

学校一流老师 一流资源



三一丛书

电机学

要点与解题

阎治安 崔新艺 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

TM3

64A

2006

西安交大教学资源文库 三一

电 机 学

要点与解题

阎治安 崔新艺 编著

西安交通大学出版社

内容简介

本书为电机学课程的学习辅导教材,内容覆盖了现在教材尤其是西安交大编著的《电机学》和全国高等教育自学考试指定教材《电机学》中的基本概念、基本理论和基本方法及其对应的习题、例题等内容,并有所扩展。全书共分五章,即直流电机、变压器、交流旋转电机的共同问题、异步电机和同步电机。每一章分若干节,内容主要是各种电机的原理、结构、特性和应用,每章分基本知识点、重点与难点、典型题解析和自我检测题四部分。附录中收录了西安交通大学近年来本科生的电机学期末考试题、硕士研究生入学考试题以及练习题的答案(部分习题有解题过程)。

本书可作为普通高等院校大学本科、专科生学习电机学课程的辅导教材;其基本内容作为高等教育自学考试以及成人高等教育的该课程的自学指导书也很适合;也可作为报考相关专业硕士研究生的复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学要点与解题/阎治安,崔新艺编. —西安:西安交通大学出版社,2006.8
(西安交大教学资源文库. 三一 丛书)
ISBN 7-5605-2248-3

I. 电... II. ①阎...②崔... III. 电机学-高等学校-教学参考资料 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 069528 号

书 名	电机学要点与解题
编 著	阎治安 崔新艺
出版发行	西安交通大学出版社
地 址	西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话	(029)82668315 82669096 (总编办) (029)82668357 82667874 (发行部)
印 刷	陕西新世纪印刷厂
字 数	261 千字
开 本	880mm×1230mm 1/32
印 张	7.25
版 次	2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-2248-3/TM·64
定 价	12.50 元

版权所有 侵权必究

丛书总序

为了使普通高等学校理工类专业的大学生更好地学习、掌握基础课和专业基础课知识,我们组织出版了这套“三一”丛书,目的就是提供一流的学习资源,使大家共享一流教师的教学经验和教学成果,为今后的学习打下良好的基础。

西安交通大学是国内仅有的几所具有百年历史的高等学府,是首批进入国家“211 工程”建设的七所大学之一,1999 年被国家确定为我国中西部地区惟一所以建设世界知名高水平大学为目标的学校。西安交大历来重视本科生教学,1996 年成为全国首家本科教学评估为优秀的大学。学校拥有国家级、省部级、校级教学名师数十名,具有丰富的、一流的教学资源。本丛书均由西安交通大学长期在教学一线主讲的教授、副教授主编,他们具有丰富的基础课、专业基础课教学和辅导经验。丛书作者们在长期的教学实践中,深深了解学生在学习基础课、专业基础课时的难点和困惑点之所在,对如何使学生更有效地学习、掌握课程的基本知识和解题技巧进行了深入的探索和研究,并将成果体现于书中。

本丛书针对中少学时课程的特点和教学要求,以普通高等学校的学生为主要对象,不拘泥于某一本教材,而是将有特色和使用量较大的各种版本的教材加以归纳总结,取其精华,自成一体。书中对课程的基本内容、研究对象、教学要求、学习方法、解题思路进行了全面、系统的

总结和提炼,按基本知识点、重点与难点、典型题解析、自我检测题等环节进行编排。本丛书既可单独使用,也可与其他教材配合使用。

我们衷心希望本丛书成为您大学基础课和专业基础课学习阶段的良师益友,帮助您克服困难,进入大学学习的自由王国,并祝您早日成为国家的栋梁之材!

在学习使用过程中,您如果发现书中有不妥之处或有好的建议,敬请批评指正并反馈给我们,我们会进一步改进自己的工作,力争使您满意。

真诚感谢您使用西安交大版图书。

西安交大出版社网址:<http://press.xjtu.edu.cn>

<http://www.xjupress.com>

理工医事业部信箱:jdlgy31@126.com

西安交通大学出版社

2006年6月

前 言

本书是为普通高等院校本、专科生编写的电机学学习辅导书,也可作为报考相关专业硕士研究生考生的复习参考书。电机学是电气类专业一门重要的技术基础课。根据多年教学经验和积累,以及与学生广泛接触和交流,作者感到十分必要编写这本书,作为《电机学》课程的辅导教材。

