

高等学校规划教材

电机与传动

杨芳春 主编

煤炭工业出版社

TM3
Y-314

高等学校规划教材

电机与传动

王芳生
李晓竹
孙永策
吴延华
杨芳春 编

煤炭工业出版社

(京)新登字 042 号

内 容 提 要

本书是煤炭高校八五规划教学综合改革系列教材之一。

全书内容包括:电力传动运动分析综述;电机内机电能量转换及电磁转矩;直流电机的结构和工作原理、机电能量转换、运行分析;交流电机的共同问题;异步电机的工作原理、运行特性、运行分析;防爆异步电动机;同步电动机;电动机容量的选择;变压器的工作原理、运行分析等。

本书是高等工科院校工业自动化、电气技术、电力系统及自动化等专业的教材,亦可供有关人员参考。

高等学校规划教材

电机与传动

杨芳春 主编

责任编辑:胡玉雁

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

阜新矿业学院印刷厂 印刷

*

开本 787×1092mm 1/16 印张 26

字数 620 千字 印数 1—2500

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

ISBN 7-5020-1168-4/TD614

书号:3947 定价:19.5 元

前 言

《电机与传动》是煤炭高等学校“八五”规划教材,是为大学本科工业自动化专业教学综合改革而编写的系列教材之一,也可供其它有关专业的大学生和科技人员使用。

电力传动控制系统在国民经济和日常生活中应用甚广,电机与传动的的基本理论和基本分析方法是它的理论基础。习惯上把这部分基本理论分为电机学和电力传动基础两门课程讲授,编者根据多年教学实践体会,将它们合而为一。以电力传动系统运动分析为主线,讨论直流和交流电力传动中起动、制动、调速的问题;用机电能量转换原理为指导分析各种电机的工作特性,使学生能掌握完整统一的科学思路。

本书编写的特点是:

1. 从电力传动运动分析出发,以电动机和生产机械的机械特性为依据,讨论系统中起动、制动及调速的各种工作状态,使读者建立电力传动系统工作过程的完整概念。

2. 以隐极和凸极电机结构模型为例,用多电流互感回路理论建立电机的参数矩阵;以机电能量转换理论给出电机的电磁转矩一般公式和电流频率约束条件,为后续各种电机理论分析奠定统一的理论基础。

3. 从改善电机绕组磁势波形出发,讨论交流电机绕组的构成原理;以磁链变化观点计算绕组内感生电势及运动电势。

4. 用电机特性与传动要求结合、磁势分析与电路计算结合的方法,分析直流和交流电动机传动生产机械的基本理论和工程分析方法。

编者在编写过程中,力求围绕主干内容,层次分明,重点突出,联系实际,去阐明电机及传动的基本概念、基本理论及基本分析方法,并配有启发性及典型的工程实例和习题。书中的符号、图例采用国家新标准,单位为法定计量单位制。

全书按 120 学时编写,讲授学时为 110~120,实验独立设课。

本书的编写分工是:阜新矿业学院杨芳春教授编写第一、二章,并任主编;淮南矿业学院王芳生副教授编写第三、四、五、六章,并任副主编;阜新矿业学院李晓竹副教授编写第七、八、九章及第十章的第三节,并任副主编;山西矿业学院孙永策副教授编写第十一、十二、十三章,并任副主编;黑龙江矿业学院吴延华副教授编写第十四、十五章及第十章的第一、二、四节,并任副主编。

从设课规划到本书编写出版,承蒙煤炭部科技教育司、教材编审委员会、教材编审室以及国内有关高校同行专家的热忱支持和大力相助,在此向他们及有关参考文献的作者一并致以谢意。

由于水平有限,书中难免有缺点和不当之处,改革设想未必恰当体现,欢迎读者指正。

编 者

1994 年 12 月于北京

出版说明

《中国教育改革和发展纲要》指出,教育改革“要按照现代科学技术文化发展的新成果和社会主义现代化建设的实际需要,更新教学内容,调整课程结构,加强基本知识、基础理论和基本技能的培养和训练,重视培养学生分析问题和解决问题的能力”。“高等学校教材要在积极扩大种类的同时,不断提高质量,加强理论与实际的联系,力求思想性和科学性的统一”,要适应教学改革需要。

由阜新矿业学院、山西矿业学院、黑龙江矿业学院、淮南矿业学院等四所院校进行的工业电气自动化专业教学综合改革,按照“知识归类、科学组合、优化设课、精简学时、加强实践”的改革原则,制定新的教学计划。根据培养目标的要求,新计划对于原有课程,采用删、调、合、增的方法改变原有课程体系,将工业电气自动化专业电类课程归并为四大类:基础理论课、方法论课、应用技术基础课和有针对性的专业课。

为了适应深化教学改革的需要,我们首先组织编写、出版以下几种教材:

电工原理
网络与系统分析
电机与传动
控制工程技术
微机原理与接口技术
计算机测控技术
矿山自动控制系统
电工技术 CAA
电气实验技术
电气工程实践教程

《电机与传动》是第三种教材,其余 8 种教材,将于一九九五内陆续出版。

煤炭工业部科技教育司
教材编审室

一九九四年十月

目 录

第一章 电力传动运动分析综述	1
第一节 电力传动系统的基本概念	1
第二节 电力传动系统的运动方程	2
第三节 负载转矩和飞轮矩的折算	5
第四节 电力传动系统的静态特性	10
第五节 电力传动系统的调速分析	17
第六节 电力传动系统的动态特性——过渡过程	23
习 题	28
第二章 电机内机电能量转换及电磁转矩	30
第一节 单边激励电机结构模型内机电能量转换的基本理论	30
第二节 隐极电机结构模型的磁链方程及电磁转矩	43
第三节 凸极电机结构模型的磁链方程及电磁转矩	55
第四节 旋转电机内机电能量转换的充要条件	58
第五节 坐标变换和变换矩阵	63
习 题	70
第三章 直流电机的工作原理和结构	72
第一节 直流电机的工作原理	72
第二节 直流电机的基本结构	75
第三节 直流电机的电枢绕组	77
第四节 直流电机的励磁方式及铭牌数据	82
习 题	83
第四章 直流电机的机电能量转换	84
第一节 直流电机的气隙磁场	84
第二节 直流电机电枢电势和电磁转矩	89
第三节 直流电机的机电能量转换	92
第四节 直流电机的换向	97
习 题	102
第五章 直流他励电动机的运行分析	103
第一节 直流他励电动机的工作特性	103
第二节 直流他励电动机的机械特性	104
第三节 直流他励电动机的起动分析	109
第四节 直流他励电动机的制动分析	115
第五节 直流他励电动机的调速分析	125
第六节 直流他励电动机各种工作状态的运行分析	133
习 题	135
第六章 直流串励电动机的运行分析	136
第一节 直流串励电动机的工作特性	136
第二节 直流串励电动机的机械特性	138

第三节	直流串励电动机的各种运转状态	142
第四节	直流串励电动机的起动分析	144
习 题	.....	148
第七章	交流电机的共同问题	149
第一节	绕组的分布和短距对磁势波形的影响	149
第二节	三相分布短距绕组	159
第三节	分布短距绕组磁势的分析	164
第四节	分布短距绕组的磁链及其感应电势	176
习 题	.....	183
第八章	异步电机的工作原理	185
第一节	异步电动机的基本结构及基本原理	185
第二节	转子静止时的异步电动机	191
第三节	转子旋转时的异步电动机	197
第四节	异步电动机的等效电路和相量图	200
第五节	异步电动机的机电能量转换	209
第六节	异步电动机的参数测定	212
习 题	.....	214
第九章	异步电动机的运行特性	216
第一节	异步电动机的工作特性	216
第二节	异步电动机的机械特性表达式	218
第三节	异步电动机的固有机械特性	224
第四节	异步电动机的人为机械特性	227
习 题	.....	230
第十章	三相异步电动机的运行分析	231
第一节	三相异步电动机的起动分析	231
第二节	三相异步电动机的调速分析	247
第三节	三相异步电动机的制动分析	264
第四节	三相异步电动机常见的运行故障分析	275
习 题	.....	278
第十一章	防爆异步电动机	280
第一节	矿用防爆电动机机械结构和电磁设计的要求	280
第二节	深槽型电动机	284
第三节	双鼠笼型电动机	286
第四节	专用防爆电动机的构造特点	288
习 题	.....	294
第十二章	同步电动机	295
第一节	同步电动机的原理、基本构造和运行状态	295
第二节	同步电动机的电压方程式	298
第三节	同步电动机的机电能量转换	303
第四节	同步电动机的运行特性	310
第五节	同步电动机的起动分析	318
第六节	异步电动机的同步化	322

第七节	无换向器电动机	324
习 题	.....	328
第十三章	电动机容量的选择	330
第一节	概述	330
第二节	电动机的发热与冷却	332
第三节	电动机容量的选择与过载能力的关系	336
第四节	连续工作制电动机容量的选择	340
第五节	短时工作制电动机容量的选择	348
第六节	断续周期工作制电动机容量的选择	350
习 题	.....	357
第十四章	变压器的工作原理	359
第一节	变压器的用途和基本结构	359
第二节	变压器的工作原理	362
第三节	三相变压器及其连接组	371
习 题	.....	377
第十五章	变压器的运行分析	379
第一节	变压器的运行特性	379
第二节	变压器的并联运行	382
第三节	整流变压器的工作特点	386
第四节	仪用互感器	389
第五节	自耦变压器	393
第六节	变压器的合闸分析	395
第七节	变压器常见的运行故障分析	398
习 题	.....	404
参考文献	.....	406

第一章 电力传动运动分析综述

本章先介绍电力传动的定义和类型,推导出单轴电力传动系统的运动方程。经过负载转矩和飞轮矩的等效折算,可将多轴电力传动系统变换为单轴系统,它是分析电力传动系统的基本理论。以各种电动机和各种生产机械的机械特性曲线为依据,分析电力传动系统的静态特性:静态工作点的稳定条件、电力传动系统四象限运行的基本概念、电气调速基本原理及调速指标。以电力传动系统运动方程为依据,介绍动态特性分析方法,如解析法及图解法。最后简介最佳过渡过程的概念。

