

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 陳閱德 張克潛 馬瑞霖 万永熙譯

李敬永校

高等教育出版社

本書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(工業电子学原理)” [Электронные и ионные преобразователи (основы промышленной электроники)] 第一卷譯出的。原書經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書。

原書共分三卷。第一卷講述电子技术, 中譯本分上下兩册出版。上册包括四章: 第一章講述整流管的一般理論; 第二章講述半导体整流閥及其应用; 第三章講述电子整流管; 第四章講述具有柵極控制的电子管。

本書也可供在工業电子学方面工作的工程师参考。

本書由吳白純、陈閱德、張克潛、馬瑞霖、万永熙五位同志譯出, 由李敬永同志校訂。

电子与离子变换器

(工業电子学原理)

第一卷 电子技术

上册

И. Л. 卡加諾夫著

吳白純等譯

高等教育出版社出版 北京琉璃廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京華印書局印刷 新华書店总經售

統一書号 15010·523 開本 850×1168 $1/32$ 印張 10 $7/16$ 字數 249,000 印數 2,501—3,200
1957 年 8 月第 1 版 1978 年 1 月北京第 2 次印刷 定價 (10) ¥ 1.60

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) б. 單相桥式綫路	26
1-8. 三相整流	28
a. 零点出头綫路(29) б. 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) б. 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) б. 用电感限制电流	60
1-12. 整流器输出端电压的脉动	69
1-13. 平波濾波器	71
a. 电感濾波器(73) б. 电容濾波器(74) в. Г-型濾波器(79)	
г. II-型濾波器(82) д. 具有并联諧振支路的濾波器(84) e. 具	
有串联諧振支路的濾波器(阻塞濾波器)	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) б. 硒整流閥(97) в. 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・整流閥的内阻	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	116
2-8. 整流閥的强度·整流閥的击穿电压	118
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参量	139
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. 純阻負載及有反向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参量的計算	169
2-20. 半导体整流器的应用	175
a. 蓄電池充电(176) б. 直流磁性放大器(178) B. 無触点快速作用的电流調节器(179) Г. 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) 8. 电解池的电源供給(184) И. 繼电器綫路的电源供給(184)	
K. 量測綫路的电源供給(185) Л. 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	189
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逸出功的影响·激活表面的發射·激活陰極和氧化物陰極	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. 圆柱形电極	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

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. 試驗电纜絕緣用的装置(243) 6. 高压直流电源装置・倍压线路(244)	
b. 樂琴管的电源供給・三倍电压线路.....	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.....	303
4-10. 特种电子管.....	307
a. 电子量測管(308) 6. 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。各种变换型式的結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發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(質譜仪)，我們就有可能来对物体結構进行非常精细的化学分析，同时观察的人根据表的指針可判断在門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針，观察者又可很精确地判断所研究的物質含元素的百分比。

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結晶結構及物体中所有微小的混合物，而且如果特殊調节一下，就可以使某些物質內各个分子和分子团也可看得見。

利用电子量测器件，可測量小到 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(陰極)示波器又記錄出它們連續变化的过程，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極為广闊的园地。

把一些非常弱的信号放大到实践所要求的水平，这样就使得許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，可以在許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稳定，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任何一种电流型式，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. Б. Юдицкий)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节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應用也应该在“工業电子学基础”这門普通課程得到反映，把叙述这种發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、器件的技术特性和參量，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種基本型式，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柵压的交流变化規律而变化的。

4) 变频——就是把某一频率的交流变为另一频率和相数的交流。

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(频率,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,通常是在一个设备中联用几节变换。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。

極大多数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和离子器件——电子整流管——所提出的要求,而且使讀者熟習那些在小功率和中等功率的整流设备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设备中的应用。

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數學參考用的書籍。

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。

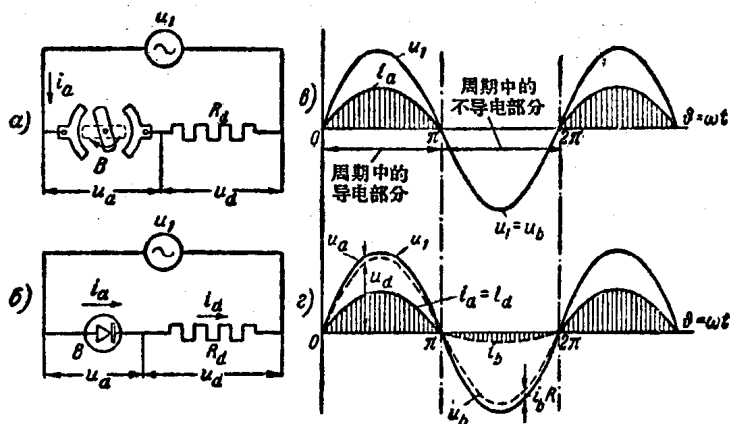


圖 1-1. 半波整流:

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

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。

倘使机械整流子旋轉的速度和接点接触時間調節得能在交流电压整个正半周期中使电路保持接通状态，則正如圖（圖 1-1, 6）中所示，电路中的电流在整个正半周期中都流过。当电压为負时，电路中無电流。

在較普遍的情况下，周期中的导电部分和不导电部分可能与交流电压的正半周期和負半周期一致。

讓我們来研究在一周期中导电和不导电部分中整流閥和負載电阻間的电压是怎样分配的。

倘使忽略整流閥内部的电压降，則我們可以得到这样的結論，即在导电的期間电源电压 u_1 全部为負載电阻所承受（圖 1-1, 6）。当考虑到在整流閥中的内部电压降 u_a 时（圖 1-1, 2），在导电期間負載电阻上的电压 u_d 小于 u_1 。

在周期中的不导电部分，即当电路中無电流时（圖 1-1, 6），电源电压 u_1 全部为整流閥所承受， $u_b = u_1$ ，因为此时整流閥使电路發生了中断。在某些实际应用的整流閥的型式中，某种（虽然实际上很小）电流 i_b 是可能产生的。这个电流称为反向电流，而在周期中不导电部分整流閥所承受的电压称为反向电压。当反向电流不存在时（圖 1-1, 6），則在这个电路中的反向电压决定于电源負半周波的电压，而当存在有反向电流 i_b 时，在整流閥上的反向电压 u_b 比电源电压 u_1 小 $i_b R_d$ （圖 1-1, 2）。

循导电方向的电流 i_a 称为正向电流，而与此电流相应的电压降称为正向电压，或称整流閥内部电压降。

在很多型式电子整流閥中的内部电压降 u_a 和反向电流 i_b 的数值小得很，以致当分析采用这些电子整流閥的各种綫路型式的作用时，最初可以忽略 u_a 和 i_b 的数值。正是由于这样，电子整流閥的性質才可以理想化了。因此，在正向电压和反向电流当做等于零的整流閥称为理想整流閥。一切实际整流閥只是在某种程度

上接近于理想整流閥。

圖 1-1, θ 中电压和电流的圖形是对应于理想整流閥的, 而圖 1-1, ι 中的圖形則是对应于实际整流閥的。

在本章中分析各种不同整流綫路时, 整流閥被認為是理想的。整流閥的内阻和反向电流对于綫路的工作情况和电流、电压数值的影响, 当我們在有关各章里分別介紹各种整流閥的物理性質以后, 对于每种型式的整流閥再單獨进行考虑。

通过負載 R_d 中的直流电流称为整流电流, 用 i_d 表示, 而負載上的电压則称为整流电压, 用 u_d 表示。

在圖 1-1, α 和 θ 中所示的只包括一个整流閥的最簡單綫路中, 整流电流仅仅在交流电压的半个周期中流过, 因此电流是断断续續的。

在綫路中利用許多整流閥时, 可以得到連續不断的整流电流曲綫, 这些整流閥在交流电压的每个周期中使电流交替通过。

1-3. 整流閥的型式及其分類

如上面所述, 为了整流, 可以使用: 1) 机械整流子, 它在一周期中按照工作情况所需要的时间使电路中断或者接通; 2) 电子整流閥, 它具有使电流只在(或者主要在)一个方向通过的特性。

在沒有获得像現在整流管所具有的这种优良的特性以前, 机械整流子在整流設備中被广泛地应用着。現在, 整流子由于在进行整流期間产生火花以及寿命較短的缺点, 在很大程度上已为电子整流閥所排挤。只在电流和电压很小的地方(量測电路, 可携帶的無綫电設備的电源供給电路), 以及在特殊的設備中, 还使用小功率机械变换器, 即所謂振动变换器, 和唯一的一种机械整流器——接触变换器, 其中采用了减小火花的特殊設備。

在这本書的範圍里, 我們不研究机械整流器。

电子整流閥的作用可以用原理圖的方式表示如圖 1-2, a。在

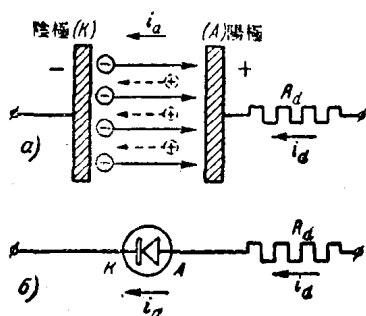


圖 1-2. 电子管作用圖解:

a—作用原理; b—符号表示。

这种电子整流閥中, 电流按單一方向流通是由于: 在电子整流閥中造成一些条件, 使一种符号的电荷, 例如电子, 仅能由两个电極中的一个(即陰極)發出。第二个电極(陽極)不放出电荷。因此, 仅当陽極对于陰極為正时, 电流才能通过整流閥。电流能維持一定的方向,

