

张为佐 著

与时俱进的电力电子



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



与时俱进的电力电子

张为佐 著



机械工业出版社

张为佐先生是我国著名的电力电子技术和功率半导体专家，长期从事功率半导体器件的研究开发工作，是我国功率半导体器件的开拓者和创始人之一。本书是张为佐先生近三十年的讲稿的整理。书中论述了世界功率半导体器件的历史进程、发展趋势和发达国家发展动态，尤其在全球经济一体化浪潮猛烈冲击、新经济理念不断深入、高新技术发展非常迅速、国际竞争异常激烈的年代，本书中提供的信息和论点，对思考我国电力电子技术和功率半导体器件的发展战略，把握自身发展机遇，努力实现我国电力电子技术发展是十分有益的。

本书可供从事电力电子技术的工程技术人员阅读，也可供大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

与时俱进的电力电子/张为佐著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 10
ISBN 978-7-111-25345-7

I. 与… II. 张… III. 半导体器件 IV. TN303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 160424 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: 牛新国 责任编辑: 王 欢

封面设计: 姚 毅 责任印制: 王书来

北京双青印刷厂印刷

2008 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 9.5 印张 · 4 插页 · 169 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-25345-7

定价: 40.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379178

封面无防伪标均为盗版

序 一

陈治明

自晶闸管以可控硅的名字问世以来,电力电子技术的发展已经走过了半个世纪的漫长路程。在最初的二十来年里,晶闸管及其家族的各种大功率开关作为主要的电力电子器件推动着大功率电力控制技术的发展。最近二十多年来,随着各种新结构器件和新材料器件的不断涌现,电力电子技术迈入不断创新、长足发展的成熟期,其应用从以工业应用为主拓展到同时服务于信息技术、家用电器、交通运输以及航空航天等多种领域,进入了在本专集中一再提到的4C时代。

张为佐教授的这本新专集,集中反映了电力电子技术在这个应用拓展时期的主要成就,重点介绍了集电力电子技术与微电子技术之大成为一体的电力IC,以及因为电力IC越来越广泛的应用而使电力电子技术获得的长足发展和沧桑巨变。作者对电源管理和电源管理半导体这一当前流行术语的介绍和诠释,尤其有助于我们加深对电力电子技术新的发展方向和电力电子技术新的学术内涵的理解,促使我们对电力电子技术的发展前沿给予更多的关注。在各种高新技术蓬勃发展的今天,一切新技术、新产品都离不开“量身定制”的新电源。这些新电源除了需要各种类型的功率开关器件以外,还需要各种新型IC来参与电源的管理,从而为现代电力电子技术的发展提供了强大的新动力。因此,电力电子技术虽已发展多年,由于不断有这样一些新问题的提出和解决,不断有创新思维和创新技术的涌现,它依然是一种领跑于时代前列的新技术。

我与为佐教授交往三十余年,十分钦佩他终生保持同电力电子技术与时俱进的旺盛精力和热情,折服于他对电力电子领域新成果、新进展的敏锐观察力。作家冯骥才曾在其一篇短文中写过:“最积极和充实的人生,是不断努力地把句号变为逗号”。为佐教授正是以这种“拒绝句号”的精神,执着地爱恋着他情有独钟的电力电子事业,死而后已地履行着他在中国电力电子技术领域的先行者职责。

