

普通高等教育电气工程与自动化规划教材

# 智能电器

主编 邹积岩

参编 何俊佳 孙辉 段雄英

主审 程礼椿

机械工业出版社

本书共分三部分，第一部分为电器智能化的定义及其基础知识；第二部分为智能电器基本结构及相关理论，包括智能电器的信号检测系统、控制系统和电子操动，智能电器的可靠性与电磁兼容等；第三部分为智能电器的应用，包括配电自动化、智能控制电器、统一电能质量管理体系等。

本书可作为高等学校电气工程与自动化专业本科或研究生教材，也可作为从事电气工程的科技人员与电器行业产品研发人员的参考书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

智能电器 赖积岩主编 北京：机械工业出版社，  
2012.12  
普通高等教育电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-111-39412-9

I ①智... II ①赖... III ①控制电器 高等学校：教材 IV ①TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 281512 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)  
策划编辑：于苏华 周娟  
责任编辑：于苏华 版式设计：冉晓华 责任校对：姚培新  
封面设计：王洪流 责任印制：洪汉军  
北京京丰印刷厂印刷  
2012 年 12 月第 1 版·第 1 次印刷  
开本：185mm×260mm 1/16 印张：14.5  
定价：28.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 88379000  
封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着人们对电力的需求日益增加，对电能质量的要求日益提高。近年来，我国电力系统及电力设备行业得到了长足的发展。伴随计算机技术及信息技术的飞速发展，开关电器领域正经历新一轮的更新换代，新概念电器层出不穷。其中最能代表时代发展的、也是发展最为迅速的是智能化电器。经过近年来业内科技工作者的不懈努力，智能电器所涉及的理论问题已越来越清楚，各种智能电器产品也逐渐得到了市场的认同。

首先，我们考虑以下电器智能化的内涵与智能电器的定义。所谓电器的智能化主要指开关电器实现人工智能的过程。按人工智能的定义，智能化是指使对象具备灵敏准确的感知功能、正确的思维与判断功能以及行之有效的执行功能而进行的工作。感知功能包括设备的自诊断，各种运行参数和系统参数的检测；思维和判断功能也就是控制，可依靠计算机或数字信号处理器（~~器~~）来完成；执行功能对开关电器而言就是对一次设备的操动。因此我们可以这样定义智能电器：在某一方面或整体上具有人工智能的电器元件或系统。

电器智能化是一种理念，是一种方法，是一个发展和进步的过程，其目的是使电器产品通过人工智能的部分或全部功能，尤其是应用现代计算机和网络技术，使产品达到最佳工况。因此，电器智能化涉及的理论与技术除了电器学基础外，还应包括数字信号处理、计算机网络和数据通信、控制理论与控制工程、电力电子技术、软件工程以及现代传感器技术等。由于电力系统和电力设备物理过程的复杂性、不确定性，一般难以有精确的数学描述。

早在 ~~1960~~ 年前，人们就开始在配电系统实践开关电器的智能化，即在配电开关外附加以智能控制器，用以自动判别线路故障，切除与隔离故障并恢复健康区段的供电。人们把这种带控制器的开关系统称为自动重合器与自动分段器。随着计算机技术的发展，越来越多的电站实现了微机化控制与管理，这使得开关智能化沿两条路线发展。路线之一是以电力系统的需求为主，基于开关的所谓“四遥”，把设备状态反映到电站主控微机，由它实现开关控制乃至整个系统的智能化。而对国内外大多制造厂家来说，则更侧重另一条发展路线：他们首先追求的是开关本体智能化，类似自动重合器与自动分段器，然后逐步实现整个系统的智能化与网络化。这种分步实施的路线也是国外大部分配电系统的发展路线。实际上，元件智能化才是最根本和最可靠的智能化。

近年来，国内外已有很多智能化开关投入市场，它们的特点都是采用先进的传感器技术和计算机信号处理与控制技术，使整个组合电器的在线监测与二次系统在一个计算机控制平台上。~~20~~世纪 ~~80~~年代末的典型产品如 ~~ABB~~ 公司的 ~~VS1~~ 型真空开关，采用了永磁操动机构，配合新型传感器以及二次控制无触点化，使该产品达到了较高的智能化水平。作者曾介绍了相同类型的真空开关永磁机构，其意义不仅大大简化了机械传动，提高了机构的可靠性；更重要的是它改进了操动的可控性，为进一步的高压开关选相合分打下了基础。在开关智能化理论方面，还有人提出智能操作的概念，即要求开关可根据电网中发出的不同工况，自动选择和调整操动机构或 ~~灭~~ 弧室，

合理地预定工作条件。变速操作打破了传统断路器单一分闸特性的概念，实际上是上述执行功能的智能化，是对高电压等级开关操动机构的改造十分有益的尝试。

电器智能化是一个更新换代的工作，涉及很多电器领域的新概念，要求我们做很多深入细致的工作，很多试验和考验是必须的。结合必要的理论计算和计算机仿真可以大大推进研究开发工作。电力系统希望开关生产厂采用更多的智能化技术，不断提高产品的档次和技术含量，赶超国际先进水平；但同时要积极扶持新概念电器，更多地采用智能化开关，从而在根本上解决电力系统的硬件水平问题，加速电力系统的现代化步伐。只要科研工作者与生产厂、系统用户更密切地配合，携手共进，我国的开关智能化水平就一定能达到国际前沿。

