

传动技术中的直流电机

刘耀新 卜成祥译 周守国校

上海南洋电机厂

出版说明

在新技术革命的浪潮中，我厂在引进西德 AEG 公司 4 系列直流电机的成套设计，制造技术的基础上，研制、开发用于可控整流器供电的新型直流电机系列：取代 Z_2 和 Z_3 系列直流电机，以适应“四化”建设的需要。

该系列电机在重量、体积、性能等方面均优于目前国内同类产品，达到当前国际上的先进水平，将广泛应用于冶金起重、机械、轻工、造纸等行业。

为使使用该产品的各单位中的有关人员尽快掌握使用和维修中的有关技术，特将西德 AEG 公司商务技术培训中心编制的《传动技术中的直流电机》予以翻译出版。

本书适用于直流电机用户单位的使用维修人员；对直流电机科研、制造部门的设计、工艺工程技术人员，大专院校有关专业师生也是一份有益的参考资料。

一九八四年十一月

目 录

直流电机的结构和用途

- 1.1 与三相异步电机的分界..... (1)
- 1.2 直流电机的机械结构..... (1)
- 1.3 直流电机的主要用途..... (6)
- 1.4 电磁设计的基本观点, 特别是
电枢绕组类型对过载能力的影
响..... (6)
- 1.5 换向器片间电压 e_s (8)

接线图和特性曲线、电枢反应

- 2.1 线端标记..... (9)
- 2.2 接线图..... (11)
- 2.3 电动势(EMK)和端电压的关
系..... (12)
- 2.4 电动机特性曲线..... (13)
- 2.5 电枢反应..... (13)
- 2.6 负载时的无补偿直流电机..... (14)
- 2.7 负载时的补偿直流电机..... (15)

换 向

- 3.1 换向过程、电抗电势..... (16)
- 3.2 换向极绕组和补偿绕组..... (16)
- 3.3 换向磁场调整..... (18)
- 3.4 换向不良的原因..... (20)
- 3.5 电刷..... (21)
- 3.6 换向器和电刷的滑动接触面..... (22)
- 3.7 静止时换向器负载特性..... (23)
- 4. 直流电机的转速控制..... (24)

- 5. 运行中的动态负荷..... (25)
- 6. 整流器供电对直流电机的影
响..... (27)
- 7. 订货须知..... (27)
- 7.1 设计的结论..... (28)
- 8. 直流电机的样本..... (29)
- 8.1 样本的结构和前言..... (29)
- 8.2 样本用法..... (29)
- 9. 机械设计的特性参数及特性..... (30)
- 10. 保护装置..... (32)

绝缘、温升、冷却

- 11.1 绝缘..... (33)
- 11.2 温升..... (34)
- 11.3 采用新绕组时的绝缘等级的改
变..... (35)
- 11.4 冷却..... (36)
- 12. 中小型直流电机的开车..... (38)
- 13. 直流电机的维护保养..... (39)
- 14. 直流电机的故障..... (41)
- 14.1 故障原因及其排除方法..... (41)
- 15. 中小型直流电机的技术发展现
状..... (41)

附 录

- 1. 直流电机 型号G10.02—GB13.04
《使用维护说明书》

直流电机的结构和用途

1.1 与三相异步电机的分界

直流电机的额定转速可在很大的范围内自由选择。

直流电机的运行转速可在宽广的范围内任意控制。

在相同的转矩下，直流电机能设计出各种不同的 U_N ， I_N ， n_N 的组合。

因端电压与电机的内部参数有关，所以在大型直流电机中端电压通常是非标准的，因为它反映了工厂内部的大小。

大型直流电机所要求的工作参数一般可用不同的极数来达到。

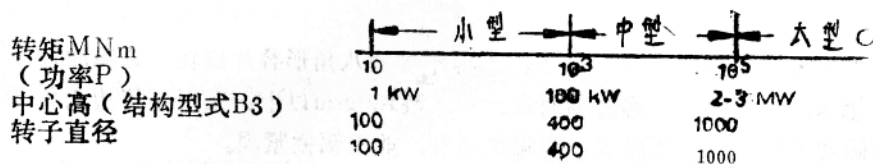
除额定参数外，也可根据过载能力 I_{max}/I_N 和弱磁范围 n_{max}/n_N 来确定选择合适的直流电机型号。

三相异步电机的重要特征在于它的频率 f 与极对数 P 和电动机转速 $n \rightarrow n_{synchronous}^*$ 之间有着固定不变的关系。而在直流电机中由于采用了换向器，从而可使直流电机不受这一规律限制。而这一点在直流电机调速方面亦具有决定性的意义。由于频率和极数不与一个特殊的转速相对应，故额定功率本身不能决定电机的中心高。而起决定性作用的仅是转矩 $M \sim \frac{P}{n}$ 。对直流电机的设计来讲，它通常将受到换向片片间电压以及换向过程中的电抗电势的限值所限制。* 注脚 $synchronous$ 意即同步。

