

高等学校教学用书

电力拖动与控制

谢桂林 黄章 刘允炘 编

dianli tuodong
yu
kongzhi

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

高等学校教学用书

电力拖动与控制

谢桂林 黄章 刘允纮 编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

《电力拖动与控制》全书共九章,第一章为电力拖动的基础知识;第二章~第三章为直流电动机的机械特性和调速;第四章~第七章为交流电动机的起动、制动、调速和容量选择;第八章为控制电器;第九章为继电器-接触器控制系统。考虑到工矿企业的需要,本书加强了交流拖动的内容,使其更加深入和实用。另外,把继电器-接触器控制系统作为课程的必要组成部分,有助于读者更清楚地了解拖动系统的要求是如何实现的,避免了空洞、抽象的问题。

本书是工业电气自动化专业的教学用书,也可供从事有关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力拖动与控制/谢桂林,黄章,刘允炘主编. —徐州:中国矿业大学出版社,1997.1(2004.7重印)

高等学校教学用书

ISBN 7-81040-674-4

I. 电… II. ①谢…②黄…③刘… III. 电力传动—自动控制—高等学校—教材 IV. TM921.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第036301号

书 名 电力拖动与控制

主 编 谢桂林 黄 章 刘允炘

责任编辑 胡玉雁

责任校对 冀锦蓉

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)

印 刷 中国矿业大学印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 14 字数 335 千字

版次印次 1997年1月第1版 2004年7月第4次印刷

定 价 18.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

电力拖动与控制是工业电气自动化专业的一门主要专业课程。本课程的内容是讨论有关电动机应用的各种问题。具体地讲,当给一个生产机械配置动力(即电动机)时,首先要考虑该生产机械的工况特点和要求,譬如,负载转矩的特性、机械惯性的大小、起动的频繁程度、负载变动情况,以及在运行过程中有无连续调整速度、电气制动和转矩限制等要求,根据这些条件和要求,选择技术上可行、经济上合理的拖动方式。所谓选择拖动方式就是确定:采用何种电动机,交流还是直流的;需不需要电源变流装置(如整流器、变频器);采用单电动机还是多电动机系统;传动方式是直接传动还是经减速器或某种类型的联轴器传动;控制方式是采用开环还是闭环系统等等。除此之外,还要根据供电电网的状况和生产机械所处周围环境,选择电动机的电压等级、容量大小、结构型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。

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,它所使用的分析手段是利用机械特性曲线的四象限图。

通过本课程的学习,应使学生掌握电力拖动系统的理论分析和设计计算方法,熟悉电力拖动系统中使用的电机和电器的规格、性能及其选择,以及拖动系统的组成和调试方法等实际应用问题。

本教材在编写上的特点是:考虑到工矿企业的实际需要,加强了交流拖动的内容,即把交流电动机的起动、制动和调速分别设章专门讨论,使介绍的内容更加深入和实用。另一个特点是把继电器-接触器控制系统作为课程的必要组成部分,这样有助于读者了解拖动系统的要求是如何实现的,避免了抽象空洞的毛病。

本书所使用的各物理量的文字符号、电气图形符号、电机电器的工作方式和使用类别等均采用了1986年来国家陆续颁布的新标准。

本教材是在作者所著《矿山电力拖动与控制》的基础上,考虑拓宽专业需要重新编写的。在这次编写中,由谢桂林主编。第一、二、三章及附录由黄章执笔,第四、五、六章由谢桂林执笔,第七、八、九章由刘允斌执笔。限于作者水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1996.5

目 录

第一章 电力拖动基本知识	(1)
第一节 概述.....	(1)
第二节 机械特性.....	(1)
第三节 拖动系统的运动方程式.....	(3)
第四节 拖动系统的静态工作点及其稳定性.....	(8)
第五节 拖动系统的起动和停车时间	(10)
复习思考题和习题	(12)
第二章 直流电动机的机械特性	(14)
第一节 直流他励电动机的机械特性	(14)
第二节 直流他励电动机的制动特性	(19)
第三节 直流他励电动机的运行状态分析	(26)
第四节 直流串励电动机的机械特性	(27)
复习思考题和习题	(31)
第三章 直流电动机的调速	(33)
第一节 电动机调速的概念和指标	(33)
第二节 直流他励电动机的调速性能	(35)
第三节 发电机-电动机组调速系统.....	(36)
第四节 交磁放大机-直流电动机调速系统.....	(38)
第五节 晶闸管整流器-直流电动机调速系统.....	(47)
第六节 直流电动机脉冲调速	(49)
复习思考题和习题	(50)
第四章 交流异步电动机的起动	(51)
第一节 异步电动机的机械特性	(51)
第二节 笼形转子异步电动机的起动	(57)
第三节 液力联轴器的应用	(61)
第四节 笼形转子异步电动机的降压起动	(63)
第五节 绕线转子异步电动机起动电阻的计算	(67)
第六节 起动时间的计算	(73)
第七节 绕线转子异步电动机频敏变阻器起动	(76)

