

电力拖动原理

李浚源 主编

华中工学院出版社

内 容 提 要

本书主要叙述电力拖动的基本理论,具有《电机学》和《电力拖动基础》的基本内容。全书共三篇二十一章,包括直流电机原理、直流电力拖动基础、变压器、交流电机原理、交流电力拖动基础及电力拖动系统中电动机的选择等六个部分。各章均有小结,并附有若干习题及思考题。

本书在章节安排、内容选择和讲述方法等方面均作了一些新的探索,注意加强专业针对性,力求少而精,突出重点,减少学时,以便更好地为专业培养目标服务和有利于专业内容的更新。

本书既可作为高等院校、电视大学及业余工大工业自动化专业的教材,也可供有关工程技术人员参考和维修电工自学。

电 力 拖 动 原 理

李浚源 秦 忆 编

责任编辑 殷伯明

*

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售

湖北省天门县印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 472,000

1983年12月第1版 1983年12月第1次印刷

印数: 1—10,000

统一书号: 15255-006 定价: 2.10元

前 言

本书根据华中工学院自编讲义《电机原理及应用》中的拖动部分（1972年校内印刷）和《电机原理及应用——电机原理部分修改稿》（1978年校内印刷）编写而成。

全书共三篇二十一章，包括直流电机原理、直流电力拖动基础、变压器、交流电机原理、交流电力拖动基础及电动机选择六个部分，具有《电机学》和《电力拖动基础》的基本内容。

原讲义与传统的《电机学》和《电力拖动基础》教材相比，在章节安排、内容选择和讲述方法等方面均有较大的改动。在章节安排上，将电力拖动分为直流电力拖动和交流电力拖动两部分，分别置于直流电机和交流电机的基本工作原理之后，并将阐述的重点放在电动机运行中的电磁过程和机电过程上。这样既加强了《电机学》和《电力拖动基础》之间的联系，又消除了它们之间在内容上的不必要的重复。在内容选择上的变动如变压器部分，在讲清了基本理论以后，主要就着眼于自动控制系统中常用特殊变压器的分析。这样，既有助于培养学生应用基本理论分析具体问题的能力，又加强了本课程与后续课程——《自动控制系统》和《半导体变流技术》之间的联系。在问题的阐述上也作了一些探索。例如分析电机绕组时，均从最简单的模型电机的绕组开始，分析它的缺点并探讨如何逐步克服这些缺点的方法，然后再确定实际的绕组形式。这样，既便于讲清问题的来龙去脉，也较符合学生的认识过程。多年的教学实践证明，上述改革，加强了教材的专业针对性。为了使内容少而精，本书删除了原讲义中与专业联系不大和已失去实际意义的部分（如异步电动机绕组的电势分析，直流电动机电枢串接附加电阻分级起动等），并适当增选了一些反映本学科发展情况的材料，如交流变频调速的发展动向等。

我们认为教材内容的更新，除应注意介绍技术上的进步外，还应介绍新的分析方法，本书在这方面作了一些尝试，例如在定性分析拖动系统的运行时引用了控制理论中的“状态”的概念。将控制理论的分析方法逐步应用于本课程，不仅可更密切本课程与后续课程之间的联系，而且能更好地阐明各类电机的共同规律。

本书可作为高等院校、电视大学及业余大学工业自动化专业的教材或教学参考书，也可供有关专业的工程技术人员参考和维修电工自学。

书中第十四、十五、十六、十七及第十九章由秦忆执笔，其余各章及附录由李浚源执笔并任主编。

华中工学院电机教研室陶醒世副教授仔细审阅了全部书稿，并提出了不少宝贵的意见，在此谨致以衷心的感谢。对本书编写过程中参阅过的有关著作和文献资料的作者（主要参考书目附后）在此也一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中错误在所难免，殷切希望读者批评、指正。

编 者

1982年10月29日

目 录

绪 论

第一篇 直流电机与直流电力拖动基础

第一章 直流电机的基本工作原理和基本结构	(3)
§1-1 直流电机的基本工作原理	(3)
§1-2 直流电机的基本结构和额定数据	(4)
§1-3 小结	(7)
习题与思考题	(7)
第二章 直流电机的磁路和绕组	(9)
§2-1 直流电机的主极磁场	(9)
§2-2 直流电机的电枢绕组	(10)
§2-3 直流电机的励磁方式	(18)
§2-4 小结	(19)
习题与思考题	(19)
第三章 直流电动机	(21)
§3-1 直流电动机带负载后的磁场	(21)
§3-2 直流电动机的电磁转矩	(24)
§3-3 直流电动机中的电枢反电势	(25)
§3-4 直流电动机的电势平衡关系和功率平衡关系	(25)
§3-5 直流电动机的转速特性和机械特性	(27)
§3-6 直流电动机的换向	(31)
§3-7 小结	(35)
习题与思考题	(36)
第四章 直流发电机	(37)
§4-1 直流发电机运行中的机电过程	(37)
§4-2 直流发电机的运行特性	(39)
§4-3 直流发电机的自动	(40)
§4-4 小结	(41)
习题与思考题	(41)
第五章 自动控制用直流电机	(43)
§5-1 直流伺服电动机	(43)
§5-2 直流测速发电机	(43)
§5-3 交轴磁场电机扩大机	(44)
§5-4 宽调速直流伺服电动机	(48)
§5-5 小结	(50)
习题与思考题	(50)
第六章 电力拖动系统的力学基础	(51)
§6-1 拖动系统的运动方程	(51)
§6-2 力、转矩、运动质量、转动惯量和飞轮矩的折算	(52)
§6-3 生产机械的机械特性	(55)
§6-4 拖动系统稳定运行的条件	(57)
§6-5 小结	(57)
习题与思考题	(58)

第七章 直流电动机的转速调节	(61)
§7-1 直流他励电动机的人为机械特性	(62)
§7-2 直流他励电动机的基本调速方式	(64)
§7-3 选择调速方式的基本依据	(67)
§7-4 常用调速系统介绍	(73)
§7-5 小结	(77)
习题与思考题	(78)
第八章 直流电动机的制动运行状态	(80)
§8-1 制动状态下的基本物理现象	(80)
§8-2 直流他励电动机的反馈制动	(80)
§8-3 直流他励电动机的反接制动	(83)
§8-4 直流他励电动机的能耗制动	(85)
§8-5 直流串励和复励电动机的制动运行状态	(88)
§8-6 小结	(89)
习题与思考题	(90)
第九章 电力拖动系统的过渡过程	(92)
§9-1 直流他励电动机起动的过渡过程	(92)
§9-2 发电机-电动机组的过渡过程	(98)
§9-3 缩短拖动系统过渡过程时间的途径	(102)
§9-4 小结	(103)
习题与思考题	(103)
第二篇 变 压 器	
第十章 变压器的基本工作原理	(105)
§10-1 变压器的一般介绍	(105)
§10-2 变压器的空载运行	(103)
§10-3 变压器的负载运行	(112)
§10-4 变压器的运行特性	(119)
§10-5 三相变压器	(121)
§10-6 小结	(130)
习题与思考题	(131)
第十一章 控制系统常用变压器	(133)
§11-1 整流变压器	(133)
§11-2 脉冲变压器	(140)
§11-3 电流互感器	(144)
§11-4 直流电流互感器	(147)
§11-5 小结	(151)
习题与思考题	(152)
第三篇 交流电机与交流电力拖动基础	
第十二章 三相异步电动机的基本工作原理和结构	(153)
§12-1 三相异步电动机最基本的工作原理	(153)
§12-2 三相异步电动机的主要结构部件	(156)
§12-3 三相异步电动机的铭牌数据	(158)
§12-4 小结	(158)
习题与思考题	(159)
第十三章 三相异步电动机的绕组和磁势	(160)

§13-1 集中绕组的缺陷	(160)
§13-2 用分布绕组改善磁势波形	(161)
§13-3 用双层短距绕组改善磁势波形	(168)
§13-4 交流绕组磁势的性质	(173)
§13-5 三相异步电动机的定子磁场	(176)
§13-6 小结	(177)
习题与思考题	(178)
第十四章 三相异步电动机的工作原理	(179)
§14-1 转子不转时异步电动机内的物理过程	(179)
§14-2 转子旋转时异步电动机内的物理过程	(182)
§14-3 笼型转子的相数和极对数	(185)
§14-4 功率平衡与转矩平衡方程	(187)
§14-5 电磁转矩与转矩-转差率特性	(188)
§14-6 异步电动机的机械特性	(190)
§14-7 三相异步电动机的单相运行	(191)
§14-8 小结	(192)
习题与思考题	(193)
第十五章 三相异步电动机的起动	(194)
§15-1 三相异步电动机直接起动中的问题及解决起动问题的途径	(194)
§15-2 绕线转子异步电动机的起动方法	(195)
§15-3 绕线转子异步电动机起动电阻的计算	(197)
§15-4 笼型转子异步电动机的起动方法	(201)
§15-5 从电机制造上改善笼型转子异步电动机的起动特性	(204)
§15-6 小结	(206)
习题与思考题	(207)
第十六章 三相异步电动机的调速	(208)
§16-1 异步电动机改变转差率调速	(208)
§16-2 异步电动机改变极对数调速	(210)
§16-3 异步电动机的变频调速	(212)
§16-4 异步电动机的串级调速	(217)
§16-5 选择异步电动机调速方式的基本依据	(219)
§16-6 小结	(219)
习题与思考题	(220)
第十七章 异步电动机的制动运行状态	(221)
§17-1 异步电动机的反馈制动状态	(221)
§17-2 异步电动机的反接制动状态	(224)
§17-3 异步电动机的能耗制动状态	(227)
§17-4 小结	(230)
习题与思考题	(231)
第十八章 异步电动机的同速旋转(电轴)系统	(232)
§18-1 电轴系统的基本工作原理	(232)
§18-2 电轴系统中的功率关系	(235)
§18-3 电轴系统的单相整步	(237)
§18-4 带公共转子电阻的电轴系统	(239)

§18-5 带变频装置的电轴系统	(239)
§18-6 小结	(240)
习题与思考题	(240)
第十九章 同步电机	(241)
§19-1 同步电动机的结构及基本工作原理	(241)
§19-2 同步电动机的电势方程和相量图	(241)
§19-3 同步电动机的功率平衡与稳态功角特性	(242)
§19-4 同步电动机的工作特性和V形曲线	(244)
§19-5 同步电动机的起动	(246)
§19-6 小结	(247)
习题与思考题	(248)
第二十章 自动控制用特种交流电机	(249)
§20-1 单相异步电动机	(249)
§20-2 异步伺服电动机	(251)
§20-3 异步测速发电机	(252)
§20-4 自整角机	(253)
§20-5 旋转变压器	(257)
§20-6 步进电动机	(260)
§20-7 小结	(265)
习题与思考题	(266)
第二十一章 电力拖动系统中电动机的选择	(267)
§21-1 按发热条件选择电动机功率的基本依据	(268)
§21-2 电机发热和冷却的一般规律	(269)
§21-3 不同工作制下电动机额定功率的确定	(270)
§21-4 选择电动机功率的一些具体问题	(274)
§21-5 空载式重复短时工作制下飞轮对减小拖动电动机功率的作用	(278)
§21-6 笼型转子三相异步电动机允许小时接通次数	(279)
§21-7 电动机种类、电压、转速和结构型式的选择	(280)
§21-8 小结	(282)
习题与思考题	(284)
附 录	
附录A 电磁调速异步电动机	(286)
附A-1 电磁转差离合器的基本工作原理和基本结构	(286)
附A-2 电磁调速异步电动机的机械特性	(288)
附A-3 电磁调速异步电动机的其他特性	(289)
附A-4 电磁调速异步电动机的调速原理	(290)
附A-5 电磁调速异步电动机的调速性能	(291)
附A-6 电磁转差离合器的其他用途	(292)
附录B 单相串励换向器电动机	(293)
附B-1 单相串励换向器电动机的工作特点和结构特点	(293)
附B-2 单相串励换向器电动机的电磁转矩	(294)
附B-3 单相串励换向器电动机的机械特性	(295)
附B-4 单相串励换向器电动机的调速原理	(295)
主要参考文献	(296)

