

• 高等学校教学用书 •

电力拖动基础

(修订版)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



冶金工业出版社

高等学校教学用书

电力拖动基础

(修订版)

东北工学院 任兴权 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

电力拖动基础

(修订版)

东北工学院 任兴权 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北海沿大街基祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787 × 1092 1/16 印张 21 1/2 字数 511 千字

1980年9月第一版

1989年5月第四次印刷

1989年5月第二版

印数41,901~49,400册

ISBN 7-5024-0457-0

TM · 10 (课) 定价4.20元

再版前言

本书初版发行以来已经八年。在这期间,国内外电力拖动学科的理论 and 实践均得到很快的发展,并取得工程实际的显著效益。例如在电力拖动理论方面已经发展应用现代控制理论对系统进行分析与设计;在控制技术和装置方面,由于微电子技术和计算机技术的发展,已经广泛地应用大功率半导体器件和微型计算机作为控制系统的主要设备。根据教材应反映现代科学技术成果的精神,本书再版在选择教材内容时,除满足冶金工业部高等院校工业电气自动化专业教学计划及电力拖动基础课程教学大纲所规定内容外,还考虑结合近年科学技术进展,对原版的内容作了相应的增删。例如,在直流电力拖动系统方面,除保留了电力拖动系统基本内容外,将原第三章中加快过渡过程方法一节作了扩充,按电力拖动最优控制规律体系改写。此外,在直流电力拖动过渡过程计算方法上,应用了计算机仿真技术。书中举二阶系统过渡过程例题,说明系统仿真模型、数值计算方法和仿真程序的具体应用。第四章中交流电力拖动过渡过程一节,由于异步机的非线性特性,过去都采用图解方法求解,不仅效率低,精度也差,这次也增加了计算机仿真程序,举例说明用仿真程序计算异步机过渡过程特性和起动时间。这些内容为应用新的计算手段和工具创造了一个初步的条件。第五章中交流拖动系统调速内容,依照近年交流调速发展的成果,讲述了交流调速的矢量控制,变频控制、双馈和串级控制。这些内容都为进一步学习交流电力拖动控制系统打下基础。第六章增加了以矿井提升装置为典型的例题,阐述电机发热与容量校验的关系。增加和改写的这些内容,在实际教学过程中,如有困难,可以重点讲述部份内容或从物理概念入手进行讲解。即使基本不讲,也并不影响基本内容的学习。引进这些新内容的目的,主要是使教材能逐步反映科学、技术的前进和发展,培养学生迎接新科学挑战的能力。

本书新版的章节结构,基本依照第一版的章节,仍分为六章。第一章电力拖动系统动力学,是把实际电力拖动系统从动力学角度概括为运动方程,运动方程是分析电力拖动系统静态特性的基础。第二章直流电力拖动系统静态特性,主要是依照生产工艺对电力拖动系统的要求,用四象限方法分析拖动系统起动、制动和调速各种运转状态的静态特性和参数的关系。第三章直流电力拖动系统动态特性,用解析法分析一阶系统的动态特性,用计算机仿真方法分析二阶系统的动态特性,此外,还介绍了电力拖动系统最优控制规律,为学习电力拖动系统计算机最优控制打下基础。第四章异步电动机起动和制动,分析异步机机械特性和各种运转状态,还介绍了用计算机仿真程序计算异步机拖动系统过渡过程特性。第五章以统一的概念分析异步机的现代调速方法,如变频调速、矢量控制、双馈和串级调速等。第六章电动机容量选择,系统介绍电机的发热、冷却原理,拖动系统工作方式以及各种工作方式下电机容量的发热校验,以及电动机电压、转速类型的选择。

本书第一、二、三章由东北工学院任兴权教授编写,第四、五章由东北工学院刘宗富教授编写,第六章由西安冶金建筑学院谷予斌副教授编写,全书由任兴权教授主编。再版初稿内容,经冶金部及有色总公司电机与电力拖动学会两届学术会议讨论并经与会同志提出宝贵意见,在此,编者特向这些同志深表感谢。由于水平所限,修改过程时间仓促,书

中肯定还存在问题，敬请读者提出批评、指导意见，以期进一步改进完善本书。

编 者

一九八七年九月一日

前 言

本书是根据一九七七年冶金工业部高等学校教材工作会议和制订的《工业企业电气化与自动化》专业教学计划编写的。本书原定名为《电机拖动基础》，是由《电机学》和《电力拖动基础》两门课合并而成。目前，不少院校都希望将课程划小，这样比较灵活，更能适应教学和科学研究的需要。征得参加审查会议所有院校的同意，现仍将原书分为《电机学》和《电力拖动基础》两部分，分两册出版。

《电力拖动基础》部分共分六章。第一章电力拖动系统动力学，着重分析拖动系统的动力学方程。它是分析拖动系统静动特性的基础。第二章直流电力拖动系统静态特性，着重分析直流他激电动机的起动、制动和调速，各种运转状态的机械特性和参数关系。为加强联系实际，本章举例分析了直流拖动系统的四象限运行，这部分内容也可以作一次课堂练习。第三章直流电力拖动系统动态特性，着重于分析拖动系统基本动态特性。在讲述拖动系统动特性时，联系静特性以分析物理概念为主。此外，还介绍了加快拖动系统过渡过程的时间最优控制原理、延缓过渡过程以及准确停车等内容，为后续课程学习打下基础。第四、五两章异步机起动、制动和调速，分析了异步电动机各种运转状态机械特性和参数的关系。调速一章着重分析了异步机变频调速。第六章电动机容量选择，着重分析电机的损耗、发热、温升，冷却的规律以及与电机运行状态的关系。这部分内容对选择电机来说是最基本的。

本书第一至第三章由东北工学院任兴权同志编写，第四、五两章由东北工学院刘宗富同志编写，第六章由西安冶金建筑学院谷予斌同志编写。全书由任兴权同志主编。书稿经过冶金工业部各兄弟院校两次审查并提出宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，时间仓促，一定还存在错误和缺点，诚恳希望同志们批评指正。

编 者

一九七九年六月

目 录

绪论	1
第一章 电力拖动系统动力学	5
第一节 单轴电力拖动系统运动方程式	5
第二节 多轴电力拖动系统运动方程式	14
第三节 电力拖动系统传动机构中的损耗和效率	23
思考题与习题	28
第二章 直流电力拖动系统静态特性	31
第一节 直流电动机机械特性的分类及其硬度	31
第二节 直流他激电动机机械特性	32
第三节 直流他激电动机的起动	44
第四节 直流他激电动机的调速	49
第五节 直流他激电动机的制动	69
第六节 直流他激电动机各种工作状态运行的分析	80
第七节 直流串激电动机机械特性及各种运转状态	92
第八节 直流复激电动机的机械特性及各种运转状态	105
思考题与习题	106
第三章 直流电力拖动系统的过渡过程	109
第一节 直流电力拖动系统过渡过程的概述	109
第二节 直流他激电动机起动过程的动态特性	111
第三节 直流他激电动机反向过程动态分析	127
第四节 直流他激电动机能耗制动过渡过程特性分析	136
第五节 直流他激电机的激磁回路过渡过程及其加快与延缓	139
第六节 电力拖动系统最优控制规律	146
第七节 直流他激电动机考虑电枢电感的过渡过程	178
第八节 电力拖动系统准确停车	201
第九节 电力拖动系统时间常数的测定	207
思考题与习题	210
第四章 异步机的机械特性曲线和起动制动	213
第一节 三相异步电动机的等值电路	213
第二节 三相异步电动机的转矩方程	217
第三节 三相异步机的人为机械特性	223
第四节 鼠笼式异步机的起动	228
第五节 绕线式异步机的起动	232
第六节 异步机电力拖动系统过渡过程计算机仿真与起动时间的计算	235
第七节 异步机的起动损耗	244

第八节 异步机的反接制动	245
第九节 异步机的再生发电制动	247
第十节 异步机的能耗制动	251
第十一节 异步机的四象限运行	257
思考题与习题	260
第五章 交流电力拖动系统的转速控制	261
第一节 异步电动机的调速方法	261
第二节 异步机的矢量控制	263
第三节 异步机的压频比控制	274
第四节 异步机的恒流控制	275
第五节 异步机的双馈和串级调速	277
第六节 同步机的变频调速	284
思考题与习题	298
第六章 电动机容量选择	299
第一节 概述	299
第二节 电机的温升与绝缘等级	299
第三节 电机的发热与冷却	301
第四节 按发热观点规定的电机的工作制	304
第五节 负载图	306
第六节 长期工作制的电机容量选择	308
第七节 短时工作制的电机容量选择	315
第八节 重复短时工作制的电机容量选择	317
第九节 鼠笼电机允许接通次数	321
第十节 容量选择举例	322
第十一节 用统计法与类比法确定电机的容量	329
第十二节 可控硅供电对电机的影响	329
第十三节 电动机类型、电压与转速的选择	331
思考题与习题	332

绪 论

在现代工业中,为了实现各种生产工艺过程的要求,需要采用各种各样的生产机械,其中除一部分生产机械采用汽动或液压拖动外,大多数的生产机械都采用电动机拖动。大多数生产机械的任务都是把电能转化为机械能,以机械运动的形式来完成各种工艺上的要求。

例如:轧钢机械利用电动机拖动轧辊进行挤压运动,使金属产生塑性变形,完成轧制钢材的工艺要求;金属切削机床利用电动机的动力,使加工对象与切削刀具产生相对运动,进行切削实现加工工艺;提升和运输机械利用电动机拖动运输机构,将被运送的对象移送到给定位置。其他如造纸、石油、化工、纺织以及印刷等各类生产机械,都是依靠电动机通过传动机构拖动生产机械运动,完成其相应的工艺要求。

