

TURING

图灵电子与电气工程丛书

WILEY

IEEE

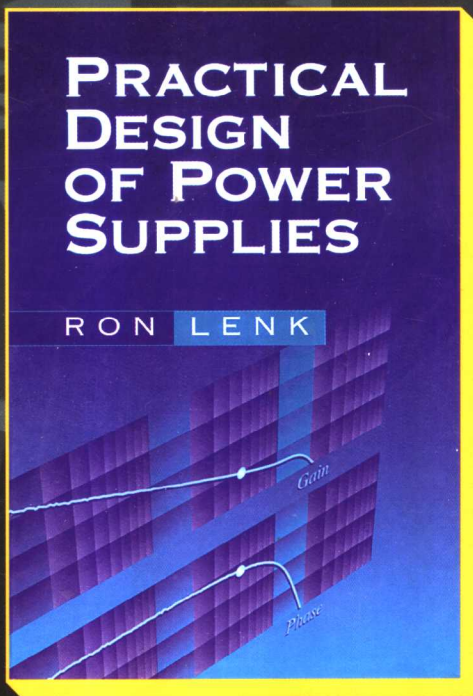
# 实用开关电源设计

## Practical Design of Power Supplies

[美] Ron Lenk 著  
王正仕 张军明 译  
徐德鸿 审

PRACTICAL  
DESIGN  
OF POWER  
SUPPLIES

RON LENK



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

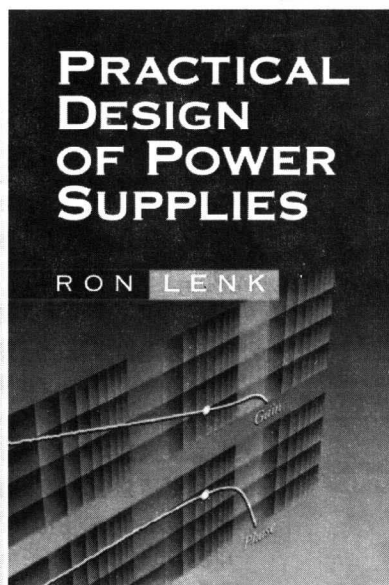
TURING

图灵电子与电气工程丛书

# 实用开关电源设计

## Practical Design of Power Supplies

[美] Ron Lenk 著  
王正仕 张军明 译  
徐德鸿 审



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

## 图书在版编目 (CIP) 数据

实用开关电源设计/ (美) 伦克著; 王正仕, 张军明译. —北京: 人民邮电出版社, 2006.4  
(图灵电子与电气工程丛书)

ISBN 7-115-14641-1

I. 实... II. ①伦...②王...③张... III. 开关电源—设计 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 024969 号

### 内 容 提 要

本书是一本介绍开关电源工程设计的实用指导书, 介绍了电源实际设计和调试工作中经常用到的各种知识, 包括变换器电路拓扑选择、元器件选择、仪器仪表的使用、控制保护电路、EMI 控制、效率与热管理以及最坏情况分析等。对磁性元件的设计和反馈设计部分作了深入详尽的介绍。本书还介绍了实验调试时经常要用到的各种电源、负载以及安全事项。

本书实用性很强, 可供从事开关电源设计的工程技术人员参考使用, 也可作为高等院校电力电子技术及相关专业师生的参考用书。

图灵电子与电气工程丛书

### 实用开关电源设计

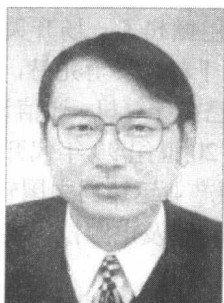
- 
- ◆ 著 [美] Ron Lenk
  - 译 王正仕 张军明
  - 审 徐德鸿
  - 责任编辑 吴爱华 舒立
  
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京顺义振华印刷厂印刷  
新华书店总店北京发行所经销
  
  - ◆ 开本: 800×1000 1/16  
印张: 16.5  
字数: 344 千字 2006 年 4 月第 1 版  
印数: 1—5 000 册 2006 年 4 月北京第 1 次印刷  
著作权合同登记号 图字: 01-2005-6089 号

ISBN 7-115-14641-1/TN · 2755

定价: 32.00 元

读者服务热线: (010)88593802 印装质量热线: (010)67129223

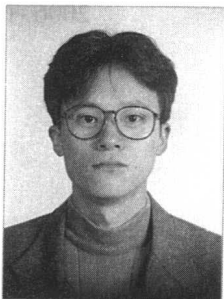
## 审、译者简介



徐德鸿，浙江大学教授，博士导师。主要从事电力电子技术的研究和教育。曾发表学术论文 200 余篇，撰写专著两本，获国家发明专利 5 项。现任国务院学位委员会电气工程学科评议组委员、IEEE 电力电子学会执行委员会 (Adcom) 委员、中国电源学会副理事长、中国电力电子学会副理事长、《电力电子技术》编委会副主任。



