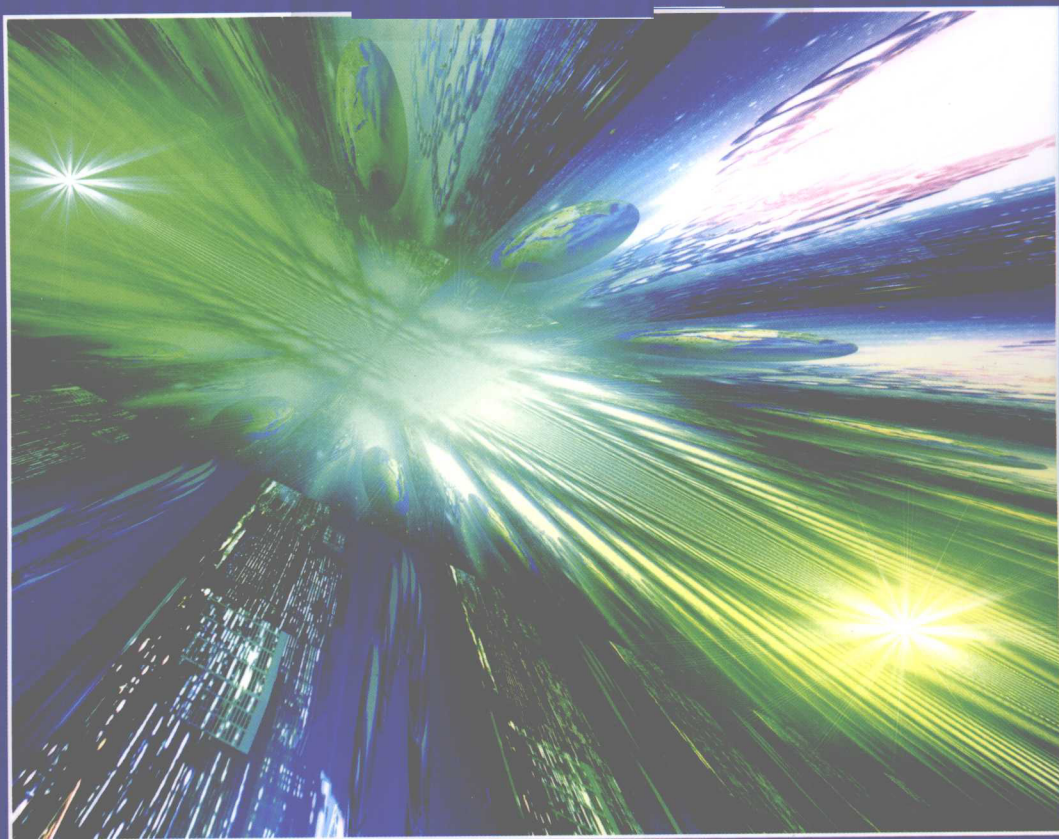


普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材

电机及拖动基础 习题解答与学习指导

唐海源 张晓江 编

第2版



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材

电机及拖动基础 习题解答与学习指导

第2版

合肥工业大学 唐海源 张晓江 编
顾绳谷 姚守猷 审



机械工业出版社

本书是与合肥工业大学顾绳谷教授主编《电机及拖动基础（上、下册）》（第4版）配套的学习指导与习题解答。本书对主教材各章的学习内容提出了基本要求，并对各章的重点难点进行了指导和总结。书中不仅给出了主教材中的全部习题的解答，还增选了一些有一定难度的典型习题并做了解答。在附录中，通过实例使读者进一步熟悉 MATLAB 语言在实际工程中的应用。

本书可以作为“电机及拖动基础”课程的学习参考书，对于学生学习本课程或考研都有帮助，也可以作为电气信息类专业的辅助教材。

图书在版编目（CIP）数据

电机及拖动基础习题解答与学习指导/唐海源、张晓江编.
—2版. —北京：机械工业出版社，2010.2
普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教材
ISBN 978-7-111-29536-5

I. 电… II. ①唐…②张… 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. TM3
TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 006878 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：王保家 责任编辑：谷玉春 封面设计：张 静
责任校对：魏俊云 责任印制：乔 宇
北京京丰印刷厂印刷
2010 年 2 月第 2 版·第 1 次印刷
184mm×260mm·11 印张·270 千字
标准书号：ISBN 978-7-111-29536-5
定价：19.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

销售二部：(010) 88379649

教材网：<http://www.cmpedu.com>

读者服务部：(010) 68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

本书是与合肥工业大学顾绳谷教授主编《电机及拖动基础（上、下册）》（第4版）配套使用的教材，内容包括《电机及拖动基础（上、下册）》（第4版）全部习题的解答及学习指导。可以作为电气信息类各专业的辅助教材。

本书第1版于2004年问世，为了便于读者在学习检查解题方法和运算结果，本次修订的章节次序和习题编号及变量符号均与主教材（第4版）相同。各章仍保留增选的有一定难度的典型习题，并且给出了解答。本版的修改主要本着结合主教材（第4版）教学内容进行，对各章重点难点的学习指导及部分习题的解答进行了补充，并对各章要掌握的学习内容提出了基本要求。在附录中增加了MATLAB语言在电力拖动领域中应用的实例，目的是让读者在学习加深对教材的理解，提高分析问题和解决问题的能力，对有关专业的教师、广大准备考研的学生及工程技术人员也有参考价值。