在编写中,我们参考了西安交通大学阎治安、崔新艺、苏少平主编的《电机学》、华中科技大学许实章主编的《电机学习题集》、全国高等教育自学考试指定教材严震池编著的《电机学》,以及顾绳谷主编的《电机及拖动基础》等教材内容,根据课程大纲要求和学生在学习中的难点作了较详细的叙述,并给出了较典型的例题。

全书共5章:第1章直流电机;第2章变压器;第3章交流旋转电机的共同问题——交流绕组、交流电势、交流磁势;第4章异步电动机;第5章同步电机。每章内容分为4个部分:第1部分为基本知识点,主要对该章内容进行了简明扼要的叙述和归纳;第2部分为重点与难点,是该章内容的复习重点和目标;第3部分为典型题分析,对精选的典型题目进行了较为详细的分析,目的是启迪思维和提高解题能力;第4部分为自我检测题,读者可用它来检测对本章内容的掌握程度。附录为“近年来”西安交通大学本科生期末考试题和硕士研究生入学考试题,读者可用来进行自测模拟考试。

需要指出,学习电机学课程,一定要认真做题,还要结合实际,提高实验操作技能和应用环节。为了节省读者宝贵的时间和精力,提高学习效率,建议在阅读本书时将精做和泛看相结合,要将重点放在电机的基本概念、基本理论和基本方法上,不必过于追求求解难题之技巧。

本书由西安交通大学电气工程学院阎治安和崔新艺编写,其中同

步电机的全部内容由崔新艺编写,阎治安编写了其余内容,并负责统稿。鱼振民教授对本书初稿作了认真的审阅,西安交通大学电机教研室梁得亮、高琳、苏少平、刘新正等老师为本书的出版提出了积极的建议并给予了热情的支持,在此向他们一并表示感谢。

西安交通大学电机学课程于2005年、2006年分别获校级、省级“电机学精品课程”,本课程的网站地址为:xf.xjtu.edu.cn/dj,供广大读者学习时参考。

由于我们的学识水平有限,本书中难免有不妥和错误之处,殷切希望读者批评指正。

编 者

2006年5月于西安交通大学

目 录

丛书总序

前言

第1章 直流电机	(1)
1.1 基本知识点	(1)
1.1.1 直流电机的原理、结构和额定值	(1)
1.1.2 直流电机的磁场分析	(5)
1.1.3 直流电机的电势、功率、转矩平衡	(6)
1.1.4 直流电机的特性和应用	(7)
1.1.5 直流电机换向	(10)
1.2 重点与难点	(11)
1.2.1 直流电机的电磁原理、结构特点和主要额定值	(11)
1.2.2 直流电机的运行分析	(12)
1.2.3 直流电机的应用和换向	(14)
1.3 典型题解析	(15)
1.3.1 直流电机的原理、额定值及基本理论	(15)
1.3.2 直流发电机	(16)
1.3.3 直流电动机	(20)
1.3.4 直流电机综合题	(25)
1.4 自我检测题	(29)
第2章 变压器	(36)
2.1 基本知识点	(36)
2.1.1 变压器的结构	(36)
2.1.2 变压器的主要额定值	(36)
2.1.3 变压器的变压原理及空载运行	(36)
2.1.4 变压器的负载运行	(38)
2.1.5 变压器的等效电路和相量图	(39)
2.1.6 变压器的参数测定	(40)
2.1.7 标么值	(40)

2.1.8	变压器的运行性能	(41)
2.1.9	三相变压器的铁心结构	(42)
2.1.10	变压器的联结组	(42)
2.1.11	三相变压器的励磁电流和电势波形	(44)
2.1.12	三相变压器的并联运行	(44)
2.1.13	三相变压器的不正常运行	(45)
2.2	重点与难点	(46)
2.2.1	变压器主要额定值	(46)
2.2.2	变压器的参数折算	(46)
2.2.3	变压器的电势平衡、磁势平衡和功率平衡	(46)
2.2.4	关于变压器的 R_m 和 X_m	(47)
2.2.5	变压器的空载实验和短路实验	(47)
2.2.6	变压器的电压调整率 ΔU 及效率 η 计算	(47)
2.2.7	三相变压器的铁心结构和电势波形	(48)
2.2.8	联结组	(48)
2.2.9	变压器的并联运行	(48)
2.2.10	自耦变压器和互感器	(49)
2.2.11	三相变压器的不对称运行分析	(49)
2.2.12	变压器的暂态运行分析	(52)
2.3	典型题解析	(54)
2.3.1	变压器的运行分析	(54)
2.3.2	三相变压器	(56)
2.4	自我检测题	(73)
第3章	交流旋转电机的共同问题	(80)
3.1	基本知识点	(80)
3.1.1	交流旋转电机的三相绕组	(80)
3.1.2	交流旋转电机的电势	(81)
3.1.3	交流旋转电机的磁势	(82)
3.2	重点与难点	(83)
3.2.1	分析交流绕组及其每相电势	(83)
3.2.2	单相基波脉振磁势和三相基波旋转磁势	(84)
3.2.3	高次谐波磁势简介	(84)
3.3	典型题解析	(85)
3.3.1	交流绕组	(85)

