



普通高等教育
“十一五”国家级
规划教材



普通高等教育
电气工程与自动化类
“十三五”规划教材

FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES

电机及拖动基础

下 册

第5版

张晓江 顾绳谷 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

电机及拖动基础

下 册

第 5 版

张晓江 顾绳谷 主 编
唐海源 姚守猷 副主编



机械工业出版社

全书分上、下两册,包括“电机学”及“电力拖动基础”两门课程的主要内容。本书为下册,主要为电力拖动部分,内容包括:电力拖动系统动力学基础、交流和直流电动机电力拖动、多电动机拖动系统以及拖动系统电动机的选择等。重点介绍电力拖动系统的运行性能与分析计算。本书是修订第5版,内容有所增删,部分安排做了调整:增加了直流电动机PWM调速方式;删除了一些过时的交流异步电动机起动、调速方法;增加了近年来在工业领域广泛使用的软起动器—三相异步电动机组合、变频器—三相异步电动机组合等内容;作为应用实例,简要介绍了近年来高速发展的高铁动车组列车牵引电机系统的工作原理;有关MATLAB/Power System Blockset应用于电力拖动系统的内容也得到进一步充实。本书给出了部分习题参考答案,并配有电子课件以及习题解答与学习指导(注:带“*”的章节为选读内容)。

本书配套有电子课件,并且单独出版了《电机及拖动基础实验》以及《电机及拖动基础习题解答与学习指导》。

本书可作为高校本科自动化、电气工程及其自动化等专业的教材,也可以作为电气类或自动化类其他专业有关课程以及“运动控制”课程的基础教材,对广大工程技术人员也有重要的参考价值。

本书配套资源可登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目(CIP)数据

电机及拖动基础. 下册/张晓江, 顾绳谷主编. —5版. —北京: 机械工业出版社, 2016. 11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育电气工程与自动化类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-54630-6

I. ①电… II. ①张… ②顾… 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(2016)第201908号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 王 荣

责任校对: 刘 岚 封面设计: 马精明

责任印制: 李 洋

中教科(保定)印刷股份有限公司印刷

2016年11月第5版第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·382千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54630-6

定价: 38.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网: www.golden-book.com

前 言

本书的第1版(上、下册)于1980年问世,1982年获机械工业出版社三十周年优秀图书一等奖;1988年获全国机电类优秀教材二等奖。第1版在经过全国高校选用十余年后,进行了修订,于1997年出版了第2版,并被列为全国普通高等教育自动化专业的规划教材。2004年1月本书经过进一步修订后,作为“21世纪普通高等教育规划教材”,出版了第3版。第3版获得机械工业出版社2004年度科技进步二等奖。本书经过再次修订,2009年1月出版了第4版,与第3版相比较,第4版内容有所增删,部分内容做了调整。第4版由教育部批准为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”。三十多年来,本书受到全国众多高校老师和同学的欢迎,选作教材使用,受到广泛好评。

为了便于组织教学,这次第5版在修订时仍将“电机”及“电力拖动”两部分内容相对集中,分别安排在上、下两册中。

上册在第4版的基础上,内容做了适当的调整。第5版的修改主要本着结合专业特点和适当兼顾电机学科体系的原则进行,以所谓传统四大电机加控制电机作为总体安排,仍以拖动系统中的主要元件——交、直流电机为主要分析对象。整体内容有所增加,部分内容做了调整,第五章中直线异步电动机一节做了充实。增加了附录G“两相异步电动机的不对称运行”。七个附录(附录A、B、C、D、E、F、G)旨在使读者在解读之后,能粗略地了解电机学科在理论分析上的两种基本分析方法,合成磁场理论与动态耦合电路法,两者各有优点,又有“异曲同工”之妙(附录C),以及两相异步电动机不对称运行时的分析方法(附录G)。继而使读者又可认识到现有四大类电机均有“优势”与不足之处。进入20世纪80年代后,电机学科经过与电力电子学科的交叉与渗透,衍生出了一种调速特性良好的“电子控制电动机”,或称“自控式同步电动机”或“无换向器电动机”(第六章第二节详述)。与此同时,经众多学者努力探索和求真,初步揭示了电机中机电能量转换“之所以然”之谜(附录E、附录F)。在“回顾与展望”中,向读者展示了电机学科的广阔前景。

