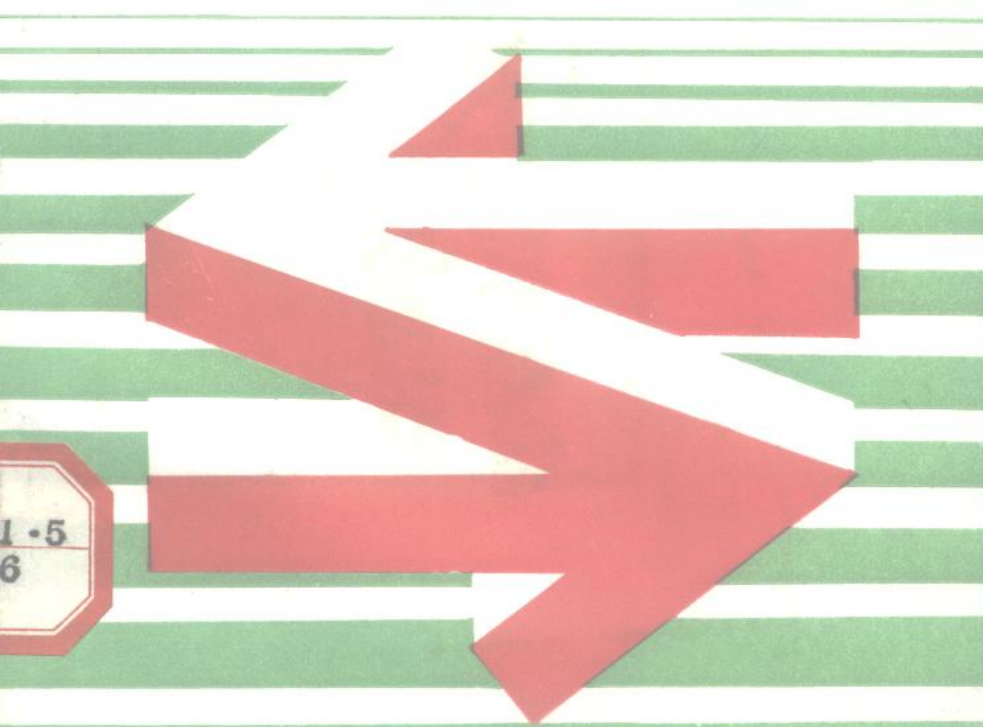


电力拖动及其 控制系统

邓星钟 主编



1-5
6

高等教育出版社

电力拖动及其 控制系统

邓星钟 主编

高等教育出版社

360438

内 容 简 介

本书是国家教委高等学校工科电工学课程 ~~1985年~~1990年教材规划项目之一。

本书取材适当,注意与电工学教材及其他参考书的配合与分工。

主要内容有:电力拖动系统的动力学基础、电动机的特性、直流拖动控制系统、交流拖动控制系统、电力拖动控制系统中电动机的选择。

(京)112号

电力拖动及其控制系统

邓星钟 主编

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

国防工业出版社印刷厂印装

开本 787×1092 1/32 印张 9 插页 1 字数 180 000

19 92 年 8 月第 1 版 19 92 年 8 月第 1 次印刷

印数 0001—3 295

ISBN7-04-003272-4/TM·168

定价 4.65 元

DY84/21
前言

电力拖动自动控制系统是机械设备的一个重要组成部分,随着机电一体化的进一步深化,它在机械设备中所占的地位将进一步提高。为加深电工学中的这一部分内容而编写了此书。书中主要介绍了电力拖动系统的运动方程式;详细分析了交、直流电动机的机械特性及电动机的选择;比较全面地介绍了交、直流拖动控制系统。

编写本书时着重考虑了以下几个关系的处理:

- 1) 原理与应用——两者兼顾,注意理论联系实际。
- 2) 元件与系统——两者紧密结合,但元件着重外部特性,为在系统中应用服务。
- 3) 定性和定量——重在定性,且建立必要的数量概念。
- 4) 保旧与建新——既要保旧,以反映我国电力拖动自动控制的现状;又要建新,以适应当前自动控制新技术发展的需要。