哭为佐调寄《金缕曲》

为佐君怎走？卅三年，相交如水，殷勤师友。中间测试承教诲，笑貌音容依旧。最难忘，抚琴佐酒。青岛促膝忆旧事，聚洛城，只缘惜别久。险误机，君记否？

清泪一掬送君走。更那堪，心意未平，又添僝僽。好将户籍转天国，留取心魂长守。只路遥，音问难候。从此来去无时差，惟音乐物理任君受。云飞处，惊雷吼。

陈治明：原西安理工大学校长，中国电工技术学会电力电子学会副理事长

序 二

徐南屏

电力电子技术与微电子技术作为现代电子技术两个重要分支,其基础都是半导体技术,四十多年的迅速发展,两种技术相互渗透、相互影响,现今电力电子技术已与微电子技术紧密结合,相互依托,共同发展,由此产生了全新的电力电子学概念。本书作者的多篇论文详细叙述了四十多年来我国电力电子技术发展历程和主要技术发展情况,展示了我国电力电子行业半导体器件发展的成就,全面阐述了功率半导体器件从 20 世纪 50 年代开始相继产生整流二极管、晶体管、晶闸管等为代表的功率半导体器件;进入 70 年代 IC、微处理 (Microprocessor) 飞速发展的同时,自关断器件以 GTO、大功率晶体管、功率 MOSFET 为代表的功率半导体器件陆续诞生并进入商品化阶段;从而在 80 年代至 90 年代机器人获得了快速发展并普遍使用;在 90 年代初,传统功率半导体器件与微电子技术的结合,生产出用途更宽广的 IGBT,无论在中功率、大功率,还是在中、高频应用,绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 以其独特的魅力和无可替代作用获得空前发展,有人称当今的时代是 IGBT 时代。

作者在本书中论述了世界功率半导体器件发展趋势和发达国家发展动态,尤其在全球经济一体化浪潮猛烈冲击、新经济理念不断深入、高新技术发展非常迅速、国际竞争异常激烈的年代,作者在本书中提供的信息和论点,对思考我国电力电子技术和功率半导体器件的发展战略,按照中央“有所为有所不为”的方针,把握自身发展机遇,努力实现我国电力电子技术的发展是十分有益的。

刚刚迈入 21 世纪,信息技术作为全球发展五大主导技术之一,电力电子技术与信息技术的战略关系,功率半导体器件作为电力电子技术基础的发展方向是至关重要的,作者对此提出了颇有见解的思路。

作者是我国著名的电力电子技术和功率半导体专家,长期从事功率半导体器件的研究开发工作,是我国功率半导体器件的开拓者和创始人之一。20 世纪 50 年代至 80 年代在国内著名研究所工作期间曾取得许多重大科研成果,

先后在发展晶体管、晶闸管、双向晶闸管等功率半导体器件上做了开创性的工作，学术造诣很深。在“电力电子技术”杂志和国内、国际性学术会议上发表许多学术论文。90年代初至今一直在美国国际整流器公司（IR）从事功率半导体器件的开发工作，参与公司在全世界发展战略实施和市场技术支持。

本书论文涉及内容十分广泛，技术内涵深刻，既有功率半导体器件在我国发展的回顾，又有全球最新技术和器件的发展情况以及发展趋势的预测，尤其对当今进入新世纪的信息时代，电力电子技术要把握发展方向，作者提出了很有时代气息的论点。因此，本书很值得广大科技人员、学者以及有关专业学生阅读参考，而且对从事电力电子产业发展的各级领导把握发展战略是一本十分有益的工具书。

张为佐先生永远离开了我们，他的一生，为电力电子技术做出了重要贡献，奋斗终身。在近十多年里，他频繁地奔走于中国、美国之间，传递着国际最新发展信息和动态，并不遗余力地为推动我国相关技术进步和应用出力。他在最后岁月里，虽病魔缠身，但他仍以极大热忱和精力工作着，生命不止、奋斗不息，这是我国老一代科技工作者难能可贵的精神所在。我们应该怀念他，纪念他。本书出版是大家对他永久的纪念。

徐南屏：原西安电力电子技术研究所所长，原中国电工技术学会电力电子学会理事长

序 三

丁道宏

1958年第一个晶闸管的问世，带来了电力电子学的革命，随后出现了大发展，并产生若干衍生器件，形成了晶闸管家族。20世纪70年代中期，门极关断晶闸管、大功率晶体管相继出现，使兆瓦级功率的逆变电源制造简化，工作频率和效率提高而体积减小。80年代及其以后出现的MOS结构输入的功率器件，开关频率更高，更有利于减小装置体积和重量。MOS结构功率器件的诞生，使电力电子学向高频电力电子技术方向迈出了新的脚步。电力半导体器件的应用，现在已渗透到国民经济的各个领域。据美国总统科学和技术顾问委员会提出，国家关键性科技领域有七个方面：能源、环保、信息和通信、制造业、材料、交通，而每项科技中，电力电子技术（电源技术是其中的重要方面）都起到重要作用。

