



普通高等教育仪器类“十三五”规划教材



现代电气控制与 可编程控制器

薛士龙 编 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育仪器类“十三五”规划教材

现代电气控制与可编程控制器

薛士龙 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书针对工程应用型教学综合改革的需要,采用工学结合、注重应用的原则编写而成。全书共分8章,主要内容有电力拖动基础、低压电器及基本控制线路、可编程控制器基本组成和工作原理、PLC的基本编程指令、步进编程指令、功能指令等。为了及时反映PLC及其应用技术飞速发展的现状,本书增加了PLC网络通信技术方面的内容。

本书可以作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,也适合从事电气控制的工程技术人员使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

现代电气控制与可编程控制器 / 薛士龙编著. —北京: 电子工业出版社, 2017.3

普通高等教育仪器类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-30902-1

I. ①现… II. ①薛… III. ①电气控制—高等学校—教材②可编程序控制器—高等学校—教材
IV. ①TM921.5②TM571.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 022297 号

策划编辑: 赵玉山

责任编辑: 赵玉山

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 16 字数: 410 千字

版 次: 2017 年 3 月第 1 版

印 次: 2017 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 37.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhaoy@phei.com.cn。

普通高等院校仪器类“十三五”规划系列

教材编委会

主 任：丁天怀（清华大学）

委 员：陈祥光（北京理工大学）

王 祁（哈尔滨工业大学）

王建林（北京化工大学）

曾周末（天津大学）

余晓芬（合肥工业大学）

侯培国（燕山大学）

前言

本书从工程出发,结合教学需要,较系统地介绍了各种低压电器和智能控制电器的工作原理及其在控制线路中的作用,并详细介绍了传统继电器控制系统中应用的三相笼型异步电动机的一些基本控制规律,以及启动、调速、制动的典型控制线路;以应用较广泛的三菱小型可编程控制器为例,对可编程控制器的工作原理、硬件结构、编程元件与基本编程指令、步进编程指令、功能指令、通信功能和现场总线等进行了较详细的介绍,同时给出了大量的应用实例,使读者对程序设计方法和设计步骤有深刻的理解。

电气控制与可编程控制器是电气类本科专业的一门专业必修课程。通过本课程的学习,学生可以获得电气控制与可编程控制器的基本知识和基本技能,培养分析和解决实际问题的能力,并为今后从事电气工程领域的技术工作打下基础。

本书可以作为高等院校自动化、电气工程及其自动化、测控技术与仪器、数控应用技术、机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、机电一体化等专业相关课程的教材,也可作为电工技师和职工岗位培训教材,也适合从事电气控制的工程技术人员使用。

本书由薛士龙编著。本书的编写得到了上海海事大学教务处和电气自动化系各位同仁的指导与帮助,在此表示由衷的感谢和敬意。

由于水平有限,编写时间仓促,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2016年10月于上海海事大学

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 电力拖动基础	(1)
1.1 电力拖动系统运行的基本概念	(1)
1.1.1 生产机械的负载转矩特性	(1)
1.1.2 电动机的工作状态及电力拖动系统运行方程式	(2)
1.2 三相异步电动机的启动、制动与调速	(4)
1.2.1 异步电动机的启动	(4)
1.2.2 异步电动机的制动	(7)
1.2.3 异步电动机的调速	(11)
1.3 直流电动机的启动、制动与调速	(14)
1.3.1 直流电动机的启动	(14)
1.3.2 直流电动机的制动	(15)
1.3.3 直流电动机的调速	(17)
习题及思考题	(18)
第 2 章 常用低压电器	(20)
2.1 常用低压电器的分类与作用	(20)
2.1.1 常用低压电器的分类	(20)
2.1.2 低压控制电器的作用	(21)
2.2 主令电器	(21)
2.2.1 控制按钮	(21)
2.2.2 行程开关	(22)
2.2.3 万能转换开关	(24)
2.2.4 主令控制器	(25)
2.3 断路器	(26)
2.3.1 结构和工作原理	(26)
2.3.2 低压断路器典型产品	(27)
2.3.3 低压断路器的选用原则	(28)
2.4 熔断器	(28)
2.4.1 常用的熔断器	(28)
2.4.2 熔断器的选择	(29)
2.5 接触器	(30)
2.5.1 触头系统	(31)
2.5.2 电磁机构	(31)
2.5.3 灭弧装置	(33)
2.5.4 接触器的型号和技术参数	(34)
2.6 继电器	(35)

