

21[★]世纪

大学课程辅导丛书

电机学

(含拖动基础)

重点难点及典型题解析

阎治安 崔新艺



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

21[★]世纪

大学课程辅导丛书

TM3-4K

Y.164

电机学

(含拖动基础)

重点难点及典型题解析

阎治安 崔新艺



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

· 西安 ·

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严震池编著的《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(含直流电动机的拖动)、变压器、交流旋转电机的共同问题、异步电机(含异步电动机的拖动)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、特性和应用以及拖动基础,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)。

本书可作为大学本科生、专科生学习电机学(含拖动)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;也可作为有关硕士研究生报考人员的复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电机学(含拖动基础)重点难点及典型题解析/阎治安,崔新艺编著.
—西安:西安交通大学出版社,2003.11
(21世纪大学课程辅导丛书)
ISBN 7-5605-1752-8

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(2003)第 098799 号

书 名	电机学(含拖动基础)重点难点及典型题解析
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)2668315 2669096 (总编办) (029)2668357 2667874 (发行部)
印 刷	西安万花印务有限责任公司
字 数	350 千字
开 本	787mm×1092mm 1/16
印 张	14
印 数	0 001~5 000
版 次	2003 年 11 月第 1 版 2003 年 11 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5605-1752-8/TM·55
定 价	20.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本书是为本、专科生编写的电机学(含拖动基础)学习辅导书,也可供攻读硕士研究生的考生复习之用。电机学是电气类各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》和《电力拖动基础》这两门课程的“自学参考书”。

在编写中,我们参考了西安交通大学王正茂、阎治安、崔新艺、苏少平主编的《电机学》、许实章主编的《电机学习题集》、全国高等自考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,并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。此外,我们还考虑到近年来国内外出版的一些教材的体系和特点,对有些在实际中运用比较多的内容(例如电机调速、电机拖动等)与传统教材相比作了适当扩充。

全书共6章:第1章直流电机及直流电动机拖动;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章异步电动机及其拖动;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(含电机拖动基础)课程,一定要认真做题,还要结合实际,重视实验和应用环节。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副教授和崔新艺副教授编写,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王正茂、高琳、苏少平、梁得亮、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。

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

2003年8月于西安交通大学

HAM 83/11

目 录

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	(3)
1.1.3 直流电机的电势、功率、转矩平衡	(5)
1.1.4 直流电机的特性和应用	(6)
1.1.5 直流电机换向	(9)
1.2 重点和难点	(9)
1.2.1 直流电机的电磁原理、结构特点和主要额定值	(9)
1.2.2 直流电机的运行分析	(10)
1.2.3 直流电机的应用和换向	(11)
1.2.4 直流电机的电力拖动	(11)
1.3 典型题分析	(13)
1.3.1 直流电机的原理、额定值及基本理论	(13)
1.3.2 直流发电机	(14)
1.3.3 直流电动机	(17)
1.3.4 他励直流电动机的拖动	(19)
1.3.5 直流电机综合题	(23)
1.4 自我检测题	(32)
第 2 章 变压器	(38)
2.1 基本知识点	(38)
2.1.1 变压器的结构	(38)
2.1.2 变压器的主要额定值	(38)
2.1.3 变压器的变压原理及空载运行	(38)
2.1.4 变压器的负载运行	(40)
2.1.5 变压器的等效电路和相量图	(40)
2.1.6 变压器的参数测定	(41)
2.1.7 标么值	(42)
2.1.8 变压器的运行性能	(42)
2.1.9 三相变压器的铁心结构	(43)
2.1.10 变压器的联结组	(43)
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	(45)
2.1.13 三相变压器的不对称运行分析	(46)

