

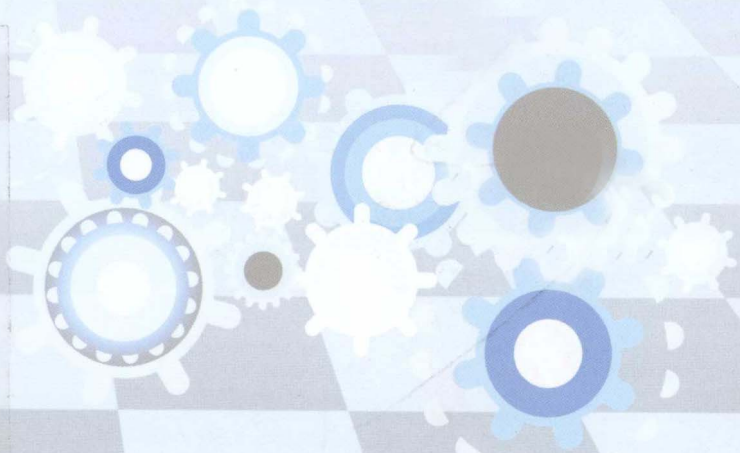


普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

电机及拖动基础 学习指导

杨玉杰 孙红星 主编
朱连成 副主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等

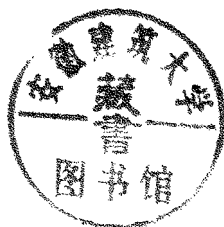


教材

电机及拖动基础学习指导

杨玉杰 孙红星 主编

朱连成 副主编



北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

针对学习“电机及拖动基础”课程比较困难的局面,本书对直流电动机及其拖动基础、变压器、三相异步电动机及其拖动基础和同步电动机等各部分需要掌握的学习内容提出了基本要求和学习指导,并对重点和难点部分进行了总结和归纳。书中不仅给出典型例题分析,还提供具有一定难度的习题及其详解,每章后均有一定数量的自测题,最后设置四套模拟试题,以供读者检测学习效果。

本书是普通高等教育“十二五”规划教材,可作为高等院校自动化相关专业本科生或研究生的教学用书,还可供从事自动化相关工作的科研、技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础学习指导/杨玉杰,孙红星主编. —北京:
冶金工业出版社, 2012. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5967-3

I. ①电… II. ①杨… ②孙 III. ①电机学—实验—高等学校—教学参考资料 ②电力传动—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM306 ②TM921-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 144673 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5967-3

北京百善印刷厂印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销

2012 年 8 月第 1 版, 2012 年 8 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 4.625 印张; 123 千字; 139 页

15.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

“电机及拖动基础”是电气工程及自动化专业的一门重要专业基础课，同时也是一门比较难教和难学的课程，学生往往需要投入很长的时间、花费很大的精力才能学好。因此，为了给学生学习本课程提供一些必要的指导，使其更好地理解 and 掌握本课程的主要内容，进而提高他们的自主学习效率和分析解决问题能力，为以后从事相关工作打好坚实基础，编者认真编写了本书。

本课程主要涉及工业企业中常用的电机拖动系统的基本理论及其在生产实践中的应用问题，内容包括直流电动机、变压器、交流电动机等的基本结构、工作原理、内部的电磁关系和能量关系。本书针对各章归纳总结了教学重点、难点及基本要求，对教学内容提供了必要的补充和有利的学习指导，每章均设置了典型例题分析和自测题，并在书后给出了自测题参考答案。编者根据多年的教学经验，参考重点院校优势学科的考研、考博试题，在本书的最后设置了四套模拟题，用于读者考查本课程的学习效果。

杨玉杰和孙红星教授担任本书主编，并负责第一、二、四、五章及模拟试题一~四的编写工作；朱连成老师担任副主编，并负责第三、六章的编写工作。在本书编写过程中，徐建

英教授、吴丽娟教授等给予了大力支持，并提出了许多中肯的建议和意见，在此表示最诚挚的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2012 年 4 月

目 录

第一章 直流电动机	1
一、基本要求	1
二、内容概述	1
三、重点与难点分析	4
四、典型例题分析	5
五、自测题	8
第二章 直流电动机的电力拖动	12
一、基本要求	12
二、内容概述	12
三、重点与难点分析	18
四、典型例题分析	18
五、自测题	30
第三章 变压器	33
一、基本要求	33
二、内容概述	33
三、重点与难点分析	37

