

高等学校规划教材 · 机械工程
PROGRAMMING TEXTBOOKS FOR HIGHER EDUCATION



电机与电力拖动简明教程

卢健康 主编

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是为适应机电类相关专业尤其是机械设计制造及自动化、机械电子工程等专业课程体系改革的需要而编写的。全书共分 8 章,内容为电力拖动系统动力学,直流电动机及其电力拖动,三相异步电动机的运行原理及其电力拖动,同步电动机及其电力拖动简介,电动机的选择,电力电子技术与现代交直流调速简介,常用控制电机和几种新型特种电动机。本书力求突出机电结合、电为机用的特点,注意理论联系实际,在内容上侧重于电机及其拖动的定性分析和应用,同时又保持适当的深度和广度,并且尽量反映近年来电机和电力拖动学科领域的新发展与新成就。

本书内容比较全面、实用,由浅入深,重点突出,大部分章节后附有习题和思考题,便于自学。本书既可作为机电类、机械类相关专业本科生的教材或硕士生的辅助教材,也适于高职、电大、函大、夜大和网大同类专业学生的教学和自学,亦可供从事机电一体化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电机与电力拖动简明教程/卢健康主编. —西安:西北工业大学出版社,2012.3
ISBN 978-7-5612-3327-6

I. ①电… II. ①卢… 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 038613 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西兴平报社印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:12.375

字 数:298 千字

版 次:2012 年 3 月第 1 版 2012 年 3 月第 1 次印刷

定 价:27.00 元

前 言

机电一体化是机械工业近几十年来发展变化的主要特征之一,机电一体化技术水平已经成为体现一个国家当代工业技术水平的重要标志之一。为了适应这种发展变化,教育部早已将院校中原机电一体化领域内相关专业整合为“机械设计制造及自动化”专业,该专业主要面向机电一体化、机械电子工程等学科方向。根据学科建设的要求,西北工业大学机电学院为该专业增设了“电机与电力拖动”课程,本书就是笔者在该课程讲义的基础上,结合多年的教学实践经验修编而成的。

与“电气工程与自动化”专业相比,机电类专业的强电与弱电类基础课程要少得多,一般又都开设有“电工技术”与“电子技术”课程,因此,机电类专业的“电机与电力拖动”课程与电气工程与自动化专业或自动化专业的相应课程在内容和学时上有着明显不同。本书的特色就在于力图适应机电类专业的需要,突出机电结合、电为机用的特点,体现理论先导、理论联系实际和精练实用的原则,在内容上偏重于电机及其拖动的定性分析和应用,降低理论深度,减少定量计算内容,并且适当反映近年来电机和电力拖动学科领域的新发展与新成就。另外,还注意到与“电工技术”及“电子技术”课程的衔接,并尽量避免或减少内容上的重复。

本书由西北工业大学卢健康主编与统稿,袁小庆任副主编。具体编写分工为第4章和第7章前3节由袁小庆编写,第5章和第7章第4节由李志宇编写,第8章第2节由王萑编写,第8章第3节由王泽锋编写,其余各章节由卢健康编写。文中带*号的为选修内容。

本书由国家级教学名师、西北工业大学博士生导师史仪凯教授审阅。史教授认真审阅了书稿并提出了不少宝贵的修改意见。在编写本书和初编及修订讲义的过程中,先后得到西北工业大学机电学院、教务处及电工学教学团队有关领导和同志们的大力支持和热情帮助;研究生高杨、方晓厅、郝风、王声钊、朱文超、谢亚乐、邢益巽、陈海标、敬瑞星和刘晓艳等做了不少辅助性工作。同时,参考了不少相关文献资料。在此,对主审、参考资料的作者、促成本书出版的西北工业大学出版社有关领导与同志和上述提供帮助的所有领导、老师、学生一并致以诚挚的谢意!

由于水平有限,书中一定有不妥之处,敬请使用本书的老师、学生不吝赐教。

编 者

2011年9月

目 录

绪论	1
第 1 章 电力拖动系统动力学	5
1.1 单轴电力拖动系统的运动方程式	5
1.2 多轴电力拖动系统的折算	7
1.3 生产机械的负载转矩特性	11
1.4 电力拖动系统稳定运行的条件	13
1.5 电力拖动系统的动态过程分析	15
本章习题	18
第 2 章 直流电动机及其电力拖动	20
2.1 直流电机的基本构造	20
2.2 直流电机的工作原理	22
2.3 直流电机的电动势与电磁转矩	24
2.4 直流电机的励磁方式和电枢反应	26
2.5 他励直流电动机的机械特性	31
2.6 他励直流电动机的起动	38
2.7 他励直流电动机的制动	42
2.8 他励直流电动机的调速	51
* 2.9 串励和复励直流电动机的电力拖动	60
本章习题	64
第 3 章 三相异步电动机的运行原理及其电力拖动	67
3.1 三相异步电动机运行时的电磁过程分析	67
3.2 三相异步电动机的等效电路	73
3.3 异步电动机的功率与转矩及工作特性	77
3.4 三相异步电动机的机械特性	81
3.5 三相异步电动机的起动	86
3.6 三相异步电动机的制动	95
3.7 三相异步电动机的调速	100
本章习题	108

