

/// 高等学校通用教材

电力传动 与自动控制系统

范正翘 主编

DIANLI CHUANDONG

YU ZIDONG KONGZHI XITONG

控制科学与工程



北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

高等学校通用教材

电力传动与自动控制系统

范正翘 主编

北京航空航天大学出版社

<http://www.buaapress.com.cn>

内容简介

本书共分四篇,第一篇介绍电力传动基础知识;第二篇介绍各种直流调速系统的原理,静、动态特性,控制规律和设计方法;第三篇介绍各种异步电动机变频调速系统和矢量控制系统的原理和控制规律;第四篇介绍电力传动系统的计算机控制,并结合计算机控制的直流调速系统和交流调速系统,重点介绍几种计算机控制系统的设计方法。全书取材注重基础性和实用性,论述条理清楚,符合教学和认识规律。本书是电气工程及自动化专业本科生教材,也可供有关专业师生和技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力传动与自动控制系统 / 范正翘主编. — 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 8

ISBN 7-81077-193-0

I. 电… II. 范… III. 电力传动—自动控制系统
IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067244 号

电力传动与自动控制系统

范正翘 主编

责任编辑 胡晓柏

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn>

E-mail: bhpress@263.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

开本: 787×960 1/16 印张: 21 字数: 470 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷 印数: 3 000 册

ISBN 7-81077-193-0 定价: 26.00 元

前 言

《电力传动与自动控制系统》编写大纲是根据北京航空航天大学电气工程及自动化专业2000年版教学计划所提出的该课程的教学基本要求拟定的。在对编写大纲进行了深入讨论后,又对原教材《电力传动与调速系统》进行了修改,并分工编写,完成了本书。

本书对交、直流传动系统中的启动、制动、调速与直流电力传动系统的过渡过程作了较详细的阐述。因为,这是电力传动自动控制系统的基础。直流传动系统主要介绍几种典型系统的工作原理,控制规律,静、动态性能 and 设计方法;交流传动系统主要介绍异步电动机变频调速系统和矢量控制系统的工作原理、控制规律和主要控制环节,并介绍无刷直流电动机的工作原理和数学模型;电力传动系统的计算机控制主要介绍几种电力传动控制系统的典型设计方法并用实例进行了阐述。

与原《电力传动与调速系统》教材比较,本书主要改动和更新的内容如下:

(1) 取消原书第5章“电力传动系统电机容量选择”。

(2) 取消原书第8章“功率晶体管调速系统”和第9章“数字调速系统”,将其内容纳入有关章节。

(3) 第三篇专述交流调速系统,取消原书第10章“晶闸管变频器异步电动机调速系统”、第11章“晶闸管自控同步电动机”和第12章“交流电动机磁场定向调速系统”,更新为第7章“异步电动机变频调速系统”、第8章“异步电动机矢量控制”和第9章“无刷直流电动机调速系统”,主要以分析系统工作原理,阐明控制规律,静、动态分析和设计为主。

(4) 增设第四篇,专述电力传动系统的计算机控制,以分析系统工作原理,阐明控制规律,静、动态分析和设计为主。

综上所述,本书加强了电力传动自动控制系统方面的内容,力图反映电力传动领域技术发展的现状。由于学时的限制,关于传动技术驱动的交流化,功率变换器的高频化,控制的数字化、智能化和网络化的详细内容将在后续课程《近代交流调速》、《功率电子学》中介绍。

本书按讲课60学时编写,其中第1~4章由西北工业大学马俊峰教授编写,第5~9章由北京航空航天大学范正翘教授编写,第10~12章由北京航空航天大学周元钧教授编写,全书由范正翘教授主编。

