

21世纪高等学校教材

电机与控制

主 编 陈建国

张纯亮

主 审 魏银库



西北工业大学出版社

21 世纪高等学校教材

电机与控制

主 编 陈建国

张纯亮

主 审 魏银库



西北工业大学出版社

【内容简介】本教材从电力拖动系统整体出发,主要介绍了直流电机、异步电动机、控制电机等的结构、工作原理及工作特性、电动机的选择,阐述了控制电器元件及基本电气控制线路,构成了完整的电机与控制系统。

图书在版编目(CIP)数据

电机与控制 / 陈建国, 张纯亮主编. — 西安: 西北工业大学出版社, 2006.8
ISBN 7-5612-2079-0

I. 电... II. ①陈... ②张... III. 电机—控制—高等学校—教材 IV. TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 097398 号

出版发行: 西北工业大学出版社

通信地址: 西安市友谊路 127 号 邮编: 710072

电 话: 029-88493844, 88491757

网 址: www.nwpup.com

印 刷 者: 郑州创维彩印制作有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 13

字 数: 317 千字

版 次: 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 22.00 元

前 言

本书在内容及层次安排上符合国家教育部“电机与控制”教学大纲和教学基本要求,可作为机电一体化、电气技术、机械制造、计算机控制等专业相关课程的教材,也可供函授、自学考试等有关专业及有关工程技术人员使用。

本着以学为本,叙述详尽,便于自学,增强应用能力技能的目的,本书侧重基本理论和基本技能的阐述,加强各章的内在联系,从电力拖动系统整体出发,编排了各章的内容和顺序,全部内容按教学时数 60 学时编写,主要内容有:绪论,第一章直流电机,第二章异步电动机,第三章控制电机,第四章电动机的选择,第五章控制电器,第六章基本电气控制线路。在绪论中对电力拖动系统的动力学进行了较详细的叙述。

本书的电路图形符号、文字符号、电路绘制及有关术语,均采用国家标准(GB/T4728 - 1990 ~ 2000)。为便于新旧标准过渡,书中对新旧标准作了对照,以利读者选用。

本书由中国人民解放军防空兵指挥学院陈建国、张纯亮主编,具体编写分工如下:第一、二、三章由陈建国编写,绪论、第四章由张纯亮编写,第五章由靳世红编写,第六章由李赞编写。田斐斐完成了全书的校对工作。

本书由魏银库同志主审。

由于作者水平所限,书中难免会有缺点和错误之处,尚希广大读者批评指正。

编 者

2006 年 7 月

目 录

绪 论	1
第一节 电力拖动系统概述	1
第二节 电力拖动系统的运动方程式	3
第三节 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算	5
第四节 生产机械的机械特性	8
第五节 电力拖动系统稳定运行的条件	10
习题与思考题	11
第一章 直流电机	13
第一节 直流电机概述	13
第二节 直流电机的结构	14
第三节 直流电机的工作原理	17
第四节 直流电动机	21
第五节 并励(他励)电动机的机械特性	26
第六节 并励(他励)电动机的调速	28
第七节 并励(他励)直流电动机的起动、反转与制动	37
本章小结	44
习题一	45
第二章 异步电动机	49
第一节 三相异步电动机的结构	49
第二节 三相异步电动机的工作原理	51
第三节 转子各量与转差率的关系	56
第四节 异步电动机的功率和电磁转矩	58
第五节 三相异步电动机的工作特性	61
第六节 异步电动机的机械特性	62
第七节 三相异步电动机的起动	64
第八节 异步电动机的调速	70
第九节 异步电动机的铭牌数据	72
第十节 单相异步电动机	75
本章小结	79
习题二	81
第三章 控制电机	84
第一节 伺服电动机	84

第二节 测速发电机	89
第三节 步进电动机	92
第四节 自整角机	95
第五节 旋转变压器	98
本章小结	99
习题三	100
第四章 电动机的选择	103
第一节 电动机容量选择的原则	103
第二节 电动机的发热与冷却	103
第三节 不同工作制下电动机容量的选择	104
第四节 电动机容量选择的统计法和类比法	110
第五节 电动机的种类、电压、转速和结构类型的选择	111
本章小结	114
习题四	114
第五章 控制电器	116
第一节 控制电器概述	116
第二节 开关	123
第三节 主令电器	125
第四节 保护电器	128
第五节 交流接触器	135
第六节 继电器	143
第七节 直流电动机控制电路	156
第八节 电子电器简介	160
本章小结	164
习题五	164
第六章 基本电气控制线路	168
第一节 继电接触控制系统线路图	168
第二节 电动机全压起动控制线路	174
第三节 电动机降压起动控制线路	177
第四节 电动机制动控制线路	185
第五节 多速电动机控制线路	190
本章小结	194
习题六	195
部分习题参考答案	197