正当电力半导体器件和电力电子学对人民的生活产生的影响越来越大的时候，张为佐先生的著作《与时俱进的电力电子》一书正式出版了。这是电力电子与电源技术界的一件喜事。

张为佐先生，多年来一直致力于电力半导体器件的研究开发，为电力半导体器件的发展，做出了杰出的贡献。张为佐先生经历了电力电子学发展的各个阶段，他不但时时刻刻注意世界前沿的发展动态，还很关注在各个领域的应用和要求。在有关电力电子或电源技术的学术会议上，多次报告介绍电力半导体器件的最新进展和最新应用。对器件新发展深入而浅出的讲解和对应用翔实而又生动的介绍，每次报告都引起听众的极大兴趣。他的这些报告对于推动我国电力半导体器件的发展和电力电子学的应用研究，起到了历史积极作用。今天，将这些报告文章，整理编辑出版成书，从书中我们可以了解到，在我国这样一个特定的历史环境条件下，我国的电力半导体器件和电力电子学是怎样发展起来的；今天我国在推进国民经济和社会信息化这一覆盖现代化全局的战略举措的时候，我国的电力电子行业又应如何发展。在书中的有关报告中，提出了很能切中目前存在问题要害的见解。因此，本书的出版，能使读者了解电力半导体器件和电力电子学过去的发展、现在的状态

和将来的发展趋势。了解过去、认识现在、预测未来，就是为了今后能够做好我们的工作。因此，《与时俱进的电力电子》一书的出版是一件很有意义的事，并且她的影响将会是长远的。

丁道宏：南京航空航天大学教授，原中国电源学会理事长，中国电工技术学会电力电子学会副理事长

目 录

序一 陈治明	
序二 徐南屏	
序三 丁道宏	
略论电力电子学	1
电力电子学的发展前景——兼论电力电子学与节能	14
微电子技术 with 电力电子技术	22
电力电子技术的新动向	25
世界功率半导体器件发展趋势	35
功率 MOSFET 及其发展浅说	39
掌握电力电子商情，发展电力电子产品	47
电力电子技术的二十年及其未来——思考走向信息时代的电力电子学	50
功率半导体器件鸟瞰	56
电力电子与功率管理	63
现代功率半导体器件封装	65
功率管理技术的发展	74
功率半导体的发展历程及其展望	76
电力电子技术在汽车 42V 直流总线下的应用	85
全球半导体及功率半导体市场综述	92
浅谈运动控制的发展	97
从电力电子到电源管理	105
电源管理半导体的新进展	115
半导体的发展与电力电子	123
回顾电力电子发展五十年	132
作者自述	
与时俱进的电力电子——我与电力电子五十年	139

略论电力电子学

电力电子学在我国正在逐步形成和发展，而有关电力电子学概念的文献却十分分散且不够统一，因而有必要就电力电子学的形成、定义、特征、分类以及展望提出一些论点并作简要的概述。

一、电力电子学的形成

电力电子学的形成有两个关键的因素：一是汞弧变流器为变流技术提供了一定的发展基础；一是晶闸管的出现使变流技术有了根本的转折。因此，电力电子学既是当代一些新技术综合发展的结果，又具有长期的发展基础。

就发展基础而言，显然应该追溯到 20 世纪初水银整流器的出现。当时，由于电气化学及电气牵引等对直流的需要，所以水银整流器一登场，就得到了迅速的发展。特别是 20 世纪 20 年代，静止“伦纳德”（Leonard）发挥了再生制动和精密控制转速的强大威力，受到了各方面的重视，同时也奠定了变流技术初步的理论和实践基础。

20 世纪 50 年代中硅整流器出现后，在整流领域就开始取代水银整流器。而 1957 年第一个晶闸管的出现，则为电子学进入功率系统开辟了一个新纪元。毫无疑问，电力半导体器件的发展对电力电子学的形成起了关键作用。

从半导体学科来说，20 世纪 50 年代末，半导体器件向两个分支分化。从集成电路的发展形成微电子学，其应用即信息电子学。从电力半导体器件的发展和变流技术结合则形成电力电子学。最初曾被称为晶闸管电子学或固态电力电子学。

电力电子学的形成可以归纳为两个阶段。第一阶段是晶闸管和整流器逐步取代水银整流器的阶段，也可以说是电力电子学的孕育阶段。当时的技术主要是交流到直流的整流，和一些较原始的逆变技术。这一阶段的特征是晶闸管的功率（电压与电流）迅速上升，水银整流器的产量迅速下降，如图 1 所示，在 20 世纪 60 年代中期完成了取代水银整流器的过程。与此相应的，国际电工委员会第 22 分会原有汞弧变流器的专业名称已不再适用，

