



“十三五”普通高等教育规划教材

DIANJI YU TUODONG JICHU
XUEXI ZHIDAO

电机与拖动基础 学习指导

刘学军 孙玉梅 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

电机与拖动基础 学习指导

主编 刘学军 孙玉梅
编写 刘丽丽 鞠晓君 杨 明
孙巧妍 姜倩倩
主审 周振雄



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为刘学军教授主编《电机与拖动基础》教材的配套学习指导书。共分2篇,第1篇为学习指导及习题解答,系统总结了《电机与拖动基础》教材的主要内容,提出各章的学习基本要求,总结出各章的学习要点,对主要知识点进行了归纳讲解。对教材的思考题和计算题进行了解答,并精心编写了模拟自测题和参考答案。第2篇为实验指导书,介绍了13个电机实验,包括直流电动机、直流发电机认识实验,直流电动机的启动、调速和反转实验,单相变压器实验,三相变压器的联结组 and 不对称短路实验,三相异步电动机、直流他励电动机的机械特性实验,三相异步电动机的启动与调速实验,三相同步发电机、电动机的运行特性实验,异步电机的M-S曲线测绘实验,步进电动机实验,力矩式自整角机实验。读者可以选择做4~8个实验,每个实验参考学时为2学时。

本书可供高等院校电气类专业的师生使用,也可供从事电力系统工作的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础学习指导/刘学军,孙玉梅主编. —北京:中国电力出版社,2016.6

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-9374-5

I. ①电… II. ①刘… ②孙… 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(2016)第114668号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年6月第一版 2016年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 11.75印张 282千字

定价 25.00元



敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书为刘学军教授主编教材《电机与拖动基础》的配套学习指导书。共分2篇，第1篇为学习指导及习题解答，系统总结了《电机与拖动基础》教材的主要内容，提出各章的学习基本要求，总结出各章的学习要点，对主要知识点进行了归纳讲解。对教材的思考题和计算题进行了解答，并精心编写了模拟自测题和参考答案。读者可以自行检测自己的学习水平，通过学习本篇能够清晰电机与拖动基础课程的知识脉络，理解基本概念，掌握电机与电力拖动系统的基本理论和分析电机问题的方法。掌握主要计算方法和解题方法步骤。

第2篇为实验指导书。为培养学生理论与实践相结合，提高创新能力，奠定了基础，介绍了13个电机实验，包括直流电动机、直流发电机认识实验，直流电动机的启动、调速和反转实验，单相变压器实验，三相变压器的联结组和不平衡短路实验，三相异步电动机、直流他励电动机的机械特性实验，三相异步电动机的启动与调速实验，三相同步发电机、电动机的运行特性实验，异步电机的M-S曲线测绘实验，步进电动机实验，力矩式自整角机实验。

本书由烟台南山学院刘学军、孙玉梅主编。由刘丽丽编写第1、2章，由鞠晓君编写第3、4章，由孙巧研编写第5、6章，由姜倩倩编写第7、8章，由孙玉梅编写第9章，杨明编写第2篇；其余章节由刘学军教授编写并负责统稿。

本书可供电气类专业学生学习《电机与拖动基础》教材课程时配套使用，亦可供从事电气工程的工程技术人员学习参考。

本书在编写过程中，参考了有关专家、学者的一些文献，北华大学周振雄教授仔细审阅并提出了宝贵的修改意见，在此表示真挚的感谢。本书的资料整理、文字录入、插图绘制由马凤军、刘畅完成，在此一并表示感谢。

由于作者水平和时间有限，书中不妥和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016年1月

目 录

前言

第 1 篇 电机与拖动基础学习指导及习题解答

第 1 章 概述	1
1.1 基本要求	1
1.2 学习要点	1
1.3 习题解答	2
第 2 章 直流电机	5
2.1 基本要求	5
2.2 学习要点	5
2.3 习题解答	8
第 3 章 电力拖动系统的动力学基础	14
3.1 基本要求.....	14
3.2 学习要点.....	14
3.3 习题解答.....	15
第 4 章 直流电动机的电力拖动	18
4.1 基本要求.....	18
4.2 学习要点.....	18
4.3 习题解答.....	19
第 5 章 变压器	29
5.1 基本要求.....	29
5.2 学习要点.....	29
5.3 习题解答.....	30
第 6 章 交流电机的基本理论	43
6.1 基本要求.....	43
6.2 学习要点.....	43
6.3 习题解答.....	44
第 7 章 异步电动机	48
7.1 基本要求.....	48
7.2 学习要点.....	48
7.3 习题解答.....	51
第 8 章 三相异步电动机的电力拖动	58
8.1 基本要求.....	58