王正仕，博士，1994 年获浙江大学硕士学位，2005 年获香港理工大学 (Hong Kong Polytechnic University) 博士学位。主要研究方向为开关电源、逆变器和电机控制。



张军明，博士，1996 年毕业于浙江大学电机系，2000 年与 2004 年分别取得硕士与博士学位。现从事电力电子系统集成和 DC/DC 变换技术研究。

# 译 者 序

20 世纪 80 年代以来，功率场效应管 MOSFET 的出现和广泛应用掀起了一场开关电源技术的革命，开关电源中功率器件的开关频率提升至数十千赫或数百千赫，甚至兆赫，使直流电源的功率密度发生了质的飞跃。开关电源正迅速替代线性电源，已在计算机、通信设备、办公设备、家用电器、仪器仪表和照明设备等方面获得广泛的应用。20 世纪 90 年代开关电源行业迅速崛起，已成为电子行业的重要组成部分。当前，世界电源产业迅速向中国转移，同时国内也出现了许多中小型电源企业，因此十分有必要进一步推广和普及电源技术实用知识，同时这也有利于提高国内电源产品设计的品质和性能，增强竞争力。

Ron Lenk 先生撰写的这本关于开关电源设计的著作，不是一本开关电源技术入门书，而是一本优秀的提高性开关电源技术参考书，实用性和实践性都非常强。书中内容包括开关电源典型功率变换电路的选取原则、开关电源中常用元件特性和选用方法、开关电源性能测试仪器功能和使用方法、磁性元件设计方法、反馈设计方法、控制电路及保护电路、效率估计和热设计以及电磁兼容等。本书中有关开关电源中常用元件特性和选用方法、磁性元件设计方法以及反馈设计方法等内容的章节颇具特色。

本书比较适合已有电力电子技术基础或开关电源技术基础的读者，可用作进一步提高电源设计知识的参考书。

全书译稿经浙江大学徐德鸿教授审校，在此谨致衷心感谢！

由于译者水平有限，翻译不当之处，欢迎读者批评指正。

译 者

2006 年 1 月

# 前 言

本书的读者是与电源、电力系统相关的工程技术人员，主要包括那些在电源领域已经有一定工作经验的设计工程师。对他们来说本书是对日常工作中需要用到的各种重要知识的纲要性总结。通常，工程师们就像救火队员一样整天忙于手头的紧急事务，以至于没有时间去查阅开关电源技术文献和资料以更新和提高自己的知识。对这些工程师来说，这本书恰为他们提供了设计优秀的电源应该具备的知识，书中详尽的实例能够使大家阅读起来更加容易。

本书对电源领域的熟练技术人员也是非常有益的。它不仅使你知其然，还让你知其所以然。书中把“为什么要这样做”和“怎样去做”这两个问题讲得很清楚——即使是有几十年工作经验的人员也会对这些问题非常感兴趣。一些非常实用的知识用方框以**实用提示**和**安全常识**的形式给出，这些知识能够在你的工作中立即见效。附录部分给出了书中所用名词的缩写以及符号的定义。

因为一个电源可行的设计方案多种多样，而且应用场合也不尽相同，因此本书并没有按详细设计手册的形式来写。但是，书中清晰地解释了基本原理，实际上你完全可以根据自己的具体应用场合，做出正确的选择。除了第6章闭环控制以外（有些数学公式是必需的），本书没有冗长的数学推导。这本书的重点在于设计的实用性，即实际中怎么做、怎么进行实际测量。

书中的例子都取自中小功率电源（0W~10kW），这也是作者本人的主要工作范围。但是本书中介绍的很多方法，同样也适用于更大功率的电源系统，希望对所有功率等级电源变换器的设计都有指导借鉴作用。最后要说明的是，这本书有意回避了计算机仿真问题（第6章一个简单的例子除外），因为这一主题需要专门的图书进行介绍。

我的朋友 Stan Canter 先生——开关电源技术领域的一位无名英雄，长期以来给了我很多睿智的建议和愉快的交流，使我受益匪浅。感谢 Anatoly Shteynberg 和爱立信美国公司为我提供机会使用本书中的原始材料授课。感谢 Steve Cartier 为我解释了有关电话机方面的那些非常难懂的问题。最后还要感谢 Chae Lee 和 Siliconix 在撰写过程中耐心细致的工作。