复习思考题和习题	(79)
第五章 异步电动机的电气制动	(81)
第一节 异步电动机电气制动的种类	(81)
第二节 动力制动的工作原理	(85)
第三节 动力制动机械特性的计算	(91)
第四节 动力制动的应用	(96)
第五节 带补偿的动力制动控制系统	(98)
复习思考题和习题	(100)
第六章 交流异步电动机的调速	(102)
第一节 变频调速	(102)
第二节 变极调速	(105)
第三节 定子调压调速	(107)
第四节 转子回路串电阻调速	(109)
第五节 异步电动机的串级调速	(110)
第六节 交流调速的其他形式	(116)
复习思考题	(118)
第七章 电动机容量的选择与验算	(119)
第一节 概述	(119)
第二节 电动机的发热和冷却过程	(120)
第三节 从发热观点对电动机工作方式的分类	(124)
第四节 连续工作方式时电动机容量的验算	(125)
第五节 短时工作方式时电动机容量的校验	(132)
第六节 间歇工作方式时电动机容量的验算	(134)
第七节 笼形转子异步电动机容许小时合闸次数的确定	(137)
第八节 选择电动机时应考虑的几个问题	(141)
复习思考题和习题	(143)
第八章 常用控制电器	(145)
第一节 接触器	(145)
第二节 继电器	(156)
第三节 主令电器	(161)
第四节 手动控制器	(163)
第五节 保护电器及组合电器	(164)
复习思考题	(169)

第九章 继电器-接触器控制系统	(170)
第一节 概述	(170)
第二节 电动机控制线路中的典型环节	(177)
第三节 绕线转子异步电动机带动力制动的可逆控制线路	(180)
第四节 绕线转子电动机以电流时间混合方式控制的线路	(185)
第五节 控制线路设计原则	(191)
复习思考题和习题	(193)
附录 磁放大器基本原理和特性	(196)
附-1 磁放大器的基本原理	(196)
附-2 磁放大器的线路与结构	(198)
附-3 磁放大器的特性曲线	(199)
附-4 磁放大器的主要参数	(202)
附-5 磁放大器的偏移	(204)
附-6 外反馈磁放大器与磁继电器	(204)
附-7 自饱和磁放大器	(209)
复习思考题和习题	(211)
参考文献	(213)

第一章 电力拖动基本知识

第一节 概 述

电力拖动系统是为生产机械服务的,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。

不同的生产工艺过程对电力拖动系统有不同的控制要求,例如水泵只要求单方向转动,而提升机则要求双向运行、频繁的起、制动以及必要的调速操作。生产机械种类繁多,控制要求繁简各异。随着人类生产活动的发展,对控制性能的要求日益提高,促使电力拖动以及自动控制理论与实践相应发展和提高,同时促进了生产工艺过程日趋完善。

根据使用的电动机型式,电力拖动系统分为交流和直流拖动系统。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型式。目前工业中应用最广泛的是交流异步电动机拖动系统,同步电动机一般应用于大功率恒速系统,而直流电动机多用于有调速要求的系统之中。

根据系统中拖动电动机的数量,电力拖动系统又可分为单机拖动和多机拖动系统。单机拖动系统结构简单,是目前应用最广的拖动系统。多机拖动系统通常用于大功率或有特殊控制要求的系统中。

近年来由于控制理论的发展,新型控制元件的开发和电力半导体、微电子技术以及微型计算机的应用,给电力拖动系统带来了革命性的变化,出现了由晶闸管可控电源供电的直流拖动系统、基于半导体变流技术的交流串级调速和各种变频调速系统等,使系统的性能更趋完善,自动化程度日益提高,成为现代工业生产的重要物质基础。

