

P.X. 希沙慕特金諾夫 著

直流电机的整流

冶金工業出版社

直流电机的整流

P. X. 希沙慕特金諾夫 著

陈蔚然 译

冶金工业出版社

本書闡述了直流电机整流的理論和实际經驗。材料是根据現代的离子傳導理論來敘述的。本書研究了电机运行和調整时所遇到的有关整流的主要問題，也反映了苏联冶金工业部所屬的一个大型冶金厂的电机运行和整流調整的經驗。

本書可供冶金工厂从事电气設備运行和检修工作的工程技術人員使用。

Р. А. Хисамутдинов
КОММУТАЦИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА
Металлургиядат (Москва—1953)

直流电机的整流

陈蔚然 譯

編輯：刘庚田

設計：魯芝芳 赵香岑

責任校对：陈一平

1953年9月第一版 1959年5月北京第二次印刷5,200册(累計10,700册)

$850 \times 1168 \cdot \frac{1}{32} \cdot 90,000$ 字 • 印張 $3 \frac{14}{32}$ • 定价 0.44 元

国家統計局印刷厂印

新华書店發行

書号0906

冶金工業出版社出版(地址：北京市灯市口甲45号)

北京市書刊出版業營業許可証出字第093号

目 录

序 言	5
第一章 整流的物理过程及理論	7
1. 整流的本質	7
2. 电刷接触的本質	12
3. 关于电解	19
4. 湿度对整流的影响	21
5. 接触电阻与接触电压降	22
6. 整流子的表面接触膜	29
整流子接触膜的可变性	31
影响整流子接触膜的諸因素	32
7. 摩擦与磨损现象	33
摩擦系数与影响摩擦的諸因素	34
8. 电刷上的压力	41
第二章 电刷装置、整流子与电刷的工作的分析	43
1. 电刷	43
2. 刷握	56
3. 整流子	57
整流子的表面状况	58
整流子表面的准备与维护	63
气隙的調整	71
第三章 观察与調整整流情况的方法	73
1. 火花和接触面情况的观察	73
2. 飞輪变流机组发电机整流的調整經驗	81
充分調整集流机构后的整流情况	81
集流机构失調时, 发生不能容許的火花	
的后果及火花形成的特性	83
减少发电机火花的嘗試	84

往后为减少火花而采取的办法.....	85
3. 建立有利整流条件的方法.....	88
建立有利的整流场.....	88
减少电抗电势.....	88
减少整流的附生电流.....	88
4. 检验与调整整流情况的方法.....	89
5. 检查与调整辅极的方法.....	90
用电刷的电位曲线法检查整流情况.....	90
用火花电流法检查与调整辅极.....	92
用无火花区域法检查与调整辅极.....	93
6. 辅极饱和对整流的影响.....	102
7. 主极对整流场的影响.....	103
8. 可调整转数的电机的整流特性.....	105
結論.....	106
参考文献.....	108

序 言

直流电力拖动装置广泛使用于国民經济事业中，特别是冶金工业（軋鋼机、高爐的装料系統等）中。

苏共第十九次党代表大会关于第五个五年計劃的指示中规定，1955年的生鉄产量要比1950年增长76%，鋼——62%，軋材——64%。

这就要冶金工业（其中包括軋鋼生产部門）大大地增設电力拖动装置。

И. Ф. 捷沃西安同志在第十九次党代表大会上的报告中說，在新的五年計劃期間（指1951年到1955年的第五个五年計劃——譯者），要生产比上一个五年計劃多九倍的軋鋼机。1955年为軋鋼机制造的电气設備应比1951年多三倍。

因此，直流电机的整流問題就有特別现实的意义。虽然，有关电机整流問題的資料已經发表了很多，可是，对这个問題的实用和实际的性質在文献中还闡述得不够。从电机整流的观点来研究电机运行的資料还很少。

本書试图概括各处公布的一些資料和一个大型联合企业軋鋼机的主拖动裝置的运行經驗，並扼要叙述整流問題的基本情况，主要是实用方面的情况。

作者在編著本書时，广泛利用了苏联学者和工程师們的科学著作。苏联的学者和工程师們在世界上首先最深入詳尽地研究了直流电机整流的理論和实际問題。科学院士K. И. 申菲尔、B. T. 卡西扬諾夫、M. П. 科斯琴科、С. Б. 尤吉茨基和M. Ф. 卡拉謝夫等人的著作对直流电机整流的最复杂科学技术問題的研究有很大的貢獻。本書也部分地引用了杂志和文献中的資料。

