



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电气工程及其自动化专业精品教材

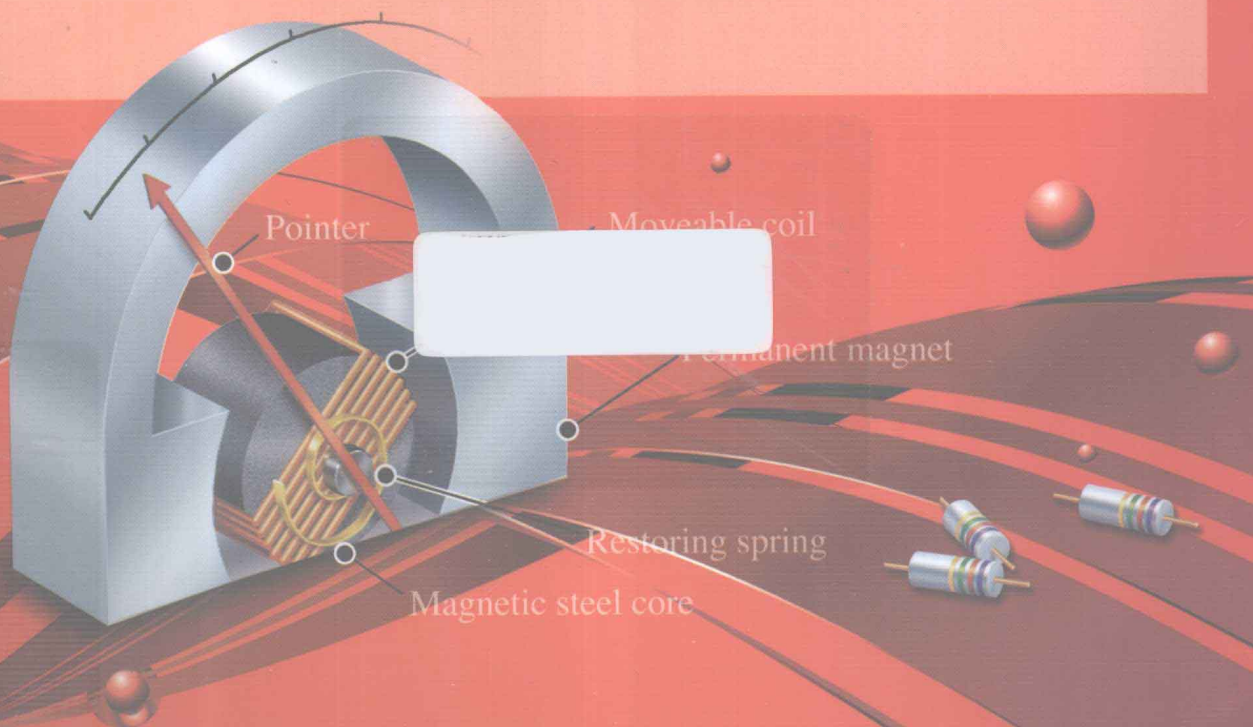
现代电力传动与控制

(第二版)

Modern Electrical Drive and Control

Second Edition

© 邱阿瑞 柴建云 孟朔 王善铭 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程及其自动化专业精品教材

现代电力传动与控制

(第二版)

邱阿瑞 柴建云 编著
孟 朔 王善铭

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书共分 10 章。第 1 章为绪论;第 2 章重点介绍电力传动系统的运动方程式;由于电动机是电力传动的动力和控制的对象,故第 3、4 章分别介绍直流电动机、异步电动机和同步电动机的原理及特性;随着电力传动控制系统的发展,控制电机成为重要的检测与控制元件,故第 5 章介绍常用控制电机的结构、原理和性能;由于可编程控制器(PLC)正广泛应用于生产中,故第 6 章介绍 PLC 的基本结构、原理、编程和指令系统;调速系统是电力传动控制系统中非常重要的组成部分,所以第 7~9 章分别介绍现代直流传动控制系统、交流传动控制系统和步进电动机传动控制系统的组成、工作原理及性能;第 10 章简要地介绍网络控制技术。本书各章后面附有思考题或习题,供复习与练习用。

本书可作为普通高等学校自动化专业、电气工程及自动化专业的教材或参考书,亦可供有关科技人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电力传动与控制 / 邱阿瑞等编著. —2 版. —北京: 电子工业出版社, 2012. 5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 电气工程及自动化专业精品教材

ISBN 978-7-121-16875-8

I. ①现… II. ①邱… III. ①电力传动—自动控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 080807 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 430 千字

版 次: 2012 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 35.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

再版前言

本书这次再版主要是对第1、2、3、4章进行了修订,对第10章的“现场总线的标准”一节重新进行了编写,并根据工业以太网近年来最新发展成果增加了一节内容,对其他各章的个别错误做了修改,对书中不规范的字符或格式做了统一处理。

在现代工业自动化生产中,整个电力传动系统不仅包括拖动生产机械设备的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统。所以,本书既讨论电动机的工作原理、特性以及启动、调速、制动与停车,又涉及电动机的现代控制系统,故本书称为“现代电力传动与控制”。