除了因电子向一个方向流动外, 还因为正离子通过整流閥向相反的方向移动。又因为按照历史上形成的概念, 我們已采取正电荷运动的方向做为电流的方向, 所以电流在电子整流閥中流动的方向是由陽極向陰極。在圖 1-2, b 整流閥符号中箭头的位置是与此方向相对应的。

按照隔开电極(陽極和陰極)的物理媒質的不同, 整流閥可以分为下列几类:

1. 半导体或固体的;
2. 液体或电解質的;
3. 电子或高度真空的;
4. 离子或充气的整流管。

最后一类又可按电極間所充气体的压力分为下面几类:

4a. 低压力的或真空的整流管, 其中压力 p 以水銀柱按毫米的几分之一或毫米来量計。

4b. 升高压力的或高压的整流管, 其中压力 p 为一大气压或更高的压力。

4a 类是最通用的一类离子器件。这一类还作进一步的分門

別類。

甲 依照陰極的型式可以分為：

4a α . 具有冷金屬陰極的器件；

4a β . 具有熱陰極的器件；

4a γ . 具有液體陰極的器件。

乙 依照放電的型式可以分為：

4a δ . 輝光放電器件；

4a ϵ . 弧光放電器件。

上面分類中所列舉的每一門類都有其主要的應用領域。

電解質整流閥壽命很短，效率較低，其應用範圍最小。這種整流閥在很大程度上已為更完善的一種整流閥——半導體整流閥所排擠。半導體整流閥的優點是在於壽命很長，又特別經濟，尤其是在低電壓領域內（在 60—80 伏範圍內）具有這些優點。高度真空整流管或電子整流管在下面各電源供給部分是非常廣泛應用的：控制系統，量測系統，調節系統和試驗設備。電子整流管中增添幾個附加的電極（柵極），可以起各種不同的作用。這種器件得到一個不十分正確的稱名叫電子管。後者是應用在一切高頻技術領域中的放大綫路、振蕩綫路、調頻和檢波綫路中。

離子器件（充氣管、閘流管、汞弧整流管）主要是應用在中等功率和大功率變換設備中。其基本優點是：具有能通過大電流的能力和有高度的效率。裝有液體陰極的離子器件（汞弧整流管）還有另外一個優點，即其壽命大大超過了其他真空型式的整流管的壽命。離子器件在最近幾年中被廣泛地用做光源和量測各種放射的器件。

在轉換輻射能為電能的真空器件中，光電器件得到了非常多的應用。

在量測技術中，電子示波器得到了很多的應用，其中電子射綫

管是主要的元件。

1-4. 对整流閥的基本要求

在轉到具体研究各个型式整流閥以前，我們来注意整流閥的基本技术数据(参量)是有益的，不論何种型式的电子整流閥，此数据足以决定它的品質。

第一个参量是在导电期間整流閥內部电位降落的大小。此数值愈小，則整流閥的效率愈高，同时在整流閥中电能轉变为热能的部分亦愈小。 u_a 对于整流閥效率的影响，在研究圖 1-1, 6 中的綫路和与此相对应的在圖 1-1, 2 中的圖形时可以得到解釋。

在导电期間，此綫路中的整流閥所消耗的瞬时功率等于：

$$p_a = u_a i_a, \quad (1-1)$$

而在同一期間內，給負載的瞬时功率是：

$$p_d = u_d i_d = u_d i_a. \quad (1-2)$$

如果整流閥的效率等于給負載的功率对于由电源得到的总功率的比值，則在忽略不导电期間的損耗时，我們可以得到效率的瞬时值

$$\eta = \frac{p_d}{p_d + p_a} = \frac{u_d i_a}{u_d i_a + u_a i_a} = \frac{u_d}{u_d + u_a}. \quad (1-3)$$

在那些型式整流閥中，如果其在导电期間內部的电位降改变很小，則公式(1-3)可以用来决定在整个周期中效率的平均值，但在这种情况下公式(1-3)中的瞬时电压值應該代以此电压的平均值。

公式(1-3)指出：

- 1) 当 u_d 的数值給定时，整流閥的内部电压降愈小，則其效率愈高；
- 2) 当 u_a 不改变时，整流电压愈高，則整流閥的效率也愈高。