2.1.14	变压器的暂态运行分析	(48)
2.2	重点和难点	(49)
2.2.1	变压器主要额定值	(49)
2.2.2	变压器的参数折算	(49)
2.2.3	变压器的电势平衡、磁势平衡和功率平衡	(50)
2.2.4	关于变压器的 R_m 和 X_m	(50)
2.2.5	变压器的空载实验和短路实验	(50)
2.2.6	变压器的电压调整率 ΔU 及效率 η 计算	(50)
2.2.7	三相变压器的铁心结构和电势波形	(51)
2.2.8	联结组	(51)
2.2.9	变压器的并联运行	(51)
2.2.10	自耦变压器和互感器	(51)
2.2.11	三相变压器的不正常运行	(52)
2.3	典型题分析	(52)
2.3.1	变压器的运行分析	(52)
2.3.2	三相变压器	(55)
2.4	自我检测题	(75)
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	重点和难点	(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	(83)
3.2.3	高次谐波磁势简介	(83)
3.3	典型题分析	(84)
3.3.1	交流绕组	(84)
3.3.2	交流电势	(89)
3.3.3	交流磁势	(92)
3.4	自我检测题	(98)
第4章	异步电机	(103)
4.1	基本知识点	(103)
4.1.1	异步电动机工作原理	(103)
4.1.2	异步电机的结构及额定值	(104)
4.1.3	异步电动机的运行分析	(105)
4.1.4	异步电动机的特性、启动、调速方法	(108)
4.1.5	单相异步电动机	(109)
4.2	重点和难点	(110)

4.2.1	异步电动机的优缺点、结构特点和额定值	(110)
4.2.2	异步电动机的三种运行状态及异步电动机的原理	(111)
4.2.3	异步电动机的电势、功率、转矩、磁势平衡	(111)
4.2.4	三相异步电动机的启动和调速方法分析	(111)
4.2.5	单相异步电动机的类型和特点	(111)
4.3	典型题分析	(112)
4.3.1	异步电机的工作状态及异步电动机的额定值	(112)
4.3.2	异步电动机的分析方法	(113)
4.3.3	异步电动机的启动、调速	(124)
4.3.4	异步电动机的拖动	(131)
4.3.5	异步电动机的拖动和启动设备计算及其硬轴联接计算	(135)
4.3.6	异步电动机的不对称运行及单相异步电动机	(138)
4.4	自我检测题	(141)
第5章	同步电机	(148)
5.1	基本知识点	(148)
5.1.1	同步电机的基本结构和原理	(148)
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	(150)
5.1.4	同步电抗	(150)
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	(152)
5.1.7	同步发电机的并网	(153)
5.1.8	同步发电机的功角特性	(154)
5.1.9	同步发电机并网后的功率调节	(155)
5.1.10	同步电动机	(156)
5.1.11	同步发电机的不对称运行	(157)
5.1.12	同步发电机突然短路的暂态过程	(158)
5.2	重点与难点	(158)
5.3	典型题分析	(160)
5.3.1	同步电机的基本结构、原理及额定值	(160)
5.3.2	同步电机的磁场和电枢反应	(161)
5.3.3	同步电抗和同步发电机的电势平衡方程及相量图	(161)
5.3.4	同步电机的参数测定和稳态运行特性	(165)
5.3.5	同步发电机的并网和功角特性	(166)
5.3.6	同步发电机有功功率和无功功率的调节	(171)
5.3.7	同步电动机	(174)
5.3.8	同步发电机的不对称运行和突然短路	(176)
5.4	自我检测题	(178)

附录 1 自我检测题参考答案 (181)

附录 2 西安交通大学近年本科生期末、硕士研究生入学考试试题 (194)

2001 年西安交通大学本科生电机学期末考试题 (194)

2002 年西安交通大学本科生电机学期末考试题 (196)

1995 年高等教育自学考试电机学试题 (198)

西安交通大学 2001 年攻读硕士学位研究生入学考试电机学试题 (200)

西安交通大学 2002 年攻读硕士学位研究生入学考试电机学试题 (202)

附录 3 “电机学”考试题参考答案 (205)

参考书目 (215)

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 D.C. 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为:

- ①将电枢绕组(引出端即电刷端)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 $T(= \sum f \frac{D}{2})$, T 使转子旋转, 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和转子两大部分组成。直流电机的结构如图 1.1 所示。其定子和转子的基本构成如下描述。

