



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电气工程学概论

■ 主 编 林孔元  
■ 副主编 王 萍



高等教育出版社  
Higher Education Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

裴贵容

# 电气工程概论

■ 主 编 林孔元

■ 副主编 王 萍



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内容提要

本书从全新的视角归纳出一种电工学教材新体系,它以建立电气工程系统的明晰概念为教学目标,由三个篇幅,即电路篇、信号与系统篇及器件篇,共19章构成,内容涉及现代电气工程的各个主要方面。全书以实际的电气系统,如检测系统、控制系统、通信系统以及电能传输系统等概念、理论、方法及技术要点为核心内容,将电气元器件以系统部件的形式作为支撑,而传统的电路理论则作为电气工程的基础语言将系统及其部件贯穿成一个整体。

本书自上而下的论述体系使得各篇、各章都自成体系,便于教师的教学运用,也利于读者灵活安排自己的学习进程。

本书内容丰富,体系新颖,论述详尽,可作为工科院校非电专业本科生电工学课程的教材使用,也可作为现场非电工程师们继续教育的参考书。鉴于本书的概论性质,它对于电气专业的在校学生也有重要的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气工程学概论/林孔元主编. —北京:高等教育出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 024935 - 4

I. 电… II. 林… III. 电气工程 - 高等学校 - 教材  
IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 153663 号

策划编辑 金春英 责任编辑 王莉莉 封面设计 于文燕 责任绘图 尹莉  
版式设计 陆瑞红 责任校对 金辉 责任印制 尤静

---

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010 - 58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800 - 810 - 0598
邮政编码	100120	网 址	<a href="http://www.hep.edu.cn">http://www.hep.edu.cn</a>
总 机	010 - 58581000		<a href="http://www.hep.com.cn">http://www.hep.com.cn</a>
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	<a href="http://www.landaco.com">http://www.landaco.com</a>
印 刷	北京铭成印刷有限公司印刷		<a href="http://www.landaco.com.cn">http://www.landaco.com.cn</a>
		畅想教育	<a href="http://www.widedu.com">http://www.widedu.com</a>
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2009 年 1 月第 1 版
印 张	39.25	印 次	2009 年 1 月第 1 次印刷
字 数	970 000	定 价	44.40 元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24935 - 00

## 郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真：(010)82086060

E - mail: dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

# 前 言

电气工程(Electrical Engineering)简称电工学。本书采用电气工程来命名是因为它的体系和内容都不同于传统的电工学。

传统的电工学体系是基础教学体系。这种体系的基本理念是只要打好基础,学生就有能力应对实际工程系统的问题。它通常以电路和器件为核心,采用自下而上的论述体系。但实际的情况是,由于学生缺乏工程系统的基本概念和知识体系,这种“以不变应万变”的基础教学模式在几十年的电工学教学中已经被证明是不成功的。

本书的内容和体系不是根据现有电工学教材与课程教学现状,而是从现代电气工程及其与非电专业工程师现场工作的关系中归纳总结出来的。这是一种全新的概论体系,它以建立电气系统的明晰概念为主要教学目标,直接面对实际的电气系统问题,而不仅仅是为读者将要面对这些问题做基础性的准备。全书以实际的电气系统,如检测系统、控制系统、通信系统以及电能传输系统等为核心内容,将电气元器件以系统部件的形式作为支撑,而传统的电路理论则作为电气工程的基础语言将系统及其部件贯穿成一个整体。

全书围绕电气系统总体知识框架编写并采用自上而下的论述体系,即先以电气系统的概念、理论、方法及技术要点建立电气工程的总体知识框架,然后再论述各个局部来逐步充实和丰富这个知识框架的内容。在这个体系中,读者在学习任何章节时都不脱离总体框架,这有助于他们准确、快捷、完整地建立电气工程的知识体系。

全书共分三篇,即电路篇、信号与系统篇和器件篇,共19章,内容遍及现代电气工程中的弱电(信息)应用和强电(电能)应用的主要领域,可供两学期共128学时的教学使用。由于采用了自上而下的论述体系,为使各章都自成体系以便于教学运用,本书在编写中并不忌讳必要的重复。在完成电路篇的学习后,书中的各章都可以灵活运用于组织各种教学循环。对于一个学期的课程,根据不同专业的需求建议选择下述的内容来组织教学:

**1. 电路—模拟系统体系:** 电路篇(1~6章)+信号与系统篇(7、8、9章)+器件篇(16、17章)。

**2. 电路—电能应用体系:** 电路篇(1~6章)+信号与系统篇(14章)+器件篇(16、17、18、19章)。

**3. 电路—数字系统体系:** 电路篇(1~6章)+信号与系统篇(10、13、14章)+器件篇(15、16、17章)。

不论是一学期还是两学期课程,第14章中的§14.7电气安全问题的学习都是必要的。

如前所述,本书的各章都具有良好的独立性,所以对于习惯于运用自下而上的体系组织教学的教师,也可以在电路篇之后采用相反的顺序,即以“16—17—18—7—8—9—19—14—15—10—11—12—13”的顺序开展教学。

本书是世行贷款“21世纪初高等理工科教育教学改革项目”(编号:B0807)研究的后续成果,是教学活动认知过程研究与实践的产物,初稿形成后,在天津大学电工学教学中

从点到面进行了多批次、多层次的试点和实践。数度春秋，几经修改方成此书。

按照现代认知科学的观点，任何的教学过程都是在一定的信息环境中进行的，是多种教学信息源综合运用过程。教材是教学信息环境中的一个重要的但不是唯一的信息源，它不能单独决定一门课程教学的水平和教学质量；建立了一个教材的新体系并不等同于建立了一门课程的教学新体系。尽管新体系的教材已经考虑到了建立课程教学新体系的需要，但这还要靠教师对教材的正确运用以及对教学进程的能动控制才能实现。

