



普通高等教育“十二五”规划教材

交直流调速控制系统

张红莲 主 编

刘崇伦 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

交直流调速控制系统

主 编 张红莲
副主编 刘崇伦
编 写 袁兴华 陶善宏
主 审 范孝良



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书共分7章,重点介绍直流电动机和交流电动机的拖动基础以及调速控制系统的基本原理和典型应用的分析方法。第1章介绍电力拖动系统的动力学基础;第2章介绍直流电动机的电力拖动基础;第3章介绍直流可控电源—电动机调速系统;第4章介绍直流电动机闭环调速控制系统;第5章介绍异步电动机的电力拖动基础;第6章介绍基于稳态模型的异步电动机调速系统;第7章介绍基于动态模型的异步电动机调速系统,包括矢量控制和直接转矩控制。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、机械工程及其自动化等相关专业,以及高等职业技术学院、高等专科学校、继续教育学院等院校的自动化、电力技术类等专业的教材,也可作为从事运动控制系统和电动机调速控制研究、设计的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

交直流调速控制系统/张红莲主编. —北京:中国电力出版社, 2011

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7810 - 7

I. ①交... II. ①张... III. ①交流电机—调速—控制系统—高等学校—教材②直流电机—调速—控制系统—高等学校—教材 IV. ①TM330.12②TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 128317 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 5 月第一版 2011 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 309 千字

定价 21.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

运动控制、电动机调速控制在国民经济各部门起着重要的作用,电气传动技术不断飞速发展。为了适应学科发展的需要,增强学生面向工程实际的适应能力,按照普通高等教育“十二五”规划教材出版要求,兼顾应用型本科和高等职业教育的教学要求,在多年从事该课程教学的基础上,我们编写了本书。本书重点介绍直流电动机和交流电动机的拖动基础以及调速控制系统的基本原理和典型应用的分析方法,遵循理论和实际相结合的原则,使学生既掌握各种调速控制系统的基本原理,又掌握这类系统的分析方法及应用,注重反映工业、工程应用中新的调速技术和调速系统。本教材内容选材合理,理论联系实际,强调工程应用。

本教材具有以下特点:

(1) 以“交直流调速控制系统”为核心,辅有“电机与拖动”、“电力电子技术”、“计算机控制技术”等相关内容的介绍。

(2) 以“控制系统的原理、分析、设计”为主线,由简入繁、由低到高地循序渐进,以直流调速为基础,充实交流调速内容,兼顾电力拖动在运动控制系统中的实际应用。

(3) 以连续模拟控制为主干,作为分析设计调速控制系统的主要方法,同时兼顾了数字计算机控制技术的应用。

(4) 理论教学内容中配有相关的实例分析,以使学生加深理解,联系实际,做到学以致用。

(5) 对 MATLAB/Simulink 软件的仿真技术进行了简要介绍,对调速控制系统进行了仿真实验,并给出了仿真结果。

本教材由张红莲任主编,刘崇伦任副主编。绪论、第4章由张红莲和刘崇伦共同编写,第1~3章由刘崇伦编写,第5~7章由张红莲编写,参加本书编写的还有袁兴华、陶善宏。全书由张红莲统稿、定稿。华北电力大学范孝良教授对全书进行了认真的审阅,并提出了许多宝贵意见。在编写本书的过程中参阅和使用了许多相关文献,在此向这些文献资料的作者表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促和编者的水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2011年3月

目 录

前言

绪论	1
0.1 交直流调速控制系统组成及其相关学科	1
0.2 交直流调速技术概况	2
0.3 课程的目的	4
第1章 电力拖动系统的动力学基础	5
1.1 电力拖动的动力学基础	5
1.2 多轴拖动系统的折算	7
1.3 生产机械的负载转矩特性	10
1.4 电力拖动系统稳定运行条件	12
习题	13
第2章 直流电动机的电力拖动基础	14
2.1 他励直流电动机的机械特性	14
2.2 他励直流电动机的起动	16
2.3 他励直流电动机的制动	18
2.4 他励直流电动机的调速	23
2.5 直流调速方式与负载的配合	28
习题	31
第3章 直流可控电源—电动机调速系统	32
3.1 直流电动机调速方法及特点	32
3.2 可控直流电源	32
3.3 相控整流—电动机系统	38
3.4 直流 PWM 变换器—电动机系统	43
3.5 调速系统的要求及开环系统的问题	49
习题	50
第4章 直流电动机闭环调速控制系统	52
4.1 转速负反馈单闭环直流调速系统	52
4.2 无静差调速系统和积分控制规律	61
4.3 单闭环调速系统的限流保护	66
4.4 转速电流双闭环直流调速系统	69
4.5 调速器的工程设计方法	76
4.6 按工程设计方法设计双闭环系统的调节器	90
4.7 弱磁控制的直流调速系统	100
4.8 可逆直流调速控制系统	102

习题.....	109
第 5 章 异步电动机的电力拖动基础	112
5.1 三相异步电动机的机械特性	112
5.2 三相异步电动机的起动	117
5.3 异步电动机的调速	121
5.4 三相异步电动机的制动	129
习题.....	134
第 6 章 基于稳态模型的异步电动机调速系统	135
6.1 变压变频调速的基本控制方式	135
6.2 电压频率协调控制时的机械特性	136
6.3 变压变频器的主要类型	139
6.4 变压变频调速系统中的脉宽调制 (PWM) 技术.....	145
6.5 基于异步电动机稳态模型的变压变频调速	160
习题.....	165
第 7 章 基于动态模型的异步电动机调速系统	166
7.1 异步电动机的动态数学模型	166
7.2 三相异步电动机的坐标变换	171
7.3 三相异步电动机的动态数学模型	174
7.4 异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	179
7.5 基于动态模型按定子磁链控制的直接转矩控制系统	191
7.6 矢量控制与直接转矩控制的比较	195
习题.....	196
参考文献	197

绪 论

调速控制是通过对电动机的控制,将电能转化为机械能,并且控制工作机械按照给定的运动规律运行的装置,其任务是通过对电动机电压、电流、频率等输入电量的控制,来改变工作机械的转矩、速度、位移等机械量,使各种工作机械按人们期望的要求运行,以满足生产工艺及其他应用的需要。

0.1 交直流调速控制系统组成及其相关学科

交直流调速控制系统由电动机、功率放大及变换装置、控制器及相应的传感器等组成,其结构如图 0-1 所示。它是以各类电动机为控制对象,以计算机和其他电子装置为控制手段,以电力电子装置为弱电控制强电的纽带,以控制理论为理论依据,以计算机数字仿真和计算机辅助设计为研究和开发工具,因此交直流调速控制已成为电机学、电力电子技术、微电子技术、计算机控制技术、控制理论、信号检测与处理技术等多门学科相互交叉的综合性学科。下面分别简要介绍各部分的作用。

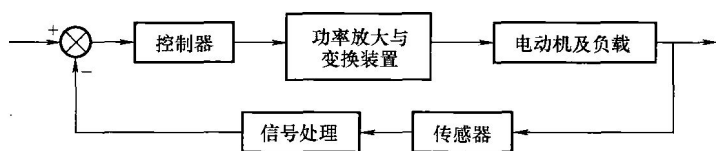


图 0-1 交直流调速系统结构

一、电动机

交直流系统的控制对象为电动机。电动机从类型上可分为直流电动机和交流电动机（包括交流异步电动机和交流同步电动机），从用途上可分为用于调速系统的驱动电动机和用于伺服系统的伺服电动机。电动机是调速控制系统的执行机构，电动机的结构和原理决定了运动控制系统的设计方法和运行性能，新型电动机的发明会带出新的运动控制系统。

二、功率放大与变换装置

功率放大与变换装置有电机型、电磁型、电力电子型等，现在多用电力电子型的。电力电子器件经历了由半控型向全控型、由低频开关向高频开关、由分立的器件向具有复合功能的功率模块发展的过程。以电力电子器件为基础的功率放大与变换装置是弱电控制强电的媒介，在运动控制系统中作为电动机的可控电源，其输出电源质量直接影响运动控制系统的运行状态和性能。

三、控制器

控制器分模拟控制器和数字控制器两类，也有模数混合的控制器，现在已越来越多地采用全数字控制器。计算机控制可以实现不同于一般线性调节的控制规律，达到模拟控制系统难以实现的控制功能和效果。计算机控制技术的应用使对象参数辨识、控制系统的参数自整

定和自学习、智能控制、故障诊断等成为可能，大大提高了运动控制系统的智能化和系统的可靠性。各种高性能的大规模或超大规模的集成电路，方便和简化了调速控制系统的硬件电路设计及调试工作，提高了运动控制系统的可靠性。高速、大内存容量、多功能的微处理器或单片微机的问世，使各种复杂的控制算法在运动控制系统中的应用成为可能，并大大提高了控制精度。

四、信号检测与处理

运动控制系统中常用的反馈信号是电压、电流、转速和位置，为了真实可靠地得到这些信号，并实现功率电路（强电）和控制器（弱电）之间的电气隔离，需要相应的传感器。电压、电流传感器的输出信号多为连续的模拟量，而转速和位置传感器的输出信号因传感器的类型而异，可以是连续的模拟量，也可以是离散的数字量。

运动控制系统的本质是反馈控制，即根据给定和输出的偏差实施控制，最终缩小或消除偏差。运动控制系统需通过传感器实时检测系统的运行状态，构成反馈控制，并进行故障分析和故障保护。

五、控制理论

控制理论是运动控制系统的理论基础，是指导系统分析和设计的依据。控制系统实际问题的解决常常能推动理论的发展，而新的控制理论的诞生，又为研究和设计各种新型的运动控制系统提供了理论依据。

0.2 交直流调速技术概况

一、直流调速技术概况

用直流电动机作为原动机的传动方式称为直流调速，由于直流调速系统具有良好的起制动、正反转及调速等性能，目前在传动领域中仍占有主要地位。虽然近年来交流电动机的调速控制技术发展很快，但就其闭环控制的工作原理来说，直流电动机的调速控制理论和实现都是交流电动机调速控制的基础。从根本上说，由于直流电动机电枢和磁场能独立进行激励控制，而且转速和输出转矩的描述是对可控电压（或电流）激励的线性函数，因此，容易实现各种直流电动机的调速控制，也容易实现对控制目标的“最佳化”，这也就是直流电动机长期主导调速领域的原因。晶闸管供电的直流调速系统具有良好的技术经济指标，目前国内多数调速系统还是沿用晶闸管电动机传动结构。晶闸管存在着控制的非线性及功率因数较低等缺点，难以实现高精度、宽范围的调速控制。随着 GTO 晶闸管、GTR、P-MOSFET、IGBT 和 MCT 等全控型功率器件的出现，利用这些有关断能力的器件，取消了原来普通晶闸管系统必需的换相电路，简化了电路的结构，提高了功率和工作效率，降低了电路噪声，也缩小了电力电子装置的体积和质量。谐波成分大、功率因数差的相控变流器逐步由斩波器或脉冲宽度调制型（PWM）变流器所代替，明显地扩大了电动机传动系统的调速范围，提高了工作效率和调速精度，改善了快速性、效率和功率因数。PWM 电源终将取代晶闸管相控式可控功率电源，成为可控直流电源的主流，一种称为软性 PWM 的电源将主宰传动控制领域，成为理想化的功率电源。

二、交流调速技术概况

由于直流电动机存在机械换向问题，其最大供电电源受到限制，机械强度也限制了转速

的进一步提高,结构的影响使其不适合腐蚀性、易爆性和含尘气体的特殊场合。交流电动机以其众多的优点,一直以来受到人们的重视,它体积小、质量轻、无电刷和换向器、转动惯量小、制造简单、结构牢固、工作可靠、易于维修。只是长期以来一直没有理想的调速方案,只能应用于恒速拖动领域。晶闸管等功率器件的出现使交流电动机调速的发展出现了一个飞跃,使得采用半导体变流技术的交流调速得以实现。由于交流电动机调速系统的控制比较复杂和调速性能差、装置价格高、效率低,使交流调速未能推广。自从微处理器出现后,国外在绕线转子异步电动机串级、无换向器电动机调速、笼型异步电动机的矢量控制以及 PWM 技术方面,都已获得重大突破与发展,进入应用阶段。目前由于大功率半导体器件、大规模集成电路的发展,交流电动机调速系统已具备了较宽的调速范围、较高的调速精度、较快的动态响应、较高的工作效率以及可以四象限运行等优异性能,其动静特性均可以与直流电动机调速系统相媲美。可以说,交流调速逐步取代直流调速已成为明显的发展趋势,特别是“节能型”交流调速技术得到很大发展。在过去大量应用所谓的不变速拖动系统中,有相当一部分是风机、水泵等拖动系统负载,这类负载约占工业电力拖动总量的一半。其中有些并不是真的不需要变速,只是由于过去的交流电动机不能调速,因而不得不依赖挡板和阀门来调节流量,同时也消耗掉大量的电能。如果采用交流电动机调速来改变风量或流量,效率将会大大提高。从各方面看,将恒速电动机改造为交流调速电动机,每台电动机约节能 20% 以上,总体的节能效益是很可观的。目前交流调速系统已占据了主导地位。

三、电动机运动控制系统的发展趋势

随着电力电子技术的进步,微机控制技术、传感器技术、微电子技术的发展应用,新型控制策略出现,使电动机控制、电气传动发展到了新的阶段,总结电动机运动控制系统的发展趋势如下:

(1) 高频化。在功率驱动装置中,低频的半控器件在中小功率范围将被高频的全控型电力电子器件取代,变换技术由相位控制转变成脉宽调制,这样既可以提高系统性能,又可以改善电网的功率因数。

(2) 交流化。由于交流电动机本身的优势,随着交流调速技术的提高和成本的降低,不仅现有的直流调速将被交流调速取代,而且大量的原来恒速运行的交流传动系统也将改为交流调速系统,原来直流调速所不能达到的高转速、大功率领域也将采用交流调速。

(3) 数字化、网络化。微处理器的发展,使数字控制器简单又灵活,模拟电子控制基本上让位于计算机数字控制,计算机仿真与辅助设计逐步融入运动控制系统的性能分析与设计中。随着系统规模的扩大和系统复杂性的提高,单机的控制系统越来越少,取而代之的是大规模的多机协同工作的高度自动化的复杂系统,这就需要计算机网络的支持,将传动设备和控制器作为一个节点联到现场总线或工业控制网上,实现集中的或分散的生产过程实时监控。