绪 论

第一节 电力拖动系统概述

生产设备种类繁多,功能各异,但从所采用的电气控制技术来说,其所用的控制原理、基本线路及分析方法是类似的。本课程结合典型机床电气控制线路,讲述上述几方面的内容,也适用于其他生产设备,以培养读者对电气控制系统的选择、使用和分析的基本能力。

机床是主要的加工设备,有“工作母机”之称,它的质量、数量、技术的先进程度以及自动化水平,都将直接影响整个机械工业及国民经济的发展,而机床的自动化水平,对提高生产率,改进产品质量和减轻劳动强度等方面起着极为重要的作用。

机床一般由四个基本部分组成:主机部分、驱动部分、控制部分、检测和显示部分,如图 0-1 所示。

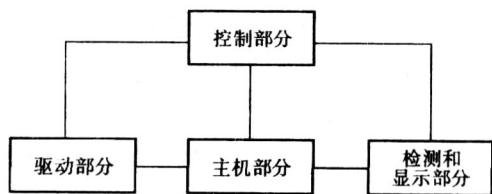


图 0-1 机床的组成

主机系指工作机械的本体。驱动部分包括原动机、传动机构等;原动机包括电动机、液压装置、气压装置等,但最主要的动力设备为电动机。控制部分的作用在于使系统中的驱动、主机、检测和显示各部分协调工作,可见控制部分是非常重要的。

一、电力拖动

以电动机为动力,通过传动机构拖动工作机构进行工作的拖动方式称为电力拖动。

在电力拖动中,电动机通常被用来实现将电能转换为机械能,这时电动机在电动状态下运行;有时也反过来把机械能转换成热能或电能,这时电动机在制动状态下运行。

电力拖动可分为直流拖动和交流拖动。直流拖动是以直流电动机为动力的拖动,而以交流电动机为动力的拖动称为交流拖动。直流电动机虽不如交流电动机结构简单、制造方便、维护容易、价格便宜等,但由于直流电动机具有良好的起动、制动和调速性能,可以方便地在较宽的范围内平滑调速,所以直流电动机仍应用于对起动和调速要求较高的机械设备中。交流电动机较多地使用三相笼型异步电动机,它具有体积小、重量轻、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修等优点,且能用于带有腐蚀性、易爆性、含尘气体等环境中。

随着生产的发展,机床功能增多,自动化程度日益提高,为了简化机械传动机构,改变过去一台电动机拖动几台机床,或一台电动机拖动一台机床的单独拖动方式,而出现了机床主运动、进给运动、辅助运动等分别由几台电动机拖动的分立拖动方式。

此外,在自动控制系统和计算装置中还用到各种交流或直流控制电机,例如伺服电动机、测速发电机、步进电动机等。各种控制电机的主要任务是转换和传递控制信号,能量的转换是次要的。

对于各种电动机,我们应该了解以下几个方面的问题:基本构造;工作原理;表示转速与转矩之间关系的机械特性;起动、反转、调速及制动的基本原理和基本方法;应用场合及如何正确使用。

二、机床电气控制系统

机床控制系统应用的控制方法很多,有电气的、液压的、气动的、机械的或综合配用的等,其中以电气控制应用最为普遍。

机床电气控制是采用电气元器件对控制对象进行控制。如继电器、接触器、交磁放大机、半导体器件等都可以作为控制装置的元器件,它们根据生产工艺的要求,按一定的线路组成电气控制系统,自动控制电动机的起动、制动、正反转,按给定程序(流程)改变速度、运动方向和机床工作部件的位置,以及工作循环自动化等。

对机床电气控制系统的一般要求:最大限度满足生产工艺的要求;力求简单经济;保证安全、可靠;操作、维修方便。

电气控制技术随着科学技术的不断发展,生产工艺不断提出新的要求而迅速发展。在控制方法上,从手动控制到自动控制;在控制原理上,由硬接线继电器接触式控制到以微处理器为核心的软件控制;在控制方式上,从断续的有级控制到连续的无级控制,由开环控制到闭环控制;在控制元器件上,由有触头元器件到无触头元器件等。随着新的控制理论和新型元器件的出现,将不断推动控制技术发展。

三、继电器—接触器控制系统

使用按钮、开关、继电器、接触器、行程开关等组成的电气控制系统,称为“继电器—接触器控制系统”或“继电器接触式控制系统”。通过电气接触点(触头)的闭合与分断来控制电路转换(接通或断开),实现对电动机运转和工作机构运动的自动控制,故又称为“有触点控制系统”。

这种控制是由操作者通过主令电器(如按钮)接通或断开继电器、接触器电路,使它们的触点闭合或分断,来接通或断开电动机电路。控制系统的工作框图如图0-2所示。

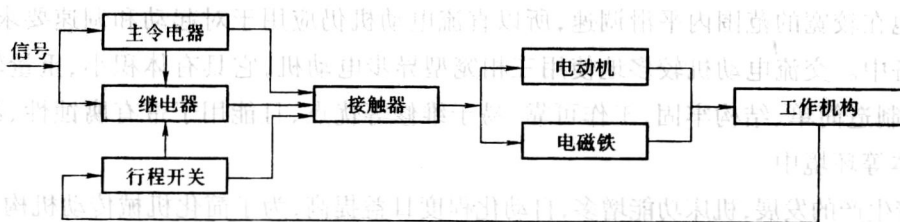


图0-2 继电器接触式控制系统框图

继电接触式控制系统是在 20 世纪 20 ~ 30 年代出现的自动控制系统。这种系统的优点是结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰能力强、工作稳定、能控制较大功率,采用它可以实现控制的自动化,还可以实现集中控制和远距离控制,现在仍是机床和机械设备应用广泛的基本的电气控制形式之一。它是本课程的重点内容。

这种控制系统的缺点是:由于是固定接线形式,只能按固定的程序进行控制,改变程序不方便,灵活性差;采用有触头的开关动作,工作频率低、触头易损坏、使用寿命短、噪声大。

对于继电接触式控制系统,我们应了解以下几个方面的问题:各种低压电器的基本结构和工作原理;对电动机起动、制动、反转、速度调节的基本控制电路的工作原理;典型机床电气控制线路是电动机基本控制电路的组合,控制线路中还具有对各个电动机电作的配合、自保、联锁、顺序、切换等功能,同时有各种行程、时间、速度、电流、温度、压力等基本控制方式;机床的运动形式及对电力拖动的要求;电气、液压、机械相互间的配合。

四、可编程序控制器

在生产中,大量存在一些以开关量控制的简单的程序控制过程,而且生产工艺和流程经常变化,要求更改控制程序,继电接触式硬接线控制系统是不能满足这种需要的。

在 20 世纪 70 年代出现了以微处理器为核心、引入了计算机存储程序技术、以软件来实现各种控制功能的自动化装置——可编程序控制器(PLC),它兼备了计算机的编程灵活、功能齐全、应用面广,比继电接触式控制简单、使用方便、抗干扰能力强的优点。PLC 具有体积小、耗电省、容易更改控制程序的特点,目前已作为一种标准化通用设备用于工业生产控制。

第二节 电力拖动系统的运动方程式

图 0-3 所示为一单轴电力拖动系统,它是由电动机 M 产生转矩 T_M ,用来克服负载转矩

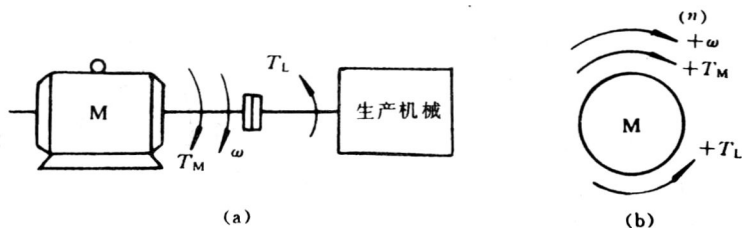


图 0-3 单轴拖动系统

(a) 传动系统图 (b) 转矩、转速的正方向

T_L ,以带动生产机械运动,当这两个转矩平衡时,传动系统维持恒速转动,转速 n 或角速度 ω 不变,加速度 dn/dt 或角加速度 $d\omega/dt$ 等于零,即 $T_M = T_L$ 时, $n = \text{常数}$, $dn/dt = 0$, 或 $\omega = \text{常数}$, $d\omega/dt = 0$,这种运动状态称为静态(相对静止状态)或稳态(稳定运转状态)。当 $T_M \neq T_L$ 时,速度(n 或 ω)就要变化,产生加速或减速,速度变化的大小与传动系统的转动惯量 J 有

关,把上述的这些关系用方程式表示,即为

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (0-1)$$

这就是单轴电力拖动系统的运动方程式。

在实际工程计算中,往往用转速 n 代替角速度 ω ,用飞轮惯量(也称飞轮转矩) GD^2 代替转动惯量 J ,由于 $J = m\rho^2 = mD^2/4$,其中, ρ 和 D 定义为惯性半径和惯性直径,而质量 m 和重力 G 的关系是 $G = mg$, g 为重力加速度,因而 J 与 GD^2 的关系是

$$\{J\}_{\text{kg}\cdot\text{m}^2} = \frac{1}{4} \{m\}_{\text{kg}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \frac{\{G\}_{\text{N}}}{\{g\}_{\text{m/s}^2}} \{D^2\}_{\text{m}^2} = \frac{1}{4} \{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2} / \{g\}_{\text{m/s}^2} \quad (0-2)$$

$$\text{或} \quad \{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2} = 4 \{g\}_{\text{m/s}^2} \{J\}_{\text{kg}\cdot\text{m}^2}$$

$$\text{且} \quad \{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}} \quad (0-3)$$

将式(0-2)和式(0-3)代入式(0-1),就可得运动方程式的实用形式

$$\{T_M\}_{\text{N}\cdot\text{m}} - \{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (0-4)$$

式中,常数 375 包含着 $g = 9.81\text{m/s}^2$,故它有加速度的量纲, GD^2 是个整体物理量,运动方程式是研究电力拖动系统最基本的方程式,它决定着系统运动的特征。当 $T_M > T_L$ 时,加速度 $a = dn/dt$ 为正,为加速运动;当 $T_M < T_L$ 时, $a = dn/dt$ 为负,系统为减速运动。系统处于加速或减速的运动状态称为动态。处于动态时,系统中必然存在一个动态转矩

$$\{T_d\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = \frac{\{GD^2\}_{\text{N}\cdot\text{m}^2}}{375} \frac{d\{n\}_{\text{r/min}}}{d\{t\}_{\text{s}}} \quad (0-5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样,运动方程式(0-1)或式(0-4)也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_d$$

$$\text{或} \quad T_M = T_L + T_d \quad (0-6)$$

就是说,电动机所产生的转矩在任何情况下,总是由轴上的负载转矩(即静态转矩)和动态转矩之和所平衡。

当 $T_M = T_L$ 时, $T_d = 0$,这表示没有动态转矩,系统恒速运转,即系统处于稳态,稳态时,电动机发出转矩的大小,仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

值得指出的是图 0-4(b)中关于转矩正方向的约定:由于传动系统有各种运动状态,相应的运动方程式中的转速和转矩就有不同的符号。因为,电动机和生产机械以共同的转速旋转,所以,一般以转动方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一转动方向的转速 n 为正,则约定电动机转矩 T_M 与 n 一致的方向

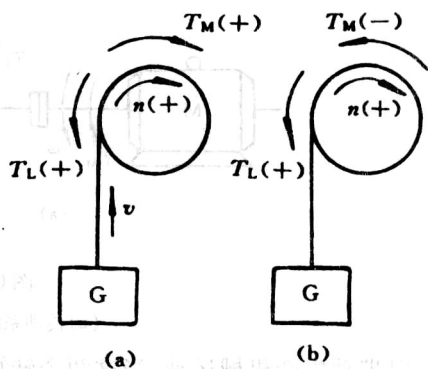


图 0-4 T_M, T_L 符号的判定

(a) 启动时 (b) 制动时

为正向,负载转矩 T_L 与 n 相反的方向为正向。根据上述约定就可以从转矩与转速的符号上判定 T_M 与 T_L 的性质:若 T_M 与 n 符号相同(同为正或同为负),则表示 T_M 的作用方向与 n 相同, T_M 为拖动转矩;若 T_M 与 n 符号相反,则表示 T_M 的作用方向与 n 相反, T_M 为制动转矩。而若 T_L 与 n 符号相同,则表示 T_L 的作用方向与 n 相反, T_L 为制动转矩;若 T_L 与 n 符号相反,则表示 T_L 的作用方向与 n 相同, T_L 为拖动转矩。

如图 0-4 所示,在提升重物过程中,试判定起重机启动和制动时电动机转矩 T_M 和负载转矩 T_L 的符号。设重物提升时电动机旋转方向为 n 的正方向。

启动时:如图 0-4(a)所示,电动机拖动重物上升, T_M 与 n 正方向一致, T_M 取正号; T_L 与 n 方向相反, T_L 亦取正号。这时的运动方程式为

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s}$$

要能提升重物,必存在 $T_M > T_L$,即动态转矩 $T_d = T_M - T_L$ 和加速度 $a = dn/dt$ 均为正,系统加速运行。

制动时:如图 0-4(b)所示,仍是提升过程, n 为正,只是此时要电动机制止系统运动,所以, T_M 与 n 方向相反, T_M 取负号,而重物产生的转矩总是向下,和启动过程一样, T_L 仍取正号,这时运动方程式为

$$-\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n\}_{r/min}}{d\{t\}_s}$$

可见,此时动态转矩和加速度都是负值,它使重物减速上升,直到停止。制动过程中,系统中动能产生的动态转矩由电动机的制动转矩和负载转矩所平衡。

第三节 转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算

上节所介绍的是单轴拖动系统的运动方程式,但实际的拖动系统一般常是多轴拖动系统,如图 0-5 所示。这是因为许多生产机械要求低速运转,而电动机一般具有较高的额定转速。这样,电动机与生产机械之间就得装设减速机构,如减速齿轮箱或蜗轮蜗杆、皮带等减速装置。在这种情况下,为了列出这个系统的运动方程,必须先将各转动部分的转矩和转动惯量或直线运动部分的质量都折算到某一根轴上,一般折算到电动机轴上,即折算成图 0-3 所示的最简单的典型单轴系统,折算时的基本原则是折算前的多轴系统同折算后的单轴系统,在能量关系上或功率关系上保持不变。下面简单地介绍折算方法。

一、负载转矩的折算

负载转矩是静态转矩,可根据静态时功率守恒原则进行折算。

对于转动运动,如图 0-5(a)所示,当系统匀速运动时,生产机械的负载功率为

$$P'_L = T'_L \omega_L$$

式中, T'_L 和 ω_L ——生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T'_L 折算到电动机轴上的负载转矩为 T_L , 则电动机轴上的负载功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中, ω_M ——电动机转轴的角速度。

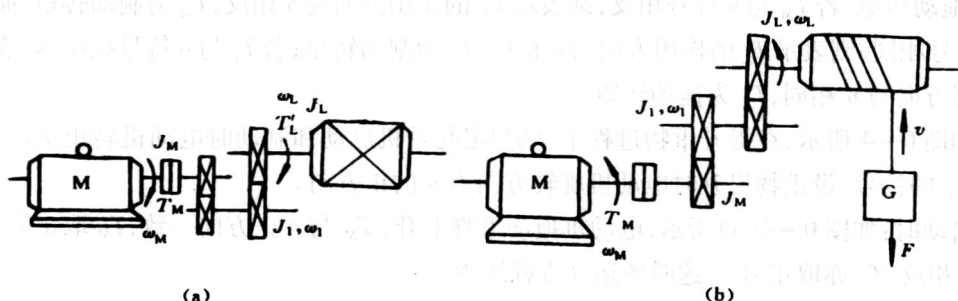


图 0-5 多轴拖动系统

(a) 旋转运动 (b) 直线运动

考虑到传动机构在传递功率的过程中有损耗,这个损耗可以用传动效率 η_c 来表示,即

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P'_L}{P_M} = \frac{T'_L \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T'_L \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T'_L}{\eta_c j} \quad (0-7)$$

式中, η_c ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率;

$j = \omega_M / \omega_L$ ——传动机构的速比。

对于直线运动,如图 0-5(b) 所示的卷扬机构就是一例。若生产机械直线运动部件的负载力为 F , 运动速度为 v , 则所需的机械功率为

$$P'_L = Fv$$

它反映在电动机轴上的机械功率为

$$P_M = T_L \omega_M$$

式中, T_L ——负载力 F 在电动机轴上产生的负载转矩。

如果是电动机拖动生产机械旋转或移动,则传动机构中的损耗应由电动机承担,根据功率平衡关系就有

$$T_L \omega_M = Fv / \eta_c$$

将 $\{\omega\}_{\text{rad/s}} = \frac{2\pi}{60} \{n\}_{\text{r/min}}$ 代入上式可得

$$\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = 9.55 \{F\}_{\text{N}} \{v\}_{\text{m/s}} / (\eta_c \{n_M\}_{\text{r/min}}) \quad (0-8)$$

式中, n_M ——电动机轴的转速。

如果是生产机械拖动电动机旋转,例如,卷扬机构下放重物时,电动机处于制动状态,这种情况下传动机构中的损耗则由生产机械的负载来承担,于是有

$$T_L \omega_M = Fv \eta'_c$$

或

$$\{T_L\}_{\text{N}\cdot\text{m}} = 9.55 \eta'_c \{F\}_{\text{N}} \{v\}_{\text{m/s}} / \{n_M\}_{\text{r/min}} \quad (0-9)$$

式中, η'_c ——生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

二、转动惯量和飞轮转矩的折算

由于转动惯量和飞轮转矩与运动系统的动能有关,因此,可根据动能守恒原则进行折算。对于旋转运动(如图 0-5(a)所示的拖动系统),折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (0-10)$$

式中, J_M, J_1, J_L ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的转动惯量;

$j_1 = \omega_M / \omega_1$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比;

$j_L = \omega_M / \omega_L$ ——电动机轴与生产机械轴之间的速比;

$\omega_M, \omega_1, \omega_L$ ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的角速度。

折算到电动机轴上的总飞轮转矩为

$$GD_Z^2 = GD_M^2 + \frac{GD_1^2}{j_1^2} + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (0-11)$$

式中, GD_M^2, GD_1^2, GD_L^2 ——电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮转矩。

当速比 j 较大时,中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 ,在折算后占整个系统的比重不大,实际工程中为了计算方便起见,多用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 或飞轮转矩 GD_M^2 的方法,来考虑中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮转矩 GD_1^2 的影响,于是有

$$J_Z = \delta J_M + \frac{J_L}{j_L^2} \quad (0-12)$$

$$\text{或} \quad GD_Z^2 = \delta GD_M^2 + \frac{GD_L^2}{j_L^2} \quad (0-13)$$

一般 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。

对于直线运动(如图 0-5(b)所示的拖动系统),设直线运动部件的质量为 m ,折算到电动机轴上的总转动惯量或总飞轮转矩分别为

$$J_Z = J_M + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_L}{j_L^2} + m \frac{v^2}{\omega_M^2} \quad (0-14)$$

$$\text{或} \quad \{GD_Z^2\}_{N \cdot m^2} = \{GD_M^2\}_{N \cdot m^2} + \frac{\{GD_1^2\}_{N \cdot m^2}}{j_1^2} + \frac{\{GD_L^2\}_{N \cdot m^2}}{j_L^2} + 365 \frac{\{G\}_N \{v^2\}_{(m/s)^2}}{\{n_M^2\}_{(r/min)^2}} \quad (0-15)$$

依照上述方法,就可把具有中间传动机构带有旋转运动部件或直线运动部件的多轴拖动系统,折算成等效的单轴拖动系统,将所求得的 T_L, GD_Z^2 代入式(0-4)就可得到多轴拖动系统的运动方程式

$$\{T_M\}_{N \cdot m} - \{T_L\}_{N \cdot m} = \frac{\{GD_Z^2\}_{N \cdot m^2}}{375} \frac{d\{n_M\}_{r/min}}{d\{t\}_s} \quad (0-16)$$

以此来研究机电传动系统的运动规律。

第四节 生产机械的机械特性

上面所讨论的电力拖动系统运动方程式中,负载转矩 T_L 可能是不变的常数,也可能是转速 n 的函数。同一转轴上负载转矩和转速之间的函数关系,称为生产机械的机械特性。为了便于和电动机的机械特性配合起来分析拖动系统的运行情况,今后提及生产机械的机械特性时,除特别说明外,均指电动机轴上的负载转矩和转速之间的函数关系,即 $n = f(T_L)$ 。

不同类型的生产机械在运动中受阻力的性质不同,其机械特性曲线的形状也有所不同,大体上可以归纳为以下几种典型的机械特性。

一、恒转矩型机械特性

此类机械特性的特点是负载转矩为常数,如图 0-6 所示。属于这一类的生产机械有提升机构、提升机的行走机构、皮带运输机以及金属切削机床等。

依据负载转矩与运动方向的关系,可以将恒转矩型负载转矩分为反抗转矩和位能转矩。

反抗转矩也称摩擦转矩,是因摩擦、非弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩,机床加工过程中切削力所产生的负载转矩就是反抗转矩。反抗转矩的方向恒与运动方向相反,运动方向发生改变时,负载转矩的方向也会随着改变,因而它总是阻碍运动的。按第二节中关于转矩正方向的约定可知,反抗转矩恒与转速 n 取相同的符号,即 n 为正方向时 T_L 为正,特性曲线在第一象限; n 为反方向时 T_L 为负,特性曲线在第三象限,如图 0-6(a)所示。

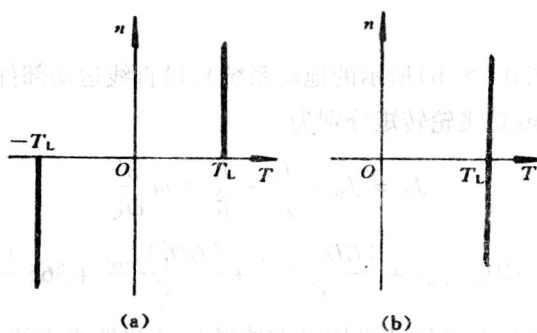


图 0-6 两种恒转矩型机械特性

(a) 反抗转矩 (b) 位能转矩

位能转矩与摩擦转矩不同,它是由物体的重力和弹性体的压缩、拉伸与扭转等作用所产生的负载转矩,卷扬机起吊重物时重力所产生的负载转矩就是位能转矩。位能转矩的作用方向恒定,与运动方向无关,它在某方向阻碍运动,而在相反方向便促进运动。卷扬机起吊重物时由于重力的作用方向永远向着地心,因此,由它产生的负载转矩永远作用在使重物下降的方向,当电动机拖动重物上升时, T_L 与 n 方向相反;而当重物下降时,

T_L 则与 n 方向相同。不管 n 为正向还是反向, T_L 都不变, 特性曲线在第一、四象限, 如图 0-6(b) 所示。不难理解, 在运动方程中, 反抗转矩 T_L 的符号总是正的; 位能转矩 T_L 的符号则有时为正, 有时为负。

二、离心式通风机机械特性

这一类型的机械是按离心力原理工作的, 如离心式鼓风机、水泵等, 它们的负载转矩 T_L 与 n 的平方成正比, 即 $T_L = Cn^2$, C 为常数, 如图 0-7 所示。

三、直线型机械特性

这一类机械的负载转矩 T_L 是随 n 的增加成正比地增大, 即 $T_L = Cn$, C 为常数, 如图 0-8 所示。实验室中作模拟负载用的他励直流发电机, 当励磁电流和电枢电阻固定不变时, 其电磁转矩与转速即成正比。

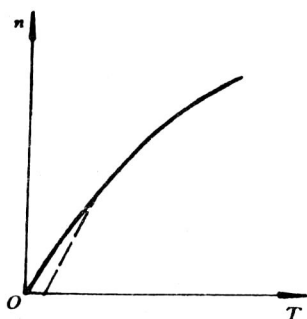


图 0-7 离心式通风机机械特性

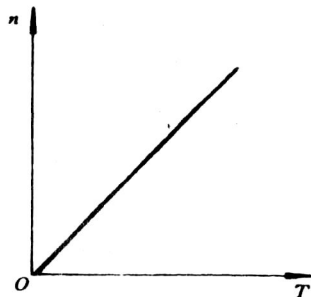


图 0-8 直线型机械特性

四、恒功率型机械特性

此类机械的负载转矩 T_L 与转速 n 成反比, 即 $T_L = K/n$, 或 $K = T_L n \propto P$ 为常数, 如图 0-9 所示。例如车床加工, 在粗加工时, 切削量大, 负载阻力大, 开低速; 在精加工时, 切削量小, 负载阻力小, 开高速。当选择这样的方式加工时, 不同转速下, 切削功率基本不变。

除了上述几种类型的生产机械外, 还有一些生产机械具有各自的转矩特性, 如带曲柄连杆机构的生产机械, 它们的负载转矩 T_L 是随转角 α 而变化的, 而球磨机、碎石机等生产机械, 其负载转矩则随时间作无规律的随机变化, 等等。

还应指出, 实际负载可能是单一类型的, 也可能是几种典型的综合, 例如, 实际通风机除了主要是通风机性质的负载特性外, 轴上还有一定的摩擦转矩 T_0 , 因此, 实际通风机的机械特性应为 $T_L = T_0 + Cn^2$, 如图 0-7 中的虚线所示。



图 0-9 恒功率型机械特性

第五节 电力拖动系统稳定运行的条件

电力拖动系统里,电动机与生产机械连成一体,为了使系统运行合理,就要使电动机的机械特性与生产机械的机械特性尽量相配合。配合好的最基本的要求是系统要能稳定运行。

电力拖动系统的稳定运行包含两重含义:一是系统应能以一定速度匀速运转,二是系统受某种外部干扰作用(如电压波动、负载转矩波动等)而使运行速度稍有变化时,应保证在干扰消除后系统能恢复到原来的运行速度。

为保证系统匀速运转,必要条件是电动机轴上的拖动转矩 T_M 和折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 大小相等,方向相反,相互平衡。从 $T-n$ 坐标平面上看,这意味着电动机的机械特性曲线 $n = f(T_M)$ 和生产机械的机械特性曲线 $n = f(T_L)$ 必须有交点,如图 0-10 所示,图中,曲线 1 为异步电动机的机械特性,曲线 2 为电动机拖动的生产机械的机械特性(恒转矩型的),两特性曲线有交点 a 和 b,交点常称为拖动系统的平衡点。

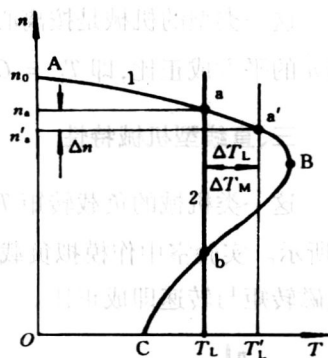


图 0-10 稳定工作点的判别

但是机械特性曲线存在交点只是保证系统稳定运行的必要条件,还不是充分条件,实际上只有 a 点才是系统的稳定平衡点,因为在系统出现干扰时,例如负载转矩突然增加了 ΔT_L ,则 T_L 变为 T'_L ,这时,电动机来不及反映,仍工作在原来的 a 点,其转矩为 T_M ,于是 $T_M < T'_L$,由拖动系统运动方程可知,系统要减速,即 n 要下降到 $n'_a = n_a - \Delta n$,从电动机机械特性的 AB 段可看出,电动机转矩 T_M 将增大为 $T'_M = T_M + \Delta T_M$,电动机的工作点转移到 a' 点。当干扰消除 ($\Delta T_L = 0$) 后,必有 $T'_M > T_L$ 迫使电动机加速,转速 n 上升,而 T_M 又要随 n 的上升而减小,直到 $\Delta n = 0$, $T_M = T_L$,系统重新回到原来的运行点 a;反之,若 T_L 突然减小, n 上升,当干扰消除后,也能回到 a 点工作,所以 a 点是系统的稳定平衡点。在 b 点,若 T_L 突然增加, n 要下降,从电动机机械特性的 BC 段可看出, T_M 要减小,当干扰消除后,则有 $T_M < T_L$ 使得 n 又要下降, T_M 随 n 的下降而进一步减小,使 n 进一步下降,一直到 $n = 0$,电动机停转;反之,若 T_L 突然减小, n 上升,使 T_M 增大,促使 n 进一步上升,直至越过 B 点进入 AB 段的 a 点工作。所以, b 点不是系统的稳定平衡点。由上可知,对于恒转矩负载,电动机的 n 增加时,必须具有向下倾斜的机械特性,系统才能稳定运行,若特性上翘,便不能稳定运行。

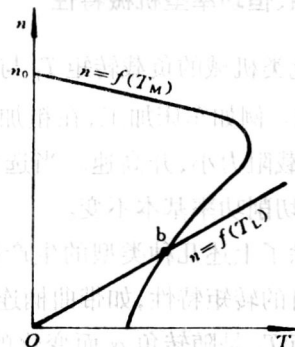


图 0-11 异步电动机拖动直流他励发电机工作时的特性

从以上分析可以总结出电力拖动系统稳定运行的必要充分条件是:

(1) 电动机的机械特性曲线 $n = f(T_M)$ 和生产机械的特性曲线 $n = f(T_L)$ 有交点(即拖

动系统的平衡点)；

(2) 当转速大于平衡点所对应的转速时, $T_M < T_L$, 即若干扰使转速上升, 当干扰消除后应有 $T_M - T_L < 0$; 而当转速小于平衡点所对应的转速时, $T_M > T_L$, 即若干扰使转速下降, 当干扰消除后应有 $T_M - T_L > 0$ 。

只有满足上述两个条件的平衡点, 才是拖动系统的稳定平衡点, 即只有这样的特性配合, 系统在受到外界干扰后, 才具有恢复到原平衡状态的能力而进入稳定运行。

例如, 当异步电动机拖动直流他励发电机工作, 具有图 0-11 的特性时, b 点便符合稳定运行条件, 因此, 在此情况下, b 点是稳定平衡点。

习题与思考题

1. 说明电力拖动系统运动方程式中的拖动转矩、静态转矩和动态转矩的概念。
2. 从运动方程式怎样看出系统是处于加速的、减速的、稳定的和静止的各种工作状态?
3. 试列出以下几种情况下(见 0-12 图)系统的运动方程式, 并说明系统的运行状态是加速、减速还是匀速?(图中箭头方向表示转矩的实际作用方向)

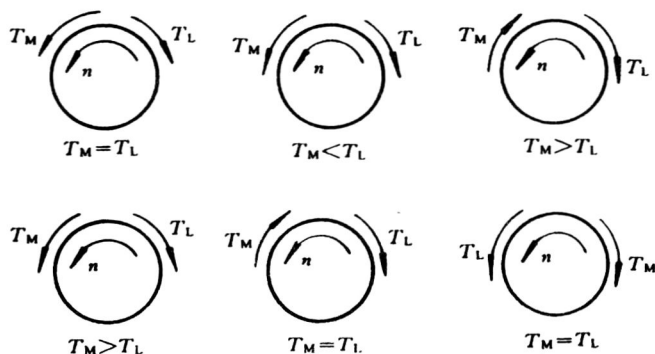


图 0-12

4. 多轴拖动系统为什么要折算成单轴拖动系统? 转矩折算依据什么原则? 转动惯量折算依据什么原则?
5. 为什么在一个多轴拖动系统中低速轴转矩大? 高速轴转矩小?
6. 为什么电力拖动系统中低速轴的 GD^2 比高速轴的 GD^2 大得多?
7. 如图 0-5(a) 所示, 电动机轴上的转动惯量 $J_M = 2.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n_M = 900 \text{ r/min}$; 中间传动轴的转动惯量 $J_1 = 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n_1 \approx 300 \text{ r/min}$; 生产机械轴的转动惯量 $J_L = 16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 转速 $n_L = 60 \text{ r/min}$ 。试求折算到电动机轴上的等效转动惯量。
8. 如图 0-5(b) 所示, 电动机转速, $n_M = 950 \text{ r/min}$, 齿轮减速箱的传动比 $j_1 = j_2 = 4$, 卷筒直径 $D = 0.24 \text{ m}$, 滑轮的减速比 $j_3 = 2$, 起重负荷力 $F = 100 \text{ N}$, 电动机的飞轮转矩 $GD_M^2 = 1.05 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 齿轮、滑轮和卷筒总的传动效率为 0.83。试求提升速度 v 和折算到电动机轴上的静态转矩 T_L 以及折算到电动机轴上整个拖动系统的飞轮惯量 GD_z^2 。