绪 论

马克思曾指出：“所有发达的机器都由三个本质上不同的部分组成：发动机，传动机构，工具机或工作机。”（引自《马克思恩格斯全集》第二十三卷，人民出版社一九七二年版，第四百一十页）。所谓拖动，就是使用各种原动机和传动机构使生产机械（工具机）产生符合人们要求的机械运动以完成一定的生产任务。以电动机作为原动机的拖动，就称为“电力拖动”。

蒸气机是大工业普遍使用的第一个原动机。十九世纪末，由解决照明问题开始，形成了电力工业部门。由于电能在生产、传输、分配、使用和控制等方面较之蒸气动力具有无可比拟的优点，所以电动机很快取代了蒸气机而成为生产机械的主要原动机。今天，电能已成为工农业生产中最主要的能量形式，因而作为机电能量变换主要工具的各类电机，在国民经济的各个部门中起着极为重要的作用，并使“电力拖动”成了一切工矿企业所遇到的课题。

电力拖动的发展，大体上经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动三个阶段。所谓成组拖动，就是一台电动机拖动一根天轴，然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械。这种拖动方式生产效率低，劳动条件差，一旦电动机发生故障，将造成成组的生产机械停车。所谓单电动机拖动，就是用一台电动机拖动一台生产机械，它虽较成组拖动前进了一步，但当一台生产机械的运动部分较多时，机械传动机构仍十分复杂。多电机拖动，即一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动，例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构，均分别由一台电动机拖动。这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构，而且控制灵活，为生产机械的局部自动化和全部自动化提供了有利条件。因此，现代电力拖动系统基本上均采用这种拖动形式。

随着社会生产力的不断提高，现代电力拖动系统已和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起。这样才能满足生产机械局部自动化和全部自动化的要求，如自动启动、制动、电动机转速自动调节、在负载和外部条件变化的情况下自动保持电动机转速恒定、按事先给定的程序或外部条件自动改变运行速度等。电子计算机的应用更进一步赋予电力拖动系统自寻最佳运行规律、自动适应运行条件和参数变化的能力。因此，今天的电力拖动实际上已经是自动化电力拖动系统的简称。然而，不论现代化自动电力拖动系统的结构如何复杂，从根本上讲它仍然是由原动机、配力机和工具机三个部分组成。研究其运行原理和运行特性是《电力拖动原理》的主要任务。

可见，《电力拖动原理》是工业自动化专业的一门重要专业基础课，它具有电机学中最基本的内容，同时又是电机学基本理论的进一步应用。它包括直流电机原理，直流电力拖动基础，变压器，交流电机原理，交流电力拖动基础和电力拖动系统中电动机的选择等六部分。本课的任务在于使学生从运行的观点上了解各类电机特别是电动机的基本工作原理和运行特性，进而熟练掌握电动机在各种运行状态下能量关系的计算和电动机调速的计算；了解电力拖动系统过渡过程的基本特征、改善过渡过程的途径、选择拖动系统电动机的基本原则以及电机和电力拖动的发展方向，从而为学习《半导体变流技术》、《自动控制系统》和《计算机控制技术》等后续课程打好基础。为了达到这一目的，本书各章还附有若干习题和

思考题，其中思考题的内容侧重于电机学的基本理论，计算题的内容侧重于电力拖动系统的基本原理，读者可根据实际需要选用。

最后必须指出，本课程既带有基础课性质，又兼有专业课性质，所以也可以说它是一门如何运用基础电工理论来解决实际工程问题的课程。因此在学习过程中既要弄清各种定义、定律和公式本身的含义，又要弄清它们所表达的实际电磁过程和机电过程，同时还必须掌握分析问题的方法的特点。鉴于实际问题中的客观情况往往比较复杂，在分析某一具体问题时，常常需要先作出若干必要的假定以使问题简化，然后再运用基本理论加以分析解决。虽然这样得出的结论有一定的近似性质，但只要近似的程度在工程误差允许的范围之内，就仍可认为它已足够准确地反映了实际的客观规律。当然，如有必要，还可在已得出主要结论之后再深入分析原来被忽略的次要矛盾对所得结论的影响，再作适当的修正。这也是解决工程实际问题所常用的分析方法，由于所得结论是建立在一定假定条件之上，因此在使用这些结论时必须注意不能超出假定条件的约束范围，否则可能会推导出错误的结论。

学习必须坚持理论与实践相结合的原则，因此一定数量的习题和实验都是重要的教学内容。为适应本教材的特点，实验内容可在参考文献[2]的绪论中所列实验的基础上作必要的增删，以尽可能加强实验的连贯性和综合性。为此，建议对直流拖动部分增加发电机-电动机组的实验，内容可包括起动、制动、强励、调速及调速性质的研究，建议对变压器部分安排如下实验：变压器基本电磁过程；正常工作状态下变压器的电流电压波形；三相变压器中电路和磁路对电流电压波形的影响；关于变压器的联接组；负载为整流网络时变压器的电流电压波形；脉冲变压器；直流互感器的研究。

第一篇 直流电机与直流电力拖动基础

直流电机，特别是直流电动机，是目前工矿企业中广泛使用的电机之一。一些对动态和静态性能要求较高的生产机械如轧钢机、造纸机、高精度金属切削机床等，一般都采用直流电动机作为拖动电机；要求较大的起动转矩和一定调速范围的生产机械如电气机车和城市电车，一般也采用直流电动机作为动力。可见，直流电动机在近代工业和生活中的地位是十分重要的。

第一章 直流电机的基本工作原理和基本结构

§ 1-1 直流电机的基本工作原理

直流电机是以导体在磁场中运动产生感应电势和载流导体在磁场中受力而实现机电能量转换的一种电磁机械。

当导体在恒定磁场中运动而“切割”磁感应线时，若磁感应强度、导体和导体的运动方向三者相互垂直，则导体内感应电势

$$e = Blv \quad [\text{伏}], \quad (1-1)$$

感应电势的方向由右手定则确定。上式中， B 为磁通密度[韦/米²]； l 为导体“切割”磁感应线部分的有效长度[米]； v 为导体相对于磁场的运动速度[米/秒]。

