

全国煤炭高职高专（成人）“十一五”规划教材

电力拖动与控制

陈 标 主编



Dianli Tuodong Yu Kongzhi

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

全国煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材

电力拖动与控制

主 编 陈 标

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书在介绍各类电机电力拖动的基本理论和常用控制电器及基本控制线路的基础上,较为详细地讲述了电力拖动系统运动方程式以及交、直流电动机的工作特性、机械特性、启动、制动和调速等,并结合矿山特点,有针对性地讲述了电力拖动系统电动机的选择、煤矿常用生产机械的控制线路、可编程控制器控制技术。本书的目的和任务是使学生通过理论与实践操作的学习,掌握电力拖动的基础知识、基本理论和基本技能,并为学习后续课程和专业知识,以及从事电机与拖动控制技术岗位工作打下基础。

本书可作为高职、高专及成人院校矿山机电、自动化及机电一体化等专业的专业课教材,亦可作为中等职业院校相关专业的教材及煤矿机电技术人员的培训教材,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动与控制/陈标主编. —徐州:中国矿业大学出版社,2008.8

全国煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5646-0031-0

I. 电… II. 陈… III. 电力传动—自动控制系统—高等学校:技术学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 125927 号

书 名 电力拖动与控制

主 编 陈 标

责任编辑 孙建波 何 戈

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 368 千字

版次印次 2008年8月第1版 2008年8月第1次印刷

定 价 24.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材 建设委员会成员名单

主任:李增全
副主任:刘咸卫 胡卫民 刘发威 王作自连
委员:(按姓氏笔画为序)
牛耀宏 王廷弼 王自学 王宪军
王春阁 石兴 刘卫国 刘景山
张军 张浩 张贵金 李玉文
李兴业 李式范 李学忠 李维安
杜俊林 陈润叶 周智仁 荆双喜
贺丰年 郝巨才 唐又驰 高丽玲
彭志刚
秘书长:王廷弼 李式范
副秘书长:耿东锋 孙建波

煤炭高职高专(成人)“十一五”规划教材 矿山机电专业编审委员会成员名单

主任:刘卫国

全编委:孙 主

副主任:黄小广 陈 标 孙茂林;并主编

委 员:(按姓氏笔画为序) 编委: 委

第 一 王 王任远 王昌田 王金国 张建国

山 李 李虎伟 李福固 陈官兴 郝虎在

文 陶 陶 梁南丁 平 洪

平 李 李 李 李 李 李

真 李 李 李 李 李 李

公 李 李 李 李 李 李

恒志强

李 李 李 李 李 李

李 李 李 李 李 李

前 言

面向 21 世纪的全球变革趋势,为适应全球经济一体化对人才的知识、能力和素质的要求,教育教学改革势在必行。随着人才培养模式的改革与发展,整个课程体系与结构发生了较大的变化。“电力拖动与控制”课程的学时比原来大为压缩。本教材就是为适应这一教学改革的变化而编写的。

本课程是矿山机电、自动化以及机电一体化等专业的主要专业课之一,是过去“电机学”和“电力拖动基础”两门课程的有机结合。在课程学时大为削减的情况下,本书编写时力求做到内容精选,重点突出。既保留经典理论体系,又吸收新的科技成果。电力拖动是指利用电动机来拖动生产机械使其运转。按照电动机的种类不同,电力拖动分为直流电力拖动和交流电力拖动。本书紧紧围绕交、直流电力拖动来安排课程内容。

本书共分 8 章,主要阐明了电力拖动系统运动方程式;直流电机的工作特性和机械特性;直流电动机的启动、制动和调速;异步电动机的工作特性和机械特性;异步电动机的启动、制动和调速;电力拖动系统电动机的选择;煤矿常用生产机械的控制线路;可编程控制器控制技术。除第七章外,每一章后面都附有本章小结与习题,供复习和练习用。

本教材的特点是理论联系实际,注重应用,免去繁琐数学推导,力求通俗易懂,符合“必需”、“够用”精神。同时注意到承前启后的作用,把学习过的课程进行有机衔接。

本书由陈标同志主编。绪论、第一章由潞安职业技术学院马宏恩同志执笔,第二章、第三章由宁夏工业职业学院温丽娟同志执笔,第四章由宁夏工业职业学院朱玉敏同志执行;第五章、第六章由宁夏工业职业学院杨金芳同志执笔,第七章由宁夏工业职业学院许惠宁同志执笔,第八章由宁夏工业职业学院尹少荣同志执笔。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编者
2008 年 3 月

