

船舶电力拖动系统

主编 谭 跃

主审 邱赤东



大连海事大学出版社

船舶电力拖动系统

主编 谭 跃

主审 邱赤东

大连海事大学出版社

© 谭 跃 2013

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力拖动系统 / 谭跃主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2013. 12
ISBN 978-7-5632-2944-4

I. ①船… II. ①谭… III. ①船舶—电力拖动—高等学校—教材 IV. ①U665.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 291406 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连华伟印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2013年12月第1版 2013年12月第1次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:11

字数:253千 印数:1~500册

出版人:徐华东

责任编辑:苏炳魁 版式设计:诚 峰

封面设计:王 艳 责任校对:孙雅荻

ISBN 978-7-5632-2944-4 定价:22.00元

内容简介

全书共六章,第一章为船舶电力拖动系统概述;第二章为船舶电机继电器接触器控制系统;第三章为船舶电机变频器控制系统;第四章为船舶电力推进系统;第五章为船舶舵机控制系统;第六章为船舶液压传动系统。

第一章内容包括:船舶电力拖动系统的组成;电力拖动运行状态分析;电力拖动系统负载转矩及转动惯量的折算;电力拖动系统的转动惯量对电动机在过渡状态中能量损耗的影响;电动机的容量选择;船舶交流电动机的起动、制动、调速及机械特性要求;船舶交流电动机的控制方法。

第二章内容包括:船舶电机常用控制电器及其电磁特性;继电器接触器控制的电力拖动系统常规保护;继电器接触器基本控制电路;船舶电气制图与识图的一般规则;船舶交流变极三速电动起货机控制线路原理分析;继电器接触器控制线路设计基础。

第三章内容包括:变频器的选择与维护;变频器的连接;变频器常用参数及设定;变频器电动机系统的运行方式;PLC - 变频器 - 电动机系统。

第四章内容包括:船舶电力推进系统的组成;电力推进对船舶电站的要求;电力推进系统的电源及变流装置;电力推进的推进装置和传动型式;船舶电力推进的控制系统;船舶综合全电力推进系统。

第五章内容包括:船舶舵机组成;自动舵基本原理及要求;自适应自动操舵仪;Kongsberg 的自动导航航迹舵原理简介。

第六章内容包括:液压传动概述;液压传动系统中的液压泵;液压传动系统中的液压马达;液压传动系统中的电控阀件;麦基加 GLH 型船舶液压起重机。

为便于学生掌握每章所学内容,每章后配备练习题。

本书是船舶电子电气工程和电气工程及其自动化本科专业教学用书,亦可作为船舶电气管理人员的参考用书。

前 言

本书作为“船舶电力拖动系统”课程的教学用书,是依据船舶电子电气工程专业培养计划和课程教学大纲编写而成的,主要面向船舶电子电气工程和电气工程及其自动化专业本科学生。

船舶电力拖动系统是指以电动机为动力的所有船舶机械设备的驱动装置和控制装置。随着船舶自动化程度越来越高,船舶电力拖动系统的自动化水平也越来越高。现代控制理论、电力电子技术、PLC 及其网络控制技术等先进技术越来越多地应用于船舶电力拖动系统中,与传统的船舶电力拖动系统相比呈现出更高的数字化、智能化、网络化等特点。因此,在本书编写过程中编者力图突出高新技术在船舶电力拖动系统的应用,使学生尽可能较全面地了解当前船舶电力拖动系统的自动化水平和发展趋势。

本书涵盖知识面较广,涉及电机学、电子技术、电力电子技术、交流调速技术、PLC 及其网络控制技术等诸多方面的知识。因此,学生必须掌握了上述相关课程的知识,才能完成本课程的学习。在实际教学中,任课教师可根据前续相关课程的设置及教学学时数要求,对有关内容进行取舍。

考虑到目前船舶普遍采用交流电制,因此交流电动机的控制是本书介绍的主要内容,而直流电动机起动、制动及调速等控制方面的内容本书没有涉及。

为了满足国家海事局电子电气员适任证书考试大纲的要求,本书除了重点介绍与考试大纲有关的知识外,还增加了船舶液压传动系统内容,使学生能初步掌握液压传动的基本知识。当然增加液压传动内容也是考虑了当前液压传动系统的控制与电子信息技术越来越紧密的原因。

本书与以前船电专业的《船舶电力拖动自动控制系统》一书相比,在内容上做了较大调整:增加了船舶电机变频器控制系统、船舶电力推进系统和船舶液压传动系统的内容;将船舶锅炉等船舶辅机的控制内容放到“船舶辅助控制装置”课程中讲授。