由于编者水平有限,书中如有错误和不妥之处,希望广大读者批评指正。

编者

2003年3月

目 录

第一篇 电力传动基础

第1章 电力传动系统动力学

1.1 电力传动系统的运动方程式	2
1.2 负载转矩和飞轮矩的折算	3
1.3 电力传动系统的负载特性	10
习 题	12

第2章 电力传动系统静特性

2.1 直流他励电动机的启动	15
2.2 直流他励电动机的制动	21
2.3 直流他励电动机的调速	27
2.4 直流他励电动机的运转状态	34
2.5 直流串励电动机的电力传动	43
2.6 直流复励电动机的电力传动	48
习 题	50

第3章 直流电力传动系统的过渡过程

3.1 概 述	51
3.2 电枢电压突变时的过渡过程	52
3.3 励磁磁通突变时的过渡过程	59
3.4 最佳过渡过程	62
习 题	64

第4章 三相异步电动机的启动、制动和调速

4.1 三相异步电动机的启动	65
----------------------	----

4.2 三相异步电动机的制动·····	75
4.3 三相异步电动机的调速·····	80
习 题 ·····	92

第二篇 直流调速系统

第5章 晶闸管自动调速系统

5.1 单环控制调速系统·····	94
5.2 单环控制调速系统的限流保护——电流截止负反馈 ·····	102
5.3 单环控制调速系统的动态数学模型 ·····	105
5.4 单环无静差调速系统 ·····	108
5.5 电枢区串级控制的调速系统 ·····	113
5.6 弱磁区串级控制的调速系统 ·····	123
5.7 可逆调速系统 ·····	126
习 题·····	137

第6章 自动调速系统的工程设计

6.1 典型系统 ·····	139
6.2 调速系统的串联校正 ·····	152
6.3 双环调速系统的设计 ·····	158
6.4 调速系统的并联微分校正 ·····	173
习 题·····	177

第三篇 交流调速系统

第7章 异步电动机变频调速系统

7.1 变频调速系统的一般基础 ·····	180
7.2 交—直—交电压型变频调速系统 ·····	185
7.3 交—直—交电流型变频调速系统 ·····	190

7.4 PWM 变频调速系统	199
习 题	211

第 8 章 异步电动机矢量控制

8.1 异步电动机的动态数学模型	212
8.2 异步电动机的矢量控制	228
8.3 异步电动机矢量控制系统举例	234
习 题	238

第 9 章 无刷直流电动机调速系统

9.1 无刷直流电动机工作原理	239
9.2 无刷直流电动机的数学模型	245
9.3 无刷直流电动机调速系统	248
习 题	250

第四篇 电力传动系统的计算机控制

第 10 章 计算机控制的电力传动系统及数字计算方法

10.1 数字式的电力传动系统	252
10.2 计算机控制系统中的数字运算方法	260
10.3 计算机控制系统中的 z 转换	269
10.4 计算机控制系统的状态空间设计方法	273
习 题	278

第 11 章 计算机控制的直流电力传动系统

11.1 PWM 驱动的直流电动机控制系统	279
11.2 基于连续域工程设计方法的数字直流调速系统	287
11.3 基于状态空间的数字直流调速系统	295
习 题	300

第 12 章 计算机控制的交流调速系统

12.1 计算机控制的转速开环变频调速系统	302
-----------------------------	-----

第一篇

电力传动基础

这一篇主要介绍电力传动的基础知识,具体内容有:

- (1) 电力传动系统的动力学基础;
- (2) 电力传动系统的静特性及各种运转状态;
- (3) 电动机的启动、制动与调速;
- (4) 电动机的过渡过程。

第 1 章

电力传动系统动力学

本章首先运用动力学原理,分析讨论电力传动系统的运动方程式及负载转矩、飞轮矩等的折算方法;其次,介绍几种典型的负载特性,即负载转矩与转速之间的相互关系。这些分析和介绍,为研究电力传动系统的静特性和过渡过程准备了必要的基础。

1.1 电力传动系统的运动方程式

电力传动系统的运动规律可以用运动方程式来描述。作用在电动机轴上的转矩有电动机的电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 。一般来说, T_e 是推动运动的,而 T_L 是反抗运动的。为此我们对转矩的正方向作如下规定:在事先选定转速 n 的正方向以后,电磁转矩 T_e 的正方向与 n 相同,负载转矩 T_L 的正方向与 n 相反,如图 1.1 所示。