作者編著本書的任務是對整流基本問題的理論與實際作通俗的敘述，目的是給冶金企業的電機運行人員以實際業務上的幫助。

著 者

第一章 整流的物理過程及理論

1. 整流的本質

整流問題在本質上就是用电刷从轉动着的整流子上取下电流、的問題。

簡略提一提整流过程是怎样的。大家知道，直流电机的电枢繞組是閉路的，裝置在每一刷架上的电刷使閉路的电枢繞組成为並联支路。全部繞組元件都和整流子截片連接。当电枢轉动时，每一元件都由一个並联电路过渡到另一个並联电路上去。

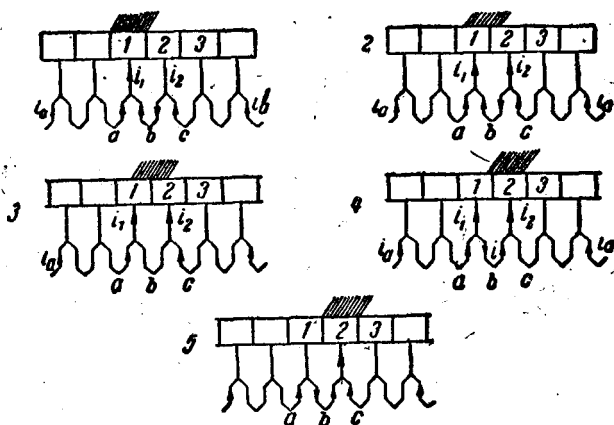


图 1 一个元件中的整流过程

图 1 示按次序进行的整流过程。位置 1：两支路的电流連到一个截片上；此时，任何元件均未短路：

$$i_1 = 2i_a; i_2 = 0.$$

位置 2：电刷連接两截片，元件 b 被短路，短路电流 i 流过。流过电刷的电流由两股电流相加而成：

$$i_1 = i_a + i; \quad i_2 = i_a - i。$$

位置 3：短路电流在整流电势的作用下，很快地减少到零。

位置 4：此后，在被短路的元件内将流过反向电流。

$$i_1 = i_a + (-i); \quad i_2 = i_a - (-i)。$$

位置 5：电刷离开截片的瞬间，就等于短路元件的开路。假如，此时 $i = i_a$ ，則在全部电刷下的电流密度都是均一的，不会发生火花。

假如 $i > i_a$ ，則电刷滑出边上的电流密度将剧烈增大。电流密度越不平衡，火花就越大。

以上所說的电流变化是在短路的元件中发生的，時間很短暫，就是說具有很高的速度。

在短路元件中电流快速的变化，就使該元件发生自感电势，並在其他元件中引起互感电势。这两电势的綜合称为电抗电势 e_r ，它引起整流元件中发生附生电流 i_k ，因而使电刷下的电流密度不平衡而发生火花。

为了中和电抗电势的有害影响，必須使被短路的元件处于能发生促进整流过程的电势（与电势 e_r 相反的）的磁场中。这磁场就叫做整流磁场，它所发生的电势叫做整流（換向）电势 e_k 。

为了保証能够产生 e_k ，早先是将电刷移出中性綫：对发电机是順整流子旋轉方向移动，对电动机是逆整流子旋轉方向移动。

e_k 的值应与負載成正比例地变化。在电机的負載急速变化时， e_k 值的变化就不可能靠电刷移出中性綫来实现。现时已使用輔极，它能自动建立必要强度的整流磁场。

考虑到电抗电势与整流电势的整流方程式如下：

$$(i_a - i)R \frac{T}{t} - (i_a + i)R \frac{T}{T - t} = -L \frac{di}{dt} + e_k,$$

式中 i ——被短路元件中的电流的瞬間值，
 i_a ——电枢繞組並联支路电流的瞬間值；
 T ——整流的全部時間；
 t ——整流开始時間；
 R ——电刷与整流子截片間的接触电阻；
 L ——元件的自感与互感系数。

理想的条件是：

$$e_r = e_k.$$

在此条件下，电抗电势的有害影响被整流电势完全抵消。此时，方程式

$$(i_s - i) R \frac{T}{t} - (i_a + i) R \frac{T}{T - t} = 0,$$

即为直綫方程式。換句話說，即直綫整流（图 2，曲綫 1）。

設
$$e_r = -L \frac{di}{dt} > e_k,$$

則电流 i 按曲綫 2 或 4 而变化，此时得到延緩整流。

設
$$e_r = -L \frac{di}{dt} < e_k,$$
 則得到加速整流（曲綫 3 和 5）。

附生电流 i_k 的存在使电刷下电流密度的分布不均衡，电刷滑出边的电流密度剧烈地增大（图 3）。在这情况下，当电刷离开截片 2 时，具有自感的电路开路，就发生弧形火花。因此，任务就在于降低电刷滑出边的电流密度，这可以在 $e_k > e_r$ 时，即加速整流时达到。

