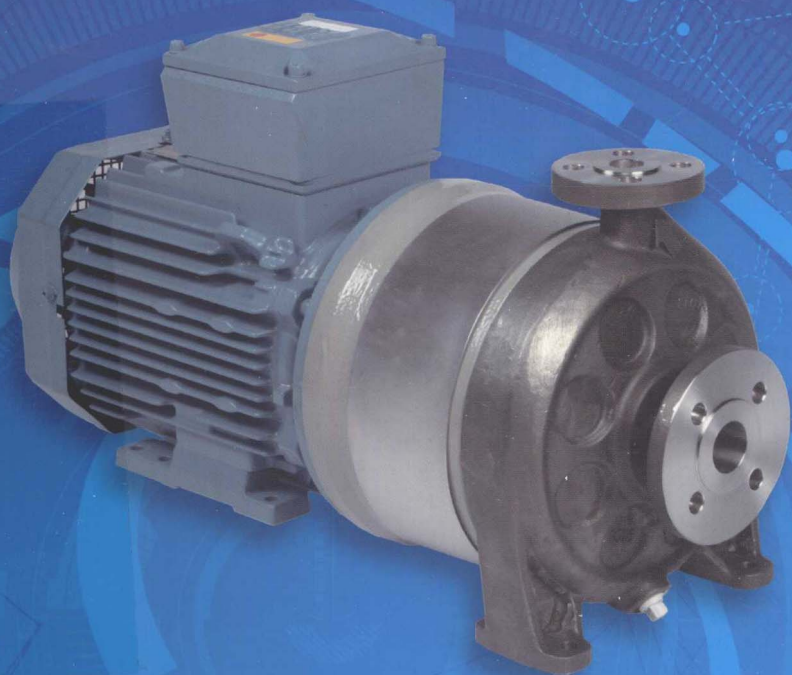


21 世纪普通高等教育电气信息类规划教材

电机与拖动基础

郭丙君 编著



DIANJI YU TUODONG JICHU



化学工业出版社

21 世纪普通高等教育电气信息类规划教材

电机与拖动基础

郭丙君 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

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,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、方法及应用等内容。并用较多的实用例题进一步说明上述内容的应用方法。对于较难理解的内容应用 MATLAB 软件进行了仿真,方便读者理解和应用。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化、机械设计制造及其自动化等相关专业教材和教学参考用书,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。

图书在版编目 (CIP) 数据

电机与拖动基础/郭丙君编著. —北京:化学工业出版社, 2012.7
21 世纪普通高等教育电气信息类规划教材
ISBN 978-7-122-14504-8

I. 电… II. 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 (2012) 第 123837 号

责任编辑:郝英华
责任校对:徐贞珍

文字编辑:项 激
装帧设计:史利平

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 刷:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:三河市宇新装订厂
787mm×1092mm 1/16 印张 17 $\frac{1}{2}$ 字数 465 千字 2012 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是作者根据电气工程及其自动化专业的性质、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。

本书可作为高等学校的电气工程及其自动化、自动化、机械设计制造及其自动化等相关专业的“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 80 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。学时少的学校，对于带*的内容可以不讲授，这部分内容是为了学生拓展知识面而选用的。

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，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，基本概念的分析和应用基础，充分注意把交、直流两大拖动系统在形式上和方法上予以统一，前后呼应，以利读者类比和对照。并结合当今应用非常广泛的 MATLAB 软件对电力拖动系统进行了仿真，有利于读者在相应的章节内容上加深理解。在每一章附有一定数量的与生产实践相结合的思考题与习题，以帮助读者提高解决实际问题的能力。