于是根据旋转运动系统的牛顿第二定律,可得

$$T_e - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

式中 T_e ——电动机的电磁转矩, $N \cdot m$;

T_L ——折算到电动机轴上的负载转矩, $N \cdot m$;

J ——旋转体的转动惯量, $kg \cdot m^2$;

Ω ——电动机轴旋转的角速度, rad/s ;

$\frac{d\Omega}{dt}$ ——电动机轴旋转的角加速度, rad/s^2 ;

$J \frac{d\Omega}{dt}$ ——惯性转矩(或加速转矩,或动态转矩), $N \cdot m$ 。

转动惯量 J 是物理学中常用的物理量,在工程上则采用飞轮矩(即飞轮惯量) GD^2 ,其单位是 $N \cdot m^2$ 。 J 与 GD^2 之间的关系为

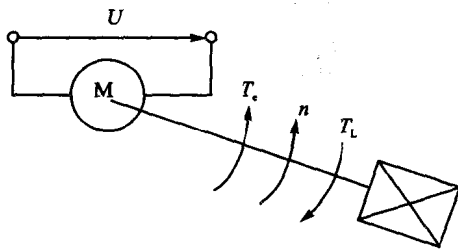


图 1.1 转矩的正方向

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{4g}$$

式中 m ——旋转部分的质量, kg;
 ρ ——旋转部分的惯性半径, m;
 G ——旋转部分的重量, N;
 D ——旋转部分惯性直径, m;
 g ——重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

角速度 Ω 与转速 $n(\text{r/min})$ 的关系为

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

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

式中常数 375 为具有 $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 的量纲。于是, 电力传动系统的运动方程式可改写为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1.1)$$

由式(1.1)可以看出, 电力传动系统的运动状态是由电动机轴上的两个转矩 T_e 和 T_L 来决定的。

(1) 当 $T_e > T_L$ 时, $dn/dt > 0$, 系统加速; 当 $T_e < T_L$ 时, $dn/dt < 0$, 系统减速。这两种情况系统都处在变速运动状态, 称动态。

(2) 当 $T_e = T_L$ 时, $dn/dt = 0$, $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 即系统静止或匀速运行, 称稳定运行状态或称稳态。

在运动方程式中, 要注意转矩的符号。由于 T_e 和 T_L 本身都是带有方向性的变量, 因此 T_e 和 T_L 本身的符号将随其方向不同而异。在代入具体数值时, 如果其实际方向与规定的正方向相同, 就用正; 否则就用负。

1.2 负载转矩和飞轮矩的折算

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 1.2(a) 所示。这是因为生产机械为了满足其工艺要求, 工作机构的速度往往与电动机的转速不同, 因此在工作机构与电动机之间必须装设变速机构, 如齿轮变速、蜗轮蜗杆变速、皮带变速机构等。但就电力传动系统而言, 一般不须详细研究每根轴上的问题, 通常只须以电动机轴为研究对象, 把一个实际的多轴系统等效为单轴系统, 即把传动机构和工作机构等效成一个负载, 如图 1.2(b) 所示。

等效单轴系统的运动方程式为

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

式中 GD^2 ——电动机轴上的总飞轮矩,包括电动机的飞轮矩 GD_a^2 和折算到电动机轴上的负载飞轮矩 GD_L^2 。

转矩和飞轮矩的折算公式随工作机构的运动形式不同而不同,现分别加以讨论。

一、旋转运动

以图 1.2 为例,说明旋转运动转矩及飞轮矩的折算。图中 n 为电动机转速; n_g 为工作机构转速; i_1 和 i_2 为各对齿轮的传动比。有

$$n_g = \frac{n}{i_1 i_2} = \frac{n}{i}$$

式中 $i = i_1 i_2 = \frac{n}{n_g}$ 为传动机构的总传动比。一般 $n_g < n$, 因此传动机构是减速的, $i > 1$; 个别情况 $n_g > n$, 这时传动机构是加速的, $i < 1$ 。

