

机床电力拖动与控制

机床电力拖动与控制

王光铨 主编

机械工业出版社

机械工业出版社

机械工业出版社

机床电力拖动与控制

主编 王光铨
编者 夏道智
石磊
毛军红



机械工业出版社

本书主要介绍数控机床、机器人和坐标测量机等数控机床用拖动电机的结构,工作原理和静、动态特性,兼述普通机床用继电器-接触器控制系统线路图的阅读、分析和设计方法。

电力拖动部分包括电力拖动系统运动方程式及其应用、直流拖动系统、交流无级调速系统、步进电动机和直线电动机等内容。

机床用继电器-接触器控制系统包括普通机床电气控制线路分析,可编程序控制器、继电器-接触器控制线路设计,机床电气设备可靠性设计等内容。

本书可作为高等院校机械制造工艺与设备专业、机械电子工程专业以及其他相关专业的教材,对工厂中的工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

机床电力拖动与控制/王光铨主编. —北京:机械工业出版社, 1997. 6
ISBN 7-111-05488-1

I. 机… 王… ①电力传动-机床②机床-电气控制 N. TG504.34

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第23310号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:韩雪清 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟
盛秀峰

封面设计:范如玉 责任印制:王国光

机械工业出版社京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年6月第1版第1次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·10.75印张·254千字

0 001—4 500册

定价:14.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

本书是笔者多年在西安交通大学机械制造工艺与设备专业（包括“机械电子工程”教改班）讲授“机床电气自动控制”课程的基础上，邀请西安理工大学、西安交通大学的几位老师协力编写而成的。

本书与目前国内常见的同类教材相比，内容差异比较显著。后者多数以讲授机床的继电器-接触器控制系统为主。笔者经多年对某些工业发达国家工科大学机械制造专业的同类型教材发展情况的了解，发现下列几点值得重视的情况。

(1) 在美国、日本、英国等工业发达国家，很难找到一本以讲授机床的继电器-接触器控制系统为主要内容的教材。他们在“电工学”教材中包括了电机、电器的基本内容和继电器-接触器控制系统的实例，而在其它课程中这方面的内容不再重复。这样的安排是有道理的。众所周知，有些知识尽管很有用，但只要交给学生一些基本学习方法以后，到生产实际可再进行深入学习并无困难，则此类知识至大学中无需也不宜多讲机床继电器-接触器控制系统就是这一类型的知识。

(2) 近30年来，随着“机械电子工程”学科的发展，美国、日本、英国等国家对于机械工程系中的电工类课程日益加强。英国和美国普遍开设“电动机及其应用”课程，日本、德国则针对性更强，普遍开设“伺服电动机及其应用”课程，其内容主要论述伺服电动机在数控机床中的应用。

(3) 前苏联50年代出得相当多的《机床电气设备》、《生产机械电气自动控制》、《电力拖动自动控制》这类教材，均以介绍生产机械的继电器-接触器控制系统为主要内容。但到70年代时，这部分内容就削减到几乎消失，并转为以讨论闭环控制的电力拖动系统的工作原理和静、动态特性为主，与西方国家同类型教材的发展趋势是一致的。

由上述情况可见，当前在高等工业学校机械工程专业中，以机床继电器-接触器控制系统作为主要教学内容的课程，在世界上工业发达国家中已是少见。

鉴于以上认识，本书编写具有下述特点：

(1) 电力拖动系统和电气控制系统并重 现在开设的“机床电气自动控制”课程教学大纲规定该课程以讲述机床的电气控制系统为主要内容，对机床的电力拖动系统介绍较少。若考虑到国内大多数院校的机械制造工艺及设备专业已经开出“数控机床”课程的现实，而将本课程中“数字控制系统”取消的话，机床电力拖动系统的内容将比机床电气控制系统的内容丰富得多，特别是系统的理论分析方法前者比后者更有普遍的实用价值。故本书中电力拖动系统的篇幅略大于电气控制系统。

(2) 重视电力拖动系统的动态特性分析 以数控机床为代表的机电一体化生产机械的主要技术任务是通过控制计算机协调各运动坐标的运动，保证一个预定的空间（或平面）型面或运动轨迹的实现，生产机械以何等精度、多大的速度实现此预定的型面或轨迹，要受到拖动电动机动态特性的制约。根据此实际情况，本书增加了电力拖动系统动态特性分析的内容。但考虑到学生原有基础，其深度限于经典控制理论的范围。

(3) 注意各门课程之间的协调与分工 1) 考虑到“电工学”课程中已有有关电动机的继电器-接触器控制电路的内容,本书中对有关这方面的内容不再重复。2) 考虑到绝大多数院校已开设“数控机床”课程,本书中不再介绍“机床数字控制”的内容。

(4) 努力反映当前国内外生产实际和社会实际情况 1) 注意到工厂已很少采用矩阵板式顺序控制器,故本书中只介绍可编程序控制器。2) 面对机床主运动系统,特别是数控机床的进给运动系统,广泛采用多种无级调速电力拖动机组的实际情况,本书中对这部分内容作了较详细的讲述,将机床电力拖动系统分为直流拖动系统、交流无级调速系统、步进电动机与直线电动机三章。与之相配合又增加了“电力拖动系统运动方程式及其应用”一章。3) 环境保护问题已日益引起世界人民的普遍重视。21 世纪的工程师应当是“绿色工程师”,此观点已日益为广大工程技术人员所接受。对于中国的机械工程师,所谓“绿色”观念,首先应是节能,减少燃煤的消耗量,本书中,多处从节能的观点出发,讨论电力拖动系统的性能,其原因即在于此。