Ron Lenk

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1	2.3 buck 变换器	20
1.1 电源	1	2.3.1 限制	20
1.1.1 实验室电源	1	2.3.2 门极驱动困难	21
1.1.2 交流电源	2	2.4 反激式变换器	23
1.1.3 蓄电池	3	2.4.1 两种形式	23
1.1.4 太阳能电池	5	2.4.2 与升压电路名字的混淆	24
1.2 负载	6	2.4.3 连续和断续	24
1.2.1 高速的要求	6	2.4.4 电容的限制	24
1.2.2 低噪声要求	8	2.4.5 输出功率限制	25
1.2.3 再谈蓄电池	9	2.4.6 输出绕组的限制	25
1.2.4 电话机	9	2.5 buck-boost 变换器	26
1.2.5 日光灯管	10	2.6 正激式变换器	27
1.2.6 其他变换器	11	2.6.1 最小负载	27
1.3 安全	11	2.6.2 漏感	28
<b>第 2 章 电路拓扑的实用选择</b> .....	15	2.6.3 总结	28
2.1 引言: 电路拓扑多达上百种	15	2.7 推挽变换器	28
2.2 一般性考虑	15	2.7.1 电压型	29
2.2.1 升压或者降压	15	2.7.2 电流型	29
2.2.2 占空比的实际限制	16	2.7.3 变压器的利用率	30
2.2.3 多少组输出	16	2.8 谐振变换器和软开关变换器	30
2.2.4 隔离	17	2.8.1 谐振变换器和软开关变换器的 区别	31
2.2.5 EMI	17	2.8.2 为什么不选用谐振变换器	31
2.2.6 选用双极型晶体管还是 MOSFET	17	2.8.3 为什么要选用软开关变换器	31
2.2.7 连续和断续	18	2.9 复合变换器	32
2.2.8 同步整流	18	参考文献	33
2.2.9 电压模式控制和电流模式控制	19	<b>第 3 章 元器件的实用选择</b> .....	35
2.2.10 结论	20	3.1 引言	35

3.2 电阻	35	3.7.5 计算损耗: 门极充电损耗	49
3.2.1 阻值	35	3.7.6 计算损耗: 开关损耗	49
3.2.2 电阻的类型	36	3.7.7 需要门极电阻	49
3.2.3 容差	36	3.7.8 最大门极电压	50
3.2.4 选择比率	37	3.8 运算放大器	50
3.2.5 最大电压	37	3.8.1 失调: 输入失调电压	50
3.2.6 温度系数	37	3.8.2 失调: 输入失调电流	51
3.2.7 额定功率	37	3.8.3 失调: 输入偏置电流	51
3.2.8 无感线绕电阻	40	3.8.4 失调控制	51
3.2.9 分流器	40	3.8.5 大电阻的限制	52
3.2.10 布线电阻	40	3.8.6 增益带宽	53
3.3 电容器及其用法	41	3.8.7 相移	54
3.3.1 电容器的种类	41	3.8.8 电压上升率	54
3.3.2 标准值	41	3.9 比较器	54
3.3.3 容差	42	3.9.1 磁滞效应	54
3.3.4 ESR 和功率损耗	42	3.9.2 输出饱和电压	55
3.3.5 老化	43	参考文献	56
3.3.6 $dV/dt$	43	<b>第 4 章 仪器的实用指导</b>	<b>57</b>
3.3.7 电容的串联	43	4.1 引言	57
3.4 肖特基二极管	44	4.2 计算器和计算方法	57
3.5 整流二极管	44	4.2.1 有效数字位数	57
3.5.1 反向恢复	45	4.2.2 是否在乎	58
3.5.2 越快越好吗	45	4.2.3 一个密切相关的问题	58
3.6 晶体管: BJT	46	4.2.4 另外一个需要避免的问题	58
3.6.1 脉冲电流	46	4.3 数字万用表和其他仪表	59
3.6.2 放大倍数可以用多大	46	4.3.1 精度和准确度	59
3.6.3 不要忽略集电极漏电流	46	4.3.2 平均	59
3.6.4 发射极-基极之间的齐纳击穿 ——这是是否是坏事	46	4.3.3 数字万用表如何滤波	59
3.6.5 快速关断	47	4.3.4 测量有效值和数字万用表的 带宽	60
3.7 晶体管: MOSFET	47	4.3.5 测量效率: 交叉校正	60
3.7.1 不要混淆 JFET 和 MOSFET	47	4.3.6 怎样放置探针	61
3.7.2 P 沟道和 N 沟道	48	4.3.7 测量低阻值的电阻	62
3.7.3 双向导通	48	4.3.8 用分流器测量大于 10A 的电流	62
3.7.4 计算损耗: 导通损耗	48		



