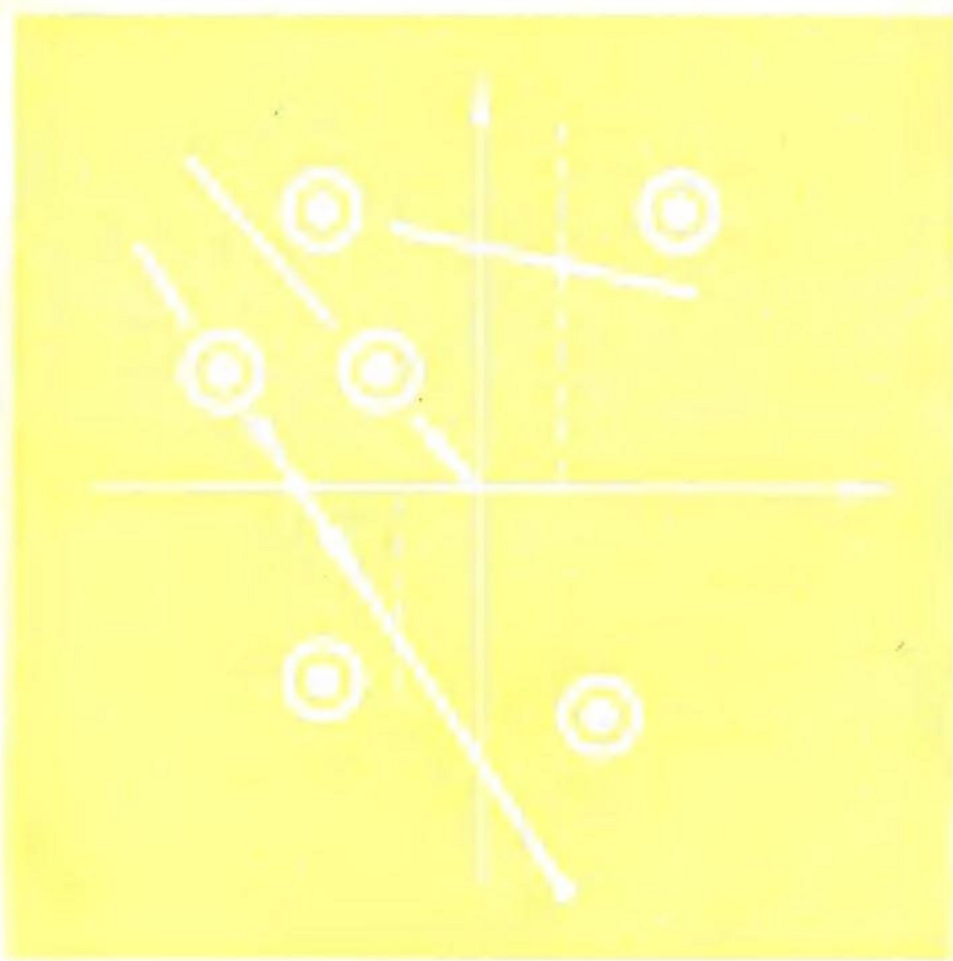


高等学校教学用书

矿山电力拖动与控制

谢桂林 黄章 刘允兹 编



中国矿业学院出版社

高等学校教学用书

矿山电力拖动与控制

谢桂林 黄章 刘允紘 编

中国矿业学院出版社

内 容 提 要

矿山电力拖动与控制全书共分九章，第一章为电力拖动的基本知识；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、调速及容量选择；第八章为常用控制电器，第九章为继电器-接触器控制系统。考虑到矿山企业的需要，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怎样实现的，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。

高等学校教学用书

矿山电力拖动与控制

谢桂林 黄章 刘允斌 编

中国矿业学院出版社出版

江苏省新华书店发行 中国矿业学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米1/16 印张14.7 字数345千字

1986年10月第1版 1986年10月第1次印刷

印数：1—10000册

统一书号 15443.011 定价 2.45 元



前 言

电力拖动与控制是一门继电机学之后的专业性课程。这门课程的内容是讨论有关电动机应用的各种问题。具体地讲,当我们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特性和要求,譬如,负载转矩的特性,机械惯性的大小,起动的频繁程度,负载的变动情况,在运行过程中有无连续调整速度、制动以及转矩限制的要求等等。根据这些条件选择技术上可行,经济上合理的拖动方式。所谓选择拖动方式就是确定采用什么样的电动机,是交流还是直流,需要不需要电源变流装置(如整流器、变频器等),采用单电机还是多电机系统,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。此外,根据供电电网的情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、结构型式以及控制设备和保护装置等问题,也属于本课程讨论的范围。

但是,从学科的角度来看电力拖动讨论的主要内容是电动机带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,使学生掌握电力拖动系统的理论分析和设计计算的方法,熟悉电力拖动系统中使用的电机与电器的规格性能及其选择,以及拖动控制系统的组成和调整等实际应用问题。

本书在内容安排上不同于一般拖动教材,主要是考虑到矿山企业的需要,加强了交流拖动的内容,即把交流电动机的起动、制动和调速单独设立章节,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,避免了空洞抽象的毛病。

本书由谢桂林同志主编。第一、二、三章及附录由黄章同志执笔,第四、五、六章由谢桂林同志执笔,第七、八、九章由刘允紘同志执笔。限于作者的水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

1985.5

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.....	(9)
第五节 拖动系统的起动和停车时间 复习思考题和习题.....	(10)
第二章 直流电动机的机械特性	(15)
第一节 直流他励电动机的机械特性.....	(15)
第二节 直流他励电动机的制动特性.....	(21)
第三节 直流他励电动机运行状态分析.....	(27)
第四节 直流串励电动机的机械特性 复习思考题和习题.....	(28)
第三章 直流电动机的调速	(34)
第一节 电动机调速的概念和指标.....	(34)
第二节 直流他励电动机的调速性能.....	(36)
第三节 发电机-电动机调速系统.....	(38)
第四节 交磁放大机-直流电动机调速系统.....	(39)
第五节 直流电动机脉冲调速 复习思考题和习题.....	(52)
第四章 交流电动机的起动	(55)
第一节 异步电动机的机械特性.....	(55)
第二节 鼠笼型电动机的起动.....	(61)
第三节 液力联轴器的应用.....	(64)
第四节 鼠笼型电动机的降压起动.....	(67)
第五节 绕线型异步电动机起动电阻的计算.....	(73)
第六节 起动时间的计算.....	(79)
第七节 绕线型异步电动机的频敏变阻器起动 复习思考题和习题.....	(82)
第五章 异步电动机的电气制动	(88)
第一节 异步电动机电气制动的种类.....	(88)
第二节 动力制动的工作原理.....	(92)
第三节 动力制动机械特性的计算.....	(93)
第四节 动力制动的应用.....	(104)
第五节 带补偿的动力制动控制系统 复习思考题和习题.....	(106)

第六章 交流异步电动机的调速	(112)
第一节 变频调速.....	(112)
第二节 变极调速.....	(115)
第三节 定子调压调速.....	(117)
第四节 转子回路串电阻调速.....	(118)
第五节 异步电动机的串级调速.....	(120)
第六节 交流调速的其他形式 复习思考题.....	(126)
第七章 电动机容量的选择与验算	(129)
第一节 概述.....	(129)
第二节 电动机的发热和冷却过程.....	(130)
第三节 从发热观点对电动机工作方式的分类.....	(134)
第四节 长时连续工作方式电动机容量的验算.....	(135)
第五节 短时工作方式时电动机容量的验算.....	(141)
第六节 重复短时工作方式时电动机容量的验算.....	(144)
第七节 鼠笼型异步电动机容许小时合闸次数的确定.....	(146)
第八节 选择电动机时应考虑的几个问题 复习思考题和习题.....	(151)
第八章 常用控制电器	(155)
第一节 接触器.....	(155)
第二节 继电器.....	(167)
第三节 主令电器.....	(172)
第四节 手动控制器.....	(174)
第五节 保护电器及组合电器 复习思考题.....	(175)
第九章 继电器-接触器控制系统	(182)
第一节 概述.....	(182)
第二节 绕线型电动机频敏变阻器起动控制线路.....	(189)
第三节 绕线型电动机带动力制动的可逆控制线路.....	(191)
第四节 绕线型电动机以电流时间混合方式控制的线路.....	(197)
第五节 同步电动机的控制线路.....	(202)
第六节 控制线路设计原则 复习思考题和习题.....	(207)
附录 磁放大器基本原理和特性	(212)
附-1 磁放大器的基本原理.....	(212)
附-2 磁放大器的线路与结构.....	(214)
附-3 磁放大器的特性曲线.....	(215)
附-4 磁放大器的主要参数.....	(219)
附-5 磁放大器的偏移.....	(221)
附-6 外反馈磁放大器与磁继电器.....	(222)
附-7 自饱和磁放大器.....	(226)
复习思考题.....	(229)
参考文献	(229)

