

# 机车电机

主 编 张洋洋 李秀超 甘永双  
副主编 朱金宝

西南交通大学出版社  
· 成 都 ·

---

图书在版编目 (C I P) 数据

机车电机 / 张洋洋, 李秀超, 甘永双主编. —成都:  
西南交通大学出版社, 2023.2

ISBN 978-7-5643-9147-8

I. ①机… II. ①张… ②李… ③甘… III. ①机车—  
牵引电机 IV. ①U260.332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2022) 第 255364 号

---

Jiche Dianji

机车电机

主编 / 张洋洋 李秀超 甘永双

责任编辑 / 李芳芳

封面设计 / 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号西南交通大学创新大厦 21 楼 610031)

发行部电话: 028-87600564 028-87600533

网址: <http://www.xnjdcbs.com>

印刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm

印张 12 字数 300 千

版次 2023 年 2 月第 1 版 印次 2023 年 2 月第 1 次

书号 ISBN 978-7-5643-9147-8

定价 45.00 元

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

# 前 言

“机车电机”是铁道机车运用与维护专业和铁道机车车辆制造与维护专业的基础课程之一，其主要任务是学习与机车有关的电机基础知识理论，熟悉电机和变压器的基本结构、工作原理和技术参数，了解 SS<sub>4</sub>G 型电力机车和 HX<sub>D</sub>3 型电力机车的牵引电机与主变压器。

本书安排内容如下：项目一介绍电机基本定律、常用的铁磁性材料及其特性和机车电机的分类；项目二介绍直流电机的工作原理、基本结构、电枢绕组、磁场和电枢反应、基本方程；项目三介绍直流牵引电机的传动方式、常用电工材料和绝缘结构、特性、启动、调速、制动、反转、换向、通风冷却和维护；项目四介绍脉流牵引电机的结构、电磁特点、换向、ZD105 型脉流牵引电动机和 ZD115 型脉流牵引电动机；项目五介绍变压器基础、JQFP2-9006/25 型牵引变压器、JQFP1-10160/25 型主变压器和 TBQ32-5280/25A 型主变压器；项目六介绍互感器基础、JDZXW2-25A 型高压电压互感器、LMZBK-25 型高压电流互感器、JDZX18-25D 型高压电压互感器和 LMZB-25C 型高压电流互感器；项目七介绍三相交流异步电动机结构和铭牌、三相交流异步电动机原理及工作特性、三相异步电机基本工作原理和三相异步电动机的启动、调速和制动；项目八介绍典型的三相交流异步牵引电机、YJ85A 型三相交流异步牵引电动机、Mitrac TM3800 F 型三相交流异步牵引电动机、YJ217A 型三相交流异步牵引电动机和 JD160 型三相交流异步牵引电动机；项目九介绍牵引通风机电机和复合冷却器通风机电机。

本书第一主编由辽宁铁道职业技术学院张洋洋担任，负责全书统稿工作，编写绪论、项目一、项目二、项目三；第二主编由辽宁铁道职业技术学院李秀超担任，负责编写项目四、项目五、项目六；第三主编由辽宁铁道职业技术学院甘永双担任，负责编写项目七、项目八；副主编由沈阳局集团公司苏家屯屯机务段安全科科长朱金宝担任，负责编写项目九。本书在编写过程中得到了中国铁路沈阳局集团有限公司锦州机务段、苏家屯机务段的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，以及编者水平有限，本书肯定存在不足之处，恳请广大读者批评指正。



本书课件

编 者

2022 年 8 月



# 目 录

绪 论 .....	001
项目一 磁路的基础知识 .....	009
任务一 电机基本定律 .....	009
任务二 常用的铁磁性材料及其特性 .....	013
任务三 机车电机的分类 .....	018
项目二 直流电机 .....	019
任务一 直流电机的工作原理 .....	019
任务二 直流电机的基本结构及铭牌数据 .....	021
任务三 直流电机的电枢绕组 .....	026
任务四 直流电机的磁场和电枢反应 .....	032
任务五 直流电机的基本方程 .....	036
项目三 直流牵引电机 .....	042
任务一 直流牵引电机传动方式 .....	042
任务二 直流牵引电机常用电工材料和绝缘结构 .....	048
任务三 直流牵引电机的特性 .....	051
任务四 直流牵引电机的启动、调速、制动和反转 .....	055
任务五 直流牵引电机的换向 .....	059
任务六 直流牵引电机的通风冷却 .....	067
任务七 直流牵引电机的维护 .....	070
项目四 脉流牵引电机 .....	074
任务一 脉流牵引电机的结构 .....	074
任务二 脉流牵引电机的电磁特点 .....	086
任务三 改善脉流牵引电动机的换向 .....	088
任务四 ZD105 型和 ZD115 型脉流牵引电动机 .....	089
项目五 变压器 .....	096
任务一 变压器基础知识 .....	096
任务二 JQFP2-9006/25 型牵引变压器 .....	099
任务三 JQFP1-10160/25 型主变压器 .....	110
任务四 TBQ32-5280/25A 型主变压器 .....	116

