

国外电气工程名著译丛

电力电子技术手册

(美) 厄文·斯皮尔曼·斯皮尔曼 主编

陈建业 杨德刚

于歆杰 梁自泽

赵伟青 译

机械工业出版社

本书是美国学术出版社邀请国际上电力电子技术领域 10 个国家 10 名著名专家和研究人员编写的一本手册。编者通过精心的组织和充分的信息,对涵盖电力电子技术及其应用领域中,从电力半导体器件的性能、各种电力变流器的原理和结构到电力电子技术在各个领域中的应用等广泛内容进行了全面、深入浅出的介绍,使该手册成为对迅速发展中的电力电子技术的一个启发性的导论。

由于本手册的目的是为从事电力电子技术的读者在解决他们面临的问题时提供指导,所以本书除了可以作为电机工程专业高年级本科生和研究生的教材外,对从事电气工程的科技人员和教师也有重要的参考价值。

本书由机械工业出版社引进,原书由美国学术出版社(Academic Press)出版。本书中文简体字版由机械工业出版社独家出版。

本书中文简体字版由机械工业出版社(Academic Press)授权机械工业出版社独家出版。

版权所有 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术手册 转美)拉希德(原著,陈建业等译) —北京:机械工业出版社, 2001
(国外电气工程名著译丛)

书名原文: Power Electronics Handbook
陈建业等译

I 电... II 拉...②陈... III 电力电子学 原技术手册 IV 电工学

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第 100000 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:孙流芳 王 玫 版式设计:冉晓华 责任校对:吴美英 张莉娟

封面设计:陈 沛 责任印制:闫 焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 10 月第 1 版·第 1 次印刷

开本: 16 开 印张: 16 插页: 0 字数: 400 千字

印数: 1000 册

定价: 25.00 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) 68995101 质量投诉电话

封面防伪标均为盗版

译者前言

电力电子技术是以电能的变换和控制为目的的电子技术。近 100 年来，随着半导体集成技术和高压大电流的电力电子器件的迅速发展，以及两者的结合，使得电力电子技术的应用领域不断地扩展，从家用电器到高压直流输电，渗入到人民生活 and 国民经济的各个领域。因此熟悉和掌握电力电子技术成为现代电气技术人员的一个基本要求。

《电力电子技术手册》一书是由多位国际知名专家联合编写的，该书通过精心的选材和组织，对涵盖电力电子技术各个学科的传统课题和最新发展进行了全面的介绍，为电力电子技术领域的在校学生和专业人员提供了一本极好的参考书。

本书由清华大学电机系陈建业、于歆杰，美国 德州仪器公司杨德刚，中国科学院自动化所梁自泽和赵伟青合译。其中，第 1-5 章由赵伟青翻译，第 6-10 章由杨德刚翻译，第 11-15 章由梁自泽翻译，于歆杰翻译了第 16-18 章及第 19 章；其余由陈建业翻译。

本书由陈建业进行了整理和统一。本书翻译过程中一直得到了赵良炳教授的关心和指导，在此表示衷心地感谢。同时还要感谢机械工业出版社，特别是孙流芳老师和王玫编辑对出版此书给予的热情支持和帮助，感谢所有有关人员为本书出版付出的辛勤劳动。

由于本书涉及电力电子技术的各个领域，内容十分丰富，而我们水平有限，所以书中难免存在错译和误译的地方，希望得到读者的指正。

译者于清华园

1998 年 6 月

序 言

简介

编写《电力电子技术手册》的目的是为工学院学生和业内人士提供一个简明而有效的参考。本书力图用精心的组织和充分的信息对覆盖电力电子广泛的研究领域进行介绍。手册既融合了传统的话题又介绍了新的进展，其中对于实际应用给予了特别的关注。这使得本手册并非一本理论书籍，而是对迅速发展的电力电子技术的一个非常具有启发性的导论。书中的内容从本质上讲是综述性的，目的是提高本书对读者的价值，并促进读者对这些内容有一个清晰的了解。