(5) 考虑到不同层次的需要 此书适用于机械制造工艺及设备专业、机械电子工程专业及其相近专业。本、专科前五章都应全部讲授。第六、七、八章,基础的、经典的、现在生产实际中已经普遍应用的内容安排在这三章的前半部分。最新的、当前生产中用得还不多、但预计发展前景良好的内容安排在这三章的后半部分。教师可根据专业性质、不同要求和学时的多少适当选择讲课内容。

此书第一、二、七、八章和第六章的部分内容由西安交通大学王光铨编写,第三章和第四章的部分内容由西安理工大学夏道智编写,第五章由西安理工大学石磊编写,第四、六两章的部分内容由西安交通大学毛军红编写。西安交通大学苗晓燕参加了本书部分章节的资料搜集和制图等工作。

本书第八章采纳了西安工业学院王建华副教授所提供的建议和资料编写而成,特此致谢。

本书经西安交通大学工企教研室葛文运教授认真、仔细审阅,对全书提出许多有益的建议,在此表示衷心感谢。

由于本书与原有同类型教材相比内容增减较大,引用了一些新资料和分析方法,加之笔者水平有限,错误与不妥之处在所难免,敬请读者不吝批评、指教。

王光铨

1995 年 3 月

于西安交通大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 本学科的基本内容	1
第二节 本学科发展概况	1
习题	5
第二章 电力拖动系统的运动方程式 及其应用	6
第一节 电力拖动系统的运动方程式	6
第二节 使用运动方程式时应注意的几个 问题	7
第三节 运动方程式应用举例	9
习题	13
第三章 普通机床继电器-接触器 控制线路分析	15
第一节 三相异步电动机性能简述	15
第二节 机床电气原理图的画法规则	19
第三节 CM6132 型普通车床电气控制线路 分析	20
第四节 C650-2 型普通车床电气控制线路 分析	24
第五节 T68 型卧式镗床电气控制线路 分析	27
第六节 X5032 型万能升降台铣床电气 控制线路分析	31
习题	36
第四章 机床电气控制线路的设计及 机床电气设备的可靠性	37
第一节 机床电气控制线路设计的 内容	37
第二节 主电路的设计	38
第三节 控制电路的设计	41
第四节 可靠性的基本概念	48
第五节 提高系统可靠性的途径与可靠性 设计概述	50
习题	52
第五章 可编程序控制器	53

第一节 PC 的结构和工作原理	53
第二节 PC 的程序表达方式	56
第三节 PC 中使用的元件	56
第四节 PC 的指令系统	58
第五节 程序编写的一般规则	65
第六节 PC 中常用的基本控制环节	67
第七节 PC 应用举例	70
习题	75
第六章 直流拖动系统	76
第一节 他励直流电动机的机械特性	76
第二节 调速指标	81
第三节 他励直流电动机调压调速系统的 动态特性分析	83
第四节 晶闸管可控整流电源	88
第五节 闭环直流调速系统静态特性	93
第六节 闭环直流无级调速系统动态 特性分析	99
第七节 双闭环直流调速系统	102
第八节 直流电动机的脉冲调宽 (PWM) 调速法	106
习题	112
第七章 交流无级调速系统	114
第一节 笼型异步电动机的调压 调速法	114
第二节 笼型异步电动机的调频 调速法	115
第三节 同步电动机无级调速系统	124
习题	133
第八章 步进电动机与直线 电动机	134
第一节 步进电动机的结构和工作 原理	134
第二节 步进电动机的性能参数和运行 特性	139
第三节 步进电动机的电源与电源 控制器	143

第四节 直线电动机	147	1. 电气设备常用基本文字符号 (摘自	
习题	149	GB7159—87)	160
附录 A 电工系统常用图形符号 (摘自		2. 常用辅助文字符号	
GB4728—84 GB4728		(摘自 GB7159—87)	161
—85)	150	参考文献	162
附录 B	160		

第一章 绪 论

机床由机械部件、液压系统、电气系统三部分组成。本课程以机床包括数控机床的电气系统为教学内容,研究机床中各种电动机和电气控制元件(前行课程如“电工学”、“微机原理”、“测试技术”中已介绍过的除外)的结构、工作原理和性能,以及由这些元器件组成的功能模块、电气系统的结构、性能、设计方法及其静、动态特性的分析方法。

通过本课程的学习,使同学们掌握现代机床使用、设计方法的另一个学科基础,此基础对于掌握其他类型的机械产品的设计、使用方法也是必要的。

第一节 本学科的基本内容

原动机带动生产机械运动叫拖动。用电动机带动生产机械运动的拖动方式称为电力拖动。不论多么复杂的拖动系统,从其原理上分析,都是由原动机、传动机构、工作机构三部分组成,见图 1-1。