本书把驱动电动机、控制电机、电力传动、可编程序控制器、直流传动控制系统、交流传动控制系统、步进电动机传动控制系统和网络控制技术 etc 强电控制需要的内容有机地结合起来,即把工业自动化、机电一体化技术所需的现代强电控制知识都集中在本书中,它不仅避免了内容的重复,而且加强了系统性,理论联系实际,使读者学习之后可以对工业自动化、机电一体化的强电控制知识有比较全面系统的了解和掌握。

本书力求突出强电控制相关内容有机结合的特点,通过内容精选、整合和优化,以满足高等院校本科生、研究生统筹培养课程体系改革要求。本书内容比较全面、系统和新颖,基本包括了工业自动化、机电一体化技术所需的现代强电控制知识,并反映了近年来最新的科研成果。本书共分十章。第1章为绪论;第2章重点介绍电力传动系统的运动方程式;由于电动机是电力传动的动力和控制的对象,故第3、4章分别介绍直流电动机、异步电动机和同步电动机的原理及特性;随着电力传动控制系统的发展,控制电机是作为重要的检测与控制元件,故第5章介绍常用控制电机的结构、原理和性能;由于可编程序控制器(PLC)正广泛应用于生产中,故第6章介绍 PLC 的基本结构、原理、编程和指令系统等;调速系统是电力传动控制系统中非常重要的组成部分,所以第7、8、9章分别介绍现代直流传动控制系统、交流传动控制系统和步进电动机传动控制系统的组成、工作原理及性能;最后一章简要地介绍网络控制技术。同时,在各章后面附有思考题或习题,供复习与练习用。

由于学时的限制,课堂上只能讲授书中一些基本内容,许多内容可在教师指导下由学生自学或作为参考之用。课堂讲授的基本内容可由教师根据授课专业的需要在教学过程中灵活掌握。

为加强学生的实践环节,在讲授本书内容时可采用“自选实验”或结合本学科相关的“SRT项目”的方式来提高学生分析问题和解决问题的能力,增强学生的动手能力和创新能力。

本书第1、2、3、4、10章由邱阿瑞编写;第5、9章由柴建云编写;第6章由王善铭、孙晓瑛编写;第7章由王善铭编写;第8章由孟朔编写。由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2012年元月于清华园

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 电力传动及控制系统	(1)
1.2 本课程的性质和任务	(2)
第 2 章 电力传动系统动力学	(4)
2.1 电力传动系统的运动方程式	(4)
2.2 负载转矩和飞轮矩的折算	(5)
2.2.1 旋转运动	(5)
2.2.2 平移运动	(6)
2.2.3 升降运动	(7)
2.3 电力传动系统的负载特性	(9)
2.3.1 恒转矩负载特性	(9)
2.3.2 通风机、泵类负载特性	(10)
2.3.3 恒功率负载特性	(10)
2.4 电力传动系统稳定运行条件	(11)
思考题	(12)
习题	(12)
第 3 章 直流电动机的原理及特性	(14)
3.1 直流电动机的基本结构和工作原理	(14)
3.1.1 直流电动机的基本结构	(14)
3.1.2 励磁方式	(16)
3.1.3 直流电动机的工作原理	(16)
3.1.4 直流电动机的额定数据	(20)
3.2 直流电动机的机械特性	(21)
3.2.1 他励直流电动机的机械特性	(21)
3.2.2 串励直流电动机的机械特性	(24)
3.3 直流电动机的启动、调速与制动	(25)
3.3.1 直流电动机的启动	(25)
3.3.2 直流电动机的调速	(26)
3.3.3 直流电动机的制动	(33)
3.4 直流电动机的各种运行状态	(40)
3.4.1 电动运行状态	(40)
3.4.2 制动运行状态	(40)
思考题	(41)
习题	(42)

第4章 交流电动机原理及特性	(44)
4.1 三相异步电动机的基本结构和工作原理	(44)
4.1.1 三相异步电动机的基本结构	(44)
4.1.2 三相异步电动机的额定数据	(46)
4.1.3 三相异步电动机的工作原理	(46)
4.1.4 三相异步电动机的等效电路	(50)
4.1.5 三相异步电动机的功率和转矩	(53)
4.2 三相异步电动机的机械特性	(57)
4.2.1 机械特性的参数表示式	(57)
4.2.2 机械特性的实用公式	(60)
4.2.3 固有机械特性和人为机械特性	(62)
4.3 三相异步电动机的启动、调速和制动	(65)
4.3.1 鼠笼式异步电动机的启动	(65)
4.3.2 高启动转矩的异步电动机	(71)
4.3.3 绕线式异步电动机的启动	(72)
4.3.4 异步电动机的软启动	(75)
4.3.5 异步电动机的调速	(77)
4.3.6 三相异步电动机的制动	(85)
4.4 异步电动机的各种运行状态	(92)
4.5 单相异步电动机	(93)
4.5.1 单相电阻分相启动异步电动机	(93)
4.5.2 单相电容分相启动异步电动机	(95)
4.5.3 单相电容运转异步电动机	(95)
4.5.4 单相电容启动与运转异步电动机	(96)
4.5.5 单相罩极异步电动机	(96)
4.6 同步电动机	(97)
4.6.1 同步电动机的基本结构	(97)
4.6.2 同步电动机的工作原理和机械特性	(97)
4.6.3 同步电动机的启动	(98)
4.6.4 同步电动机的功角特性	(99)
4.6.5 同步电动机的功率因数调节	(104)
4.6.6 永磁同步电动机	(105)
思考题	(106)
习题	(109)
第5章 控制电机	(111)
5.1 伺服电动机	(111)
5.1.1 直流伺服电动机	(111)
5.1.2 交流伺服电动机	(113)
5.2 力矩电动机	(114)
5.3 测速发电机	(116)
5.3.1 直流测速发电机	(116)

5.3.2 交流测速发电机	(116)
5.4 自整角机	(118)
5.4.1 三相自整角机	(118)
5.4.2 单相自整角机	(118)
思考题	(119)
第6章 可编程序控制器(PLC)	(120)
6.1 PLC的主要特点、功能和性能指标	(120)
6.1.1 PLC的主要特点	(120)
6.1.2 PLC的主要功能	(121)
6.1.3 PLC的主要性能指标	(122)
6.2 PLC的基本结构和工作原理	(122)
6.2.1 PLC的基本结构	(122)
6.2.2 PLC的工作原理	(124)
6.3 PLC的编程与指令系统	(126)
6.3.1 PLC的编程语言	(126)
6.3.2 基本指令与编程方法	(127)
6.3.3 FP1的指令系统及其编程方法	(130)
6.4 PLC的应用举例	(138)
习题	(141)
第7章 直流传动控制系统	(142)
7.1 单闭环直流调速系统	(142)
7.1.1 单闭环有静差调速系统	(142)
7.1.2 单闭环无静差调速系统	(144)
7.2 双闭环直流调速系统	(147)
7.2.1 双闭环调速系统的组成	(147)
7.2.2 双闭环调速系统的静特性	(147)
7.2.3 双闭环调速系统的动态特性	(148)
7.3 可逆直流调速系统	(150)
7.3.1 电枢可逆系统与磁场可逆系统的比较	(150)
7.3.2 晶闸管和电动机的工作状态	(152)
7.3.3 电枢可逆系统的环流问题	(153)
7.3.4 电枢可逆自然环流调速系统	(156)
7.3.5 可控环流的可逆调速系统	(158)
7.3.6 逻辑无环流可逆调速系统	(159)
7.4 直流脉宽调速系统	(161)
7.4.1 不可逆直流脉宽调速系统	(161)
7.4.2 可逆直流脉宽调速系统	(163)
7.4.3 脉宽调速系统的开环机械特性	(166)
思考题	(167)
第8章 交流传动控制系统	(168)
8.1 交流传动系统介绍	(168)

8.1.1 常见的交流传动方法	(168)
8.1.2 交流调速控制技术的发展	(170)
8.2 交—直—交变频调速系统	(171)
8.2.1 交—直—交电压型变频调速系统	(171)
8.2.2 交—直—交电流型变频调速系统	(172)
8.3 PWM变频调速系统	(175)
8.3.1 PWM型变频器的工作原理	(176)
8.3.2 PWM变频调速系统的控制方法	(178)
8.4 交—交变频调速系统	(186)
8.4.1 基本原理	(186)
8.4.2 交—交变频分类	(187)
8.4.3 交—交变频的优缺点	(187)
8.4.4 交—交变频应用	(188)
8.5 矢量控制系统	(189)
8.5.1 矢量控制的基本原理	(189)
8.5.2 矢量控制系统构成	(197)
8.6 线绕式异步电动机调速系统	(199)
思考题	(201)
第9章 步进电动机传动控制系统	(202)
9.1 步进电动机的基本结构与原理	(202)
9.2 步进电动机的运行特性	(204)
9.3 步进电动机的驱动控制电路	(205)
思考题	(207)
第10章 网络控制	(208)
10.1 现场总线概述	(208)
10.1.1 现场总线的含义	(209)
10.1.2 现场总线的优点	(210)
10.1.3 现场总线的标准	(210)
10.2 几种典型现场总线	(215)
10.2.1 基金会现场总线 FF H1	(215)
10.2.2 PROFIBUS 总线	(217)
10.2.3 WorldFIP 总线	(219)
10.2.4 CAN 总线	(220)
10.2.5 LonWorks	(221)
10.2.6 HART	(223)
10.3 工业以太网	(224)
10.3.1 以太网简介	(224)
10.3.2 Ethernet/IP 网络	(226)
10.3.3 高速以太网 HSE	(227)
10.3.4 实时以太网 EPA	(228)
思考题	(231)
参考文献	(232)

第1章 绪 论

1.1 电力传动及控制系统

在家庭、学校、工厂和农村,到处都可看到以电动机为动力的家用电器或各种各样的机械设备。例如:电风扇、空调机、洗衣机、冰箱、打印机、复印机、印刷机、电梯、风机、水泵、油泵、起重机、机床、轧钢机、锻压机、搅拌机、电动工具、皮带输送机、提升机、空气压缩机、分离机、钻机以及各种农业机械等。这种以电动机为动力来拖动各种电器设备和生产机械的拖动方式,就称为电力传动(又称电力拖动)。由于电力传动方式效率高,便于控制,所以在各行各业中得到广泛应用。