本手册的撰写人员遍及全球，包括来自 100 多个不同国家的多位作者，其中有些是该专业领域的权威人士。作者的选择是基于他们对相应主题的熟悉程度。撰写人员的贡献使得这本手册成为对发展中的电力电子技术的最新技术水平的一个全面的介绍，其内容包含以下应用领域：

- 用于进行整流、逆变、变频和斩波等电力变换的现代电力电子器件的特性；
- 对于不同类型电力变流器的运行、分析和设计的基本原理和深入研究；
- 电力电子技术最新的应用实例。

电力电子技术的背景

第一次电子技术革命起源于 1876 年贝尔电话实验室的贝尔、斯通和 杂波等发明硅晶体管。绝大多数当代电子技术的进展都可以追溯到那次发明。现代微电子学这些年来的进展就源自对硅半导体的研究。第二次电子技术革命起源于 1906 年通用电气公司开发出商用晶闸管。这标志着电力电子技术的一个新的世纪的到来。此后，开发出了许多不同的电力电子装置和变换技术。

对于能源（尤其是电能）的需求，随着人们生活质量的提高始终在增长。电力电子技术有利于电能的有效利用，从而降低电能损耗。半导体装置作为开关用于电能变换和处理，使得固态电子技术成为对电力和能量流动的有效控制手段。从微波炉到高压直流输电等应用领域都力图寻找高效低损耗的装置。新的器件和新的电力电子系统不断地得到发展，以对电力和能量进行更为有效的控制。

电力电子技术已经成为现代技术中重要的组成部分，并对电力和能量的控制起到了革命性的贡献。随着电压、电流等级不断提高和电力半导体装置开关特性的不断改进，其应用领域也得以不断拓展，从照明控制、运动控制中的电能供应、工厂自动化、运输、能量存储、兆瓦级的工业驱动和电能的传输与分配，电力电子技术的高效率和强控制能力使其成为在运动控制领域中早期机电和电子系统的具有吸引力的替代品。在输电领域的应用，包括高压直流（HVDC）换流站、柔性交流输电系统（FACTS）和静止无功补偿器。在配电领域的应用包括整流变换、动态滤波

器、频率转换和用户电力系统。

从家用空调和计算机电源到工业电动机控制，几乎所有电气和机电设备都包含电力电子电路和系统。为了跟上时代的发展，在应用领域从事容量从几百伏电压和电流为若干分之一安培的显示设备到约 1000 kV 高压直流输电等方面的电力和能量的控制与转换的应用工程师，应该对电力电子技术有适当的了解。

本书的编排

本手册首先是引言，随后的内容涵盖了电力电子器件、电力变流器、应用和外围设备等问题。本书分为 7 个部分。第一部分包括了对电力电子器件的作用和特性进行介绍的章节。这些电力电子器件包括电力二极管、晶闸管、门极关断 (GTO) 晶闸管、电力双极晶体管 (BJT)、电力 MOSFET、绝缘栅双极型晶体管、IGBT 控制晶闸管 (IGCT) 和静电感应器件。

其他的部分包括不同类型的电力变流器，电力变流器的运行原理和分析与设计方法。此外还包括电力变流器的门极驱动电路和控制方法。随后的 3 章覆盖了在电源、电子镇流器、可再生能源、电网输电、无功补偿器和电容充电方面的应用。

其后的 2 章介绍电动机传动和汽车系统的运行、原理和控制方法。然后用两章介绍电能质量问题和有源滤波器，再有两章介绍计算机仿真、组件和智能电源系统。

查找你关心的话题

本书每章的开始给出了本章的目录。读者可以通过查看目录以增进对本书结构、编排和内容的了解。

读者

本手册的目的是给学生和从业工程师提供广泛的电力电子技术领域中所遇到问题的答案。本书可以用作电气或系统工程专业研究生的教材，也可用作高年级本科生的参考书，还可为那些对电力电子装置和电机传动系统的运行、项目管理、设计与分析感兴趣的工程技术人员提供参考。