2.6.1	电磁式继电器	(35)
2.6.2	磁电式继电器	(37)
2.6.3	时间继电器	(37)
2.6.4	热继电器	(39)
2.6.5	速度继电器	(39)
2.6.6	干簧继电器	(40)
2.6.7	固态继电器	(40)
2.6.8	热敏电阻式温度继电器	(41)
2.6.9	可编程通用逻辑控制继电器	(41)
2.7	电磁制动器	(42)
2.7.1	圆盘式电磁制动器	(42)
2.7.2	抱闸式电磁制动器	(42)
2.8	软启动器	(43)
2.8.1	软启动器的工作原理和组成	(44)
2.8.2	软启动器的控制功能	(45)
2.8.3	软启动器的保护功能	(47)
2.9	变频器	(47)
2.9.1	交流异步电动机变频调速原理	(47)
2.9.2	变频器的控制方式	(48)
2.9.3	几个重要参数的设定	(49)
2.9.4	变频调速的应用	(50)
	习题及思考题	(52)
第3章	基本电气控制线路	(53)
3.1	电气控制线路基本知识	(53)
3.1.1	电气图中的图形符号	(53)
3.1.2	电气图中的文字符号	(53)
3.1.3	电气控制线路图的类型	(54)
3.1.4	电动机的基本保护环节	(55)
3.2	三相交流异步电动机的基本控制线路	(57)
3.2.1	点动控制	(57)
3.2.2	连续控制	(57)
3.2.3	点动和连续结合控制	(58)
3.2.4	互锁控制	(59)
3.2.5	多地点控制	(59)
3.2.6	行程控制	(59)
3.2.7	顺序控制	(60)
3.3	交流三相异步电动机的启动控制	(61)
3.3.1	笼型异步电动机降压启动控制	(61)
3.3.2	绕线式异步电动机转子串电阻降压启动控制电路	(62)
3.4	三相异步电动机的制动控制线路	(64)
3.4.1	反接制动控制线路	(64)

3.4.2	能耗制动控制线路	(65)
3.5	交流三相异步电动机的变极调速控制	(66)
3.5.1	交流三相异步电动机调速方法	(66)
3.5.2	交流三相异步电动机变极调速线路	(66)
	习题及思考题	(70)
第4章	可编程控制器概述	(72)
4.1	可编程控制器的组成和指标	(72)
4.1.1	可编程控制器发展	(72)
4.1.2	可编程控制器的组成	(76)
4.1.3	可编程控制器的主要性能指标	(79)
4.1.4	可编程控制器的编程语言	(79)
4.2	可编程控制器的工作原理	(81)
	习题及思考题	(84)
第5章	三菱FX系列PLC性能和指令	(85)
5.1	三菱FX系列可编程控制器概述	(85)
5.1.1	三菱FX系列可编程控制器系统配置和性能指标	(85)
5.1.2	三菱FX系列PLC内部可编程器件	(89)
5.2	三菱FX系列可编程控制器基本指令和应用	(95)
5.2.1	可编程控制器的基本指令	(95)
5.2.2	梯形图编程规则	(103)
5.2.3	基本指令编程应用	(105)
5.3	三菱FX系列可编程控制器步进程控指令	(112)
5.3.1	状态寄存器和状态转移图	(113)
5.3.2	步进指令	(113)
5.3.3	可编程控制器状态编程方法	(115)
5.3.4	步进指令应用	(117)
5.4	三菱FX系列可编程控制器功能指令	(119)
5.4.1	功能指令的基本格式	(119)
5.4.2	功能指令介绍	(121)
	习题及思考题	(163)
第6章	三菱FX2N系列PLC特殊功能模块	(168)
6.1	模拟量输入输出模块	(168)
6.1.1	模拟量输入模块FX2N-4AD	(168)
6.1.2	模拟量输入模块FX2N-4AD-PT	(171)
6.1.3	模拟量输入模块FX2N-4AD-TC	(174)
6.1.4	模拟量输出模块FX2N-4DA	(176)
6.2	高速计数模块FX2N-1HC	(179)
6.2.1	FX2N-1HC性能指标和特性	(179)
6.2.2	编程与应用	(184)
6.3	定位控制模块	(184)
6.3.1	脉冲输出模块FX2N-1PG	(185)

