

高等学校教学用书

电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第一卷 电子技术

上 册

И. Л. 卡加諾夫 著

吳 白 純 等 譯

人民教育出版社

73.691
170
1-1

高等学校教学用书



电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第一卷 电子技术

上册

И. И. 卡加諾夫著

吳白純 陈閱德 張克潛 馬瑞霖 万永熙譯

李敬永校

24620/13

100.1.29
人民教育出版社

本书系根据苏联国立动力出版社 (Государственное энергетическое издательство) 1950 年出版的卡加諾夫 (И. Л. Каганов) 所著“电子与离子变换器(工业电子学原理)” [Электронные и ионные преобразователи (основы промышленной электроники)] 第一卷译出的。原书经苏联高等教育部审定为动力高等学校、电工高等学校以及动力工程系和电工工程系用的教科书。

原书共分三卷。第一卷讲述电子技术，中译本分上下两册出版。上册包括四章；第一章讲述整流管的一般理论；第二章讲述半导体整流阀及其应用；第三章讲述电子整流管；第四章讲述具有栅极控制的电子管。

本书也可供在工业电子学方面工作的工程师参考。

本书由吳白純、陳國德、張克潛、馬瑞霖、万永熙五位同志译出，由李敬永同志校訂。

电子与离子变换器

(工业电子学原理)

第一卷 电子技术

上册

И. Л. 卡加諾夫著

吳白純等译

(北京市书刊出版业营业许可登记证出字第2号)

人民教育出版社出版(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 15010·523 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 10 $\frac{7}{16}$

字数 245,000 印数 7,701—10,200 定价 (7) 年 1.20

1957 年 8 月第 1 版 1961 年 12 月北京第 7 次印刷

序

近几十年来，电子学有非常大的發展。除了在無線电技术設備里利用电子学获得了巨大的成就以外，电子学在各种工業設備中的运用也在增長，并获得多方面的發展。这些应用就开拓了一种技术領域，这个領域称为工業电子学。

工業电子学可根据其用途分为两个部門：

- a) 控制和量測系統的电子学；
- b) 交流系統的电子学或动力电子学。

控制系統电子学是無線电电子学的繼續發展，后者为無線电工程的广泛应用开辟了道路。無線电工程發展的基础是無線电的發明者阿·斯·波波夫(А. С. Попов)光輝的工作所奠定的。

無線电工程的进步和随之而来的工業电子学的發展是与生产放大电子管和振荡电子管紧密联系的。

虽然新發展的技术部門对于电子管的生产提出了严重的要求，并且从 1914—1915 年起已有了尼·德·帕帕列克西 (Н. Д. Папалекси) 所設計的放大电子管，但生产电子管这一事業在偉大的十月社会主义革命以前进行得还很慢。其原因主要是在于沙皇俄国技术落后和反动的当权階級屈膝于外国的科学和技术之前。只有在偉大的十月社会主义革命以后，由于列宁的特別指示，建立了一个为了研究放大电子管和振荡电子管的尼热戈罗德 (Нижегород) 無線电實驗室，同时把列宁格勒的一些零星的小企業合成为一个大企業，开始制造放大电子管和振荡电子管。还在电子管發展的更早的一个阶段，姆·阿·龐契-勃魯耶維契 (М. А. Бонч-Бруевич) 和阿·阿·車尔納曉夫 (А. А. Чернышев) 的著作对电子管作了很大的改进，后者建議采用加热陰極。斯維特蘭 (Светлан)

工厂职工的工作对电子管技术进一步的发展有很大影响，这工厂是在斯·阿·維克辛斯基(С. А. Векшинский)的领导下进行工作的。

1888年,阿·格·斯多列托夫(А. Г. Столетов)所发现的光电现象,为光电器件奠定了发展的基础。在波·維·季莫费耶夫(П. В. Тимофеев)领导下设计了一些初期的国产光电器件,并把它们运用到工业上去。

在动力电子学系统中,离子器件(汞弧整流管、充气管和闸流管)得到主要的应用。初期的一些国产的玻璃汞弧整流管是在維·波·沃洛格金(В. П. Вологдин)领导下设计和制造的,而金属汞弧整流管则在維·克·克拉里温(В. К. Крапивин)的领导下设计和制造的。初期的一些国产的工业用充气管和闸流管,以及多次点火的汞弧整流管(引燃管)是在斯維特蘭工厂在尤·德·保尔第利(Ю. Д. Болдырь)和阿·姆·歇烈歇夫斯基(А. М. Шерешевский)的领导下设计出来的。这些器件最初的研究是在全苏电工研究所进行的。