只要有电能的地方,就可利用电动机将电能转变为机械能,然后拖动各种电器设备和生产机械进行启动、稳定运行、调速、制动与停车,以满足人们生活、工作和进行各种生产的要求。根据应用场合和电源情况的不同,电动机有直流电动机、交流异步电动机和交流同步电动机,以及不同需求的特种电动机。

直流电动机把直流电能转变为机械能,其突出优点是调速范围宽,易于平滑调速,启动、制动和过载转矩较大,并且易于控制;缺点是电机结构较复杂,制造成本较高,存在换向问题使其单机容量、最高转速和使用环境受到限制,维护不便。交流电动机把交流电能转变为机械能,它和直流电动机相比,尤其是异步电动机,由于结构简单、价格低廉、运行可靠、维护方便,因此成为各行各业中使用最广泛的一种电动机;缺点是启动与过载转矩小,其调速与转矩控制比较复杂,调速性能不够理想。随着电力电子技术、计算机技术、微电子技术和现代控制技术的发展,交流调速系统的性能和经济指标已赶上直流调速系统,一些原来用直流电动机来拖动的生产机械和设备正逐步被交流电动机所取代。

随着现代工业自动化的发展,对生产过程的自动化程度,机械加工的准确度和精度等要求越来越高。电力传动系统不仅包括拖动生产机械设备的电动机,而且包括控制电动机的一整套控制系统。所以,用于生产过程的电力传动系统一般由电动机、控制设备、传动机构、生产机械和电源组成,如图 1.1 所示。

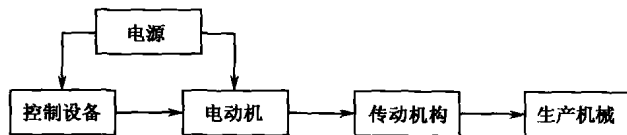


图 1.1 电力传动系统框图

电力传动系统按照电动机类型分为直流传动系统和交流传动系统;按照机组形式分为单台电动机传动系统和成组多机传动系统;按照运动方式分为单方向运转的不可逆传动系统和双方向运转的可逆传动系统;按照用途形式分为主传动系统和辅助传动系统。

直流传动系统在一个较长的时期内,由于它的启动性能、调速性能和转矩控制性能较好,在调速要求较高的应用领域里一直占着主导地位。

20 世纪 70 年代以后,功率晶体管(BJT)、门极关断晶闸管(GTO)、功率 MOS 场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT)、集成门极换向晶闸管(IGCT)、电子注入增强门极晶体管(IEGT)等一批新型电力电子器件的问世,为交流传动系统的发展奠定了物质基础。随着新型电力电子器件的不断涌现,交流变频技术得到飞速发展。磁通跟踪型 PWM 逆变器以不同的开关模式在电机中产生的实际磁通去逼近定子磁链的给定轨迹——理想磁通圆,由于控制简单、数字化方便,已呈现出取代传统 SPWM 的趋势;电流跟踪型 PWM 逆变器兼有电压和电流控制型逆变器的优点,其电流动态响应快、实现方便;PWM 逆变器工作频率的进一步提高将受到开关损耗的限制,由于应用谐振技术使功率开关在零电压或零电流下进行开关状态转换,开关损耗几乎为零,使逆变器效率高、体积小、重量轻、成本低。

在交流变频技术飞速发展的同时,交流传动控制技术也取得突破性进展。由于交流电动机是多变量、强耦合的非线性系统,与直流电动机相比,转矩控制要困难得多。20 世纪 70 年代初提出的矢量控制理论解决了交流电动机的转矩控制问题,它应用坐标变换将三相系统转换为两相系统,再经过按转子磁场定向的同步旋转变换实现了定子电流励磁分量与转矩分量之间的解耦,从而达到对交流电动机的磁链和电流分别控制的目的;20 世纪 80 年代中期提出的直接转矩控制方法,它采用空间矢量分析方法在定子坐标系进行磁通、转矩计算,通过磁通跟踪型 PWM 逆变器的开关状态直接控制转矩。因此,不用对定子电流进行解耦,免去矢量变换的复杂计算,控制结构简单,便于实现全数字化。

DSP 及各种微处理器的应用,促进了模拟控制系统向数字控制系统的转化,数字化技术使得复杂的控制得以实现,简化了硬件,降低了成本,提高了系统的可靠性,使操作、维护更加方便。

随着现代控制理论的发展,电力传动控制技术的发展日新月异,非线性解耦控制、自适应控制、模糊控制、人工神经网络控制等各种新的控制策略正在不断涌现,必将推动电力传动控制技术的进一步发展。

1.2 本课程的性质和任务

本课程既要讨论电动机的工作原理、特性,以及启动、稳定运行、调速、制动与停车等,又要涉及电力传动系统的现代控制技术,故本课程称做“现代电力传动与控制”。

“现代电力传动与控制”课程把驱动电动机、控制电机、电力传动、可编程序控制器、直流传动控制系统、交流传动控制系统、步进电动机传动控制系统和网络控制技术等强电控制需要的内容有机地结合起来,即把工业自动化、机电一体化技术所需的现代强电控制知识都集中在这一门课程中,它不仅避免内容重复,加强系统性,而且理论联系实际,使学生学习之后可对工业自动化、机电一体化的强电控制知识有比较全面系统的了解和掌握。

本课程力求突出机电结合的特点,通过内容精选、整合和优化,以满足本硕统筹培养课程体系改革的要求。教材内容比较全面、系统和新颖,基本包括了工业自动化、机电一体化技术所需的现代强电控制知识,并反映了近年来最新的科研成果。

本课程教材共分 10 章。第 1 章为绪论;第 2 章重点介绍电力传动系统的运动方程式;由于电动机是电力传动的动力和控制的对象,故第 3、4 章分别介绍直流电动机、异步电动机和同步电动机的原理及特性;随着电力传动控制系统的发展,控制电机是作为重要的检测与控制元

件,故第5章介绍常用控制电机的结构、原理和性能;由于可编程序控制器(PLC)正广泛应用于生产中,故第6章介绍PLC;调速系统是电力传动控制系统中非常重要的组成部分,所以第7、8、9章分别介绍现代直流传动控制系统、交流传动控制系统和步进电动机传动控制系统的组成、工作原理及性能;最后一章简要介绍电力传动控制系统的网络控制。同时,在各章后面附有思考题或习题,供教学复习与练习用。

由于学时的限制,课堂上只能讲授教材中一些基本内容,许多内容可在教师指导下由学生自学或作为参考之用。课堂讲授的基本内容可由教师根据专业需要在教学过程中灵活掌握。

为加强学生的实践环节,本课程采用“项目训练”的方式来提高学生分析问题和解决问题的能力,增强学生的动手能力和创新能力。

第2章 电力传动系统动力学

2.1 电力传动系统的运动方程式

最简单的单轴电力传动系统如图 2.1 所示。传动系统的负载与电动机转轴直接相连,负载的转速与电动机的转速相同。图中作用在电动机转轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T ($\text{N} \cdot \text{m}$) 和负载转矩 T_L ($\text{N} \cdot \text{m}$),电磁转矩 T 的正方向与转速 n (r/min) 的正方向相同,而负载转矩 T_L 的正方向与转速 n 的正方向相反。

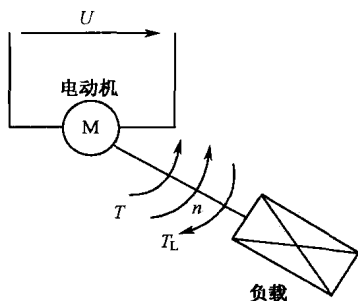


图 2.1 单轴电力传动系统

根据旋转运动系统的牛顿第二定律,可得

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

式中, J 为旋转系统的转动惯量 ($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2$); Ω 为转子旋转机械角速度 (rad/s); $\frac{d\Omega}{dt}$ 为转子旋转机械角加速度 (rad/s^2)。

由于转动惯量 J 是物理学中常用的物理量,工程上则常用飞轮矩 GD^2 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$) 来表示系统的机械惯性。它们之间的关系为

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

式中, m 为系统转动部分的质量 (kg); ρ 为系统转动部分的转动惯性半径 (m); g 为重力加速度 (9.8m/s^2)。

转速 n 与旋转机械角速度 Ω 的关系为

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2-3)$$

将式(2-2)和式(2-3)代入式(2-1)得

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

式(2-4)通常被称为电力传动系统的运动方程式。

从式(2-4)可以看出,电力传动系统的运动状态是由电动机轴上的两个转矩 T 和 T_L 来决定的。

(1) 当 $T > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统加速;

(2) 当 $T < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统减速;

(3) 当 $T = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 系统稳速运转 ($n = \text{常值}$) 或处于静止状态 ($n = 0$)。

因此, $(T - T_L)$ 被称为动态转矩或加速转矩。

2.2 负载转矩和飞轮矩的折算

在生产实际中,许多生产机械为了满足工作的需要,工作机构的速度往往与电动机的转速不同,因此在电动机与工作机构之间需装设变速机构,如皮带变速、齿轮变速和蜗轮蜗杆变速等。这时的电力传动系统就称为多轴电力传动系统,如图 2.2 所示。

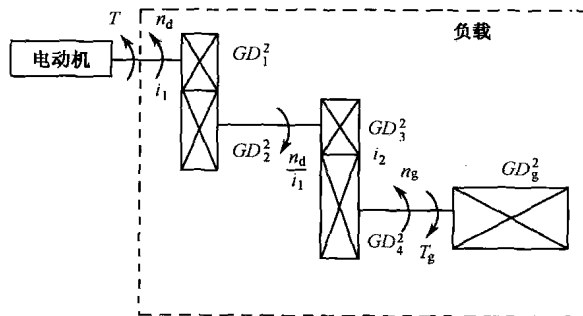


图 2.2 多轴电力传动系统

对于多轴电力传动系统,一般不用详细研究每一根轴上的问题,而只需以电动机轴为研究对象,这时要把工作机构与传动机构合起来等效为一个负载,这样,一个实际的多轴电力传动系统就可简化等效成如图 2.1 所示的单轴电力传动系统。

等效单轴电力传动系统的运动方程式为

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

式中, T 为电动机的电磁转矩; T_L 为折算到电动机轴上的负载转矩; GD^2 为电动机轴上的总飞轮矩,它包括电动机转子本身的飞轮矩 GD_0^2 和折算到电动机轴上的负载飞轮矩 GD_L^2 。

转矩和飞轮矩的折算将随工作机构运动形式的不同而不同,下面分别加以讨论。

2.2.1 旋转运动

1. 转矩的折算

工作机构为旋转运动的例子如图 2.2 所示。若不考虑传动机构的损耗,工作机构折算到电动机轴上的功率(W)应等于工作机构的功率,即

$$\begin{aligned} T_L \Omega &= T_g \Omega_g \\ T_L &= \frac{T_g \Omega_g}{\Omega} = \frac{T_g n_g}{n_d} = \frac{T_g}{i} \end{aligned} \quad (2-6)$$

式中, T_L 为工作机构折算到电动机轴上的转矩; Ω 为电动机转轴的角速度; T_g 为工作机构的实际负载转矩; Ω_g 为工作机构转轴的角速度; n_d 为电动机转轴的转速; n_g 为工作机构转轴的转速; $i = i_1 \cdot i_2 = \frac{n_d}{n_g}$ 为传动机构的总速比,其中 i_1 、 i_2 分别为第一、二级速比。通常传动机构是减速的,即 $n_g < n_d$, 故 $i > 1$; 若传动机构是增速的,则 $n_g > n_d$, $i < 1$ 。

若考虑传动机构的传动效率,则

$$T_L \Omega = \frac{T_g \Omega_g}{\eta_c}$$

$$T_L = \frac{T_g \Omega_g}{\eta_c \Omega} = \frac{T_g n_g}{\eta_c n_d} = \frac{T_g}{\eta_c i} \quad (2-7)$$

式中, η_c 为传动机构的传动效率,它是各级传动效率的乘积。

负载转矩折算的原则是折算前后的功率不变。

2. 飞轮矩的折算

在多轴传动系统中,传动机构为电动机负载的一部分。因此,负载飞轮矩折算到电动机轴上的飞轮矩包括工作机构部分的飞轮矩和传动机构部分的飞轮矩,然后再与电动机转子的飞轮矩相加就为等效单轴系统的总飞轮矩。负载飞轮矩折算的原则是折算前后的动能不变。

因为旋转物体的动能(J)表示式为

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{GD^2 n^2}{7149} \quad (2-8)$$

因此,负载飞轮矩折算的计算式为

$$\frac{GD_L^2 n_d^2}{7149} = \frac{GD_1^2 n_d^2}{7149} + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{7149} \cdot \frac{n_d^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{7149} \cdot \frac{n_d^2}{i_1^2 \cdot i_2^2}$$

化简得

$$GD_L^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{i_1^2 \cdot i_2^2} \quad (2-9)$$

式中, GD_L^2 为折算到电动机轴上的负载飞轮矩; GD_1^2 、 GD_2^2 、 GD_3^2 、 GD_4^2 分别为传动机构各个齿轮的飞轮矩; GD_g^2 为工作机构部分的飞轮矩。

由式(2-9)可知,传动机构各轴折算到电动机轴上的飞轮矩应为各轴上的飞轮矩除以电动机与该轴的速比平方。

于是,折算后传动系统总飞轮矩为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 \quad (2-10)$$

式中, GD_d^2 为电动机转子本身的飞轮矩。

通常,传动机构各轴以及工作机构的转速要比电动机的转速低,而飞轮矩的折算与转速比平方成反比,因此各轴折算到电动机轴上的飞轮矩的数值并不大,故在系统总飞轮矩中占主要成分的是电动机转子本身的飞轮矩。因此,在实际工作中,为了减少折算的麻烦,可采用下式来估算系统的总飞轮矩,即

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (2-11)$$

一般 $\delta = 0.2 \sim 0.3$, 如果电动机轴上还有其他大飞轮矩部件,如机械抱闸的闸轮等, δ 的数值需要加大。

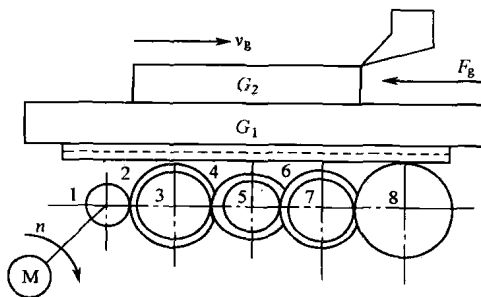


图 2.3 刨床传动系统示意图

2.2.2 平移运动

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。刨床传动系统示意图如图 2.3 所示。这种运动的折算方法与旋转运动有所不同。

设 F_g 为工作机构作平移运动时所克服的阻力(N), v_g 为工作机构移动的速度(m/s),则工作机构所需功率为

$$P_g = F_g v_g \quad (2-12)$$

根据折算前后的功率不变的原则,并考虑到传动系统的损耗,折算到电动机轴上的负载转矩的计算式推导如下。

$$\text{因为} \quad T_L \Omega = \frac{F_g v_g}{\eta_c}$$

$$\text{所以} \quad T_L = \frac{F_g v_g}{\eta_c \Omega} = \frac{F_g v_g}{\eta_c \frac{2\pi n_d}{60}} = 9.55 \frac{F_g v_g}{\eta_c n_d} \quad (2-13)$$

式中, T_L 为工作机构折算到电动机轴上的转矩; Ω 为电动机转轴的角速度; n_d 为电动机转轴的转速; η_c 为传动机构的传动效率。

2. 飞轮矩的折算

设 $m_g, G_g (=G_1 + G_2)$ 为平移运动部分的质量(kg)和重量(N),其动能为

$$\frac{1}{2} m_g v_g^2 = \frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2 \quad (2-14)$$

平移运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩应满足折算前后的动能不变的原则,即

$$\frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2 = \frac{GD_{lg}^2 n_d^2}{7149}$$

于是

$$GD_{lg}^2 = \frac{7149}{2g} \frac{G_g v_g^2}{n_d^2} = 365 \frac{G_g v_g^2}{n_d^2} \quad (2-15)$$

式中, GD_{lg}^2 为平移运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩。

传动机构其他轴上飞轮矩的折算与旋转运动部分所述相同。

2.2.3 升降运动

1. 转矩的折算

某些生产机械的工作机构是作升降运动,如起重机、提升机和电梯等。虽然升降运动和平移运动都属于直线运动,但各有特点。现以起重机为例,讨论其折算方法。图 2.4 为起重机传动系统示意图。

图中,电动机通过传动机构拖动一卷筒,卷筒上的钢丝绳悬挂一重物。设 G_z 为重物的重量, R 为卷筒的半径, n_j 为卷筒的转速, i 为速比。

(1) 提升重物时负载转矩的折算

提升重物时,重物对卷筒轴的负载转矩为 $G_z R$ 。由于提升重物时传动机构的损耗由电动机负担,因此折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_L = \frac{G_z R}{i \cdot \eta_c} \quad (2-16)$$

式中, η_c 为提升传动效率。

(2) 下放重物时负载转矩的折算

下放重物时,重物对卷筒轴的负载转矩仍为 $G_z R$ 。但由于下放重物时传动机构的损耗不由电动机负担,而是由负载来负担,因此折算到电动机轴上的负载转矩为

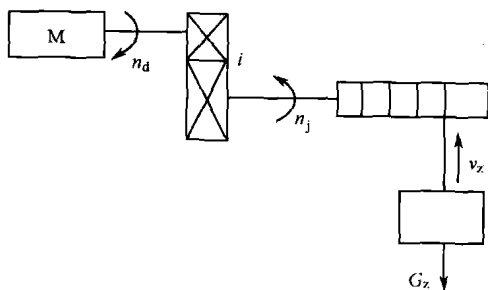


图 2.4 起重机传动系统示意图

$$T_L = \frac{G_z R}{i} \eta_c^\downarrow \quad (2-17)$$

式中, $\eta_c^\downarrow$ 为下放传动效率。

比较式(2-16)和式(2-17)可以看出,同一重物在提升和下放时折算后的负载转矩不一样,下放时折算后的负载转矩小于提升时折算后的负载转矩。提升传动效率 $\eta_c^\uparrow$ 与下放传动效率 $\eta_c^\downarrow$ 也不相等。对于同一重物在提升和下放时,传动机构的损耗 p_c 可以认为不变。提升时电动机功率减去负载功率就是传动机构的损耗,即

$$p_c = \frac{G_z R \Omega_j}{\eta_c^\uparrow} - G_z R \Omega_j = G_z R \Omega_j \left(\frac{1}{\eta_c^\uparrow} - 1 \right) \quad (2-18)$$

式中, Ω_j 为卷筒的旋转角速度。

而下放时负载功率减去电动机功率为传动机构的损耗,即

$$p_c = G_z R \Omega_j - G_z R \Omega_j \eta_c^\downarrow = G_z R \Omega_j (1 - \eta_c^\downarrow) \quad (2-19)$$

由式(2-18)和式(2-19)得

$$\begin{aligned} G_z R \Omega_j (1 - \eta_c^\downarrow) &= G_z R \Omega_j \left(\frac{1}{\eta_c^\uparrow} - 1 \right) \\ \eta_c^\downarrow &= 2 - \frac{1}{\eta_c^\uparrow} \end{aligned} \quad (2-20)$$

从上式可知,若提升传动效率 $\eta_c^\uparrow$ 小于 0.5,下放传动效率 $\eta_c^\downarrow$ 将为负值。 $\eta_c^\downarrow$ 为负值,说明负载功率不足以克服传动机构的损耗,因此还需电动机提供功率,即还需电动机推动,重物才能下放。显然,如果没有电动机的推动,重物是掉不下来的,这就是传动机构的自锁作用。对于像电梯这类涉及人身安全的设备,传动机构的自锁作用尤为重要。要使 $\eta_c^\downarrow$ 为负值,需选用低提升传动效率 $\eta_c^\uparrow$ 的传动机构,如蜗轮蜗杆传动,其 $\eta_c^\uparrow$ 约为 0.3~0.5。

