

— 高等学校教材 —

工业电子学

上 册

(1965 年修订本)

华中工学院 西安交通大学合编
沈尚贤主编

高 等 教 育 出 版 社

高等学校教



工 业 电 子 学
上 册

(1965 年修訂本)

华中工学院 西安交通大学合编
沈尚贤主编

高等教育出版社

本书阐述了工业电子学的基本原理，把电子器件（包括电子管、离子管、半导体管等）与电子电路联系在一起讨论。全书分上、下册出版，上册内容包括绪论、不控整流器、可控整流器、电子管放大器等章；下册内容包括半导体三极管放大器、正弦波振荡器、脉冲电路、电子仪器等章。

本书系在第二版的基础上修订而成，经清华大学工业电子学教研组审阅，并经高等工业学校电工课程教材编审委员会工业电子学课程教材编审小组复审通过。

本书可作为高等工业学校本科五年制电机制造类和动力类电力方面各专业工业电子学课程的试用教材，亦可供其他专业师生以及从事工业电子技术的工作人员参考。

本书原由人民教育出版社出版。现经上级决定，自1965年1月1日起，另行成立“高等教育出版社”；本书今后改用高等教育出版社名义继续印行。

工 业 电 子 学

上 册

(1965年修订本)

华中工学院 西安交通大学合编

沈尚贤 主编

北京市书刊出版业营业许可证出字第119号

高等教育出版社出版(北京景山东街)

人民教育印刷厂印装

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

统一书号K15010·1037 开本 850×1168 1/32 印张 7 9/16

字数 189,000 印数 60,501—65,500 定价(7) 0.90

1961年8月第1版 1962年9月第2版

1965年7月第3版 1965年7月北京第9次印刷

第三版序

本版与前一版相比，主要做了下列一些工作：(1)前一版内容龐杂，現在作了較大的精簡，例如刪去了調制器和解調器一章，对大功率整流方面也作了很多刪节，精簡了一些設計計算方面的内容等等，因而目前的篇幅，約为前一版的一半，使能較符合于目前教学的实际需要；(2)在电子管放大电路的分析方法方面，較前有所加强；(3)为了加强电子电路应用方面的知識，重新改写了“电子仪器”一章；(4)插图一律按国家标准电工系統图图形符号GB312-64来繪制；(5)公式中所用符号，亦按照国家标准的要求作了改革，除一些国际通用的符号外，脚注一律改用汉语拼音字母来表示。 E 和 U 的正向表示方法，改为与“电工基础”課程的有关教材所用者一致，以利于銜接。对于半导体三极管放大电路中各种电压和电流的假定正方向，現按照实际情况来規定，以免引出許多不必要的負号而搞得很煩瑣。

本版修訂工作，第一、二章由湯之璋同志負責，第三章由康华光同志負責，华中工学院电工教研室工业电子学小組有关同志参加了上述三章的修訂工作。第四章由蔡元龙同志負責，第五、六章由沈尚賢同志負責，第七章先后由蔣大宗、蔡元龙两同志执笔。全书由沈尚賢同志負責校閱定稿。在全书的修訂过程中，秦祖蔭同志参加了許多工作。

本版在修訂过程中，曾于1963、1964年由华中工学院和西安交通大学印成讲义試用，并承清华大学、南京工学院、东北工学院、浙江大学、山东工学院、哈尔滨工业大学、天津大学、广西大学、北京工业大学、大連工学院、安徽工学院、成都工学院、广东工学院、湖南大学等校寄来宝貴意見。本书由清华大学童詩白、吳白純、孙