1.2 直流电机的机械结构

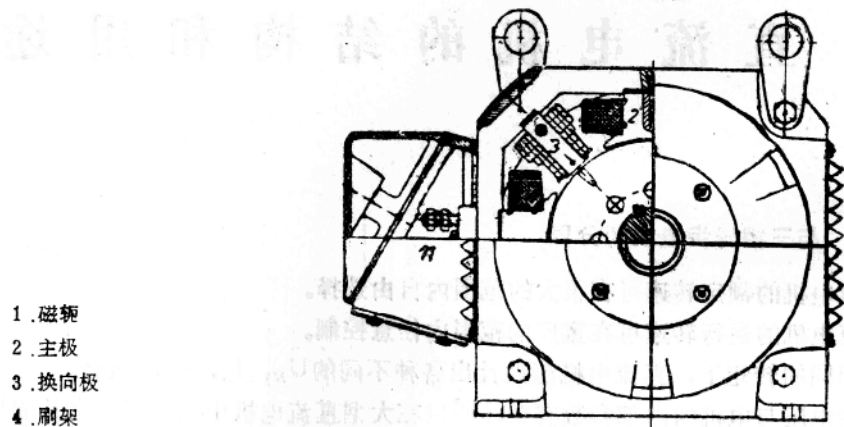
直流电机的数量级

大、中、小型的直流电机的划分是任意的，它並沒有严格的规定，通常习惯的划分是（即在有关文章中常用的）与以上技术数据有关：

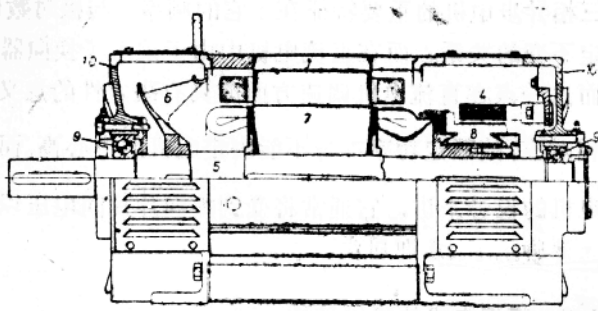


机械结构

小型直流电机的主要结构件



- 1.磁轭
- 2.主极
- 3.换向极
- 4.刷架
- 5.转轴
- 6.风扇
- 7.电枢
- 8.换向器
- 9.轴承(向心滚珠轴承)
- 10.端盖
- 11.接线盒



大型直流电动机的主要结构件

主要结构件的说明

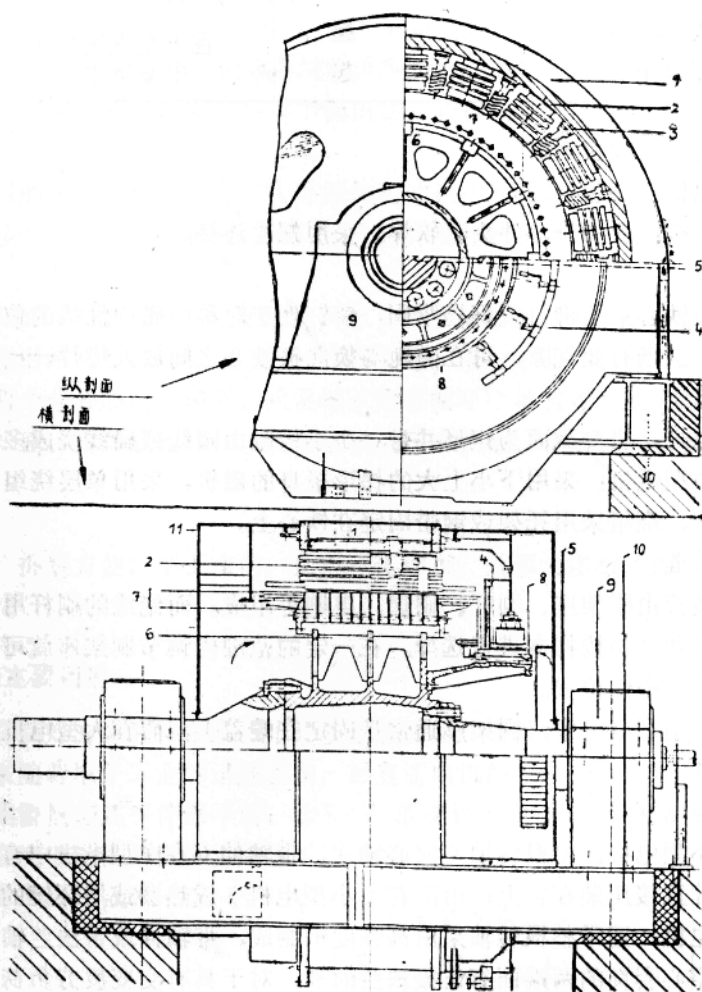
定子磁轭

小型电机：中心高160mm以下，采用不等边八角形叠片磁轭。磁轭冲片连同主极、换向极用绝缘的电工钢片一起冲制而成。中心高160mm以上：采用不等边八角形磁轭，并由绝缘的磁轭冲片交错叠压而成，两端加压圈，并用辐铁紧固。

中型电机：采用圆形磁轭，常用整块磁轭或叠片磁轭（用压圈和螺栓紧固）。

大型电机：采用圆形分半结构。用绝缘的扇形冲片交错叠压而成，并在压板或压圈之间用螺栓作轴向紧固。采用加强筋以提高机座的刚性。放宽机座的底脚来增加稳定性。底脚紧固螺栓的大小视短路时的动负荷而定。

1. 定子
2. 主极
3. 换向极
4. 电刷装置
5. 转轴
6. 电枢支架
7. 电枢
8. 换向器
9. 轴承
10. 基座
11. 端罩



主 极

主极铁心由叠片组成。

不带补偿绕组的极靴（矮极靴）；

带补偿绕组的极靴（高极靴）。

励磁绕组

小型电机：用园导线绕制的紧密线

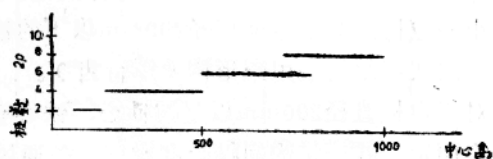
圈；

中型电机：用扁导线绕制的分开线

圈；

大型电机：多匝螺旋型卷绕的分线圈。

补偿绕组



标准直流电机极数和中心高的关系

通常从中心高 也可能从中心高小于	280mm以下 630mm		不带补偿 绕组
通常从中心高 也可能从中心高	250mm 起 315mm 起	在大型直流电机 中基本上	带补偿绕组

小型电机：漆包圆线

中型电机：漆包扁线

大型电机：裸铜排，并头套软焊。采用螺栓连接。

换向极

换向极铁心采用铆钉或螺栓紧固，铆钉处于对称的磁中性线的位置（减少阻尼）。

为调整磁场有效气隙，可在磁轭与换向极铁心之间放入垫片——有时也可用非磁性垫片（附加气隙）。

小型电机：极身截面为矩形并带一个小极靴由圆线或扁线绕成多匝线圈。

大、中型电机：采用下小上大的梯形极身的磁极，采用单层绕组（有时绕组也用多根并联扁导线），绕组采用托架或钢带固定在铁心上。

电刷装置

电刷装置由刷架座、刷杆、刷握、电刷等组成。而绝缘的刷杆用螺钉紧固在刷架座上。电刷的规格和结构按样本进行选择。在一定的范围内调节刷架座就可使电刷处于中性线的位置，或稍偏离中性位置。

在中、小型电机中，刷架座通常是固定在端盖上，而在大型电机中，则固定在定子上。

电 枢

转轴与电枢支架

中、小型电机：整根转轴（实心轴），带轴伸（在中型电机中有时也带法兰轴伸）。电枢铁心冲片直接压装在轴上；用滚花（小型电机）或热套或用环键的方法与轴固定。

大型电机：通常整根转轴采用高强度钢制成，带轴伸或带法兰轴伸。在超大型电机中，采用铸钢空心套筒的两端面有连接法兰的轴。对于具有交变疲劳负荷的电机，亦需采用具有较大过渡的圆角半径。

分开的电枢支架大多利用切向键固定在轴上，或籍助支撑的圆盘或筋板焊在轴上。外圆上的纵向辐铁承受铁心叠片。径向键用于径向预应力，4个切向键槽用来传递转矩。

带绕组的电枢铁心冲片

铁心冲片是采用具有合适磁滞损耗系数的绝缘电工钢片。

小型电机：对于电枢直径200mm以下的铁心，按照冷却方式有带或不带轴向通风孔的结构，圆线绕组均采用梨形槽（平行齿）。

对于电枢直径200mm以上的铁心，铁心有轴轴向通风孔和径向通风沟（通风沟数视铁心长度而定，在一定的间隔长度设有一条通风沟），棒形绕组采用矩形槽，每片换向片上有1至3匝，电枢绕组铁心部分采用扎带绑扎固定。

中型电机：电枢铁心冲片不用扇形冲片，铁心两端用压板固定在轴上。铁心有轴向通风孔和径向通风沟，矩形槽的铁心多数用于异槽式棒形绕组，槽中绕组的固定采用扎带或槽楔，而均压线则放在换向器端绕组端部的下面。

大型电机：铁心由单张扇形片叠压而成，两端用两块压板通过螺栓紧固。铁心设有径向通风沟、冷却风经电枢支架进入。矩形槽的铁心用于异槽式棒形绕组，绕组铁心部分用槽楔或扎带固定。换向器端的均压线直接与换向器升高片连接。

换向器

压入轴上或辐铁上或转子支架上，大形换向器也可固定在电枢支承结构件上。小型换向器采用带埋置钢环的塑料换向器，通常采用拱型换向器。如换向器的线速度很高，则应采用高强度钢制成的紧圈。