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请有关专家和广大读者不吝赐教。

编著者

2012 年 5 月

目 录

绪论	1
0.1 概述	1
0.2 电力拖动的历史、现状与发展趋势	2
0.3 本课程的性质、任务和要求	3
1 电力拖动系统动力学	4
1.1 电力拖动系统的运动规律	4
1.1.1 电力拖动系统的组成	4
1.1.2 电力拖动系统的运动方程式	4
1.2 多轴电力拖动系统的简化	5
1.2.1 旋转运动	6
1.2.2 平移运动*	7
1.2.3 升降运动*	8
1.3 生产机械的典型负载转矩特性	12
1.3.1 恒转矩负载的转矩特性	12
1.3.2 恒功率负载特性	13
1.3.3 通风机型负载特性	13
1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	14
思考题与习题	16
2 直流电机原理	17
2.1 直流电机的用途及基本工作原理	17
2.1.1 直流电机的用途	17
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	25
2.4.1 直流电机的励磁方式	25
2.4.2 直流电机的空载磁场	26
2.4.3 电枢磁场	26
2.4.4 电枢反应	28
2.5 电枢电动势与电磁转矩	29

2.5.1	电枢电动势	29
2.5.2	电磁转矩	30
2.6	直流发电机*	31
2.6.1	直流发电机稳态运行时的基本方程式	31
2.6.2	功率关系	32
2.6.3	他励直流发电机的运行特性	34
2.6.4	并励直流发电机	34
2.7	直流电动机运行原理	35
2.7.1	直流电机的可逆原理	35
2.7.2	他励直流电动机稳态运行的基本方程式	36
2.7.3	他励直流电动机的功率关系	36
2.7.4	直流电动机的工作特性	38
2.8	串励直流电动机	38
2.9	直流电机的换向	39
2.9.1	换向物理过程	40
2.9.2	换向元件中的电动势	40
2.9.3	改善换向的方法	41
	思考题与习题	42
3	直流电动机的拖动	43
3.1	直流电动机的机械特性	43
3.1.1	固有机械特性	43
3.1.2	人为机械特性	44
3.1.3	根据电动机的铭牌数据估算机械特性	46
3.2	他励直流电动机的启动	47
3.2.1	对启动的要求和启动过程分析	47
3.2.2	降电压启动	48
3.2.3	电枢回路串电阻启动	48
3.2.4	他励直流电动机启动仿真*	51
3.3	他励直流电动机的调速	54
3.3.1	他励直流电动机的调速方法	54
3.3.2	调速指标	56
3.3.3	调速方式与负载类型的配合	57
3.3.4	他励直流电动机的调速仿真*	59
3.4	他励直流电动机的电动与制动运行	63
3.4.1	概述	63
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	68
3.4.6	回馈制动运行	69
3.4.7	他励直流电动机制动仿真*	71
	思考题与习题	75

4 变压器	78
4.1 变压器的工作原理和结构	78
4.1.1 变压器的工作原理	78
4.1.2 变压器的分类	79
4.1.3 变压器的基本结构	79
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	85
4.3 变压器的负载运行	86
4.3.1 负载运行时的电磁过程	86
4.3.2 电动势平衡方程	87
4.3.3 磁动势平衡方程	87
4.3.4 变压器绕组的折算	88
4.3.5 等效电路和相量图	89
4.3.6 简化等效电路和简化相量图	90
4.4 标么值及应用	93
4.5 变压器的参数测定	95
4.5.1 变压器的空载试验	95
4.5.2 变压器的短路试验	96
4.6 变压器的运行特性	97
4.6.1 变压器负载时副边端电压的变化	97
4.6.2 变压器的效率	99
4.7 变压器的连接组别	100
4.7.1 单相变压器绕组的标志方式	101
4.7.2 三相变压器绕组的连接	102
4.7.3 三相变压器的连接组别	103
4.7.4 标准连接组	106
4.8 变压器的并联运行	106
4.8.1 变压器并联运行的理想条件	106
4.8.2 并联条件不满足时对变压器运行的影响	106
4.9 电力拖动系统中的特殊变压器	109
4.9.1 自耦变压器	109
4.9.2 仪用互感器	111
思考题与习题	113
5 三相异步电动机原理	115
5.1 三相异步电动机的基本结构和基本工作原理	115
5.1.1 异步电机主要用途与分类	115
5.1.2 基本结构	115
5.1.3 三相异步电动机的基本工作原理	117
5.1.4 三相异步电动机的型号和额定值	118