项目六 互感器 .....	123
任务一 互感器基础知识 .....	123
任务二 JDZXW2-25A 型高压电压互感器 .....	124
任务三 LMZBK-25 型高压电流互感器 .....	126
任务四 JDZX18-25D 型高压电压互感器 .....	128
任务五 LMZB-25C 型高压电流互感器 .....	130
项目七 交流电机 .....	132
任务一 三相交流异步电动机结构和铭牌 .....	132
任务二 三相交流异步电动机原理及工作特性 .....	136
任务三 三相异步电机基本工作原理 .....	141
任务四 三相异步电动机的启动、调速和制动 .....	142
项目八 三相交流异步牵引电机 .....	148
任务一 典型的三相交流异步牵引电机 .....	148
任务二 YJ85A 型三相交流异步牵引电动机 .....	151
任务三 Mitrac TM3800 F 型三相交流异步牵引电动机 .....	160
任务四 YJ217A 型三相交流异步牵引电动机 .....	165
任务五 JD160 型三相交流异步牵引电动机 .....	170
项目九 交流辅助电机 .....	181
任务一 牵引通风机电机 .....	181
任务二 复合冷却器通风机电机 .....	183
参考文献 .....	186

# 绪 论

电机是一种机电能量转换或信号转换的电磁机械装置。

## 一、电机发展简史

电机发展的历史，大体上可分为三个时期，分别是直流电机的产生和形成时期，交流电机的形成和发展时期，电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善化的时期。

### 1. 直流电机的产生和形成时期

电机发展的初期，主要是直流电机发展的历史。1821年，法拉第发现了载流导体在磁场内受力的现象；1831年，法拉第又发现了电磁感应定律。两年以后，皮克西利用永久磁铁和线圈之间的相对运动和一个换向装置，制成了一台旋转磁极式直流发电机，这就是现代直流发电机的雏形。虽然早在1833年，楞茨已经证明了电机的可逆原理，但在1870年以前，直流发电机和电动机一直被视为两种不同的电机，各自独立发展着。对于直流电动机，当时是以电磁铁之间的相互吸引和排斥，作为制造电动机的指导思想，并采用蓄电池作为电源。因此要使电动机在工业中得到广泛应用，就必须提供较大的廉价直流电源。

这样，由于生产（电报、电解、电镀、电动机电源）上的需要，使直流发电机得到较快的发展。在1834—1870年这段时间内，发电机方面出现了三个重大的发明和改进。在励磁方面，首先从永磁转变到用电力来励磁，其后又从用蓄电池他励发展到自励。在电枢方面，1870年，格拉姆提出环形电枢绕组以代替凸极式的T形电枢绕组；由于环形电枢绕组为分布绕组，电压脉动较小，换向和散热情况也较好，所以T形电枢绕组不久就被淘汰。关于环形电枢绕组，曾在电动机模型中被提出过，但没有受到重视。格拉姆在发电机上提出环形电枢结构以后，人们对发电机和电动机中的这两种结构进行了对比，最后终于使电机的可逆原理被大家所接受，此后直流发电机和电动机的发展合二为一。

1870—1890年是直流电机发展的另一个阶段。1873年，海夫纳-阿尔泰涅克发明了鼓形电枢绕组，提高了电枢导线的利用率。为了加强绕组的机械固定和减少铜线内部的涡流损耗，电枢铁心采用了开槽结构，绕组的有效部分被放入槽内。1880年，爱迪生提出采用叠片铁心，以减少铁心损耗、降低电枢绕组的温升。鼓形电枢绕组和电枢开槽、叠片铁心的结构，一直沿用到今天。

上述直流电机的进步发展使得直流电机的电磁负荷、单机容量和效率大幅提高，这样，换向器上的火花问题就成为当时的突出问题。1884年出现了换向极和补偿绕组，1885年开始用炭粉来作电刷。这些措施一方面使火花问题暂告缓和，另一方面又促进了电磁负荷和单机

容量的进一步提高。

在电机理论方面,1886年,霍普金生兄弟确立了磁路的欧姆定律。1891年,阿尔诺德建立了直流电枢绕组理论。这些理论使直流电机的设计和计算建立在更为科学的基础上。到19世纪90年代,直流电机已经具备了现代直流电机的主要结构特点。

1882年是电机发展史上的一个转折点。这一年,台勃莱兹把米斯巴哈水电站发出的2 kW的直流电,用一条57 km长的输电线送到慕尼黑,从而为电能和电机的应用开创了广阔的前景。随着直流电的广泛应用,直流电机很快就暴露出其固有的缺点。众所周知,远距离输电时,电压越高,线路的损耗就越小,但是制造高压直流发电机却有很大的困难。此外,随着单机容量的日益增大,直流电机的换向也越来越困难。因此,19世纪80年代以后,人们的注意力就逐渐转向交流电方面。

## 2. 交流电机的形成和发展时期

早在1832年,单相交流发电机就已出现。但是在1870年以前,人们对交流电还不是很了解,生产上也没有对交流电的需要。1876年,亚勃罗契柯夫首次采用交流和开磁路式串联变压器给“电烛”供电。1884年,霍普金生兄弟发明了具有闭合磁路的变压器。次年,齐波诺斯基、德利和勃拉第三人又提出了变压器的心式和壳式结构,此后单相变压器在照明系统中得到了一定的应用。但是,应用交流电来驱动各种工作机械的问题,仍未获得解决。

交流感应电动机的发明,与产生旋转磁场这一研究工作紧密相连。1825年,阿拉果利用金属圆环的旋转,使悬挂在其中的磁针得到一定的偏转,这一现象实质上就是多相感应电动机的原始工作基础。1879年,拜依菜采用依次变动四个磁极上的激磁电流的办法,首次用电的办法获得了旋转磁场。1883年,台勃莱兹提出,把两个在时间和空间上各自相差1/4周期的交变磁场合成,可以得到一个旋转磁场。1885年,弗拉利斯把利用交流电来产生旋转磁场,和采用铜盘来产生感应涡流这两个思想结合在一起,制成了第一台两相感应电动机。1888年,弗拉利斯又提出了《利用交流电来产生电动旋转》的经典论文。同一时期,特斯拉(Tesla)也独立地从事于旋转磁场的研究,并且几乎与弗拉利斯同时发明了两相感应电动机。

1889年,多利伏-多勃罗伏尔斯基提出采用三相制的建议,并设计和制出了三相感应电动机。与单相或两相系统比较,三相输电系统的效率较高,用铜量也较节省;三相电机的性能、效率和材料利用也比两相电机好。三相制的优点,在1891年建成的从劳芬到法兰克福的三相电力系统中得到充分的显示。这个系统的顺利运行表明,三相交流电不但便于输送和分配,也可用作电力驱动。三相感应电动机的结构简单、工作可靠。因此到20世纪初叶,在电力工业中,交流三相制已占据绝对统治的地位。

19世纪80年代末期,由于交流发电站的迅速发展,要求研制能与发电机直接连接的高速原动机。由于许多科技人员的潜心研究,很快就出现了高速的汽轮机。到19世纪90年代初期,许多电站中已经装有1 000 kW的汽轮发电机组。此后,三相同步发电机的结构逐渐划分为高速和低速两类,高速的以汽轮发电机为代表,低速的以水轮发电机为代表。同时,由于比较明显的理由,几乎所有的制造厂都采用了磁极旋转、电枢绕组嵌放在定子铁心槽内的结构。随着电力系统的逐渐扩大,频率也趋于标准化,欧洲以50 Hz为标准工频,美国以60 Hz为标准工频。

由于工业和运输方面的需要,19世纪90年代还出现了由交流变换为直流的旋转变流机,



以及交流换向器电机。

在电机理论方面, 1893 年左右, 开耐莱和司坦麦茨开始用复数和相量来分析交流电路。1894 年, 海兰特发表了《多相感应电动机和变压器性能的图解确定法》的论文, 是感应电机理论中的第一篇经典论文。同年, 弗拉利斯已经采用把脉振磁场分解为两个大小相等、转向相反的旋转感场的方法, 来分析单相感应电动机, 这种方法以后被称为双旋转磁场理论。1894 年左右, 波梯又建立了交轴磁场理论。1899 年, 在研究凸极同步电动机的电枢反应时, 勃朗台尔提出了双反应理论, 此理论后来成为研究所有凸极电机的基础。

总的来说, 到 19 世纪结束时, 各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法, 大体上都已建立起来。

### 3. 电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善化的时期

20 世纪是电机发展史中的一个新时期。这个时期的特点是: 由于工业的发展, 对电机提出了各种新的和更高的要求。另外, 由于自动化技术的需要, 出现了一系列控制电机。在这个时期内, 由于对电机内部所发生的电磁、发热和其他过程进行了深入的研究, 加上材料的改进, 使得交、直流电机的单机容量和材料利用得到很大的提高, 电机的性能也有显著改进。

就材料利用来说, 以德国 AEG 厂出品的三相笼型 3.7 kW、1 500 r/min 的感应电动机为例, 1889 年该机重 155 kg, 1901 年减少到 108 kg, 1930 年进一步降低到 42 kg, 外形尺寸也显著减小。就单机容量来说, 20 世纪初, 水轮发电机的最大单机容量不超过 1 000 kW, 而现在则已达到 700 MW; 汽轮发电机的单机容量开始时不超过 5 000 kW, 1930 年提高到 100 MW, 40 年代和 50 年代以后, 由于采用了氢冷、氢内冷、油冷和水冷等冷却方法, 单机容量进一步提高。目前汽轮发电机的单机容量已超过 1 000 MW。

在电机理论方面, 1918 年, 福提斯古提出了求解三相不对称问题的一般方法——对称分量法, 使不对称运行时交流电机内部的物理情况得以弄清, 并使同步电机和感应电机的分析方法初步得到统一。1926—1930 年, 道赫提和聂克尔两人在发展勃朗台尔双反应理论的基础上, 先后发表了五篇经典论文, 在仔细地分析了气隙磁导和同步电机内部的磁场分布以后, 导出了凸极同步电机的稳态电压方程和相量图, 直轴和交轴同步电抗, 稳态和瞬态时同步电机的功角特性, 以及三相和单相突然短路时的短路电流; 初步建立起同步电机稳态和瞬态分析的理论 and 计算方法。同一时期, 许多学者 (Wiesmann, Alger, Park, Kilgore) 又研究并提出了电枢漏抗、同步电抗和直轴瞬态电抗的计算公式和测定方法, 为同步电机稳态和瞬态参数的计算奠定了基础。1929 年派克发表了《同步电机的双反应理论 (I) ——通用分析方法》的经典论文, 提出 dq0 变换和瞬态运行时同步电机的电压方程 (即派克方程), 以及运算电抗的概念等一系列理论和思想。此后, 又经过一批学者 (Crary, Concordia, Rankin, Stanley, Lyon, Clarke, 萨本栋, 顾毓琇等) 的多年努力, 使坐标变换和交流电机的瞬态分析理论得以建立。

