

电机用电刷及其使用方法

〔日〕碳素材料学会编

机械工业出版社

统一等问题，对初学者来说，还有难以理解的地方，其中包括技术情报、使用方法以及运行过程中出现的故障和解决方法等，因此，迫切期待陆续出版一些适合这方面需要的书籍。

本书承已故宗宫教授家族的资助、日本学术振兴会第117委员会本田英昌委员长的大力推荐以及有关人士的支持和协助，并在B分科会和“电刷恳谈会”的会员们的共同努力下，完成了编纂工作。本书不偏重于深奥复杂的学术理论，而是汇集了笔者的渊博学识和丰富经验，着眼于实际使用、力求术语的统一和通俗易懂，并综合了大量的宝贵文献资料。它不仅对于从事电刷研究的年轻科技人员，就是对于从事使用和制造的技术人员来说，也是一本很有价值的参考书。

当期望电机和电刷工业在当前的技术革新中获得进一步发展的时候，我热烈祝贺本书的出版，并介绍了本书的编纂过程和特点，以此作为本书的序言。

1976年3月

日本学术振兴会第117
委员会B分科会调查主任
铃木弘茂

译 者 的 话

在国民经济各领域中，电机广泛用于工业、农业和交通运输业等各个方面。无论是将机械能转化为电能，还是将电能转化为机械能，都要靠电机来实现。电刷在电机中起着导出或导入电流的作用，在整流子电机中，电刷还起着换向作用。因此，电刷的质量直接影响电机的使用性能，它是电机的一个重要组成部件。

随着电机工业的迅速发展，对电刷的品种、性能、制造技术、测试方法以及使用方法等提出了越来越高的要求。尤其电机的使用条件日趋苛刻，如何正确地使用电刷，也即如何判断、分析和排除电刷在运行过程中出现的各种故障已成为电机运行的一个重要而迫切需要解决的问题。

日本碳素材料学会邀请有关方面的专家编写了《电机用电刷及其使用方法》一书，该书积累了丰富的实际经验和大量文献资料，从使用角度深入浅出地介绍了电刷的有关问题，是目前内容较新，实用价值较高的一本参考书。

本书在翻译过程中，得到了哈尔滨电碳研究所、哈尔滨电碳厂等单位有关同志的指导和帮助；全书译稿由哈尔滨电碳研究所副总工程师王宜善同志作了技术审定，特在此表示衷心谢意。

由于译者水平所限，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

执笔者一览表

责任编辑

鈴木弘茂 東京工業大学教授

安藤利也	東海カーボン	茅ヶ崎工場	(第4章)
石川侃二*	日本国有鉄道	鉄道技術研究所	(第12章)
伊藤欣二郎	富士電機製造	川崎工場	(第13章)
大久保勝弘*	日本工業大学	工学部	(第6章)
熊谷正博*	日本国有鉄道	鉄道技術研究所	(第12章)
桑原繁太郎	日立化成工業	桜川工場	(第7、15章)
武政隆一*	日本工業大学	工学部	(第8章)
出崎征夫	日本カーボン	横浜工場	(第3章)
長沖 通	日本カーボン	技術部	(第3章)
長野美雄	富士カーボン工業	技術部	(第14章)
浜崎晏行	三菱電機	神戸製作所	(第11章)
茂本正二	日立製作所	日立研究所	(第10章)
森田义男	三菱電機	相模製作所	(第5章)
山田恒久	東洋カーボン	茅ヶ崎工場	(第2章)
山村龍男*	法政大学	工学部	(第1章)
横田隆一	東京芝浦電気	鶴見工場	(第9章)

(* 为编辑干事)

序 言

1889年前后，碳刷开始用于电机。其后约八十五年，随着电机工业的迅速发展，电机用电刷的制造技术日趋完善，性能显著提高，品种日益增多，使用方法也越来越复杂。电刷虽然体积不大，价格便宜，但它在电机上所起的作用却很重要，常常被人们比作电机的心脏。