第4章 同步电动机及其电力拖动简介	110
4.1 同步电动机的基本结构和工作原理	110
4.2 同步电动机的起动	112
4.3 同步电动机的调速简介	113
第5章 电动机的选择	115
5.1 电动机的温升及其变化规律	115
5.2 电动机工作制的分类	119
5.3 连续工作制下电动机功率的选择	120
5.4 短时工作制下电动机功率的选择	123
5.5 断续周期工作制下电动机功率的选择	125
5.6 电动机类型、额定电压与转速及结构形式的选择	125
本章习题	127
第6章 电力电子技术与现代交直流调速简介	128
6.1 电力电子器件简介	128
6.2 交流调压器与异步电动机调压调速	133
6.3 直流斩波器与直流电动机 PWM 调速	137
6.4 变频和逆变电路	142
6.5 异步电动机的变频调速	146
6.6 无刷直流电动机调速系统	153
第7章 常用控制电机	161
7.1 伺服电动机	161
7.2 步进电动机	164
7.3 力矩电动机	167
7.4 自整角机	169
本章习题	173
第8章 几种新型特种电动机	174
8.1 开关磁阻电动机	174
8.2 横向磁场永磁电机	179
8.3 无轴承电机	184
8.4 超声波电动机	187
参考文献	191

绪 论

一、电力拖动的含义与功能

电力拖动(又称为电力传动、电气传动或机电传动)系统是指以电动机为原动机驱动机械的系统的总称,其目的是将电能转换成机械能,实现机械的起动、停止和速度调节,完成各种工艺过程的要求,保证其正常进行。

在现代工农业生产、日常生活与办公等许多场合,需要使用各种各样的机械。而要拖动各种机械运转,可以采用气动、液压传动或电力拖动方式。由于电力拖动具有控制简单、调节性能好、损耗小、经济、能实现远距离控制和自动控制等一系列优点,因此大多数机械均采用电力拖动。

为了实现生产过程自动化的要求,电力拖动系统中不但包括拖动生产机械的电动机,而且包括控制电机及其相关的一整套控制系统。也就是说,现代电力拖动是和由各种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,因此,现代的电力拖动系统也常被称为电力拖动自动控制系统。

电力拖动系统所要完成的功能,广义地讲,就是要使机械设备、生产线、车间以及整个工厂都实现自动化;从狭义上来说,是指通过控制电动机驱动生产机械,实现产品数量的增加、质量的提高、生产成本的降低、工人劳动条件的改善以及能量的节约。随着生产工艺的发展,对电力拖动系统提出了越来越高的要求。例如,一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米,甚至几微米;重型镗床为了保证加工精度和粗糙度,就要在极慢的稳定速度下进给,即要求在很宽的范围内调速;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械操作频繁,要求在不到1s的时间内完成从正转到反转的过程,即要求能迅速地起动、制动与反转;对于电梯和起重机等升降机械,则要求起动与制动平稳,并能准确地停止在给定位置上;为了提高效率,由数台或数十台设备组成的自动生产线,要求统一控制和管理。诸如此类的要求都是靠电力拖动自动控制系统来实现的。

二、电机与电力拖动技术的发展

电能是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。在自动控制系统中,各种小巧灵敏的控制电机被广泛地用做检测、放大、执行和解算元件。

无论是旋转电机的能量转换,还是控制电机的信号变换,一般都是通过电磁感应作用来实现的,因而分析电机内部的电磁过程及其所表现的特性时,要应用有关电和磁的定律,如分析电路的基尔霍夫定律、安培环路定律、电磁感应定律和电磁力定律等。但是,电机毕竟是一种机械,除电和磁的定律以外,还涉及力学、结构、工艺、材料等方面的问题,因此,电机在拖动系

统中是一种综合性的装置或元件。

电机是随着生产发展而产生和发展的,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工业上的初步应用、各种电机的初步定型以及电机理论和电机设计计算方法的产生和发展。在由电气化时代进入自动化、信息化和网络化时代的今天,不但对电机提出了诸如性能良好、运行可靠、单位容量的质量轻、体积小等越来越多的要求,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重要分支。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。