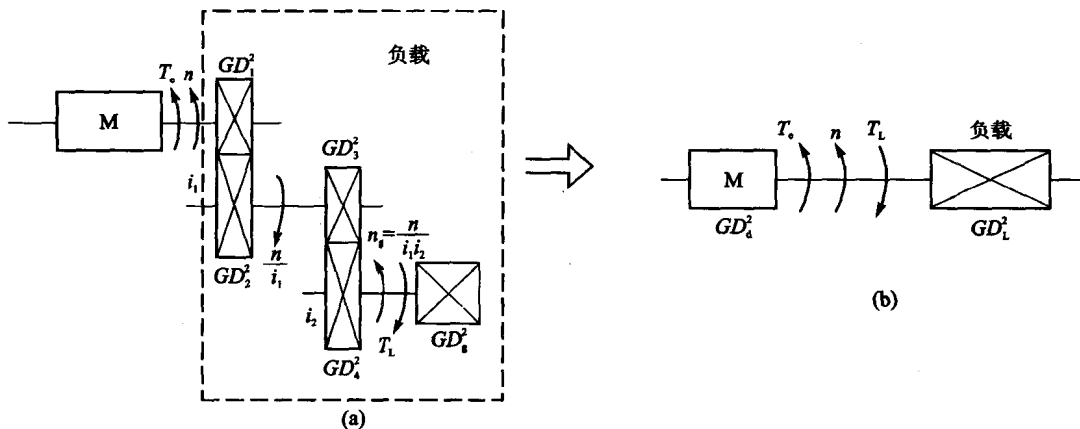


图 1.2 多轴电力传动系统等效成单轴传动系统

1. 转矩的折算

当电动机带上工作机构旋转时,电动机轴上的功率应该等于工作机构所需的功率加上传动机构损耗的功率,用传动效率 η_c 表示,则

$$\text{电动机轴上的功率} = \frac{\text{工作机构所需功率}}{\eta_c}$$

负载转矩折算的原则是折算前后的功率不变,因此

$$T_L \Omega = \frac{T_g \Omega_g}{\eta_c}$$

所以

$$T_L = \frac{T_g}{\eta_c \left(\frac{\Omega}{\Omega_g} \right)} = \frac{T_g}{\eta_c \left(\frac{n}{n_g} \right)} = \frac{T_g}{\eta_c i} \quad (1.2)$$

式中 Ω, Ω_g ——电动机轴和工作机构轴的角速度；

T_g ——工作机构轴上的转矩；

T_L ——工作机构折算到电动机轴上的负载转矩；

η_c ——传动机构的效率，应为各级效率的乘积。

上式就是负载转矩的折算公式，可以看出，由低速轴折算到高速轴时，转矩将变小，反之转矩将变大。

2. 飞轮矩的折算

在图 1.2 中，把传动机构当做电动机负载的一部分，传动机构和工作机构轴上的飞轮矩折算到电动机轴上之后的飞轮矩 GD_L^2 与电动机转子的飞轮矩 GD_d^2 之和就是等效成单轴系统的飞轮矩 GD^2 。

负载飞轮矩折算的原则是折算前后的动能不变。旋转体的动能为

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \frac{GD^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 = \frac{\pi^2}{7 \cdot 200g} GD^2 n^2 = \frac{GD^2 n^2}{7 \cdot 156}$$

因此飞轮矩折算的关系应为

$$\frac{GD_L^2 n^2}{7 \cdot 156} = \frac{GD_1^2 n^2}{7 \cdot 156} + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{7 \cdot 156} \cdot \frac{n^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{7 \cdot 156} \cdot \frac{n_g^2}{i_1^2 i_2^2}$$

即

$$GD_L^2 n^2 = GD_1^2 n^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} \cdot n^2 + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{i_1^2 i_2^2} \cdot n^2$$

所以

$$GD_L^2 = GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_g^2}{i_1^2 i_2^2} \quad (1.3)$$

式中 $GD_1^2, GD_2^2, GD_3^2, GD_4^2$ 为各个齿轮的飞轮矩，由式(1.3)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。

折算以后，系统总的飞轮矩为

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_L^2 \quad (1.4)$$

一般情况下，在总的 GD^2 中，电动机的 GD_d^2 占的比例最大，其次是工作机构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例最小。所以，在实际工作中，为了计算简便起见，通常用适当加大电动机飞轮矩的方法来计入传动机构的飞轮矩。于是将系统总的飞轮矩简化为

$$GD^2 = (1 + \delta) GD_d^2 \quad (1.5)$$

一般 $\delta = 0.2 \sim 0.3$ 。如果电动机轴上还有其他大飞轮矩部件，如抱闸的闸轮等，则需专门考虑。

二、平移运动

某些生产机械具有作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。它的转矩和飞轮矩的折算公式有其自己的特点。

1. 转矩的折算

设 F 为工作机构作直线运动时所克服的阻力(N), v_g 为工作机构的直线速度(m/s), 则工作机构所需的功率为

$$P_g = Fv_g$$

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以后, 应满足

$$\begin{aligned} T_L \Omega &= \frac{P_g}{\eta_c} = \frac{Fv_g}{\eta_c} \\ \text{所以 } T_L &= \frac{Fv_g}{\eta_c \Omega} = \frac{Fv_g}{\eta_c \frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv_g}{\eta_c n} \end{aligned} \quad (1.6)$$

2. 飞轮矩的折算

设 m_g 、 G_g 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

$$\frac{1}{2} m_g v_g^2 = \frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2$$

直线运动部分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

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{G_g}{g} v_g^2 &= \frac{GD_L^2 n^2}{7\,156} \\ \text{所以 } GD_L^2 &= \frac{7\,156}{2g} \cdot \frac{G_g v_g^2}{n^2} = 365 \frac{G_g v_g^2}{n^2} \end{aligned} \quad (1.7)$$

三、升降运动

有些生产机械具有升降运动的工作机构,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,但又有自己的特点。现以起重机为例,如图 1.3 所示。

1. 转矩的折算

设 m_g 、 G_g 为直线运动部分的质量(kg)和重量(N); v_g 为直线速度(m/s); F 为工作机构直线作用力(N)。

升降运动的转矩折算与功率的传送方向有关,有两种情况:

(1) 提升运动。此时电动机带动负载,使重物提升,功率的传送方向是由电动机到负载,传动损耗由电动机负担。因此,折算到电动机轴上的功率应等于负载功率除以效率,即

$$T_L \Omega = \frac{Fv_g}{\eta_c^{\uparrow}}$$

所以
$$T_L = \frac{Fv_g}{\eta_c^\uparrow \Omega} = 9.55 \frac{Fv_g}{\eta_c^\uparrow n} \quad (1.8)$$

式中 $\eta_c^\uparrow$ ——提升传动效率。

(2) 重物下降运动。此时负载带动电动机。重力作用是推动运动的,而电动机是反对运动的。功率传送的方向是由负载到电动机,传动损耗是由负载来负担。因此

$$\eta_c^\downarrow = \frac{\text{电动机功率}}{\text{负载功率}} = \frac{\text{负载功率} - \text{传动机构损耗}}{\text{负载功率}}$$

这样一来,折算到电动机轴上的功率应等于负载功率乘以传动效率,即

$$T_L \Omega = Fv_g \eta_c^\downarrow$$

所以
$$T_L = \frac{Fv_g}{\Omega} \eta_c^\downarrow = 9.55 \frac{Fv_g}{n} \eta_c^\downarrow \quad (1.9)$$

式中 $\eta_c^\downarrow$ ——下降传动效率。

可见,同一重物在提升时和下放时折算后的转矩不一样,下降时的折算转矩小于提升时的折算转矩。提升传动效率 $\eta_c^\uparrow$ 与下降传动效率 $\eta_c^\downarrow$ 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

$$\Delta P = \text{电动机功率} - \text{负载功率} = \frac{Fv_g}{\eta_c^\uparrow} - Fv_g = Fv_g \left(\frac{1}{\eta_c^\uparrow} - 1 \right)$$

下降时

$$\Delta P = \text{负载功率} - \text{电动机功率} = Fv_g - Fv_g \cdot \eta_c^\downarrow = Fv_g (1 - \eta_c^\downarrow)$$

由于提升和下降时的 ΔP 相等,则

$$Fv_g \left(\frac{1}{\eta_c^\uparrow} - 1 \right) = Fv_g (1 - \eta_c^\downarrow)$$

所以
$$\eta_c^\downarrow = 2 - \frac{1}{\eta_c^\uparrow} \quad (1.10)$$

在实际工作中, $\eta_c^\downarrow$ 为负值是有益的,它能起安全作用。 $\eta_c^\downarrow$ 为负值,说明负载功率不足以克服传动机构的损耗,所以没有电动机推动,重物本身是掉不下来的。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为重要。要使 $\eta_c^\downarrow$ 为负,必须采用低提升效率 $\eta_c^\uparrow$ (即高损耗)的传动机构。例如涡轮蜗杆传动,其提升效率 $\eta_c^\uparrow = 0.3 \sim 0.5$ 。

2. 飞轮矩的折算

飞轮矩的折算不涉及传动损耗或效率,因此升降运动与平移运动都相同。

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

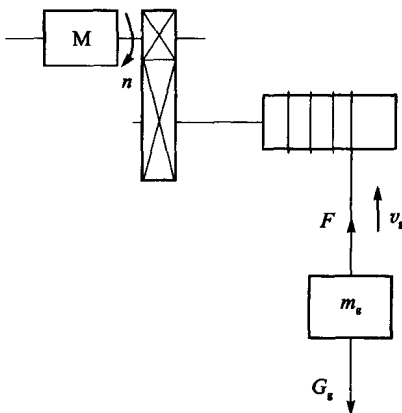


图 1.3 起重机示意图

b. 直线运动部分的飞轮矩 GD_b^2

齿轮 8 的转速

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

工作台及工件的直线运动速度

$$v_g = \text{齿轮 8 圆周的线速度} = Z_8 t_8 n_8 = \frac{66 \times 25.13 \times 10^{-3} \times 12.5}{60} \text{ m/s} = 0.347 \text{ m/s}$$

$$\text{所以 } GD_b^2 = 365 \frac{(G_1 + G_2) v_g^2}{n^2} = 365 \times \frac{(12\ 050 + 17\ 650) \times 0.347^2}{420^2} \text{ N} \cdot \text{m}^2 = 7.35 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

c. 折算到电动机轴上的总的飞轮矩 GD^2

$$GD^2 = GD_a^2 + GD_s^2 + GD_b^2 = (110.5 + 9.81 + 7.35) \text{ N} \cdot \text{m}^2 = 127.66 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

(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

$$F = \text{切削力} + \text{摩擦力} = \text{切削力} + (G_1 + G_2) \times \text{摩擦系数} =$$

$$10\ 000 \text{ N} + (12\ 050 + 17\ 650) \text{ N} \times 0.1 = 12\ 970 \text{ N}$$

$$\text{所以 } T_L = 9.55 \frac{F v_g}{n \eta_c} = 9.55 \times \frac{12\ 970 \times 0.347}{420 \times 0.7} \text{ N} \cdot \text{m} = 146.2 \text{ N} \cdot \text{m}$$

例 1.2 某提升机传动系统如图 1.5 所

示,罐笼 $G_0 = 2\ 943 \text{ N}$,重块 $G = 9\ 810 \text{ N}$,平衡块 $G_p = 5\ 886 \text{ N}$,罐笼提升速度 $v_g = 1.5 \text{ m/s}$,电动机转速 $n = 980 \text{ r/min}$,提升传递效率 $\eta_c^{\uparrow} = 0.85$,机构及鼓轮的转动惯量忽略不计。试求:

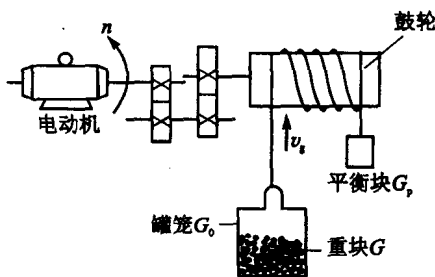


图 1.5 提升机传动系统

(1) 折算到电动机轴上的直线运动的部分的飞轮矩 GD_L^2 ;

(2) 罐笼提升和下放时折算到电动机轴上的负载转矩 T_L 。

解:

(1) 直线运动部分的重量为

$$G_g = G_0 + G + G_p = (2\ 943 + 9\ 810 + 5\ 886) \text{ N} = 18\ 639 \text{ N}$$

$$\text{所以 } GD_L^2 = 365 \times \frac{G_g v_g^2}{n^2} = 365 \times \frac{18\ 639 \times 1.5^2}{980^2} \text{ N} \cdot \text{m}^2 = 15.94 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

(2) 罐笼提升时, G_0 、 G 、 G_p 可用一个直线作用力 F 来等效。所谓等效,即对鼓轮轴产生的转矩而言, F 与 G_0 、 G 、 G_p 是等效的。所以,直线作用力为

$$F = G_0 + G - G_p = (2\,943 + 9\,810 - 5\,886)\text{N} = 6\,867\text{ N}$$

所以
$$T_L = 9.55 \frac{Fv_g}{\eta_c^\uparrow n} = 9.55 \times \frac{6\,867 \times 1.5}{0.85 \times 980} \text{N} \cdot \text{m} = 118.09 \text{ N} \cdot \text{m}$$

罐笼下放时,有

$$\eta_c^\downarrow = 2 - \frac{1}{\eta_c^\uparrow} = 2 - \frac{1}{0.85} = 0.82$$

所以
$$T_L = 9.55 \frac{Fv_g}{n} \eta_c^\downarrow = 9.55 \times \frac{6\,867 \times 1.5}{980} \times 0.82 \text{ N} \cdot \text{m} = 82.3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

1.3 电力传动系统的负载特性

负载特性是生产机械的负载转矩与转速的关系,一般可分成下列三类。

一、恒转矩负载特性

它的特点是负载转矩 T_L 恒定不变,与转速无关,即 $T_L = \text{常数}$ 。恒转矩负载又有两种:

1. 反抗性恒转矩负载(又称为摩擦转矩负载)

它的特点是负载转矩的方向总是与运动方向相反,即总是反抗运动的;当运动方向改变时,负载转矩的方向也随之改变。摩擦类型的转矩就具有这样的性质,例如,机床刀架的平移运动,电车在平道上的行驶,金属的压延等。

根据 1.1 节中对 T_L 正、负号的规定,对于反抗性恒转矩负载,当 n 为正向时, T_L 与 n 的正向相反, T_L 应为正;当 n 为负向时, T_L 也改变方向,与 n 的正方向相同, T_L 应为负。因此,反抗性恒转矩负载特性应画在第一、第三象限内,如图 1.6 所示。

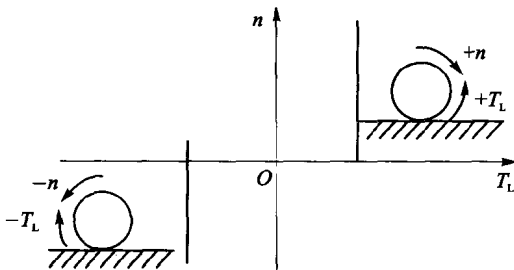


图 1.6 反抗性恒转矩负载特性