第二节 机 械 特 性

电动机是进行电能与机械能变换的旋转机器。转矩和转速是旋转系统中两个密切相关的物理量,也是拖动系统运动状态分析的两个基本参数,它们之间的关系称为转矩-转速特性,通常称作机械特性。只有将电动机的机械特性与工作机械的机械特性适当地配合才能实现电力拖动系统的合理运行。

一、电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机的电磁转矩 M 与转速 n 之间的关系,即 $n=f(M)$ 。机械特性可以用机械特性方程式或机械特性曲线图表示。

对于不同类型的电动机和不同的运行条件,电动机具有各不相同的机械特性。

1. 按机械特性硬度分类

机械特性的硬度说明电动机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

$$\beta = \frac{dM}{dn} \quad (1-1)$$

图 1-1 中示出了具有不同硬度的机械特性曲线。多数电动机的机械特性是下降型的,即转速随转矩的增加下降,硬度 β 为负值。转矩增加而转速保持不变的机械特性(图 1-1 曲线 a)称为绝对硬特性,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 1-1 曲线 b 和 c 的直线段)称为硬特性,直流他励电动机和异步电动机特性的工作段属于这一类;随转矩增加转速下降幅度较大的机械特性(图 1-1 曲线 d)称为软特性,直流串励电动机的机械特性属此类。

硬特性具有转速比较稳定,受负载扰动影响小的特点,适用于提升机、通风机、水泵和机床的电力拖动;软特性具有在负载转矩增大时转速自动降低的特点,适用于电机车等要求平稳起动的机械。

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,机械特性可分为固有特性和人为特性两种。固有特性又称自然特性,当电动机的端电压及频率(指交流电动机)为额定值,励磁电流(指直流电动机)也是额定值,同时电动机的回路中无附加电阻或电抗时得到的机械特性称固有特性。不具备上述运行条件的机械特性曲线统称人为特性或人工特性。

当固有特性不能满足生产机械运行要求时,可以改变运行条件获得人为特性,用以满足生产工艺过程的需要。

二、工作机械的机械特性

工作机械是泛指由电动机带动运转的对象,如水泵电动机带动泵轮,采煤机电机带动滚筒等等。工作机械的转矩 M_L 与转速 n 一般可表示为 $n=f(M_L)$ 函数关系,称为工作机械的机械特性。不同类型的工作机械具有不同的特性,可按下述原则分类。

1. 按转矩随转速的变化关系分类

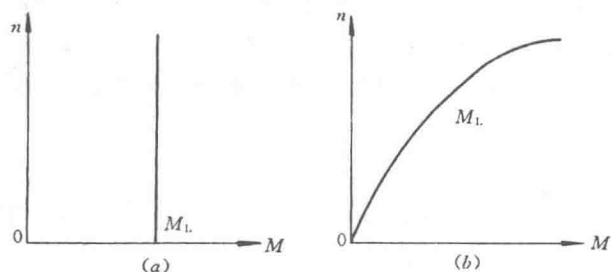


图 1-2 工作机械的机械特性
a——恒转矩负载; b——变转矩负载

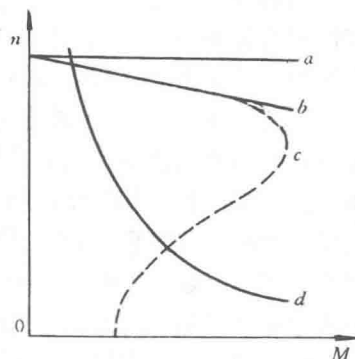


图 1-1 各种电动机的机械特性曲线

1) 恒转矩特性

当转速变化时转矩不发生变化,即转矩保持定值,如图 1-2a 所示。属于这类负载的工作机械很多,如采煤机、输送机、提升机等。

2) 变转矩特性

转矩随转速变化,如图 1-2b 所示。例如通风机、水泵等。这类负载的性质与气体或液体的流速有关,转矩近似地与转速的平方成比例,即 $M_L \approx K n^2$ 。

图 1-2 中的特性都位于第一象限,它表明在某一可能的转向(如正转)下,负载转矩与转速的符号相同,物理意义是负载转矩的作用方向与转速相反。

2. 按转矩相对转速的作用方向分类

1) 阻转矩特性

这种负载转矩的特点是转速方向改变时,转矩的作用方向随之改变,同时其作用方向始终与运动方向相反,即起阻碍运动的作用,如摩擦转矩。图 1-3 所示为阻转矩特性,位于第一及第三象限。