8.2 学习要点	58
8.3 习题解答	61
第9章 同步电机	66
9.1 基本要求	66
9.2 学习要点	66
9.3 习题解答	69
第10章 控制电机及其他用途电动机	81
10.1 基本要求	81
10.2 学习要点	81
10.3 习题解答	83
第11章 电机拖动系统中的电动机选择	92
11.1 基本要求	92
11.2 学习要点	92
11.3 习题解答	95
第12章 电机与电力拖动自测题	101
12.1 电机与电力拖动自测题一	101
12.2 电机与电力拖动自测题二	104
12.3 电机与电力拖动自测题三	107
12.4 电机与电力拖动自测题四	110
12.5 电机与电力拖动自测题五	114
12.6 电机与电力拖动自测题六	117

第2篇 电机与拖动基础实验指导书

实验要求	122
实验1 直流电动机认识实验	123
实验2 直流发电机认识实验	127
实验3 直流电动机的启动、调速和反转实验	133
实验4 单相变压器实验	135
实验5 三相变压器的联结组和不平衡短路实验	140
实验6 三相异步电动机的机械特性实验	146
实验7 三相异步电动机的启动与调速实验	150
实验8 三相同步发电机的运行特性实验	154
实验9 三相同步电动机运行特性实验	160
实验10 直流他励电动机机械特性实验	165
实验11 异步电机的M-S曲线测绘实验	170
实验12 步进电动机实验	174
实验13 力矩式自整角机实验	178
参考文献	182

第 1 篇 电机与拖动基础学习指导及习题解答

第 1 章 概 述

1.1 基 本 要 求

- (1) 了解电机的分类及用途。
- (2) 了解电力拖动系统的构成及发展概况。
- (3) 了解物质在磁性能方面的特点。
- (4) 磁路的欧姆定律，了解磁路基尔霍夫定律，了解磁路的计算。
- (5) 掌握电磁感应定律、电磁力定律。

1.2 学 习 要 点

- (1) 了解磁场的基本物理量。如磁通量 (Φ)、磁感应强度 (B)、磁场强度 (H)、磁导率 (μ)、磁阻 (R_m)、磁压 (U_m)、磁动势 (F)、磁导 (Λ_m) 等。
- (2) 了解铁磁材料的特性，铁磁材料的磁滞和涡流损耗。
- (3) 磁化曲线。B-H 曲线的非线性关系，剩磁、矫顽磁力、硬磁材料、软磁材料。
- (4) 掌握磁路的基本定律。

安培环路定律
$$\oint H \cdot dl = \Sigma I$$

电磁感应定律
$$e = -\frac{d\psi}{dt}, e = Blv$$

磁路欧姆定律
$$\Phi = \frac{F}{R_m}$$

磁路基尔霍夫第一定律
$$\Sigma I = 0$$

磁路基尔霍夫第二定律
$$\oint H \cdot dl = \Sigma NI$$

- (5) 电磁力、电磁转矩。

电磁力
$$F_e = F = Bli$$

电磁转矩
$$T = Fr$$

- (6) 磁路基本计算。磁路中，气隙虽小，但所需的磁动势却很大，通常可以忽略铁芯的磁压降。

(7) 了解铁芯线圈电路中电压、电流和功率的关系,了解铁损的形成和减少铁损的方法。

1.3 习题解答

1.3.1 思考题解答

1-1 变压器感应电动势和电机中的切割电动势产生的原因有什么不同?其大小与哪些因素有关?

答:根据电磁感应定律,变化的磁场会产生电场,使导体产生感应电动势,电机中电磁感应现象表现在导体与磁场相对运动,导体切割磁力线在导体内产生切割电动势,用 $e = Blv$ 表示,在磁感应强度 B 一定时, e 与导体长度 l 和切割速度 v 成正比;在变压器中,线圈中磁通变化在线圈中产生感应电动势称为变压器电动势,用 $e = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 表示。当线圈匝数一定, e 与磁通变化率 $\frac{d\Phi}{dt}$ 成正比。

1-2 磁路饱和对磁路的等效电感有何影响?

答:由于磁性材料磁导率 μ 不是常数, β 和 H 不是正比关系,因此磁路结构一定时磁路磁阻是非线性的。当磁路饱和时导磁系数 μ 大大减少,使磁路的等效电感大大减小。

1-3 如何减少铁芯中磁滞和涡流损耗?

答:磁路中铁损耗的公式为 $p_{Fe} = (k_n f B_m^2 + k_c d^2 f^2 B_m^2)$ 可知要减小 p_{Fe} ,就要减小磁感应强度 B_m 。

1-4 起始磁化曲线、磁滞回线和基本磁化曲线是如何形成的,它们有哪些要求?