日本从日本学术振兴会于1934年提出电刷的研究课题之后才正式开始研究电刷，以本野亨博士（京都大学教授）为委员长的第18小组委员会，特别为电刷的研究工作配备了强有力的研究力量，并对主要的电刷品种增添了研究性的测试项目。值得提出的是，由于宗宫知行博士（应庆大学教授）进行的弹性模量和粘度系数与换向间关系的实验性研究，进一步推动了换向用电刷的研制工作。

目前，在日本学术振兴会第117委员会的B分科会里，把碳刷的研究作为碳素制品及其应用研究的一个组成部分。而且，承蒙有关人士的热忱帮助，B分科会的下属组织——“电刷恳谈会”从前年起开始活动，定期召开会议，发表研究成果和交流情报资料。

然而，电刷在运行中出现的问题非常复杂，它的机理直到现在还不能科学完整地解释清楚，不少地方仍依赖于技术知识和实际经验。

另外，在查阅到的许多有关电刷的制造技术、性能测试和运行状况等研究报告中，也存在电机和材料方面的术语不

目 录

1. 电刷的功能和换向作用.....	1
1.1 电刷的功能.....	1
1.2 电刷的换向作用.....	2
1.3 电阻换向.....	4
1.4 电压换向.....	5
1.5 电刷特性与无火花换向区.....	5
2. 电刷的种类、制造方法和标准.....	7
2.1 电刷的种类.....	7
2.2 电刷的制造方法.....	9
2.3 电刷的标准.....	25
3. 电刷的试验方法.....	32
3.1 概述.....	32
3.2 电刷的静态特性.....	34
3.3 电刷的动态特性.....	42
4. 电刷的静态特性.....	48
4.1 碳的基本特性.....	48
4.2 硬度.....	50
4.3 电阻系数.....	51
4.4 抗折强度.....	55
4.5 体积比重.....	56
4.6 真比重.....	57
4.7 灰分.....	58
4.8 弹性模量.....	58
4.9 固体粘度系数.....	59
4.10 其他.....	59

4.11 电刷的静态特性与实用性能.....	59
5. 电刷的动态特性.....	61
5.1 概述	61
5.2 电刷滑动接触的基础.....	61
5.3 电刷的摩擦特性.....	64
5.4 电刷的接触电压降特性.....	72
5.5 电刷的磨损特性.....	77
5.6 电刷的换向特性.....	89
6. 电刷的火花.....	95
6.1 产生火花的影响.....	95
6.2 产生火花的原因.....	95
6.3 产生火花的机理.....	98
6.4 火花的电压和电流波形.....	100
6.5 火花的能量.....	103
6.6 火花引起电刷和换向器或集电环的损伤.....	104
6.7 换向火花等级和火花的允许极限.....	106
6.8 火花的测定方法.....	108
6.9 火花的防止方法.....	109
7. 刷握.....	111
7.1 刷握的作用和结构.....	111
7.2 电刷跳动.....	112
7.3 电刷与刷盒的间隙对电刷滑动特性的影响.....	112
7.4 刷盒的形状和角度.....	113
7.5 弹簧的种类.....	116
7.6 电刷压力.....	118
7.7 电刷高度对电刷压力的影响.....	119
7.8 刷握的固定.....	120
7.9 刷握的发展动向.....	120
8. 电刷故障及其处理方法.....	122

8.1 概述	122
8.2 氧化膜和局部电流	122
8.3 电刷类别和特性	127
8.4 刷握	132
8.5 负载电流和气体介质对换向器表面的影响	133
9. 换向不良的原因及其处理方法	138
9.1 换向不良的原因	138
9.2 换向不良的处理方法	148
10. 电刷磨损及其处理方法	159
10.1 电刷磨损的因素	159
10.2 磨损的定义	161
10.3 电刷磨损量的测定方法	162
10.4 影响电刷磨损的各种因素及其处理方法	164
11. 换向器的磨损	176
11.1 换向器表面的状态	176
11.2 换向器表面的良好状态	176
11.3 条痕	176
11.4 黑痕	181
11.5 铜曳	183
11.6 斑点	184
11.7 换向器表面状态的表示	184
12. 牵引电机用电刷	190
12.1 概述	190
12.2 分类与用途	191
12.3 电刷坯料的显微组织、一般特性和规格标准	192
12.4 试验方法(特殊方法)	198
12.5 实用性能	204
12.6 故障调查实例的若干问题及其处理方法	206
12.7 提高电刷性能的途径	219