本书共分三部分，第一部分为智能电器的定义及其基础知识；第二部分为智能电器基本结构及相关理论，包括智能电器的信号检测系统、控制系统和电子操动，智能电器的可靠性与电磁兼容等；第三部分为智能电器的应用，包括配电自动化、~~云~~智能电器、统一电能质量管理体系等。第 1 章智能电器概论，介绍电器的定义与分类，电器的典型结构，电器智能化的内涵与主要内容，智能电器的理论任务等；第 2 章电器学基本理论与信号处理基础，包括电流的热效应与力效应，电接触与电弧，磁路计算，采样与数字滤波，常用信号分析方法等；第 3 章智能电器的信号检测系统，包括现场参量类型及数字化测量方法，智能电器中的各类传感器，信号输入通道设计，现场参量的信号分析与处理以及信号检测系统误差等；第 4 章智能电器的控制系统，包括控制器的基本结构与组成，控制器的基本功能与特点，控制器的系统设计，智能电器控制器的硬件系统，智能电器控制器的控制算法基础，智能电器的网络化与通信系统等；第 5 章电子操动与永磁机构，包括传统操动系统及其局限性，电子操动的构成与设计原则，永磁操动机构的磁设计，相控开关，电子操动控制精度与可靠性分析，基于永磁机构的直流断路器等；第 6 章智能电器的可靠性与电磁兼容，包括智能电器的可靠性，智能电器的电磁兼容，智能电器的电磁兼容试验与标准等；第 7 章配电自动化，包括配电自动化的基本概念，智能式重合器与分段器，配电网馈线自动化的基本模式，馈线远方终端 ~~云~~，配电自动化的通信等；第 8 章柔性交流输电系统（~~云~~智能）电器，包括电力电子技术在输电系统的应用，典型 ~~云~~智能电器，超高压真空开关的实现等；第 9 章统一电能质量管理体系，包括电能质量问题的提出，无功补偿，瞬时无功功率理论，有源滤波，动态电能质量调节，统一电能质量调节器等。最后，在附录中介绍了智能电器中常用的计算机分析与仿真软件工具。

本书由大连理工大学邹积岩教授主编，华中科技大学程礼椿教授主审。邹积岩教授负责第 1 章的编写和全书的统稿；何俊佳教授负责第 2 章以及附录的编写；段雄鹰博士负责第 3 章的编写；孙辉教授负责第 4 章的编写。大连理工大学董恩源、廖敏夫和方春恩三位博士学位论文也为本书提供了部分素材。西安交通大学的张杭教授和王汝文教授对本书的结构和内容提出了许多宝贵意见。书中的部分实验在大连理工大学电力电子研究所完成，得到丛吉远高工、邹启涛高工的支持。对以上同仁和老师为本书的完成所做的工作，在此一并表示衷心的感谢！

本书可作为电气工程及其自动化专业本科生及研究生的教材，也可作为从事电气工程的科技人员与电器行业产品研发人员的参考书。鉴于编著者水平所限，书中难免有不足和谬误之处，诚挚地欢迎广大读者批评指正。

# 目 录

前言	
第 1 章 智能电器概论	1
1.1 电器的定义与分类	1
1.2 电器的典型结构	1
1.3 电器智能化的内涵与主要内容	1
1.4 智能电器的理论任务	1
思考题	1
参考文献	1
第 2 章 电器学基本理论与信号处理基础	2
2.1 电流的热效应	2
2.1.1 电器设备的最大允许温升	2
2.1.2 电器的发热与散热	2
2.1.3 导体的升温与冷却过程	2
2.1.4 电器设备的短时发热	2
2.2 电流的力效应	2
2.2.1 概述	2
2.2.2 载流系统电动力的计算	2
2.2.3 交流电动力	2
2.3 电接触	2
2.3.1 概述	2
2.3.2 接触电阻	2
2.3.3 电接触的稳定性与接触劣化	2
2.4 电弧	2
2.4.1 概述	2
2.4.2 电弧弧柱过程	2
2.4.3 直流电弧	2
2.4.4 交流电弧	2
2.5 磁路与磁路计算	2
2.5.1 非极化磁路	2
2.5.2 极化磁路	2
2.5.3 磁路计算	2
2.6 采样	2
2.6.1 概述	2
2.6.2 连续时间信号的采样	2
2.6.3 离散时间信号的采样	2
2.6.4 离散时间信号的抽取和内插	2
2.7 数字滤波	2
2.7.1 滤波的概念	2
2.7.2 数字滤波器基本网络结构	2
2.7.3 离散数字滤波器的设计方法	2
2.7.4 有限冲激响应 (FIR) 滤波器	2
2.8 常用信号分析方法	2
2.8.1 信号的时域分析	2
2.8.2 信号的频域分析	2
2.8.3 信号的 域分析	2
思考题	2
参考文献	2
第 3 章 智能电器的信号检测系统	3
3.1 现场参量类型及数字化测量方法	3
3.2 智能电器中的各类传感器	3
3.2.1 电量传感器	3
3.2.2 非电量传感器	3
3.2.3 开关量检测方法	3
3.3 信号输入通道设计	3
3.3.1 输入通道的基本结构	3
3.3.2 模拟量输入通道中的信号调理电路	3
3.3.3 模拟信号数字化调制方法	3
3.3.4 隔离的概念及措施	3
3.4 现场参量的信号分析与处理	3
3.4.1 数字滤波器	3
3.4.2 非线性传感器测量结果的线性化处理	3
3.4.3 常用电参量的计算	3
3.5 信号检测系统误差	3
思考题	3
参考文献	3
第 4 章 智能电器的控制系统	4
4.1 控制器的基本结构与组成	4
4.2 控制器的基本功能与特点	4
4.2.1 控制器的基本功能	4