绪论	1
第一章 电力拖动系统的动力学基础	4
第一节 概述	4
第二节 机械特性	5
第三节 拖动系统的运动学方程式及多轴系统的折算	6
第四节 拖动系统的静态工作点及其稳定性	11
本章小结	12
习题一	13
第二章 直流电动机的电力拖动	15
第一节 他励直流电动机的机械特性	15
第二节 他励直流电动机的启动	20
第三节 他励直流电动机的制动	24
第四节 他励直流电动机的调速	32
第五节 串励直流电动机的机械特性和运行特点	40
本章小结	43
习题二	43
第三章 三相异步电动机的运行与拖动	45
第一节 三相异步电动机的运行特性	45
第二节 三相异步电动机的启动	53
第三节 三相异步电动机的制动	65
第四节 三相异步电动机的调速	74
本章小结	85
习题三	87
第四章 电动机的选择	90
第一节 选择电动机的一般原则	90
第二节 电动机的发热与冷却	92
第三节 电动机容量的选择	94
第四节 短时工作制电动机容量的选择	95
第五节 重复短时工作制电动机容量的选择	96
第六节 选择电动机容量的工程方法	97
本章小结	98

习题四	98
第五章 常用控制电器	100
第一节 低压开关	101
第二节 主令电器	103
第三节 接触器	107
第四节 继电器	111
第五节 保护电器	119
本章小结	127
习题五	128
第六章 电动机的基本控制线路	130
第一节 三相异步电动机正转控制线路	130
第二节 三相异步电动机的正反转控制线路	133
第三节 位置控制与自动往返控制线路	137
第四节 顺序控制与多地控制线路	139
第五节 三相异步电动机降压启动控制线路	143
第六节 三相异步电动机的制动控制线路	150
第七节 并励直流电动机的基本控制线路	154
本章小结	158
习题六	159
第七章 煤矿常用机械的电气控制	163
第一节 软启动器	163
第二节 采煤机电气控制	173
第三节 刮板输送机电气控制	182
第四节 矿井提升机电气控制系统	184
第八章 可编程控制器原理及应用	214
第一节 可编程控制器概述	214
第二节 可编程控制器(PLC)的基本结构	216
第三节 可编程控制器(PLC)的工作原理	218
第四节 可编程控制器(PLC)的分类和特点	220
第五节 可编程控制器的编程语言	221
第六节 可编程控制器的应用举例	223
本章小结	226
习题八	226
参考文献	227

绪 论

在工厂、矿山、农业和交通运输等部门中,大量地使用着各种各样的生产机械,如车床、磨床、刨床、采煤机、输送机、提升机和轧钢机等。生产机械中一些部件的运动,需要原动力来拖动。自从 19 世纪电动机问世以来,由于电力在传输、分配、使用和控制方面无可比拟的优越性,使电动机拖动获得广泛应用。我们把用电动机来拖动生产机械称为电力拖动。

不同的生产机械、不同的生产工艺对电力拖动的要求各不相同,但从大的方面看,无非包括以下几个部分:电动机、生产机械、传动装置、电气控制设备和电源。因此我们将电力拖动系统定义为:为生产机械服务的,以电动机为原动机,由电动机、传动装置、生产机械和电气控制设备等部分组成的机械电气系统。其组成如图 0-1 所示。

电动机是电力拖动系统中的原动机,是进行电能与机械能变换的旋转机器。根据电动机种类不同,电力拖动系统分为交流拖动系统和直流拖动系统。交流电动机有笼型转子异步电动机、绕线转子异步电动机和同步电动机等,直流电动机则有他励电动机、串励电动机和复励电动机等几种类型。由于交流异步电动机具有结构简单、造价低、容易维护等优点,所以在生产中得到广泛应用。同步电动机一般应用于大功率恒速系统,直流电动机多用于有调速要求的系统中。

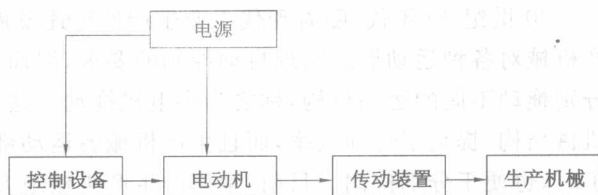


图 0-1 电力拖动系统的组成

控制设备是控制电动机运转的设备,是由各种控制电器(如按钮、开关、熔断器、接触器、继电器等)按一定要求和规律组成的控制线路和设备,用以控制电动机的运行。

传动机构是电动机与生产机械的工作机构之间传递动力的装置,如减速箱、皮带、联轴器等。

生产机械中直接进行生产加工的机械设备称为工作机构,它可以认为是电动机的负载。

电力拖动与控制这门课程的研究内容就是有关电力拖动的各种问题。具体地讲,当给一个生产机械配置电动机时,首先要考虑该生产机械的特点和要求,例如负载的机械特性、机械惯性的大小、启动的频繁程度、启动方法要求和负载变动情况以及在运行过程中有无调速、电气制动等要求,根据这些条件和要求,选择技术上可行、经济合理的拖动方式。选择拖动方式,就是要确定:采用何种电机,交流电机还是直流电机;采用单电机还是多电机拖动;传动方式是直接传动还是经减速器或其他类型的联轴器传动;采用何种控制方式控制等。除此之外,还要根据供电电网的状况和生产机械所处的周围环境,选择电动机的电压等级、容量大小、结构形式及控制设备和保护装置等。这些问题都属于本课程研究讨论的范围。但从学科的角度看,电力拖动研究的主要内容是电动机拖动生产机械运动的问题,它的理论分析基础是转矩平衡关系,即电动机的电磁转矩与负载转矩的平衡关系,它所使用的手

段是机械特性曲线的四象限图。

目前,除一小部分生产机械采用气动或液压拖动外,大多数生产机械都采用电力拖动。电力拖动已成为现代工业生产高度电气化、自动化的基础和核心,而实现工业企业的电气化和自动化对于提高产品质量、改善工作条件、增加工作可靠性及提高生产效率和企业经济效益有着重大意义。

回顾电力拖动的发展历史,自19世纪末,在生产机械的拖动系统中,电动机逐渐代替了蒸汽机,出现了电力拖动。到目前为止,电力拖动经历了成组拖动、单机拖动和多电机拖动三个阶段。

19世纪末,交、直流电动机相继出现,最初由一台电动机拖动传动轴,再由传动轴经过皮带或绳索来分别拖动许多生产机械,称之为成组拖动。这种拖动方式机构复杂,传递路径长,损耗大,生产灵活性也小,工作中极不安全,因此已被淘汰。

20世纪20年代,出现了单独拖动形式,即一台电动机拖动一台生产机械,称之为单电机拖动。这种拖动简化了中间传动机构,降低了能量传递中的损失,提高了生产率,同时也可充分利用电动机的调速性能,并易于实现自动控制。

20世纪30年代,随着现代工业生产的迅速发展,单电动机拖动已不能满足较复杂的生产机械对各种运动形式实现自动控制的要求,因而出现了在一台生产机械中由多台电动机分别拖动不同的运动机构,称之为多电机拖动。这种拖动方式不但简化了生产机械本身的机械结构,提高了传动效率,而且生产机械各运动部分能够选择最合理的运动速度,缩短了工时,也便于分别控制。目前,常用的生产机械绝大多数都采用单电机拖动或多电机拖动。

在电力拖动方式的演变过程中,电力拖动的控制方式也由手动控制逐步向自动控制方向发展。这种发展和更新是与电动机、电器制造业以及各种自动化元件的发展密不可分的。

采用继电器、接触器等组成的有触点断续控制的系统,称为继电器接触器控制系统,是最初的控制方式,这种控制方式产生于20世纪二三十年代。最初是采用一些手动电器(如开关、按钮等)来控制执行电器(电动机),称为手动控制。它适合于那些容量小、不需频繁操作的场合,后来发展为采用继电器、接触器、位置开关、保护元件的自动控制方式,通常叫做电器控制。这种控制是操作者通过主令电器接通继电器和接触器,再通过它的触头接通或断开电动机线路,从而实现电动机的自动启动、反转、调速和停车等操作。由于继电器接触器式有触点控制只有通和断两种状态,所以其控制作用是断续的,也就是说,只能控制信号的有无,不能连续控制信号的变化。但是这种控制方法简单直接、工作稳定、成本低,能在一定范围内适应单机和生产自动化的需要,在工矿企业中仍被广泛采用。

由于直流电机调速性能好,调速范围可相应地扩大,调速精度高,调速平滑性强,在20世纪30年代出现了直流发电机—电动机组的调速系统,而四五十年代,通过电机放大机和磁放大器元件实现了控制的自动调速系统。随着半导体技术的发展,60年代出现了大功率整流元件——晶闸管,组成了先进的用途广泛的晶闸管—电动机连续控制系统。目前,由于大功率电子器件的不断更新和发展,晶闸管直流拖动系统已得到广泛的应用,并向大容量的方向进一步发展。

继电器接触器控制系统具有接线固定、使用单一等明显缺陷,一旦工艺流程有所变动,就需要重新配线,满足不了程序经常改变、控制要求比较复杂的系统的需要。多年来,一种新型的控制设备——可编程控制器得到迅速发展,它通过编码、逻辑组合来改变程序,实现对

第一章 电力拖动系统的动力学基础

第一节 概 述

在电力拖动系统中,虽然电动机有不同的种类和特性,生产机械中工作机构的负载特性也是各不相同的,但从动力学角度分析,都可以看做一个由电动机拖动并通过传动机构带动工作机构运转的动力学整体,它们都服从动力学的统一规定。电力拖动系统动力学主要研究拖动系统的转矩关系、运动方程式、多轴拖动系统的转矩折算及静态工作点的稳定性等问题。在电力拖动系统中,根据电动机和工作机构之间的连接关系可以分为单轴系统和多轴系统。若电动机的转轴直接与工作机构的转轴相连接,则称之为单轴系统。若电动机和工作机构之间通过若干传动机构(例如齿轮、皮带、链)相连接,则称之为多轴系统。为便于讨论拖动系统的运动特征,我们常按一定的原则对多轴系统进行等效折算,将其转换为单轴系统。这样一来,无论多复杂的拖动系统,都可以作为一个简单的有固定转轴的旋转系统来加以讨论。在电力拖动旋转系统中,电动机轴转矩(通常以电动机的电磁转矩近似代替)、负载转矩和转速是表征其运动特征的主要物理量,同时它们又都是向量,因此,在讨论其运动特征前首先要规定这些物理量的正方向。一般情况下,选取顺时针转向为转速的正方向。当实际转动方向与选定的正方向一致时,转速的值为正,反之为负。在选定转速正方向的基础上确定转矩的正负。当电磁转矩与选定的转速的正方向一致时取正,反之为负。负载转矩的定义方法与电磁转矩相反,当负载转矩与选定的转速正方向一致时其值为负,反之为正。转矩和转速的相互关系及符号的确定如图 1-1 所示。

从图 1-1 中我们可以看出,负载转矩可能和转速同方向,也可能反方向。同样电机电磁转矩可能与转速同方向,也可能反方向。这些情形在电机实际运行过程中都是存在的。通常根据电机电磁转矩与转速方向的关系把电动机的运行状态分为电动运行状态和制动运行状态。当电磁转矩与转速方向相同时,如图中第一、第三象限所示,电动机处于电动状态,即电动机正常工作时所处的状态,此时,电动机的转矩的方向与电动机的实际旋转方向一致,电磁转矩为拖动转矩,电动机从电网吸收电能并转变为机械能拖动负载工作。当转速与电磁转矩同为正即处于第一象限时,电机顺时针旋转称为正转状态。当转速与电机转矩同为负即处于第三象限时,电机逆时针旋转称为反转状态。而当电动机处于电磁转矩与转速方向相反的

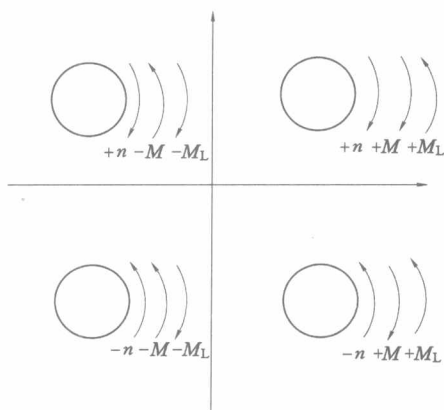


图 1-1 转速和转矩符号及所处象限

n ——转速; M ——电磁转矩; M_L ——负载转矩

运行状态时,如图中第二、第四象限所示,称为制动运行状态,此时电磁转矩为制动转矩,电动机相当于发电机,将机械能转变为电能,消耗在电枢回路中或回馈至电网。制动运行状态通常只出现在电机电气制动停车或提升机下放重物等特殊场合。