在科学院物理技术研究所里,在阿·費·約飞(А. Ф. Иоффе)领导下所进行的研究工作大大促进了半导体整流器件的发展和在生产上广泛应用。

随着器件的发展,变换线路也有了发展。維·費·米特盖維奇(В. Ф. Миткевич),阿·派·盖尔雄(А. П. Гершун),尼·德·帕帕列克西,格·伊·巴巴特(Г. И. Бабат)等人在设计这些线路方面进行了一系列的研究。

在初期研究的基础上组织出产工业用的最初几批器件,这只是苏联制造电子和离子器件的巨大发展计划的最初阶段。除了生产无线电电子学和工业电子学上用的多种器件的工业以外,苏联还建立了生产工业上用的整套电子设备和离子设备的若干专门生

产部門。

隨着工業的發展，这种技术的創造者和革新者的数目也飞快地增長了。在我們的社会主义国家里，对于他們进行創造有着極美滿的条件。

在本書各章叙述他們所完成的研究时所列举的个人名字只不过是很多科学家、工程师、技术員中的一小部分。他們遵照我們党和人民的領袖斯大林的号召，創造了技术的最新典范，提高了社会主义工業的生产水平，并在动力系統的工作中达到高度的指标。

現在，摆在我們国家面前的任务就是設法尽量提高劳动生产率和逐步消灭智力劳动和体力劳动間的对立，在这时候机床和生产工具以及电力系統的一切环节的自动化就具有特殊的作用。在自动化中的主要环节便是控制系統的电子学。

超远距傳輸能量的問題对于我們国家有非常大的意义，解决这一問題时無疑地会实现直流在傳送能量方面所具有的巨大优点。动力电子学在解决發展我們国民經济計劃(運輸电气化、有色冶金、化学工業)中的其他問題上的作用也是同样重要的。

电子学在各种各样的技术領域里面的先进作用，給高等工業学校、首先給动力学院和电工学院提出如下迫切任务：用足够巩固的关于电子学基础的知識来武装年青的工程师幹部。

这也就是为什么高教部特別注意到首先在电工学院和动力学院的电工类各專業里如何講授工業电子学問題的原因。对于所有这些專業采用了統一的“工業电子学”教学大綱，只是所講授的分量根据各專業規定的各篇章学时的不同而有所增减。

根据批准的教学大綱編写了“工業电子学基础”这本教科書。本書共分如下兩册出版：1)电子技术，2)离子技术。这本书是“电子和离子变换器”那本教科書的进一步的發展，原書在1937年和1940年出过兩版。这本书与以前兩版所不同之处是：在这本書里

对于在电子控制系统中所用的器件和线路给予了较多的注意。例如,在这种系统里有非常大的意义的电子放大器,已专设一章。关于电子振荡器部分,由于高频在各种工业设备里有广泛的应用,并且日益扩大其应用范围,也大大扩充了篇幅,并且也分为独立的一章。由于半导体整流阀和光电管在工业上的应用已经扩大,叙述它们的两章也就大大扩充了。

又有了新的一章,即“电子射线器件及其应用”,这章是说明这些器件的物理性质、工作特性及其在现代工业电子学中的作用。

在本书的第二册里,编入新的一章,即“辉光放电器件”,而且把讲述热阴极器件和水银阴极器件的两章改写了很多,因为这些器件在最近十年得到很大的改进。

在决定本书的内容以及各章和全书的结构时,反映了荣获列宁勋章的莫斯科动力学院工业电子学教研组教师们多年来在不同的专业和专门化里所进行的关于“工业电子学”这门课的教学过程的安排。对于那些根据教学计划规定的时数不足以授完教学大纲上所有各部分内容的专业,在本书分节时已考虑到可以使学生根据教师的指定,摘要阅读这一部分或那一部分。