定子(Stator) {
主磁极 { 励磁绕组
励磁铁心
换向极(改善换向用)
机座、端盖, 电刷装置

转子(Rotor) {
电磁部分 { 电枢绕组
电枢铁心
换向器(发电或馈电的过渡装置)
机械部分 { 转轴
风扇

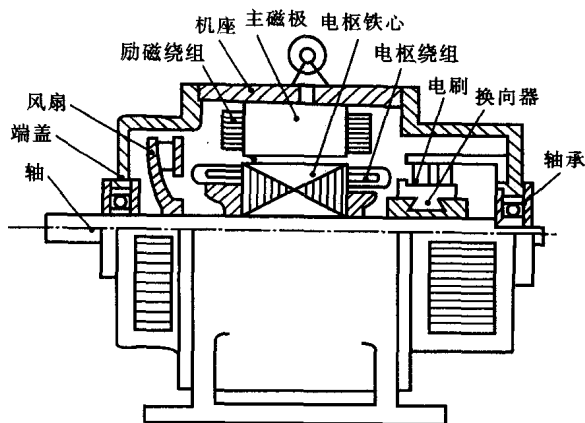


图 1.1 直流电机的结构示意图

3. 额定值

额定值是电机长期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_{fN} ,单位均为 V;
- ②额定电流 I_N ,额定励磁电流 I_{fN} ,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

$$\text{直流发电机 } P_N = U_N I_N$$

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

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。

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 $a = p$,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 $a = 2$ 。

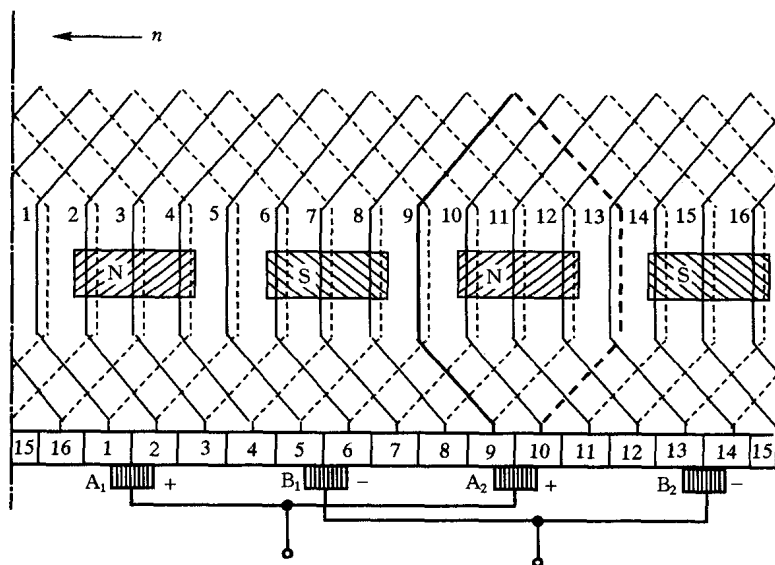


图 1.2 单叠绕组展开图

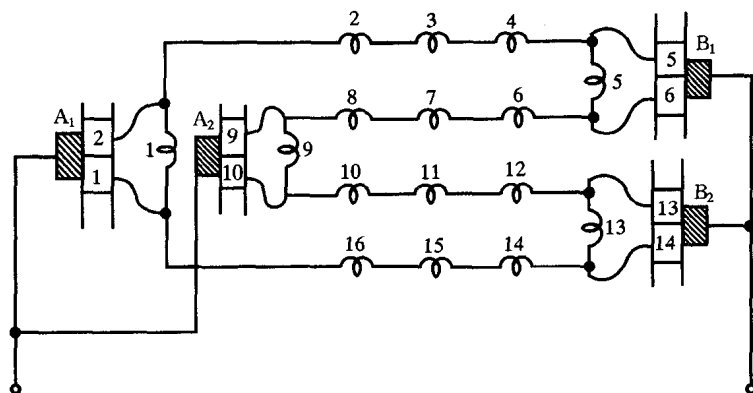


图 1.3 单叠绕组等效电路图

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 $\Phi_{串}$ 与并励磁通 $\Phi_{并}$ 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。

