



高等职业教育规划教材

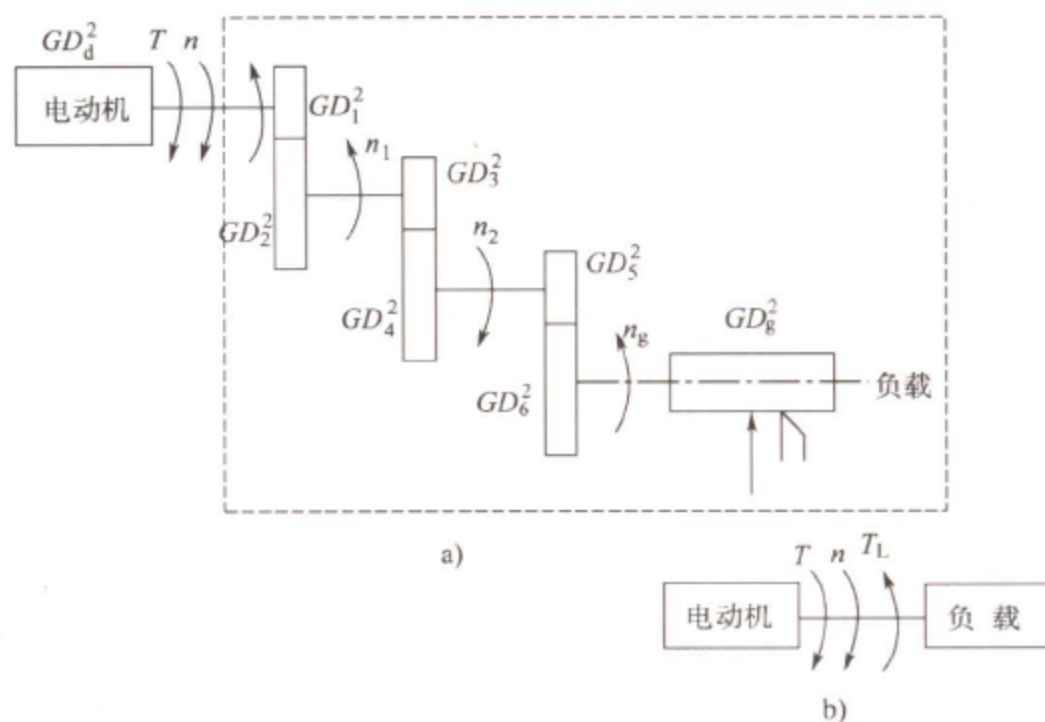
交通职业教育教学指导委员会推荐教材
高等职业院校船舶技术专业教学用书

船舶电力拖动

电气自动化技术（船舶电气方向）专业

● 刘明伟 主编 ● 周涛 主审

Chuanbo
Dianli
Tuodong



人民交通出版社
China Communications Press

交通职业教育教学指导委员会推荐教材
高等职业院校船舶技术类专业教学用书

● 船舶电力拖动

主编 刘明伟

船舶电工工艺

主编 周 涛

船舶电站

主编 丛培亭

船舶信号

主编 闫世杰

策划编辑/黄兴娜 责任编辑/赵履榕 美术编辑/孙立宁

ISBN 7-114-06010-6



9 787114 060106 >

ISBN 7-114-06010-6

定 价：40.00 元



高等职业教育规划教材

交通职业教育教学指导委员会推荐教材
高等职业院校船舶技术类专业教学用书

船舶电力拖动

电气自动化技术（船舶电气方向）专业

● 刘明伟 主编 ● 周涛 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是高等职业教育船舶技术类电气自动化技术(船舶电气方向)专业交通职业教育教学指导委员会规划教材之一,按照《船舶电力拖动》教学大纲的要求而编写的。

本书共分十五章,主要内容包括:基本知识;电动机机械特性;低压控制电器;电动机的基本控制环节及其分析和设计;电力拖动系统起动控制;电力拖动系统电气制动控制;电动机的转速调节;锚机的电力拖动与控制;起货机的电力拖动与控制;舵机的电力拖动与控制;空压机的电力拖动与控制;机舱辅机自动调节系统;船舶辅助锅炉;焚烧炉控制系统;可编程控制器等方面的知识。

本书是针对三年制高等职业教育编写的,二年制的也可参考使用。同时,本书还适用于船员的考证培训和船厂职工的自学以及其他形式的职业教育。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电力拖动/刘明伟主编. —北京:人民交通出版社, 2006.7

ISBN 7-114-06010-6

I .船… II .刘… III .船舶—电力拖动
IV .U665.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第048876号

书 名: 船舶电力拖动

著 者: 刘明伟

责任编辑: 赵履榕

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285656, 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京宝莲鸿图科技有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 23

字 数: 580千

插 页: 1

版 次: 2006年7月 第1版

印 次: 2006年7月 第1次印刷

书 号: ISBN 7-114-06010-6

印 数: 0001—2000册

定 价: 40.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



为深入贯彻《国务院关于大力发展职业教育的决定》，积极推进课程改革和教材建设，为职业教育教学和培训提供更加丰富、多样和实用的教材，更好地满足我国造船工业快速发展的需要，交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会委托交通职业教育研究会船舶技术专业委员会，联合组织全国开办有船舶技术类专业的职业院校及其骨干教师，编写了高等职业教育船舶工程技术专业、轮机工程技术（船舶动力机械与装置方向）专业和电气自动化技术（船舶电气方向）专业交通职业教育教学指导委员会规划教材。

本系列教材注重以就业为导向，以能力为本位，面向市场，面向社会，体现了职业教育的特色，满足了高素质的实用型、技能型船舶技术专业高等职业人才培养的需要。本系列教材在组织编写过程中，形成了如下特色：

1. 认真总结了全国开办有船舶技术类专业的职业院校多年来的专业教学经验，并吸收了部分企业专家的意见，代表性强，适用性广；
2. 以职业岗位的需求为出发点，适当精简了教学内容，减少了理论描述，具有较强的针对性；
3. 教材编写时在每章前列出了知识目标和能力目标等学习目标要求，每章结尾处编制了大量思考与练习题，便于组织教学和学生学习。

本系列教材是针对三年制高等职业教育编写的，二年制的也可参考使用。同时，本系列教材还适用于船员的考证培训和船厂职工的自学以及其他形式的职业教育。

《船舶电力拖动》是高等职业教育船舶技术类电气自动化技术（船舶电气方向）专业交通职业教育教学指导委员会规划教材之一，按照《船舶电力拖动》教学大纲的要求，曾多次深入造船企业、公司、科研院所调查研究，收集毕业生反馈的信息，本着高等职业教育是培养一大批具有必要理论知识和较强实践能力以及生产、建设、管理、服务第一线急需的专门人才这一原则而确定编写内容。因此，书中的基本理论以必须、够用为度，尽量减少理论论证，以掌握概念、突出实用、实际、实践、培养技能为教学重点，加强了船舶电力拖动系统中实际应用知识，使教材更符合现代化区域造船模式和生产工艺。

参加本教材编写工作的有：主编渤海船舶职业学院刘明伟（编写第一至五章及附录），参编哈尔滨电机厂责任有限公司何亮（编写第六至八章）、渤海船舶职业学院吴鹰（编写第九至十一章）、渤海船舶职业学院刘志旺（编写第十二章）、江苏海事职业技术学院王刚华（编写第十三章）、渤海船舶职业学院王立军（编写第十四至十五章）。

本教材由江苏海事职业技术学院周涛担任主审。在此表示衷心感谢。

限于编者经历和水平，教材内容难以覆盖全国各地的实际情况，希望各教学单位在积极选用和推广本系列教材的同时，注重总结经验，及时提出修改意见和建议，以便再版修订时改正。

交通职业教育教学指导委员会航海类专业指导委员会
二〇〇六年三月



| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 501 | ..... | ..... | ..... |
| 401 | ..... | ..... | ..... |
| 301 | ..... | ..... | ..... |
| 201 | ..... | ..... | ..... |
| 101 | ..... | ..... | ..... |
| 111 | ..... | ..... | ..... |
| 211 | ..... | ..... | ..... |
| 311 | ..... | ..... | ..... |
| 411 | ..... | ..... | ..... |
| 511 | ..... | ..... | ..... |
| 611 | ..... | ..... | ..... |
| 711 | ..... | ..... | ..... |
| 811 | ..... | ..... | ..... |
| 911 | ..... | ..... | ..... |
| 1011 | ..... | ..... | ..... |
| 1111 | ..... | ..... | ..... |
| 1211 | ..... | ..... | ..... |
| 1311 | ..... | ..... | ..... |
| 1411 | ..... | ..... | ..... |
| 1511 | ..... | ..... | ..... |
| 1611 | ..... | ..... | ..... |
| 1711 | ..... | ..... | ..... |
| 1811 | ..... | ..... | ..... |
| 1911 | ..... | ..... | ..... |
| 2011 | ..... | ..... | ..... |
| 2111 | ..... | ..... | ..... |
| 2211 | ..... | ..... | ..... |
| 2311 | ..... | ..... | ..... |
| 2411 | ..... | ..... | ..... |
| 2511 | ..... | ..... | ..... |
| 2611 | ..... | ..... | ..... |
| 2711 | ..... | ..... | ..... |
| 2811 | ..... | ..... | ..... |
| 2911 | ..... | ..... | ..... |
| 3011 | ..... | ..... | ..... |
| 3111 | ..... | ..... | ..... |
| 3211 | ..... | ..... | ..... |
| 3311 | ..... | ..... | ..... |
| 3411 | ..... | ..... | ..... |
| 3511 | ..... | ..... | ..... |
| 3611 | ..... | ..... | ..... |
| 3711 | ..... | ..... | ..... |
| 3811 | ..... | ..... | ..... |
| 3911 | ..... | ..... | ..... |
| 4011 | ..... | ..... | ..... |
| 4111 | ..... | ..... | ..... |
| 4211 | ..... | ..... | ..... |
| 4311 | ..... | ..... | ..... |
| 4411 | ..... | ..... | ..... |
| 4511 | ..... | ..... | ..... |
| 4611 | ..... | ..... | ..... |
| 4711 | ..... | ..... | ..... |
| 4811 | ..... | ..... | ..... |
| 4911 | ..... | ..... | ..... |
| 5011 | ..... | ..... | ..... |
| 5111 | ..... | ..... | ..... |
| 5211 | ..... | ..... | ..... |
| 5311 | ..... | ..... | ..... |
| 5411 | ..... | ..... | ..... |
| 5511 | ..... | ..... | ..... |
| 5611 | ..... | ..... | ..... |
| 5711 | ..... | ..... | ..... |
| 5811 | ..... | ..... | ..... |
| 5911 | ..... | ..... | ..... |
| 6011 | ..... | ..... | ..... |
| 6111 | ..... | ..... | ..... |
| 6211 | ..... | ..... | ..... |
| 6311 | ..... | ..... | ..... |
| 6411 | ..... | ..... | ..... |
| 6511 | ..... | ..... | ..... |
| 6611 | ..... | ..... | ..... |
| 6711 | ..... | ..... | ..... |
| 6811 | ..... | ..... | ..... |
| 6911 | ..... | ..... | ..... |
| 7011 | ..... | ..... | ..... |
| 7111 | ..... | ..... | ..... |
| 7211 | ..... | ..... | ..... |
| 7311 | ..... | ..... | ..... |
| 7411 | ..... | ..... | ..... |
| 7511 | ..... | ..... | ..... |
| 7611 | ..... | ..... | ..... |
| 7711 | ..... | ..... | ..... |
| 7811 | ..... | ..... | ..... |
| 7911 | ..... | ..... | ..... |
| 8011 | ..... | ..... | ..... |
| 8111 | ..... | ..... | ..... |
| 8211 | ..... | ..... | ..... |
| 8311 | ..... | ..... | ..... |
| 8411 | ..... | ..... | ..... |
| 8511 | ..... | ..... | ..... |
| 8611 | ..... | ..... | ..... |
| 8711 | ..... | ..... | ..... |
| 8811 | ..... | ..... | ..... |
| 8911 | ..... | ..... | ..... |
| 9011 | ..... | ..... | ..... |
| 9111 | ..... | ..... | ..... |
| 9211 | ..... | ..... | ..... |
| 9311 | ..... | ..... | ..... |
| 9411 | ..... | ..... | ..... |
| 9511 | ..... | ..... | ..... |
| 9611 | ..... | ..... | ..... |
| 9711 | ..... | ..... | ..... |
| 9811 | ..... | ..... | ..... |
| 9911 | ..... | ..... | ..... |
| 10011 | ..... | ..... | ..... |

| | | |
|------------|----------------------|------------|
| 第一节 | 制动控制方式与方法 | 102 |
| 第二节 | 直流电力拖动系统再生制动控制 | 103 |
| 第三节 | 直流电力拖动系统能耗制动控制 | 104 |
| 第四节 | 直流电力拖动系统反接制动控制 | 106 |
| 第五节 | 交流电力拖动系统机械制动控制 | 109 |
| 第六节 | 交流电力拖动系统再生制动控制 | 111 |
| 第七节 | 交流电力拖动系统能耗制动控制 | 112 |
| 第八节 | 交流电力拖动系统的反接制动控制 | 112 |
| | 思考与练习 | 114 |
| 第七章 | 电动机的转速调节 | 115 |
| 第一节 | 电动机调速的性能指标 | 115 |
| 第二节 | 直流电动机电枢分路法调速 | 116 |
| 第三节 | 直流电动机电枢回路串电阻调速 | 118 |
| 第四节 | 直流电动机改变主磁通调速 | 120 |
| 第五节 | 三相异步电动机的变极调速 | 121 |
| 第六节 | 改变转差率调速 | 124 |
| 第七节 | 变频调速 | 129 |
| 第八节 | 电力拖动系统的过渡过程 | 131 |
| | 思考与练习 | 134 |
| 第八章 | 锚机的电力拖动与控制 | 135 |
| 第一节 | 锚机的运行特点以及对电力拖动和控制的要求 | 135 |
| 第二节 | 电动起锚机的控制线路 | 137 |
| 第三节 | 锚机的调试方法及常见故障 | 139 |
| | 思考与练习 | 141 |
| 第九章 | 起货机的电力拖动与控制 | 142 |
| 第一节 | 起货机类型及运行特点 | 142 |
| 第二节 | 一般发电机 G-M 系统起货机 | 147 |
| 第三节 | 双输出 G-M 系统起货机 | 153 |
| 第四节 | 变极调速交流电动起货机 | 157 |
| 第五节 | 交流绕线式电动起货机 | 164 |
| 第六节 | 电动液压起货机 | 174 |
| | 思考与练习 | 184 |
| 第十章 | 舵机的电力拖动与控制 | 186 |
| 第一节 | 概述 | 186 |
| 第二节 | 操舵方式及其基本工作原理 | 192 |
| 第三节 | 自动舵的基本类型及其调节规律 | 196 |
| 第四节 | 自动操舵系统基本工作原理 | 197 |
| 第五节 | 舵机各主要部件的作用 | 200 |
| 第六节 | PR-8000 自动操舵仪 | 213 |
| 第七节 | 自动舵 | 220 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 思考与练习····· | 235 |
| 第十一章 空压机的电力拖动与控制 ····· | 237 |
| 第一节 概述····· | 237 |
| 第二节 空压机控制线路····· | 237 |
| 第三节 调试方法与常见故障分析····· | 242 |
| 思考与练习····· | 245 |
| 第十二章 机舱辅机自动调节系统 ····· | 246 |
| 第一节 船舶制冷系统的电气控制····· | 246 |
| 第二节 室内温度自动调节系统(空调) ····· | 253 |
| 思考与练习····· | 258 |
| 第十三章 船舶辅助锅炉 ····· | 259 |
| 第一节 船舶辅助锅炉系统概述····· | 259 |
| 第二节 辅助锅炉检测与控制基本理论知识····· | 259 |
| 第三节 船舶辅助锅炉系统的组成····· | 263 |
| 第四节 锅炉系统调试方法和常见故障分析····· | 273 |
| 思考与练习····· | 277 |
| 第十四章 焚烧炉控制系统 ····· | 278 |
| 第一节 焚烧炉概述系统组成及主要功能····· | 278 |
| 第二节 焚烧炉的电气控制线路····· | 280 |
| 第三节 故障排除····· | 302 |
| 思考与练习····· | 308 |
| 第十五章 可编程控制器 ····· | 309 |
| 第一节 概述····· | 309 |
| 第二节 PC 的基本原理 ····· | 314 |
| 第三节 可编程控制器的程序设计语言····· | 319 |
| 第四节 PLC 程序编制····· | 322 |
| 第五节 PLC 系统设计····· | 337 |
| 第六节 可编程序控制器应用实例····· | 343 |
| 思考与练习····· | 358 |
| 参考文献 ····· | 359 |





第一章 基本知识

● 学习目标

知识目标

1. 电力拖动的系统的运动方程式;
2. 电力拖动系统的运行状态的判断。

能力目标

1. 了解船舶机械的基本特点及对电力拖动的要求;
2. 掌握电力拖动的系统的运动方程式;
3. 会分析电力拖动系统的运行状态。

第一节 概 述

在工业、农业、交通运输、国防等各部门中,广泛使用着各种各样的机械设备。要使生产机械产生满足不同工艺过程要求的运动,就需要有产生这种运动的原动机,如电动机、蒸汽机、内燃机、液压机等。所谓拖动,就是运用各种原动机使生产机械产生直线运动或者旋转运动,以完成一定的工作任务。

自从19世纪有了电动机以后,由于电力在传输、分配、使用和控制等方面都比其他动力要方便得多,如效率高、操作简便、易于维护保养,尤其是运行比较经济和对各种复杂操作及自动化提出的多种要求容易实现。因此以电动机作为原动机的拖动方式被广泛应用。我们把电动机拖动生产机械称为电力拖动,又称电气传动。电气传动就是电动机把电能转换成机械能,驱动生产机械的工作机构产生所需要的运动。在这里,工作机构是电动机的负载。

电力拖动广泛应用于各行各业中,与我们日常生活、工农业生产息息相关。人们常见的家用电器中就有许多电力拖动的例子,如电风扇、空调机、录音机、录放机的旋转部分,洗衣机中电动机带动水轮旋转等,这都是大家所熟悉的。在工农业生产中,用电动机驱动各种生产机械运转是最常见的、极为普遍的拖动方式,如各式吊车、各类机床、各种港口机械。从数瓦的电动刮胡刀到几万千瓦的大型锅炉风机电动机,从天上卫星姿态调整到深水潜艇电力推进,都是电力拖动的实例。在各类船舶上,常用电动机拖动各种工作机械,即各种辅机,如起货机、锚机、舵机、压缩机、通风机、绞盘机、拖缆机以及各类泵等。

不同行业、不同场合对电力拖动的要求不同。例如起货机,其任务是提升或下放货物。提升时,电动机正转,货物被提升起来;下放货物,电动机先制动停止,然后再反向起动,电动机在制动状态下下放货物。这是基本工作过程,实际上还要调速来满足更多的工艺要求等。尽管要求不同,实现的控制线路也不同,但就电力拖动系统的研究对象和内容来说,都不外乎是研究各种类型的直流电动机与交流电动机的起动、制动、反转、调速等各种工作状态及它们的控



制线路,其中包括控制线路的结构、工作原理以及线路中使用的各种控制电器等。

船舶电力拖动系统通常由电动机、传动装置(或工作机构)、控制设备、工作机械和电源5个基本部分组成。

控制设备是控制电动机起动运转的设备,它是由各种控制电器(如开关、熔断器、接触器、继电器、按钮等)、控制电机、自动化元件或计算机等按照一定要求和规律组成控制线路和设备,用于控制电动机的运行,即控制电动机的起动、制动、反转和调速。控制设备按其操作方式分为手动控制、半自动控制、全自动控制。目前普遍使用的是半自动控制,即包括新型器件组成的各种继电器-接触器控制系统。与过去不同的是,随着科技发展,越来越多的自动化元件或各种传感器及智能化装置应用到电力拖动自动控制系统中,推动了科研的发展。

一、船舶机械的基本特点及对电力拖动的要求

船舶机械的种类是很多的,除了直接用作船舶推进的船舶主机外,还有完成各种特定任务的辅助机械,因此工程上一般把它们分为两大类:船舶主机和船舶辅机。这些除了主机外的为数众多、类型各异的辅机(包括船舶发电机在内),在船舶安全航行中起着必不可少的作用。

根据服务对象的不同,船舶辅机分为:

(1)为船舶主机服务的主要有:空气压缩机、燃油输送泵、润滑油泵、海水泵、淡水泵、油水分离机、盘车机等。

(2)为船舶提供各种电源的有:柴油发电机组或汽轮发电机组、变流机组、变频机组,还有变压器组、整流装置、逆变器等。

(3)为船舶航行和安全服务的主要有:舵机装置、起锚机、绞缆机、吊艇机、舷梯、可调螺距螺旋桨装置、侧推装置、减摇装置、消防总用泵、应急消防泵、压载水泵、舱底水泵、机舱送风抽风机组、废气锅炉等。

(4)为船舶货运服务的主要有:起货机、舱口盖机、通风机、装载泵、驳油泵、洗舱泵、惰性气体监控装置等。

(5)为船员与旅客生活服务的主要有:燃油辅助锅炉、空调装置、伙食冷藏制冷装置、海水淡化装置、淡水快速净化装置、淡水泵、卫生水泵、厨房机械、升降机等。

(6)为船舶防污染服务的主要有:油水分离器、生活污水处理装置、焚烧炉、污水舱的油含量微机监控处理系统等。

由于船舶辅机服务对象的多样性、特定要求的复杂性,又由于可能以多种工作方式来完成所规定的任务,再加上科学技术进步使各种机型与控制方法不断发展,所以船舶辅机种类繁多。目前,对船舶辅机自控设备的要求,归纳起来有以下几点:

1. 可靠性和可维修性

根据船舶使用条件要求,船用电气设备要做到寿命长且故障少,具有较高的可靠性与可维修性,以保证安全航行。设计时要有防止发生误动作与防止发生误操作的连锁机构,还要考虑到维护修理容易、更换零部件方便及适量的备品备件。因而船舶电力拖动自动控制设备和系统采用冗余设计,多数装置具有备用设备和备用系统;遇到故障时,自动转换备用系统并迅速切除、隔离故障部分;重要设备多路供电、多种工作方式保证持续供电和连续运转;装置设计有必要的参数、状态、工况显示和报警系统;为了提高其维修性,能简单、快速地进行故障诊断,还



要考虑设置必要的适用的维修通道等。

2. 环境适应性

船用电气设备应在下列环境条件下正常工作：

- (1) 航行于无限航区,其封闭处所内 $0 \sim 45^{\circ}\text{C}$, 敞开甲板 $-25 \sim 45^{\circ}\text{C}$ 。除热带海区以外的有限航区,其封闭处所内 $0 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 敞开甲板 $-25 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
- (2) 纵倾纵摇 $\leq \pm 10^{\circ}$, 横倾横摇 $\leq \pm 22.5^{\circ}$ 。
- (3) 正常航行中产生的振动和冲击。
- (4) 潮湿空气、盐雾、油雾、霉菌处所。

3. 标准化、通用性

为保证设备完好率和尽量少备件,以减少体积和重量,要求设备及零部件通用性要好。应采用国家标准规定标准化产品系列,同一用途的设备具有同一规格,以保证良好的互换性,提高经济效益。

4. 电源波动适应性

船舶电网电压或频率偏离额定值时,在规定允许波动值范围内应可靠地工作：

- (1) 电压稳态变化值： $(+6\% \sim -10\%)U_N$ 。
- (2) 电压瞬态变化值： $\pm 20\%U_N$, 恢复时间 1.5s 。
- (3) 频率稳态变化值： $\pm 5\%f_N$ 。
- (4) 频率瞬态变化值： $\pm 10\%f_N$, 恢复时间 5s 。

5. 电磁兼容性

设备采用适当措施后,可限制所产生干扰电压和电流不超过允许值,并保证电气拖动系统中电子装置在船舶电磁环境中正常工作。

二、电力拖动系统分类与船舶电拖方案

电力拖动的方式种类繁多,实现方法多种多样。如表 1-1 所示,如果以电动机种类去划分,可分为直流拖动系统、交流拖动系统两大类。若以电力拖动控制设备有无电源变换装置区分,可分为调速拖动和单机拖动两大类。电源变换装置是为了调速而设计的,属于调速拖动类型;但有些单机拖动也有有限的调速功能,例如交流笼式异步电动机的变极调速只有二、三速且按电机极对数变换而成倍变换其速度。

电力拖动方式方法的分类

表 1-1

| 电拖方式 | 拖动类型 | 实现的方法 |
|------|------|--|
| 直流拖动 | 单机拖动 | 并励电动机拖动系统 串励电动机拖动系统 复励电动机拖动系统 |
| | 调速拖动 | 简单 G-M 系统 三绕组 G-M 系统 双输出 G-M 系统 三输出 G-M 系统 电机放大机 G-M 系统 磁放大器 G-M 系统 SCR-M 系统 SCR-G-M 系统 |



续上表

| 电拖方式 | 拖动类型 | 实现的方法 | |
|------|------|--|------------------------------|
| 交流拖动 | 单机拖动 | 笼式恒速拖动 绕线式(串电阻、电抗、串频敏) 变极调速(恒功率、恒转矩调速) | |
| | 调速拖动 | 笼式 | 调压调速系统 变频调速系统 滑差电机调速系统 |
| | | 绕线式 | 调压调速系统 SCR——串级调速系统 |

第二节 电力拖动系统的基本运动方程式

一、运动方程式

电力拖动自动控制是电动机拖动工作机械运转的机电统一的系统。它必须涉及到许多力学问题和相关的基础学科门类及应用科学技术问题。由物理知识可知,质量为 m 的物体位于摩擦力为 F_f 的平面上,当外力 F 大于摩擦力 F_f 时,该物体作加速度运动,如图 1-1a) 所示。按牛顿第二定律,则有:

$$F - F_f = ma = m \frac{dV}{dt} = F \cdot dt \quad (1-1)$$

式中: a ——加速度;

V ——直线运转速度;

$F \cdot dt$ ——惯性力, $F \cdot dt = m \frac{dV}{dt}$ 。

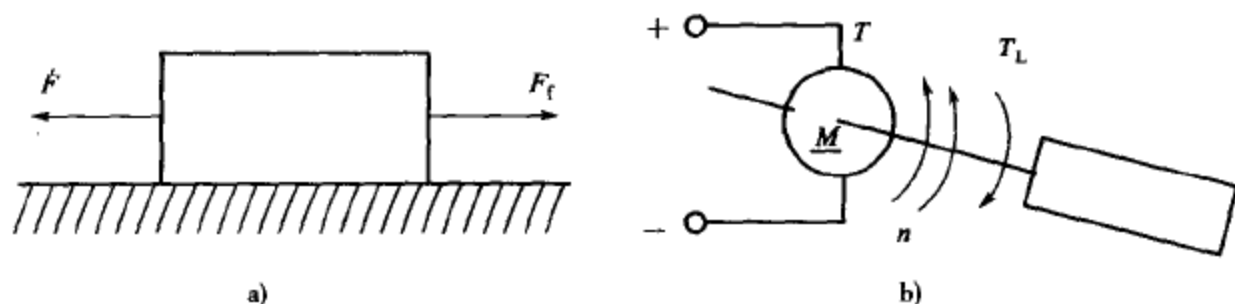


图 1-1 力的平衡和转矩的平衡

对于旋转运动的物体,例如电动机拖动工作机械作旋转运动,如图 1-1b) 所示,则有:

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

式中: T ——电动机发出的转矩, $N \cdot m$;

T_L ——阻转矩, $N \cdot m$;

J ——转动惯量, $kg \cdot m^2$;



ω ——电动机轴旋转角速度, rad/s。

这就是电力拖动系统的运动方程式。式(1-2)右边部分: $J \cdot \frac{d\omega}{dt} = T \cdot dt$, 称为惯性力矩。

工程上常采用飞轮矩 GD^2 ($N \cdot m^2$) 和转速 n (r/min) 较为方便。 GD^2 与 J 的关系为:

$$J = m\rho^2 = \frac{G}{g} \left(\frac{D}{2} \right)^2 \quad (1-3)$$

$$GD^2 = 4gJ$$

式中: m ——旋转体的质量, kg;

g ——重力加速度, m/s^2 ;

ρ ——回转半径, m;

G ——旋转体重量, N;

D ——回转直径, m。

ω 与 n 的关系为: $\omega = 2\pi n/60$

式(1-2)用 GD^2 与 n 来表示, 则

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

GD^2 通常在机电产品目录中给出, 历史上一般沿用工程单位制 $kg \cdot m^2$ 。需要按照国际单位制换算成 $N \cdot m^2$, 其二者之间关系为:

$$1kg \cdot m^2 = 9.8N \cdot m^2$$

式(1-4)就是工程上常用的电力拖动系统的运动方程式。必须注意: 式中数字 375 具有加速度量纲。

二、电力拖动系统运动状态的分析

方程式(1-2)清楚地表明, 电力拖动系统的运动状态不仅取决于电动机输出的转矩 T , 且与负载转矩 T_L 有关, 即运动状态取决于作用在电动机轴的转矩的代数和。

(1) 当 $T = T_L$ 时, 则 $dn/dt = 0$, 即 $n = 0$ 或 $n = \text{常数}$, 此时电力拖动系统处于静止或匀速状态;

(2) 当 $T > T_L$ 时, 则 $dn/dt > 0$, 电力拖动系统处于加速度状态;

(3) 当 $T < T_L$ 时, 则 $dn/dt < 0$, 电力拖动系统处于减速状态。

应当明确, 在只有(1)时, 拖动状态才处于稳定运动状态, 是为静态; (2)和(3)两种状态电力拖动系统都处于过渡过程中, 是为动态。为进一步理解运转状态, 举例说明如下:

今有一电力拖动系统, 原稳定运行于 A 点, 此时电动机发出转矩为 T_A , 负载转矩为 T_{LA} , 由于 $T_A = T_{LA}$, 所以 $dn/dt = 0$ 。若负载由 T_{LA} 增加到 T_{LB} , 在增加负载初始瞬间, 因机械惯性, 转速来不及变化, T 仍为 T_A , 使 $T < T_{LB}$, $dn/dt < 0$, 系统减速; 随着 n 的下降, 电动机发出的转矩不断增加, 当 $T = T_{LB}$ 时, 则 $T = T_{LB}$, $dn/dt = 0$, 减速过程结束, 系统稳定运行于 B 点, 如图 1-2 所示。

若系统原来稳定运行于 B 点, 后因负载突然下降到 T_{LA} , 则情况与上述过程相反, 系统将出现加速运转状态, 直至稳定于 A 点运行。

另外一种情况是电源电压变动导致电磁转矩的变化。例如原来稳定运行于如图 1-3 中 A



点。当电源电压突然降低,电动机的机械特性由 1 变成 2,由于机械惯性,转速不能突变,工作点由 A(T_A, n_A)点变成 B(T_B, n_B)点,此时,电动机转矩减少到 T_B ,使得 $T_B - T_L < 0, dn/dt < 0$,系统减速运转。转速沿特 2 下降,直到 C 点 $T_C = T_L, dn/dt = 0$,电动机到达新的稳定运行点 C 运转。

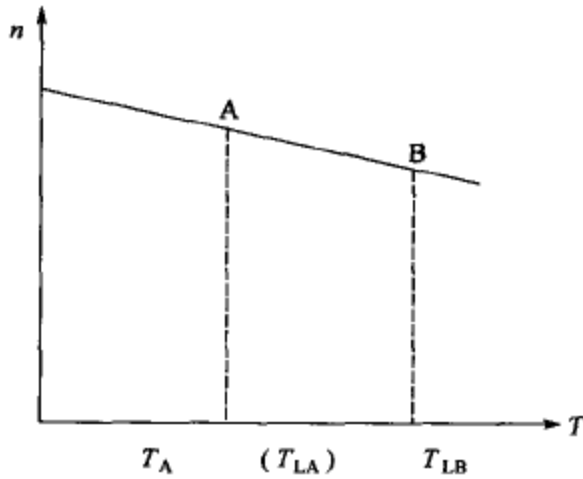


图 1-2 电拖系统运转时的动态变化

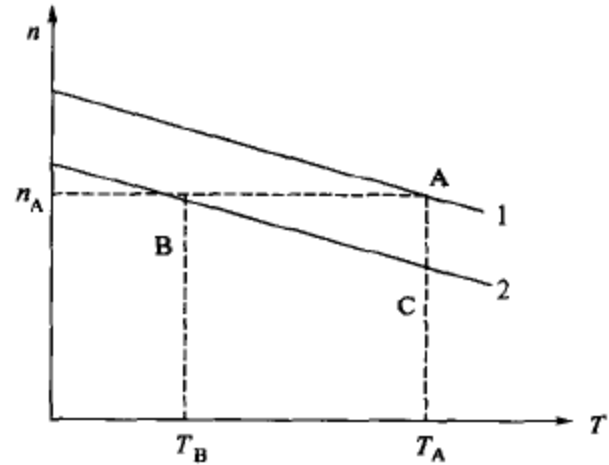


图 1-3 电源电压降低时的机械特性

由以上分析可见:机械惯性比电磁惯性大得多,即转速不能突变,电枢电流可以突变。所以,当负载或电源电压突变时,转速来不及变化,电动机转矩产生突变。

第三节 电磁转矩和负载转矩与转向的关系

从上节分析中知道,我们运用运动方程式(1-4)时,是从 dn/dt 大于零、小于零或等于零来确定系统的运动状态,它不仅与电磁转矩 T 及负载转矩 T_L 的大小有关,而且与两者的方向有关。一般原则规定某转向为正(任意规定),则电动机的转矩方向若与所规定的方向相同为正,相反为负。负载转矩 T_L 的方向,若与所规定的方向相反为正,相同为负。根据以上原则本教材预先规定如下:

- n ——逆时针方向为正,顺时针方向为负;
- T ——逆时针方向为正,顺时针方向为负;
- T_L ——顺时针方向为正,逆时针方向为负。

图 1-4 表示电动机的电磁转矩 T 与转速 n 转向的关系。

如图 1-4 所示:在第一象限和第三象限中, T 与 n 方向相同,电动机工作在电动状态,即电动机产生的转矩 T 用来拖动其轴上的负载运行。在第二象限, T 为负, n 为正;在第四象限, T 为正, n 为负,所以第二和第四象限中 T 与 n 的方向相反,电动机工作在制动状态,即电动机产生的转矩 T 阻止其轴上的负载的运转。关于制动状态的详细内容见第五章的分析讨论。

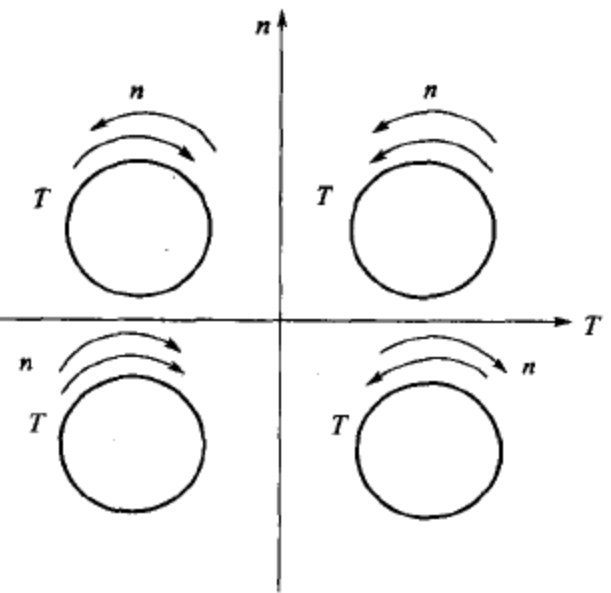


图 1-4 T 与 n 的关系

在恒定转矩负载中,恒定反抗性负载转矩与转向的关系见图 1-5a),从图中可知,当转向改变时,反抗性负载转矩 T_L 的方向也随之改变;恒定位能性负载转矩与转向的关系如图 1-5b)所示,当转矩方向改变时,位能性负载转矩的作用方向仍然不变,起货机吊起重物加在电



动机轴上的负载力矩属于这种类型工况。

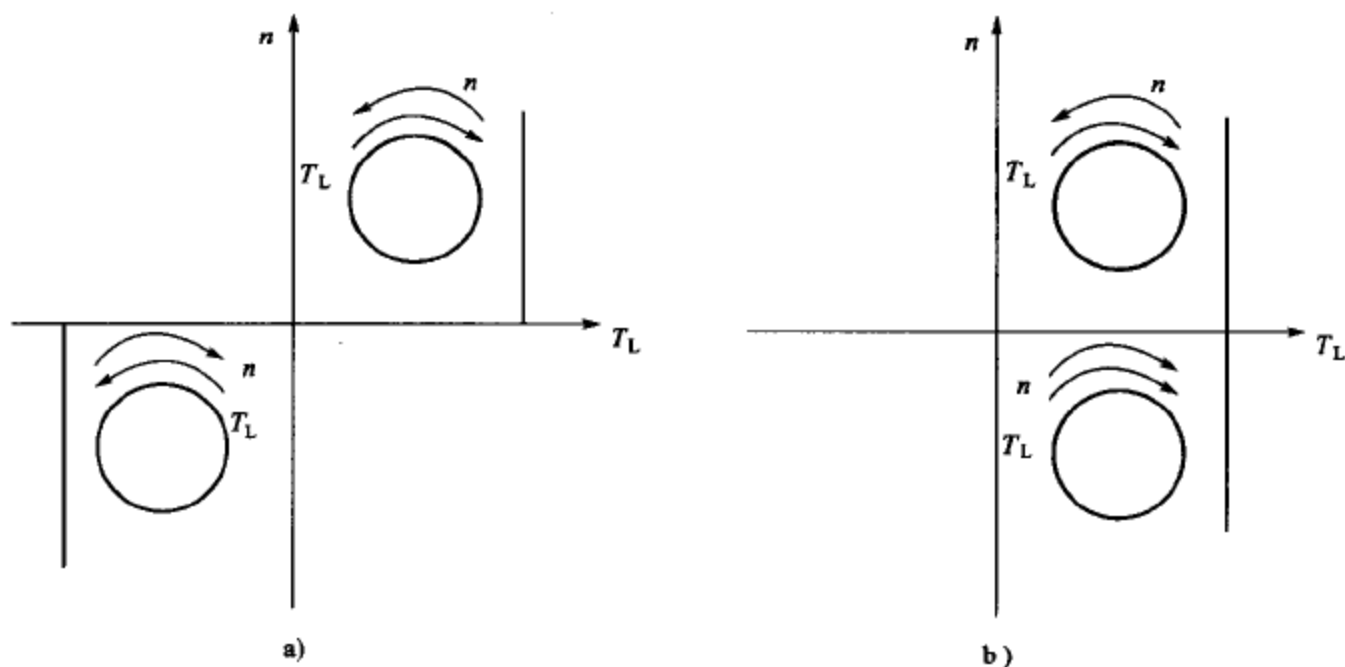


图 1-5 负载转矩与转向的关系

a) 反抗性负载; b) 位能性负载

在图 1-6 中标出了电磁转矩 T 、负载转矩 T_L 以及转速 n 的转向,下面利用运动方程式来分析其运动状态。

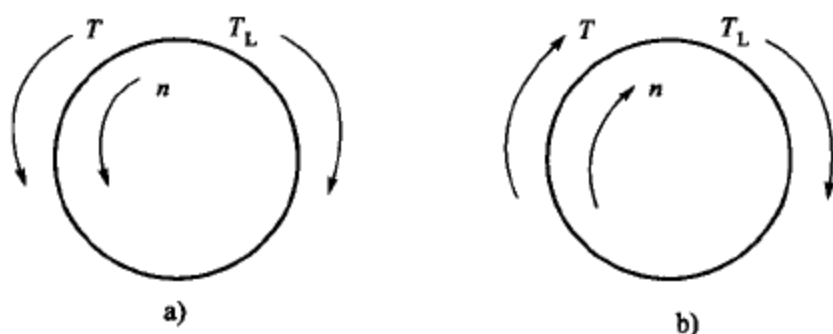


图 1-6 利用运动方程式分析运动状态

对于图 1-6a), n 与 T 均为逆时针方向,均为正; T_L 为顺时针方向,也为正值,而且 $T_L > T$, 根据式(1-4)则有:

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} < 0$$

即 $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统处于减速运动状态。

对于图 1-6b), n 与 T 均为顺时针方向,皆为负值; T_L 为逆时针方向则为正值,而且 $T_L > T$, 根据式(1-4)则有:

$$-T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{d(-n)}{dt}$$

该式两边乘(-1)

则

$$T + T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} > 0$$

即 $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统处于加速运行状态。



第四节 折算到电动机轴上的转动惯量和转矩

上面讨论了电力拖动系统的运动方程式和负载转矩特性。在运动方程式中,负载转矩直接作用在电动机轴上。但实际传动机构很复杂,一般情况下,电动机与生产机械间都有齿轮传动及其他传动机构,如图 1-7 所示。

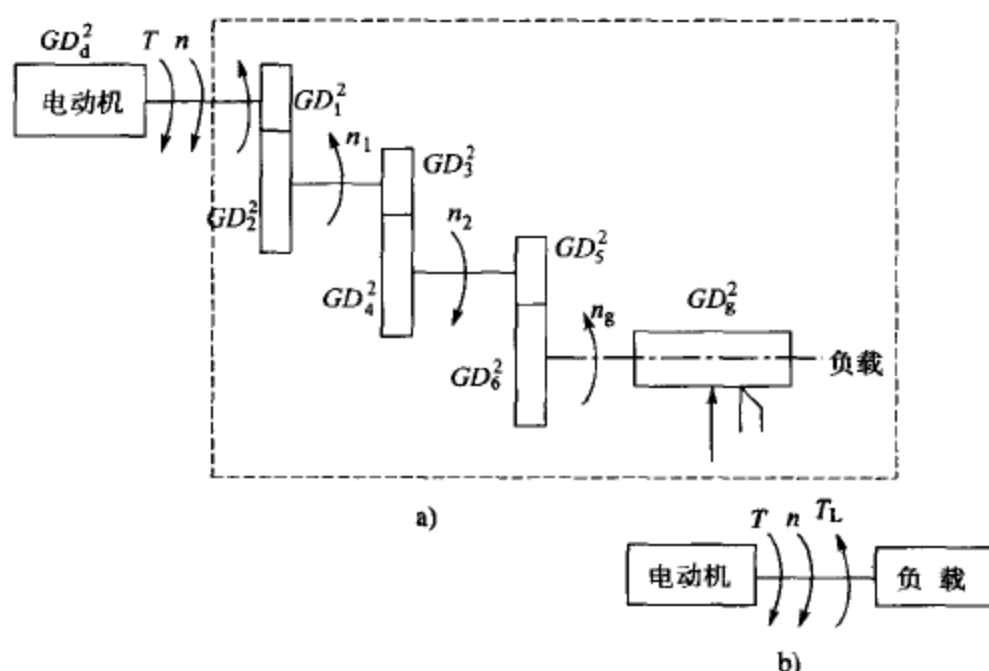


图 1-7 拖动系统示意图

显然,该图是通过 4 个轴把电动机的转速 n (角速度为 ω) 转变为生产机构所需要的转速 n_g (角速度为 ω_g)。每根轴上各有其本身的转速和转动惯量。因此,通常要把生产机械的转矩 T_g 和转动惯量(包括轴的转动惯量)等效到电动机轴上,这项工作称为折算。可见,折算就是把图 1-7a) 所示的实际拖动系统等效为图 1-7b) 的单轴系统,折算的原则是保持两个系统传送的功率及储存的动能相同。

一、旋转运动

传动机构见图 1-7a)。图中: $\omega, \omega_1, \omega_2, \omega_g$ 为各轴的旋转角速度(显然 ω 与 ω_g 分别为电动机和工作机构的旋转角速度),分别对应各轴的旋转速度 n, n_1, n_2, n_g 。 J_d 和 J_g 分别为电动机和工作机构的转动惯量。 $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$ 为各个齿轮的转动惯量。

i_1, i_2, i_3 为各对齿轮的速比。减速时, $i > 1$; 升速时, $i < 1$ 。通常都是减速。很显然,从电动机到工作机构的总速比 $i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3$ 。

于是

$$n = i \cdot n_g$$

1. 转动惯量的折算

设 J 为折算到电动机轴上的等效转动惯量,根据储存的动能相同的原理,得:

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} (J_d + J_1) \omega^2 + \frac{1}{2} (J_2 + J_3) \omega_1^2 + \frac{1}{2} (J_4 + J_5) \omega_2^2 + \frac{1}{2} (J_6 + J_g) \omega_g^2$$

整理后得:



$$J = J_d + J_1 + \frac{J_2 + J_3}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2} + \frac{J_4 + J_5}{\left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2} + \frac{J_6 + J_g}{\left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)^2}$$

$$= J_d + J_1 + \frac{J_2 + J_3}{i_1^2} + \frac{J_4 + J_5}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{J_6 + J_g}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2}$$

因 $GD^2 = 4gJ$, 所以折算到电动机轴上的等效飞轮矩为:

$$GD^2 = GD_d^2 + GD_1^2 + \frac{GD_2^2 + GD_3^2}{i_1^2} + \frac{GD_4^2 + GD_5^2}{i_1^2 \cdot i_2^2} + \frac{GD_6^2 + GD_g^2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot i_3^2} \quad (1-5)$$

2. 转矩的折算

把工作机构的转矩 T 折算到电动机轴上, 折算后的等效转矩为 T_L , 根据传送功率相同的原则,

$$T_L = \frac{T_g}{\eta \left(\frac{\omega}{\omega_g}\right)} = \frac{T_g}{\eta \cdot i} \quad (1-6)$$

式中: η ——传动机构总效率。

若图 1-7 所示系统为主轴传动机构, 设 F 为切削力(N)、 R 为工件半径(m)、则主轴所负担的切削转矩为: $T_g = FR(N \cdot m)$

式(1-6)即为转矩折算公式。可见, 当传动机构为减速时, 折算到电动机轴上的等效转矩大大减小。

二、直线运动

在生产实践中, 常常有许多工作机构作直线运动。当然, 仔细区分还有平移运动和升降运动之别, 但折算的方法基本一样, 且船上常见的例子是起货机, 属于升降运动。我们以提升运动为例, 图 1-8 所示为提升货物时的情况。

1. 转动惯量的折算

下面计算直线运动部分折算到电动机轴上的等效转动惯量 J 或等效飞轮矩 GD^2 。作直线运动所具有的动能为 $mv^2/2$, 如果折算到电机轴上, 则动能为 $J\omega^2/2$, 根据储存动能相同的原理, 则有:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{J\omega^2}{2} \quad (1-7)$$

整理后得:

$$J = m \left(\frac{v}{\omega}\right)^2$$

因为 $GD^2 = 4gJ$, $m = G/g$, $\omega = 2\pi n/60$, 则上式变为

$$GD^2 = 365 \frac{GV^2}{n^2} \quad (1-8)$$

式中: G ——直线运动体的重量, N;

V ——直线运动体的速度, m/s。

若整个拖动系统即有作直线运动的部件, 又有作旋转运动的部件, 根据式(1-5)和式(1-8)可得折算到电动机轴上的总飞轮矩: