

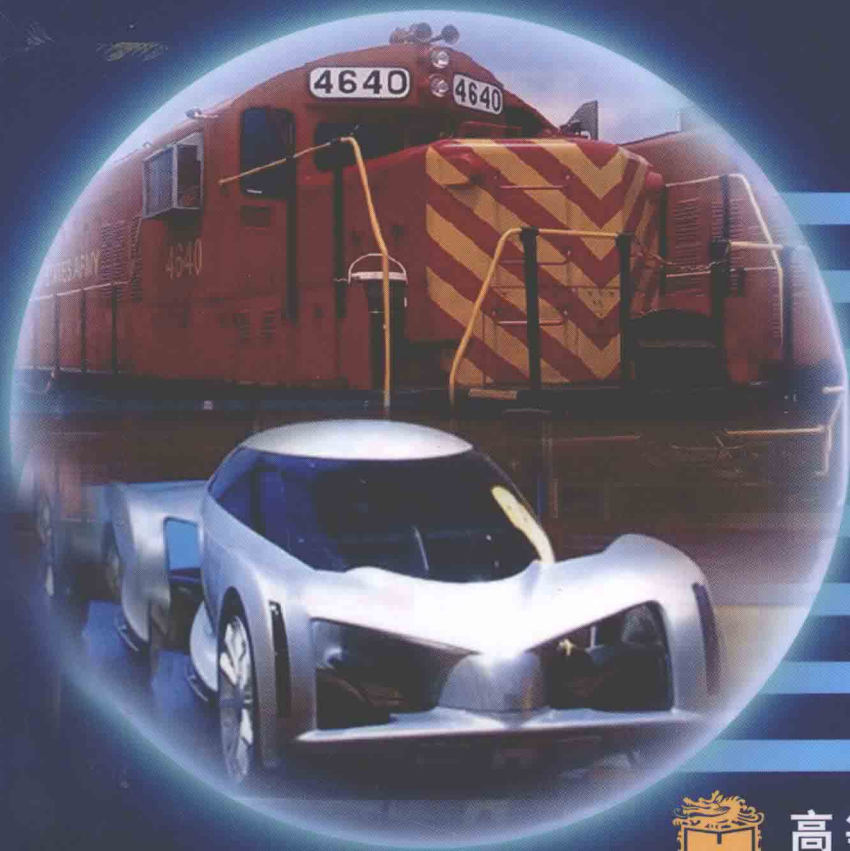


普通高等教育“十五”国家级规划教材

(高职高专教育)

电机及拖动学习指导

许晓峰 主编



高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电机及拖动学习指导

许晓峰 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是根据许晓峰主编的《电机及拖动》(第2版)编写的配套学习指导书。全书按内容提要、基本要求、重点与难点分析、典型例题分析、部分思考题与习题解答、自测题参考答案等六个方面逐章加以论述。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校的工业电气自动化、供用电技术、电气技术等专业的“电机及拖动”课程的辅助教材,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动学习指导/许晓峰主编. —北京:高等教育出版社,2004.7

ISBN 7-04-014656-8

I. 电... II. 许... III. ①电机—高等学校:技术学校—教学参考资料②电力传动—高等学校:技术学校—教学参考资料 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 030741 号

策划编辑 尹 洪 责任编辑 张玉海 封面设计 王凌波 责任绘图 尹文军
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京市鑫霸印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 9.5
字 数 230 000

版 次 2004 年 7 月第 1 版
印 次 2004 年 7 月第 1 次印刷
定 价 11.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

出版说明

为加强高职高专教育的教材建设工作,2000年教育部高等教育司颁发了《关于加强高职高专教育教材建设的若干意见》(教高司[2000]19号),提出了“力争经过5年的努力,编写、出版500本左右高职高专教育规划教材”的目标,并将高职高专教育规划教材的建设工作分为两步实施:先用2至3年时间,在继承原有教材建设成果的基础上,充分汲取近年来高职高专院校在探索培养高等技术应用性专门人才和教材建设方面取得的成功经验,解决好高职高专教育教材的有无问题;然后,再用2至3年的时间,在实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》立项研究的基础上,推出一批特色鲜明的高质量的高职高专教育教材。根据这一精神,有关院校和出版社从2000年秋季开始,积极组织编写和出版了一批“教育部高职高专规划教材”。这些高职高专规划教材是依据1999年教育部组织制定的《高职高专教育基础课程教学基本要求》(草案)和《高职高专教育专业人才培养目标及规格》(草案)编写的,随着这些教材的陆续出版,基本上解决了高职高专教材的有无问题,完成了教育部高职高专规划教材建设工作的第一步。

2002年教育部确定了普通高等教育“十五”国家级教材规划选题,将高职高专教育规划教材纳入其中。“十五”国家级规划教材的建设将以“实施精品战略,抓好重点规划”为指导方针,重点抓好公共基础课、专业基础课和专业主干课教材的建设,特别要注意选择一部分原来基础较好的优秀教材进行修订使其逐步形成精品教材;同时还要扩大教材品种,实现教材系列配套,并处理好教材的统一性与多样化、基本教材与辅助教材、文字教材与软件教材的关系,在此基础上形成特色鲜明、一纲多本、优化配套的高职高专教育教材体系。

普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

教育部高等教育司

2002年11月30日

前 言

本书是根据许晓峰主编的《电机及拖动》(第2版)编写的配套学习指导书。全书按内容提要、基本要求、重点与难点分析、典型例题分析、部分思考题与习题解答、自测题参考答案等六个方面逐章加以论述。

本书对《电机及拖动》的主要内容、重点和难点进行全面、扼要的分析和总结,帮助读者把握教材的基本要求、各章的重点和难点以及学习方法,通过对部分思考题的分析和习题的解答,使读者加深对基本概念的理解,提高分析和解决问题的能力。为了开阔思路,提高学生灵活应用的能力,适当补充了一些原教材中未详细叙述到的内容,供广大师生参考。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校的工业电气自动化、供用电技术、电气技术等专业的“电机及拖动”课程的辅助教材,也可供有关工程技术人员参考。

本书第2、5章由沈阳工程学院吕中枢编写,第1章及第7章中的伺服电机、测速发电机、自整角机、旋转变压器和步进电机的学习指导内容由承德石油高等专科学校邹振春编写,其余部分由沈阳工程学院许晓峰编写,本书由许晓峰统稿并担任主编。

本书由北京交通大学武慧芳副教授主审,审阅过程中提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编者

2004年1月

目 录

第 1 章 直流电机	1	四、典型例题分析	68
一、内容提要	1	五、部分思考题与习题解答	69
二、基本要求	2	六、自测题参考答案	77
三、重点与难点分析	3	第 5 章 三相异步电动机的电力拖动	81
四、典型例题分析	7	一、内容提要	81
五、部分思考题与习题解答	8	二、基本要求	81
六、自测题参考答案	14	三、重点与难点分析	82
第 2 章 直流电动机的电力拖动	19	四、典型例题分析	89
一、内容提要	19	五、部分思考题与习题解答	93
二、基本要求	19	六、自测题参考答案	101
三、重点与难点分析	20	第 6 章 同步电机	103
四、典型例题分析	24	一、内容提要	103
五、部分思考题与习题解答	27	二、基本要求	103
六、自测题参考答案	38	三、重点与难点分析	103
第 3 章 变压器	41	四、典型例题分析	111
一、内容提要	41	五、部分思考题与习题解答	114
二、基本要求	41	六、自测题参考答案	123
三、重点与难点分析	41	第 7 章 驱动和控制微电机	127
四、典型例题分析	48	一、内容提要	127
五、部分思考题与习题解答	51	二、基本要求	128
六、自测题参考答案	58	三、重点与难点分析	128
第 4 章 三相异步电动机	63	四、典型例题分析	138
一、内容提要	63	五、部分思考题与习题解答	139
二、基本要求	63	六、自测题参考答案	141
三、重点与难点分析	63		

第1章

直流电机

一、内容提要

本章主要介绍直流电机的工作原理及其基本结构。

直流电机的工作原理是建立在电磁感应定律和电磁力定律的基础上的。在不同的外部条件下,电机中能量转换的方向是可逆的。如果从电机轴上输入机械功率,电枢绕组中感应电动势大于端电压,即 $E_a > U$ 时,电机运行于发电机状态,将机械能转换为电能,从电刷两端输出电能;如果从电枢输入电功率,电枢绕组中感应电动势小于外加端电压,即 $E_a < U$ 时,电机运行于电动机状态,将电能转换为机械能,从轴上输出机械能。

直流电机的结构可分为定子、转子两大部分。定子部分包括:机座、主磁极(包括励磁绕组)、换向极(包括换向极绕组)和电刷装置。定子主要用来建立磁场。转子部分包括:电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴和轴承等。转子主要通过电枢绕组传递电磁功率,是电动机的核心部件。

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、S 两种,故并联支路数为 2。

绕组元件中感应电动势和元件中流过的电流都是交变的,但经过换向器和电刷的机械整流作用,使在电刷和电刷接通的外电路上,电动势、电压和电流都变换为直流。

直流电机能量变换是依靠气隙磁场进行的。空载时,直流电机的气隙磁场由励磁绕组的磁动势产生;负载时,气隙磁场由励磁绕组和电枢绕组的磁动势共同产生。电枢磁动势对气隙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,对电动机来说,其磁场的物理中性线逆转向偏离几何中性线。在磁路饱和时,交轴电枢反应具有去磁效应,使每极磁通量减少。

直流电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,与转速方向一致。

换向是指绕组元件从一条支路经过电刷转入另一条支路时,元件中电流方向改变的过程。按换向的电磁理论分析,直线换向不会产生火花,延迟换向有可能出现火花,造成换向不良。为改善换向,直流电机一般都装设换向极,使换向元件在换向区感应电动势抵消元件的电抗电动势和电枢反应电动势,力求实现直线换向。

直流电动机的工作特性与励磁方式密切相关。他、并励直流电动机的电磁转矩基本上正比于电枢电流,当负载变化时,转速变化很小,特性较硬。串励直流电动机的电磁转矩近似与电枢电流的平方成比例,因此串励电动机的起动力矩较大,负载变化时,转速变化较大,特性较软,在使用时注意不准空载或轻载工作,以避免转速过高。复励直流电动机的特性介于二者之间。

