场模拟参量在经过传感器变换为相应的电压信号后，还必须经过信号调理电路，进行进一步的幅值调整和滤波处理，才能送至 A/D 转换器变为中央处理器能接受并处理的数字量，以保证测量和处理结果的准确性。由于现场开关量信号只是电气触点的分、合或脉冲信号的有、无状态，对它们的调理是把这些状态变为对应的、可被中央处理器处理的逻辑信号。

为提高监控单元的抗干扰能力，经信号调理和变换后的数字量和逻辑量与中央处理模块之间还应当具有良好的电隔离。以下分别讨论智能电器监控单元需检测的各种现场参量常用的传感器技术、信号调理技术及其与处理器的接口方法。

2.2 电量信号检测方法

在被保护和控制的线路中，各种电参数是智能电器监控的一类主要现场参量，包括供电电压、线路电流、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数等。这些电参数中需要直接检测的只有电压和电流，其他参数则是通过特定算法，由中央处理器根据测得的电压和电流计算出来，所以本节只介绍电压和电流的检测方法。

用于电压和电流检测的传感器一直是电气测量中一个重要的研究内容。按照传感器的工作原理，主要分为以下几类：

(1) 以法拉第电磁感应定律为基础的互感器，包括铁心电磁式电压、电流互感器和空心电流互感器。

(2) 按霍尔效应原理工作的互感器，主要包括霍尔电流传感器和霍尔电压传感器。

(3) 基于磁光效应和光电效应的互感器，主要有光学电流互感器和光学电压互感器。