第5版下册中删除了一些过时的电机起动、调速方法;增加了近年来在工业领域广泛使用的直流电机PWM调速方式,软起动器-三相异步电动机组合、变频器-三相异步电动机组合等内容;作为应用实例,简要介绍了近年来高速发展的高铁动车组列车牵引电机系统的工作原理;有关MATLAB/Power System Blockset用于电力拖动系统的内容也得到进一步充实;还增加了涵盖电力拖动主要内容的教学参考实验,可供不同院校参考(注:带“*”的章节为选读内容)。

本书采用的常用文字符号和图形符号均已参照我国现行国家标准,在第5版(上、下册)中,分别列表,进一步统一了符号。

本书可以作为高校本科自动化、电气工程及其自动化等专业的教材，也可以作为电气类或自动化类其他专业有关课程及“运动控制”课程的基础教材，对工程技术人员也有重要的参考价值。本书上、下册均附有部分习题的参考答案。

与本书配套，已经出版了《电机及拖动基础习题解答与学习指导》和《电机及拖动基础实验》两本教材。

本书第5版由合肥工业大学张晓江、顾绳谷主编，唐海源、姚守猷为副主编。上册由唐海源（除第五章第八节、附录G外）编写和修订，中山大学陈鸣编写了上册第五章第八节及附录G；下册由张晓江编写和修订。

由于作者水平有限，谬误之处在所难免，欢迎广大读者不吝赐教。对在本书编写和出版过程中提出过意见、建议和帮助的同志表示衷心感谢。

为了配合课堂教学，本书上、下册均配有电子课件，欢迎使用本书作为教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

编 者

下册常用符号表

A	A 相	K'_T	转矩允许过载倍数 (选择电动机时, 留有裕量的 K_T 值)
A	面积, 电动机散热系数	K_{st}	异步电动机起动转矩倍数
B	B 相	K_I	异步电动机起动电流倍数
C	C 相	L	电感
C	电容	N	每相串联匝数
C_T	转矩常数	n	转子转速
C_e	电动势常数	n_N	额定转速
E	电动势 (交流电动势有效值)	n_0	直流电机空载转速
E_a	电枢反电势	n_s	交流电机同步转速
e	电动势的瞬时值	n_z	负载时转速
E_ϕ	相电动势	n_{st}	过渡过程开始时转速
E_0	空载电动势	Δn	转速差
F	磁动势, 力	P	功率
f	频率	P_N	额定功率
f_1	异步电动机定子频率	P_e	电磁功率
f_2	异步电动机转子频率	P_{mech}	机械功率
f_N	额定频率	P_k	堵转功率, 短路功率
GD^2	飞轮惯量	P_1	输入功率
I	电流 (交流电流有效值)	P_2	输出功率
I_a	直流电机的电枢电流	R	电阻
I_f	直流电机励磁电流	R_f	直流电机励磁绕组电阻
I_m	交流励磁电流	R_a	电枢电阻
I_μ	励磁电流中的无功分量	R_k	异步电动机短路电阻
I_N	额定电流	R_F	频敏电阻铁耗等效电阻
I_0	空载电流	R_T	绕线转子回路总电阻
I_k	短路电流, 堵转电流	R_Ω	串接的电阻值
I_{st}	起动电流	s	转差率
i	电流瞬时值	s_N	额定转差率
J	转动惯量	s_m	最大转矩时的转差率
K_T	异步电动机转矩过载倍数		

