



普通高等教育规划教材

DIANJI YU TUODONG JICHU

电机与拖动基础

赵利 主编



化学工业出版社

普通高等教育规划教材

电机与拖动基础

赵 利 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要论述电机原理与电力拖动基础。全书涵盖电力拖动系统动力学基础、直流电机、变压器、异步电机、同步电机、控制电机等电机学内容,以及直流电动机的电力拖动、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机容量的选择等电力拖动的内容。

本书可作为自动化、电气工程及其自动化、机电一体化等相关专业的本科教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动基础/赵利主编. —北京:化学工业出版社, 2015.7

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-122-24347-8

I. ①电… II. ①赵… III. ①电力传动-高等学校-教材②电机-控制系统-高等学校-教材 IV. ①TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 135714 号

责任编辑:廉 静

文字编辑 张燕文

责任校对:王素芹

装帧设计:王晓宇

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 装:高教社(天津)印务有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16¼ 字数 395 千字 2015 年 9 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: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本书是适应自动化学科的发展,为自动化专业、机械类专业及其他非电机专业本科生编写的教材,全面阐述了这些专业所需的电机与电力拖动的基本理论和基本知识。

“电机与拖动基础”是相关专业的一门专业基础课,是将电机学、电力拖动和控制电机等内容有机结合而成的一门课程。

在电力工业中,发电机和变压器是电站和变电所的主要设备;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;在自动控制技术中,各式各样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。因此,本课程具有重要的地位和作用。

随着电力电子技术、计算机控制技术等的迅速发展,电气传动领域已发生了根本性的变化。许多新思想、新方法在该领域得到应用,许多新型电机不断涌现。为了既能保留这门传统学科的知识精华,又尽可能反映当前新技术的发展情况,笔者结合多年来的教学经验,并参考了相关文献,编写了这本《电机与拖动基础》教材。

本书主要包括以下内容。

- ① 直流电机、变压器和交流电机的基本原理、构造、主要特性及应用。
- ② 交、直流电机拖动系统的机械特性及各种运行状态的分析和计算。
- ③ 各种控制电机的类别、构造、特点及应用。

本教材在体系结构和内容编排方面较传统教材作了较大调整,主要体现在以下几方面。

① 重在介绍基本概念、基本运行原理与基本运行特性,理论知识以够用为度,但仍保持教材内容的相对连贯性和稳定性;尽可能运用图解、图示等方法降低理论难度,并注重实用性。

② 准确定位,合理取舍内容。以往的直流电源由直流发电机提供改为大多由交流整流电源提供,而启动、调速和制动性能优良的直流电动机也有被采用先进控制技术(如变频控制)的三相异步电动机等替代的趋势。因此编者对直流发电机、直流电动机的电力拖动内容进行了较大幅度的删减,突出三相异步电动机及电力拖动的内容。

③ 为适应当前工业发展的需要,增加了不少电机与系统以及新型电机的内容,如三相异步电动机的变频调速及永磁无刷直流电动机、开关磁阻电机、步进电机的驱动控制等内容。

④ 为便于学生自学,设置了一定数量的例题。

本教材由山西大同大学赵利担任主编,负责全书的体系结构和统编工作。其中第3章和第4章由山西大同大学宫殿强编写;第5章由南京师范大学朱明祥编写;第8章、第9章和第10章由山西大同大学贾权编写,其余章节由赵利编写。

我们力图将一本简洁、通俗易懂的教材呈现给广大读者。由于编者水平所限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2015年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电机及电力拖动系统简介	1
1.2 本课程的性质、任务和内容	2
1.3 本课程的特点及学习方法	3
第 2 章 电力拖动系统动力学基础	4
2.1 电力拖动系统运动方程	4
2.2 多轴电力拖动系统的等效	5
2.2.1 工作机构为转动情况时, 转矩与飞轮矩的折算	5
2.2.2 工作机构为平移运动时, 转矩与飞轮矩的折算	7
2.2.3 工作机构作升降运动时, 转矩与飞轮矩的折算	8
2.3 典型负载转矩特性	10
2.3.1 恒转矩负载	10
2.3.2 恒功率负载	10
2.3.3 风机、泵类负载	11
2.4 电力拖动系统稳定运行的条件	11
小结	12
思考题	12
习题	13
第 3 章 直流电机原理	15
3.1 直流电机的基本运行原理	15
3.2 直流电机的结构和额定值	17
3.2.1 直流电机的结构	17
3.2.2 直流电机的额定值	19
3.3 直流电机的电枢绕组	20
3.3.1 单叠绕组	21
3.3.2 单波绕组	24
3.4 直流电机的空载主磁场	25
3.4.1 直流电机的磁路	26
3.4.2 空载时气隙磁密分布及磁化曲线	27