4.3.9 怎样用数字万用表测量 MOSFET	62	5.5.2 磁芯材料类型的选择	93
4.4 电子负载	63	5.5.3 磁芯的选择	94
4.4.1 为什么稳定的变换器会出现 振荡	63	5.5.4 磁芯材料的选择	96
4.4.2 最小输入电压	63	5.5.5 气隙的选择	98
4.5 示波器	63	5.5.6 磁芯损耗	101
4.6 网络分析仪	64	5.5.7 怎么运用磁性材料性能图表	101
4.7 奈奎斯特图	67	5.5.8 降低开关频率可否降低磁芯 损耗	103
<b>第5章 磁性元件的实用设计</b>	<b>69</b>	5.5.9 绕组损耗	104
5.1 磁的基础知识	69	5.5.10 是否要考虑趋肤效应	105
5.1.1 引言	69	5.5.11 铜耗与变压器总损耗	106
5.1.2 安培定律	69	5.5.12 磁感应强度有两个公式吗	107
5.1.3 法拉第定律	70	5.6 正激式变换器的设计实例	108
5.1.4 关于电感	71	5.6.1 匝数比=1:1	108
5.1.5 混乱的单位	71	5.6.2 匝数比=2:1	109
5.1.6 神秘的词:三个“R”	72	5.6.3 匝数比=3:1	109
5.2 理想变压器	73	5.6.4 匝数比=4:1	109
5.3 实际变压器	76	5.7 电流互感器的设计实例	110
5.3.1 磁芯材料	78	5.8 可批量生产的磁性元件设计技术	112
5.3.2 饱和	78	5.8.1 导线的粗细	112
5.3.3 磁芯的其他局限	79	5.8.2 导线粗细比率	113
5.3.4 优化设计	80	5.8.3 环形磁芯绕线的限制	113
5.4 直流电感的实际设计	81	5.8.4 胶带与导线的绝缘	113
5.4.1 选择磁芯	81	5.8.5 分层	114
5.4.2 第一次尝试	81	5.8.6 绕组的数目	114
5.4.3 第二次尝试	86	5.8.7 密封	114
5.4.4 选择导线	87	5.8.8 技术规格书	115
5.4.5 电阻的计算	89	5.9 结论	115
5.4.6 功率损耗	89	参考文献	116
5.4.7 和温度有关	91	<b>第6章 实用反馈设计</b>	<b>117</b>
5.4.8 结论	92	6.1 引言	117
5.5 反激式变压器的设计实例	92	6.2 复习	117
5.5.1 反激式变压器的主要方程	92	6.2.1 对数和分贝	117
		6.2.2 复数	118

6.2.3	复函数	119	6.6.2	电流模式控制的局限性	145
6.2.4	什么是函数变换	120	6.6.3	斜坡补偿	146
6.2.5	两种函数变换	120	6.6.4	如何补偿电流模式控制器	147
6.2.6	两种变换有什么区别	120	6.6.5	电流环能否测量	147
6.2.7	电容 $C$ 和电感 $L$ 的变换	121	6.6.6	平均电流模式控制	148
6.3	传递函数	121	6.7	无最小相位系统	148
6.3.1	什么是传递函数以及什么时候 使用传递函数	121	6.8	系统稳定的一些概念	151
6.3.2	传递函数的合成法则	122	6.8.1	输入和输出阻抗	151
6.3.3	非线性系统没有(有用的)函数 变换	124	6.8.2	变换器的输出阻抗	153
6.4	基本的控制理论	124	6.8.3	两个稳定的变换器可以组成一个 不稳定系统	154
6.4.1	波特图	125	6.8.4	不稳定系统实例	155
6.4.2	稳定的要求	126	6.9	关于仿真的一些想法	156
6.4.3	需要多少相位裕度系统才能 稳定	129	参考文献	157	
6.4.4	增益裕度	129	<b>第7章 实用控制和监控电路设计</b>	<b>159</b>	
6.4.5	关于条件稳定	129	7.1	控制电路	159
6.4.6	小信号和大信号稳定	130	7.1.1	启动	159
6.5	如何让电压型 buck 变换器稳定	131	7.1.2	软启动	161
6.5.1	如何测量开环响应	132	7.1.3	时序	161
6.5.2	威纳波尔的 $K$ -因子环路补 偿法	134	7.1.4	反馈	162
6.5.3	实际需要考虑的问题	137	7.1.5	限流	163
6.5.4	其他方面的评价	138	7.1.6	开关频率	164
6.5.5	如何测量闭环响应	138	7.1.7	同步	164
6.5.6	测量: 变压器法	139	7.2	监控电路	166
6.5.7	测量: 信号迭加	140	7.2.1	如何监控电压	166
6.5.8	变换器的闭环	141	7.2.2	电压基准	166
6.5.9	不要用错误的方法测量环路	142	7.2.3	在没有负电源供电时如何监控 一个负电压	167
6.5.10	测量开环的更好方法	142	7.2.4	为何需要采用滞环比较器	167
6.5.11	误差放大器同相端没有引出 脚时的处理方法	144	7.2.5	电阻与分流器	168
6.6	电流模式控制	145	7.2.6	差分放大器	168
6.6.1	原理	145	7.2.7	补偿分流器的电感	170
			7.2.8	故障应为低电平	170
			7.2.9	驱动红色 LED	171