在采用圆铜线绕组的小型电机中，对于大外圆结构的换向器，直接可与电枢绕组连接，否则应采用升高片连接的方式，如果长度较长，则升高片要作特殊支撑。

轴 承

中小型电机：主要选用结构形式B3（或类似于B3）和滚动轴承。

大型电机：主要选用结构形式D5，采用滑动轴承；轴承座支撑轴瓦，轴瓦按中心高划分。轴承带有一个或两个分开的活动油环。通常轴承附有循环冷却装置。在特殊情况下，还应带有油压减压器（低速、重负载起动）或者配备轴向压力轴承。轴承底座多数分成支承结构和箱形结构。

端 罩

仅用于大型电机，拆装方便，带工作门，盖板或工作窗。端罩大多数为内部通风系统的零件。

1.3 直流电机的主要用途

由于直流电机具有良好的调速特性及转矩调整性能因而广泛被用于各种复杂的传动系统项目中。特别是近年来随着电子工业的迅速发展，对直流电机的生产销售也起了积极的推动作用，相反发电机的销售量却几乎停滞不前。据KeVe的统计（电动机VDI—Z118），在过去八年中，联邦德国直流电动机的销售量约增长了一倍。

1. 常规工业传动的应用范围

机 床

纺织、造纸工业

塑料工业

挤压机、化工搅拌机

水泥工业

钻探工业

起重设备

冶金工业

轧钢厂主传动

运输机械

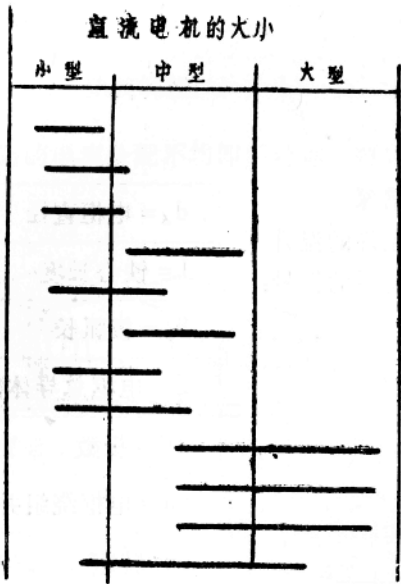
船舶传动

试验室设备

2. 特种电机

执行或伺服电动机

牵引电动机



牵引辅助传动（高压电动机）
 永磁电动机
 电子换向电动机

1.4 电磁设计的基本观点，特别是电枢绕组对过载能力的影响

功率 P

和 转速 n

主要尺寸

转矩 $M \sim \frac{P}{n}$

和 $d_A^2 \cdot I$

其一

其二

由ESSON的电机常数C来确定它们之间相互的关系：

$$C = \frac{P}{n \cdot d_A^2 \cdot I}$$

求得的电磁功率数值随转子直径的增大而增大，但主要取决于电机的利用系数。

$C \sim A \cdot B_L$

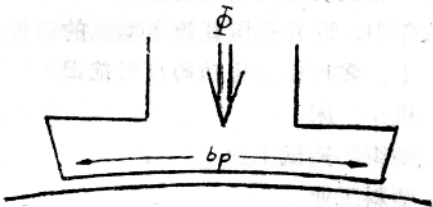
这里考虑为额定参数

线负荷 A

$$A = \frac{I_A Z}{\pi \cdot d_A} \left[\frac{A}{cm} \right]$$

气隙磁密（磁通密度） B_L

$$B_L = \frac{\Phi}{b_p \cdot l} [T]$$

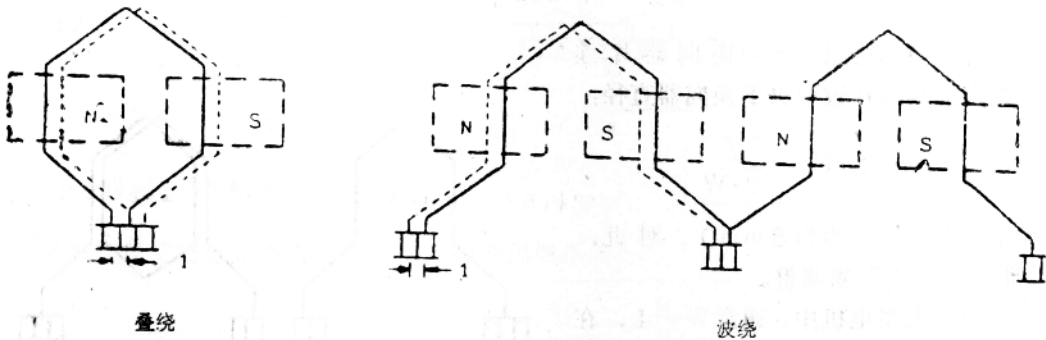


影响：槽深
 允许的温升
 公式中使用的符号：

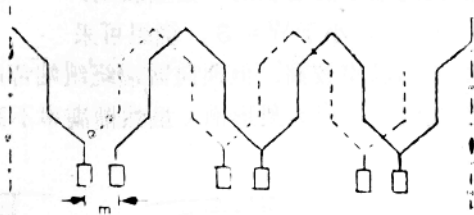
d_A = 电枢直径	
l = 铁心长度	
b_p = 极弧长	
Z = 电枢总导体数	
$2P$ = 极数	
$2a$ = 电枢绕组并联支路数	
n = 转速	min^{-1}
Φ = 每极磁通	$\text{Wb} \quad \checkmark \text{s}$
$E; U_g$ = 电动势	电动势 V