3.3.2	交流电势	(91)
3.3.3	交流磁势	(94)
3.4	自我检测题	(98)
第4章	异步电机	(104)
4.1	基本知识	(104)
4.1.1	异步电动机工作原理	(104)
4.1.2	异步电机的结构及额定值	(105)
4.1.3	异步电动机的运行分析	(107)
4.1.4	异步电动机的特性、启动、调速方法	(110)
4.1.5	单相异步电动机	(112)
4.2	重点与难点	(113)
4.2.1	异步电动机的优缺点、结构特点和额定值	(113)
4.2.2	异步电动机的三种运行状态及异步电动机的原理	(113)
4.2.3	异步电动机的电势、功率、转矩、磁势平衡	(114)
4.2.4	三相异步电动机的启动和调速方法分析	(114)
4.2.5	单相异步电动机的类型和特点	(114)
4.3	典型题解析	(115)
4.3.1	异步电机的工作状态及异步电动机的额定值	(115)
4.3.2	异步电动机的分析方法	(116)
4.3.3	异步电动机的启动、调速	(130)
4.4	自我检测题	(140)
第5章	同步电机	(147)
5.1	基本知识	(147)
5.1.1	同步电机的基本结构和原理	(147)
5.1.2	同步电机的磁场和电枢反应	(149)
5.1.3	时-空统一相量图	(149)
5.1.4	同步电抗	(149)
5.1.5	同步发电机的电势方程式和相量图	(151)
5.1.6	同步发电机的参数测定和稳态运行特性	(151)
5.1.7	同步发电机的并网	(154)
5.1.8	同步发电机的功角特性	(155)
5.1.9	同步发电机并网后的功率调节	(156)
5.1.10	同步电动机	(157)

5.2 重点与难点	(159)
5.3 典型题解析	(162)
5.3.1 同步电机的基本结构、原理及额定值	(162)
5.3.2 同步电机的磁场和电枢反应	(163)
5.3.3 同步电抗和同步发电机的电势平衡方程及相量图	(164)
5.3.4 同步电机的参数测定和稳态运行特性	(167)
5.3.5 同步发电机的并网和功角特性	(169)
5.3.6 同步发电机有功功率和无功功率的调节	(174)
5.3.7 同步电动机	(178)
5.3.8 同步发电机的不对称运行和突然短路	(181)
5.4 自我检测题	(182)
附录 1 自我检测题参考答案	(186)
附录 2 西安交通大学本科生期末、硕士研究生入学考试试题	(201)
2004 年西安交通大学本科生电机学期末考试题	(201)
2005 年西安交通大学本科生电机学期末考试题	(203)
西安交通大学 2005 年攻读硕士学位研究生入学复试电机学(含电机设计) 试题	(205)
西安交通大学 2006 年攻读硕士学位研究生入学复试电机学试题	(207)
附录 3 “电机学”考试题参考答案	(210)
2004 年西安交通大学本科生电机学期末试题参考答案	(210)
2005 年西安交通大学本科生期末试题参考答案	(213)
西安交通大学 2005 年攻读硕士学位研究生入学复试电机学(含电机设计) 试题参考答案	(216)
西安交通大学 2006 年攻读硕士学位研究生入学复试电机学试题参考答案	(217)
参考书目	(219)

第 1 章 直流电机

1.1 基本知识点

1.1.1 直流电机的原理、结构和额定值

1. 原理

直流电机(英文名称 DC Electrical Machines)按其工作原理不同分为发电机和电动机两种。其中,直流发电机的工作原理归纳为:

- ①原动机拖动转子以 $n(\text{r/min})$ 旋转;
- ②电机内部须有(直流励磁的或永久磁钢的)磁场存在;
- ③电枢导体切割磁场感应电势 $e_{\text{大小}} = Blv$, 其(瞬时)方向用右手定则判断, 注意导体电势的性质为交流电, 而经过换向器和电刷引出的电势才为直流电, 故直流发电机可以供给直流电能。