教材围绕教学目标为学生编写，供学生阅读，它其实只是对学习者的“学什么”所做出的规定，而不是教师“讲什么”的依据。学习是学习者的事，教师作为学习者的帮助者，应根据教学目标并以自己的教授方式运用教材及其他各种信息源，通过课堂交互和对其他教学环节的指导为学习者的知识构建过程提供切实的帮助。

对于那些已经不满足于按照一本既定的教材讲授一门课程的大多数教师而言，本书对于他们改变原有的教学模式和教学方法的愿望可能是一种鼓励，它的新颖体系和丰富内容将为他们进一步的教学改革实践提供具体的帮助；对于那些已经根据自己的教学目标组织教学并据此为学生选择合适教材的教师，编者期待并相信，本书将会为他们开创电工学的教学新天地提供有益的支持和帮助。

本书的电路篇及信号与系统篇由林孔元教授主持编写，器件篇由王萍教授主持编写。参加本书编写工作的还有天津大学的刘正光教授和路志英博士。刘正光教授所提供的“微型计算机”和“计算机网络”两章书稿中的有关内容被编入本书的第11章逻辑控制系统和第13章数据通信系统中；路志英博士为本书编写了附录，并提供“模拟控制系统”和“数字控制系统”两章书稿，这两章书稿的主要内容被编入本书的第9章模拟控制系统和第12章数字控制系统中。林孔元教授为全书做了审订，王萍教授为全书的练习与习题做了修订和补充。

编者衷心感谢天津大学电气与自动化工程学院从事电工学课程教学的教师们，他们多年来为本书的教学运用做了许多艰苦而富有创造性的教学试点工作并对书稿提出了诸多中肯的修改意见。编者还要特别感谢高等教育出版社金春英副编审和国内同行们为本书的编写和出版所给予的热情鼓励和支持。

本书是编者为开创电工学课程新体系和教学新模式所做出努力的一部分，是教学改革的一次探索和尝试。由于学识所限，书中不足和错误之处在所难免，还望广大教师和读者不吝指教。

编者 林孔元 王萍

2008年5月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1	§ 1.5 关于本书 .....	6
§ 1.1 电气工程的强电应用 .....	1	1.5.1 对象和需求 .....	6
§ 1.2 电气工程的弱电应用 .....	2	1.5.2 体系与结构 .....	7
§ 1.3 电气工程与电路 .....	4	1.5.3 内容介绍 .....	7
§ 1.4 电气工程与非电工程师 .....	5	1.5.4 编写思路 .....	10

## 电 路 篇

第2章 电路问题 .....	13	2.7.1 正弦周期电压、电流激励下的 电路问题 .....	30
§ 2.1 电路与电路模型 .....	13	2.7.2 非正弦周期电压、电流激励下 的电路问题 .....	37
2.1.1 电路与电路图 .....	13	2.7.3 阶跃的电压、电流激励下的 电路问题 .....	38
2.1.2 电路中常用的几个术语 .....	14	本章小结 .....	39
2.1.3 电路模型 .....	16	习题 .....	40
§ 2.2 电路的状态与过程 .....	20	第3章 电路分析的基本方法 .....	45
2.2.1 状态与过程描述 .....	20	§ 3.1 网孔电流法 .....	45
2.2.2 稳态过程与瞬态过程 .....	21	§ 3.2 结点电压法 .....	49
§ 2.3 电路基本定律 .....	21	§ 3.3 含电流源电路的处理方法 .....	52
2.3.1 定律与定理 .....	21	3.3.1 一般情况的处理方法 .....	52
2.3.2 电压和电流的参考方向 .....	21	3.3.2 含理想电流源支路时的 处理方法 .....	53
2.3.3 欧姆定律 .....	21	§ 3.4 电路分析中的等效方法及其应用 .....	54
2.3.4 基尔霍夫电流定律和电压定律 .....	22	3.4.1 戴维宁定理 .....	54
§ 2.4 电路中的功率与能量 .....	23	3.4.2 诺顿定理 .....	56
§ 2.5 线性电路与非线性电路 .....	24	3.4.3 电压源模型与电流源模型之间 的等效变换 .....	57
2.5.1 线性电路及其基本性质 .....	24	3.4.4 叠加定理及其应用 .....	58
2.5.2 线性电路的计算模型 及分析对策 .....	24	本章小结 .....	59
2.5.3 非线性电路及其工程处理方法 .....	27	习题 .....	60
§ 2.6 恒定的电压、电流激励下的 电路问题 .....	29	第4章 相量运算与交流电路分析 .....	64
2.6.1 恒定的电压、电流描述 .....	29	§ 4.1 正弦交流电的相量表示 .....	64
2.6.2 恒定的电压、电流激励下电路 的工作特点 .....	29	4.1.1 复数的表示和基本运算 .....	64
2.6.3 恒定电压、电流激励下的 电路分析 .....	30	4.1.2 交流电的相量表示和相量运算 .....	66
§ 2.7 变化的电压、电流激励下的 电路问题 .....	30	§ 4.2 交流电路的复阻抗 .....	70