本书计划教学学时数为 54 学时。配合本书教学,课内配套继电器接触器、船舶电力推进、船舶自动舵三个实验。

本书第一章至第五章由谭跃编写,第六章由陈海泉编写。刘东、杨杰、李文华参编了第六章部分内容,管成城、汪旭明参编了本书第二章和第五章部分内容。全书由谭跃统稿。本书由大连海事大学邱赤东教授主审。

本书在编写过程中参考了西门子公司、ABB 公司的变频器和电力推进相关资料,并引用了部分插图。部分内容参考了一些教材、期刊文献。在此向相关作者表示感谢。

因作者水平有限,书中难免有错漏之处,恳请读者指正。

编 者

目 录

第一章 船舶电力拖动系统概述	1
第一节 船舶电力拖动系统的组成	1
第二节 电力拖动运行状态分析	1
第三节 电力拖动系统负载转矩及转动惯量的折算	8
第四节 电力拖动系统的转动惯量对电动机在过渡状态中能量损耗的影响	13
第五节 电动机的容量选择	15
第六节 船舶交流电动机的起动、制动、调速及机械特性要求	28
第七节 船舶交流电动机的控制方法	34
练习题	35
第二章 船舶电机继电器接触器控制系统	36
第一节 船舶电机常用控制电器及其电磁特性	36
第二节 继电器接触器控制的电力拖动系统常规保护	40
第三节 继电器接触器基本控制电路	42
第四节 船舶电气制图与识图的一般规则	46
第五节 船舶交流变极三速电动起货机控制线路原理分析	48
第六节 继电器接触器控制线路设计基础	54
练习题	56
第三章 船舶电机变频器控制系统	57
第一节 变频器的选择与维护	57
第二节 变频器的连接	59
第三节 变频器常用参数及设定	64
第四节 变频器电动机系统的运行方式	66
第五节 PLC - 变频器 - 电动机系统	70

练习题	76
第四章 船舶电力推进系统	77
第一节 船舶电力推进系统的组成	77
第二节 电力推进对船舶电站的要求	79
第三节 电力推进系统的电源及变流装置	81
第四节 电力推进的推进装置和传动型式	85
第五节 船舶电力推进的控制系统	92
第六节 船舶综合全电力推进系统	94
练习题	95
第五章 船舶舵机控制系统	96
第一节 船舶舵机组成	96
第二节 自动舵基本原理及要求	102
第三节 自适应自动操舵仪	113
第四节 Kongsberg 的自动导航航迹舵原理简介	118
练习题	121
第六章 船舶液压传动系统	122
第一节 液压传动概述	122
第二节 液压传动系统中的液压泵	125
第三节 液压传动系统中的液压马达	128
第四节 液压传动系统中的电控阀件	133
第五节 麦基加 GLH 型船舶液压起重机	148
练习题	164
参考文献	165

第一章 船舶电力拖动系统概述

第一节 船舶电力拖动系统的组成

船舶电力拖动系统是指包括控制装置在内的由电动机驱动的所有船舶动力机械的总称。按其功能及在船舶上的分布可分为机舱辅机、甲板机械和船舶电力推进三大部分。

一、机舱辅机

- (1) 为船舶辅助锅炉服务的辅助设备:燃油泵、风机、水泵。
- (2) 为船舶主机服务的辅助设备:海水泵、淡水泵、分油机、空压机、燃油泵、滑油泵等。
- (3) 船舶冷藏、空调动力装置及控制。

二、甲板机械

- (1) 电动机驱动或液压驱动的船舶起货机。
- (2) 电动机驱动或液压驱动的锚机及绞缆机。
- (3) 舱内电梯及舷梯。
- (4) 船舶舵机设备:液压泵、舵机控制装置。

三、船舶电力推进

- (1) 主电力推进。
- (2) 船舶侧推。

第二节 电力拖动运行状态分析

一、生产机械的机械特性

生产机械的机械特性是研究电力拖动的重要依据。电动机拖动生产机械运动时,电动机产生的电磁力矩 T_e 必须克服生产机械加于其轴上的负载转矩 T_L (也称为生产机械的静态阻转矩)。

根据运动形式,生产机械的机械特性可分为以下几种主要类型,几种典型的生产机械的机械特性如图 1-1 所示。

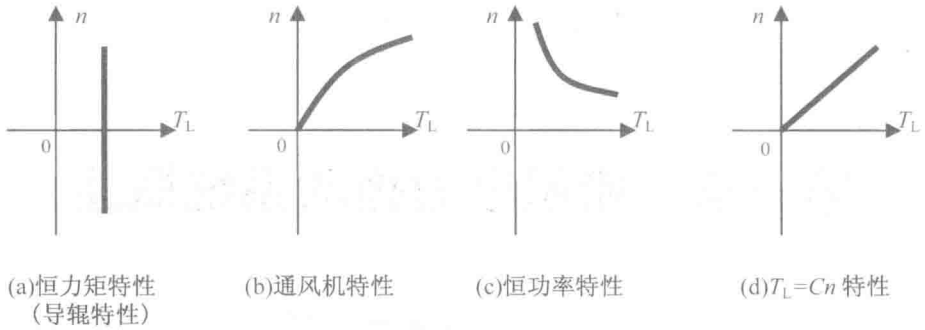


图 1-1 几种典型的生产机械的机械特性

(1) 生产机械的静阻转矩 T_L 与转速 n 无关, 即 $T_L = \text{常数}$ 。

船舶起货机的提升机构, 这种生产机械的机械特性称之为恒力矩特性。运输一定重量的皮带运输机, 称之为导辊特性 ($T_L = FD = \text{常数}$, 张力 F 和导辊直径 D 始终不变)。机械特性如图 1-1 (a) 所示。

(2) 生产机械的静阻转矩 T_L 是转速 n 二次方的函数, 即 $T_L = Cn^2$ 。

通风机、离心泵等离心式机械便具有这种抛物线式的特性, 通常又称作通风机特性。机械特性如图 1-1 (b) 所示。

(3) 生产机械的静阻转矩 T_L 与转速 n 的乘积等于常数。

即 $T_L n = \text{常数}$ 。例如造纸、电缆等生产机械中将产品卷绕在辊筒上, 张力 F 和线速度 v 的乘积基本保持不变, 即 $Fv = P(\text{功率}) = \text{常数}$, 形成 $T_L n = \text{常数}$ 的双曲线特性, 称之为卷绕特性, 这类卷绕特性属恒功率特性。机械特性如图 1-1 (c) 所示。

(4) 生产机械的静阻转矩 T_L 是转速 n 一次方的函数。

即 $T_L = Cn$, 其机械特性如图 1-1 (d) 所示。例如船用直流变流机组, 由电动机拖动直流发电机发电。当发电机励磁恒定且外接负载不变时, 电动机轴上的负载转矩 T_L 等于发电机的电磁转矩 T_e , 即负载转矩 T_L 与转速 n 成正比变化。

还有一些生产机械具有其本身特点。例如在船上广泛使用的往复泵和回转泵都属于容积泵类, 其机械特性的形状大致与管路特性的形状相似。泵的管路系统有其特定的管路特性, 因为泵所产生的压头 H 必须克服一定的静压头 H_j 、管路中的各种流动损耗 (动压头) H_{ld} 。静压头 H_j 包括封闭容器的反压 H_{fa} 、输送液体的几何高度 H_{jg} 和管道中的摩擦阻力 H_{gm} 以及管子弯头阀门等附件的阻力 H_{fu} , 即

$$H_j = H_{fa} + H_{jg} + H_{gm} + H_{fu} \quad (1-1)$$

在既定的管路中, 管路的流动损耗可表示为

$$H_{ld} = KQ^2 \quad (1-2)$$

式中, K ——常数;

Q ——排量。

K 与管路的长度和直径、弯头和附件的多少、管子内表面的粗糙度和排出阀的开度有关。排出阀的开度越大, K 值越小。

液体流过此管路必须具有的总压头为

$$H = H_j + H_{ld} = H_j + KQ^2 \quad (1-3)$$

上式表明了管路总压头与排量之间的理论关系,即管路的特性方程。从管路的特性方程可做出管路特性曲线,如图 1-2 (a)所示,其中曲线 1 是静压头占优势(如锅炉给水泵的管路系统),曲线 2 是动压头占优势(如主机海水泵)。于是在静压头占优势的管路中,容积泵的机械特性如图 1-2 (b)中的曲线 1 所示。在动压头占优势的管路中,容积泵的机械特性如图 1-2 (b)中的曲线 2 所示。