当前,电机制造技术的发展趋势主要有以下三个方面:

(1)大型和巨型化。单机容量越来越大,如三峡电站水轮发电机组单机功率达 700 MW (发电机最大容量为 840 MVA)。

(2)微型化。为适应设备小型化的要求,电机的体积越来越小,质量越来越轻。

(3)多样化。新原理、新工艺、新材料和新结构的电机不断涌现,如无刷直流电动机、开关磁阻电动机、直线电动机、超声波电动机、横向磁场电机、无轴承电机等。

与电机的发展过程相类似,电力拖动技术也是逐步发展起来的。其发展历程大致可分为以下三个阶段:

1. 成组拖动阶段

成组拖动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。这种方式无法实现自动控制,且能量在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,生产安全得不到保证,容易发生人身、设备事故。如果电动机有故障,被拖动的所有生产设备都将一起停车,甚至会使整个生产停顿。

2. 单电动机拖动阶段

为了克服上述这种陈旧落后的电力拖动方式存在的缺点,从 20 世纪 20 年代以来,生产机械上广泛采用单电动机拖动系统,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,使每台生产设备既可独立工作,实现电气调速,又省去了大量的中间传动机构,使机械结构简化,并且易于实现生产机械运转的全自动化。

3. 多电动机拖动阶段

如果用一台电动机拖动具有多个工作机构的生产机械,生产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,开始广泛采用“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 3 个主轴的龙门铣床用 3 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部分组成,每一部分可用单独的电动机来拖动。

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,要求快速启动、制动及反转,要求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,还必须要有自动控制设备,以组成自动化的电力拖动系统,而电力拖动系统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、调速和同步,自动维持转速、转矩或功率为恒定值,按给定程序或规律改变速度、转向和工作机构的位置,以及使工作循环自动化等。

随着电机及电器制造业与自动化技术的进步,电力拖动系统也得以不断地发展与更新。最初采用的控制系统是继电器-接触器组成的断续控制系统,到后来普遍采用由电力电子变流器供电的连续控制系统。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和由变频器或伺服驱动器供电的交流电力拖动系统两大类。交流电力拖动系统包括由绕线型异步电动机组成的双馈调速系统和由异步或同步电动机组成的变频调速与伺服系统等。目前,随着电力电子技术、信息技术以及控制理论的发展,电力拖动系统的性能指标也上了一大台阶,不仅可以满足生产机械快速起动、制动以及正、反转的要求(即所谓的四象限运行状态),还可以确保整个电力拖动系统具有较高的调速与定位精度和较宽的调速范围。这些性能指标的提高,使得生产设备的生产率和产品质量大为提高。此外,随着多轴电力拖动系统的发展,过去许多难以解决的问题也变得迎刃而解,如复杂曲轴、曲面的加工,机器人、航天器等复杂空间轨迹的控制与实现等。目前,电力拖动系统正朝着网络化、信息化方向发展,包括现场总线、智能控制策略以及网络技术在内的各种新技术、新方法均在电力拖动领域中得到了应用。电力拖动理论与技术的面貌正在日新月异地发展变化。

三、本课程的性质、任务与内容

机电一体化产品质量和技术水平的高低,已经成为当今世界衡量一个国家实力和国际地位的重要标志。实现产品的高质量和技术的高水平,关键的一环是机电一体化人才的培养。高校要培养基础扎实、知识面宽、能力强、素质高、具有创新精神和实践能力的“机电复合型”人才,使学生学习并掌握机、电、液、计算机等综合控制系统的技术。在综合控制系统中的电气控制系统主要包含弱电控制(如计算机控制技术)和强电控制,而强电控制的主要内容,对机电类专业来讲,除“电工技术”课程中已学过的磁路与铁芯线圈电路、变压器、继电器-接触器控制和异步电动机结构与工作原理等内容外,其余的都需要在本课程中学习。

本课程是机械设计制造及其自动化专业、机械电子工程专业和机电一体化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、直流电机与控制电动机的基本结构和工作原理,以及电力拖动系统的典型主电路、运行性能、分析计算与电机选择方法,为学习相关的后续课程和进行科学研究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“电机学”及“电力拖动基础”的主要内容,但不包括学生在“电工技术”课程中已学过的磁路、铁芯线圈电路、变压器和异步电动机结构与工作原理等内容,以避免不必要的重复。在学完本课程之后,应达到下列要求:

- (1) 理解常用交、直流电机的基本理论。
- (2) 理解常用控制电动机的工作原理、特性及用途。
- (3) 掌握分析电动机机械特性及各种运行状态的基本理论和方法。
- (4) 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,了解机械惯性对直流电力拖动过渡过程的影响。
- (5) 掌握电力拖动系统中电动机调速方法的基本原理和技术经济指标。
- (6) 掌握选择电机的原理与方法。