直流电动机的工作原理归纳为:

- ①将电枢绕组(通过换向器和电刷端)接通直流电源, 电枢导体便有电流 i_a 流通;
- ②电机内部有磁场存在;
- ③载流的转子导体在磁场中受到电磁力 $f_{\text{大小}} = Bli_a$, 其方向用左手定则判断;
- ④电磁力作用于转子就产生了电磁转矩 $T(= \Sigma f \frac{D}{2})$, T 使转子以转速 n 旋转, 以拖动机械负载。

同一台电机, 结构上不作任何改变, 既可作为发电机运行, 也可作为电动机运行, 这就是电机的可逆性原理。

另外, 为了得到最大的直流电势, 电刷的位置总是与几何中线上的导体相接触。

2. 结构

凡旋转电机的基本结构总有定子(Stator)和转子(Rotor)两大部分组成。直流电机的结构如图 1.1 所示。对小型直流电机, 定子和转子的基本构成描述如

下。

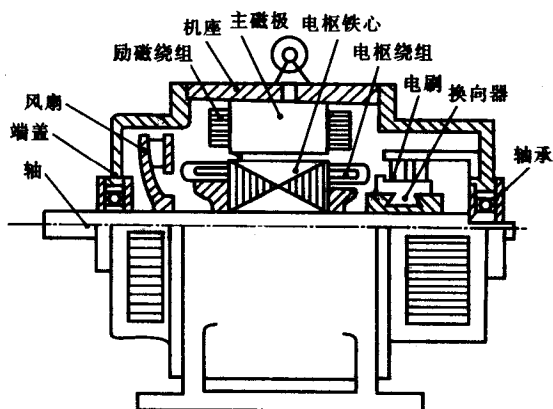
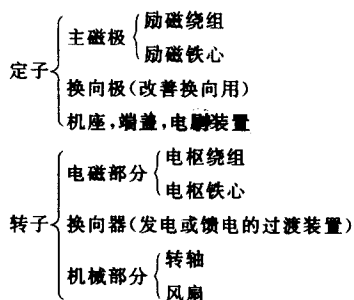


图 1.1 直流电机的结构示意图

3. 额定值

额定值是电机按规定方式运行时允许的各物理量的值,直流电机的额定值(Rating)主要有:

- ① 额定电压 U_N , 额定励磁电压 U_{IN} , 单位均为 V;
- ② 额定电流 I_N , 额定励磁电流 I_{IN} , 单位均为 A;
- ③ 额定转速 n_N , 单位为 r/min(即转/分钟);
- ④ 额定功率 P_N , 单位为 W, 即计算量纲为 W, 但 P_N 值大于 1 000 W 时, 单位

用 kW 表示; P_N 表示额定的输出功率, 电机的效率用 $\eta (= \frac{P_2}{P_1})$ 表示, 则有

$$\text{直流发电机 } P_N = U_N I_N$$

直流电动机 $P_N = U_N I_N \eta_N = P_{1N} \eta_N$

注: P_N 特指额定状态时的输出功率, P_{1N} 特指额定状态时的输入功率; P_2 泛指输出功率, P_1 泛指输入功率。

4. 电枢绕组

电枢绕组一般装在直流电机的转子上,是最重要的部件之一,在能量转换中电枢绕组起着关键作用。这里仅作简介,详细分析请参考专著。

原始的电枢绕组采用环形绕组,环形绕组比较直观,讲原理时使用方便,但环形绕组制造困难,容易损坏。后来直流绕组均改进为鼓形绕组,按线圈之间的联接规律不同,将鼓形绕组分为叠绕组、波绕组和混合绕组。叠绕组和波绕组还可分别绕制成单叠、复叠和单波、复波式绕组。各种绕组的规律常用绕组展开图来表示。