书中所用图形符号、文字符号及单位均采用国家标准。

本书可作为高等学校工科非电专业学生学习电工学课程的补充读物,也可供有关工程技术人员参考。

本书初稿由华中理工大学李昇浩教授审阅,提出了许多很好的修改意见,在此表示衷心感谢。

本书第五章由周祖德编写,其余各章均由邓星钟编写并负责全书的统编和定稿。

限于编者的水平,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第一章	概述	1
§ 1-1	电力拖动的目的和任务	1
§ 1-2	电力拖动及其控制系统的发展概况	2
§ 1-3	内容安排	4
第二章	电力拖动系统的动力学基础	5
§ 2-1	电力拖动系统的运动方程式	5
§ 2-2	转矩、转动惯量和飞轮转矩的折算	9
§ 2-3	生产机械的机械特性	15
§ 2-4	电力拖动系统稳定运行的条件	18
第三章	电动机的特性	21
§ 3-1	直流电动机的特性	22
§ 3-2	电力拖动系统的过渡过程	64
§ 3-3	异步电动机的特性	74
第四章	直流拖动控制系统	121
§ 4-1	概述	121
§ 4-2	电力拖动控制系统调速方案的选择	127
§ 4-3	电机放大机直流调速系统	138
§ 4-4	磁放大器控制的直流调速系统	163
§ 4-5	晶闸管-电动机直流拖动控制系统	168
§ 4-6	直流脉宽调速系统	200
第五章	交流拖动控制系统	216
§ 5-1	概述	216
§ 5-2	电磁转差离合器调速系统	217
§ 5-3	交流调压调速系统	221
§ 5-4	线绕式异步电动机调速	227
§ 5-5	晶闸管变频调速系统	231

§ 5-6	异步电动机矢量变换控制系统.....	243
§ 5-7	无换向器电动机及其调速系统.....	249
§ 5-8	同步电动机的晶闸管励磁系统.....	256
第六章	电力拖动控制系统中电动机的选择.....	259
§ 6-1	概述.....	259
§ 6-2	电动机的发热与冷却.....	260
§ 6-3	不同工作制下电动机容量的确定.....	262
§ 6-4	电动机容量选择的统计法和类比法.....	274
§ 6-5	晶闸管供电对电动机的影响.....	275
§ 6-6	电动机种类、电压、转速和结构型式的选择.....	277

主要参考文献

第一章 概 述

§1-1 电力拖动的目的和任务

电力拖动(又称电力传动或电气传动)就是指以电动机为原动机驱动生产机械的系统之总称。它的目的是将电能转变为机械能,实现生产机械的起动、停止以及速度调节,完成各种生产工艺过程的要求,保证生产过程的正常进行。

在现代工业中,为了实现生产过程自动化的要求,电力拖动不仅包括拖动生产机械的电动机,而且包含控制电动机的一整套控制系统,也就是说,现代电力拖动是和由多种控制元件组成的自动控制系统紧密地联系在一起的,所以本书取名为《电力拖动及其控制系统》。

从现代化生产的要求来说,电力拖动控制系统所要完成的任务,从广义上讲,就是要使生产机械设备、生产线、车间、甚至整个工厂都实现自动化。从狭义上讲,则专指控制电动机驱动生产机械,实现生产产品数量的增加,质量的提高,生产成本的降低,工人劳动条件的改善以及能量的合理利用。随着生产工艺的发展,对电力拖动控制系统提出了愈来愈高的要求,例如,一些精密机床要求加工精度达百分之几毫米、甚至几微米;重型镗床为保证加工精度和光洁度,要求在极慢的稳速下进给,即要求在很宽的范围内调速;轧钢车间的可逆式轧机及其辅助机械,操作频繁,要求在不到1s的时间内就能完成从正转到反转的过程,即要求能迅速地起动、制动和反

转;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;对于冷、热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;为了提高效率,由数台或数十台设备组成的生产自动线,要求统一控制和管理。诸如此类的要求,都是靠电动机及其控制系统和机械传动装置来实现的。