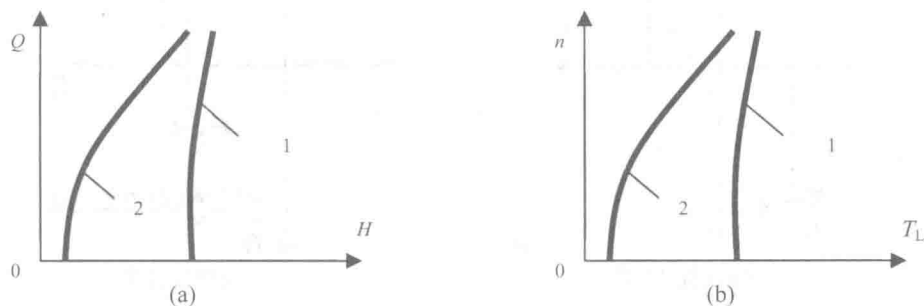


图 1-2 管路特性曲线及容积泵的机械特性

二、电动机的工作状态

电机具有可逆性,它既可以作为电动机工作,也可以作为发电机工作。当电机作为电动机运行时,其电磁转矩方向与旋转方向相同,电磁转矩为传动转矩。当电机作为发电机运行时,其电磁转矩方向与旋转方向相反,电磁转矩为制动转矩。电动机用其电磁转矩驱动负载运行时,这种工作状况为电动状态;与此相反电动机用其电磁转矩阻止轴上的负载而运行,这种状态称为制动状态。

利用 $T_e - n$ 直角坐标表示如图 1-3 所示,假设逆时针方向为正方向,顺时针方向为负方向。在第 I 象限,电动机的电磁转矩 T_e 与转速 n 均为正。在第 III 象限,电磁转矩 T_e 与转速 n 均为负。在这两象限内, T_e 与 n 的方向相同,电动机处于电动状态。在第 II 象限,电磁转矩 T_e 为负, n 为正。在第 IV 象限, T_e 为正, n 为负。所以在第 II 象限和第 IV 象限中, T_e 与 n 的方向相反,电动机处于制动状态。

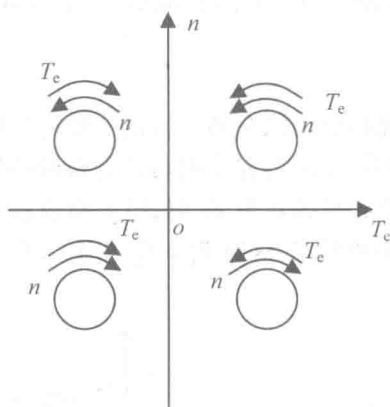


图 1-3 电动机电磁转矩与旋转方向的关系

三、负载力矩方向与电动机转向的关系及其负载性质

负载力矩 T_L 与旋转方向 n 也可以表示在上述的直角坐标系中。按假定的方向,负载转矩 T_L 以顺时针方向为正方向,以逆时针方向为负方向。换言之,生产机械加于电动机轴上的负载转矩 T_L 的正方向,是与电动机的电磁转矩 T_e 的假定正方向相反,而与电动机的电磁转矩 T_e 的假定负方向相同。

如图 1-4 (a)所示,为恒定的反抗性负载,旋转方向改变时,反抗性负载转矩 T_L 方向也

随着改变,且始终与旋转方向 n 相反。如图 1-4 (b) 所示,为恒定的位能性负载,如船舶起货机的机械特性,当旋转方向改变时,位能性负载转矩 T_L 方向不变。图中虚线表示考虑了静态阻力矩时的位能性负载特性。

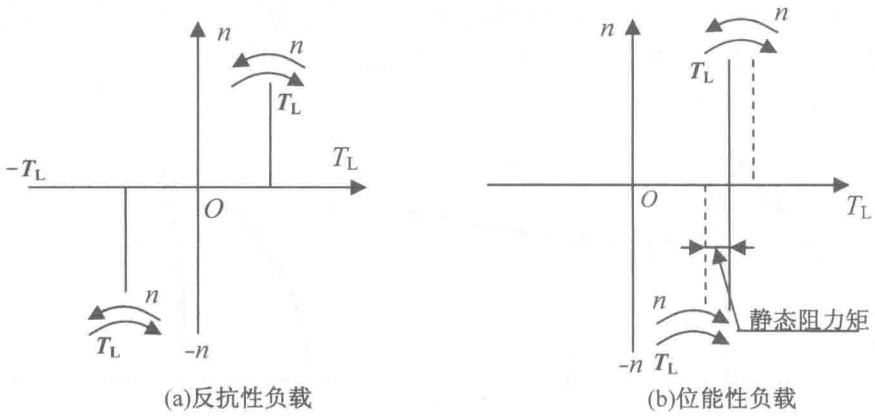


图 1-4 负载转矩与旋转方向的关系

四、电力拖动运动方程式

电力拖动系统必须满足生产上提出的要求,根据生产机械的需要,电动机的电磁转矩 T_e 必须与生产机械加于电动机轴上的负载转矩 T_L 相适应。在电动机稳定运行时,电动机的电磁转矩 T_e 等于电动机轴上的负载转矩 T_L ,即