随着工艺技术的不断发展,各种生产机械根据其工艺特点,对生产机械和拖动电动机也不断地提出各种不同的要求。

例如:轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械,要求电动机能迅速地起动、制动和反转;不可逆式轧机为适应轧制不同品种和不同规格的钢材而要求调节转速;采用电机单独拖动的热连轧机、冷连轧机以及造纸机的各机架或分部,则要求各机架或各分部的转速保持一定的比例关系进行协调运转;一些精密的金属切削机床,如镗床的进给机构,则要求在极慢的稳速下进给,以保证达到要求的加工精度和光洁度;对于电梯和提升机则要求起动和制动平稳,并能准确地停止在给定的位置上。上述这些不同工艺要求,都是靠电动机及其控制系统和机械传动装置实现的。

由于生产机械各种工艺的相应要求,促进了电动机性能和电力拖动控制系统的发展。电力拖动系统包括传输机械能的传动机构,产生拖动力矩的电动机以及控制电动机运转的电气控制设备等部份。凡是用电动机拖动生产机械,将电能转变为机械能且完成一定工艺要求的装置或系统称为电力拖动系统。

电力拖动系统在我国,其发展历程大体上可分为三个阶段;

第一阶段,大约从30年代到50年代。当时生产机械对电力拖动系统提出的要求,只限于起动,制动和调节速度。在这一时期主要是用常系数线性微分方程数学工具分析、设计电力拖动系统,即分析系统静态机械特性和参数关系,系统动态响应与系统惯性时间常数、放大倍数等参数的关系,并依据工艺要求确定系统参数,设计起制动电阻,起制动控制继电器的整定值等。工程上的控制元件和装置主要是采用电磁接触器和继电器组成的继电器接触控制系统,应用简易刀开关或鼓型控制器、主令控制器等手动控制器件进行控制或操作。大容量的电力拖动控制系统采用电机式放大元件,对控制信号给以放大,实现电力拖动控制系统开环控制。我国50年代以前投产的冶金轧钢设备、各类金属切削机床以及起重运输机械等,大多数是属于这种类型的电力拖动系统,在生产上发挥了很重要的作用。

第二阶段,大约处在50年代到70年代。随着生产工艺不断强化、生产效率不断提高、劳动条件不断改善,对电力拖动系统提出更多的要求。例如起制动过程要求加快动态响应;也有一大类生产机械要求起制动平稳,例如乘客高速电梯、城市地铁或电车,就要求

速度变化受到限制；此外要求扩大调速范围，以保证较低速度运行。除起制动的平稳运行外，还有准确定位要求，例如电梯平层精度；还有多台电机按比例协调运动，如造纸机、塑料挤压机、带钢连轧机等；还有位置的跟随要求，如仿形机床，高射炮的跟踪及射击标等。要满足上述较复杂的工艺要求在理论上应用古典控制理论分析闭环电力拖动系统的静态和动态特性，主要是应用频率特性法和跟轨迹法，间接地分析系统的稳定性和系统调节器参数计算，使系统在静态精度和快速响应指标都达到较高的水平。系统所用功率变换元件和装置已采用水银整流器、闸流管整流器和可控硅整流器，这些元件和装置上的交流装置，而且其效率均有较大的提高。在控制元件方面，也用磁放大器、电子管放大器、晶体管放大器等组成比例、积分、微分调节器，系统的响应时间大约从一秒左右下降到千分之一秒左右，放大倍数从10提高到 10^5 ，装置效率大体上从80%增加到95%，而且装置体积小，重量轻，运行、维护简单。这时期的电力拖动系统称为自动电力拖动系统，直到目前在我国各技术领域的生产机械上仍大量使用闭环反馈的这类电力拖动控制系统，为国民经济发展做出显著的成效。

第三阶段，大约从70年代到现在。随着生产工艺的发展和生产机械的改进，对电力拖动系统提出越来越高的要求。例如在加快起制动过程方面，要求在允许条件的前提下起制动时间最短，也就是最大限度充分利用设备的能力；此外，要求电力拖动系统在起制动过程消耗能量最小，以最经济的条件运行；在平稳起制动过程方面则要求在满足平稳条件下尽量加快起制动过程，即所谓平稳快速的控制规律。这些都是要求拖动系统分别满足在某项指标的极值状态下工作，即通常所说的最优控制。有些系统即使在干扰条件下工作，但仍要求系统能满足工艺某项指标的最优控制，这就是所谓的自适应控制规律。目前在控制系统方面已能比较好地解决系统的非线性、变参数、扰动下的最优工作特性。在这阶段分而治之采用了现代控制理论，主要是最优控制理论和自适应控制理论。这些理论是用状态空间法建立拖动系统的数学模型，然后对数学模型进行最优化处理求得各类最优控制规律，实现具有这样特性的系统所采用的元件和装置主要是大面积集成电路、微型计算机，因为计算机灵活、可靠，且用软件能完成各种复杂的运算控制规律，它是构成近代电力拖动计算机控制系统所不可缺少的控制部件。