第一节 电力传动系统的基本概念

一、电力传动系统的定义

用电动机拖动生产机械完成各种生产工艺要求的传动系统称为电力传动系统。它是由电动机、生产机械、传动机构、控制装置及电源等五个基本环节组成,如图 1-1 所示。

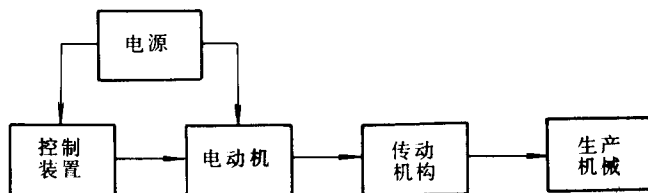


图 1-1 电力传动系统的结构图

电动机将电能转换为机械能供给生产机械实现各种运动。电动机有直流和交流两种。传动机构是联接电动机和生产机械的中间环节,它的作用是传递机械能给生产机械,如变速器、运动变换器、离合器等。控制装置是控制电动机实现各种运动状态,满足生产机械工艺要求,如控制电动机起动、制动及反转、控制电动机在恒转速、恒功率或恒转矩下运行、控制电动机实现生产过程自动化等。电源是供给电动机及控制装置电能的能源。在近代大型电力传动系统中的电源,大多数是电力半导体器件组成的可控电源,如电压和频率可调节的交流或直流电源。可控电力传动系统能提高生产机械的生产率和产品加工精度,又满足高效节能的要求。

二、电力传动系统的类型

1. 按电动机种类分类

有直流传动和交流传动两类。采用直流电动机拖动生产机械的称为直流传动系统;采用交流电动机拖动生产机械称为交流传动系统。交流电动机具有结构简单、价格便宜、维护方便、运行可靠、单机容量较大、电压和转速较高、惯性小等优点,故交流传动系统应用广泛。特别是近年来由于电力电子技术迅速发展,交流调速技术趋于成熟,大型电力传动系统正被交流传动所占领,这是一个新的发展动向。

由于直流电动机结构复杂、价格较贵、单机容量不大、电压和转速不能很高等弱点,使直流传动系统的应用受到限制,只有在起动、制动、正反转、调速等要求较高的场所上应用。

2. 按传动系统使用电动机的数量分类

有单电机传动和多电机传动两类。单电机传动是由一台电动机拖动一台生产机械。由于一台生产机械具有几个不同种类的运动,使传动机构复杂化,且不利于对各种运动的调节,为此采用多电机传动系统。多电机传动是由多台电机分别拖动一台生产机械的每个运动部分,克服了单电机传动的缺点。另外,为了减少传动系统的总投资及系统惯性,可用双电动机拖动同一台生产机械。

3. 按传动系统对电动机控制方式分类

有断续控制和连续控制两类。由接触器和各种继电器组成对电机进行开环控制的系统,属于断续控制电力传动系统或继电器—接触控制电力传动系统。由各种自动控制元件、放大器及调节器组成,对电机进行闭环控制的系统,或由计算机组成的计算机控制系统等,属于连续控制电力传动系统。

第二节 电力传动系统的运动方程

一、单轴电力传动系统运动方程

1. 单轴传动系统运动方程的一般形式

在电力传动系统中,无论电动机的种类如何、生产机械性质如何,每一个传动系统就运动分析而言都是一个动力学整体。可根据动力学原理建立电力传动系统的运动方程,作为分析系统运动状态的理论依据。

单轴电力传动系统是最基本的传动系统,由电动机轴直接拖动生产机械运行如图 1-2 所示。电动机拖动生产机械以角速度 Ω 旋转,经 dt 时间轴的转角为 $d\alpha$,电动机轴上电磁转矩 T 作功为 dA 。 dA 除克服负载转矩 T_L 所作的功 dA_L 以外,其余的功等于系统储存的动能 dW_d 。若整个系统的转动惯量为 J ,在一段时间内系统的能量平衡方程为

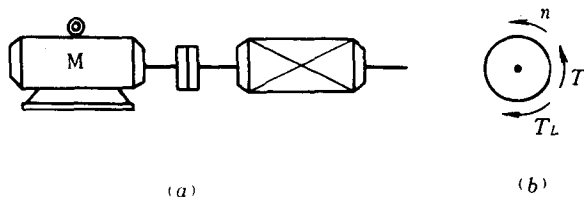


图 1-2 单轴传动系统及轴上的转矩正方向
a—单轴传动系统;b—轴上转矩正方向

$$A - A_L = W_d = \frac{1}{2} J \Omega^2 \quad (1-1)$$

上式对时间求导,得到功率平衡方程为

$$\frac{dA}{dt} - \frac{dA_L}{dt} = \frac{dW_d}{dt}$$

或

$$P - P_L = P_d \quad (1-2)$$

而

$$P_d = \frac{dW_d}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J \Omega^2 \right) = J \Omega \frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{2} \Omega^2 \frac{dJ}{dt} \quad (1-3)$$