1.1.1 控制器的基本特点 .....	1.1	1.1.1 压器同步关合 .....	1.1
1.1.2 控制器的系统设计 .....	1.2	1.1.2 断路器的同步分断 .....	1.2
1.1.2.1 控制器系统设计的基本要求 .....	1.2	1.1.2.1 同步开关的技术要求 .....	1.2
1.1.2.2 控制器系统设计的主要步骤 .....	1.2	1.1.3 电子操动控制精度	
1.1.3 智能电器控制器的硬件系统 .....	1.3	与可靠性分析 .....	1.3
1.1.3.1 中央控制器 .....	1.3	1.1.3.1 永磁机构的动作时序 .....	1.3
1.1.3.2 译码与存储器系统 .....	1.3	1.1.3.2 控制精度分析 .....	1.3
1.1.3.3 基本输入输出系统 .....	1.3	1.1.3.3 电子操动的可靠性分析 .....	1.3
1.1.4 智能电器控制器的控制		1.1.4 基于永磁机构的直流	
算法基础 .....	1.4	断路器 .....	1.4
1.1.4.1 专家系统设计 .....	1.4	1.1.4.1 直流断路器简介 .....	1.4
1.1.4.2 模糊逻辑设计 .....	1.4	1.1.4.2 电流转移原理 .....	1.4
1.1.4.3 神经网络基础 .....	1.4	1.1.4.3 新型结构的直流断路器 .....	1.4
1.1.4.4 模式识别和聚类分析 .....	1.4	1.1.4.4 系统仿真分析 .....	1.4
1.1.5 智能电器的网络化与		思考题 .....	1.4
通信系统 .....	1.5	参考文献 .....	1.4
1.1.5.1 现场总线技术 .....	1.5	第 2 章 智能电器的可靠性与	
1.1.5.2 数字通信基础 .....	1.5	电磁兼容 .....	1.5
1.1.5.3 变电站通信系统结构 .....	1.5	2.1 智能电器的可靠性 .....	1.5
1.1.5.4 变电站通信网的基本设计原则 .....	1.5	2.1.1 可靠性的一般理论 .....	1.5
1.1.5.5 通信网的软硬件实现 .....	1.5	2.1.2 常用的可靠性指标 .....	1.5
1.1.5.6 系统协议 .....	1.5	2.1.3 设备常见失效模式 .....	1.5
1.1.5.7 国际标准的特点 .....	1.5	2.1.4 产品可靠性模型的建立 .....	1.5
1.1.5.8 基于国际标准的变电站内		2.1.5 产品可靠性的评估 .....	1.5
通信系统框架模型 .....	1.5	2.2 智能电器的电磁兼容 .....	1.5
1.1.5.9 智能电器的网络化 .....	1.5	2.2.1 概述 .....	1.5
思考题 .....	1.5	2.2.2 智能电器的电磁干扰源 .....	1.5
参考文献 .....	1.5	2.2.3 智能电器中的电磁耦合方式 .....	1.5
第 3 章 电子操动与永磁机构 .....	1.6	2.2.4 智能电器中的电磁干扰	
3.1 传统操动系统及其局限性 .....	1.6	抑制措施 .....	1.5
3.2 电子操动的构成与设计原则 .....	1.6	2.3 智能电器的电磁兼容	
3.2.1 电子操动系统的一般构成 .....	1.6	试验和标准 .....	1.6
3.2.2 永磁操动机构的励磁控制 .....	1.6	2.3.1 概述 .....	1.6
3.3 永磁操动机构的磁设计 .....	1.6	2.3.2 电磁兼容抗扰度试验 .....	1.6
3.3.1 基本方程的建立 .....	1.6	2.3.3 电磁兼容标准 .....	1.6
3.3.2 永磁体处理及机构磁场计算 .....	1.6	思考题 .....	1.6
3.3.3 永磁操动机构的负载特性 .....	1.6	参考文献 .....	1.6
3.3.4 永磁机构的其他结构形式 .....	1.6	第 4 章 配电自动化——智能	
3.4 相控开关 .....	1.6	电器应用之一 .....	1.6
3.4.1 相控开关的基本要素 .....	1.6	4.1 概述 .....	1.6
3.4.2 并联无功电容器与空载变		4.1.1 我国配电网的现状 .....	1.6

苑园	配电自动化的基本概念 .....	员愿	愿园	高级静止无功发生器 .....	员怨
苑园	配电自动化的发展及现状 .....	员园	愿园	故障电流限制器 .....	圆员
苑园	配电网自动化的技术难点 .....	员员	愿园	储能系统 .....	圆圆
苑园	智能式重合器与分段器 .....	员圆	愿园	超高压真空开关的实现 .....	圆猿
苑园	重合器与分段器 .....	员圆	愿园	高压和超高压领域发展真空开关 的可行性 .....	圆猿
苑园	自动重合器与分段器 .....	员猿	愿园	光控模块式真空开关 .....	圆缘
苑园	配电网馈线自动化的 基本模式 .....	员源	愿园	多断口真空开关的整体结构 .....	圆愿
苑园	以重合器 输 段器构成的 控制模式 .....	员源	思考题 .....		圆园
苑园	以 云裁实现 杂葬葬葬集中 控制模式 .....	员远	参考文献 .....		圆园
苑园	“无信道就地智能控制 垣葬葬葬”模式 .....	员苑	第 怨章 统一电能管理系统——智能 电器的发展 .....		圆员
苑园	“有信道就地智能控制 垣葬葬葬”模式 .....	员园	怨园	电能质量问题的提出 .....	圆员
苑园	馈线远方终端——云裁 .....	员园	怨园	理想的三相交流系统的电能 .....	圆员
苑园	云裁的功能及性能要求 .....	员园	怨园	电力环境污染及其危害 .....	圆员
苑园	云裁的技术核心 .....	员猿	怨园	电能质量标准 .....	圆猿
苑园	云裁的组成 .....	员猿	怨园	无功补偿 .....	圆源
苑园	配电自动化的通信 .....	员源	怨园	无功功率与功率因数 .....	圆源
苑园	配电自动化通信方式 .....	员源	怨园	无功功率的物理意义 .....	圆缘
苑园	配电自动化通信规约 .....	员远	怨园	动态无功补偿原理 .....	圆远
苑园	基于 附葬葬葬的配电自动化 通信体系 .....	员苑	怨园	瞬时无功功率理论 .....	圆怨
思考题 .....		员怨	怨园	基本理论 .....	圆怨
参考文献 .....		员怨	怨园	谐波和无功电流的检测 .....	圆园
第 愿章 柔性交流输电系统电器——智能 电器应用之二 .....		员员	怨园	有源滤波 .....	圆园
愿园	柔性交流输电问题的提出 .....	员员	怨园	有源滤波器系统的构成 .....	圆园
愿园	电力电子技术在输 电系统的应用 .....	员圆	怨园	有源滤波器的主电路 .....	圆园
愿园	电力电子技术对输电系统 的影响 .....	员猿	怨园	动态电能质量调节 .....	圆缘
愿园	在输电系统中应用的电力 电子开关 .....	员源	怨园	不间断电源 (附葬葬) .....	圆缘
愿园	云葬葬葬电器在输电系统中 的应用 .....	员远	怨园	动态电压恢复器 (阅葬葬) .....	圆愿
愿园	典型柔性交流输电系统 (云葬葬葬) 电器 .....	员苑	怨园	统一电能质量调节器 .....	圆怨
愿园	静止无功补偿器 .....	员苑	怨园	概述 .....	圆怨
			怨园	统一电能质量调节器 的主电路 .....	圆怨
			怨园	统一电能质量调节器 的控制技术 .....	圆员
			思考题 .....		圆远
			参考文献 .....		圆远
			附录 常用分析与仿真工具 .....		圆苑
			附录 粤 云葬葬葬及其应用 .....		圆苑
			附录 月 云葬葬葬及其应用 .....		圆园
			附录 悦 粤葬葬葬及其应用 .....		圆苑