2. 飞轮矩的折算

升降运动的飞轮矩折算与平移运动相同。故升降部分折算到电动机轴上的飞轮矩为

$$GD_{Lz}^2 = 365 \frac{G_z v_z^2}{n_d^2} \quad (2-21)$$

式中, GD_{Lz}^2 为升降部分折算到电动机轴上的飞轮矩; v_z 为重物提升或下放的速度; n_d 为电动机转轴的转速。

【例题 2-1】 在传动机构为齿轮变速的如图 2.2 所示的电力传动系统中,已知工作机构的转矩 T_g 为 240 N·m,转速 n_g 为 128r/min;速比 $i_1=2.4, i_2=3.2$;传动效率 $\eta_1=0.94, \eta_2=0.92$;飞轮矩 $GD_d^2=6.4 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_1^2=1.2 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_2^2=2.6 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_3^2=1.4 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_4^2=2.8 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_g^2=25 \text{ N} \cdot \text{m}^2$;忽略电动机空载转矩。求:

(1) 折算到电动机轴上的负载转矩 T_L ; (2) 电动机轴上系统总飞轮矩 GD^2 。

解

(1) 折算到电动机轴上的负载转矩 T_L

$$\text{总传动效率} \quad \eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 = 0.94 \times 0.92 = 0.8648$$

$$\text{总速比} \quad i = i_1 \cdot i_2 = 2.4 \times 3.2 = 7.68$$

$$\text{负载转矩} \quad T_L = \frac{T_g}{\eta_c \cdot i} = \frac{240}{0.8648 \times 7.68} = 36.14 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 电动机轴上系统总飞轮矩 GD^2

$$\begin{aligned}
 \text{负载飞轮矩} \quad GD_L^2 &= GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{i_1^2 \cdot i_2^2} \\
 &= 1.2 + \frac{2.6 + 1.4}{2.4^2} + \frac{2.8 + 25}{2.4^2 \times 3.2^2} = 1.2 + 0.6944 + 0.4713 \\
 &= 2.366 \text{ N} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

$$\text{总飞轮矩} \quad GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 = 6.4 + 2.366 = 8.77 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

【例题 2-2】 起重机的传动机构如图 2.4 所示。已知重物 $G_z = 120\text{kg}$, 卷筒半径 $R = 0.35\text{m}$, 齿轮速比 $i = 6.4$, 提升重物时的效率 $\eta_c^* = 0.91$, 提升重物的速度 $v_z = 0.86\text{m/s}$, 电动机转子飞轮矩 $GD_d^2 = 57.8\text{N} \cdot \text{m}^2$, 齿轮飞轮矩 $GD_1^2 = 3.4\text{N} \cdot \text{m}^2$, $GD_2^2 = 15.6\text{N} \cdot \text{m}^2$, 卷筒飞轮矩 $GD_R^2 = 40.2\text{N} \cdot \text{m}^2$; 忽略电动机空载转矩。求: (1) 折算到电动机轴上的负载转矩 T_L ; (2) 电动机轴上系统总飞轮矩 GD^2 。

解

(1) 求折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{G_z R}{i \cdot \eta_c^*} = \frac{120 \times 9.8 \times 0.35}{6.4 \times 0.91} = 70.67 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 求电动机轴上系统总飞轮矩

提升重物时电动机的转速

$$n_d = i \cdot \frac{60v_z}{2\pi R} = 6.4 \times \frac{60 \times 0.86}{2\pi \times 0.35} = 150.2 \text{ r/min}$$

$$\begin{aligned}
 \text{负载飞轮矩} \quad GD_L^2 &= GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_R^2}{i^2} + 365 \frac{G_z v_z^2}{n_d^2} \\
 &= 3.4 + \frac{15.6 + 40.2}{6.4^2} + 365 \times \frac{120 \times 9.8 \times 0.86^2}{150.2^2} \\
 &= 18.83 \text{ N} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

$$\text{总飞轮矩} \quad GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 = 57.8 + 18.83 = 76.63 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

2.3 电力传动系统的负载特性

电力传动系统的负载特性是指生产机械的负载转矩与转速的关系, 典型的负载特性可分成恒转矩负载、通风机及泵类负载和恒功率负载等三类。

2.3.1 恒转矩负载特性

恒转矩负载的特点是负载转矩 T_L 恒定不变, 与负载转速 n_L 无关, 即 $T_L = \text{常数}$ 。恒转矩负载又分两种:

1. 反抗性恒转矩负载

反抗性恒转矩负载的特点是负载转矩的方向总是与运动的方向相反, 即转矩的性质是反抗运动的制动性转矩, 图 2.5 表示的是这种负载的特性。

从图 2.5 可以看出, 当 $n_L > 0$ 时, $T \equiv T_L > 0$; 当 $n_L < 0$ 时, $T \equiv -T_L < 0$ 。摩擦类型的负载都属于这种负载特性, 如机床刀架的平移运动、轧钢机、地铁列车等。

2. 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载的特点是负载转矩的方向固定不变, 并与转速的方向无关。起重机提