旋转感应电势的计算公式： $E = U_q = Z \frac{2p}{2a} \frac{n}{60}$ 不同类型的电枢绕组其并联支路数 $2a$ 也不相同。因此，选用合适类型的绕组与各种不同的电压、电流和转速值相匹配，从而就可得到较高的电机利用系数。

在安放绕组时，应注意一定的运算法则，该法则限定了电枢槽数和换向片数。
根据绕组的连接规律可分为：



单重结构，其换向器节距为 1
多重接线经常出现形式：



多重波绕组=串联绕组其换向器节距为m

单叠绕组

$2a = 2p$

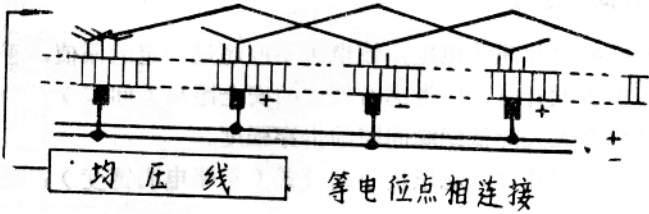
波绕组

$2a = 2m$

单波绕组： $m = 1$

在同极性电刷并联的多极电机中，由于各支路的电流分配不均即不对称，则导致换向不良。

解决办法



根据旋转感应电势的计算公式可推导出电枢绕组所需导体数：

$Z = C \cdot \frac{2a}{2p} \cdot \frac{E}{n}$

其中 $C \approx 60 / \Phi_{A\text{允许}}$ 通常C随电机中心高的增长而变小

在小型电机中，不同类型的电枢绕组经常会引起一些实际的绕线问题。必须将具有总导体数 Z 的电枢绕组安放在电枢槽内。合适的槽距约在15和25mm之间（小型电机）或者在20和35mm之间（大、中型电机），即理想的槽数范围取决于电枢直径的大小。 Z 可以通过“ U ”和/或“ W ”来调整。

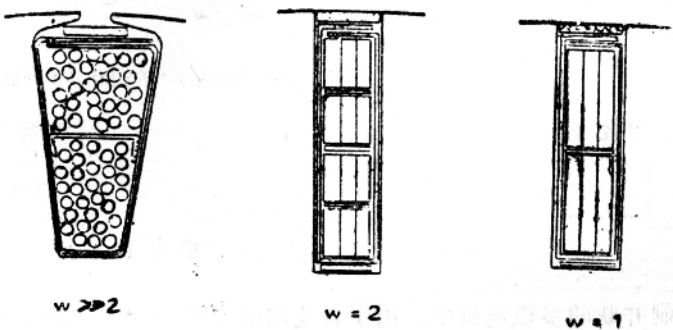
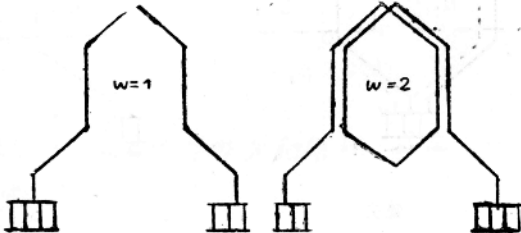
$$N = \frac{Z}{2 \cdot u \cdot w}$$

另外，电枢绕组必须与换向器片连接，最多的换向片数取决于换向器直径：

$$K = N \cdot U = \frac{Z}{2 \cdot W}$$

（最小换向器片距约为3mm）。对此， Z 只能通过“ W ”来调整。

在中、大型电机中，通常 $W = 1$ ，在小型电机中以及在通常的电源电压时， W 是随中心高的缩小而增长的（数量级别： $W = 2 \cdots \cdots 20$ ）。小于 $W = 3$ ，绕组可采用扁导线（槽满率较高，但换向器端绕组端部成型较困难）， $W = 3$ 以上，通常大多采用园导线散嵌绕组，槽形为梨形槽（虽然槽满率不高，但制造成本低）。



1.5 换向器片间电压 e_s

片间电压即相令换向片间的电压，该电压不应超过一定的限值，否则将会引起电位差火花及环火。在直流电机设计时，应考虑有较大的安全距离（间隙）。因为电刷磨损的粉尘以及加之一定的温度将会大大降低绝缘间隙的击穿强度。