(4) 智能化。借助于数字和网络技术,智能控制已经深入到电动机运动控制系统的各个方面,例如模糊控制、神经网络控制、解耦控制等。各种观测器和辨识技术应用于电动机运动控制系统中,大大改善了控制系统的性能,为其走向复杂的多层的网络控制提供了可能。电动机运动控制正由简单的单机控制走向多机多种控制工程协调的系统集成控制。

0.3 课程的目的

本课程的目的：使读者掌握交直流调速控制系统的基本组成原理，并能结合工程实际、根据生产设备技术指标，选择控制系统的结构；在掌握反馈闭环控制思想基础上，能合理正确地选择和整定系统的动、静态参数；在功率可控电路和控制电路的实现上，掌握目前普及应用的技术和正在发展的新技术，掌握模拟电路、微处理器、智能功率集成电路以及目前广泛应用的各类器件及由这些器件组成的系统；能从工程实用的角度提出问题、分析问题和解决问题；通过本课程的学习，能胜任电气传动控制系统的使用、维护和管理工作的。

第1章 电力拖动系统的动力学基础

1.1 电力拖动的动力学基础

电力拖动是由电动机拖动,并通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。虽然电动机可以有不同的种类和特性,生产机械的负载特性也可以是各种各样的,但是从动力学角度来看,它们都服从统一的动力学规律,所以研究电力拖动时,要首先分析电力拖动系统的动力学问题。

1.1.1 电力拖动系统的组成

电力拖动系统一般由电动机、生产机械的传动机构、工作机构、控制设备和电源组成,通常又把传动机构和工作机构称为电动机的机械负载,如图1-1所示。

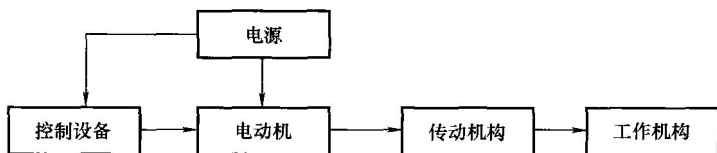


图 1-1 电力拖动系统的组成

1.1.2 电力拖动的运动方程式

一、运动方程式

为了推导电力拖动系统的运动方程式,首先来分析单轴拖动系统的运动特点。单轴电动机拖动系统就是只包含一根轴的系统,如图1-2(a)所示。电力拖动系统经过化简,都可转化为电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统,各物理量的方向标示如图1-2(b)所示。

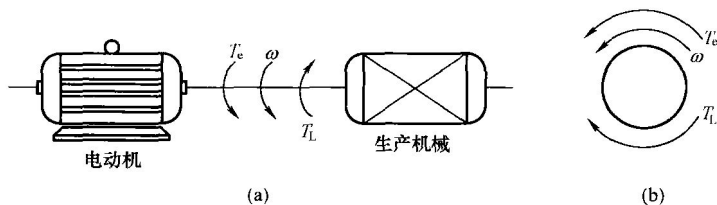


图 1-2 单轴电力拖动系统

(a) 单轴电力拖动系统; (b) 系统各物理量的方向标示

当电动机的转矩 T_e 作用于这一系统时,根据牛顿动力学定律可知,电动机的转矩除了克服运动系统的静阻转矩 T_L 外,还使整个系统沿着电动机转矩 T_e 的作用方向,产生角加速度 $d\omega/dt$ 。而角加速度的大小与旋转体的转动惯量 J 成反比,这种关系可用方程式表示如下

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

式(1-1)为单轴拖动系统以转矩表示的运动方程式,是电动机拖动系统运动方程的一

般形式。由于此式所用单位在计算和使用中不太方便,因此,在电动机拖动的工程应用和实验计算中,往往不用转动惯量 J ,而用飞轮转矩 GD^2 来表征旋转物体的惯性作用。旋转物体的角速度也用电动机轴上的转速 n 表征。在工程计算中,通常用转速 n (r/min) 代替角速度 ω (rad/s),用飞轮转矩 GD^2 代替转动惯量 J 。由于 n 与 ω 的关系为

$$\omega = 2\pi n/60 \quad (1-2)$$

J 与 GD^2 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中: g 为重力加速度,可取 $g=9.81\text{m/s}^2$; m 为整个系统旋转部分的质量 (kg); G 为整个系统旋转部分的质量 (N); r 为系统转动部分质量对其旋转轴的回转半径 (m); D 为系统转动部分质量对其旋转轴的回转直径 (m)。