例 1 四极 16 槽直流单叠绕组展开图如图 1.2,它所对应的某瞬时电路图如图 1.3 所示。

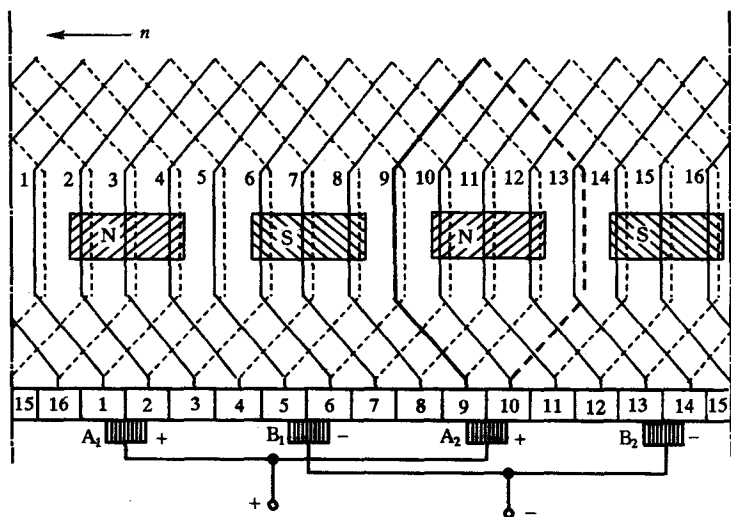


图 1.2 单叠绕组展开图

例 2 四极 15 槽直流单波绕组展开图如图 1.4,它所对应的某瞬时电路图如图 1.5 所示。

对于非从事电机制造和设计的人员来说,不需对各种绕组的联接规律搞的很

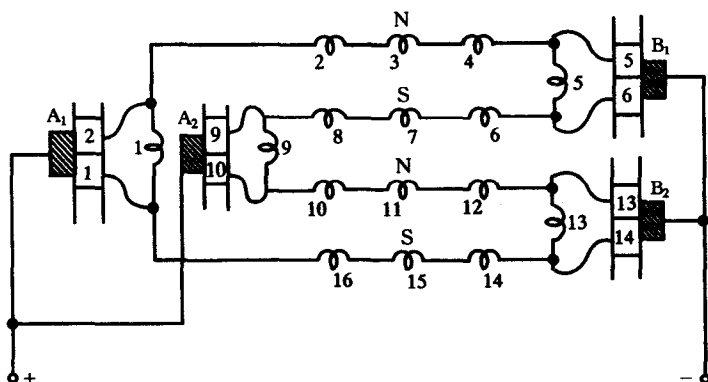


图 1.3 单叠绕组等效电路图

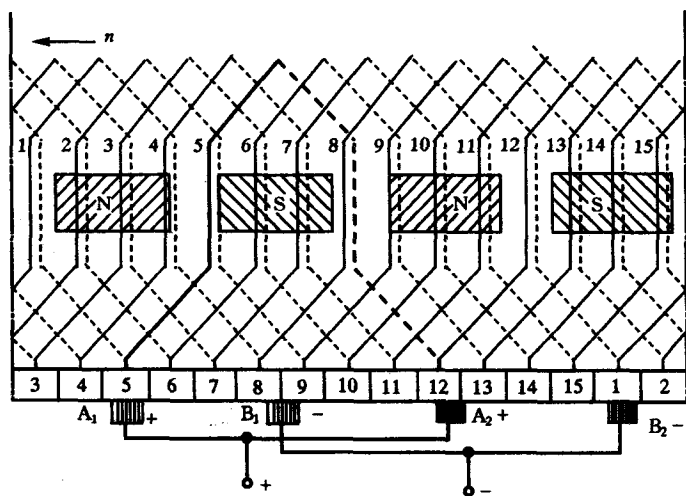


图 1.4 单波绕组展开图

透彻,只需对不同绕组的并联支路对数 a 的计算弄清楚即可。例如由图 1.3 和图 1.5 可以明显看出:单叠绕组的 $a=p$,单波绕组的 $a=1$;也可证明复(或双)叠绕组的 $a=2p$,复(或双)波绕组的 $a \approx 2$ 。

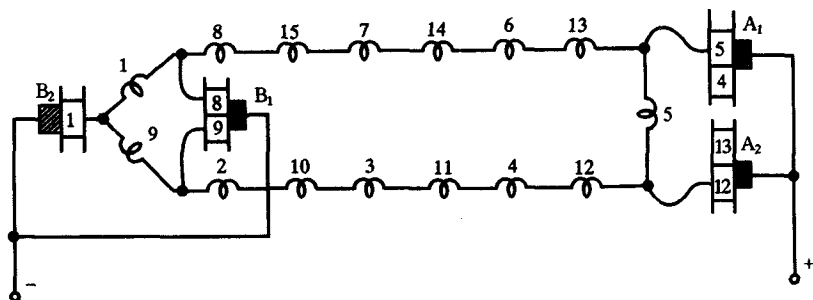


图 1.5 单波绕组等效电路图

1.1.2 直流电机的磁场分析

1. 励磁方式

典型的直流电机绕组由定子磁极上的励磁绕组和转子上的电枢绕组构成，两个绕组如何联接（例如并联、串联等）就决定了直流电机是何种励磁方式，不同励磁方式电机的运行特性也各不相同。励磁方式共有 4 种：①他励式（或永磁式）；②并励式；③串励式；④复励式。