现代机床的原动机均采用电动机。电动机将电能转换为机械能,通过传动机构带动生产机械的工作机构运行。一台机床上运动部件通常不止一个。各运动部件的运动都按一定规律

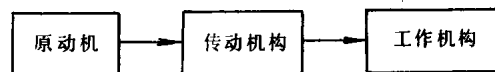


图 1-1 机床电力拖动系统原理图

进行,并彼此相互协调,如普通车床有液压润滑系统、冷却泵、主运动部件和进给运动部件四部分。其中液压润滑系统必须开始运行于主运动、进给运动出现之先,终止于主运动、进给运动停止之后。主运动和进给运动又都是双向的。两个运动方向绝不可同时出现。这种各部件运动的相互协调和连锁关系,主要靠机床的电气控制系统实现。机床电气系统通常由电力拖动和电气控制两部分组成。前者的任务是将电能转换为机械能,拖动机床的各运动部件。此任务是由各种类型的电动机完成的。后者的任务是对各拖动电机进行控制,使它们按规定的状态、程序运动,并使机床各运动部件的运动得到合乎要求的静、动态特性,以保证加工过程的顺利进行。这部分使用的器件种类繁多,最常见的有按钮开关、继电器、接触器,以及新开发的各种传感器,电子计算机等等。

本书将对机床电气系统进行阐述。

第二节 本学科发展概况

一、机床电力拖动系统发展概况

机床在人类历史上出现得是很早的。中国至少可以上溯到汉代。但在金属或木材切削过程中要消耗大量的能量。因此,在蒸汽机出现之前,人类在只有自然力——人、畜、风、水——可供利用的条件下,机床不可能得到大规模的推广、应用、蒸汽机出现后,机床出现了成组拖动方式。即用一台蒸汽机通过地轴、天轴、平皮带等传动件将机械能传送到机加工

车间,同时拖动多台机床,称为成组拖动。自19世纪末,电动机得到工业应用,使拖动技术有了新的发展。其发展经历大致如下:

(1) 成组拖动 以一台电动机同时拖动多台机床。这种拖动方式由于结构不合理,电动机性能不能被充分利用,致使能量传送路程长、能量损失大、效率低、车间内噪声大、很不安全。这种拖动方式在国内已不再采用。

(2) 单电机拖动 这种拖动方式的特点是每台机床上安装一台电动机,再通过机械传动装置将机械能传送到机床的各运动部件。这种传动方式与成组拖动方式相比,减少了中间传动机构,致使能量传送路程短,提高了效率。但如果机床尺寸比较大,运动部件比较多,则机械装置必然复杂、庞大。这种拖动方式在微、小型机床,如仪表机床上至今仍普遍使用,但在大多数机床上已被多电机拖动方式所取代。

(3) 多电机拖动 在一台机床上,安装多台电动机,分别拖动各运动部件。这样机床的机械传动装置相对于单电机拖动必然大大简化。特别是这种拖动方式可以按各运动部件所要求的拖动特性选用不同类型的电动机,使各个运动部件互不干扰地分别获得理想的运动特性,从而使整个机床的性能提高、结构简化、成本下降、易实现自动化生产。现代化电力拖动系统基本上采用多电机拖动。

(4) 交直流无级调速系统 电力拖动系统有直流电力拖动系统和交流电力拖动系统两种,他们是以拖动生产机械的电动机类型来分类的。生产机械的运动机构如机床的主运动和进给运动均有调速要求。假定拖动电机本身是可以调速的,则电动机与机械运动部件之间的齿轮变速箱有可能取消或大大简化。历史上最早出现的电动机是直流电动机,它的调速原理和控制设备都很简单,但是和同等功率的笼型异步电动机相比。直流电动机尺寸大,价格高,特别是炭刷,换向器需要经常维修,运行可靠性差。因此,进入单电机拖动时期,首先应用到机床上的是笼型异步电动机而不是直流电动机。但在一些要求宽调速,起动、制动,正、反转特别频繁,而且对过渡过程有特殊要求的场合笼型异步电动机难于满足要求。

20 世纪的 20 年代直流发电机-电动机组(简称 G-M 机组)开始应用于机床。其结构原理示于图 1-2。

G-M 机组的工作原理是由一台恒速旋转的笼型异步电动机带动直流发电机发出直流电压,供给直流电动机,利用刀开关 S 改变发电机励磁电流 I_{fG} 的方向,利用可变电阻 R_f 改变发电机励磁电流的大小,从而改变施加于电动机电枢端子上的电压的大小和极性。于是,电动机的转速和转向也随之变化。在此机组的基础上发展出来的多种闭环无级调速机组可以在一定程度、一定范围内满足机床宽调速、正反转频繁过渡过程可控的要求。但其缺点也是十分显著的。首先,机组的总装机容量至少是机床

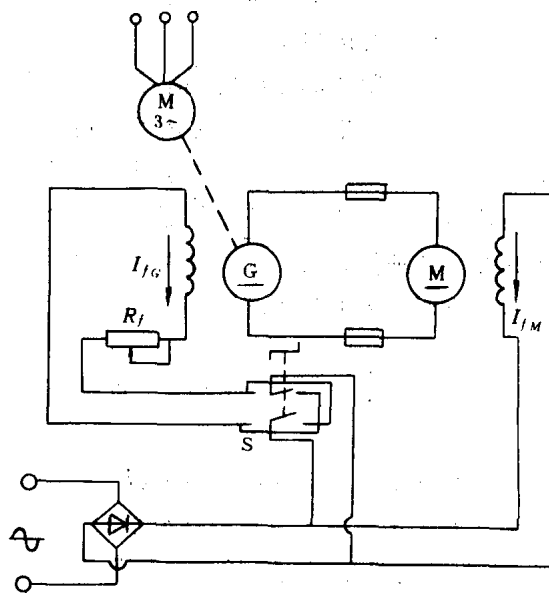


图 1-2 G-M 机组电路原理图

实际需要功率的 3 倍, 因此占地面积、价格、耗电量等均大幅度上升, 维修工作量也大大增加。这就严重地限制了它的应用范围, 在国产机床中这种机组, 只有在龙门刨床、大型镗床等机床上还有遗存。此外均被淘汰。