<b>第 8 章 实用效率和热管理</b> .....	173	9.4.2 大电流驱动电路接地, 独立地线	200
8.1 效率.....	173	9.4.3 器件只有输入信号, 没有信号地线的情况	200
8.1.1 定义.....	173	9.4.4 电流互感器的位置	201
8.1.2 效率的重要性.....	173	9.4.5 反馈信号线	202
8.1.3 模块.....	173	9.4.6 布板提示	202
8.1.4 90%的效率已经相当出色.....	174	9.5 低频滤波.....	203
8.1.5 计算实例 1.....	174	9.5.1 基本知识.....	203
8.1.6 计算实例 2.....	181	9.5.2 差模滤波.....	203
8.1.7 提高效率.....	182	9.5.3 商用与军用.....	203
8.2 热管理.....	183	9.5.4 参数选取.....	204
8.2.1 元件寿命与温度.....	183	9.5.5 共模滤波.....	204
8.2.2 模块.....	184	9.5.6 参数选取.....	205
8.2.3 美国军标 MIL-HDBK-217.....	184	9.5.7 电感、电容及其缺点.....	205
8.2.4 MIL-HDBK-217 标准: 举例.....	184	9.5.8 MOV (压敏电阻) 存在电容.....	206
8.2.5 MIL-HDBK-217 标准: 讨论.....	187	9.5.9 单个元件的价格获得两个元件的效果	206
8.2.6 温度计算.....	187	9.5.10 不可能获得 100dB 的衰减	206
8.2.7 散热器等.....	188	9.6 高频滤波.....	207
8.2.8 有限元分析.....	189	9.6.1 何处使用磁珠.....	207
参考文献.....	190	9.6.2 旁路电容.....	207
<b>第 9 章 实用 EMI 控制方法</b> .....	191	9.7 其他相关主题.....	208
9.1 概述.....	191	9.7.1 噪声估算.....	208
9.1.1 辐射和传导.....	191	9.7.2 最优滤波.....	208
9.1.2 辐射噪声的处理办法.....	192	9.8 最优军用 EMI 滤波器设计.....	209
9.1.3 外壳材料.....	193	9.9 EMI 滤波与变换器稳定性.....	211
9.1.4 共模和差模.....	193	参考文献.....	212
9.1.5 地线和大地.....	193	<b>第 10 章 实用最差情况分析方法</b> .....	213
9.1.6 军用和商用测试方法.....	194	10.1 概述.....	213
9.2 如何从差模中分离共模.....	194	10.1.1 最差情况分析的目的.....	213
9.3 噪声来源.....	196	10.1.2 如何进行 WCA.....	213
9.3.1 开关波形.....	196	10.1.3 应力分析的目的.....	214
9.3.2 电容耦合.....	196	10.1.4 有效值与最差情况.....	214
9.4 布板.....	197		
9.4.1 信号地和功率地.....	198		

---

10.1.5	数学方法与仿真	215	10.2.7	应力分析	223
10.1.6	蒙特卡罗分析或灵敏度分析	215	10.2.8	结论	224
10.2	举例	216	10.3	结束语	224
10.2.1	电路	216	<b>附录 A</b>	<b>本书中采用的符号和缩写</b>	
10.2.2	需要分析的特性	216		<b>列表</b>	225
10.2.3	表格评估方法	217	<b>附录 B</b>	<b>最差情况分析使用的数据</b>	
10.2.4	WCA: 比较器动作电平	219		<b>手册</b>	227
10.2.5	WCA: 双极型晶体管正常情况 关断	221	<b>附录 C</b>	<b>电气图形符号对照表</b>	243
10.2.6	WCA: PWM 芯片关断时间	222	<b>索引</b>		245

本书的读者对象是中小功率（范围大约为  $0\text{W}\sim 10\text{kW}$ ）电源的设计工程师。这类读者可能已经对功率变换器有一定的经验，至少知道功率变换器有多种不同类型。（讲述拓扑的第 2 章将讨论各种类型。）为什么有多种不同类型，而不是仅用一种电路结构，通过改变不同的电路参数来完成各种电源呢？这样做有很充分的理由，主要是两方面：变换器的运行需要多种多样的电源输入；同样，有多种多样的负载需要变换器提供电源。只有拥有多年变换器设计经验的工程师，才能体会这两方面多样性的真实含义——这正是电源设计工程师在技术上面临的挑战，要比数字电路设计工程师大得多的原因之一。因此，本书一开始就比较详细地介绍了各种各样的电源及负载，包括常用的和特殊的，使你对此先有个感性认识。本书给出的例子当然无法包罗万象，它们只是反映了作者本人在本书讨论的功率范围内的一些设计经历（有的并不是那么令人愉快）；你也可以从现在开始积累例子。由于一些电源和负载需要很长的文字说明，所以本书不会全面讨论；相反，这些例子的目的只是为了说明电源的各种运行环境。