(7) 了解电机与电力拖动今后发展的方向。

* (8) 了解几种新型特种电机的基本结构和工作原理。

(9) 了解现代电力拖动调速系统的基本知识。

(10) 了解典型的交、直流电动机调速系统的基本结构和主电路工作原理。

在交、直流电机的起动、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,而如何实现自动起动、制动及调速的控制线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,应在“电气传动自动控制系统”等相关后续课程中学习。

第 1 章 电力拖动系统动力学

拖动是指由原动机带动生产机械运转。用各种电动机作为原动机带动生产机械运动,称为电力拖动。电力拖动系统的结构如图 1.1 所示,一般由电动机、机械传动机构、生产机械的工作机构、控制设备和电源五部分组成。其中电动机是原动机,通过传动机构带动生产机械的工作机构执行某一生产任务;机械传动机构用来传递和变换机械能;控制设备则用来控制电动机的运动;电源向电动机和其他电气设备供电。通常把机械传动机构及工作机构称为电动机的机械负载。

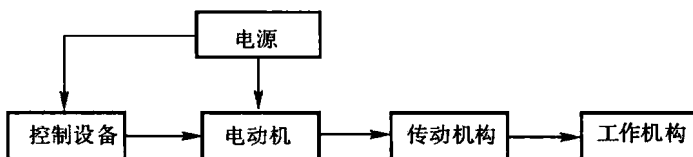


图 1.1 电力拖动系统结构示意图

电动机及其负载构成了电力拖动系统。要研究电力拖动系统,不仅要研究电动机自身的运行性能,还要研究电动机和负载之间相互作用的运动规律。

本章首先运用动力学原理,分析讨论电力拖动系统的运动方程式和转矩及飞轮矩的折算方法;接着介绍几种典型的负载转矩特性,即负载转矩与转速之间的相互关系;然后分析电力拖动系统稳定运行的条件;在此基础上,进一步研究电力拖动系统在起动、制动、调速等运行过程中转矩与转速之间的变化规律,分析电力拖动系统的过渡过程。

1.1 单轴电力拖动系统的运动方程式

电动机输出轴直接拖动生产机械运转的拖动系统称为单轴电力拖动系统,如图 1.2 所示。在图 1.2 所示的电力拖动系统中,作用在该轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T 、电动机的空载转矩 T_0 及生产机械的负载转矩 T_m 。电动机的负载转矩 T_L 为 T_0 与 T_m 之和。轴的旋转角速度为 Ω 。电动机转子的转动惯量为 J_R ,生产机械转动部分与联轴器的转动惯量之和为 J_m ,因此单轴拖动系统对转轴的总转动惯量为 $J = J_R + J_m$ 。图 1.2(b) 给出了各物理量的参考方向(正方向),假设两轴之间为刚性连接且轴无弹性变形,那么图 1.2 所示的单轴拖动系统可以看成是刚体绕固定轴转动。根据动力学定律并考虑各量的正方向,可以得出单轴电力拖动系统运动方程式

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1.1)$$

式中,各个转矩的单位为 $N \cdot m$,各个转动惯量的单位为 $kg \cdot m^2$,而角速度的单位则是 rad/s 。

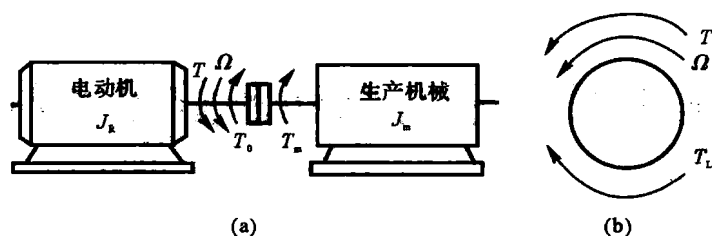


图 1.2 单轴电力拖动系统结构及各量的参考方向

(a) 单轴电力拖动系统结构; (b) 各量的参考方向

单轴电力拖动系统的运动方程式描述了作用于单轴拖动系统的各个转矩与角速度变化之间的关系,是研究电力拖动系统各种运转状态的基础。

式(1.1)是电力拖动系统运动方程的一般物理表达形式。但在实际的电力拖动工程实践中,往往不用转动惯量 J 而采用飞轮惯量(或称飞轮矩) GD^2 表示旋转体的惯性,用转速 n 代替角速度 Ω 。 n 与 Ω 的关系为

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

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (1.2)$$

J 与 GD^2 之间的关系为

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1.3)$$

式中 m —— 系统转动部分的质量,单位为 kg;

G —— 系统转动部分的重力,单位为 N;