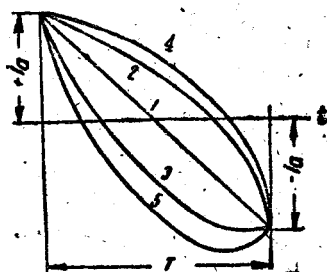


图 2 在整流周期中元件內的电流曲綫

1—直綫整流；2、4—延緩整流；
 3、5—加速整流

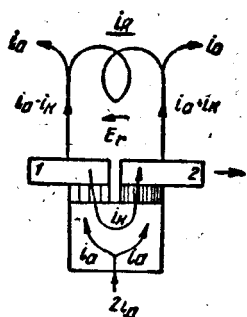


图 3 电刷下电流密度的分布

1—滑入边；2—滑出边

加速整流对经常过负载和承受电流冲击的电机特别有利。

电枢反应对整流也有重大影响，即它能使主磁通畸变。这畸变随负载而定，在容量不大的电机中电枢反应的影响可以用辅极来补偿。

在现代的大型电机中，为了补偿电枢反应使用了补偿绕组。图 4 示出辅极和补偿绕组对主极下磁通曲线形状的影响。

辅极仅在整流区域内补偿电枢的横向磁场。为电枢反应引起的主磁场的畸变依然存在。在主极的一半下面感应磁通的集中，使截片间的电位差增大，这将促成环火现象。因此，在大型电机中使用补偿绕组来补偿电枢反应。这些补偿绕组仅补偿电枢电势（约 30%），而电抗电势则应该由辅极来补偿。

在冲击负载的情况下，除了以上说过的影响整流的诸因素外，整流也受所谓变压器性电势 e_t 的影响。变压器性电势 e_t 出现在当负载变动引起主磁通变动的时候（串激电机、复激电机与具有可调整励磁的分激电机）。

当主磁通 Φ_B 变动时，在短路的元件中就诱导出变压器性电势。

$$e_t = - \frac{d\Phi_B}{dt} W \times 10^{-8} \text{ 伏,}$$

式中 e_t ——变压器性电势；

Φ_B ——主极磁通；

W ——元件的线圈匝数；

t ——励磁磁通的变动时间。

如果在励磁磁通增强时变压器性电势的方向与电抗电势 e_r 的方向相反，则在励磁磁通减弱时 e_r 的方向就与 e_r 相同。

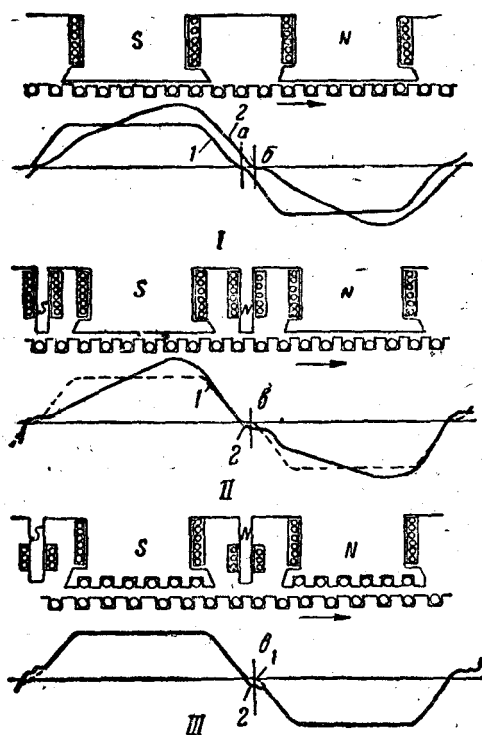


图 4 发电机电磁曲线形式

I—没有辅极与补偿绕组； II—有辅极； III—有辅极与补偿绕组；

1—无负载时的磁场曲线； 2—满负载时的磁场曲线； a—无负载时的

中性线； b—满负载时的中性线； B—全部负载时的中性线

因此，变压器性电势的存在就使整流过程更加复杂化。

我們在这里結束整流的經典理論的主要原理的研究，进而研究电刷—整流子接触层中的物理过程。现代的观点 已对經典性的整流理論的基本原理提出一系列的修正。

首先研究电刷接触的本質。

2. 电刷接触的本質

无论怎样合适的电刷，其工作弧面总不能与整流子的弧面严密吻合。这是因为电刷在刷握中有游隙以及电刷在弹簧压力下具有柔软性的緣故。电刷的圆弧比整流子的圆弧稍大。

除此以外，电刷与整流子的接触圆弧随温度而变，这是因为它们的热膨胀系数不同所致。电机长时期停車后再開車时发生火花就是这个原因促成的，特别是在电刷和整流子开始发热以前。由此可见，电刷下的弧形並非全是接触面。甚至在电刷与整流子表面圆弧吻合的区域中，也沒有完全恒定的接触（见图5）。在这种点的接触中，很可能有极大的电流密度。