6.3.2	脉冲输出模块 FX2N-10PG	(187)
6.3.3	定位控制器 FX2N-10GM 和 FX2N-20GM	(189)
6.4	串口通信模块 FX2N-232-BD	(189)
6.4.1	性能指标	(189)
6.4.2	编程及应用	(190)
第 7 章	FX 系列可编程控制器通信及应用	(192)
7.1	FX 系列 PLC 串口通信	(192)
7.1.1	通信方式	(192)
7.1.2	FX 系列 PLC 和计算机的通信命令字和通信格式	(194)
7.2	FX 系列网络通信	(197)
7.2.1	几种典型的现场总线	(197)
7.2.2	开放式现场总线 CC-Link	(199)
7.2.3	FX 系列 CC-Link 主站模块 FX2N-16CCL-M	(201)
7.2.4	CC-Link 接口模块 FX2N-32CCL	(204)
7.2.5	CC-Link 接口模块 FR-A5NC	(204)
7.2.6	FX 系列 PLC 为主站时与远程站之间的通信	(205)
7.3	开放式现场总线 CC-Link 应用	(206)
7.3.1	CC-Link 开放式现场总线数据链路建立	(206)
7.3.2	主站与远程设备站的通信程序	(208)
	习题及思考题	(210)
第 8 章	可编程控制器系统设计及应用	(211)
8.1	可编程控制器系统设计	(211)
8.1.1	可编程控制器系统设计的基本原则	(211)
8.1.2	可编程控制器系统设计的一般步骤和内容	(211)
8.1.3	可编程控制器的选型与硬件配置	(213)
8.1.4	节省 I/O 点数的方法	(215)
8.1.5	可编程控制器应用中需注意的若干问题	(217)
8.2	可编程控制器应用	(218)
8.2.1	可编程控制器在分拣系统中的应用	(218)
8.2.2	PLC 在全自动洗衣机控制系统中的应用	(222)
8.2.3	PLC 在机械手控制系统中的应用	(226)
	习题及思考题	(229)
附录 A	FX 系列 PLC 功能指令一览表	(230)
附录 B	特殊继电器和特殊寄存器一览表	(236)
附录 C	FX 系列可编程控制器的编程软件 SWOPC-FXGP/WIN-C	(240)
	参考文献	(247)

第1章

电力拖动基础

1.1 电力拖动系统运行的基本概念

电动机在电力拖动系统中作为原动机驱动生产机械工作。最简单的电力拖动系统是电动机与生产机械直接联轴，如通风机、离心泵等机械，称为单轴电力拖动系统；而在更多的场合中，电动机是经传动机构与生产机械相连的，如起货机等，称为多轴系统。生产机械所拖动的负载也有旋转、直线和往复等不同的运动形式。无论系统为单轴还是多轴、负载的运动形式为直线或旋转，为了分析的方便，通常都把实际多轴传动的拖动系统通过折算的方法等效成单轴系统，对于电动机而言，负载最终是以阻转矩的形式作用于电动机转轴上的，这一阻转矩称为负载转矩。

电力拖动系统有两种运行状态：一是相对稳定状态，此时电动机以恒速旋转或静止不动；二是过渡状态，如电动机启动、制动及转向改变时的转速处于加速或减速的显著变动状态。决定这两种运行状态的因素是电动机的电磁转矩 T 和加于电动机轴上的负载转矩 T_L 。因此，分析、研究电力拖动系统运行状态的主要依据是：1) 电动机的机械特性 $n=f(T)$ ，即电动机的转速随电磁转矩变化的规律；2) 生产机械的负载转矩特性 $n=f(T_L)$ ，即生产机械的转速与负载转矩之间的关系。

1.1.1 生产机械的负载转矩特性

电动机拖动生产机械运行时，它所产生的电磁转矩 T 必须克服生产机械加在它的轴上的负载转矩 T_L 。生产机械作用在电动机轴上的负载转矩就其性质（转矩方向）而言，可分为反抗性负载转矩和位能性负载转矩。

反抗性负载转矩的特点是，不论电动机是正转还是反转，它总是起着阻碍电动机旋转的作用。当电动机改变旋转方向时，反抗性负载转矩的方向也随之改变。各类泵、通风机等均属于这一类。

位能性负载转矩的特点是，负载转矩总是保持一个固定的作用方向，而与电动机旋转方向的改变无关。因此，当电动机以正方向旋转时，它起着阻碍电动机运动的作用，而当电动机反方向旋转时，则推助电动机转动。起货机、起锚机等属于这一类负载。

当生产机械的转速变化时，它加在电动机轴上的负载转矩的大小也会按一定规律变化，即 $n=f(T_L)$ 或 $T_L=f(n)$ 。船舶生产机械的负载转矩一般可分为以下三种主要类型。

1. 恒转矩负载特性

恒转矩负载特性中，负载转矩与转速无关。即

$$T_L = \text{定值}$$

恒转矩负载特性具有反抗性，例如机床的平移机构；也有位能性的，如起货机械等，其负载特性曲线如图 1-1 所示。

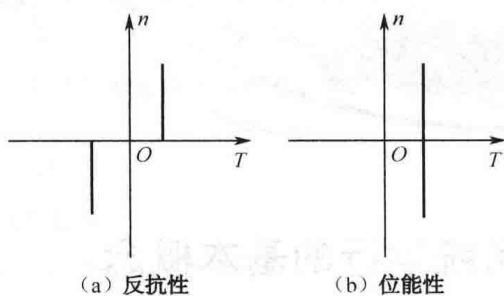


图 1-1 恒转矩负载特性曲线

2. 通风机负载特性

通风机类型的负载转矩大致与转速的二次方成正比，即

$$T_L = kn^2$$

式中， k 为比例系数，它的特性曲线是一抛物线。通风机负载特性一般都是反抗性的，如图 1-2 所示，其第 3 象限内的曲线（反转时）与第 1 象限的曲线是对称的。船舶上的通风机、离心泵、螺旋桨等生产机械都具有这类特性。

3. 恒功率负载特性

恒功率负载特性的负载转矩与其角速度的乘积基本保持不变，即

$$T_L n = \text{定值}$$

或

$$T_L = \frac{k}{n}$$

式中， k 为比例系数，其特性曲线是一双曲线，如图 1-3 所示。工程救捞拖轮上的“自动收缆机”具有这种特性。收缆时，缆绳的张力与线速度的乘积基本保持不变。

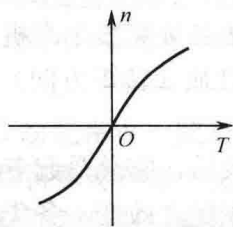


图 1-2 通风机负载特性

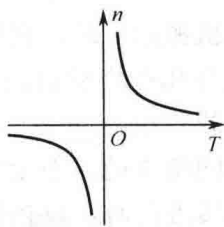


图 1-3 恒功率负载特性

1.1.2 电动机的工作状态及电力拖动系统运行方程式

1. 电动机的工作状态

电动机的运行状态根据其电磁转矩与转速方向的关系，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,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1、3象限;而制动运行时, n 总与 T 的方向相反,曲线位于第2与第4象限。

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 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,故负载特性曲线在坐标的第1、3象限;而对于位能性负载,则特性曲线也可能出现在第2或第4象限。

2. 电力拖动系统运动方程式

根据刚体运动定律,电力拖动系统运行的任何瞬间,作用于电动机轴上的转矩必须保持平衡,即

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

式中, J 是拖动系统中折算到电动机轴上的总转动惯量, $J \frac{d\Omega}{dt}$ 是系统的转动惯量储存的动能所产生的加速转矩(或称动态转矩);而 $\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$ 则是以飞轮矩 GD^2 作为系统转动惯量的量度时的加速转矩的另一种表达式。若以 ΔT 简单表示加速转矩,则电力拖动系统的运动方程式为

$$T - T_L = \Delta T \quad (1-2)$$

式中, T 及 T_L 的正负取值由它们与设定转速的正方向关系决定。即假定 n 以逆时针方向为正方向时,则电动机的电磁转矩 T 逆时针时取正,顺时针时取负;而负载转矩 T_L 逆时针时取负,顺时针时取正。加速转矩 ΔT 的正负则由 T 和 T_L 的代数和来确定。

当 $T=T_L$ 时, $\Delta T=0$ ($dn/dt=0$),则 $n=0$ 或 $n=\text{定值}$,拖动系统处于静止状态或恒速运行,为稳定运行状态;

当 $T>T_L$ 时, $\Delta T>0$ ($dn/dt>0$),拖动系统处于加速的过渡过程中;

当 $T<T_L$ 时, $\Delta T<0$ ($dn/dt<0$),拖动系统处于减速的过渡过程中。

3. 电力拖动系统维持稳定运行的条件

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。当干扰消失以后,若系统能自动恢复到原来的工作点上,则系统就具备维持稳定运行的条件。

图1-4(a)所示的是置于同一 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,即电动机带一转矩值为 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 $\Delta T=0$,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,则需进一步分析。

如果拖动系统原来运行在 A 点上,突然出现瞬时扰动,比如电动机端电压升高,则电动机的电磁转矩 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。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, 系统恢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 $T > T_L$, 将使转速恢复到原来的数值。因此系统在 A 点具备维持稳定运行的条件。

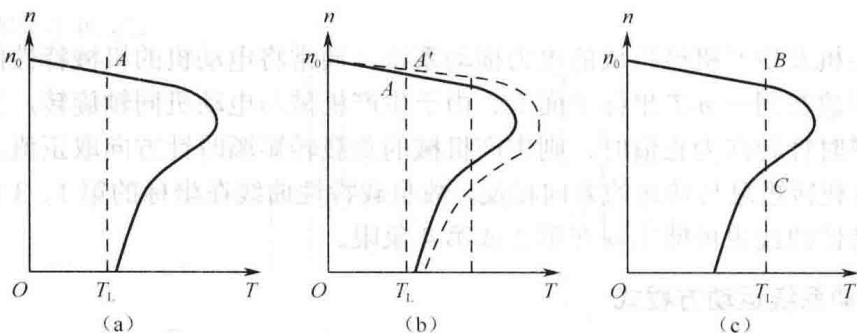


图 1-4 电力拖动系统工作点的稳定性判别

但是, 两条特性曲线的交点并非都是系统的稳定工作点。图 1-4 (c) 所示为异步电动机驱动较重的恒转矩负载, 此时特性曲线出现两个交点 B 和 C 。如果系统运行在 B 点上, 显然它能够稳定工作 (稳定性判别跟前面 A 点讨论的情况一样)。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 的上升导致 T 进一步增大, 又使电动机进一步加速, 直到 B 点为止才进入恒速运行 ($T=T_L$)。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。所以选择在 C 点上工作, 拖动系统没有自动恢复稳定运行的能力, 即 C 点是系统运行的不稳定工作点。由此可见对恒转矩负载来说, 异步电动机机械特性曲线在临界转差率以下部分为不稳定工作区。

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; 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有 $T > T_L$, 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。

1.2 三相异步电动机的启动、制动与调速

1.2.1 异步电动机的启动

电动机的启动, 是指电动机接通电源后, 转速由零上升到稳定转速的整个动态过程。电动机启动时的电磁转矩 T 必须大于生产机械加在电动机轴上的负载转矩 T_L , 否则电动机将无法启动, 甚至可能反被生产机械的负载转矩倒拉导致反转。

电动机启动过程的时间不长, 但对电动机本身和电力系统的影响却很大。特别是船舶电站的容量有限, 船上有些辅机拖动系统所采用的电动机的功率接近电站发电机的单机功率, 若直接启动, 其启动电流将引起电网电压的很大波动, 从而影响其他用电设备的正常运行。所以对启动频繁和大容量电动机的启动, 必须设法缩短启动时间, 减小或限制启动电流。

实际生产过程中, 对异步电动机的启动有一定的要求。为了缩短启动时间、提高生产效率,

一般要求异步电动机有足够大的启动转矩,但启动转矩的加大,必然导致启动电流增大;为了保证电动机以及生产机械的安全运行和减小对电网的冲击,通常又要求限制启动电流以及启动转矩。所以电动机的启动必须根据拖动系统的具体情况统筹兼顾这两方面的因素。实际应用中异步电动机有着多种启动方法。

1. 鼠笼式三相交流异步电动机全电压直接启动

全电压直接启动就是将电动机的定子绕组经开关设备直接与三相额定电源接通。电动机直接启动具有设备简单、操作方便等优点。

图 1-5 所示为一台鼠笼式三相异步电动机带一通风机电阻负载的特性曲线。启动时电动机的电磁转矩 $T=T_{st}$, $T_L=T_{Lst}$, 根据拖动系统运动方程式,此时 $\Delta T>0$, 拖动系统由静止开始加速启动。在加速过程中 T 的变化规律是从 a 点沿曲线①变化到 b 点, T_L 的变化规律是从 c 点沿曲线②变化到 b 点。在转速从零加速到 n_b 的过程中, T 始终大于 T_L 直到 b 点, $T=T_L$, $\Delta T=0$, 启动过程结束, 拖动系统以转速 n_b 稳定运行于 b 点。

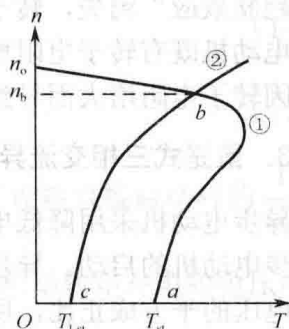


图 1-5 三相异步电动机特性曲线

在全电压直接启动时,电动机定子绕组接通电源瞬间,转子由于惯性不能立即转动,此时转子电势和电流较大,因而定子电流也较大,通常启动电流 $I_{st}=(5\sim 8)I_N$ 。由于鼠笼式异步电动机的结构简单,过载能力较强,且一般启动过程时间都较短,启动电流一般不会对电动机造成直接的损害,因此就电动机本身来说,是允许直接启动的。但另一方面,对于大容量的鼠笼式电动机直接启动,由于启动电流大和功率因数低,会引起较大的船舶电网电压降落,影响其他用电设备的正常工作。因此,从我国《钢质海船建造入级规范》(以下简称《入级规范》)所限定的电网电压降的角度来确定船舶上的鼠笼式异步电动机能否直接启动。目前的交流船舶电站容量较大,并装有性能良好的自动电压调整器,机舱中各类容量在发电机单机容量 60% 以下的鼠笼式异步电动机几乎都采用全电压直接启动。

2. 改善启动性能的特殊三相异步电动机

普通鼠笼式异步电动机虽然启动时电流很大,但启动时功率因数较低,启动转矩并不很大。异步电动机可通过采用如图 1-6 所示的双鼠笼式或如图 1-7 所示的深槽式等特殊结构的转子,以改善全电压直接启动性能。这两种类型的异步电动机特点是启动转矩大,而启动电流较小。

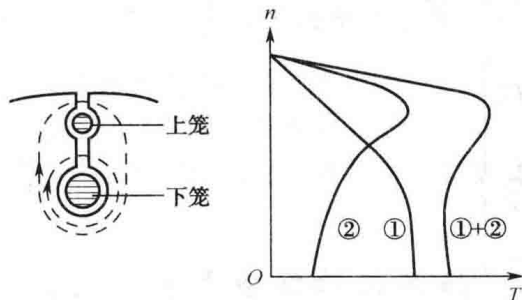


图 1-6 双鼠笼式异步电动机的转子槽形及机械特性

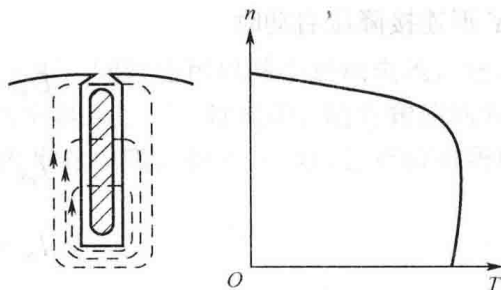


图 1-7 深槽式异步电动机的转子槽形及机械特性

双鼠笼式异步电动机的转子上有两套笼型导条,分上笼与下笼。两笼间由狭长的缝隙隔开。与下笼相较链的漏磁通(即下笼的漏抗)比上笼的大得多。上笼通常用电阻系数较大的黄铜或

铝青铜制成，且导条截面较小，故电阻较大；下笼导条截面较大，用紫铜等电阻系数较小的材料制成，故电阻较小；而深槽式转子的槽形窄而深，深槽中的导条可以看作是很多根导线并联嵌在槽内。槽漏磁的分布在槽底较密，而在槽口较疏，因此导条靠近槽底部分的漏电抗要比槽口部分的漏电抗大。启动时，转子频率较高，电流的“趋肤效应”使转子电流大部分集中在双鼠笼式的上笼，或深槽式转子的槽口部分，使得转子绕组呈现出较大的电阻值，而相比普通电动机具有较大的启动转矩；启动过程结束，电动机进入正常运行后，转子频率变得很小，电流的“趋肤效应”消失，转子绕组所呈现的电阻值与普通电动机相仿。因此，双鼠笼式和深槽式异步电动机既有转子电阻增大所带来的启动转矩增大、启动电流减小的优点，又可避免正常运行时因转子电阻增大而导致电动机的特性曲线变软。

3. 鼠笼式三相交流异步电动机的降压启动

异步电动机采用降低电源电压启动是限制启动电流的一种常用方法。船舶上通常用于大容量异步电动机的启动。异步电动机在电源电压频率以及其他参数不变的情况下，其电磁转矩与外施电压的平方成正比，所以降压启动时启动转矩大大减小，启动时间较长，它一般用在轻载启动的场合。

1) 星形—三角形 (Y— Δ) 换接降压启动

此方法适用于正常运行时电动机定子绕组为三角形连接（即定子每相绕组额定电压为电网线电压）的异步电动机，且负载为轻载或空载启动的拖动系统。启动时先将电动机的定子绕组星形连接后与电源接通，待电动机转速升高、电流减小后，再通过继电接触器等开关装置将绕组改为三角形连接，进入正常运行。图 1-8 所示为星形—三角形两种方式连接时电压、电流的比较。

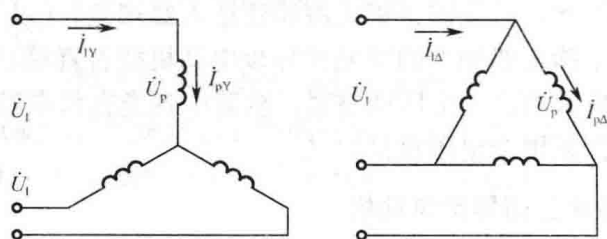


图 1-8 定子绕组 Y 形连接和 Δ 形连接时电压、电流的比较

设电源线电压为 U_l ，电动机每相绕组的等效阻抗为 Z 。比较星形连接和三角形连接时定子每相绕组上的电压、绕组中的电流以及电动机的线电流可得：

Y 形连接降压启动时

$$\left. \begin{aligned} U_Y &= U_p = \frac{1}{\sqrt{3}} U_l \\ I_{pY} &= \frac{U_p}{Z} = \frac{U_l}{\sqrt{3}Z} \\ I_{lY} &= I_{pY} = \frac{U_l}{\sqrt{3}Z} \end{aligned} \right\}$$

而 Δ 形连接直接启动时

$$\left. \begin{aligned} U_{\Delta} &= U_1 \\ I_{p\Delta} &= \frac{U_{\Delta}}{Z} = \frac{U_1}{Z} \\ I_{l\Delta} &= \sqrt{3}I_{p\Delta} = \sqrt{3}\frac{U_1}{Z} \end{aligned} \right\}$$

由此可得

$$U_Y = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{\Delta} \quad (1-3)$$

$$I_{IY} = \frac{1}{3}I_{l\Delta} \quad (1-4)$$

因此, 采用 Y 形连接降压启动, 定子每相绕组上电压降低为 Δ 形连接直接启动时的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$; 而电动机的线电流为直接启动时的 $\frac{1}{3}$ 。另一方面, 由于异步电动机的启动转矩与电源电压的平方成正比, 所以在定子绕组降压 $\frac{1}{\sqrt{3}}$ 的情况下启动, 电动机的启动转矩也将减小为直接启动时的 $\frac{1}{3}$ 。

2) 自耦变压器降压启动

正常运行时星形连接的大容量异步电动机, 可采用自耦变压器实现降压启动。启动时三相自耦变压器的原边绕组接电源, 而副边与电动机的定子绕组相连, 电动机在经过变压器降压的电压下启动。其降压幅度为变压器的变比 K 。若设电动机全电压直接启动时的电流 (即电网提供的线电流) 为 I_{st} , 则降压启动时电动机的启动电流为 I_{st}/K , 该电流也是变压器副边绕组中的电流; 而此时电网提供的线电流, 即变压器原边绕组中的电流为

$$I'_{st} = \frac{1}{K} \frac{I_{st}}{K} = \frac{I_{st}}{K^2} \quad (1-5)$$

由此可见, 对采用变比为 K 的自耦变压器降压启动, 启动时电网提供的电流是直接启动时的 $1/K^2$ 。同理, 由于降压启动, 启动转矩将为直接启动时的 $1/K^2$ 。实际应用中, 自耦变压器的副边绕组一般有三个不同变比的抽头 (如 $K=0.55$ 、 0.64 、 0.73 等) 以满足不同负载对不同降压幅度的启动要求。

4. 绕线式异步电动机转子串电阻启动

绕线式异步电动机转子串电阻不仅可以增大启动转矩, 同时还可以减小启动电流, 这是改善电动机启动性能的一种有效方法。启动时, 转子回路中串入三相对称电阻, 随着转速的升高, 通过继电器或频敏变阻器等自动装置逐级切除外部串接电阻, 进入正常运行后应将所串电阻全部切除。

1.2.2 异步电动机的制动

当电动机在运行过程中, 若其电磁转矩的方向与转子转速的方向相反, 则为电动机的制动运行状态。对电力拖动系统而言, 此时电磁转矩成了制动转矩, 其产生的制动作用称为电气制动。与机械制动相比, 电气制动具有无机械磨损、制动平稳、容易实现自动控制等优点。电气制动可用于拖动系统减速或加速停车、起货机等位能性负载的匀速下降等场合。