 新世纪高等院校精品教材

DIANJI YU TUODONG JICHU

XUEXI ZHIDAO HE KAOSHI ZHIDAO

电机与拖动基础 学习指导和考试指导

林瑞光 主编



浙江大學出版社

新世纪高等院校精品教材

电机与拖动基础 学习指导和考试指导

林瑞光 主编

TM3
C6

浙江大學出版社

内 容 简 介

本书各章的安排与《电机与拖动基础》教材一致,并在最后增加一章“考试指导”。每章的内容均包括学习内容提要、典型例题剖析及原《电机与拖动基础》书中的全部习题与思考题的解答等三部分。学习内容提要对该章内容进行归纳与总结,指出必须掌握的基本要点;典型例题与原书不重复,以加深理解、拓宽知识面;习题与思考题的解答仅向读者推荐一种解题方法,但不一定是惟一的,希望读者能从中得到启发,探索出自己的更简明快捷的解题方法。考试指导包括典型试卷分析及模拟试卷两部分,其中典型试卷分析既给出解题过程又指出解题思路,而模拟试卷仅给出最终答案,解题过程由读者自己进行,以检验读者对《电机与拖动基础》的理解程度,提高应试水平。各章的学习内容提要可作为考前的复习提纲。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础学习指导和考试指导/林瑞光主编.
杭州:浙江大学出版社,2004.3
ISBN 7-308-03619-7

I. 电... II. 林... 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(2004)第 014871 号

出版发行 浙江大学出版社
(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)
(E-mail:zupress@mail. hz. zj. cn)
(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 杜希武

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 14.75

字 数 380 千

版 次 2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

印 数 0001—5000

书 号 ISBN 7-308-03619-7/TM·029

定 价 25.00 元

前 言

本书是与浙江大学林瑞光教授主编、由浙江大学出版社出版的《电机与拖动基础》配套的教学用书。旨在帮助读者加深对电机与拖动的基本原理的理解,改进学习电机与拖动课程的思维方法,提高该课程的解题能力与应试水平。

本书各章的安排与《电机与拖动基础》教材一致,并在最后增加一章“考试指导”。每章的内容均包括学习内容提要、典型例题剖析及原《电机与拖动基础》书中的全部习题与思考题的解答等三部分。学习内容提要对该章内容进行归纳与总结,指出必须掌握的基本要点;典型例题与原书不重复,以加深理解、拓宽知识面;习题与思考题的解答仅向读者推荐一种解题方法,但不一定是惟一的,希望读者能从中得到启发,探索出自己的更简明快捷的解题方法。考试指导包括典型试卷分析及模拟试卷两部分,其中典型试卷分析既给出解题过程又指出解题思路,而模拟试卷仅给出最终答案,解题过程由读者自己进行,以检验读者对《电机与拖动基础》的理解程度,提高应试水平。各章的学习内容提要可作为考前的复习提纲。

本书由林瑞光教授主编,并负责各章的学习内容提要与典型例题的编写;由史涪激副教授负责第4、5、6章的习题与思考题的解答以及考试指导的编写;绪论及第1、2、3、7、8章的习题与思考题的解答由邱建琪博士完成。最后由林瑞光教授对全书进行统稿。

本书可作为本科、专科及成人教育有关专业的《电机与拖动》课程的教学参考书。为了更好地发挥本书的作用,建议读者在参考本书的习题与思考题解答时,最好自己先进行独立思考与解题,然后再与本书解答进行对照,并找出不一致的原因,千万不要一味抄袭,否则有违本书的编写愿望。

本书在编写过程中,得到章玮副教授与卢琴芬博士帮助,特此表示感谢!由于编写时间仓促,书中难免存在错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2003年11月

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 学习内容提要	(1)
§ 0-2 例题剖析	(2)
§ 0-3 习题与思考题解答	(6)
第一章 直流电机	(9)
§ 1-1 学习内容提要	(9)
§ 1-2 例题剖析	(13)
§ 1-3 习题与思考题解答	(15)
第二章 直流电机的电力拖动	(30)
§ 2-1 学习内容提要	(30)
§ 2-2 例题剖析	(37)
§ 2-3 习题与思考题解答	(41)
第三章 变压器	(65)
§ 3-1 学习内容提要	(65)
§ 3-2 例题剖析	(70)
§ 3-3 习题与思考题解答	(76)
第四章 三相感应电动机	(92)
§ 4-1 学习内容提要	(92)
§ 4-2 例题剖析	(101)
§ 4-3 习题与思考题解答	(105)
第五章 三相感应电动机的电力拖动	(125)
§ 5-1 学习内容提要	(125)
§ 5-2 例题剖析	(133)
§ 5-3 习题与思考题解答	(138)
第六章 三相同步电动机	(160)

§ 6-1	学习内容提要	(160)
§ 6-2	例题剖析	(166)
§ 6-3	习题与思考题解答	(169)
第七章 驱动与控制微电机 (179)		
§ 7-1	学习内容提要	(179)
§ 7-2	例题剖析	(186)
§ 7-3	习题与思考题解答	(188)
第八章 电动机容量的选择 (192)		
§ 8-1	学习内容提要	(192)
§ 8-2	例题剖析	(195)
§ 8-3	习题与思考题解答	(196)
考试指导 (208)		
	典型试卷 1 及其分析.....	(208)
	典型试卷 2 及其分析.....	(213)
	模拟试卷 1	(218)
	模拟试卷 2	(221)
	模拟试卷 3	(224)