13. 集电环用电刷	221
13.1 集电环和电刷的材质	221
13.2 集电环和电刷的工作状况	223
13.3 特殊气体介质中的滑动特性	232
14. 小型电机用电刷	237
14.1 小型电刷	237
14.2 家庭电器和电动工具用电刷	237
14.3 汽车电气装备用电刷	240
14.4 飞机电气装备用电刷	250
14.5 微型电动机用电刷	250
15. 刷握引起的故障及其处理方法	253
15.1 压指动作不协调	253
15.2 压指限位器位置不正确	254
15.3 刷握与换向器或集电环表面的间距过大	254
15.4 电刷压力不均匀	254
15.5 电刷的加压方向不正确	255
15.6 共振	255
15.7 刷握变形	256
15.8 电刷厚度薄于换向片距	256
15.9 电刷宽度窄于集电环槽距	256
15.10 恒压薄片弹簧折损	257
15.11 恒压薄片弹簧安装不合适	258
15.12 电刷倒棱过小及刷盒倒棱过大	258
15.13 刷盒上附着粘附性物质	258
15.14 刷辫的有效长度过短	258
15.15 刷辫绝缘套管的纤维接触刷盒	258
15.16 无刷辫电刷	259
15.17 电刷高度过高	259
15.18 集电环的环式沟槽与电刷压力	260

X

15.19 刷握的固定位置不正确	260
15.20 刷握配置不当	260
15.21 电刷的滑动噪声大	260
15.22 绝缘杆与刷握	261
索引	262

1. 电刷的功能和换向作用

1.1 电刷的功能

电刷通常也叫做brush、Bürste、(电)刷子或碳刷。目前用得最多的是电化石墨电刷。1856年, 西门子公司维尔纳(Werner V. Siemens)在德国首次用电刷在换向器上进行了显示换向作用的实验, 制成了现今直流电机的雏形, 然而, 那时的电刷是用细铜丝制成的纯金属电刷⁽¹⁾。

日本的电机制造业开始于十九世纪(明治末期), 那时所用的电刷完全依赖于进口, 这从国防上考虑是不妥的。为此, 日本学术振兴会以自行满足国内电刷需求为目的, 于1934年(昭和9年)设立了第18小组委员会(电气材料)第一分科会, 并在1940年⁽²⁾和1944年⁽³⁾发表了有关电刷的研究成果。

电刷的功能是在电机的固定部件与旋转部件——换向器或集电环之间传导电流, 在直流电机或交流整流子电机中, 被电刷短路的线圈的电流方向在接触过程中改变 180° 。

此时, 对于被短路的线圈来说, 电刷与换向器表面的接触电阻起着限制短路电流的作用, 而对于负载电流来说, 它形成了一个影响电机出力的接触电压降。另外, 负载电流无论怎样变化, 都应要求接触电压降尽量相等, 也就是要求电刷与换向器表面的接触电阻为非线性, 这是电刷与换向器表面的滑动接触所要求的最为复杂的电气特性。

