



普通高等教育“十二五”规划教材

常用电子器件原理 及典型应用

汪西川 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

常用电子器件 原理及典型应用

汪西川 编著



机械工业出版社

本书汇集了在电气工程、电子技术、仪器仪表、自动控制、通信技术等许多学科领域中广泛应用的多种新型的电子器件,简明扼要地论述了其结构原理、主要特性、应用方法和典型实例等。具体包括四类器件:第一类为一般器件,包括稳压器件、恒流器件、负阻器件(单结晶体管和隧道二极管)。第二类为敏感器件,包括光敏器件、热敏器件、压敏器件和磁敏器件。第三类为功率器件,包括功率晶体管(GTR)、门极关断晶闸管(GTO)、功率场效应晶体管(VMOS)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)。第四类为集成器件,包括集成运算放大器和集成时基电路等。掌握了这些颇具代表性的电子器件的结构原理、主要特性和典型应用,不仅有助于理解已有的电路,更可以通过借鉴移植而有助于设计出性能更好的新电路。本书的最后部分还给出了上述四类器件在“全国大学生电子设计竞赛”中的许多应用实例,并加以简要的分析或说明,包括电源及逆变类、放大及滤波类、测量及控制类等几类较常用的电路。这些案例均有可行的电路结构和具体参数,因此很有借鉴意义或参考价值。

本书电子器件典型、应用广泛、系统性较强、兼顾理论与实用。本书既可作为大专院校相关专业的教材,也可作为有关科技人员、业余爱好者和电子设计竞赛参赛者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

常用电子器件原理及典型应用/汪西川编著. —北京:机械工业出版社, 2012.3

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-37207-3

I. ①常… II. ①汪… III. ①电子器件—高等教育—教材 IV. ①TN103

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第012027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:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·412千字

标准书号:ISBN 978-7-111-37207-3

定价:33.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

电子技术的飞速发展，越来越凸显出电子器件的重要作用。电子器件行业已经成为支撑电子信息等产业发展的重要基础行业。电子器件是各种电路和电子设备不可或缺的基础器件。推动产品设备的智能化、提升相关产品的竞争力等都离不开电子器件的发展与应用。而电类及相关领域的科技人员，尤其是高等院校相关专业的学生，在电子器件方面应具有足够宽广和扎实的理论基础和实用技能，才能适应电子技术领域快速发展的需要。

本书主要为高校“电子器件”课程的创建和教学以及相关科技人员的学习或应用需要而编写。其宗旨在于使读者在较短的时间内系统地掌握常用电子器件的结构原理、主要特性及典型应用等方面的基本理论和应用技能，以拓展在电子器件方面的知识面和应用能力，为应用电路或设计电路打下基础。

本书汇集了在电气工程、电子技术、仪器仪表、自动控制、通信技术、计算机应用等许多学科领域中广泛应用且较具代表性的多种新型的电子器件，简明扼要、深入浅出地论述了其结构原理、主要特性、应用方法和典型实例等内容。受教学时数或篇幅的限制，书中择要介绍了四类较为典型的器件。第一类为一般器件，包括稳压器件、恒流器件和负阻器件（单结晶体管及隧道二极管）。第二类为敏感器件，包括光敏器件、热敏器件、压敏器件和磁敏器件。第三类为功率器件，包括功率晶体管（GTR）、门极关断晶闸管（GTO）、功率场效应晶体管（VMOS）和绝缘栅双极型晶体管（IGBT）。第四类为集成器件，包括集成运算放大器和集成时基电路等。这些器件是除普通电阻、电容、电感和普通二极管、晶体管等之外应用最广的电子器件。掌握了这些颇具代表性的常用电子器件的结构原理、主要特性和典型应用，不仅有助于理解已有的电路，更可以通过借鉴或移植而有助于设计出性能更好的新电路。本书的最后部分还给出了上述四类器件在“全国大学生电子设计竞赛”中的许多应用实例，并加以简要的分析或说明，包括电源及逆变类、放大及滤波类、测量及控制类等几类较常用的电路。这些案例均有可行的电路结构和具体参数，且大多经过实际验证，因此很有借鉴意义或参考价值。

本书的主要特色是：涉及的电子器件种类较多且大多应用广泛，内容兼顾理论分析与应用指导两方面，所选的电子器件及实例比较典型，系统性强、条理清晰等。本书作者已从事高校本科“电子器件”课程教学10多年，书中不少内容是作者多年教学心得的要点总结，因此更适合于课堂教学或自学参考。目前，涉及常用电子器件较典型且面较广的、能兼顾理论与实用的相关教材还很少，期望本书的出版能多少弥补当前电子器件教学及应用指导方面可用教材的不足。本书既可作为高等院校相关专业的教材，也可作为有关科技人员、业余爱好者和电子设计竞赛参赛者的参考书。

在本书的编写过程中参阅了一些书籍杂志和其他文献资料，在此谨向有关作者表示谢意。另外，还要对上海大学给予的“教材建设专项经费资助”以及上海大学机电工程

与自动化学院给予的“机电工程教育高地子项目”资助表示感谢。同时还要感谢机械工业出版社的编辑及相关工作人员对本书的编写和出版给予的关心与支持。

由于本人水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编著者

目 录

前言

第 1 篇 一般器件 1

第 1 章 稳压器件 1

1.1 稳压二极管的工作原理和特性参数 1

1.1.1 稳压二极管的工作原理 1

1.1.2 稳压二极管的伏安特性 2

1.1.3 稳压二极管的主要参数 3

1.2 稳压二极管的应用 3

1.2.1 稳压电路 3

1.2.2 限幅电路 5

1.2.3 过电压保护电路 6

1.2.4 电平转移电路 7

1.3 可调基准源及应用 8

1.3.1 TL431 可调基准源简介 8

1.3.2 TL431 可调基准源应用举例 9

1.4 三端集成稳压器及应用 10

1.4.1 三端集成稳压器简介及使用注意 事项 10

1.4.2 三端固定式集成稳压器及应用 11

1.4.3 三端可调式集成稳压器及应用 12

附表 1-1 部分 2CW 系列稳压二极管的主 要参数 13

附表 1-2 部分三端固定式集成稳压器的 主要参数 13

附表 1-3 部分三端可调式集成稳压器的 主要参数 14

第 2 章 恒流器件 15

2.1 恒流二极管的工作原理和特性参数 15

2.1.1 恒流二极管的工作原理及伏安 特性 15

2.1.2 恒流二极管的主要参数 16

2.2 恒流二极管的应用 17

2.2.1 恒流电路 17

2.2.2 稳压电路 21

2.2.3 其他应用 22

2.3 可调恒流管和集成恒流管及应用 24

2.3.1 可调恒流管及应用 24

2.3.2 集成恒流管及应用 25

附表 2-1 部分常用恒流二极管的主要参 数 26

附表 2-2 部分集成恒流管的主要参数 27

第 3 章 单结晶体管 28

3.1 单结晶体管的结构、工作原理和特 性参数 28

3.1.1 单结晶体管的内部结构 28

3.1.2 单结晶体管的工作原理及伏安 特性 28

3.1.3 单结晶体管的主要参数 30

3.2 单结晶体管的应用 30

3.2.1 张弛振荡器 30

3.2.2 正弦波振荡器和锯齿波发生器 36

3.2.3 单稳态触发器 36

3.3 程控单结晶体管及应用 37

3.3.1 程控单结晶体管的工作原理和 特性参数 37

3.3.2 程控单结晶体管的应用 38

附表 3-1 部分单结晶体管的主要参数 40

附表 3-2 国产 BT40 程控单结晶体管的 主要参数 40

第 4 章 隧道二极管 41

4.1 隧道二极管的工作原理和特性参数 41

4.1.1 隧道二极管的工作原理 41

4.1.2 隧道二极管的伏安特性和主要 参数 43

4.1.3 反向二极管 44

4.2 隧道二极管的应用 45

4.2.1 振荡电路 45

4.2.2 触发电路 48

4.2.3 放大电路 50

4.2.4 其他应用 52

附表 4-1 部分隧道二极管的主要参数 55

第 2 篇 敏感器件 56

第 5 章 光敏器件 56

5.1 光敏器件及基础知识 56

5.1.1 基础知识 56

5.1.2 光敏器件简介 58

5.2 光敏器件的应用	62	7.3.1 电感的冲击影响及消除方法	101
5.2.1 光敏电阻的应用	62	7.3.2 电容的冲击影响及消除方法	101
5.2.2 光敏二极管的应用	63	附表 7-1 部分 MYG20 型压敏电阻的主 要参数	102
5.2.3 光敏晶体管的应用	65	附表 7-2 部分 ZnO 压敏电阻的主要参 数	103
5.2.4 光耦合器的应用	67	第 8 章 磁敏器件	104
附表 5-1 部分 MG45 硫化镉光敏电阻的 主要参数	70	8.1 霍尔元件	104
附表 5-2 部分 2DU 型硅光敏二极管的 主要参数	70	8.1.1 霍尔元件的工作原理和特性参 数	104
附表 5-3 部分 3DU 型硅光敏晶体管的 主要参数	71	8.1.2 霍尔元件的应用	109
附表 5-4 部分晶体管输出光耦合器的 主要参数	71	8.2 其他磁敏器件	115
第 6 章 热敏器件	72	8.2.1 磁敏电阻及应用	115
6.1 热敏电阻的工作原理和特性参数	72	8.2.2 磁敏二极管及应用	116
6.1.1 热敏电阻的工作原理及分类	72	8.2.3 磁敏晶体管及应用	119
6.1.2 热敏电阻的特性及参数	73	附表 8-1 部分霍尔元件的主要参数	121
6.1.3 热敏电阻的工作点选择	76	附表 8-2 部分磁敏电阻的主要参数	121
6.2 热敏电阻的应用	76	附表 8-3 部分磁敏二极管的主要参数	122
6.2.1 温度测量电路	76	附表 8-4 部分磁敏晶体管的主要参数	122
6.2.2 温度控制电路	78	第 3 篇 功率器件	123
6.2.3 温度补偿电路	79	第 9 章 功率晶体管 (GTR)	123
6.2.4 过热保护电路	81	9.1 GTR 的结构及特性	123
6.2.5 其他应用	83	9.1.1 GTR 的结构及原理	123
6.3 热电偶及应用	84	9.1.2 GTR 的特性及参数	124
6.3.1 热电偶测温的基本原理	85	9.2 GTR 的驱动与保护	127
6.3.2 热电偶测温的基本定律	86	9.2.1 GTR 的驱动电路	127
6.3.3 热电偶测温的冷端补偿	87	9.2.2 GTR 的保护电路	130
6.3.4 热电偶的基本应用	87	9.3 GTR 的应用	131
附表 6-1 部分 NTC 热敏电阻的主要参 数	88	9.3.1 逆变电路	131
附表 6-2 部分 PTC 热敏电阻的主要参 数	89	9.3.2 电源变换电路	132
附表 6-3 常用热电偶及基本特性	89	9.3.3 其他应用	133
第 7 章 压敏器件	90	附表 9-1 部分 GTR 的主要参数	134
7.1 压敏电阻的工作原理和特性参数	90	附表 9-2 部分低饱和压降 GTR 的主要 参数	135
7.1.1 压敏电阻的工作原理及分类	90	第 10 章 门极关断晶闸管 (GTO)	136
7.1.2 压敏电阻的特性及参数	91	10.1 GTO 的结构及特性	136
7.1.3 压敏电阻的应用类型及使用 注意事项	92	10.1.1 GTO 的结构及原理	136
7.2 压敏电阻的应用	95	10.1.2 GTO 的特性及参数	139
7.2.1 过电压保护电路	95	10.2 GTO 的驱动与保护	142
7.2.2 其他应用	99	10.2.1 GTO 的驱动电路	142
7.3 电感与电容的冲击影响及消除方法	101	10.2.2 GTO 的保护电路	145
		10.3 GTO 的应用	146
		10.3.1 斩波电路	146
		10.3.2 逆变电路	147

10.3.3 开关电路	147	13.1.5 集成运算放大器的应用基础	198
附表 10-1 部分 GTO 的主要参数	149	13.2 集成运算放大器的基本应用	201
附表 10-2 部分 3CTG 型 GTO 的主要 参数	149	13.2.1 集成运算放大器的线性应用	201
第 11 章 功率场效应晶体管 (VMOS)	150	13.2.2 集成运算放大器的非线性应 用	206
11.1 VMOS 的结构及特性	150	13.2.3 集成运算放大器实用电路举 例	211
11.1.1 VMOS 的结构及原理	150	附表 13-1 部分常用集成运算放大器的 主要参数	214
11.1.2 VMOS 的特性及参数	151	附表 13-2 部分宽带集成运算放大器的 主要参数	216
11.2 VMOS 的驱动与保护	154	第 14 章 集成时基电路	217
11.2.1 VMOS 的驱动电路	154	14.1 555 时基电路的基础知识	217
11.2.2 VMOS 的保护电路	159	14.1.1 双极型 555 时基电路的组成 及原理	217
11.3 VMOS 的应用	162	14.1.2 CMOS 型 555 时基电路简介	220
11.3.1 电源变换电路	162	14.1.3 555 时基电路的主要参数	220
11.3.2 其他应用	164	14.1.4 555 时基电路的使用注意事项	222
附表 11-1 部分功率 MOSFET 的主要 参数	166	14.2 555 时基电路的基本应用	223
附表 11-2 部分大功率 MOSFET 的主 要参数	167	14.2.1 有稳型电路	223
第 12 章 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	168	14.2.2 无稳型电路	228
12.1 IGBT 的结构及特性	168	14.2.3 555 时基电路的应用实例	231
12.1.1 IGBT 的结构原理及主要特点	168	附表 14-1 部分双极型 555 时基电路的 主要参数	237
12.1.2 IGBT 的基本特性及主要参数	169	附表 14-2 部分 CMOS 型 555 时基电路 的主要参数	237
12.2 IGBT 的驱动与保护	174	第 5 篇 竞赛应用	238
12.2.1 IGBT 的驱动电路	174	第 15 章 电子器件在全国大学生电 子设计竞赛中的应用	238
12.2.2 IGBT 的保护电路	177	15.1 电源及逆变类电路	238
12.3 IGBT 的应用	181	15.1.1 线性稳压电源	238
12.3.1 逆变电路	181	15.1.2 开关稳压电源	240
12.3.2 放大电路	183	15.1.3 恒流电路	242
附表 12-1 部分 IGBT 的主要参数	184	15.1.4 逆变电路	244
附表 12-2 部分开关型 IGBT 模块的主 要参数	184	15.2 放大及滤波类电路	245
第 4 篇 集成电路	185	15.2.1 放大电路	245
第 13 章 集成运算放大器	185	15.2.2 滤波电路	249
13.1 集成运算放大器的基础知识	185	15.3 测量及控制类电路	252
13.1.1 集成运算放大器的结构及原 理	185	15.3.1 测量电路	252
13.1.2 集成运算放大器的主要参数	188	15.3.2 控制电路	256
13.1.3 集成运算放大器的分类及选 用	191	参考文献	259
13.1.4 集成运算放大器的使用要点	194		

第1篇 一般器件

第1章 稳压器件

1.1 稳压二极管的工作原理和特性参数

1.1.1 稳压二极管的工作原理

稳压二极管又称齐纳二极管 (Zener Diode), 是由 P 型和 N 型半导体材料构成的双端稳压器件。根据半导体理论, PN 结具有单向导电性, 即当 PN 结上加正向电压时, 有较大的正向电流, 且电流随电压的增加而迅速增大; 当 PN 结加反向电压时, 反向电流很小, 且几乎不随外加电压而变化。当反向电压超过一定数值 (即反向击穿电压) 时, 反向电流便急剧增大, 而随着反向电流的急剧增加, PN 结的反向电压却增加很少, 这种现象称为 PN 结的反向击穿。稳压二极管就是利用这种反向击穿特性制成的。当然, 反向电流的增加应有限制, 否则 PN 结会迅速被烧坏。

反向击穿通常分为电击穿和热击穿两类。电击穿是由加在 PN 结上的强电场所造成的, 通常是可逆的。半导体的击穿电场一般为 200kV/cm 左右。热击穿则是因 PN 结温度过高而造成的击穿, 是不可逆的永久性损坏。

电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿。

雪崩击穿: 当 PN 结的反向电压足够高 (比如大于 6V) 时, PN 结中电场较强, 使载流子加速, 能量增强。其中, 某些具有足够高能量的载流子有可能与中性原子相撞, 并把能量传递给原子价带上的电子, 使之激发或电离, 从而产生新的电子-空穴对。这些新的载流子又被加速并可能产生碰撞, 于是形成连锁反应或倍增效应, 像雪崩一样导致载流子剧增, 电流急剧增大。如此造成的击穿称为雪崩击穿, 这种击穿通常发生于 PN 结一侧是重掺杂的二极管中, 其击穿电压反比于轻掺杂侧的杂质浓度, 如图 1-1 所示。

齐纳击穿: 在加有较高的反向电压的情况下, PN 结区中存在强电场, 它能够直接破坏原子的共价键, 将束缚电子分离出来产生电子-空穴对, 从而形成较大的反向电流, 这种现象称为齐纳击穿, 如图 1-1 所示。对于掺杂浓度较高的半导体, 其 PN 结中的电荷密度较大, 因而耗尽层很薄, 只要在 PN 结上加不高的反向电压 (比如 4V 以下), 耗尽层就可获得 200kV/cm 以上的电场强度, 足以将中性原子的价电子拉出, 形成很多电子-空穴对, 从而使电流剧增。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 200kV/cm 以上, 这只有在杂质浓度很高的 PN 结中才能达到。因为杂质浓度大, 空间电荷区内的电荷 (即杂质离子) 密度也大, 所以空间电荷区很窄, 即使所加电压不是很高, 电场强度也可能很强。