## 第 1 章 智能电器概论

电气工程是一门传统学科，开关电器又是其中的一个传统领域。计算机技术及信息技术的飞速发展对开关电器领域注入了新的活力，由此产生的智能电器成为这一传统领域新的亮点。我们从传统电器的一般概念出发，定义电器智能化和智能电器，以达了解和理解典型智能电器的目的。

### 1.1 电器的定义与分类

“电器”一词在我们的生活中出现的频率很高，电器的定义是什么？用于检测电参数、控制电路、实现电能转换的硬件设备和装置统称为电器。

凡是根据外部指令或预定的功能，自动或手动、连续或断续地改变电路参数，实现对电路或非电对象的切换、控制、检测和能量变换的电气设备都属电器的范畴。

当代科学领域，人们根据涉及的电能水平和信号强度，把电科学与技术分成“强电”与“弱电”。强电的特征是功率和电能的传输与控制；弱电的特征则是信号的传递与控制。我们一般把强电领域的技术问题归入电气工程，而把弱电领域的技术问题归入电子工程。电器的主要舞台是强电领域，可以说电气工程领域的硬件都属电器的范畴，电器是电气科学的载体。

随着电子技术和计算机技术的发展，尤其是电力电子技术的发展，电气工程与电子工程的界限越来越模糊。这里我们还是把工作放在弱电范畴的、以信号与控制为主要功能的电子装置单列一类，属于电子工程领域；而把用于功率与电能控制的电力电子装置作为广义的电器对待。随着电力电子器件的不断发展和进步，电力电子技术在电气工程领域中的地位将会越来越重要，尤其是电器的智能化将越来越依赖电力电子技术来实现。强电领域的电器中大多依赖电子技术来控制，而常规的电子系统，对其中电源的要求也越来越严格。因此可以说，我们已经进入了强电与弱电重新融合的时代，电器中有电子技术，电子装置中也有功率电器。智能电器就是成功应用电子技术完成电能控制的电器。

电器的分类方式有多种，一般按功能和使用领域可分为：

(1) 高压电器 额定工作电压在 10kV 以上，主要用于电力系统，少量用于脉冲功率技术和特种电源中。高压电器一般包括：断路器、负荷开关、熔断器、避雷器、电抗器等。其中断路器可以分断系统短路电流，是电力系统的“卫士”；负荷开关可以频繁操作，控制负荷的通断；熔断器的作用与断路器类似，但只能一次性动作。

实际上更严格的高压电器是指额定工作电压在 10kV 以上的电器，而在配电和供电网使用的、额定工作电压在 10kV 以下、1kV 以上的电器又被称为“中压电器”。

(2) 低压与家用电器 额定工作电压在 1kV 以下，主要用于电力拖动和家庭的电气设施，包括：断路器、接触器、组合（自动）开关、低压熔断器、低压避雷器、电磁起动器，家用电热、制冷、电动工具和照明灯具等。其中接触器和电磁起动器主要用于电动机等负载

控制，组合（自动）开关则用于基本用电单元的控制与过载保护。

（**獠** 测量电器 电气工程中的电量传感器（包括电流互感器、电压互感器）、非电量（输出为电量的）传感器。

（**源** 能量存储与转换电器（电磁元件） 包括电力电容器，电抗器，电磁铁，电热、电声、电光电器等。

（**缘** 特种电器 这里主要指矿用电器，航空、舰船与铁道电器等。

从原理上还可以把电器分为静态电器和动态电器，因测量电器和能量存储与转换电器在工作中本身状态不变，我们称为静态电器，而开关与控制类电器则被称为动态电器。

进一步还可以按执行机能和转换深度将电器分为：开关电器、连续控制电器；有触点电器和无触点电器等。执行通断任务时的转换深度 可用下式描述

$$\frac{Z_{\text{开}}}{Z_{\text{闭}}}$$

式中， $Z_{\text{开}}$ 、 $Z_{\text{闭}}$ 分别为电器回路的开路阻抗和闭合阻抗。对于有触点电器： $Z_{\text{开}} \sim Z_{\text{闭}}$ ，对于无触点电器： $Z_{\text{开}} \sim Z_{\text{闭}}$

电力系统中的高、低压电器以开关电器为主；开关电器中又以断路器为典型的研究对象，其工作条件最为苛刻，大多以三相交流电源为主要工作背景。

另外，从产业分工和结构方面，我们还可以把电器分为电器元件和成套电器，后者一般要结合电子控制装置组成一个功能系统，实际上已成为广义的电器了。

## 圆 电器的典型结构

### 圆 高压开关电器

高压断路器是最典型的高压开关电器，一般由灭弧室、操动机构、框架和辅助开关等组成。图 圆 为目前国内用量最大的 **圆** 型户内高压真空断路器。

短路电流的切断由三个真空灭弧室完成，真空灭弧室由弹簧储能操动机构驱动，其动作指令由开关柜上的继电保护系统给出，开关上的若干组辅助触点可反映开关的状态，并可供外部电路使用。

真空灭弧室是开关的核心，依赖真空介质优异的电弧扩散与熄弧性能和弧后极高的介质强度，当操动机构接到分断指令开始分闸操动时，处于闭合状态的真空灭弧室触头分离（可能拉出电弧），在交变电流零点时电弧熄灭，完成电路分断功能。真空开关可以在 **圆** 电压等级的配

电系统中分断几万安培的短路电流，实现短路保护的目。

真空开关对其操动机构的要求苛刻，需随时准备动作，决不允许拒动或误动，一般采用

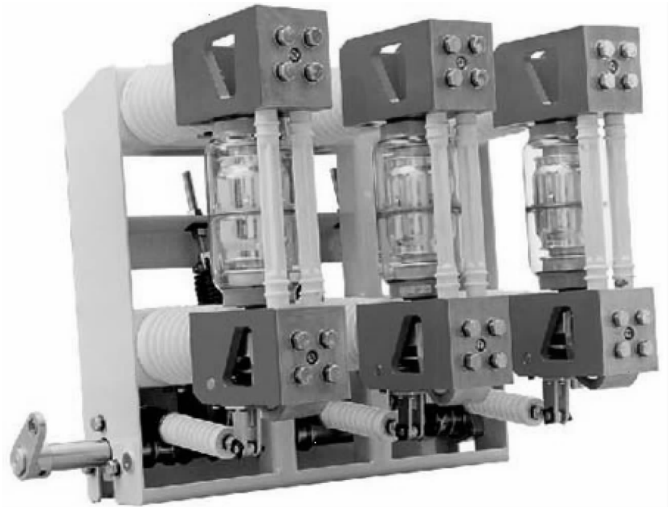


图 圆 在 **圆** 型户内高压真空断路器

储能的方式排除机构能源故障带来的隐患。此外，在响应速度、出力和瞬时功率以及寿命等方面也有较高的要求。对真空开关而言，目前较常用的是弹簧储能机构；而近年来新发展的永磁操动机构，可以与计算机控制匹配，而达到很高的时间控制精度，实现开关的动作相位控制，因此也被称作电子操动。

开关的框架主要应有绝缘方面的保证，使处于高电位的灭弧室和处于地电位的操动机构得以落脚。现代开关的框架上往往还附加有进行自诊断和发出控制指令的智能装置，有的高压开关整体封闭在一个绝缘气体柜内。

### 图 15-1 低压开关电器

塑壳断路器是典型的低压开关电器，一般由灭弧室、操动机构、骨架和外壳以及过流脱扣装置等组成。图 15-1 为目前国内用量最大的低压塑壳断路器。低压系统曾经大量使用各种熔断器，塑壳断路器中有过电流保护脱扣装置，各分支可以省去熔断器，从而简化了系统。此外，塑壳断路器采用了先进的灭弧系统，使开关利用电弧自身能量将其分割成许多小段，很容易在短路电流达到峰值前将其熄灭，从而使实际电弧的电流峰值和能量远没有达到预期值，我们称之为限流开断。限流的最大意义在于：降低了整个系统可能出现的电流极限，在系统电动力和热稳定方面有了更好的保证。此外由于实际承受的电弧能量较小，灭弧室的体积也可以做的较小。



图 15-1 典型低压塑壳断路器

### 图 15-2 测量与能量转换电器

目前电力系统中最典型的测量电器是各种电流互感器和电压互感器。低压电流互感器与高压电流互感器的结构基本一致，只是一次和二次线圈之间的绝缘水平的差异，均为在环形铁心上绕一定匝数的二次线圈，主电流穿过环形线圈视作单匝的一次线圈。电压互感器就是小功率变压器，绝缘系统随额定电压的高低而不同。

能量转换电器范围很广，实际上电机是应用最广的机电能量转换系统，但对它的研究已自成体系，成为专门的学科领域。除电机以外的电磁、电热、电光、电声等虽然都有自己专门领域，但仍属于电器范畴。这部分器件直接与人们的日常生活相关，与电能的使用相关，



图 15-2 典型成套电器——高压开关柜

其相关知识也是电气工程师必须掌握的。

### 源 家用电器

随着经济和社会的发展，家用电器的用电量在电能消耗中的比例越来越大，反映了家用电器使用量的急剧增加。虽然其内涵主要是上述能量转换电器，但它更多地结合了电子技术，其技术含量越来越高，因此，有必要把它们单列一类进行分析研究。当然，现代高档的音像设备和太阳能设备、电动车等，主要是相关领域的研究对象，只是归类在家用电器中。

### 源 成套电器和电力系统自动化装置

现代成套电器是电气工程与电子工程结合的产物，它不仅仅是电器元件的集成，更主要的是其功能的完备，作为一个系统直接完成用户的服务功能。图 1-1 为典型成套电器——高压开关柜。

## 源 电器智能化的内涵与主要内容

随着现代信息技术的飞速发展，智能化成为工业装置的发展趋势。在开关电器领域，智能化开关发展迅速，其动力首先来自电力系统的可靠性与自动化程度越来越高的要求。现代配电和用电系统包括供电小区或智能大厦的电气设备都要求在监测、控制及保护等方面完全自动化和智能化，作为电力系统的硬件，其智能化则是上述用电体系自动化与智能化的基础。为了满足电力系统日益提高的可靠性要求，电力设备的状态检修技术得到了飞速发展，这一技术要求设备能自诊断、运行状态可控，能及时发现故障的前兆，这与电器智能化的基本要求也是一致的。

首先，让我们以开关为例定义电器智能化。所谓电器的智能化主要指开关电器实现人工智能的过程。按人工智能的定义，智能化是指使对象具备灵敏准确的感知功能、正确的思维与判断功能以及行之有效的执行功能而进行的工作。

感知功能包括设备的自诊断、各种运行参数和系统参数的检测，可依靠各种传感器来完成，这在现代传感器技术已迅速发展的今天，是比较容易实现的。

思维和判断功能就是控制，可依靠计算机或数字信号处理器（源）来完成，与控制相关的理论与实践都比较丰富，也取得了显著的成效。这方面既有硬件问题，又有软件问题，软件发展的空间更大些。

执行功能对开关电器而言就是对一次设备的操动。对开关电器的智能化而言，目前的“瓶颈”问题是“行之有效的执行功能”。执行功能的非线性、多学科交织的复杂性是困扰人们的主要障碍。

以上这三方面的工作就是电器智能化的主要内容。因此我们可以这样定义智能电器：在某一方面或整体上具有人工智能的功能的电器元件或系统。

早在 1960 年前，就开始有开关智能化的概念并在配电系统实践，即在配电开关外附加以智能控制器，用以自动判别线路故障，切除与隔离故障并恢复健康区段的供电，人们称之为自动重合器与自动分段器。随着计算机技术的发展，越来越多的电站实现了微机化控制与管理，这使得开关智能化沿两条路线发展。在电力系统方面，希望开关实现所谓“四遥”，把设备状态反映到电站主控微机，由它实现开关乃至整个系统的智能化。这是一条自上而下的技术路线。另一条是自下而上的发展路线，首先追求的是开关本体智能化，然后汇入系统总

的控制体系中。元件智能化才是最根本和最可靠的智能化，对国内外大多制造厂家来说，更侧重的是元件智能化。

近年来国外已有很多智能化开关面市，高压领域典型的有东芝公司的 **悦** 和 **粤** 公司的 **精** 型智能化 **粤**，它们的特点都是采用先进的传感器技术和微型计算机处理技术，使整个组合电器的在线监测与二次系统在一个计算机控制平台上。在中压领域较典型的有 **圆** 世纪 **怨** 年代初富士公司的智能式真空断路器及 **粤** 公司近年来推出的 **灾** 型真空断路器。富士公司的产品包括三种功能：自动保护功能、早期维护功能和信息传递功能。其中自动保护功能指开关本体可对过电流和短路故障进行检测与判断并发出指令，使开关可靠分断；早期维护功能指开关在真空度降低时，电接触部位温升异常以及脱扣线圈断线时均能发出报警，提示操作人员把开关退出运行进行维修；信息传递功能则指除正常外部加入的控制信号外开关状态的信号输出。该开关比较有特色的是其光 **温** 继电器。温度传感元件为双金属片，当受热板的温升达到给定值时，就会带动光路开关动作。由于没有电的联系，受热板可安装在要监视的电接触部位。

**粤** 的 **灾** 型真空开关是该公司的最新产品，除了新颖的一体化绝缘结构外，最显著的特色是采用了永磁操动机构。此外，它的二次控制无触点化和采用新型传感器也是比较显著的进步。开关的位置传感器和辅助接点均为无触点的接近开关或光开关，新型电量传感器信号可以直接变换成数字信号，取代了传统的电磁式电压和电流互感器。

在高压 **灾** 开关智能化方面，近年来较热门的是智能气体绝缘组合电器，也称 **灾**。主要特色是采用现代传感器技术和在线自诊断技术。此外，有文献提出智能操作的概念<sup>[10]</sup>，即要求开关的操作性能可根据电网中发出的不同工况，自动选择和调整操动机构以及灭弧室合理的预定工作条件。例如：对于自能式断路器的分断操作，小负载时触头以较低的速度分断，既可保证所需的灭弧能量又可减少机械损耗；而在接到短路信号时则以全速分断，获得最佳开断效果。变速操作打破了传统断路器单一分断特性的概念，实际上是上述执行功能的智能化，是对高电压等级开关操动机构改造十分有益的尝试。

## 员原 智能电器的理论任务

根据上述智能电器的定义，我们可以从其可完成的功能方面看到智能电器研究的理论任务。

首先，在负责智能电器信号来源的传感器方面，我们不但要研究新的传感和检测机理，如光电、红外、超声波等，还要研究传感器的灵敏度与准确度。此外，我们还应该注意新的检测方法，如无传感器虚拟法、综合评估法、指纹数据以及扰动误差校正法等研究。

在信号处理与控制系统研究方面，包括信号处理的总线技术，以太网和基于互联网的信号传输技术，基于小波分析、模糊逻辑分析等数据处理技术，暂态分析与电磁兼容技术；控制方面包括控制策略研究、可靠性与冗余、最优化技术等。这方面还要包括各种仿真技术，如 **精**、**粤**、**灾**、**粤** 等仿真软件的应用等。

在新的执行功能研究方面，包括各种新的电弧或电路控制机理研究、同步开关技术等。它们直接面向对象，往往引起整体机理的革命。如电子操动引起了新一轮相控开关研究、多断口断路器的复兴，以及高可靠性系统的实现等，均体现了革命性的技术进步，连带出相当

远

多的机理与模型研究，可得到范围广泛的理论成果。

### 思 考 题

员猿 归纳电器的定义、分类。

员圆 根据人工智能的定义分析电器智能化与智能电器的内涵。

员猿 描述两种现有的智能电器。

员源 简述电器智能化的发展趋势。

### 参 考 文 献

员 陈振生 圆智能化高压电器 圆第一届智能开关与开关柜技术研讨会文集，员猿苑 猿

圆 马志瀛，陈晓宁，徐黎明等 圆超高压断路器的智能操作 圆中国电机工程学报，员猿怨 猿(苑)：猿

猿 邹积岩，王毅 圆开关智能化的概念与相关的理论研究 圆高压电器，圆猿猿 猿(远)：猿

# 第 0 章 电器学基本理论与信号处理基础

智能电器的理论基础一般包括电器学的基本理论和信息科学的基本理论。由于后者涉及的理论范围极其宽广，包括信息的提取、传输和处理，与智能电器关系最大的是信号处理技术，而信息的提取主要由各种成型的传感器来完成，信号的传输则依赖现代网络技术和光电转换技术，均已成为专门的领域。作为智能电器的基础理论部分，本章主要介绍电器学基本理论和信号处理基础。

## 0.1 电流的热效应

凡是承载电流的导体或设备，都会因导电回路的材料性质而承受电流的热效应。对导体材料而言，是因为导电构件自身电阻的存在而产生热损耗（电阻损耗）；对铁磁体来说，则来源于交流电流引起的交变磁场而产生的涡流和磁滞损耗；而支撑导体的绝缘材料，会在高场强下产生介质损耗。这些损耗，最终都体现为发热。

## 0.2 电器设备的最大允许温升

电器设备各零部件及绝缘介质的性能与温度有紧密的关系，当温度上升到一定程度时，金属和绝缘介质的机械性能和电气性能会发生突变，使用寿命便急剧下降。

不同材料发生性能突变的温度范围是不一样的，确定允许工作温度的原则是保证电器设备在设计的使用期限内能可靠地工作，具体有二：①保证电器绝缘不致因温度过高而损坏或使用寿命过分降低；②导体和结构部分不致因温度过高而降低其机械性能。

对金属材料而言，其允许温度取决于其机械强度的变化及支撑绝缘的热耐受能力。温度达到一定值后，材料发生软化，机械强度显著降低。例如，铜在长期工作时的软化温度为 100℃。

金属材料的软化不仅与温度有关，还与温升速度有关，在快速升温的情况下，铜的软化点可以到 150℃。因此，铜在短路电流作用下的允许发热温度规定得较正常工作状态时高。

对绝缘材料，其允许温度主要取决于其物理、机械、化学及电气性能的变化。国标 GB 1983 将电气绝缘材料的耐热性划分为若干个耐热等级。耐热等级表示该产品在额定负载和规定的其他条件下达到预期使用期时所能承受的最高温度。各耐热等级及其对应的温度见表 0.1。温度超过 100℃，则按间隔 10℃ 相应设置耐热等级。

导体连接处，尤其是开关的各类触头，其允许温度比非接触处要低得多。因为接触点（面）的导电状态比非接触处要恶劣。接触处的电阻是变化的、不稳定的。若触头温度过高，接触面容易发生强烈氧化、锈蚀，严重的发热、温升或因导电不良而“打火”都有可能造成熔焊，使开关丧失工作能力。触头间的接触压力通常依靠弹簧来维持，过高的温度对弹簧的刚度有影响，从而造成接触压力的不稳定。因此，触头接触处的允许温升规定得较低。

表 圆园 电气绝缘材料的耐热等级

耐热等级	再	粤	耘	月	云	匀	圆园	圆园	圆园
温度 兹	怨	员缘	员园	员园	员缘	员园	圆园	圆园	圆园

电器设备各部件在长期工作时的最大允许温度与环境温度在 源兹时的允许温升（允许温度与环境温度之差）见表 圆园

表 圆园 电器各部分的温升

序号	电器零件、材料及介质的类别 <sup>①-④</sup>		最高允许温度 兹			周围空气温度为 源兹时的允许温升 兹			
			空气中	兹中	油中	空气中	兹中	油中	
员	触头 <sup>⑤⑥</sup>	裸铜或裸铜合金	猿	怨	愿	猿	怨	愿	
		镀锡	怨	怨	怨	怨	怨	怨	
		镀银或镀镍（包括镀厚银或镀银片）	员缘	员缘	怨	缘	缘	怨	
圆	用螺栓或其他等效方法联结的导体结合部分 <sup>⑦</sup>	裸铜、裸铜合金和裸铝、裸铝合金	怨	员缘	员园	怨	缘	愿	
		镀（搪）锡	员缘	员缘	员园	缘	缘	愿	
		镀银（包括镀厚银）或镀镍	员缘	员缘	员园	猿	猿	愿	
猿	用其他裸金属制成或表面镀其他材料的触头或联结 <sup>⑧</sup>								
源	用螺栓或螺钉与外部导体连接的端子 <sup>⑨</sup>	裸铜、裸铜合金和裸铝、裸铝合金			怨			怨	
		镀（搪）锡或镀银（包括镀厚银）	员缘			缘			
		其他镀层 <sup>⑩</sup>							
缘	油开关用油 <sup>⑪</sup>			怨			怨		
远	起弹簧作用的金属零件 <sup>⑫</sup>								
苑	下列等级的绝缘材料及与其接触的金属材料 <sup>⑬⑭</sup>	需要考虑发热对机械强度影响的	再（对不浸渍材料） 粤（对浸在油中或浸渍过的材料） 耘 月 云 匀	缘 怨 员园	怨 员园 员园	— 员园 员园	缘 愿 怨	怨 愿 怨	— 愿 愿
		不需要考虑发热对机械强度影响的	再（对不浸渍材料） 粤（对浸在油中或浸渍过的材料） 耘 月 云 匀	员园 员园 员园 员园 员园 员园	怨 员园 员园 员园 员园 员园	— 员园 员园 员园 员园 员园	怨 愿 怨 怨 怨 怨	怨 怨 怨 怨 怨 怨	— 愿 愿 愿 愿 愿 愿
		漆	油基漆 合成漆	员园 员园	员园 员园	员园 员园	愿 愿	愿 愿	愿 愿
愿	不与绝缘材料（油除外）接触的金属材料（触头除外）	需要考虑发热对机械强度影响的	裸铜、裸铜合金或镀银 裸铝、裸铝合金或镀银 钢、铸铁及其他	员园 员园 员园	员园 员园 员园	员园 员园 员园	愿 怨 怨	愿 怨 怨	愿 愿 愿

(续)

序号	电器零件、材料及介质的类别			最高允许温度 轸			周围空气温度为 源益时的允许温升 轸		
				空气中	源益中	油中	空气中	源益中	油中
愿	不与绝缘材料(油除外)接触的的金属零件(触头除外)	不需要考虑发热对机械强度影响的	裸铜、裸铜合金或镀银 <sup>⑮</sup> 裸铝、裸铝合金或镀银 <sup>⑯</sup>	源缘 源缘	源缘 源缘	源圆 源圆	源缘 怨缘	源缘 怨缘	源圆 源圆

- ①相同零件、材料及介质其功能属于表 圆缘中所列的几种不同类别时，其最高允许温度和温升按各类别中最低值考虑。
- ②表 圆缘中数值不适用于处于真空中的零件和材料。
- ③封闭式组合电器、金属封闭开关设备等外壳的最高允许温度和温升由其相应的标准规定。
- ④以不损害周围的绝缘材料为限。
- ⑤当动、静触头有不同镀层时，其允许温度和温升应选取表 圆缘中允许值较低的镀层之值。
- ⑥涂、镀触头，在按电器的相应标准进行下列试验后，接触表面仍应保留镀层，否则按裸触头处理：  
葬 关合试验和开断试验（如果有的话）；  
遭 热稳定试验；  
糟 机械寿命试验。
- ⑦当两种不同镀层的金属材料紧固连接时，允许温升值以较高者计。
- ⑧其值应根据材料的特性来决定。
- ⑨此值不受所连外部导体端子涂镀情况的影响。
- ⑩以油的上层部位为准。
- ⑪当采用低闪点的油时，其温升值的确定应考虑油的汽化和氧化作用。
- ⑫以不损害材料之弹性为限。
- ⑬绝缘材料的耐热分级按 圆缘的规定执行。
- ⑭对不需要考虑发热对机械强度影响的铜、铜合金、铝、铝合金最高允许温度既不高于所接触的绝缘材料的最高允许温度，也不得高于本表中序号 愿页 遭所规定的值。
- ⑮耐热等级超过 匀级者以不导致周围零件损坏为限。
- ⑯表 圆缘中的裸铜合金和裸铝合金是指铜基和铝基合金，均不包括粉末冶金件。粉末冶金件的最高允许温度由制造厂在产品技术条件中规定。

### 圆缘 电器的发热与散热

#### 圆缘 电器中的发热

电器设备发热的来源主要是各种形式的能量损耗，包括电阻损耗、铁磁损耗和介质损耗。

##### 圆缘 电阻损耗

当一具有直流电阻 砸的导体流过电流 陨时，它所损耗的功率为

$$孕越陨砸 \tag{圆缘}$$

但对交流电路而言，由于集肤效应和邻近效应的影响，导体的截面并未得到有效的使用，这使得电阻比直流时要大，此时的功率损耗为

$$孕越云陨砸 \tag{圆缘}$$

式中，云为附加的损耗系数，它等于集肤系数 运和邻近系数 运的乘积。集肤效应和邻近效应使电流密度的分布不均匀（见图 圆缘），在图 圆缘中设以 圆为界，将导体截面分成内外两

部分。显然，就 圆筒内侧或外侧截面上流过的电流所交链的磁通而言，外侧比内侧的少，越往导体截面中心的电流所交链的磁通越多。由于交变磁通将产生感应电动势，该反电动势所产生的电流要阻止原电流的流通。越靠近截面中心，这种阻挡作用越强，电流密度越低，所表现出的交流附加电阻越大，这种作用用集肤系数来表示。原电流相邻导体中引起的涡流随距离增加而衰减，由于涡流方向与原有电流的方向相反，相当于驱使电流向外侧集中，这种作用叫邻近效应，用邻近系数来表示。在图 圆环中，若电流的假定方向如图，则会在相邻导体中产生如图中环状方向的涡流。图中 圆环则 圆环曾定性示出了导体中的电流密度分布。

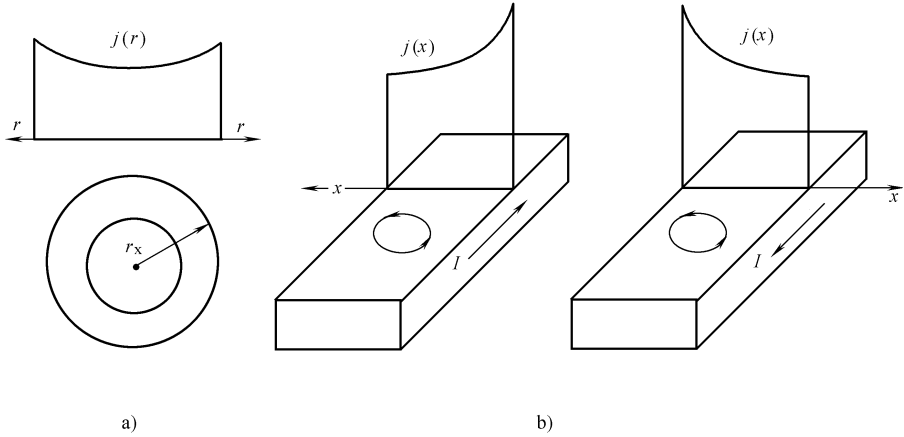


图 10-1 通过交流电流时的集肤效应和邻近效应

圆环 集肤效应 圆环 邻近效应

考虑上述两效应后，交流电阻的表达式可写为

$$R_{ac} = \frac{\rho l}{S} K_m K_p \quad (10-10)$$

式中， $K_m$  为集肤系数； $K_p$  为邻近系数； $\rho$  为导体的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )， $l$  为导体的长度 (m)； $S$  为导体截面面积 ( $\text{m}^2$ )。 $\rho$  与导体的温度有关，通常取

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha(\theta - 20)] \quad (10-11)$$

或  $\rho = \rho_{\theta} [1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (10-12)$

式中， $\rho_{20}$  为导体在 20℃ 时的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )， $\rho_{\theta}$  为导体在  $\theta$  时的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )， $\alpha$  为电阻温度系数 ( $1/^\circ\text{C}$ )， $\theta$  为导体的温度 ( $^\circ\text{C}$ )。常用金属材料的  $\rho_{20}$  及  $\alpha$  见表 10-1

表 10-1 常用金属材料的  $\rho_{20}$  及  $\alpha$

材料	电阻率 $\rho_{20}$ (20℃) ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	电阻温度系数 $\alpha$ ( $1/^\circ\text{C}$ )
铜	$1.72 \times 10^{-8}$	0.00393
黄铜	$1.78 \times 10^{-8}$	0.00200
银	$1.59 \times 10^{-8}$	0.00380
铝	$2.82 \times 10^{-8}$	0.00429
钢	$1.73 \times 10^{-7}$	0.00600
灰铸铁	$1.03 \times 10^{-7}$	0.00600
康铜	$4.82 \times 10^{-8}$	约 0
镍铬 (康铜)	$1.35 \times 10^{-7}$	0.00004
铬	$1.29 \times 10^{-7}$	0.00004
钨	$5.48 \times 10^{-8}$	0.00450