



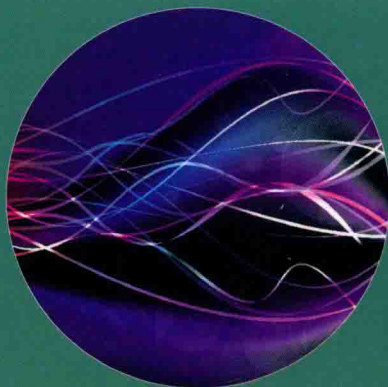
普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

熊永前 编 著

电机学 (第四版)

学习指导与习题解答

Dianjixue (Disiban) Xuexi Zhidao yu Xiti Jieda



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

要 容 内

普通高等院校电子信息与电气工程类专业教材

电机学(第四版) 学习指导与习题解答

熊永前 编著

华中科技大学出版社

中国·武汉



内 容 提 要

本书根据辜承林、陈乔夫、熊永前编写的国家级规划教材、国家级精品课程教材《电机学》(第四版),结合编者多年从事电机学教学的经验编写而成,是该教材的配套教学用书。按照电机学教学大纲所要求的教学内容,对导论、直流电机、变压器、交流绕组的基本理论、异步电机、同步电机等各章的要点分别进行了总结和归纳,对其全部习题作了详细解答,附有模拟试题及参考答案。

本书可作为高等学校电气工程及其自动化专业,以及其他强电类专业的补充教材或教学参考书,也可供相关专业自学人员和报考电气类研究生的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机学(第四版)学习指导与习题解答/熊永前编著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5680-4383-0

I. ①电… II. ①熊… III. ①电机学-高等学校-教学参考资料 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 148467 号

电机学(第四版)学习指导与习题解答

熊永前 编著

Dianjixue (Disiban) Xuexi Zhidao yu Xiti Jieda

策划编辑:谢燕群

责任编辑:谢燕群

封面设计:原色设计

责任校对:何欢

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:10.5

字 数:248千字

版 次:2018年7月第1版第1次印刷

定 价:24.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

电机学是电气工程及其自动化类专业的一门核心技术基础课程,其主要特点是电磁物理理论与工程实际紧密结合,概念抽象繁多,综合性强,是较难教学的课程之一。通过完成一定数量的教材中习题的练习,是深入掌握一门课程的主要学习途径。然而,对于初学者,特别是还不习惯从工程观点分析思考问题的读者,在知识快速增长的信息时代,要在短时间内迅速掌握电机学中的各种概念、各种物理量之间的复杂关系,分清实际问题中的主次因素,是十分困难的。帮助读者掌握电机学的知识点,提供解决问题的思路和方法是本书编写的初衷。

本书根据辜承林、陈乔夫、熊永前编写的普通高等教育国家级规划教材、国家级精品课程教材《电机学》(第四版)(华中科技大学出版社,2018),结合编者多年从事电机学教学的经验编写而成,是该教材的配套教学用书。本书按照电机学教学大纲所要求的教学内容,对导论、直流电机、变压器、交流绕组的基本理论、异步电机、同步电机等各章的要点分别进行了总结和归纳,并对其全部习题作了详细解答,目的是让读者加深对教材的理解,提高分析和解决实际问题的能力,节约时间,提高学习效率。本书附有两套模拟试题及参考答案,便于读者检验学习效果。

在本书的编写过程中,硕士研究生程源、夏雨、涂小涛、周康、张世林、王伟等同学参与了部分题目的解答和排版整理工作,在此深表感谢。编者水平有限,难免有不足和疏漏之处,恳请读者指正。联系方式:武汉华中科技大学电气与电子工程学院,邮政编码:430074。e-mail: yqxiong@mail.hust.edu.cn

编 者

2018年3月

于华工园

目 录

第 1 章 导 论

| | |
|-------------------------|-------|
| 第 1 章 导论 | (1) |
| 一、学习指导 | (1) |
| 二、习题解答 | (2) |
| 第 2 章 直流电机 | (10) |
| 一、学习指导 | (10) |
| 二、习题解答 | (14) |
| 第 3 章 变压器 | (38) |
| 一、学习指导 | (38) |
| 二、习题解答 | (42) |
| 第 4 章 交流电机绕组的基本理论 | (75) |
| 一、学习指导 | (75) |
| 二、习题解答 | (78) |
| 第 5 章 异步电机 | (92) |
| 一、学习指导 | (92) |
| 二、习题解答 | (96) |
| 第 6 章 同步电机 | (109) |
| 一、学习指导 | (109) |
| 二、习题解答 | (115) |
| 模拟试题 | (147) |
| 模拟试题一 | (147) |
| 模拟试题二 | (149) |
| 模拟试题参考答案 | (151) |
| 模拟试题一参考答案 | (151) |
| 模拟试题二参考答案 | (155) |
| 参考文献 | (159) |

第 1 章 导 论

一、学习指导

电机中导磁用的铁磁材料主要是硅钢片以及低碳钢。其主要特点是存在饱和现象,在交变磁场中存在磁滞损耗和涡流损耗,使电机发热、降低效率。铁磁材料饱和后,其导磁性能下降,即其磁导率减小,导致磁路的磁导减小、磁阻增加。磁路及其分析方法是电机研究的基础,全电流定律和磁路欧姆定律是电机学中最常用的两个磁路定律,磁路欧姆定律主要用于定性分析。磁路的概念有助于对电感参数的理解,电感参数计算公式对于电机学中电抗参数的分析具有重要的作用。电机的基本工作原理是建立在电磁感应定律、全电流定律、电路定律、磁路定律和电磁力定律等定律基础上的,掌握这些基本定律,是研究电机基本理论的基础。

1. 全电流定律

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I$$

当电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系时,上式中的电流取正号。全电流定律表明,电流是产生磁场的源,电机中的磁场主要靠电流激励产生,产生电机主磁场的电流称为励磁电流。在应用全电流定律进行电机磁路分析与计算时,一般取磁力线作为积分回路,从而简化积分运算。

2. 电磁感应定律

1) 电磁感应电动势

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

上式中的感应电动势方向与磁通方向应符合右手螺旋关系。根据磁通变化的原因,感应电动势又分为变压器电动势和运动电动势两种。

2) 变压器电动势

磁场与线圈(导体)间无相对运动,因磁通的变化而感应的电势称为变压器电动势。电机中的磁通 Φ 通常是随时间按正弦规律变化的,线圈中感应电动势的有效值为

$$E = 4.44 f N \Phi_m$$

3) 运动电动势

磁场恒定,由线圈(或导体)与磁场之间的相对运动所产生的感应电动势称为运动电动势。运动电动势的大小与导体长度、导体与磁场间相对运动的速度以及磁通密度成正比。

$$e = Blv$$

3. 电磁力定律

通电导体在磁场中受到力的作用,在圆周运动中,力和半径的乘积即为转矩。在电机

中,电磁力产生的转矩称为电磁转矩。当磁场方向和导体方向垂直时,通电导体的电磁力为

$$f = Bli$$

4. 磁饱和现象

当铁磁材料中的 B 达到一定的程度后,随着 H 的增加, B 的增加逐渐变慢,磁导率 μ_{Fe} 减小。

5. 铁耗

当铁磁材料中的磁场交变时,存在磁滞损耗和涡流损耗,统称为铁耗。在质量一定的情况下,铁耗 p_{Fe} 与磁场交变的频率 f 和最大磁通密度 B_m 的关系为

$$p_{Fe} \propto f^\beta B_m^2$$

式中, β 为与材料相关的系数,其值一般在 1.2~1.6 范围内。

6. 磁路基本定律

1) 磁路欧姆定律

$$\Phi = \frac{Ni}{l/(\mu A)} = \frac{F}{R_m} = F\Lambda_m$$

式中, $F = Ni$ 为磁动势, N 为匝数, i 为励磁电流。 $R_m = \frac{l}{\mu A}$ 为磁阻,磁阻与磁路长度 l 成正比、与磁导率 μ 和磁路面积 A 成反比。 $\Lambda_m = \frac{1}{R_m} = \frac{\mu A}{l}$ 为磁导。对于非铁磁材料,磁导率为常数,磁路的磁阻、磁导亦为常数;对于铁磁材料,磁阻、磁导不是常数,随着饱和程度的提高,磁导率会减小、磁阻会增加、磁导会减小。

2) 磁路的基尔霍夫第一定律

$$\sum \Phi = 0$$

上式表明,穿入(或穿出)任一封闭面的磁通等于零。

3) 磁路的基尔霍夫第二定律

$$\sum F = \sum Ni = \sum Hl = \sum \Phi R_m$$

上式表明,在磁路中,沿任何闭合磁路的磁动势的代数和等于磁压降的代数和。

7. 自感和互感

自感系数

$$L = N^2 \Lambda_m$$

互感系数

$$M = N_1 N_2 \Lambda_m$$

自感系数与线圈匝数 N 的平方及自感磁通所经磁路的磁导 Λ_m 成正比;互感系数与两线圈匝数的乘积及互感磁通所经磁路的磁导 Λ_m 成正比。空心线圈的电感是常数;铁芯线圈的电感不是常数,铁芯饱和后,电感减小。

二、习题解答

1.1 电机和变压器的磁路常采用什么材料制成? 这些材料各有哪些主要特性?

答 电机和变压器的磁路主要采用硅钢片制成。硅钢片具有良好的导磁性能,其磁导率极高(可达真空磁导率的数百乃至数千倍),能减小电机和变压器的体积。同时由于硅钢

片加入了半导体硅,增加了材料的电阻率,从而能有效降低材料在交变磁场作用下产生的磁滞损耗和涡流损耗。

1.2 磁滞损耗和涡流损耗是什么原因引起的?它们的大小与哪些因素有关?

答 铁磁材料在交变磁场的作用下,磁畴之间相互摩擦产生的能量损耗称为磁滞损耗。当交变磁通穿过铁磁材料时,将在其中感应电动势和产生涡流,涡流产生的焦耳损耗称为涡流损耗。磁滞损耗和涡流损耗合在一起称为铁耗。在铁磁材料重量一定的情况下,铁耗 p_{Fe} 的大小与磁场交变的频率 f 和最大磁通密度 B_m 之间的关系为

$$p_{Fe} \propto f^\beta B_m^2$$

式中, β 为频率指数,与材料性质有关,其值在 1.2~1.6 之间。因此,铁耗与最大磁通密度的平方、磁通交变频率 f 的 β 次方成正比。

1.3 变压器电动势、运动电动势产生的原因有什么不同?其大小与哪些因素有关?

答 变压器电动势是线圈与磁场相对静止,单由磁通随时间变化而在线圈中产生的感应电动势,与变压器工作时的情况一样,并由此而得名。运动电动势是磁场恒定时,单由线圈(或导体)与磁场之间的相对运动所产生。变压器电动势的大小与线圈匝数及与线圈交链的磁通随时间的变化率成正比;运动电动势的大小与导体长度、导体与磁场间相对运动的速度以及磁通密度成正比。

1.4 什么是磁饱和现象?

答 当铁磁材料中的磁通密度 B 达到一定的程度后, B 的增加随着外加场 H 的增加而逐渐变慢,磁导率减小,这种现象称为磁饱和现象。

1.5 磁路的基本定律有哪些?当铁芯磁路上有几个磁动势同时作用时,磁路计算能否用叠加原理?为什么?

答 磁通、磁动势、磁阻分别和电路中的电流、电动势和电阻对应,磁路的基本定律分别和电路中的基本定律对应。磁路的基本定律有磁路欧姆定律 $\Phi = F/R_m = \Lambda_m F$,磁路基尔霍夫第一定律 $\sum \Phi = 0$,磁路基尔霍夫第二定律 $\sum F = \sum Hl = \sum \Phi R_m$ 。

当铁芯磁路上有几个磁动势同时作用时,磁路计算一般不能用叠加原理。因为铁芯磁路存在饱和现象。饱和时,磁阻不是一个常数,因此不能用叠加原理。若铁芯中的磁通密度很小,没有饱和,则可以用叠加原理。

1.6 自感系数的大小与哪些因素有关?有两个匝数相等的线圈,一个绕在闭合铁芯上,一个绕在木质材料上,哪一个的自感系数大?哪一个的自感系数是常数?哪一个的自感系数是变数,随什么原因变化?

答 自感系数 $L = N^2 \Lambda_m$,即自感系数与线圈匝数 N 的平方及自感磁通所经磁路的磁导 Λ_m 成正比。

由于铁磁材料的磁导率远远大于非铁磁材料的磁导率,铁磁材料存在饱和现象,其磁导率不是一个常数,非铁磁材料的磁导率是常数,因此,在匝数相等的情况下,铁芯线圈的自感系数大于木芯线圈的自感系数。木芯线圈的自感不变。铁芯线圈的自感随铁芯饱和程度的提高而减小。

1.7 如图 1.1 所示,一次绕组外加正弦电压 u_1 ,绕组电阻为 R_1 、电流为 i_1 ,试问

(1) 绕组内为什么会感应出电动势?

(2) 标出磁通、一次绕组的自感电动势、二次绕组的互感电动势正方向;

(3) 写出一次侧电压平衡方程;

(4) 当电流 i_1 增加或减小时, 分别标出两侧绕组的感应电动势的实际方向。

解 (1) 一次绕组外加正弦电压 u_1 , 绕组内产生交变电流 i_1 , 在交变磁动势 $N_1 i_1$ 作用下产生交变磁场, 与一次、二次绕组交链, 从而在一次、二次侧绕组内感应出电动势。

(2) 由电流的参考正方向, 按右手螺旋法则确定磁通的正方向; 再按感应电动势与磁通之间呈右手螺旋关系确定一次、二次绕组中的感应电动势正方向, 如图 1.2 所示。

(3) 在图 1.2 所示的假定正向下, 根据基尔霍夫第二定律可得一次侧电压平衡方程

$$u_1 = -e_1 + i_1 R_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1$$

(4) 当电流 i_1 增加时, 磁通对时间的变化率为正, 感应电动势的实际方向与假定正向相反; 当电流 i_1 减小时, 磁通对时间的变化率为负, 感应电动势的实际方向与假定正向相同。

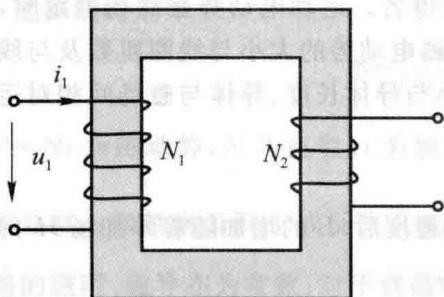


图 1.1 习题 1.7 和 1.8 附图

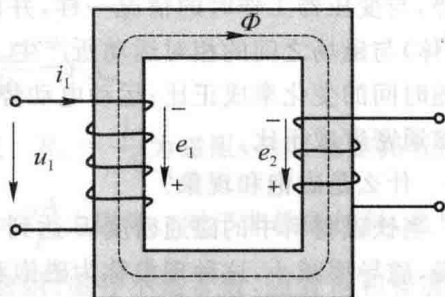


图 1.2 习题 1.7 解答附图

1.8 如图 1.1 所示, 如果电流 i_1 在铁芯中建立的磁通是 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, 二次绕组的匝数是 N_2 , 试求二次绕组内感应电动势有效值的计算公式, 并写出感应电动势与磁通量关系的复数表示式。

解 根据电磁感应定律, 二次绕组内感应电动势表达式为

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -N_2 \Phi_m \omega \cos \omega t$$

有效值的计算公式为

$$E_2 = \frac{N_2 \omega \Phi_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} \pi f N_2 \Phi_m = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

感应电动势滞后于磁通 90° , 用复数表示式为

$$\dot{E}_2 = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

1.9 有一单匝矩形线圈与一无限长导体在同一平面上, 如图 1.3 所示, 试分别求出下列条件下线圈内的感应电动势:

(1) 导体中通以直流电流 I , 线圈以线速度 v 从左向右移动;

(2) 导体中通以电流 $i = I_m \sin \omega t$, 线圈不动;

(3) 导体中通以电流 $i = I_m \sin \omega t$, 线圈以线速度 v 从左向右移动。

解 由全电流定律可得无限长导体在图 1.3 所示 x 处产生的磁通密度为

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2\pi(a+x)}$$

矩形线圈所交链的磁通为

$$\Phi = \int_{vt}^{c+vt} \frac{\mu_0 i}{2\pi(a+x)} b dx = \frac{\mu_0 b i}{2\pi} \ln \frac{a+c+vt}{a+vt}$$

(1) 当 $i=I$, 线圈以线速度 v 从左向右移动时, 线圈内的感应电动势为

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 b I}{2\pi} \frac{vc}{(a+c+vt)(a+vt)}$$

或者根据 $e=blv$ 分别求出线圈两垂直边的感应电动势, 然后相减得出线圈的电动势。

(2) 当 $i=I_m \sin \omega t$, 线圈不动时, 有

$$\Phi = \frac{\mu_0 b I_m \sin \omega t}{2\pi} \ln \frac{a+c}{a}$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\left(\frac{\mu_0 b \omega I_m}{2\pi} \ln \frac{a+c}{a} \right) \cos \omega t$$

(3) 当 $i=I_m \sin \omega t$, 线圈以线速度 v 从左向右移动时, 有

$$\Phi = \frac{\mu_0 b I_m \sin \omega t}{2\pi} \ln \frac{a+c+vt}{a+vt}$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 b I_m}{2\pi} \frac{vc}{(a+c+vt)(a+vt)} \sin \omega t - \left(\frac{\mu_0 b I_m \omega}{2\pi} \ln \frac{a+c+vt}{a+vt} \right) \cos \omega t$$

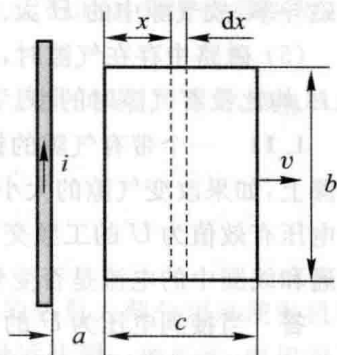


图 1.3 习题 1.9 附图

1.10 在图 1.4 所示的磁路中, 两个线圈都接在直流电源上, 已知 I_1, I_2, N_1, N_2 , 回答下列问题:

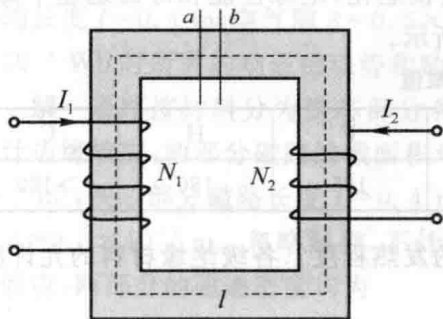


图 1.4 习题 1.10 附图

- (1) 总磁动势 F 是多少?
- (2) 若 I_2 反向, 总磁动势 F 又是多少?
- (3) 电流方向仍如图 1.4 所示, 若在 a, b 处切开形成一长为 δ 的空气隙, 总磁动势 F 是多少? 此时铁芯磁压降大还是空气隙磁压降大?
- (4) 在铁芯截面积均匀和不计漏磁的情况下, 比较(3)中铁芯和气隙中 B, H 的大小。
- (5) 比较(1)和(3)中两种情况下铁芯中的 B, H 的大小。

解 (1) 总磁动势

$$F = I_1 N_1 - I_2 N_2$$

(2) 若 I_2 反向, 则总磁动势

$$F = I_1 N_1 + I_2 N_2$$

(3) 若 I_2 不反向, 磁路在 a, b 处切开, 则总磁动势不变, $F = I_1 N_1 - I_2 N_2$; 由于空气隙中的磁阻大, 因此磁压降主要在气隙中。

(4) 在不计漏磁的情况下, 所有磁力线均沿铁芯闭合, 根据磁通的连续性原理可知, 铁芯和气隙中的磁通相等。铁芯截面积均匀、气隙很小的情况下可忽略边缘效应, 气隙处的磁力线分布和铁芯中的一致, 因此铁芯和气隙中的 B 相等。由于气隙的磁导率远远小于铁芯

的磁导率,故气隙中的 H 大。

(5) 磁路中存在气隙时,磁路的磁阻增大,在磁动势不变的情况下,磁通减少,铁芯中的 B 、 H 均比没有气隙时的小。

1.11 一个带有气隙的铁芯线圈(参考图 1.4),若线圈电阻为 R ,接到电压为 U 的直流电源上,如果改变气隙的大小,问铁芯内的磁通 Φ 和线圈中的电流 I 将如何变化? 当线圈接到电压有效值为 U 的工频交流电源上,若线圈电阻忽略不计,如果改变气隙大小,则铁芯内磁通和线圈中的电流是否变化?

答 当接到电压为 U 的直流电源上时,线圈电流 $I=U/R$ 为恒量,线圈磁动势 $F=NI$ 为恒量。若增大气隙,磁路的磁阻增大,则磁通 Φ 减少;反之,减小气隙,磁路的磁阻减小,则磁通 Φ 增大。

当线圈接到电压有效值为 U 的工频交流电源上时,线圈中的电流是交变的,产生交变磁通。忽略线圈电阻时,线圈感应电动势有效值 $E=U$,又因 E 正比于磁通幅值 Φ_m ,因此,铁芯内磁通幅值不变。由于增大气隙时磁路的磁阻增大,而磁通不变,故线圈中电流应增大;反之,若减小气隙,则线圈中电流应减小。

1.12 电机运行时,热量主要来源于哪些部分?

答 电机运行时,热量主要来源于三个部分的损耗:(1) 电路中的电阻损耗;(2) 铁芯中的磁通密度交变产生的铁耗;(3) 运动部件产生的摩擦通风损耗(机械损耗)。

1.13 电机中常用的绝缘材料有哪些种类? 是根据什么分级的? 各级材料的最高允许温度是多少?

答 电机中常用的绝缘材料根据耐热分成 A、E、B、F、H、C 六级,每种级别的绝缘材料在其温度限值之下可以长期使用,超过其温度限值则很快老化,绝缘性能和寿命迅速下降。电机中常用绝缘材料的耐热等级和温度限值如表 1.1 所示。

表 1.1 绝缘等级与温度限值

| 绝缘等级 | A | E | B | F | H | C |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 温度限值/($^{\circ}\text{C}$) | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |

1.14 为什么用温升而不直接用温度来表示电机的发热程度? 各级绝缘材料的允许温升限值是多少?

答 电机运行时的损耗转化为热量而使电机温度升高,热量与温差对应。同一台电机,在相同的工况下其发热量相同,如果环境温度不同,则电机的实际温度不同,而温升是相同的。因此,工程中用温升而不是用温度表示电机发热的程度。如一台电机的工作温度达到 120°C ,但环境温度为 100°C ,则温升 $\tau=20^{\circ}\text{C}$,这说明电机本身的发热情况并不严重,而电机的工作温度偏高则是由于环境温度高。反之,即便电机工作温度仅 100°C ,但环境温度只有 10°C ,那么实际温升也达到 90°C ,发热情况就相当严重了。

绝缘材料的温度限值只是确定了电机的最高工作温度,温升限值则取决于环境温度。为适应我国大部分地区不同季节的运行环境,国家统一制定的环境温度标准是 40°C (介质为空气)。即绝缘材料的温升限值等于其温度限值减去标准环境温度 40°C ,例如, E 级和 B 级绝缘材料的温升限值分别为 75°C 和 80°C 。

1.15 电机的发热(或冷却)规律如何? 为什么电机刚投入运行时温升增长得快些, 越到后面温升增长就越慢?

答 将电机看作均质等温体, 初始温度为环境温度, 根据传热学知识, 可推导出电机的温升函数为

$$\tau = \tau_{\infty} (1 - e^{-t/T})$$

由上式对时间求导得

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_{\infty}}{T} e^{-t/T}$$

由数学推导可知上式为单调递减函数。开始时电机发出的热量大部分用来使电机本身温度升高, 随着 τ 的增加, 越来越多的热量散发到周围空间, 最后达到一种平衡, 电机温度不再升高。故电机刚投入运行时温升增长得快些, 越到后面温升增长就越慢。

1.16 电机的冷却方式和通风系统有哪些种类? 一台已制成的电机被加强冷却后, 容量可否提高?

答 电机的冷却方式有直接冷却(又称内部冷却)和间接冷却(又称外部冷却)两大类。通风系统有轴向通风、径向通风、混合通风以及外风扇自冷通风等多种形式。一台已制成的电机被加强冷却后, 容量可以适当提高, 因为容量提高后, 发热量增加, 通过加强冷却, 使电机的温升保持不变。

1.17 一个有铁芯的线圈, 电阻为 2Ω 。当将其接入 110 V 的交流电源时, 测得输入功率为 90 W , 电流为 2.5 A , 试求此线圈的铁芯损耗。

解 线圈铜耗 $p_{\text{Cu}} = I^2 R = 2.5^2 \times 2 \text{ W} = 12.5 \text{ W}$

铁芯损耗 $p_{\text{Fe}} = P - p_{\text{Cu}} = (90 - 12.5) \text{ W} = 77.5 \text{ W}$

1.18 图 1.5 所示铁芯用 DR510-50 硅钢片叠成, 截面积 $A = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 铁芯的平均长度 $l = 0.4 \text{ m}$, 空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 绕组的匝数为 600 匝, 试求产生磁通 $\Phi = 10.9 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁动势和励磁电流。

解 磁路按材料分为铁芯部分和气隙部分两段, 不计边缘效应, 两部分磁路的截面积均为 $A = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 铁芯部分磁路长度 $l = 0.4 \text{ m}$, 气隙部分磁路长 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。忽略漏磁, 不计气隙处的磁场边缘效应, 两部分的磁通密度均为

$$B = \frac{\Phi}{A} = \frac{10.9 \times 10^{-4}}{12.25 \times 10^{-4}} \text{ T} = 0.89 \text{ T}$$

气隙磁场强度

$$H_{\delta} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0.89}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 7.08 \times 10^5 \text{ A/m}$$

查教材 DR510-50 硅钢片磁化曲线, 得铁芯磁场强度 $H_{\text{Fe}} = 299 \text{ A/m}$ 。

铁芯部分磁压降 $H_{\text{Fe}} l = 299 \times 0.4 \text{ A} = 119.6 \text{ A}$

气隙部分磁压降 $H_{\delta} \delta = 7.08 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} \text{ A} = 354 \text{ A}$

磁动势 $F = H_{\text{Fe}} l + H_{\delta} \delta = (119.6 + 354) \text{ A} = 473.6 \text{ A}$

励磁电流 $I = \frac{F}{N} = \frac{473.6}{600} \text{ A} = 0.79 \text{ A}$

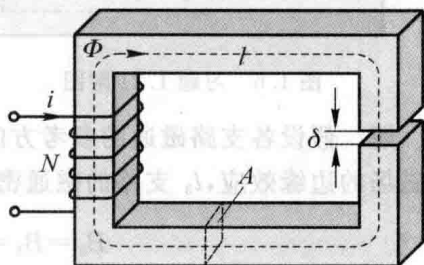


图 1.5 习题 1.18 附图

1.19 设 1.18 题中励磁绕组的电阻为 $120\ \Omega$, 接于 $110\ \text{V}$ 的直流电源上, 问铁芯磁通是多少?

解 励磁磁动势 $F = NI = N \frac{U}{R} = 600 \times \frac{110}{120} \text{ A} = 550 \text{ A}$

已知磁动势求磁通属于磁路计算的第二类问题, 需要用迭代法求解。先假设一个磁通 Φ' , 按上题的方法求出一个磁动势 F' 。给定误差 ϵ , 如果 $|F - F'| < \epsilon$, 则 Φ' 即为所求。否则, 重新假定 Φ' , 重新计算, 直到 F' 满足误差要求为止。本题的最后结果为 $\Phi = 12.25 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 。

1.20 设 1.19 题所示励磁绕组的电阻可忽略不计, 接于 $50\ \text{Hz}$ 的正弦电压 $110\ \text{V}$ (有效值) 上, 问铁芯磁通最大值是多少?

解 由于励磁绕组的电阻可忽略不计, 故反电动势 $E = U$ 。铁芯磁通最大值为

$$\Phi_m = \frac{E}{4.44 N f} = \frac{110}{4.44 \times 600 \times 50} \text{ Wb} = 8.26 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

1.21 图 1.6 所示中直流磁路由 DR510-50 硅钢片叠成, 磁路各截面的面积相等, $A = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$, 磁路平均长 $l_1 = 0.5 \text{ m}$, $l_2 = 0.2 \text{ m}$, $l_3 = 0.5 \text{ m}$ (含气隙 δ), $\delta = 0.2 \times 10^{-2} \text{ m}$ 。已知气隙中的磁通量 $\Phi = 4.6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$, 磁动势 $N_2 I_2 = 10300 \text{ A}$, 求另外两支路中的 Φ_1 , Φ_2 及 $N_1 I_1$ 。

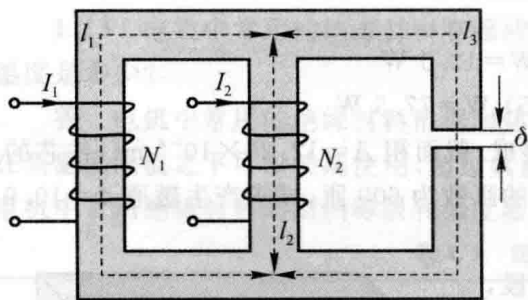


图 1.6 习题 1.21 附图

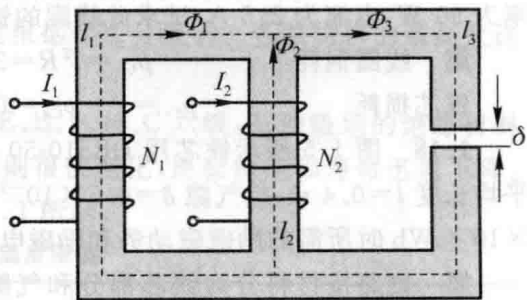


图 1.7 习题 1.21 解答附图

解 假设各支路磁通的参考方向如图 1.7 所示。已知 $\Phi_3 = \Phi = 4.6 \times 10^{-3} \text{ Wb}$, 忽略气隙磁场的边缘效应, l_3 支路的磁通密度与气隙中的磁通密度相等, 即

$$B_3 = B_\delta = \frac{\Phi}{A} = \frac{4.6 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} \text{ T} = 1.84 \text{ T}$$

气隙磁场强度 $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{1.84}{4\pi \times 10^{-7}} \text{ A/m} = 1.4642 \times 10^6 \text{ A/m}$

由 $B_3 = 1.84 \text{ T}$, 查教材中的 DR510-50 硅钢片磁化曲线, 得 l_3 支路铁芯磁场强度为

$$H_3 = 14600 \text{ A/m}$$

根据磁路的基尔霍夫第二定律, 对 l_2 和 l_3 构成的回路有

$$N_2 I_2 = H_2 l_2 + H_3 (l_3 - \delta) + H_\delta \delta$$

由上式可解得 $H_2 = 504 \text{ A/m}$

由 $H_2 = 504 \text{ A/m}$, 查 DR510-50 硅钢片磁化曲线, 由线性插值法得到 $B_2 = 1.108 \text{ T}$ 。

l_2 支路的磁通密度

$$\Phi_2 = B_2 A = 1.108 \times 2.5 \times 10^{-3} \text{ Wb} = 2.77 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

根据磁路的基尔霍夫第一定律, l_1 支路的磁通密度为

$$\Phi_1 = \Phi_3 - \Phi_2 = (4.6 \times 10^{-3} - 2.77 \times 10^{-3}) \text{ Wb} = 1.83 \times 10^{-3} \text{ Wb}$$

$$l_1 \text{ 支路的磁通密度 } B_1 = \frac{\Phi_1}{A} = \frac{1.83 \times 10^{-3}}{2.5 \times 10^{-3}} \text{ T} = 0.732 \text{ T}$$

由 $B_1 = 0.732 \text{ T}$, 查 DR510-50 硅钢片磁化曲线, 得 l_1 支路铁芯磁场强度

$$H_1 = 220.8 \text{ A/m}$$

根据磁路的基尔霍夫第二定律, 对 l_1 和 l_2 构成的回路有

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = H_1 l_1 - H_2 l_2$$

解得

$$N_1 I_1 = 10310 \text{ A}$$

第2章 直流电机

一、学习指导

1. 直流电机结构和工作原理

常用的直流电机是换向器式电机,其电枢导体(元件)中的电动势和电流均是交变的,通过电刷的电流为直流。对于直流电动机,换向器将直流转换成交流,起逆变作用;对于直流发电机,换向器将交流转换成直流,起整流作用。换向器和电枢导体保持相对静止关系,而电刷与换向器总是保持相对运动关系。

旋转电机的结构有定子和转子两大部分,定子和转子之间存在着气隙。在旋转电机主磁路中,气隙的磁阻占主要部分。直流电机通常采用转枢式结构,定子安装有主极铁芯,由钢板叠压而成。主极铁芯上外套励磁绕组,励磁绕组通入直流电流,建立的磁场称为励磁磁场,也称为主磁场。主极铁芯沿圆周均匀布置,相邻两个主磁极的极性相反(N极和S极),以产生周期性对称磁场。N极和S极总是成对使用,习惯上用符号 p 表示电机的极对数,极数等于 $2p$ 。直流电机常在N极和S极之间安装换向极,换向极上的换向绕组与电枢绕组串联,其作用是改善换向。

直流电机的转子上主要有电枢铁芯和换向器。电枢铁芯由硅钢片叠压而成,以减小铁耗。电枢铁芯表面槽中安装电枢绕组,用来感应电动势和流过电流,起着转换机电能量的作用。构成电枢绕组的元件与换向器中的换向片连接,安装在定子上的电刷与换向片接触,将电枢绕组中的电引入或引出。

电机中的额定功率均指输出功率。对于发电机,该功率为电功率;对于电动机,该功率为机械功率。直流电机额定功率 P_N 、额定电压 U_N 、额定电流 I_N 、额定效率 η_N 之间的关系为

$$\text{发电机} \quad P_N = U_N I_N$$

$$\text{电动机} \quad P_N = U_N I_N \eta_N$$

2. 直流电机电枢绕组特点

为了得到平滑的电压,直流电机电枢绕组由许多分布于电枢槽中的线圈(元件)按一定的规律连接构成。直流电机电枢绕组各元件间通过换向器连接,构成一个闭合回路,回路内各元件的电动势互相抵消,从而不产生环流,因此,直流电机的电枢绕组是无头无尾的闭合绕组。元件内的电动势和电流均为交流,通过换向器和电刷间的相对运动实现交、直流转换。

电刷与换向器接触,将电枢绕组分割成多条并联支路。各条并联支路要保持对称,以及各条并联支路的元件数相等,感应电动势相同。电刷的放置原则是:空载时正、负电刷之间获得最大的电动势,这时被电刷短路的元件的电动势为零。因此,电刷应放在换向器的几何中性线上。对端接对称的元件,换向器的几何中性线与主极轴线重合。对于单叠绕组,并联

支路对数等于电机极对数($a=p$);对于单波绕组,并联支路对数等于1($a=1$)。

直流电机各条并联支路中的元件是在不断变化的,但从定子上看,各条并联支路中的元件相对主磁极的位置是不变的,因此,直流电机电枢绕组又称为“伪静止绕组”。

3. 直流电机空载磁场和磁化曲线

直流电机空载磁场是由主磁极上的励磁绕组通入直流电流后所建立的,该磁场称为空载磁场或主磁场。主磁场经过气隙同时与电枢绕组和励磁绕组交链的磁通称为主磁通。主磁通与励磁电流的关系曲线称为磁化曲线。从磁化曲线可以看出电机的饱和程度。饱和程度对电机的性能有很大的影响。电机的磁化曲线仅和电机的几何尺寸及所用的材料有关,而与电机的励磁方式无关。电机的运行特性与其磁化曲线密切相关。设计电机时,一般使额定工作点位于磁化曲线开始弯曲的部分,这样既可保证一定的可调节度,又不至于浪费材料。

4. 直流电机电枢反应

当电枢绕组流过电流时,会产生电枢磁动势,此时,气隙磁场由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立。电枢磁动势对主磁场的影响称为电枢反应。

当电刷放在几何中性线上时,电枢磁动势的方向与主极轴线正交,称为交轴电枢反应。交轴电枢反应的影响是:① 主极下的磁场一半被削弱,一半被加强,引起气隙磁场波形畸变,使气隙磁场零点位置偏移;② 磁路不饱和时,不影响每极磁通量的大小,而磁路饱和时有去磁作用,使每极磁通量减小。

当电刷安装偏离几何中性线时,电枢磁动势可分解为直轴和交轴两个分量。直轴电枢磁动势的方向与主极轴线重合,称为直轴电枢反应。直轴电枢反应起去磁或助磁作用。

5. 直流电机感应电动势和电磁转矩

电枢绕组是电机实现能量转换的关键部件,在电枢绕组上感应电动势 E 和产生电磁转矩 T_{em} 。

感应电动势 $E = C_E \Phi n$

电磁转矩 $T_{em} = C_T \Phi I_a$

式中, n 为转子转速, I_a 为电枢电流。 Φ 为每极磁通量,空载时($I_a=0$), Φ 由励磁磁动势建立;负载时由励磁磁动势和电枢磁动势共同建立。 Φ 主要取决于励磁电流。电机不饱和时,由于电枢反应不影响 Φ 的大小,因此, Φ 与励磁电流成正比;电机饱和时,由于电枢反应有去磁作用,因此,电枢电流增加时, Φ 会减小,但 Φ 的大小仍然主要由励磁电流决定。 C_E 和 C_T 是与电机结构有关的常数,分别称为电动势常数和转矩常数。

电动势常数 $C_E = \frac{pN_a}{60a}$

转矩常数 $C_T = \frac{pN_a}{2\pi a}$

$C_T = \frac{30}{\pi} C_E$

感应电动势和电磁转矩公式是直流电机的基本公式,是分析直流电机运行性能的依据,大家必须牢固掌握。

6. 直流电机的励磁方式

直流电机的性能随着励磁方式的不同而有很大差异。直流电机励磁方式可分为他励、并励、串励和复励等几种。要着重掌握他励、并励、串励电动机的端电压、电枢电流、励磁电流之间的关系。

同一台电机既可以作发电机运行也可以作电动机运行,视外界条件的不同而定,这就是电机的可逆性。

7. 直流电动机的基本方程

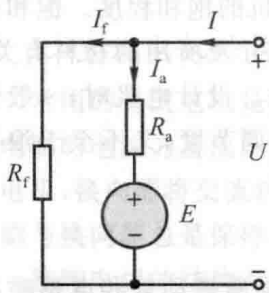


图 2.1 并励直流电动机等效电路

图 2.1 是根据并励直流电动机的数学模型抽象出的等效电路图, U 和 I 分别为电机的端电压和端电流, I_a 为电枢电流(流入电刷的电流), I_f 为励磁电流。 R_a 为电枢回路总电阻(包括电枢绕组电阻和电刷接触电阻), R_f 为励磁回路总电阻(包括励磁绕组电阻和励磁回路外串的调节电阻)。在实际电机中,励磁绕组电阻远远大于电枢绕组的电阻,励磁电流远远小于电枢电流,但励磁电流控制着感应电动势 E 的大小。在电枢回路中,外加电压由电枢回路电阻压降和感应电动势平衡,其中关于电动势远远大于电枢回路电阻压降。

要认真掌握直流电动机的基本方程:电动势平衡方程、功率平衡方程、转矩平衡方程。

电动势平衡方程

$$U = E + I_a R_a = C_E \Phi n + I_a R_a$$

功率平衡方程

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu}$$

$$P_{em} = P_2 + p_0$$

电磁功率

$$P_{em} = E I_a$$

空载损耗

$$p_0 = p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad}$$

铜耗

$$p_{Cu} = p_{Cua} + p_{Cuf} = I_a^2 R_a + I_f^2 R_f \text{ (并励)}$$

转矩平衡方程

$$T_{em} = T_2 + T_0$$

电磁转矩

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

输出转矩

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega}$$

空载制动转矩

$$T_0 = \frac{p_0}{\Omega}$$

8. 直流电动机的工作特性

直流电动机的工作特性有:速率特性 $I = f(P_2)$,转矩特性 $T_{em} = f(P_2)$,效率特性 $\eta = f(P_2)$ 。当输出功率 P_2 增加时,输入功率 P_1 亦必须增加,在端电压不变的条件下, I_a 必须增加。因此, I_a 是随着 P_2 的增加而增加的。在解释特性曲线形状时,主要利用有关的数学表达式和物理概念。速率特性和转矩特性的相关数学表达式为

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