总的讲来建设对生产总的要求是优质、高效、低耗，而具体到各类生产机械的电力拖动系统的要求就应当是提高控制质量、加快过渡过程、降低能量消耗。要实现这一总的目的，就必须应用近代控制理论和计算机控制技术。目前，这种近代电力拖动计算机控制还处于研制阶段，预估在不久的将来，它将会应用在要求较高的生产机械中，创造更大的经济效益。这样的问题带有一定的普遍性，很具有现实意义，是近代电力拖动系统发展的一个方向。

随着电力拖动自动控制在理论上和实践上的发展，又反过来促进生产机械和生产工艺亦进一步完善。

例如：由于电力拖动装置调速性能的改善，可以代替笨重价昂的机械变速装置，这点对大型机械尤为重要，笨重的传动机构可以得到简化；又如在轧钢厂的飞剪机上，采用同步电力拖动系统，就实现了机械轴难以实现的与轧机最后机架同步的要求；又如数控机床采用步进电机拖动系统，配合数字插补器可以完成任意轮廓仿形加工，代替了易磨损的机械仿形机构等。在我国目前提出的口号：机电一体化设备，正是这种电力拖动控制

系统和生产机械之间的相互影响和相互发展的典型。

电力拖动系统应用和推广，一直是生产机械改进工艺、简化设备、提高效率、降低消耗的关键。电力拖动系统在冶金、轧钢、机床、交通、运输以及造纸、橡胶、塑料、国防等方面得到广泛的应用，给国民经济发展带来巨大的影响。

例如：在炼铁高炉应用方面，高炉的拖动控制技术在降低能源消耗、提高自动化程度、改善劳动条件方面不断取得新进展。如高炉装料和布料系统以及热风炉鼓风机多数应用了交流电力拖动调速系统，大型鼓风机起动用无换向器电机方式，热风炉还采用计算机控制，可减少热风温差，提高热风温度平均约 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ ，效率可提高 $1\sim 2\%$ 。

在轧钢机应用方面，目前直流拖动系统往大型方向发展，如西德3600板轧机电机容量11540kW，供电电压1200V，电源用1200V可控硅装置，除节约电能、提高效率外，还减少占地面积。对于轧机交流拖动系统，由于大功率半导体器件研制成功，交流电机应用日渐增多，如西门子公司宽带钢热连轧机，其电机总容量10622kW，频率 $7\sim 14\text{Hz}$ ，转速为 $\pm 70\sim 140\text{r/min}$ 。轧钢机拖动控制应用数字直接控制（DDC）方式，在响应速度不比模拟控制差的条件下，可以提高控制精度。轧制工艺的总体控制应用计算机多级分散控制方式，如美国热轧带钢轧机分散计算机控制系统（DCCS）分为管理控制级，生产过程控制级（区域控制）以及拖动控制三级，主要特点是功能更加完善，控制趋向多级分散方式，可靠性更加提高。

在高速电梯应用方面，随着生产不断提高，生活不断改善，电梯设备比较普遍地应用在机关、工厂、学校、宾馆、医院、住宅以及高层的电视塔、观赏厅等建筑。目前电梯速度超过 2.5m/s 的，其拖动方案仍多用直流可控硅拖动系统，如日本三菱电机公司装在东京SUNSHINE60大楼中的直流拖动电梯，其提升速高达 10m/s ，是目前世界最高速度。近年也出现交流拖动系统变频调速控制的电梯，1983年日本东京GOTANDANN大厦安装了 4m/s 高速交流电梯。计算机在电梯控制中也得到应用，其一是拖动系统的计算机控制，可以使电梯平稳舒适和具有较高的平层精度，其二是在自动选层和多梯群控方面的应用。

在造纸机应用方面，造纸机拖动系统主要技术要求是多台电机速度协调按比例运行和高精度稳速运行两点，因之系统调速范围广，起制动和稳速运行精度要求高，近年计算机控制也在造纸机拖动控制系统得到应用。例如美国西屋公司1981年提供的造纸机，电机总功率7150kW，最高速度 1065m/s ，纸机每一分部均有微型机控制，其稳速精度为 0.005% ，各分部之间张力变化小于 $\pm 0.01\%$ 。

电力拖动系统在机床方面的应用，以数控机床为代表，拖动系统应用可控硅供电大惯量直流力矩电机，如美国盖梯司公司生产的力矩电机数据：最大功率4马力，低速时转矩 $3041\text{N}\cdot\text{cm}$ ，最大转矩达 $18050\text{N}\cdot\text{cm}$ ，其快速响应性能好。数控装置绝大多数采用计算机控制，如，可编程序控制器（PC），计算机数控（CNC）以及计算机群控（DNC）。

