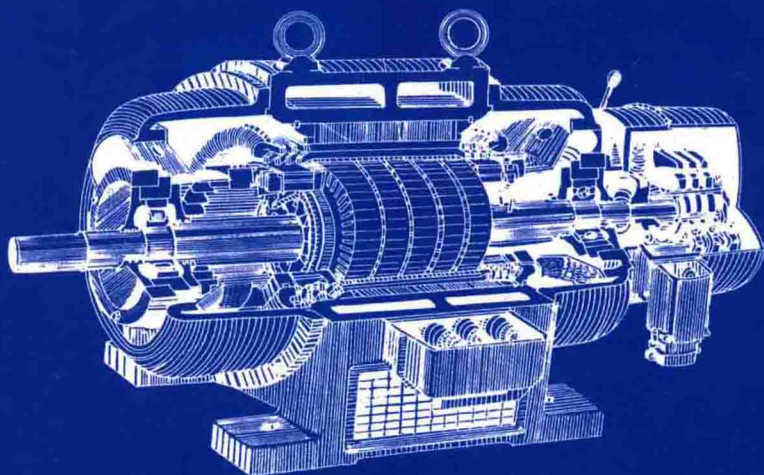


上海市“085工程”资助出版精品教材

船舶电气及控制系统

林叶春 主编

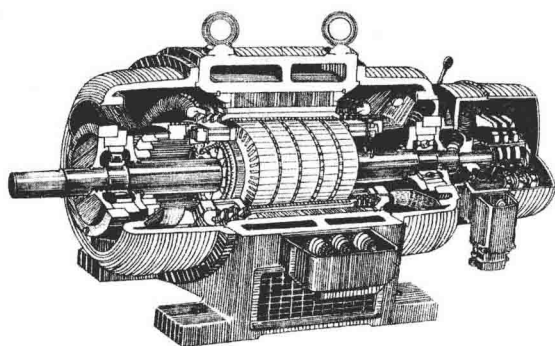


上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

上海市“085工程”资助出版精品教材

船舶电气及控制系统

林叶春 主编



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是普通高等教育航海技术类轮机工程和船舶电子电气工程专业教学的配套教材之一。

本书分 22 章 5 部分: 第一部分从第 1 章到第 7 章, 为电机及拖动基础, 包括电力拖动系统的动力学基础、电磁学的基本知识、直流电机原理、变压器、交流异步电动机、同步电机和控制电机; 第二部分从第 8 章到第 13 章, 为船舶电力拖动系统, 包括电机控制基础、船舶机舱电力拖动控制电路、甲板机械的电力拖动控制系统、船舶航向控制系统、交流变频调速系统及变频器和船舶电力推进系统; 第三部分从第 14 章到第 20 章, 是船舶电站, 包括船舶电力系统、船舶同步发电机的并车运行、船舶同步发电机电压及无功功率的自动调节、船舶电力系统频率及有功功率自动调节、船舶电力系统的综合保护、船舶电站自动化和船舶高压电力系统; 第四部分是第 21 章, 简述了船舶照明系统和船舶内部通信; 第五部分是第 22 章, 介绍了船舶安全用电。

本书可作为轮机工程和船舶电子电气工程专业本科教材, 也可作为相关专业课程的参考教材, 还可供船舶电气及轮机自动化技术人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶电气及控制系统 / 林叶春主编. —上海: 上海交通大学出版社, 2015
ISBN 978-7-313-12546-0

I. ①船… II. ①林… III. ①船用电气设备—电气控制—高等学校—教材 IV. ①U665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 014705 号

船舶电气及控制系统

主 编: 林叶春

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 韩建民

印 制: 上海景条印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm

字 数: 809 千字

版 次: 2015 年 2 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-12546-0/U

定 价: 48.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 32.75

印 次: 2015 年 2 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-59815625 转 8028

前 言

《船舶电气及控制系统》教材是为轮机工程和船舶电子电气工程专业学生学习相关的专业必修课而编写的,也可作为相关专业课程的参考教材,还可供船舶电气及轮机自动化技术人员自学使用。本书注重系统性和实用性,面向考证等社会需求,以培养应用型的高级轮机技术人才和船舶电气人才为目标,力求简明扼要,通俗易懂,有较强的针对性、适用性和先进性。

本书主要阐述了电力拖动的动力学基础和电磁学的基础知识;分析了直流电机、变压器、交流异步电机、同步电机和控制电机的基本工作原理、机械特性和应用技术;结合船舶电气的特点,对船舶电机、船舶机舱、甲板机械的电力拖动控制系统进行了分析和讨论;针对典型的控制系统,对船舶航向控制进行了探讨分析;由于变频控制技术在船舶的应用推广,本书在介绍变频器工作原理后,还对电力推进控制系统进行了分析讨论;在介绍了船舶电力系统后,分析了船舶同步发电机的并车控制技术,同步发电机的电压调节控制,电力系统有功功率的自动调整,船舶电力系统的综合保护;结合典型实例,分析船舶电站自动化控制技术,并对越来越多的高压船舶电站进行了分析和讨论;最后介绍了船舶照明系统、船舶安全用电和船舶内部通信。

本书由上海海事大学的林叶春主编,李精明、陈军、王海燕、甘世红、李军军任副主编。全书分22章:第1章电力拖动系统的动力学基础;第2章电磁学的基本知识;第3章直流电机原理;第4章变压器;第5章交流异步电动机;第6章同步电机;第7章控制电机;第8章电机控制基础;第9章船舶机舱电力拖动控制电路;第10章甲板机械的电力拖动控制系统;第11章船舶航向控制系统;第12章交流变频调速系统及变频器;第13章船舶电力推进系统;第14章船舶电力系统;第15章船舶同步发电机的并车运行;第16章船舶同步发电机电压及无功功率的自动调节;第17章船舶电力系统频率及有功功率自动调节;第18章船舶电力系统的综合保护;第19章船舶电站自动化;第20章船舶高压电力系统;第21章船舶照明系统和船舶内部通信;第22章船舶安全用电。其中第2章、第3章由甘世红编写,第9章、第14章和第17章由李精明编写,第12章由李军军编写,第15章和第21章由王海燕编写,第22章由陈军编写,其余部分由林叶春编写。参加本书编写工作的还有刘冲、武起立、张俊、陈文涛、孙永明、李品友、陈泰山、岳虎、杨义伟等。全书由林叶春统稿。

本书在编写和出版过程中,得到上海海事大学教务处、商船学院、上海交通大学出版社、上海海事大学自动化机舱和轮机模拟器、中远上海远洋公司技术部以及“育明”轮等有关单位和部门领导的鼎力支持和悉心指导,得到了上海海事大学领导和商船学院同仁的帮助和支持,特别是得到了兄弟院校及国家海事中心黄党和的指导 and 大力支持并提供了宝贵资料,在此向以上单位和个人一并致以诚挚的谢意。

由于本书内容涉及面广,加之编者的水平有限,书中存在的不当和误漏之处,敬请同行和读者批评指正。

编 者

2015年元月

目 录

第1章 电力拖动系统的动力学基础	1
1.1 单轴电力拖动系统的动力学分析	1
1.2 生产机械的负载转矩特性	2
1.3 电动机的机械特性与电力拖动系统的稳态运行	5
1.4 多轴电力拖动系统的化简	7
第2章 电磁学的基本知识	10
2.1 磁场的基本概念与电磁感应定律	10
2.2 常用铁磁材料的性能	18
2.3 电磁力	20
第3章 直流电机	24
3.1 直流电机的工作原理	24
3.2 直流电机的构造和励磁方式	25
3.3 直流电动机的运行特性	28
第4章 变压器	36
4.1 变压器的结构和原理	36
4.2 变压器的同名端判别方法	42
4.3 三相变压器的组成与常用连接组别	43
4.4 变压器在船舶电气中的应用	45
第5章 交流异步电动机	51
5.1 三相异步电动机的结构与铭牌参数	51
5.2 三相异步电动机的工作原理	55
5.3 三相异步电动机的工作特性	59
5.4 三相异步电动机的起动	65
5.5 三相异步电动机的调速	69
5.6 三相异步电动机的制动	72
5.7 单相异步电动机	76
第6章 同步电机	80
6.1 三相交流同步电机的构造与工作原理	80
6.2 同步发电机的运行及特性	84

6.3	同步电动机的功率与转矩	90
6.4	同步电机的功率因数	93
6.5	永磁同步电动机	95
6.6	船用同步电机的应用	99
第7章	控制电机	103
7.1	伺服电动机	103
7.2	步进电机	106
7.3	测速装置	109
7.4	自整角机	112
第8章	电机控制基础	116
8.1	常用控制电器	116
8.2	电气制图	139
8.3	电动机的基本保护环节	143
8.4	控制电路的基本控制环节	145
8.5	船舶机舱典型控制电路	150
第9章	船舶机舱电力拖动控制电路	157
9.1	空压机自动控制电路	157
9.2	电动机互为备用自动切换控制电路	162
第10章	甲板机械的电力拖动控制系统	169
10.1	甲板机械的运行特点	169
10.2	锚机和绞缆机电力拖动控制系统	171
10.3	起货机的电力拖动与控制	176
10.4	电动液压起货机控制系统	179
10.5	电动液压绞缆机	186
10.6	船用电梯控制系统	188
第11章	船舶航向控制系统	197
11.1	船舶舵机控制系统的基本要求	197
11.2	船舶舵机装置的组成及控制系统分类	198
11.3	操舵方式及基本工作原理	200
11.4	自动舵的要求与组成	204
11.5	液压舵机的控制	211
11.6	NAVIPLOT 型自动舵系统简介	218
11.7	舵机控制系统的维护与故障分析	224

第 12 章 交流变频调速及变频器	229
12.1 交流变频调速的基本原理	229
12.2 交流变频调速的控制方式	232
12.3 交-直-交变频技术	235
12.4 电压源型和电流源型逆变器	237
12.5 通用变频器外部接口电路及主要参数	244
第 13 章 船舶电力推进系统	253
13.1 船舶电力推进系统的基本概念	253
13.2 电力推进系统的变频调速控制	263
13.3 电力推进的控制及管理	274
第 14 章 船舶电力系统	278
14.1 船舶电力系统概述	278
14.2 船舶电源	287
14.3 配电装置	297
14.4 船舶电力系统中的常用电器	304
14.5 船舶电网	316
第 15 章 船舶同步发电机的并车运行	329
15.1 并车的条件及其分析	329
15.2 同步发电机的手动并车	331
15.3 同步发电机自动并车的基本原理	338
第 16 章 船舶同步发电机电压及无功功率的自动调整	345
16.1 自动电压调整的基础知识	345
16.2 相复励自励恒压装置	350
16.3 可控相复励自励恒压励磁系统	352
16.4 无刷发电机的励磁系统	355
16.5 并联运行发电机组间无功功率的分配	359
第 17 章 船舶电力系统频率及有功功率自动调整	365
17.1 船舶电力系统有功功率的自动调整	365
17.2 自动调频调载原理	374
第 18 章 船舶电力系统的综合保护	379
18.1 船舶电力系统综合保护的组成及基本要求	379
18.2 船舶交流电力系统的短路计算	390
18.3 船舶电力系统的故障分析与处理	400

第 19 章 船舶电站自动化	405
19.1 船舶自动化电站概述	405
19.2 SIMOS PMA71 型电力自动管理系统	408
19.3 发电机并车和保护单元(PPU)	427
19.4 船舶电能管理系统	435
第 20 章 船舶高压电力系统	445
20.1 船舶高压电力系统的结构与要求	445
20.2 “泰安口”半潜式电力推进船中的高压电力系统	449
20.3 船舶高压配电设备	452
20.4 船舶高压配电系统	460
20.5 船舶高压岸电连接	465
20.6 船舶高压电力系统的安全操作和管理	467
第 21 章 船舶照明系统和船舶内部通信	472
21.1 船舶照明系统分类	472
21.2 船舶常用灯具及其控制电路	474
21.3 船舶照明系统的维护和常见的故障处理	483
21.4 船内电话通信系统	486
21.5 船舶操纵信号设备	488
21.6 电气信号装置	492
第 22 章 船舶安全用电	496
22.1 船舶安全用电	496
22.2 船舶电气火灾的预防	500
22.3 油轮电气系统的安全管理	502
22.4 船舶电气设备的船用条件及船检规定	505
22.5 船舶电气设备绝缘	508
参考文献	513

第 1 章 电力拖动系统的动力学基础

电动机实现了电能到机械能的转换,电动机拖动生产机械运转的方式称为电力拖动。本章是电力拖动系统的基础,主要分析电力拖动系统中电动机带动生产机械在运动过程中的力学问题。

1.1 单轴电力拖动系统的动力学分析

如图 1-1 所示,电力拖动系统一般由电动机、生产机械的传动机构、负载、控制设备和电源组成,通常又把传动机构和负载统称为电动机的机械负载。

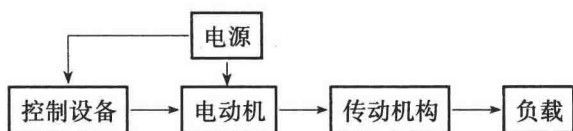


图 1-1 电力拖动系统组成

1.1.1 运动方程式

电力拖动系统经过化简,都可转为如图 1-2(a)所示的电动机转轴与生产机械的工作机构直接相连的单轴电力拖动系统,各物理量的方向标示如图 1-2(b)所示。根据牛顿动力学定律,该系统的运动方程为

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

式中: T_e 为电动机的电磁转矩($\text{N} \cdot \text{m}$); T_L 为生产机械的阻转矩($\text{N} \cdot \text{m}$); J 为电动机轴上的总转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); ω 为电动机的角速度(rad/s)。

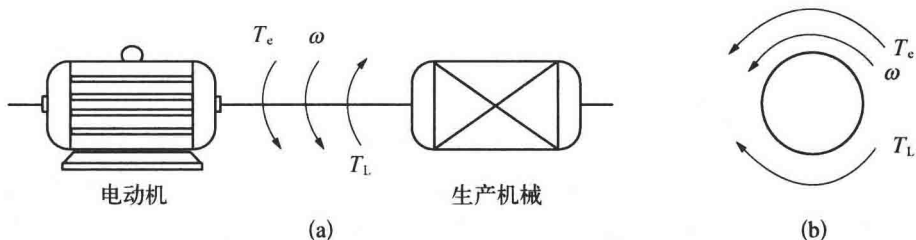


图 1-2 单轴电力拖动系统

(a) 单轴系统简图 (b) 物理量方向标示

在工程计算中,通常用单位为转/分(r/min)的转速 n 代替角速度 ω ;用飞轮矩 GD^2 代替转动惯量 J 。由于 n 与 ω 的关系为

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

J 与 GD^2 的关系为

$$J = mr^2 = \frac{GD^2}{4g} \quad (1-3)$$

式中: m 为系统转动部分的质量(kg); G 为系统转动部分的重力(N); r 为系统转动部分的回转半径(m); D 为系统转动部分的内径直径(m); g 为重力加速度(m/s^2), 在北京地区 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

把式(1-2)和式(1-3)代入式(1-1), 可得电力拖动系统运动方程的实用形式:

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

式中: GD^2 为系统转动部分的总飞轮力矩($\text{N} \cdot \text{m}^2$); 等号右侧分母上的数字是具有加速度量纲的系数, $375 = 4g \times 60/2\pi$ 。

1.1.2 运动方程中方向的约定

式(1-4)中的 T_e , T_L 和 n 都是有方向的, 它们的实际方向可以根据图 1-2(b)给出的参考正方向, 用正、负号来表示。这里规定 n 及 T_e 的参考方向为对观察者而言逆时针为正, 反之为负; T_L 的参考方向为顺时针为正, 反之为负。这样规定参考正方向恰好符合式(1-1)和式(1-4)中负载转矩 T_L 前有一个负号的表达关系。

1.1.3 运动方程的物理意义

式(1-4)表明电力拖动系统的转速变化 $\frac{dn}{dt}$ (即加速度) 由电动机的电磁转矩 T_e 与生产机械的负载转矩 T_L 之间的关系决定。

(1) 当 $T_e = T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, 表示电动机以恒定转速旋转或静止不动, 电力拖动系统的这种运动状态被称为静态或稳态。

(2) 若 $T_e > T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统处于加速状态。

(3) 若 $T_e < T_L$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统处于减速状态。

也就是一旦 $T_e \neq T_L$, 则转速将发生变化, 这种运动状态被称为动态或过渡状态。

由于任何一个复杂的电力拖动系统都可以通过等效或折算的方法, 简化为由图 1-2 表示的单轴电力拖动系统, 因此可以用式(1-1)或式(1-4)来描述系统运动。这样, 可建立电力拖动系统的运动方程, 来研究和分析系统的动力学特性。

1.2 生产机械的负载转矩特性

在运动方程式中, 负载转矩 T_L 与转速 n 的关系 $T_L = f(n)$ 或 $n = f(T_L)$ 即为生产机

械的负载转矩特性。负载转矩 T_L 的大小与多种因素有关。以车床主轴为例,当车床切削工件时,主轴转矩和切削速度、切削量大小、工件直径、工件材料及刀具类型等都有密切关系。

1.2.1 负载转矩特性的基本类型

1. 按负载转矩性质分

按负载转矩性质(转矩方向),负载可分为:

(1) 反抗性负载: 负载转矩始终与电动机的转向相反,起着阻碍电动机旋转的作用。其转矩大小可能恒定,也可能变化,但是总与转向相反。船舶机舱中行车前后行走、机床的平移机构运动较多体现了反抗性负载的特点。

(2) 位能性负载: 负载转矩方向不变,与电动机旋转方向也无关。常见的重物的提升与下放,其转矩可以是基本恒定,提升与下放时转矩也可以不同,但是转矩方向不变,与转速无关。

2. 按负载转矩变化规律分

按负载转矩变化规律来分,大多数生产机械的负载转矩特性可归纳为下列3种类型:

1) 恒转矩负载特性

所谓恒转矩负载特性,就是指负载转矩 T_L 与转速 n 无关的特性,即当转速变化时,负载转矩 T_L 保持常值。恒转矩负载特性又可分为反抗性负载特性和位能性负载特性两种:

(1) 反抗性恒转矩负载特性: 反抗性恒转矩负载特性的特点是,恒值转矩 T_L 的方向总是与运动方向相反。根据前述正负符号的规定,当正转时, n 为正,转矩 T_L 为反向,应取正号,即为 $+T_L$;而反转时, n 为负,转矩 T_L 为正向,应变为 $-T_L$,如图 1-3 所示。显然,反抗性恒转矩负载特性应画在第 I 与第 III 象限内,属于这类特性的负载有金属的压延、机床的平移机构等。

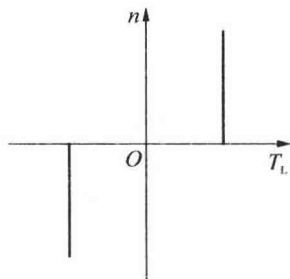


图 1-3 反抗性恒转矩负载特性

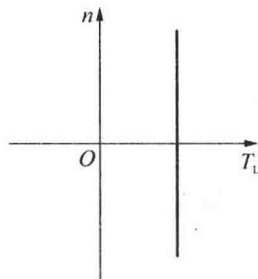


图 1-4 位能性恒转矩负载特性

(2) 位能性恒转矩负载特性: 位能性恒值负载转矩则与反抗性的特性不同,它由拖动系统中某些具有位能的部件(如起重类型负载中的重物)造成,其特点是转矩 T_L 具有固定的方向,不随转速方向改变而改变。如图 1-4 所示,不论重物提升(n 为正)或下放(n 为负),负载转矩始终为反方向,即 T_L 始终为正,特性画在第 I 与第 IV 象限内,表示恒值特性的直线是连续的。

由图 1-4 可见,提升时转矩 T_L 阻碍提升;下放时 T_L 却促进下放,这是位能性负载的特点。

2) 风机和泵类负载特性

风机和泵类负载的转矩与转速大小有关,基本上与转速的平方成正比,即

$$T_L = kn^2 \quad (1-5)$$

式中: k 为比例系数。

风机和泵类机械,其负载特性有相同之处,简称风泵类机械。图 1-5 所示为风机类负载特性曲线;由于泵类机械只能正转,没有反转,因此其负载特性仅限于第 I 象限。

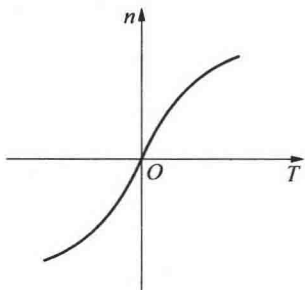


图 1-5 通风机负载特性

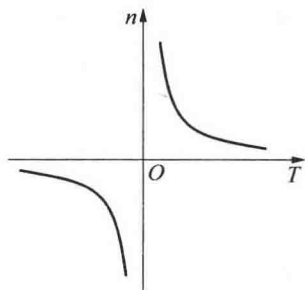


图 1-6 恒功率负载特性

属于风泵类负载的生产机械有通风机、水泵、油泵等,其中空气、水、油等介质对机器叶片的阻力基本上和转速的平方成正比。船舶中各种风机、叶片泵等,甚至螺旋桨均可认为是通风机负载。

3) 恒功率负载特性

有些生产机械,比如车床主轴,在粗加工时,切削量大,切削阻力大,此时开低速;在精加工时,切削量小,切削阻力小,往往开高速。因此,在不同转速下,负载转矩基本上与转速成反比,即

$$T_L = \frac{k}{n} \quad (1-6)$$

由于负载功率 $P_L = T_L \omega$, 又有 $\omega = 2\pi n/60$, 即 $P_L = T_L 2\pi n/60 = T_L n/9.55$, 再代入式 (1-6), 可得 $P_L = k/9.55$ 为常数, 表示在不同转速下, 电力拖动系统的功率保持不变, 负载转矩 T_L 与 n 的特性曲线呈现恒功率的性质, 如图 1-6 所示。常见的有机床切削加工、电缆卷筒或造纸卷筒等负载。

1.2.2 实际生产机械的负载特性

实际生产机械的负载转矩特性可能是以上几种典型特性的综合。例如, 实际风机和泵类机械除了主要是风泵类负载特性外, 由于其轴承上还有一定的摩擦转矩 T_f , 因而实际风泵类负载特性应为

$$T_L = T_f + kn^2 \quad (1-7)$$

其特性曲线如图 1-7 所示。而实际的起重机的负载特性如图 1-8 所示, 除了负载特性外, 还应考虑起重机传动机构等部件的摩擦转矩。

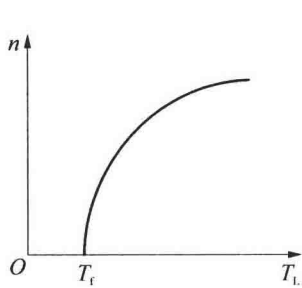


图 1-7 实际的泵类负载特性

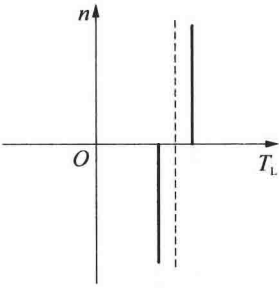


图 1-8 实际的起重机负载特性

1.3 电动机的机械特性与电力拖动系统的稳态运行

电力拖动系统主要是由电动机与负载两部分组成的,通常把电动机的电磁转矩与转速之间的关系称为机械特性。由于电磁转矩与转速是表现电动机运动的主要变量关系,因此研究电动机的机械特性是电力拖动系统的主要内容。

1.3.1 电动机机械特性的一般形式

电动机的运行状态根据其电磁转矩 T 与转速方向的关系,分为电动运行和制动运行状态。电动机的电磁转矩方向与转速方向相同时,电磁转矩为克服其轴上的负载转矩而驱动转轴旋转的动力矩,电动机为电动运行状态;而当电动机的电磁转矩方向与转速方向相反时,电磁转矩为阻止其轴上负载运动的阻转矩,电动机处于制动运行状态。

就机械特性曲线而言,如图 1-9 所示,当电动机处于电动运行状态时, n 与 T 同为正值或同为负值,曲线位于 $n-T$ 坐标平面的第 I、III 象限;而制动运行时, n 总与 T 的方向相反,曲线位于第 II 与第 IV 象限。

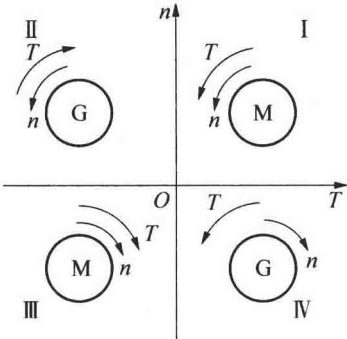


图 1-9 电机运行的四个象限

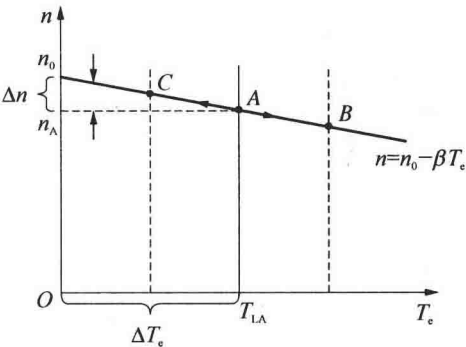


图 1-10 电动机机械特性的线性段

对于由电动机及生产机械构成的电力拖动系统,通常将电动机的机械特性曲线与生产机械的负载特性曲线放在同一个 $n-T$ 坐标平面上。由于生产机械与电动机同轴旋转,当设定电动机的转速和转矩以逆时针转向为正值时,则生产机械的负载转矩顺时针方向取正值。因此,对于反抗性负载,因负载转矩总与转速的方向相反,故负载特性曲线位于坐标的 I、III 象限;而对于位能性负载,则特性曲线出现在第 I 或第 IV 象限。

考虑到大部分电动机的机械特性都具有或可近似为一线性区段,如图 1-10 所示,因此电

动机的机械特性可表示成

$$n = n_0 - \beta T_e \quad (1-8)$$

式中: n_0 为电动机的理想空载转速(r/min); β 为电动机机械特性曲线的斜率。

所谓理想空载转速 n_0 是指忽略电机空载损耗, 当电磁转矩 $T_e = 0$ 时的电动机转速。机械特性的斜率表示其转速变化与转矩变化之比, 即 $\beta = \Delta n / \Delta T_e$ 。且 β 越小, 其机械特性越硬。

1.3.2 电力拖动系统稳定运行的概念

电力拖动系统稳定运行是指系统在扰动作用下, 离开原来的平衡状态, 但仍然能够在新运行条件下达到平衡状态, 或者在扰动消失之后, 能够回到原有的平衡状态。

调速过程必须使得拖动系统稳定。根据刚体运动定律, 电力拖动系统运行时的任何瞬间, 作用于电动机轴上的转矩必须保持平衡, 如式(1-4)所示的电力拖动系统运动方程的实用形式, 若以 ΔT 简单表示加速转矩, T_e 简化为用 T 表示, 则电力拖动系统的运动方程式为

$$T - T_L = \Delta T \quad (1-9)$$

将电动机的机械特性曲线与生产机械的负载特性曲线放在同一 $n-T$ 坐标平面上, 可通过两曲线判断系统在某一转速时 ΔT 的情况。

如图 1-11 所示, 假设电动机的机械特性(曲线 2)与生产机械的负载特性(曲线 1)两条曲线有一交点 a 。在 a 点上, $T_a = T_L$, $\Delta T = 0$, 是系统的一个静态工作点。当假如负载突然受到一个干扰减小后, 负载特性变为曲线 3, 此时, 电机转速仍为 n_a , $T > T_L$ 时, $\Delta T > 0$, 转速加速至 b 点时电磁转矩与负载重新相等, 拖动系统重新稳定运行在 b 点, 转速为 n_b 。如果干扰是短时的, 负载很快恢复到特性曲线 1, 则 b 点的电磁转矩 T_b 小于负载转矩 T_a , 转速下降, 当电磁转矩与负载转矩一致时, 回到交点 a , 系统再次平衡, 稳定运行在 a 点。同理, 负载增加, 曲线变化, 从曲线 1 变为 4 后, 转速下降, 工作点稳定在 c 点, 在负载从曲线 4 变回 1 后, 系统再次稳定运行在 a 点。

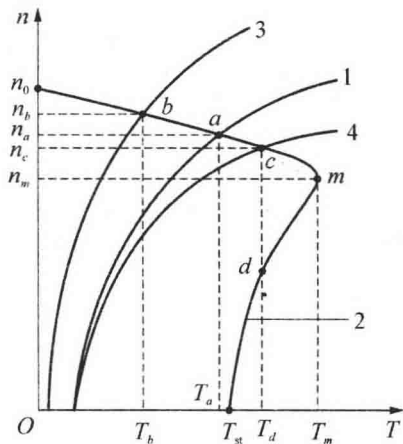


图 1-11 电动机电磁转矩和负载力矩

当电力拖动系统由于受到外界干扰(如生产机械负载的变化或电动机外加电压的波动等)时, 系统的转速将发生变化而离开原来平衡状态。如果在扰动持续期间, 系统能在新条件下达到新的平衡, 在新的工作点稳速运行; 当干扰消失以后, 若系统能自动回复到原来的工作点上, 则系统就具备维持稳定运行的条件。若系统运行到 d 点, 情况会如何呢? 下面结合图 1-12 作详细分析。

图 1-12(a) 是置于同一 $n-T$ 坐标平面上异步电动机的机械特性曲线和恒转矩负载特性曲线的配合, 即电动机驱动一转矩值为 T_L 的恒转矩负载运行。两条曲线有一交点 A , 在 A 点上, $T = T_L$ 。由电力拖动系统运动方程式可知, 动态转矩 $\Delta T = T - T_L = 0$, 所以在 A 点上该系统能保持一个恒定的转速 n_1 运行, 是系统的一个静态工作点。但系统能否在 A 点维持稳定运行, 则需作进一步的分析。

如果拖动系统原来运行在 A 点上, 突然出现瞬时扰动, 如电动机端电压升高, 则电动机的

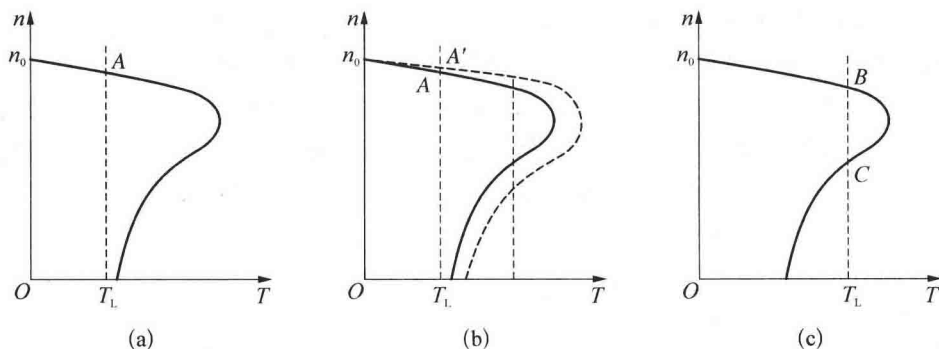


图 1-12 电力拖动系统工作点的稳定性判别

电磁转矩 T 瞬时增大, 故 $T > T_L$, $\Delta T > 0$, 从而使系统加速, 在转速上升过程中, 电动机转矩随之减小。如图 1-12(b) 到达 A' 点后, 电磁转矩和负载转矩又达到新的平衡, 系统以新的恒定转速 n_1' 运行。当扰动消除后, $T < T_L$ 时, 转速下降, 系统回复到原来的工作点上。同理, 如瞬时扰动引起转速稍有降低, 当扰动消失后, 则由于 $T > T_L$ 将使转速回复到原来的数值。因此系统在 A 点具备维持稳定运行的条件。图 1-12(c) 所示的是异步电动机带一较重的恒转矩负载, 使特性曲线出现两个交点 B 和 C 。如果系统运行在 B 点上, 显然能够维持稳定工作(判别跟前面 A 点讨论的情况一样)。但如果系统在 C 点上运行, 当突然出现瞬时扰动(如端电压增大)时, 电磁转矩 T 瞬时增大, 使电动机加速, n 的上升又导致 T 进一步的增大, 使电动机进一步加速, 直到 B 点为止才能进入恒速运行($T = T_L$)。反之, 如果端电压瞬时下降, 导致 $T < T_L$ 时, 电动机将从 C 点减速, 转速的降低又使 T 下降, 进一步使电动机减速, 直到转速 $n = 0$ 为止。所以在 C 点上, 拖动系统不具备维持稳定运行的条件。

由此可见, 电动机机械特性曲线与负载特性曲线的交点是系统的一个平衡点。系统维持稳定运行的条件为: 在该交点所对应的转速之上有 $T < T_L$, 而在交点所对应的转速之下 $T > T_L$ 。对恒转矩负载来说, 异步电动机机械特性曲线在最大转矩以下部分为不稳定工作区, 如图 1-12(c) 所示。

以上的分析可以推广到一般情况下电力拖动系统的稳定性判别: 系统在电动机机械特性曲线与负载特性曲线的交点能保持恒速运行, 即 $T = T_L$, 实现转矩平衡; 如果在该交点所对应的转速之上有 $T < T_L$, 而在交点所对应的转速之下 $T > T_L$ 。那么系统就具有恢复稳定工作的能力, 该点即为稳定工作点, 反之为不稳定工作点。即在该交点处有关系式

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn} \quad (1-10)$$

成立。

根据平衡稳定的条件, 在电力拖动系统中只要电动机机械特性的硬度小于负载特性的硬度, 该系统就能平衡而且稳定。对于带恒转矩负载拖动系统, 只要电动机机械特性的硬度是负值, 系统就能稳定运行, 而各类电动机机械特性的硬度, 大都是负值或具有负的区段, 因此, 在一定范围内电力拖动系统带恒转矩负载都能稳定运行。

1.4 多轴电力拖动系统的化简

前面讨论了单轴电力拖动系统问题, 但是, 实际的电力拖动系统往往是复杂的, 有的生产

机械需要通过传动机构进行转速匹配,因此增加了很多齿轮和传动轴;有的生产机械需要通过传动机构把旋转运动变成直线运动,如刨床、起重机等。对这样一些复杂的电力拖动系统,通常用折算的方法把复杂的多轴拖动系统等效为一个简单的单轴拖动系统,然后通过等效系统建立运动方程,使两者的动力学性能保持不变,以实现问题求解。一个典型的等效过程如图 1-13 所示,其基本思想是通过传动机构的力学折算把实际的多轴系统表示成等效的单轴系统。

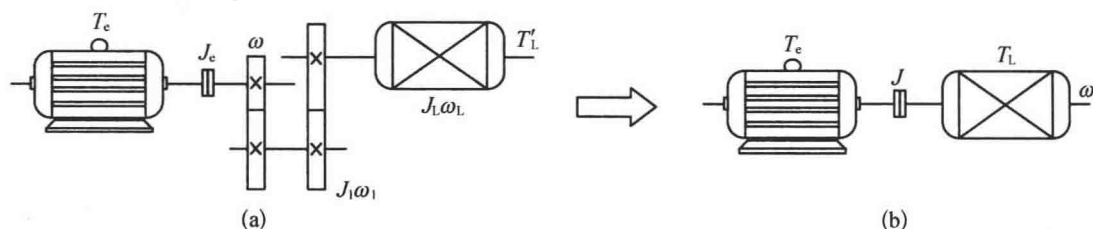


图 1-13 电力拖动系统的等效原理

(a) 实际的多轴系统 (b) 等效的单轴系统

在电力拖动系统中折算一般是把负载轴上的转矩、转动惯量或者是力和质量折算到电动机轴上,而中间传动机构的传动比在折算中就相当于一个变比系数。系统等效的原则是:保持两个系统传递的功率及储存的动能相同。其静态转矩的等效原则是:系统的传送功率不变。

如图 1-13 所示,设 T'_L 为折算前的负载转矩, T_L 为折算后的负载转矩,假如要把工作机构的转矩 T'_L 折算到电动机轴上,如果不考虑传动机构的损耗,工作机构折算前的机械功率为 $T'_L \omega_L$,折算后电动机轴上的机械功率为 $T_L \omega$,根据功率不变原则,应有折算前后工作机构的传递功率相等,即

$$T'_L \omega_L = T_L \omega \quad (1-11)$$

式中: ω_L 为生产机械的负载转速(rad/s); ω 为电动机转速(rad/s)。

如果要考虑传动机构的损耗,可在折算公式中引入传动效率 η_c 。

将图 1-13 中两轴系统中的电动机转动惯量 J_e 和生产机械的负载转动惯量 J_L ,折算到电动机轴的等效系统的转动惯量 J ,其等效原则是:折算前后系统的动能不变,即有

$$\frac{1}{2} J \omega^2 = \frac{1}{2} J_e \omega^2 + \frac{1}{2} J_L \omega_L^2 \quad (1-12)$$

经整理后得

$$J = J_e + J_L \left(\frac{\omega_L}{\omega} \right)^2$$

即

$$J = J_e + J_L \left(\frac{1}{j_L} \right)^2 \quad (1-13)$$

式中: $j_L = \omega/\omega_L$, 即某一拖动系统轴对电动机轴传动比。

从式(1-12)可知,单轴拖动系统的等效转动惯量 J 等于电动机转动惯量 J_e 加上折算前

拖动系统每一根轴的转动惯量除以该轴对电动机轴传动比 j_L 的平方和。当传动比 j_L 较大时, 该轴的转动惯量折算到电动机轴上后, 其数值占整个系统的转动惯量的比重就很小。

本章小结

通过本章的学习, 了解电力拖动系统的一般运动规律, 为进一步学习电力拖动系统在各种运行工况条件下的稳态和动态性能分析奠定理论基础。本章的学习要点在于:

- (1) 掌握电力拖动系统的运动方程, 并能熟练运用于电力拖动系统的分析和研究。
- (2) 了解生产机械的负载特性, 掌握各种负载的特点, 以便与电动机特性相匹配。
- (3) 掌握电力拖动系统的稳态分析方法, 并能用于分析电力拖动系统的稳定问题。
- (4) 了解复杂电力拖动系统的等效概念及应用折算方法进行系统简化。

复习思考题

- 1-1 什么是电力拖动系统? 它包括哪些部分?
- 1-2 电力拖动系统旋转运动方程式中各量的物理意义是什么? 它们的正负号如何确定?
- 1-3 转矩的动态平衡关系与静态平衡关系有什么不同?
- 1-4 拖动系统的飞轮矩 GD^2 与转动惯量 J 是什么关系?
- 1-5 把多轴电力拖动系统简化为单轴电力拖动系统时, 负载转矩的折算原则是什么? 各轴转动惯量的折算原则是什么?
- 1-6 生产机械的负载转矩特性归纳起来, 可以分为哪几种基本类型?
- 1-7 电力拖动系统稳定运行的条件是什么? 请举例说明。