家斡、許道榮等同志審閱，編者謹表示衷心的感謝。

本版雖作了一些改革，但體系仍舊，從目前我國教學改革的要求來看，相距甚遠，殷切希望使用本教材的師生和其他讀者多多指正，以便繼續改進。

沈尚賢 1965年5月17日

上册目录

第三版序	vii
緒論	1
0.1 本課程的內容和任務	1
0.2 工業電子學的發展	2
參考文獻	3
第一章 不控整流器	5
1.0 概述	5
1.1 熱陰極真空二極管	6
1.1.1. 熱陰極真空二極管的構造和工作原理	6
1.1.2. 真空二極管的伏安特性	8
1.1.3. 真空二極管的參數和定額	11
1.2 熱陰極充气二極管	14
1.2.0. 引言	14
1.2.1. 熱陰極充气二極管的構造	14
1.2.2. 充气二極管的伏安特性	15
1.2.3. 熱陰極充气二極管的定額及使用時應注意之點	17
1.3 半導體二極管	19
1.3.0. 引言	19
1.3.1. 半導體的電特性	19
1.3.2. PN 結及其單向導電特性	21
1.3.3. 半導體二極管的伏安特性	24
1.3.4. 半導體二極管的構造和特性	26
1.3.5. 半導體二極管的定額和使用特點	28
1.4 真空二極管、充气二極管和半導體二極管作為整流器件的比較	29
1.5 具有純電阻負載的單相整流電路	31
1.5.0. 引言	31
1.5.1. 單相半波整流電路	31
1.5.2. 單相全波整流電路	36
1.5.3. 單相橋式整流電路	40
1.5.4. 小結	42

1.6 具有滤波器的单相整流电路	42
1.6.1. 具有电容滤波器的单相整流电路	43
1.6.2. 具有电感滤波器的单相整流电路	48
1.6.3. 具有复式滤波器的单相整流电路	54
1.6.4. 小结	55
1.7 小功率整流器的应用举例	56
1.8 多相不控整流电路	59
1.8.0. 引言	59
1.8.1. 三相半波整流电路	60
*1.8.2. 三相桥式整流电路	65
*1.8.3. 并联复式三相半波整流电路	68
1.8.4. 小结	73
第一章习题及思考题	75
第一章参考文献	79
第二章 可控整流器	80
2.0 概述	80
2.1 可控整流器件	81
2.1.1. 闸流管	81
*2.1.2. 汞弧管	87
2.2 可控整流器的栅极控制原理及控制电路	90
2.2.1. 正弦波移相控制原理及其电路	90
2.2.2. 脉冲控制原理及其电路	95
*2.3 三相可控整流电路的分析	96
2.3.1. 负载为纯电阻时的情况	97
2.3.2. 负载为电阻-电感串联的情况	99
第二章习题和思考题	101
第二章参考文献	103
第三章 电子管放大器	104
3.0 概述	104
3.1 放大电子管	105
3.1.1. 三极管	105
3.1.2. 三极管基本放大电路的图解分析法	109
3.1.3. 三极管基本放大电路的微变等效电路分析法	123
3.1.4. 三极管放大电路的输入阻抗及输出阻抗	134
3.1.5. 多极管	138

3.1.6. 多极管基本放大电路的分析方法	145
3.1.7. 放大电子管的定额及其性能的比較	150
3.2 低频电压放大器	153
3.2.0. 引言	153
3.2.1. 阻容耦合放大器的基本电路及各元件的作用	154
3.2.2. 阻容耦合放大器的频率特性	156
3.2.3. 小结	169
3.3 低频功率放大器	170
3.3.0. 引言	170
3.3.1. 单边功率放大器	171
3.3.2. 推挽功率放大器	179
*3.3.3. 倒相电路	185
3.3.4. 小结	186
3.4 放大器中的反馈	186
3.4.0. 引言	186
3.4.1. 反馈放大器的放大倍数	187
3.4.2. 负反馈对放大器性能的改善	190
3.4.3. 阴极输出器	194
*3.4.4. 负反馈放大器实用电路举例	199
3.5 直流放大器	201
3.5.0. 引言	201
3.5.1. 分压器耦合电路	202
3.5.2. 直流放大器产生零点漂移的原因及其削弱方法	203
3.5.3. 并联平衡电路	205
3.5.4. 小结	210
3.6 相敏放大器	211
3.6.0. 引言	211
3.6.1. 单边相敏放大器	212
3.6.2. 差动式相敏放大器	215
3.7 放大器中的干扰和噪声	219
3.7.0. 引言	219
3.7.1. 干扰的来源及其消除方法	219
3.7.2. 放大器中的固有噪声	223
*3.7.3. 在放大器中采用负反馈以抑制干扰和噪声	225
第三章习题和思考题	226
第三章参考文献	234