1950 年功率晶体管问世, 开创了新型无极调速电力拖动系统的先河。1957 年晶闸管诞生。不久晶闸管整流器-直流电动机 (VTH-M) 直流无极调速系统问世, 并应用于机床。此后, 多种性能优越的新型电动机, 多种计算机-变流器 (由大功率晶体管或晶闸管组成)-交、直流电动机组成的新型无极调速系统问世, 并应用于机床工业。使机床的总体结构大大简化, 静、动态特性显著提高。

现概略介绍几种交、直流电动机无级调速系统:

(1) 单相或三相 VTH-M 系统 这种系统直接由 G-M 机组发展而来。它与 G-M 机组的差别在于它以晶闸管调压电源取代了 G-M 机组中直流发电机。因而它保留了直流拖动的优点, 又把 G-M 机组中的三台电机去掉了两台, 代以一套无旋转部件的晶闸管可控整流电源。目前, 在各种大、中功率无级调速系统中, 它的应用最广泛。

(2) 变频脉冲电源-步进电动机系统 步进电动机的运行是每加一个脉冲, 转子就转过一个固定的步距角, 因此特别适合于计算机控制的拖动系统, 目前在数控机床特别是经济型数控机床的进给系统中得到广泛应用。

(3) 大功率晶体管脉宽调制-电动机 (PWM-M) 系统 脉宽调制 PWM 即 Pulse width modulation 的缩写。脉冲调制电源本质上是一个调压的直流电源, 但性能优于晶闸管调压直流电源。如果此系统中的直流电动机采用稀土永磁大惯量电动机, 则除了保留直流电动机控制性能好的优点外, 又具有低转速、大转矩、大转动惯量, 高转矩-转动惯量比等优点。特别适合于机器人、闭环、半闭环数控机床伺服进给系统的需要。当采用这种系统时, 常常可以省去电动机与工作机构之间的减速齿轮箱。不但简化了传动机构, 而且提高了系统的动态特性。

(4) 计算机-变频器 (变频、变压电源)-异步电动机无级调速系统 在异步电动机中笼型异步电动机的结构最简单, 运行最可靠, 价格也最低, 并易于制成全封闭式, 用于工作环境特别不良的地方。因此如何对异步电动机特别是笼型异步电动机进行无级调速这一问题长期以来引起有关行业中广大工程技术人员的关注。在笼型异步电动机的三种可能的调速方案 (调频、调转差率、调极对数) 中, 尤以调频法优点显著。历史上曾出现过一些笼型异步电动机调频调速机组, 均因有这样或那样的缺陷, 难于推广, 直到 1970 年前后, 提出了矢量控制法, 简称 FOC 法, 才在笼型异步电动机调速理论方面出现了突破。加之计算机工业、电力电子工业的飞跃发展, 多种计算机控制的笼型异步电动机变频无级调速系统纷纷出现。并在包括机床工业在内的各行业中得到广泛应用。

(5) 计算机-变频器-同步电动机无级调速系统 如果同步电动机由变频电源供电, 同样可以进行无级调速。同步电动机转子上的励磁绕组如果用永久磁钢取代, 可以取消同步电动机转子轴上的炭刷、集电环。其结构的简单化程度可与笼型异步电动机相媲美, 而其运行的经济性显著优于笼型异步电动机。由于有这一优点, 使这种系统于 1973 年第一次世界能源危机爆发后, 得到人们的重视。到 70 年代后期, 发展永磁同步电动机无级调速系统已成为世界性潮流。国内的某些工业部门例如纺织工业部, 已决定将纺织机械上所用全部旧式笼型异步电动机 (约占总装机容量的 30%) 改为永磁同步电动机, 同时也引起机床工业的有关领导部门

和工程技术人员的重视，并得到逐步推广应用。

以上所列举的五种交、直流无级调速电力拖动系统并不反映电力拖动学科的全貌，仅是其中挑出已在或今后很可能在机床工业部门中得到广泛应用的五种加以介绍。由于这些新的电力拖动技术的应用，使机床等机械产品的结构简化，性能显著提高。

由机床电力拖动系统的发展过程可以看出下列一些特点和总趋势：

1) 伴随着机床电力拖动型式由成组拖动向单电机拖动，多电机拖动以及交、直流无级调速系统的发展，机床原动机和工作机构之间的距离不断缩短，中间传动机构不断简化，甚至取消传动齿轮箱，这不但使机床总体结构大为简化，而且大大提高了机床运动系统的刚性和快速响应性，使其静、动态特性显著改善。

2) 在计算机控制的电力拖动系统中，综合运用了计算机技术、电力电子技术、测试技术以及电机制造等多种学科的最新成果，使其性能充分满足各种生产机械的不同需要。并使它本身成为典型的机电一体化产品。

3) 电力拖动系统的功能结构图也由开环发展到闭环。从只考虑系统的静特性发展到静、动态特性并重，在数控机床的伺服进给系统中，往往动态特性更是决定加工精度和产生率的主要因素。这就促使一些现代控制理论和方法在本学科中得到应用。

二、机床电气控制系统发展概况

机床电气控制系统的发展与机床电力拖动系统的发展有密切关系，在成组拖动时期机床上没有电动机，当然也不会有电气控制设备。在单电机拖动时期，机床上只有一台电动机，相应的电气控制设备也只有手动开关，无电气控制系统可言。随着多电机拖动时期的到来，机床电气设备中包括了电气控制系统。电气控制系统的发展历程如下：

1. 继电器-接触器控制系统

这种控制系统由按钮开关、行程开关、继电器、接触器等开关元、器件组成。其优点是元、器件的工作原理和结构均很简单，易于掌握，易于维修，价格低廉。在系统不是很复杂的情况下，可靠性问题不突出。但这种系统的功能有限，想靠它实现连续的轮廓控制十分困难。特别是这种系统一旦设计、组装完成后，要改变它的工作程序很麻烦。另外，对工作程序多、自动化要求高的设备，靠它实现自动控制，系统就很复杂、庞大，并使可靠性降低。目前，这种系统多用于自动化程度不高的通用机床。

为了满足单件、小批量、复杂型面自动化生产需要，1948年美国空军针对试验性飞机螺旋桨加工的需要，提出了数控铣床的设想，并于50年代初期实现了商品化，从此开辟了机床控制系统的第二个历程。

2. 计算机控制系统

由数字计算机控制的机床称为数控机床。

一台数控机床需要实现的控制要求很多。但其中最重要的是实现各运动坐标对伺服拖动系统的控制要求。为了理解数控机床的特征。图1-3画出典型的运动坐标伺服拖动系统的结构图。预定的工作程序以规定形式记录于控制介

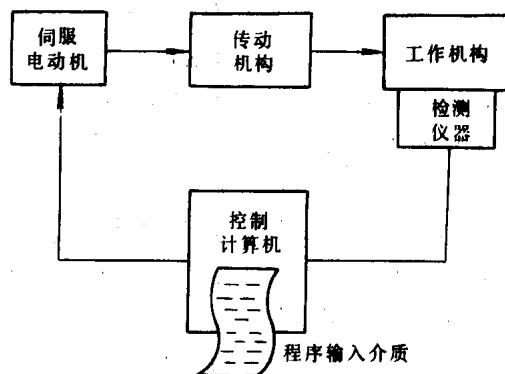


图 1-3 数控机床坐标运动伺服控制系统结构图

质上,控制介质有穿孔带、磁带等,并将有记录的控制介质输入计算机。计算机根据接收到的工作指令控制伺服电动机的工作状态,并通过中间传动机构带动工作机构运动。又通过安装在工作机构上的检测仪器,如光栅、感应同步器等,检测出工作机构的实际运动结果,并将此检测结果送入计算机,与工作指令所规定的数值相比较,得到两者的差值,再以此差值为依据,控制电动机的运动,直至此差值为零时停止。即工作机构实现了规定的运动结果时为止。

由于计算机技术的应用,使机床这种传统的工具机的功能出现了质的飞跃。数控机床尽管有很多优点,但对以手工操作为主的通用机床和自动化循环比较简单、比较固定的自动化机床,采用计算机控制失之于成本太高,功能不能充分发挥。(即使在日本,80年代末期非数控机床也还占机床总台数的30%。)因此希望开发出一种新型控制电器,它既能克服继电器-接触器系统的缺点,价格又远低于电子计算机,并且使用方便、可靠性高。1967年问世的顺序控制器具有这样的特点。

3. 可编程序控制器(简称PC)控制系统

顺序控制器有两种类型,矩阵板式顺序控制器和可编程序控制器。现在前者已很少使用。可编程序控制器实质上是一种专用的控制计算机,它的作用是代替继电器-接触器系统。所以它只需作逻辑运算,不需作数学运算,因而逻辑电路和指令系统简单,程序编制方法易于掌握。要改变已编制好的程序也很方便,由于上述优点,现已在机床上得到广泛应用。本书将对可编程序控制器进行专章介绍。

数控机床问世至今已有40多年,在这40多年中,它的发展速度是惊人的,它已经历了若干代。对此,本书不拟一一列举。只想指出一个总的特点。新一代数控机床与前一代相比,虽然各方面都有所提高,但它们之间最引人注目的差异和进步,往往首先表现为机床电气控制系统的差异和进步。特别是控制计算机硬件和软件的差异和进步。不但如此,自数控机床问世后,机床电气设备的价格在机床总价格中所占百分比也发生很大变化,对一般机床来讲,此百分比通常不高于10%,而对数控机床,此百分比高于50%是常有的。因此现代机床的总体结构要受其电气设备的影响固然是无可争议的事实,而且它的性能、价格、性能-价格比也逐步地由主要决定于其机械部分转为主要决定于其电气设备部分。由此可见掌握此门课程的知识、概念对一个机械工程师的重要性。

习 题

1. 本学科的研究对象与基本内容是什么?
2. 机床电力拖动发展至今已经历过哪几个历史时期?机床电力拖动总的发展趋势是什么?它给机床的总体结构和性能带来什么影响?
3. 从本世纪50年代末至今,已有哪些新型的无级调速电力拖动机组在机床工业中获得实际应用?
4. 闭环、半闭环数控机床的出现,使机床结构产生了哪些变化?当今,在此结构中,哪一个部分发展速度最快,对机床性能的提高影响最大?

第二章 电力拖动系统的运动方程式及其应用

电动机与生产机械相联接组成电力拖动系统。电力拖动系统的静、动态特性严重影响生产机械的工作性能。特别是数控机械如：数控机床、机器人、坐标测量机等，其伺服拖动系统的工作性能往往主要决定于电力拖动系统的动态特性。本章介绍电力拖动系统动态特性分析的力学基础——电力拖动系统运动方程式，并利用此方程式分析、讨论几个有实用价值的问题。总结出机械工程师应当具有的几点基本知识。

第一节 电力拖动系统的运动方程式

在忽略电力拖动系统中各元件的弹性变形的条件下，写出电力拖动系统的能量平衡方程式

$$A_M - A_L = A_I \quad (2-1)$$

式中 A_M ——电动机所做的功；

A_L ——机械负载阻力所做的功；

A_I ——各运动部件惯性力所做的功。

设电动机拖动的系统中各运动部件都是旋转部件，并将各转轴的转动惯量都折算到电动机轴上（折算方法见本章第二节）则

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

J ——拖动系统中全部运动部件的转动惯量折算到电动机轴上的总和；

ω ——电动机的角速度。

将式(2-1)对时间微分得到

$$P_M - P_L = J \omega \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt} \quad (2-2)$$

式中 P_M ——电动机的输出功率；

P_L ——负载消耗的功率。

大多数生产机械运动部件的转动惯量不随转角 α 的改变而变化，即 $dJ/d\alpha = 0$ 。因此式(2-2)变为

$$P_M - P_L = J \omega \frac{d\omega}{dt}$$

等号两边同除以 ω ，得到

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} = J \ddot{\alpha} \quad (2-3)$$

式中 T_M ——电动机输出转矩；

T_L ——机械负载折算到电动机轴上的阻转矩（折算方法见本章第二节）；

$\ddot{\alpha}$ ——电动机转子的角加速度。

式 (2-3) 也可写成 $\ddot{\alpha} = \frac{I}{J} (T_M - T_L)$, 此式称为电力拖动系统的运动方程式。它说明只有当电动机输出转矩 T_M 与负载的阻转矩 T_L 两者相等时, 才会出现 $\ddot{\alpha} = 0$, 即电动机的转速 ω 为常数 C 的情况, 这时的运行状态称为稳态运行。若 T_M 与 T_L 不等, 当 $T_M - T_L > 0$ 时, 则 $\ddot{\alpha} > 0$, 系统加速; 当 $T_M - T_L < 0$ 时, 则 $\ddot{\alpha} < 0$, 系统减速。无论 $\ddot{\alpha} > 0$, 系统加速, 或 $\ddot{\alpha} < 0$, 系统减速均称为非稳态运行。当转动惯量 J 的大小已经确定时, 加、减速的快慢即 $\ddot{\alpha}$ 的大小决定于 $(T_M - T_L) / J$ 。

根据 $J = mr^2 = \frac{G}{9.81} \frac{D^2}{4}$, $\omega = 2\pi \frac{n}{60}$, 式 (2-3) 可化为工程上更常用的形式

$$T_M - T_L = \frac{GD^2 dn}{375 dt} \quad (2-4)$$

式中 G ——旋转体重力;

D ——旋转体直径;

n ——旋转体转速 (r/min)

式中 GD^2 称为运动系统的等效飞轮惯量, 注意式中的 375 具有加速度的量纲。此外, 目前电机产品目录中给出的飞轮惯量大多采用 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 的单位, 换算成 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 时, 需乘以 9.81。

第二节 使用运动方程式时应注意的几个问题

一、转矩 T_M 和 T_L 正负号的决定

1. 当电动机在起动和正常工作过程中

T_M 的方向与电动机的实际转向一致, T_L 的方向与电动机的实际转向相反, 见图 2-1a, 这时式 (2-3) 可写成 $T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$, 即 T_M 取“+”号, T_L 取“-”号。

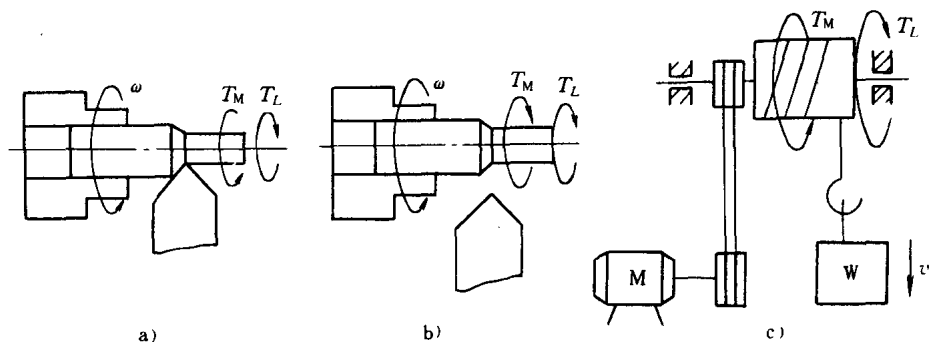
2. 当电动机在停止过程中

为加快电动机的停止速度, 通常将其接成制动状态。这时 T_M 和 T_L 的方向相同, 并且都与电动机的实际转向相反, 见图 2-1b, 此时式 (2-3) 可写成 $-T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$, 即 T_M 和 T_L 均取“-”号。

3. 当电动机拖动重物下降时

例如天车或吊车的挂钩在重物下放时, 负载产生的转矩与电动机实际转向一致。为使重物下降速度 v 不要太快, 以免发生危险, 常将电动机接成制动状态, 使其转矩与电动机实际转向相反, 这时式 (2-3) 可写成 $-T_M + T_L = J \frac{d\omega}{dt}$, 即 T_M 取“-”号, 而 T_L 取“+”号, 见图 2-1c。