答:未经磁化过的铁磁材料进行磁化后的 $B-H$ 曲线,称为起始磁化曲线。若铁磁材料反复磁化,得到闭合的磁滞回线,从磁滞回线可知, B 的变化总是滞后于 H ,这种现象称为磁滞现象。故称为磁滞回线。对于同一铁磁材料,选取不同 H_m 多次交变磁化,可以得到一系列磁滞回线,将这些磁滞回线正顶点与原点连成的曲线称为基本磁化曲线。

1-5 螺线管中磁通与电动势的正方向如图 1-1 所示,当磁通变化时,分别写出它们之间的关系式。

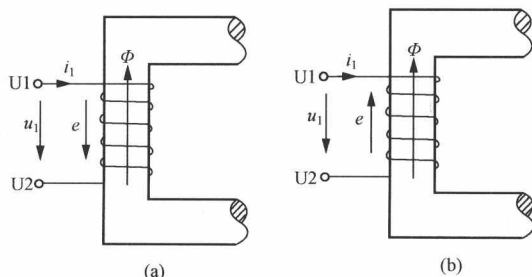


图 1-1 思考题 1-5 图

答:对于图 1-1 (a) 图, $e = -\frac{Nd\Phi}{dt}$ 对于图 1-1 (b) 图 $e = \frac{Nd\Phi}{dt}$ 。

1.3.2 计算题解答

1-1 某铁芯的截面积 $S=10\text{cm}^2$ ，当铁芯中的 $H=5\text{A/cm}$ 时， $\Phi=0.001\text{Wb}$ ，可以认为磁通在铁芯内均匀分布，求铁芯的磁感应强度 B 和磁导率 μ 。

解：铁芯中磁感应强度和磁导率 μ 为

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.001}{10 \times 10^{-4}} = 1.0(\text{T})$$

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{1.0}{5 \times 10^2} = 0.2 \times 10^{-2}(\text{H/m})$$

1-2 在一个铸钢制成的闭合铁芯上绕有一个匝数 $N=1000$ 匝的线圈。铁芯的截面积 $S=20\text{cm}^2$ ，铁芯平均长度 $l=50\text{cm}$ 。若要在铁芯中产生 $\Phi=0.002\text{Wb}$ 时，试问线圈中应通入多大直流电流。如果在制作时铁芯中出现一段 $l_0=0.2\text{cm}$ 的气隙，要保持铁芯中磁通不变，则通入线圈直流电流增加多少？

解：(1) 无气隙时，铁芯中磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0.002}{20 \times 10^{-4}} = 1(\text{T})$$

查铁芯磁化曲线（教材图 1-6 常用铁磁性材料的基本磁化曲线） $H=9.2\text{A/cm}$ ，因而磁通势为

$$F = Hl = 9.2 \times 10^2 \times 50 \times 10^{-2} = 460(\text{A})$$

线圈电流为

$$I = \frac{F}{N} = \frac{460}{1000} = 0.46(\text{A})$$

(2) 有气隙时， $B_0=B$ ，气隙中磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} = 0.796 \times 10^6(\text{A/m})$$

线圈磁通势应增加的数值

$$\Delta F = H_0 l_0 = 0.796 \times 10^6 \times 0.2 \times 10^{-2} = 0.1592 \times 10^4(\text{A})$$

线圈电流增加值

$$\Delta I = \frac{\Delta F}{N} = \frac{0.1592 \times 10^4}{1000} = 1.592(\text{A})$$

气隙磁阻

$$R_{m0} = \frac{\Delta F}{\Phi_m} = \frac{0.1592 \times 10^4}{0.002} = 0.796 \times 10^6(\Omega)$$

1-3 如图 1-2 所示磁路中，铁芯厚度均为 50mm ，铁芯 1 用硅钢，铁芯 2 用铸钢制成。若要在铁芯中产生 0.0012Wb 的恒定磁通，线圈的磁通势为多少？

解：图 1-2 所示磁路各部分长度为

$$l_1 = [2 \times (120 - 20) + (200 - 20) + (200 - 20 - 50 - 1)] \\ = 509\text{mm} = 50.9(\text{cm})$$

$$l_2 = 50\text{mm} = 5(\text{cm})$$

$$l_0 = 2 \times 0.5 = 1\text{mm} = 0.1(\text{cm})$$

磁路各部分面积

$$S_1 = 50 \times 20 = 1000 \text{ mm}^2 = 10 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$S_2 = S_1 = 10 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$S_0 = S_1 = 10 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$\text{即 } S_1 = S_2 = S_0 = 10 \text{ (cm}^2\text{)}$$

磁路各部分磁感应强度为

$$\begin{aligned} B_1 = B_2 = B_0 &= \frac{\Phi}{S_1} = \frac{0.0012}{10 \times 10^{-4}} \\ &= 1.2 \text{ (T)} \end{aligned}$$