緒 論

0.1 本課程的內容和任務

工業電子學是一門研究在工業中應用電子技術的學科，而電子技術則是一種應用電子管、離子管、半導體管等電子器件來組成電路、裝置等，以服務於生產和試驗研究的科學技術。

本課程講述工業電子學的基礎，內容包括三個方面：一是“管”，在這部分中討論各種工業電子學中最常用和基本的電子器件的工作原理和特性；二是“路”，在這部分中論述由這些電子器件組成的基本電子電路的工作原理、分析方法和性能；三是“用”，在這部分中介紹一些具體的電子設備，主要是講幾種基本的電子儀器。這三者之間，則以“路”為中心。在討論“管”時，其深度以能基本上滿足使用要求和講清電路即可；而“用”的部分，則是舉一些實際例子，以幫助讀者更好地運用學過的基本電路，並了解儀器的使用和有關測試技術。

本課程中關於電子電路的分析，是建立在“電工基礎”課程中電路理論的基礎上的。由於電子器件是非線性元件，因此電子電路的分析一般較為複雜。為了簡化計算，對於這些電路，通常都是從工程觀點出發，採用一些合理的簡化方法，以獲得所需的足夠準確的結果，這是學習本課程時須注意的一個特點。讀者應了解應用這些簡化計算時具有的条件。在分析電子電路時，又常涉及非正弦波問題和過渡過程問題，應隨時複習“電工基礎”中的有關部分。

本課程是一門技術基礎課，既著重於基本理論的闡述，更應將

理論与实际密切联系,加强电子技术方面的运算、实验和看电路图的基本功训练。从课程的性质来看,要求读者对基本的电子电路能进行分析计算,从而为以后理解各专业中用到的电子设备的工作原理、性能和正确使用打下基础。在各专业中都毫无例外地要用到电子测试设备,其中除一些常用的电子仪器如电子管电压表、电子示波器等将在本课程内讲解外,其他的电子设备还有很多,可以在本课程的基础上经过进一步的学习来掌握它们。现在举一些应用电子设备的例子:如对电机、电器专业来说,有电机的离子励磁系统和电子-磁放大器调节器等;对高压技术和电气绝缘及电缆技术两专业来说,有产生直流高压的测试设备和许多特殊用途的电子仪器等;对工业企业电气化及自动化专业来说,有电气自动化中所需要的电子-离子控制和调节装置及高频加热炉等;至于对发电厂电力网及电力系统专业来说,在遥测遥控和继电保护装置及直流输电技术中,又与工业电子学有密切联系。

0.2 工业电子学的发展

本世纪初,电子技术最初在通信领域中有迅速的发展。随后,由于适应工业生产高度增长的需要,就逐步形成了这一门称为“工业电子学”的新的独立的学科,它迄今还在不断地继续发展。[参 0.1; 参 0.2]。

在现代企业中广泛应用着的自动化设备,其中不少是属于工业电子学范畴的。许多电气装置中,要求把交流电变为直流电,或其他电流种类的变换,这些都可以利用电子学的成就来更好地完成。工业中一些新的工艺,例如高频加热、超声波测试和加工等,也往往与电子技术有密切的联系。新的电子测试仪器,为生产和科研工作创造了良好的条件。半导体和脉冲技术等学科的兴起,又为