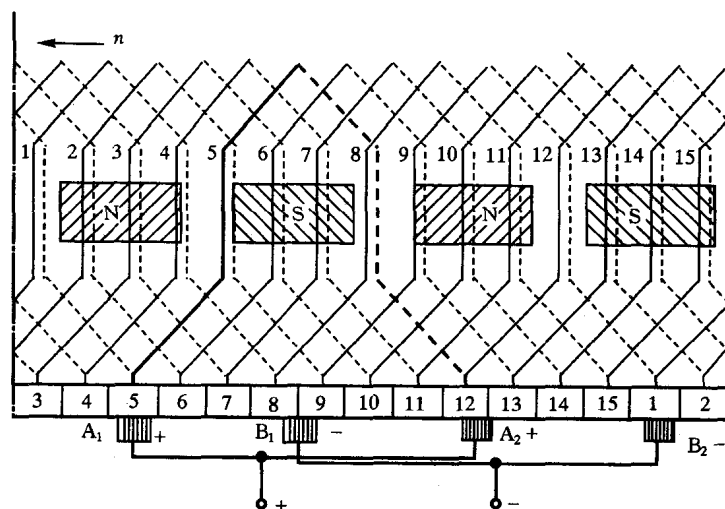


图 1.4 单波绕组展开图

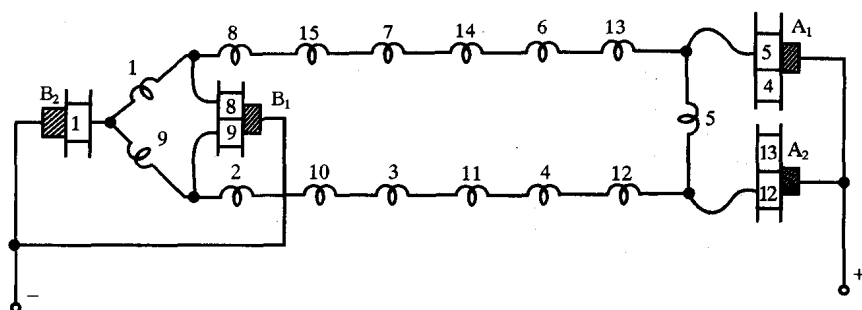


图 1.5 单波绕组等效电路图

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 $B_\delta(x)$,再将 $B_\delta(x)$ 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)	
$\left\{ \begin{array}{l} \text{交轴 电枢反应} \\ \text{(负载后均存在)} \end{array} \right\}$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{使主磁密 } B_0(x) \text{ 波形畸变} \\ \text{具有一定的饱和去磁作用} \end{array} \right\}$	前极端	减磁 增磁
		后极端	增磁 减磁
		(直发) (直动)	
$\left\{ \begin{array}{l} \text{直轴 电枢反应} \\ \text{(仅在电刷偏移时才存在)} \end{array} \right\}$	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 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 $N \cdot m$ 。

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 $\Delta U_b = 1.0 V$ 。

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“功率流程图”，它是非常有效的方法。直流发电机和直流电动机的功率流程图分别如图 1.6 所示。

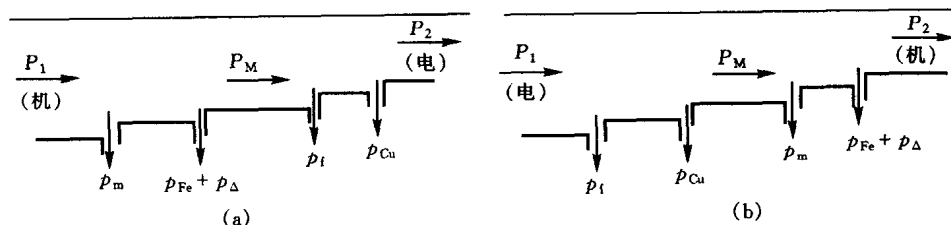


图 1.6 直流电机的功率流程图

(a) 直流发电机；(b) 直流电动机

5. 转矩平衡方程式

$$\begin{cases} \text{直流电动机} & T = T_0 + T_2 (\text{较常用}) \\ \text{直流发电机} & T_1 = T_0 + T \end{cases}$$

