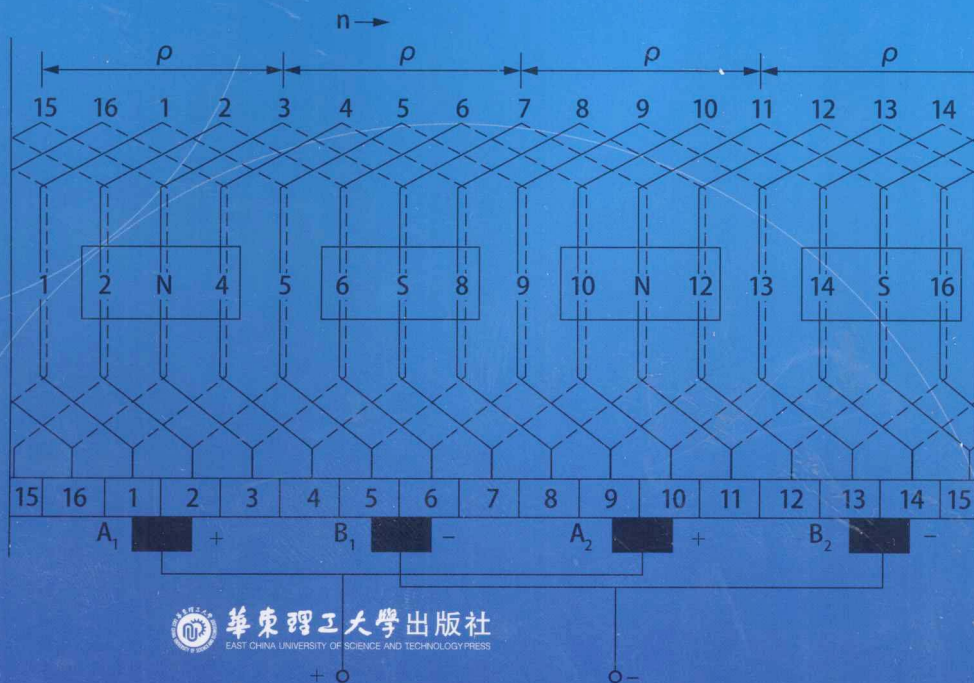


电机与电力拖动

DIANJI YU DIANLI TUODONG

郭丙君 编著



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

电机与电力拖动

郭丙君 编著

 华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

· 上海 ·

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动/郭丙君编著. —上海:华东理工大学出版社,
2013. 8
高等院校网络教育系列教材
ISBN 978-7-5628-3620-9

I. ①电… II. ①郭… III. ①电机-高等学校-教材
②电力传动-高等学校-教材 IV. ①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 175141 号

电机与电力拖动

编 著 / 郭丙君

责任编辑 / 纪冬梅

责任校对 / 张 波

封面设计 / 裘幼华

出版发行 / 华东理工大学出版社有限公司

地 址: 上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话: (021)64250306(营销部)

(021)64252749(编辑部)

传 真: (021)64252707

网 址: press.ecust.edu.cn

印 刷 / 上海展强印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 447 千字

版 次 / 2013 年 8 月第 1 版

印 次 / 2013 年 8 月第 1 次

书 号 / ISBN 978-7-5628-3620-9

定 价 / 39.00 元

联系我们: 电子邮箱 press@ecust.edu.cn

官方微博 e.weibo.com/ecustpress

淘宝官网 <http://shop61951206.taobao.com>



序

网络教育是依托现代信息技术进行教育资源传播、组织教学的一种崭新形式,它突破了传统教育传递媒介上的局限性,实现了时空有限分离条件下的教与学,拓展了教育活动发生的时空范围。从1998年9月教育部正式批准清华大学等4所高校为国家现代远程教育第一批试点学校以来,我国网络教育历经了若干年发展期,目前全国已有68所普通高等学校和中央广播电视大学开展现代远程教育。网络教育的实施大大加快了我国高等教育的大众化进程,使之成为高等教育的一个重要组成部分;随着它的不断发展,也必将对我国终身教育体系的形成和学习型社会的构建起到极其重要的作用。

华东理工大学是国家“211工程”重点建设高校,是教育部批准成立的现代远程教育试点院校之一。华东理工大学网络教育学院凭借其优质的教育教学资源、良好的师资条件和社会声望,自创建以来得到了迅速的发展。但网络教育作为一种不同于传统教育的新型教育组织形式,如何有效地实现教育资源的传递,进一步提高教育教学效果,认真探索其内在的规律,是摆在我们面前的一个新的、亟待解决的课题。为此,我们与华东理工大学出版社合作,组织了一批多年来从事网络教育课程教学的教师,结合网络教育学习方式,陆续编撰出版一批包括图书、课程光盘等在内的远程教育系列教材,以期逐步建立以学科为先导的、适合网络教育学生使用的教材结构体系。

掌握学科领域的基本知识和技能,把握学科的基本知识结构,培养学生在实践中独立地发现问题和解决问题的能力是我们组织教材编写的一个主要目的。系列教材包括了计算机应用基础、大学英语等全国统考科目,也涉及了管理、法学、国际贸易、机械、化工等多学科领域。

根据网络教育学习方式的特点编写教材,既是网络教育得以持续健康发展的基础,也是一次全新的尝试。本套教材的编写凝聚了华东理工大学众多在学科研究和网络教育领域中有丰富实践经验的教师、教学策划人员的心血,希望它的出版能对广大网络教育学习者进一步提高学习效率予以帮助和启迪。

华东理工大学副校长



前 言

本书是作者根据电气工程及其自动化类专业的性质、教学改革的要求以及多年的“电机与电力拖动”课程教学经验,并参阅其他教材而编写的,力求使“电机学”与“电力拖动基础”有机地结合起来,并保持各自的系统性和相对独立性。

本教材可作为高等学校的电气工程及其自动化、自动化、机电一体化等专业的“电机学”“电机及拖动基础”“电机及电力拖动”课程的通用教材,也可作为工程技术人员的参考用书,还可以作为相关专业的函授教材,对于从事电气工程应用的工程技术人员也是一本实用的参考书。

教授本书需要 64 学时左右,不同院校、不同专业可根据授课学时的差异,选择学习本教材内容,对于安排学时少的学校,带 * 的内容可以不讲授,这部分内容是为了学生拓展知识面而用的。

本书主要内容包括变压器、直流电机、异步电机、同步电机、控制电机及电力拖动基础,也介绍了电力拖动系统中电动机的选择,重点分析、讨论电机的基本结构、运行原理、参数及运行性能,以及电力拖动系统的启动、调速、制动的原理、方法及应用。

本书在编写中着重于基本原理、基本方法、基本概念的分析 and 应用基础,深入浅出并充分注意把交、直流两大拖动系统在形式和方法上予以统一,前后呼应,以利于读者类比和对照。在每章后附有本章小结和学习要求,也给出了与生产实践相结合的一定数量的思考题与习题,以帮助读者提高解决实际问题的能力,同时每章还设计了相应的自测题,并给出了自测题的答案,以便于自学。

本书将电力拖动技术和 MATLAB/Simulink 仿真技术有机地结合在一起,对所有的重点内容及有关的过渡过程应用仿真技术安排在案例馆中进行讲解,适合于学生对于教学的重点知识和难点知识的理解和掌握,限于篇幅以上内容在电子课件中实现。