§ 0-1 学习内容提要

一、电机理论中常用的基本电磁定律

电机的工作原理是建立在全电流定律、电磁感应定律、电磁力定律、电路定律与磁路定律等基本定律基础上的。这些定律贯穿《电机与拖动基础》全书的始终,熟练掌握这些定律是学好《电机与拖动》课程的基础。

1. 全电流定律

当导体中有电流通过时,就会产生与该载导体相交链的磁场,磁通的正方向与电流正方向符合右手螺旋关系,其数学表达式为

$$\oint_l H \cdot dl = \sum I$$

式中 $\sum I$ 为积分回路所包围的全部电流代数和,当电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系时,该电流取正号,反之取负号。

在电机或变压器中,全电流定律可简化为:

$$\sum H_k \cdot l_k = \sum N \cdot i = F$$

式中 H_k 为磁路长为 l_k 的第 k 段磁路的磁场强度, N 为线圈匝数, i 为每匝电流, F 为作用在整个磁路上的磁动势。

2. 电磁感应定律

当线圈或导体所交链的磁链发生变化时,在线圈或导体中就会产生感应电动势,其方向是该电动势企图在线圈或导体内产生电流建立磁场以阻止线圈或导体所交链磁链的变化,其大小与磁链变化成正比。当感应电动势正方向与磁通正方向符合右手螺旋关系时,电磁感应定律的数学表达式为:

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

线圈与磁场相对静止,仅穿过线圈的磁通大小或方向发生变化时所产生的感应电动势称为变压器电动势。当所有磁通与线圈的全部匝数都交链时,则变压器电动势可表达为:

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

如果磁场是由线圈电流产生, $\Psi = L \cdot i$, 则当该电流发生变化时,在线圈中感应的电动势称为自感电动势。当磁路是线性时,电感 L 为常数,则自感电动势表达式为:

$$e = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

当磁场大小与方向不变,而导体与磁场有相对运动时,则导体内的感应电动势称为运动(旋转)电动势。当导体、磁力线与运动方向互相垂直时,则运动电动势表达式为:

$$e = B \cdot l \cdot v$$

运动电动势的方向可用右手定则确定。

3. 电磁力定律

载流导体在磁场中会受到力的作用,称为电磁力。当磁场、导体电流与电磁力方向互相垂直时,则电磁力表达式为:

$$f = B \cdot l \cdot i$$

电磁力的方向可用左手定则确定。

4. 磁路定律

第 k 段磁路的磁压降 $(Hl)_k$ 可用磁路欧姆定律表示,即:

$$(Hl)_k = \Phi \cdot R_{mk} \text{ 或 } \Phi = \frac{(Hl)_k}{R_{mk}}$$

穿入(或穿出)任一封闭面的磁通之和为零,即磁路的基尔霍夫第一定律为:

$$\oint_s B \cdot ds = 0$$

沿任一闭合磁回路,磁动势的代数和等于磁压降的代数和,即磁路的基尔霍夫第二定律为:

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

对于无分支磁回路,则可以写成:

$$\sum F = \Phi \cdot \sum R_m \text{ 或 } \Phi = \frac{\sum F}{\sum R_m}$$

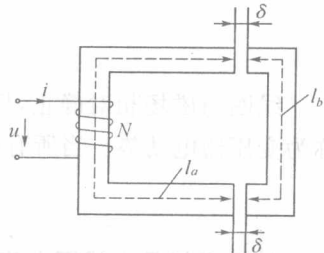
二、铁磁材料的主要特性

1. 良好的导电性与高的导磁性能;
2. 磁化曲线的非线性以及磁饱和现象;
3. 交变磁化时的磁滞现象与磁滞损耗;
4. 交变磁化时的涡流损耗。

§ 0-2 例题剖析

例 1 某电磁铁如图(1)所示,励磁线圈匝数 $N=500$ 匝,铁芯磁路静止部分和可动部分(衔铁)的截面积 $S=0.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 相同,材料也相同。静止磁路长 $l_a=20\text{cm}$,动铁磁路长 $l_b=10\text{cm}$,单边气隙长 $\delta=1\text{cm}$,铁芯的部分磁化曲线为:

$H(\text{A/cm})$	1.95	90.5	151
$B(\text{Wb/m}^2)$	0.56	1.73	1.84



图(1) 电磁铁

试求：

(1) 直流励磁, 为产生 $f=10\text{N}$ 的吸力, 应通入直流电流 $I=?$

(2) 保持直流励磁电压不变, 衔铁吸合后的吸力 $f=?$

(3) 继项(2), 将其电流减至 60%, 吸力 $f=?$

(4) 对于项(1), 通入 50Hz 正弦交流电流, 其有效值与项(1)相同, 其吸力如何?