将式 (1-2) 和式 (1-3) 代入式 (1-1), 可得电力拖动运动方程式的实用形式

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

式中: $375=4g \times 60/2\pi$, 是具有加速度量纲的系数。

二、运动方程中方向的约定

式 (1-4) 中的 T_e 、 T_L 和 n 都是有方向的, 它们的实际方向可以根据图 1-2 (b) 给出的参考正方向, 用正、负号来表示。这里规定 n 及 T_e 的参考方向对观察者而言逆时针为正, 反之为负; T_L 的参考方向顺时针为正, 反之为负。这样规定参考正方向恰好符合式 (1-2) 中负载转矩 T_L 前有一个负号的表达关系。

三、运动方程的物理意义

式 (1-4) 表征了电动机拖动系统机械运动的普遍规律, 是研究电动机拖动系统各种运转状态的基础, 也是生产实践中设计计算的依据。式 (1-4) 表明电力拖动系统的转速变化 dn/dt (即加速度) 由电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的负载转矩 T_L 的关系决定。

(1) 当 $T_e=T_L$ 时, $dn/dt=0$, 表示电动机以恒定转速旋转或静止不动, 电力拖动系统的这种运动状态被称为稳态或静态。

(2) 若 $T_e>T_L$ 时, $dn/dt>0$, 系统处于加速状态。

(3) 若 $T_e<T_L$ 时, $dn/dt<0$, 系统处于减速状态。

也就是一旦 $T_e \neq T_L$, 则转速将发生变化, 我们把这种运动状态称为动态或过渡状态。在理解和使用运动方程式 (1-4) 时, 还必须注意以下几个问题:

(1) GD^2 是表示整个旋转系统惯性的物理量, 是一个符号, 切不可把它割裂开而理解为系统的 G 与 D^2 的乘积。

(2) 电动机枢及其他机械部件的飞轮转矩 GD^2 的数值可从相应的产品目录或有关手册中查得, 其单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

(3) 为了使运动方程式具有普遍性, 能够描述各种各样运动形式和运行状态的系统, 式中转矩 T_e 与 T_L 应带有正、负号。一般是首先规定某一旋转方向为正方向, 对于电动机的转矩, 若转矩方向与所规定的正方向相同, 则 T_e 带正号, 反之则带负号; 而负载转矩的正负号与上述规定正好相反, 即负载转矩的方向与所规定的正方向相同时, 则 T_L 带负号, 相反时则带正号。因此运动方程式的一般形式为

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

1.2 多轴拖动系统的折算

在电力拖动系统中,如果电动机和工作机构直接相连,这时工作机构的转速等于电动机的转速,工作机构的转矩等于作用在电动机轴上的阻转矩,这种系统称为单轴系统。前面我们讨论了单轴电力拖动系统,但是,实际的电力拖动系统往往是复杂的,有的生产机械需要通过一套传动机构进行转速匹配,因此增加了很多齿轮和传动轴,使电动机的角速度 ω 传递到工作机构时,变成符合工作机构需要的角速度 ω_L ;有的生产机械需要通过传动机构把旋转运动变成直线运动,比如刨床、起重机等。图1-3(a)所示的就是一个三轴系统,对这样一些复杂的电力拖动系统,我们可以采用以下办法来研究解决其动力学问题:

(1) 对拖动系统的每根轴分别列出其运动方程式和各轴之间相互联系的方程式,用列方程组的办法来消除中间变量。这种解法会因方程较多、计算量大而比较繁杂,而就电力拖动系统而言,主要是把电动机作为研究对象,并不需要详细讨论每根轴的问题。

(2) 用折算的方法把复杂的多轴拖动系统等效为一个简单的单轴拖动系统,然后通过等效系统建立运动方程,以实现问题求解,这种方法相对较为简单。

1.2.1 系统等效的原则

在电力拖动系统的分析中,对于一个复杂的多轴电力拖动系统,比较简单而且实用的方法是用折算的方法把它等效成一个简单的单轴拖动系统来处理,并使两者的动力学性能保持不变。一个典型的等效过程如图1-3所示,通过传动机构的力学传递关系折算把实际的多轴系统表示成等效的单轴系统。

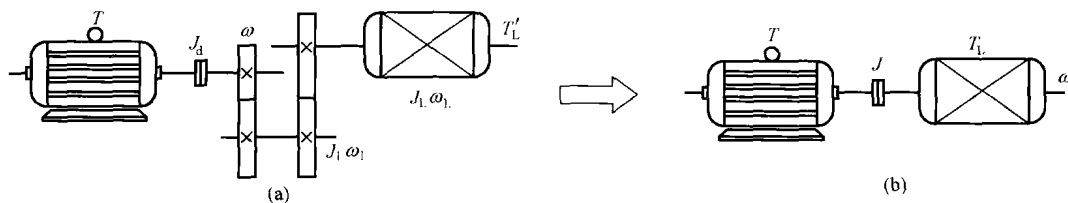


图1-3 电力拖动系统的等效原理

(a) 实际的多轴系统; (b) 等效的单轴系统

在电力拖动系统中,折算一般是把负载轴上的转矩、转动惯量或者是力和质量折算到电动机轴上,而中间传动机构的传动比在折算中就相当于变压器的匝数比。系统等效的原则是保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。若以电动机轴为研究对象,需要折算的量有工作机构的负载转矩、系统中各轴(除电动机轴之外)的转动惯量。对于某些直线运动的机构,则必须将直线运动的质量 m_L 及运动所需克服的阻力 F_L 折算到电动机轴上。

1.2.2 多轴系统等效为单轴系统的方法

一、静态转矩的折算

先考虑一个简单的两轴系统,如图1-4所示,假如要把工作机构的转矩 T'_L 折算到电动机轴上,其静态转矩的等效原则是系统的传送功率不变。

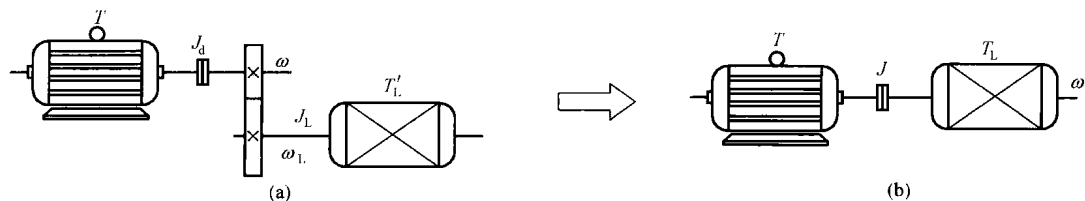


图 1-4 两轴拖动系统的等效

如果不考虑传动机构的损耗，工作机构折算前的机械功率为 $T'_L \omega_L$ ，折算后电动机轴上的机械功率为 $T_L \omega$ 。根据功率不变原则，应有折算前后工作机构的传递功率相等，即

$$T'_L \omega_L = T_L \omega \quad (1-6)$$

式中： ω 、 ω_L 分别是电动机的转速和生产机械的负载转速。

由式 (1-6) 可得折算后工作机构的转矩为

$$T_L = \frac{T'_L}{\omega/\omega_L} = \frac{T'_L}{j} \quad (1-7)$$

式中： j 是电动机轴与工作机械轴间的转速比， $j = \omega/\omega_L = n/n_L$ 。

如果要考虑传动机构的损耗，可以在折算公式中引入传动效率 η_c 。由于功率传送是有方向的，因此引入效率 η_c 时必须注意因功率传送方向的不同而不同。现分两种情况讨论：

(1) 电动机工作在电动状态。此时由电动机带动工作机构，功率由电动机向工作机构传送，传动损耗由电动机承担，即电动机发出的功率比生产机械消耗的功率大。根据功率不变原则，应有

$$T_L \omega \eta_c = T'_L \omega_L \quad (1-8)$$

$$T_L = \frac{T'_L}{\eta_c (\omega/\omega_L)} = \frac{T'_L}{j \eta_c} \quad (1-9)$$

(2) 电动机工作在发电制动状态。此时由工作机构带动电动机，功率传送方向由工作机构和向电动机传送，因而传动损耗由工作机构承担。根据功率不变原则，应有

$$T_L \omega = T'_L \omega_L \eta_c \quad (1-10)$$

$$T_L = \frac{T'_L}{j} \eta_c \quad (1-11)$$

对于系统有多级齿轮或皮带轮变速的情况，设已知各级转速比为 $j_1, j_2, \dots, j_n$ ，则总的速比为各级转速比之积，即

$$j = j_1 \cdot j_2 \cdots j_n = \prod_{i=1}^n j_i \quad (1-12)$$

在多级传动时，如果已知各级的传递效率为 $\eta_{c1}, \eta_{c2}, \dots, \eta_{cn}$ ，则总效率 η_c 应为各级效率之积，即

$$\eta_c = \prod_{i=1}^n \eta_{ci} \quad (1-13)$$

二、转动惯量和飞轮矩的折算

将图 1-4 中两轴系统中的电动机转动惯量 J_d 和生产机械的负载转动惯量 J_L ，折算到电动机轴的等效系统的转动惯量 J ，由于各轴的转动惯量对运动过程的影响直接反映在各轴所储存的动能上，因此折算时实际系统与等效系统储存的动能应相等，这就是折算转动惯量和

飞轮矩的等效原则。折算前后系统的动能不变, 即有

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J_d\omega^2 + \frac{1}{2}J_L\omega_L^2 \quad (1-14)$$

$$J = J_d + J_L\left(\frac{\omega_L}{\omega}\right)^2 \quad (1-15)$$

$$J = J_d + J_L\left(\frac{1}{j_L}\right)^2 \quad (1-16)$$

由于 $GD^2 = 4gJ$, 可以相应地得到折算到电动机轴上的等效飞轮转矩

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 \frac{1}{j_L^2} \quad (1-17)$$

式 (1-16) 和式 (1-17) 的结果可以推广到多轴电力拖动系统中, 设多轴电力拖动系统有多根中间传动轴, 则折算到电动机轴上的等效转动惯量 J 和飞轮矩 GD^2 分别为

$$J = J_d + J_1 \frac{1}{j_1^2} + J_2 \frac{1}{j_2^2} + \cdots + J_n \frac{1}{j_n^2} \quad (1-18)$$

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2/j_1^2 + GD_2^2/j_2^2 + \cdots + GD_n^2/j_n^2 \quad (1-19)$$

从式 (1-19) 可知, 折算到单轴拖动系统的等效飞轮矩 GD^2 等于折算前拖动系统每一根轴的飞轮矩除以该轴对电动机轴传动比 j_L 的平方之和。当传动比 j_L 较大时, 该轴的飞轮矩折算到电动机轴上后, 其数值占整个系统的转动惯量的比重就很小。

一般情况下, 在总的飞轮矩 GD^2 中, 电动机轴上的飞轮矩 GD_d^2 占的比重最大, 其次是工作机构轴上飞轮矩的折算值, 所以实际工作中为了计算简便, 往往用适当加大电动机轴上的飞轮矩来计算总的飞轮矩, 于是总的飞轮矩的计算可以简化为

$$GD^2 = (1 + \delta)GD_d^2 \quad (1-20)$$

式中: δ 为小于 1 的系数, 一般取 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。

三、直线运动系统等效为旋转运动系统

有些生产机械不仅有旋转运动部件, 还兼有直线运动部件, 分析时要把这样的拖动系统等效为简单的单轴拖动系统, 如图 1-5 所示。这就需要分别对旋转运动和直线运动两种物理量进行折算, 前面我们已讨论过旋转运动系统的折算, 这里仅讨论直线运动系统的折算。

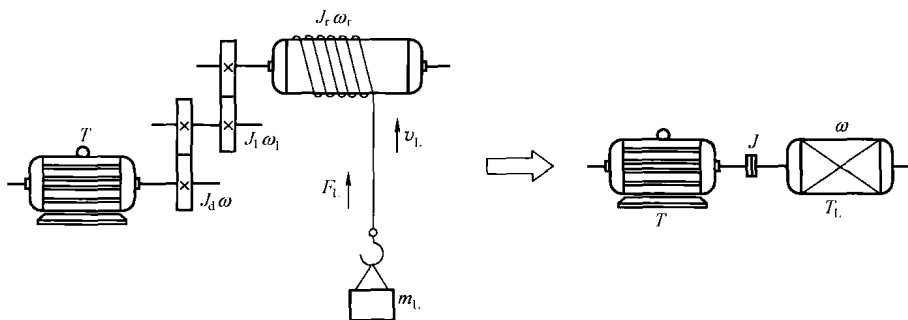


图 1-5 混合拖动系统的等效

(一) 静态力 F_L (或称负载重力) 的折算

工作机构直线运动时, 其质量 m_L 中储存有动能, 为了把速度为 v_L 的质量 m_L 折算到电动机轴上, 用电动机轴上一个转动惯量 J 的转动体与之等效。把直线运动的静态力 F_L 折算

到电动机轴上等效静转矩 T_L 的原则仍是保持折算前后的静态功率不变。如果考虑功率的传递方向, 同样分两种情况讨论:

(1) 电动机工作在电动状态。此时由电动机带动工作机构, 使重物提升。由图 1-5 可知, 折算前直线运动部件的静态功率 P'_L 为

$$P'_L = F_L v_L \quad (1-21)$$

折算后等效拖动系统的静态功率为 P_L

$$P_L = T_L \omega \quad (1-22)$$

由于功率是由电动机传向负载, 按功率平衡原则 $P_L = P'_L / \eta_c$, 即

$$T_L \omega = \frac{F_L v_L}{\eta_c} \quad (1-23)$$

代入关系式 $\omega = 2\pi n / 60$, 经整理, 得到如下折算公式

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta_c} \quad (1-24)$$

(2) 电动机工作在发电制动状态。此时工作机构带动电动机, 使重物下放。根据功率平衡关系, 有

$$T_L \omega = F_L v_L \eta'_c \quad (1-25)$$

由此得

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n} \eta'_c \quad (1-26)$$

式中: η'_c 是物体下放时的传动效率。

可以证明, 在提升与下放时传动损耗相等的条件下, 下放传动效率与提升传动效率之间有下列关系

$$\eta'_c = 2 - \frac{1}{\eta_c} \quad (1-27)$$

(二) 直线运动系统质量的折算

如图 1-5 所示, 将直线运动系统的质量 m_L 折算到电动机轴上, 用等效的转动惯量 J_L 来表示, 折算的原则是两者储存的动能相等, 即

$$\frac{1}{2} J_L \omega^2 = \frac{1}{2} m_L v_L^2 \quad (1-28)$$

$$J_L = m_L \left(\frac{v_L}{\omega} \right)^2 \quad (1-29)$$

由于 $J_L = GD_L^2 / 4g$, $\omega = 2\pi n / 60$, $m_L = G_L / g$, 则

$$GD_L^2 = 4gm_L \left(\frac{v_L}{\omega} \right)^2 = 4gm_L \left(\frac{60v_L}{2\pi n} \right)^2 = 365G_L \left(\frac{v_L}{n} \right)^2 \quad (1-30)$$