二、基 本 要 求

学习本章应主要掌握以下几个方面的内容:

1. 掌握在磁场里运动导体产生感应电动势和载流导体受力这两个基本规律,这两个规律是直流电机工作的理论基础。

2. 了解直流电机的主要结构和各部分的主要作用。要求知道直流电机的两大组成部分:定子和转子。

3. 应知道直流电机的铭牌中有哪些主要的额定数据及其含义以及在使用电机时应当注意的事项。

4. 电枢绕组是直流电机的核心。

(1) 理解单叠绕组和单波绕组各节距的计算方法。

(2) 能够看懂绘制好的绕组展开图。

(3) 了解各绕组的主要特点,知道什么情况下用单叠绕组,什么情况下用单波绕组。

5. 了解什么叫电枢反应;电枢反应对电机的影响;如何抵消电枢反应的影响。

6. 熟练掌握电枢电动势和电磁转矩的计算公式和性质。

(1) 在恒定磁场中转动的电枢绕组产生感应电动势,电动势的大小可用下式计算:

$$E_a = \frac{N}{2a} e_{av} = C_e \Phi n$$

式中: $C_e = \frac{pN}{60a}$, 当电机制造好后仅与电机结构有关,称为电动势常数; N 是电枢导体总数。

(2) 在恒定的磁场内通电的电枢绕组产生电磁转矩,转矩的计算由下式给出:

$$T_{em} = C_T \Phi I_a$$

式中: $C_T = \frac{pN}{2a\pi}$ 仅与电机结构有关,称为转矩常数。

(3) 两个常数之间的关系为 $C_T = 9.55 C_e$ 。

以上两个计算公式是直流电机中的最基本公式,贯穿直流电机及直流电机拖动分析的始终,应当牢记。

7. 了解直流电机的换向过程。什么叫直线换向? 如何改善直流电机的换向?

8. 了解直流发电机的励磁方式。

9. 掌握电磁功率的关系式 $P_{em} = T_{em} \Omega = E_a I_a$, 这个公式说明了直流电机中机电能量是可以彼此互相转换的。

10. 掌握并励直流发电机电压建立的三个条件: 电机主磁路有剩磁; 并励绕组极性连接正确; 励磁绕组回路电阻小于临界电阻值。

11. 掌握直流发电机的外特性。
12. 了解什么叫电机的可逆原理。
13. 掌握如何判断一台电机是处于电动状态还是发电状态。
14. 掌握分析直流电机用的电动机惯例、发电机惯例,能根据惯例写出直流电机稳态运行的基本方程式。
15. 掌握他励直流电动机运行时,电机内的功率关系。
16. 掌握他励直流电动机的机械特性。

三、重点与难点分析

直流电机由定子和转子两大部分组成。定子主要作用是产生一定空间分布的磁场。定子由主磁极、机座、换向磁极、电刷装置和端盖等部分组成。转子主要作用是产生电磁转矩和感应电动势,直流电机中的能量转换均发生在转子中,转子是直流电机的核心。转子由电枢铁心、电枢绕组、换向器、电机转轴和轴承等部分组成。

在磁场里,运动导体产生感应电动势

$$e = B_x l v \quad (1.1)$$

该式说明,电机要产生感应电动势必须具备三个条件:即要有磁场的存在;金属导体 l 处于磁场中;导体 l 与磁场间产生相对运动。

在磁场里,载流导体受力:

$$f = B_x l I \quad (1.2)$$

该式说明,在磁场中的有电流流过的导体将受到电磁的作用产生电磁力。

为保证电机能够安全可靠稳定运行,根据国家标准和电机数据及实验数据,电机制造者规定了电机正常运行时的工作状态即电机的铭牌数据,该数据也称为额定数据,具体意义如下:

额定功率 P_N :也称为额定容量,指在额定条件下电机所能供给的功率。

额定电压 U_N :在额定运行条件下,电机出线端的平均电压。

额定电流 I_N :运行于额定电压、额定功率时对应的电枢电流值称为电机的额定电流。

额定转速 n_N :对应于额定电压、额定电流,即电机运行于额定功率时所对应的转速。

额定励磁电流 I_{fN} :指电机运行于额定电压、额定电流、额定转速及额定功率时的励磁电流。

转子绕组也称为电枢,是直流电机进行能量转换的核心部件。直流电机的转子绕组是由一定形状的绕组元件按照一定的规律组成的闭合绕组,其连接规律主要有单叠绕组和单波绕组两种。单叠绕组并联支路数多,允许通过的总电枢电流大,每个支路里的元件数少,支路合成感应电动势较低,因此单叠绕组适合用于低电压、大电流的直流电机。对于单波绕组,支路对数永远等于 1,在支路电流与单叠绕组支路电流相同的情况下,单波绕组能允许通过的总电枢电流就较小;由于每个支路里含的元件数较多,合成感应电动势较高,所以单波绕组适用于较高电压、较小电枢电流的直流电机。