5.2	交流电机电枢绕组及其感应电动势和磁通问题	119
5.2.1	交流电机电枢绕组	119
5.2.2	旋转磁动势	122
5.2.3	交流绕组的感应电动势	130
5.3	三相异步电动机的空载运行	135
5.3.1	空载运行时的电磁关系	135
5.3.2	空载运行时的电动势方程、等效电路及相量图	136
5.4	三相异步电动机的负载运行	137
5.4.1	负载运行时的磁动势平衡方程	137
5.4.2	负载运行时的电磁关系	139
5.4.3	负载运行时的电动势平衡方程	139
5.4.4	三相异步电动机的等效电路	140
5.5	三相异步电动机的功率平衡和转矩特性	143
5.5.1	功率关系	143
5.5.2	转矩关系	145
5.6	三相异步电动机的工作特性	146
	思考题与习题	147
6	三相异步电动机的拖动	149
6.1	三相异步电动机的机械特性	149
6.1.1	机械特性表达式	149
6.1.2	固有机械特性	153
6.1.3	人为机械特性	154
6.1.4	异步电动机机械特性的 MATLAB 绘制*	155
6.2	三相异步电动机的启动	157
6.2.1	概述	157
6.2.2	三相异步电动机的直接启动	159
6.2.3	三相笼型异步电动机的降压启动	159
6.2.4	三相异步电动机的软启动	165
6.2.5	特种笼型转子异步电动机的启动	166
6.2.6	三相笼型异步电动机启动仿真*	167
6.3	绕线式三相异步电动机的启动	171
6.3.1	转子串频敏变阻器启动	172
6.3.2	转子串电阻分级启动	173
6.3.3	异步电动机启动时间和启动时能耗的计算	176
6.3.4	绕线式三相异步电动机转子绕组串电阻启动仿真*	179
6.4	三相异步电动机的调速	180
6.4.1	改变定子电压调速	181
6.4.2	绕线转子异步电动机转子串电阻调速	183
6.4.3	改变定子极数调速	187
6.4.4	三相异步电动机变频调速	190
6.4.5	绕线转子异步电动机的串级调速	195
6.4.6	电磁转差离合器调速	200

6.5	三相异步电动机的制动	204
6.5.1	电动运行	204
6.5.2	能耗制动	204
6.5.3	反接制动	206
6.5.4	回馈制动运行	207
6.5.5	三相异步电动机的制动仿真*	211
	思考题与习题	215
7	三相同步电动机原理	218
7.1	同步电动机的结构和工作原理	218
7.1.1	同步电动机的基本工作原理	218
7.1.2	同步电动机的结构	218
7.2	同步电动机的电磁关系	219
7.2.1	同步电动机的磁通势	219
7.2.2	凸极式同步电动机的双反应原理	220
7.2.3	凸极式同步电动机的电压平衡方程式	222
7.2.4	凸极式同步电动机的电动势相量图	222
7.2.5	隐极式同步电动机	223
7.3	同步电动机的功率关系与矩角特性	224
7.3.1	功率关系	224
7.3.2	电磁功率	225
7.3.3	功角特性	225
7.3.4	矩角特性	226
7.3.5	稳定运行	226
7.4	同步电动机功率因数的调节	228
7.4.1	同步电动机的功率因数调节	228
7.4.2	U形曲线	230
	思考题与习题	231
8	三相同步电动机的拖动	233
8.1	三相同步电动机的机械特性	233
8.2	同步电动机的启动	234
8.2.1	辅助电动机启动	234
8.2.2	异步启动	235
8.2.3	变频启动	235
8.2.4	三相同步电动机异步启动仿真*	235
8.3	三相同步电动机的调速	237
8.3.1	三相同步电动机变频调速时的矩角特性	237
8.3.2	三相同步电动机变频调速时的机械特性	239
8.3.3	调速用同步电动机的几种类型	240
8.3.4	三相同步电动机调速系统的几种典型结构及应用领域	241
8.3.5	三相同步电动机调速系统的分类及特点	241
8.3.6	三相同步电动机、异步电动机、直流电动机调速系统的比较	243

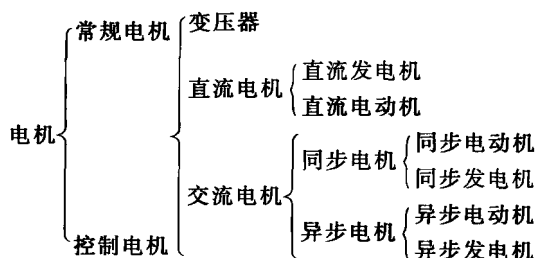
8.4	三相同步电动机的制动	245
8.4.1	电网供电同步电动机的制动	245
8.4.2	三相同步电动机制动仿真	245
	思考题与习题	247
9	微控电机	248
9.1	单相异步电动机	248
9.1.1	一相定子绕组通电时的机械特性	248
9.1.2	两相绕组通电时的机械特性	249
9.1.3	各种类型的单相异步电动机	250
9.2	测速发电机	253
9.2.1	直流测速发电机	253
9.2.2	交流异步测速发电机	255
9.2.3	测速发电机的比较	257
9.3	伺服电动机	257
9.3.1	直流伺服电动机	258
9.3.2	交流伺服电动机	259
9.3.3	交流伺服电动机的控制方法	261
9.4	步进电动机	263
9.4.1	矩角特性及稳定平衡点	263
9.4.2	步进运行状态	264
9.4.3	连续运行状态	266
9.4.4	通电方式和电动机转速	266
9.4.5	运行矩频特性	267
9.4.6	步进电动机的驱动电路	269
	思考题与习题	269
	参考文献	270

绪 论

0.1 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，可分为以下几种：



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、水力和原子能发电进行，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型电机作为驱动装置。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。

0.2 电力拖动的历史、现状与发展趋势

公元前 3000 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, 人类开始利用蒸汽为动力。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。成组拖动即用一台电动机拖动一根天轴, 再经过传动带或绳索来分别拖动几台生产机械, 这种拖动型式由于结构不合理, 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 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一个自动化电力拖动系统崭新的阶段。

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, 电动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, 在要求较高调速系统中, 交流电力拖动应用仍一度受到限制。至今, 由于电力电子技术飞跃发展, 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,它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,今后电力拖动系统发展和应用,必然会在交、直流拖动系统相互竞争和交替发展进程中不断完善并进入一个划时代的新领域。

目前,电力拖动的现状可以概括为两点。

① 电力拖动现已取代其他拖动形式,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,例如,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,例如,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器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如下。

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,例如,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。

0.3 本课程的性质、任务和要求

电机与拖动基础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有关后续课程,如“电力拖动自动控制系统”、“交、直流调速”等储备必要的基础知识。

本课程在学习时要注意到各章节之间相互内在联系,力求达到融会贯通。认真做好每章思考题与习题是学好本课程的关键。实验及课程设计是必要的实践性教学环节,应重视。

1 电力拖动系统动力学

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，是电力拖动部分的基础。

1.1 电力拖动系统的运动规律

1.1.1 电力拖动系统的组成

原动机带动生产机械运动叫拖动。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。

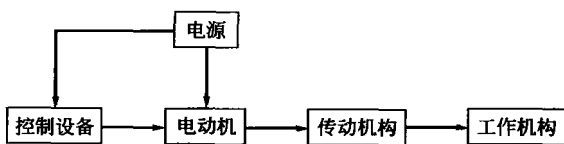


图 1-1 电力拖动系统组成框图

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。

1.1.2 电力拖动系统的运动方程式

电力拖动系统的运动规律可以用运动方程来描述。作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T 和负载转矩 T_L (T_L 又叫阻转矩)。一般来说，电动机是拖动运动的，负载是反抗运动的。为此在列写电力拖动系统的运动方程时，对转矩和转速的正方向（即参考方向）作如下规定：在画出转速 n 的正方向后，电磁转矩 T 的正方向与 n 相同，负载转矩 T_L 的正方向与 n 相反，如图 1-2 所示。单轴电力拖动系统中电磁转矩、负载转矩和转速变化的关系用转动方程式来描述：

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

在实际工程计算中，经常用转速 n 代替角速度 Ω 来表示系统转动速度，用飞轮惯量或称飞轮矩 GD^2 代替转动惯量 J 来表示系统的机械惯性。 Ω 与 n 的关系， J 与 GD^2 的关系是

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (1-2)$$

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \times \frac{D^2}{4} \quad (1-3)$$

式中， m 为系统转动部分的质量，kg； G 为系统转动部分的重力，N； ρ 为系统转动部分

的转动惯性半径, m ; D 为系统转动部分的转动惯性直径, m ; g 为重力加速度, 北京地区取 $g = 9.80 \text{ m/s}^2$; Ω 为角速度, rad/s ; n 为转动速度, r/min ; T , T_L 为电磁转矩和负载转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

把式(1-2)、式(1-3)代入转动方程, 化简后得

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中, GD^2 为转动部分的飞轮矩, $\text{N} \cdot \text{m}^2$; 375 为系数, $\text{m/min} \cdot \text{s}$ 。

转矩的单位仍为 $\text{N} \cdot \text{m}$, 转速的单位仍为 r/min 。

式(1-4)表明, 电力拖动系统的运动状态是由作用在转轴上所有转矩的代数和决定的。 $T - T_L$ 称为动转矩。当动转矩等于零时, 系统处于恒转速运行的稳态, 即当 $T = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, 转速不变, 系统或以恒速运行或者静止, 称为稳定运转状态, 简称稳态。静止状态只是转速为零的一种特殊的稳态。动转矩大于零时, 系统处于加速运动的过渡过程中, 即当 $T > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统加速; 动转矩小于零时, 系统处于减速运动的过渡过程中, 即当 $T < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统减速。

这里必须注意, T 与 T_L 本身都是有方向性的变量, 在代入具体数值时, 如果其实际方向与规定的正方向相同, 就用正数, 否则就用负数。掌握这一点, 才能正确运用系统的运动方程式。

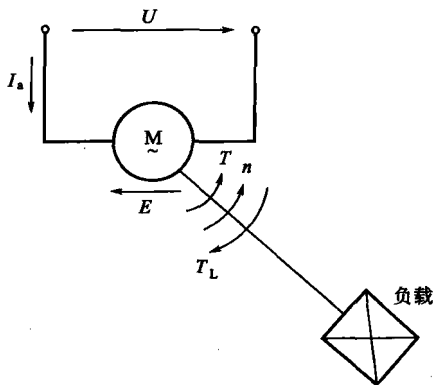
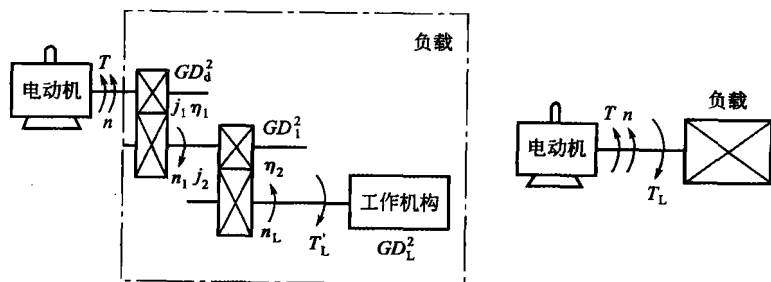


图 1-2 他励直流电动机单轴电力拖动系统

1.2 多轴电力拖动系统的简化

上节讨论的拖动系统中, 电动机和工作机构直接相连, 这时工作机构的转速等于电动机的转速, 工作机构负载转矩就等于作用在电动机轴上的阻转矩 (忽略电动机空载转矩 T_0), 这种系统称为单轴系统, 如图 1-2 所示。



(a) 多轴系统

(b) 等效单轴系统

图 1-3 电力拖动系统的简化

实际的电力拖动系统, 往往不是单轴系统, 而是通过传动机构使电动机的转速 n 变换为工作机构所需要的转速 n_L , 这种系统称为多轴系统。图 1-3 (a) 所示的就是一种三轴的拖动系统。其传动机构为两级齿轮减速机构, 其转速比为 j_1 、 j_2 , 传动效率为 η_1 、 η_2 , 三根转速不相同的转轴, 其转速分别为 n 、 $n_1 = n/j_1$ 、 $n_L = n/(j_1 j_2)$ 。三根轴上的转矩、飞轮矩也都不一样。

在分析该三轴系统时, 应分别对每一根转轴列写出其转动方程式, 三个转动方程式联立求

解,便可得出系统的运行状态。显然,对于多轴电力拖动系统,上述方法是相当麻烦的。为了简化多轴系统的分析计算,通常把负载转矩与系统飞轮矩折算到电动机轴上来,变多轴系统为单轴系统,列写一个转动方程式进行计算,其结果与联立求解多个方程式的结果完全一样。例如,把图 1-3 (a) 所示的多轴系统,简化为图 1-3 (b) 所示的单轴系统,折算的原则是:保持系统的功率传递关系及系统的储存动能不变。这样一来,分析计算该系统时,首先就要从已知的实际负载转矩 T'_L 求出等效的负载转矩 T_L ,称为负载转矩的折算,从已知的各转轴上的飞轮矩 GD_0^2 、 GD_1^2 、 GD_2^2 求出系统的总飞轮矩 GD^2 ,称为系统飞轮矩的折算。

转矩和飞轮矩的折算随工作机构运动形式的不同而不同,现分别加以讨论。

1.2.1 旋转运动

在实际生产中,有很多生产机械工作机构的运动都属于旋转运动,如车床的主轴。下面仍以图 1-3 为例来说明旋转运动转矩和飞轮矩的折算。

(1) 转矩的折算

设工作机构的负载转矩为 T'_L , 转速为 n_L 对应的角速度 $\Omega_L = 2\pi n_L / 60$, 则工作机构对应的功率为

$$P'_L = T'_L \Omega_L$$

而折算后的功率 P_L 为

$$P_L = T_L \Omega$$

式中, T_L 为折算到电动机轴上的等效负载转矩; Ω 为电动机轴的角速度, $\Omega = 2\pi n / 60$ 。

根据折算前后功率不变的原则,应有下列关系

$$\begin{aligned} T'_L \Omega_L &= P'_L = P_L = T_L \Omega \\ T_L &= T'_L \frac{\Omega_L}{\Omega} = T'_L \frac{n_L}{n} = \frac{1}{j} T'_L \end{aligned} \quad (1-5)$$

$j = \Omega_L / \Omega = n_L / n$ 为电动机与工作机构的转速比,一般来说, $j > 1$, 即传动机构是减速的。

式(1-5)表明:在工作机构的低速轴上,转矩 T'_L 较大,而折算到电动机的高速轴上时,等效转矩 T_L 数值减小。从功率不变的观点来看,显然低速轴的转矩大,高速轴的转矩小。实际上在机械功率的传递过程中,传动机构存在着功率损耗,称为传动损耗。传动损耗可以在传动机构的效率 η_c 中考虑。

当电动机带动工作机构旋转时,功率的传递力向是由电动机到负载,传动损耗由电动机负担,电动机输出的功率比生产机械消耗的功率大,这时的功率关系应为

$$\begin{aligned} P_L &= P'_L \frac{1}{\eta_c} \\ T_L \Omega &= T'_L \Omega_L \frac{1}{\eta_c} \\ T_L &= T'_L \frac{1}{j \eta_c} \end{aligned} \quad (1-6)$$

式(1-6)中,电动机轴与工作机构轴的转速比 j 为总的转速比,在多级传动中应为各级转速比之积,即 $j = j_1 j_2 \dots$

传动效率 η_c 是传动机构的总效率,同样为各级传动效率之积,即 $\eta_c = \eta_1 \eta_2 \dots$

不同种类的传动机构,其传动效率是不同的,并且负载大小不同时,其效率也不同。通常均用满载效率进行计算。传动效率可从《机械工程手册》上查得,例如,每对齿轮(用滚动轴承)的满载效率为 0.975~0.985,蜗轮蜗杆的满载效率为 0.5~0.7。

(2) 飞轮矩的折算

飞轮矩的大小是旋转物体机械惯性大小的体现。旋转体的动能为 $J\Omega^2 / 2$ 。设折算成单轴系

统后的等效转动惯量为 J ，则对应于图 1-3 的系统有

$$\frac{1}{2}J\Omega^2 = \frac{1}{2}J_d\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_L\Omega_L^2$$

公式两边同乘以 $4g$ ，除以 Ω^2 ，即可得与 J 相对应的等效飞轮矩 GD^2 的折算公式。

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2 \frac{1}{j_1^2} + GD_L^2 \frac{1}{j_1^2 j_2^2} \quad (1-7)$$

式(1-7) 右边各项的 GD^2 是系统每根轴的 GD^2 。如图 1-3 中，电动机轴的 GD_d^2 为电动机转子的飞轮矩与装在该轴的齿轮飞轮矩之和；第二根轴的飞轮矩 GD_1^2 为该轴上两个齿轮飞轮矩之和；第三根轴的飞轮矩 GD_L^2 为工作机构飞轮矩与该轴齿轮飞轮矩之和。

一般情况下，在总的飞轮矩 GD^2 中，电动机转子本身的飞轮矩 GD_d^2 占的比重最大，工作机构轴上的飞轮矩折算值占的比重较小，而传动机构飞轮矩的折算值所占比重则更小。因此在实际工作中，为了减少折算的麻烦，往往可以采用下式估算系统的总飞轮矩

$$GD^2 = (1+\delta)GD_d^2$$

式中， GD_d^2 为电动机转子本身的飞轮矩，其值可从产品目录中查得； δ 为小于 1 的数，一般取 $\delta=0.2\sim 0.3$ ，如果在电动机轴上还有其他大飞轮矩的部件，如制动器的闸轮等， δ 值则需加大。

1.2.2 平移运动*

有些生产机械，其工作机构是做平面运动的，如图 1-4 所示，例如刨床的工作台。平面运动属于直线运动，它的转矩和飞轮矩的折算公式有并自己的特点。

图 1-4 表示刨床的传动示意图，电动机经多级齿轮减速后，通过由齿轮与齿条的啮合，将旋转运动变成直线运动。

(1) 转矩的折算

设切削时工件与工作台的速度为 v_L (m/s)，刨刀作用在工件上的力（切削力）为 F_L (N)，则切削功率 P_L (W) 为

$$P_L = F_L v_L$$

切削力 F_L 反映到电动机轴上表现为转矩 T_L ，切削功率 P_L 反映到电动机轴上为

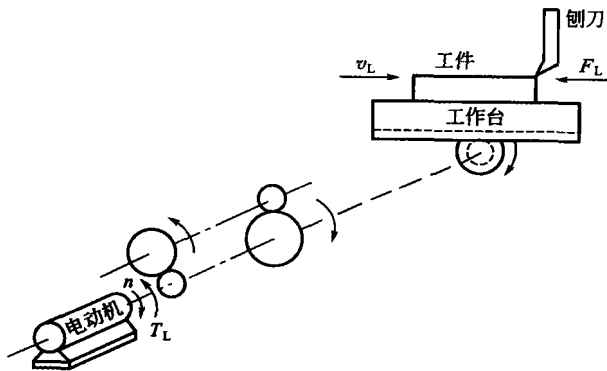


图 1-4 工作机构作平面运动的示意图

$$T_L \Omega_d = T_L \frac{2\pi n_d}{60}$$

如果不考虑传动系统的传动损耗，根据传递功率的原理，有

$$F_L v_L = T_L \frac{2\pi n_d}{60}$$

$$T_L = \frac{F_L v_L}{2\pi n_d / 60} = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d}$$

如果考虑传动损耗，传动损耗同样由电动机负担，则

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n_d \eta_0} \quad (1-8)$$

(2) 飞轮矩的折算

设直线运动部分的重力 $G_L = m_L g$ ，则直线运动部分的动能为