当处于磁场中的导体有电流通过时，磁场与电流相互作用将产生电磁力。若磁感应强度的方向与导体相互垂直，则作用于导体上的电磁力

$$f = Bli \quad [\text{牛顿}], \quad (1-2)$$

电磁力的方向由左手定则确定。上式中， i 为通过导体的电流[安]。

式(1-1)描述了机械量 v 和电量 e 的转换关系，它是发电机工作的基础。式(1-2)描述了电量 i 和机械量 f 两者之间的转换关系，它是电动机工作的基础。在完成机电量之间转换的过程中，磁场是一个重要的媒介。根据上述原理设计的一台最简单的直流电机，如图1-1所示。

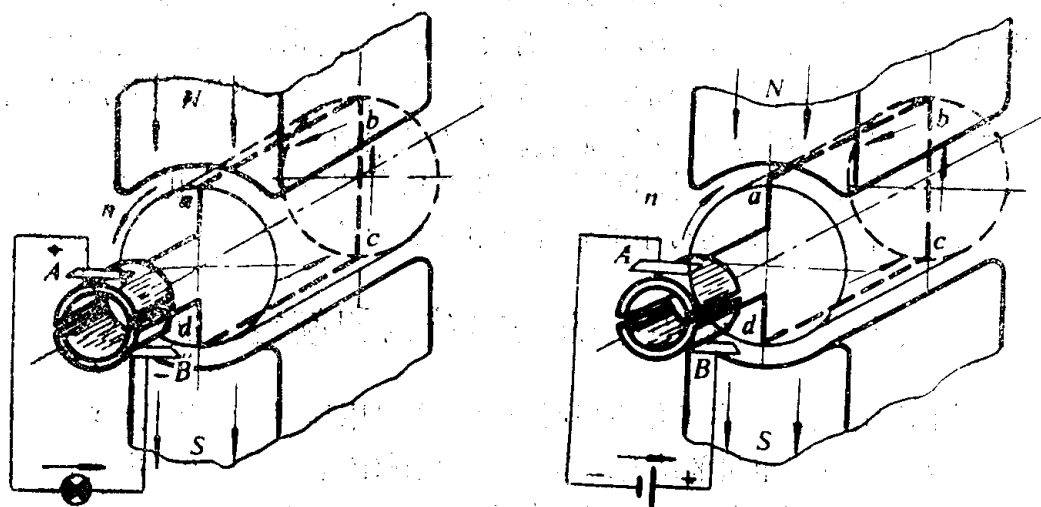


图1-1 最简单的直流发电机和直流电动机

a 发电机 b 电动机

图中, N 和 S 是安装在固定支架上的一对磁极, 构成电机的固定部分, 称为定子, 磁极间安装有一个圆形铁心, 其上装有线圈 $abcd$, 线圈的两个出线端分别接在两片称为换向片的铜片上。圆形铁心、线圈和换向片构成一个整件, 并安装在一转轴上, 构成电机的旋转部分, 称为电枢或转子。换向片与两把固定不动的电刷 A 、 B 相接触, 使旋转的线圈和固定不动的外部电路之间构成闭合的电路。定子与电枢间的空隙, 称为空气隙。

如果这台直流电机的电枢由另一台原动机带动, 并以固定角速度 Ω 沿一定方向旋转 (例如沿逆时针方向旋转, 如图 1-1a 所示), 则两个线圈边 ab 和 cd 就交替“切割” N 极和 S 极下的磁通, 而产生频率一定的交流电势。而且由于换向片和电刷的整流作用, A 电刷总是和处于 N 极下的线圈边相联, 在逆时针转向下其极性恒为正, B 电刷总是和处于 S 极下的线圈边相联, 在逆时针转向下其极性恒为负。此时, 若在 A 、 B 两端接上一定大小的负载, 则负载中将有一方向不变的电流通过, 并产生一定大小的直流输出功率, 从而实现了将原动机输入的机械功率转变为电机输出的电功率的能量转换。这时, 电机作为发电机运行。

如果将这台直流电机的 A 、 B 两端接至具有一定功率的直流电源, 则当直流电流经电刷和换向片流入线圈后, ab 和 cd 两边都变成了载流导体, 并均将受到电磁力 f 的作用。在图 1-1b 中的电源极性下, 按左手定则可判定此电磁力将推动电枢沿顺时针方向旋转。虽然每个线圈边中电流的方向是交变的, 但由于电刷和换向片的作用, 每个磁极下的线圈边中的电流及其所受电磁力的方向都是固定不变的。因此, 线圈边所受的电磁力将推动电枢沿固定方向持续运行, 并从转轴上输出一定大小的机械功率, 从而实现了将直流电源输入电功率转变为转轴上输出的机械功率的能量转换。这时, 电机作为电动机运行。

可见, 一台直流电机究竟是直流发电机还是直流电动机, 区别不在于电机本身的结构而在于输入功率的形式。如果输入功率是转轴上的机械功率, 电机即作为发电机运行, 并将这部分机械功率转换为电功率, 由电刷两端输出; 如果输入功率是电刷两端的电功率, 电机即作为电动机运行, 并将这部分电功率转换成机械功率, 由转轴上输出。

当电机作为发电机运行并向外部负载输出电功率时, 线圈边 ab 和 cd 都变成了载流导体, 它们在磁场中必然受电磁力的作用并产生转矩, 这就是隐藏在发电机中的电动机因素。若电枢沿逆时针方向旋转, 如图 1-1a 所示, 则根据左手定则, 可以判定电磁力产生的转矩沿顺时针方向作用于电枢, 而起着平衡外部拖动转矩、吸收机械功率的作用。当电机作为电动机运行、旋转着的线圈边“切割” N 和 S 极下的磁通时, 必然要在其中产生感应电势, 这就是隐藏在电动机中的发电机因素。若 A 、 B 电刷分别接外部电源的正负极 (见图 1-1b), 则根据右手定则可以判定, 在线圈与外部电源的闭合回路中, 上述感应电势的作用方向与外部电源电压方向相反, 而起着平衡外部电源电压、吸收输入电功率的作用。

发电机原理和电动机原理的这种相互矛盾又相互依存的关系, 是电机实现机电能量转换的基础, 也是正确理解直流电机运行中的各种机电现象的关键。

§1-2 直流电机的基本结构和额定数据

图 1-1 只是为阐明电机的基本工作原理而引用的电机原理图。实际的直流电机结构比它复杂得多, 图 1-2 是实际直流电机的结构示意图。从机械结构上看, 实际电机也分为静止 (定子) 与旋转 (电枢或转子) 两大部分, 定子的作用是建立电机的磁场并作为电机的机械支撑, 它包括主磁极、换向极、电刷装置、机枢绕组、换向器、风扇、转轴等部件。图 1-3 是一台直流电机的剖面图。

一、直流电机的主要部件

1. 主磁极 主磁极又称主极，它的作用是建立直流电机的主极磁场。在普通直流电机中，它是由一块铁心套装上励磁绕组组成的电磁铁，如图1-4所示。少数特殊直流电机的主磁极由永久磁铁制成。磁极下面的扩展部分称为极靴，其作用是使主极磁通沿极下气隙空间尽可能均匀地分布。各主极上的励磁线圈大多采用串联联接，以保证每极励磁电流严格相等。线圈接线时应保证接上励磁电源后，相邻磁极的极性相反。

2. 换向极 换向极安装在定子上的两个主极之间，也由铁心和励磁绕组两部分构成。励磁线圈与电枢绕组串联，目的是改善电机的换向条件（参阅第三章）。

3. 机座 机座既是电机的机械支撑，又是电机磁路的一部分。它通常由铸钢铸成或由钢板焊成。

4. 电枢铁心 电枢铁心用来安放电枢绕组元件，同时又是电机磁路的一部分。由于它与主极磁通之间存在着相对运动，因此为减小铁心内的涡流损耗，电枢铁心由涂有绝缘的硅钢片迭压而成。容量较大的电机，电枢上还设有径向通风沟和轴向通风孔，以改善散热条件。

5. 电枢绕组 电枢绕组由绕组元件组成，绕组元件由铜线或铝线预先绕制而成，嵌放在电

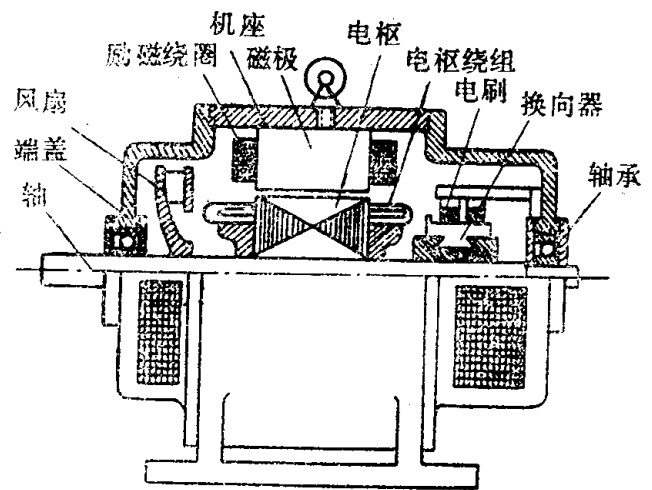


图1-2 直流电机结构示意图

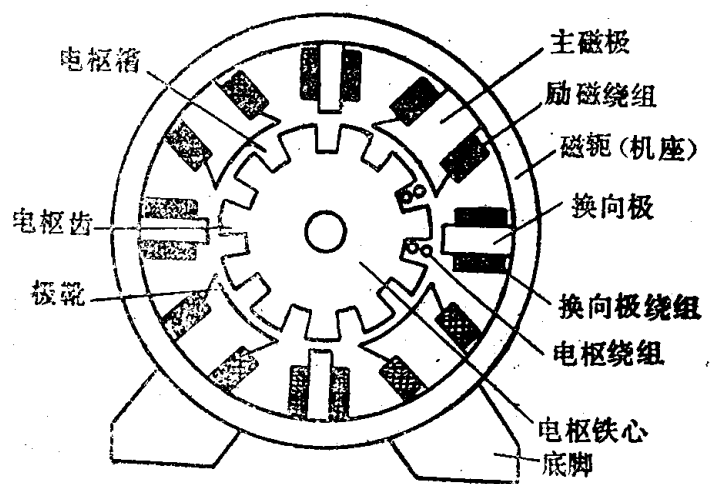


图1-3 直流电机剖面图

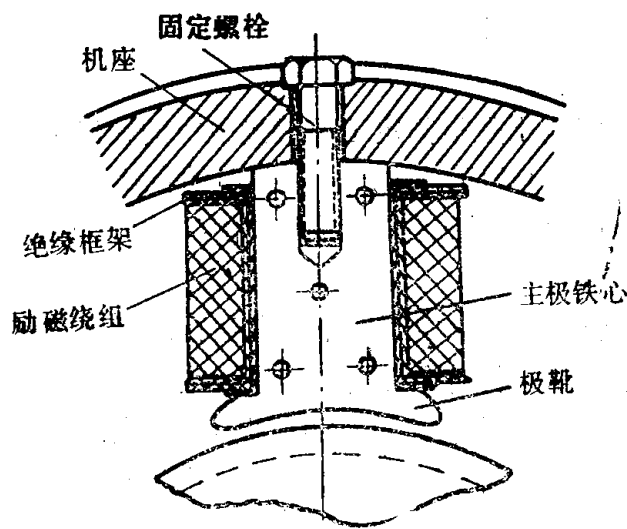


图1-4 主磁极

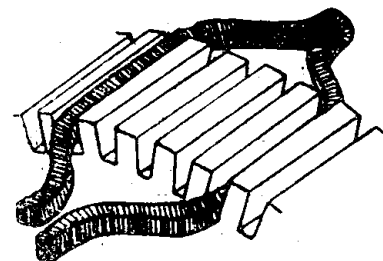


图1-5 绕组元件在槽中的位置

枢铁心槽中（如图1-5所示），并用槽楔和玻璃丝带固紧，每个元件的两个出线端则分别接在

两个换向片上，并通过换向片将各个绕组元件按一定规律联接在一起。元件在电枢槽中的部分称为元件边，在槽外的部分称为端接部分。一个元件的两条元件边中，放在电枢槽上半部分的，称为上层边；放在槽的下半部分的，称为下层边。元件可能是单匝的，也可能是多匝的。若元件匝数为 W_s ，则一个元件边中包含 W_s 根导体。元件与槽壁之间，上、下元件边之间，都必须有可靠的绝缘，如图1-6所示。