考虑到, $P = T\Omega$ 及 $P_L = T_L\Omega$, 于是有

$$T - T_L = \frac{P_d}{\Omega} = J \frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{2} \Omega \frac{dJ}{d\alpha} \quad (1-4)$$

上式称为单轴电力传动系统的运动方程式。右边第一项是当角速度 Ω 随时间变化时产生的惯性转矩,第二项是当转动惯量 J 随转角 α 变化时产生的惯性转矩。在多数情况下,转动惯量 J 是不变化的,即 $dJ/d\alpha=0$ 。此时单轴电力传动系统运动方程式(1-4)可简化为

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-5)$$

式中 T —— 电动机的电磁转矩, $N \cdot m$;
 T_L —— 生产机械的负载转矩, $N \cdot m$;
 J —— 电动机轴上所有旋转体的总转动惯量, $N \cdot m \cdot s^2$;
 Ω —— 电动机轴旋转的瞬时角速度, rad/s ;
 $\frac{d\Omega}{dt}$ —— 电动机轴旋转的角加速度, rad/s^2 。
 $J \frac{d\Omega}{dt}$ —— 系统的动态转矩(或惯性转矩), $N \cdot m$ 。

由运动方程可见,电力传动系统的运动状态是由作用在电动机轴上的两个转矩 T 和 T_L 共同决定的。

2. 单轴传动系统运动方程的实用形式

在工程实践中,往往用飞轮矩(亦称飞轮惯量) GD^2 表征系统的惯性影响,其单位为 $N \cdot m^2$ 。 J 与 GD^2 间存在下列关系:

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-6)$$

式中 m —— 系统旋转体的总质量, kg ;
 G —— 系统旋转体的总重量, N ;
 g —— 重力加速度, $g = 9.81 m/s^2$;
 D —— 回转直径(亦称惯性直径), m ;
 ρ —— 回转半径(亦称惯性半径), m 。

角速度 Ω 与转速 $n(r/min)$ 间有

$$\Omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}$$

于是,动态转矩为

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} = \frac{\pi}{30} \frac{GD^2}{4g} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

式中,375 具有加速度的量纲, m/s^2 。这样,单轴电力传动系统的运动方程实用形式为

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-7)$$

二、 Ω 、 T 、 T_L 正方向及系统运动分析

1. Ω 、 T 、 T_L 的正方向

上面按电机输给系统的能量平衡方程,推出系统转矩平衡的运动方程。电磁转矩 T 的方向与 Ω 方向间有两种可能情况: T 与 Ω 方向相同时, T 为拖动转矩; T 与 Ω 方向相反时, T 为制动转矩。负载转矩 T_L 的方向与 Ω 方向间亦有两种可能情况: T_L 与 Ω 方向相反时, T_L 为制动转矩(或称阻转矩); T_L 与 Ω 方向相同时, T_L 为拖动转矩。因此,电力传动系统中是以 Ω 方向为基准去判别转矩 T 和 T_L 的属性。为研究方便,规定系统按逆时针(或顺时针)旋转

作为 Ω 的正方向, T 的正方向与 Ω 正方向相同, T_L 的正方向与 Ω 正方向相反, 如图 1-2b 所示。式(1-5)或式(1-7)符合这种正方向规定, 可用它们分析电力传动系统中各种运动状态。

2. 系统运动状态分析

1) 正向电动状态 若 $\Omega > 0, T > 0$ 时为正向电动状态, 此时 T 拖动系统正向运动为拖动转矩。如 $T_L > 0, T_L$ 阻碍系统正向运动为制动转矩, 系统内有电能转换为机械能。正向电动状态的运动分析有:

若 $T - T_L > 0$, 即 $T > T_L$ 时, $J d\Omega/dt > 0$, 系统处于正向加速状态;

若 $T - T_L = 0$, 即 $T = T_L$ 时, $J d\Omega/dt = 0$, 系统处于静止或正向稳定运行状态;

若 $T - T_L < 0$, 即 $T < T_L$ 时, $J d\Omega/dt < 0$, 系统处于正向减速状态。

2) 正向制动状态 若 $\Omega > 0, T < 0$ 时为正向制动状态(或发电状态)。

如 $T_L < 0$, 此时 T_L 推动系统正向运动为拖动转矩。 T 将阻碍系统正向运动, 电机处于制动状态, 系统内有机能转换为电能。

正向制动状态的运动分析, 亦有加速、减速及等速三种形式。

3) 反向电动状态 若 $\Omega < 0, T < 0$ 时为反向电动状态, 此时 T 拖动系统反向运动为拖动转矩。如 $T_L < 0, T_L$ 阻碍系统反向运动为制动转矩, 系统内仍然有电能转换为机械能。

反向电动状态的运动分析, 亦有加速、减速及等速三种形式。

4) 反向制动状态 若 $\Omega < 0, T > 0$ 时为反向制动状态。如 $T_L > 0$, 此时 T_L 推动系统反向运动为拖动转矩。 T 将阻碍系统运动, 电机处于制动状态, 系统内有机能转换为电能。

反向制动状态的运动分析, 亦有加速、减速及等速三种形式。

三、多轴电力传动系统运动方程

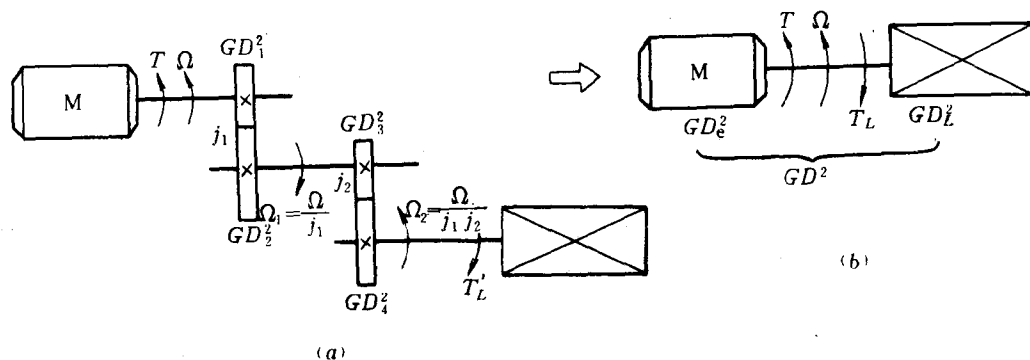


图 1-3 多轴传动系统折算成单轴传动系统

a—多轴传动系统; b—等效单轴传动系统

在实际应用中, 很多生产机械都是采用多轴电力传动系统, 如图 1-3a 所示。这是因为一般生产机械为满足工艺要求, 需要较低的转速。电动机的功率 $P = T\Omega$, 为保证一定的输出功率, Ω 值小时则 T 值要大。 T 增加必然增加电机的铁磁材料和有色金属用量, 增加电机成本。从电机设计的阿诺德公式看出

$$P = CD^2 l n$$

式中, C 为阿诺德常数, 它与电机的电磁参数有关; D 为电机的转子直径; l 为转子的有效轴

向长度; n 为电机的转速。由此看出, 提高电机的转速 n , 可以减小电机的体积。因此, 一般希望制造高转速的电机。在电力传动系统中电动机和生产机械之间必须装设减速机构, 如齿轮减速箱、蜗轮蜗杆变速等, 构成了多轴电力传动系统。就电力传动系统而言, 一般不需详细研究每根轴上的运动问题, 通常只需以电动机轴为研究对象, 把实际的多轴系统等效为单轴系统, 即把传动机构和生产机械等效成电动机轴上的负载, 如图 1-3b 所示。

等效单轴电力传动系统的运动方程为

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

式中, T 为电动机的电磁转矩; T_L 为折算到电动机轴上的等效负载转矩; GD^2 为折算到电动机轴上的总飞轮矩, 包括电动机转子的飞轮矩 GD_r^2 和折算到电动机轴上的等效负载飞轮矩 GD_L^2 之和。

因此, 将实际的多轴系统等效为单轴系统, 必须进行负载转矩和飞轮矩的折算。根据能量守恒定律, 折算的原则是折算前的多轴系统与折算后的单轴系统在能量和功率关系上保持不变。负载转矩和飞轮矩的折算公式随生产机械的运动形式不同而异。

第三节 负载转矩和飞轮矩的折算

一、旋转运动时负载转矩和飞轮矩的折算

1. 电机工作在电动状态时负载转矩的折算

负载转矩的折算原则是, 保持折算前后系统传递的功率不变。电机工作在电动机状态时, 电机产生的电磁转矩为拖动转矩, 能量由电动机向生产机械传递时, 因摩擦作用必然引起传动损耗, 此时传动损耗由电动机承担, 由传动效率 η 体现。

如电动机轴上的输出功率为 $P_2 = T_L' \Omega$, 它传递到生产机械上的负载功率变为 $P_L = T_L \Omega_L$, 则传动效率 η 为

$$\eta = \frac{P_L}{P_2} = \frac{T_L' \Omega_L}{T_L \Omega}$$

或改写为

$$T_L = \frac{T_L' \Omega_L}{\eta \Omega} = \frac{T_L'}{\eta \Omega / \Omega_L} = \frac{T_L'}{\eta j} \quad (1-8)$$

式中 T_L' —— 生产机械实际负载转矩;

T_L —— 折算到电动机轴上的等效负载转矩;

Ω 及 Ω_L —— 电动机轴和生产机械轴的角速度;

η —— 传动机构的传动效率。若各级传动机构的效率分别为 $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$, 则

$$\text{总效率 } \eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n = \prod_{k=1}^n \eta_k;$$

j —— 电动机轴转速(主动转速)与生产机械轴转速(从动转速)之比, 称为总传动比。若各级传动机构的传动比分别为 $j_1, j_2, \dots, j_n$, 则 $j = \frac{\Omega}{\Omega_L} = \frac{n}{n_L} = j_1 j_2$

$\dots j_n = \prod_{k=1}^n j_k$ 。

$$\dots j_n = \prod_{k=1}^n j_k$$

2. 电机工作在制动状态时负载转矩的折算

电动机工作在制动运行状态时,电动机产生的电磁转矩为制动转矩,此时能量由生产机械向电机传送,传动损耗由生产机械承担,则有

$$T_L \Omega = T_L' \Omega_L \eta$$

或

$$T_L = \frac{T_L' \Omega_L \eta}{\Omega} = \frac{T_L'}{j} \eta \quad (1-9)$$

3. 飞轮矩的折算

转动惯量 J 和飞轮矩 GD^2 的折算原则是保持折算前后系统存储的动能不变,使折算前后系统的动态过程相同。在图 1-3a 中,依据折算原则可写出

$$\frac{J\Omega^2}{2} = \frac{J_d\Omega^2}{2} + \frac{J_1\Omega_1^2}{2} + \frac{J_2\Omega_2^2}{2}$$

两边同乘以 $2/\Omega^2$ 得

$$J = J_d + \frac{J_1}{(\Omega/\Omega_1)^2} + \frac{J_2}{(\Omega/\Omega_2)^2} = J_d + \frac{J_1}{j_1^2} + \frac{J_2}{(j_1 \cdot j_2)^2} \quad (1-10)$$

式中 J ——折算后等效单轴传动系统的总转动惯量;

j_1, j_2 ——各级的传动比(传速比); $j_1 = \Omega/\Omega_1, j_2 = \Omega_1/\Omega_2$;

J_d ——电动机轴上的转动惯量,包括转子及齿轮 1 的转动惯量之和;

J_1, J_2 ——各传动轴上转动惯量;

Ω ——电动机轴的旋转角速度;

Ω_1, Ω_2 ——各传动轴的旋转角速度。

由于 $J = GD^2/4g$, 故式(1-10)可写成飞轮矩表达形式,即等效单轴传动系统的总飞轮矩为

$$GD^2 = GD_e^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{j_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{j_1^2 j_2^2} = GD_e^2 + GD_L^2 \quad (1-11)$$

其中 GD_L^2 为传动机构与生产机械轴上飞轮矩折算到电动机轴上后的总飞轮矩。 GD_e^2 、 GD_1^2 、 GD_2^2 、 GD_3^2 、 GD_4^2 和 GD_5^2 为各个齿轮和生产机械的飞轮矩。由式(1-11)可知,每级的飞轮矩折算到电动机轴上应除以电动机与该级的传动比平方。一般情况下,在总的 GD^2 中,电动机的 GD_e^2 占比重最大,其次是生产机械轴上的飞轮矩折算值,传动机构的飞轮矩的折算值所占的比重最小。在实际工作中,为了简化计算起见,可用适当加大电动机飞轮矩的方法来计及传动机构及生产机械的飞轮矩的影响,即

$$GD^2 = (1.2 \sim 1.3)GD_e^2$$

如果电动机轴上还有其它大飞轮矩部件,如抱闸的闸轮等需专门考虑。

二、平移运动时力和质量的折算

1. 力与转矩的折算

某些生产机械具有平移运动的工作机构,如刨床的工作台。平移运动属于直线运动,此时不知道负载转矩,而是已知直线作用力。设 F_L 为工作机构作直线运动时遇到的阻力(N); v_L 为工作机构的直线速度(m/s),则工作机构所需的功率为

$$P_L = F_L v_L$$

折合到电动机轴上的负载转矩 T_L 应满足折算前后功率相等的原则,考虑到传动机构中的损耗后,应满足

有

$$T_L \Omega = \frac{P_L}{\eta} = \frac{F_L v_L}{\eta}$$

$$T_L = \frac{F_L v_L}{\eta \Omega} = \frac{F_L v_L}{\eta \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{F_L v_L}{\eta n} \quad (1-12)$$

2. 质量与飞轮矩的折算

设 m_L 、 G_L 为直线运动部分的质量(kg)和重量(N), 则直线运动部分的动能为

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

直线运动部分的重量折算到电动机轴上的飞轮矩 GD_L^2 应满足折算前后动能相等的原则, 即

$$\frac{1}{2} \frac{G_L}{g} v_L^2 = \frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_L^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

可求得

$$GD_L^2 = 365 \frac{G_L v_L^2}{n^2} \quad (1-13)$$

三、升降运动时负载转矩和飞轮矩的折算

有些生产机械具有升降运动的工作机械, 如电梯、提升机、起重机等。升降运动和平移运动都属于直线运动, 但各有其特点, 现以提升机为例讨论, 如图 1-4 所示。

1. 提升运动时负载转矩的折算

此时电动机带动重物提升, 功率传送方向是由电动机到负载, 传动损耗由电动机负担。因此, 负载折算到电动机轴上的功率应等于负载功率除以传动效率, 即

$$T_L \Omega = \frac{F_L v_L}{\eta_{\uparrow}}$$

$$T_L = \frac{F_L v_L}{\eta_{\uparrow} \Omega} = 9.55 \frac{F_L v_L}{\eta_{\uparrow} n} \quad (1-14)$$