T	转矩, 时间常数	X	电抗
T_N	额定转矩	X_F	频敏电阻带铁心绕组电抗
T_e	电磁转矩	X_m	励磁电抗
T_k	堵转转矩	X_k	短路电抗
T_0	空载转矩	Z	阻抗
T_2	电动机轴上输出转矩	Z_m	励磁阻抗
$T_{\max}$	(异步电动机) 最大转矩	Z_k	短路阻抗
T_{mT}	最大制动转矩	$ZC\%$	负载持续率
T_z	负载转矩	α	晶闸管触发延迟角
T_{st}	起动转矩	η	效率
T_{MA}	拖动系统机械时间常数	η_N	额定效率
T_{lM}	机电时间常数	Φ	磁通量, 热流量
T_{ia}	电枢电路电磁时间常数	θ	角度, 温度
t	时间	θ_0	实际环境温度
t_g	电动机工作时间	θ_m	绝缘材料最高允许温度
t_{st}	起动时间	φ	相角, 功率因数角
U	电压 (交流电压有效值)	γ	液体的密度
U_N	额定电压	τ	温升
U_1	电源线电压	τ_Q	起始温升
U_0	空载电压	τ_W	稳定温升
U_k	短路电压, 堵转电压	ω	角频率, 电角速度
U_x	自耦变压器输出电压	Ω	转子机械角速度
U_ϕ	定子相电压	Ω_s	同步机械角速度
u	电压的瞬时值	Ω_{st}	机械角速度起始值
v	直线速度	Ω_x	机械角速度终了值
W	功, 能量		

目 录

前 言

下册 常用符号表

绪 言 1

第八章 电力拖动系统动力学基础 6

第一节 电力拖动系统的运动方程式 6

第二节 工作机构转矩、力、飞轮惯量 和质量的折算 11

第三节 电动机和工作机构间速比可变 的系统 14

第四节 考虑传动机构损耗时的折算 方法 17

第五节 生产机械的负载转矩特性 22

小结 24

习题 24

第九章 直流电动机的电力拖动 26

第一节 他励直流电动机的机械特性 26

第二节 他励直流电动机的起动 33

第三节 他励直流电动机的制动 46

第四节 他励直流电动机的调速 55

第五节 晶闸管一直流电动机系统 64

第六节 直流电动机 PWM 控制电路及 机械特性 68

第七节 他励直流电动机过渡过程的 能量损耗 69

第八节 串励直流电动机的电力拖动 72

小结 75

习题 77

第十章 三相异步电动机的机械特性 及各种运转状态 80

第一节 三相异步电动机机械特性的 三种表达式 80

第二节 三相异步电动机的固有机 械特性与人为机械特性 85

第三节 三相异步电动机的各种运 转状态 88

第四节 根据异步电动机的技术数据

计算异步电动机的参数 99

第五节 绕线转子异步电动机调速及 制动电阻的计算 102

小结 107

习题 108

第十一章 三相异步电动机的起动 及起动设备的计算 110

第一节 三相异步电动机的起动方法 110

第二节 改善起动性能的三相异 步电动机 116

第三节 三相笼型异步电动机定子 对称起动电阻的计算 117

第四节 三相笼型电动机起动自耦 变压器的计算 118

第五节 三相绕线转子异步电动机 转子对称起动电阻的计算 119

第六节 三相异步电动机的起动过程 122

第七节 三相异步电动机过渡过程的 能量损耗 125

* 本章附录 软起动器 128

小结 129

习题 130

第十二章 三相异步电动机的调速 133

第一节 变极调速 133

第二节 变频调速 136

第三节 调节转差能耗调速 138

* 本章附录 150

一、常用变频器的工作原理简介 150

二、高铁动车组牵引电机驱动系统 简介 150

小结 152

习题 153

第十三章 多电动机拖动系统 154

第一节 硬轴连接的双电动机拖 动系统 154

第二节 同步旋转系统（电轴系统） 157

小结 166

习题	167	第八节 选择电动机功率的统计法或 类比法	200
第十四章 电力拖动系统电动机的 选择	169	第九节 电动机电流种类、形式、额定 电压与额定转速的选择	201
第一节 电动机的发热和冷却及电动机 工作制的分类	171	小结	204
第二节 连续工作制电动机的选择	175	习题	205
第三节 短时工作制电动机的选择	186	附录	209
第四节 断续周期工作制电动机的 选择	188	附录 A MATLAB 语言简介	209
第五节 笼型异步电动机允许小时合闸 次数的确定	190	附录 B MATLAB 语言应用于计算的 实例	214
第六节 带冲击负载时电动机的选择	192	附录 C 电力拖动教学参考实验	229
第七节 电力拖动调速电动机功率的 选择	195	附录 D 电机及拖动常用图形符号	250
		下册部分习题参考答案	253
		参考文献	258