绪论这一章还介绍了有关实验室安全方面的问题。通常，在实验室和书本中，人们都会忽略这个主题，或至少在时间不够时，会推至一边。但我们还是建议读者仔细阅读这些内容，因为它对于电源工作者及其相关人员，甚至对正在进行试验的实验室的参观人员，都非常重要。

## 1.1 电源

### 1.1.1 实验室电源

在开发新的变换器时，都需要用到实验室的直流电源。然而，即使是性能理想的直流电源，在使用的时候，仍然会出现一些意想不到的现象。

实验室里通常有老式和新式两种直流电源，它们之间的差别非常明显，很容易区分：旧式电源非常重。这是因为旧式电源采用较重的工作于  $60\text{Hz}$ （或  $50\text{Hz}$ ）频率的金属变压器，用线性调节手段来减压，其输出端并联大容量的电容（ $10\,000\mu\text{F}$  甚至更大），机壳里装有风扇，为线性调节器散热。金属结构使这些旧式电源可靠性很高，似乎根本不会坏，我本人就见过有些旧式电源甚至是二战时期的产品，但现在甚至将来很长的一段时期，仍然能可靠地

工作。

新式电源通常采用开关调节技术。(要注意的是对电噪声非常敏感的应用场合是个例外,这时电源仍然会采用线性调节技术,但通常功率较小。)开关调节技术使得新式电源比相同功率的旧式电源要轻很多,但也更容易受到各种问题的影响,本书将从各个方面阐述这方面的问题。原因之一是虽然新式电源也经常自我宣传容量较大的输出电容,但是使用的时候如果在其输出端并上足够大的电容,那么任何开关调节都会出现振荡现象。当然,电源生产厂家已经考虑到用户外接电容的可能性,在设计的时候已经想办法让内部的输出电容起到主要作用,并针对内部输出电容设计了控制补偿电路,使电源能够稳定工作。但是如果使用时外接的电容足够大,那么电路的稳定工作仍然会被破坏,最终产生振荡。实际工作中,虽然线性调节器同样存在振荡的可能,但是60Hz变压器型电源似乎没有发生这种振荡现象,原因可能是外接那么大的电容基本不可能。

另一个问题是在美国实验室电源是60Hz的。开关调节器电源在这方面有很好的性能,因为它在60Hz附近有较高环路增益,对输出的60Hz波动有很好的抑制作用。而且,新的开关型电源比旧式开关电源性能更好,因为一些旧式开关电源采用晶闸管和相控技术,会带来较强的60Hz噪声。而现代新式的开关电源采用场效应管器件(MOSFET等),其控制回路的频带宽度可以设计得很高。旧式线性调节性电源依赖于容量巨大的输出电容来滤除电压纹波,其效果并不让人满意。

旧式线性电源具有优势的另一场合是,有时为了得到应用中需要的更大输出电流,可以将两台或多台电源并联。(当然,这需要远端传感器,与变换器无关。)旧式变换器的噪声都在60Hz的地方,每一个变换器产生的噪声都是同相的,因为它们都由工频电源馈电。至少噪声的频谱是明确的。对于开关电源来说,使用的时候是没有同步端口的,因此每一个开关电源都以自己频率工作。如果不凑巧,这些频率非常接近,并联在一起的变换器会产生一种低频的差频。显然,差频不利于变换器的并联。

### 1.1.2 交流电源

通常人们认为只要插入烤箱的电源插头,面包就可以烤好。但对于我们电源设计人员而言事实远非如此简单!交流电源种类繁多,并伴有各种各样的问题。为了保证电源能够长期稳定可靠的工作,需要做大量的工作,对相关的国际和国家技术标准做大量研究。事实上许多电气工程师一生都在从事这方面的工作,因此这并不是令人吃惊的事情。

在各种不同的交流电源中,最明显的区别在于频率不同。美国的电网频率是60Hz,欧洲的是50Hz。实际上各种电源的交流频率都允许存在一定的偏差。因此如果要设计全球都适用的电源,频率范围需要低到47Hz,在美国则可高达63Hz。这个允许偏差的频率范围是需要的,因为电力公司的大涡轮机工作时就存在一定的转速偏差。与工作于60Hz频率的电源相比,工作于50Hz(实际上可能是47Hz)的电源需要更大容量的电容。

电压的高低也各不相同。在美国,插座的电源是110V(有时是120V),但也有208V的

交流电压（供洗衣机用）、三相 480V 的交流电压（供工业用）和 277V 的电压（供日光灯照明用，不同的楼宇有时也有 120V 的交流电）。在欧洲却是 230V……而澳大利亚是 240V！还有一种用于闭路电视的 60V 电源，实际上是一种高阻抗的峰峰值大约为 120V 的准方波。