致谢

来自世界各地的作者的专业水平和奉献精神使得本手册得以实现。我本人非常感谢包括机械工业出版社在内的学术出版社出版本书的相关人员。另外，对本书的执行编辑刘国治致以特别谢意。

最后我要向我的夫人王琳表示深深的感谢。她无私的支持使本书的出版成为可能。

目 录

译者前言

序言

第 1 章 导 论

1.1 电力电子技术的定义	1
1.2 主要特点	1
1.3 电源的发展趋势	2
1.4 变换例子	2
1.5 分析和设计工具	2
1.6 小结	2

第 2 章 电力二极管

2.1 作开关使用的二极管	3
2.2 二极管的一些特性	3
2.3 通用二极管的类型	3
2.4 二极管的典型定额	3
2.5 二极管吸收电路	3
2.6 电力二极管的串并联	3
2.7 二极管的典型应用	3
2.8 选择二极管的标准参数表	3

第 3 章 晶 闸 管

3.1 引言	4
3.2 基本结构和工作原理	4
3.3 静态特性	4
3.4 动态特性	4
3.5 晶闸管参数	4
3.6 晶闸管类型	4
3.7 门极驱动的要求	4
3.8 晶闸管模型	4
3.9 应用	4

第 4 章 门极关断晶闸管

4.1 引言	5
4.2 基本结构和工作原理	5

4.3 晶闸管的晶闸管模型	5
4.4 静态特性	5
4.5 转换过程	5
4.6 晶闸管中的晶闸管模型	5
4.7 应用	5

第 5 章 电力双极型晶体管

5.1 引言	6
5.2 基本结构和工作原理	6
5.3 静态特性	6
5.4 动态特性	6
5.5 晶体管的基极驱动电路	6
5.6 双极型晶体管的 SPICE 仿真	6
5.7 晶体管的应用	6

第 6 章 电力场效应晶体管

6.1 引言	7
6.2 电力电子电路中的开关转换	7
6.3 一般开关特性	7
6.4 电力场效应晶体管	7
6.5 电力场效应晶体管的结构	7
6.6 电力场效应晶体管的工作区	7
6.7 场效应晶体管的 SPICE 模型	7
6.8 电力电子器件的比较	7
6.9 电力电子器件的未来发展方向	7

第 7 章 绝缘栅双极型晶体管

7.1 引言	8
7.2 基本结构和工作原理	8
7.3 静态特性	8
7.4 动态特性	8
7.5 绝缘栅的性能参数	8
7.6 栅极驱动要求	8

电路模型.....	源
应用.....	源

第 愿章 酝券控制晶闸管

引言.....	源
等效电路和开关特性.....	源
酝券和其他电力电子器件的比较.....	源
酝券的门极驱动.....	源
酝券的保护.....	源
酝券的仿真模型.....	源
第一代和第二代 酝券.....	源
晕沟道 酝券.....	源
基区电阻可控晶闸管.....	源
酝券关断晶闸管.....	源
酝券的应用.....	源
小结.....	源
附录.....	源

第 愿章 静电感应器件

引言.....	源
静电感应器件理论.....	源
杂质的特性.....	源
杂质器件的双极模式运行 (月载).....	源
静电感应器件的射极.....	源
静电感应二极管 (杂质).....	源
横向穿通晶体管 (蕴栽).....	源
静电感应晶体管逻辑 (杂载) 电路.....	源
由 杂质防止 月饱和.....	源
静电感应 酝券晶体管 (杂暗券).....	源
空间电荷限制负载 (杂蕴).....	源
电力 酝券晶体管.....	源
静电感应晶闸管.....	源
门极关断 (载韵) 晶闸管.....	源

第 愿章 二极管整流器

引言.....	源
单相二极管整流器.....	源
三相二极管整流器.....	源
多相二极管整流器.....	源
整流器中的滤波系统.....	源
高频二极管整流器电路.....	源

第 愿章 单相可控整流器

线路换相单相可控整流器.....	源
单位功率因数单相整流器.....	源

第 愿章 三相可控整流器

引言.....	源
线路换相可控整流器.....	源
强迫换相三相可控整流器.....	源

第 愿章 阅潮阅兑变换器

引言.....	源
阅潮阅兑器.....	源
降压 (月载) 变换器.....	源
升压 (月载) 变换器.....	源
月载阅兑变换器.....	源
库克变换器.....	源
寄生参数的影响.....	源
同步变换器和双向变换器.....	源
控制原理.....	源
阅潮阅兑变换器的应用.....	源

第 愿章 逆变器

引言.....	源
单相电压源逆变器.....	源
三相电压源逆变器.....	源
电流源逆变器 (悦载).....	源
逆变器的闭环运行.....	源
逆变器中的再生.....	源
多重化逆变器.....	源

第 愿章 谐振与软开关变换器

引言.....	源
分类.....	源
谐振开关.....	源
准谐振变换器 (匝韵兑).....	源
在杂在高频领域的应用.....	源
多谐振变换器 (酝韵兑).....	源
零电压转换变换器 (在栽).....	源
无耗散有源钳位网络.....	源
负载谐振变换器.....	源

员源园	谐振变换器的控制电路	员源园
员源员	扩展周期准谐振变换器(耘云云云)	员源员
员源圆	软开关和电磁干扰的抑制	员源圆
员源猿	大功率装置的缓冲器与软开关	员源猿
员源源	软开关 阅渊渊渊电力逆变器	员源源

第 员章 粤渊渊渊变换器

员源员	引言	员源员
员源圆	单相 粤渊渊渊电压控制器	员源圆
员源猿	三相 粤渊渊渊电压控制器	员源猿
员源源	周波变流器	员源源
员源缘	矩阵变换器(酝允)	员源缘
员源远	粤渊渊渊变换器的应用	员源远

第 员章 阅渊渊渊变换器技术和 怨个系列的罗氏变换器

员源员	引言	员源员
员源圆	正输出罗氏变换器	员源圆
员源猿	负输出罗氏变换器	员源猿
员源源	双输出罗氏变换器	员源源
员源缘	多象限运行的罗氏变换器	员源缘
员源远	开关电容多象限罗氏变换器	员源远
员源苑	开关电感多象限罗氏变换器	员源苑
员源愿	多象限 在允准谐振罗氏变换器	员源愿
员源怨	多象限 在允准谐振罗氏变换器	员源怨
员源园	同步整流 阅渊渊渊罗氏变换器	员源园
员源员	门控, 罗氏谐振器	员源员
员源圆	应用	员源圆

第 员章 门极驱动电路

员源员	引言	员源员
员源圆	晶闸管的门极要求	员源圆
员源猿	晶闸管门极触发电路	员源猿
员源源	简单的晶闸管门极触发电路	员源源
员源缘	可关断器件的驱动器	员源缘
员源远	一些实际的驱动电路	员源远

第 员章 电力变换器控制方法

员源员	引言	员源员
员源圆	利用状态空间模型的电力变换器控制	员源圆

员源猿	电力变换器的滑模控制	员源猿
员源源	电力变换器的模糊逻辑控制	员源源
员源缘	小结	员源缘

第 员章 电 源

员源员	引言	员源员
员源圆	线性串联稳压器	员源圆
员源猿	线性并联稳压器	员源猿
员源源	集成稳压器	员源源
员源缘	开关型稳压器	员源缘

第 员章 电子镇流器

员源员	引言	员源员
员源圆	放电灯的高频供电	员源圆
员源猿	放电灯建模	员源猿
员源源	电子镇流器用谐振逆变器	员源源
员源缘	高功率因数电子镇流器	员源缘
员源远	应用	员源远

第 员章 电力电子技术在电容器充电中的应用

员源员	引言	员源员
员源圆	带充电电阻器的高压直流电源	员源圆
员源猿	谐振充电	员源猿
员源源	开关变换器	员源源

第 员章 电力电子技术在可再生能源中的应用

员源员	引言	员源员
员源圆	电力电子技术在光电电力系统中的应用	员源圆
员源猿	电力电子技术在风力电力系统中的应用	员源猿

第 员章 高压直流(匀允渊渊输电

员源员	引言	员源员
员源圆	匀允渊渊换流站的主要元件	员源圆
员源猿	换流桥分析	员源猿
员源源	控制与保护	员源源
员源缘	酝允渊渊运行	员源缘
员源远	应用	员源远

缘范	现代趋势	缘范	缘范	转矩控制传动系统的基本类型：矢量控制、直接转矩控制	缘范
缘范	匀加速系统仿真技术	缘范	缘范	基于德克萨斯仪器公司 阙孕的运动控制	缘范
缘范	小结	缘源	缘源		
	第 缘章 多电平变换器和无功补偿			第 缘章 基于人工智能的传动	
缘范	引言	缘范	缘范	基于人工智能的技术应用简介	缘范
缘范	无功功率现象及其补偿	缘范	缘范	基于人工智能的技术	缘范
缘范	先进静止无功补偿器 (粤灾) 的建模与分析	缘范	缘范	人工智能在电动机和传动方面的应用	缘范
缘范	静止无功补偿器用于提高涡轮交流发电机的稳定性	缘范	缘范	人工智能在传动方面的工业应用	缘范
缘范	多电平逆变器	缘范	缘范	基于神经网络的速度估计器应用	缘范
缘范	三电平逆变器的谐波消除方法	缘范		第 猿章 电气传动中的模糊逻辑	
缘范	与电网连接的三电平 粤灾结构	缘源	猿范	引言	缘范
	第 缘章 传动类型与规范		猿范	模糊逻辑概念	缘范
缘范	概述	缘范	猿范	模糊逻辑在电气传动中的应用	缘范
缘范	传动系统的要求和规范	缘范	猿范	硬件系统描述	缘范
缘范	传动系统的分类和特性	缘范	猿范	小结	缘范
缘范	负载的类型和特性	缘范		第 猿章 电力电子技术在汽车中的应用	
缘范	变速传动系统的拓扑	缘范	猿范	引言	缘范
缘范	脉宽调制 (孕灾) 电压源逆变器 (灾) 传动	缘范	猿范	现在的汽车电源系统	缘范
缘范	应用	缘范	猿范	系统环境	缘范
缘范	小结	缘范	猿范	电力电子技术提供的功能	缘范
	第 缘章 电动机传动		猿范	采用多路复用技术的负载控制	缘范
缘范	引言	缘范	猿范	机电能量转换	缘范
缘范	直流电动机传动	缘范	猿范	双 轱电压汽车电气系统	缘范
缘范	异步电动机传动	缘范	猿范	电气和混合电动汽车	缘范
缘范	同步电动机传动	缘范	猿范	小结	缘范
缘范	永磁交流同步电动机传动	缘范		第 猿章 电能质量	
缘范	永磁无刷直流 (孕灾) 电动机传动	缘范	猿范	引言	缘范
缘范	伺服传动	缘范	猿范	电能质量	缘范
缘范	步进电动机传动	缘范	猿范	无功功率和谐波补偿	缘范
缘范	开关磁阻电动机传动	缘范	猿范	国际标准	缘范
缘范	同步磁阻电动机传动	缘范	猿范	小结	缘范
	第 缘章 传动系统的无传感器矢量控制和直接转矩控制			第 猿章 有源滤波器	
缘范	引言	缘范	猿范	引言	缘范
			猿范	有源电力滤波器的类型	缘范

猿猿猿	并联有源电力滤波器	猿猿猿
猿猿猿	串联有源电力滤波器	猿猿猿

第 猿猿章 电力电子技术和电动机传动系统的计算机仿真

猿猿猿	引言	猿猿猿
猿猿猿	利用计算机仿真工具进行设计和分析	猿猿猿
猿猿猿	利用 猿猿猿 对电力电子电路进行仿真	猿猿猿
猿猿猿	电力电子电路和电机的仿真	猿猿猿
猿猿猿	采用磁场定向(矢量)控制的异步电动机的仿真	猿猿猿
猿猿猿	利用 猿猿猿 进行无传感器矢量	

	控制系统的仿真	猿猿猿
猿猿猿	利用 猿猿猿 进行仿真	猿猿猿
猿猿猿	小结	猿猿猿

第 猿猿章 组装和智能电源

猿猿猿	引言	猿猿猿
猿猿猿	背景	猿猿猿
猿猿猿	功能集成	猿猿猿
猿猿猿	电路划分技术的评估	猿猿猿
猿猿猿	全价模型	猿猿猿
猿猿猿	电路划分方法	猿猿猿
猿猿猿	猿猿猿 电动机传动系统设计实例	猿猿猿

英汉术语对照

第

1

章

导 论

作者 李金波 邓志

目 录

电力电子技术的定义	圆	开关矩阵	远
主要特点	圆	基尔霍夫电压、电流定律的含义	苑
效率的目标：开关工作方式	圆	硬件的解决方案：半导体器件	愿
可靠性目标：简单化和集成化	猿	软件解决方案：开关函数	园
电源的发展趋势	猿	接口解决方案：无损滤波器的 设计	赧
变换例子	源	小结	赧
单开关电路	源	参考文献	赧
能量平衡的方法	缘		
分析和设计工具	远		

圆 电力电子技术的定义^①

人们常常认为，它们并不直接使用电，而是更多地通过直接利用通信设备、照明设备、机械加工、参加娱乐活动来获取电能和电子设备给我们所带来的一切实质性的好处。从这种意义上讲，电气工程是一门大量涉及能量转换和信息处理的学科。在一般电子工程界，电路工程师们设计和应用的目的，在大多数情况下，首先是信息的传输，其次才考虑能量问题。在模拟和数字电路的设计中，这的确是事实。在无线电应用领域中，有时能量和信息是同样重要的，但电路的主要功能仍然是信息的转换。

电能的变换和控制是怎么一回事呢？电能源的种类是多样的，形式也是不同的。因此，很自然地就要考虑到电子电路和系统是如何适应电能的转换和管理这一难题。而电力电子这门学科是依照电能的变换、应用以及电子器件来定义的。更准确地说，电力电子技术是由下列定义的。

定义：电力电子技术是研究用于控制（电）能量流动的电子电路，而且这些电路处理功率流的能力要比单个器件的功率定额大得多。

整流器大概是人们最熟悉的一个符合上述定义的例子。用于电源设备中的逆变器（阅读图1-1-1变换器的总称）和阅读图1-1-2变换器也是一些很普通的应用例子。正如图1-1-3所示，电力电子技术处于该图的中心位置，在其周围汇聚着涉及能量系统、应用和控制这些方面的课题^②。实现功率控制的任何一种实用电路都必须涉及器件和控制的有关问题，除此之外，能量本身问题也需加以考虑。在电力电子技术所特有的诸多方面中，应着

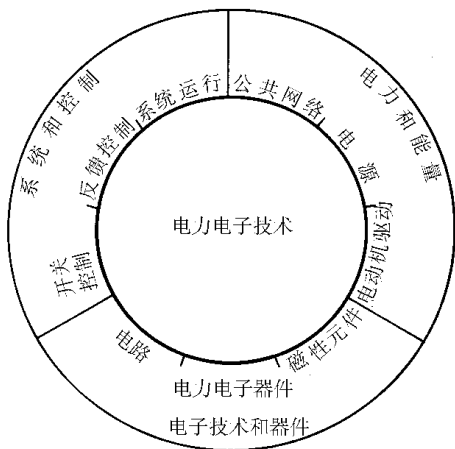


图 1-1-3 控制、能量、电力电子技术之间的相互关系

重考虑的是，大量的器件问题、储能用的磁性元件的应用问题以及必须适合于非线性系统的专用控制方法。在涉及到电气工程研究时，只要我们考虑到电力电子技术与众不同的设计方法以及面临的极大挑战，那么电力电子技术必将同数字、模拟和无线电电子技术处于同等重要的地位。

电力电子技术的历史是同具有大功率处理能力的电子器件的进步紧密相连的^③。不过在过去的 60 年里，发生了从“器件策动”向“应用策动”方面的转变。这种转变取决于下列两个因素：一是存在满足几乎所有应用要求所需的相适应的功率定额的半导体器件；二是小型化的普遍推广带动了电力电子产品种类的不断增多。

圆 主要特点

所有电力电子电路都是用来管理某种电源与负载之间电能的流动。电路的作用必须使电能按一定方向流动，而不是阻碍其流动。图 1-1-4 给出了一般功率变换系统的框图。处于框图中间位置的电力变换器的功能就是用来控制给定电源与给定负载之间的能量流动。此外，电力变换器是用电力电子电路来实现的。对于整个系统来说，通过电力变换器的能量必有一部分损失。这样一来，一个极端重要的问题就被提出来了，即为了制造一个电力变换器，要使实际变换器的设计效率接近 100%，那么我们不能只考虑使用无损元件。

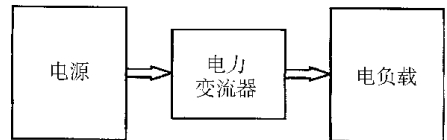


图 1-1-4 电功率变换的通用系统（来自参考文献 [圆]，牛津大学出版社 1985 年版权，允许引用）

连接电源和负载的电力变换器影响着系统的可靠性。如果能源是完全可靠的（在整个运行期间），那么变换器的故障就影响到用户（负载），正如同能源故障一样。一个不可靠的变换器就会产生一个不可靠的系统。用这种观点来考虑问题，在一个典型的美国家庭里，一年只停电几分钟的话，那么电能利用率就是 99.9999%。若要防止系统的故障，则要求变换器具有更高的可靠性。一个理想的变换装置在它所允许的使用寿命之内是不会发生故障的。因此在很多情况下，要做到极高的可靠性比高效率困难得多。

圆 效率的目标：开关工作方式

电路中的器件简单得就像是一个灯开关。这就提醒我们，

① 悦康编著。《圆 电力电子技术》。北京：机械工业出版社，2008 年。② 悦康编著。《圆 电力电子技术》。北京：机械工业出版社，2008 年。③ 悦康编著。《圆 电力电子技术》。北京：机械工业出版社，2008 年。

电力电子技术要达到的目的并不是新奇的。从理论上讲，理想开关在接通的状态下，它的电压降应是零，同时流过电流。而在关断状态下电流被截断，而不管其上电压的高低。开关器件的功率损耗等于在开关转换过程中电流和电压的乘积，在理想情况下应全为零，也就是说控制能量流动时是无损的。此外，这种情况下的可靠性也是很高的。民用电灯开关可使用几十年，大约可连续开关 10^6 次。可它仍不能满足所有实际的需要。开关电源中所用的开关器件经常每一秒钟要开关 10^4 次。就连最好的机械开关也经不住超过几百万次的操作，然而半导体开关器件（没有机械寿命限制）却是电力变换器可选择的理想器件。

由理想开关构成的电路是没有损耗的。因此开关器件是电力变换器中的主要元件，而且很多人认为，研究功率变换器主要是研究开关式功率变换器。此外磁性变压器、无损储能元件如电感和电容都可在电力变换器中使用。图 1-1 给出一个完美的电力电子系统基本原理图。它由电源、负载、电力电子电路以及控制电路组成。电力电子电路包括了开关器件、无损储能元件、磁性变压器等。控制器从电源、负载和设计要那里得到所需的信息，然后决定如何操作开关，以完成所希望的变换。而控制器一般由小功率数字和模拟电路构成。