由于编者水平有限,书中难免存在不当和谬误之处,恳请有关专家和广大读者不吝赐教。

编 者

2013 年 6 月

目 录

绪论	1
概述	1
电力拖动的历史、现状与发展趋势	2
本课程的性质、任务和要求	4
1 电力拖动系统动力学	5
学习目标	5
1.1 电力拖动系统运动方程式	5
1.1.1 电力拖动系统的组成	5
1.1.2 电力拖动系统的运动方程式	6
1.2 多轴电力拖动系统的简化	7
1.3 生产机械的典型负载转矩特性	9
1.3.1 恒转矩负载的转矩特性	9
1.3.2 恒功率负载特性	10
1.3.3 通风机型负载特性	10
1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	11
本章小结	13
思考题与习题一	14
自测题一	14
2 直流电机原理	16
学习目标	16
2.1 直流电机的用途及基本工作原理	16
2.1.1 直流电机的用途	16
2.1.2 基本工作原理	17
2.2 直流电机的主要结构与参数	18
2.2.1 主要结构	18
2.2.2 电机的铭牌数据	19
2.3 电枢绕组	21
2.3.1 电枢绕组的基本知识	21
2.3.2 单叠绕组	22



2.3.3	单波绕组	24
2.4	直流电机磁场	26
2.4.1	直流电机的励磁方式	26
2.4.2	直流电机的空载磁场	26
2.4.3	电枢磁场	28
2.4.4	电枢反应	28
2.5	电枢电动势与电磁转矩	30
2.5.1	电枢电动势	30
2.5.2	电磁转矩	31
2.6	直流发电机	32
2.6.1	直流发电机稳态运行时的基本方程式	32
2.6.2	功率关系	34
2.6.3	他励直流发电机的运行特性	36
2.6.4	并励直流发电机	37
2.7	直流电动机运行原理	38
2.7.1	直流电机的可逆原理	38
2.7.2	他励直流电动机稳态运行的基本方程式	39
2.7.3	他励直流电动机的功率关系	39
2.7.4	直流电动机的工作特性	41
2.8	直流电机改善换向的方法	42
	本章小结	43
	思考题与习题二	44
	自测题二	44
3	直流电动机的拖动	46
	学习目标	46
3.1	直流电动机的机械特性	46
3.1.1	固有机械特性	46
3.1.2	人为机械特性	48
3.1.3	根据电机的铭牌数据估算机械特性	49
3.2	他励直流电动机的启动	51
3.2.1	对启动的要求和启动过程分析	51
3.2.2	降电压启动	52
3.2.3	电枢回路串电阻启动	52
3.3	他励直流电动机的调速	56
3.3.1	他励直流电动机的调速方法	56
3.3.2	调速指标	59
3.3.3	调速方式与负载类型的配合	60



3.4	他励直流电动机的电动与制动运行	62
3.4.1	概述	62
3.4.2	电动状态	63
3.4.3	能耗制动	64
3.4.4	电压反向的反接制动过程	67
3.4.5	转速反向的反接制动运行	69
3.4.6	回馈制动运行	69
	本章小结	72
	思考题与习题三	73
	自测题三	75
4	变压器	77
	学习目标	77
4.1	变压器的工作原理和结构	77
4.1.1	变压器的工作原理	77
4.1.2	变压器的分类	78
4.1.3	变压器的基本结构	78
4.1.4	变压器的型号、额定数据	80
4.2	变压器的空载运行	81
4.2.1	空载运行时的电磁关系	81
4.2.2	空载电流	84
4.2.3	空载时的等效电路和相量图	86
4.3	变压器的负载运行	87
4.3.1	负载运行时的电磁过程	87
4.3.2	电动势平衡方程	88
4.3.3	磁动势平衡方程	88
4.3.4	变压器绕组的折算	89
4.3.5	等效电路和相量图	90
4.3.6	简化等效电路和简化相量图	91
4.4	标么值及应用	95
4.5	变压器的运行特性	97
4.5.1	变压器负载时副边端电压的变化	97
4.5.2	变压器的效率	99
4.6	变压器的联结组别	101
4.6.1	单相变压器绕组的标志方式	101
4.6.2	三相变压器绕组的联结	102
4.6.3	三相变压器的联结组别	104
4.6.4	标准联结组	107