为了进一步找出分析各种电机的统一方法, 经过对各类电机的综合考察, 1935—1938 年, 克朗提出了原型电机的概念, 并且利用张量分析来研究旋转电机。这种方法的特点是, 一旦列出原型电机的运动方程, 通过特定的转换张量, 就可以求出其他各种电机的运动方程。线圈的连接, 电刷或集电环的引入, 对称分量和其他各种分量的应用等等, 都相当于一定的坐标变换。运动方程一旦建立, 根据一定的步骤, 即可画出电机的等效电路, 并进一步得到电

机的各种性能。Kron 的工作，不但揭示了各种电机和各种分析方法之间的相互联系，从而使电机理论逐步趋于统一，而且还为许多复杂问题的求解提供了途径，所以它是电机理论的一个重大发展。

1920—1940 年，还有许多学者 (Dreyfus, Punga, Fritz, Möller, Heller) 对双笼和深槽电机的理论和计算方法、谐波磁场所产生的寄生转矩及其削弱、感应电机的噪声等问题进行了一系列的研究，使感应电机的运行性能得到明显提高。

20 世纪 40 年代前后，由于第二次世界大战的影响，自动控制技术得到很大的发展，此时出现了一系列新的控制电机，例如电机放大机，交流测速发电机，旋转变压器等。同时，自整角机和伺服电动机的性能也有很大的提高。同一时期，小型分马力电机的理论也有较大的发展。

1954 年，柯伐煦提出了空间矢量法，并导出了在转速为  $\omega_k$  的旋转坐标系中，感应电机的空间矢量电压方程，为后来感应电机速度和转矩的矢量控制打下了理论基础。1957—1969 年，卡佐夫斯基发表了一系列论文，提出用频率法来分析和求解交流电机的各种瞬态过程和非正常运行情况，为交流电机的瞬态分析做出了新的贡献。但是在计算机引入以前，对于转速为变化的交流电机动态问题，除极少数借助微分分析器和动态模型机组而得到解答之外，其余则无法求出解答。

1965 年以后，计算机逐步被引入到电机工程的各个领域，先是模拟计算机，然后是数字计算机。由于数字计算机的快速发展和各种数值方法和软件包的应用，各种电机内的磁场分布、参数的不饱和值及饱和值，以及电机内三维温度场的分布等等，都可以用计算机得到其数值解。由于状态方程和数值解法的引入，动态运行时交流电机的非线性运动方程也可以用计算机顺利解出，从而使电机的各种动态问题的计算、分析得以实现。这是电机分析中的又一次突破。

电枢开槽、线圈置于槽内以后，由于导体所处位置的磁场明显减弱，线圈内的感应电动势和作用在转子上的电磁转矩是否会相应减小?实践表明，开槽以后感应电动势和电磁转矩并未发生变化，但是理论上应当如何解释，此问题曾经长期困扰着电机工程的研究人员。从 1896 年一直到 1960 年，经过许多学者对产生电动势和电磁转矩的机理进行认真分析、推导和实验研究以后，此问题最终得到解决。接下来是电机内部机电能量转换的机理问题。就交流电动机而言，电能是如何从定子输入并转换为气隙磁场的磁能?气隙磁能又在什么条件下转换为转子的机械能，并输出给负载?从 1950 年开始，国内外许多学者对此问题进行了一系列的研究。到目前为止，此问题可认为已经弄清。

在电机的理论体系方面，除了传统的电机学体系之外，从 1959 年起，以怀特和伍德逊为首，逐步建立起一种机电能量转换的新体系。这种体系的特点是：把旋转电机作为机电装置的一种，从电磁场理论出发导出其参数，从汉密尔顿原理和拉格朗日方程出发建立其运动方程，用统一的方法来研究各种电机的电动势、电磁转矩和能量转换的条件和机制，用统一的方法（动态电路法、坐标变换、框图和传递函数、状态方程等）来分析各种电机的稳态和动态性能，以及电机和系统的联系。这种体系的优点是理论和数学推导更加严密；缺点是物理概念不够清晰，使初学者较难掌握。

20 世纪 70 年代以后，由于大电流量晶闸管的发展，出现了便于控制、体积小、噪声小的大容量直流电源，从而使直流电动机的好调速性能得以进一步发挥。使用由电力电子器件

所构成的变频器作为交流电动机的调频电源,可使感应电动机和同步电动机得到平滑、宽广的调速,具有较高的效率,从而改进了交流电动机的调速性能。1971年,勃拉舒克和海斯模仿直流电机转矩的控制规律,利用坐标变换理论,将交流电机的磁场解耦,提出交流电机的“矢量变换控制”,加上电力电子技术的发展,使交流电动机的速度和转矩控制技术发生了一次飞跃。

20世纪80年代以后,由于永磁材料、电力电子和自动控制技术的发展,使永磁无刷电机和开关磁阻电机等新型电机得到较快的发展。

20世纪90年代以后,一种场路结合的有限元——状态空间耦合时步法得到应用。此法先用求解三维非线性恒定磁场的有限元法,求得定、转子电流和转子位置为某一组设定值时电机的饱和参数;再用此参数代入状态方程,用数值法解出动态过程中定、转子电流和转子位置的即时值;再用修正的电流和位置值重新计算参数;经过多次迭代,可得该步长时的参数、电流和转子位置的确认值。然后一个步长、一个步长地往前计算,最后得到整个动态过程中的电流、转速、转矩和功角等。由于此法既考虑了参数的饱和值,又避免用时步法直接求解三维非线性瞬态场,一方面降低了计算难度和减少了计算时间,另一方面又可得到较高的精度,从而使交流电机的动态计算又前进了一步。

理想的目标是,利用求解定、转子具有相对运动,及铁心的非线性和磁滞、涡流损耗,以及定、转子端部磁场的瞬态非线性三维涡流场的时步法,来求解任意供电波形下交流电机的动态过程。随着计算机内存的扩展、CPU速度的不断提高和计算方法的不断改进,这一目标正在逐步实现中。

关于电机和电机理论的发展简史,就介绍到这里。研究电机的发展历史,有助于我们认识电机的发展规律及其进一步发展的途径。

#### 4. 我国电机工业发展概况

中华人民共和国成立前,我国的电机工业极端落后,全国只有少数几个城市有电机制造厂。这些制造厂规模小、设备差、生产能力低下、产品规格混乱、材料多依赖于进口。中华人民共和国成立前(1947年)全国的最高年产量,发电机为2万kW,电动机为5.1万kW,交流发电机的单机容量不超过200kW,交流电动机不超过230kW。1949年,全国的发电机装机容量仅为1850MW,年发电量约为43亿kW·h。

中华人民共和国成立以来,我国的电机制造业得到快速发展,从仿制阶段到自行设计阶段再到研究、创新阶段,经过60余年的努力,我国已经建立起自己的电机工业体系,有了统一的国家标准和统一的产品系列,建立了全国性的研究实验基地和研究工程技术人员队伍。在大型交、直流电机方面,已研制成功 $2 \times 5\,000$  kW的直流电动机,4700 kW的直流发电机和42 MW的同步电动机。在大型发电设备方面,已研制出1000 MW的汽轮发电机,1150 MW的核电机组和700 MW的水轮发电机。电力变压器的最大容量已达到840 MVA,电压最高为750 kV。

在中、小型和微型电机方面,已开发和制成一百多个系列、上千个品种、几千个规格的各种电机。在特殊电机方面,由于新的永磁材料的出现,制成了许多高效节能、维护简单的永磁电机。由于电机和电力电子装置、单片微型计算机相结合,出现了各种性能和形态迥异

的“一体化电机”。

上述各种类型的电机，除满足我国生产和生活领域中的各种不同需求外，尚有部分电机出口。

## 二、电机在国民经济中的作用

就能量转换的功能而言，电机可分为发电机和电动机两大类。发电机是把机械能转换为电能。在发电站中，通过原动机先把各类一次能源（燃料发出的热能、水的位能、原子能、风能等）蕴藏的能量转换为机械能，然后通过发电机把机械能转换为电能，再经输、配电网网络送往城市各工矿企业、家庭等各种场合，供公众使用。电动机是把电能转换为机械能，用来驱动各种用途的生产机械和装置，满足不同的需求。电力变压器则是将一种交流电压、电流的电能，转换成同频率的另一种电压、电流的静止电器。

由于一次能源形态的不同，可以制成不同类型的发电机。利用水力资源，和水轮机配合，可制成水轮发电机；利用煤、石油等能源的热能，和锅炉、汽轮机配合，可制成汽轮发电机。此外，还有利用风能、原子能等能源的各类发电机。

截止到 2012 年年底，我国的电站总装机容量已达 11.4 亿 kW，年总发电量为  $4.94 \times 10^4$  亿 kW·h。从发电量看，我国已居世界第二位。随着三峡水利电力工程和大亚湾、秦山等核电站的建成和发电，我国逐年加大了水力资源的开发和建设核电站的投资。我国西部各水系蕴藏着丰富的水力资源，新疆、内蒙古、黑龙江和沿海各省拥有丰富的风力资源。优先发展水电，加快发展风电，积极发展核电和太阳能发电，努力增加洁净能源的比重，这不仅将改善环境，而且是一条可持续发展之路。

电动机作为动力设备，已广泛应用于各行各业，例如机械行业的工作母机，冶金行业的高炉、转炉、平炉和轧钢机，交通运输行业中的电车、电力机车，各类企业中的鼓风、起吊、运输传送，农业中的电力排灌、农副产品加工，以及医疗器械、家用电器等，大至冶金企业使用的高达上万千瓦的电动机，小至小功率电动机，乃至几瓦的微电动机。在各类动力机械中，电动机的容量已超过总容量的 60%。

根据应用场合的要求和电源的不同，电动机分为直流电动机、交流同步电动机、交流感应电动机以及满足不同需求的特种电动机。20 世纪 70 年代以后，由于大功率电力电子器件、微电子器件、变频技术以及计算机技术取得的一系列进展，我国还研制出多种调速性能优良、效率较高、能满足不同要求的交流电动机调速系统，和由变频器供电的一体化电机。

就信号转换功能的控制电机而言，大体上有测速电机、伺服电机、旋转变压器和自整角机等几种，这些电机主要用于自动控制系统中作为检测、执行、随动和解算元件，例如机床加工的自动控制，舰船方向舵的自动控制，大炮和雷达的自动定位，飞机的飞行控制，计算机、自动记录仪表的运行控制等。这类电机通常为微观电机，对精度和快速响应的要求较高。

总之，在电力工业中，发电机是生产电能的主要设备。变压器是变电站和输、配电线路中对电压进行变换的主要设备。在机械、冶金、纺织、煤炭、石油、化工，交通运输和家用电器等行业中，电动机是各种生产机械的主要动力设备。在国防和民用的各种自动控制系统中，控制电机是重要且不可缺少的元件。因此，电机在国民经济的各个领域起到极其重要的作用。

### 三、电机在电力机车中的应用

电力机车是一种由外部接触网供电、由牵引电动机驱动的现代化牵引动力设备。电力机车在构造上一般划分为电气部分、机械部分和空气管路系统三大部分。

对于交-直传动的电力机车来说,电气部分包括牵引变压器、硅整流机组、牵引电动机、辅助电动机、高压电器和低压电器;对于交-直-交传动的电力机车来说,电气部分包括牵引变压器、变流器、牵引电动机、高压电器和低压电器,通过导线连接成三大电路:主电路、辅助电路和控制电路。主电路由牵引电动机以及与之相连接的电气设备和导线共同组成,是电力机车上的高电压大电流的动力回路,主要作用是实现牵引与制动运行;辅助电路是指将辅助电机(压缩机电机、通风机电机、油泵等)和辅助设备及其相关的电气设备连接而成的线路,辅助电路的作用旨在保证主电路设备正常工作,改善司乘人员的工作条件;控制电路是指司机控制器、低压电器和各电器控制线圈组成的电路,主要作用是通过控制低压电器实现对主辅电路设备的控制,使机车按照机车乘务员意图运行,完成运输任务。

电机在电力机车上的应用主要有以下三种:

#### 1. 牵引电机

电力机车、电传动内燃机车、动车组、地铁车辆和城市地铁等各种电传动机车车辆都使用牵引电机驱动轮对来完成机车车辆的牵引运行。因此,我们把用作牵引功能的电机都称为牵引电机。牵引电机通常有直流牵引电机和交流牵引电机,直流牵引电机一般采用串励电动机,这是因为直流串励电动机具有牵引性能良好、调速范围广、控制方便、系统简单可靠等优点。例如,我国的DF系列的内燃机车大都采用直流串励电动机;我国自主研制的SS系列的电力机车也采用直流电机,只不过电力机车从接触网获得单相工频交流电,经整流后加在电动机两端的电压为脉动电压,电动机通过的电流为脉动电流,也可称作脉流牵引电动机。但直流电动机的主要缺点是必须有换向器,这不仅使机身质量和尺寸大、费铜,而且电机故障率高、维修保养工作量大,同时,还限制了转速的提高。随着科技的不断进步,尤其是三相交流异步电动机的控制技术不断发展,现在很多机车采用三相交流异步牵引电机,其结构简单、牢固,没有换向器,维修方便,功率大,体积小,重量轻,具有良好的牵引性能。我国的HX系列内燃机车和电力机车都采用了三相交流异步牵引电动机。

#### 2. 变压器

主变压器是交流电力机车上的重要部件,用来把接触网上的25 kV高压电降为具有多种电压的低压电,以满足机车各种电机、电器工作的需要。例如,SS<sub>4</sub>改型电力机车,高压绕组额定电压25 kV,牵引绕组额定电压1 390.8 V,辅助绕组额定电压3 99.86/226 V,励磁绕组额定电压104.3 V;HX<sub>D</sub>3型客运电力机车采用JQFP1-10160/25型主变压器,高压绕组额定电压25 kV。

交流电力机车上还有很多的特殊的变压器——互感器,能够把高电压、大电流变换成低电压、小电流,供给测量仪表及继电器的线圈使用。这样,就可以使测量仪表与高压电路绝缘,保证工作安全,扩大仪表量程。与继电器线圈相连,当电路过流时,继电器动作,可以对电路起到保护作用。

### 3. 辅助电机

为了保证机车的正常运行，在单相工频交流电力机车中装有许多辅助机械，这些辅助机械多采用结构简单、价格低廉的三相异步电动机驱动。按用途可归纳为压缩机电动机、通风机电动机、主变压器油泵等几类。

# 项目一 磁路的基础知识

## 任务一 电机基本定律



微课：磁路的基础知识

在学习电机基本定律之前，我们首先了解一下磁场的相关知识。

### 一、磁路的基本物理量

#### (一) 基本物理量

在中学时，为了研究和分析磁场，我们引入了定性描述磁场的物理量磁力线。磁力线上任一点的切线方向即为该点磁场的方向，磁力线的疏密程度反映该点磁场的强弱。

#### 1. 磁感应强度

磁感应强度  $B$  是表示磁场中某点的磁场强弱和方向的物理量，它是一个矢量。磁感应强度也被称为磁通量密度或磁通密度。在磁场中垂直于磁场方向放置一个通电导体，其所受的磁场力  $F$  与电流  $I$  和导体长度  $L$  的乘积  $IL$  之比称为通电导体所在处的磁感应强度  $B$ ，即

$$B = \frac{F}{IL} \quad (1-1)$$

磁感应强度  $B$  与电流之间的方向关系可用右手螺旋定则来确定。在国际单位制中，磁感应强度的单位为特斯拉 (T)。

如果磁场内各点的磁感应强度大小相等、方向相同，则这样的磁场称为匀强磁场。

#### 2. 磁通

磁通  $\Phi$  是描述磁场在某一范围内分布情况的物理量。磁感应强度  $B$  与垂直于磁场方向的某一截面积  $S$  的乘积称为通过该面积的磁通  $\Phi$ ，即

$$\Phi = BS \quad \text{或} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可知，磁感应强度在数值上可看作与磁场方向垂直的单位面积内所通过的磁通，因此，磁感应强度又称为磁通密度。

在国际单位制中，磁通的单位为韦伯（Wb）。



### 3. 磁导率

磁导率  $\mu$  是用来表示磁场媒质磁性的物理量，也就是用来衡量物质导磁能力大小的物理量，其单位为亨利每米 (H/m)。

由实验可知，真空中的磁导率为一个常数，用  $\mu_0$  表示，即  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m。为了比较不同的物质的导磁性能，我们把一种物质的磁导率  $\mu$  与真空磁导率  $\mu_0$  的比值称为相对磁导率，用  $\mu_r$  表示，即

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (1-3)$$

### 4. 磁场强度

磁场强度  $H$  是计算磁场时所引用的一个物理量，是矢量，通过它可以确定磁场与电流之间的关系。磁场中某点的磁感应强度  $B$  与磁导率  $\mu$  的比值称为该点的磁场强度  $H$ ，即

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (1-4)$$

在均匀介质中，磁场强度的方向与磁感应强度的方向一致。在国际单位制中，磁场强度的单位为安培每米 (A/m)。

#### (二) 磁路的概念

磁通所通过的路径称为磁路。图 1-1 (a)、(b) 分别表示变压器磁路和四极直流电机磁路。

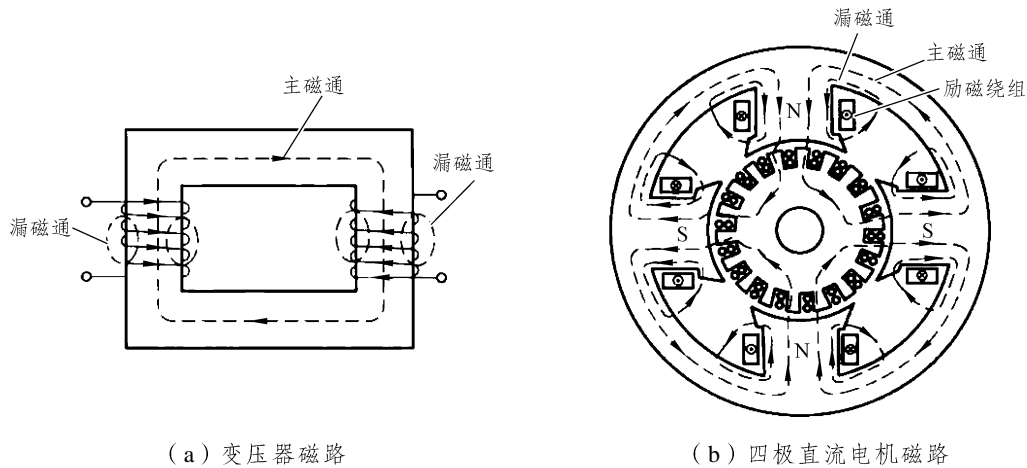


图 1-1 磁路

在电机和变压器中常把线圈套装在铁心上。当线圈内通有电流时，在线圈周围的空间(包括铁心内、外)就会形成磁场。由于铁心的磁导率要比空气大得多，所以载流线圈所产生的绝大部分磁通将在铁心内通过，这部分磁通称为主磁通。围绕载流线圈和部分铁心周围的空间，还存在少量分散的磁通，这部分磁通称为漏磁通。主磁通和漏磁通所通过的路径分别称为主磁路和漏磁路。如图 1-1 所示为两种磁通和相应磁路的示意图。

产生磁通的载流线圈称为励磁线圈（或励磁绕组），励磁线圈中的电流称为励磁电流。若励磁电流为直流，磁路中的磁通为恒定，不随时间而变化，这种磁路就称为直流磁路。直流电机的磁路就属于这一类。若励磁电流为交流（为把交、直流激励区别开，对于交流情况，以后称为激励电流），磁路中的磁通随时间交变变化，这种磁路就称为交流磁路，交流铁心线圈、变压器和感应电机的磁路都属于这一类。

磁路的分析计算和电路的分析计算一样，也有类似的基本定律。

## 二、全电流定律

沿着任何一条闭合回线  $L$ ，磁场强度  $H$  的线积分值  $\oint Hdl$  就等于该闭合回路所包围的总电流值  $\sum I$ （代数），这就是安培环路定律，又称为全电流定律，它是数学表达式为

$$\oint Hdl = \sum I \quad (1-5)$$

式中  $H$  ——磁路铁心的磁场强度，A/m；

$l$  ——磁路（闭合磁路）的平均长度，m；

$I$  ——通过线圈的电流，A。

在电工技术中，通常只应用安培环路定律的简单形式，即在磁场中，任选一磁力线作为闭合磁路，若闭合磁路上各点的磁场强度  $H$  相等，且其方向与闭合回线的切线方向一致，则磁场强度  $H$  与闭合回线的长度  $l$  的乘积就等于闭合回线内所包围的电流总和  $\sum I$ ，其表达式为

$$Hl = \sum I \quad (1-6)$$

在如图 1-2 所示磁路中，应用安培环路定律为

$$Hl = NI \quad (1-7)$$

式中  $N$  ——线圈的匝数。

式 (1-7) 中，线圈匝数与电流的乘积  $NI$  称为磁通势，用字母  $F$  表示，即

$$F = NI \quad (1-8)$$

式中  $F$  ——磁通势，安培 (A)。

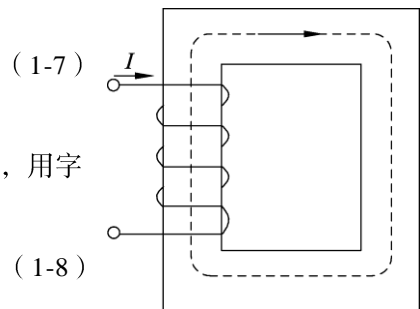


图 1-2 磁路

## 三、磁路的欧姆定律

以图 1-2 所示磁路为例，将  $H = B/\mu$  和  $B = \Phi/S$  代入式 (1-7)，可得

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{F}{R_m} \quad (1-9)$$

式中  $S$  ——磁路的截面积， $m^2$ ；

$R_m$ ——磁路的磁阻， $R_m = l / \mu S$ ， $1/H$ 。

式(1-9)与电路的欧姆定律在形式上相似，故称为磁路欧姆定律。因铁磁性材料的磁导率 $\mu$ 不是常数，因此，磁路的欧姆定律通常不能用于定量计算，只能用于定性分析。

磁路和电路的比较如表 1-1 所示。

表 1-1 磁路和电路的比较

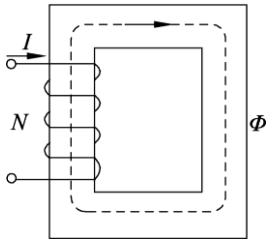
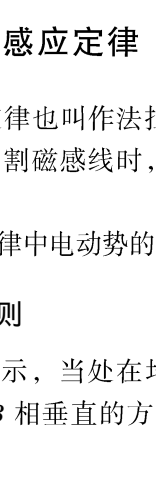
磁路	电路
	
磁通势 $F$	电动势 $E$
磁通 $\Phi$	电流 $I$
磁感应强度 $B$	电流密度 $J$
磁阻 $R_m = l / \mu S$	电阻 $R = l / \gamma S$
欧姆定律 $\Phi = F / R_m$	欧姆定律 $I = E / R$

表 1-1 中， $\gamma$ 为电导率， $\gamma = 1 / \rho$ ，单位为西门子每米 (S/m)。其中， $\rho$ 为电阻率，它是用来表示各种物质电阻特性的物理量。某种材料的导线，长为 1 m、横截面积为 1 mm<sup>2</sup>时，在常温 (20 °C) 的电阻称为这种材料的电阻率。

#### 四、电磁感应定律 (磁生电)

电磁感应定律也叫作法拉第电磁感应定律。实验指出，通电导体置于磁场中，并与磁场做相对运动而切割磁感线时，导体中会产生电流，该电流称为感应电流，产生的电动势称为感应电动势。

电磁感应定律中电动势的方向可以通过右手定则或楞次定律来确定。

##### 1. 右手定则

如图 1-3 所示，当处在均匀磁场中的有效长度为  $L$  的直导体，以速度  $v$  朝着与  $B$  相垂直的方向而切割磁感线时，此时导体中感应电动势  $e$  的大小为

$$e = BLv \tag{1-10}$$

感应电动势的方向由右手定则来确定，这是发电机理论的基础，如图 1-3 所示。

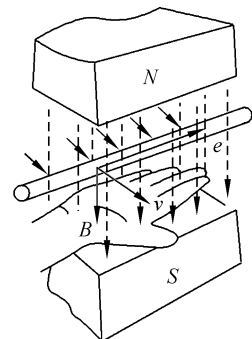


图 1-3 直导体中的感应电动势