查磁化曲线（教材 1-6 常用铁磁材料的基本磁化曲线）得

$$H_1 = 5.4 \text{ A/cm}$$

$$H_2 = 12.7 \text{ A/cm}$$

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{1.2}{4\pi \times 10^{-7}} = 0.955 \times 10^6 \text{ A/m} = 0.955 \times 10^4 \text{ (A/cm)}$$

最后求得磁通势为

$$\begin{aligned} F &= H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 l_0 \\ &= (5.4 \times 50.9 + 12.7 \times 5 + 0.955 \times 10^4 \times 0.1) = 1293 \text{ (A)} \end{aligned}$$

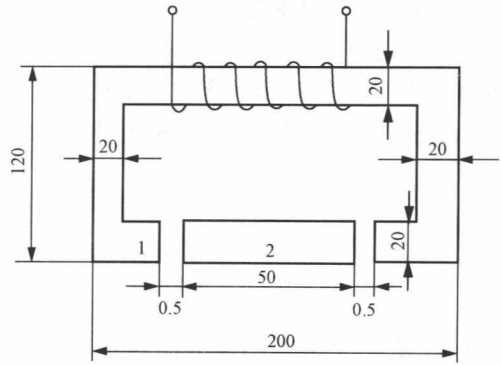


图 1-2 计算题 1-3 图 (单位: mm)

第2章 直流电机

2.1 基本要求

- (1) 了解直流电机的用途及工作原理。
- (2) 了解直流电机的基本结构、额定值和型号。
- (3) 熟悉直流电机的励磁方式。
- (4) 理解直流电机电枢绕组的构成及特点。
- (5) 理解直流电机磁场、电枢反应及换向。
- (6) 掌握直流电机的电磁转矩和电动势。
- (7) 掌握他励直流发电机和并励直流发电机的分析和运行特性。
- (8) 掌握直流电动机的分析和运行特性。

2.2 学习要点

1. 直流电机的分类和用途

直流电机按励磁方式他励式、并励式、串励式和复励式。按能量转换方式可以分为发电机和电动机。直流发电机的用途主要是用作直流电源。

2. 直流电机的基本结构

直流电机由静止部分（定子）和转动部分（转子）组成。定子由主磁极（励磁绕组和励磁铁芯）、换向极（换向绕组和换向铁芯）、电刷装置和机座等部件组成；转子由电枢和转子轴组成。电枢由电枢铁芯、电枢绕组和换向器等部件组成。

3. 直流电机主要额定值

额定值是长期稳定运行时电机应遵循的电机各物理量。直流电机铭牌标有的额定值主要有：额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定转速 n_N 、额定励磁电流 I_{fN} 。对直流电动机， P_N 是指轴上输出的机械功率额定值 $P_N = T\Omega$ ，对直流发电机是指电枢输出的电功率 $P_N = U_N I_N$ 。

4. 直流电机电枢绕组

(1) 电枢绕组均为双层绕组，线圈数等于换向片数等于虚槽数，即 $s = k = Z_u$ 。

(2) 电枢绕组通过换向器连接成闭合绕组，通过电刷引入或引出电流并形成偶数条支路。

(3) 电枢绕组通常采用短距绕组，用第一节距 $y_1 \leq \tau$ ，合成节距 $y = y_1 + y_2$ ，换向器节距 $y_k = y$ 等术语描述连接规律。

(4) 电枢绕组分为叠绕组和波绕组。

单叠绕组： $y = y_k = 1$ ，同一主极下的全部线圈连成一条支路， $a = p$ 。

单波绕组： $y = y_k = (k + 1) / p = \text{整数}$ ，所有主极下的全部线圈连成一条支路， $a = 1$ 。

5. 电枢电动势

电枢电动势是指直流电机正、负电刷之间的感应电动势,即电枢绕组里每条并联支路的电动势,即 $E_a = C_e \Phi n$ 。 E_a 与每极磁通 Φ 和转速 n 成正比。必须指出,直流电机电枢绕组电动势是直流,但是电枢导体的电动势却是交变的,其频率为 $n = \frac{pn}{60f}$ 。发电机的电动势与电枢电流方向相同,而电动机的电动势方向与电枢电流方向相反,故称为反电动势。

6. 电磁转矩

直流电机的电磁转矩由电枢电流与磁场相互作用产生的电磁力形成,其表达式为 $T = C_T \Phi I_a$,电磁转矩与每极磁通 Φ 和电枢电流 I_a 的乘积成正比,而电磁转矩的方向由每极磁通 Φ 和电枢电流 I_a 方向共同决定,改变其一极性,可改变电磁转矩方向。发电机电磁转矩与转向相反,称为制动转矩,电动机的电磁转矩与转向相同,称为驱动转矩。电磁转矩系数与电动势系数的关系为 $C_T = 9.55 C_e$ 。

7. 直流电机的磁场

直流电机的气隙磁场由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立的,电枢反应的作用使气隙磁场发生畸变,还有一定的去磁作用。