为研究电枢反应对直流电机特性的影响,首先要研究直流电机的空载磁场。

当忽略主磁路中铁磁性材料的磁阻时,主磁极下气隙磁通密度的分布就取决于气隙 δ 的形

状和大小。磁极中心及附近的气隙 δ 较小且均匀不变,磁通密度较大且基本为常数;靠近两边极尖处,气隙逐渐变大,磁通密度减小;超出极尖以外,气隙明显增大磁通密度显著减小,在磁极之间的几何中性线处,气隙磁通密度变为零。因此空载时的气隙磁通密度分布为一平顶波。

气隙中由电枢电流产生的磁通密度分布为对称的马鞍形波。

电枢反应是由于电枢磁场的存在,电枢磁场对空载磁场的作用。电枢反应分为电刷在几何中性线上时的电枢反应和电刷不在几何中性线上时的电枢反应两种。当电刷在几何中性线上且负载时,由于电枢反应的影响,气隙磁场发生畸变,对于直流发电机而言,每一磁极下,电枢要进入的主磁极磁场一端的磁场被削弱,而另一端则被加强。磁场为零的位置由空载时的几何中性线顺转向移动一个 α 角。物理中性线与几何中性线不再重合,使磁场的分布曲线发生畸变。同时使每极磁通比空载时的每极磁通略为减少,这种去磁作用完全由磁路的饱和引起,称为附加的去磁作用。

当电刷不在几何中性线时,电枢反应将分为交轴电枢反应和直轴电枢反应两部分。交轴电枢反应的性质同电刷在几何中性线上时的性质。直轴电枢反应对于发电机而言,当电刷顺转向移动时, F_{ad} 起去磁作用;当电刷逆转向移动时, F_{ad} 起增磁作用。而对直流电动机而言,当电刷顺转向移动时, F_{ad} 起增磁作用;而当电刷逆向转动时, F_{ad} 起去磁作用。

电枢反应的结果在磁场饱和的情况下,将使磁场减弱,使电枢感应电动势降低,同时电枢反应使磁场发生畸变,使电机的换向困难,有时会产生换向火花或环火。因此应尽可能减少电枢反应的影响。

不论是发电机还是电动机,在其运行时均在电枢绕组中产生感应电动势和电磁转矩。感应电动势和电磁转矩是电机进行能量转换的重要因素。电机的感应电动势可用下式计算:

$$E_a = C_e \Phi n \quad (1.3)$$

式中: $C_e = \frac{pN}{60a}$ 是一个仅与电机结构有关的常数,称为电动势常数。

上式表明当电机制造好后,感应电动势与气隙磁通和电机转速三者间的关系。对于发电机当转速不变时,可通过改变励磁电流改变发出电压的大小或当励磁电流不变时通过改变电机转速改变发出电压的大小;对于电动机,当外加电枢电压不变时,通过改变励磁电流改变转速的大小或当励磁电流不变时通过改变外加电压改变电机的转速。上式是发电机调整输出电压和电动机调整输出转速的基础。

电磁转矩可用下式计算:

$$T_{em} = C_T \Phi I_a \quad (1.4)$$

式中: $C_T = \frac{pN}{2\pi a}$ 是仅与电机结构有关的常数,称为转矩常数。

从 C_e 与 C_T 的表达式可以看出:

$$C_T = 9.55 C_e \quad (1.5)$$

或

$$C_e = 0.105 C_T \quad (1.6)$$

从式(1.4)可看出,制造好的直流电机其电磁转矩仅与电枢电流和气隙磁通之积成正比。

直流电机电枢绕组中一个元件经过电刷从一个支路转换到另一个支路里时,电流方向改变

的过程称为换向。

换向不良会产生电火花或环火,严重时将烧毁电刷导致电机不能正常运行,甚至引起事故。直流电机的火花等级见表 1.1。

改善电机换向的最有效方法是装上换向极。换向极装在两个相邻的主磁极之间的几何中性线上,同时为防止环火出现有时在主磁极上还安装补偿绕组,从而抵消电枢反应的影响。此外选用适当的电刷,也有利于换向。在使用维修过程中,欲更换电刷时,必须选用与原来同一型号的电刷,如果实在配不到相同牌号的电刷,应尽量选择特性与原来相接近的电刷,并全部更换。

直流发电机的方程式包括:电压平衡方程式、电磁转矩平衡方程式和功率平衡方程式。在列写直流电机的基本方程式时,应按照发电机惯例确定各物理量间的参考方向,然后根据各物理量间的相互关系写出关系式或方程式。

表 1.1 直流电机火花等级表

火花等级	电刷下的火花程度	换向器与电刷状态
1	无火花	换向器上没有黑痕;电刷上没有灼痕
$1\frac{1}{4}$	电刷边缘仅有微弱的点状火花,或有非放电性的红色火花	
$1\frac{1}{2}$	电刷边缘大部分或全部有轻微火花	换向器上有黑痕,不可擦除;电刷上有轻微灼痕
2	电刷边缘大部分或全部有较强烈的火花	换向器上有黑痕但不扩大,用汽油可擦除;电刷上有灼痕,如短时出现该级别火花则换向器上不出现灼痕,电刷不被烧焦或损坏
3	电刷整个边缘有强烈的火花,同时有大火花飞出	黑痕相当严重,不可擦除;电刷上有灼痕,如在該级火花下运行,换向器将出现灼痕,电刷将被烧焦或损坏

根据直流发电机惯例及基尔霍夫电压定律可写出电压平衡方程式:

$$E_a = U + 2\Delta U_b + R_\Sigma I_a \tag{1.7}$$

式中: $R_\Sigma I_a$ 项为电枢电流在电枢回路串联的各绕组(包括电枢绕组、换向极绕组和补偿绕组等)总电阻上的电压降。 $2\Delta U_b$ 为正、负电刷与换向器表面的接触压降,实际应用中,把 $2\Delta U_b$ 的作用归入电枢回路总电阻中,此时电枢回路总电阻表示为 R_a ,上式可重写为:

$$E_a = U + R_a I_a \tag{1.8}$$

该式说明直流发电机的感应电动势一部分消耗在电枢绕组电阻(发电机内阻)上,另一部分向外输出给负载。

作用在直流发电机轴上的转矩有三个:即发电机的拖动转矩 T_1 、电磁转矩 T_{em} 和空载转矩 T_0 。电磁转矩、空载转矩与转速 n 的方向相反,是阻转矩。稳态运行时拖动转矩和阻转矩相平衡,据此可写出稳态运行时的转矩平衡方程式为:

$$T_1 = T_{em} + T_0 \tag{1.9}$$

将式(1.9)的两端同乘以电枢轴上机械角速度 Ω ,得出:

$$T_1 \Omega = T_{em} \Omega + T_0 \Omega \quad (1.10)$$

式中: $T_1 \Omega = P_1$, 为原动机输入给发电机的机械功率; $T_{em} \Omega = P_{em}$, 为电磁功率; $T_0 \Omega = P_0$, 为空载损耗。因此, 上式又可写成:

$$P_1 = P_{em} + P_0 \quad (1.11)$$

该式即为发电机的功率平衡方程式。

式中: P_0 为空载损耗, 包括机械摩擦损耗 P_{mec} 和铁损耗 P_{Fe} , 因此空载损耗 P_0 又可表示为:

$$P_0 = P_{mec} + P_{Fe} \quad (1.12)$$

从形式上看, $P_{em} = T_{em} \Omega$ 是属于机械性质的功率, 对 $P_{em} = T_{em} \Omega$ 的右边进行变换可得:

$$\begin{aligned} P_{em} = T_{em} \Omega &= C_T \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} \\ &= \frac{pN}{60} \Phi n I_a = C_e \Phi n I_a = E_a I_a \end{aligned} \quad (1.13)$$

该式说明: P_{em} 一方面代表电动势为 E_a 的电源输出电流 I_a 时所发出的电功率, 一方面又代表转子以转速 n 旋转时克服电磁转矩 T_{em} 所消耗的机械功率。

对式(1.8)两边分别乘以电枢电流 I_a 得:

$$E_a I_a = U I_a + R_a I_a^2 = P_2 + P_{Cua} \quad (1.14)$$

式中: P_2 是直流发电机输出给负载的电功率; P_{Cua} 是电枢回路绕组电阻及电刷与换向器表面接触电阻上的电损耗, 称为铜损。

除上述各种损耗之外, 还有杂散损耗 P_{ad} (自励发电机还有励磁损耗, 用 P_f 表示)。因此, 发电机的功率平衡方程为:

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{em} + P_0 + P_{ad} = P_2 + P_{Cua} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad} \\ &= P_2 + \sum P \end{aligned} \quad (1.15)$$

式中: $\sum P$ 为发电机的总损耗。

直流发电机的功率平衡关系可用图 1.1 表示。

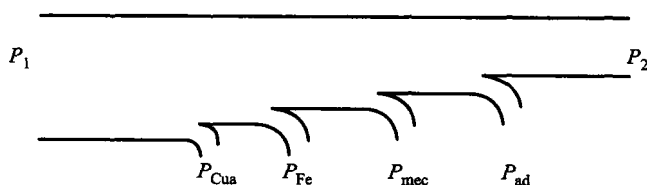


图 1.1 直流发电机的功率流程图

直流电机在一定的条件下, 可作为发电机运行, 把机械能转变为电能供给直流负载; 而在另外的条件下又可把电能转换为机械能拖动机械负载, 这就是直流电机的可逆原理。

直流电机的运行状态取决于电磁转矩与拖动转矩及电磁功率与机械功率之间的关系。当电磁转矩大于机械转矩时, 电磁功率转换为机械功率拖动机械负载, 电机作为电动机运行; 当电磁转矩小于机械转矩时, 机械功率转换为电磁功率供给直流电负载, 电机作为发电机运行。当电机作为电动机运行时, 电磁转矩为拖动性转矩; 当电机作为发电机运行时, 电磁转矩为制动性转矩。

根据电动机惯例, 电动机的基本方程如下:

$$U = E_a + R_a I_a \quad (1.16)$$

$$T_{em} = T_2 + T_0 \quad (1.17)$$

式中: T_2 为负载转矩; T_0 为空载转矩。

把式(1.16)两边同时乘以 I_a 可得功率平衡方程:

$$P_1 = P_{em} + P_{Cua} \quad (1.18)$$

式中: $P_1 = UI_a$, 为直流电源输入给电动机的电功率; $P_{em} = E_a I_a$, 为电磁功率; $P_{Cua} = R_a I_a^2$, 为电枢回路铜损耗。

把式(1.17)两端同时乘以机械角速度 Ω 可得:

$$P_{em} = P_2 + P_0 \quad (1.19)$$

式中: $P_2 = T_2 \Omega$, 为电机输出的机械功率; $P_0 = T_0 \Omega$, 为空载损耗。

综合上述各式可得:

$$P_1 = P_{em} + P_{Cua} = P_2 + P_{Cua} + P_{mec} + P_{Fe} + P_{ad} = P_2 + \sum P \quad (1.20)$$

式中: P_{ad} 为附加损耗。

直流电动机的功率平衡关系可用图 1.2 表示。

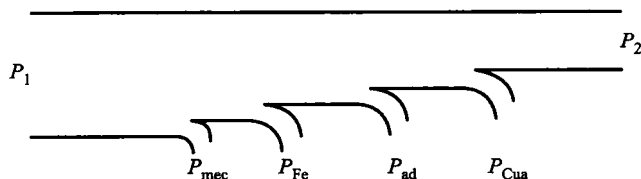


图 1.2 直流电动机功率流程图

四、典型例题分析

【例 1.1】 已知一台直流电机的数据为:单叠绕组,极数 $2p=4$,电枢总元件数 $N=400$,电枢电流 $I_a=10\text{ A}$,每极磁通 $\Phi=2.1 \times 10^{-2}\text{ Wb}$,求转速 $n=1\ 000\text{ r/min}$ 时的电枢电动势为多少?此时的电磁转矩又为多少?

解: 计算电枢电动势和电磁转矩主要根据下述计算公式:

$$E_a = C_e \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n, T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a$$

在计算过程中首先要弄清电机的绕组形式,是单波绕组还是单叠绕组,即公式中的 a 为多少。单波绕组的 $a=1$,单叠绕组的 $a=p$,对于本题 $a=2$ 。将已知数据代入上述公式即可算出电枢电动势和电磁转矩。

$$E_a = C_e \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{2 \times 400}{60 \times 2} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 1\ 000\text{ V} = 140\text{ V}$$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{2 \times 400}{2 \times 3.14 \times 2} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 10\text{ N}\cdot\text{m} = 13.4\text{ N}\cdot\text{m}$$

【例 1.2】 一台并励直流电动机的额定数据为: $P_N=17\text{ kW}$, $I_N=92\text{ A}$, $U_N=220\text{ V}$, $n_N=1\ 200\text{ r/min}$,电枢回路总等效电阻 $R_a=0.1\ \Omega$,励磁回路电阻 $R_f=110\ \Omega$,试求:

- (1) 额定运行时的电枢电动势；
- (2) 额定负载时的电磁转矩；
- (3) 电动机在额定负载时的效率。

解：此类问题是根据电动机的方程式求解电动势和电磁转矩，相关方程式如下：

$$U = E_a + R_a I_a, E_a = U - R_a I_a$$

$$C_T \Phi = 9.55 C_e \Phi = 9.55 E_a / n_N$$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a$$

将已知数据代入上式，可解出电动势和电磁转矩。

$$E_a = U - R_a I_a = (220 - 0.1 \times 92) \text{ V} = 210.8 \text{ V}$$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = (9.55 E_a / n_N) I_a = (9.55 \times 210.8 / 1200) \times 92 \text{ N} \cdot \text{m} = 154 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\text{输入功率: } P_1 = I_N U_N + U_N^2 / R_1 = (220 \times 92 + 220^2 / 110) \text{ kW} = 20.68 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{P_N}{P_1} \times 100\% = \frac{17}{20.68} \times 100\% = 82.2\%$$

五、部分思考题与习题解答

【1.6】 已知一台四极的直流发电机，电枢绕组是单叠绕组，如果在运行时去掉一个刷杆或丢掉相邻的两个刷杆，问对这台电机有何影响？若这台电机的电枢绕组是单波绕组情况又如何？

答：电枢绕组为单叠绕组时，运行时去掉一个或相邻两个电刷，并联支路数减少一半，电枢电流将减少一半。

电枢绕组为单波绕组时，并联支路数不受影响，电枢电流不变，但每个电刷通过的电流将增大，致使换向困难。

【1.7】 一台两极直流电机，主极不加励磁电流，只在电刷通入直流电流且电枢以一定的转速旋转（由别的原动机拖动），问电枢导体切割电枢磁通产生的气隙磁场是否感生电动势？电刷两端得到总的感应电动势为多少？

答：感应电动势（参见图 1.3）。

电刷两端得到总的感应电动势为零。

【1.8】 电磁转矩与什么因素有关？如何确定电磁转矩的实际方向？

答：由 $T_{em} = C_T \Phi I_a$ 知：对于已制造好的直流电机，其电磁转矩与电枢电流和气隙磁通的乘积成正比。

可用左手定则判断电枢导体的受力方向，从而确定电磁转矩的实际方向。对于直流发电机而言，电磁转矩为制动转矩，与转子转向相反；而对于直流电动机而言，电磁转矩为驱动性质，与转子转向相同。

【1.14】 并励直流发电机正转时如能自励，问反转时是否还能自励？如果把并励绕组两头对调，且电枢反转，此时是否能自励？

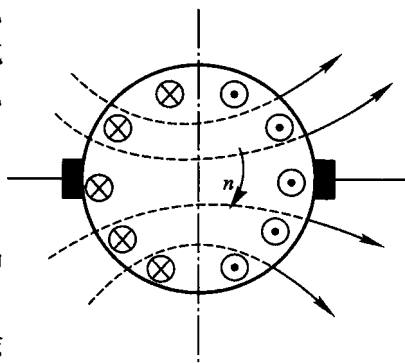


图 1.3 题 1.7 图

答：并励直流发电机正转时能自励，反转时则不能自励。如果把并励绕组两头对调，且电枢反转，此时能自励。

【1.15】 根据换向的电磁理论，如何得到直线换向？直线换向时电刷下的火花情况如何？什么是延迟换向？延迟换向严重时电刷下有没有火花出现？

答：换向元件里合成电动势 Σe 为零时， $i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right)$ ，换向元件里的换向电流随时间线性变化，这种换向称为直线换向。

直线换向时不产生火花。

换向过程中换向元件里的合成电动势大于零，使换向电流变化延缓，不再是线性的，出现了电流延迟现象，这时的换向称为延迟换向。

延迟换向时电刷下产生电火花。

【1.16】 一台直流发电机额定数据为：额定功率 $P_N = 10 \text{ kW}$ ，额定电压 $U_N = 230 \text{ V}$ ，额定转速 $n_N = 2850 \text{ r/min}$ ，额定效率 $\eta_N = 0.85$ 。求它的额定电流及额定负载时的输入功率。

解：额定电流：

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{10 \times 10^3}{230} \text{ A} = 43.48 \text{ A}$$

额定负载时的输入功率：

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{10}{0.85} \text{ kW} = 11.76 \text{ kW}$$

【1.17】 一台直流电动机的额定数据为：额定功率 $P_N = 17 \text{ kW}$ ，额定电压 $U_N = 220 \text{ V}$ ，额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$ ，额定效率 $\eta_N = 0.83$ 。求它的额定电流及额定负载时的输入功率。

解：额定负载时的输入功率：

$$P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{17}{0.83} \text{ kW} = 20.48 \text{ kW}$$

额定电流：

$$I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{20480}{220} \text{ A} = 93.10 \text{ A}$$

【1.18】 已知直流电机的极对数 $p = 2$ ，槽数 $Z = 22$ ，元件数 S 及换向片数 K 都等于 22，连成单叠绕组。

(1) 计算绕组各节距；

(2) 画出绕组展开图、磁极及电刷的位置；

(3) 求并联支路数。

解：(1) 绕组节距计算

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{22}{4} - \frac{2}{4} = 5$$

$$y = y_K = 1$$

$$y_2 = y_1 - y = 5 - 1 = 4$$

(2) 绕组展开图如图 1.4 所示(采用右行短距绕组)

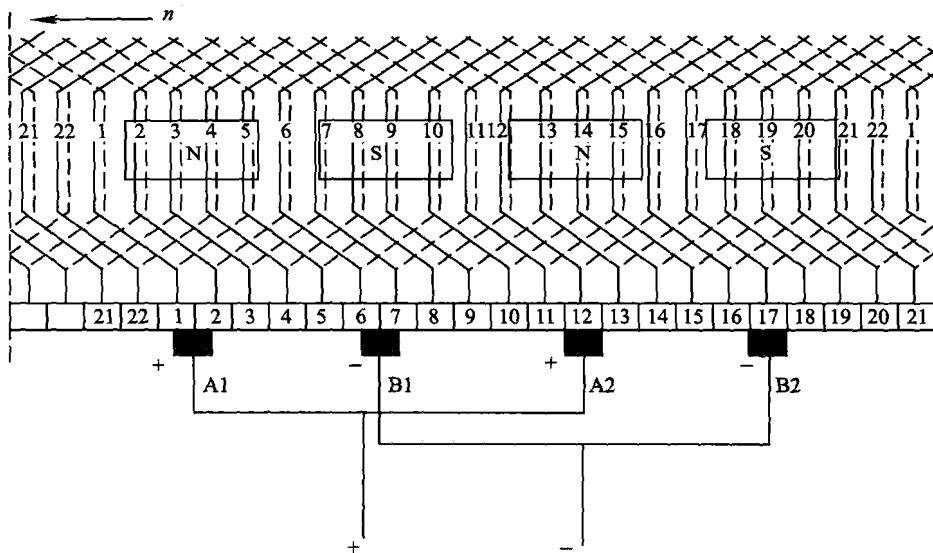


图 1.4 题 1.18 图

(3) 并联支路数如下:

$$a = p = 2, 2a = 4$$

【1.19】 已知直流电机的数据为: $p = 2, Z = S = K = 19$, 连成单波绕组。

(1) 计算各节距;