绪 言

一、电机及电力拖动技术的发展概况

电能是现代大量使用的一种能量形式。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。人类自从使用了电能，便从繁重的体力劳动中得到了解放，劳动生产率大大提高，并能完成手工劳动不易或不能完成的生产任务。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，都必须利用电机作为能量转换或信号变换的机电装置。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。如在机械工业、冶金工业、化学工业中，机床、挖掘机械、轧钢机、起重机械、抽水机、鼓风机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作为检测、放大、执行和解算元件被广泛应用。

不论是旋转电机的能量转换，还是控制电机的信号变换，都是通过电磁感应作用而实现的，因此分析电机内部的电磁过程及其所表现的特性时，要应用有关电磁学的规律，如基尔霍夫第一、第二定律，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。

电机的发明至今已有近 200 年的历史，其发展大体上可以分成三个时期：①直流电机的产生和形成；②交流电机的形成；③电机理论、设计和制造工艺逐步达到完善。

电机是随着生产发展而产生和发展的，到 19 世纪末，各种交、直流电机的基本类型及其基本理论和设计方法，大体上都已经建立起来了，而电机的发展反过来又促进社会生产力的不断提高。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。在由电气化时代进入原子能、计算机及自动化时代的今天，不仅对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的质量小、体积小等方面越来越多的要求，而且随着自动控制系统和计算装置的发展，在旋转电机的理论基础上，发展出多种高精度、快响应的控制电机，成为电机学科的一个独立分支。与此同时，电力电子学等学科的渗透使电机这一较为成熟的学科得到新的发展。

新中国成立以来，我国的电机制造工业发生了巨大变化，经过工程技术人员的努力，不仅建成了独立自主和完整的体系，而且有一些产品已经达到或接近世界先进水平。就各种拖动系统中的主要设备——电动机而言，已经研制成功 $2 \times 5000\text{kW}$ 的直流

电动机、4700kW 的直流发电机和 42MW 的同步发电机。电力变压器的最大容量已做到 840MVA, 电压最高达 750kV。在中小型电机和控制电机方面, 亦自行设计和生产了 125 个系列, 上千个品种, 几千个规格的各种电机。由于生产上的需要, 最近几年, 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, 亦进行了许多摸索、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。中小型电机正向多用途、多品种方向发展, 向高效节能方向发展。在应用上, 由于计算机技术迅速发展, 将会出现由机器人工作的无人工厂, 以计算机作为这些工厂的“中枢神经”, 使实现无人化成为可能。在这个时代里, 某些特种电机必须具有快速响应、精确定位、快速起动和停止等比人的手脚更复杂而精巧的运动。理论上, 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种极其重要的执行元件。因此, 它将和电力电子学、计算机、控制论结合起来, 发展成一门新的学科。

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, 其发展也是有一个过程的。

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”。它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、长带和带轮等。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 20 世纪 20 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, 则机械内部仍将保留着复杂的机械传动机构。因此, 自 20 世纪 30 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, 因而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, 每台电动机拖动一根主轴运动。某些生产机械的生产过程长而且连续, 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, 链式运输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连接或摩擦连接等。很多情况下也采用电气方法联系, 如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)以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, 实现在很宽的范围

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,以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,按给定程序或者实时根据要求而改变速度、改变转向和工作机构的位置,以及使工作循环自动化等。

随着电机、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。

20世纪30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、自动化元件及电力电子器件的不断更新与发展,在上述发电机—电动机组的基础上,发展成为采用交磁电机扩大机、磁放大器、可控离子变流器及晶闸管整流器等组成的自动化直流电力拖动系统。目前,晶闸管、IGBT等直流自动电力拖动系统已得到广泛的应用,自动化的直流电力拖动成套设备正在向大容量的方向发展,并做到集中控制、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、转动惯量小等一系列优点,单机功率比直流电机高得多,电压容易做成高压,还能实现高速运转。