(1) 空载磁场。直流电机空载时,电机内部只有励磁电流通过励磁绕组建立的磁场,是直流电机的主磁场,也称为空载磁场。空载磁动势 F_0 与气隙磁密 B_g 的分布是平顶波。

(2) 电枢磁场。直流电机带上负载后,电枢绕组有电流通过建立电枢磁场,电枢磁场在空间静止,如果电刷位于几何中心线上,则电枢磁场与空载磁场正交,这时,电枢磁场称为交轴磁场。电枢电流建立电枢磁动势 F_a 与气隙磁密 B_g 分布为马鞍波。

(3) 电枢反应。直流电机的气隙磁场 F_g 由励磁磁动势 F_0 和电枢磁动势 F_a 共同建立的,即 $F_g = F_0 + F_a$,电枢反应的作用使气隙磁场发生畸变,在且还有一定的饱和去磁作用。当电刷不在几何中心线上时,会产生直轴电枢反应和交轴电枢反应。交轴电枢反应使磁场歪扭,发生畸变,直轴电枢反应使主磁场增磁或去磁。

(4) 直流电机的换向。直流电机换向是指电枢元件从一个支路退出,经过电刷短路后进入另一条支路的过程。换向过程中,电枢绕组产生电抗电动势和电刷放在几何中性线处且无补偿绕组的直流电机电枢反应电动势,均阻碍电枢电流变化而使换向延迟,造成换向回路断开时有一定电磁能量的火花释放。改善换向的方法是在两主磁极之间安装换向极,以抵消上述两种电动势作用。换向极绕组和电枢绕组串联,并使换向极磁动势抵消在几何中性线处作用的电枢磁动势外,还产生换向极电动势去抵消电抗电动势。常用改善换向的方法还有装设补偿绕组、合理选择电刷和电刷移动位置等。

8. 直流发电机和直流电动机的运行分析

用直流电机的基本方程式分析直流电动机的运行。

(1) 基本方程式。

电压平衡方程式:

$$\text{发电机} \quad E_a = U + I_a R_a + 2\Delta U_b$$

$$\text{电动机} \quad U = E_a + I_a R_a + 2\Delta U_b$$

转矩方程式:

$$\text{发电机} \quad T_1 = T + T_0$$

电动机 $T = T_0 + T_2$

功率平衡方程式:

发电机 $P_1 = P_e + P_0 = P_2 + p_{Cu} + p_{ad} + p_{me} + p_{Fe} = P_2 + p_{al}$

电动机 $P_1 = P_e + p_{Cu} + P_0 = P_2 + p_{ad} + p_{Cu} + p_{me} + p_{Fe} = P_2 + p_{al}$

式中 p_{Cu} ——铜损耗;

p_{ad} ——附加损耗;

p_{me} ——机械损耗;

p_{Fe} ——铁损耗;

p_{al} ——总损耗。

(2) 直流发电机的运行特性。

1) 外特性: 在 $n = n$, $I = I_{IN}$, 发电机端电压与负载电流 $U = f(I)$ 关系曲线称为外特性。由空载的到满载, 电压下降程度可以用电压调整率表示, 即

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\%$$

他励发电机 $\Delta U = 5\% \sim 10\%$, 并励发电机 $\Delta U \approx 20\%$, 并励发电机电压调整率比他励发电机大, 主要原因是负载增大时, 不但是电枢回路电压降增大, 而且电枢反应去磁作用增强, 使每极磁通量减小, 从而使电枢电动势减小。还有因端电压降低进一步加剧了端电压的下降。

2) 空载特性: 在 $n = n_N$, $I_L = 0$, 发电机的端电压与励磁电流之间的关系曲线 $U = f(I_f)$ 称为空载特性。发电机的空载特性曲线形状与电机磁化曲线相同, 是反应电机磁路特性的重要曲线。

3) 调节特性: 在 $n = n_N$, $U = U_N$, 发电机励磁电流与负载电流之间的关系曲线 $I_f = f(I_L)$ 称为调节特性。

它反映了负载变化时, 要维持端电压稳定时励磁电流的调节规律。

(3) 并励发电机的自励过程。为使并励发电机能建立电压, 必须同时满足以下三个条件:

- 1) 电机磁路有剩磁, 磁化曲线有饱和现象;
- 2) 励磁绕组接线和电枢绕组旋转方向应配合正确;
- 3) 励磁回路总电阻小于发电机该转速下的临界电阻。

9. 直流电动机的运行分析

(1) 直流电动机的工作特性是指在电动机的转速、电磁转矩、效率与输出功率或电枢电流的关系 $n, T, \eta = f(P_2)$, 由于实际运行中电枢电流容易测量, 故工作特性一般表示为 $n, T, \eta = f(I)$ 。