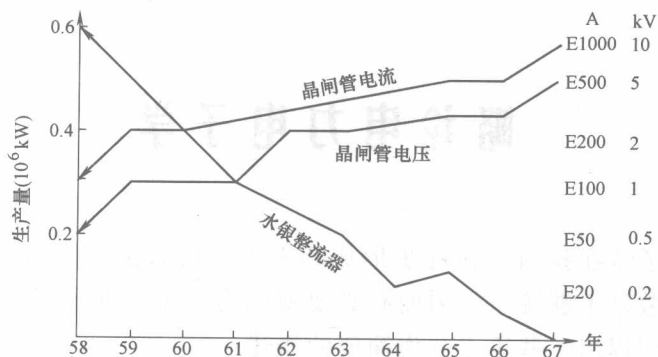


图 1

于 1966 年易名为静止电力变流器，请参看图 2。

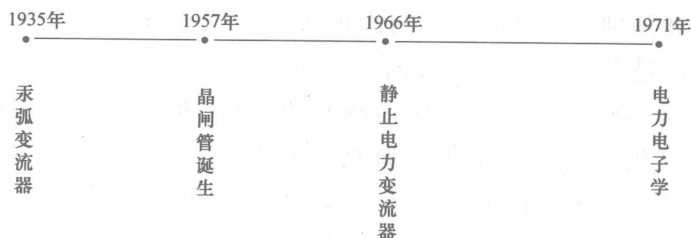


图 2

第二阶段是电力电子学形成并渐趋成熟的阶段。20 世纪 60 年代中期以后，晶闸管不仅在功率上有增长，在频率上也有很大发展。尤其是许多新型电力半导体器件不断涌现，它们以其各自不同的特长占有了各个不同的应用领域，使应用范围大为扩展。如果把电力半导体器件比喻为一棵大树，经过十余年的发展，这棵大树已根深叶茂，长出了许多分支（图 3）。与此同时，新的电力电子电路也在不断发展。例如：从直流到直流的斩波器，从交流到交流的周波换流器都逐渐开始成熟；为改善逆变后的波形，又出现了脉宽调制器（PWM）等种种新的电路。在控制部件方面，从水银整流器时代的真空管和磁放大器开始，已经出现了向第四代的变迁。如图 4 所示：50 年代后期的晶体管、60 年代后期的集成电路和 70 年代中期的微处理器。应用微计算机的直接数字控制（DDC），可以说是开辟了电力电子学的新时代，与晶体管或单结晶体管的模拟信号触发方式相比，能更精确地控制触发角，减少高次谐波的产生，和上一级计算机也能更好地配合。至此，可以说，电力电子学已进入了成熟期，它已经