电力拖动系统应用面极广，除上面举例外在各方面均有成功的应用。例如，塔回转拖动系统，雷达、卫星天线的拖动系统，都是属于跟随空间目标一类位置随动系统，还有船舶自动驾驶的随动系统、天文台望远镜与天体同步运转的随动拖动系统等，要求系统的静态误差小于某一工艺性指标。同步旋转一类拖动系统应用在大、中型码头装卸场、贮料场的装卸桥、门型吊或水闸门的升降机构、保证同步运转，近年在石油工业中，钻井平台中转盘、绞车以及泥浆泵中都应用直流电机拖动，还有深入地下开采石油的潜油

系用潜油电机的拖动控制系统。矿山运输的电力机车拖动系统采用直流串激电机斩波调速技术等,此外,随着生产开发,技术进步,电力拖动系统也正在不断地应用到新的设备上和新的技术领域。

综上所述、电力拖动系统是由相互关联的元器件或装置组成的一个统一的整体。它从功率传递、能量变换角度使电能转变为机械能而做功、完成工艺要求;从信息传递、满足控制要求角度使系统按某一最优规律运动,达到某些指标最小(或最大),例如时间最小,能耗最小等。电力拖动系统不应理解为是电机的简单应用,因为电机本身只是电力拖动系统中的一个元件、是一个功率变换执行元件、而电力拖动系统是完成生产工艺要求的由众多元器件组成的一个整体。

本课程是工业电气自动化专业的一门专业基础课,是在电工基础、电机学基础上进行学习。课程主要内容如下所述,首先是电力拖动系统动力学,这章是本课的基础,所有各种类型的生产机械和拖动系统都抽象为一个动力学运动系统,然后分析这个动力学系统的起动,调速和制动各种状态的静动态特性、所以这章所讲述的内容是如何描述一个实际拖动系统、是建立电力拖动系统动力学运动方程的主要部份;其次是电力拖动系统的静态特性这部份,包括直流拖动系统和交流拖动系统的静态特性,主要分析拖动系统如何满足生产机械的各种运转状态的要求,阐述起动、调速、制动各种运转状态的静特性和参数的关系、书中介绍四象限分析方法,应当很好理解并掌握这种方法。再次是电力拖动系统动态特性部份,它包括直流和交流过渡过程两章。研究系统过渡过程特性有着重大的意义,例如缩短起制动反转的过渡过程时间可以大大地提高生产效率。在动态过程节省能量消耗,有些特殊工艺要求的生产机械、如平稳起制动、准确定位等问题都是电力拖动系统的动态特性这章所分析的内容。此外还介绍分析过渡过程的方法,如解析法、计算机仿真方法等,这是分析、设计系统必须掌握的工具和方法。最后一部份就是如何根据拖动系统工作的方式,从充分发挥电机能力的角度正确选择电机容量和使用电动机的问题,这就是电动机容量计算与选择一章。

学完本课程为后续课电力拖动自动控制系统,交流调速系统、变流技术和工厂电气控制设备打好基础。本课程主要介绍各种电力拖动系统的基本原理,分析各种电力拖动系统的静动态特性和参数关系以及满足不同运动规律的特性等,而如何在工程上实现的具体电路,选择那些类型元器件等问题将在后续课中讲述。

学习任何课程,除了要掌握具体原理、方法、知识之外,更主要的是独立分析问题和提出解决问题的能力。这种能力的培养和锻炼来自于课堂听讲,注意教师对问题的分析及实践锻炼。

第一章 电力拖动系统动力学

由前述可见，电力拖动系统也可以看成是由电动机拖动，并通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。虽然电动机可以是不同种类和特性，生产机械的负载性质也可以各种各样，但从动力学角度来分析时，它们都服从动力学的统一规律，所以我们首先分析电力拖动系统的动力学。本章主要分析、讨论运动方程的概念，计算以及与各参量的关系。

第一节 单轴电力拖动系统运动方程式

一、电力拖动系统运动方程式

1. 生产机械种类和典型单轴拖动系统 实际生产当中，存在着大量的各种各样的生产机械。但从其机械运动的形式来分类，生产机械及其电力拖动系统主要可以分成下列几大类型，如图1-1所示。

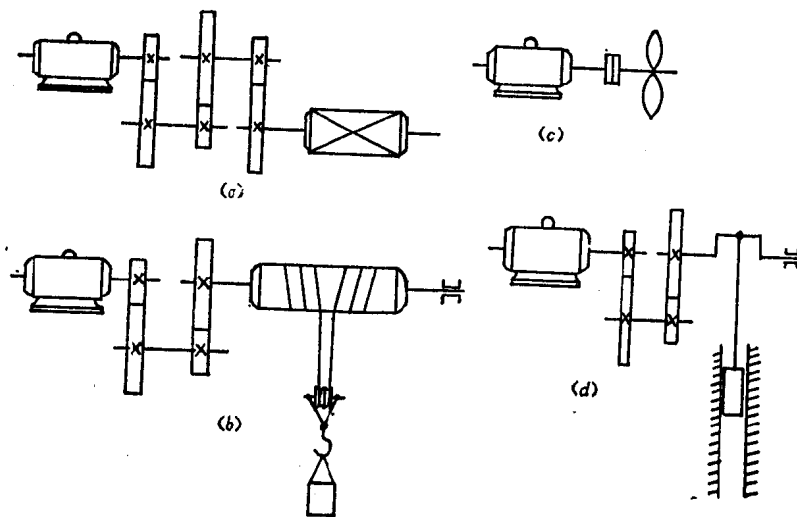


图 1-1 各种典型生产机械运动形式

图中 (a) 属于摩擦类负载，系由多根转动轴组成的旋转运动系统。例如，机床主轴拖动系统，以及带有变速机构的吊车走行机构等。

图中 (b) 属于位能负载类的生产机械，它的特点是位能负载为主还包括有少量的摩擦负载。例如吊车的提升机构，矿井卷扬机构等。

图中 (c) 所示是属于鼓风机类负载，它的特点是阻转矩随转速升高不断增大，如水泵，鼓风机等生产机械。

图中 (d) 所示是属于把旋转运动转化为直线往复运动的曲柄连杆机构。这种生产机械的负载转矩随曲柄轴转角而变化，如剪断机、冲压机以及活塞式空压机等。

我们分析生产机械拖动系统运动规律以及负载转矩性质，都是建立在古典动力学的理论基础。为了抓住本质，通常都将上述各种类型生产机械运动系统折算为等效的典型一根轴的单轴拖动系统，或者，有时折算成等效的典型平移直线运动系统。这样折算是为了便于分析和研究。

下面，首先讨论只包括一根轴的单轴旋转系统，找出其普遍的运动规律，即单轴拖动系统的运动方程式。然后再研究多轴拖动系统或平移运动系统折算成等效的简单的单轴拖动系统。

2. 单轴拖动系统运动方程式 图1-2所示为一根轴的单轴拖动系统，也可以看成是多轴拖动系统折算成等效的单轴系统。它概括了千千万万生产机械运动系统的共性。

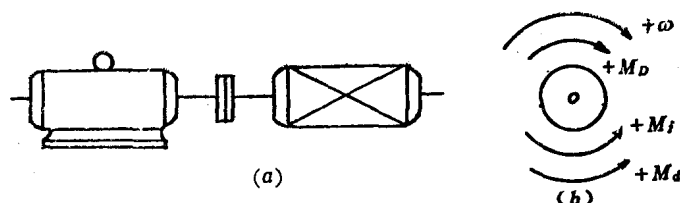


图 1-2 单轴拖动系统及转矩转速正方向

当电动机的转矩 M_D 作用于此系统时，依照动力学定律知，除克服运动系统的静阻转矩 M_f 之外，还使整个系统沿着电动机转矩 M_D 的作用方向，产生角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 。而角加速度的大小与旋转体的转动惯量 J 成反比。把这个关系用方程式表示时如 (1-1) 式：

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

式中 M_D ——电动机的拖动转矩 ($N \cdot m$)；

M_f ——单轴旋转系统的静态摩擦转矩 ($N \cdot m$)；

J ——单轴旋转系统的转动惯量 ($N \cdot m \cdot s^2$)；

ω ——单轴旋转系统的角速度 (rad/s)；

t ——时间 (s)。

式 (1-1) 称为单轴拖动系统的运动方程式。实质上，此式就是旋转运动系统的牛顿第二定律。

当电动机的转矩 M_D 小于系统的静态阻转矩 M_f 时，即 $M_D < M_f$ ，整个旋转着的运动系统将沿着静阻转矩 M_f 的作用方向产生角减速度 $\frac{d\omega}{dt}$ ，其大小也是与旋转体的转动惯量 J 成反比，也如 (1-1) 式所示。

在电力拖动系统各种运转状态的分析当中，常用转矩平衡的概念来表达运动方程式 (1-1)。在拖动系统加速、减速或正转、反转等工作状态中，电动机转矩 M_D 总是被轴上的静阻转矩 M_f 和动阻转矩 M_d 所平衡。依照达兰培尔定律也可以把 (1-1) 式写成下式：

$$M_D - M_f = M_d \quad (1-2)$$

(1-2) 式称为转矩平衡方程式。由 (1-1) 式知：

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

动态阻转矩 M_d 也称为惯性转矩, 它的大小与系统转动惯量 J 和角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 的乘积成比例。当角速度不发生变化时, 惯性转矩为零; 如果系统的角速度发生改变时, 也就是有角加速度或角减速度时, 惯性转矩就和角加(减)速度成比例的存在。也就是说当系统处于过渡过程时, 产生惯性转矩, 而当系统处于稳态工作时惯性转矩为零。它的特点说得通俗些就是反对速度变化的: 当系统加速时, 拖动转矩 M_D 除克服静态阻转矩 M_J 之外, 还得克服反对加速的动态阻转矩 M_d ; 当系统减速时, 制动转矩 M_D 和静态阻转矩 M_J 共同克服反对减速的动态阻转矩 M_d 。

为(1-1)式中角速度和各转矩的正方向作如下的规定: 角速度 ω 的正方向, 规定为对观察者的顺时针方向, 如图1-2(b)所示。电动机所产生的电磁转矩 M_D 的方向与 ω 的正方向相同者规定为正方向, 即对观察者顺时针方向为正, 如图1-2(b)所示, 反之为负。生产机械静负载转矩 M_J 的方向, 规定它与角速度 ω 正方向相反为正, 即对观察者逆时针方向为正, 反之为负, 如图1-2中(b)所示。这样规定正好符合(1-1)式中静转矩 M_J 前有一个负号的表达关系。电动机电磁转矩 M_D 和负载转矩 M_J 的方向是互不关联, 分别根据工艺状况各自独立, 因此它们在运动方程式中是处于主导地位, 而动态转矩 $M_d = J \frac{d\omega}{dt}$ 的方向是由拖动系统的电动机电磁转矩 M_D 和负载转矩 M_J 共同决定的, 所以动态转矩 M_d 在运动方程式中是处于从属地位。

现在我们为动态转矩 M_d 的正方向作如下的规定: 加速过程中 $M_D - M_J > 0, \frac{d\omega}{dt} > 0$, 此时 M_d 的方向为反对 ω 增加的方向, 我们把这个方向规定为正, 即 $M_d > 0$; 减速过程中, $M_D - M_J < 0, \frac{d\omega}{dt} < 0$, 此时 M_d 的方向为反对 ω 减少的方向, 这时 M_d 的方向与规定正方向相反, 故称为负方向, 即 $M_d < 0$ 。

图1-2(b)所示为拖动系统加速过程的运动情况, 图中标出各转矩和角速度的正方向。

3. 单轴拖动系统功率平衡方程式 为了全面了解运动方程式的不同表现形式, 下面将动能平衡方程式和功率平衡方程式写出, 便于灵活运用。

旋转着的拖动系统, 其转矩随转角 θ 的位移而作功, 如:

$$\int M_D d\theta_D - \int M_J d\theta_D = \int M_d d\theta_D$$

$$\text{或} \quad A_D - A_J = A_d \quad (1-4)$$

式中 A_D ——电动机转矩作用在旋转着的拖动系统时, 输出或吸收的机械能;

A_J ——生产机械的负载转矩作用在旋转着的拖动系统时, 输出或吸收的机械能;

A_d ——旋转着的拖动系统转动惯量所贮存的动能, 随着转速的增高或减少, 拖动系统将吸收或释放的动能;

θ_D ——电动机轴的角位移。

显而易见, (1-4) 式是表明拖动系统机械能守恒的关系式。

依照力学定律, 能量 A 对时间 t 的变化率称为功率。因此, 对 (1-4) 式, 求它对时间 t 的导数, 则得功率平衡方程式:

$$\frac{dA_D}{dt} - \frac{dA_I}{dt} = \frac{dA_d}{dt}$$

或

$$P_D - P_I = P_d \quad (1-5)$$

式中 P_D ——电动机产生或吸收的机械功率;

P_I ——生产机械负载吸收或释放的机械功率;

P_d ——拖动系统转动惯量存贮的动态功率。

(1-5) 式在分析拖动系统时会经常碰到。

判断电动机从运转着的拖动系统中是吸收机械功率还是输出机械功率, 完全取决于电动机电磁转矩 M_D 和转速 n 的方向。当作用在系统上的 M_D 和转速 n 同方向时, 电动机输出功率给旋转着的拖动系统。当略去空载损耗功率时, 此功率的一部分转变为机械功率, 它完成工艺过程而做功, 另一部分当转速变化时存贮于运动系统。当 M_D 与 n 的方向相反时, 电动机从旋转着的拖动系统中吸取机械功率, 转换为电功率。

生产机械的负载转矩 M_I 作用在旋转着的拖动系统时, 当 M_I 与 n 同方向, 表示放出机械功率给旋转着的拖动系统; 当 M_I 与 n 反方向时, 表示从旋转着的拖动系统中吸收机械功率。

应当注意, 电动机的功率 P_D 不管是将电功率转化为机械功率, 或是将机械功率转化为电功率, 都是独立进行的, 这并不影响生产机械负载是吸收功率还是放出机械功率 P_I 。它们两者 (P_D 和 P_I) 都是由各自独立的条件所决定。而旋转的拖动系统转动惯量的动态功率 P_d , 则是根据功率平衡关系, 由电动机的功率 P_D 和负载的机械功率 P_I 共同决定。

例如, 拖动系统的电动机转矩 M_D 和转速 n 的方向相同时, 电动机输出功率, 这时拖动系统转速 n 增加, 电动机的功率一部分做功满足工艺要求, 另一部分使系统增加贮存的机械功率, 即增加了转动惯量的动态功率 P_d 。反之, 当拖动系统转速 n 减小时, 拖动系统的转动惯量释放贮存的机械功率, 也即减少了转动惯量的动态功率 P_d 。

上面所述 (1-1), (1-2), (1-4), (1-5) 式是电力拖动系统的运动方程式和功率平衡方程式, 它们是电力拖动系统机械运动形式的普遍客观规律, 是研究电力拖动系统各种运转状态的基础。运动方程式 (1-1) 不仅描述了系统机械运动的普遍规律, 而且在具体运转状态中还是设计计算的依据。

4. 拖动系统运动方程式的实用表达式 (1-1) 式在实际工程计算中, 因为单位的关系不太习惯, 也不方便, 所以在实际工作中角速度 ω (rad/s) 用旋转电机轴的转速 n (r/min) 代替; 旋转系统的转动惯量 J ($N \cdot m \cdot s^2$) 用旋转系统的飞轮惯量 GD^2 ($N \cdot m^2$) 代替 (GD^2 有时也称飞轮转矩)。它们的相互关系为:

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

$$GD^2 = mg(2\rho)^2 = 4gm\rho^2 = 4gJ \quad (N \cdot m^2) \quad (1-7)$$

式中 g ——重力加速度, $g = 9.81$ (m/s^2);

m ——整个系统旋转部分的质量 (kg);

ρ ——系统转动部分质量对其旋转轴的回转半径 (m)。

应当注意, GD^2 这个物理量是整个旋转系统的飞轮惯量, 它是各个旋转部件飞轮惯量折算到电机轴上的总和。虽然其中 G 相当于系统转动部分的重量, D^2 相当于旋转体转动直径 (2ρ) 的平方, 但是由于将它们结合在一起用来表示系统的飞轮惯量, 所以在实际应用中, 无论是计算或书写 GD^2 这两个符号时, 总应是写在一起, 而不能分开。因为写在一起它代表飞轮惯量这样一个物理量, 分开时其每个符号所代表的物理量就是又一种内容。此点应当特别注意。

考虑式 (1-6) 和 (1-7), 则 (1-1) 式可以用旋转系统飞轮惯量 GD^2 和转速 n 来表示, 此时, 拖动系统运动方程式:

$$M_D - M_j = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-8)$$

(1-8) 式为今后常用的运动方程式形式。但要注意, 式中系数 $375 = \frac{49 \cdot 60}{2\pi}$ 是带有加速度量纲的系数。

关于旋转系统中飞轮惯量随转角变化的拖动系统运动方程式, 在此不加论述。如果想分析这类问题, 请参阅有关书籍。

综上所述, 电力拖动系统运动方程式 (1-8) 式为实用表达形式。 M_j 是静态阻转矩, M_D 是电动机拖动转矩, 它们构成运动系统的一对主要矛盾。当 $M_D > M_j$ 时, $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} > 0$, 即运动系统处于加速的过渡过程。随着时间 t 增加, 转速 n 也增加, 动态转矩阻碍系统的加速, 也就是动态转矩与作用在旋转物体各转矩之和相平衡。当 $M_D < M_j$ 时, $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$, 即加速度是负的, 也即随着时间 t 增加转速 n 下降。此时动态转矩阻碍系统减速, 但动态转矩也仍与系统其他作用转矩之和相平衡, 即拖动系统的各转矩在动态过程一直保持平衡的关系。如果 $M_D = M_j$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 即系统的转速 n 不随时间 t 变化, 系统处于稳定状态, 动态转矩等于零, 即以恒定转速运转或静止不动。

为了求解运动方程式, 必须对其中的参量进行深入的分析, 即对电动机的电磁转矩 M_D 、生产机械的负载转矩 M_j 以及拖动系统的飞轮惯量 GD^2 等参数进行分析。

电动机的电磁转矩 M_D 对转速 n 的关系, 是各类电动机的一个重要特性, 我们在直流电动机课程中已有了一定的认识, 准备在下一章还要对它进行专门的分析。

生产机械负载转矩 M_j 的特性以及拖动系统飞轮惯量 GD^2 的计算, 下面要逐一加以讨论。

二、电力拖动系统的负载静转矩

1. 负载转矩按工艺参数分类 生产机械的负载静转矩特性是指生产机械的静转矩 M_j 与工艺过程的某些因素的关系, 例如转速、行程、时间等。根据负载静转矩 M_j 与这些因素的依赖关系, 一般可分成下列几种类型:

(1) 静转矩 M_j 恒定不变, $M_j = \text{const.}$ 属于这一类的生产机械如提升机构, 提升机的走行机构、皮带运输机、轧机以及金属切削机床等。它们的静转矩不随转速变化而保