唐海源副教授编写第一~七章；张晓江副教授编写第八~十四章及附录；全书由合肥工业大学顾绳谷教授、姚守猷教授审阅。

本书在解题过程中力求方法简明、概念清楚。学习指导部分对教材各章节提出了基本要求、重点、难点及应注意的问题。由于本书编者水平有限，书中有欠妥之处在所难免，敬请批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 磁路	1
一、学习指导	1
二、习题与解答	2
三、增选习题与解答	7
第二章 直流电机	9
一、学习指导	9
二、习题与解答	10
三、增选习题与解答	19
第三章 变压器	27
一、学习指导	27
二、习题与解答	28
三、增选习题与解答	34
第四章 异步电机 (一) ——三相异步电动机的基本原理	39
一、学习指导	39
二、习题与解答	40
三、增选习题与解答	46
第五章 异步电机 (二) ——三相异步电动机的运行原理及单相异步电动机	52
一、学习指导	52
二、习题与解答	53
三、增选习题与解答	59
第六章 同步电机	65
一、学习指导	65
二、习题与解答	66
三、增选习题与解答	68
第七章 控制电机	72
一、学习指导	72
二、习题与解答	73
三、增选习题与解答	76
第八章 电力拖动系统的动力学基础	78
一、学习指导	78
二、习题与解答	80
三、增选习题与解答	82
第九章 直流电动机的电力拖动	85
一、学习指导	85
二、习题与解答	86
三、增选习题与解答	98
第十章 三相异步电动机的机械特性及各种运转状态	103
一、学习指导	103
二、习题与解答	105
三、增选习题与解答	110
第十一章 三相异步电动机的起动及起动设备的计算	118
一、学习指导	118
二、习题与解答	118
三、增选习题与解答	127
第十二章 三相异步电动机的调速	132
一、学习指导	132
二、习题与解答	133
第十三章 多电动机的拖动系统	137
一、学习指导	137
二、习题与解答	137
三、增选习题与解答	141
第十四章 电力拖动系统电动机的选择	143
一、学习指导	143
二、习题与解答	144
三、增选习题与解答	160
附录 MATLAB 语言及其在电力拖动领域的应用	161
参考文献	171

第一章 磁 路

一、学习指导

(一) 基本要求

1. 建立变压器、电机磁路的基本概念，了解磁路中几个基本物理量的意义及单位。
2. 了解常用铁磁材料的分类、磁化过程及基本磁化曲线。
3. 理解和运用磁路的几个基本定律及磁路计算的一般步骤。
4. 了解直流、交流磁路的异同点。

(二) 学习指导

本章是为学习变压器及各种电机打基础的，有些基本概念在中学物理课中已阐明，但还需结合工程实际情况作进一步讨论。

1. 磁路的概念

变压器、电机进行能量传递或转换的介质是主磁通，主磁通的路径是主磁路。由铁磁材料构成的主磁路是非线性的，所以漏磁通数量很小。漏磁通不参与能量传递或交换，它只匝链自身线圈且路径的介质主要是线性的空气介质。变压器主磁路是闭合体，不含气隙，而电机中含有的气隙则为主磁路的一部分。

2. 磁场的基本物理量

(1) 磁感应强度 B

表征磁场中某点磁场强弱的物理量，亦称磁通密度，指垂直通过单位面积的磁力线数目。国际单位制中， B 的单位为 T（特斯拉）。

(2) 磁通 Φ

在均匀磁场中，垂直通过某个截面积的磁力线总量为该面积的磁通量。磁通 Φ 等于磁感应强度 B 与垂直于磁场方向的面积 A 的乘积，即 $\Phi = BA$ ，国际单位制中， Φ 的单位为 Wb（韦伯）。

(3) 磁场强度 H

表征物质磁导能力大小的量称为磁导率 μ ，它与磁场强度 H 的乘积等于磁感应强度，即 $B = \mu H$ 。或理解为，磁场中的某点磁感应强度与该点磁导率之比为该点的磁场强度 H 。真空的磁导率为 μ_0 ，国际单位制中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ，铁磁材料的磁导率 $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ 。国际单位制中， H 的单位为 A/m。

3. 磁路的基本定律

安培环路定律 $\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum i$ (i 的符号根据闭合回线 L 的环行方向是否符合右手螺旋关系确定。) 是磁路计算的基础。磁路中的欧姆定律 $F = \Phi R_m = \Phi/\Lambda$ 、基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$ 、基尔霍夫第二定律 $Ni = \sum_{k=1}^3 H_k l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots = \sum (Hl)$ 均对应于电路中的相应定

律，且磁路与电路有很多相似之处。需要注意的是，磁通可以通过导磁性介质，也可以通过非磁性介质，磁阻是随铁心饱和程度而变化的，或说磁导率 μ_{Fe} 是随铁心饱和程度增加而减小的。

4. 铁磁材料的特性

1) 铁磁材料分软、硬两大类，软磁材料磁滞回线窄，是电机、变压器常用的材料；硬磁材料磁滞回线宽，可作永久磁铁。

2) 铁磁材料在外磁场作用下磁畴排列整齐才呈现磁性。

3) 电机、变压器中常用的磁化曲线是平均磁化曲线。

4) 交流磁路中铁磁材料中有涡流、磁滞损耗，这些损耗与电源频率及磁通密度有关。

5. 磁路计算

磁路计算的正向问题，是已知磁通 Φ 后，按正向磁路计算步骤求出所需的总励磁磁动势 F ，同时注意磁路结构是有分支或无分支。磁路计算的逆向问题需要用试探法进行。

6. 交流磁路

交流磁路在瞬时仍然遵循磁路的基本定律，电机、变压器通常属于磁路计算的正向问题，可以使用基本磁化曲线和直流磁路的计算步骤。但应注意交流磁路中的饱和现象会引起电流、磁通、电动势波形畸变；交变磁通除了会引起铁心损耗外还会在被磁通匝链的线圈中感应产生电动势。

二、习题与解答

1-1 磁路的基本定律有哪些？若磁路上有几个磁动势同时作用，磁路计算时能否用叠加原理？为什么？

答：磁路的基本定律有：安培环路定律 $\oint_L \mathbf{H}d\mathbf{l} = \sum i$ 或简写为 $HL = Ni$ ；磁路的欧姆定律 $Ni = \Phi \frac{l}{\mu A}$ 或写为 $F = \Phi R_m$ ；磁路的基尔霍夫第一、第二定律 $\sum \Phi = 0$ ， $Ni = \sum_{k=1}^n H_k l_k$ 。由于铁心磁路饱和时呈非线性，故磁路计算时不能用叠加原理。

1-2 简述铁磁材料的磁化过程。

答：铁磁物质未放入磁场之前，其内部磁畴排列是杂乱的，磁效应互相抵消，对外不呈现磁性；若将铁磁物质放入磁场中，在外磁场的作用下，磁畴的轴线将趋于与外磁场方向一致，且排列整齐形成一个附加磁场与外磁场叠加后，就呈现出磁性。

1-3 什么是铁磁材料的基本磁化曲线？

答：对同一个铁磁材料，选择不同的磁场强度 H_m 进行反复磁化，可得一系列大小不同的磁滞回线，再将各个磁滞回线的顶点连接起来，所得到的曲线称为基本磁化曲线或称为平均磁化曲线。

1-4 磁路计算正问题的步骤是什么？

答：磁路计算中有正问题、反问题。正问题计算步骤为：

- 1) 把磁路按不同的材料、不同的截面积分成若干段。
- 2) 计算各段磁路的有效截面积 A_k 和平均长度 l_k 。
- 3) 由通过各段磁路截面积的磁通量 Φ_k ，计算各段磁路的平均磁通密度 $B_k = \Phi_k / A_k$ 。
- 4) 根据 B_k 求出对应的磁场强度 H_k ，铁磁材料由基本磁化曲线查出 H_k ；对于空气隙，可直接按 $H_g = B_g / \mu_0$ 计算。
- 5) 计算各段的磁位降 $H_k l_k$ ，由 $F = \sum H_k l_k$ 求得给定磁通量时所需要的总励磁磁动势 F 。

1-5 铁心中的磁滞损耗和涡流损耗是怎样产生的？它们与哪些因素有关？

答：铁磁材料置于交变磁场中，材料被反复交变磁化，磁畴之间相互不停地摩擦、翻转，消耗能量，并以热量形式表现，这种损耗称为磁滞损耗。由于铁心是导体，铁心中磁通随时间变化时，根据电磁感应定律，在铁心中将产生感应电动势并引起涡流，此涡流在铁心中引起的损耗也以热量形式表现，称为涡流损耗。磁滞损耗与涡流损耗之和称为铁心损耗，它们与电源频率 f 、磁通密度 B 及铁心重量有关。

1-6 说明交流磁路与直流磁路的异同点。

答：直流磁路中磁通是不随时间变化的，故没有磁滞、涡流损耗，也不会无相对运动的线圈中感应产生电动势。而交流磁路中磁通是随时间而变化的，会在铁心中产生磁滞、涡流损耗，并在其所匝链的线圈中感应产生电动势，另外其饱和现象也会导致励磁电流、磁通、感应电动势波形的畸变。交流磁路的计算就瞬时而言，遵循磁路的基本定律。

1-7 铁心由 DR320 硅钢片叠成，如图 1-1 所示，已知线圈匝数 $N = 1000$ ，铁心厚度为 2.5 cm，叠加片系数为 0.93。不计漏磁，试计算：

- (1) 中间铁心柱磁通为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ，不计铁心的磁位降时所需的直流励磁电流；
- (2) 考虑铁心的磁位降，产生同样磁通量时所需的励磁电流。

解：

(1) 因磁路左右对称，故可用右边半边来计算。考虑到气隙磁场的边缘效应，计算气隙有效截面积时，通常在长、宽方向各增加一个 δ 值，则气隙截面积 A_2 为：

$$\begin{aligned} A_2 &= (1.25 \times 10^{-2} + 0.025 \times 10^{-2}) \\ &\quad \times (0.025 \times 0.93 + 0.025 \times 10^{-2}) \text{ m}^2 \\ &\approx 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

气隙磁密为

$$B_2 = \frac{\Phi}{2A_2} = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{2 \times 3 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.25 \text{ T}$$

励磁电流为

$$F = H_2 l_2 = \frac{B_2}{\mu_0} l_2 = \frac{1.25}{4\pi \times 10^{-7}} \times 2 \times 0.025 \times 10^{-2} \text{ A} \approx 500 \text{ A}$$

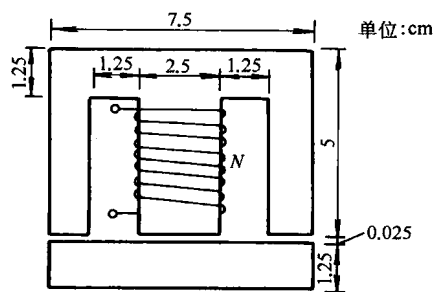


图 1-1 习题 1-7 图

$$I_f = \frac{F}{N} = \frac{500}{1000} \text{A} = 0.5 \text{A}$$

(2) 计及铁心磁位降时, 中间铁心磁密为

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{7.5 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-2} \times 0.025 \times 0.93} \text{T} = 1.29 \text{T}$$

查磁化曲线得 $H_1 = 7 \times 10^2 \text{A/m}$; 铁心磁路长 l_1 为

$$l_1 = \left\{ \left[\frac{7.5}{2} \times 10^{-2} - \frac{1.25}{2} \times 10^{-2} + (5 + 0.025) \times 10^{-2} \right] \times 2 - 0.025 \times 2 \times 10^{-2} \right\} \text{m} = 0.1625 \text{m}$$

励磁电流为

$$F = H_1 l_1 + H_2 l_2 = (7 \times 10^2 \times 0.1625 + 500) \text{A} \\ = 613.8 \text{A}$$

$$I_f = \frac{F}{N} = \frac{613.8}{1000} \text{A} = 0.614 \text{A}$$

1-8 一个闭合环形铁心线圈如图 1-2 所示, 其匝数 $N = 300$, 铁心中磁感应强度为 0.9T , 磁路的平均长度为 45cm 。试求:

(1) 铁心材料为铸铁时, 线圈中的电流;

(2) 铁心材料改用 DR320 硅钢片时, 线圈中的电流。

解:

(1) 铁心材料为铸铁时, 查磁化曲线得 $H_1 = 7000 \text{A/m}$, 则

$$I_1 = \frac{H_1 l}{N} = \frac{7000 \times 0.45}{300} \text{A} = 10.5 \text{A}$$

(2) 当铁心材料改用 DR320 硅钢片时, 查磁化曲线得 $H_2 = 230 \text{A/m}$

$$I_2 = \frac{H_2 l}{N} = \frac{230 \times 0.45}{300} \text{A} = 0.345 \text{A}$$

可见由于铁心材料不同, 得到同样的磁感应强度, 所需励磁电流的大小相差很多。

1-9 有一个环形铁心线圈, 其内径为 10cm , 外径为 15cm , 铁心材料为铸钢。磁路中含有一空气隙, 其长度为 0.2cm 。若线圈中通有 1A 的电流, 如要得到 0.9T 的磁感应强度, 试求线圈的匝数是多少?

解:

磁路平均长度为

$$l = \frac{10 + 15}{2} \pi \text{cm} = 39.3 \text{cm}$$

查磁化曲线, 当 $B = 0.9 \text{T}$ 时, $H_1 = 760 \text{A/m}$

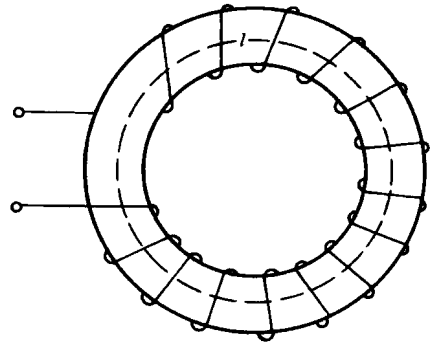


图 1-2 习题 1-8 图

空气隙中磁场强度为

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 7.2 \times 10^5 \text{ A/m}$$

总磁动势为

$$\begin{aligned} NI &= \sum Hl = H_1 l_1 + H_0 \delta = [760 \times (39.2 - 0.2) \times 10^{-2} + 7.2 \times 10^5 \times 0.2 \times 10^{-2}] \text{ A} \\ &= (296 + 1440) \text{ A} = 1736 \text{ A} \end{aligned}$$

线圈匝数为

$$N = \frac{IN}{I} = \frac{1736}{1} = 1736$$

可见磁路中含有空气隙时，磁动势大部分都降落在空气隙中。

1-10 如图 1-3 所示铸钢铁心，各项尺寸见表 1-1。左边线圈通入电流产生磁动势 1500A。试求下列三种情况下右边线圈应加的磁动势值：

- (1) 气隙磁通为 $1.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时；
- (2) 气隙磁通为零时；
- (3) 右边铁心柱中的磁通为零时。

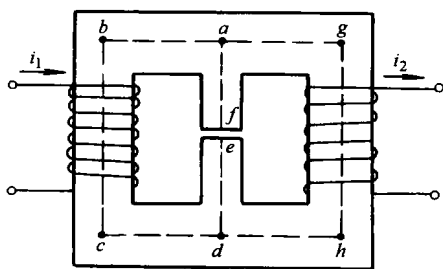


图 1-3 习题 1-10 图

表 1-1 习题 1-10 中铸钢铁心的各项尺寸

路径	截面积/(10^{-4} m^2)	长度/(10^{-2} m)
abcd	4	50
aghd	5	75
af	2.5	10
fe	2.75	0.25
ed	2.5	10

解：

各段磁路的截面积 A 和长度 l 为

第一段：abcd, $A_1 = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $l_1 = 50 \times 10^{-2} \text{ m}$

第二段：aghd, $A_2 = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $l_2 = 75 \times 10^{-2} \text{ m}$

第三段：af、ed, $A_3 = 2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $l_3 = 20 \times 10^{-2} \text{ m}$

第四段：fe, $A_4 = 2.75 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, $l_4 = 0.25 \times 10^{-2} \text{ m}$

(1) 当气隙磁通 $\Phi_4 = 1.65 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时

$$B_3 = \frac{\Phi_4}{A_3} = \frac{1.65 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.66 \text{ T}$$

查磁化曲线得 $H_3 = 5 \times 10^2 \text{ A/m}$

$$B_4 = \frac{\Phi_4}{A_4} = \frac{1.65 \times 10^{-4}}{2.75 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.6 \text{ T}$$

$$H_4 = \frac{B_4}{\mu_0} = \frac{0.6}{4\pi \times 10^{-7}} \text{A/m} = 4.78 \times 10^5 \text{A/m}$$

在左边回路中, 有 $F = H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_4 l_4$, 即

$$1500 = H_1 \times 50 \times 10^{-2} + 500 \times 20 \times 10^{-2} + 4.78 \times 10^5 \times 0.25 \times 10^{-2}$$

解出 $H_1 = 411.5 \text{A/m}$, 查磁化曲线得 $B_1 = 0.56 \text{T}$

于是有

$$\Phi_1 = B_1 A_1 = 0.56 \times 4 \times 10^{-4} \text{Wb} = 2.24 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$\Phi_2 = \Phi_1 - \Phi_4 = (2.24 \times 10^{-4} - 1.65 \times 10^{-4}) \text{Wb} = 0.59 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{0.59 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} \text{T} = 0.118 \text{T}$$

查磁化曲线得 $H_2 = 0.8 \times 10^2 \text{A/m}$

对于整个回路 $cbgh$ 磁动势为

$$1500 \text{A} - F_2 = H_1 l_1 + H_2 l_2 = (411.5 \times 50 \times 10^{-2} + 0.8 \times 10^2 \times 75 \times 10^{-2}) \text{A}$$

得右边线圈磁动势为

$$F_2 = 1234.3 \text{A}$$

(2) 气隙磁通为零时

$$\Phi_1 = \Phi_2$$

在左边磁回路中, $1500 \text{A} = H_1 l_1$, 得

$$H_1 = \frac{1500}{50 \times 10^{-2}} \text{A/m} = 3000 \text{A/m}, \text{查磁化曲线得 } B_1 = 1.5 \text{T}$$

于是有

$$\Phi_1 = \Phi_2 = B_1 A_1 = 1.5 \times 4 \times 10^{-4} \text{Wb} = 6 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{6 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-4}} \text{T} = 1.2 \text{T}, \text{查磁化曲线得 } H_2 = 12.8 \times 10^2 \text{A/m}$$

在整个 $cbgh$ 回路中, 有

$$1500 \text{A} - F_2 = H_1 l_1 + H_2 l_2 = (3000 \times 50 \times 10^{-2} + 12.8 \times 10^2 \times 75 \times 10^{-2}) \text{A}$$

得右边线圈磁动势为 $F_2 = -960 \text{A}$

(3) 右边铁心柱磁通 $\Phi_2 = 0$ 时

$\Phi_1 = \Phi_3$, 由于磁路是非线性, 故 Φ_1 要用试探法来求。设 83% 的磁动势消耗在气隙中, 则气隙中的磁通 Φ 为

$$\Phi = \frac{0.83F}{\frac{1}{\mu_0} \frac{l_4}{A_4}} = \frac{0.83 \times 1500 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 2.75 \times 10^{-4}}{0.25 \times 10^{-2}} \text{Wb} = 1.72 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$B_3 = \frac{\Phi}{A_3} = \frac{1.72 \times 10^{-4}}{2.5 \times 10^{-4}} \text{T} = 0.688 \text{T}, \text{查磁化曲线得 } H_3 = 5.3 \times 10^2 \text{A/m}$$

$$B_1 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{1.72 \times 10^{-4}}{4 \times 10^{-4}} \text{T} = 0.43 \text{T}, \text{查磁化曲线得 } H_1 = 3 \times 10^2 \text{A/m}$$

左边回路的总磁位降为

$$\sum Hl = (0.83 \times 1500 + 5.3 \times 10^2 \times 20 \times 10^{-2} + 3 \times 10^2 \times 50 \times 10^{-2}) \text{A}$$

$$= (1245 + 106 + 150) \text{ A} = 1501 \text{ A} \approx F$$

可见试探值正确，此时右边线圈磁动势应为

$$F_2 = 0.83 \times 1500 \text{ A} + H_3 l_3 = (1245 + 106) \text{ A} = 1351 \text{ A}$$