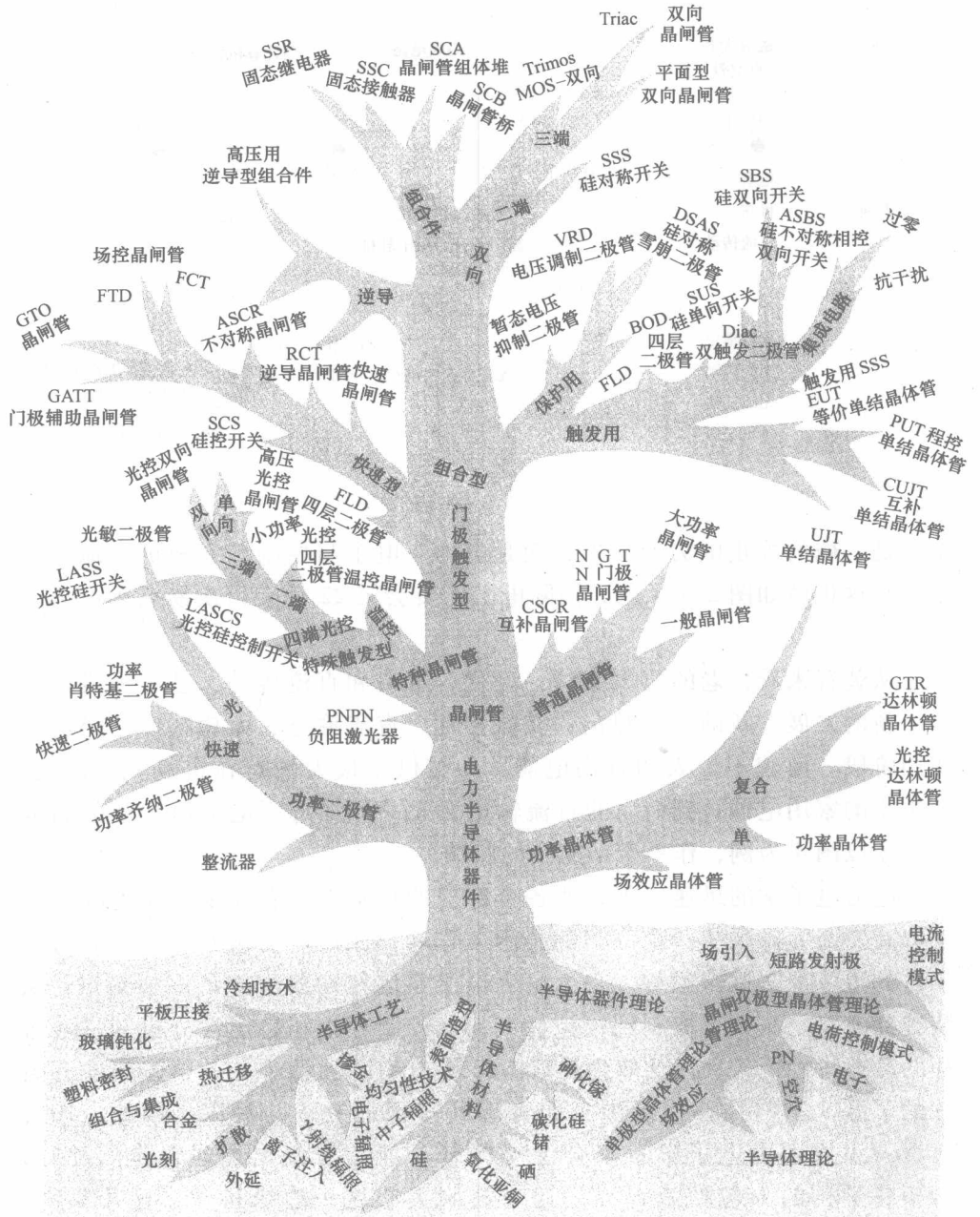


图 3

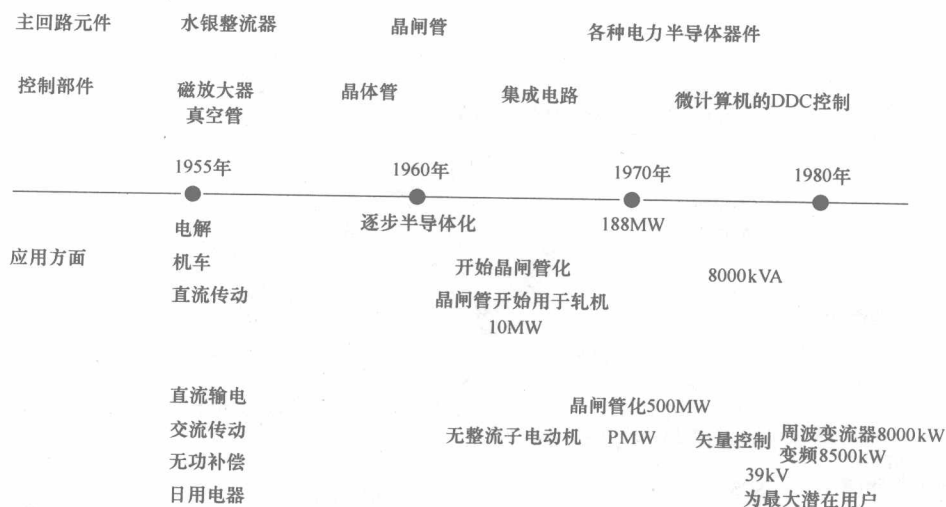


图 4

不再是一般的静止电力变流器，而是电力、电子与控制三方面更好地新的结合。这也就如图2所示的，国际电工委员会第22分会再次易名为电力电子学。

从装置来看，老的三大支柱：电化、牵引和直流传动，已更为成熟并有了新的发展。新的三大热门：交流传动、直流输电、无功补偿已经进入实用阶段。而貌不惊人的日用电器，却提供了最大的潜在市场。可以说，从小小的家用电器直到浩大的直流输电，无一不渗透了电力电子学的新成就。今以图4为例，作一个不完全的归纳。