6. 换向器 换向器由许多相互绝缘的换向片组成，并由固紧机构固定成一个整体，如图1-7所示。小型直流电机中的换向器也有用环氧树脂浇铸成一个整体的。在直流发电机中，

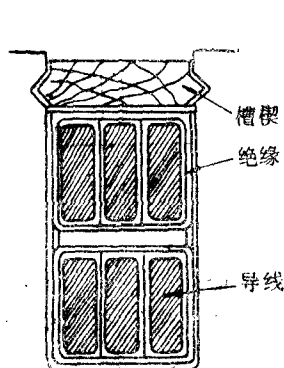


图1-6 电枢槽的截面图

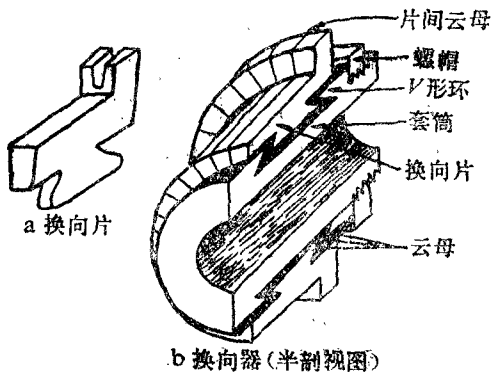


图1-7 换向片和换向器

a 换向片; b 换向器(半剖视图)

换向器的作用是将电枢绕组中的交变电势整流成电刷上的直流电势；在直流电动机中，它的作用是将外部的直流电流变换为电枢绕组元件内的交变电流，使每个主极下的元件边中电流方向一致，保证电动机能产生恒定方向的转矩。

7. 电刷装置 电刷装置由电刷、刷握、刷杆和刷杆座组成；起联接电枢电路与外电路的作用。电刷是以石墨为主要材料制成的导电块，安放在刷握内，并由弹簧压在换向片表面。刷握用螺钉固紧在刷杆上。为便于调整电刷的位置，全部刷杆都装在同一个刷杆座上，以便在确定了电刷的正确位置后，用螺钉将其固紧在机座或端盖上。

二、直流电机的额定数据

为保证电机的可靠运行和具有良好的性能，电机制造厂根据国家标准和运行时的技术要求规定了电机的额定工作情况，简称额定工况。电机在额定工况下的运行数据称为额定数据，也称铭牌数据，主要有：

1. 额定电压 U_N [伏] 对于直流发电机，额定电压是指额定工况下发电机的输出电压；对于直流电动机，是指额定工况下加在电动机电枢上的工作电压。某些电动机铭牌上的电压有三个数字，如185/220/320伏，它表示该电动机的正常工作电压为220伏，但在180伏和320伏的电压下也能工作。

2. 额定电流 I_N [安] 对直流发电机额定电流是指在额定工况下长期运行时能向负载提供的最大电流，对直流电动机是指在额定工况下长期运行时允许输入的最大电枢电流。

3. 额定功率 P_N [千瓦或瓦] 额定功率是指电机在安全、可靠的前提下，长期运行时所允许输出的最大功率。对直流电动机是指其轴上输出的机械功率；对直流发电机是指其出线端上输出的电功率。

直流发电机的额定功率等于其额定电压和额定电流的乘积。直流电动机的额定功率等于额定电压、额定电流和额定工况下电动机的运行效率 $\eta_N\%$ 的乘积。

4. 额定转速 n_N [转/分] 额定转速是指电动机在额定工况下的运行速度。

此外, 电动机中额定值的概念还可推广到额定转矩 M_N , 它是额定工况下电动机轴上的输出转矩, 且

$$M_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} [\text{牛顿} \cdot \text{米}], \quad (1-3)$$

式中, P_N 的单位为千瓦。

式(1-3)是电力拖动系统中常用的计算公式之一。

§1-3 小 结

直流电机, 是以导体在磁场中运动产生感应电势和载流导体在磁场中受力为基础来实现机电能量转换的。

1. $e = Blv$ 描述了机械量 v 和电量 e 两者之间的转换关系, 是发电机工作的基础。 $f = Bl i$ 描述了电量 i 和机械量 f 两者之间的转换关系, 是电动机工作的基础。

2. 感应电势 e 和电磁力 f 同时出现在同一导体中, 即发电机中隐藏着电动机的因素, 电动机中隐藏着发电机的因素。一台直流电机究竟是直流发电机还是直流电动机, 区别不在于电机本身的结构而在于输入功率的形式。如果输入功率是转轴上的机械功率, 电机即作发电机运行, 并将这部分功率转换成电功率由电刷两端输出; 如输入功率是电刷两端的电功率, 电机即作为电动机运行, 并将这部分功率转换成机械功率由转轴上输出。因此, 发电机和电动机不应视为两种不同类型的电机, 而应看作是同一台电机的两种不同运行方式。

3. 为实现机电能量转换, 直流电机的结构应包括定子与转子两大部分。定子用于建立磁场, 并作为机械支撑; 转子也称电枢, 用于嵌放绕组元件。定子和转子之间存在着一定的空气隙。

学完本章后, 可通过现场参观熟悉直流电机各主要部件的安装方式和作用。

习题与思考题

1. 试将 $e = -W \frac{d\Phi}{dt}$ 与 $e = Blv$ 两式统一起来, 并指出各自的适用范围。

2. 对直流发电机, 为了将交流电势变换成直流电势, 需要采用换向器。但直流电动机中, 外加电压本身已是直流电压, 为什么仍须采用换向器?

3. 为什么直流电动机的转子需用表面带绝缘层的硅钢片迭压而成, 而定子则可以不用?