本书的手稿是经过莫斯科动力学院“工业电子学”教研组的教师集体详细讨论过的。讨论的结果已由作者在手稿付印前的最后修改中予以考虑。

作者也接受了波·维·季莫费耶夫教授关于光电管这一章、斯·尼·克利才(С. И. Кризе)关于放大器这一章及格·阿·吉共诺夫(Г. А. Тягунов)教授关于电子整流管这一章所提出的若干意见,表示感谢。

作者也感谢本书的评阅人维·费·富拉索夫(В. Ф. Власов)教授和格·伊·巴巴特教授于本书准备付印时在审阅手稿上化了很大的劳动。

第一卷上册目录

序	vii
緒論	1
第一章 整流的一般理論	6
1-1. 整流是电流变换的一种型式	6
1-2. 簡單的整流綫路・基本定义	7
1-3. 整流閥的型式及其分类	9
1-4. 对整流閥的基本要求	12
1-5. 整流閥組合体通过变压器接連电源・計算綫路时的原始数量及未知数量	13
1-6. 單相半波整流	16
1-7. 單相全波整流	23
a. 零点出头綫路(23) 6. 單相桥式綫路	26
1-8. 三相整流	28
a. 零点出头綫路(29) 6. 三相桥式綫路	38
1-9. 电阻和电感負載时整流器的工作	43
a. 半波整流(43) 6. 全波整流	48
1-10. 电阻和电容負載时整流器的工作	51
1-11. 負載为反电动势时整流器的工作	56
a. 用电阻限制电流(56) 6. 用电感限制电流	60
1-12. 整流器輸出端电压的脉动	69
1-13. 平波濾波器	71
a. 电感濾波器(73) 6. 电容濾波器(74) 7. F-型濾波器(79)	
r. II-型濾波器(82) 8. 具有并联諧振支路的濾波器(84) 9. 具有	
串联諧振支路的濾波器(阻寒濾波器)	87
1-14. 整流器电路中的功率、效率和功率系数	88
第二章 半导体整流閥及其应用	92
2-1. 半导体整流閥的类型	92
2-2. 工業用的半导体整流閥和整流閥組合体的制造工艺和結構	93
a. 氧化亞銅整流閥(93) 6. 硒整流閥(97) 7. 硫化銅整流閥	99
2-3. 金屬、絕緣体、半导体的导电率	101
2-4. 整流作用的理論	106
2-5. 伏安特性・整流閥的等級・整流閥的內阻	109
2-6. 整流閥的形成	114

2-7. 整流閥特性曲綫的不稳定性・衰老与渐变	176
2-8. 整流閥的强度・整流閥的击穿电压	178
2-9. 整流閥的电容	120
2-10. 整流閥組合体的电流和电压・中和系数	121
2-11. 整流閥組合体中的功率損耗	127
2-12. 整流閥組合体的效率	129
2-13. 整流閥柱体的發热・允許的負載电流	131
2-14. 半导体整流器的計算・等效綫路・外部特性・工厂出品的整流閥柱体的 參量	129
2-15. 可調整流閥电桥的計算・等效綫路	149
2-16. 电阻-电感負載时可調电桥的計算	151
2-17. 电阻-电容負載时可調电桥的計算	162
2-18. 純阻負載及有反电动势时可調电桥的計算	166
2-19. 与整流閥电桥串联的可調电抗器的等效綫路參量的計算	169
2-20. 半导体整流器的应用	175
a. 蓄電池充电(176) 6. 直流磁性放大器(178) b. 無触点快速作用的 电流調节器(179) r. 电流稳定器(180) A. 同步机的自激(181) e. 具有电压校准的同步机的复激(182) ж. 小功率电动机的电源供 給(183) B. 电解池的电源供給(184) H. 繼电器綫路的电源供給(184) K. 量測綫路的电源供給(185) L. 遙控綫路	186
2-21. 半导体整流閥的新型式及其应用	186
2-22. 半导体整流閥的試驗	183
a. 导向电压和电流(189) 6. 反向电流	189
第三章 电子整流管	190
3-1. 構造和作用原理	190
3-2. 真空和自由行程	191
3-3. 气体分子的热速度・麦克斯韋分配函数	193
3-4. 金属内电子的能量・金属表面的电位壁壘	197
3-5. 热电子發射	199
3-6. 陰極附近的外部电场对遏出功的影响・激活表面的發射・激活陰極和敷 氧化物的陰極	203
3-7. 陰極的發射特性・体积电荷、电子初速和接触电位差的影响	206
3-8. 板極电流和电压間的关系	211
a. 平板电極(213) 6. 圓柱形电極	216
3-9. 电子整流管板極特性和参数	219
3-10. 板極散射功率	223
3-11. 沒有灯絲的整流管・場致电子發射	224
3-12. 电子器件的整流强度・击穿电压	225
3-13. 电子整流管的类型和参数	226