当平均电流密度为 $8 \sim 10$ 安培/厘米² 时，接触点上的电流密度可达数千 安培/厘米²。

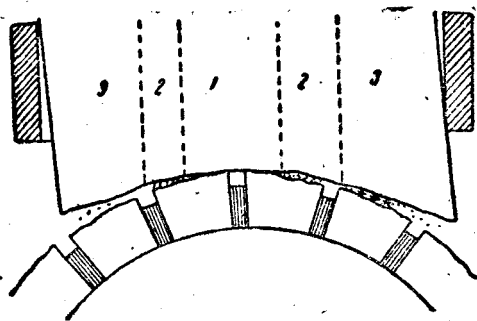


图5 在工作过程中电刷与整流子的接触示意图

1—紧密的机械接触区域；2—通过銅—石墨粉尘的接触区域；

3—通过火花与电弧的接触区域

由于整流子的轉动、机械磨損和极高的电流密度引起的局部破坏等原因，这些点的接触是很不稳定的，任何时候都在变动

着。实际上，任何一点仅在很短的时间內发生接触，陷入电刷或整流子的工作面中的各点根本不能接触。

由于电流密度极高，接触点就被烧紅。我們知道，碳与銅在紅热时是正极性的，发出带正电荷的离子，即产生电刷接触的热电离作用。也可以将电刷和整流子当作两个电极，如果电流是从电刷流向整流子，則电刷的极性便是正的；当电流反向时，則电刷的极性便是負的。各个接触点可被热至白热化。当白热时，出现多量的电子，即发生了电子从負极热放射的过程。假如正离子达到了必要的速度，則电子从負极热放射就通过冲击离子化来实现。施予电极的电压愈高，正离子获得趋向負极的加速度就愈高。当发生冲击离子化时，从負极飞出的电子使两极間的气体电离，形成新的离子，它們也冲击負极。放电就这样自行保持着，这种放电方式就叫做电弧。

如果离子未能获得必要的速度，那就不会有电子放射现象。在这情况下，电流仅由加热了的电极所促成的正离子来传送。这样的放电方式不能单独实现，因为电极应在所有时间內被加热，使促成正离子的产生。

熾热的正极性物质发出带正电荷的离子。物质愈热，发出愈易。例如，銅发出的銅离子比碳发出的碳离子多得多。銅的汽化溫度約 2400°C ，而碳約 4000°C 。正极性物质离子的損失叫做正极汽化。

电刷与整流子間的接触，可以看作为三条並联电路(图 5)：
1—紧密接触的电路，这是早先說到的点的接触；2—通过最小的导体（銅—石墨粉尘）的电路；3—凭借火花与瞬間电弧通过空气隙的电路。

从上述接触层的諸电路看来，沒有根据去認為接触传导是电刷与整流子間传导的主要形式，如在經典理論中所認定的那样，因为，单独的接触点中既然有巨大的电流密度，則以上所述的电

子热放射与热离子化就完全是可能的。在这条件下，无疑地要发生电刷接触的离子化。实际上，应该认为是接触传导加上离子传导。相应的，与直接接触区域相并列的应该是更广阔的离子传导区域与电子放射区域，即从整流子上取下电流是通过电弧和正离子的传送。

离子化和电子放射现象的发生，除了接触层中的局部高温外，滑动接触的特性（在全部时间内，电刷与整流子接触的持续性被破坏着）也有决定性的影响。在整流子上经常有各种形式的粉尘：碳的、石墨的粉尘，氧化铜与氧化亚铜的粉尘，云母与其他物质的粉尘。其中，有些是导电的，有些是绝缘的。有时云母沿截片边缘突起。这些，都使接触的持续性受到破坏，并且促成电弧或火花现象。试验证明，电流密度仅在1~2安培时不会发生离子化，同时，比滑入边受到更剧烈震动的滑出边根本不参与直接接触的建立。