四、典型例题分析	37
五、自测题	41
第四章 三相异步电动机	45
一、基本要求	45
二、内容概述	45
三、重点与难点分析	52
四、典型例题分析	52
五、自测题	55
第五章 三相异步电动机的电力拖动	57
一、基本要求	57
二、内容概述	57
三、重点与难点分析	67
四、典型例题分析	67
五、自测题	71
第六章 同步电动机	73
一、基本要求	73
二、内容概述	73
三、重点与难点分析	76
四、典型例题分析	76
五、自测题	77

自测题参考答案	79
模拟试题一	104
模拟试题二	107
模拟试题三	110
模拟试题四	113
模拟试题参考答案	116
参考文献	139

第一章 直流电动机

一、基本要求

本章从分析直流电动机的工作原理、基本结构、能量转化关系及其在生产实践中的应用出发，重点讲述了他励直流电动机的工作原理及其物理关系，分析了电动机负载时的电枢反应及其产生的影响，并着重介绍了直流电动机负载运行时的功率平衡方程式、转矩平衡方程式和电压平衡方程式。

本章要求了解直流电动机的工作原理、基本结构和能量转化关系；熟练掌握直流电动机的工作原理及其物理关系，直流电动机负载运行时的功率平衡方程式、转矩平衡方程式和电压平衡方程式；并能灵活运用，解决生产实际中的问题。

二、内容概述

直流电动机的工作原理是建立在电磁感应原理基础上的，因此必须能熟练应用右手螺旋定则、右手定则、左手定则，并结合电刷和换向器的作用来确定各物理量的正方向。换向器是直流电动机的特有问题，必须予以重视。

旋转电动机都是由静止部分和旋转部分组成的。直流电动机的静止部分称为定子，其作用是建立主磁场；旋转部分称为转子（电枢），其作用是产生电磁转矩和感应电动势，实现

能量转化。

直流电动机输入电能，输出机械能。

电枢绕组是直流电动机的核心部分。它们在电动机的磁场中旋转会感应出电动势；当绕组中有电流流过时，所产生的电枢磁动势与气隙磁场作用又会产生电磁转矩。电枢绕组是由许多个形状完全相同的绕组元件，按照一定的规律连接起来的。按照绕组元件和换向器的连接方式不同，其可以分为叠绕组（单叠绕组和复叠绕组）和波绕组（单波绕组和复波绕组）。常用的电枢绕组有单叠绕组和单波绕组。单叠绕组是将上层边位于同一磁极下的元件先串联成一条支路，不同磁极下的支路再并联，故并联支路数等于磁极数。单波绕组是将上层边位于同极性磁极下的元件串联成一条支路，由于磁极只有 N 极、S 极两种，故并联支路数为 2。

直流电动机能量变换是依靠气隙磁场进行的。直流电动机的磁场由励磁绕组和电枢绕组共同建立。电动机空载时，只有励磁电流建立的主磁场；负载时，电枢绕组流过电流产生电枢磁场，电枢磁场对励磁磁场的影响称为电枢反应。当电刷位于几何中性线时，只有交轴电枢反应。交轴电枢反应使气隙磁场发生畸变。电枢反应不仅使主磁场发生畸变，而且有一定的去磁作用。

直流电动机的能量变换可用电磁功率来表征，即 $E_a I_a = T_{em} \Omega$ 。对直流电动机，感应电动势是反电动势，其方向与电枢电流方向相反。而对于电动机而言，电磁转矩是拖动转矩，其方向与转速方向一致。

直流电动机的感应电动势为：

$$E_a = \frac{z_a}{2a} e_{av} = \frac{z_a}{2a} \cdot \frac{2p}{60} \cdot \Phi n = C_e \Phi n$$