两相邻刷杆间的换向片片间电压按下列公式（忽略电刷宽度）：

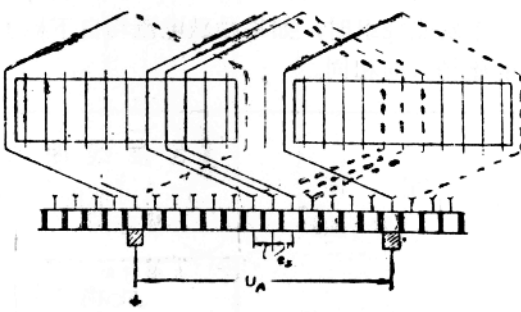
$$\sum e_s = U_A$$

当电压 U_A 在换向片上均匀分布时，可采用：

$$e_s = \frac{2P \cdot U_A}{K}$$

P = 极对数
 K = 换向片片数

事实上在负载及空载时电压不可能是均匀分布的。施加的端电压通常与电动势大致相等。然而仅在主极下的电枢导线中才能感生出电动势，极间的电枢导线不产生电动势。主极气隙磁场均匀分布的直流电机可为：



$$e_s = \frac{2P \cdot U_A}{K} \cdot \frac{\tau_p}{b_{\text{磁极}}}$$

τ_p = 极距 $b_{\text{磁极}}$ = 极弧长

如果气隙磁场分布不均匀，则最大的片间电压为：

$$e_{s_{\max}} = \frac{2P \cdot U_A}{K} \cdot \frac{\tau_p}{b_{\text{磁极}}} \cdot \frac{B_{\max}}{B_{\text{平均}}}$$

B = 气隙磁密

其实人们关心的只是最大的片间电压，但习惯上使用算术计算值（ $e_s = 2P \cdot U_A / K$ ）並以其作为评定的尺度。

在一般情况下，片间电压限值可按：

- $e_s = 15V$ 不带补偿绕组的直流电机
- $e_s = 20V$ 带补偿绕组的直流电机

2.1 线端标记

VDE 0570/7.57规程“线端标记”的规定已在1977年1月1日，由DIN42401标准（第1和第3篇）所代替。该标准的第1篇确定了旋转电机线端标准的基本规定，而标准的第3篇专门对直流电机作了规定。

绕组名称	老标准	新标准
电枢绕组	始端A 终端B	始端A1 终端A2
换向极绕组	始端G 终端H	始端B1 终端B2
补偿绕组	无特殊标记 (划入换向极绕组)	始端C1 终端C2
串励励磁绕组	始端E 终端F	始端D1 终端D2
并励励磁绕组	始端C 终端D	始端E1 终端E2
他励励磁绕组	始端I 终端K	始端F1 终端F2
辅助绕组： 纵向轴	未规定	始端H1 终端H2
横向轴	未规定	始端J1 终端J2

新标准中的其他规定:

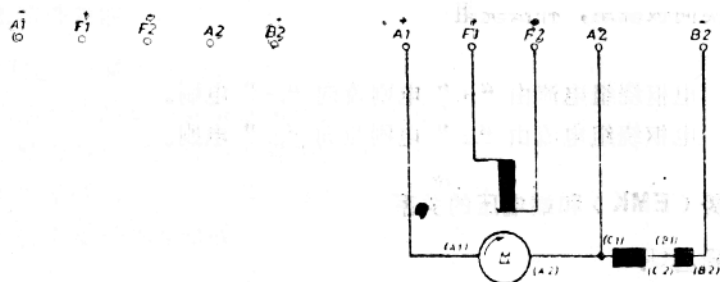
在各种情况下, 从下标 1 流向下标 2 (或相反), 则电枢回路的绕组接线则是正确的。

有二个励磁绕组时, 如果励磁电流均自下标 1 流向下标 2 (或相反), 则二个励磁绕组所形成的磁场方向相同。

	名 称	老 接 线 图 77.1.1前的 标志图	接 线 图 77.1.1后DIN42401 第1篇和第3篇规 定的接线标志	新 名 称
M 1	他励直流一並 励电动机			他励直流电动机
M 2	他励直流复励 电动机			带辅助串励绕组的 他励直流电动机
M 3	直流並励电动机 自 励			直流並励电动机
M 4	直流串励电动机			直流串励电动机
G 1	他励直流並励— 发 电 机			他励直流发电机
G 2	直流並励发电机 自 励			直流並励发电机
G 3	直流复励发电机 自 励			带辅助串励绕组的 直流复励发电机
G 4	带差复励绕组的他励 直流並励发电机			带差复励绕组的他 励直流发电机