4.7 电力拖动系统中的特殊变压器	107
4.7.1 自耦变压器	107
4.7.2 仪用互感器	110
本章小结	112
思考题与习题四	113
自测题四	115
5 三相异步电动机原理	116
学习目标	116
5.1 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	116
5.1.1 异步电动机的主要用途与分类	116
5.1.2 基本结构	117
5.1.3 三相异步电动机的基本工作原理	119
5.1.4 三相异步电动机的型号和额定值	120
5.2 交流电机电枢绕组及其感应电动势和磁通问题	121
5.2.1 交流电机电枢绕组	121
5.2.2 旋转磁动势	125
5.2.3 交流绕组的感应电动势	135
5.3 三相异步电动机的空载运行	141
5.3.1 空载运行时的电磁关系	141
5.3.2 空载运行时的电动势方程、等效电路及相量图	142
5.4 三相异步电动机的负载运行	143
5.4.1 负载运行时的磁动势平衡方程	144
5.4.2 负载运行时的电磁关系	145
5.4.3 负载运行时的电动势平衡方程	146
5.4.4 三相异步电动机的等效电路	147
5.5 三相异步电动机的功率平衡和转矩特性	151
5.5.1 功率关系	151
5.5.2 转矩关系	152
5.6 三相异步电动机的工作特性	154
本章小结	155
思考题与习题五	156
自测题五	157
6 三相异步电动机的拖动	158
学习目标	158
6.1 三相异步电动机的机械特性	158
6.1.1 机械特性表达式	158



6.1.2	固有机械特性	163
6.1.3	人为机械特性	163
6.2	三相异步电动机的启动	166
6.2.1	概述	166
6.2.2	三相异步电动机的直接启动	168
6.2.3	三相鼠笼式异步电动机的降压启动	168
6.2.4	三相异步电动机的软启动	175
6.2.5	特种笼型转子的异步电动机的启动	176
6.3	绕线式三相异步电动机的启动	178
6.3.1	转子串频敏变阻器启动	178
6.3.2	转子串电阻分级启动	180
6.4	三相异步电动机的调速	184
6.4.1	改变定子电压调速	184
6.4.2	绕线转子异步电动机转子串电阻调速	186
6.4.3	改变定子极数调速	188
6.4.4	三相异步电动机变频调速	192
6.5	三相异步电动机的制动	198
6.5.1	电动运行	198
6.5.2	能耗制动	199
6.5.3	反接制动	200
6.5.4	回馈制动运行	202
	本章小结	207
	思考题与习题六	208
	自测题六	210
7	三相同步电动机	212
	学习目标	212
7.1	同步电动机的结构和工作原理	212
7.1.1	同步电动机的基本工作原理	212
7.1.2	同步电动机的结构	213
7.2	同步电动机的电磁关系	214
7.2.1	同步电动机的磁通势	214
7.2.2	凸极同步电动机的双反应原理	215
7.2.3	凸极同步电动机的电压平衡方程式	216
7.2.4	凸极同步电动机的电动势相量图	217
7.2.5	隐极同步电动机	218
7.3	同步电动机的功率关系与矩角特性	219
7.3.1	功率关系	219



7.3.2	电磁功率	220
7.3.3	功角特性	220
7.3.4	矩角特性	221
7.3.5	稳定运行	222
7.4	同步电动机功率因数的调节	224
7.4.1	同步电动机的功率因数调节	224
7.4.2	U形曲线	227
7.5	同步电动机的启动	228
7.5.1	辅助电动机启动	228
7.5.2	异步启动	228
7.5.3	变频启动	229
	本章小结	230
	思考题与习题七	230
	自测题七	231
8	微控电机	232
	学习目标	232
8.1	单相异步电动机	232
8.1.1	一相定子绕组通电时的机械特性	233
8.1.2	两相绕组通电时的机械特性	234
8.1.3	各种类型的单相异步电动机	234
8.2	测速发电机	238
8.2.1	直流测速发电机	238
8.2.2	交流异步测速发电机	240
8.2.3	测速发电机的比较	243
8.3	伺服电动机	243
8.3.1	直流伺服电动机	243
8.3.2	交流伺服电动机	245
8.3.3	交流伺服电动机的控制方法	247
8.4	步进电动机	249
8.4.1	矩角特性及稳定平衡点	249
8.4.2	步进运行状态	251
8.4.3	连续运行状态	253
8.4.4	通电方式和电机转速	253
	本章小结	255
	思考题与习题八	255
	自测题八	256