3.4.3 直流电机的励磁方式	27
3.5 电枢电动势与电磁转矩	28
3.5.1 电枢电动势	28
3.5.2 电磁转矩	29
3.6 直流发电机运行原理	30
3.6.1 直流发电机稳态运行时的基本方程	30
3.6.2 他励直流发电机的运行特性	32
3.7 直流电动机运行原理	33
3.7.1 他励直流电动机稳态运行时的基本方程	33
3.7.2 他励直流电动机的功率关系	34
3.7.3 他励直流电动机的运行特性	34
3.8 直流电机换向	35
小结	37
思考题	38
习题	39
第4章 他励直流电动机的电力拖动	42
4.1 他励直流电动机的机械特性	42
4.1.1 机械特性的一般表达式	42
4.1.2 固有机械特性	43
4.1.3 人为机械特性	43
4.2 他励直流电动机的运行	47
4.2.1 他励直流电动机的启动	47
4.2.2 他励直流电动机的反转	50
4.2.3 他励直流电动机的调速	50
4.2.4 他励直流电动机的制动	51
4.2.5 他励直流电动机的四象限运行	57
小结	58
思考题	59
习题	59
第5章 变压器	62
5.1 概述	62
5.1.1 变压器的用途	62
5.1.2 变压器的分类	62
5.1.3 变压器的基本结构	63
5.1.4 变压器的额定值	65
5.2 变压器的运行分析	66
5.2.1 变压器的空载运行	66
5.2.2 变压器的负载运行	70
5.3 变压器参数测定	76

5.3.1 空载试验	76
5.3.2 短路试验	77
5.3.3 阻抗电压	78
5.4 标么值	79
5.4.1 标么值的概念	79
5.4.2 基值的选取	79
5.5 变压器的运行特性	79
5.5.1 电压调整率和外特性	79
5.5.2 效率和效率特性	80
5.6 三相变压器	81
5.6.1 三相变压器的磁路系统	81
5.6.2 三相变压器的绕组接法和连接组别	82
5.6.3 三相变压器的并联运行	86
5.7 特种变压器	87
5.7.1 自耦变压器	87
5.7.2 仪用互感器	88
小结	89
思考题	91
习题	91

第6章 异步电机原理	93
6.1 三相异步电动机的结构与工作原理	93
6.1.1 三相异步电动机的基本结构	93
6.1.2 三相异步电动机的工作原理	96
6.1.3 三相异步电动机的额定值	98
6.2 三相交流电动机的绕组	99
6.2.1 交流绕组的基本知识和基本量	99
6.2.2 三相单层绕组的排列和连接	101
6.2.3 三相双层叠绕组的排列和连接	102
6.3 三相交流绕组的电动势	104
6.3.1 线圈的感应电动势	104
6.3.2 线圈组的感应电动势	108
6.3.3 一相绕组的感应电动势	109
6.4 三相异步电动机的定子磁动势	110
6.4.1 单个整距线圈的磁动势	110
6.4.2 整距线圈组的磁动势	113
6.4.3 短距线圈组的磁动势	116
6.4.4 单相绕组产生的磁动势	117
6.4.5 三相绕组产生的合成基波磁动势	119
6.5 三相异步电动机的电磁关系	122
6.5.1 三相异步电动机空载时的电磁关系	122