举例: 补偿直流电动机, 采取他励並带有: 温度传感器、静止加热器、换向器室照明, 接线图

不是看线端位置, 而是以线端标志为准。



逆时针

顺时针

附加标记

- 101—102 温度传感器
- 103—104 传感器断路
- 201—202 加热器
- 401—402 灯
- 402—403 灯开关

2.2 接线图（新标准）

旋转方向

假设：在励磁绕组中电流由线端标记下标1流向标2（例如：F1接“+”，F2接“-”）。

电动机运行

若A1接“+”，则旋转方向为顺时针方向。

发电机运行

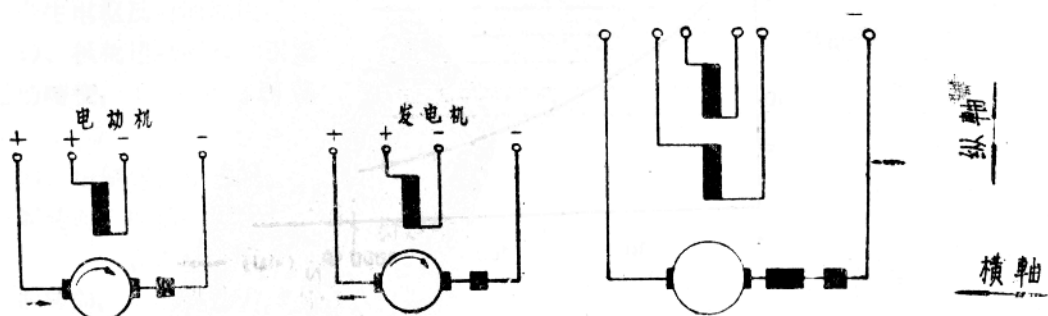
A1为“+”，旋转方向为顺时针方向。

旋转方向定义

按VDE 0530第1部分，第2.15.1节

“对仅有一个轴伸端的电机，旋转方向是指从单轴伸端一端观察时转子的旋转方向。对具有不同粗细两个轴伸端的电机，旋转方向是指较粗一端观察时转子的方向。”

对具有两个粗细相同轴伸端的电机，电机的旋转方向依观察者的位置，视转子的旋转方向而定。“顺时针方向为右转”。



纵轴绕组：并励、串励、他励绕组

横轴绕组：换向极绕组，补偿绕组

规则：

电动机运行：电枢绕组电流由“+”电刷流向“-”电刷。

发电机运行：电枢绕组电流由“-”电刷流向“+”电刷。

2.3 电动势 (EMK) 和端电压的关系

电机的电压降 ΔU ：

$$\Delta U = I_A \cdot \Sigma R_i + U_B$$

R_i = 电枢回路电阻；

电动机运行

$$U_A - \Delta U - U_g = 0$$

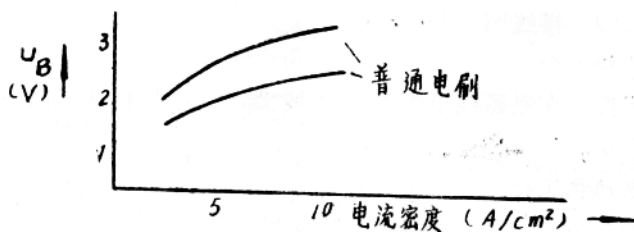
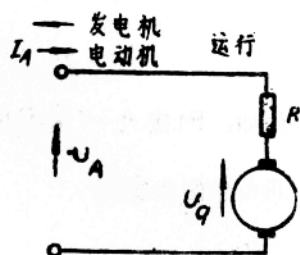
$$U_A = U_g + \Delta U$$

U_B = 电刷压降

发电机运行

$$U_A + \Delta U - U_g = 0$$

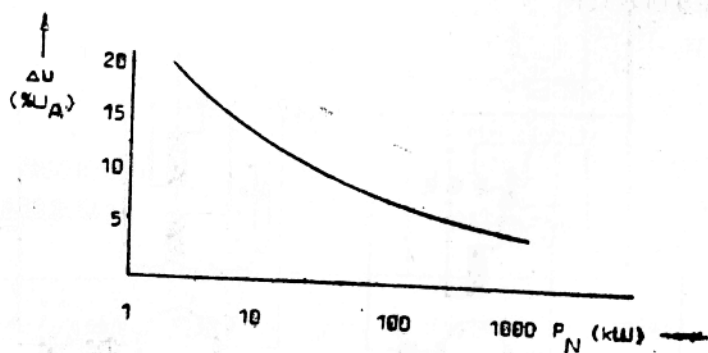
$$U_A = U_g - \Delta U$$



“+”和“-”为电刷压降。

根据电磁感应定律（假设励磁不变），转速与 E 成正比的变化，因此电压降对直流电机的转速特性曲线产生影响。在特殊情况下，例如对低速运行的辊道电动机，在冲击负载时，如要求转速不能显著下降，则在一定的条件下，就要适当增大整流器的电压裕度。

电机的电压降 $\Delta U = f(P_N)$

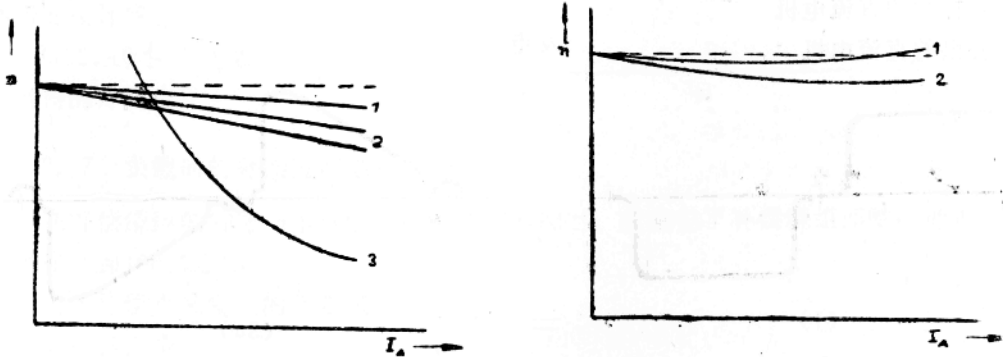


2.4 电动机特性曲线

假设: $U_A =$ 恒定, 忽略电枢反应

1. 并励或他励 (他励是目前最常用的励磁方式)
2. 并励或他励带少量串励绕组 (复励绕组)
3. 串励 (除用于牵引电机外, 其它基本不用)

考虑电枢反应的电动机特性曲线



1. 并励或他励
2. 并励或他励带复励绕组

$U =$ 恒定, G22, 10 85KW 440V 1000/1700 Y_{min}

电机所测得的转速特性曲

线

2.5 电枢反应

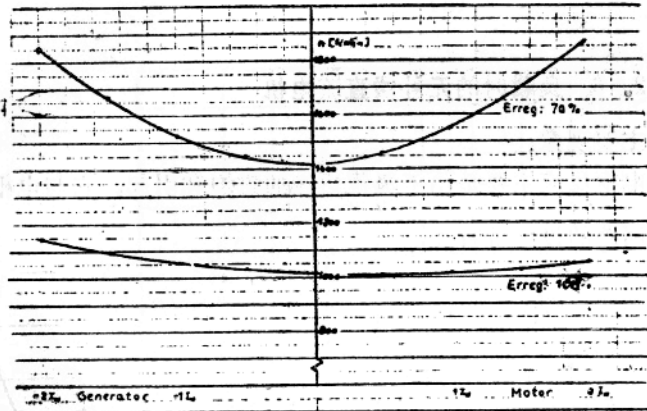
所谓电枢反应即由电枢绕组、换向极绕组以及特定情况下的补偿绕组所产生的磁场对合成主磁场的影响。

产生电枢反应的原因:

a)、极靴边缘磁饱和引起主磁场畸变: (总是削弱磁场)

b)、电刷偏离中性线:

顺转向: 电动机运行—增磁 } 稳定的
发电机运行—弱磁
逆转向: 电动机运行—弱磁
发电机运行—增磁



c)、换向极调整不当:

换向极磁场太弱如顺转向移动电刷

换向极磁场太强如逆转向移动电刷

磁场分布曲线(理想的)

1. 空载时的磁场曲线

2. 负载时及主极不励磁时的磁场曲线

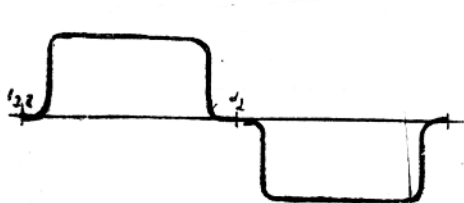
a) 非补偿的直流电机

b) 补偿的直流电机(补偿度 $<100\%$)

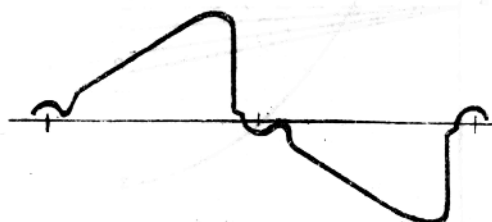
3. 负载时的磁场曲线

a) 无补偿的直流电机

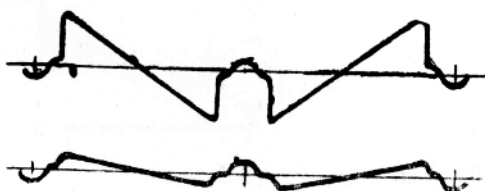
b) 补偿的直流电机



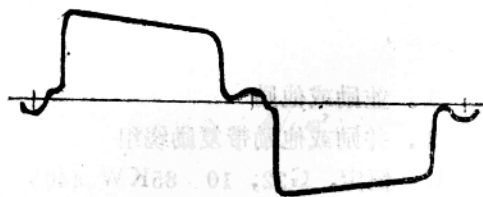
(1)



(3a)



(2)

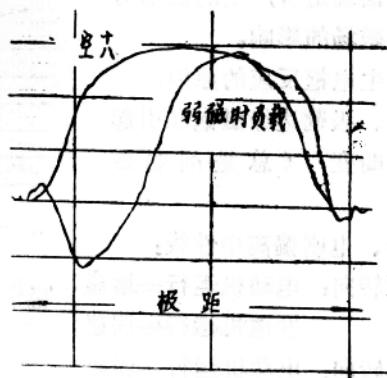
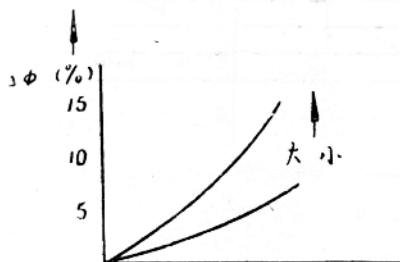


(3b)

2. 6 负载时的无补偿直流电机

主要现象:

电枢反应主要是由于极靴边缘的磁饱和引起, 它与电枢电流, 励磁程度以及电机大小、电磁回路的设计等有关。



型号G22.10