第二节 机械特性

一、电动机的机械特性

电动机作为拖动系统中的原动机,是一个将电能转化为机械能的旋转机器,其转速与电磁转矩之间往往存在一定关系。电动机的机械特性就是指电动机的转速与电磁转矩之间的函数关系: $n=f(M)$ 。电动机的机械特性常用机械特性方程式和机械特性曲线图来表示。

对于不同类型的电动机和不同的运行条件,其机械特性是不同的。通常有以下两种分类方法:

(1) 按机械特性硬度分类

机械特性的硬度表示电动机电磁转矩随转速变化的程度。特性曲线上某一点的硬度就是该点转矩对转速的导数,即

$$\beta = \frac{dM}{dn}$$

不同的机械特性硬度是不同的。由于电动机的机械特性大多数是下降型的,即转速随转矩的增加而下降,硬度为负值。根据硬度的值通常将电机的机械特性分为三类:转矩增加而转速保持不变的机械特性(图 1-2 中曲线 a),称为绝对硬特性, $\beta \rightarrow \infty$,同步电动机的机械特性属于此类;随转矩增加转速略有下降的机械特性(图 1-2 中曲线 b),称为硬特性, $\beta = -(40 \sim 10)$,直流他励电动机的机械特性属于此类;随转矩增加转速下降幅度较大的机械特性(图 1-2 中曲线 c),称为软特性, $\beta = -(5 \sim 1)$,直流串励电动机的机械特性属于此类。

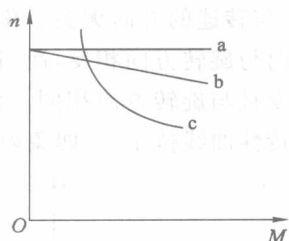


图 1-2 电动机的机械特性曲线

(2) 按电动机运行条件分类

运行条件是指电动机的端电压、频率(交流电动机)等电源参数以及励磁电流、附加电阻等电机回路参数。按照运行条件的不同可将电动机机械特性分为固有特性和人为特性。

固有特性又称为自然特性,是指电动机的电压、频率、励磁电流均为额定值同时回路中无附加电阻或电抗时的机械特性。

当固有特性不能满足生产机械运行要求时,需要人为地改变运行条件中的部分参数,电机的机械特性随之也会发生改变,这种由于改变了运行条件而得到的机械特性称为人为特性,也叫做人工特性。

二、生产机械的机械特性

与电动机类似,不同的生产机械,其转速与转矩之间的关系也是不同的。生产机械的转速与转矩之间的函数关系 $n=f(M_L)$ 称为生产机械的机械特性或负载转矩特性。该机械特

性同样也常用机械特性方程式和机械特性曲线图来表示。

生产机械的机械特性常有下列两种分类方法。

(1) 按转矩与转速的数值变化关系分类

① 恒转矩特性 当转速变化时转矩不发生变化,即转矩保持某一恒定值,如图 1-3 中曲线 a 所示。

② 变转矩特性 转矩的大小随转速变化而变化的机械特性。变转矩特性常有两种,如图 1-3 中曲线 b 和 c 所示。曲线 b 称为通风机型负载特性,各种流体机械都属于这种机械特性。此类负载的转矩近似与转速的平方成正比关系,即 $M_L \approx kn^2$,曲线近似呈抛物线形状。曲线 c 称为恒功率负载特性,特征是在不同转速下功率保持不变,负载转矩与转速成反比,即 $M_L = \frac{K}{n}$,如车床切削工件,粗加工时切削量大,切削阻力大,应低速切削;精加工时切削量小,切削阻力小,可高速切削。

(2) 按转矩相对于转速的方向分类

① 阻转矩特性 这种特性的特点是无论转速方向如何改变,转矩的方向始终与转速方向相反,即起阻碍运动的作用。常见的摩擦转矩即属于阻转矩特性。特性曲线位于一、三象限,如图 1-4 所示。

② 位势转矩特性 特点是转矩的作用方向始终保持不变,与转速的方向无关。例如提升机提升重物时负载转矩的方向与旋转方向相反,而当下放重物时,负载转矩的方向依然不变且与旋转方向相同。由于负载转矩方向不随转向变化,故特性曲线位于一、四象限,如图 1-5 所示。

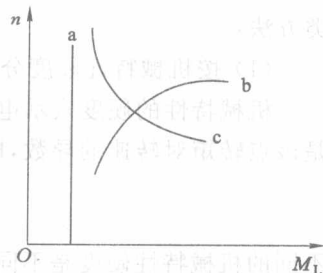


图 1-3 生产机械的机械特性

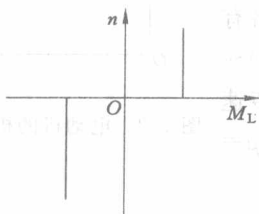


图 1-4 阻转矩特性

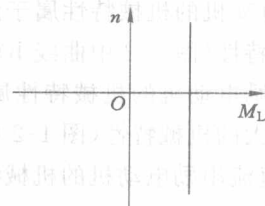


图 1-5 位势转矩特性

需要指出,实际的生产机械并非只具有一种简单的机械特性,往往是由几种机械特性组合而成的,所以在现场应用时要综合考虑并加以分析。

第三节 拖动系统的运动学方程式及多轴系统的折算

一、运动方程式

在电力拖动系统中,电动机将取自电网的电能为机械能,带动生产机械,按照预期的运行规律实现生产工艺过程。虽然生产系统的具体结构和负载特性各不相同,但从理论分析的角度均可以把它抽象为单一转轴的动力学系统。该系统只具有一个拖动转矩(电

机电磁转矩)、一个负载转矩和一个转动惯量,这样便于分析研究。

拖动系统中当电动机以恒定转速拖动工作机构稳定运行时,电动机的拖动转矩等于系统的负载转矩,这种运动状态称为稳定运行状态;如果电动机的转速不断变化,根据旋转系统的牛顿第二定律可以知道,电动机的拖动转矩不仅要克服系统的负载转矩,而且还要克服因运行部分的惯性引起的动态转矩,这种运动状态称为不稳定运行状态,又叫动态或过渡过程。

作用于拖动系统的转矩有电动机的电磁转矩 M 和负载转矩 M_L , 设系统的转动惯量为 J , 角速度为 ω , 则角动量为 $J\omega$ 。根据动力学平衡原理可得到系统运动方程式

$$M - M_L = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt}$$

因为拖动系统的转动惯量 J 为常量,故上式可简化为

$$M - M_L = J \frac{d\omega}{dt}$$

式中 M ——电动机电磁转矩, $N \cdot m$;

M_L ——系统的负载转矩, $N \cdot m$;

J ——系统的转动惯量, $kg \cdot m^2$;

$$J = m\rho^2$$

m ——转动部分的质量, kg ;

ρ ——质量 m 的半径, m ;

ω ——电动机轴的角速度, rad/s ;

$J \frac{d\omega}{dt}$ ——动态转矩。

在工程计算中,由于电动机的转速习惯上用每分钟转数 n 表示,则

$$\omega = 2\pi n/60 = n/9.55$$

将上式代入运动方程式中,得到运动方程式的另一种形式

$$M - M_L = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt}$$

以上运动方程式中 J 代表的是运动系统总的转动惯量,即等于电动机转子和生产机械的转动惯量之和。在过去使用的单位制中常用飞轮惯量 GD^2 表示系统惯量,单位为 $kg \cdot m^2$, J 与 GD^2 在数值上的关系为

$$J = GD^2/4g$$

式中 G ——转动部分的重力, N ;

D ——转动直径, m ;

g ——重力加速度。

分析运动方程式可知:

- (1) 当 $M - M_L > 0$ 时动态转矩大于 0, 拖动系统处于加速状态。
- (2) 当 $M - M_L = 0$ 时动态转矩等于 0, 拖动系统处于停车或稳定运行状态。
- (3) 当 $M - M_L < 0$ 时动态转矩小于 0, 拖动系统处于减速状态。

二、多轴系统的折算

在实际的拖动系统中,电动机与负载之间往往装有若干传动机构,以改变运动方式和转

速,构成所谓的多轴系统。如果对每一根转轴分别列出相应的运动方程式,然后联立求解,显然很麻烦。为此可采用等值折算的方法将各个不同转速轴上的转矩折算到某个基准转速的转轴上,一般是折算到电动机转轴上。这样多轴多速系统就可以简化为等值的单轴单速系统。

当以电动机轴为研究对象时,需要折算的参数有:工作机构转矩 M_L' ,系统中各轴(电动机轴除外)的转动惯量 $J_1、J_2、\dots、J_L$ 。对于某些做直线运动的工作机构还必须把直线运动的质量 m 及运动所需克服的阻力 F 折算到电动机轴上。