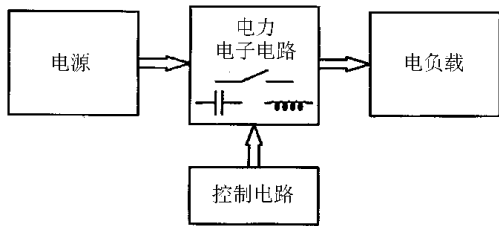


图 1-1 基本的电力电子系统（同图 1-1 说明）

开关器件的选择主要依据它的功率处理定额——额定电流和电压的乘积，而不是额定功率损耗。这和其他电子技术应用有所不同，在那儿额定功率损耗是被优先考虑的。例如：一个典型立体声录音机，完成从交流输入到音频输出。这时大部分音频放大器不使用电力电子技术，电力电子器件也不作开关使用。对于商用 100W 的音频放大器，在设计时要选一个足以耗散最大为 100W 功率的晶体管。这时的半导体器件首先是用来重构信号，而不是用来控制能量流动的。然而当作为开关使用时，它的输出功率将大大提高，正如下面的例子所示。

【例 1-1】 $2N2148$ 是普通双极型晶体管，其耐压为 100V ，最大集电极电流为 1A ，额定耗散功率为 1W 。在传统的模拟电路中，它的能量控制范围为 100W 。原则上，这个器件可以在 100V 的电路处理 1A 的电流，因此电力电子工程师认为，它的功率处理定额为 100W 。而 1W 的功率控制能力与良好的开关特性相结合，使得这种器件成为电源设备中一个常用的辅助元件。

【例 1-2】 $2N6901$ 是一种金属氧化物半导体场效应晶

体管 [有源器件]，其漏极电流定额为 1A ，耐压为 100V ，额定耗散功率为 1W 。因此它的额定功率处理能力为 100W 。一些生产商利用这种器件开发出用于电冰箱、空调，甚至电动车的电力电子控制器。

在 1-1 节中的电力电子定义的第二部分指出，电路所能处理的功率要比单个器件定额大得多。在第一个例子中，可以利用 100W 来处理 100W 的电路，然而单个器件的定额只有 1W 。在第二个例子中，可以利用 100W 使电路的处理能力达到 100W 。而它的器件本身的定额只有 1W 。它们各自的比值是很大的，分别是 100 倍和 100 倍。从电力电子领域来看，这是很正常的。相比之下，在传统音频放大器中，器件的电路处理功率与其耗散功率定额之比接近 1

1-2 可靠性目标：简单化和集成化

大功率应用将引出一些重要的问题。例如，逆变器中的半导体器件的功率处理定额通常为功耗定额的 100 倍或更高。一个很小的设计错误、意想不到的热问题或电路布局的微小改动，可能只会使功率处理定额变化一些，比如约为器件自身功耗定额的 100 倍。然而，这种小变化就会在器件上产生很大的附加应力，并很快烧毁。所以电力电子电路可靠性的第一个问题是如何控制器件的电压、电流、功率损耗不超过它的定额极限。然而，在高的功率处理容量条件下，这可能是一个困难的问题。

可靠性的第二个问题是简单化问题。系统中元器件越多，就越容易引起系统的故障。这一原则在军用电子设备中已经很好地建立起来。电力电子技术也是朝这种简单化的方向发展，尤其是在主功率回路上。为此，人们必须在严格的应用这些元器件方面下工夫。通常，这也意味着应将精确的控制策略应用于似乎简单的变换电路中。

可靠性的第三个问题是集成化问题。解决可靠性和复杂性矛盾的一种办法是在一个基片上集成大量元器件和多种功能。例如，微处理器中集成了 10^6 多个门电路，同时它们之间的所有连线和信号的流动也都在一个基片内完成，所以它的可靠性几乎和单个器件的一样。与此同时，电力电子器件的一个重要发展就是集成模块 [2]。现在制造商已找到一种方法——将开关器件、保护电路以及它们之间的连线封装在一起，成为一个单元。变换器的控制电路也集成化，以便尽可能地保持电路的高可靠性。然而，这又引出了可靠性的第四个问题——封装本身的问题，而且对此至今只有部分的了解。首先封装在模块内部的细引线对温度很敏感，也易于受到振动而损坏；其次，由于几何尺寸的减小，使得内部电路元器件之间的电磁干扰更加严重。

1-3 电源的发展趋势

由于电子设备价格的下滑，所以电源的成本已占据了系统