ρ —— 系统转动部分的回转半径,单位为 m;

D —— 系统转动部分的回转直径,单位为 m;

g —— 重力加速度,工程上一般取为 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

将式(1.2)和式(1.3)代入式(1.1)并化简整理,可得到电力拖动系统运动方程的工程实用表达形式,即

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.4)$$

式中, GD^2 是系统转动部分的总飞轮矩(单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^2$),而常数 $375 \approx 4g \times 60 / (2\pi)$,它具有加速度的量纲。

式(1.4)表明:电力拖动系统的加速度 dn/dt 是由作用在转轴上所有转矩的代数和 $T - T_L$ 决定的。当 $T > T_L$ 时, $dn/dt > 0$,系统加速;当 $T < T_L$ 时, $dn/dt < 0$,系统减速。在这两种情况下系统的运动都处在过渡过程之中,称为动态或过渡状态。

当 $T = T_L$ 时, $dn/dt = 0$,系统以恒定的转速运行或者静止不动。这种运动状态称为稳定运转状态或静态,简称稳态。

需要强调的是, T , T_L 及 n (或 Ω) 都是有正方向(或称参考方向)的,如果规定转速 n 对观察者而言逆时针为正方向(参见图 1.2(b)),则电磁转矩 T 与 n 的正方向相同时应取正,而负载转矩 T_L 与 n 的正方向相反时取正。当给上述基本运动方程式代入具体数值时,如果其实际方

向与规定的正方向相同就取正值,否则应取负值。

【思考题】

1. 电力拖动系统包括哪几部分? 各个部分起什么作用? 举例说明。
2. 电力拖动系统运动方程式中 T , T_L 及 n 的正方向是如何规定的? 如何表示它的实际方向?
3. 试述飞轮矩的含义与表达式。
4. 从运动方程式中如何看出拖动系统是处于加速、减速、恒速或静止等运动状态的?

1.2 多轴电力拖动系统的折算

电力拖动系统中的电动机转速一般都比较低,而多数生产机械为满足工艺要求则需要较低的转速,或者需要平移、升降、往复等不同的运动形式。在电动机和工作机构之间通常具有传动与减速装置以及运动形式变换装置,因此,实际的电力拖动系统多数都是多轴电力拖动系统,如图 1.3(a) 所示。图中采用 4 个轴把电动机角速度 Ω 变成符合生产机械工作机构需要的角速度 Ω_m ,不同的轴上有不同的转动惯量和转速,也有相应的反映电动机拖动的转矩及反映工作机构工作的阻转矩。

对于多轴电力拖动系统,如果用单轴电力拖动系统运动方程式分析其运动情况,就需要对每一根轴分别列出运动方程式,再联立求解。这种直接求解多轴系统的方法很复杂,计算较为困难,为了简化计算,一般都采用先把多轴系统等效折算为等效的单轴系统后再来求解的间接方法,如图 1.3(b) 所示。当对图 1.3(b) 所示的系统使用电力拖动系统基本运动方程式(1.4)进行分析时,式中的 T_L 应是折算后的等效负载转矩 T_{meq} 与 T_0 之和, GD^2 是折算后系统总的等效飞轮矩。