由上述可见, 习惯上虽然把电力拖动系统的运动方程式写成 $T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$ 的形式, 但这种形式只适用于系统起动与正常运转的过程中。在系统停止过程中和电动机拖动重物下放的过程中, T_M 和 T_L 的符号可能发生变化。确定正、负号的原则是: 在此运行状态下, T_M 和 T_L 的方向与电动机转子的实际转向是否一致, 一致取“+”号, 相反取“-”号。

图 2-1 T_M 与 T_L 正、负号的决定

a) 起动与工作状态 b) 制动状态 c) 重物下放时

二、负载力矩 T_L 的折算

在现代金属切削机床中,电动机和工作机构之间一般均有皮带、齿轮等变速装置。在机床主运动系统中,刀具作用到加工工件上的切削力矩为 T_c ,显然 T_c 不能直接代入式 (2-3) 中代替 T_L 需要经过折算。

折算公式的推导:

假设:在忽略传动装置的摩擦损耗和拖动系统处于稳定运转的条件下,则电动机的输出功率应等于切削功率。电动机的输出功率应为折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 与电动机转速 ω_M 的乘积,即 $T_L \omega_M$;切削功率是 $T_c \omega_n$, ω_n 是机床主轴转速,则 $T_L \omega_M = T_c \omega_n$, 故有

$$T_L = \frac{\omega_n}{\omega_M} T_c = \frac{1}{j} T_c \quad (2-5)$$

式中 j ——电动机轴与机床主轴的传动比, $j = \frac{\omega_M}{\omega_n}$ 。

式 (2-5) 虽然是针对机床推导出来的,显然对其他类型生产机械也适用。从式 (2-5) 还可以看出,机床主运动系统为什么常采用恒速笼型异步电动机加齿轮变速箱的变速机构。机床主运动机构在毛坯加工时,切削用量大, T_c 大,要求机床主轴低速旋转;到精加工时,切削用量小, T_c 小,要求机床主轴高速旋转。在电动机与机床主轴之间有一个齿轮变速箱,一方面满足调速的要求,另一方面依靠变化齿轮变速箱的传动比,使毛坯加工时 j 大,尽管这时 T_c 大,但折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 并不大;精加工时 j 小,尽管这时 T_c 小,但折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 并不小。两种情况下的 T_L 近乎相等,由于笼型异步电动机的转速 ω_M 是固定的,因此无论是精加工或毛坯加工,笼型异步电动机的输出功率 $\omega_M T_L$ 近于不变,同一台笼型异步电动机,在两种工作情况下都很合适。反之,如果没有齿轮变速箱,由电动机轴直接驱动机床主轴,这时式 (2-5) 中的 $j=1$,相应地毛坯切削时电动机就要输出大转矩,以后会证明不管什么型式的电动机,要它输出大转矩,其输入电流也必须相应加大。由于电动机的额定功率正比于额定输入电流,因此为满足低速时电动机输出大转矩的需要,电动机的额定功率必须选得大;同一台电动机到高速时又因输出转矩太小,功率远远地用不足,造成浪费。这就是尽管电动机调速方法很多,但难于在机床主运动系统中,取代笼型异步电动机加齿轮变速箱调速系统的根本原因。除非有一种电动机,它在低速时输出特别大的转矩才能实现此目的。

三、转动惯量 J 的折算

电力拖动系统中, 转轴通常不会只有一根, 设有 n 根, 每根轴的转速不同, 设为 ω_1 、 ω_2 、 $\dots$ 、 ω_n 。不同转轴 (包括安装于其上的零件如齿轮等) 即使转动惯量 J 相等, 只要转速不同, 则它们所储藏的动能依然不等, 因此式 (2-3) 中, 等式右边的 J 应理解为整个运动系统的等效转动惯量。所谓等效转动惯量是指一个假想的单轴旋转系统的转动惯量, 此轴及此轴上所有元件的转速均与电动机转速相同, 而此系统中所储藏的动能与真实系统相等。

真实系统所储藏的动能为 $\frac{1}{2}(J_M\omega_M^2 + J_1\omega_1^2 + \dots + J_n\omega_n^2)$; 等效系统所具有的动能应为 $\frac{1}{2}J\omega_M^2$, 两者相等。则

$$\frac{1}{2}J\omega_M^2 = \frac{1}{2}(J_M\omega_M^2 + J_1\omega_1^2 + J_2\omega_2^2 + \dots + J_n\omega_n^2) \quad (2-6)$$

式中 J ——等效转动惯量;

J_1 、 J_2 、 $\dots$ 、 J_n ——分别为实际旋转系统中, 第 1、2、 $\dots$ 、 n 根转轴的转动惯量。第 n 根轴即机床主轴;

J_M ——电动机转子的转动惯量。

ω_1 、 ω_2 、 $\dots$ 、 ω_n ——分别为第 1、2、 $\dots$ 、 n 根转轴转速。

由式 (2-6) 可得

$$\begin{aligned} J &= J_M + \frac{1}{\omega_M^2}(J_1\omega_1^2 + J_2\omega_2^2 + \dots + J_n\omega_n^2) \\ &= J_M + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \dots + J_n \frac{1}{j_n^2} \end{aligned} \quad (2-7)$$