拖动系统的折算原则是保持系统在折算前后其传递的功率和储存的动能不变。

(一) 工作机构的转矩折算

工作机构的转矩折算实质上就是用电动机轴上的负载转矩 M_L 来等效代替工作机构轴上的负载转矩 M_L' 。折算的原则是折算前后的功率不变,一般还需考虑功率传递过程中的机械损耗。

折算前工作机构的功率为

$$P_L' = M_L' \omega_L$$

式中 M_L' ——工作机构轴上的负载转矩, $N \cdot m$;

ω_L ——工作机构轴的角速度, rad/s 。

折算到电动机轴上的功率为

$$P_L = M_L \omega$$

式中 M_L ——折算到电动机轴上的等效负载转矩, $N \cdot m$;

ω ——电动机轴的角速度, rad/s 。

考虑到传动机构存在功率损耗,假设功率传递效率为 η ,则上述两种功率在电动状态时存在如下关系

$$P_L \eta = P_L'$$

即

$$M_L \omega \eta = M_L' \omega_L$$

因此,可得到折算后的转矩为

$$M_L = \frac{M_L' \omega_L}{\eta \omega} = \frac{M_L'}{\eta^i}$$

式中 i ——电动机轴与工作机构轴的转速之比,又称为传动机构的传动比,即

$$i = \frac{\omega}{\omega_L} = \frac{n}{n_L}$$

当传动机构为多级变速时,则上式中传动比为各级传动比之积,传动效率为各级传动效率之积,即

$$i = i_1 i_2 \dots i_L$$

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_L$$

(二) 传动机构和工作机构转动惯量的折算

当多轴系统转动后,由于各轴的结构不同,转动惯量也不相同。当将其等效成单轴系统时各轴的转动惯量也应折算,即用电动机轴上的一个等效转动惯量来代替各轴的转动惯量。折算的原则是折算前后系统的动能不变。

若各轴的角速度分别为 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L$, 则有如下关系:

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J_M\omega^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_1^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_2^2 + \dots + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2$$

$$J = J_M + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega^2} + \dots + J_L \frac{\omega_L^2}{\omega^2}$$

$$= J_M + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_2}{i_1^2 i_2^2} + \dots + \frac{J_L}{i_1^2 i_2^2 \dots i_L^2}$$

式中 J ——折算到电机轴上的总转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

J_M ——电动机的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

J_1, J_2, \dots, J_L ——各级传动机构和工作机构的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。

在拖动系统的分析计算中, 如果系统包括某些做直线运动的部件, 则这些直线运动部件的质量及其上的作用力也应进行折算。折算原则与旋转部件相同, 即保持折算前后功率和动能不变。

作用力 F 按功率不变原则折算。如提升机的钢丝绳以作用力 F 悬吊重物, 以速度 v 上升或下降, 这个力反映在电机轴上就是一个负载转矩, 也就是作用力 F 在电机轴上的等效折算转矩。因此作用力的折算本质上也是转矩的折算。考虑到传动效率可得

$$M_L \omega \eta = Fv$$

$$M_L = \frac{Fv}{\omega \eta}$$

如将电动机的转速用每分钟转数 n 表示, 则上式变为

$$M_L = \frac{9.55Fv}{n\eta}$$

作用力的折算实质上就是负载转矩的折算, 可证明如下:

$$M_L = \frac{9.55Fv}{n\eta} = \frac{9.55FD\omega_L}{n\eta^2} = \frac{9.55M_L'n_L}{n\eta 9.55} = \frac{M_L'n_L}{n\eta} = \frac{M_L'}{i\eta}$$

式中 D ——滚筒直径;

ω_L ——滚筒角速度;

M_L' ——作用力 F 在滚筒上产生的等效转矩;

n_L ——滚筒的每分钟转数;

i ——传动比;

η ——传动效率。

直线运动的质量中也储存有动能。直线运动的工作机构是由电动机拖动的, 因此需要把速度为 v 的质量 m 折算到电机轴上, 即用电机轴上的一个转动惯量 J 与之等效。质量折算的实质是转动惯量的折算, 折算的原则是动能平衡。因此, 其折算前后有如下关系

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

$$J = m \frac{v^2}{\omega^2}$$

式中 m ——直线运动部分的质量, kg ;

v ——直线运动速度, m/s ;

ω ——电动机轴角速度, rad/s 。