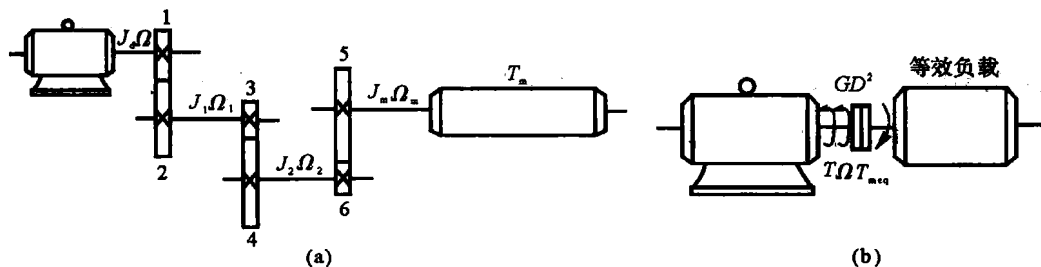


图 1.3 多轴电力拖动系统示意图

(a) 多轴系统; (b) 等效折算图

下面具体介绍负载转矩和飞轮矩的折算方法。等效折算的原则是保持折算前后系统的动力学性能不变,即系统在折算前和折算后应具有相等的机械功率和动能。

1.2.1 工作机构转动时的折算

1.2.1.1 转矩的折算

转矩的折算应遵守所传递的功率相等的原则。在图 1.3 所示的电力拖动系统中,工作机

构上的阻转矩是 T_m , 折算到电动机轴上的阻转矩是 T_{meq} , 如果忽略传动机构的损耗, 则有

$$T_{meq}\Omega = T_m\Omega_m$$

即

$$T_{meq} = \frac{T_m\Omega_m}{\Omega} = \frac{T_m}{j} \quad (1.5)$$

式中, j 是电动机轴与工作机构轴间的转速比。如传动机构为多级变速, 各级的转速比为 $j_1, j_2, j_3, \dots$, 则总转速比为

$$j = j_1 j_2 j_3 \dots, \quad j = \frac{\Omega}{\Omega_m} = \frac{n}{n_m}$$

如果考虑传动机构的传动损耗, 而且电机工作在电动状态, 传动损耗由电机承担, 则负载转矩的折算值还要更大些, 为

$$T_{meq} = \frac{T_m}{j\eta} \quad (1.6)$$

式中, η 为传动机构的总效率, 等于各级传动效率的乘积, 即

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots$$

如果电机工作在发电制动状态, 即电机由工作机构带动, 传动损耗就由工作机构承担, 按传动功率不变的原则, 则负载转矩的折算值要更小一些, 为

$$T_{meq} = \frac{T_m}{j}\eta \quad (1.7)$$

1.2.1.2 飞轮矩的折算

当对多轴系统进行折算时, 除了转矩的折算外, 还须将传动机构各轴的转动惯量 $J_1, J_2, \dots$ 和工作机构的转动惯量 J_m 折算到电动机轴上, 用电动机轴上一个等效的转动惯量 J 或飞轮矩 GD^2 来反映各轴的转动惯量对整个拖动系统的影响。各轴的转动惯量对运动过程的影响直接反映在各轴转动惯量所储存的动能上, 因而飞轮矩的折算原则就是保持折算前后系统储存的动能不变。依据动力学原理, 一个旋转体的动能为 $\frac{1}{2}J\Omega^2$, 设各轴的角速度分别为 $\Omega, \Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_m$, 由系统储存的动能不变原则可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}J\Omega^2 &= \frac{1}{2}J_d\Omega^2 + \frac{1}{2}J_1\Omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\Omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2}J_m\Omega_m^2 \\ J &= J_d + J_1/\left(\frac{\Omega}{\Omega_1}\right)^2 + J_2/\left(\frac{\Omega}{\Omega_2}\right)^2 + \dots + J_m/j^2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

式中, J_d 为电动机轴的转动惯量。考虑到 $J = \frac{GD^2}{4g}, \Omega = \frac{2\pi n}{60}$, 上式又可写成

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2/\left(\frac{n}{n_1}\right)^2 + GD_2^2/\left(\frac{n}{n_2}\right)^2 + \dots + GD_m^2/j^2 \quad (1.9)$$

式中, $GD_d^2, GD_1^2, \dots, GD_2^2$ 和 GD_m^2 分别为电动机轴和各轴上相应的飞轮矩。

在系统总飞轮矩中, 电动机轴上的飞轮矩一般占的比例最大, 其次是工作机构上飞轮矩的折算值, 而传动机构中各种飞轮矩的折算值占的比例最小。因此, 在工程实践中为了简化计算, 也可采用下式近似估算系统的总飞轮矩, 即

$$GD^2 = (1 + \delta)GD_d^2 \quad (1.10)$$

式中, GD_2^2 是电动机轴的飞轮矩, 其值可从产品目录中查阅。如果在电动机轴上除了第一级小齿轮外没有其他旋转部件, 一般取 δ 为 $0.2 \sim 0.3$ 。

1.2.2 工作机构直线运动时转矩与飞轮矩的折算

有些生产机械的工作机构具有直线运动的特点, 如起重机的提升装置、机床工作台带动工件前进来进行切削加工等。直线运动又分为平移运动和升降运动两种, 下面分别讨论这两种直线运动的电力拖动系统的折算方法。

1.2.2.1 平移运动

1. 转矩的折算

很多生产机械, 例如刨床, 其工作机构做平移运动, 如图 1.4 所示。切削时工件与工作台的速度为 v (单位为 m/s), 刨刀固定不动, 刨刀作用在工件上的力为 F (单位为 N), 传动机构的效率为 η 。则切削时的切削功率 $P(\text{W})$ 为

$$P = Fv$$

如果考虑传动机构中的损耗, 则电动机轴上的负载功率为

$$T_{\text{meq}} \Omega = \frac{P}{\eta} = \frac{Fv}{\eta}$$

所以

$$T_{\text{meq}} = \frac{Fv}{\eta \Omega} = \frac{Fv}{\eta \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n \eta} \quad (1.11)$$