$$T_e = T_L \tag{1-4}$$

$$T_e - T_L = 0$$

此时电动机在某一转速上稳定旋转。例如异步电动机拖动离心泵运行,其机械特性如图 1-5 所示,1 为异步电动机的机械特性,2 为离心泵的机械特性。当异步电动机的转矩 T_e 等于离心泵的转矩 T_L 时,电力拖动系统稳定运行于 A 点。如果 T_e 或 T_L 发生变化而破坏了原有平衡状态,这时 $T_e > T_L$ 或 $T_e < T_L$,便出现了动态转矩 T_d

$$T_e - T_L = T_d \tag{1-5}$$

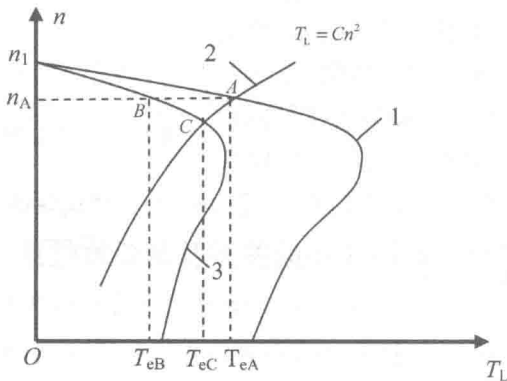


图 1-5 异步电动机拖动离心泵的运行状况

于是电动机在动态转矩 T_d 作用下而使转速升高或降低,直至 T_e 与 T_L 达到新的平衡状态,动态转矩等于零。如图 1-5 所示,拖动系统原来稳定运行于 A 点,电动机的转速为 n_A ,此时电动机的电磁转矩等于电动机轴上的负载转矩,即 $T_{eA} = T_{LA}$ 。由于电源电压的降低,电动机的机械特性 1 突然变化到特性曲线 3。在电压变化瞬间,电力拖动系统因惯性仍保持原来的转速 n_A ,而电动机的电磁转矩由 T_{eA} 突变至 T_{eB} ,负载转矩 T_{LA} 仍保持不变,由于电磁转矩减小,拖动系统出现动态转矩,即

$$T_d = T_{eB} - T_L \quad (1-6)$$

因为 $T_{eB} < T_{LA}$,动态转矩 T_d 为负,拖动系统减速。由电动机的特性曲线 3 可知,电动机的电磁转矩随转速的减少而逐渐增加,在 C 点,电动机的电磁转矩由 T_{eC} 与负载转矩 T_{LC} 又相等,动态转矩 $T_d = 0$,拖动系统稳定运行于 C 点。式(1-6)就是电力拖动运动方程式基本形式。

动态转矩 T_d 与拖动系统运动体的惯性在单位时间内所吸收或放出的功率 P_d 之间的关系如下式

$$T_d = \frac{P_d}{\omega}$$

而
$$P_d = \frac{dA}{dt}$$

全部转动体所具有的动能 A 由刚体动力学得

$$A = \frac{1}{2}J\omega^2$$

式中, J ——电力拖动系统的转动惯量;

ω ——电力拖动系统的角速度。

$$\text{因此, } T_d = \frac{1}{\omega} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2}J\omega^2 \right) \right] = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \frac{d\alpha}{dt}$$

$$\text{因为 } \omega = \frac{d\alpha}{dt}$$

所以

$$T_d = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-5)得电力拖动运动方程式

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \quad (1-8)$$

一般刚体为园柱体, $dJ/d\alpha = 0$,则电力拖动运动方程式可写为

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-9)$$

在电力拖动的理论研究和实际计算中,有时不用转动惯量 J 而用飞轮矩 GD^2 (因电机产品目录中载有 GD^2 的数据),若再以转速 n 代替 ω ,则

$$J = mr^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-10)$$

式中, m ——转动体的质量, kg;

r ——回转半径, m;

D ——回转直径, m;

G ——转动体的重量, N。

如 n 以 r/min 计, T_e 和 T_L 以 $N \cdot m$ 计, J 以 $kg \cdot m^2$ 计, ω 以 s^{-1} 计, t 以 s 计, 将式(1-10)代入式(1-9)得

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{4g} \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt}$$

即

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-11)$$

同理, 式(1-8)可表示为

$$T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{7200} \frac{d(GD^2)}{d\alpha} \quad (1-12)$$