式中 z_a ——电枢绕组总元件数；

a ——并联支路数；

e_{av} ——一根导体的平均感应电动势，V；

p ——磁极对数；

Φ ——每极磁通，Wb；

n ——转子转速，r/min；

C_e ——电动势常数，V·min/(Wb·r)。

直流电动机的电磁转矩为：

$$T_{em} = \frac{pz_a}{2\pi a} I_a = C_T \Phi I_a$$

式中 I_a ——电枢电流，A；

C_T ——转矩常数，N·m/(Wb·A)。

直流电动机的电压平衡方程式为：

$$E_a = U - I_a R_a$$

式中 U ——电动机的电枢电压，V；

R_a ——电枢回路总电阻，包括电枢绕组电阻及电刷的接触电阻， Ω 。

他励直流电动机的功率平衡方程式为：

$$P_{em} = P_1 - p_{Cua}$$

$$P_0 = p_m + p_{Fe} + p_{ad}$$

$$P_2 = P_{em} - p_0 = P_1 - \sum p$$

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

式中 P_{em} ——电磁功率，W；

P_1 ——电动机的输入功率，W；

p_{Cua} ——电枢绕组的铜损耗，W；

p_0 ——空载损耗，W；

p_{m} ——机械损耗，包括轴承及电刷的摩擦损耗及通风损耗，W；

p_{Fe} ——铁损耗，包括电枢铁芯的磁滞损耗和涡流损耗，W；

p_{ad} ——附加损耗，通常指没有包括在上述各项中的损耗，这部分损耗由于通常难以精确计算，一般占额定功率的 0.5% ~ 1%，W；

P_2 ——输出功率，W；

Σp ——总损耗，W；

T_2 ——输出转矩，N·m；

T_0 ——空载损耗转矩，N·m。

直流电动机的运行特性有转速特性、转矩特性和效率特性。他励电动机的转速特性表明：负载变化时转速的变化很小，属于硬特性。

三、重点与难点分析

重点：直流电动机负载运行时的功率平衡方程式、转矩平衡方程式和电压平衡方程式。

难点：直流电动机的电枢反应及其产生的影响。

四、典型例题分析

【例 1-1】 一台他励直流电动机， $P_e = 40\text{kW}$ ， $U_e = 220\text{V}$ ， $I_e = 210\text{A}$ ，额定转速（即指额定电压和额定负载时的转子转速） $n_e = 1000\text{r/min}$ ， $R_a = 0.078\Omega$ ， $p_{ad} = 1\% P_e$ 。试求额定状态下：（1）输入功率 P_1 和总损耗 Σp ；（2）铜损耗 p_{Cu} 、电磁功率 P_{em} 及铁损耗与机械损耗之和 $p_{Fe} + p_m$ ；（3）额定电磁转矩 T_{em} 、输出转矩 T_2 和空载损耗转矩 T_0 。

解 通过本例题可帮助大家熟练地掌握他励直流电动机的能量平衡关系和转矩平衡关系。

结合功率流程图得出下列关系式：

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

$$P_1 = U_e I_e$$

$$P_{em} = P_2 + p_{ad} + p_{Fe} + p_m$$

$$P_{em} = E_a I_a = T_{em} \Omega$$

$$p_{Cua} = I_a^2 R_a$$

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

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = C_T \Phi I_a$$

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega} = \frac{P_0}{\Omega} = T_{em} - T_0$$

式中 U_e ——额定运行状态时电动机的输入电源电压，V；

I_e ——额定负载时电动机的允许长期输入的电流，A；

Ω ——电枢的机械角速度, $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, rad/s。

应用例题中所给出的数据, 可计算出:

$$(1) \text{ 输入功率: } P_1 = U_e I_e = 220 \times 210 = 46200 \text{ W} = 46.2 \text{ kW}$$

$$\text{总损耗: } \Sigma p = P_1 - P_e = 46.2 - 40 = 6.2 \text{ kW}$$

$$(2) \text{ 铜损耗: } p_{\text{Cua}} = I_e^2 R_a = 210^2 \times 0.078 = 3440 \text{ W} = 3.44 \text{ kW}$$

$$\text{电磁功率: } P_{\text{em}} = P_1 - p_{\text{Cua}} = 46.2 - 3.44 = 42.76 \text{ kW}$$

(由功率流程图得出)

或 $P_{\text{em}} = E_a I_a = (U_e - I_e R_a) I_e = 42.76 \text{ kW}$ (由电磁功率的两重性得出)

铁损耗与机械损耗之和:

$$p_{\text{Fe}} + p_{\text{m}} = P_{\text{em}} - P_e - p_{\text{ad}} = 42.76 - 40 - 0.4 = 2.36 \text{ kW}$$

$$(3) \text{ 电磁转矩: } T_{\text{em}} = \frac{P_{\text{em}}}{\Omega_e} = \frac{42.76 \times 10^3}{\frac{2\pi n_e}{60}} = 408 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{或 } T_{\text{em}} = C_T \Phi I_e = 9.55 \times C_e \Phi \left(C_e \Phi = \frac{U_e - I_e R_a}{n_e} \right) I_e = 408.36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(上面两种计算结果有误差, 是由系数 9.55 造成的)

式中 Ω_e ——电枢额定的机械角速度, $\Omega_e = \frac{2\pi n_e}{60}$, rad/s。

$$\text{输出转矩: } T_2 = \frac{P_2}{\Omega_e} = \frac{40 \times 10^3}{\frac{2\pi n_e}{60}} = 382 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{空载损耗转矩: } T_0 = T_{\text{em}} - T_2 = 26.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{或 } T_0 = \frac{p_0}{\Omega_e} = \frac{p_{\text{Fe}} + p_{\text{m}} + p_{\text{ad}}}{\Omega_e} \approx 26.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