式(1.11) 就是平移运动的负载转矩折算公式。

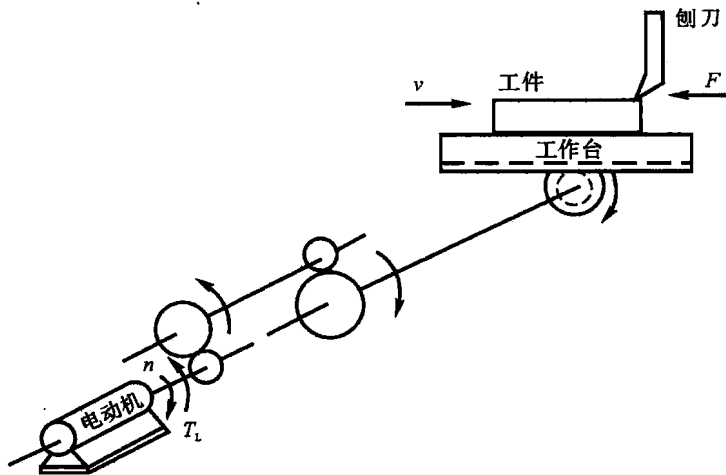


图 1.4 工作机构做平移运动的示意图

2. 飞轮矩的折算

设平移运动部件所受的重力为 $G = mg$, 则平移运动部件的动能为

$$\frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2$$

又设拟折算到电动机轴上的转动惯量为 J_{eq} , 折算到电动机轴上的等效飞轮矩为 GD_{eq}^2 , 那

么折算到电动机轴上后的动能为

$$\frac{1}{2} J_{\text{eq}} \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_{\text{eq}}^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

按照折算前后保持系统动能不变的原则可得

$$\frac{1}{2} \frac{G}{g} v^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_{\text{eq}}^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

所以

$$GD_{\text{eq}}^2 = 4 \times \frac{Gv^2}{\left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{Gv^2}{n^2} \quad (1.12)$$

为了求得等效单轴系统的总飞轮矩,还需要计算传动机构各旋转轴飞轮矩的折算值,其方法与多轴旋转系统飞轮矩的折算方法相同,此处不再赘述。

1.2.2.2 升降运动

工作机构为升降运动的机械常见的有电梯、起重机和矿井卷扬机等。升降运动虽然也是直线运动,但与平移运动不同的是它与重力有关。

1. 转矩的折算

图 1.5 所示为一起重机示意图,通过传动机构(减速箱)拖动一个卷筒,缠在卷筒上的钢丝绳悬挂一重物,重物的重力为 $G = mg$,传动机构总转速比为 j ,重物提升时传动机构效率为 η ,卷筒半径为 R ,转速为 n ,假设重物提升或下放的速度都为 v_L ,是个常数。

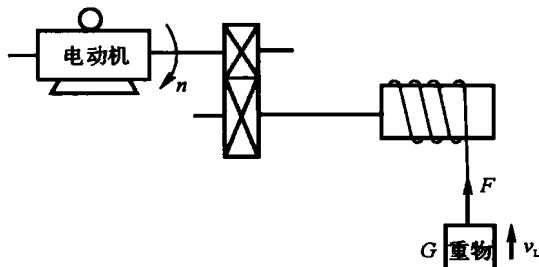


图 1.5 起重机示意图

重物作用在卷筒上,重物对卷筒轴上的负载转矩为 GR ,不计传动机构损耗时,折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{\text{meq}} = \frac{GR}{j} \quad (1.13)$$

如果考虑传动机构的损耗,当提升重物时,这个损耗由电动机负担,故折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{\text{meq}} = \frac{GR}{j\eta} \quad (1.14)$$

传动机构的损耗转矩 ΔT 为

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta} - \frac{GR}{j}$$

当下放重物时,工作机构带动电动机使重物下放,传动损耗由工作机构承担,因而折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_{\text{meq}} = \frac{GR}{j} \eta' \quad (1.15)$$

式中, η' 为重物下放时传动机构的效率, 在提升与下放传动损耗相等(提升与下放同一重物)的条件下, 可以证明 η' 与 η 有如下关系:

$$\eta' = 2 - \frac{1}{\eta} \quad (1.16)$$

2. 飞轮矩的折算

由于飞轮矩的折算不涉及传动损耗, 因此升降运动飞轮矩的折算与平移运动飞轮矩的折算相同。

【思考题】

将多轴电力拖动系统折算为等效单轴系统时, 分别按什么原则折算负载转矩和各轴的飞轮矩?

1.3 生产机械的负载转矩特性

在运动方程式(1.4)中, 负载转矩(亦称阻转矩) T_L 与转速 n 的函数关系 $T_L = f(n)$ 称为生产机械的负载转矩特性(也可简称为负载特性)。负载转矩 T_L 的大小与多种因素有关。以车床为例, 当其切削加工时, 其主轴转矩与切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。据统计, 大多数生产机械的负载特性可近似归纳为恒转矩特性、恒功率特性和通风机特性 3 种典型特性。

1.3.1 恒转矩负载特性

凡是负载转矩 T_L 的大小为一定值, 而与转速 n 无关的负载称为恒转矩负载。根据负载转矩的方向是否与转向有关又分为两种。

1. 反抗性恒转矩负载特性

这种负载转矩源于摩擦阻力。其特点是 T_L 大小不变但作用方向总是与运动方向相反, 属于阻碍运动的制动性质的转矩。属于这一类负载的生产机械有带式输送机、轧钢机、起重机的行走机构等。

从反抗性恒转矩负载的特点可知, 当 n 为正向时, T_L 亦为正; 当 n 为负向时, T_L 也改变方向(阻碍运动, 与 $+n$ 同方向), 变为负值。因此, 反抗性恒转矩负载特性位于第 I 与第 III 象限内, 如图 1.6 所示。

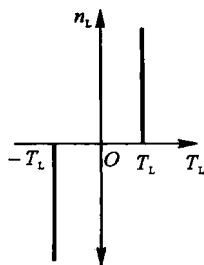


图 1.6 反抗性恒转矩负载特性

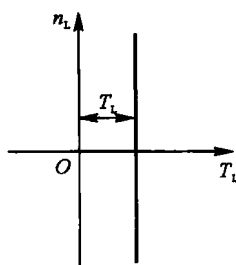


图 1.7 位能性转矩负载特性

2. 位能性转矩负载特性

这种负载转矩是由重力作用产生的。它的特点是 T_L 的大小与作用方向都不会因转速的变化(包括转速大小和方向的变化)而变化。

最典型的位能性负载是起重机的提升机构及矿井卷扬机。这类负载无论是提升重物还是下放重物,重力的作用方向不变。如果以提升作为运动的正方向,则 n 为正向时, T_L 是阻碍运动的阻转矩,也为正值;当下放重物, n 为负向时, T_L 的方向不变,仍为正,表明此时 T_L 是促进运动的,由提升重物时的阻转矩变成了拖动转矩。其特性位于第 I 和第 IV 象限内,如图 1.7 所示。

1.3.2 恒功率负载特性

有些机床,例如车床,粗加工时,切削量大,因而切削阻力也大,此时主轴开低速;而精加工时,切削量小,因而切削阻力也小,往往要求主轴开高速。因此,在不同转速下,负载转矩 T_L 基本上与转速成反比,即

$$T_L = \frac{K}{n}$$

于是,切削功率为

$$P_L = T_L \Omega = T_L \frac{2\pi n}{60} = \frac{T_L n}{9.55} = \frac{K}{9.55} = K_1$$

式中, K 和 K_1 分别是两个具有功率量纲的系数。

可见,切削功率基本不变,因此,把这种负载称为恒功率负载。其负载特性 $T_L = f(n)$ 成双曲线关系,如图 1.8 所示。

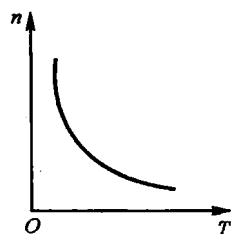


图 1.8 恒功率负载特性

1.3.3 通风机负载特性

通风机的转矩与转速大小有关,基本上与转速的平方成正比,即

$$T_L = kn^2$$

式中, k 为一比例系数。

通风机负载特性如图 1.9 中实线所示。图中只画出了第 I 象限即转速为正向时的特性,鉴于通风机负载是反抗性的,当转速反向时, T_L 也反向,变为负值,故第 III 象限中应有与第 I 象限特性对称的曲线。

属于通风机型负载的生产机械有离心式通风机、水泵、液压泵等。这种负载转矩是由周围介质(空气、水、油等)对工作机构的叶片产生阻力所引起的。

需要强调的是,以上 3 类都是很典型的负载特性,实际负载可能不是纯粹的一种类型,而往往是几种类型的综合。例如,实际的通风机由于轴承上有一定的摩擦转矩 T_{m0} , 因此实际的通风机负载转矩为

$$T_L = T_{m0} + kn^2$$

与其相应的特性如图 1.9 中实线所示。再如起重机的提升机构,除位能性转矩外,传动机构也存在摩擦转矩 T_{m0} , T_{m0} 具有反抗性恒转矩负载性质。因此实际提升机构的负载转矩特性是反抗性负载和位能负载两种典型特性的综合,相应的负载特性如图 1.10 中的实线所示。