4.2.1 复阻抗的表述形式 .....	70	§ 5.2 交流电路中的谐振与频率响应 .....	92
4.2.2 复阻抗的串联与并联 .....	72	§ 5.3 交流电路频率特性分析 .....	95
§ 4.3 交流电路的复功率 .....	73	5.3.1 一阶电路的频率特性 .....	95
§ 4.4 交流电路相量分析概要 .....	74	5.3.2 二阶电路的频率特性分析 .....	99
4.4.1 基尔霍夫定律的相量形式 .....	74	本章小结 .....	99
4.4.2 交流电路的相量计算模型 .....	74	习题 .....	100
4.4.3 相量形式的网孔电流法 .....	75	<b>第 6 章 电路瞬态过程分析</b> .....	103
4.4.4 相量形式的结点电压法 .....	76	§ 6.1 电路瞬态计算模型 .....	103
4.4.5 其他等效方法的相量形式 .....	77	§ 6.2 一阶电路的瞬态过程分析 .....	104
§ 4.5 三相交流电路的相量分析 .....	79	§ 6.3 二阶电路瞬态过程分析 .....	108
4.5.1 三相交流电 .....	79	§ 6.4 拉普拉斯变换概要 .....	111
4.5.2 三相交流电路中的电源与负载 .....	79	§ 6.5 用拉普拉斯变换方法求解瞬态过程 .....	112
4.5.3 三相对称电路的功率计算 .....	85	6.5.1 一阶电路瞬态分析 .....	112
本章小结 .....	85	6.5.2 二阶电路瞬态分析 .....	113
习题 .....	86	本章小结 .....	114
<b>第 5 章 交流电路的频率特性</b> .....	90	习题 .....	115
§ 5.1 二端口网络与传递函数 .....	90		

信号与系统篇

<b>第 7 章 模拟信号与模拟系统</b> .....	118	8.3.5 放大器的失真和漂移 .....	151
§ 7.1 信号问题 .....	118	8.3.6 噪声问题 .....	154
7.1.1 信号与信息 .....	118	§ 8.4 传输线 .....	156
7.1.2 时间信号与代码信号 .....	119	§ 8.5 检测系统实例分析 .....	159
§ 7.2 模拟信号分析 .....	122	8.5.1 检测任务与系统构成 .....	159
7.2.1 连续信号分析 .....	122	8.5.2 信号处理系统功能 .....	159
7.2.2 采样信号分析 .....	125	8.5.3 传感器类型和性能 .....	160
§ 7.3 系统问题 .....	129	8.5.4 信号处理系统 .....	162
7.3.1 系统及系统模型 .....	129	本章小结 .....	165
7.3.2 三类系统问题 .....	130	习题 .....	166
7.3.3 系统的分类 .....	130	<b>第 9 章 模拟控制系统</b> .....	169
7.3.4 模拟系统分析概要 .....	133	§ 9.1 模拟控制系统的组成 .....	169
本章小结 .....	136	§ 9.2 控制系统的稳态特性分析 .....	170
习题 .....	137	§ 9.3 控制系统动态特性分析 .....	173
<b>第 8 章 模拟检测系统</b> .....	138	9.3.1 惯性部件的动态特性 .....	173
§ 8.1 检测系统构成 .....	138	9.3.2 系统的动态特性分析 .....	174
§ 8.2 传感器 .....	139	§ 9.4 控制系统稳定性分析 .....	177
§ 8.3 放大器 .....	143	9.4.1 系统稳定性概念 .....	177
8.3.1 放大器的电路模型 .....	143	9.4.2 稳定性判别准则 .....	177
8.3.2 放大器的输入阻抗和输出阻抗 .....	144	9.4.3 稳定性评估方法 .....	178
8.3.3 放大器的频率特性 .....	146	§ 9.5 控制系统特性的补偿 .....	183
8.3.4 多级放大器及其频率特性 .....	149	§ 9.6 过程控制系统 .....	187



9.6.1 过程控制系统的组成 .....	188	本章小结 .....	264
9.6.2 单回路控制系统 .....	189	习题 .....	265
9.6.3 串级控制系统 .....	190	<b>第12章 数字控制系统</b> .....	268
9.6.4 比值控制系统 .....	190	§ 12.1 数字控制系统组成 .....	268
9.6.5 前馈控制系统 .....	193	§ 12.2 数字控制基本算法 .....	273
9.6.6 大滞后补偿控制系统 .....	195	12.2.1 数字PID算法 .....	274
本章小结 .....	197	12.2.2 数字滤波算法 .....	276
习题 .....	197	§ 12.3 计算机控制系统分析概要 .....	279
<b>第10章 数字信号与数字逻辑系统</b> .....	202	12.3.1 采样保持信号激励的分析 .....	280
§ 10.1 数字信号 .....	202	12.3.2 数字控制系统传递函数的 $z$ 域形式 .....	281
10.1.1 数字信号与信息表示 .....	202	12.3.3 数字控制系统动态特性分析 .....	284
10.1.2 数字信号的存储 .....	203	12.3.4 数字控制系统稳定性分析概要 .....	287
10.1.3 数字信号的传输 .....	204	本章小结 .....	291
§ 10.2 数字信号与二进制数 .....	205	习题 .....	292
10.2.1 二进制数 .....	205	<b>第13章 数据通信系统</b> .....	294
10.2.2 BCD码与数字显示 .....	207	§ 13.1 数据通信的基本概念 .....	294
§ 10.3 模数(A/D)和数模(D/A)信号 转换 .....	209	13.1.1 并行通信与串行通信 .....	294
10.3.1 采样与采样定理 .....	210	13.1.2 基带传输与频带传输 .....	295
10.3.2 A/D转换(ADC) .....	211	13.1.3 数字信号的调制与解调 .....	295
10.3.3 D/A转换(DAC) .....	212	13.1.4 多路复用方式 .....	297
§ 10.4 数字信号与逻辑 .....	214	13.1.5 单工和双工通信方式 .....	298
10.4.1 命题逻辑概要 .....	214	13.1.6 误码及传输差错控制 .....	298
10.4.2 数字信号的逻辑演算 .....	216	13.1.7 码元、码字、信息组、数据 帧、码效率及传输速率 .....	301
§ 10.5 数字逻辑系统 .....	217	13.1.8 异步通信和同步通信 .....	302
10.5.1 数字逻辑演算 .....	217	§ 13.2 数据通信系统的组成 .....	304
10.5.2 组合逻辑系统 .....	220	13.2.1 站点 .....	304
10.5.3 时序逻辑系统 .....	223	13.2.2 信道 .....	305
本章小结 .....	232	13.2.3 数据通信网络 .....	305
习题 .....	233	§ 13.3 数据通信协议 .....	306
<b>第11章 逻辑控制系统</b> .....	237	13.3.1 通信网络模型 .....	307
§ 11.1 开关逻辑控制系统 .....	237	13.3.2 通信网络协议 .....	308
11.1.1 开关逻辑系统 .....	237	§ 13.4 局域网 .....	313
11.1.2 开关逻辑控制系统 .....	240	13.4.1 计算机网络概述 .....	313
§ 11.2 可编程逻辑控制系统(PLC系统) .....	245	13.4.2 局域网的特点 .....	314
11.2.1 开关控制逻辑的数字化处理 .....	245	13.4.3 以太网及其信息传输控制方法 .....	314
11.2.2 PLC系统构成 .....	246	13.4.4 环形令牌网及其信息 传输控制方法 .....	315
11.2.3 PLC系统的工作流程 .....	249	13.4.5 总线形令牌网及其信息 传输控制方法 .....	315
11.2.4 PLC的编程问题 .....	250		
11.2.5 PLC的主要技术性能指标 .....	263		
11.2.6 PLC应用编程问题 .....	263		

13.4.6 网络互连 .....	316	14.2.4 普通居民小区的配电方式 .....	331
§ 13.5 工业现场总线 .....	317	§ 14.3 电力系统负荷与电力系统品质 .....	332
13.5.1 现场总线技术特点 .....	317	14.3.1 电动机运行对电力系统的影响 .....	332
13.5.2 现场总线系统的构造特点 .....	318	14.3.2 电力系统功率因数问题 .....	335
13.5.3 现场总线的通信模型 .....	318	14.3.3 电力系统谐波问题 .....	338
13.5.4 几种流行的现场总线 .....	318	14.3.4 电力系统的电压调整率 .....	338
本章小结 .....	319	§ 14.4 电力系统的保护 .....	340
习题 .....	320	§ 14.5 电力系统电流和电压的测量 .....	341
<b>第 14 章 电力系统</b> .....	322	§ 14.6 供电公司电力用户 .....	343
§ 14.1 中国电力系统概况 .....	322	§ 14.7 电气安全问题 .....	344
14.1.1 电力系统的组成 .....	322	14.7.1 电气对人体的伤害 .....	345
14.1.2 电力系统的运行管理体制 .....	324	14.7.2 电气火灾及其他灾害 .....	349
14.1.3 电力系统频率与电压等级 .....	325	14.7.3 电气安全的保障措施 .....	349
14.1.4 电力系统与环境污染 .....	326	14.7.4 低压配电系统中线路和设备的 电气安全防护 .....	350
§ 14.2 配电系统 .....	327	14.7.5 电气安全的技术保障措施 .....	351
14.2.1 配电网的基本结构 .....	327	本章小结 .....	354
14.2.2 终端变电站 .....	327	习题 .....	355
14.2.3 企事业单位与现代楼宇的 配电方式 .....	330		

## 器 件 篇

<b>第 15 章 数字集成电路</b> .....	358	及其计算 .....	380
§ 15.1 数字集成电路问题 .....	358	15.5.4 集成电路的温升计算 .....	381
15.1.1 数字集成电路的构建原则 .....	361	§ 15.6 可编程逻辑器件 .....	382
15.1.2 数字集成电路的分类与 产品系列 .....	361	15.6.1 PLD 中基本门电路的画法 .....	382
15.1.3 数字集成电路的主要品质指标 .....	362	15.6.2 PLD 的基本类型 .....	383
§ 15.2 集成电路的线逻辑 .....	366	本章小结 .....	388
15.2.1 一种特殊的 TTL 门电路输出 结构及线与逻辑的实现 .....	367	习题 .....	389
15.2.2 ECL 逻辑系列门电路的输出 结构及线或功能的实现 .....	368	<b>第 16 章 运算放大器</b> .....	391
15.2.3 利用三态门实现线选通 .....	369	§ 16.1 运算放大器的电路模型及 其理想化参数 .....	391
§ 15.3 集成电路中的传播延时 .....	370	16.1.1 运算放大器的表示符号及 主要端点引线说明 .....	391
§ 15.4 集成电路的扇出能力 .....	374	16.1.2 运算放大器的电路模型及 理想化参数 .....	392
15.4.1 直流负载和直流扇出能力 .....	375	§ 16.2 反相放大电路 .....	393
15.4.2 输入电容与交流扇出能力 .....	376	16.2.1 反相放大电路的接法 .....	393
§ 15.5 集成电路的功耗与发热 .....	378	16.2.2 虚地概念及反相放大电路分析 .....	393
15.5.1 静态功率损耗及其计算 .....	378	§ 16.3 同相放大电路 .....	395
15.5.2 动态功率损耗及其计算 .....	379	16.3.1 同相放大电路的接法 .....	395
15.5.3 常见逻辑系列的功率损耗 及其计算 .....	380	16.3.2 同相放大电路分析 .....	396