§1-2 电力拖动及其控制系统的发展概况

电力拖动及其控制系统总是跟随着社会生产的发展而发展。单就电力拖动而言,它的发展大体上经历了成组拖动、单电机拖动和多电机拖动三个阶段,所谓成组拖动,就是一台电动机拖动一根天轴,然后再由天轴通过皮带轮和皮带分别拖动各生产机械,这种拖动方式生产效率低,劳动条件差,一旦电动机发生故障,将造成成组的生产机械停车。所谓单电机拖动,就是用一台电动机拖动一台生产机械,它虽较成组拖动前进了一步,但当一台生产机械的运动部件较多时,机械传动机构仍十分复杂。多电机拖动,即一台生产机械的每一个运动部件分别由一台专门的电动机拖动,例如龙门刨床的刨台、左右垂直刀架与侧刀架、横梁及其夹紧机构,均分别由一台电动机拖动。这种拖动方式不仅大大简化了生产机械的传动机构,而且控制灵活,为生产机械的自动化提供了有利的条件,所以现代电力拖动基本上均采用这种拖动形式。

控制系统的发展还随控制器件的发展而发展。随着功率器件、放大器件的不断更新,电力拖动控制系统的发展日新月异,它主要经历了四个阶段:最早的自动控制是在本世纪初,

它仅借助于简单的接触器与继电器等控制电器，实现对控制对象的起动、停车以及有级调速等控制，它的控制速度慢，控制精度差；30年代出现了电机放大机控制，它使控制系统从断续控制发展到连续控制，连续控制系统可随时检查控制对象的工作状态，并根据输出量与给定量的偏差对控制对象自动进行调整，它的快速性及控制精度都大大超过了最初的断续控制，并简化了控制系统，减少了电路中的触点，提高了可靠性，使生产效率大为提高；40~50年代出现了磁放大器控制和大功率可控水银整流器控制；但时隔不久，于50年代末期出现了大功率固体可控整流元件（晶闸管），很快晶体管放大器-晶闸管控制就取代了水银整流器控制，后来又出现了功率晶体管控制。由于晶体管、晶闸管具有效率高、控制特性好、反应快、寿命长、可靠性高、维护容易、体积小、重量轻等优点，它的出现为电力拖动自动控制系统开辟了新纪元。随着数控技术的发展，计算机的应用，大规模集成电路的出现，特别是微型计算机的出现和应用，又使控制系统发展到一个新阶段——采样控制，它也是一种断续控制，但是和最初的断续控制不同，它的控制间隔（采样周期）比控制对象的变化周期短得多，因此在客观上完全等效于连续控制，把晶闸管技术与微电子技术、计算机技术紧密地结合在一起，使晶体管与晶闸管控制具有强大的生命力，所以晶体管与晶闸管控制已经成为当前自动控制系统的主流，并正在迅速地取代其它的控制方式，向机电一体化方向迅猛发展。

§ 1-3 内容安排

本书内容处理的原则是:立足电工学课程,尽量避免与电工学和其它电工学教学小丛书的重复,在电工学的基础上加深加宽,还要自成体系;既要介绍当前常用的电力拖动控制系统,又要介绍一些新型的拖动控制系统及其发展前景。本书共分六章。

第一章主要介绍电力拖动控制系统的发展概况。

第二章介绍电力拖动系统的动力学基础,运动方程式。

第三章主要介绍最常用的直流电动机和交流异步电动机在各种运转状态下的机械特性,并对电力拖动系统的过渡过程作了一些扼要的介绍。

第四章直流拖动控制系统。首先介绍电力拖动调速方案选择的基本依据,再通过电机放大机控制系统介绍几种常用的反馈控制环节,重点介绍了晶闸管-电动机调速系统和脉宽调速系统。

第五章交流拖动控制系统。主要介绍电磁转差离合器调速系统、交流调压调速系统、变频调速系统以及同步电动机的晶闸管励磁系统。

第六章电力拖动控制系统中电动机的选择。重点介绍电动机容量的选择。

与本书有关的其它详细内容可参阅侯振程编《继电器控制》、唐介编《控制微电机》等电工学教学小丛书。

第二章 电力拖动系统的动力学基础

电力拖动系统是由电动机拖动, 并通过传动机构带动生产机械运转的一个机电运动的动力学整体, 尽管电动机有不同的种类和特性, 生产机械的负载性质也可以各种各样, 但从动力学的角度来分析时, 则都应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运动方程式, 进而分析电动机带动生产机械运行时的条件。

§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式

图 2-1-1 所示为一单轴电力拖动系统, 它是由电动机产生转矩 T_M 用以克服负载转矩 T_L , 带动生产机械运动。当这

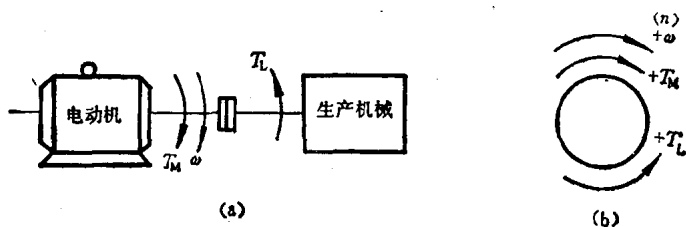


图 2-1-1 单轴拖动系统及转矩转速的正方向

两个转矩平衡时, 拖动系统保持转动, 转速 n 或角速度 ω 不变, 加速度 $\frac{dn}{dt}$ 或角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 等于零, 即 $T_M = T_L$ 时, n 等于常数, $\frac{dn}{dt}$ 等于零, 或 ω 等于常数, $\frac{d\omega}{dt}$ 等于零, 这种运行状态称为静态(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,而速度变化的大小还与拖动系统的转动惯量 J 有关。把上述的这些关系用方程式表示,即为:

$$T_M - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2-1-1)$$

这就是单轴拖动系统的运动方程式。

式中 T_M ——电动机的拖动转矩[牛顿·米];

T_L ——单轴拖动系统的负载转矩[牛顿·米];

J ——单轴拖动系统的转动惯量[千克·米²];

ω ——单轴拖动系统的角速度[1/秒];

t ——时间[秒]。

在实际工程计算中,往往用转速 n (转/分)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 $J = mr^2 = \frac{1}{4}mD^2$, 其中 r 和 D 定义为惯性半径和惯性直径(米),而质量 m (千克)和重量 G (牛顿)的关系是 $G = mg$, $g = 9.81\text{m/s}^2$ 为重力加速度,所以 J 与 GD^2 的关系是:

$$J = \frac{1}{4}mD^2 = \frac{1}{4} \frac{G}{g} D^2 = \frac{GD^2}{4g} (\text{千克} \cdot \text{米}^2) \quad (2-1-2)$$

或 $GD^2 = 4gJ$ (牛顿·米²)

且
$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (2-1-3)$$

将式(2-1-2)和(2-1-3)代入式(2-1-1),就可得运动方程式的实用形式:

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

式中常数 375 包含着 $g = 9.81\text{m/s}^2$, 故它有加速度的因次, 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 $a = \frac{dn}{dt}$ 为正，拖动系统运动产生加速；当 $T_M < T_L$ 时， $a = \frac{dn}{dt}$ 为负，拖动系统运动产生减速。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：

$$T_t = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (2-1-5)$$

它使系统的运动状态发生变化。这样运动方程式(2-1-1)或(2-1-4)也可以写成转矩平衡方程式

$$T_M - T_L = T_t$$

或
$$T_M = T_L + T_t \quad (2-1-6)$$

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)和动态转矩之和来平衡。

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

值得指出的是图 2-1-1(b)中关于转矩正方向的约定：由于拖动系统有各种运动状态，相应地，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。设电动机某一旋转方向的转速 n 为正，则约定拖动转矩 T_M 与 n 一致的方向为正向，而负载转矩 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 、 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。