实际上, 雪崩击穿与齐纳击穿往往是同时存在的。稳压值较低的稳压二极管主要是齐纳

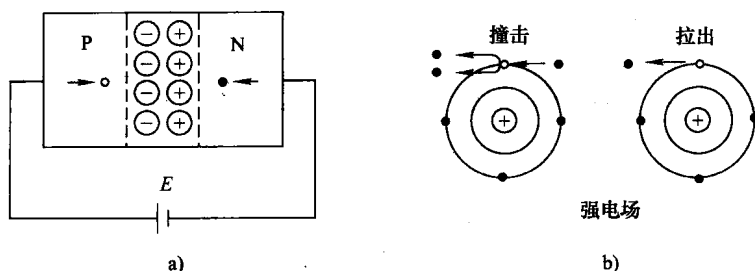


图 1-1 稳压二极管的结构及反向击穿原理

a) 稳压二极管结构 b) 雪崩击穿和齐纳击穿示意图

击穿，稳压值较高的主要是雪崩击穿。对于硅管来说，分界约在 $4 \sim 7\text{V}$ ， 4V 以下的稳压二极管属齐纳击穿， 7V 以上的属雪崩击穿，而 $4 \sim 7\text{V}$ 之间的则两种击穿都有。

上述的电击穿即雪崩击穿或齐纳击穿通常是可逆的。也就是说，当 PN 结击穿时，只要电流限制在一定的范围内，功耗未超出最大允许值，PN 结未被烧毁，那么反向电压减小后，PN 结仍可恢复原来的正常状态。即雪崩击穿和齐纳击穿属于可恢复性的，撤掉电压后，在 PN 结内没有物理损伤。

若反向电压或反向电流过大，使消耗在 PN 结上的功率超出了最大允许值，导致结温过高，PN 结被烧毁，就称为热击穿。热击穿是不可逆的，它将导致 PN 结的永久损坏，因此在工程上应避免出现。常用的预防方法是限制 PN 结上的功耗，或通过加散热片、强制风冷等手段，及时把 PN 结上的热量散发出去。

1.1.2 稳压二极管的伏安特性

图 1-2 所示为稳压二极管的电路图形符号及伏安特性。其正向伏安特性与普通二极管类似，但反向特性有所不同。普通二极管在反向电压达到击穿电压后，将被击穿损坏。而稳压二极管在反向电压小于击穿电压（又称稳定电压） U_z 时，反向电流极小（微安数量级）。但当反向电压增至 U_z 后，只要反向电压稍有增加，电流便急剧增大，此时稳压二极管处于反向击穿状态，对应于曲线的 AB 段，称为击穿区。由于制造工艺不同于普通二极管，稳压二极管的这种击穿是可逆的，只要去掉外加电压，即可恢复正常。

当然，稳压二极管的功耗不可超过允许值，否则也会造成不可逆击穿而损坏。为此，稳压二极管必须串联一个适当的限流电阻。

注意，限流电阻不仅起限流作用，还起电压调节作用。如果稳压二极管不经限流电阻而直接并接在电路的输入端和输出端上，它不仅可能因电流过大而被烧坏，也起不到稳压作用。正常工作时，稳压二极管往往通过限流电阻被设置在伏安特性的反向击穿区（AB 段），在此区域，电流变化较大而电压几乎不变。

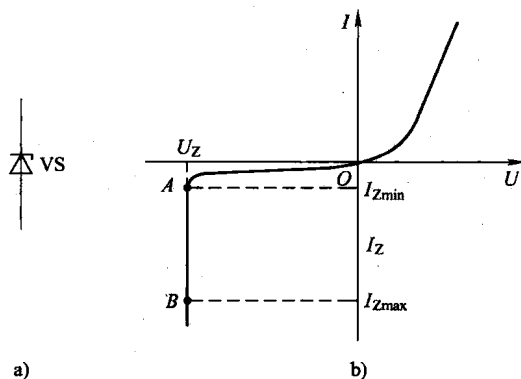


图 1-2 稳压二极管的电路图形符号及伏安特性

a) 电路图形符号 b) 伏安特性

可见,稳压二极管的主要特点是击穿后,其两端的电压基本保持不变,利用这个特性即可实现稳压。当把稳压二极管接入电路后,因电源或其他因素造成电路电压变动时,稳压二极管两端或与其并联的负载两端的电压将基本保持稳定。

1.1.3 稳压二极管的主要参数

1) 稳定电压 U_Z : 指稳压二极管反向击穿后的稳定工作电压,它随电流和温度的不同而略有变化。由于制造工艺不易控制,同一型号的稳压二极管,其稳压值也有差异,例如 2CW51 稳压二极管的稳定电压值是 2.5 ~ 3.5V。但就同一个管子而言,对应于一定的工作电流却有一个确定的稳定电压,因此在使用或更换稳压二极管时,一定要进行测试,看其稳压值是否合乎要求。

2) 稳定电流 I_Z : 指稳压二极管工作于稳定电压时的工作电流,为一参考值。它通常有一定的允许范围。实际应用中,工作电流的选定还要结合具体情况来考虑。

稳压二极管允许通过的最大反向电流称为最大稳定电流(或最大工作电流) I_{Zmax} ,超过此值稳压二极管将会发热损坏。稳压二极管进入正常稳压状态所必需的最小电流称为最小稳定电流(或最小工作电流) I_{Zmin} ,小于此值时稳压二极管不能起到稳压作用。

3) 动态电阻 R_Z : 指在稳压条件下,稳压二极管两端的电压变化与电流变化的比值,即

$$R_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$$

R_Z 随工作电流而变。对于同一稳压二极管,通常工作电流越大,动态电阻越小,稳压性能越好。

4) 电压温度系数 C_{TV} : 用来说明稳定电压值受温度变化影响的系数,指稳压二极管工作于稳定电流,温度每变化 1℃ 时稳定电压的相对变化量,即

$$C_{TV} = \Delta U_Z / (U_Z \Delta T)$$

C_{TV} 越小,温度稳定性越好。通常,稳压值低于 5V 的稳压二极管 C_{TV} 为负,高于 6V 的 C_{TV} 为正,介于 5 ~ 6V 之间的, C_{TV} 接近于零。因此,选用 5 ~ 6V 的稳压二极管受温度的影响较小。在要求高的场合,可用两个温度系数相反的稳压二极管串联进行补偿。

5) 最大耗散功率 P_M : 稳压二极管在反向击穿工作时其 PN 结所能承受的最大功率值,即 $P_M = U_Z I_{Zmax}$ 。由 P_M 可以求出最大稳定电流。稳压二极管的实际功率损耗应小于 P_M ,否则将会损坏。

目前,稳压二极管已系列化。稳定电压为 1 ~ 500V,最大耗散功率在 0.25 ~ 50W 范围的品种已基本齐备。高精度的稳压二极管,其电压温度系数可达 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 稳压二极管的应用

1.2.1 稳压电路

由稳压二极管构成的最简单的稳压电路如图 1-3 所示。只要电阻 R 将稳压二极管 VS 设置在稳压区,负载 R_L 上就可得到一个比较稳定的电压 U_L 。在此,电阻 R 既起电压调节作用,又起限流作用,因此也称限流电阻。

该电路的稳压原理如下:引起电压不稳定的因素包括电源电压的波动和负载电流的变化

等。假如电源电压 U_i 增加, 则 U_L 随之增加。但因稳压二极管处于稳压区击穿状态, 当 U_L 稍有增加时, I_Z 就显著增加, 因此导致 R 上的压降增加, 从而抵偿 U_i 的增加, 使 U_L 保持近似不变。反之, U_i 减小时亦然。同理, 若 U_i 不变, 负载电流 I_L 增大时, 则 R 上的压降增大, U_L 因而减小。但 U_L 稍有减小, I_Z 便显著减小, 从而抵偿 I_L 的增大, 使通过 R 的电流和压降保持近似不变, 因此 U_L 也几乎不变。负载电流减小时, 稳压过程类似。归纳起来, 不管是哪种因素引起 U_L 变化, 经过如下的负反馈过程:

$$U_L \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_L \downarrow$$

最后都会使 U_L 趋于近似不变, 从而起到稳压作用。

图 1-3 电路中, 稳压二极管 VS 和限流电阻 R 的选取应遵从以下原则:

- 1) 稳压二极管的稳定电压应按负载电压选取, 即 $U_Z = U_L$ 。如一只管子的稳压值不够, 可用两只以上的稳压二极管串联。
- 2) 选择稳压二极管的最大稳定电流 I_{Zmax} 为最大负载电流 I_{LM} 的 2 倍以上。
- 3) 输入直流电压取为: $U_i = (2 \sim 3) U_L$ 。
- 4) 限流电阻 R 的大小应满足两个极端条件: 一是 U_i 为最低 U_{imin} 而负载电流为最大 I_{LM} 时, 流过稳压二极管的电流最小, 应不小于稳压二极管的最小稳定电流 I_{Zmin} , 即

$$(U_{imin} - U_L)/R > I_{Zmin} + I_{LM}$$

二是 U_i 为最高 U_{imax} 而负载开路 $I_L = 0$ 时, 流过稳压二极管的电流最大, 应不超过稳压二极管的最大稳定电流 I_{Zmax} , 即

$$(U_{imax} - U_L)/R < I_{Zmax}$$

因此, R 应满足如下关系:

$$\frac{U_{imax} - U_L}{I_{Zmax}} < R < \frac{U_{imin} - U_L}{I_{Zmin} + I_{LM}}$$

- 5) 限流电阻的额定功率应取电阻上实际最大耗散功率的 2~3 倍, 即

$$P \geq (2 \sim 3) I^2 R = (2 \sim 3) (U_{imax} - U_L)^2 / R$$

图 1-4 所示为一个两级稳压二极管稳压电路, 以提高输出电压的稳定性。输入交流电压 220V, 经降压整流和稳压, 最后在 2CW13 两端输出 6V 的直流电压。

上述由稳压二极管构成的简单稳压电路因受稳压二极管限制, 输出电流较小, 且稳定度不高。在负载电流要求较大的场合, 可将稳压二极管与晶体管组合, 构成带射极跟随器的稳压电路, 如图 1-5 所示, 这是最简单的晶体管串联式稳压电路。其中, R 和 VS 组成基本稳压电路, 为调整管 VT 的基极提供稳定的基准电压 U_Z 。而 VT 的 $U_{be} = U_Z - U_L$ 。假定由于某种因素导致 U_L 上升 (下降也类似), 因 U_Z 不变, 于是 U_{be} 减小, 则 I_b 和 I_c 也减小, 从而使负载电压 U_L 回落, 保持近

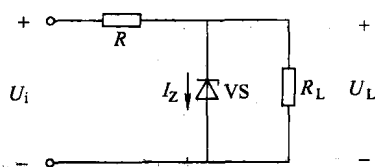


图 1-3 稳压二极管构成的最简单的稳压电路

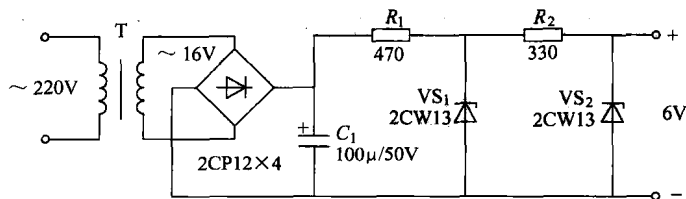


图 1-4 两级稳压电路

似不变。其反馈过程或自动调整过程如下：

$$U_L \uparrow \rightarrow U_{be} \downarrow \rightarrow I_b \downarrow \rightarrow I_c \downarrow \rightarrow U_L \downarrow$$

这种电路比图 1-3 所示的简单稳压电路的电流负载能力提高约 β 倍 (β 为晶体管 VT 的共射极电流放大倍数)。

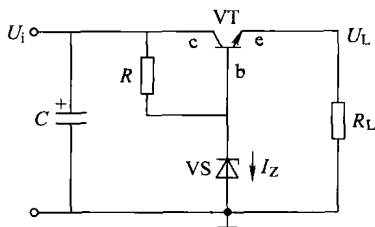


图 1-5 带射极跟随器的稳压电路

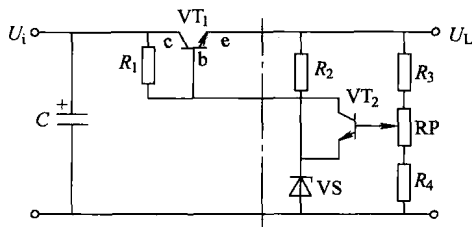


图 1-6 带放大环节的稳压电路

通常，输出电压的变化量是很微小的，它对调整管的控制作用也较微弱，因此稳压效果往往不是很好。在负载电流较大，且要求输出电压稳定度很高时，常采用带放大环节的串联式稳压电路，以提高反馈信号对调整管的控制作用，使稳压性能得到改善。其基本电路如图 1-6 所示。图 1-6 中，稳压二极管用来提供基准电压信号，经与来自输出电压的取样信号比较形成差分信号，进而由晶体管 VT_2 放大并通过调整管 VT_1 使输出电压稳定。注意，此处 U_Z 取自 U_L 而非 U_i ，因而更加稳定。其电压变化的反馈过程如下：

$$U_L \uparrow \rightarrow U_b \downarrow, U_e \uparrow \rightarrow U_{be} \downarrow \rightarrow I_b \downarrow \rightarrow I_c \downarrow \rightarrow U_L \downarrow$$

图 1-7 所示为一可调稳压电路，其中点划线框内可等效为一个可变稳压二极管。通过调节电位器 RP，可使电路的稳压值在 5~45V 范围内设定。当稳压二极管的耗散功率为 250mW 时，电路的最大输出电流约为 50mA。与单管稳压电路类似，其电压变化是一个负反馈过程，即输出电压增大导致电流 I_Z 急剧增大，进而导致压降 U_R 增大，从而使输出电压减小而趋于稳定。

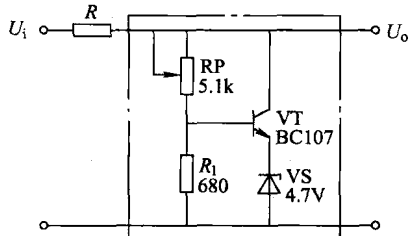


图 1-7 5~45V 可调稳压电路

1.2.2 限幅电路

稳压二极管用于限幅的基本电路及输入、输出波形如图 1-8 所示。其中前两个是串联限幅电路，后两个是并联限幅电路。串联限幅电路的输出电压波形是输入电压波形中高于稳压二极管击穿电压的部分，它可用来抑制干扰脉冲，以提高电路的抗干扰能力，还可用作鉴幅器，以鉴别信号的幅值。并联限幅电路的输出波形是输入波形中低于击穿电压的部分，可用于整形和稳定输出波形的幅值，还能将正弦电压整形为方波电压，或从全波整流后的波形得到梯形波电压。

图 1-9 所示为运算放大器的限幅电路。稳压二极管 VS_1 和 VS_2 对接在反馈支路中，正常工作时，运算放大器输出电压的绝对值小于 U_Z ，这条支路不起作用。但当输出电压的绝对值大于 $(U_Z + U_D)$ 时，便会使一个稳压二极管反向击穿，另一个稳压二极管正向导通，负反馈加强，从而使输出电压限制在 $\pm (U_Z + U_D)$ 的范围之内。其中 U_Z 为稳压二极管的稳定电压， U_D 为稳压二极管的正向导通电压。

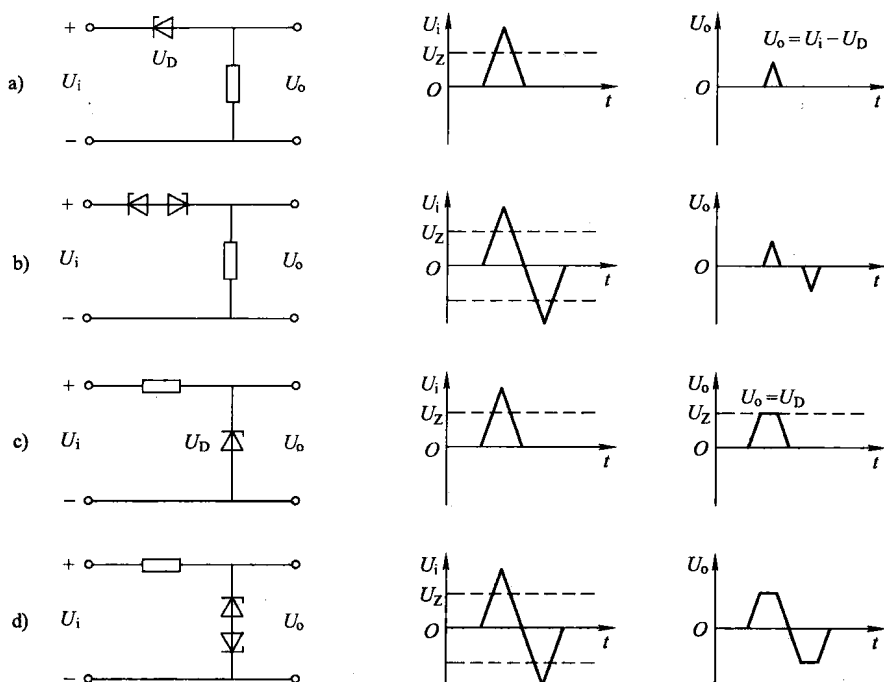


图 1-8 稳压二极管限幅电路

a) 串联限幅直流正向 b) 串联限幅交流双向 c) 并联限幅直流正向 d) 并联限幅交流双向

图 1-10 所示为一个由运算放大器组成的方波发生器电路，振荡频率为 200Hz。电路中将两个稳压二极管反向串联后并联在发生器的输出端上，可将输出电压的幅度限制在 $\pm 10\text{V}$ 的范围之内。

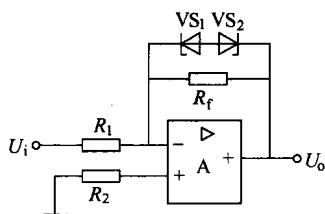


图 1-9 运算放大器的限幅电路

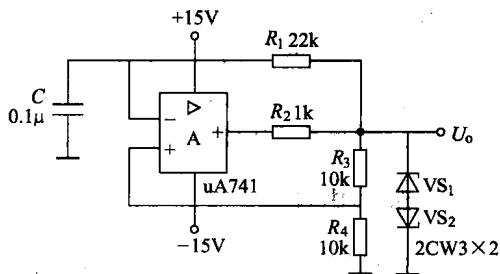


图 1-10 方波发生器限幅电路

1.2.3 过电压保护电路

1. 过电压保护

图 1-11 所示为两个负载过电压保护电路。正常状态下，电源电压低于稳压二极管的击穿电压，稳压二极管的反向电阻很大，相当于开路，负载 R_L 正常工作。当电源电压过高时稳压二极管击穿，电流急剧增大，导致 R_1 压降增大，负载电压受到限制，从而起到保护负载 R_L 的作用。其反馈过程如下：

U_i 未过电压时：

$I_Z \approx 0$ ，保护电路部分相当于断路，不起作用。

U_i 过电压时:

对于图 1-11a 所示电路, $U_L \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow U_{R_1} \uparrow \rightarrow U_L \downarrow$, 使 U_L 趋于稳定;

对于图 1-11b 所示电路, $U_i \uparrow \rightarrow U_L \uparrow \rightarrow I_b \uparrow \rightarrow I_c \uparrow \rightarrow U_{R_1} \uparrow \rightarrow U_L \downarrow$, 使 U_L 几乎不变。

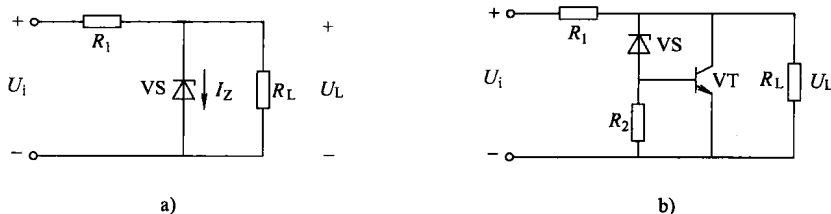


图 1-11 两种过电压保护电路

a) 单个稳压二极管保护电路 b) 稳压二极管与晶体管组合保护电路

图 1-12 所示电路是稳压二极管用于三端集成稳压器输出的过电压保护电路。假定由于三端集成稳压器损坏, 造成输出电压大于 13V, 则稳压二极管 VS 击穿, 触发晶闸管 VT 导通, 导致电源短路并熔断熔丝 FU, 从而起到过电压保护的作用。图 1-13 所示为交流过电压保护电路。

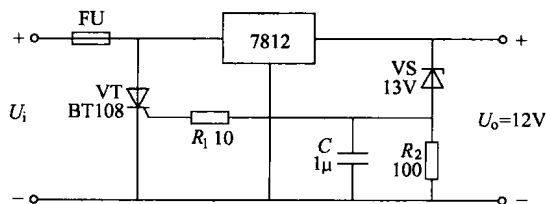


图 1-12 三端集成稳压器输出过电压保护电路

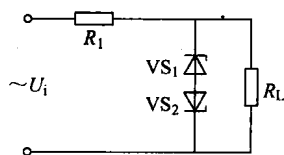


图 1-13 交流过电压保护电路

2. 过低电压保护

某些电路或器件不允许较长时间工作于过低电压状态, 为此可用如图 1-14 所示的过低电压 (或欠电压) 保护电路。当电源电压超过稳压二极管 VS 的击穿电压时, VS 击穿导通, 有足够的电流激励继电器 K, 使触点接通, 负载 R_L 正常工作。一旦电源电压过低 (即达不到稳压二极管 VS 的击穿电压) 时, 便没有足够的电流流过继电器, 负载即与电源断开, 从而起到过低电压 (或欠电压) 保护作用。

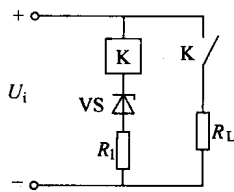


图 1-14 过低电压保护电路

1.2.4 电平转移电路

直流放大器各级之间如无耦合电容或变压器隔离, 级间静态工作点就会相互影响。为使各级都能得到合适的静态工作点且被放大的信号损失较小, 常用稳压二极管垫高电平、充当耦合元件, 如图 1-15 所示。稳压二极管工作在击穿状态下的动态电阻很小, 因此可几乎无衰减地传递信号。

数字逻辑电路中, 由不同导电类型的晶体管组成的分立元器件电路和不同种类的数字集成电路, 其信号电平往往具有不同的幅值和极性, 当它们相互连接时通常需要加入电平转移电路。例如, 若前级输出电平大于后级要求的输入电平且极性相同, 常采用串联或并联限幅

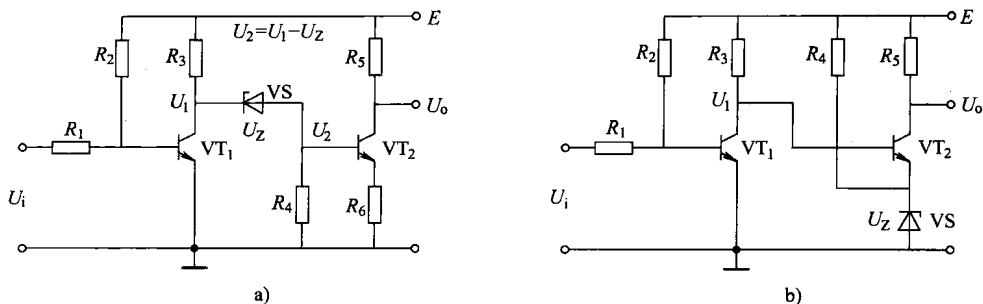


图 1-15 稳压二极管用于级间耦合的电平转移

a) 垫高基极 b) 垫高发射极

器；若前后级信号电平极性相反，则电平转移电路可用图 1-16 所示的形式。图 1-16a 中，稳压二极管和一个电阻组成电平转移电路，把信号电平从 $0 \sim -9\text{V}$ 变换成 $+5 \sim 0\text{V}$ ，从而可与 TTL 电路相连。由图 1-16b 所示波形可以看出，通过电平转移电路后信号波形不变，但电平上移了。电平转移时，信号幅值可根据后级的要求而变，但只能减小，不能增大。

图 1-17 所示为用稳压二极管提升三端集成稳压器输出电压的电路。电路中加入稳压二极管 VS，可将三端集成稳压器的公共端电位提高，从而使输出的电压提升为 $U_o = U_z + U_w$ ，其中的 U_z 为稳压二极管的稳定电压， U_w 为三端集成稳压器的输出稳压值。

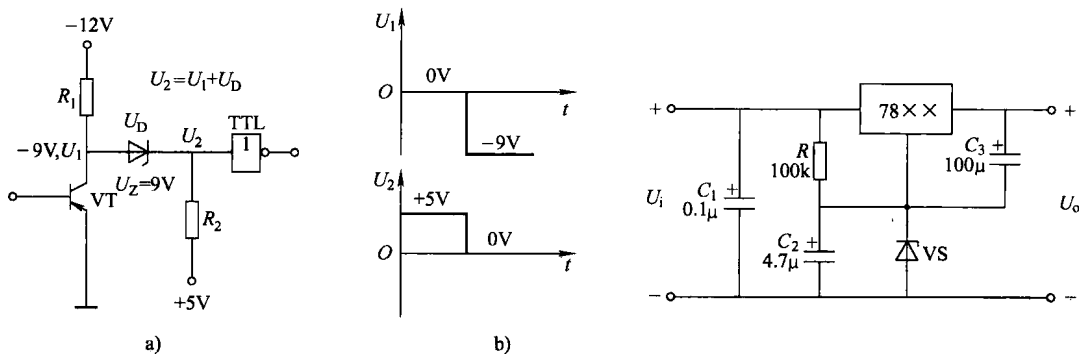


图 1-16 数字电路中的电平转移

a) 转移电路 b) 电压波形

图 1-17 稳压二极管用于三端稳压器的电位提升

此外，稳压二极管还可用于退耦电路、检波电路、选择电路等。由稳压二极管组成的恒压源由于内阻小，可兼作稳压和退耦电路，且与信号频率无关，用于小功率电路退耦效果很好。稳压二极管的反向特性转折明显，线性好，将其偏置在伏安特性的 AB 段（见图 1-2b），用于检波电路，有效率高、失真小的优点。

1.3 可调基准源及应用

1.3.1 TL431 可调基准源简介

TL431 是精密可调分流基准源。主要特点如下：稳压值在 $2.5 \sim 36\text{V}$ 范围内连续可调；

温度特性平坦, 典型值为 $50 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$; 动态电阻低, 典型值为 0.2Ω ; 输出噪声低。其工作电压 U_{KA} 的允许范围为 $2.5 \sim 36\text{V}$, 极限值为 37V ; 工作电流 $I_{KA} = 1.0 \sim 100\text{mA}$, 极限值为 150mA ; 室温额定功率 $\leq 1\text{W}$ 。TL431 性能优良, 价格低廉。在很多应用场合可代替稳压二极管。

TL431 的电路图形符号和内部等效电路如图 1-18 所示。其中, 运算放大器的反相输入端是一个内部的 2.5V 基准源, 只有同相端 (即 R 端) 的电压非常接近 2.5V 时, 晶体管中才会有一个稳定的非饱和电流通过。随着 R 端电压的微小变化, 通过晶体管的电流可在 $1.0 \sim 100\text{mA}$ 范围内变动。二极管用于防止电源反接时损坏器件。

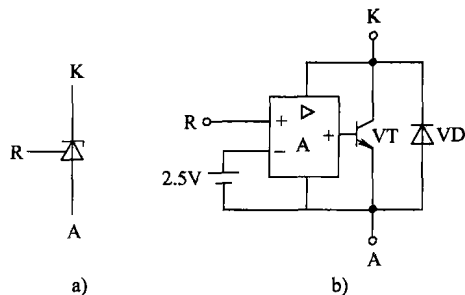


图 1-18 可调基准源的电路图形符号及内部等效电路
a) 电路图形符号 b) 等效电路

1.3.2 TL431 可调基准源应用举例

1. 稳压应用

TL431 可等效为一个稳压二极管, 主要用于稳压, 其基本应用电路如图 1-19 和图 1-20 所示。其中, 图 1-19 为固定基准源, 输出电压 2.5V ; 图 1-20 为可调基准源, 输出电压 $U_o = 2.5(1 + R_1/R_2)\text{V}$ 。其稳压原理如下: TL431 的内部含有一个 2.5V 的基准电压, 当在 R 端引入输出反馈时, 通过阴极 K 到阳极 A 较宽范围的分流, 控制输出电压。若 U_o 上升, 则反馈量增大, TL431 的分流也增大, 从而又导致 U_o 下降。显然, 这个负反馈在 R 端电压等于 2.5V 处稳定。选择不同的 R_1 和 R_2 的值即可得到 $2.5 \sim 36\text{V}$ 范围内的任意电压输出。需要注意的是, 选择电阻 R 时必须保证 TL431 的工作条件, 就是通过阴极的电流 I_{KA} 应在 $1.0 \sim 100\text{mA}$ 之间。

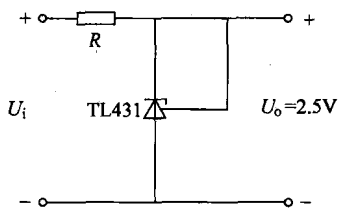


图 1-19 2.5V 稳压电路

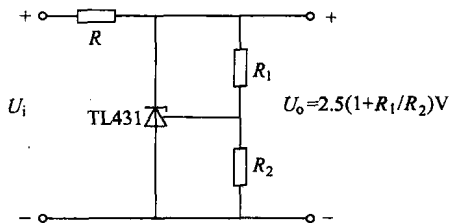


图 1-20 可调输出稳压电路

当要求输出电流较大且电压稳定度较高时, 可将 TL431 与晶体管组合构成稳压电路, 图 1-21 和图 1-22 所示为两个应用实例。图 1-21 为精密 5V 稳压电路, 如调整两个分压电阻的比值, 也可改变输出电压。稳压过程如下:

$$U_o \uparrow \rightarrow I_{KA} \uparrow \rightarrow I_b \downarrow \rightarrow I_e \downarrow \rightarrow U_o \downarrow$$

图 1-22 所示为大电流并联稳压电路, 稳压过程如下

$$U_o \uparrow \rightarrow I_{KA} \uparrow \rightarrow I_b \uparrow \rightarrow I_e \uparrow \rightarrow U_R \uparrow \rightarrow U_o \downarrow$$

2. 可控分流应用

如上所述, 当 TL431 的 R 端电压有微小变化时, I_{KA} 将随之在 $1 \sim 100\text{mA}$ 范围内变化。