式中, $\eta_{\uparrow}$ 为提升传动效率。

2. 下降运动时负载转矩的折算

当提升机带重物下降时, 为使下放速度不致过快, 应该使电动机工作在制动状态, 产生一个与转速相反的电磁转矩与负载转矩相平衡, 保证以恒定的转速下放重物。重力作用是推动运动的, 功率传送的方向是由负载重物到电动机, 传动损耗由负载负担。此时

$$\text{传动效率}(\eta_{\downarrow}) = \frac{\text{负载功率} - \text{传动损耗}}{\text{负载功率}} = \frac{\text{电动机功率}}{\text{负载功率}}$$

于是, 折算到电动机轴上的功率等于负载功率乘以传动效率, 即

$$T_L \Omega = F_L v_L \eta_{\downarrow}$$

有

$$T_L = \frac{F_L v_L \eta_{\downarrow}}{\Omega} = 9.55 \frac{F_L v_L \eta_{\downarrow}}{n} \quad (1-15)$$

式中, $\eta_{\downarrow}$ 为下降传动效率。

可见同一重物在提升时和下放时折算后的负载转矩不同, 下降时的折算转矩小于提升

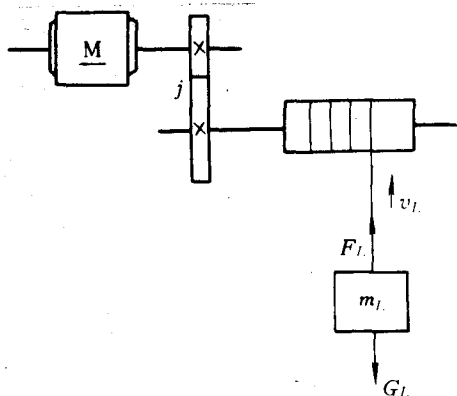


图 1-4 提升机示意图

时折算转矩。提升传动效率 $\eta_{\uparrow}$ 与下降传动效率 $\eta_{\downarrow}$ 并不相等。对于同一重物的提升和下降, 传动机构的损耗可以认为不变, 令它等于 ΔP , 则提升时

$$\begin{aligned}\Delta P_{\uparrow} &= \text{电动机输出功率} - \text{负载功率} \\ &= \frac{F_L v_L}{\eta_{\uparrow}} - F_L v_L = F_L v_L \left(\frac{1}{\eta_{\uparrow}} - 1 \right)\end{aligned}$$

下降时

$$\begin{aligned}\Delta P_{\downarrow} &= \text{负载功率} - \text{电动机输出功率} \\ &= F_L v_L - F_L v_L \eta_{\downarrow} = F_L v_L (1 - \eta_{\downarrow})\end{aligned}$$

认为提升和下降时的 ΔP 相等, 则有

$$\begin{aligned}F_L v_L \left(\frac{1}{\eta_{\uparrow}} - 1 \right) &= F_L v_L (1 - \eta_{\downarrow}) \\ \eta_{\downarrow} &= 2 - \frac{1}{\eta_{\uparrow}}\end{aligned}\quad (1-16)$$

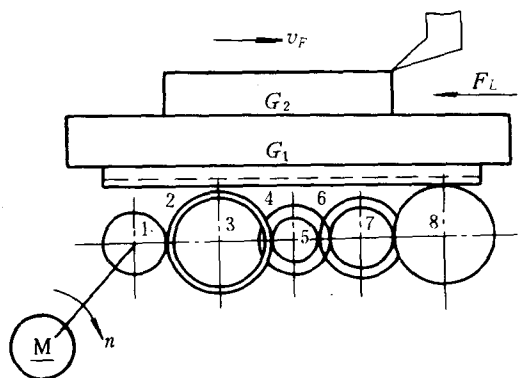


图 1-5 刨床传动系统图

在实际工作中, $\eta_{\downarrow}$ 为负值有益, 起安全作用。 $\eta_{\downarrow}$ 为负值说明负载功率不足以克服传动机构的损耗, 在没有电动机推动时重物自身是掉不下来的, 这就是传动机构的自锁作用, 它对于像电梯这类涉及人身安全的机械尤其重要。要使 $\eta_{\downarrow}$ 为负值, 必须采用低提升效率 $\eta_{\uparrow}$ (即高损耗) 的传动机构, 例如蜗轮蜗杆传动, 其提升效率 $\eta_{\uparrow} = 0.3 \sim 0.5$ 。

3. 飞轮矩的折算

飞轮矩的折算不涉及传动损耗和效率, 因此升降运动和平移运动都相同, 其折算公式同式(1-13)。

应该指出, 上面讲了不同运动形式的负载转矩及飞轮矩的折算。如果一个电力传动系统中既有旋转运动又有直线运动, 那么整个负载飞轮矩的折算值应等于旋转运动部分飞轮矩的折算值与直线运动部分飞轮矩的折算值之和, 然后将整个负载飞轮矩的折算值加上电动机转子的飞轮矩就是整个系统折算到电动机轴上的等效飞轮矩。