电力电子学的迅速发展，使各个部门的技术工作者要求合作的呼声愈来愈高。因为局限在一个部门的技术工作者，往往不能包罗万象地对每个学科的边缘都掌握得很好。一个电力电子系统往往要求兼备许多知识：从装置到电路、从数字控制到模拟控制、从控制理论和稳定性分析到过渡过程的动态特性模式、从功效到热瞬态问题，并且还要求对半导体器件有足够的了解。这些往往使参加工作者感到知识的贫乏与局限。因此，1973年 Newell 在电力电子学专家会议（PESC）上，曾提出加强合作的呼吁，希望各学科的人包括教育界一起来共同关心这一边缘科学。这几年来，这些呼吁在各国得到了很大的响应，国际会议频繁召开（请参阅表1），教育部门开始注意培养人才。这些都说明电力电子学不仅形成而且已经成熟。

表 1 国际电力电子学专业及有关会议一览

	电力电子学		功率变换及自动控制			电子器件		
名称	电力电子学 专家会议	电力电子学电子半 导体及其应用会议	国际自动控制联合会电 力电子学及电传动	工业应用 学会年会 电力半导体 及变流器等	固态功率 变换 会议	国际 电子器件 会议	国际 固态器件 会议	欧洲 固态器件 研究会议
简称	PESC		IFAC	IAS	POWERCON	IEDM		ESSDERC
时间	每年 6 月 中旬			每年 9 月中旬 ~ 10 月中旬	一般为 5 月	每年 12 月 上旬	每年 8 月下旬 9 月下旬	每年 9 月 中旬
地点	美国	英国 (伦敦)	德国	美国、 加拿大	美国	美国 (华盛顿)	日本 (东京)	德国
1970	第一届			第五届		第十六届	第二届	
1971	第二届			第六届		第十七届	第三届	第一届
1972	第三届			第七届		第十八届	第四届	第二届
1973	第四届			第八届		第十九届	第五届	第三届
1974	第五届	第一届	第一届	第九届	第一届	第二十届	第六届	第四届
1975	第六届			第十届	第二届	第二十一届	第七届	第五届
1976	第七届			第十一届	第三届	第二十二届	第八届	第六届
1977	第八届	第二届	第二届	第十二届	第四届	第二十三届	第九届	第七届
1978	第九届			第十三届	第五届	第二十四届	第十届	第八届

二、电力电子学的定义

一门学科在开始形成时，往往不存在一个明确严格的定义。实际上总不是由定义来决定一门技术的发展，而是在发展中逐步形成定义。因而，曾经有多种途径来探讨电力电子学的定义，下面只举四种比较主要的有一定影响力的定义方法。

1. 从电子学的定义延伸

电子学是研究真空、气体及固体中电子运动的科学，并研究以此原理制成的器件与它的应用。简单说来，也即是研究“电子器件及其应用”。因而电力电子学自然也可定义为“电力电子器件及其应用”，或者称为“电力半导体器件及其应用”。

由于微处理器及控制系统的引入，电力电子器件目前已可包括几乎所有各种半导体器件，这样它的含义就开始模糊。此外，把电力电子学仅仅理解为“电力半导体器件及其应用”，就难免不得出电力电子学即“电力半

导体器件及其装置”的结论。这种理解，实质上是停留在“静止电力变流器”的阶段。

2. 从电子学的分类来说明

曾有人建议把电子学分为信息电子学和电力电子学两个分支，如图 5 所示。电力电子学研究电力的传送、变换、控制和开关；信息电子学研究信息的检出、传送和处理。这种分类的缺点也和上一节所讨论的有些相似。因为随着大规模集成电路和微处理器的迅速发展并廉价化，它们开始渗透到各个技术部门，也包括电力电子技术在内。信息电子学就像神经系统，它已渗入到电力电子系统的肌肉系统之中，把电力电子学理解为只研究肌肉系统（执行系统）显然也是片面的。因此有人认为电力电子技术应该包括如图 5 所示的虚线框框内的大部分，在这种情况下，这种定义就失去了意义。当然，这种分类方法也有一些优点，尤其在我国，往往把电子工业只理解为信息电子技术工业，把半导体只理解为集成电路和微电子技术，这种定义能很好纠正大家对电子技术的片面理解。