第一章 电力拖动基本知识

第一节 概 述

电力拖动系统是为一定的生产过程服务的，以电动机为原动机，包括电动机、传动装置、生产机械以及电气控制设备等在内的机械电气系统。

不同的生产工艺过程对电力拖动系统有不同的要求，例如矿井水泵只要求单向恒速转动，而矿井提升机则要求双向可逆运行、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有相应的发展和提高，反过来又促进着生产工艺过程日趋完善。

自从电动机问世以来，随着电机性能的不断改进和完善，规格品种增多，又因电力传输经济、方便，电力拖动系统得到了迅速的发展。直到今天，电力拖动系统仍然是工业生产系统中的基本拖动方式。

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。交流电动机包括鼠笼型电动机，异步电动机和同步电动机，直流电动机则有他励电动机，串励电动机和复励电动机等。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，而直流电动机则在调速要求较高的系统中应用较多。

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，但性能受到一定限制，是目前应用最多的拖动系统。多机拖动系统通常应用于大功率或有特殊控制要求的系统中，其中应用较多的是双机拖动系统。

近年来由于控制理论的发展，新型控制元件的采用，以及数控和计算机技术的应用，电力拖动系统的自动化程度日益提高。系统的性能更趋完善，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，而转矩和转速是旋转系统运动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。不同的电动机有不同的机械特性，不同的工作机械（电动机的负载）也有不同的机械特性，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合理的运行。

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，不同性能的电动机以及不同的运行条件，电动机具有各不相同的机械特性。常用的有下列分类方法。

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，

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

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，转速随转矩的增加而下降，即硬度 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，例如同步电动机的机械特性；转矩增加转速略有下降的特性（图 1-1 曲线 b 及 c 的直线段）称为硬特性，例如直流他励电动机及异步电动机的特性；转矩增加转速大幅度下降的特性（图 1-1 曲线 d）称为软特性，例如直流串励电动机的特性。

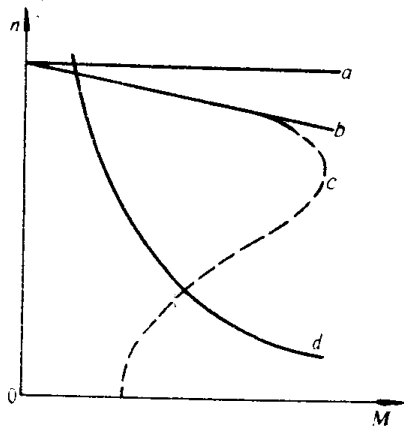


图 1-1 各种电动机的机械特性曲线

硬特性具有转速比较稳定，受外界干扰影响小的优点，适用于提升机、通风机、水泵和机床的电力拖动；而软特性具有在负载转矩增大时转速自动降低的特点，适用于电气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时得到的机械特性称固有特性。不具备上述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要求。各种电动机的固有及人为特性将在以后的章节中研究。

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，采煤机电动机带动滚筒等等。工作机械的转矩 M_x 一般表示为转速的函数 $n = f(M_x)$ ，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

(1) 恒转矩特性

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

(2) 变转矩特性

转矩随转速变化，如图 1-2 b 所示。例如通风机、水泵等，这种负载的性质与气体或液体的粘性阻力有关。

图 1-2 中的特性都位于第一象限，它表示在某一可能的转向（如正转）下负载转矩与转速的符号相同，即表示负载转矩的作用方向与转速相反。

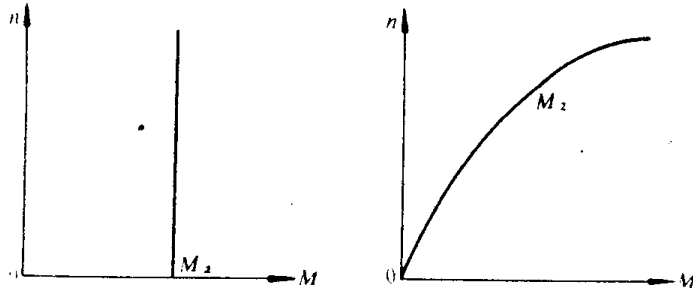


图 1-2 工作机械的机械特性

a—恒转矩负载；b—变转矩负载

2. 按转矩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矩随转速方向的改变而改变，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，由于转矩随转向变化，故位于第一及第三象限。

(2) 位转矩特性

特点是转矩的方向与转速的正负方向无关，或负载转矩作用方向始终不变。这类负载一般均具有储能特性，如位能造成的重力负载等，故称位转矩负载。图 1-4 所示为位转矩特性，例如提升载荷对提升机滚筒形成的负载转矩。因负载转矩不随转向变化，故特性分布在第一及第四象限（设上提的运动方向为 $+n$ ）。

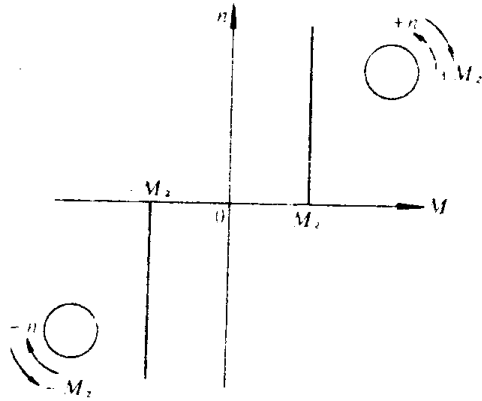


图 1-3 阻转矩特性

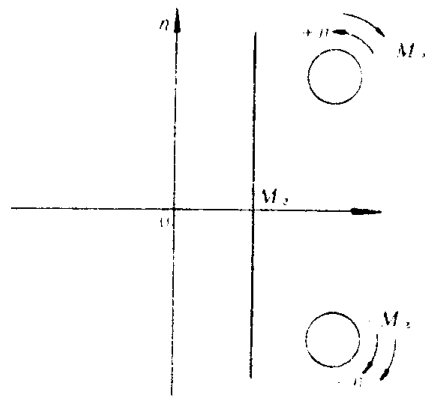


图 1-4 位转矩特性

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、负载性能和控制要求各不相同

同,但是,从理论分析的角度可以将电力拖动系统看做是一个统一的动力学系统。为了实现预期的控制要求,需要研究系统的运动学、动力学性能以及描述系统的运动方程式。

以电动机做原动机的电力拖动系统本质上是旋转系统。描述旋转系统的主要物理量为:转矩、转速、转速变化率以及系统的转动惯量。系统的运动状态主要可划分为稳定运动状态(或称静态)和不稳定运动状态(又称为动态或过渡过程)两种。从动力学平衡的观点将系统中的各物理量联系起来,组成运动方程式,以此做为系统运动状态分析的工具,即系统的运动方程式是描述系统运动状态的数学表达式。

作用于电力拖动系统的转矩包括电动机的轴转矩 M 和负载转矩 M_z 。设系统总的转动惯量为 J ,且 J 为常量,角速度为 ω ,角加速度为 $\frac{d\omega}{dt}$,根据动力学定律,可得到电力拖动系统运动方程式的一般形式,

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

式中 M ——电动机的轴转矩, $N \cdot m$;

M_z ——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(1-2)右端的一项称为动态转矩,记做 M_f ,

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

动态转矩的物理意义是:当电动机的轴转矩 M 和负载转矩 M_z 不相等时,系统的转速将发生变化,转速的变化率与动态转矩成正比,与系统的转动惯量成反比。将式(1-3)代入式(1-2)可以得到系统的转矩平衡方程式

$$M - M_z = M_f \quad (1-4)$$

在工程计算中,旋转速度常用每分钟转数 n (r/min) 表示,而不用 ω ,给出的转动惯量常是飞轮惯量 GD^2 ($kg \cdot m^2$),而较少直接给出 J 。这些参数有如下关系:

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

$$J = \frac{1}{4} GD^2$$

如将上述关系代入式(1-2),则可得到用 n 和 GD^2 表示的运动方程式

$$M - M_z = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

注意,运动方程式中的 J (或 GD^2) 代表的是系统总的转动惯量,即等于电动机转子和生产机械的转动惯量之和。

* 在目前习惯使用的工程单位中,转矩 M 的单位为 $kg \cdot m$,转动惯量 J 的单位为 $kg \cdot m \cdot s^2$, J 与 GD^2 的关系为 $GD^2 = 4gJ$,所以系统运动方程式将有如下形式:

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

在分析拖动系统的运动状态,进行拖动系统的动态计算时,都要应用运动方程式,下面简要说明根据运动方程式确定拖动系统运动状态的原则。根据 M 和 M_z 的相互关系,运动可能是加速的、减速的或等速的。

$$M - M_z > 0; M_f > 0; \frac{dn}{dt} > 0 \text{ —— 加速运动;}$$

$$M - M_z < 0; M_f < 0; \frac{dn}{dt} < 0 \text{ —— 减速运动;}$$

$$M - M_z = 0; M_f = 0; \frac{dn}{dt} = 0 \text{ —— 等速运动。}$$

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,首先要定义转速和转矩的正方向。本书采用下述符号系统:

首先确定转速的正方向。旋转系统存在两种可能的转动方向,可任取其一(例如顺时针转向)做为转速的正方向,记为 $+n$;相反的转向(如逆时针)则为 $-n$ 。

在选定转速正方向的基础上确定转矩的符号。电动机做为原动机,当其轴转矩与转速的正方向一致时取正号,即为 $+M$,反之则取为 $-M$ 。负载转矩符号的定义方法与电动机相反,当负载转矩与转速的正方向一致时取负号,即为 $-M_z$,反之则取为 $+M_z$ 。转矩和转速的相互关系以及符号的确定示于图1-5之中。

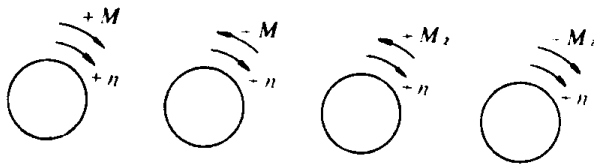


图 1-5 转速和转矩符号

二、转矩的折算

上述运动方程式表示的是同一转轴上电动机转矩和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,即包括有以不同速度转动的部件,形成多轴或多速系统。分析这种系统运动状态时,需对各转轴分

别列出运动方程式,然后联立求解。这种计算方法比较复杂。为简化计算,可采用等值折算的方法,此时需要将各个速度不同部件的转矩折算到做为基准转速的某个转轴上,一般是折算到电动机轴上。这样,多速系统就转化为一个等值的单速系统,负载转矩和动态转矩都应进行折算,现分述如下:

1. 负载转矩(静态转矩)的折算

根据力学中功率不变的原则,在一个拖动系统中将负载转矩由一轴折算到另一转轴时必须保持功率相等,并需考虑功率传递中的机械损失。图1-6a表示一级齿轮传动系统,生产机械轴上的负载转矩折算到电动机轴上时,按下列公式计算,

$$M_z \omega_f \eta = M_{zm} \omega_m$$

$$M_z = \frac{M_{zm} \omega_m}{\omega_f}$$

$$M_x = \frac{M_{z.m}}{i\eta} \quad (1-6)$$

式中 M_x ——折算到电动机轴上的负载转矩；

$M_{z.m}$ ——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；

η ——减速器的效率；

$i = \frac{\omega}{\omega_m}$ ——电动机与工作机械之间的传动比。

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至电动机，此时传动中的机械损失将由生产机械（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，

$$M_x = \frac{M_{z.m}\eta}{i} \quad (1-7)$$

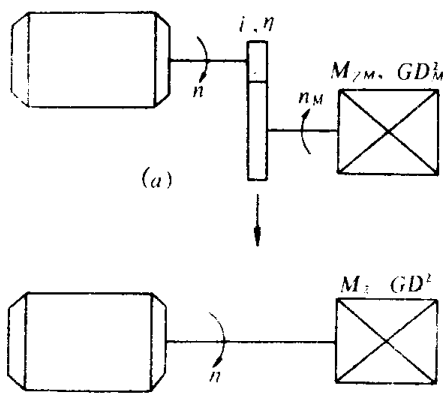


图 1-6 一级齿轮传动系统及其等效单轴系统

2. 动态转矩的折算

动态转矩反映当转速变化时拖动系统中动能储存的变化，因此动态转矩的折算应根据动能不变的原则进行。由力学可知，转动物体的动能等于 $\frac{1}{2}J\omega^2$ 。设工作机械轴上的转动惯量为 J_m ，其角速度为 ω_m ，折算到电动机轴上的等效转动惯量为 J ，则

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

$$J = J_m \left(\frac{\omega_m}{\omega} \right)^2 = \frac{J_m}{i^2} \quad (1-8)$$

在计算时如使用飞轮惯量 GD^2 ，其折算公式是一样的。机械轴上的飞轮惯量为 GD_m^2 ，机械轴转速为 r_m ，电动机的转速为 n ，折算到电动机轴上的飞轮惯量 GD^2 为

$$GD^2 = GD_m^2 \left(\frac{r_m}{n} \right)^2 = \frac{GD_m^2}{i^2} \quad (1-9)$$

式中的 $i = \frac{n}{r_m} = \frac{\omega}{\omega_m}$ 。由此可见，动态转矩的折算实际上就是转动惯量或飞轮惯量的折算。

折算后的动态转矩要根据电动机轴上原有的转动惯量和折算到电动机轴上的转动惯量之和进行计算。图 1-6a 所示双轴系统折算后的等值单速系统如图 1-6b。

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，只需将式中的传动效率和传动比代入多级传动系统总的传动效率和总的传动比即可。

三、直线运动部分作用力和质量的折算

1. 作用力 F 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，也应进行折算。如提升机的钢丝绳以 F 力悬吊重物，以速度 v 上升或下降，这些力在电动机轴上的反映是负载转矩 M_z 。其折算方法与转矩相同，即保持功率相等并考虑传动效率。在电动机带动工作机械的条件下，有

$$M_z \omega \eta = Fv$$

$$M_z = \frac{Fv}{\omega \eta} \quad (1-10)$$

如将电动机的转速用每分钟转数 n 表

$$M_z = \frac{60}{2\pi} \frac{Fv}{n\eta}$$

或

$$M_z = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-11)$$

式中 M_z ——直线运动部分折算到电动机轴上的负载转矩，N·m，

F ——直线作用力，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

$$M_z = 9.55 \frac{Fv\eta}{n} \quad (1-12)$$

2. 质量 m 的折算

质量为 m 的直线运动部件中也储存有动能，表现为机械运动的惯性，使速度不能突变。在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，所以在过渡过程计算中必须加以考虑。通常也要进行折算，折算的原则仍然是保持动能不变。

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，其折算转动惯量为 J ，由动能相等的原则可得

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

$$J = m \left(\frac{v}{\omega} \right)^2 \quad (1-13)$$

也可用折算飞轮惯量表示，则

$$GD^2 = 365 \frac{mv^2}{n^2} \quad (1-14)$$

式中 m ——直线运动部件的质量（或重量），kg，

v ——部件直线运动速度，m/s；

n ——电动机转速，r/min；

GD^2 ——直线运动部件折算到电动机轴上的飞轮惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。

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

滚筒转速

$$r_m = \frac{60v}{\pi D} = \frac{60 \times 2.1}{\pi \times 0.9} = 25.5 \text{ r/min}$$

电动机转速

$$n = r_m i_1 i_2 = 25.5 \times 6 \times 6 = 918 \text{ r/min}$$

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

$$M_x = 9.55 \frac{FV}{n\eta^2} = 9.55 \times \frac{49050 \times 1.2}{918 \times 0.94^2} = 693 \text{ N}\cdot\text{m}$$

电动机轴上的静态功率

$$P_x = \frac{M_x n}{9.55} = \frac{693 \times 918}{9.55} = 66600 = 66.6 \text{ kW}$$

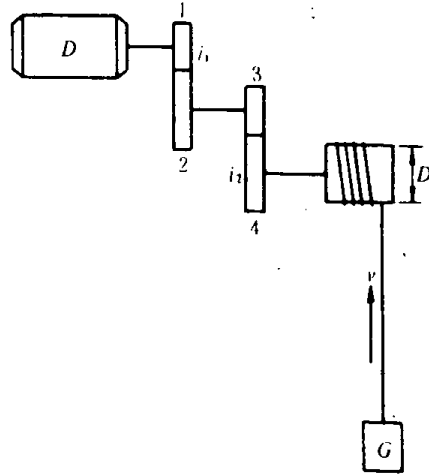


图 1-7 拖动系统图

例 1-2 在上例中, 如果电动机、齿轮、滚筒的飞轮惯量分别为: $GD_1^2 = 10\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $GD_2^2 = 1\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $GD_3^2 = 10\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $GD_4^2 = 5\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $GD_5^2 = 20\text{kg}\cdot\text{m}^2$, $GD_m^2 = 40\text{kg}\cdot\text{m}^2$, 电动机起动时间 $t_s = 2\text{s}$ 。求电动机的起动转矩。

解

电动机轴上的飞轮惯量

$$[GD^2]_1 = GD_1^2 + GD_2^2 = 10 + 1 = 11 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

其余各轴上旋转部件折算到电动机轴上的飞轮惯量

$$[GD^2]_2 = \frac{GD_3^2 + GD_4^2}{i_1^2} + \frac{GD_5^2 + GD_m^2}{i_1^2 i_2^2}$$

$$= \frac{10 + 5}{6^2} + \frac{20 + 40}{6^2 \times 6^2} = 0.463 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

直线运动部件折算到电动机轴上的飞轮惯量

$$[GD^2]_3 = 365 \frac{mv^2}{n^2} = 365 \times \frac{5000 \times 1.2^2}{918^2} = 3.12 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

整个系统折算到电动机轴上的总飞轮惯量

$$GD^2 = [GD^2]_1 + [GD^2]_2 + [GD^2]_3 = 14.58 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$$

计算动态转矩时假设起动期间为等加速运动, 则

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n}{t_s} = \frac{918}{2} = 459 \text{ r/min/s}$$

电动机轴上的动态转矩

$$M_j = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt} = \frac{14.58}{38.2} \times 459 = 175 \text{ N}\cdot\text{m}$$

电动机所需的起动转矩为

$$M_q = M_x + M_j = 693 + 175 = 868 \text{ N}\cdot\text{m}$$

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

电动机和工作机械的机械特性各不相同，在特定的运行条件下，系统可能达到某一稳定运行状态，相应的转速和转矩坐标称为拖动系统的静态工作点。换句话说，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。

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

$$M = M_x \quad (1-15)$$

计算静态工作点可以根据电动机机械特性和工作机械的机械特性，采用解析计算法，但采用图解法更为直观。在机械特性曲线图上，电动机和工作机械的机械特性的交点即为系统的静态工作点，如图 1-8 所示。

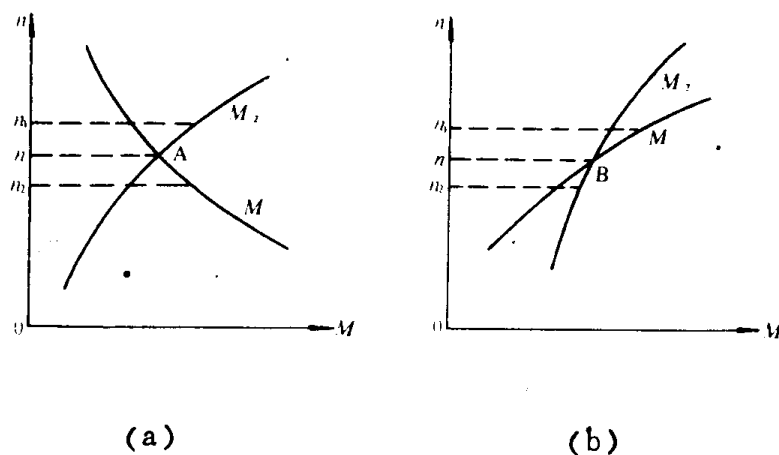


图 1-8 拖动系统的静态工作点

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。所谓稳定的工作点，是指拖动系统受瞬时的外来扰动后，能自动恢复到原有稳定工作状态的静态工作点。

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能否使系统恢复原有平衡状态。例如图 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_x ，系统将做减速运动，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_z , 使系统进一步加速; 当扰动作用使转速降低到 n_2 , 产生的转矩差会使转速进一步下降。不论扰动作用方向如何, 相应产生的转矩差都会使转速远离原有平衡点, 因而该点称不稳定工作点。

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_{z1} , 工作点 P 是稳定的, 对负载特性 M_{z2} , P 点则是不稳定工作点。图 1-10 中, 对电动机特性 M_1 , 工作点 P 是稳定, 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。

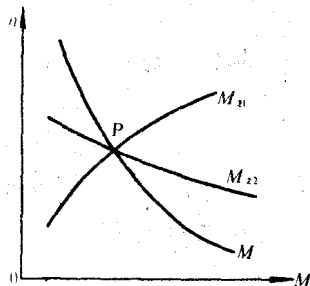


图 1-9 负载特性与工作点稳定性的关系

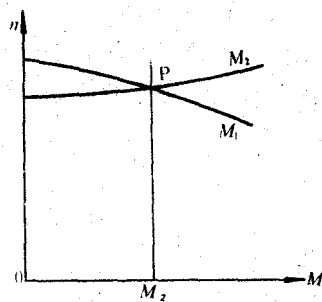


图 1-10 电动机特性与工作点稳定性的关系

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, 而能量是不能突变的, 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, 称为过渡过程时间, 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温升过高。例如对鼠笼电动机拖动系统, 规定起动时间不得超过 30 秒钟。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

$$M - M_z = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$$

根据上式可求得起动过程的持续时间, 即起动时间 t_s 为

$$t_s = \frac{GD^2}{38.2} \int_0^{n_e} \frac{dn}{M - M_x} \quad (1-16)$$

上式是计算起动时间的一般公式，如果加速转矩（即加速过程中的动态转矩） $M - M_x$ 在起动过程中保持不变，起动终了时的转速为额定值，则可求出起动时间

$$t_s = \frac{GD^2}{38.2} \int_0^{n_e} \frac{dn}{M - M_x} = \frac{GD^2 n_e}{38.2(M - M_x)} \quad (1-17)$$

式中 GD^2 ——折算到电动机轴上的全部飞轮惯量；

n_e ——电动机额定转速；

M_x ——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

$$-M - M_x = \frac{GD^2}{38.2} \frac{dn}{dt}$$

制动停车时间可由下式求出，

$$t_T = -\frac{GD^2}{38.2} \int_{n_e}^0 \frac{dn}{M + M_x} \quad (1-18)$$

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

$$\begin{aligned} t_T &= -\frac{GD^2}{38.2} \int_{n_e}^0 \frac{dn}{M + M_x} = \frac{GD^2}{38.2} \int_0^{n_e} \frac{dn}{M + M_x} \\ &= \frac{GD^2 n_e}{38.2(M + M_x)} \end{aligned} \quad (1-19)$$

为了提高生产率，需缩短起动和制动停车时间。可采用下列方法：

(1) 减小电动机的飞轮惯量 GD^2 ，如选用细长转子（或电枢）的电动机，或采用双电动机拖动。因为每台电动机功率变小，其转子直径变小，总的 GD^2 比单台同容量电动机的 GD^2 小；

(2) 充分利用电动机过载能力，增大加速或减速转矩；

(3) 选择适当的传动比 i ，使折算到电动机轴上的拖动系统总 GD^2 值较小。

3. 过渡过程时间的图解算法

在实际拖动系统中，加速和减速转矩并不经常保持恒定，为求得过渡过程时间，必须知道加速或减速转矩与转速之间的函数关系，式 (1-16) 和 (1-18) 才可解。如果函数关系不能以简单的解析式表示，则采用图解法求过渡过程时间较方便。以下举例说明用图解法求起动时间。

图1-11所示为一台感应电动机带动一台扇风机的拖动系统。电动机和扇风机的机械特性分别为 $n = f(M)$ 及 $n = f(M_x)$ ，利用图解法求起动时间 t_s 。