在整个运动系统中, 通常电动机转子转速最高, 此后各转轴的转速按规律递减, 因此 j_1 、 j_2 、 $\dots$ 、 j_n 均大于 1。还由于各转轴的结构都是细而长的, 只有电动机转子短而粗。而转动惯量正比于旋转体半径的平方。因此可认为整个旋转系统的转动惯量主要集中在电动机转子上。所以在计算机床运动系统的等效转动惯量时可以只考虑电动机转子的转动惯量, 而传动机构各个环节的转动惯量则以加大电动机转子的转动惯量到 δ 倍来计入, 即

$$J = \delta J_M \quad (2-8)$$

上式中 δ ——考虑到传动机构的影响的比例系数, δ 通常取 1.1~1.3。

以上是以转动惯量为对象推导其折算公式的过程, 显然如果以飞轮惯量 GD^2 为对象, 其折算公式也相同, 无需赘述。

另外, 上述是将切削转矩 T_C 和各旋转轴的转动惯量均折算到电动机轴上, 若折算到其他任一根转轴上也是可以的, 其方法相同。

第三节 运动方程式应用举例

一、系统稳定运行条件

从电力拖动系统运动方程式 $T_M - T_L = J\ddot{\alpha}$ 可以看出, 当 $T_M - T_L = 0$ 时, $\ddot{\alpha} = 0$, 因此 $\omega = C$, 系统以恒速运转, 处于稳定运行状态。

设此时外界通过某种途径向系统输入干扰,使 $T_M - T_L \neq 0$, 这种干扰可能通过电动机输入,例如电源的电压或频率发生波动,也可能通过负载输入,例如被加工件的材质或尺寸不均匀使切削力矩发生变化,这时 $\dot{\alpha} \neq 0$, 转速将出现波动。所谓稳定性是指系统在干扰作用下,偏离稳定运行状态,当干扰消失后,它自动回复到原有稳定运行状态的能力。显然系统如果不具备此种能力,将无法正常工作。

设电动机的机械特性 $\omega_M = f(T_M)$ 和负载的机械特性 $\omega_L = g(T_L)$, 如图 2-2 所示。初始时,系统稳定运行于 0 点,在此点 $T_M = T_L$ 。系统的转速是 ω_0 。由于外界干扰使转速偏离 ω_0 , 产生 $\Delta\omega_0$ 的增量,相应地引起电动机和负载的转矩增量 ΔT_M 和 ΔT_L , 由于偏差量很小,以 0 点的两根切线代替 $f(T_M)$ 和 $g(T_L)$, 得到

$$\Delta T_M = \frac{dT_M}{d\omega} \Delta\omega = a\Delta\omega, \quad \Delta T_L = \frac{dT_L}{d\omega} \Delta\omega = b\Delta\omega \quad (2-9)$$

a, b 分别是通过 0 点的两根切线对 ω 轴的斜率 $\operatorname{tg}\varphi$ 与 $\operatorname{tg}\psi$ 。

写出运动方程式的增量方程

$$\Delta T_M - \Delta T_L = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (2-10)$$

将式 (2-9) 代入式 (2-10) 得到

$$(a - b) \Delta\omega = J \frac{d\Delta\omega}{dt} \quad (2-11)$$

式 (2-11) 是 $\Delta\omega$ 的一元一次微分方程, 其解为

$$\Delta\omega = \Delta\omega_0 e^{\frac{a-b}{J}t} \quad (2-12)$$

由式 (2-12) 可知, 要使 $t \rightarrow \infty$ 时 $\Delta\omega \rightarrow 0$, 即恢复到原有的转速, 必须 $a - b < 0$, 即 $\operatorname{tg}\varphi < \operatorname{tg}\psi$, 此不等式称为系统稳定运行条件。

如图 2-2 所示情况, 当 φ 角大于 90° 时, 则 $\operatorname{tg}\varphi < 0$, 电动机的机械特性是一根随着转矩的加大不断下降的曲线; 当 ψ 角小于 90° 时, $\operatorname{tg}\psi > 0$, 负载的机械特性是一根随着转矩的加大不断上升的曲线, 稳定运行条件得到满足, 系统稳定运行。现在再对此图进行定性分析, 在干扰没有加到系统之前, 系统应稳定运行于 0 点, 因为在此点电动机产生的转矩 T_M 与负载所吸收的转矩 T_L 两者正好相等; 干扰进入后, 系统转速增加 $\Delta\omega_0$, 由图可以看出, 这时电动机输出的转矩减少, 减少量是 ΔT_M , 因为是减少, ΔT_M 是负值, 而负载的阻转矩加大, 加大量是 ΔT_L , 因为是加大, ΔT_L 是正值, 代入式 (2-10), 等式左端一定是“-”号, 因此 $d\Delta\omega/dt$ 一定也是“-”号, 即速度只可能下降, 一直降到 $\Delta\omega = 0$ 时为止。

既然系统稳定运行是有条件的, 其条件是 $\operatorname{tg}\varphi < \operatorname{tg}\psi$, 那么这个条件得不到满足时, 系统就不能稳定运行。在实际中, 图 2-3a 的情况是最容易碰到的不稳定运行情况。这种情况通常出现于内部有电流正反馈的闭环电力拖动系统之中。如果电流正反馈信号过强, 电动机的机械特性就会上翘, 运行一定不稳定。此外, 内部有励磁磁场补偿的直流电动机, 如果补偿过度, 电动机的机械特性也会上翘, 运行也不稳定。图 2-3b 运行是稳定的, 但情况不正常, 通常发生在高速笼型异步电动机拖动低速大转矩负载的情况下, 这时因为笼型异步电动机运行时转差率 s 很大, 不需太长的时间, 电动机将被烧毁, 这两种情况在生产实际中都是可能出现的, 要注意避免。