

高等学校试用教材

电机及拖动基础

上册

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社

73.2
686
1:1

高等学校试用教材

电机及拖动基础

上册

合肥工业大学 顾绳谷 主编



电机及拖动基础

上册

合肥工业大学 顾绳谷 主编

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

民族印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 850×1168 1/32·印张 11 1/2·字数 304 千字

1980年7月北京第一版·1982年2月北京第七次印刷

印数 162,001—202,000·定价 1.40 元

统一书号: 15033·4858

编 者 的 话

本书是根据 1978 年 4 月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会精神及同年 5 月在黄山召开的工业电气自动化专业教材编写会议制订的《电机及拖动基础》编写大纲编写的。

本书包括《电机学》及《电力拖动基础》两门课程的主要内容，合并为《电机及拖动基础》，使电机及拖动有机结合，更好地为专业的发展方向服务。

全书分上下两册，上册内容包括：直流电机及拖动、变压器、交流电机等，下册内容包括：交流电机拖动、控制电机、多电动机拖动系统与拖动系统电机的选择等。

本书可作为高等院校工业电气自动化专业试用教材，也可供有关专业师生、工程技术人员及工人同志参考。

本书由合肥工业大学电气工程系顾绳谷教授主编，其中第二、六、七、八、十一及十二各章由顾绳谷教授编写；第一、四、五、九、十各章由姚守猷付教授编写；韩继生同志编写本书第三章初稿，张世栋同志对本书文稿和图稿做了大量工作。

全书由哈尔滨工业大学工业电气自动化教研室赵昌颖付教授审阅，并对书稿提出了许多宝贵的修改意见。谨致以衷心的感谢。

在编写过程中，参考了清华大学、西安交通大学、华中工学院、哈尔滨电工学院等兄弟院校的自编教材及讲义，以及有关单位的许多资料。在此，表示衷心感谢。

一九七九年十月

36488

目 录

绪言	1
----------	---

第一篇 直流电机及拖动

第一章 直流电机	9
§ 1-1 直流电机的工作原理及结构	10
§ 1-2 直流电机的铭牌数据及主要系列	17
§ 1-3 直流电机的绕组	18
§ 1-4 直流电机的磁场	28
§ 1-5 直流电机的运行原理	41
§ 1-6 直流电机的换向	60
小结	66
习题	68
第二章 直流电机的电力拖动	72
§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	72
§ 2-2 工作机构转矩、力、飞轮矩和质量的折算	76
§ 2-3 生产机械的负载转矩特性	83
§ 2-4 他励直流电动机的机械特性	86
§ 2-5 他励直流电动机的起动	97
§ 2-6 他励直流电动机的制动	118
§ 2-7 他励直流电动机的调速	132
§ 2-8 他励直流电动机过渡过程的能量损耗	157
§ 2-9 串励直流电动机的电力拖动	162
小结	167
习题	170

第二篇 变 压 器

第三章 变压器	176
---------------	-----

VI

§ 3-1 变压器的工作原理、分类及结构	176
§ 3-2 单相变压器的空载运行	185
§ 3-3 单相变压器的负载运行	190
§ 3-4 变压器的等值电路及相量图	193
§ 3-5 等值电路参数的测定	198
§ 3-6 变压器的运行特性	201
§ 3-7 三相变压器	206
§ 3-8 自耦变压器与仪用互感器	226
小结	231
习题	234
附录 3-1 小型单相变压器的计算	237
附录 3-2 变压器的暂态过程	246

第三篇 交流电机及拖动

第四章 三相异步电动机的基本原理	251
§ 4-1 三相异步电动机的工作原理及结构	252
§ 4-2 三相异步电动机的铭牌数据及主要系列	262
§ 4-3 三相异步电动机的定子绕组	264
§ 4-4 三相异步电动机的定子磁势及磁场	278
§ 4-5 三相异步电动机定子绕组的电势	300
小结	307
习题	309
第五章 三相异步电动机的运行原理	312
§ 5-1 三相异步电动机运行时的电磁过程	312
§ 5-2 三相异步电动机的等值电路及相量图	324
§ 5-3 三相异步电动机的功率和转矩	338
§ 5-4 三相异步电动机的工作特性及其测取方法	343
§ 5-5 三相异步电动机的参数测定	347
小结	350
习题	352
主要符号表	355