(2) 在 $U = U_N$, $I_f = I_{fN}$, 电枢回路电阻 $R_a = a$ (a 为常数) 时, 转速与转矩之间的关系曲线 $n = f(T)$, 故又称为转矩-转速特性。

(3) 他励 (并励) 电动机的机械特性较硬, 串励电动机的机械特性为软特性。

(4) 并励电动机在运行时, 励磁回路不能断路, 否则在轻载时会造成飞车, 重载时电枢电流过大, 电机温升过高烧毁。

(5) 串励电动机不能在空载或轻载下运行, 否则会造成飞车, 使电机受到严重损坏。

(6) 串励电动机有很大的起动转矩和较强的过载能力。

2.3 习题解答

2.3.1 思考题解答

2-1 简述直流发电机和直流电动机的基本工作原理。

答：直流发电机和直流电动机的工作原理相同，用电磁感应定律和电磁力定律解释，直流电机通过电刷和换向器将电机内部的交流电动势和交流电流转变为电机外部的直流电动势和直流电流，实现了换向，虽然电枢线圈是旋转的，并且其中电流是交变的，但它所在固定磁极下的电枢电流方向不变。因此，电枢电流在空间产生的磁场恒定不变。

直流电机具有可逆性，同一台直流电机即可作为发电机运行也可作为电动机运行。取决于外部工作条件不同。

2-2 在直流电机中为什么电枢导体中的感应电动势为交流。而由电刷引出的电动势确为直流，电刷与换向器的作用是什么？

答：因为电枢导体在电机内部旋转时，经过 N 极和 S 极，故导体电动势为交流，通过电刷引出电动势为直流，电刷和换向器作用是将电机内部交流电流、电动势转变为外部直流电流、电动势。

2-3 简述直流电机的主要结构和部件及作用。

答：直流电机基本结构分为定子、转子。定子由主磁极、换向极、机座和电刷装置等组成。主磁极由铁芯和励磁绕组组成。主磁极作用是产生电机磁场。励磁绕组由绝缘导线绕组而成。换向极由铁芯和绕组组成，换向极的作用是补偿电枢反应。机座有两个作用，一个是固定主磁极、换向极和端盖并支撑和固定电机在基础上，另一个作用是作为电机的磁路，称为磁轭。电刷作用是把转动的电枢与外电路连接，使电流经电刷输入电枢或从电枢输出。

2-4 直流电动机总共有几种励磁方式？各有什么特点？

答：直流电机励磁方式有他励、并励、串励、复励四种，他励特性较硬，串励特性较软，并励介于二者之间。

2-5 一台 p 对极直流电动机，若将电枢绕组由单叠绕组改为单波绕组（导体数不变），问额定电压、额定电流和额定功率如何变化？

答：保持支路电流不变，则额定电流减小 p 倍，额定电压增加 p 倍，额定功率不变。

2-6 电磁转矩与什么因素有关？如何确定电磁转矩的实际方向？

答：电磁转矩 T 正比于主磁通 Φ_m 和转子电流。电磁转矩方向决定于转子受电动力方向，即决定于电机磁场方向和导体电流方向。对于直流发电机，电磁转矩方向与电枢转向相反，电磁转矩是制动性质的，对于直流电动机电磁转矩方向与电枢转向相同是驱动性质的。因此，改变直流电机励磁电压极性或改变电枢绕组两端电压极性即可改变直流电动机的转向或直流发电机输出电压的极性。

2-7 何谓电枢反应？电枢反应对气隙磁场有什么影响？

答：负载时，直流电机中气隙磁场是由定子励磁磁场和转子电枢磁场共同产生，电枢电流在空间产生磁场也是恒定的，通常把负载时电枢磁场对主极磁场的影响称为电枢反应。受电枢反应的影响，使气隙磁场发生畸变，考虑到磁路饱和和作用，还有附加的去磁作用使磁通量减少。

2-8 如何判断一台直流电机运行在发电状态还是运行在电动状态?

答: 从电动势平衡方程式上看, 电动状态时, 电枢电流与电枢电压方向相反, 称为反电势, 电磁功率 $P_e = EI < 0$ 表示吸收机械功率转化为电功率输出。发电状态时, 则电枢电流与电枢电压同方向, 电磁功率 $P_e = EI > 0$ 表示吸收电功率转化为机械功率输出, 吸收机械功率转化为电磁功率输出。

2-9 为什么他励直流发电机的外特性是向下倾斜的?

答: 因为发电机端电压为

$$U = E - IR_a$$

发电机存在电阻压降 $\Delta U = IR_a$, 当发电机电枢电流 $I \uparrow$, 则 $\Delta U \uparrow$ 、 $U \downarrow$ 。故发电机外特性为下倾斜。电枢反应去磁作用增大, 使气隙磁场减弱, 同时电枢压降增大。

2-10 何为换向, 为什么要换向? 改善换向的方法有哪些?