解 预备知识:

电磁铁励磁线圈通入电流 i 时, 磁拉力使衔铁移动而吸合, 衔铁吸力等于气隙磁场储能对衔铁移动距离的导数, 即 $f = \frac{dW_m}{d\delta}$ 。

在均匀磁场下, 一个气隙的磁场储能为:

$$W_{m\delta} = \frac{1}{2} H_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{\delta}^2}{\mu_{\delta}} \cdot S_{\delta} \cdot \delta$$

式中空气导磁系数 $\mu_{\delta} = \mu_0$, 而真空导磁系数 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$; 如果忽略气隙磁通的扩散作用, 则 $S_{\delta} \approx S$ 。

对于图(1)电磁铁有两个气隙, 气隙总磁能 $W_m = 2 \cdot W_{m\delta}$, 则衔铁吸力为:

$$f = \frac{d}{d\delta} \left(2 \times \frac{1}{2} \cdot \frac{B_{\delta}^2}{\mu_0} \cdot S \cdot \delta \right) = \frac{B_{\delta}^2}{\mu_0} \cdot S$$

(1) 据吸力公式可得:

$$B_{\delta} = \sqrt{\frac{\mu_0 f}{S}} = \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7} \times 10}{0.4 \times 10^{-4}}} = 0.5605 \text{ (T)}$$

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0.5605}{4\pi \times 10^{-7}} = 4460 \times 10^2 \text{ (A/m)}$$

对于图(1)的无分支磁路, 且各段磁路截面相等, 则铁芯内 $B \approx B_{\delta} = 0.5605 \text{ T}$, 查铁芯磁化曲线可得铁芯磁场强度为 $H = 1.95 \text{ A/cm}$ 。则磁路的磁动势 F 为:

$$\begin{aligned} F &= \sum Hl = H \cdot l_a + H \cdot l_b + H_{\delta} \cdot \delta \\ &= 1.95(20 + 10) + 4460 \times 10^2 \times 0.01 = 4518.5 \text{ (A)} \end{aligned}$$

$$\text{直流励磁电流 } I = \frac{F}{N} = \frac{4518.5}{500} \approx 9.04 \text{ (A)}$$

计算结果可知, 对于如图(1)所示的带有空气隙的磁回路, 虽然气隙磁路长占总磁路长的比值仅为 $\frac{1+1}{20+10+1+1} = 0.0625$, 但是两个气隙所需磁动势却占总磁动势的比值为:

$$\frac{4460}{4518.5} = 0.987. \text{ 说明了由于铁磁材料的导磁系数越大于空气, 铁芯磁路上的磁压降很小,}$$

励磁绕组所建立的磁动势绝大部分是降落在气隙上。

(2) 衔铁吸合后, 一方面由于气隙 $\delta \approx 0$, 使磁回路的总磁阻 R_m 大大减小, 另一方面, 由于直流励磁回路的电流 i 仅决定于励磁电压 U 与绕组电阻 R 而与磁通大小无关, 当 U, R 不变时, 此时电流 $I = 9.04 \text{ A}$ 不变, 即磁动势 $F = 4518.5 \text{ A}$ 不变。所以衔铁吸合后的磁通 $\Phi = \frac{F}{R_m}$ 将增加, 使磁路饱和度提高。吸合后的铁芯磁场强度为:

$$H = \frac{F}{l_a + l_b} = \frac{4518.5}{20 + 10} = 150.62 \text{ (A/cm)}$$

查铁芯材料的磁化曲线得:

$$B = 1.84 \text{ (T)}$$

此时吸力为:

$$f = \frac{B^2}{\mu_0} \cdot S = \frac{1.84^2}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.4 \times 10^{-4} = 107.8 \text{ (N)}$$

由此可知,吸合后由于 Φ 大大增加,使 B 增加,导致吸力 $f \propto B^2$ 也大大增加。

(3)当电流减至60%时, F 与 H 也比例地减至60%,此时 $H=150.62 \times 0.6=90.4 \text{ (A/cm)}$ 。查磁化曲线得 $B=1.73 \text{ (T)}$ 。

吸力

$$f = \frac{1.73^2}{4\pi \times 10^{-7}} \times 0.4 \times 10^{-4} = 95.3 \text{ N}$$

由此可知,由于项(2)时磁路已处较饱和区,即使励磁电流减小至60%,其 Φ 、 B 并未按比例减小, B 仍较大,所以吸力仍较大,仍比有气隙存在时大得多。

(4)将图(1)磁路总磁阻 $R_m = \frac{l_a}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} + \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S_\delta} + \frac{l_b}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \cdot (l_a + 2\mu_r \cdot \delta + l_b)$,磁通 $\Phi = \frac{N \cdot i}{R_m}$,气隙磁密 $B_\delta = \frac{\Phi}{S}$ 诸式代入吸力公式可得:

$$f = \left(\frac{\mu_r \cdot N}{l_a + l_b + 2 \cdot \mu_r \cdot \delta} \right)^2 \cdot \mu_0 \cdot S \cdot i^2$$

式中 μ_r 为铁芯材料的相对导磁率,当 $i = I_m \cdot \sin \omega t = I \cdot (\sqrt{2} \cdot \sin \omega t)$ 时,有:

$$\begin{aligned} f &= \mu_0 \cdot S \cdot \left(\frac{\mu_r N}{l_a + l_b + 2 \cdot \mu_r \cdot \delta} \right)^2 \cdot I^2 \cdot (\sqrt{2} \cdot \sin \omega t)^2 \\ &= F_0 \cdot (\sqrt{2} \cdot \sin \omega t)^2 \end{aligned}$$

由于 $I=9.04 \text{ A}$ 与项(1)相同,可以近似认为此时铁芯的饱和度与项(1)相同,即项(1)与项(4)时的 μ_r 相同,则: $F_0=10 \text{ N}$ 也相同。则:

$$f = 10 \cdot (\sqrt{2} \cdot \sin \omega t)^2 = 10 \cdot (1 - \cos 2 \cdot \omega t) = F_0 - f_N$$

作出 f, F_0, f_N 随 ωt 而变的曲线如图(2)所示,由图可知,交流励磁时,电磁铁的吸力由两个分量所组成,其中恒定分量 $F_0=10 \text{ N}$ 不随时而变,交变分量 f_N 是以两倍频率即 100 Hz 而交变,其幅值与 F_0 相等,所以合成吸力是在 $0 \sim 20 \text{ N}$ 之间以两倍频率而振动。

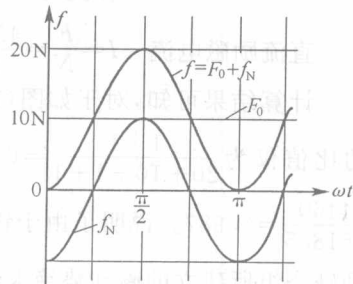
例2 某匝数 $N=100$,宽 $\overline{ab}=\overline{cd}=l_a=10 \text{ cm}$,长 $\overline{ad}=\overline{bc}=l_b=20 \text{ cm}$ 的矩形线圈处于磁场中,试求:

(1)线圈静止,磁场以频率为 $f=50 \text{ Hz}$ 作正弦变化,即 $B=1.2 \cos \omega t \text{ (T)}$,线圈内的感应电动势与其位置角 θ 的关系, θ 定义如图(3)所示。

(2)磁场为 $B=1.2 \text{ T}$ 恒定均匀磁场,线圈以 $n=1500 \text{ r/min}$ 沿其轴线逆时针旋转,线圈内感应电动势如何?

解 当线圈处于图(3)位置时,穿过线圈的磁通为:

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \theta = 0.1 \times 0.2 \cdot B \cdot \cos \theta = 0.02 B \cdot \cos \theta$$



图(2) 电磁铁吸力

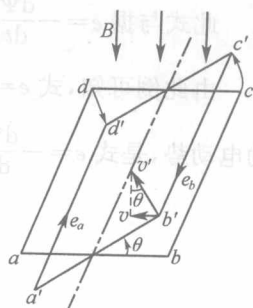
可见穿过线圈的磁通与线圈位置有关,当 $\theta=0, \cos\theta=1$ 时, $\Phi=0.02 \cdot B$,即当线圈平面与磁力线垂直时,穿过线圈的磁通最大;当 $\theta=90^\circ, \cos\theta=0$ 时, $\Phi=0$,即当线圈平面与磁力线平行时,穿过线圈的磁通为零。

(1)当 $B=1.2\cos\omega t$ 时,穿过线圈的磁通为:

$$\begin{aligned}\Phi &= 0.02 \times 1.2 \cdot \cos\omega t \cdot \cos\theta = 0.024\cos\theta \cdot \cos\omega t \\ &= \Phi_m \cdot \cos\theta \cdot \cos\omega t\end{aligned}$$

此时线圈静止不动, θ =常数,则线圈中的感应电动势(即变压器电动势)为:

$$\begin{aligned}e &= -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(N \cdot \Phi_m \cdot \cos\theta \cos\omega t)}{dt} = N \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos\theta \sin\omega t \\ &= \sqrt{2} (4.44f \cdot N \cdot \Phi_m \cdot \cos\theta) \sin\omega t = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin\omega t\end{aligned}$$



图(3) 感应电动势

可见感应电动势为与磁场同频率 $f = \frac{\omega}{2\pi} = 50(\text{Hz})$ 而交变的正弦电动势,其有效值 $E = 4.44f \cdot N \cdot \Phi_m \cdot \cos\theta$ 与线圈位置有关:当 $\theta=0$ 时,即线圈平面与磁力线垂直时,感应电动势达最大,其有效值为 $E = 4.44 \times 50 \times 100 \times 0.024 = 532.8(\text{V})$ 。当 $\theta=90^\circ$ 时,即线圈平面与磁力线平行时,则线圈内感应电动势为零, $E=0$;感应电动势的时间相位是落后于其磁通 90° 。

(2)当 $B=1.2\text{T}$ 恒定时,穿过线圈的磁通为 $\Phi = B \cdot S \cdot \cos\theta = 0.024\cos\theta = \Phi_m \cdot \cos\theta$,此时线圈旋转角速度为 $\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157(\text{rad/s})$ 。线圈位置 $\theta = \Omega \cdot t = 157 \cdot t$ 随时而变,穿过线圈的磁通为: $\Phi = \Phi_m \cdot \cos\Omega \cdot t$ 。则感应电动势(即运动电动势)为:

$$\begin{aligned}e &= -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{d(N \cdot \Phi_m \cdot \cos\Omega t)}{dt} = N \cdot \Phi_m \cdot \Omega \cdot \sin\Omega t \\ &= \sqrt{2} (4.44f \cdot N \cdot \Phi_m) \sin\Omega t = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin\Omega t\end{aligned}$$

可见当磁场恒定,线圈以 $n=1500\text{r/min}$ 匀速旋转时,感应电动势也是交变的正弦电动势,交变频率 $f = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{2\pi n/60}{2\pi} = \frac{1500}{60} = 25(\text{Hz})$ 。感应电动势的角频率 Ω 等于以 rad/s 为单位的线圈旋转角速度,感应电动势有效值为 $E = 4.44f \cdot N \cdot \Phi_m = 4.44 \times 25 \times 100 \times 0.024 = 266.4(\text{V})$ 。感应电动势的时间相位也是落后于穿过线圈的磁通 90° 。

对于此题也可以应用运动电动势公式 $e = B \cdot l \cdot v$ 进行计算,只是式中 B, l, v 三者应互相垂直。如图(3)所示, $v = v' \cdot \sin\theta$,其中 v' 为运动线速度, $v' = \frac{n}{60} \left(2\pi \cdot \frac{l_a}{2} \right) = \frac{\pi \cdot l_a \cdot n}{60} (\text{m/s})$;线圈中仅长度为 l_b 的两边切割磁力线产生运动电动势,且每边有 N 根,由右手定则可知,在线圈内导体 $a'd'$ 与 $b'c'$ 内的运动电动势 e_a 与 e_b 方向正好是相加的,所以公式中的 $l = 2 \cdot N \cdot l_b$,而 $B=1.2\text{T}$ 恒定,则运动电动势为:

$$\begin{aligned}e &= Blv = B \cdot 2N \cdot l_b \cdot \frac{\pi l_a \cdot n}{60} \cdot \sin\theta = N \cdot (Bl_a \cdot l_b) \cdot \frac{2\pi n}{60} \cdot \sin\Omega t = N\Phi_m \cdot \Omega \cdot \sin\Omega t \\ &= \sqrt{2} \left(\Phi_m \cdot N \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \right) \cdot \sin\Omega t = \sqrt{2} (4.44fN\Phi_m) \sin\Omega t = \sqrt{2} E \sin\Omega t\end{aligned}$$

此式与据 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 推导的结果相同。

由此倒可知,式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 既适于变压器电动势又适于运动电动势,而 $e = Blv$ 只适于运动电动势,是式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 的一种特殊形式。

§ 0-3 习题与思考题解答

0-1 在求取感应电动势时,式 $e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$ 、式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 、式 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 以及式 $e = Blv$ 等诸式中,哪一个式子具有普遍的形式? 另外诸式必须在各自的什么条件下才能适用?

答 式 $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ 是感应电动势的普遍形式。其负号表示感应电动势的正方向与磁链的正方向符合右手螺旋关系,如果两者不符合右手螺旋关系,则应取正号。

式 $e_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$ 适于自感电动势,表示由于线圈中电流 i 的变化使由 i 产生的交链该线圈的磁链发生变化时所产生的电动势。据定义 $L = \frac{\Psi}{i}$,在磁路不饱和或空心线圈的场合, L 不随 i 而变,是一个常数的条件下,有 $e_L = \frac{d\Psi}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt}$ 。

式 $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$ 适于穿过线圈所有 N 匝的磁通相同,均为 Φ 时,即 $\Psi = N \cdot \Phi$ 的情况。

式 $e = Blv$ 适于运动电动势,而且 B 、 l 、 v 三者相互垂直的场合。

0-2 有两个线圈匝数相同,一个绕在闭合铁芯上,另一个绕在木材上,两个线圈通入相同频率的交变电流。如果它们的自感电动势相等,试问哪个线圈的电流大? 为什么?

答 绕在木材上的线圈电流大。因为两者 f 相等,产生同样的 e ,意味着产生同样的 Φ 。据产生 Φ 所需磁动势 $N \cdot I = \Phi \cdot R_m$,由于铁芯的导磁系数 μ_{Fe} 比木材的 $\mu_{木}$ 大得多,即铁芯的磁阻小得多, $R_{m木} \gg R_{mFe}$,故 $NI_{木} \gg I_{铁} N$,即 $I_{木} \gg I_{铁}$ 。

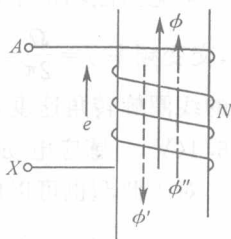
0-3 如果感应电动势正方向与磁通的正方向之间不符合右手螺旋关系,

则电磁感应定律应写成 $e = +\frac{d\Psi}{dt} = +N \frac{d\Phi}{dt}$,试说明其原因。

证明 以图(4)为例,磁通 Φ 与绕组 N 匝完全交链,即 $\Psi = N \cdot \Phi$,而且 Φ 与感应电动势 e 正方向不符合右手螺旋定则,所以感应电动势表达式应为 $e = +\frac{d\Psi}{dt} = +N \frac{d\Phi}{dt}$ 。现证明该正号的物理意义。

当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 时, $e = +N \frac{d\Phi}{dt} > 0$ 为正,表示此时感应电动势的实际方向与其正方向一致;另一方面从物理意义来看,由楞次定律可知,

当 $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ 即磁通增加时,感应电动势企图要产生一个感应电流,且此电流建立磁通 Φ' 用以阻止 Φ 的增加,即 Φ' 与 Φ 方向相反,据右手螺旋定则,此电流应从 X 进 A 出,所以此时感应电动势的实际方向也应从 X 指向 A ,与其正方向一致。



图(4) 习题 0-3 附图

当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 时, $e = +N \frac{d\Phi}{dt} < 0$ 为负, 表示此时感应电动势的实际方向与其正方向相反;

从物理意义看, 当 $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ 即磁通减少时, 感应电动势产生的感应电流所建立的磁通 Φ'' 阻止 Φ 的减小, 即 Φ'' 与 Φ 方向一致, 据右手螺旋定则, 产生 Φ'' 的感应电流应从 A 进 X 出, 即此时感应电动势的实际方向也应从 A 指向 X, 与其正方向相反。

因此, 为了正确反映感应电动势的实际方向, 当 Φ 与 e 正方向不符合右手螺旋关系时, 感应电动势表达式应写成 $e = +\frac{d\psi}{dt}$ 取正号。同样方法可以证明当 Φ 与 e 正方向符合右

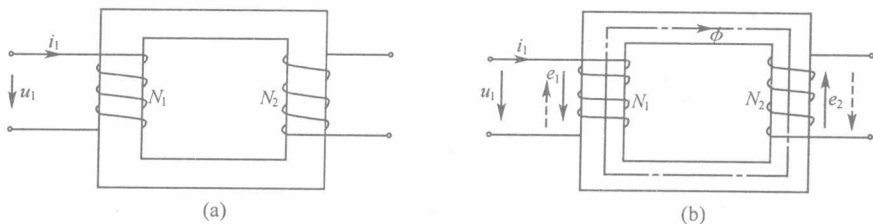
手螺旋关系时, 应 $e = -\frac{d\psi}{dt}$ 取负号, 证明方法留给读者自己进行。

0-4 在图(5)-a 中, 当线圈 N_1 外施正弦电压 u_1 时, 为什么在线圈 N_1 及 N_2 中都会感应出电动势? 当电流 i_1 增加时, 标出这时 N_1 及 N_2 中感应电动势的实际方向。

答 当线圈 N_1 流过电流 i_1 时, 就会在铁芯内建立磁通 Φ 。 i_1 与其中 Φ 正方向符合右手螺旋关系, 如图(5)-b 所示。由于 Φ 同时交链线圈 N_1 与 N_2 , 所以当 i_1 交变时, N_1 与 N_2 所交链的磁链以同一个频率而交变, 所以在 N_1 与 N_2 中都会感应出电动势。

据右手螺旋关系, 标出由 Φ 在 N_1 与 N_2 中的感应电动势 e_1 与 e_2 的正方向如图(b)所示, 则感应电动势表达式分别为 $e_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt}$, $e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$ 。当 i 增加时, Φ 也增加, $\frac{d\Phi}{dt} > 0$, 由上表达式可得 $e_1 < 0$, $e_2 < 0$, 说明此时 N_1 与 N_2 中感应电动势的实际方向与 e_1 与 e_2 的正方向相反, 如图(b)虚线所示。

关于此时 e_1 与 e_2 的实际方向, 也可用题 0-3 介绍的楞次定律的方法判断之。这将留给读者自己进行。

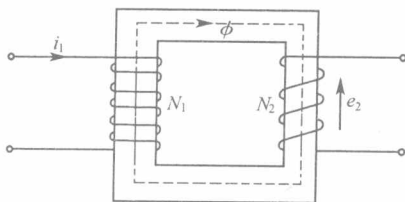


图(5) 习题 0-4 附图

0-5 在图(6)中, 电流 i_1 在铁芯中建立的磁通为 $\Phi = \Phi_m \cdot \sin\omega t$, 各物理量的正方向如图所示。试求匝数为 N_2 的线圈中感应电动势的表达式。

解: 由图(6)知, e_2 与 Φ 的正方向不符合右手螺旋关系, 所以

$$\begin{aligned} e_2 &= +N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \cdot \frac{d(\Phi_m \cdot \sin\omega t)}{dt} \\ &= N_2 \cdot \Phi_m \cdot \omega \cdot \cos\omega t = E_{2m} \cos\omega t \\ &= \sqrt{2} \cdot E_2 \cdot \sin(\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$



图(6) 习题 0-5 附图

式中感应电动势幅值为： $E_{2m} = \omega N_2 \Phi_m$ 。

感应电动势有效值为： $E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m$ 。

在异步电动机中，定子绕组通入交流电后，产生旋转磁场，切割转子导体，在转子中产生感应电动势和感应电流。转子电流与定子电流相互作用，产生电磁转矩，使电动机转动。异步电动机的特点是：转子转速低于同步转速，转差率 $s > 0$ 。

异步电动机的等效电路如图 1-10 所示。定子侧为交流电源，等效电路包含定子电阻 R_1 、定子漏抗 $X_{1\sigma}$ 、励磁支路（并联 R_m 和 X_m ）以及转子支路（串联 R_2 和 $X_{2\sigma}$ ）。转子支路中的 R_2 和 $X_{2\sigma}$ 是折算到定子侧的等效参数。图中还标出了定子电流 I_1 、励磁电流 I_m 、转子电流 I_2 以及电磁功率 P_{em} 、机械功率 P_{mech} 和总功率 P_{total} 的流向。

异步电动机的机械特性如图 1-11 所示。横轴为转差率 s ，纵轴为电磁转矩 T 。曲线显示了启动转矩 T_{st} 、最大转矩 T_m 和临界转差率 s_m 。在额定负载下，转差率 s 很小，通常小于 5%。

异步电动机的功率因数 $\cos \phi$ 随着负载增加而提高。在轻载时，由于励磁电流 I_m 较大，功率因数较低。随着负载增加，有功功率增加，功率因数也随之提高。



异步电动机的机械特性如图 1-11 所示。横轴为转差率 s ，纵轴为电磁转矩 T 。曲线显示了启动转矩 T_{st} 、最大转矩 T_m 和临界转差率 s_m 。在额定负载下，转差率 s 很小，通常小于 5%。

异步电动机的功率因数 $\cos \phi$ 随着负载增加而提高。在轻载时，由于励磁电流 I_m 较大，功率因数较低。随着负载增加，有功功率增加，功率因数也随之提高。

直流电机

§ 1-1 学习内容提要

一、直流电机的基本工作原理

以直流电动机为例。

1. 直流电动机外施于电机出线端的电压 U 与电流 I 是直流,通过换向器与电刷的作用而使流过电枢绕组内部的电流 i_a 是交流,此电刷与换向器实质上是起了逆变作用。
2. 电枢绕组电流与气隙磁场相互作用产生电磁力,使转子受到一个力矩,称为电磁转矩 T 。在 T 的作用下转子沿 T 的方向旋转并带动轴上的机械负载转矩,从而把从电源吸收的电能转换成机械能从轴上输出。电磁转矩方向与转子转向一致,是驱动转矩。
3. 电枢旋转时,电枢绕组导体切割气隙磁场磁力线产生感应电动势,在电枢内部,此感应电动势 e_a 也是交流,其方向始终与 i_a 相反,故称反电动势。
4. 虽然电枢绕组是旋转的而且电枢电流又是交流,但是从空间上看,N极或S极下的电枢导体电流方向不变,即电枢电流所生的磁场(称为电枢磁场)在空间上是一个静止不变的恒定磁场。

对于直流发电机,也可以得出与上述类似的结论,将留给读者自行总结。

二、电机的可逆原理

同一台电机由于外界条件的不同,既可作发电机运行也可作电动机运行,称为电机的可逆原理,是电机中的普遍原理,不仅适于直流电机,也适合于交流电机。

三、直流电机的电枢绕组

1. 直流电机电枢绕组元件的第一节距 $y_1 = \frac{z}{2p} \pm \epsilon = \text{整数}$,式中 z 为电枢槽数, p 为主磁极极对数。
2. 直流电机电枢绕组的全部元件通过换向器而连接成一个闭合的回路,由于沿回路中各元件的电动势之和为零,所以不会产生环流。
3. 直流电机电枢绕组为双层绕组,设元件数为 s ,换向片数为 k ,槽数为 z ,则有 $s = k = z$ 。
4. 直流电机的电刷数目等于主磁极数 $2p$,按放电刷的原则是:被电刷所短路的元件的感应电动势为零。使正负电刷间获得电动势最大,所产生的电磁转矩最大。为此,电刷的实

际位置应与主磁极轴线对准。由于此时被电刷所短路的两元件边处于几何中心线,所以又习惯简称为电刷处于几何中性线上。

5. 对于单叠绕组,换向器节距 $y_k = y = 1$,式中 y 为合成节距;其并联支路数 $a = p$ 。

6. 对于单波绕组, $y_k = y = \frac{k-1}{p}$ = 整数;其并联支路数 $a = 1$ 与极数无关。所以对单波绕组言,理论上可以只用正负一对电刷,但实际仍常取 $2p$ 个电刷。

四、直流电机的磁场

1. 以直流电动机为例,直流电机各种励磁方式的特点是:

(1)他励:励磁绕组由励磁电源 U_f 单独供电,励磁电流 I_f 不受电机端电压 U 及电枢电流 I_a 的影响,所以有 $I = I_a$,式中 I 为电机出线端电流。

(2)并励:励磁绕组与电枢绕组由同一个直流电源 U 供电,所以 $I = I_a + I_f$ 。

(3)串励:励磁绕组与电枢绕组相串联,所以有 $I = I_a = I_f$ 。

(4)复励:主磁极上有 N_f 和 N_s 两套励磁绕组,其中 N_f 与电枢并联,称并励绕组, N_s 与电枢串联,称串励绕组。若电枢绕组先串 N_s 再与 N_f 并,称长复励,此时 $I_s = I_a, I = I_a + I_f$;若电枢绕组先并 N_f ,然后再与 N_s 串,称短复励,此时 $I = I_s = I_a + I_f$ 。如果 N_s 所生的磁动势 F_s 与 N_f 所生的 F_f 方向一致,称积复励,相反者为差复励。

2. 直流电机空载时的气隙磁场仅由励磁绕组所生的励磁磁动势所建立。穿过气隙而同时与定转子绕组交链的磁通称为主磁通。空载时主磁通 Φ_0 与励磁磁动势 F_0 的关系曲线 $\Phi_0 = f(F_0)$ 称为电机的磁化曲线。由于 $F_0 = N_f \cdot I_f$,其中 N_f 为励磁绕组匝数,所以电机磁化曲线又可表示成 $\Phi_0 = f(I_f)$ 。当 I_f 较小时,磁路未饱和, $\Phi_0 \propto I_f$ 呈线性,当 I_f 较大时,磁路饱和使 $\Phi_0 = f(I_f)$ 开始拐弯,电机磁化曲线呈饱和特性。电机通常工作在略带饱和区。

电机的磁化曲线仅与电机尺寸及所用材料有关,因而也与饱和度有关,但是与励磁方式无关。

3. 直流电机负载时的气隙磁场是由励磁磁动势 F_f 与电枢电流所建立的电枢磁动势 F_a 共同建立的,所以负载时的气隙磁场 B_{ax} 跟空载时气隙磁场 B_{0x} 是不同的。称负载时电枢电流所生的电枢磁动势对气隙中主磁场的影晌为电枢反应。

当电刷位于几何中心线时,电枢磁场与主磁极正交,此时电枢磁动势称为交轴磁动势,而交轴电枢反应表现如下:

(1)使气隙磁场沿圆周的分布波形发生畸变,电动机的前极尖磁场被加强而后极尖磁场被削弱;发电机时为前极尖削弱后极尖加强。

(2)气隙中磁密为零的物理中性线将偏离几何中心线,对电动机言是逆转向移过 α 角而发电机为顺转向移。

(3)当磁路不饱和时,负载时每极磁通 Φ 跟空载时 Φ_0 相等;当磁路饱和时,交轴电枢反应起去磁作用,使 $\Phi < \Phi_0$ 。

当电刷偏离几何中心线时,电枢磁动势可以分解成交轴磁动势 F_{aq} 与直轴电枢磁动势 F_{ad} 两个分量。其中 F_{aq} 作用已上述, F_{ad} 仅对气隙磁场起去磁或助磁作用。如果电刷逆转向偏移,则电动机的 F_{ad} 起去磁作用而发电机起助磁作用;如果电刷顺转向偏离, F_{ad} 的作用则反之。

五、直流电机的电枢电动势、电磁转矩和电磁功率

电枢电动势 E_a 、电磁转矩 T 和电磁功率 P_M 是直流电机通过电磁感应实现机电能量转

矩的三个最基本的物理量。

1. 电枢电动势是指从一对正负电刷间引出的直流电动势,数值上等于一条支路内所有串联导体电动势之和。表达式为: $E_a = C_e \cdot \Phi \cdot n$ 。式中 $C_e = \frac{pN}{60a}$ 为电动势常数, Φ 为每极磁通(单位 Wb), n 为电枢绕组对主磁极的相对转速(单位 r/min), E_a 单位为 V。

2. 电磁转矩是电枢绕组所有载流导体与主磁场相互作用所生的力矩之和,表达式为 $T = C_M \cdot \Phi \cdot I_a$ 。式中转矩常数 $C_M = \frac{pN}{2\pi a}$,对于一台已定电机,有 $\frac{C_M}{C_e} = \frac{60}{2\pi} \approx 9.55$,电枢总电流 I_a 单位为 A,电磁转矩 T 的单位为 $N \cdot m$ 。

3. 电磁功率是指直流电机在电磁感应作用下机械能与电能相互转换的功率,其关系式为 $P_M = E_a \cdot I_a = T \cdot \Omega$,式中 Ω 为转子旋转的机械角速度,单位为 rad/s。

六、直流电机的基本方程式

1. 直流电动机的基本方程式

(1) 直流电动机惯例应注意 E_a 与 I_a 方向相反,为反电动势, T 与 n 转向一致,是驱动转矩。

(2) 电动势平衡方程式: $U = E_a + I_a(R_a + R_\Omega)$;转速公式 $n = \frac{U - I_a(R_a + R_\Omega)}{C_e \Phi}$ 。式中 R_a 为电枢回路电阻(包括电刷接触电阻), R_Ω 为串入电枢回路的调节电阻(用于起动、制动或调速)。在电动机中 $U > E_a$ 。

(3) 转矩平衡方程式: $T = T_2 + T_0 = T_z$;稳态运行时电枢电流为 $I_a = \frac{T_z}{C_M \cdot \Phi}$,式中 $T_z = T_2 + T_0$ 为总负载转矩,包括轴上输出的有效转矩 T_2 和电机空载转矩 T_0 。

(4) 功率平衡方程式: $P_1 = P_M + p_{cua} + p_{cuf} = P_2 + p_{cua} + p_{cuf} + p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta = P_2 + \sum p$,效率为 $\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$,式中 P_1 为从电源吸收的电功率, P_2 为从轴上输出的机械功率, $\sum p$ 为电机总损耗。

2. 直流发电机的基本方程式(*)

直流发电机的惯例应注意 E_a 与 I_a 方向一致, T 与 n 方向相反,是制动转矩。其基本方程式有:

$$E_a = U + I_a \cdot R_a, \text{在发电机中 } E_a > U.$$

$$T_1 = T + T_0, \text{式中 } T_1 \text{ 是从原动机输入的拖动转矩, } n \text{ 与 } T_1 \text{ 方向一致。}$$

$$P_1 = P_M + p_0 = P_2 + p_{cua} + p_{cuf} + p_0 = P_2 + \sum p, \eta = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}, \text{式中空载损耗 } p_0 = p_{Fe} + p_\Omega + p_\Delta.$$

七、直流电机的运行特性

1. 直流电动机的工作特性

直流电动机的工作特性是指转速、转矩 T 及效率和电枢电流 I_a 的关系曲线。

(1) 他(并)励直流电动机的 $n = f(I_a)$ 是一条下降不多的硬特性,其理想空载转速 $n_0 = \frac{U_N}{C_e \cdot \Phi}$; $T = f(I_a)$ 是一条通过原点的近似直线; $\eta = f(I_a)$ 是先升后降,当不变损耗与可变损