这些仅仅是标称值，每一种电源还有各自的允许偏差。以 110V 交流电源为例，从 90V 到 130V 的范围内都认为是正常的，对于电源而言，性能并不会减弱。还有电压的过低和短时跌落，基本上电源设备必须能从 0V 到标称电压的整个范围内都能安全工作，免受损坏（欠压时，可以用欠压保护电路对电源装置进行保护）。当电网电压突然中断哪怕 60Hz 情况下的几个周期时，有些电源设备可能还必须提供不间断的电能（这时只能用大容量的电容或电池，如果电源包含功率因素校正电路，那么输出电容需要比通常的电路大得多）。

还有过电压情况。许多照明灯启动时的电弧，能够在  $2\Omega$  的阻抗上产生 6kV 的电压，并且能以线与线和共模的形式出现（见第 9 章 EMI 部分）。这种照明启动时产生的高电压有两个特点：一是时间短（上升时间为  $1.2\mu\text{s}$ ，衰减时间为  $50\mu\text{s}$ ），二是很高的能量在 1ms 时间内衰减掉。还有一些瞬态高压，在半个周期内线电压峰值可以高达 750V！（这对一些通信电源是需要的。雷电时希望高电压沿着电力线衰减，断路器动作需要一定的时间。）

以上介绍的仅仅是电力交流电源中各种复杂问题的很小一部分。总之交流电源所处的环境十分恶劣。设计电源时经常会出现这样一种现象：在可靠性和满足国家安全规范（每个国家不尽相同）上面所花费时间与设计电源其余部分所花费的时间大致相当。

3

### 1.1.3 蓄电池

蓄电池的特性在有些方面完全超出了大多数电力工程师的知识范围，因为蓄电池涉及化学反应和冶金方面的知识。事实上，有一些问题，甚至连电化学方面的专家也不完全清楚。和蓄电池相比，交流电源要好理解得多。这里我们将介绍相关的基本知识，这样当你设计使用蓄电池的变换器时，能知道问题所在。

首先要强调的是，蓄电池不是超大容量的电容器，虽然它可以进行充电、放电，可以存储能量、释放能量。但是蓄电池与电容有很大的不同：如果在蓄电池上施加一个正弦电源，可以发现电压和电流之间没有相位差，蓄电池性能上也不等同于下面要讨论的滤波器。下面探讨蓄电池的一些基本性能，特别是作为一种电源，接上负载时流进、流出电流的不同电气特性。

蓄电池有许多电池单元组成，通常这些电池单元以串联方式连接（并联连接的形式比较少见）。知道这样一个事实对于电源工程师在工作中会有所帮助：电池单元是蓄电池基本“细胞”，蓄电池由单个或多个电池单元连接而成蓄电池。

**警告** 不要把这些电池单元并联形成蓄电池，这样是很危险的。让蓄电池制造商按你的需要将这些单元配置成合适的电压和容量。如果确实需要并联，可以用二极管接成“或”逻辑的形式。

单个电池单元基本上是一个化学反应装置，通常由两个金属电极和导电通道组成。导电通道可以是液体的、也可以是固体的，取决于所使用的化学物质。电池单元的关键之处在于根据电流流进流出的不同流向，能够产生可逆的化学反应（对可充电电池或“二次”电池，不可充电电池称为“原电池”）。当两个金属电极（即阴极和阳极）上外接电源进行充电时，产生的化学反应使一些物质的化学结构发生改变，对蓄电池是充电储能状态。当电极上接上负载时，产生一个逆向相反的化学反应，使这些物质又回到原来的状态，并向外释放电能。

作为电源，蓄电池的性能与工作频率有很大关系。我们首先从最高频率开始分析，然后逐渐减小频率。在变换器典型的开关频率，即 20kHz 或更高的时候，蓄电池似乎是开路的，因为蓄电池输出端、内部以及电极上存在等效电感，而且化学反应本身需要一定的时间来完成。例如镍氢电池内部的等效电感约为 200nH，5 个这样的电池单元串联的话（输出电压 6V）等效电感就可达 1 $\mu$ H。如果工作频率为 200kHz，其阻抗可达 1 $\Omega$ 。蓄电池需要吸收变换器产生的同频率的开关纹波，因此，通常需要在蓄电池两端并联外接电容。

如果以 1kHz 或低至几赫的低频方式工作，由于内部的化学反应，蓄电池会表现出大量的非线性现象。当输出电流逐渐增大时，电压会逐渐下降（其关系近似于反正弦函数）。图 1-1 示出了 12V 镍氢电池的标称电流-电压曲线。标称电压为 12V，电流输出方向定义为负方向。当输出电流较小时，蓄电池的电压下降特性类似于一个电阻：电流增加一倍，电压将增加一倍。但是大电流时电压下降的幅度变化，却没有小电流工作时变化那样明显。在电压降至 0V 以前，电池可以输出极大的电流（图中没有画出）。（实际中不允许这样操作。因为蓄电池短路会产生爆炸！）作者在进行镍氢电池测试试验时，曾经出现过高达 1500A 的短路电流。