4. 已知某直流电动机的铭牌数据如下: $P_N = 7.5$ 千瓦, $U_N = 220$ 伏, $n_N = 1500$ 转/分, $\eta_N = 88.5\%$, 试求该电机的额定电流和额定转矩。

5. 一台直流发电机, 其部分铭牌数据如下: $P_N^* = 180$ 千瓦, $U_N = 230$ 伏, $n_N = 1450$ 转/分, $\eta_N = 89.5\%$, 求:

(1) 该发电机的额定电流。

(2) 电流保持为额定值而电压下降为100伏时原动机的输出功率。(设此时 $\eta\%$ 仍等于 $\eta_N^*\%$)

6. 图1-8中, D_1 和 D_2 两根相距0.2米的平行金属导轨, 与水平面成 30° 的倾角; G 为一根可在导轨上自由滑动的金属棒, 质量 $M = 4.5$ 克。整个机构处在 $B = 0.2$ 韦/米²、方向与水平面垂直的均匀磁场中。图1-8a中, 两导轨之间接电压 $U = 2.5$ 伏、内阻 $R_1^* = 2$ 欧的直流电源, 极性如图中所示; 图1-8b中, 两导轨之间接 $R_2^* = 0.1$ 欧的电阻。金属棒和导轨间的接触电阻忽略不计, 摩擦力为零。那么

(1) 上述两种情况下, 当金属棒处于匀速运动状态时, 其运行速度 v 、铜棒中的感应电势 e 和电流 i 各

为多少？方向如何？

(2) 试就本题的结果说明发电机原理和电动机原理同时存在于同一电机中。

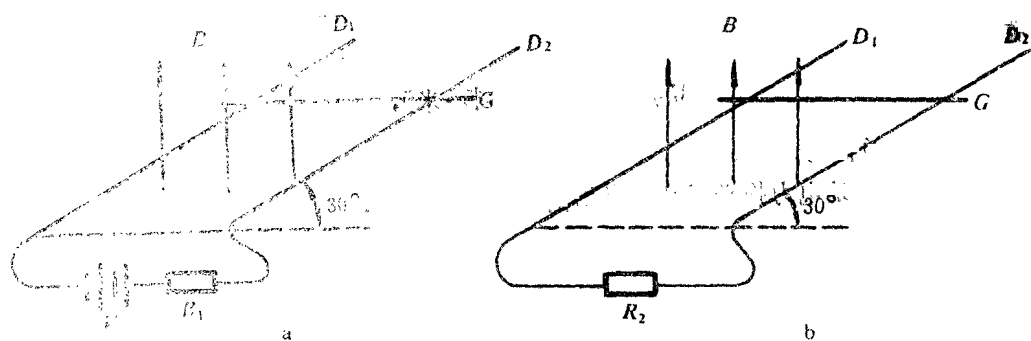


图1-8 习题6附图

第二章 直流电机的磁路和绕组

磁场是电机实现能量转换的媒介，电机的运行性能在很大程度上与磁场的特性有关；电枢绕组是直流电机的主要电路部分，是电机实现能量转换的枢纽。

§ 2-1 直流电机的主极磁场

仅由主磁极建立的磁场，称为直流电机的主极磁场。主极磁通的路径如图 2-1 中带箭头的虚线所示，据磁路欧姆定律，在此磁路上有

$$2F_0 = \Phi_0 R_m, \quad (2-1)$$

式中， $F_0 = I_f W_f$ 为一个主极建立的励磁磁势（ W_f 为一个主极励磁绕组的匝数， I_f 是通过此绕组的励磁电流）； Φ_0 为一个主极的磁通量， R_m 为磁路上包括空气隙和铁心的总磁阻。式（2-1）给出了励磁磁势与主极

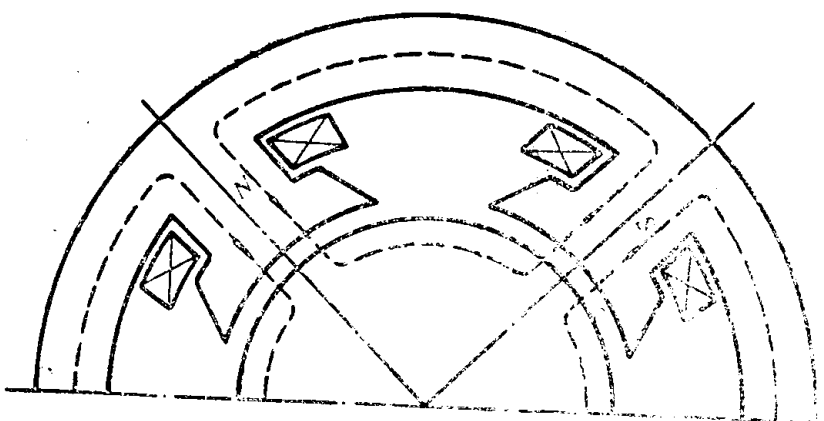


图2-1 直流电机主极磁通的路径

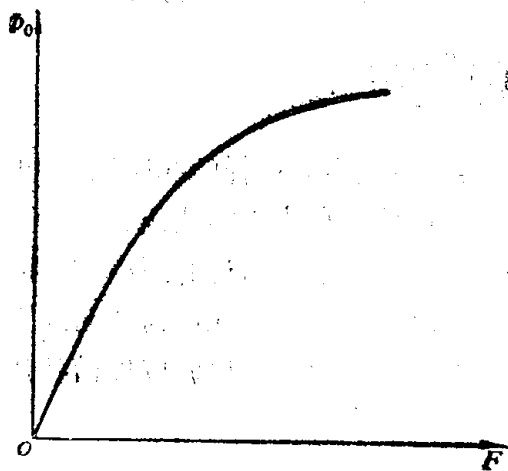


图2-2 直流电机的磁化曲线

磁通量之间的函数关系，表示这个关系的函数图形称为直流电机的磁化曲线，如图2-2所示。

在 Φ_0 较小、铁心未达到磁的饱和时，铁心中磁压降近似为零，主极磁势 F_0 主要消耗在空气隙中。由于空气磁路的磁阻等于常数，所以曲线的起始部分近似为直线。随着 Φ_0 的增大，磁化曲线开始呈现非线性的饱和特性。为了充分利用铁磁材料，铁心的额定工作点均取在磁化曲线开始弯曲处。当转速为常数时，直流电机电刷间的电势 E_0 与主极磁通 Φ_0 成正比；又当励磁绕组匝数一定时，励磁磁势 F_0 与励磁电流 I_f 成正比。因此，在某一固定的运行速度下，电机的磁化