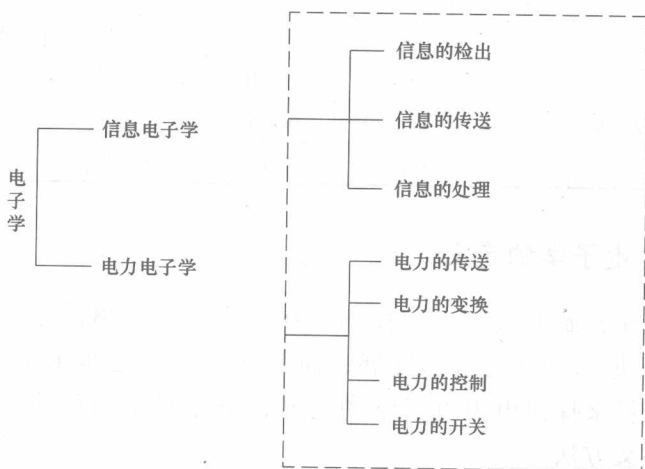


图 5

3. 从边缘学科的观点来看

Newell 所提出的“倒三角”定义，近年来已为各国所接受。即把电力电子学定义为是一门交叉于电气工程三大领域：电力、电子和控制之间的边缘科学。图 6 重绘了 Newell 所制的图。

为了加深印象，列表 2 用以说明电力、电子、控制三门学科各自的发展，从这里也能看出电力电子学的动向，但这个表的电力部分较偏重于

电动机的介绍。

4. 国际电工委员会关于电力电子学的定义

这是一个最简单的定义：“以电力技术为对象的电子学”。然而，Power 这个字翻译到中文以后，其意义就不明确了，因为它可以翻译成电力、功率或动力，其含义并不全然相同。现在有一种提法，即凡直接控制市电的皆称为 Power，这样多少给这个字以一个界限。

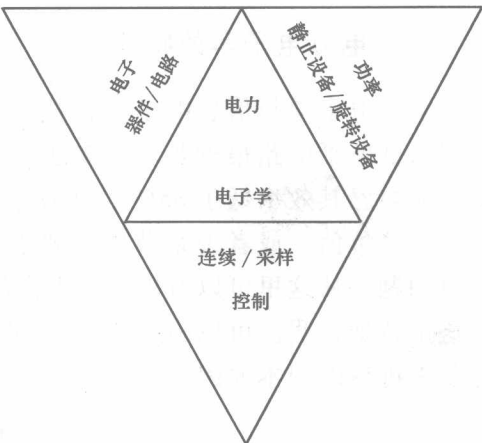


图 6

表 2 电力、电子和控制的发展概况

年代	电 力	电 子	控 制
1950	晶闸管电动机	微处理机	环境控制
	斩波器控制	小型计算机	生物系控制
	逆变器传动		电子计算机控制
	晶闸管“伦纳德”	可控硅	矢量控制论
	霍尔电动机		状态变数法
	晶体管电动机	硅整流器	工作机械的数值控制
	磁放大器		取样值控制
	电机放大器	锗整流器	根轨迹法
	旋转式自动调整器		电子式调节计
	交磁放大器	晶体管	伺服机构
	科特雷尔整流机	电子计算机	
	变压整流器		奈奎斯特定理
	接触变流机		通信系统的控制
	闸流管电动机	引燃管	生产过程自动调节
	无整流子电动机	氧化亚铜整流器	航空机自动导航
1900	静止“伦纳德”	硒整流器	
	旋转变流机	闸流管	
		广 播	
		二级真空管	
		三级真空管	
		水银整流器	
	感应电机		里阿普洛夫定理
			拉斯定理
	鼓形线组电动机		
	环形线组电动机		
1850	同步机		
	直流机		
	交流发电机		
	法拉第法则		
	电磁铁		
1800			瓦特的调速机