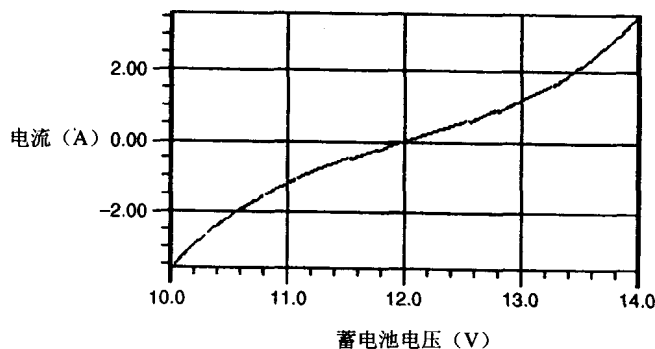


图 1-1 12V 电池的典型电流-电压特性

电池的输出电流与端电压之间关系还与温度、剩余电量有关。输出电流太大可能引起电池的损坏。任何电池当工作温度低于其额定温度时都会损坏。例如密封的铅酸电池在  $-10^{\circ}\text{C}$  以下温度就不能正常工作。这就是为什么汽车在冬天很可能无法启动的原因。

工作频率继续降低，周期变为几分钟或几小时的时候，蓄电池将以“安·时”来衡量所



充的电量（电流×时间=所充电量）。对电源设计工程师来说，容易混淆的是，这和能够从蓄电池输出多少能量没有简单的关系，并不等于电容量乘以输出电压。输出电压和输出电流有关。蓄电池厂家会给出各种参数曲线，但是这些曲线并不能涵盖实际操作中的每一点。需要更多更有用的信息。你自己对蓄电池进行测试是没有意义的。不同厂家生产的蓄电池性能上会有很大的不同，同样的化学物质、同样的“安·时”容量，两种蓄电池能够维持工作时间的会有很大的差异。

蓄电池还有一种自放电现象。一组充满电的蓄电池不接任何负载（即完全空载）下，如果放置较长的时间，自身的能量会逐渐丢失。这个储存能量丢失的时间和电池所采用的化学物质有关。镍氢电池可以是 24 小时，而锂电池可以是几年。

使用多年以后，经历了多次充电放电的循环，蓄电池能够存储的容量逐渐下降，这时，可以认为蓄电池寿命的结束。蓄电池寿命取决于它的工作情况：经历充放电的次数，放电深度等。即使是后备式蓄电池，处于浮充状态（总是处于充满状态），平时完全充满，5 至 10 年以后需更换。

电池的种类很多，铅酸化学电池、镍铬电池等等。每种电池都有自己与众不同的特性。因此研究电池的性能需要大量的时间，对于电子电源设计工程师来说，一个更好的方法是：找到愿意和你紧密合作的电池制造商，借助他们的技术经验。

#### 1.1.4 太阳能电池

太阳能电池是一种很有发展前途的电源。太阳能电池是一种二极管阵列，当太阳光照射时会产生电流。事实上所有的集成电路芯片都对光会有反应（所以 EEPROM 可以用紫外线来擦除数据）。但是，太阳能电池是通过优化处理，在单位光照面积上，能够产生最大的电能。太阳能电池的电流-电压特性（ $I-V$ ）特性类似于一个整流器（区别仅在于太阳能电池是产生能量而不是消耗电能）。 $I-V$  曲线是一个电流的对数函数形式。图 1-2 为理想的太阳能  $I-V$  曲线。和你最初希望的形式相反，这个曲线给出的是电流和电压的关系。利用图 1-2 可以得到输出功率与电流关系（功率=电流×电压），可以发现存在一个功率最大点，如图 1-3 所示。实际工作中，这个最大功率输出点需要外接一定的负载，否则，开路 and 短路时都没有送出功率。外接变换器要求工作于最大功率的左半部分，输出电流增加，输出功率也随之增加。如果工作在最大功率点的右半部分，超出峰值功率，系统会不稳定。如果变换器要输出更大的功率，那就要输出更大的电流。但是，根据  $I-V$  曲线，电流增大就会使功率减小，就需要更大的电流。这样在图中就进入最大功率点的右边部分，功率沿着曲线下降。找到的功率最大点，同时又保证系统不超过这个点，一直是设计应用太阳能电池的挑战性课题。

一些应用太阳能电池的变换器，它们的工作原理类似于反激式变换器：在一个周期的一段时间是让电流对地短路，在剩余的时间里，再把能量释放在一个电感里。这给太阳能电池带来一个问题：由于是在半导体器件，内部存在一个和电压、温度有关的电容。这个电容会对与其并联的器件产生瞬间的浪涌电流，直至被放电放完。电容上的电压也不能很快上升，