绪 言

一、电机及电力拖动技术的发展概况

电能是现代大量应用的一种能量形式。这种能量形式有许多优点，如生产和变换比较经济，传输和分配比较容易，使用和控制比较方便等等。人类自从使用了电能以后，从繁重的体力劳动中得到了解放，大大提高了劳动生产率，并能完成手工劳动所不易或不能完成的生产任务，因此电能已成为国民经济各部门中动力的主要来源。

电能的生产、变换、传输、分配、使用和控制等，都必须利用电机这种进行能量变换或讯号变换的电磁装置。在电力工业中，发电机和变压器是电站和变电所中的主要设备。在工业企业中，大量应用电动机作为原动机去拖动各种生产机械。如机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、电铲、轧钢机、吊车、抽水机、鼓风机等等都要用大大小小的电动机来拖动；在自动控制技术中，各式各样的小巧灵敏的控制电机广泛地作为检测、放大、执行和解算元件。

不论是旋转电机的能量变换，还是控制电机的讯号变换，都是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机内部电磁过程及其所表现的特性时，要应用有关的电和磁的规律，如电路第一、第二定律，全电流定律、电磁感应定律和电磁力定律等，但是电机毕竟是一种机械，除电磁规律以外，还涉及到结构、工艺、材料等方面的问题，所以电机在拖动系统中是一种综合性的装置或元件。

电机是随着生产的发展而产生和发展的；而电机的发展，反过来，又促进社会生产力的不断提高。二十世纪以前，电机的发展过程是由诞生到在工业上初步应用，各种电机的初步定型以及

电机理论和电机设计计算的建立和发展。二十世纪的特征是由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代，不仅对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的重量轻、体积小等方面愈来愈多的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论上，发展出多种高可靠性、高精度、快速响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。同时由于功率电子学等先进学科的渗透，使电机这一古老学科得到新的发展。

新中国成立以来，我国的电机制造工业发生了巨大的变化。三十年来不仅建成了独立自主和完整的体系，而且有的产品已经达到世界先进水平，就各种拖动系统中的主要设备——电动机而言，近年来已生产了不少大型的直流电动机、异步电动机和同步电动机；在中小型电机和控制电机方面，亦自行设计和生产了不少新系列电机。由于生产上的需要，这几年来，对电机的新原理、新结构、新工艺、新材料、新的运行方式和调试方法，亦进行许多摸索、研究和试验工作，取得了不少成就。

当前科学技术突飞猛进，因此电机在制造上也向着大型、巨型发展。在应用上由于计算技术迅速发展，将会出现由机械人工作的无人工厂，以计算机作为这些工厂的“中枢神经”，实现无人化的可能。在这种时代里的某些特种电机必须具有快速响应，模仿性运动，快速起动和停止等比人的手脚更复杂而精巧的运动。在理论上，由于在电机中应用了控制技术，使电机具有更良好的特性，使各类电机成为各种机电系统中一个极为重要的元件。因之有可能将发展一门把电子学、电机学和控制论结合起来的新的学科。

上面简述了电机的发展概况。同样应用各种电动机拖动各种生产机械的电力拖动技术，其发展也是有个过程的。

最初，电力拖动代替了蒸汽或水力的拖动。当时电动机拖动生产机械的方式是通过天轴实现的，称为“成组拖动”。就是由一台电动机拖动一组生产机械，从电动机到各生产机械的能量传递以及在各生产机械之间的能量分配完全用机械方法，靠天轴及机

械传动系统来实现。电动机远离生产机械,车间里有大量的天轴、长皮带和皮带轮等。能量传递过程中的损耗大,效率低,生产率低,灰尘大,劳动条件与卫生条件很差,而且易出事故。另外,如果电动机发生故障,则成组的生产机械将停车,甚至整个生产可能停顿。这是一种陈旧落后的电力拖动方式。

为了克服上述缺点,自二十世纪二十年代以来,生产机械上广泛采用一种“单电动机拖动系统”在这一系统中,一台生产机械用一台单独的电动机拖动。这样,电动机与生产机械在结构上配合密切,可以用电气方法调节每台生产机械的转速,从而进一步简化机械结构,而且易于实现生产机械运转的全部自动化。

但是,如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械时,则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构,因此,自三十年代起,广泛采用了“多电动机拖动系统”,即每一个工作机构用单独的电动机拖动,这样生产机械的机械结构可大为简化。例如,具有三个主轴的龙门铣床用三台电动机拖动,每台电动机拖动一个主轴运动。某些生产机械的生产过程长而连续,如造纸,印刷,纺织,轧制等机械,也都采用多电动机拖动系统,这些机械一般由多个分部组成,每一分部可用单独电动机拖动。

必须指出,在只有一个工作机构的生产机械上有时也采用多电动机拖动系统。例如,链式输送机的工作机构是一条长的链式运输带,它往往采用多台电动机拖动。

在多电动机拖动系统中,各台电动机可在机械上采用刚性联结或摩擦联系等。很多情况下也采用电气方法联系,用电气控制线路及装置实现各电动机间的转速关系保持恒定(如电轴系统),维持某一参数(如张力)在容许范围内,如造纸、纺织、印刷、轧制等生产机械及各电动机间互相联锁(保证一定的起动运转,停车程序)等。

随着生产的发展,对上述单电动机拖动系统及多电动机拖动系统提出了更高的要求:如要求提高加工精度与工作速度,要求快速起动、制动及逆转,实现在很宽范围内调速及整个生产过程

自动化等。要完成这些任务，除电动机外，必须有自动控制设备，组成自动化的电力拖动系统。

现代工业的电力拖动，一般都要求局部的或全部的自动化，因此必然要与各种控制元件组成的自动控制系统联系起来，而电力拖动则视为自动化电力拖动系统的简称。在这一系统中可对生产机械进行自动控制，如实现自动控制起动、制动、调速、同步、自动维持转速、转矩或功率为恒定值，按给定程序或事先不知道的规律改变速度、改变转向和工作机构的位置，及使工作循环自动化等。

随着电机及电器制造业以及各种自动化元件的发展，自动化电力拖动系统得到不断的更新与发展。

最初采用的控制系统是继电器-接触器型的，属于有触点断续控制系统，称为继电器-接触器自动控制系统。

三十年代初，出现了发电机-电动机组，使调速性能优异的直流电动机得到了广泛的应用。在直流电动机的拖动系统中，由于电机、电器、自动化元件及功率电子器件的不断的更新与发展，在上述发电机-电动机组的基础上，发展成为采用交磁放大机、磁放大器、可控离子变流器及可控硅整流器等组成的自动化直流电力拖动系统。目前可控硅直流自动电力拖动系统已得到了广泛的应用，并正在向大容量的方向发展。国外自动化的直流电力拖动的成套设备功率已高达2万多千瓦，供1200伏的直流电动机配套使用。做到集中控制，集中监视。在自动化元件方面已有整套标准控制单元，控制装置集成化，小型化，微型化，做到结构上组合安装积木化，微型化的自动化装置可直接装于电动机机座上，做到与电动机一体化，节省专用的控制柜。设备可靠性高，维护简便，许多设备都可做到锁门运行，不需监视与维护。

与直流电动机相比，交流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、惯性小等一系列优点，单机功率比直流电机高很多（目前直流电机的单机功率一般为12000~14000千瓦），电压可容易做成6000~10000伏（直流电机只有1000伏左右），还能实现高速

拖动（几万到几十万转/分），而直流电机一般只能达到3000转/分。

国外在四十年代末到五十年代，对串级及离子变频的交流调速系统进行了一些研究，并提出了无换向器电动机的原理。其后，可控硅元件的出现，为交流调速系统开辟了广阔的前途。六十年代后期，基本上解决了技术上的关键问题。七十年代则进入扩大应用及系列化，进一步提高性能指标，向大容量发展的阶段。目前串级调速系统，变频调速系统及无换向器电动机的功率都已达到一万千瓦以上，控制系统已实现集成化，并已在工业中广泛应用。

我国建国以来，电力拖动自动化技术的发展有很大成绩，建立了一些有一定电力拖动自动化水平的工厂，成立了一批科研与设计机构。但与国外比较差距还是较大。目前正急起直追，主攻成套，狠抓基础，开展一些关键技术的研究，如电力拖动自动化成套技术，它应用系统工程理论与计算机对工业自动化系统及成套设备的技术经济指标进行全面分析研究，使系统各组成部分按全系统要求的最佳方式工作，达到全系统和整个成套设备综合技术经济指标最佳。

随着近代电子技术和电子计算技术的发展以及现代控制理论的应用，自动化电力拖动正向着计算机控制的生产过程自动化的方向迈进。在一些现代化的工厂里，从原料进厂到产品出厂都是自动化或半自动化的，而且达到高速、优质、高效率地生产。但必须指出，在大多数综合自动化系统中，自动化的电力拖动系统仍然是不可缺少的主要组成部分。

我国与国外的发展情况相同，一些工厂企业的生产过程正从单机、局部自动化发展到全盘，综合自动化。在中国共产党的正确领导下，在不远的将来，一大批自动生产线，一些自动化车间和自动化工厂将会在我国出现。

二、本课程的性质，任务与内容

本课程是工业电气自动化专业的一门专业基础课。

本课程的任务是使学生掌握常用交直流电机、控制电机及变压器等的基本结构与工作原理以及电力拖动系统的运行性能，分析计算，电机选择与实验方法，为学习《自动控制系统》，《自动控制理论》及《计算机控制技术》等课程准备必要的基础知识。

本课程主要研究电机与电力拖动系统的基本理论问题，同时也联系到科学实验与生产实际的内容。具有原《电机学》及《电力拖动基础》的基本内容，包括直流电机及拖动、变压器、交流电机及拖动、控制电机及多电动机拖动系统与拖动系统电机的选择等五部分。在学完本课程之后，应达到下列要求：

(1) 掌握常用交直流电机及变压器的基本理论(电磁关系、能量关系等)；

(2) 掌握控制电机的工作原理，特性及用途；

(3) 掌握分析电动机机械特性及各种运转状态(电动、反接制动、能耗制动、回馈制动)的基本理论；

(4) 掌握电力拖动的机械过渡过程的基本特性及其主要的分析方法；了解机械惯性和电磁惯性同时作用时，它们对直流电力拖动过渡过程的影响；

(5) 掌握电力拖动系统中电动机参数调速方法的基本原理和技术经济指标；

(6) 掌握选择电机的原理与方法；

(7) 掌握电机与电力拖动系统的基本的实验方法与技能，并具有熟练的运算能力；

(8) 了解电机与电力拖动今后发展的方向。

为了解决本课程计算方法的基本问题，给以启发性的示范以提高学生的运算能力，同时也起到巩固理论知识的作用，建议在教学过程中安排1~2次习题课，内容为交直流电动机工作特性与机械特性的计算。

为了深入掌握本课程的有关内容，应在教学过程中，选择适当份量的课外作业，进行演习。本书各章均附例题思考题及习题，

可供参考与选择。习题也可与实验内容结合起来。

各章所附习题作业的主要内容为：

- (1) 运动方程式中各参数折算的计算；
- (2) 他励直流电动机工作特性的计算；
- (3) 他励直流电动机机械特性的计算；
- (4) 他励直流电动机过渡过程的计算；
- (5) 变压器工作特性的计算；
- (6) 异步电动机工作特性的计算；
- (7) 异步电动机机械特性的计算；
- (8) 异步电动机起动设备的计算；
- (9) 异步电动机过渡过程的计算；
- (10) 长时变化负载下电动机功率的计算；
- (11) 短时工作方式电动机功率的计算；
- (12) 断续工作方式电动机功率的计算；
- (13) 硬轴联结双电动机拖动系统机械特性的计算。

本课程在教学过程中，必须进行必要的实验，其主要目的和要求为：

(1) 通过实验，对交直流电动机的工作特性及机械特性的性质，基本原理和理论计算加以验证；

(2) 进行独立的实验操作，学会测定各种电机（包括控制电机及变压器）的工作特性，电力拖动的机械特性及电机参数的方法，提高实验技能和熟练程度。

建议本课程在下列实验内容中选做九个左右，实验学时数约为21（除实验的3、7、8外，每个实验为2学时）：

- (1) 他励直流电动机工作特性的测定；
- (2) 并励直流发电机特性的测定；
- (3) 他励直流电动机在各种运转状态下机械特性的测定（3学时）；
- (4) 电动机飞轮矩和参数的测定；
- (5) 单相变压器的空载、短路和极性试验；

- (6) 三相变压器极性和绕组联接组的测定;
- (7) 三相异步电动机参数及工作特性的测定 (3 学时);
- (8) 绕线转子异步电动机在各种运转状态下机械特性的测定 (3 学时);
- (9) 同步电动机的起动和功率因数调节的实验;
- (10) 交(直)流执行电动机的工作特性的测定;
- (11) 交(直)流测速发电机在不同负载下的电压转速特性及误差的测定;
- (12) 自整角机的转矩特性, 输出特性及精确度的测定。

本课程是在学过高等数学、物理、电路及磁路等有关内容后进行讲授的。

由于自动化电力拖动系统的内容很多, 高等学校一机部对口工业电气自动化专业座谈会所订教学计划将有关内容分为三门课程, 即: 《电机及拖动基础》; 《自动控制系统》; 《半导体变流技术》。某些内容还包括在《计算机控制技术》、《自动控制理论》及个别选修课中, 在学工阅读教材《工厂电气控制设备》中也有反映。本课程仅讨论自动化电力拖动系统的某些基本原理, 例如交直流电机的起制动及调速部分, 本书只介绍其基本原理、方法、特性、以及调速方法的技术经济指标, 而如何实现自动起制动及调速的线路以及分析系统的动态特性等问题, 不属本书的范围。这些内容应在一些后续课程中讲授。

第一篇 直流电机及拖动

第一章 直 流 电 机

内 容 提 要

本章以直流电动机为讨论的主要对象，分析直流电机的工作原理、结构、电路、磁路、运行原理及换向等问题，为电力拖动系统提供元件的性能知识。

讨论问题时，既运用在电工原理课程中所学习过的基本电磁规律，又注意到直流电动机是拖动系统中的元件，以及在其中进行着机电能量变换的物理现象。

旋转电机是一种机电能量变换的电磁装置，把电能变换为机械能的称为电动机；把机械能变换为电能的称为发电机。由于电流有交、直流之分，所以旋转电机也有直流电机与交流电机两大类。

直流电动机有很多优点，如调速特性很好、起动转矩较大等等，特别是调速特性为交流电动机所不及。因此在对电动机的调速性能和起动性能要求高的生产机械上，大都使用直流电动机进行拖动；但是直流电动机的制造工艺复杂，生产成本较高，维护较困难，可靠性较差，所以在现代工业的拖动系统中，直流电动机与交流电动机“各得其所”。直流发电机也有和直流电动机一样的缺点，而且还要配一台差不多容量的原动机，随着可控硅技术的发展，特别是在大功率可控硅元件问世以后，有逐步被整流电源所取代的趋势。目前有些直流电源，如大型同步发电机的励磁电源以及化学工业中的电镀、电解等设备的电源还是用直流发电机来供给。

§ 1-1 直流电机的工作原理及结构

一、直流电机的工作原理

(一) 直流电动机的工作原理

直流电动机的工作原理是建立在皮-萨电磁力定律的基础上。我们回顾一下皮-萨电磁力定律。

根据实验可知，若磁场与载流导体互相垂直（图 1-1 a），则作用在导体上的电磁力应为

$$f = Bi l \quad (1-1)$$

式中 B ——磁场的磁感应强度（韦/米²）；

i ——导体中的电流（安）；

l ——导体的有效长度（米）。

算出来的电磁力单位是牛。力的方向用左手定则（图 1-1 b）决定。

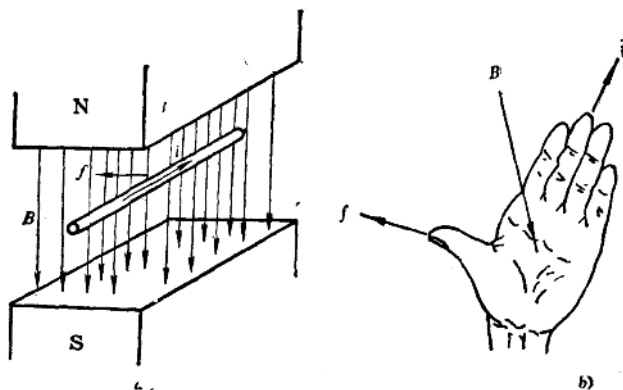


图1-1 载流导体在磁场内受到的电磁力及左手定则

由于绝大多数的电动机都须作连续的旋转运动，因此必须使载流导体在磁场中所受到的电磁力，形成一种方向不变的转矩。我们先观察一下如图 1-2 所表示的一种简单的电磁装置，它能否

使导体所受的电磁力形成一种转矩？

图 1-2 中，N、S 为一对固定的磁极（一般是电磁铁，也可以是永久磁铁），两磁极间装着一个可以转动的铁质圆柱体，圆柱体的表面上固定着一个线圈，上线圈边为 a ，下线圈边为 x （下面把这个装有线圈的铁质圆柱体称为电枢）。N 极与 S 极的磁力线所通过圆柱体的途径如图 1-2 中所表示。当线圈 ax 中通入直流电流（由 a 边流入，从 x 边流出）时，线圈边 a 和 x 上均受到电磁力，根据左手定则决定力的方向，这一对电磁力形成了作用于电枢的一个电磁转矩，转矩的方向是逆时针方向。若电枢转动，线圈边 a 和 x 的位置互换，而线圈中通过的还是直流电流，则所产生的电磁转矩的方向却变为顺时针方向了，因此电枢受到一种方向交变的电磁转矩。这种交变的电磁转矩只能使电枢来回摇摆，而不能使电枢连续转动。显然，要使电枢受到一个方向不变的电磁转矩，关键在于，当线圈边在不同极性的磁极下，如何将流过线圈中的电流方向及时地加以变换，即进行所谓“换向”。为此必须增添一个叫做换向器的装置，如图 1-3 中所表示。换向器由互相绝缘的铜质换向片构成，装在轴上，也和电枢绝缘，且和电枢一起旋转。换向器又与两个固定不动的电刷 A、B 相接触。

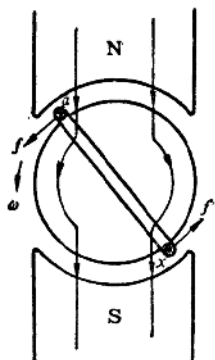


图1-2 载流线圈在气隙磁场中产生的电磁转矩

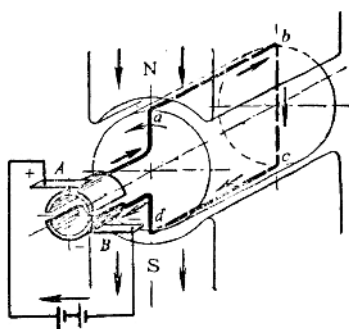


图1-3 直流电动机工作原理示意图