20世纪40年代末到50年代,国外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,晶闸管、大功率晶体管及IGBT等电力电子自关断器件的出现,为交流调速系统开辟了广阔的前途,目前已进入扩大应用及系列化阶段,性能指标进一步提高。串级调速系统、变频调速系统及自控式同步电动机(无换向器电动机)正在向大容量发展;控制系统已实现集成化,并且已经在工业中广泛应用;交流电力拖动已经逐渐取代直流拖动。

新中国成立以来,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。但是与国外先进国家相比,差距还是较大。目前正在急起直追,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,它应用系统工程学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的分析研究,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。

随着近代电力电子技术和计算机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,力求做到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,例如在计算机集成制造系统(CIMS)中,自动化的电力拖动系统仍然是不可缺少的组成部分。



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,已经出现大批自动生产线。一些自动化车间和自动化工厂也已在我国出现。

另外,低成本自动化技术与设备的开发,越来越引起国内外的注意。特别对于中小型企业,应用适用技术的设备,不仅有利于获得经济效益,而且能提高生产率、可靠性与柔性,还有易于应用的优点。自动化的电力拖动系统更是低成本自动化系统的重要组成部分。

目前,世界已处于信息化的时代。以信息化带动工业化,以工业化促进信息化,是我国实现现代化的道路。由于电力拖动是各类工业(特别是制造业)、各种生产机械的主要拖动方式,其理论与技术的发展,必将在我国实现现代化与工业化的进程中,起着十分重要的作用。

二、本课程的性质、任务与内容

本课程是自动化、电气工程及其自动化等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流电机、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“电力拖动自动控制系统”“自动控制理论”“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。在学完本课程之后,应达到下列要求:

- 1) 了解常用铁磁材料的特性,掌握磁路基本定律及计算方法。
- 2) 熟悉常用交、直流电机及变压器的基本结构和工作原理,对交、直流电机绕组的基本形式及其连接规律要有一定的认识。
- 3) 掌握交、直流电机及变压器稳态运行时的基本理论、运行性能及其分析方法。
- 4) 在对称运行时,熟练运用等效电路计算变压器和三相异步电动机的性能。
- 5) 掌握控制电机的工作原理、特性及用途。
- 6) 掌握分析电动机机械特性及各种运行状态(起动、反接制动、能耗制动、回馈制动)的基本理论。
- 7) 掌握电力拖动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对直流电力拖动过渡过程的影响。
- 8) 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。
- 9) 掌握选择电机的原理与方法。
- 10) 掌握电机与电力拖动系统的基本实验方法与技能,并具有熟练的运算能力。
- 11) 了解电机与拖动今后发展的方向。

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分量的课外作业进行练习。习题内容可与实验内容结合起来。课外作业的主要内容为:

- 1) 直流磁路的正问题计算。
- 2) 直流电动机工作特性的计算。
- 3) 变压器运行特性的计算。

- 4) 交流绕组磁动势的计算。
- 5) 三相异步电动机工作特性的计算。
- 6) 运动方程式中各参数折算的计算。
- 7) 他励直流电动机调速特性的计算。
- 8) 他励直流电动机过渡过程的计算。
- 9) 三相异步电动机机械特性的计算。
- 10) 三相异步电动机起动设备的计算。
- 11) 三相异步电动机调速特性的计算。
- 12) 三相异步电动机过渡过程的计算。
- 13) 硬轴连接双电动机拖动系统机械特性的计算。
- 14) 长期变化负载下电动机功率的计算。
- 15) 短期工作方式电动机功率的计算。
- 16) 断续工作方式电动机功率的计算。

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) 通过进行独立的实验操作,学会测定各种电机(包括变压器)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。

下面列出本课程的主要实验内容供选做:

- 1) 直流电动机工作特性的测定。
- 2) 直流发电机实验。
- 3) 单相变压器实验。
- 4) 三相变压器极性和联结组的测定。
- 5) 三相异步电动机实验。
- 6) 三相同步电动机的起动和V形曲线的测定。
- 7) 交流伺服电动机的特性测定。
- 8) 交、直流测速发电机实验。
- 9) 自整角机实验。
- 10) 他励直流电动机在各种运转状态下机械特性的测定。
- 11) 他励直流电动机飞轮惯量的测定。
- 12) 三相异步电动机起动与调速实验。
- 13) 三相绕线转子异步电动机各种运转状态下机械特性的测定。
- 14) 电轴系统示范实验。

本课程与“电力拖动自动控制系统”“电力电子技术”“电器控制”等课程的分工必须明确,以免有些内容遗漏或重复。在交、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、制动及调速的电路以及分析系统的动态特性等问题,不属于本书介绍的范围。这些内容应在一些后续课程中讲授。

第八章

电力拖动系统动力学基础

内容提要

研究电力拖动系统动力学的目的是为介绍电力拖动的机械特性与过渡过程等内容做必要的理论基础准备。第一节及第二节分析运动方程式，对方程式中各参数（力、转矩、质量和飞轮惯量等）的折算方法进行分析研究；第三节介绍了电动机和工作机构间速比可变系统的有关问题；第四节讨论考虑传动机构损耗的简化折算方法与较准确的折算方法；最后，在第五节介绍几种典型生产机械的负载转矩特性。

第一节 电力拖动系统的运动方程式

“拖动”就是应用各种原动机使生产机械产生运动，以完成一定的生产任务。而用各种电动机作为原动机的拖动方式称为“电力拖动”。

一般情况下，电力拖动装置可分为电动机、工作机构、控制设备及电源四个组成部分（见图8-1）。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机械部分。控制设备是由各种控制电机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成的，用以控制电动机的运动，从而对工作机构的运动实现自动控制。为了向电动机及一些电气控制设备供电，在电力拖动系统中必须设有电源部分。

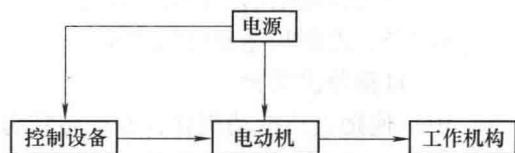


图 8-1 电力拖动系统示意图

需要指出的是，在许多情况下，电动机与工作机构并不同轴，而在两者之间有传动机构，它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。

下面我们将研究电力拖动系统中电动机带动负载的力学问题。

一、运动方程式

电动机在电力拖动系统中做直线运动（如直线电动机）或旋转运动时，由力学定律可知，必须遵循下列两个基本的运动方程式。

对于直线运动，方程式为

$$F - F_z = m \frac{dv}{dt} \quad (8-1)$$

式中 F ——拖动力 (N);

F_z ——阻力 (N);

$m \frac{dv}{dt}$ ——惯性力, 如果质量 m 的单位为 kg, 速度 v 的单位为 m/s, 时间 t 的单位为 s, 则惯性力的单位与 F 及 F_z 相同, 为 N。

与直线运动时相似, 旋转运动的方程式为

$$T - T_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (8-2)$$

式中 T ——电动机产生的拖动转矩 (N·m) (拖动转矩 T 与电动机电磁转矩 T_e 相差一个空载转矩 T_0 , $T = T_e - T_0$);

T_z ——阻转矩 (或称负载转矩) (N·m);

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——惯性转矩 (或称加速转矩)。

转动惯量 J 可表示为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (8-3)$$

式中 m 与 G ——旋转部分的质量 (kg) 与重力 (N);

r 与 D ——惯性半径与惯性直径 (m) (注意: 不是圆柱体的半径和直径);

g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

这样, 由式 (8-3) 可见, 转动惯量 J 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

运动方程式 (8-2) 的形式不够实用, 在实际计算中常把它化为另一种形式。

在式 (8-2) 中, 如将角速度 Ω (rad/s) 化成用每分钟转数 n (r/min) 表示的形式, 即

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

并用式 (8-3) 代入, 即得式 (8-2) 的实用形式为

$$T - T_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (8-4)$$

式中 GD^2 ——飞轮惯量 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$), $GD^2 = 4gJ$ 。