§ 16.4 差分放大电路 .....	399	§ 17.5 共基极放大电路 .....	452
16.4.1 差分放大电路的接法 .....	399	17.5.1 共基极放大电路的静态分析 .....	452
16.4.2 差分放大电路分析 .....	399	17.5.2 共基极放大电路的动态分析 .....	453
§ 16.5 积分与微分电路 .....	401	§ 17.6 放大电路的频率特性 .....	455
16.5.1 积分电路 .....	401	17.6.1 低频电压放大倍数 .....	455
16.5.2 微分电路 .....	402	17.6.2 高频电压放大倍数 .....	456
§ 16.6 滤波电路 .....	402	17.6.3 放大电路的通频带 .....	459
§ 16.7 运算放大器的频率特性 .....	406	§ 17.7 双极晶体管三种放大电路的 性能比较 .....	460
§ 16.8 稳定性 .....	409	§ 17.8 场效应晶体管放大电路 .....	460
§ 16.9 运算放大器的直流偏移 .....	412	17.8.1 场效应晶体管外部特性 .....	461
16.9.1 输入偏移电压 $U_{i0}$ 对运算放大器 应用电路的影响 .....	413	17.8.2 场效应晶体管的小信号模型 .....	462
16.9.2 输入偏移电流 $I_{i0}$ 对运算放大器 应用电路的影响 .....	413	17.8.3 场效应晶体管放大电路 .....	462
§ 16.10 运算放大器的非线性应用 .....	414	§ 17.9 多级放大器 .....	466
16.10.1 单限比较器 .....	414	17.9.1 多级放大电路的组织原则 .....	466
16.10.2 滞迟比较器 .....	416	17.9.2 多级放大器的级间耦合方式 .....	467
16.10.3 振荡器 .....	417	17.9.3 多级放大电路的动态性能 .....	469
16.10.4 理想二极管 .....	419	17.9.4 多级放大电路的幅频特性 .....	470
本章小结 .....	420	§ 17.10 差分放大电路 .....	471
习题 .....	420	17.10.1 差分放大电路的基本 工作原理 .....	471
<b>第 17 章 晶体管放大电路</b> .....	<b>424</b>	17.10.2 差分放大电路的输入、 输出方式 .....	472
§ 17.1 晶体管 .....	425	17.10.3 差分放大电路的动态 特性分析 .....	473
17.1.1 晶体管的构成与分类 .....	425	17.10.4 共模抑制能力分析 .....	475
17.1.2 双极晶体管的电流控制 功能描述 .....	426	§ 17.11 晶体管导电机理 .....	475
17.1.3 双极晶体管的电路模型 .....	427	17.11.1 半导体晶体 .....	475
§ 17.2 晶体管放大电路的基本问题 .....	433	17.11.2 半导体 PN 结及其导电特点 .....	476
17.2.1 晶体管放大电路的组成原则 .....	433	17.11.3 双极晶体管 .....	478
17.2.2 晶体管放大电路的特性分析 .....	435	17.11.4 绝缘栅场效应晶体管 .....	480
§ 17.3 共发射极放大电路 .....	436	本章小结 .....	482
17.3.1 共发射极放大电路的静态分析 .....	436	习题 .....	483
17.3.2 共发射极放大电路的动态分析 .....	440	<b>第 18 章 半导体开关器件及其应用</b> .....	<b>486</b>
17.3.3 晶体管的静态工作点对放大 电路性能的影响 .....	446	§ 18.1 半导体二极管 .....	486
17.3.4 负载电阻对放大电路 性能的影响 .....	446	§ 18.2 二极管的基本应用 .....	487
§ 17.4 共集电极放大电路 .....	448	18.2.1 整流 .....	487
17.4.1 共集电极放大电路的静态 特性分析 .....	448	18.2.2 限幅 .....	489
17.4.2 共集电极放大电路的动态 特性分析 .....	448	18.2.3 检波 .....	490
		§ 18.3 齐纳二极管 .....	492
		§ 18.4 直流电源 .....	494
		18.4.1 直流电源的滤波环节 .....	495

18.4.2 直流电源的稳压环节 .....	497	§ 19.2 机电能量变换与电动机 .....	541
18.4.3 直流电源的品质 .....	499	19.2.1 机电能量变换原理 .....	541
18.4.4 集成稳压电源 .....	499	19.2.2 电动机 .....	543
§ 18.5 二极管管压降 .....	500	§ 19.3 三相异步电动机 .....	549
§ 18.6 晶体管开关特性及其电路模型 .....	500	19.3.1 三相异步电动机的定子和转子 .....	549
18.6.1 双极晶体管开关 .....	500	19.3.2 三相异步电动机的转差率 .....	550
18.6.2 场效晶体管 .....	501	19.3.3 三相异步电动机电磁转矩 .....	551
§ 18.7 斩波电路 .....	502	19.3.4 三相异步电动机的起动 .....	553
18.7.1 信号的幅值调制 .....	502	19.3.5 三相异步电动机的调速 .....	557
18.7.2 微弱直流信号的放大 .....	502	19.3.6 三相异步电动机的运行特性 .....	559
§ 18.8 变流电路 .....	504	19.3.7 三相异步电动机的铭牌 与接线盒 .....	561
18.8.1 变流原理电路 .....	504	§ 19.4 单相异步电动机 .....	562
18.8.2 变流电路的特殊问题 .....	506	19.4.1 单相脉动磁场 .....	563
18.8.3 基于脉宽调制原理的变流技术 .....	507	19.4.2 单相异步电动机的转矩特性 .....	563
§ 18.9 二极管逻辑电路 .....	509	19.4.3 单相异步电动机的起动 .....	564
18.9.1 二极管-电阻逻辑电路 .....	510	§ 19.5 三相同步电动机 .....	565
18.9.2 二极管-晶体管逻辑电路 .....	511	19.5.1 三相同步电动机的转子结构 .....	565
§ 18.10 MOS 场效晶体管逻辑 .....	512	19.5.2 三相同步电动机的电磁转矩 .....	566
18.10.1 NMOS 逻辑电路 .....	512	19.5.3 三相同步电动机的起动 .....	567
18.10.2 CMOS 逻辑电路 .....	513	19.5.4 三相同步电动机的功率因数 .....	567
§ 18.11 可编程逻辑器件的 MOS 与 - 或逻辑电路 .....	515	§ 19.6 直流电动机 .....	568
§ 18.12 晶闸管 .....	516	19.6.1 直流电动机的结构与分类 .....	568
18.12.1 晶闸管的结构及开关特性 .....	516	19.6.2 直流电动机的电磁转矩和 机械特性 .....	569
18.12.2 晶闸管的典型应用 .....	517	19.6.3 直流电动机的起动 .....	571
18.12.3 晶闸管应用的特殊问题及 晶闸管派生器件 .....	519	19.6.4 直流电动机的调速 .....	572
§ 18.13 其他电力电子器件 .....	520	19.6.5 直流电动机的运行特性 .....	573
18.13.1 双极功率晶体管 .....	520	§ 19.7 步进电动机 .....	574
18.13.2 功率场效晶体管 (Power MOSFET) .....	521	19.7.1 反应式步进电动机的工作原理 .....	574
18.13.3 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) .....	521	19.7.2 步进电动机的工作方式和 驱动电源 .....	575
18.13.4 MOS 控制晶闸管 (MCT) .....	522	19.7.3 反应式步进电动机的典型结构 .....	576
18.13.5 功率集成电路与 IPM .....	522	§ 19.8 直线电动机概述 .....	576
18.13.6 主要电力电子器件特性比较 .....	523	19.8.1 直线电动机的基本结构 .....	577
本章小结 .....	523	19.8.2 直线电动机的主要类型 .....	579
习题 .....	524	19.8.3 直线异步电动机(也即交流直线 感应电动机)的工作原理 .....	579
<b>第 19 章 电磁与电动器件</b> .....	527	§ 19.9 电磁式低压电器 .....	580
§ 19.1 电磁感应与变压器 .....	527	19.9.1 电磁式低压电器的电磁机构 .....	580
19.1.1 螺线管磁场及相关的定律 .....	527	19.9.2 低压断路器 .....	581
19.1.2 导磁材料与工程磁路 .....	528	19.9.3 接触器 .....	582
19.1.3 变压器 .....	535		

---

19.9.4 电磁式继电器 .....	583	附录 C 拉普拉斯变换 .....	596
19.9.5 电磁式时间继电器 .....	584	附录 D $z$ 变换 .....	599
19.9.6 电磁阀 .....	585	附录 E 傅里叶变换 .....	600
本章小结 .....	586	附录 F 集成电路计数器 .....	604
习题 .....	587	部分习题答案 .....	608
附录 A 矩阵与行列式 .....	590	参考文献 .....	615
附录 B 线性方程组求解 .....	594		

电气工程是电磁基本规律具体运用的产物,它综合应用电磁的、电子的,以及各种电与非电能转换等技术,以电路的形式组成各种系统来实现它的工程目标。

从应用角度概括地讲,电气工程可分为大功率的电能(强电)应用和小功率(弱电)的信号或信息处理两个部分。尽管它们的工程目标不同,但是在技术上却是互相融合、相互支持的。

电气工程既十分传统,又极其现代。它的应用已经深入到工业生产和社会生活的各个方面,并且始终引领工业与社会现代化的进程。

建议读者从下述的角度来对待本书:

1. 了解电气工程中强电和弱电两个方面的主要应用。
2. 对电气工程建立起一个总体的认识,切实掌握它的理论、方法和技术要点,一旦需要时可以方便地从本书中找到正确的引导和必要的知识支持。
3. 从本书中发现某些自己特别感兴趣的内容作为继续学习或进一步研究的选项。

## § 1.1 电气工程的强电应用

电气工程的强电应用是指电能量的利用,包括电热电焊、电力照明、电解电镀、电力驱动以及为这些应用提供电力能源保证的电力生产、传输和分配等。强电应用技术的核心是各种能量转换的方法和技术,例如电能-热能、电能-光能、电能-化学能以及电能-机械能的转换等;强电应用所关注的主要问题是电能利用的质量、效率,以及相关的环境及社会问题。

### 1. 电力加热

电加热是一种高效的加热技术,它可以准确控制加热温度和加热过程,并且把热量严格控制在需要加热的部位或空间之中。电弧加热、工频加热、中频加热广泛应用于金属冶炼和金属加工,如电炉炼钢、金属热处理、金属焊接等;高频加热应用于非金属材料加工,如塑料注塑、焊接等;传统的电阻加热方法用于连续生产过程以及建筑物采暖之中,如化学反应加热、电热采暖等;在日常生活中,电热灶具、电烤箱、微波炉、热水器是大家所熟知的电加热器具。

### 2. 电力照明

电力照明转换效率高,便于控制和调节。迄今为止,还没有任何其他的照明技术可以用来取代电力照明。从微小的发光二极管到大功率的泛光灯,各式各样的发光器件和照明灯具应用

于家庭、建筑物、公共场所、影院剧院、体育场馆、街道、公路、机场跑道、港口航道等的夜间照明，以及广告、标志、信号等特殊场合。电力照明是电气工程中的一个活跃领域，各种发光器件以及新的、高效率、节能型的照明灯具还在不断地研制和开发之中。

### 3. 电解电镀

电解技术用于贵金属的冶炼和提纯以及化学元素提取的生产过程中，如铜、铝的电解，海水电解等；电镀技术用于金属材料的表面加工、保护和装饰。电解和电镀需要大功率直流电源的支持，电力电子技术是它的核心技术。

### 4. 电力驱动

与其他类型的动力机械相比，电动机具有性能优良、结构简单、价格低廉、使用和维护方便，以及控制精确、调节方便等一系列优点，所以，采用电力来驱动各种机械装置与设备仍然是当今的首选方案。电动机所消耗的电能几乎占国家总发电量的1/3，它的使用之广泛由此可见一斑。在工业生产领域，电动机应用于机械加工设备的驱动，包括机械加工机床及轧钢设备，以及连续生产过程中的泵、压缩机、风机、传送带等；在交通运输领域中，它用来驱动电气机车、动力车厢、磁悬浮列车、电动汽车等；在家用电器中，它用于洗衣机、烘干机、电冰箱、微波炉、电烤箱，以及录音机、打印机、自动门窗及卷帘装置之中；在军事领域，陆海空三军装备中所使用的电动机更是不胜枚举。

### 5. 电力传输

“集中生产、统一传输、分散使用”是电力能源系统构建模式的主要特点。电能的生产集中在有限数量的大型和巨型发电厂中，各种类型发电厂所生产的电能全部汇集在一个庞大的电网之中进行统一调度、传输和分配，而电能的使用则几乎分布在世界的各个角落。火力发电、水力发电及核能发电技术与设备；交、直流超高压(220~500kV)和特高压(750kV以上)输电技术与设备，以及高压供电和低压配电技术与设备构成电气工程的一个重要的组成部分。

## § 1.2 电气工程的弱电应用

电气工程的弱电应用是指电气技术在信号与信息领域中的应用。这个领域涉及信息的获取、传输、处理和应用，也称为信号与信息工程。信号和信息处理通常都在低电压、小电流下进行，“弱电”一词来源于此。除了大功率的无线电台、电视台、雷达站等个别系统与装置，在弱电应用领域中，“电能利用”问题并不是主要关注的问题。

广泛采用电子技术是弱电应用领域的基本特征，主要包括如下几个方面的应用。

### 1. 检测系统

检测是获取信号或信息的一种技术手段，它借助传感器感受信号并将它转换为便于表达和处理的电信号形式。电信号经过放大、滤波等处理后，或提供给人们观测、分析和判断；或进行记录、存储和显示处理；或经由通信系统进行传输；或直接用来进行控制和调节；或进入计算机系统进一步的处理、分析、识别或决策。在生物医学领域，信号检测技术用来监测人的体温、心率、血压及血黏度等，以辅助医生的诊断；在工业领域则用来测量生产过程的压力、温度、流量等参数，以实现生产过程的监控；在生活中，检测技术用来测量室内的温度、湿度，烟气等以实现空气调节和火灾报警；等等。

## 2. 通信系统

人与人之间交换信息称为通信，它以原始信号(模拟信号)形式交换信息，如电话、广播、电视等；而机器与机器之间信息交换则以数据交换为主，称为数据通信，如计算机网络中的局域网、广域网和互联网，以及计算机与其外围设备之间、控制系统中的控制器与控制对象之间的数据交换等；人与机器之间交换信息，往往要经过数据到信号或信号到数据的转换，即所谓的模数或数模转换，如数字电视及计算机的屏幕显示、图像扫描及信号的采样输入等。发送、接收；调制、解调；编码、译码，以及噪声、干扰；信源、信道等是通信系统最基本的概念。

通信系统是一种经典的电子系统，是电子技术综合应用的产物。随着数字技术的普及，数字通信技术已经成为各类通信系统的核心技术。在数字通信中，不论是人与人、人与机器，还是机器与机器之间的通信，在信道上传输的都是数字信号(即数据)，发送、传输、接收过程中处理的也是数字信号，对于某些类型的通信，如数字广播和数字电视，也仅仅在发送端的输入环节和接收端的输出环节需要做一些模数或数模转换处理。

## 3. 信息处理系统

信息处理包含信号处理和数据处理两个方面。信号处理包括信号的放大、滤波、分解、变换等；数据处理包含数值计算，逻辑演绎等。计算机是数据处理的强大工具，所以信息处理，包括信号处理(先将信号转换为数据)和数据处理都可以由计算机来执行。

大型数字计算机具有极高的运算速度和计算能力，一般按照多终端通用计算机的模式设计。在经济金融领域中，它用于经济管理部门及银行、保险等的业务处理；在商业领域，用于财务管理、市场分析及风险评估；在行政部门，它用于业务处理及人事、工资管理；在工程领域，它用于工程分析、工程设计与工程管理；在生产部门，它用于生产过程管理与控制；在研究部门，它用来做仿真与建模、模型求解、图像处理、语音合成；等等。

微型计算机，包括微处理器和个人计算机，它们的计算速度和计算能力有限，一般应用于处理小规模的问题和事务。在工业部门，它们用于智能仪器仪表、可移动设备，家用电器、小型控制器以及大系统中部件的测控和数据处理；在管理网络中，它们用来构成网络节点，处理有限的数据和信息；等等。

计算机由硬件和软件两大系统组成，硬件系统由大规模或超大规模集成电路组成，它们是半导体电子器件；软件系统是可以由硬件系统执行的程序，即指令代码序列。软件被存储在计算机内部的存储器中，由计算机自动执行。

## 4. 控制系统

控制是对对象状态或过程的精确调整，使之准确到达既定的目标或沿着既定的进程运行。例如，在装配机器人手臂的运动控制中，不断地对机器人的手臂运动进行精确调节，使之按照既定的轨迹准确地到达指定的工位；在室内空调系统的控制中，调节空调系统的运行使室内的温度和湿度保持在设定的水平上；在生产过程的控制中，调节温度、压力、流量等过程参数，使生产过程严格按照既定的工艺流程进行；等等。

“反馈”是控制系统的一个核心概念。将调节的结果回送到控制系统称为“反馈”，系统利用反馈信号与控制目标进行比较并做出判断，决定下一步的调节方向和调节量。“反馈”使信号流向出现回流，这决定了控制系统的闭环结构和相应的闭环系统分析理论体系。

在弱电应用领域，即信号信息领域中，“信号与信息”、“模拟信号与模拟系统”和“数字



信号与数字系统”是几个重要的概念。信号是可观测的物理现象，是具体的；信息是现象所表述的本质，是抽象的。信息是信号的内涵，信号是信息的载体。模拟信号是原始信号的电模拟信号（通常模拟成电压信号），它以信号波形或函数形式来描述；数字信号则是原始信号的数字编码信号，它以代码序列的形式来描述。模拟信号以原始的电压或电流信号的形式传送、分析和处理；数字信号以0、1代码的形式传送，以数值计算和逻辑分析的方法进行分析和处理。由于处理的是实际信号，模拟系统是纯硬件的物理系统；而数字系统，由于处理的是信号代码，则有纯硬件系统和软件、硬件相结合的系统两种形式，前者是基于数字电路的信息处理系统，后者是基于计算机的信息处理系统。在实际应用中，模拟技术与数字技术往往是综合运用的，所以更多的是呈现为数字模拟混合系统的形式。

弱电应用和强电应用只是从电能应用的角度对电气工程进行的一种划分。事实上，在强电领域中有弱电技术的运用；在弱电领域有强电技术的运用。所以，这种划分并不是绝对的。强电系统中的调节、控制、保护、测量等环节一般采用弱电技术；而弱电系统中的信号发射、发送，以及控制执行等环节，则更多的是采用强电技术。实际的电气工程系统总是体现强电和弱电技术的综合应用。

强电系统多使用电磁器件，如电机、变压器、开关、接触器、继电器等，而弱电系统多使用电子器件，如晶体管、二极管、集成电路等。通常把强电技术称为电气或电工技术，而把弱电技术称为电子技术，但这仅仅是根据所使用器件类型不同的一种习惯上的区分。这种划分其实并不准确。从电气工程的理论上讲，不论是从路（即电路）的角度、还是从场（电场、磁场、电磁场）的角度看，它们都同样是电子技术的基础理论；从技术层面上看，两者也是互相渗透、相互支持的。在电工系统中不乏电子器件和电子技术的应用，特别是电力电子器件与技术已经成为强电技术的一个重要领域；在电子系统中，电磁器件和强电技术的使用也是随处可见的，如变压器、微电机、继电器的应用等。总而言之，“电气”是个大概念，“电子”是其中的一个小概念。电子工程包含在电气工程之中，是电气工程的一个分支。

具备强电和弱电双重的知识和能力是电气工程师的基本要求；而熟悉强电和弱电的理论、方法和技术的要点则是一个优秀非电工程师的重要标志之一。

## § 1.3 电气工程与电路

在电气工程中，实际系统的结构包含下述三个层次。

### 1. 系统

系统，如检测系统、通信系统、控制系统、电力传动系统等，是一个为实现既定目标而将若干部件组合而成的一个复杂的整体。系统中各个部件用导线相连接构成电路形式，并连接在电源上运行。所以，电气系统实质上是一种电路系统。

### 2. 部件

在系统中独立担负既定任务的部分称为系统的部件，如强电系统中的变压器、电动机、整流器，弱电系统中的各种放大器、滤波器、振荡器、运算器、变换器以及大规模、超大规模集成电路等。部件具有独立功能，是大系统中的小系统，它们由各种更小的元件和器件组成。部件中的元、器件也以电路形式连接并在特定电源的供电下运行。所以，系统部件实质上是系统