答: 绕组元件由一条支路转入另一条支路的过程中, 元件里的电流就要改变一次方向。这种元件内电流改变方向的过程称为换向。

在直流电机原理已阐述直流电机电枢绕组电动势、电流是交变的, 通过换向器和电刷的换向变成外电路的直流电动势和直流电流。

改变换向的方法主要有: 在电机主极之间加装换向磁极、在主磁极上安装补偿绕组。

2-11 一台发电机改作电动机或转向改变时, 换向极绕组是否需要改变接线?

答: 根据换向极的极性与电枢磁场的极性相反, 分析结果是不需要改变接线。

2-12 并励发电机必须满足哪些条件才能建立起正常的输出电压?

答: 并励发电机建立正常输出电压, 即必须满足自励的三个条件:

- (1) 发电机主磁极必须有足够的剩磁;
- (2) 励磁绕组和电枢绕组的接线正确, 保证励磁电流所产生的磁场方向与剩磁场方向相同;
- (3) 励磁回路总电阻必须小于该转速下的临界电阻。

2-13 单叠绕组与单波绕组的元件连接规律有何不同? 同样极对数为 p 的单叠绕组与单波绕组的支路对数为何相差 p 倍?

答: 单叠绕组中每个元件都是与相邻的元件连接, 而单波绕组的每个元件是与相距约两个磁极距的元件连接。每个元件的两端连接的换向片相距很远。单叠绕组每个元件的两端连接的换向片是紧密相邻的。单波绕组是把所有 N 极下的元件串联组成一个支路, 所有 S 极下的元件串联组成一个支路, 即单波绕组支路对数 $a=1$, 而单叠绕组每个磁极下的元件组成一个支路, 支路数对数等于极对数 $a=p$ 。

2-14 何谓发电机外特性? 他励发电机和并励发电机的外特性有什么不同?

答: 发电机的外特性是指当 $n = n_N$, $I = I_N$ 时, $U = f(I)$ 的关系曲线。他励发电机的外特性比并励发电机的外特性硬。在同样负载条件下, 他励发电机的电压调整率比并励发电机的电压调整率小。

2-15 何谓电动机的工作特性? 比较不同励磁方式对工作特性的影响。

答: 直流电动机的工作特性是指电动机在 U_N 、 I_N , 电枢回路附加电阻为零条件下, 电机转速、电磁转矩和效率与输出功率的关系, 即 $n, T, \eta = f(P_2)$ 。不同励磁方式对工作特性影响较大。他励直流电动机转速调整率较小, 而串励电动机转速调整率较大, 他励电动机转矩特性, 电磁转矩与电枢电流成正比, 而串励电动机电磁转矩与电枢电流平方成正比。而复

励电动机工作特性介于并励电动机和串励电动机之间。串励电动机在空载时有飞车危险，而复励电动机因为有并励绕组存在，电动机空载时不会有飞车危险。

2.3.2 计算题解答

2-1 一台直流电动机，已知 $P_N = 13\text{kW}$ ， $U_N = 220\text{V}$ ， $n_N = 1500\text{r/min}$ ， $\eta_N = 0.85$ ，求额定电流 I_N 及额定负载时的输入功率 P_1 。

解：额定电流
$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{13 \times 10^3}{220 \times 0.85} = 69.5 (\text{A})$$

额定负载时的输入功率
$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{13 \times 10^3}{0.85} = 15.29 (\text{kW})$$

2-2 一台直流发电机，已知 $P_N = 90(\text{kW})$ ， $U_N = 230\text{V}$ ， $n_N = 1450\text{r/min}$ ， $\eta_N = 0.89$ ，求额定电流 I_N 及额定负载时的输入功率 P_1 。

解：额定电流
$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{90 \times 10^3}{230} = 391.3 (\text{A})$$

额定负载时的输入功率
$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{90 \times 10^3}{0.89} = 101.1 (\text{kW})$$

2-3 已知直流电机的极对数 $p = 2$ ，虚槽数 $Z_u = s = k = 18$ ，连成单叠绕组。

- (1) 计算绕组各节距；
- (2) 画出绕组展开图、磁极及电刷的位置；
- (3) 求并联支路数。

解：(1) 计算节距。

极距
$$\tau = \frac{Z_u}{2p} = \frac{18}{2 \times 2} = \frac{18}{4} = 4.5$$

第一节距
$$y_1 = \frac{Z_u}{2p} \mp \epsilon = \frac{18}{4} - \frac{2}{4} = 4 (y_1 < \tau \text{ 短距绕组})$$

取右行绕组，合成节距 $y = +1$ ，第2节距 $y_2 = y_1 - y = 4 - 1 = 3$ ，换向器节距 $y_k = 1$ 。

(2) 单叠绕组展开图如图 2-1 所示。

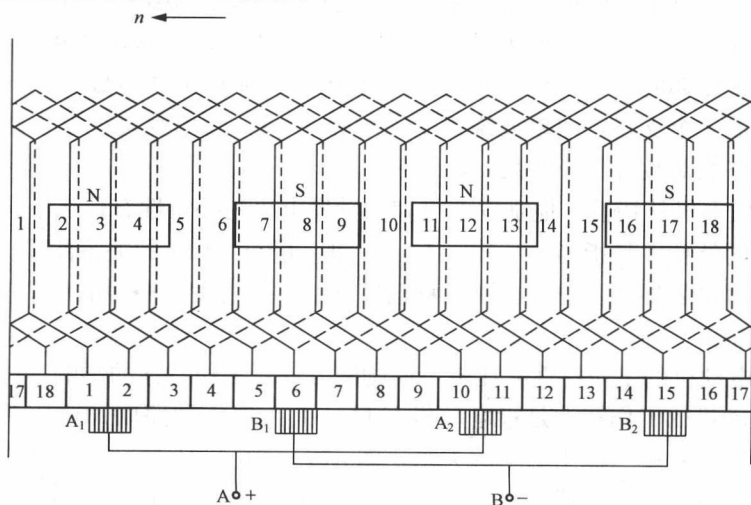


图 2-1 单叠绕组展开图

(3) 并联支路数 $2a=4$

2-4 已知直流电机的数据 $p=2$, $Z_u = s = k = 19$, 连成单波绕组。

- (1) 计算各节距;
- (2) 画出绕组展开图、磁极及电刷位置;
- (3) 求并联支路数。

解: (1) 计算节距。

$$\text{极距} \quad \tau = \frac{Z_u}{2p} = \frac{19}{2 \times 2} = \frac{19}{4}$$

$$\text{第一节距} \quad y_1 = \frac{Z_u}{2p} \mp \epsilon = \frac{19}{4} - \frac{3}{4} = 4 \quad (y_1 < \tau \text{ 短距绕组})$$

取单波左行绕组, 合成节距 $y = \frac{k-1}{p} = \frac{19-1}{2} = 9$, 换向器节距 $y_k = y = 9$ 。

(2) 单波绕组展开图如图 2-2 所示。

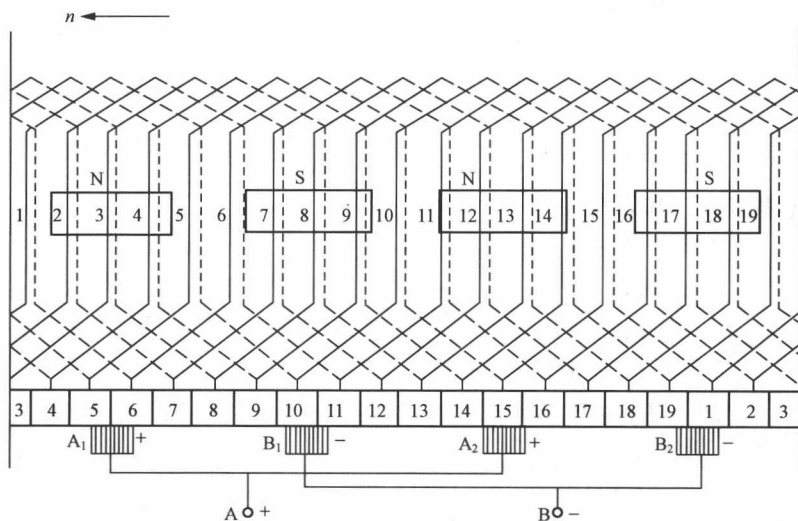


图 2-2 单波左行绕组展开图

(3) 并联支路数 $2a=1$

2-5 一台他励直流电动机的额定数据: $P_N = 13\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $n_N = 1000\text{r/min}$, $p_{Cu} = 500\text{W}$, $P_0 = 395\text{W}$ 。计算额定运行时电动机的 I_N , T_0 , T_N , P_e , η , R_a 。

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{13 \times 1000}{220 \times 0.936} = 63.2 \text{ (A)}$$

$$\text{解:} \quad P_e = P_2 + P_0 = P_N + P_0 = 13 \times 10^3 + 395 = 13395 \text{ (W)}$$

$$P_1 = P_e + p_{Cu} = 13395 + 500 = 13895 \text{ (W)}$$

$$T_0 = \frac{60}{2\pi} \times \frac{P_0}{n_N} = 9.55 \times \frac{395}{1000} = 3.77 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$T_N = \frac{60}{2\pi} \times \frac{P_N}{n_N} = 9.55 \times \frac{13000}{1000} = 124.2 \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \frac{13000}{13895} \times 100\% = 93.6\%$$