曲线也可用 $E_0 = f(I_f)$ 表示，并可以用实验方法测出。但此时同一台电机在不同运行速度下有不同的磁化曲线，故在使用上有些不便。

电枢表面各点磁通密度的分布情况不一样是电机磁场中另一个值得注意的问题。如图 2-3a 所示，由于主极结构上的特点，主极磁通中每条磁感应线所经路径上的磁阻不尽相同。因此在同一主极磁势作用下，电枢表面各点的磁通密度也不相同。若不考虑铁心的磁阻，则磁阻的大小完全决定于磁路上气隙的长度，在极靴下，由于空气隙较短，所以磁阻较小，磁通密度较高；在极靴以外的空间里，气隙长度显著增加，因此磁阻加大，磁通密度迅速下降。在两个极下空间的分界线处磁通密度 B 下降为零。通过电枢表面 $B = 0$ 处的电枢轴线称为物理

中性线,与主极中心线垂直的电枢轴线称为几何中性线,当电机中仅存在着主极磁场时,几何中性线与物理中性线重合。如将电机定子和电枢通过几何中性线沿转轴方向剖开并展平,且不考虑电枢齿的影响,则主极磁通密度在电枢表面的分布波形如图2-3b所示的平顶波。图

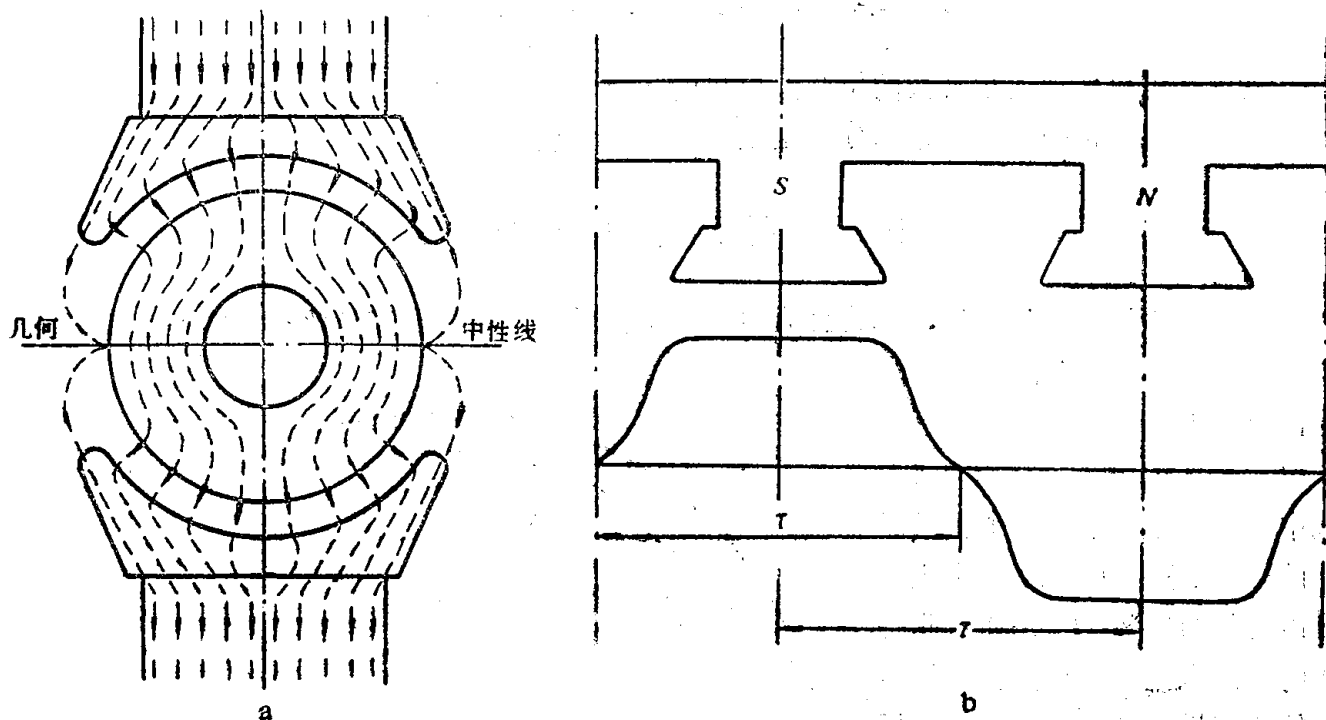


图2-3 a主极磁场; b展开图

中, S极下的磁通垂直穿出电枢表面, 设为正, N极下的磁通垂直进入电枢表面, 设为负。每个极下空间的宽度为 180° 电角度, 在展开图上它等于相邻两主极轴线间的距离, 即极距 τ 。

§ 2-2 直流电机的电枢绕组

在图1-1所示模型电机的电枢上只装有一个线圈。在实际电机中, 这样的线圈远不止一个, 它们均匀分布在电枢上, 按一定规律联接成一条特殊的电路, 称为电枢绕组。

电枢绕组的基本单元称为绕组元件, 元件的两有效元件边在电枢上跨过的距离称为跨距或第一节距, 记作 y_1 。为使每个元件的两元件边在通过电流时产生的转矩在任何瞬间的方向均一致, 元件的跨距 y_1 应等于一个极距。由于元件边嵌放在电枢槽中, 所以 y_1 应以槽数作为计量单位, 一般地

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \mp \epsilon (\epsilon < 1), \quad (2-2)$$

式中, Z 为电枢槽数, p 为主极对数, $\frac{Z}{2p}$ 为以槽数作计量单位时的极距 τ 。如 y_1 不是整数, 则必须适当选择 ϵ 将其凑成整数, 此时元件的跨距略小于或略大于极距。通常称 $y_1 = \tau$ 时的电枢绕组为整距绕组, 称 $y_1 < \tau$ 时的电枢绕组为短距绕组, 称 $y_1 > \tau$ 时的电枢绕组为长距绕组。

前已指出, 直流发电机和直流电动机在结构上无任何差别, 因此在探讨电机绕组的结构时, 仅以电动机为例说明电枢绕组的构成原则, 然后介绍直流电动机中应用最广的单迭绕组和单波绕组。

一、电枢绕组的构成原则

当直流电动机电枢上只有一个绕组元件时, 它的轴上输出转矩的数值很小, 在元件边经