T_0 为空载阻力转矩, $T_0 = \frac{P_0}{\Omega} = \frac{p_m + p_{Fe} + p_{\Delta}}{\frac{2\pi n}{60}}$; T_2 为电动机的输出转矩, $T_2 = \frac{P_2}{\Omega}$; T_1 为

发电机的输入转矩, $T_1 = \frac{P_1}{\Omega}$; T 为直流电机的电磁转矩, $T = \frac{P_M}{\Omega} = \frac{E_a I_a}{\frac{2\pi n}{60}}$ 。

说明: 以上是直流电机定量计算和分析时的常用公式, 注意灵活应用并熟练掌握; 另外在分析直流电机的计算题时, 往往根据已知可先求出 $C_e \Phi$ 值, 这样将为后面的分析计算带来极大的方便, $C_e \Phi$ 的计算式根据电势表达式和电势平衡方程解得:

$$\text{直动} \quad C_e \Phi = \frac{U_N - I_a \sum R_a}{n_N}; \quad \text{直发} \quad C_e \Phi = \frac{U_N + I_a \sum R_a}{n_N}$$

1.1.4 直流电机的特性和应用

直流发电机的特性有开路(或空载)特性和外特性; 直流电动机的特性有工作特性和机械特性。分别分析如下。

1. 直流发电机(D.C. Generator)

(1) 空载特性 $U_0 = f(I_f)$ 当 $n = n_N, I = 0$ 时, 调节励磁电流, 端电压 U_0 随励磁电流 I_f 变化的关系称之为“直发”的空载特性, 其曲线如图 1.7 所示。

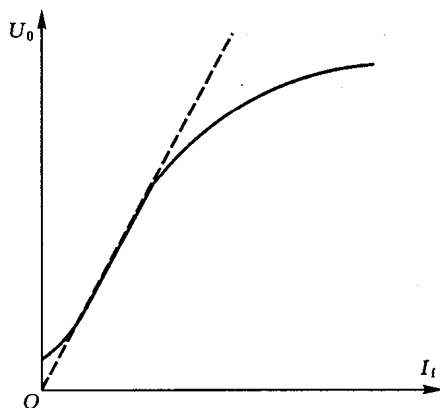


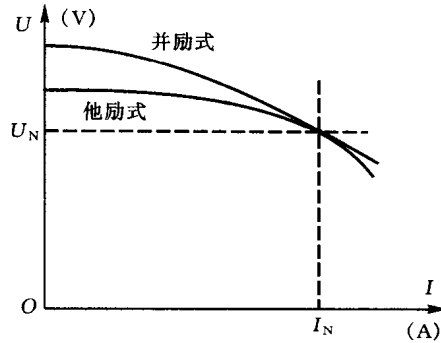
图 1.7 直流发电机的空载特性曲线

注意: 并励直流发电机的建压条件有: ①电机内部要有剩磁; ②励磁电流产生的磁通与剩磁同方向; ③励磁回路的总电阻要小于建压时的临界电阻。

不同励磁方式的同一台电机的空载特性曲线是相似的或一致的。通过它可求取磁路设计的饱和程度。

(2) 外特性 $U = f(I)$ 当 $n = n_N, R_f = \text{常数}$ 时, 改变负载, 端电压 U 随负载电流 I 变化的关系称之为“直发”的外特性。

不同励磁方式的外特性曲线是不相同的,例如他励式和并励式的同一台直流发电机的外特性曲线如图 1.8 所示。通过该曲线可求出该电机不同励磁方式时的电压调整率 ΔU 。



1.8 直流他励、并励式发电机的外特性曲线

电压调整率(Voltage Regulation)是发电机(含变压器)的重要的性能指标之一。

注意:并励直流发电机外特性曲线(随 I 增大)下降的原因有:①电枢电阻压降的存在;②电枢反应的去磁作用;③励磁电流的进一步减小。

2. 直流电动机(D.C. Motor)

(1) 工作特性 当 $U = U_N, R_f + r_f = \text{常数}$ 时,改变负载后, n, T, η 分别随 P_2 变化的关系称之为其工作特性。其曲线如图 1.9 所示。

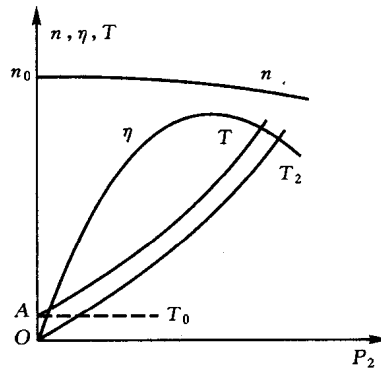


图 1.9 直流电动机的工作特性曲线

(2) 机械特性 $n = f(T)$ 对应的数学公式为 $n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{\sum R_a}{C_e C_T \Phi^2} T$ 或 $n = n_{0L} - kT$

式中: $n_{0L} = \frac{U}{C_e \Phi}$ 为理想空载转速; $k = \frac{\sum R_a}{C_e C_T \Phi^2}$ 为斜率。

求取机械特性曲线的实验方法完全同工作特性,只是将工作特性曲线中的 n 和 T 值单独对应取出,画在坐标纸上即可。不同励磁方式的机械特性曲线是不同的。

注意:串励直流电动机:①不能空载(或轻载)启动或运行;②其启动转矩很大;③其输出功

率变化不大,不易过载。故广泛应用于交通运输。

(3) 直流电动机的启动 系统对任何电动机启动的要求是:①最初启动电流 I_{st} 要小;②最初启动转矩 T_{st} 要大。也是电动机启动性能好的两个要素。

注意:启动并励、他励、复励直流电动机在操作时,合开关前,切记应将:①电枢回路外串电阻置于最大阻值位置(目的是限制 I_{st});②励磁绕组外串电阻置于最小阻值位置(目的是提高 T_{st})。但串励直流电动机不能直接空(或轻)载启动。

(4) 直流电动机的调速 电动机的启动、调速和制动均属于电动机的应用问题,生产实际中经常要遇到这些问题,若不掌握启动、调速、制动的理论,使用时很可能无从下手,甚至会发生事故。尤其是调速,应用上更广泛。然而就电机本身而言,直流电动机的调速性能要比交流电动机好。所谓调速性能好,是指电动机拖动机械负载的转速变化范围宽广,速度变化连续易调。

直流电动机调速的思路即依据公式为 $n = \frac{U - I_a(R_a + R_{ij})}{C_e \Phi}$,此式中: R_a 为电动机本身电枢回路的总电阻, R_{ij} 为电枢回路外串电阻。由此式可以知道直流电动机调速的方法和结论如下:

- ① 改变电枢回路外串调节电阻 R_{ij} ,若 $R_{ij} \uparrow \rightarrow n \downarrow$;
- ② 改变励磁回路外串调节电阻 R_f ,若 $R_f \uparrow \rightarrow I_f \downarrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow$;
- ③ 改变电源电压 U 调速(常用于他励式直流电动机),若 $U \uparrow \rightarrow n \uparrow$ 。

(5) 直流电动机的制动 所谓制动就是使电动机转轴尽快减速或停转,即给电动机一个阻力转矩。直流电动机制动的的方法和理论分析如下:

① 能耗制动 能耗制动的接线图的关键是须借助于双向双刀开关 K ,将 K 合向电源一侧时,电动机正常运行, T 与 n 同向, T 为拖动作用的转矩;若要进行制动,将 K 尽快合向另一侧即电源反接,则电枢回路通过电阻 R 短路,此时,直流电机作发电机运行,发电机工作时的 T 与 n 反向, T 为制动作用的转矩,故使 n 下降得快,最后停转。

② 反接制动 反接制动的接线图仍需借助于双向双刀开关 K 。将 K 合向电源一侧,电动机正常运行, T 与 n 同向, T 为拖动性质的转矩;若要反接制动,将 K 尽快合向电源反接的另一侧,开始直流电机暂作制动运行,因此时的 I_a 与 T 的方向变反,而 Φ 没改变方向,故 T 为制动性质的转矩而且使 n 急剧减小,到 $n=0$ 的瞬间断开电源即可(若不断开电源,电动机将反转)。

由于制动时 $I_a \left(= -\frac{U + E_a}{R_a + R} \right)$ 很大,电机易发热,故反接制动不适合于频繁制动的场合。

③ 回馈制动 回馈制动适用于串励直流电动机中当电车上坡时的情况。此时将串励绕组改接为他励接法,用另一直流电源(例如蓄电池)供给少量的 I_f ,电枢回路仍接入电网,开始时使 I_a 方向不变。则电车上坡时,转速越来越高,即随着 $n \uparrow \rightarrow$ 电枢电势 $E_a = C_e n \Phi \uparrow$ 到 $E_a > U$ 时,该电机作发电机运行,向电网输送电能, I_a, T 方向变反,当电车上坡的势能等于电机输出电能与损耗之和时,电车则平稳前进。

回馈制动如果是对于他励直流电动机,降压调速的过程中会出现正向回馈制动;而当他励电动机拖动势能恒转矩负载运行时,采用电压反接制动过程中会出现反向回馈制动。

1.1.5 直流电机换向

1. 基本概念

①研究换向的实际意义:换向质量直接影响电机性能,换向不好火花大。

②换向定义:旋转着的电枢某元件,从一条支路转换到另一条支路时,元件(即换向线圈)中电流变化的过渡过程。

③换向周期:换向元件中的电流 i_a 从正(或负)值变到负(或正)值所用的时间,即一个换向片通过一个电刷所用的时间: $T_H = \frac{60}{nK} \approx 0.0005 \sim 0.002 \text{ s}$, 式中, T_H 为换向周期(s); K 为电机的换向片数; n 为转速(r/min)。

2. 电抗、电枢反应、换向极电势

由于换向周期时间很短,如此短的时间元件中的电流方向要改变,必然会带来麻烦,即阻碍换向,其因素或基本理论就是存在三个电势:即 e_x 、 e_a 和 e_k 。其性质说明如下。

①电抗电势 e_x 性质:力图阻止换向线圈中电流 i_a 的变化,即力图与换向开始的电流同方向,是阻碍换向的。

②电枢反应电势 e_a 性质:换向线圈切割交轴电枢反应磁通 ϕ_{aq} 所引起,其性质也是力图与换向前的电流同方向而阻碍换向。

③换向极电势 e_k 性质:换向线圈切割改善换向的换向极后感应的电势,其性质是力图与换向结束的电流同方向,是改善或帮助换向的。

3. 改善换向的电磁方法

①装置换向极:这是常用的有效方法,但这里的关键是如何确定换向极的极性:

发电机:顺转向看与主极极性相同;电动机:逆转向看与主极极性相同。

②移动电刷位置:其原理是利用主磁极对换向元件感应的电势来改善换向,这里的关键是电刷移动的方向:

发电机:顺转向移动一个小角度;电动机:逆转向移动一个小角度。

1.2 重点和难点

1.2.1 直流电机的电磁原理、结构特点和主要额定值

直流电机的工作原理是基于电磁感应定律之上。按能量转换过程的不同,分为发电机运行和电动机运行。直流发电机是将机械能转换为直流电能,转换过程中的条件是有转子导体的运动和磁场的存在,根据电磁感应公式 $e = Blv$,将有交流电势产生,经过换向器和电刷引出了直流电。而直流电动机是将直流电能转换为机械能,转换过程中的条件是有载流的电枢导体和磁场的存在,根据电磁力公式 $f = Bli$,将产生电磁力,作用于转子产生电磁转矩使转轴拖动机械负载运行。电机是可逆的,读者应掌握电机的可逆性原理。

直流电机的结构宏观上讲有定子和转子两大部分,定子和转子又各有自己的电磁部分和机械部分,其结构特点的关键是直流电机具有换向器。换向器的作用对直流发电机相当于“整流器”,将交流电势转换为直流电势;直流电动机中换向器的作用相当于“逆变器”,是将直流电