

机械设计制造及其自动化专业系列教材

机电传动及控制

主编 / 路敦民 王克义 崔洪斌 主审 / 张立勋

MECHANICAL & ELECTRIC
TRANSMISSION AND CONTROL



哈尔滨工程大学出版社

●机械设计制造及其自动化专业系列教材

机电传动及控制

主 编 路敦民 王克义 崔洪斌

主 审 张立勋

哈尔滨工程大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机电传动及控制/路敦民,王克义,崔洪斌主编.
哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005
ISBN 7-81073-753-8

I.机… II.①路…②王…③崔… III.电力传
动控制设备 IV.TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 108409 号

内 容 简 介

本书共分 8 章。绪论简要介绍机电传动系统的特点及发展历史;第 1 章介绍机电传动系统的动力学基础;第 2 章介绍直流电动机的工作特性;第 3 章介绍交流电动机的工作特性;第 4 章介绍步进电动机的特性;第 5 章介绍机电传动系统电器控制;第 6 章介绍电动机的选择;第 7 章介绍直流调速系统。

本书是高等学校机械设计制造及其自动化专业本科生教材,也可供有关专业师生和技术人员参考。

哈尔滨工程大学出版社出版发行
哈尔滨市南通大街145号 哈尔滨工程大学11号楼
发行部电话:(0451)82519328 邮编:150001
新华书店经销
哈尔滨工业大学印刷厂印刷

*

开本 787mm×1 092mm 1/16 印张 11.25 字数 268 千字

2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—3 000 册

定价:15.00 元

前 言

“机电传动及控制”是高等学校机械设计制造及其自动化专业的一门选修课程,教学时数为 32 学时。本课程的作用和任务是通过课程的学习,使学生了解机电传动的基本知识;了解直流调速系统的基本概念、组成;掌握直流、交流电动机,以及步进电动机的工作原理、应用和选择方法;机电传动系统电器控制等内容。

本教材的内容主要包括:机电传动系统的动力学基础,直流电动机、交流电动机、步进电动机的各种特性,机电传动系统中电动机的选择,机电传动系统电器控制,直流调速基础等。重点介绍了机电传动系统的动力学方程式及多轴传动系统转矩和转动惯量的折算方法;直流他励电动机、三相异步电动机的基本工作原理和机械特性;电动机容量的选择原则、选择方法,电器控制的基本电路及交流电动机的控制电路。

全书共分 8 章,绪论及第 1、2 章由路敦民编写,第 3、4 章由崔洪斌编写,第 5、6、7 章由王克义编写,全书由路敦民统稿。哈尔滨工程大学张立勋教授担任主审。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2005 年 8 月

目 录

0 绪 论	1
0.1 机电传动的特点及其在国民经济中的应用	1
0.2 机电传动系统的发展	2
0.3 机电传动及控制系统的分类和特点	3
0.4 本课程的性质、内容及任务	4
1 机电传动系统动力学基础	5
1.1 机电传动系统的动力学方程	5
1.2 负载转矩和惯量的折算	7
1.3 负载的机械特性	14
1.4 机电传动系统稳定运行的条件	17
习题与思考题	18
2 直流电动机的工作特性	22
2.1 直流电动机的基本结构和工作原理	22
2.2 直流他励电动机的机械特性	25
2.3 直流他励电动机的启动特性	30
2.4 直流他励电动机的调速特性	34
2.5 直流他励电动机的制动特性	40
2.6 直流他励电动机传动系统过渡过程分析	48
2.7 无刷直流电动机	51
习题与思考题	54
3 交流电动机的工作特性	58
3.1 三相异步电动机的结构和工作原理	58
3.2 三相异步电动机的定子电路和转子电路	66
3.3 三相异步电动机的转矩与机械特性	67
3.4 三相异步电动机的启动特性	73
3.5 三相异步电动机的调速特性	78
3.6 三相异步电动机的制动特性	81
3.7 单相异步电动机	84
3.8 同步电动机	88
3.9 直线异步电动机	90
习题与思考题	92
4 步进电动机	95
4.1 步进电动机的特点	95
4.2 步进电动机的工作原理	96
4.3 步进电动机的环形分配器及驱动	98

4.4	步进电动机的选用	104
	习题与思考题	104
5	机电传动系统电器控制	105
5.1	常用低压控制电器	105
5.2	常用基本控制线路	127
5.3	笼型异步电动机启动控制线路	133
5.4	异步电动机正反转控制线路	137
5.5	异步电动机的调速控制线路	139
5.6	异步电动机制动控制线路	141
	习题与思考题	144
6	机电传动系统中电动机的选择	147
6.1	电动机种类、形式、电压和转速的选择	147
6.2	电动机容量的选择	148
	习题与思考题	153
7	直流自动调速系统	155
7.1	调速系统动态性能指标	155
7.2	单闭环直流调速系统	156
7.3	闭环直流调速系统稳态参数的计算	162
	习题与思考题	163
附录 1	常用电气图形符号新旧对照表	165
附录 2	电气设备常用基本文字符号(摘自 GB7159 - 87)	169
附录 3	电气设备常用辅助文字符号新旧对照表	171
参考文献	172

0 绪 论

0.1 机电传动的特点及其在国民经济中的应用

人类科技发展史经历了从简单手工工具到复杂的机械设备的漫长历程。在动力方面,古代利用人力、畜力、自然力(如风力、水力等)。在瓦特发明蒸汽机后,蒸汽机迅速成为机器的动力,极大地推动了生产力的发展。后来出现了电能,由于其具有适宜大量生产、集中管理、远距离传输和自动控制等优点,从而取代了蒸汽动力而成为工业发展的主要动力,推动了第二次工业革命的发展。当今时代,电能在现代化工农业生产、交通运输、科学技术、国防建设以及日常生活中的应用非常广泛。

电能的广泛应用使轻便灵活的电动机成为机械的主要的动力源。电能的产生主要是靠火电厂或水电站的交流发电机,它们把其他形式的能源转化成电能,而电动机是在国民经济和人民生活中应用最广的用电设备。以电动机为原动机构成的机电传动系统是现代化生产中必不可少的传动系统,相比其他拖动方法(例如风力拖动、水力拖动、内燃机拖动等),具有许多无法比拟的优点,最主要的优点是启动、调速、制动、反转等都比其他方法容易实现,而且可获得所需的静态特性和动态特性,特别是数控技术和计算机技术的应用,进一步提高了机电传动的性能指标,使采用机电传动时的生产率和产品质量进一步提高。它为生产过程的自动化提供了十分有利的条件,是生产过程电气化、自动化的重要前提。

机电传动(又称电力拖动或电力传动),是以电动机作为原动机驱动生产机械的系统的总称。机电传动系统是将电能转变为机械能的装置,通过对电动机的控制,用以实现生产机械的启动、停止、速度调节以及各种生产工艺过程的要求。

机电传动系统其主要特点是功率范围极大,单个设备的功率可从几毫瓦到几百兆瓦;调速范围极宽,转速从每分钟几转到每分钟几十万转,在无变速机构的情况下调速范围可达10 000;适用范围极广,可适用于任何工作环境与各种各样的负载。机电传动与国民经济、人民生活有着密切的联系并起着重要的作用,广泛用于冶金、机械、轻工、矿山、港口、石化、航空航天等各个行业以及日常生活之中。它既有轧钢机、起重机、泵、风机、精密机床等大型调速系统,也有空调机、电冰箱、洗衣机等小容量调速系统。据统计,机电传动系统的用电量占我国总发电量的60%以上。据预测,从2000年至2010年我国机电传动产品市场需求年增长率约为15%,市场前景广阔。因此机电传动是国民经济中充满活力的基础技术和高新技术,它的发展和进步已成为更经济地使用材料、能源及提高劳动生产率的合理手段,成为促进国民经济不断发展的重要因素,成为国家现代化的重要标志之一。正确使用机电传动系统并使之进一步向前发展,对国民经济建设具有十分重要的现实意义。

0.2 机电传动系统的发展

0.2.1 传动方式的发展历程

初期的机电传动都是成组传动的,即一台电动机拖动成组的生产机械。这种方式生产效率较低,劳动条件较差。以后改进成单机传动,即一台电动机拖动一台生产机械。进而发展成多机传动,即多台电动机分别拖动生产机械的多个工作部位。这是从传动效率角度来看机电传动的演变过程。

0.2.2 控制手段的发展

从控制手段的发展来看,早期机械由操作者手动控制。操作者通过眼、耳等感觉器官观察机械的运行状态,同时运用其经验和知识进行分析、判断,通过手脚操作机械。后来一些简单的机械控制机构代替了操作者的部分劳动,最后发展成为电气控制。对于开关量的自动控制,从20世纪20到30年代起,开始采用继电器、接触器和行程开关等控制电器,实现对控制对象的启动、停止以及有级调速等控制。这种电器控制装置适用于动作比较简单、控制规模小的场合,具有结构简单、价格低廉、维护方便、抗干扰强等特点,因此广泛应用于各类机床和机械设备上。采用这种控制装置可以方便地实现生产过程自动化,而且还可以实现集中控制和远距离控制。继电接触控制线路的缺点是:由于是固定接线形式,故在进行程序控制时,改变控制程序不方便,灵活性差;采用有触点的开关动作,工作频率低,触点易损坏,可靠性差,另外它的控制速度慢,控制精度也低。尽管如此,这种控制装置仍能满足在一定范围内的机械设备的自动控制。目前,继电器接触器控制仍然是机床和其他机械设备最基本的电气控制形式之一。

20世纪50年代出现了二极管、晶体管、集成电路等半导体逻辑元件,组成了可靠性较高的无触点逻辑控制装置。这种控制装置与继电器接触器控制装置相比较,具有体积小、可靠性好、反应速度快、寿命长等优点。然而这种装置也是固定接线,仍不能解决通用性和灵活性问题。此方法更适用于专机的专用控制系统。

20世纪60年代电子计算机的出现及其在工业控制中的大量应用,大大提高了控制装置的通用性和灵活性,而且它还具有采样速度快和控制功能强等优点。但是,对于开关量的自动控制来说,它不需要复杂的数学运算,而要求编制程序简单,使用维修方便。如果采用通用的电子计算机来完成开关量的控制,则存在“大材小用”和不经济等问题。因此,需要一种比电气控制装置和半导体逻辑控制装置通用性和灵活性强,又比计算机控制装置简便而经济的开关量控制装置,顺序控制器就是适应这样的需要而产生的。

顺序控制器是通过组合逻辑元件插接或编程来实现继电接触控制线路功能的装置。顺序控制器的类型较多,它可以满足程序经常改变的控制要求,使机床和机械设备的控制系统具有较大的灵活性和通用性。它的主要优点是:通用性强,程序可变,编程容易,可靠性高和使用、维护方便。但这种控制系统的输入/输出端数目往往受到矩阵板本身结构的限制,而且抗干扰性差,目前已较少应用。

目前,由于大规模集成电路的发展,以及微处理机的价格低廉,所以采用微处理机组成

的可编程序控制器已获得了广泛的应用。可编程序控制器其核心为可编程序逻辑控制器,简称 PLC。它是 1969 年才开始发展的。它按照成熟而有效的继电器接触控制概念和设计思想,利用不断发展的新技术、新电子器件,逐步形成了具有特色的各种系列产品。

尽管机电控制已向无触点、连续控制、弱电化、微机化的方向发展,但由于继电器接触器控制系统所用的控制电器结构简单、价格便宜,能够满足生产设备一般生产的需要,目前仍得到广泛的应用。继电器接触器控制的设计方法是设计机械设备过程控制的基础。掌握了它的设计方法后,学习其他的控制方法便更容易。因而本书中介绍的是继电器接触器控制的机电传动系统。

0.3 机电传动及控制系统的分类和特点

机电传动可分为不调速和调速两大类。按照电动机的类型不同,机电传动又分为直流与交流传动两大类。直流机电传动与交流机电传动在 19 世纪先后诞生,但当时的机电传动系统是不调速系统。随着社会化大生产的不断发展,生产制造技术越来越复杂,对生产工艺的要求越来越高。这就要求生产机械能够在工作速度、快速启动和制动、正反转运行等方面具有较好的静态和动态性能,从而推动了电动机的调速技术不断向前发展。

由于直流电动机的调速性能和转矩控制性能较好,20 世纪 30 年代起,就开始使用直流调速系统。由最初的旋转变流机组控制发展为电机放大机、磁放大机控制,再进一步用晶闸管、电力晶体管控制,使系统快速性、可靠性和经济性不断提高,应用非常广泛。然而,由于直流电动机具有电刷和换向器,所以制造工艺复杂,成本高,维护麻烦,单机容量和转速都受到限制,它的局限性也逐渐显露出来。

交流电动机中的异步电动机,具有结构简单、制造容易、价格低廉、运行可靠、维护方便、效率较高等一系列优点,早就普遍应用于恒速运行的生产机械中。由于其调速性能和转矩控制性能不够理想,长期以来难以推广使用。近三十年来,由于电力电子技术的发展,才出现各种类型的交流调速系统。例如:变频调速、串级调速、磁场定向控制调速和无换向器电动机调速等系统。发明矢量控制之后,使得交流调速系统逐步具备了宽的调速范围、高的稳态精度、快的动态响应以及在四象限作可逆运行等良好的技术性能,在调速性能方面完全可与直流调速系统相媲美,所以才逐渐得到应用。计算机控制技术和现代控制理论应用于交流调速系统后,为其发展创造了更加有利的条件,使交流调速系统成为当前发展和研究的重点。采用微机控制以后,用软件实现矢量控制算法,使硬件电路规范化。从而降低了成本,提高了可靠性,而且还有可能进一步实现更复杂的控制技术。电力电子和微机控制技术的迅速进步是推动交流调速系统不断更新的动力。交流传动正逐步取代直流传动而成为机电传动的主流。不过由于交流调速控制系统比较复杂,中、小容量的调速装置价格偏高,实现四象限运行要比直流传动复杂。交流调速的上述缺点如果不能完全克服,直流调速仍会在许多场合继续发挥作用。

0.4 本课程的性质、内容及任务

机电传动及控制是高等学校机械设计制造及其自动化专业的一门选修课。本课程的教学内容主要包括:机电传动系统的动力学基础,直流电动机、交流电动机、步进电动机的各种特性,机电传动系统中电动机的选择,机电传动系统电器控制,直流自动调速系统等。

本课程的作用和任务是使学生了解机电传动的基本知识,了解电机直流自动调速系统;掌握直流、交流电动机,步进电动机的工作原理、应用和选择方法,机电传动系统电器控制等内容。

1 机电传动系统动力学基础

1.1 机电传动系统的动力学方程

机电传动系统是一个机、电统一的运动系统,只有为其建立起动力学方程式,才能深入地分析和研究其运动特性。在研究由电动机和生产机械所构成的机电传动系统的运动规律时,为了抓住本质,通常先研究最简单的,即只包

含一根轴的单轴机电传动系统,如图 1-1 所示。简单的机电传动系统由电动机 M 产生转矩 T_M ,用来克服生产机械的负载转矩 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,角速度 ω 保持不变,角加速度 $d\omega/dt$

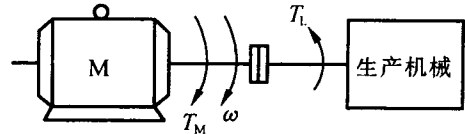


图 1-1 单轴拖动系统

等于零,即 $T_M = T_L$ 时, ω 为常数, $d\omega/dt = 0$, 这种运动状态称为静态或稳态。当 $T_M \neq T_L$ 时,加速度就不等于零, 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 和 $(T_M - T_L)$ 的值有关。把上述的这些关系用方程式表示,即为

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

- 式中 T_M ——电动机输出的转矩, $N \cdot m$;
 T_L ——单轴传动系统的负载转矩, $N \cdot m$;
 J ——单轴传动系统的转动惯量, $kg \cdot m^2$;
 ω ——单轴传动系统的角速度, rad/s 。

式(1-1)就是单轴机电传动系统的动力学方程式,该式也可根据转动系统的牛顿第二定律获得。式(1-1)在工程上应用不太方便,实际计算中,往往不用转动惯量 J , 而用工程上常用的飞轮惯量 GD^2 。由理论力学可知 $J = m\rho^2 = \frac{1}{4} mD^2$, 因为 $G = mg$, 所以

$$J = \frac{1}{4} mD^2 = \frac{1}{4} \frac{G}{g} D^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-2)$$

- 式中 g ——重力加速度, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;
 m ——旋转部分的质量, kg ;
 G ——系统旋转部分的重量, N ;
 ρ ——系统旋转部分的惯性半径, m ;
 D ——系统旋转部分的惯性直径, m 。

另外,旋转运动角速度为
$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (1-3)$$

式中 ω ——角速度, rad/s ;

n ——转速, r/min。

将式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1),可得

$$T_M - T_L = J \frac{dw}{dt} = \frac{GD^2}{4g} \cdot \frac{dw}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式(1-2)中 $GD^2 = 4gJ$,称为飞轮惯量(或飞轮矩),这里 GD^2 被看成是一个整体,不再理解为 G 与 D^2 的乘积。

式(1-4)中,常数 375 包含着 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$,故它有加速度的量纲。动力学方程式是研究机电传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 dn/dt 为正,传动系统为加速运动;当 $T_M < T_L$ 时, 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

$$T_d = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-5)$$

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

$$T_M - T_L = T_d \text{ 或 } T_M = T_L + T_d \quad (1-6)$$

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,电动机输出转矩的大小,仅由电动机所带的负载(生产机械)所决定。

由于电动机转矩性质及运行状态的不同,以及工作机械负载性质的不同,电动机转矩 T_M 和负载转矩 T_L 不仅大小不同,方向也是变化的。在动力学方程式中它们所取的符号也不同。通常以电动机轴的旋转方向为参考来确定转矩的正负。设电动机某一旋转方向为正,则规定电动机的转矩 T_M 的方向与所规定的正方向相同时为正,相反时为负。 T_M 为正时是驱动转矩, T_M 为负时是制动转矩。负载转矩 T_L 的规定符号与电动机转矩 T_M 的规定符号相反,即与所规定的正方向相同时为负,相反时为正。以上符号关系可以用图 1-2 所示轴端图来表示。图中选择逆时针旋转方向为正。

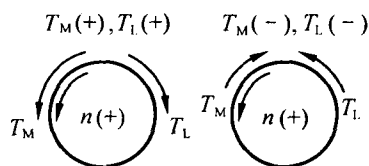


图 1-2 轴端图

以上符号关系可以用图 1-2 所示轴端图来表示。图中选择逆时针旋转方向为正。

例 1-1 图 1-3 所示的各图中, T_M 、 T_L 、 n 均为实际方向,试:

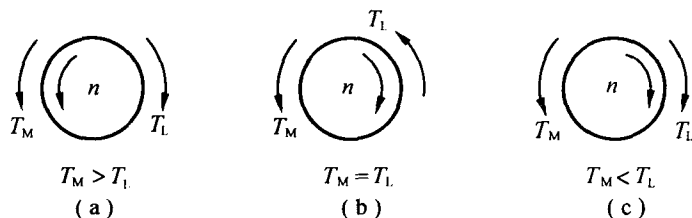


图 1-3 例 1-1 图

(1)根据图示 T_M 、 T_L 、 n 的方向,列出各机电传动系统的动力学方程式;

(2)说明各图中 T_M 、 T_L 是驱动转矩,还是制动转矩;

(3)根据各图中所示 T_M 、 T_L 、 n 的方向,说明各系统的运行状态是加速、减速还是匀速。

解 (1)因按正方向的约定:当 T_M 与 n 同向时, T_M 为正;当 T_L 与 n 反向时, T_L 为正。

故:图 1-3(a)为 $T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$;图 1-3(b)为 $-T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$;图 1-3(c)为 $-T_M +$

$$T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}。$$

(2)因为当 T_M 与 n 同向时, T_M 为驱动转矩; T_L 与 n 反向时, T_L 为制动转矩。故:图 1-3(a)中 T_M 为驱动转矩, T_L 为制动转矩;图 1-3(b)中 T_M 、 T_L 均为制动转矩;图 1-3(c)中 T_L 为驱动转矩, T_M 为制动转矩。

(3)因为当动态转矩 $T_d > 0$ 时,为加速;当 $T_d < 0$ 时,为减速;当 $T_d = 0$ 时,为匀速。故:图 1-3(a)为加速运行状态;图 1-3(b)为匀速运行状态;图 1-3(c)为减速运行状态。

1.2 负载转矩和惯量的折算

在实际应用中,很多生产机械都是采用多轴机电传动系统。这是因为许多生产机械为了满足其工艺要求,例如需要较低的转速,或者需要平移、升降等不同的运动形式,而在制造电动机时,为了合理地利用材料和降低成本,除特殊情况外(例如力矩电动机,额定转速较低;又如直线电动机,输出直线位移),一般都做成额定转速较高的旋转电动机,因此在工作机械与电动机之间必须装设变速机构,如齿轮变速、蜗轮蜗杆变速、皮带变速等。

分析多轴传动系统,可以按照分析单轴系统的方法,分别列写各根轴的动力学方程式,以及各轴之间相互联系的关系式,然后再将这些方程式联立,即可求得系统的运动规律。但是这种方法比较复杂,传动轴越多,列写的方程式就越多,工作量就越大。实际上分析和计算多轴传动时,通常采用折算的方法,将所有轴的转矩和转动惯量折算到同一根轴上(通常折算到电动机轴上),将系统等效为单轴系统,然后使用基本动力学方程式求解。折算的原则是保持传递的功率不变和系统储存的动能不变。

1.2.1 旋转运动

图 1-4 所示为一工作机械作旋转运动的多轴系统,工作机械转矩为 T_g ,折算到电动机轴上后为 T_L 。折算的原则是系统传递的功率不变。传动机构的损耗在传动效率 η_c 中考虑。

1. 负载转矩的折算

(1)电动机工作在电动状态

对于旋转运动,如图 1-4 所示,当系统匀速运动时,生产机械的负载功率为

$$P_g = T_g \omega_L$$

式中, T_g 和 ω_L 分别是生产机械的负载转矩和旋转角速度。

设 T_g 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

$$P_L = T_L \omega_M$$

式中, ω_M 电动机转轴的角速度。

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

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P_g}{P_L} = \frac{T_g \omega_L}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩, 即

$$T_L = \frac{T_g \omega_L}{\eta_c \omega_M} = \frac{T_g}{\eta_c i} \quad (1-7)$$

式中 η_c ——电动机拖动生产机械运动时的传动效率;

$i = \omega_M / \omega_L$ ——传动机构的速比。

(2) 电动机工作在发电状态

电动机工作于发电状态时, 工作机构带动电动机旋转, 功率由工作机构向电动机传送, 传动损耗由工作机构承担, 传送到电动机的功率小于工作机构轴上的功率, 按传递功率不变的原则, 可得

$$T_L = \frac{T_g \eta'_c}{i} \quad (1-8)$$

式中, η'_c 为生产机械拖动电动机运动时的传动效率。

式(1-8)中各符号的含义与式(1-7)中相同, 其中总的速比 $i = \frac{\omega_M}{\omega_L}$ 为电动机轴与工作机构轴的转速比, 在多轴电力拖动系统中, 应为各级速比的乘积, 即 $i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \cdots$ 。一般设备中, 电动机的转速高于工作机构的转速, 即 $i > 1$, 因而工作机构的转矩折算到电动机轴上变小了许多。总的传动效率在多轴电力拖动系统中, 应为各级传动效率的乘积, 即 $\eta_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdots$ 。各级传动效率的大小随各级传动机构的不同而不同。

2. 惯量的折算

由于转动惯量(或飞轮惯量)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 1-4 所示的拖动系统), 折算到电动机轴上的总转动惯量为

$$J_a = J_M + \frac{J_1}{i_1^2} + \frac{J_g}{i_L^2} \quad (1-9)$$

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

$i_1 = \omega_M / \omega_1$ ——电动机轴与中间传动轴之间的速比;

$i_L = \omega_M / \omega_L$ ——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惯量为

$$(GD^2)_a = (GD^2)_M + \frac{(GD^2)_1}{i_1^2} + \frac{(GD^2)_g}{i_L^2} \quad (1-10)$$

式中, $(GD^2)_M, (GD^2)_1, (GD^2)_g$ 分别为电动机轴、中间传动轴、生产机械轴上的飞轮惯量。

当速比 i 较大时,中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮惯量 $(GD^2)_1$,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,多采用适当加大电动机轴上的转动惯量 J_M 或飞轮惯量 $(GD^2)_M$ 的方法,来考虑中间传动机构的转动惯量 J_1 或飞轮惯量 $(GD^2)_1$ 的影响,于是有

$$J_a = \delta J_M + \frac{J_g}{i_L^2} \quad (1-11)$$

或

$$(GD^2)_a = \delta (GD^2)_M + \frac{(GD^2)_g}{i_L^2} \quad (1-12)$$

一般 $\delta = 1.1 \sim 1.25$ 。为更简便起见,可将负载项也加以估算,有

$$J_a = \delta J_M \text{ 或 } (GD^2)_a = \delta (GD^2)_M$$

此时 δ 应稍微增大一些,可取 $\delta = 1.2 \sim 1.3$ 。

1.2.2 平移运动

某些生产机械的工作机构是作平移运动的。例如图 1-5 中刨床的工作台和工件,就是由电动机通过齿轮变速后,再通过齿轮与齿条啮合带动作平移运动的。

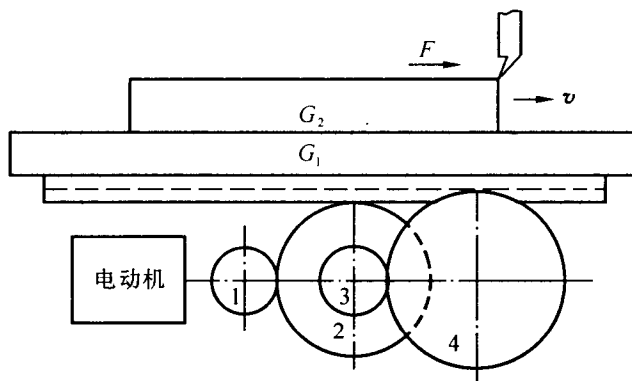


图 1-5 刨床的传动系统图

1. 转矩的折算

设切削时工作台的直线速度为 v ,刨刀作用在工件上相遇的阻力(等于切削力)为 F ,则切削时的切削功率为 $P = Fv$ 。折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 应满足折算前后功率不变的原则,考虑传动机构中的传动损耗,应有

$$T_L = \frac{Fv}{\eta_c} \cdot \frac{1}{\omega_M} = \frac{Fv}{\eta_c} \cdot \frac{60}{2\pi n_M} = 9.55 \frac{Fv}{\eta_c n_M} \quad (1-13)$$

式中 T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩, $N \cdot m$;

F ——工作机构作直线运动时所克服的阻力, N ;

v ——工作机构的线速度, m/s ;

n_M ——电动机的转速, r/min ;

η_c ——总的传动效率。

2. 惯量的折算

设平移运动部分的总重量 $G_L = m_L g$, 则平移运动部分折算前的动能为

$$\frac{1}{2} m_L v^2 = \frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v^2$$

设其折算到电动机轴上的转动惯量为 J_L , 相应的飞轮惯量为 $(GD^2)_L$, 则折算到电动机轴上后的动能为 $\frac{1}{2} J_L \omega_M^2 = \frac{1}{2} \frac{(GD^2)_L}{4g} \left(\frac{2\pi n_M}{60} \right)^2$, 根据折算前后动能不变的原则, 可得

$$\frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v^2 = \frac{1}{2} \frac{(GD^2)_L}{4g} \left(\frac{2\pi n_M}{60} \right)^2$$

整理则得折算到电动机轴上的飞轮矩的计算公式

$$(GD^2)_L = 4 \frac{G_L v^2}{\left(\frac{2\pi n_M}{60} \right)^2} = 365 \frac{G_L v^2}{n_M^2} \quad (1-14)$$

传动机构中其他轴的飞轮矩 GD^2 的折算, 与前文的计算方法相同。

1.2.3 升降运动

有些生产机械的工作机构运行时作升降运动, 例如起重机械、提升机、电梯等, 虽然亦为直线运动, 但是转矩的折算与平移运动有所不同。

1. 转矩的折算

图 1-6 为一起重机的示意图。电动机通过齿轮减速带动一个卷筒, 卷筒上的钢丝绳悬挂一重物。设重物的质量为 m_L 、重量为 G_L , 提升或下降线速度为 v 。

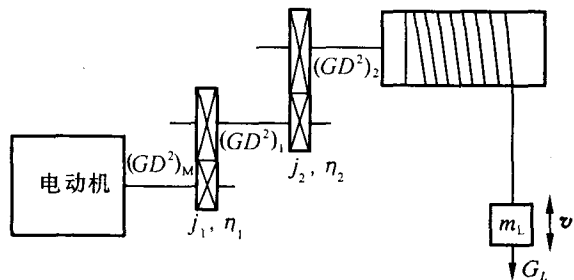


图 1-6 起重机的传动系统示意图

(1) 提升运动

提升运动时, 电动机带动负载, 功率由电动机传给负载, 传动损耗由电动机承担。根据传递功率不变的原则, 可得

$$T_L \omega_M = \frac{G_L v}{\eta_c}$$

$$T_L = \frac{G_L v}{\eta_c \omega_M} = \frac{G_L v}{\eta_c \frac{2\pi n_M}{60}} = 9.55 \frac{G_L v}{\eta_c n_M} \quad (1-15)$$

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

G_L ——提升重物的重力, N ;

v ——提升重物的线速度, m/s ;

n_M ——电动机的转速, r/min ;

η_c ——提升时的传动效率。

(2) 下降运动

此时负载带动电动机, 功率的传送方向是由负载到电动机, 传动损耗由负载承担。根据传递功率不变原则, 可得

$$T_L \omega_M = G_L v \eta'_c$$

$$T_L = \frac{G_L v}{\omega_M} \eta'_c = \frac{G_L v}{2\pi n_M} \eta'_c = 9.55 \frac{G_L v}{n_M} \eta'_c \quad (1-16)$$

式中各符号的含义与式(1-15)中相同,只有 η'_c 是下放时的传动效率,与提升同一重物时的传动效率 η_c 大小不等,它们的关系是

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (1-17)$$

这一关系可以证明如下。因为提升和下放同一重物时,可以认为传动损耗 ΔP 不变,则提升时的损耗为 $\Delta P = \frac{G_L v}{\eta_c} - G_L v = G_L v \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right)$, 下放时的损耗为 $\Delta P = G_L v - G_L v \eta'_c = G_L v (1 - \eta'_c)$ 。由于 $G_L v \left(\frac{1}{\eta_c} - 1 \right) = G_L v (1 - \eta'_c)$, 故有 $\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c}$ 。此式表明,如果在轻载或空载提升效率 $\eta_c < 0.5$ 时,则下放时,效率 $\eta'_c < 0$, 电动机轴上输入的功率 $G_L v \eta'_c$ 为负值,说明此时工作机械的功率不足以克服传动机构的损耗功率,电动机仍工作在电动状态,输出功率与工作机构共同承担传动损耗。电梯空载下放轿箱时就属于这种情况。

2. 惯量的折算

转动惯量和飞轮惯量的折算与传动损耗或效率无关,所以折算方法与平移运动时相同。

例 1-2 有一机电传动系统,减速机构为两级减速箱,其示意图如图 1-7 所示。已知齿轮齿数之比 $Z_2/Z_1 = 3$, $Z_4/Z_3 = 5$, 减速机构的效率 $\eta_c = 0.92$, 各齿轮的飞轮惯量分别为 $(GD^2)_1 = 29.4 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, $(GD^2)_2 = 78.4 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, $(GD^2)_3 = 49 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, $(GD^2)_4 = 196 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, 电动机的飞轮惯量 $(GD^2)_M = 294 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, 负载的飞轮惯量 $(GD^2)_g = 450.8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$, 负载转矩 $T_g = 470.4 \text{ N}\cdot\text{m}$, 试求:

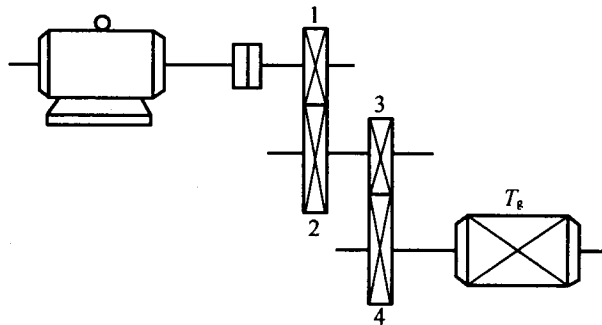


图 1-7 两级传动系统

- (1) 折算到电动机轴上的负载转矩;
- (2) 折算到电动机轴上的系统总的飞轮惯量。

解 (1) 折算负载转矩为

$$T_L = T_g \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} \frac{1}{\eta_c} = 470.4 \text{ N}\cdot\text{m} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{0.92} = 34.1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

- (2) 折算到电动机轴系统总的飞轮惯量为