目 录

3-14. 电子整流管的構造.....	229
3-15. 低压电子整流器・典型线路的計算.....	234
3-16. 高压电子装置.....	242
a. 試驗电纜絕緣用的裝置(248) б. 高压直流电源裝置・倍压綫路(244) 等	
в. 線琴管的电源供給・三倍电压綫路.....	246
3-17. 电子檢波装置.....	248
第四章 具有柵極控制的电子管	250
4-1. 电子管中柵極的作用	250
4-2. 柵極和板極共同作用的等效电压的計算・陰極电流的計算公式	254
4-3. 負柵極时三極管的靜态特性曲綫	261
4-4. 負柵極时的柵極电流	265
4-5. 正柵極时三極管的靜态特性曲綫	269
4-6. 电子管的靜态參量	274
4-7. 四个电极的电子管(四極管)	285
4-8. 五个电极的电子管(五極管)	292
4-9. 复合电子管和变频电子管	308
4-10. 特种电子管.....	307
a. 电子量測管(308) б. 电子指示管	312
4-11. 电子管中电流的波动(噪声).....	314
4-12. 具有柵極控制的电子管的应用.....	316

参考書目

中俄名詞对照表

緒 論

电子器件和离子器件的应用尽管广泛而多样，这些器件的功用却多半可以归结为把一种电流变为另一种电流，或者把能量加以变换。各种变换型式的结合就为电子学开辟了非常广泛的应用道路，既可应用于控制和量测的系统，又可应用于动力系统。这种应用所以能获得巨大效果，是由于利用电子器件和离子器件所发生的变换过程可达到非常快的速度、高度的准确和高度的效率。同时还可以达到其他器件完全不能达到的灵敏度。例如，用量测的离子器件(质谱仪)，我们就有可能来对物体结构进行非常精细的化学分析，同时观察的人根据表的指针可判断在门德列夫的周期表中所列元素的原子序数(这里也包含同位素)，而根据另外一个仪表的指针，观察者又可很精确地判断所研究的物质含元素的百分比。

利用其他仪器，例如，电子显微镜，观察者不仅可以研究物体的结晶结构及物体中所有微小的混合物，而且如果特殊调节一下，就可以使某些物质内各个分子和分子团也可看得见。

利用电子量测器件，可测量小到 10^{-17} 安的电流和小到 10^{-10} 伏的电压。量测这样小的电量，同时利用电子(阴极)示波器又记录出它们连续变化的过程，还能够把非电量(温度、变形、液体成分、气体成分等等)的量测过程加以变换；这样就为量测技术打开了极为广阔的园地。

把一些非常弱的信号放大到实践所要求的水平，这样就使得许多微小的量测成为可能，这些量测从前是完全不可想像的。比如，利用电子学，可以在许多情况下量测与心理活动有关的人体的

生理状态，而这些量測結果就很明显地記錄在电子射綫管的显光屏上。

在零件制造中精密到1微米的不准确对于机械量測仪器來說是完全不能發現的，如利用电子仪器就不仅可以很容易發現这些微小的不准确，而且很容易將需要这样准确度的零件作精密的挑选分类。

电动机的轉速及电机的輸出电流和电压的微小改变，都可以放大和記錄，这不但可使电动机和电机的工作情况保持高度的穩定，而且还可以使机器的工作情况能符合于任何所需的工况圖。例如，光电仿模机床可以使非常复杂的零件加工，在加工过程中机床随着所决定的圖来运动。

光电仪器不仅可以在量方面区分最远的光源的光强不同，例如天空上的星球，而且可以使人眼不能觉察的物体可以看得見。新型的电子离子器件，例如电子离子开关，电子离子繼电器，电子离子指示器，已經可以根据新的方法解决許多电路轉換的問題。

利用电子器件可使任何复杂动作的系統自动化得到实现，直到制造出电子計算机，它可以进行任何复杂的数学計算。这种自动化及其用来控制工作过程和操縱遙远物体(遙控和远距离操縱)已在苏联社会主义經濟里很成功地得到广泛的应用。

电热加工的广泛应用(例如金屬的淬火和融化，半导体的加工，木材的干燥，电焊，真空加工等等)亦属于电子学正在加强發展的領域。

在較强大的变换系統里，离子器件得到特別广泛的应用。这些器件不仅可以整流和变流，而且可以把一种电流型式变为另外一种电流型式，同时它的經濟指标是非常高的。因为利用离子器件来整流的經濟指标高，所以应用直流的范围已大大扩充了。根据不完全的資料，現在所用的直流电不少于电厂总电量的20%。

因为直流在技术和經濟方面具有高度的优越性，在冶金和金屬加工工業中很广泛地应用直流。如果把电机和离子器件有机地結合起来，就产生了一些新的拖动型式，不仅在直流方面，而在交流方面，同时也产生了一些新型的發电机。像斯·伯·尤其茨基(С. В. Юлицкий)的同步电机系統就是屬於这种类型，其中直流的励磁机用具有可以自动調節的半导体整流器来代替。

在利用直流向远方輸出电力方面，姆·奥·达利渥-达伯拉渥利斯基(М. О. Доливо-Добровольский)作了很多研究工作，而这些研究对苏維埃国家有很大的貢獻，現在由于在制造大功率的高压汞弧管方面有很大成就，上面这种輸电已經大規模实现了。自然，工業电子学如此广泛的发展和应用也应该在“工業电子学基础”这門普通課程得到反映，把叙述这种发展的主要方向作为自己的任务。除了研究在工業电子学各个方面所广泛应用的器件的性質和特性以外，还必须說明与应用这些器件有关的电路的性質，并介紹最通用的綫路計算方法。

因此，本書的每一章都有綜合性的材料，包括器件的說明及其工作性質的分析、它們的結構、器件的技术特性和参量，也包括一些应用这些器件的典型綫路的叙述和其中某些綫路的計算。

在說明器件的工作性質和特性的时候，作者力圖把这些性質和器件工作的物理过程联系起来，以便防止教条地掌握这些教材，同时帮助学生了解辯証發展的道路，遵循这些道路器件获得不断改进。

在研究綫路时，作者力圖使讀者逐漸的熟習变流和变能的各种基本型式，这些型式在現代电子学中得到广泛应用。首先是下面几种型式：

- 1) 整流——所謂整流是把交流变为直流；
- 2) 变流——所謂变流是把直流变为交流；

3) 放大与振蕩——就是在能量方面把直流变为交流,而这些交流是根据加到器件栅压的交流变化規律而变化的。

4) 变频——就是把某一頻率的交流变为另一頻率和相数的交流。

5) 調制与檢波(解調)——就是利用檢波和整流把振蕩的一种形式(頻率,振幅或相位)正向和反向变成另外一种形式的振蕩。

把射綫能变为电能(光电器件)和把电能变为光能(电子射綫器件和气体放电光源)也都是利用电子和离子器件完成的能量变换型式。

对于在操縱和調节系統中所应用电子设备來說,通常是在一个設備中联用几节变换。例如,一节放大部分或振蕩部分还需要附加一节整流部分,因为供給放大和振蕩电子管需要直流电压,而这种供給设备的电源通常是交流的。一个光电部分通常也需要直流来供給。所以,整流部分是多数电子设备的一个組成环节。

極大多數的电子离子器件具有單向导电性,即除了完成其他一些作用外,首先完成电子整流管的作用,这是很重要的事实。在整流綫路里,这些器件就完全是为了完成这些作用的。根据这两个原因,本書第一卷材料的叙述,从与整流理論有关的一些基本規律的研究开始。

第一章的目的,不只是使讀者了解一个綫路对于簡單的电子和离子器件——电子整流管——所提出的要求,而且使讀者熟悉那些在小功率和中等功率的整流設備里最常用的簡單綫路的計算方法。

在第一章里整流管是理想化了,然后随着研究各类整流管的物理性質和工作特性。在本書每一章末尾都按采用这类整流管的具体綫路进行准确計算。这里,也研究了这些器件在工業設備中的应用。

在本書第五章里，也對放大綫路的計算給以極大的注意。對於利用或設計整流和放大設備的工程師來說，最時常遇到的是要計算電子設備中整流和放大部分中的參數。

為了具體化起見，在個別情況下，還附有計算示例，但因本書篇幅有限，例子的數目是不多的。這種情況也同時使作者必須：

- 1) 相當壓縮某些個別綫路作用的描述。
- 2) 在若干情況下，略去中間數學推演，有時略去書內所給公式的推導，而希望讀者找專門的指導書來參考。

在書末所列的參考書目，只包括那些與本書正文有關或可作為本書教學參考用的書籍。

第一章 整流的一般理論

1-1. 整流是电流变换的一种型式

正如緒論中所指出，整流是把一种型式电流变换为另一种型式电流的最通用的方式。我們在控制系統和調節系統的供电部分中，在量測系統中，在充电設備中，在电子离子拖动技术中，在电机励磁的新系統中，以及在一切需要直流电或者直流具有优越性的动力部分中，都可以遇到各种不同型式的整流。

电子或离子整流器在一般的情况下由下列三部分組成：

a) 整流閥部分，用以变交流为直流；

b) 变压器部分，用以改变电源交流电压的大小使之符合于整流器輸出所需的电压大小；

B) 平波濾波器部分，用以减低整流器輸出端的整流电压或电流的脉动。

在直流輸出一端承受各种不同負載的情况下，以上每一部分工作情况的說明和計算參量的确定，在本章所述的只适用于小功率整流設備和中等功率設備。

在本章所討論的各个部分綫路中的电流和电压的計算，是假定整流管和变压器都沒有內阻，此外，还假定整流閥只在一个方向通过电流（理想的整流閥）。这样不仅使計算簡單，而且可以概括到所有各种型式整流閥的下一步計算。

在后面的几章中，考虑到采用各种整流閥和各种負載时的整流閥內阻，然后又考虑到变压器綫圈的电阻，来进行准确計算，这种計算并不需要修改在第一章中所述的計算原理，而只是計算方

法进一步發展而已。

1-2. 簡單的整流綫路·基本定义

由金屬導綫構成的电路，電流向一方向流動和向另一方向流動的情況是一樣的，亦即电路的導電率與電流在电路中所流動的方向無關。因此，倘使將這個电路接到交流電源上，那么在电路中的電流亦將是交流的。

倘使擺在我們面前的任務是在由交流電壓 u_1 (圖 1-1, a 和 б) 供电的电路中得到固定方向的電流 (直流)，則這個任務可借加接一個機械整流子 (變換器，圖 1-1, a) 來解決，此整流子只是在交流電壓一周期的某些部分將电路周期性地下接通，或者可以借整流管 (圖 1-1, б) 來解決，它具有一種能力，使電流只在單一方向通過。

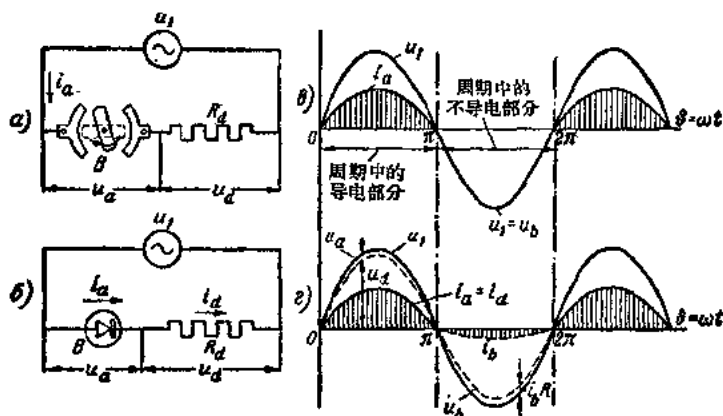


圖 1-1. 半波整流。

a—機械整流子綫路；б—電子整流管綫路；в—理想整流管的電壓和電流圖形；г—實際整流管的電壓和電流圖形。

當這種整流管接入电路時，電流只能在一個方向流過。把與此方向一致的電壓 u_1 取為正值，而把與此方向相反的電壓，即對應於迴路中不導電的方向者當做負值