2) 位势转矩特性

特点是转矩的作用方向与转速的方向无关,即负载转矩的作用方向始终保持不变,这类负载具有储能特性。例如提升载荷对提升机滚筒形成的负载转矩,当提升载荷时,负载转矩的作用方向与旋转方向相反,电动机对负载做功,负载获得位能;当下放载荷时,负载转矩的作用方向不变且与旋转方向相同,负载的位能转化为动能。图 1-4 所示为位势转矩特性,由于负载转矩不随转向变化,故特性位于第一及第四象限。

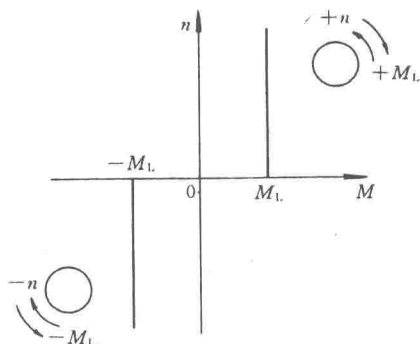


图 1-3 阻转矩特性

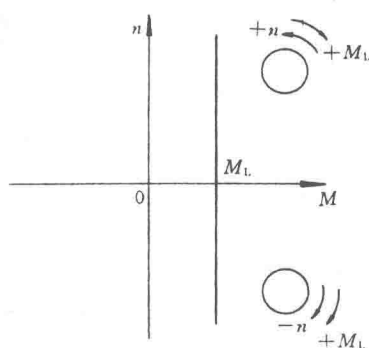


图 1-4 位势转矩特性

第三节 拖动系统的运动方程式

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转变为机械能,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,但是从理论分析的角度均可以把它们抽象为单一转轴的 dynamics 系统。该系统只具有一个负载转矩和一个转动惯量,这样便于分析研究。

系统的运动状态可划分为稳定运动状态(或称静态)和不稳定运动状态(又称动态或过渡过程)两种。从动力学平衡条件可写出系统运动方程式,作为系统运动状态分析的工具。

作用于电力拖动系统的转矩有电动机的轴转矩 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 $J\omega$ 。根据动力学定律,可得到系统运动方程式的一般形式为

$$M - M_L = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \quad (1-2)$$

一般电力拖动系统的转动惯量 J 为常量,故式(1-2)可简化为

$$M - M_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-3)$$

式中 M ——电动机的轴转矩, $N \cdot m$;

M_L ——负载转矩, $N \cdot m$;

J ——系统转动惯量, $kg \cdot m^2$;

ω ——角速度, rad/s ;

t ——时间, s 。

式(1-3)右边的一项称为动态转矩,记做 M_{dyn} ,则式(1-3)可写为

$$M - M_L = M_{dyn} \quad (1-4)$$

$$M_{dyn} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-5)$$

从式(1-4)可见,动态转矩等于电动机的轴转矩与负载转矩的差值,物理意义为:当 M 与 M_L 不相等时,系统的转速将发生变化,式(1-5)表示,转速的变化率与动态转矩成正比。

在工程计算中,旋转速度常用每分钟转数 $n(r/min)$ 表示,转速 n 与角速度 ω 有如下关系:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9.55} \quad (1-6)$$

将式(1-6)代入式(1-3)中,可得运动方程式的另一表达形式为

$$M - M_L = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

注意,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,有时用 GD^2 表示系统惯量,单位为 $kgf \cdot m^2$, J 与 GD^2 在数值上的关系为

$$GD^2 = 4J \quad (1-8)$$

必要时可按上式进行折算。

根据式(1-7)可知:

当 $M - M_L > 0$ 或 $M_{dyn} > 0$ 时,系统为加速运动过程;

当 $M - M_L < 0$ 或 $M_{dyn} < 0$ 时,系统为减速运动过程;

当 $M - M_L = 0$ 或 $M_{dyn} = 0$ 时,系统处于稳定运动状态。

在旋转系统中,转速和转矩都是有向量。因此,在应用运动方程式进行分析计算时,用正、负号表示其两种可能的方向。本书采用下述符号系统定义转速和转矩的方向。

首先定义转速的正方向,可任取某一转动方向(例如顺时针转向)为转速的正方向。当实际转动方向与选定的正方向一致时,其值为正,反之为负。在选定转速正方向的基础上确定转矩的符号。当电动机轴转矩与选定的转速正方向一致时其值为正,反之为负。负载转矩的定义方法与电动机转矩相反,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。这是因为在动力平衡方程式中已考虑了负载转矩的作用方向与旋转方向相反这一因素(在运动方程式中以 M 与 M_L 之差值表示)。转矩和转速的相互关系以及符号的确定示于图 1-5 之中。

二、转矩的折算

上述运动方程式表示的是单一转轴系统中电动机转矩与负载转矩的基本关系。但在实际的拖动系统中,电动机与负载之间往往装有变速装置,即系统中包含有以不同速度转动的部件,形成多轴或多速系统。分析这种系统的运动状态时,可以对各转轴分别列出运动方程式,然后联立求解。为简化计算,可以从联立方程组导出等值折算的方法,即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轴上。这样,多轴多速系统就简化为等值的单轴单速系统。

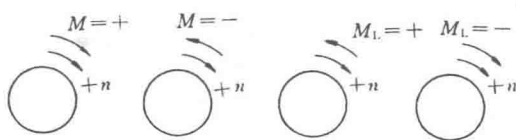


图 1-5 转速和转矩符号

转矩折算的理论根据是动力学的功率不变及能量平衡原则。对单一转轴系统,若将式(1-7)两端乘以 ω , 得到功率平衡方程式为

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

$$\text{或} \quad M\omega = M_L\omega + J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (1-9)$$

式中 $M\omega$ ——电动机轴功率 P ;

$M_L\omega$ ——负载功率 P_L ;

$J\omega \frac{d\omega}{dt}$ ——旋转系统所储动能的变化量。

设初始条件 $t=0$ 时, $\omega=0$, 将式(1-9)积分可得能量平衡关系为

$$\begin{aligned} \int_0^t P dt &= \int_0^t P_L dt + \int_0^t J\omega \frac{d\omega}{dt} dt \\ &= \int_0^t P_L dt + J \int_0^{\omega} \omega d\omega = \int_0^t P_L dt + \frac{1}{2} J\omega^2 \end{aligned} \quad (1-10)$$

$$\text{或} \quad W = W_L + \frac{1}{2} J\omega^2 \quad (1-11)$$

式中 W ——输入电动机的能量;

W_L ——负载吸收的能量;

$\frac{1}{2} J\omega^2$ ——系统储存的动能。

旋转系统中任一转轴均具有式(1-9)及式(1-11)所示的功率、能量平衡关系。折算的实质就是将动力系统中各转轴上的功率流和能量流归算到某个单一的基准轴上,从而使计算简化。为此,需进行负载转矩和动态转矩的折算。

1. 静态转矩(负载转矩)的折算

静态转矩折算根据力学中的功率不变原则,即将负载转矩从一转轴折算到另一转轴时必须保持功率相等,一般还需考虑功率传递中的机械损耗功率。图 1-6a 所示为一级齿轮传动系统,将生产机械轴上的负载转矩折算到电动机轴上时,可按下列公式计算

$$M'_L \omega \eta = M_L \omega_m$$

$$M'_L = \frac{M_L \omega_m}{\omega \eta}$$

即

$$M'_L = \frac{M_L}{i\eta} \quad (1-12)$$

式中 M'_L ——折算到电动机轴上的负载转矩；

M_L ——工作机械轴上的负载转矩；

ω ——电动机轴的角速度；

ω_m ——工作机械轴的角速度；

$i = \frac{\omega}{\omega_m} = \frac{n}{n_m}$ ——电动机与工作机械之间的传动比， n, n_m 分别代表电动机和工作机械轴的转速。

如果电动机处于发电方式运转，则功率传递方向是从生产机械经电动机至电网，此时传动中的机械损耗功率将由生产机械（负载侧）负担。因此，将负载转矩折算到电动机轴上时，应按下式计算

$$M'_L = \frac{M_L \eta}{i} \quad (1-13)$$

2. 动态转矩的折算

动态转矩反映拖动系统中储存动能的变化，根据力学中的能量平衡原则，动态转矩折算时应保持系统的动能不变。设工作机械轴上的转动惯量为 J_m ，角速度为 ω_m ，折算到电动机轴上的等效转动惯量为 J' ，电动机轴的角速度为 ω ，则有

$$\frac{1}{2} J' \omega^2 = \frac{1}{2} J_m \omega_m^2$$

即

$$J' = J_m \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2 = \frac{J_m}{i^2} \quad (1-14)$$

由此可见，动态转矩的折算就是转动惯量的折算。由于惯量恒为正值，折算后系统的动态转矩要根据电动机轴上原有的转动惯量及折算到电动机轴上的转动惯量之和进行计算。图 1-6a 中的双轴系统折算后的等值单速系统如图 1-6b 所示。

上述负载转矩和转动惯量的折算公式是根据图 1-6 所示一级齿轮传动系统得到的。对于多级传动系统，上述公式仍然适用，只需将式中传动效率和传动比代入多级传动系统总的传动效率和总传动比即可。此外，上述折算是以电动机轴为基准轴进行的，实际应用中可选用系统中的任一转轴作为基准轴。

三、直线运动部件作用力和质量的折算

在拖动系统的分析计算中，如系统包括有某些作直线运动的部件，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，即保持功率和能量的平衡关系。

1. 作用力 F 的折算

作用力 F 按功率不变原则折算。如提升机的钢丝绳以 F 力悬吊重物，以速度 v 上升或下降，这个力反映在电动机轴上就是一个负载转矩，也就是作用力 F 在电动机轴上的等效折算转矩 M'_L 。考虑传动效率，在电动机带动提升机（工作机械）的条件下，可得

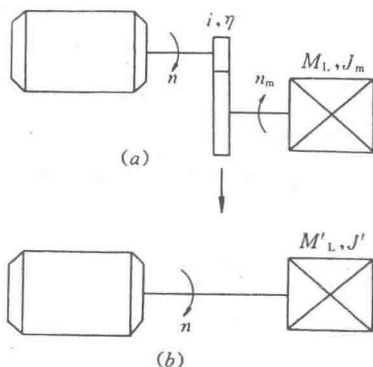


图 1-6 一级齿轮传动系统
及其等效单轴系统

$$M'_L \omega \eta = Fv$$

$$M'_L = \frac{Fv}{\omega \eta} \quad (1-15)$$

如将电动机的转速 n 用每分钟转数表示, 上式变为

$$M'_L = \frac{60}{2\pi} \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-16)$$

式中 M'_L ——直线运动部分折算到电动机轴上的负载转矩, $N \cdot m$;

F ——直线运动作用力, N ;

v ——直线运动速度, m/s ;

n ——电动机转速 r/min 。

如工作机械带动电动机以发电方式运转, 则有

$$M'_L = \frac{Fv\eta}{\omega} = 9.55 \frac{Fv\eta}{n} \quad (1-17)$$

2. 质量 m 的折算

质量 m 按动能不变原则进行折算。直线运动部件中所储存的动能与在转动部件中储存的动能具有等值的作用, 故折算原则亦相同。

质量为 m 并具有直线速度 v 的部件折算到角速度为 ω 的电动机轴上, 其折算转动惯量 J' , 由动能相等的原则可得

$$\frac{1}{2} J' \omega^2 = \frac{1}{2} m v^2$$

$$J' = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 \quad (1-18)$$

式中 m ——直线运动部分的质量, kg ;

v ——直线运动速度, m/s ;

ω ——电动机轴的角速度, rad/s 。

例 1-1 计算图 1-7 所示系统中电动机的转速、电动机轴上的静态转矩和静态功率。已知: 重物 $m=5000 \text{ kg}$, 上升速度 $v=1.2 \text{ m/s}$, 每对齿轮的传动比 $i_1=i_2=6$, 每对齿轮的效率 $\eta=0.94$, 滚筒直径 $D=0.9 \text{ m}$ 。

解:

图 1-7 拖动系统图

滚筒转速
$$n_m = \frac{60v}{\pi D} = \frac{60 \times 1.2}{\pi \times 0.9} = 25.5 \text{ r/min}$$

电动机转速
$$n = n_m i_1 i_2 = 25.5 \times 6 \times 6 = 918 \text{ r/min}$$

负载静阻力
$$F = mg = 5000 \times 9.81 = 49050 \text{ N}$$

将 F 折算到电动机轴上的转矩

$$M'_L = 9.55 \frac{Fv}{n\eta^2} = 9.55 \times \frac{49050 \times 1.2}{918 \times 0.94^2} = 693 \text{ N} \cdot m$$

电动机轴上的静态功率

$$P_L = \frac{M'_L n}{9.55} = \frac{693 \times 918}{9.55} = 66600 = 66.6 \text{ kW}$$

例 1-2 在上例中, 如果电动机、齿轮、滚筒的转动惯量分别为: $J_M=2.5 \text{ kg} \cdot m^2$, $J_1=$

$0.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_3 = 1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_4 = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_m = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 电动机起动时间 $t_{\text{ST}} = 2 \text{ s}$ 。求电动机的起动转矩。

解:

电动机轴上的转动惯量

$$J_{M1} = J_M + J_1 = 2.5 + 0.25 = 2.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

其余各轴上旋转部件折算到电动机轴上的转动惯量

$$J_{M2} = \frac{J_2 + J_3}{i_1^2} + \frac{J_4 + J_m}{i_1^2 i_2^2} = \frac{2.5 + 1.25}{6^2} + \frac{5 + 10}{6^2 \times 6^2} = 0.115 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

直线运动部件折算到电动机轴上的转动惯量

$$J_{M3} = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 = m \left(\frac{v}{2\pi n / 60} \right)^2 = 5000 \times \left(\frac{1.2 \times 60}{2\pi \times 918} \right)^2 = 0.78$$

整个系统折算到电动机轴上的转动惯量

$$J = J_{M1} + J_{M2} + J_{M3} = 3.645 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

计算动态转矩时假设起动期间为等加速运动, 则

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{t_{\text{ST}}} = \frac{918}{2} = 459 \text{ (r/min)/s}$$

起动期间电动机轴上的动态转矩

$$M_{\text{dyn}} = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt} = \frac{3.645}{9.55} \times 459 = 175 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机所需的起动转矩为

$$M_{\text{ST}} = M'_L + M_{\text{dyn}} = 693 + 175 = 868 \text{ N} \cdot \text{m}$$

第四节 拖动系统的静态工作点及其稳定性

一、拖动系统的静态工作点

电动机和它拖动的工作机械在一定运行条件下, 达到某一稳定运行状态, 与之相对应的转速和转矩所确定的坐标点称拖动系统的静态工作点。静态工作点表示电动机以何种转速带动工作机械稳定运行, 或在何种转速下电动机的轴转矩与工作机械的负载转矩相平衡。

静态工作点表示一种平衡状态, 即系统的转速相对不变。根据运动方程式, 确定工作点的条件为

$$M(n) = M_L(n)$$

计算静态工作点即由上式求得电动机的稳定转速。可以根据电动机机械特性和工作机械的机械特性, 采用解析算法, 但采用图解法更直观。在机械特性曲线图上, 电动机和工作机械的机械特性交点即为系统的静态工作点, 如图 1-8 所示。

二、静态工作点的稳定性

系统的静态工作点是理论上可能的稳定运行点, 但是从静稳定的观点分析, 静态工作点可以分为稳定的和不稳定的。工作点的稳定性是指拖动系统受到瞬时的外来扰动后, 能自动恢复到原有稳定工作状态的性质。在电动机与工作机械的机械特性适当匹配的条件下, 可以获得稳定的静态工作点。

工作点的稳定性可以根据电动机在平衡点附近的运动状态分析。通常是假定外来扰动使系统的转速发生偏移,然后分析相应的转矩差值或动态转矩能否使系统恢复原有平衡状态。如图 1-8a 中的工作点 A ,其转速为 n 。设扰动使转速升高到 n_1 ,由图可见电动机的转矩 M 小于负载转矩 M_L ,动态转矩将使系统作减速运动,因此扰动消失后转速变化趋向 A 点;同理如扰动使转速降低到 n_2 ,系统的转矩差或动态转矩在扰动消失后会使转速回升趋向 A 点。因此, A 点为稳定的静态工作点,简称稳定工作点。对图 1-8b 中的平衡点 B ,当扰动使系统转速升高到 n_1 时,电动机转矩 M 大于负载转矩 M_L ,动态转矩使系统进一步加速;当扰动作用使转速降低到 n_2 ,产生的动态转矩会使转速进一步下降。不论扰动作用方向如何,相应产生的转矩差或动态转矩都会使转速远离原有平衡点,因而该点称为不稳定工作点。

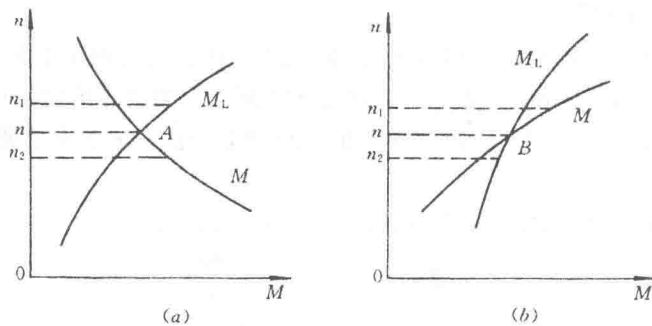


图 1-8 拖动系统的静态工作点

工作点的稳定性是由电动机机械特性与工作机械的机械特性两者之间的配合关系确定的。图 1-9 中,对负载特性 M_{L1} ,工作点 P 是稳定的;对负载特性 M_{L2} , P 点则是不稳定的。图 1-10 中,对电动机特性 M_1 ,工作点 P 是稳定的,对电动机特性 M_2 , P 点则是不稳定的,即对于恒转矩负载特性,只是在电动机具有下斜特性时才能获得稳定的工作点,这个结论是有实际意义的。

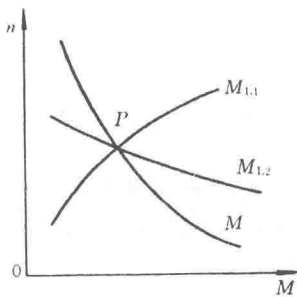


图 1-9 负载特性与工作点稳定性的关系

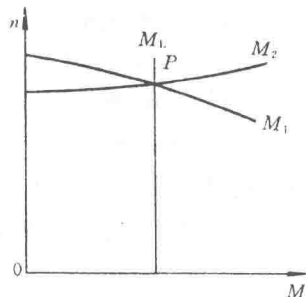


图 1-10 电动机特性与工作点稳定性的关系

第五节 拖动系统的起动和停车时间

拖动系统从某一稳定运行状态变化到另一稳定运行状态,其间必然经过过渡过程。因为在实际的拖动系统中存在各种惯性,如物体质量引起的机械惯性,由电感线圈带来的电磁惯性等。运动状态的改变使惯性部件的能量储存发生变化。因能量是不能突变的,所以状态的改变也必然是渐变的,这就是产生过渡过程的物理本质。

系统的起动、停车和调速等都是转速变化的过渡过程,过程的实现需要一定的时间,称过渡过程时间,或分别称起动时间、停车时间等。过渡过程时间可以根据运动方程式进行计算。

一、起动和停车时间

在生产过程中经常起动和制动的机械,其生产率将直接受拖动装置起动和制动停车时间的影响,此外过长的起动时间将使电机的温升过高。例如对笼形转子电动机拖动系统,规定起动时间不得超过 30s。总之,起动和停车时间对生产和安全都有重要影响。

1. 起动时间计算

拖动系统在起动过程中,描述系统状态的运动方程式为

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

根据上式可求得起动过程的持续时间,即起动时间 t_{ST} 为

$$t_{ST} = \frac{J}{9.55} \int_0^n \frac{dn}{M - M_L} \quad (1-19)$$

式(1-19)是计算起动时间的一般公式。式中电动机转矩 M 及负载转矩 M_L 为转速 n 的函数,即电动机与工作机械机械特性的函数表达式。如果加速转矩(即加速过程中的动态转矩) $M - M_L$ 在起动过程中保持不变,起动终了时的转速为额定值,则起动时间可按式求得:

$$t_{ST} = \frac{J}{9.55} \int_0^{n_N} \frac{dn}{M - M_L} = \frac{J n_N}{9.55(M - M_L)} \quad (1-20)$$

式中 J ——折算到电动机轴上的全部转动惯量;

n_N ——电动机额定转速;

M_L ——折算到电动机轴上的负载转矩。

2. 制动停车时间计算

拖动系统在减速停车过程中,往往需要施加制动转矩(电气或机械制动)。在制动转矩和负载转矩的共同作用下,拖动系统逐渐减速,最后停车。设制动转矩为 $-M$,则运动方程式为

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

制动停车时间可由下式求出:

$$t_{BR} = - \frac{J}{9.55} \int \frac{dn}{M + M_L} \quad (1-21)$$

如果减速转矩 $M + M_L$ 在制动过程中维持不变,开始减速时的转速为 n_N ,则减速停车时间为