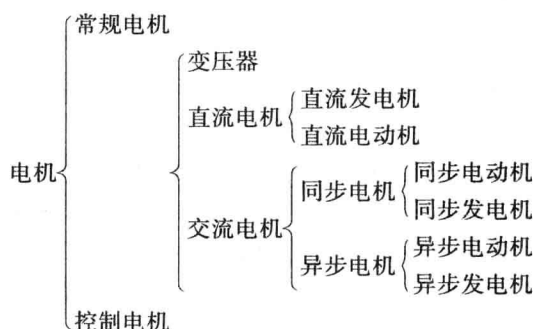
9 电动机的选择	257
学习目标	257
9.1 电动机选择的主要内容	257
9.1.1 电动机种类的选择	257
9.1.2 电动机结构类型的选择	258
9.1.3 电动机额定参数的选择	259
9.2 电动机的发热、冷却与工作制	260
9.2.1 电动机的发热与冷却	260
9.2.2 电动机的工作制	262
9.3 电动机额定功率的选择	263
9.3.1 电动机额定功率选择的步骤	263
9.3.2 电动机额定功率选择的原则	264
9.3.3 连续工作制电动机额定功率的选择	266
本章小结	268
思考题与习题九	268
自测题九	269
参考文献	270
附录一 自测题答案	271

绪 论

概 述

物质、能量和信息是人类赖以生存的三大基本要素。电能作为一种能量形式,由于其易于传输、变换、分配和控制,已成为使用最为广泛的现代能源,也是人们生产和生活中使用动力的主要来源。电机是指以电磁感应为理论基础进行机电能量转换或信号转换的一种电磁机械装置。

电机的种类很多,可分类如下:



常规电机的主要任务是完成能量的转换和传递,例如:

变压器——将一种电压等级的交流电能变换成另一种电压等级的交流电能。

发电机——将机械能转换成电能输出。

电动机——将电能转换成机械能输出,主要应用于电力拖动系统中,带动生产机械运转。

控制电机的主要任务是完成控制信号的转换和传递,通常用于控制系统中,作为检测、校正及执行元件使用,主要包括伺服电动机、测速发电机、自整角机、旋转变压器和步进电动机等。

从基本原理上看,发电机和电动机仅是电机的两种不同运行方式,从能量转换角度看,两者是可逆的。

电能的生产集中在火力、水力和原子能发电,由厂内的发电机组完成。为了减少输电中的电能损耗,远距离输电均采用高电压,然后经过降压再供给用户,电压的升高和降低都是由变压器完成的。



由电动机来拖动生产机械运行的系统,称为电力拖动系统。也就是说电力拖动就是使用各种电动机作为原动机拖动生产机械运动,以完成一定的生产任务。由于电动机具有性能优良、高效可靠、控制方便等优点,因此现代化生产中,除了一部分生产机械是采用气动或液压拖动以外,大多数生产机械都采用电力拖动。例如:在工农业生产和交通运输中,机床、轧钢机、起重机、卷扬机、鼓风机、抽水机、纺织机、印染机、印刷机、电动工具和电动车辆等都采用电力拖动;在人们的日常生活中,各种家用电器大都使用微、特电机作为驱动装置。在自动控制系统、计算机系统和机器人等高新技术中,大量使用控制电机作为检测、放大和执行元件。

因此,可以说电机与电力拖动系统已广泛应用到我们现代社会生产和生活的方方面面。如果没有发电机也就没有大量的电能产生,如果没有电动机也就没有用电力驱动的运动装置和设备。

电力拖动的历史、现状与发展趋势

公元前三千年,中国有了水车,后来又出现了风车,这些都是最简单的拖动系统。

17世纪末,人类开始利用蒸汽动力。1782年,瓦特发明了第一台连续运转的蒸汽机,开创了机器时代。

1831年法拉第发现了电磁感应现象。1888年,Tesla发明了感应电动机,从此开始了电气时代。

自19世纪末电动机逐步代替蒸汽机以来,电力拖动的发展,大体上经历了成组拖动、单机拖动和多电动机拖动三个阶段。所谓成组拖动即用一台电动机拖动一根主轴,再经过传动带或绳索来分别拖动几台生产机械,这种拖动形式由于结构不合理,电动机性能不能充分发挥,而且效率很低,所以现在已经很少采用。其后,在20世纪20年代开始采用了单机拖动,即用一台电动机来拖动一台生产机械,减少了中间传动机构,提高了效率,并可充分利用电动机的调速性能来满足生产机械的工艺要求。随着社会的进步和生产力的发展,一台生产机械往往具有许多运动机构,如仍用一台电动机来拖动,显然是不适合的,因此,在20世纪30年代后,人们开始采用多电动机来拖动运动机构较复杂的生产机械,即用一台电动机来拖动生产机械中某一个运动部件,这样也易实现自动化生产,所以,现代化电力拖动系统基本上是采用这种多电动机拖动形式的。

1956年,晶闸管在Bell实验室诞生,“电子”进入到强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的纽带,开始了电子时代。

20世纪60年代,电力电子器件全面进入电力拖动领域,其重要意义在于:电力电子学把机器时代、电气时代和电子时代开创的技术有机地融合在一起。

其后,自动化技术和计算机技术也不断应用于电机控制,使电力拖动系统发生了根本性改变。当今电力拖动已进入到一个自动化电力拖动系统的崭新阶段。

然而,无论现代电力拖动系统结构如何复杂,从原理上讲,它们仍然是由原动机、传动机构和生产机械三个部分组成。



其中,电机是一个机电能量转换器,它把从电源输入的电能转换成生产机械所需的机械能或者将机械能(由动能或位能转换而来)转换成电能馈送至电网。传动机构用于传送动力、实现速度和运行方式的变换。

电力拖动系统包括直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两种,它们是以拖动生产机械的电动机类型来分类的。

由直流电动机作为原动机的拖动系统称为直流电力拖动系统。其优点是系统的启动转矩大,在较大范围内能进行速度的平滑调节且控制简便。然而,由于直流电动机具有换向器和电刷,给运行带来不少麻烦,如需要经常维护,不能使用在易燃、易爆工业场合,以及限制了电动机向高速、大容量方面发展,尽管这样,直流电力拖动系统至今在各个工业传动中仍发挥着重要的作用。

以交流电动机作为原动机的拖动系统,称为交流电力拖动系统。由于交流电能输送方便,交流异步电动机的结构简单、价格便宜、维护方便,并且能在高速及环境条件较恶劣场合下应用等优点,故使交流电力拖动获得极广泛的应用。但是,长期以来由于交流拖动的调速性能(如调速范围、调速精度、平滑性、过载能力)等指标都不及直流电力拖动,因此,在要求较高的调速系统中,交流电力拖动应用一度受到了限制。直至如今,由于电力电子技术的飞跃发展,出现了各种类型的晶闸管(半控型电力电子器件)整流电路及逆变电路,特别是基于全控型电力电子器件的整流电路及逆变电路的高速发展,不但为直流电力拖动系统解决了可控制直流电源问题,同时也为交流电力拖动系统提供了频率和电压可调的交流电源,这显然为交流调速系统开辟了新的前景。

可以深信,今后电力拖动系统的发展和應用,必然会在交、直流拖动系统相互竞争和交替发展的进程中不断完善并进入到一个划时代的新领域。

目前,电力拖动的现状可以概括为以下两点:

(1) 电力拖动现已取代了其他拖动形式,成为主要的拖动形式。这是因为电动机与其他原动机相比有许多优点,比如:电能的获得和转换比较经济;传输和分配比较便利;操作和控制容易,特别是易于实现自动与远程控制。因此,目前绝大多数的生产机械都采用电力拖动。而且,目前电力拖动的方式也几乎全部是单机或多机拖动。

(2) 当代科学和技术的新成果广泛地应用于电力拖动系统之中,比如:电力电子学的发展,使半导体变流装置广泛地用作电力拖动的电源;微电子学的发展,使电子控制器件和微处理机成为电力拖动的主要控制手段;自动控制理论广泛应用于电力拖动自动控制系统中,大大提高了系统的性能等。

随着现代电力电子技术、自动化技术和计算机技术的发展,电机与拖动的发展趋势为:

- (1) 用交流电力拖动取代直流电力拖动;
- (2) 从节能的角度改造电力拖动系统,比如:用交流调速系统拖动电动水泵可以节能;
- (3) 继续采用新技术不断提高电力拖动系统的性能和完善系统功能;
- (4) 通过系统集成和技术融合,组成综合自动化系统,以进一步提高生产效率。



本课程的性质、任务和要求

电机与电力拖动教材是把电机学和电力拖动基础两门课程有机结合为一门课程的教材。本课程是电气工程及其自动化、自动化专业等相关专业的一门专业基础课,学生在掌握了电路、电子等课程知识后,通过本课程学习,将获得各种电动机的工作原理及由各种电动机所组成的电力拖动系统的基本理论,系统在各种运行状态时的静、动态特性与计算方法,并能掌握结合生产实践,用工程方法正确地选择电动机的容量等基本技能。同时也为进一步学习本专业的有关后续课程,如《电力拖动控制系统》《交、直流调速》等储备必要的基础知识。

在学习本课程时要注意各章节之间的内在联系,力求达到融会贯通。认真做好每章思考题和习题是学好本课程的关键。而实验及课程设计是必要的实践性教学环节应给予一定的重视。



电力拖动系统动力学

学习目标

通过本章的学习,了解电力拖动系统的基本概念;掌握电力拖动系统的运动方程式;学会多轴旋转系统的折算方法;掌握电力拖动系统中的负载的机械特性;掌握电力拖动稳定运行的条件。

本章介绍电力拖动系统的组成和电力拖动系统的运动方程式,生产机械转矩及系统飞轮矩的折算方法,生产机械各种类型的机械特性,最后介绍电力拖动系统稳定运行的条件。本章内容不仅适用于直流电力拖动,也适用于交流电力拖动,是交、直流电力拖动系统的共同问题,也是电力拖动部分的基础。

1.1 电力拖动系统运动方程式

1.1.1 电力拖动系统的组成

原动机带动生产机械运动叫做拖动。用电动机带动生产机械运动的拖动方式叫电力拖动,电动机是原动机,生产机械是电动机的负载。最简单的电力拖动,如日常生活中的电风扇、洗衣机,工业生产中的水泵等;复杂的电力拖动,如钢厂中的连轧机和可逆轧机等。

电力拖动系统一般是由电动机、生产机械的工作机构、传动机构、控制设备以及电源等五部分组成,如图 1-1 所示。电动机把电能转换成机械动力,用以拖动生产机械的某一工作机构。工作机构是生产机械为执行某一任务的工作机械部分。控制设备由各种电器元件组成,用以控制电动机的运转,从而对工作机构的运动实现自动控制。电动机与工作机构之间的传动机构,是把电动机的运动经过中间变速或变换运动方式后,再传给生产机械的工作机构。电源用来向电动机及电气控制设备供电。

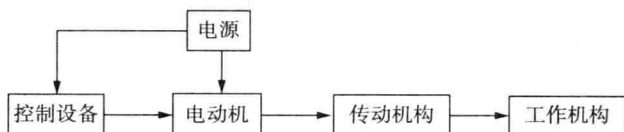


图 1-1 电力拖动系统示意图