(2) 画出绕组展开图、磁极及电刷位置;

(3) 求并联支路数。

解: (1) 绕组节距计算

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \epsilon = \frac{19}{4} + \frac{1}{4} = 5$$

$$y = y_K = \frac{K - 1}{p} = \frac{19 - 1}{2} = 9$$

$$y_2 = y - y_1 = 9 - 5 = 4$$

(2) 绕组展开图如图 1.5 所示(采用左行长距绕组)

(3) 并联支路数如下:

$$2a = 2$$

【1.20】 一台直流电机的极对数 $p = 3$, 单叠绕组, 电枢绕组总导体数 $N = 398$, 气隙每极磁通 $\Phi = 2.1 \times 10^{-2} \text{ Wb}$, 当转速分别为 $n = 1500 \text{ r/min}$ 和 $n = 500 \text{ r/min}$ 时, 求电枢绕组的感应电动势。

解: (1) $n = 1500 \text{ r/min}$ 时

$$E_a = C_e \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{3 \times 398}{60 \times 3} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 1500 \text{ V} = 209 \text{ V}$$

(2) $n = 500 \text{ r/min}$ 时

$$E_a = C_e \Phi n = \frac{pN}{60a} \Phi n = \frac{3 \times 398}{60 \times 3} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 500 \text{ V} = 69.65 \text{ V}$$

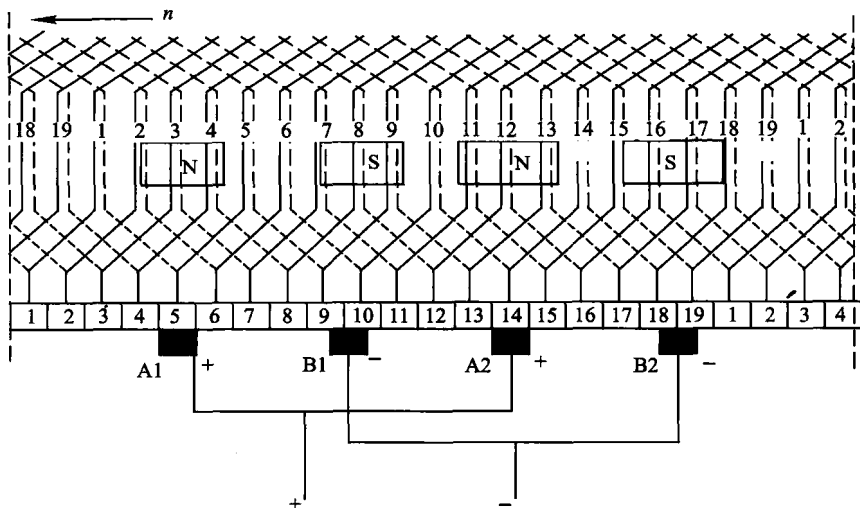


图 1.5 题 1.19 图

【1.21】 同上题数据, 设电枢电流 $I_a = 10 \text{ A}$, 磁通 Φ 保持不变, 问其电磁转矩为多大? 如果把此电枢绕组由单叠绕组改为单波绕组, 并保持支路电流不变, 问这种情况下的电磁转矩又为多大?

解: (1) 电枢绕组为单叠绕组 $a = 3$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{3 \times 398}{2 \times 3.14 \times 3} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 10 \text{ N} \cdot \text{m} = 13.31 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 电枢绕组为单波绕组 $a = 1$

$$T_{em} = C_T \Phi I_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = \frac{3 \times 398}{2 \times 3.14 \times 1} \times 2.1 \times 10^{-2} \times 10 \text{ N} \cdot \text{m} = 39.93 \text{ N} \cdot \text{m}$$

【1.22】 一台直流发电机的额定容量 $P_N = 17 \text{ kW}$, 额定电压 $U_N = 230 \text{ V}$, 额定转速 $n_N = 1500 \text{ r/min}$, 极对数 $p = 2$, 电枢总导体数 $N = 468$, 单波绕组, 气隙每极磁通 $\Phi = 1.03 \times 10^{-2} \text{ Wb}$, 试求:

(1) 额定电流;

(2) 电枢电动势。

解: (1) 额定电流

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{17 \times 10^3}{230} \text{ A} = 73.91 \text{ A}$$

(2) 电枢电动势

$$E_a = C_e \Phi n_N = \frac{pN}{60a} \Phi n_N = \frac{2 \times 468}{60 \times 1} \times 1.03 \times 10^{-2} \times 1500 \text{ V} = 241 \text{ V}$$

【1.23】 一台并励直流发电机的数据为: 额定电压 $U_N = 230 \text{ V}$, 额定电枢电流 $I_{aN} = 15.7 \text{ A}$, 额定转速 $n_N = 2000 \text{ r/min}$, 电枢回路电阻 $R_a = 1 \Omega$ (包括电刷接触电阻), 励磁回路总电阻 $R_f = 610 \Omega$ 。将这台发电机改为电动机运行, 并联在 220 V 的直流电源上, 求当电动机电枢电流与发电机额定电枢电流相同时, 电动机的转速为多少 (电刷放在几何中性线上, 不考虑电枢反应及磁