应用电力拖动运动方程式(1-11)和式(1-12), 通常以电动机轴为研究对象。由于电动机类型及运转状态不同, 以及生产机械负载类型不同, 电动机轴上的电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 不仅大小不同, 而且方向也是变化的。因此, 运动方程式可以写成下列一般形式

$$\pm T_e - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-13)$$

$$\pm T_e - (\pm T_L) = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{7200} \frac{d(GD^2)}{d\alpha} \quad (1-14)$$

对于 T_e 及 T_L 前面的正负号的选取, 可按图 1-3 电动机电磁转矩与旋转方向的关系及图 1-4 负载转矩与旋转方向的关系规定选取, 即电动机的电磁力矩 T_e 的方向与所规定的正方向相同时, T_e 前取正号; 反之取负号。电动机轴上的负载力矩 T_L 的方向与其所规定的正方向相同时, T_L 前取正号; 反之取负号。通常可根据电动机的机械特性曲线和生产机械的负载特性曲线来决定正负号。当特性曲线位于第 I 和第 IV 象限, 两者前均取正号。当特性曲线位于第 II 和第 III 象限, 两者前均取负号。

动态力矩 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 或 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + \frac{n^2}{7200} \frac{d(GD^2)}{d\alpha}$ 的大小和正负号由 $\pm T_e - (\pm T_L)$ 的代数和来决定。

电力拖动运动方程式(1-13)和式(1-14)是研究和计算电力拖动运行的通用方程式, 它可以把电力拖动系统的稳定运行状态和过渡状态都表示出来。当拖动系统稳定运行时, $dn/dt = 0$, 此时 $T_e = T_L$, 动态力矩 $T_d = 0$ 。当电力拖动系统工作在过渡状态时, 转速是变化的, 此时有两种情况:

(1) $\pm T_e - (\pm T_L) > 0$, 即 $dn/dt > 0$, 拖动系统在加速状态。

(2) $\pm T_e - (\pm T_L) < 0$, 即 $dn/dt < 0$, 拖动系统在减速状态。

五、电力拖动系统电动机与负载的配合及稳定性分析

电力拖动系统运行的稳定状态是 $dn/dt=0$, 运动方程式中为 $T_e = T_L$ 。而拖动系统运行的稳定性是指拖动系统在某一稳定状态运行时, 由于生产机械负载的变化或其他原因(如电源电压变化等)破坏了原有的稳定运行状态, 然后能在短时间内恢复到原来的稳定状态, 属于静态稳定性问题, 它是电力拖动自动化系统稳定与否的必要条件。即首先要把电动机的机械特性与生产机械的机械特性选配好, 如若选配不好, 系统肯定不能稳定运行。

分析稳定性的简易方法是在平衡点附近作出两条平行线, 如图 1-6 中虚线所示。在图 1-6(a) 中的 P 点为稳定的平衡点, 因为在 P 点以上的各点对应转速 n' 时, 电动机的电磁转矩 T_e 小于负载转矩 T_L , 电动机将减速回至 P 点。在 P 点以下各点如对应转速 n'' 时, 电动机转矩 T_e 大于负载转矩 T_L , 电动机加速至 P 点, 因此 P 点为稳定运行平衡点。

在图 1-6(b) 中, 对应于负载转矩 T_L , P 点为不稳定运行点。因为在 P 点以上各点, 电动机的转矩 T_e 大于负载转矩 T_L , 电动机将加速远离 P 点。在 P 点以下各点, 电动机转矩 T_e 小于负载转矩 T_L , 电动机将减速至停止。因之对此 $T_L = f(n)$ 而言, P 点是不稳定运行点; 稍有扰动, 平衡就遭到破坏, 而在扰动去掉以后, 系统不再恢复至原来状态。

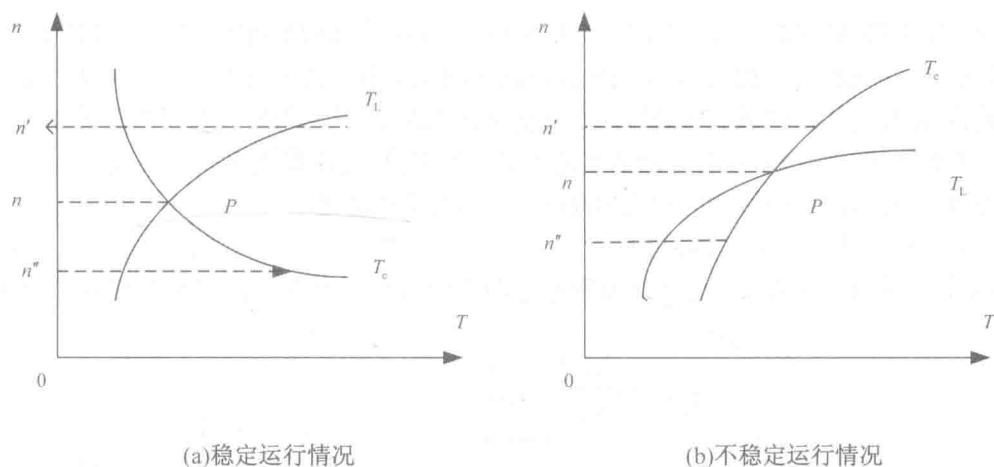


图 1-6 电动机稳定运行判别方法

此外, 对于恒转矩负载而言, 要求电动机特性为下降型, 才能稳定运行, 如图 1-7(a) 所示。如果电动机的机械特性呈上升趋势, 如直流差复励电动机, 则如图 1-7(b) 所示, 异步电动机转差率很大时, 如图 1-7(c) 中曲线段, 运行则属于不稳定。

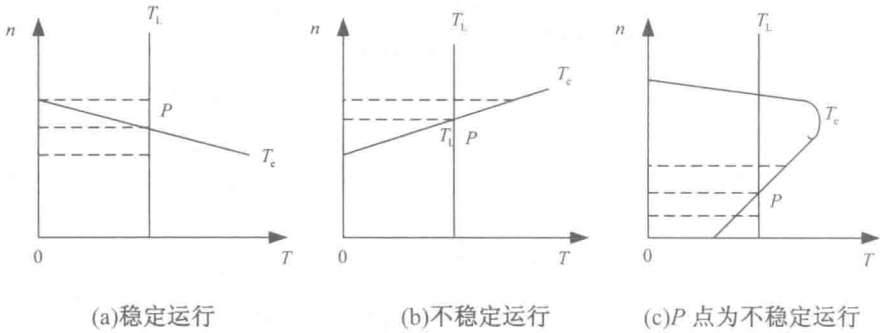


图 1-7 电力拖动系统的稳定运行与不稳定运行

第三节 电力拖动系统负载转矩及转动惯量的折算

一、电力拖动系统负载转矩的折算

应用电力拖动运动方程式(1-13)和式(1-14)研究电力拖动系统的运行,电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 必须在同一轴上,通常以电动机轴为研究对象。若电动机与生产机械之间有传动装置,则需要把生产机械的负载转矩折算到电动机轴上,然后再研究电力拖动系统的各种运行状态的规律。负载转矩折算的依据是能量守恒定律,进而推之可表示为折算前后系统的传递功率不变,而中间传动机构的损耗放在传动效率中考虑。

1. 工作机构负载转矩 T_{LW} 的折算

如图 1-8 所示,电动机通过变速齿轮把电动机的转速 n 变为符合工作机构需要的转速

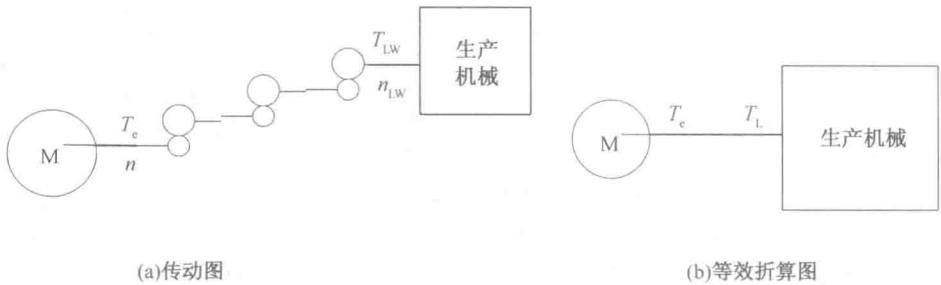


图 1-8 工作机构负载转矩 T_{LW} 的折算

n_{LW} 。设各齿轮间的传动比为 $i_1, i_2 \dots i_n$, 相应的传动效率为 $\eta_1, \eta_2 \dots \eta_n$, 工作机构的转速为 n_{LW} , 工作机构负载转矩为 T_{LW} , 电动机的转速为 n , 当电动机工作在电动状态时, 根据功率平衡条件得

$$T_{LW} \cdot n_{LW} \cdot \frac{1}{\eta_z} = T_L \cdot n \tag{1-15}$$

式中, 传动装置总效率 $\eta_z = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \dots \cdot \eta_n$ 。

所以折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_L = \frac{T_{LW}}{(n/n_{LW})\eta_z} = \frac{T_{LW}}{i_z\eta_z} \quad (1-16)$$

式中,传动装置总传动比 $i_z = \frac{n}{n_{LW}} = i_1 \cdot i_2 \cdots i_n$ 。

当电动机工作在发电制动状态时,按传递功率不变原则,有

$$T_{LW}n_{LW}\eta_z = T_L n$$

即

$$T_L = \frac{T_{LW}}{i_z}\eta_z \quad (1-17)$$

每级传动机构的效率可从机械工程手册上查到。例如,每对齿轮(带滚动轴承)的满载效率为 0.975~0.985,蜗轮蜗杆传动的满载效率为 0.5~0.7。

2. 直线运动体的作用力折算到电动机轴上

如图 1-9 所示,设直线运动体的速度为 v ,其作用力为 F_L , T_L 为力 F_L 折算到电动机轴上的负载力矩, ω 和 n 为电动机的角速度和转速,则根据功率平衡条件得

$$F_L v \frac{1}{\eta_z} = T_L \omega \quad (1-18)$$

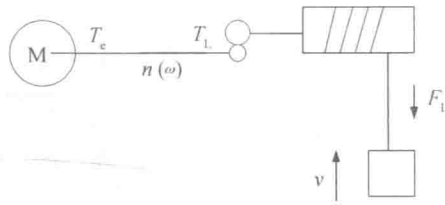


图 1-9 直线运动体的折算

若 F_L 以 N 计, v 以 m/s 计, ω 以 s^{-1} 计, T_L 以 $N \cdot m$ 计, n 以 r/min,则

$$T_L = \frac{F_L v}{\omega \eta_z} = \frac{F_L v}{\frac{2\pi n}{60} \eta_z} = 9.55 \frac{F_L v}{n \eta_z} \quad (N \cdot m) \quad (1-19)$$

式中,传动装置总效率 $\eta_z = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdots \eta_n$ 。

3. 起重机械负载力矩折算到电动机轴上

对于船舶起重机械,主要的传动机械类型是提升、旋转、变幅。对于提升机构,分为上升和下降两种情况。

上升时折算到电动机轴上的静阻力矩为

$$T_{Lr} = \frac{9.81QD}{2mi_z\eta_z} \quad (N \cdot m) \quad (1-20)$$

下降时折算到电动机轴上的静阻力矩为

$$T_{Ld} = \frac{9.81QD\eta_z}{2mi_z} \quad (N \cdot m) \quad (1-21)$$

式中, Q ——包括吊钩在内的货物重量,kg;

D ——钢丝绳卷筒直径,m;

- m ——钢丝绳滑轮倍率；
- i_z ——系统总传动比；
- η_z ——系统总传动效率。

对于旋转机构,折算到电动机轴上的负载力矩原则上应按下式计算:

$$T_{LS} = \frac{T_m + T_q + T_w}{i_z \eta_z} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-22)$$

- 式中, T_m ——系统摩擦静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_q ——支撑倾斜产生的静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_w ——系统风载静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

上述各分量要根据实际结构进行计算。

变幅机构的计算比较复杂,折算到电动机轴上的静阻力矩原则上应按下式计算:

$$T_{LJ} = \frac{T_G + T_Q + T_f + T_b + T_m}{i \eta} \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-23)$$

- 式中, T_G ——变幅系统自重不平衡产生的静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_Q ——由于货物运动不能保持水平产生的静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_f ——系统风阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_b ——货物偏摆产生的静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
- T_m ——系统摩擦静阻力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

当货物在水平移动的同时还进行垂直提升时,变幅机构拖动电动机轴上的最大静阻力矩可按下式计算

$$T_{Lfm} = \frac{9.55Q}{5n\eta} (v_i + 50v_r) \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-24)$$

- 式中, Q ——包括吊钩在内的货物重量, t ;
- v_i ——货物最大水平移动速度, m/s ;
- v_r ——货物移动速度的垂直分量, m/s ;
- n ——电动机转速, r/min ;
- η ——总效率。

起重机各个机构采用不同的传动机构时的额定效率如表 1-1 所示。

表 1-1 起重机各个机构采用不同的传动机构时的额定效率

传动环节名称	起升机构 η	大车与小车运行机构 η	回转机构 η
钢丝绳传动滑轮组	0.98 ~ 0.99	0.98	—
钢丝绳卷筒排绳器	0.98	—	—
两极开式齿轮减速机	0.75 ~ 0.8	0.7 ~ 0.8	0.78 ~ 0.82
三齿轮减速机或两极行星减速机	0.8 ~ 0.84	0.76 ~ 0.82	0.82 ~ 0.86
非自锁式蜗轮传动	0.7	0.65 ~ 0.7	0.65
自锁式蜗轮传动	0.35 ~ 0.47	0.42 ~ 0.5	0.37 ~ 0.48