此外, 应尽量要求电刷与换向器或集电环之间在较宽的

转速范围内保持平稳的接触。因此，作为电刷基体材料之一的石墨，它所具有的固体润滑作用将充分显现出来，同时，也应充分注意包括刷握在内的振动系统的结构。

1.2 电刷的换向作用

为了说明换向过程中线圈的电流变化，首先，用电刷厚度 $\ominus$ 相当于一个换向片距时的最简单的换向方程式来表示⁽⁴⁾。

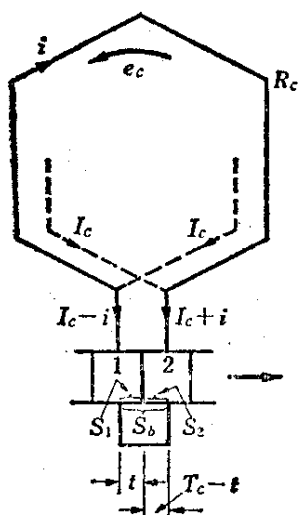


图 1.1 表示换向开始后 t 秒的状态。它们的关系为

$$S_1 = S_b \frac{t}{T_c}, \quad S_2 = S_b \frac{T_c - t}{T_c} \quad (1.1)$$

$$R_1 = R_b \frac{S_b}{S_1} = R_b \frac{T_c}{t}, \quad R_2$$

$$= R_b \frac{S_b}{S_2} = R_b \frac{T_c}{T_c - t} \quad (1.2)$$

图1.1 换向过程中线圈的电流变化

图中 i ——被电刷短路的电枢线圈的电流（短路电流）（安）；

I_c ——线圈的电流（安）；

e_c ——线圈的感应电势（伏）；

S_b ——电刷的接触面积（米²）；

S_1 ——电刷与换向片 1 的接触面积（米²）；

S_2 ——电刷与换向片 2 的接触面积（米²）；

$\ominus$ 原文为电刷宽度，疑误——译者注。

- R_c ——被电刷短路的电枢线圈的电阻（欧）；
 R_r ——换向器升高片的电阻（欧）；
 R_b ——电刷与换向器表面的接触电阻（欧）；
 R_1 ——电刷与换向片 1 的接触电阻（欧）；
 R_2 ——电刷与换向片 2 的接触电阻（欧）；
 L ——线圈的电感（亨利）。

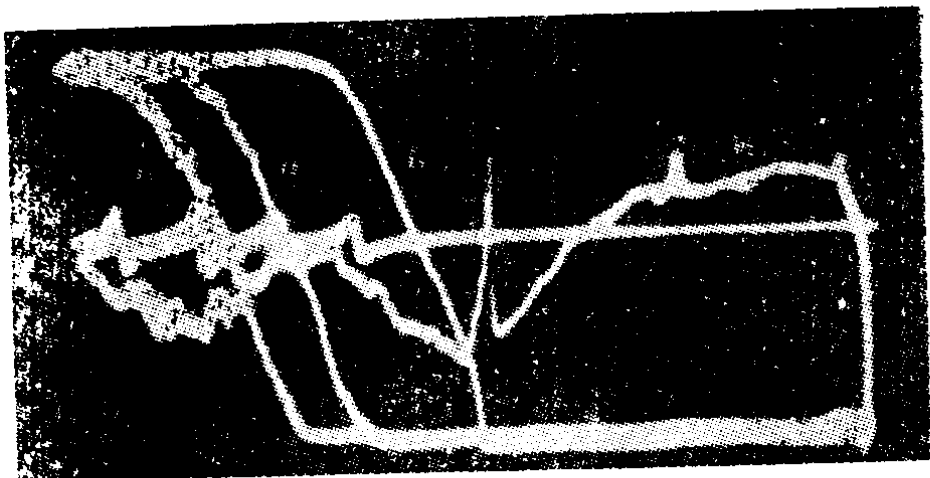


图 1.2 示波器显示的换向曲线图例

i_1 、 i_2 、 i_3 ——同一个槽中的三个线圈的电流波形
 v_2 ——第 2 个线圈的电压波形（第 1 和第 3 个线圈的电压波形也大体相同）

当线圈、换向器升高片、换向片和电刷组成的闭合电路满足基尔霍夫定律时，可得下面的换向方程式

$$\begin{aligned}
 &L \frac{di}{dt} + R_c i + R_r (I_c + i) - R_r (I_c - i) \\
 &+ R_b \frac{T_c}{T_c - t} (I_c + i) - R_b \frac{T_c}{t} (I_c - i) + e_c \\
 &= 0
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

用测试线圈观察换向曲线时，便可看到以式(1.3)为基础的波形⁽⁵⁾。图1.2表示电刷厚度为换向片距的2.5倍，每个电枢槽中各嵌入三个线圈时的三个电流波形及电压波形的代

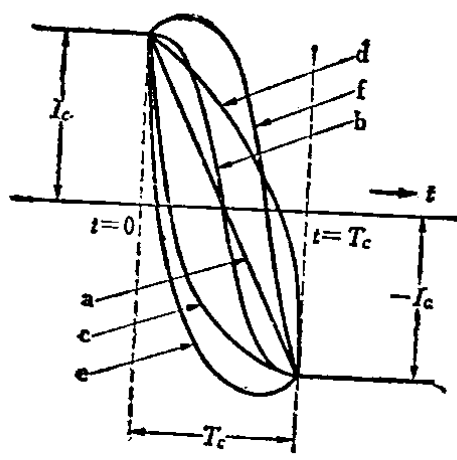


图1.3 换向曲线

a—直线换向 b—正弦波换向
c、e—超越换向 d、f—延迟换向

表性图例。图 1.3 表示直线换向、正弦波换向、延迟换向和超越换向等典型换向曲线。

在图 1.3 中，换向曲线对水平轴的斜率为 di/dt ， di/dt 乘以换向过程中线圈的电感 L 得电抗电势，线圈中的电流变化因电感的存在而显得滞后，使 di/dt 变小，因此，在换向后期 di/dt 最高，亦即为延迟换向。此时，电抗电势 $L di/dt$ 达到最高值，并成为电刷与换向器间产生火花的原因。

原因。

由上所述，产生换向火花的部位经常出现在电刷的滑出边。在图1.2中，电刷约覆盖着2.5个换向片，同一电枢槽中各线圈的互感非常大，而与相邻电枢槽中线圈的互感却几乎等于零。因此，如各线圈的有效自感分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 ，则可观察到它们之间较大的差异，即

$$L_1:L_2:L_3=1:6:33$$

由此可见，同一电枢槽中最后终止换向的线圈在换向后期最易出现火花。

1.3 电阻换向

在式(1.3)中，如果电刷与换向器表面的接触电阻 R_b 非常大，而其他的电阻成分（线圈的电阻 R_c 和换向器升高片的电阻 R_s ）及线圈的电感 L 都可忽略不计，并且换向线圈的感应电势 e_c 等于零，则式(1.3)可简化为

$$R_b \frac{T_c}{T_c - t} (I_c + i) - R_b \frac{T_c}{t} (I_c - i) = 0 \quad (1.4)$$

解式(1.4)，求得线圈的电流*i*为

$$i = I_c \frac{T_c - 2t}{T_c} \quad (\text{安}) \quad (1.5)$$

式(1.5)表示直线换向， di/dt 为恒值。这种用增大电刷接触电阻获得良好换向的方法叫做电阻换向。它表示电刷与换向器表面的接触电阻在换向方面所起的重要作用。

1.4 电压换向

直流电机的转速一旦提高，换向周期就要缩短；直流电机的容量一旦增大，电流就要增大。这两种情况都使式(1.3)中的 di/dt 增大，尽管线圈的电感*L*恒定，电抗电势 $L di/dt$ 也不能忽略不计。另外，在与电抗电势相反的方向上产生的感应电势抵消了电抗电势，因此，换向曲线近似于直线。同时，尽量减小换向后期的 di/dt ，以抑制换向火花的产生，这种获得良好换向的方法叫做电压换向。为此，直流电机装有换向极，并与电枢绕组串联，通常换向极也有抵消一部分电枢反应的作用。

换向极的作用过强时，变成超越换向，在这种情况下，换向后期的 di/dt 增大，易在电刷的滑出边产生火花。

脉动电流驱动直流电动机时，换向极磁场受脉动电流的影响必须从换向极的磁路上设法消除，这一问题有待进一步研究^{(6), (7)}。

1.5 电刷特性与无火花换向区

电刷与换向器或集电环间的电器*i*跟接触电压降*v*之间

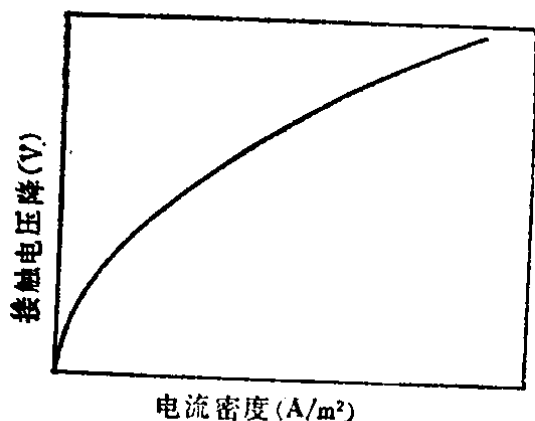


图1.4 电刷滑动时的伏安特性曲线

的关系如图 1.4 所示，它主要显示氧化亚铜薄膜的作用，可近似地表示为

$$v = k g^{1/n} \quad (\text{伏}) \quad (1.6)$$

式中 k ——比例常数；

g ——电流密度 (安/米²)；

n ——大于 1 的实数。

安部氏⁽⁸⁾将式(1.6)代入换向方程式，说明了无火花换向区的存在，相继从事这方面研究工作的有林⁽⁹⁾和一木⁽¹⁰⁾氏等。乙武氏⁽¹¹⁾还用模拟电子计算机使这种研究实用化。

这些研究表明，电刷滑动时的伏安特性曲线呈非线性，它对无火花换向起着重要的作用。

特别在决定是否产生换向火花的换向后期，要求电刷的伏安特性曲线呈非线性，因此要求测定电刷滑动时的动态伏安特性曲线⁽¹²⁾。

参 考 文 献

- (1) Arnold : Gleichstrommaschinen, (1919).
- (2) 日本學術振興會：電機用刷子の研究 (I), (1940).
- (3) 日本學術振興會：電機用刷子の研究 (II), (1944).
- (4) Langsdorf : Principles of Direct Current Machines, 397, (1931)
- (5) 山村, 山崎：電学誌, 76, 743, (1956).
- (6) 山村, 山崎：電学誌, 80, 598, (1960).
- (7) 石川：電学誌, 85, 1218, (1965).
- (8) 安部：電学誌, 60, 74, (1940).
- (9) 林：電学誌, 68, 203, (1948).
- (10) 一木：日立評論, 33, 187, (1951).
- (11) 乙武：東芝レビュー, 16, 1030, (1961).
- (12) Вегнер : Электричество, No. 5, 78, (1962).

2. 电刷的种类、制造方法和标准

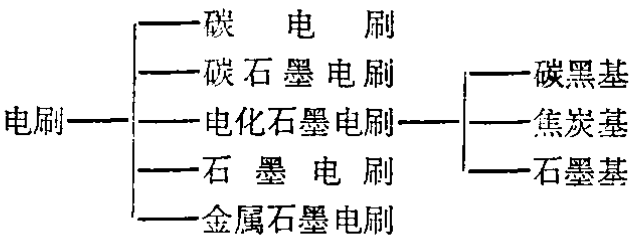
2.1 电刷的种类

电刷的种类很多。可以预料，随着电动机和发电机等旋转电机的性能进一步提高、小型化以及温度和压力等使用条件的多样化，电刷的种类还将日趋增多。现将电刷按原材料和用途的不同大致分类如下。

2.1.1 按原材料分类

电刷按原材料的不同可分为碳质电刷和金属质电刷两大类。碳质电刷以碳黑、石墨或焦炭等一般性碳素材料（元素符号为C，原子序数为6）为主要原材料，金属质电刷以铜粉和石墨为主要原材料，一般称为金属石墨电刷或金属电刷。电刷按原材料的分类如表2.1所示。

表 2.1 电刷按原材料的分类



详细内容将在制造方法一节里叙述。如上所述，按不同材质可将电刷分为碳质电刷与金属质电刷，有时也将碳质电刷叫做碳电刷，但是，为了不与下面进一步分类时出现的同样术语相混淆，这里仍叫做碳质电刷。

2.1.2 按用途分类

电刷按用途分类是相当困难的。这是因为使用电刷的电机有电动机和发电机，直流和交流以及大型和小型的区别，