三、增选习题与解答

1-11 铁磁材料分成几类？各有什么特点？分别用在什么场合？

答：铁磁材料根据磁滞回线形状不同，分为软磁材料、硬磁（永磁）材料两大类。软磁材料磁滞回线窄，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都小且磁导率较高，一般用于制造电机、变压器的铁心。硬磁（永磁）材料磁滞回线宽，剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 都大，可以制成永久磁铁。

1-12 空心线圈的电感是常数，而铁心线圈的电感是否为常数？为什么？

答：铁心线圈的电感 L 不是常数，它是随励磁电流而变化的，而励磁电流又随铁心的饱和程度而变化，故铁心线圈是一个非线性的电感元件。

1-13 两个线圈尺寸、形状、匝数均相同，一个是空气心，另一个是铁磁材料铁心，接电压同样的电源时，两线圈中电流是否相同？为什么？

答：空气心线圈因空气磁阻大，产生一定量的磁通需要较大的磁动势，在线圈匝数不变的情况下，线圈中电流较大。同理，铁心线圈因铁磁材料磁导率较高，或说产生同样大的磁通量所需磁动势较小，故铁心线圈中电流较小。

1-14 图 1-4 所示有分支磁路的铁心材料由 DR530 硅钢片叠成，截面积 $A_1 = A_2 = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ， $A_3 = 10 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ；各部分磁路平均长度 $l_1 = l_2 = 0.5 \text{ m}$ ，中间两段铁心的平均长度相等，其总长度 $l_3 = 2 \times 0.07 \text{ m}$ ，气隙长度 $\delta = 1.0 \times 10^{-4} \text{ m}$ 。已知 $\Phi_3 = 10 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ ， $F_1 = N_1 i_1 = 350 \text{ A}$ ，求 $F_2 = N_2 i_2$ 应为多少？

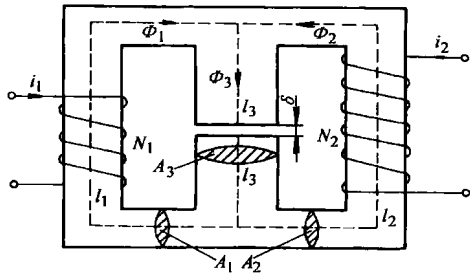


图 1-4 习题 1-14 图

解：假定各磁通正方向如图 1-4 所示，其中 i_1 和 Φ_1 ， i_2 和 Φ_2 符合右手螺旋关系，中间磁路的磁位降为

$$B_3 = \frac{\Phi_3}{A_3} = \frac{10 \times 10^{-4}}{10 \times 10^{-4}} \text{ T} = 1.0 \text{ T}$$

查磁化曲线得 $B_3 = 1.0 \text{ T}$ ， $H_3 = 350 \text{ A/m}$ 。

不计气隙边缘效应时， $B_\delta = B_3 = 1.0 \text{ T}$ ，则中间磁路磁位降为

$$2H_3 l_3 + H_\delta \delta = \left(2 \times 350 \times 0.07 + \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times 1.0 \times 10^{-4} \right) \text{ A} = 128.6 \text{ A}$$

计算左边铁心内磁通 Φ_1 ，由磁路的基尔霍夫第二定律，对回路 1 有

$$H_1 l_1 = F_1 - (2H_3 l_3 + H_\delta \delta) = (350 - 128.6) \text{ A} = 221.4 \text{ A}$$

$$H_1 = \frac{H_1 l_1}{l_1} = \frac{221.4}{0.5} \text{A/m} = 442.8 \text{A/m}$$

查磁化曲线得 $H_1 = 442.8 \text{A/m}$, $B_1 = 1.1 \text{T}$

$$\Phi_1 = A_1 B_1 = 6 \times 10^{-4} \times 1.1 \text{Wb} = 6.6 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

由磁路的基尔霍夫第一定律得

$$\Phi_2 = \Phi_3 - \Phi_1 = (10 \times 10^{-4} - 6.6 \times 10^{-4}) \text{Wb} = 3.4 \times 10^{-4} \text{Wb}$$

$$B_2 = \frac{\Phi_2}{A_2} = \frac{3.4 \times 10^{-4}}{6 \times 10^{-4}} \text{T} = 0.57 \text{T}$$

查磁化曲线得 $B_2 = 0.57 \text{T}$, $H_2 = 150 \text{A/m}$

$$H_2 l_2 = 150 \times 0.5 \text{A} = 75 \text{A}$$

由磁路的基尔霍夫第二定律, 对回路 2 有

$$F_2 = N_2 I_2 = H_2 l_2 + 2H_3 l_3 + H_8 \delta = (75 + 128.6) \text{A} = 203.6 \text{A}$$

第二章 直流电机

一、学习指导

(一) 基本要求

1. 了解直流电机的基本结构、工作原理以及直流电机的可逆性。
2. 熟悉直流电机的励磁方式。
3. 理解直流电机电枢绕组的构成及特点。
4. 掌握直流电机的电枢反应及工作特性。
5. 了解直流电机的换向。

(二) 学习指导

本章主要介绍直流电动机，以讨论并励、串励电动机的工作特性为主。

1. 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理基于安培定律。电枢绕组端加直流电压，通过换向器与电刷的配合，使同一磁极下的元件边中电流方向不变，或讲电枢绕组内电流是交变的，且直流电机有可逆性。

2. 直流电机的励磁方式

直流电机的励磁方式有他励、并励、串励和复励，了解各种励磁方式的电流关系。励磁方式不同对电机运行性能有较大影响，主要反应在磁场变化影响到电动机的转速和转矩。

3. 电枢绕组

直流电机电枢绕组通过换向片联接而构成一个闭合回路。主要分为单叠式、单波式，单叠绕组特点为支路对数 a 等于极对数 p ，换向节距 $y_c = 1$ ，每极下元件为一条串联支路，多用于电流较大的直流电机；单波绕组支路对数 $a = 1$ ，换向节距 $y_c = \frac{k \pm 1}{p}$ ，同极性下元件为一条串联支路，多用于电压较高的直流电机。电刷放置应使短路元件位于磁密最小处，且电刷数等于极数。

4. 电枢反应

电枢反应是直流电机的基本理论部分，阐述了直流电机是双边励磁的，气隙磁场随不同的负载变化。空载时，气隙磁场是由励磁磁动势 F_f 单独产生的；负载时，气隙磁场是励磁磁动势 F_f 与电枢磁动势 F_a 合成后产生的，电枢电流产生的电枢磁动势 F_a 使气隙磁场畸变且呈去磁性，并影响直流电机的运行性能。对发电机影响其端电压，对电动机影响电磁转矩和转速。

5. 基本方程（并励电动机）

感应电动势

$$E_a = C_e \Phi n$$

电磁转矩

$$T_e = C_T \Phi I_a$$

转矩方程

$$T_e = T_2 + T_0$$

电动势平衡方程

$$U = E_a + I_a R_a$$

功率平衡方程

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

$$P_e = E_a I_a = T_e \Omega = \frac{2\pi}{60} T_e n$$

$$P_1 = p_{\text{Cua}} + p_{\text{Cuf}} + p_{\text{mech}} + p_c + p_{\text{Fe}} + P_N$$

式中, p_1 是从电源输入的电功率; p_{Cua} 是电枢电阻的铜耗, 它随负载大小变化; p_{Cuf} 是励磁电阻的铜耗, 它不随负载大小变化。 p_{Fe} 是电枢铁心的损耗, 在转速和气隙磁密变化不大时可认为是恒定的; p_c 是附加损耗, 是由于电枢铁心上齿槽的存在, 电机运行时气隙磁通大小脉振而在铁心中引起的损耗, 以及电枢反应气隙磁场畸变引起的电枢铁心额外损耗等。这些损耗通常难于精确计算, 对于无补偿绕组的直流电机按额定容量的 1% 估算, 对于有补偿绕组的直流电机按额定容量的 0.5% 估算; p_{mech} 是机械损耗, 包括轴承及电刷摩擦和风扇损耗, 在电机转速变化不大时, 认为机械损耗是不变的; P_N 是电动机轴上输出的机械功率, 是随负载大小变化的, 通常电机运行最大效率大致出现在 80% 左右负载时。

6. 工作特性

直流电动机工作特性是指并励电动机在 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN}$ 时, 串励电动机在 $U = U_N$ 且电枢回路均不串电阻时的固有特性, 即转速特性 $n = f(I_a)$, 转矩特性 $T_e = f(I_a)$, 效率特性 $\eta = f(I_a)$ 。其中, 并励电动机转速特性是硬特性, 从空载到额定负载转速下降不多, 电磁转矩基本上随负载线性增加。串励电动机转速特性是软特性, 电机转速随负载增加而迅速下降, 转矩则以高于电枢电流一次方的比例增加。另外, 串励电动机不允许空载或轻载运行。

7. 直流发电机

并励直流发电机是一种自励发电机, 在符合自励电压建立的三个条件后, 发电机空载, 原动机转速 $n = n_N$, 即可建立起额定电压。但负载运行时, 随着负载的增加, 相比他励发电机, 并励发电机的外特性下降较多。原因除电枢反应的去磁效应使气隙磁场减小、电枢电阻压降增大以外, 还有电机端电压的下降会使励磁电流减小, 又进一步的使感应电动势下降, 但在额定负载内, 发电机端电压也不致于下降的过多。

8. 换向

直流电机换向是指电枢元件从一条支路退出, 经过电刷短路后进入另一条支路的过程。换向过程中, 电枢绕组产生的电抗电动势 e_x 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 e_a , 均阻碍电枢电流变化而使换向延迟, 造成换向回路在断开时有一定电磁能量以火花形式释放。改善换向的主要方法是在两主极之间安装换向极。换向极绕组与电枢绕组串联, 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。

二、习题与解答

2-1 一台直流电动机, 其额定数据如下: $P_N = 160\text{kW}$, $U_N = 220\text{V}$, $\eta_N = 90\%$, $n_N = 1500\text{r/min}$ 。求该电动机的额定电流。

解: 直流电动机的额定功率为

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$

则其额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N \eta_N} = \frac{160 \times 10^3}{220 \times 0.9} \text{A} = 808 \text{A}$$

2-2 在直流电动机中是否存在感应电动势？如果有，电动势的方向怎样？

答：直流电动机励磁后，电枢端施额定电压，电动机转动后，电枢绕组与磁场有相对运动，其内部存在感应电动势，该感应电动势的方向与电枢端电压方向相反，故也称反电动势。

2-3 如果直流电机的电枢绕组元件形状如图 2-1 所示，则电刷应放在换向器上的什么位置？

答：这种电枢元件的形状是元件端部不对称元件。就电刷放置的原则来说，被电刷短路的元件有效边应处在磁密最小处，使短路元件内感应电动势最小。对端部对称的元件来说，电刷应放在磁极轴线下，也是该元件的中心线下。端部不对称的元件，因其端部并不感应电动势，有效边仍处在磁密最小处，故电刷不能放在磁极轴线下，而应放在处于磁密最小处的有效边所联端部的换向片上，如图 2-2 所示。

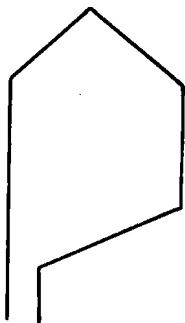


图 2-1 某种电枢绕组元件的形状

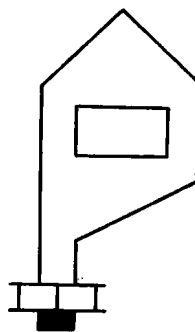


图 2-2 电刷应放的位置

2-4 一台直流电机，若有一磁极失磁，将会产生什么样的后果？

答：直流电机电枢绕组经换向器片联接后是一个闭合绕组，由于各支路串联元件数相等，使得各支路感应电动势相等。从闭合电路内部看，各支路电动势互相抵消，不会在电枢绕组内部产生环流。若有一个磁极失磁，该磁极下的元件就不感应产生电动势，直流发电机将会在电枢绕组内部产生环流；直流电动机因电枢端外施额定电压，失磁支路中的电流会很大，这都将会因电流过大而损坏直流电机绕组。

2-5 单叠绕组与单波绕组的元件联接规律有何不同？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：单叠绕组的联接是一个元件紧叠一个元件，换向节距 $y_c = 1$ ，且一个极下的元件为

一条串联支路，支路对数为 $a = p$ 。单波绕组的联接不是把元件依次串联，而是把相隔大约两个极距并在磁场中位置差不多相对应的元件联接起来，其换向节距 $y_c = \frac{k \pm 1}{p}$ ，同极性下的元件为一条串联支路，其支路对数 $a = 1$ ，使相同极对数的单叠绕组与单波绕组支路对数相差 p 倍。

2-6 何谓电枢反应？电枢反应对气隙磁场有什么影响？对电机运行有何影响？

答：直流电机励磁后，由励磁磁动势 F_f 产生气隙磁场，电枢绕组内通有电流 I_a 产生的电枢磁动势 F_a 对气隙磁场的影响称为电枢反应。电枢反应使气隙磁场波形畸变，并呈去磁性。电枢反应对直流发电机影响其端电压，对直流电动机影响其电磁转矩和转速。

2-7 直流电动机有哪几种励磁方式？在不同的励磁方式下，线路电流、电枢电流、励磁电流三者之间关系如何？

答：直流电动机的励磁方式一般有四种：

(1) 他励 励磁电流 I_f 与电枢电流 I_a 、线路电流 I 无关，且 $I_a = I$ 。

(2) 并励 线路电流 I 与电枢电流 I_a 、励磁电流 I_f 的关系为 $I = I_a + I_f$ 。

(3) 串励 线路电流 I 与电枢电流 I_a 、励磁电流 I_f 为同一个电流，即 $I = I_a = I_f$ 。

(4) 复励 励磁绕组有两个部分，一个绕组与电枢绕组并联，另一个绕组与电枢绕组串联。以“先并后串”为例，线路电流 I 就是串励绕组中的电流 $I_{串}$ ，且等于电枢电流 I_a 与并励绕组中电流 $I_{并}$ 之和，即 $I = I_{串} = I_a + I_{并}$ 。

2-8 什么因素决定直流电机电磁转矩的大小？电磁转矩的性质和电机运行方式有何关系？

答：从电磁转矩公式可知 $T_e = C_T \Phi I_a$ ，当电机励磁不变时，电磁转矩 T_e 与电枢电流成正比。若电机作发电机运行，电磁转矩 T_e 是制动性的阻转矩；若电机作电动机运行，电磁转矩 T_e 是驱动性的拖动转矩。

2-9 一台并励直流电动机将其电枢单叠绕组改接为单波绕组，问对其电磁转矩会有什么影响？

答：由电磁转矩公式可知 $T_e = \frac{pz}{2\pi a} \Phi I_a$

(1) 单叠绕组 支路对数 $a = p$ ，电枢电流为 $I_a = 2ai_a$ ，故有

$$T_e = \frac{pz}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{pz}{2\pi a} \Phi (2ai_a) = \frac{pz}{2\pi} \Phi (2i_a)$$

(2) 单波绕组 支路对数 $a = 1$ ，电枢电流为 $I'_a = 2i_a$ ，故有

$$T'_e = \frac{pz}{2\pi a} \Phi I'_a = \frac{pz}{2\pi} \Phi (2i_a)$$

可见，当磁通不变时，在保持支路电流不变的情况下，电磁转矩 T_e 才是不变的。

2-10 并励直流电动机的起动电流决定于什么？正常工作时电枢电流又决定于什么？