6.5.2	三相异步电动机转子堵转时的电磁关系	124
6.5.3	三相异步电动机负载时的电磁关系	127
6.6	三相异步电动机的功率与转矩	135
6.6.1	功率关系	135
6.6.2	转矩平衡关系	136
6.6.3	电磁转矩的物理表达式	137
6.7	三相异步电动机参数的测定	138
6.7.1	空载试验与励磁参数的测定	138
6.7.2	堵转试验	139
6.8	三相异步电动机的工作特性及其求取	140
6.8.1	工作特性分析	140
6.8.2	工作特性求取	142
6.9	单相异步电动机	142
6.9.1	单相异步电动机工作原理	143
6.9.2	单相异步电动机主要类型	145
小结		147
思考题		149
习题		150
第7章	三相异步电动机的电力拖动	151
7.1	异步电动机的机械特性	151
7.1.1	机械特性的三种表达式	151
7.1.2	固有机械特性	154
7.1.3	人为机械特性	155
7.2	三相异步电动机的启动	156
7.2.1	三相笼型异步电动机的直接启动	157
7.2.2	三相笼型异步电动机的降压启动	157
7.2.3	高启动性能的特殊笼型异步电动机	160
7.2.4	三相绕线式异步电动机的启动	161
7.3	三相异步电动机的调速	163
7.3.1	转差功率消耗型异步电动机调速方法	163
7.3.2	转差功率回馈型异步电动机调速方法——串级调速	165
7.3.3	转差功率不变型异步电动机调速方法	167
7.4	三相异步电动机的制动	174
7.4.1	能耗制动	174
7.4.2	反接制动	177
7.4.3	回馈制动	179
7.4.4	异步电动机运行状态小结	181
小结		182
思考题		184
习题		185

第 8 章 同步电动机	188
8.1 同步电动机的类型和结构	188
8.2 三相同步电动机的电磁关系	189
8.2.1 同步电动机的磁动势及磁通	189
8.2.2 凸极同步电动机的双反应原理	190
8.2.3 三相同步电动机负载时的电磁关系	191
8.3 三相同步电动机的电压平衡方程与向量图	193
8.4 三相同步电动机的功率关系与矩角特性	194
8.4.1 功率关系	194
8.4.2 功角特性	195
8.4.3 矩角特性	196
8.4.4 同步电动机的稳定运行与过载能力	197
8.5 同步电动机功率因数的调节和 V 形曲线	198
8.5.1 功率因数的调节	198
8.5.2 同步电动机 V 形曲线	200
8.6 同步电动机的启动	200
8.6.1 同步电动机的异步启动	200
8.6.2 辅助电动机的启动	201
8.6.3 变频启动	201
小结	201
思考题	202
习题	202
第 9 章 控制电机	204
9.1 伺服电动机	204
9.1.1 直流伺服电动机	204
9.1.2 交流伺服电动机	206
9.2 测速发电机	209
9.2.1 直流测速发电机	210
9.2.2 交流测速发电机	211
9.3 自整角机	212
9.3.1 力矩式自整角机	212
9.3.2 控制式自整角机	216
9.4 旋转变压器	218
9.4.1 正弦-余弦旋转变压器空载工作原理	218
9.4.2 正弦-余弦旋转变压器负载工作原理	219
9.4.3 原边补偿正弦-余弦旋转变压器	220
9.5 步进电动机	220
9.5.1 步进电动机的分类	221
9.5.2 反应式步进电动机的结构和原理	221

9.5.3 反应式步进电动机的特性	224
9.6 永磁无刷直流电动机	226
9.6.1 永磁无刷直流电动机的结构	226
9.6.2 永磁无刷直流电动机的工作原理	226
9.6.3 电压方程、电磁转矩和转速	228
小结	230
思考题	231
习题	231
第 10 章 电力拖动系统电动机的选择	232
10.1 电力拖动系统电动机选择的一般问题	232
10.1.1 电动机种类的选择	232
10.1.2 电动机额定电压与额定转速的选择	232
10.2 电动机发热与冷却	233
10.2.1 电动机的发热与温升	233
10.2.2 电动机的冷却与散热	234
10.2.3 电动机的允许温升与绝缘材料	235
10.3 电动机额定功率的选择	236
10.3.1 电动机的工作方式	236
10.3.2 连续工作制电动机的选择	236
10.3.3 短时工作制电动机的选择	240
10.3.4 断续周期工作制电动机的选择	241
10.3.5 电力拖动调速电动机的选择	242
10.4 电动机额定功率选择的其他问题	242
10.4.1 统计法	242
10.4.2 带冲击负载对电动机额定功率选择的影响	243
10.4.3 笼型异步电动机的小时合闸次数的确定	244
小结	245
思考题	246
习题	246
参考文献	247

第1章

绪 论

1.1 电机及电力拖动系统简介

在现代社会中,电能是使用最广泛的一种能源。电能与其他能源相比,有突出的优点:适宜大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制。

在电能的生产、转换、传输、分配、使用与控制等方面,都必须通过能够进行能量传递与变换的电磁机械装置来实现,这些电磁机械装置称为电机。概括地说,电机的作用主要有以下三个方面。

① 进行电能的生产、传输和分配。如发电厂中,由汽轮机(或水轮机、柴油机)带动电机发电,将机械能转换成电能,这种电机称为发电机。发电机发出的电压一般为 $10\sim 20\text{kV}$ 。为了减少远距离输电中的能量损失,并保证输电质量,必须采用变压器将电压升高,达到 110kV 、 220kV 、 330kV 、 500kV 甚至更高。高压输电线将电能输送到用电地区,再经降压变压器,将电压降至用电设备所能承受的电压,如 220V 、 380V 、 6kV 和 10kV 等。

② 驱动各种生产机械和设备。用户使用电动机将电能转换成机械能,用来驱动各种用途的生产机械和装置,如驱动机床、电力排灌、电车牵引、鼓风抽水、轧钢造纸以及家用电器的驱动等。

③ 应用于各类自动控制系统中,作为检测、校正及执行元件。主要包括伺服电动机、测速电动机、自整角机、旋转变压器和步进电动机等。

电机作为一种机电能量转换元件,是适应工农业生产、科学技术和日常生活的需要而发展的。由于使用电机的场合要求多种多样,电机的种类繁多,总体上可进行如下分类。

(1) 按电流的种类分

① 直流电机。

② 交流电机(变压器、同步电机、异步电机)。

(2) 按电机的功能分

① 发电机:将机械能转变成电能。

② 电动机:将电能转变成机械能。

③ 变压器、变频器、变流机、移相等:分别用于改变电压、频率、电流及相位,即把一种类型的电能转变成另一种类型的电能。

④ 控制电机:以实现信号转换为目的,作为自动控制系统元件。

值得指出的是,从基本工作原理来看,发电机与电动机只是电机的两种不同的运行方

式,从能量转换的观点来看,两者是可逆的。

上述分类中,除变压器是静止电气设备外,其余均为旋转电机。按电流的类型及工作原理的某些差异,旋转电机又可分为直流电机、交流异步电机、交流同步电机及各种具有专门用途的控制电机等。

电能利用中,绝大多数负载都要求将电能转换成机械能加以利用,即由电动机来拖动各种用途的生产机械。电动机拖动生产机械运转完成既定的工艺要求,称为电力拖动。简单的

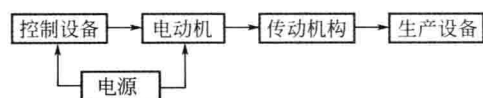


图 1-1 电力拖动系统的构成

电力拖动系统一般由控制设备、电动机、传动机构、生产设备和电源五部分组成。它们之间的关系如图 1-1 所示。

电力拖动经历了最初的成组拖动(即单台电动机拖动一组机械)、单电机拖动(即单台电动机拖动单台机械设备)到多电机拖动(即单台设备中采用多台电动机)几个阶段。每个阶段生产机械所采用的电机的数量有所不同。

随着生产的发展和科技水平的提高,对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,要求快速启动、制动及反转,实现在大范围内调速以及整个生产过程自动化等。这些都必须要有自动控制设备,以组成自动化的电力拖动系统。

最早的电力拖动控制系统是继电器-接触器自动控制系统,属于有触点断续控制系统。后来发展成为普遍采用电力电子器件组成的连续控制系统。连续控制系统包括由相控变流器或斩波器供电的直流电力拖动系统,以及由变频器或伺服驱动器供电的交流调速系统两大类。直流电动机具有良好的启动、制动性能,适宜在宽广的范围内平滑调速,在需要高性能可控电力拖动的领域中得到广泛应用。但是,由于交流电动机较直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,而且单机容量可以做得很大,电压等级可以做得很高,可以实现高速拖动等,所以人们一直在致力研究性能更高的交流调速系统。目前,随着电力电子技术、控制理论以及微处理技术的发展,交流调速系统已经得到广泛应用,性能指标进一步提高,容量进一步增大,控制系统集成化程度进一步提高。交流电力拖动系统取代直流电力拖动系统已经是无可争议的事实。

1.2 本课程的性质、任务和内容

现代工业控制系统包括两大类:一类是过程控制系统,以表征生产过程的参变量为被控对象的自动控制,如温度、压力、流量、液位、成分、浓度等的控制;另一类是运动控制系统,它主要涉及机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制,如机器人、机床类生产机械等。而电机及其拖动负载,作为运动控制系统的执行机构和控制对象,在运动控制系统中占据着重要的地位。就运动控制系统而言只有了解和熟悉执行机构和被控对象的特点和规律,才能有效地设计控制策略,选择合适的控制回路和电力电子变流器,最终获得优良的控制性能指标。

《电机与拖动基础》就是为了解决这一问题而为电气工程类学科开设的一门专业基础课之一。在整个专业教学计划中起承前启后的作用,它是《物理学》、《电路》等课程的后续课程,又是《运动控制系统》、《工厂电气控制设备》等专业课程的先导课程。

《电机与拖动基础》课程的任务是使学生掌握各种电机和变压器的基本结构、工作原理和主要特性,并掌握各种电动机启动、调速、制动和反转的方法、原理、优缺点和适用场

合；培养学生对电机及电力拖动方面的分析问题、解决问题的能力，包括一定的计算能力；学习测试各种电机、变压器的性能和参数的基本方法，进行实验技能的训练，为学习后续课程和今后的工作创造必要的条件。

本课程的内容包括：直流电机及拖动、变压器、异步电机及拖动、同步电动机、控制电机和电动机容量的选择等。

1.3 本课程的特点及学习方法

本课程的特点是理论性强，实践性也强。分析电机与电力拖动的工作原理要用电学、磁学和动力学的基础理论，既要有时间概念，又要有空间概念，所以理论性较强；而用理论分析各种电机和电力拖动的实际问题时，必须结合电机的具体结构、采用工程观点和工程分析方法，除要掌握基本理论以外，还应注意培养实验操作技能和计算能力，所以实践性也较强。

考虑到电机是实现电能与机械能转换的装置，而电能与机械能的转换是通过电磁场来完成的，因此要了解和熟悉电机的各种特性，就需要分析电机内部的电磁过程。鉴于电磁场的抽象性，因而增加了该课程的难度。而电力拖动系统则涉及对系统的基本指标要求与方法的实现等问题，必然涉及要用系统的观点看问题。因此，学习本课程时一定要以物理概念为主、工程计算为辅。除了了解基本运行原理与电磁过程外，重点应掌握各类电动机的机械特性以及其与生产机械配合时的启动、制动方法与调速方案，并通过实验和仿真对相关知识进行理解并掌握。因此，学习本门课程应特别注意理论联系实际。

第2章

电力拖动系统动力学基础

原动机带动负载运转称为拖动，以电动机带动生产机械运转的拖动方式称为电力拖动。电力拖动系统中所用的电动机种类很多，生产机械的性质也各不相同。因此，需要找出它们的普遍运动规律，予以分析。从动力学的角度看，它们都服从动力学的统一规律。所以，在研究电力拖动时，首先要分析电力拖动系统的动力学问题，建立电力拖动系统的运动方程。

2.1 电力拖动系统运动方程

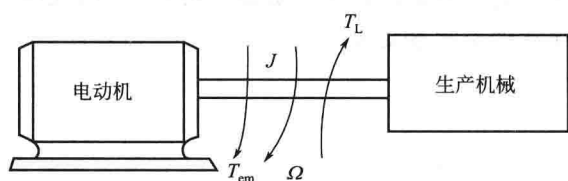


图 2-1 单轴电力拖动系统的示意图

最简单的电力拖动系统是电动机与生产机械同轴，组成单轴系统，如图 2-1 所示。电动机的电磁转矩 T_{em} 通常与转速 n 同向，是驱动性质的转矩；生产机械的工作机构转矩，即负载转矩 T_L 通常是制动性质的转矩。如果忽略电动机的空载转矩 T_0 ，根据牛顿第二定律，单轴电力拖动系统的动力学方程为

$$T_{em} - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (2-1)$$

式中， Ω 为系统旋转的角速度 rad/s ； J 为转动部分的转动惯量， $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

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

式中， m 与 G 分别为转动部分的质量与重量，单位分别为 kg 与 N ； ρ 与 D 为转动部分的平均半径与直径，单位为 m ； g 为重力加速度， $g = 9.80 \text{m/s}^2$ 。

在实际工程计算中，经常用转速 $n(\text{r/min})$ 代替角速度 Ω 来表示系统的转动速度， $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ ，将其与式(2-2)一同代入式(2-1)得运动方程的实用形式：

$$T_{em} - T_L = \frac{GD^2}{375} \times \frac{dn}{dt} \quad (2-3)$$

式中， GD^2 为转动部分的飞轮矩 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)， $\frac{dn}{dt}$ 的单位为 $\text{r}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 。所以式(2-3)中的 375 具有加速度量纲，为 m/s^2 ；飞轮矩 GD^2 是反映物体旋转惯性的一个整体物理量，可由相应的产品说明书给出。

由式(2-3)可知,系统的旋转运动可分为以下三个状态。

- ① 若 $T_{em} = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 电动机处于恒速状态, 拖动系统稳态运行。
- ② 若 $T_{em} > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 电动机处于加速状态, 拖动系统加速暂态运行。
- ③ 若 $T_{em} < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 电动机处于减速状态, 拖动系统减速暂态运行。

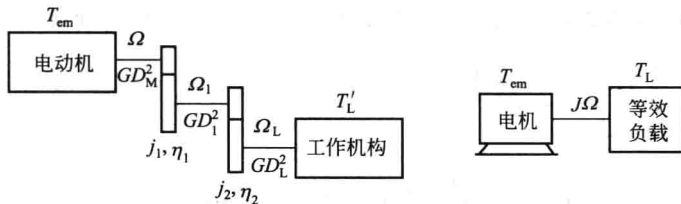
在实际电力拖动系统中,电动机可能正、反转运行,即作用在电动机轴上的电磁转矩 T_{em} 和负载转矩 T_L 的大小和方向都有可能发生变化。因此,运动方程式(2-3)中的转矩 T_{em} 、 T_L 是带有正、负号的代数量。在应用运动方程式时,必须注意转矩的正、负号。一般规定如下。

- ① 首先选取电动机处于电动状态时的旋转方向为转速 n 的正方向。
- ② 电磁转矩 T_{em} 若与转速 n 的正方向相同,则取“+”;反之,则取“-”。
- ③ 负载转矩 T_L 若与转速 n 的正方向相反,则取“+”;反之,则取“-”。

这样,若 $T_{em} - T_L$ 的计算结果为正,则意味着拖动系统将加速运行;反之,拖动系统则处于减速制动状态。

2.2 多轴电力拖动系统的等效

式(2-3)是针对单一电动机直接带动生产机械的单轴拖动系统的动力学方程式。而对实际的大多数拖动系统而言,在电动机和生产机械之间存在诸如减速器、传动带等传动机构,构成多轴拖动系统。图 2-2(a) 是三轴电力拖动系统示意图,传动机构为二级齿轮减速机构,其速比为 j_1 、 j_2 , 传动效率为 η_1 、 η_2 。这个系统中,由三根转速不同的转轴,其转速分别为 Ω 、 Ω_1 和 Ω_L , 三根轴上的转矩、飞轮矩也都不一样。为了简化分析计算,可将图 2-2(a) 多轴系统等效为图 2-2(b) 所示的单轴系统。把负载转矩 T'_L 折算到电动机轴上变成 T_L , 这时 T_L 可看成一个等效负载的负载转矩;把系统各轴上的飞轮矩折算到电动机轴上变成一个总飞轮矩 GD^2 。折算原则是:保持折算前、后功率不变及系统储存动能不变。



(a) 等效前的实际多轴旋转系统

(b) 等效后的单轴系统

图 2-2 多轴旋转运动系统的等效

综上所述,分析多轴系统的方法是:首先从已知的实际负载转矩 T_L 求出等效的负载转矩 T_L ,即负载转矩的折算;然后由各级转轴上的飞轮矩 GD_M^2 、 GD_1^2 、 GD_L^2 求出总飞轮矩 GD^2 ,即系统飞轮矩的折算。

2.2.1 工作机构为转动情况时,转矩与飞轮矩的折算

(1) 转矩的折算

如图 2-2(a) 所示多轴拖动系统,考虑到传动机构的效率,折算时应考虑功率的传递方

向, 以确保传递机构的损耗到底是由电动机承担还是由生产机械承担。

当电动机工作在运行状态时, 所有功率都是由电动机提供, 此时, 功率由电动机流向生产机械, 传动机构的损耗自然由电动机承担。按照等效前、后传递功率不变的原则, 负载所获得的输出功率为

$$T'_L \Omega_L = T_L \Omega \eta \quad (2-4)$$

于是, 得到折算后的负载转矩为

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta \left(\frac{\Omega}{\Omega_L} \right)} = \frac{T'_L}{\eta \left(\frac{n}{n_L} \right)} = \frac{T'_L}{\eta j} \quad (2-5)$$

式中, Ω_L 为工作机构转轴的角速度; Ω 为电动机轴的角速度; T'_L 为工作机构实际负载转矩; T_L 为工作机构负载转矩折算到电动机轴上的折算值; $j = \frac{n}{n_L}$ 为传动机构的总转速比, 写成一般形式 $j = j_1 j_2 j_3 \cdots$, 等于各级转速比乘积; η 为传动机构的总效率, 等于各级传动效率乘积, $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots$ 。

式(2-5)说明, 转矩按转速的反比来折算。

当电动机工作在发电制动状态时, 所有功率由生产机械提供, 此时, 功率由生产机械流向电动机, 传动机构的损耗自然由生产机械承担。于是, 电动机所获得的输出功率为

$$T_L \Omega = T'_L \Omega_L \eta \quad (2-6)$$

折算后的负载转矩为

$$T_L = \frac{T'_L \eta}{\left(\frac{\Omega}{\Omega_L} \right)} = \frac{T'_L \eta}{\left(\frac{n}{n_L} \right)} = \frac{T'_L \eta}{j} \quad (2-7)$$

对于由减速箱等组成的传动机构, 传递功率反向并不影响传递机构的效率, 亦即无论功率由谁提供, 同一传动机构的效率相等。

(2) 飞轮矩的折算

拖动系统的结构与图 2-2 所示相同, 设电动机转子的转动惯量为 J_M , 传动机构各轴的转动惯量分别为 J_1 、 J_2 、 J_3 、 $\cdots$; 工作机构的转动惯量为 J_L , 折算到电动机轴上的等效转动惯量为 J (相应的飞轮矩为 GD^2), 则按照折算前、后储存的动能不变的原则, 有

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} J_M \Omega^2 + \frac{1}{2} J_1 \Omega_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \Omega_2^2 + \cdots + \frac{1}{2} J_L \Omega_L^2$$

折算后的转动惯量为

$$J = J_M + J_1 \left(\frac{\Omega_1}{\Omega} \right)^2 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega} \right)^2 + \cdots + J_L \left(\frac{\Omega_L}{\Omega} \right)^2 \quad (2-8)$$

将 $J = \frac{GD^2}{4g}$ 代入式(2-8), 则折算后的飞轮矩为

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{G_1 D_1^2}{\left(\frac{n}{n_1} \right)^2} + \frac{G_2 D_2^2}{\left(\frac{n}{n_2} \right)^2} + \cdots + \frac{G_L D_L^2}{\left(\frac{n}{n_L} \right)^2}$$

即

$$GD^2 = GD_M^2 + \frac{G_1 D_1^2}{j_1^2} + \frac{G_2 D_2^2}{(j_1 j_2)^2} + \cdots + \frac{G_L D_L^2}{j^2} \quad (2-9)$$

式中, GD^2 为折算后电动机轴上的等效飞轮矩; GD_M^2 为电动机轴的飞轮矩; $G_1 D_1^2$ 、 $G_2 D_2^2 \cdots$ 为传递机构各级传动轴的飞轮矩; $G_L D_L^2$ 为工作机构轴的飞轮矩; j_1 、 $j_2 \cdots$ 为各级传动机构的转速比; $j = j_1 j_2 \cdots$ 为电动机轴与工作机构轴之间的总转速比。

一般情况下, 在系统总的飞轮矩中, 电动机轴上的飞轮矩最大, 工作机构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的比重更小。因此在实际计算中, 为了减少折算的麻烦, 可以采用式(2-10) 来估算系统的飞轮矩:

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_M^2 \quad (2-10)$$

GD_M^2 值可以从产品目录中查得。 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部件, 如制动器的闸轮等, δ 值则需取得大一些。

例 2-1 图 2-2(a) 所示的电力拖动系统中, 已知飞轮矩 $GD_M^2 = 14.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $GD_1^2 = 18.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, $GD_L^2 = 120 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 传动效率 $\eta_1 = 0.91$, $\eta_2 = 0.93$, 负载转矩 $T'_L = 85 \text{ N} \cdot \text{m}$, 转速 $n = 2450 \text{ r/min}$, $n_1 = 810 \text{ r/min}$, $n_L = 150 \text{ r/min}$, 忽略电动机空载转矩, 求:

(1) 折算到电动机轴上的系统总飞轮矩 GD^2 ;

(2) 折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 。

解

(1) 系统总飞轮矩

$$\begin{aligned} GD^2 &= GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{\left(\frac{n}{n_1}\right)^2} + \frac{GD_L^2}{\left(\frac{n}{n_L}\right)^2} \\ &= 14.5 + \frac{18.8}{\left(\frac{2450}{810}\right)^2} + \frac{120}{\left(\frac{2450}{150}\right)^2} \\ &= 14.5 + 2.055 + 0.450 \\ &= 17.005 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

(2) 负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L}{\frac{n}{n_L} \eta_1 \eta_2} = \frac{85}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} = 6.15 \text{ N} \cdot \text{m}$$

2.2.2 工作机构为平移运动时, 转矩与飞轮矩的折算

(1) 转矩的折算

某些生产机械的工作机构作平移运动, 如刨床的工作台, 示意图如图 2-3 所示。这种运动的折算方法与旋转运动有所不同。

切削时工件与工作台的速度为 v_g (m/s), 刨刀作用在工件上的力为 F_g (N), 传动机构效率为 η 。则工作机构所需功率为

$$P_g = F_g v_g \quad (2-11)$$

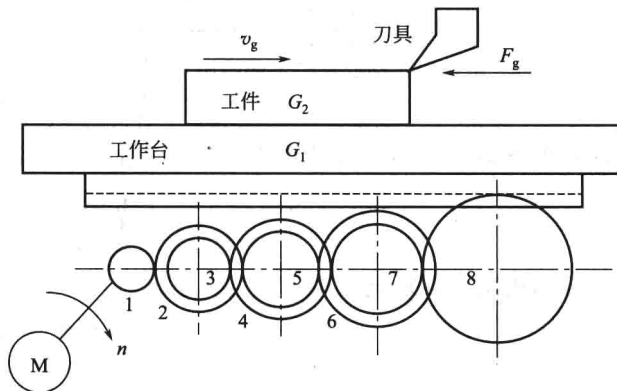


图 2-3 刨床拖动系统示意图