【例 1-2】 电动机的技术数据与例 1-1 相同。试求：
 (1) 理想空载转速 n_0 与实际空载转速 n'_0 ；(2) 如额定负载不变，在电枢回路中串入 0.1Ω 电阻后，电动机的稳定电枢电流和转速；(3) 在额定负载情况下，电枢不串电阻和串入 0.1Ω 电阻时的电动机效率。

解 (1) 因为 $C_e \Phi_e = \frac{U_e - I_e R_a}{n_e} = 0.2036 \text{ V} \cdot \text{min/r}$

所以，理想空载转速： $n_0 = \frac{U_e}{C_e \Phi_e} = \frac{220}{0.2036} = 1080 \text{ r/min}$

$$C_T \Phi_e = 9.55 \times C_e \Phi_e = 1.9457 \text{ N} \cdot \text{m/A}$$

实际空载电流： $I_0 = \frac{T_0}{C_T \Phi_e} = \frac{26.5}{1.9457} = 13.57 \text{ A}$

实际空载转速： $n'_0 = \frac{U_e - I_0 R_a}{C_e \Phi_e} = \frac{220 - 13.57 \times 0.078}{0.2036} = 1075 \text{ r/min}$

(2) 因为他励电动机磁通没有变化，所以负载转矩不变，则电枢电流的稳定值不变（即 $I_L = I_e$ ）。

所以，在串有 0.1Ω 电阻的情况下，电压平衡方程式为：

$$E_a = U_e - I_a (R_a + R_{ad})$$

转速： $n = \frac{U_e - I_e (R_a + 0.1)}{C_e \Phi_e} = \frac{220 - 210 \times (0.078 + 0.1)}{0.2036}$

$$= 897 \text{ r/min}$$

(3) 不串电阻时的电动机效率：

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1} \right) \times 100\% = 86.58\%$$

串入 0.1Ω 电阻后, 电枢回路的铜损耗增加了, 所以总损耗也加大了。

$$\Sigma p' = \Sigma p + I_c^2 \times 0.1 = 6.2 + 4.41 = 10.61 \text{ kW}$$

$$\text{所以 } \eta' = \left(1 - \frac{\Sigma p'}{P_1}\right) \times 100\% = \left(1 - \frac{10.61}{46.2}\right) \times 100\% = 77.24\%$$

结论: 通过上面两个例题可见, 做直流电动机稳定运行分析时, 应首先掌握直流电动机稳定运行时的基本原理以及电压平衡方程式、功率平衡方程式和转矩平衡方程式, 这样就可以用不同的方法解题。

【例 1-3】 要想改变直流电动机的转子转向, 可用哪些方法实现?

解 改变直流电动机的转子转向就是改变电磁转矩的方向。因此, 实现方法有两个: 一是改变电枢电流的方向; 二是改变励磁电流的方向以改变磁场方向。

五、自测题

1-1 直流电动机的励磁方式有 ()、()、() 和 () 四种形式。

1-2 直流发电机的额定功率是指 ()。

1-3 直流电动机电枢导体中的电势和电流是 () 性质的。

1-4 单叠绕组的支路数与电动机的极数 ()。

1-5 单波绕组的支路数是 ()。

1-6 直流电动机电枢绕组的感应电势与电动机的转速

成()。

1-7 他励直流发电机,当转速升高 20% 时,电势()。

1-8 直流电动机的电磁转矩与电枢电流成()。

1-9 直流电动机()直接起动。

1-10 直流电动机一般采用()和()的方法起动,起动电流限制为额定电流的()。

1-11 在电枢回路中串电阻调速,理想空载转速(),特性的()增大。

1-12 直流电动机降压调速,理想空载转速(),特性的()不变。

1-13 直流电动机弱磁调速,理想空载转速(),特性的()变软。

1-14 当直流电动机带恒转矩负载时,若为他励电动机,当电枢电压下降时,其转速(),电枢电流()。

1-15 运行中的并励直流电动机,其()不能突然短路或断开。

1-16 判断下列结论是否正确,正确的在括号内打“√”,否则打“×”。

(1) 他励直流电动机降低电源电压属于恒转矩调速方式,因此只能拖动恒转矩负载运行。()

(2) 他励直流电动机电源电压为额定值,电枢回路不串电阻,减弱磁通时,无论拖动恒转矩负载还是拖动恒功率负载,只要负载转矩不过大,电动机的转速都升高。()

(3) 他励直流电动机拖动的负载,只要转矩不超过额定转矩 T_e ,不论采用哪一种调速方法,电动机都可以长期运行