工业电子学的进一步发展提供了广阔的前景。例如电子计算技术在工业中的应用近年来也日益增加。

工业电子学是一门新兴的技术,利用它来实现生产自动化,改进产品质量,提高劳动生产率,改善劳动条件,使生产达到又多又快又好又省,这是符合社会主义建设的需要的。但是在资本主义国家中,自动化程度愈高,资本家就可以有更多的剥削,带来了更多的工人失业,这个矛盾是无法解决的。由此可见,不论哪一门科学技术,在不同的社会制度中,必然会有不同的发展结果。

解放以前,我国的半封建半殖民地的社会性质,决定了我国工业的落后性,工业电子学这门科学技术在那时也是“一穷二白”的。解放后,在党的领导下,我国开始兴建了一大批先进的社会主义工矿企业,这些企业对工业电子学有着迫切的要求,因此促使工业电子学也迅速发展。生产和研究工业电子学装备的企业和事业单位随着也日益增多。1958年以来,我国的社会主义建设进入了一个新的阶段,在工业电子学的发展方面也是如此[参0.3]。一系列精密的电子仪器和复杂的电子设备(例如电子计算机、电子显微镜)以及大功率变流装置(例如供电于电气机车的整流器,高频焊接用的变频器)等,都已能自己设计和制造。工业电子学的应用范围日益扩展,生产水平不断提高,技术队伍在迅速成长。可以深信,在党的社会主义建设总路线的光辉照耀下,经过我们的艰苦奋斗,我国工业电子学的生产水平和科学水平,一定会获得更大更快的发展和提高。

参考文献

0.1 蔣大宗:“电子学在工业中的应用”,《电世界》,1956年第8期。

0.2 И. Л. Каганов:“Применение электроники в промышленности”,《Электричество》,1953,№. 7,27—40 頁; №. 8,16—23 頁。譯文見林津譯:“电

子学在工业中的应用”，《电器工业》，1956年第3期，12—16頁；第4期，25—27頁；第5期，19—22頁；第6期，18—21頁；第7期，37—39頁。

0.3 “新中国无线电工业的十年”，《无线电》，1959年，第10期。

第一章 不控整流器

1.0 概述

由于生产和科学技术的发展,直流电的应用愈来愈广泛,例如在自动控制系统、调节系统、测量设备中,在电机励磁系统中,在充电设备中,都要用直流电。此外,在无綫电设备和各种电子仪器中,一般也都必須在直流供电下才能工作。又如在超高压输电中,采用直流电也有它的优越性。

但是发电厂所生产的大都是交变的电流,例如在一般的电力网中就是用 50 赫的交流电供电,这样,电力生产方式与用电需要之間发生了矛盾,这个矛盾可以通过整流器来解决。所谓整流器,就是一种将交变电能变换为直流电能的能量变换器。

一个简单的整流电路如图 1.0.1, a 所示, 图中“ D_{lx} ”^①为理想整

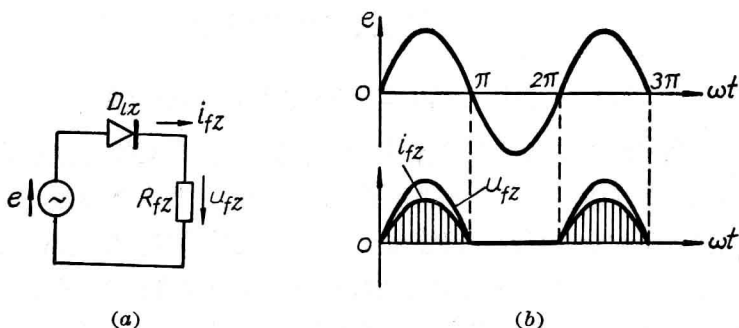


图 1.0.1. 简单的整流电路。

(a) 电路图; (b) 波形图。

① D 代表“二极管”(包括电子、离子、半导体二极管); lx 代表“理想”(lǐxiǎng)。

流器件的表示符号, R_{fz} ^① 为负载电阻, 电动势 e 、电压 u_{fz} 及电流 i_{fz} 的假定正方向用箭头表示, 其中 e 的方向表示电位升, 而 u_{fz} 的方向则表示电位降。所谓“正方向”即指这些量为正值时的方向。图 1.0.1, b 为电路中 e 、 u_{fz} 、 i_{fz} 的波形图。

整流器件是整流器中主要的组成部分, 它具有单向导电的性能, 也就是说, 当加于整流器件两端的电压为某一种极性时, 可以有较大的电流通过, 而当加于它两端的电压极性相反时, 则在同样的电压下, 电流为零或者很小。这样, 在电路中应用了整流器件, 就可能实现把交变电能变换为直流电能。

整流器件可以分为三类, 即电子管(真空管)、离子管(充气管)和半导体管。

在这一章里, 我们先讨论三种类型的整流器件, 然后分别讨论整流电路和滤波电路。通过对本章的学习, 希望能够了解各种整流器件的性能和特点, 并掌握各种整流电路的基本工作原理、分析方法及其应用范围。

1.1 热阴极真空二极管

1.1.1 热阴极真空二极管的构造和工作原理

热阴极真空二极管(简称真空二极管)的最常见的两种外形如图 1.1.1 所示。图 1.1.2 表示真空二极管的一些内部构造。真空二极管是一个密封的玻璃管或金属管, 管内被抽成高度真空, 其压强达 10^{-6} — 10^{-7} 毫米水银柱的数量级。在管内装有两个电极, 一个是阴极, 另一个是阳极。电极的引线是通过玻璃与管外的金属管脚相联接。阴极是用来发射电子的, 由于它是利用热电子发射

① fz 代表“负载”(fùzài)。

原理来产生电子的,因而用来制造阴极的材料要具有較低的逸出功,并具有能在足够高的温度下运用的性能。在各种阴极材料中,以氧化物阴极用得最广泛,这种阴极通常以鎳或鎳合金作芯料,上塗一层鋇、鋇等氧化物而成。电子管的阴极按加热的方式又分为直热式和間热式两种,如图1.1.2所示。直热式灯絲通以电流加热后直接发射电子,而間热式的灯絲只是用来加热阴极,使阴极間接受热而发射电子。在电子仪器中以間热式用得較多。

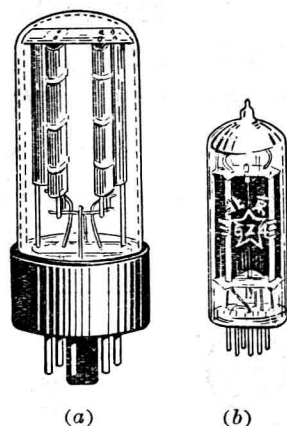


图 1.1.1. 真空二极管的外形。

(a) 玻壳較大的真空二极管;
(b) 姆指型真空二极管。

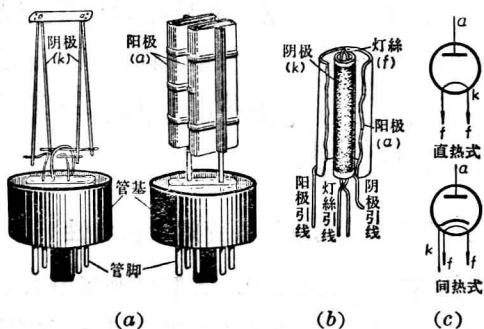


图 1.1.2. 直热式与間热式的内部构造及符号。

(a) 直热式真空二极管的阴极和阳极构造; (b) 間热式真空二极管的灯絲、阴极和阳极构造; (c) 直热式和間热式阴极的真空二极管的符号。

阳极是用来接收电子的,它一般是用鎳、鋁、鋇或石墨等制成,常制成扁圓形或圓筒形圍繞在阴极之外。

因此从发射电子的性能方面来看,真空二极管的阴极和阳极是不同的,只有阴极能发射大量电子,而阳极在正常工作情况下只接收电子。

現在我們來說明真空二極管的單向導電作用。當燈絲接上電源(通常均用交流電源)後,陰極因受熱而溫度升高,從而把電子發射到周圍的空間,如果在陽極和陰極之間外加一直流電源 E_a , 並且把陽極接到電源的正極上,陰極接到電源的負極上,如圖 1.1.3 所示,那麼,由陰極發出來的電子,在陽極正電場的吸引下便向陽極移動,于是就形成了由陰極到陽極再經過電源回到陰極的電子流,電流的方向如圖 1.1.3 所示。

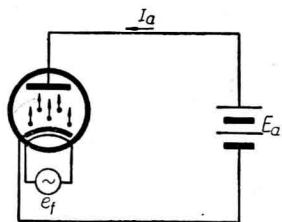


圖 1.1.3. 真空二極管的導電狀態。無電流通過。

不難推知,當我們用一個交流電源 e_a 以代替直流電源 E_a 時,在真空二極管的陽極回路內將只有單方向的電流流過。

由此可見,真空二極管具有單向導電性,而且只有它的陽極電位高於陰極電位它才導電。

1.1.2 真空二極管的伏安特性

為了研究真空二極管的性能,我們可利用圖 1.1.4 所示的電路,以實驗的方法測出這種管子的陽極電壓 u_a 與陽極電流 i_a 的關係曲線,如圖 1.1.5 所示。這種曲線稱為真空二極管的伏安特性。

在圖 1.1.5 中,讓我們先研究一下當燈絲電壓 $U_f = U_{fe}^{\text{①}}$ 時的那條曲線,在坐標原點 O 以左的部分,稱為截止區,這是由於陽極對陰極的電位為負,陽極不但不吸引電子反而排斥電子,故陽極電流 $i_a = 0$ 。在曲線的 Oa 部分, u_a 為正,部分從陰極發射出來的電子,

① e 代表“額定”(édíng)。

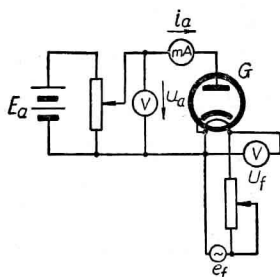


图 1.1.4. 求二极管特性曲线所用的电路图。

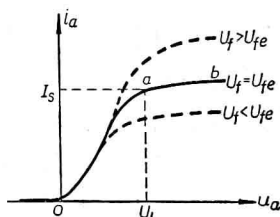


图 1.1.5. 真空二极管的伏安特性曲线①。

可以到达阳极,因此外电路中有 i_a 流过,并且 i_a 随着 u_a 的升高而增大。当 u_a 继续升高,到达曲线的 ab 部分时,从阴极发射出来的电子都将被阳极吸去,因此 i_a 到达了饱和,这时即使 u_a 增加, i_a 也几乎不甚变化。这一饱和电流的大小,与每单位时间从阴极发射出来的电子数有关,它决定于阴极的材料和加热温度。

现在着重讨论 Oa 部分的伏安特性。我们知道,当阴极加热后,各电子以不同的初速度从阴极表面发射到阴极和阳极之间的空间,由于电子本身是带负电的,因而在阴极和阳极之间就形成了负的空间电荷(图 1.1.6),这些电荷必然产生一负电场,使电子受到排斥作用。在 $u_a = 0$ (即把阳极和阴极短接,两个电极之间没有外加电场)的情况下,只有极少数初速度较高的电子才能克服由空间电荷造成的负电场的排斥作用而到达阳极,大部分电子则重返阴极。因此 i_a 是很小的,一般可以忽略。当正的 u_a 逐渐增高时,阳极与阴极之间有了外加的正电场,以帮助阴极发射出来的电子克服空间电荷效应而流向阳

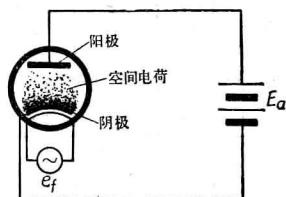


图 1.1.6. 真空二极管的空间电荷效应。

① f, s 是国际通用符号, f 代表“灯丝”, s 代表“饱和”。