必须指出, 式 (8-4) 中的数字 375 是具有加速度量纲的。

电动机电枢 (或转子) 及其他转动部件的飞轮惯量 GD^2 的数值可由相应的产品目录中查到, 但是其单位目前有时仍然用 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 表示。为了转化成 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 的单位, 可将查到的数据乘以 9.81。

电动机的工作状态可由运动方程式表示出来。分析式 (8-4) 可知:

1) 当 $T = T_z$, $\frac{dn}{dt} = 0$ 时, 则 $n = 0$ 或 $n = \text{常值}$, 即电动机静止或等速旋转, 电力拖动系统处于稳定运转状态下。

2) 当 $T > T_z$, $\frac{dn}{dt} > 0$ 时, 电力拖动系统处于加速状态, 即处于过渡过程中。



3) 当 $T < T_z$, $\frac{dn}{dt} < 0$ 时, 电力拖动系统处于减速状态, 也是处于过渡过程中。

二、运动方程式中转矩的正负符号分析

应用运动方程式, 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机类型及运转状态的不同, 以及生产机械负载类型的不同, 电动机轴上的拖动转矩 T 及阻转矩 T_z 不仅大小不同, 方向也是变化的。因此, 运动方程式可写成下列一般形式

$$\pm T - (\pm T_z) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (8-5)$$

式 (8-5) 中, 转矩 T 与 T_z 前均带有正负符号, 一般可做如下规定:

如果预先规定某一旋转方向 (如顺时针方向) 为正方向, 则转矩 T 的方向如果与所规定的正方向相同, 上式 T 前带正号, 相反时带负号。而阻转矩 $\pm T_z$ 在式 (8-5) 中已带有总的负号, 因此其正负号的规定恰恰与转矩 T 的规定相反, 即阻转矩 T_z 的方向如果与所规定的旋转正方向相同时, T_z 前取负号, 相反时则取正号。

而在反转方向 (如逆时针方向), 则转矩 T 如果与反转的方向相同时取负号, 相反时则取正号; 阻转矩 T_z 如果与反转的方向相同时取正号, 相反时则取负号。

上面的规定也可归纳为: 转矩 T 正向取正, 反向取负; 阻转矩 T_z 正向取负, 反向取正。

加速转矩 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 的大小及正负符号由转矩 T 及阻转矩 T_z 的代数和来决定。

三、各种形状旋转体转动惯量的计算

通常, 电动机转子以及生产机械的旋转部件大多数都是圆柱体, 但是, 也有非圆柱体的部件。特别是近年来随着制造业自动化程度的提高, 焊接、喷涂、装配和上下料等各种类型的工业机器人越来越广泛地应用于生产第一线。这一类生产机械的转动惯量是机器人控制系统中的极其重要的参数。

图 8-2 是一个典型的 3 自由度机械臂的示意图。可以看到, 对于第一个自由度的驱动电动机 M_1 而言, 它的转动部件包括后面几节机械臂, 不再是圆柱体了, 它的转动惯量随着后面几个自由度的驱动电动机 M_2 、 M_3 输出角度的变化而变化。旋转体的转动惯量是机器人动力学系统数学模型中的重要参数, 如果对这个参数的计算不准确, 误差过大, 则会导致机器人控制系统的性能降低, 甚至导致控制系统不稳定。

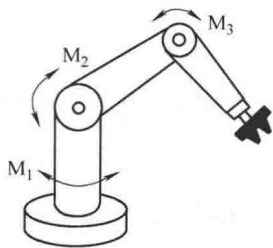


图 8-2 3 自由度机械臂的示意图

因此, 我们有必要计算出各种形状旋转体转动惯量。计算旋转物体的转动惯量分两种情况, 一种是旋转轴通过该物体的重心; 另一种是旋转轴不通过该物体的重心。

1) 旋转轴通过该物体的重心时, 转动惯量可以按以下公式计算:

$$J = \sum_{i=1}^k r_i^2 \cdot \Delta m_i \quad (8-6)$$

式中 Δm_i ——该物体某个组成部分的质量;

r_i ——该部分 Δm_i 的重心到旋转轴的距离。

对质量连续分布的物体用相应的定积分计算: