

高等院校电气工程系列教材

电机与电力拖动基础 学习指导

戴文进 陈瑛 杨莉 编著

清华大学出版社

高等院校电气工程系列教材

电机与电力拖动基础 学习指导

戴文进 陈瑛 杨莉 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要论述电机与电力拖动基础的学习方法。全书共分8章,各章分别就电机和电力拖动各部分内容,以内容提要、疑难剖析、拾遗补缺、习题解答和习题补充等板块形式进行讲述。

本书为《电机与电力拖动基础》一书的配套教材,也可作为其他相近专业的参考书,还可供有关技术人员选用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动基础学习指导/戴文进,陈瑛,杨莉编著.--北京:清华大学出版社,2012.3

(高等院校电气工程系列教材)

ISBN 978-7-302-27173-4

I. ①电… II. ①戴… ②陈… ③杨… III. ①电机—高等学校—教学参考资料 ②电力传动—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第217424号

责任编辑:邹开颜 赵从棉

封面设计:傅瑞学

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:15.5 字 数:373千字

版 次:2012年3月第1版 印 次:2012年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:30.00元

产品编号:042282-01

本书为《电机与电力拖动基础》一书的配套教材,主要论述电机与电力拖动基础的学习方法。书中各章分别以内容提要、疑难剖析、拾遗补缺、习题解答和习题补充等板块形式进行讲述,相信能对学生的学学习有一定的指导作用。

本书由南昌大学戴文进、陈瑛和杨莉共同编著。戴文进撰写了各章的内容提要、疑难剖析和拾遗补缺各板块,陈瑛撰写了第1~6章的习题解答,杨莉撰写了第7、8两章的习题解答和所有章的习题补充。

此外,戴文进的研究生王凯、陈向杰、刘海静、邓志辉、赵杰、林卿生、杨华、王宝福、谢友慧等同学在本书的资料搜集、文字录入、图表和曲线的绘制及扫描等方面做了大量工作,在此一并致谢。

本书作者虽都长期从事电机与电力拖动基础的教学,但毕竟水平有限,故书中谬误之处在所难免,敬请读者不吝指正。

编著者

2011年10月于南昌大学

第 1 章 直流电动机	1
1.1 内容提要	1
1.1.1 基本要求	1
1.1.2 掌握要点	1
1.2 习题解答	7
1.3 习题补充	15
第 2 章 交流电机	21
2.1 内容提要	21
2.1.1 基本要求	21
2.1.2 掌握要点	21
2.2 疑难剖析	34
2.2.1 Yy 连接的 6 种组别的接线图和相量图	34
2.2.2 Yy 连接的 6 种组别的内在规律	34
2.2.3 Yy 连接的 6 种组别的判定和组构的简便方法	36
2.2.4 6 种 Yd 连接组别的接线图和相量图	37
2.2.5 Yd 连接的 6 种组别的便捷的识别和组构方法	38
2.3 拾遗补缺	38
2.3.1 Dy 和 Dd 的连接组别	38
2.3.2 Dy 和 Dd 连接组别的接线图与相量图	39
2.4 习题解答	41
2.5 习题补充	56
第 3 章 电力拖动系统及其动力学原理	87
3.1 内容提要	87
3.1.1 基本要求	87
3.1.2 掌握要点	87
3.2 拾遗补缺	89
3.3 习题解答	91

第 4 章 直流电动机的电力拖动	98
4.1 内容提要	98
4.1.1 基本要求	98
4.1.2 掌握要点	98
4.2 拾遗补缺	113
4.3 习题解答	116
4.4 习题补充	136
第 5 章 三相异步电动机的电力拖动	146
5.1 内容提要	146
5.1.1 基本要求	146
5.1.2 掌握要点	146
5.2 习题解答	159
5.3 习题补充	175
第 6 章 电力拖动系统中电动机容量的选择	183
6.1 内容提要	183
6.1.1 基本要求	183
6.1.2 掌握要点	183
6.2 习题解答	193
第 7 章 特种驱动电机	211
7.1 内容提要	211
7.1.1 基本要求	211
7.1.2 掌握要点	211
7.2 习题解答	217
7.3 习题补充	220
第 8 章 控制电机	222
8.1 内容提要	222
8.1.1 基本要求	222
8.1.2 掌握要点	222
8.2 习题解答	229
8.3 习题补充	233
参考文献	239

1.1 内容提要

1.1.1 基本要求

- (1) 了解直流电动机的用途；
- (2) 了解直流电动机的工作原理；
- (3) 了解直流电动机的基本结构；
- (4) 熟悉直流电动机的额定值；
- (5) 熟悉直流电动机的励磁方式；
- (6) 掌握直流电动机的运行原理；
- (7) 熟练掌握直流电动机的各种工作特性。

1.1.2 掌握要点

1. 直流电动机的额定值

电动机的额定值是电动机运行的基本依据,直流电动机的额定值主要包括以下几种。

- (1) 额定电压 U_N : 在额定工作条件下电动机输入电压的额定值,单位为 V。
- (2) 额定电流 I_N : 在额定工作条件下电动机输入电流的额定值,单位为 A。
- (3) 额定容量 P_N : 直流电动机在额定条件下运行时,电动机转轴上输出的机械功率,单位为 W 或 kW。它等于额定电压 U_N 和额定电流 I_N 的乘积,再乘以电动机的效率,即 $P_N = U_N I_N \eta_N$ 。
- (4) 额定转速 n_N : 电动机在额定工作条件下运行时的转子转速,单位为 r/min。
- (5) 额定效率 η_N : 在额定工作条件下,电动机输出功率与输入功率的百分比。
- (6) 额定励磁电压 U_{fN} : 在额定工作条件下,电动机励磁绕组两端的电压。
- (7) 额定励磁电流 I_{fN} : 在额定工作条件下,电动机励磁绕组上的电流。

2. 直流电动机的励磁方式

直流电动机的励磁方式决定着直流电动机的运行特性,采用不同的励磁方式的直流电动机,其运行特性迥然不同。

直流电动机的励磁方式可分为他励及自励,其中自励又分为并励、串励和复励三种。

图 1-1 所示为各种励磁方式相应的接线图。

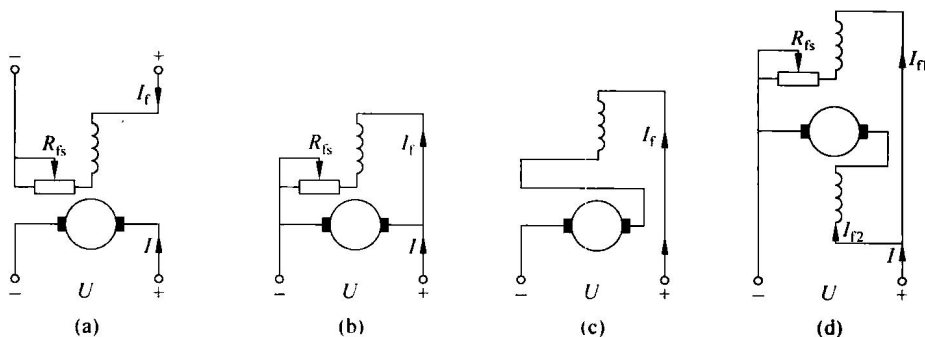


图 1-1 直流电动机按励磁分类接线图

(a) 他励; (b) 并励; (c) 串励; (d) 复励

3. 直流电动机的电枢绕组

直流电动机电枢绕组的线圈在磁场中转动产生感应电动势,同时通电线圈在磁场中受到力的作用,产生电磁转矩,从而实现机电能量转换。电枢绕组是直流电动机的一个重要部件。

4. 直流电动机的空载磁场

直流电动机空载时,电枢电流为零,直流电动机的气隙磁场由主磁极绕组的励磁磁动势 F_f 建立。图 1-2 所示为一台四极直流电动机在空载时气隙磁场的分布情况。

电动机主磁极产生的磁通分为主磁通 Φ_0 和漏磁通 Φ_σ 两部分。

空载磁场在一个极面下的气隙磁通密度空间分布如图 1-3 所示。

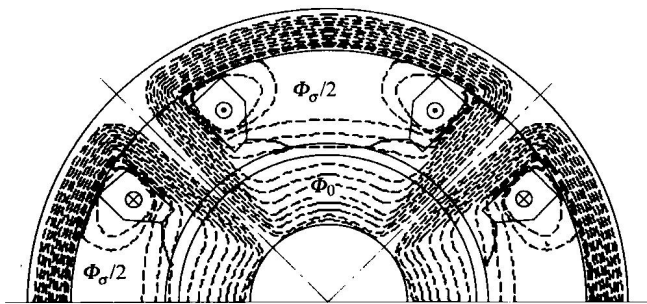


图 1-2 主磁通和漏磁通的分布

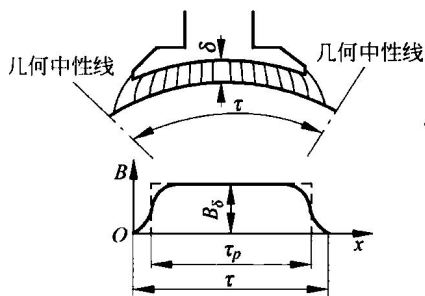


图 1-3 空载磁场在一个极面下的磁通密度分布

空载磁场的特点是磁极面下气隙 δ 小且较均匀,故磁通密度较高,幅值为 B_δ ;但由于两极之间的气隙增加,因而其磁通密度显著下降,从磁极边缘至两磁极间的轴线(几何中心线)处,其磁通密度曲线呈陡降形态,整个曲线呈马鞍形。

5. 直流电动机的电枢反应

当电动机带上负载后,电枢绕组流过电流,产生电枢磁动势。此时,电动机气隙磁场便由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立。

负载时电枢磁动势对主极磁场的影响,称为电枢反应。

电枢反应前后的磁场分布情况如图 1-4 所示,其中图(a)、(b)、(c)分别为电动机空载磁场、电枢磁场和两者的合成磁场分布图。

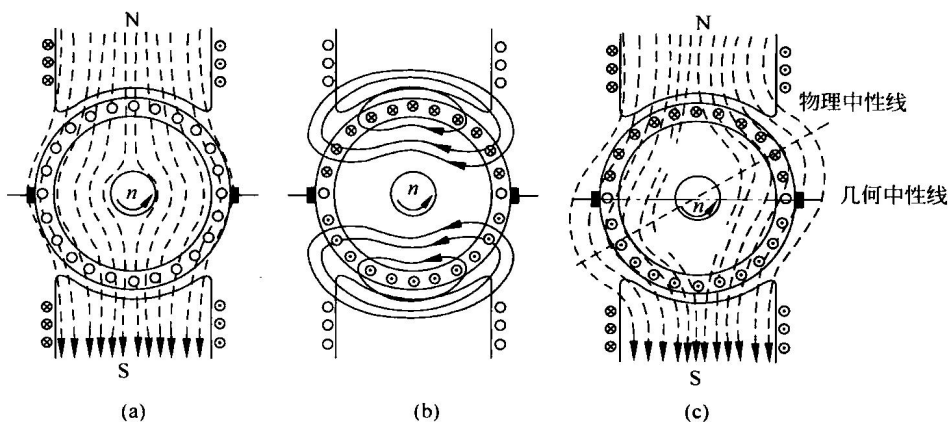


图 1-4 电枢反应对磁场分布的影响

(a) 空载时的磁场分布; (b) 电枢磁场分布; (c) 合成磁场分布

其相应的气隙磁密分布曲线如图 1-5 所示。

从图 1-4 和图 1-5 的比较可见,电枢反应的结果如下。

(1) 气隙磁场发生畸变,使磁场的物理中性线偏离几何中性线一个角度。被电刷短路的换向线圈中的电动势不为零,增加了换向的困难。

(2) 电枢反应的去磁作用将使每极磁通略有减小,并将影响电枢绕组中的电动势和电磁转矩随之减小。

(3) 电枢反应使极面下的磁通密度分布不均匀。

6. 直流电动机电枢绕组的感应电动势

经推导,直流电动机电枢绕组的感应电动势的计算公式为

$$E_a = lv \frac{N}{2a} B_{av} = l \times 2p\tau \frac{n}{60} \times \frac{N}{2a} \times \frac{\Phi}{\tau l} = \frac{pN}{60a} \Phi n$$

也可写成

$$E_a = C_e \Phi n$$

式中

$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

由此可见,直流电动机电枢绕组的感应电动势,与每极磁通和转速的乘积成正比。

7. 直流电动机的电磁转矩

经推导,直流电动机的电磁转矩的计算公式为

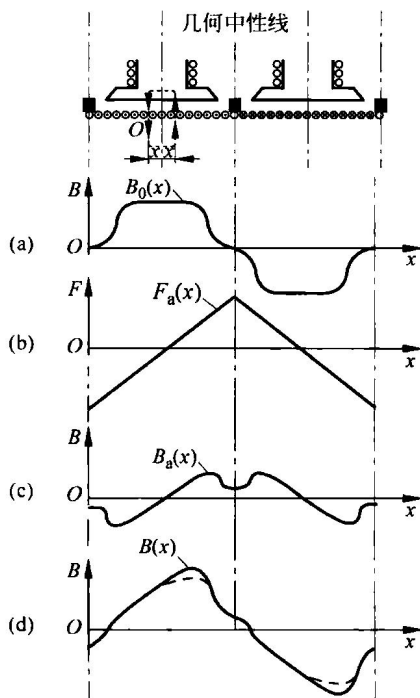


图 1-5 空气隙中磁通密度分布曲线

(a) 空载磁通密度; (b) 电枢磁动势;
(c) 电枢磁通密度; (d) 合成磁通密度

$$T = 2pl \times \frac{I_a}{2a} \times \frac{D_a}{2} \times \frac{N}{2p} \times \frac{\Phi}{l} \times \frac{2p}{\pi D_a} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a$$

也可写成

$$T = C_T \Phi I_a$$

式中

$$C_T = \frac{pN}{2\pi a}$$

由此可见,直流电动机的电磁转矩与每极磁通和电枢电流的乘积成正比。

8. 直流电动机运行的基本方程式

直流电动机各物理量的参考正方向如图 1-6 所示。

在此所假定的正方向下,直流电动机运行的各基本方程式如下所示。

(1) 电动势平衡方程式

直流电动机的电动势平衡方程式为

$$U = E_a + I_a R'_a + 2\Delta U_b = E_a + I_a R_a$$

(2) 功率平衡方程式

直流电动机的功率平衡方程式为

$$P_1 - P_2 = \sum p = p_{Cu} + p_{Fe} + p_{mec} + p_{ad}$$

直流电动机功率传递的全过程,可用如图 1-7 所示的功率流程图来表示。

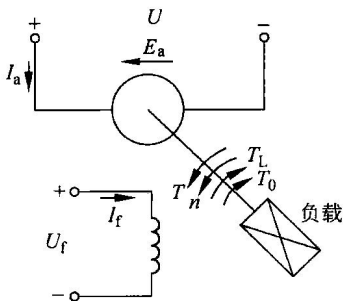


图 1-6 直流电动机物理量的参考正方向

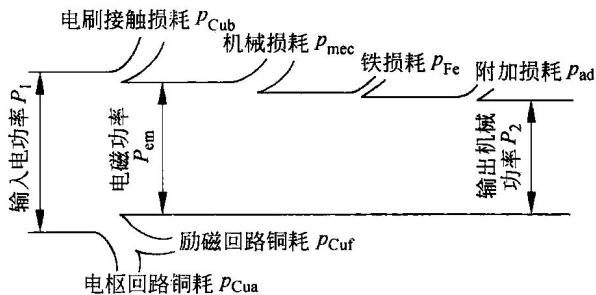


图 1-7 直流电动机的功率流程图

直流电动机的输出功率与输入功率的百分比,称为直流电动机的效率,即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

(3) 转矩平衡方程式

直流电动机的转矩平衡方程式为

$$T = T_2 + T_0$$

9. 电机的可逆性原理

从原理上讲,一台电机不论是直流电机,还是交流电机,都可在一定的条件下作电动机运行,将电能转变为机械能;而在另一种条件下,又可作发电机运行,将机械能转换为电能,这就是电机学中的电机可逆性运行原理。

10. 直流电动机的工作特性

所谓直流电动机的工作特性,是指在电压 $U=U_N=$ 常值,电枢回路不串入外加电阻,励磁电流保持不变的条件下,电动机的转速 n 、电磁转矩 T 和效率 η 三者,与输出功率 P_2 之间的关系曲线,即 $n, T, \eta = f(P_2)$ 。

11. 并励直流电动机的工作特性

对并励直流电动机来说,工作特性是指当电压 $U=U_N=$ 常值, $I_f = I_{fN} =$ 常值时, $n, T, \eta = f(P_2)$ 或 $n, T, \eta = f(I_a)$ 的关系曲线。并励直流电动机的接线图和其工作特性曲线分别如图 1-8(a)、(b) 所示。

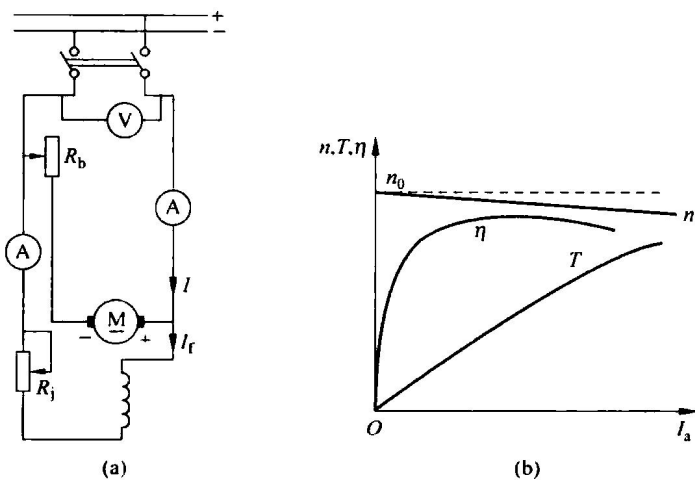


图 1-8 并励直流电动机的接线图和工作特性曲线

(1) 转速特性

并励直流电动机的转速特性表达式如下所示:

$$n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

可见,并励直流电动机的转速随电流 I_a 的增加而下降,如图 1-8(b) 中的转速特性曲线所示。

直流电动机的转速变化的大小,可用转速变化率(或称转速调整率) Δn 来表示:

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$$

(2) 转矩特性

并励直流电动机的转矩特性,如图 1-8(b) 中的转矩特性曲线所示。可见,其为一条略微向下弯曲的曲线。

(3) 效率特性

并励直流电动机的效率特性,是指 $U=U_N=$ 常值, $I_f = I_{fN} =$ 常值时, $\eta = f(I_a)$ 的关系曲线。

直流电动机的效率 η 为

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}$$

并励直流电动机的效率特性,如图 1-8(b)中的效率特性曲线所示。

可见,当 I_a 较小时, $\sum p$ 随电流 I_a 增加较小,效率 η 上升较快;而当 I_a 较大时, $\sum p$ 随电流 I_a 增加较大,效率 η 增加较慢。当 I_a 大到一定值时,效率 η 达到最大值,之后随电流 I_a 的增大,效率 η 又逐渐减小。

12. 串励直流电动机的工作特性

对串励直流电动机来说,其工作特性是指当电压 $U=U_N$ 为常值, $n, T, \eta = f(P_2)$ 或 $n, T, \eta = f(I_a)$ 的关系曲线。串励直流电动机的接线图和工作特性曲线分别如图 1-9(a)、(b) 所示。

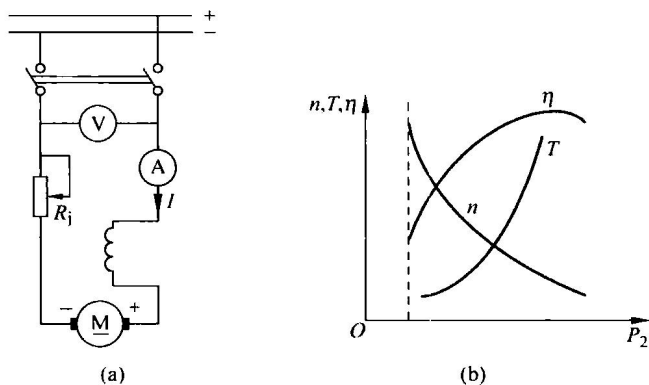


图 1-9 串励直流电动机的接线图和工作特性曲线

(1) 转速特性

串励直流电动机的转速表达式为

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e K I_a} - \frac{R_a}{C_e K}$$

可见,其转速 n 与电枢电流 I_a 成反比,转速特性为一双曲线,如图 1-9(b)中的曲线所示。当负载小时转速很高,负载增大时转速急剧下降,故串励电动机不允许空载或带很轻负载运转。

(2) 转矩特性

串励直流电动机的转矩表达式为

$$T = C_T \Phi I_a = C_T K I_a^2 = \frac{C_T}{K} \Phi^2$$

可见,其电磁转矩和电枢电流的平方成正比,转矩特性为一抛物线,如图 1-9(b)中的曲线所示。

(3) 效率特性

串励直流电动机的效率特性与并励直流电动机相似。

13. 复励直流电动机的工作特性

复励直流电动机的接线图如图 1-10 所示。

复励直流电动机通常接成积复励形式,此时串励绕组的磁动势与并励绕组的磁动势方向相同。如果并励磁动势起主要作用,其工作特性接近并励电动机的工作特性;反之,如果串励磁动势起主要作用,其工作特性就接近串励电动机的工作特性。

复励直流电动机的工作特性介于并励直流电动机与串励直流电动机的工作特性之间,如图 1-11 所示。

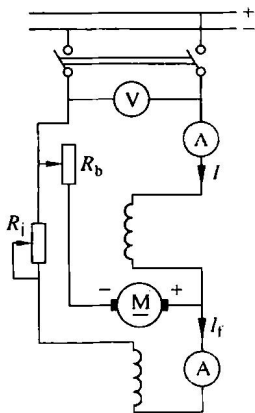


图 1-10 复励直流电动机的接线图

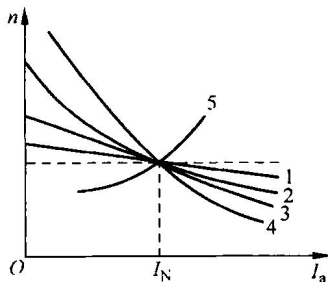


图 1-11 直流电动机的工作特性曲线

- 1- 并励电动机；2- 以并励为主的复励电动机；
3- 以串励为主的积复励电动机；4- 串励电动机；
5- 差复励并励电动机

1.2 习题解答

1-1 试述直流电动机的基本工作原理。

答 直流电动机的工作原理,是建立在毕-萨电磁力定律的基础上的。在直流电动机中,为了产生方向始终如一的电磁转矩,外部电路中的直流电流必须改变成电机内部的交流电流,这一过程称为电流的“换向”。换向过程由换向器与电刷完成。

如图 1-12 所示,将电枢绕组通过电刷接到直流电源上,绕组的转轴与机械负载相连,这时便有电流从电源的正极流出,经电刷 A 流入电枢绕组,然后经电刷 B 流回电源的负极。当线圈的 ab 边在 N 极下,cd 边在 S 极下时,电枢绕组中的电流沿着 a—b—c—d 的方向流动。电枢电流与磁场相互作用产生电磁力 f ,其方向可用左手定则来判断。这一对电磁力所形成的电磁转矩,使电机逆时针方向旋转。

当电枢绕组的 ab 边转到 S 极下,cd 边转到 N 极下时,通过换向器的作用,原来与电刷 A 相接触的线圈 a 端的铜片,现已变成与电刷 B 接触,因而电枢绕组中的电流变成沿 d—c—b—a 的方向流动。运用左手定则判断出,电磁力及电磁转矩的方向仍然使电动机逆时针旋转。

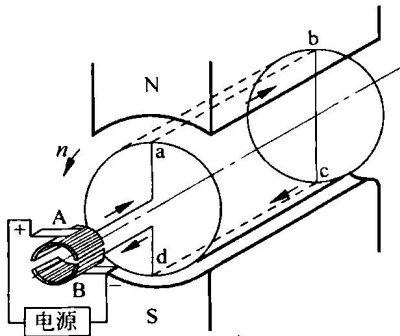


图 1-12 习题 1-1 附图

在同一方向的电磁转矩作用下,电机拖动生产机械沿着与电磁转矩相同的方向旋转,向负载输出机械功率,电机完成将电能转换成机械能输出的功能。这就是直流电动机的基本工作原理。

1-2 直流电动机由哪几个主要部件构成? 这些部件的功能是什么?

答 直流电机主要由定子和转子两大基本结构部件组成。

直流电机的定子由主磁极、换向磁极、电刷装置、机座等组成。

(1) 主磁极: 建立主磁通,包括铁芯(由低碳钢片叠成)和绕组(由铜线绕成)。

(2) 换向磁极: 改善换向,包括铁芯(中大型的由低碳钢片叠成,小型的由整块锻钢制成)和绕组(由铜线绕成)。

(3) 机座: 固定主磁极、换向磁极、端盖等,同时构成主磁路的一部分,用铸铁、铸钢或钢板卷成。

(4) 电刷装置: 引出(或引入)电流,电刷由石墨等材料制成。

转子由电枢铁芯、电枢绕组和换向器组成。

(1) 电枢铁芯: 构成主磁路,嵌放电枢绕组,由电工钢片叠成。

(2) 电枢绕组: 产生感应电动势和电磁转矩,实现机电能量转换,由铜线绕成。

(3) 换向器: 用于换向,由铜片叠成。

1-3 直流电动机的励磁方式有哪几种? 每种励磁方式的励磁电流与电枢电流有怎样的关系?

答 电流关系如下表所示(复励时, I_f 指并励绕组的励磁电流)。

励磁方式 种类	他励	并励	串励	复励
电动机	$I = I_a, I_f$ 独立	$I = I_a + I_f$ $U_f = U_a$	$I = I_a = I_f$	$I = I_a + I_f$

表中, I_f 为励磁电流; I_a 为电枢电流; I 为输入电流; U_f 为励磁电压; U_a 为电枢电压。

1-4 一台四极直流电动机,采用单叠绕组,问:

(1) 若取下一只或相邻两只电刷,电机是否可以工作?

(2) 若只用相对两只电刷,电机是否可以工作?

(3) 若有一磁极失去励磁将产生什么后果?

答 根据直流电机电枢绕组的并联支路图分析。

(1) 如果仅取下一只电刷,剩下三只电刷仍能工作。由于现在是剩下两条支路并联,因此对感应电动势并无影响。设原来电枢绕组每条支路电流为 I ,4条支路并联总电流为 $4I$ 。现在由于两条支路的电阻相等,因此两条支路并联总电流为 $2I$,现在电流和原来电流之比为 $\frac{2I}{4I} = \frac{1}{2}$,所以现在功率为原来功率的 $1/2$ 。

只用相邻两只电刷,电机能够工作。此时,电枢感应电动势不受影响,但电机容量要减小。现在两条支路并联,一条支路电阻为另一条支路电阻的3倍,因此两路并联总电流为 $I + \frac{1}{3}I = \frac{4}{3}I$ 。现在电流和原来电流之比为 $\frac{\frac{4}{3}I}{4I} = \frac{1}{3}$,因此,现在功率减为原来功率的 $1/3$ 。在轻载时尚能运行,重载或满载不能运行。

(2) 只用相对的两只电刷时,此时虽形成两条并联支路,每条支路下一半元件的电动势方向与另一半元件的电动势方向恰好相反,故每条支路总电动势为零,所以电动机无法工作。

(3) 若有一磁极失去励磁时,电动势不受影响。失去励磁的那条支路无电动势,因此相当于三条支路并联,总电流为原来总电流的 $3/4$,即功率为原来功率的 $3/4$ 。

1-5 何谓电枢反应?电枢反应对气隙磁场有何影响?公式 $E_a = C_e \Phi n$ 和 $T = C_T \Phi I_a$ 中的 Φ 应是什么磁通?

答 直流电机在空载运行时,气隙磁场仅由励磁磁动势产生。当电机带上负载后,气隙磁场便由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立。负载时电枢磁动势对主极磁场的影响,称为电枢反应。

电刷在几何中性线时产生交轴电枢反应,其结果是:①气隙磁场发生畸变,使磁场的物理中性线偏离几何中性线一个角度 α 。被电刷短路的换向线圈中的电动势不为零,增加了换向的困难。对发电机来说,顺电枢旋转方向移过 α 角;对电动机来说,则逆电枢旋转方向移过 α 角。②一半磁极磁通增加,另一半磁极磁通减小。在磁路不饱和的情况下,增加与减少的磁通相同,每极磁通不变。磁路饱和时,增加得少,减少得多,每极磁通减少,电动势和电磁转矩随之减小。

电刷偏离几何中性线时,除产生交轴电枢反应(其结果与上同)外,还产生直轴电枢反应,其结果是去磁或助磁。

公式 $E_a = C_e \Phi n$ 和 $T = C_T \Phi I_a$ 中的 Φ 应是每个极面下的气隙合成磁通,它由励磁磁动势和电枢磁动势共同产生。

1-6 直流电动机电刷之间的感应电动势与某一导体的感应电动势有何不同?

答 一个导体元件所感应的电动势为交流电动势,其表达式为 $e = B_{av} lv$ 。由于气隙磁通密度 B_{av} 在 N、S 极下正、负交替地变化,因此一个元件的感应电动势也是交变的。

电刷间的感应电动势为直流电动势,是一个支路的电动势,其表达式为 $E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n$ 。

1-7 直流电动机的感应电动势与哪些因素有关?若一台直流电动机在额定工作条件下运行时的感应电动势为 220 V,试问在下列情况下电动势变为多少?

- (1) 磁通减少 10%;
- (2) 励磁电流减少 10%;
- (3) 转速增加 20%;
- (4) 磁通减少 10%,同时转速增加 20%。

答 直流电动机的感应电动势表达式为 $E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi$,其中, $C_e = \frac{pN}{60a}$,由电机结构决定的常数,称为电动势常数。所以感应电动势与气隙每极磁通量 Φ 和电枢的转速 n 有关。若每极磁通 Φ 保持不变,则电枢电动势和转速成正比;若转速保持不变,则电枢电动势与每极磁通成正比。

(1) Φ 减少 10%, E_a 亦减少 10%,为 198 V;

(2) I_f 减少 10%,由于磁路饱和, Φ 减少不到 10%, E_a 亦减少不到 10%,因此 $198 \text{ V} < E_a < 220 \text{ V}$;

(3) n 增加 20%, E_a 亦增加 20%, 为 264 V;

(4) Φ 减少 10%, 同时 n 增加 20%, $E = (1 - 0.1) \times (1 + 0.2) \times 220 = 237.6$ (V)。

1-8 如何改变并励电动机的旋转方向?

答 改变直流电动机转向就是要改变电磁转矩的方向, 电磁转矩是电枢电流和气隙磁场相互作用产生的, 因此改变电枢电流的方向或改变励磁磁场的方向就可以达到改变电动机转向的目的。对于并励电动机, 可以将电枢绕组的两个接线端对调或将并励绕组的两个接线端对调, 但两者不能同时改变。

1-9 并励电动机在运行中励磁回路断线, 将会发生什么现象? 为什么?

答 励磁回路断开后, 主极磁场只剩下剩磁。在断开瞬间, 转速 n 不会立即变化, 因此电枢电动势 E_a 变为与剩磁磁通 Φ_r 成正比的很小的值。由于电枢电流 $I_a = (U - E_a) / R_a$, R_a 很小, 因此 I_a 会急剧增大。由于主磁通 Φ 减至很小, I_a 增至很大, 因此电磁转矩 $T = C_T \Phi I_a$ 的变化就有两种可能。

(1) 若 I_a 增大的比率高出主磁通 Φ 减小的比率(剩磁较大时), 则 T 迅速增大, 当负载转矩 T_L 不变时, 使转速 n 明显升高。随着 n 升高, E_a 升高, 使 I_a 开始减小, T 减小, 最终在较高的转速下 $T = T_L$, 电动机达到新的稳态。此时, n 和 I_a 都远远超过其额定值, 一方面出现“飞车”现象, 会造成电机转子(特别是换向器)的损坏; 另一方面, 过大的电枢电流使电机发热严重, 换向火花很大, 有可能烧毁换向器和电枢绕组。这种情况是很危险的。

(2) I_a 增大受到 R_a 的限制, 因此, 若 I_a 增大的比率低于主磁通 Φ 减小的比率(剩磁很小时), 则 T 减小, T_L 不变时, 使 n 降低。随着 n 降低, E_a 降低。此时 E_a 已经非常小了, 因此, E_a 降低使 I_a 增大从而 T 增大的幅度很有限, 即使减速到 $n = 0$, 仍有 $T < T_L$ 。最终电动机停转, 但 I_a 仍然远远超过其额定值, 可能烧毁电机, 这种情况也是很危险的。所以, 并励(或他励)直流电动机运行中绝不允许励磁回路开路, 对此必须采取必要的保护措施。

从上述分析可见, 这种因励磁回路开路而造成主磁通异常变化的情况, 与正常的弱磁升速是有所不同的。

1-10 串励电动机为什么不能空载运行? 复励电动机能否空载运行?

答 串励电动机, 由于 $I_f = I_a$, 如果磁路未饱和, $\Phi \propto I_f$, 由 $T = C_T \Phi I_a$ 可见, $T \propto I_a^2$; 如果磁路高度饱和, 则 Φ 基本上不变, 即 $T \propto I_a$ 。这对起动和过载能力有重要意义。但负载减轻时, 转速会上升, 如负载为轻载时, 电动机的转速将迅速上升, 造成“飞车”。

复励电动机既有并励绕组又有串励绕组, 可使电机具有串励电动机的特点, 而又不发生空载“飞车”的危险, 从而保证电机能稳定运行。

1-11 何谓直流电机的可逆原理? 如何判断一台接在直流电网上正在运行的直流电机是工作在发电状态还是电动状态?

答 从原理上讲, 一台电机不论是交流电机, 还是直流电机, 都可以在一定的条件下, 作为发电机运行, 将其机械能转换为电能; 而在另一种特定的条件下, 又作为电动机运行, 将电能转换为机械能, 这个原理称为电机的可逆原理。

对于直流电机来说, 可根据下列关系来判断电机的运行状态。

当 $E_a > U$, T 与转速 n 反方向时为发电机运行状态;

当 $E_a < U$, T 与转速 n 同方向时为电动机运行状态。

1-12 一台直流电动机,额定功率为 $P_N = 75 \text{ kW}$,额定电压 $U_N = 220 \text{ V}$,额定效率 $\eta_N = 88.5\%$,额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$,求该电动机的额定电流和额定负载时的输入功率。

解 额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{75 \times 10^3}{220 \times 88.5\%} = 385.2 (\text{A})$$

额定负载时的输入功率

$$P_{1N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{75}{88.5\%} = 84.745 (\text{kW})$$

或

$$P_{1N} = U_N I_N \times 10^{-3} = 220 \times 385.2 \times 10^{-3} = 84.745 (\text{kW})$$

1-13 一直流电动机数据为: $2p = 6$,总导体数 $N = 780$,并联支路数 $2a = 6$,运行角速度 $\omega = 40\pi \text{ rad/s}$,每极磁通为 0.0392 Wb 。试计算:

- (1) 电动机感应电动势;
- (2) 速度为 900 r/min ,磁通不变时电动机的感应电动势;
- (3) 磁通为 0.0435 Wb , $n = 900 \text{ r/min}$ 时电动机的感应电动势;
- (4) 若每一线圈电流的允许值为 50 A ,在第(3)问情况下运行时,电动机的电磁功率。

解 (1) 电动势常数

$$C_e = \frac{pN}{60a} = \frac{3 \times 780}{60 \times 3} = 13$$

电机转速

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} = \frac{60 \times 40\pi}{2\pi} = 1200 (\text{r/min})$$

感应电动势

$$E_{a1} = C_e \Phi n = 13 \times 0.0392 \times 1200 = 611.52 (\text{V})$$

- (2) 速度为 900 r/min ,磁通不变时电动机的感应电动势为

$$E_{a2} = C_e \Phi n' = 13 \times 0.0392 \times 900 = 458.64 (\text{V})$$

- (3) 磁通为 0.0435 Wb , $n = 900 \text{ r/min}$ 时电动机的感应电动势为

$$E_{a3} = C_e \Phi' n' = 13 \times 0.0435 \times 900 = 508.95 (\text{V})$$

- (4) 每一线圈电流的允许值为 50 A ,则电机中总电枢电流为

$$I_a = 2aI = 6 \times 50 = 300 (\text{A})$$

电磁功率

$$P_{em} = E_{a3} I_a = 508.95 \times 300 \times 10^{-3} = 152.7 (\text{kW})$$

1-14 已知一台四极, 1000 r/min 的直流电动机,电枢有 42 槽,每槽中有 3 个并列线圈边,每元件有 3 匝,每极磁通为 $\Phi = 0.0175 \text{ Wb}$,电枢绕组为单叠绕组。试求:

- (1) 电枢绕组的感应电动势;
- (2) 若电枢电流 $I_a = 15 \text{ A}$,电枢的电磁转矩。

解 每个线圈匝数 $N_c = 3$,每个虚槽有 3 个线圈边,因此,电枢导体总数为

$$N = 2N_c uQ = 2 \times 3 \times 3 \times 42 = 756$$

单叠绕组并联支路对数为

$$a = p = 2$$