例 1-1 刨床传动系统如图 1-5 所示, 若电动机 M 的转速 $n = 420 \text{ r/min}$, 转子的飞轮矩 $GD_2^2 = 110.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$, 工作台重 $G_1 = 12050 \text{ N}$, 工件重 $G_2 = 17650 \text{ N}$, 传动效率 $\eta = 0.7$, 各齿轮及飞轮矩如表 1-1, 齿轮 8 的节距 $t_8 = 25.13 \text{ mm}$, 工作台与床身的摩擦系数为 0.1。试计算折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD^2 及负载转矩 T_L 。

表 1-1 传动机构的技术数据

齿 轮 号	1	2	3	4	5	6	7	8
齿 轮 数	20	55	30	64	30	78	30	66
$GD^2, \text{N} \cdot \text{m}^2$	4.12	20.10	9.81	28.40	18.60	41.20	24.50	63.75

解: (1) 求折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD^2

①旋转运动部分(不包括电机的转子)折算到电机轴上的飞轮矩 GD_a^2 。齿轮变速时,其转速与齿轮的齿数成反比,则

$$\begin{aligned} GD_a^2 &= GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{(Z_2/Z_1)^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{(Z_2/Z_1)^2(Z_4/Z_3)^2} \\ &\quad + \frac{GD_6^2 + GD_7^2}{(Z_2/Z_1)^2(Z_4/Z_3)^2(Z_6/Z_5)^2} + \frac{GD_8^2}{(Z_2/Z_1)^2(Z_4/Z_3)^2(Z_6/Z_5)^2(Z_8/Z_7)^2} \\ &= 4.12 + \frac{20.1 + 9.81}{(55/20)^2} + \frac{28.4 + 18.6}{(55/20)^2 \times (64/30)^2} + \frac{41.2 + 24.5}{(55/20)^2 \times (64/30)^2 \times (78/30)^2} \\ &\quad + \frac{63.75}{(55/20)^2 \times (64/30)^2 \times (78/30)^2 \times (66/30)^2} = 9.81 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

②直线运动部分折算到电动机轴上的飞轮矩 GD_b^2 。齿轮 8 的转速

$$\begin{aligned} n_8 &= \frac{n}{(Z_2/Z_1)(Z_4/Z_3)(Z_6/Z_5)(Z_8/Z_7)} \\ &= \frac{420}{(55/20) \times (64/30) \times (78/30) \times (66/30)} = 12.5 \text{ r/min} \end{aligned}$$

工作台 G_1 及工件 G_2 的直线运动速度就是齿轮 8 的圆周线速度,即

$$v_L = \frac{\pi D_8 n_8}{60} = \frac{Z_8 t_8 n_8}{60} \quad \text{m/s}$$

或

$$v_L = \frac{66 \times 25.13 \times 10^{-3} \times 12.5}{60} = 0.347 \text{ m/s}$$

于是

$$GD_b^2 = 365 \frac{(G_1 + G_2) v_L^2}{n^2} = 365 \times \frac{(12050 + 17650) \times 0.347^2}{420^2} = 7.35 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

③折算到电动机轴上的总飞轮矩 GD^2 。

$$GD^2 = GD_c^2 + GD_L^2 = GD_c^2 + GD_a^2 + GD_b^2 = 110.5 + 9.81 + 7.35 = 127.66 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

可见,电动机的飞轮矩占主要地位。

(2)求折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 。刨床的工作机构(工作台)作直线运动,其阻力为

$$\begin{aligned} F_L &= \text{切削力} + \text{摩擦力} = \text{切削力} + (G_1 + G_2) \times \text{摩擦系数} \\ &= 10000 + (12050 + 17650) \times 0.1 = 12970 \text{ N} \end{aligned}$$

将 F_L 折算到电动机轴上的等效负载转矩为

$$T_L = 9.55 \frac{F_L v_L}{n \eta} = 9.55 \times \frac{12970 \times 0.347}{420 \times 0.7} = 146.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

例 1-2 某提升机传动系统如图 1-6 所示。已知数据:电动机起动时间 $t_u = 0.8 \text{ s}$ 等加速运动,电动机稳定运行转速 $n = 1440 \text{ r/min}$,提升的重物 $G = 3000 \text{ N}$,平衡锤重 $G_P = 1000 \text{ N}$,绞车滚筒直径 $D_L = 0.4 \text{ m}$,电动机转子飞轮矩 $GD_c^2 = 9.81 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,靠背轮 D 的飞轮矩 $GD_D^2 =$

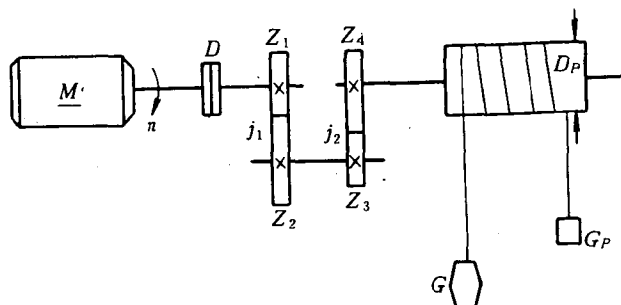


图 1-6 提升机传动系统