说明：①复励式直流电机接线有积（或加）复励和减（或差）复励之分，取决于串励磁通 Φ_s 与并励磁通 Φ_p 的方向相同或相反。

②他励绕组和并励绕组一般可通用，但串励和并（或他）励绕组绝不能通用。

③并励直流电机的励磁电流 I_f 、电枢电流 I_a 和负载电流 I 三者的关系要弄清楚：对于直流发电机 $I_a = I + I_f$ ；对于直流电动机 $I_a = I - I_f$ 。

④励磁损耗 p_f 只有 $(1 \sim 3)\% P_N$ 。实验接线时，励磁回路一般采用细导线，电枢回路一般采用粗导线。

2. 空载磁通

空载磁通密度 $B_0(x)$ 的分布波形呈“平顶波”。主磁通 Φ 的路径为闭合磁路， Φ 要经过：气隙①→电枢齿①→电枢轭→电枢齿②→气隙②→主磁极②→定子轭→主磁极①→气隙①。在这个闭合磁路中，虽然两段气隙是很小的，但励磁磁势的绝大部分是消耗在气隙中了。

3. 电枢反应

电枢磁通密度 $B_a(x)$ 的分布波形呈“马鞍形波”。电机负载后电枢磁场（用 B_a 代表）对空载磁场（用 B_0 代表）的影响称之为电枢反应。研究电枢反应的实质就

是 $B_a(x)$ 与 $B_0(x)$ 合成后得 $B_g(x)$, 再将 $B_g(x)$ 的波形与 $B_0(x)$ 比较可得电枢反应, 其结果如下表所示。

		(直发) (直动)	
交轴 电枢反应 (负载后均存在)	使主磁密 $B_0(x)$ 波形畸变 具有一定的饱和去磁作用	前极端	减磁 增磁
		后极端	增磁 减磁
		(直发) (直动)	
直轴 电枢反应 (仅在电刷偏移时才存在)	电刷若顺转向偏移一小角度时	减磁	增磁
	电刷若逆转向偏移一小角度时	增磁	减磁

1.1.3 直流电机的电势、功率、转矩平衡

定量分析直流电机问题常用下列基本方程式。

1. 直流电势表达式

$E_a = \frac{pN}{60a} n \Phi = C_e n \Phi$, 此式中的 E_a 对“直发”(直流发电机的简称)叫正电势(即 E_a 与 I_a 同向), 对“直动”(直流电动机的简称)叫反电势(即 E_a 与 I_a 反向)。极对数 p 、并联支路对数 a 、电枢绕组总导体数 N 为结构参数。 n 为转速, 单位是 r/min, Φ 为每极磁通, 单位是 Wb。

2. 电磁转矩表达式

$T = \frac{pN}{2\pi a} I_a \Phi = C_T I_a \Phi$, 此式中的 T 的性质对“直发”为制动(即 T 与 n 反向)作用, 对“直动”为拖动(即 T 与 n 同向)作用。 I_a 的单位为 A, Φ 的单位为 Wb, T 的单位为 N·m。

3. 电势平衡方程式

$$\begin{cases} \text{直流发电机: } E_a = U + I_a R_a + 2\Delta U_b \\ \text{直流电动机: } U = E_a + I_a R_a + 2\Delta U_b \end{cases}$$

注意到, 对“直发” $E_a > U$, 对“直动” $U > E_a$; R_a 为除电刷接触电阻外的电枢回路总电阻, ΔU_b 为一个电刷的压降, 对本书一般取 $\Delta U_b = 1.0 \text{ V}$ 。

4. 功率平衡方程式

$$P_1 = \Sigma p + P_2$$

即输入功率 P_1 等于总的损耗 Σp 与输出功率 P_2 之和。

而总损耗 $\Sigma p = p_m + p_{Fe} + p_\Delta + p_f + p_{Cu}$, 它包括机械损耗 p_m , 铁耗 p_{Fe} 、附加损耗 p_Δ 、励磁损耗 p_f 和铜耗 p_{Cu} 。其中 $P_f = U_f I_f = I_f^2 (R_f + r_f)$,

$p_{Cu} = I_a^2 R_a + 2\Delta U_b I_a = p_a + p_b$, 若详细描述各项功率与损耗的关系用“功率流