就近对整流领域详尽的研究证明，电刷接触有电离的性质，即在接触层中发生着极有意思的复杂的电离过程。这些研究改变了许多经典性的整流理论。

根据最新的研究，在探讨接触层中发生的电离过程时，应当考虑到如下的现象。

1. 在接触层中电流通过直接接触的各个点：此时，将发生接触传导。对这个过程的阐述，经典的整流理论是正确的。

2. 电流受带正电荷离子的作用而流通：这过程在形成粉尘状接触时发生，电流仅集中在碾碎的粉尘的凸出表面上，这些凸出的表面被高电流密度加热并发出正离子，即电流靠正离子传送，这个过程伴随着正极的汽化。

3. 电流以火花与放电电弧的形式而流通：这个过程的特性在材料电蚀理论中有所叙述，这理论的简略原理如下。

由于受在转换电路时于接触面间发生的放电的作用，电极物

質发生轉移——电蝕。

电弧放电 它是

是电极物質在强烈的热作用下发生的；另一种是冷电花放电。在电弧放电时，物質剧烈地从負极轉向正极，同时負极发生热破坏作用（熔融与汽化）；在冷电花放电时，分子的热作用有了限制，电极的溫度不能上升，物質从正极轉向負极。

在有震动接触的电气設備中，經常有电弧与冷电花放电。电弧放电发生在断路的瞬間，电花放电发生在閉路的瞬間。

电花永远在接触点閉合时发生，但在低电压下，它很微弱，甚至看不见。

电弧仅在被伏安特性规定的电压与电流下发生（图6，I），当电压与电流低于规定的最低限度时，就不会发生电弧。

这样，就有着两个放电的区域：电弧放电区和电花放电加上电花放电的。这两个区域用分界曲綫分开。这分界曲綫规定了在接触点断开时电弧发生的区域（图6，I）。在横軸上被曲綫所截出的綫段，表示在电容C不存在时发生电弧的最低电流值。

在电弧与电花放电同时存在时，有着这样的分界曲綫，它的特点是：从正极与負极轉移的物質数量在发生电弧与电花的单位時間內彼此相等。这条分界曲綫位于电弧发生曲綫的稍右边（图6，II），它表示接触点物質的轉移最少。

离开电弧或电花放电区域的分界曲綫，就会引起正极或負极物質在单位時間內的轉移量不断增大。

为了明了电弧与电花放电現象的本質，我們概略地研究一下在气体介質中导电的过程。

如果向处于气体介質中的电极施予电压，則气体离子在电场的作用下开始移动並产生电流，在一定的瞬間內，电流与所施电压成正比。这条关系曲綫即图7中的OC綫段。

当电压繼續提高时，电流的增大轉慢，到末了，根本就停止增大，即流过的电流是恒定的，不随所加电压的升高而增大，进入

所謂飽和電流階段 (CD 綫段)。

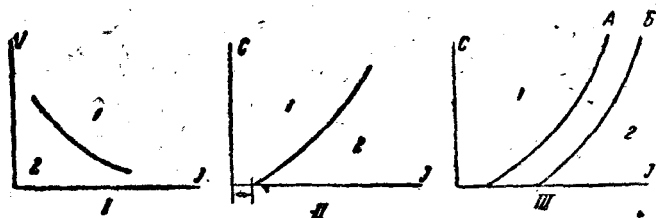


圖 6 電弧与放电的特性曲綫

I—電弧的伏安特性曲綫：V—电压，伏特；I—电流，安培；1—发生電弧的区域；2—不发生電弧的区域。II—電弧发生的分界曲綫：C—电容，微法拉；I—电流，安培；1—发生電弧的区域；2—发生電弧+電花的区域。III—電弧的分界曲綫：C—电容，微法拉；I—电流，安培；1—正極電弧区域；2—負極電弧区域；A—電弧发生的分界曲綫；

B—正負極電弧相等时的分界曲綫

曲綫的这一部分表示电极間形成的离子数等于电极上放电的离子数。在这阶段中，电极間运动的气体离子所积蓄的动能已漸次增大。

能量的这种积蓄要到气体离子获得很高的速度时，即当它們能够打击中性的分子使其分裂（离子化）成正离子和电子时，方才結束。离子与电子經常力图結合成为中性的分子。但，假如游离的速度超过形成中性分子的速度，离子与电子的数量就开始剧烈地增长。这一增长的过程，必然导致正离子与电子的高度集中。从这一瞬間起，电路中的电流就剧烈地增大（曲綫 DA 部分），並得到独立放电的第一种形式。此时，气体发亮光，伴随着比較輕微的特殊音响——这叫做平靜放电。

在綫段 DA 上，电场强度的增大和气体冲击离子化程度的不断增长引起了电流的增大並急剧地被新形式的放电现象——電花放电所截断（曲綫 AB 部分）。

電花放电现象証明，介質导电率的逐漸增大，因其絕緣强度