[例] 在提升重物过程中,判定电动机起动和制动时电动机转矩 T_M 和负载转矩 T_L 的符号。

[解] 设重物提升时电动机旋转方向为 n 的正方向。

起动时:如图 2-1-2(a)所示,电动机拖动重物上升,电动机转矩 T_M 与 n 正方向一致,

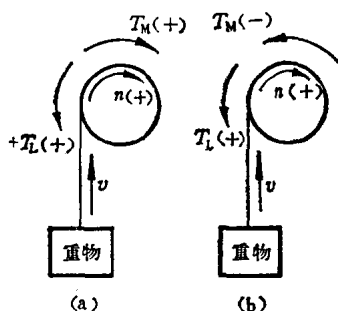


图 2-1-2 T_M, T_L 之符号判定

T_M 取正号;负载转矩 T_L 与 n 方向相反, T_L 亦取正号。这时的运动方程式为:

$$T_M - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

要能提升重物,必存在 $T_M > T_L$, 即动态转矩 $T_t = T_M - T_L$ 和加速度 $a = \frac{dn}{dt}$ 均为正,系统进行加速。

制动时:如图 2-1-2(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,所以电动机转矩应与旋转方向相反, T_M 取负号。而重物产生的负载转矩总是向下,和起动过程一样, T_L 仍取正号,这时运动方程式为:

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

可见,此时动态转矩和加速度都是负值,它使重物减速上升,直至停止。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来平衡。

§2-2 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 2-2-1 所示。这是因

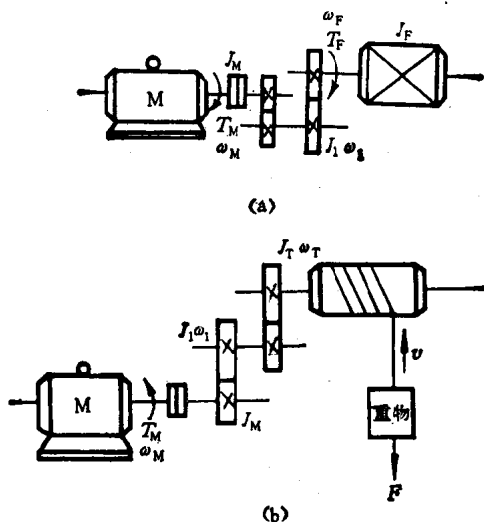


图 2-2-1 多轴拖动系统

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,在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 2-1-1 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、功率关系上保持不变。下面介绍具体的折算方法。

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。

对旋转运动，如图 2-2-1 (a) 所示，当系统匀速运动时，生产机械的负载功率为：

$$P_F = T_F \omega_F$$

式中， T_F 和 ω_F 分别为生产机械的负载转矩和旋转角速度。设 T_F 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 为电动机转轴的角速度。

在不考虑传动机构的功率损耗的前提下，有

$$T_L \omega_M = T_F \omega_F$$

由此可求出折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T_F \omega_F}{\omega_M} = \frac{T_F}{j}$$

式中， $j = \frac{\omega_M}{\omega_F}$ 为传动机构的速比，此式表明，不考虑传动机构的功率损耗时，折算到电动机轴上的负载转矩的大小与传动

机构的速比成反比。

实际上,传动机构在传递功率的过程中是有损耗的,这个损耗可以用传动效率 η_c 来表示,且

$$\eta_c = \frac{\text{输出功率}}{\text{输入功率}} = \frac{P_F}{P_M} = \frac{T_F \omega_F}{T_L \omega_M}$$

于是可得折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_L = \frac{T_F \omega_F}{\eta_c \omega_M} = \frac{T_F}{\eta_c j} \quad (2-2-1)$$

式中, η_c 为电动机拖动生产机械运动时的传动效率。

各种减速机构满载时的传动效率可以从有关工程手册中查到。

对直线运动,如图 2-2-1(b)所示,在某些生产机械中,运动部件既有旋转运动,又有直线运动。图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 [牛顿],运动速度为 v [米/秒],则所需的机械功率为:

$$P_F = Fv$$

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 就是负载力 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

$$T_L \omega_M = \frac{Fv}{\eta_c}$$

以 $\omega_M = \frac{2\pi n_M}{60}$ 代入上式,可得