应用上述分析中介绍的方法就能够把一个多轴拖动系统化简成一个单轴拖动系统, 这样, 只需一个运动方程式, 即可研究多轴系统的问题。

1.3 生产机械的负载转矩特性

生产机械的负载转矩 T_L 的大小与很多因素有关, 以车床主轴为例, 当车床切削工件时, 主轴转矩和切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。

通常把负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $T_L = f(n)$ 称为生产机械的负载转矩特性, 简称负载性质。生产机械的负载转矩特性可归纳为三种类型。

1.3.1 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性, 就是指负载转矩 T_L 与转速 n 无关的特性, 即当转速变化时, 负载转矩 T_L 保持常值。根据负载转矩的方向是否与电动机转向有关, 恒转矩负载特性又可分为反抗性负载特性和位能性负载特性两种。

一、反抗性恒转矩负载特性

反抗性恒转矩负载特性的特点是, 恒值转矩 T_L 总是和运动的方向相反, 转矩作用方向随转动方向的改变而改变。摩擦性负载转矩就具有这样的性质, 负载转矩的方向总是和运动方向相反。根据前述正负符号的规定, 当正转时, n 为正, 转矩 T_L 为反向, 应取正号, 即为 $+T_L$; 而反转时, n 为负, 转矩 T_L 为正向, 应变为 $-T_L$ 。属于这一类的生产机械有提升机的走行机构、皮带运输机、轧钢机以及某些金属切削机床的平移机构等。显然, 反抗性恒转矩负载特性曲线应画在平面坐标系的第一与第三象限内, 如图 1-6 所示。

二、位能性恒转矩负载特性

位能性恒转矩负载特点是转矩 T_L 具有固定的方向, 不随转速方向改变而改变。不论重物提升 (n 为正) 或下放 (n 为负), 负载转矩始终为反方向, 即 T_L 始终为正, 特性画在第一与第四象限内, 表示恒值特性的直线是连续的。由图 1-7 可见, 提升时, 转矩 T_L 反抗提升; 下放时, T_L 却帮助下放, 这是位能性负载的特点。属于这一类的生产机械有起重机的提升机构、高炉上料卷扬机构、矿井提升机构等。

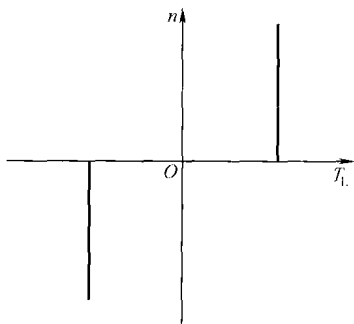


图 1-6 反抗性恒转矩负载特性

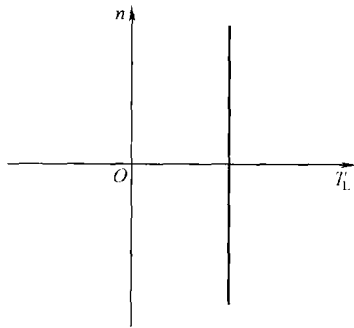


图 1-7 位能性恒转矩负载特性

1.3.2 通风机负载特性

凡是按离心力原理工作的机械, 如离心式鼓风机、水泵、液压泵等, 其负载转矩随着转速的增加而增大。通风机的转矩与转速大小有关, 基本上与转速的平方成正比, 即 $T_L = kn^2$ 。通风机负载特性如图 1-8 所示, 图中只在第一象限画出了转速正向时的特性, 鉴于通风机负载是反抗性的, 当转速反向 (n 为负) 时, T_L 是负值, 第三象限中应有与第一象限特性对称的曲线。

1.3.3 恒功率负载特性

在机械加工工业中, 有些生产机械, 比如车床, 在粗加工时切削量比较大, 切削阻力比较大, 此时开低速; 在

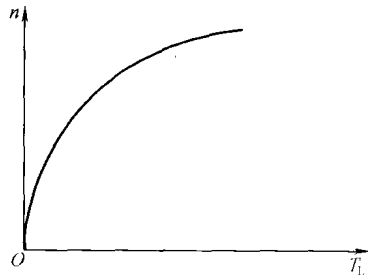


图 1-8 通风机负载特性