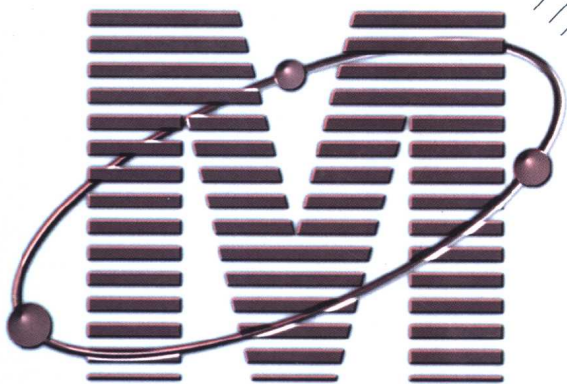




煤炭技工学校通用教材



矿山电力拖动与控制

煤炭工业出版社

煤炭技工学校通用教材

矿山电力拖动与控制

全国煤炭技工教材编审委员会 编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书首先介绍了电力拖动的基本知识、常用控制电器、电动机的基本控制方法，以及可编程控制器的基本原理、基本指令和编程方法；然后介绍了矿山排水、压气、通风设备的电控系统和目前应用较多的典型交流、直流提升控制系统的基本工作原理；最后介绍了电动机的选择原则及几种用途电动机的选择方法。本书既可作为煤炭技工学校的教材，又可作为机电工程技术人员及工人的培训教材。

煤炭技工学校通用教材

矿山电力拖动与控制

全国煤炭技工教材编审委员会 编

责任编辑：姜庆乐

*

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址：www.cciph.com.cn

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm×1092mm¹/₁₆ 印张 24¹/₂ 插页 8

字数 581 千字 印数 3,101-6,100

2002 年 1 月第 1 版 2003 年 7 月第 2 次印刷

ISBN 7-5020-2055-1/TM7

社内编号 4826 定价 35.80 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，本社负责调换

全国煤炭技工教材编审委员会

主任委员 刘 富

副主任委员 仵自连 刘同良 张贵金 韩文东 范洪春 刘荣林

雷家鹏 曾宪州 夏金平 张瑞清

委 员 (按姓氏笔划为序)

于锡昌	牛麦屯	牛宪民	王亚平	王自学	王郎辉
甘志国	石丕应	仵自连	任秀志	刘同良	刘荣林
刘振涛	刘 富	刘 鉴	刘鹤鸣	吕军昌	孙东翔
孙兆鹏	邢树生	齐福全	严世杰	吴庆丰	张久援
张 君	张祖文	张贵金	张瑞清	李 玉	李庆柱
李祖益	李家新	杨 华	辛洪波	陈家林	周锡祥
范洪春	赵国富	赵建平	赵新社	夏金平	高志华
冀立谦	储可奎	曾宪州	程光玲	程建业	程彦涛
韩文东	雷家鹏	樊玉亭			

前 言

为了加快煤炭技工学校的教学改革步伐，不断适应社会主义市场经济发展和劳动者就业的需要，加速煤炭工业技能型人才的培养，促进煤炭工业现代化建设的发展和科学技术的进步，在全国职业培训教学工作指导委员会的指导下，全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会，以全国煤炭技工学校“八五”教材建设规划为基础，研究制定了全国煤炭技工学校新时期教材建设规划，并列入了国家劳动和社会保障部制定的全国技工学校教材建设规划，劳动和社会保障部以《关于印发1999年度全国职业培训教材修订开发计划的通知》（劳社培就司函（1999）第15号）下发全国。这套教材共59种，其中技术基础课教材43种，实习课教材16种，目前正在陆续出版发行之中。

这套教材主要适用于煤炭技工学校教学、工人在职培训、就业前培训，也适合具有初中文化程度的工人自学和工程技术人员参考。

《矿山电力拖动与控制》是这套教材中的一种，是根据经劳动和社会保障部批准的全国煤炭技工学校统一教学计划、教学大纲的规定编写的，经全国职业培训教学工作指导委员会煤炭专业委员会审定，并于2000年被劳动和社会保障部认定为合格教材，是全国煤炭技工学校教学、工人在职培训、就业前培训的必备的统一教材。

本教材由阳泉煤炭技工学校宋密科同志编写，新汶矿务局技工学校和爱国同志主审。在本教材的编写过程中，得到了学校领导和本单位教师及煤矿有关工程技术人员的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，书中难免有不当之处，恳请广大读者批评指正。

全国煤炭技工教材编审委员会

2001年9月29日

目 录

第一章 电力拖动的基本知识	1
第一节 概 述	1
一、电力拖动系统的组成及运动方程式.....	1
二、机械特性.....	3
三、拖动系统的稳定工作点.....	5
第二节 直流电动机的电力拖动	7
一、直流他励电动机的机械特性和起动.....	7
二、直流他励电动机的制动.....	11
三、直流他励电动机的调速.....	16
四、直流串励电动机的机械特性.....	18
第三节 交流异步电动机的电力拖动	23
一、交流异步电动机的机械特性.....	24
二、交流异步电动机的起动.....	28
三、交流异步电动机的制动.....	36
四、交流异步电动机的调速.....	42
习题与思考题.....	54
第二章 常用控制电器	56
第一节 接触器与继电器	56
一、接触器.....	56
二、继电器.....	63
第二节 主令电器及保护、组合电器	68
一、主令电器.....	68
二、保护电器.....	71
三、组合电器.....	78
第三节 磁放大器	82
一、磁放大器的原理与结构.....	82
二、磁放大器的主要参数.....	85
三、磁放大器的反馈.....	86
四、磁放大器的特性及技术数据.....	88
第四节 旋转控制电器	91
一、自整角机.....	91

二、测速发电机	95
三、交磁扩大机	99
习题与思考题	102
第三章 电动机的控制	103
第一节 电气线路图	103
一、电路图	103
二、接线图	109
第二节 鼠笼式电动机的控制	110
一、直接起动控制	111
二、降压起动控制	114
第三节 绕线式异步电动机的控制	124
一、转子回路串频敏变阻器起动控制	124
二、转子回路串电阻起动控制	126
习题与思考题	137
第四章 可编程控制器	138
第一节 可编程控制器基本工作原理	139
一、可编程控制器的控制原理	139
二、可编程控制器的工作原理	141
第二节 可编程控制器的技术参数	146
一、可编程控制器的技术性能	146
二、可编程控制器内的编程元件	147
第三节 可编程控制器的基本指令及应用	157
一、基本指令	157
二、基本指令的应用	169
第四节 可编程控制器的编程方法	176
一、程序编制	176
二、编程器及其应用	187
习题与思考题	197
第五章 排水、压气、通风设备的电气控制	198
第一节 排水设备的电气控制	198
一、排水设备的控制要求	198
二、水泵的控制单元	199
三、单台大型水泵控制线路	203
第二节 压气设备的电气控制	205
一、空压机的控制要求及保护元件	205
二、空压机控制线路	208

第三节 通风设备的电控系统	211
一、矿井主通风设备电控系统的基本要求	212
二、同步电动机的功角特性	213
三、同步电动机的起动	219
四、带励磁机的同步电动机控制线路	221
五、晶闸管励磁的同步电动机控制线路	223
习题与思考题	232
第六章 主提升交流拖动电控系统	233
第一节 交流提升系统的控制环节	233
一、提升工作图及提升控制	233
二、动力制动装置及控制	238
三、微电动机拖动装置	245
四、可调闸及其控制	245
五、提升机的速度控制及深度指示装置	249
第二节 TKD-A 型提升机电控线路	257
一、电路的组成	257
二、提升机控制	264
三、微电动机拖动控制	270
第三节 多绳摩擦提升机电控系统	272
一、控制系统的组成	273
二、提升机控制	275
第四节 提升信号	277
一、矿井提升信号的基本要求	277
二、提升信号电路	278
习题与思考题	283
第七章 主提升直流拖动电控系统	284
第一节 发电机—电动机组直流拖动系统及控制环节	284
一、系统的组成及机械特性	284
二、电机扩大机控制环节	287
三、磁放大器控制环节	289
四、速度负反馈和自消磁环节	292
五、电流截止负反馈环节	294
六、速度给定环节	296
第二节 发电机—电动机组直流提升控制线路	302
一、电路的组成	302
二、提升机控制	310
第三节 晶闸管变流器—电动机直流拖动系统及控制环节	313

一、直流拖动系统的组成及晶闸管变流电路·····	313
二、机械特性·····	319
三、变流装置的接线方式及电抗器·····	322
四、晶闸管变流器—电动机拖动系统控制环节·····	328
第四节 晶闸管变流器—电动机直流提升系统控制电路·····	343
一、电动机电枢回路及控制·····	344
二、电动机励磁回路及控制·····	355
三、控制电路工作过程·····	360
第五节 带式输送机直流拖动电控系统·····	364
一、带式输送机的控制要求及差动原理·····	364
二、感应调压器—硅整流—直流电动机控制电路·····	365
习题与思考题·····	370
第八章 电动机的选择·····	372
第一节 电动机的选择原则及其发热与冷却·····	372
一、电动机的选择原则·····	372
二、电动机的发热与冷却及工作方式·····	374
第二节 排水、压气、通风、提升设备电动机的选择·····	377
一、矿井主排水泵电动机的选用及电耗·····	377
二、空气压缩机电动机的选用及电耗·····	378
三、通风设备电动机的选用及电耗·····	379
四、提升机电动机的选择与电耗·····	379
习题与思考题·····	382

第一章 电力拖动的基本知识

第一节 概 述

电力拖动是以电力为原动力，通过电气设备（如电动机等）带动生产机械来完成一定的生产任务。矿山生产所用的生产机械，如提升机、通风机、水泵、空气压缩机等都是采用电动机拖动。采用电力拖动具有以下优点：

- (1) 电能输送方便、经济，便于分配；
- (2) 可满足不同类型生产机械的需要，并且拖动效率高；
- (3) 拖动性能好，能达到生产工艺要求的最佳工作状态；
- (4) 能进行远距离监视、测量和控制，便于集中管理，容易实现生产过程的自动化。

随着现代科学技术的发展、创新，电力拖动系统将会发生突飞猛进的变化。特别是新型控制元件的开发和电力半导体、微电子技术以及微型计算机的应用，使拖动系统的自动化程度日益提高，工作性能进一步完善。

一、电力拖动系统的组成及运动方程式

1. 电力拖动系统的组成

电力拖动系统由四部分组成，如图 1-1 所示。

1) 电源

电源用以向拖动系统提供能源。它主要由变压器、各种高、低压开关和继电保护装置及各类仪表、仪器等组成，以便向电动机及控制设备合理配电。

2) 电动机

电动机是生产机械的原动机。它的作用是将电能转变为机械能带动生产机械工作。

根据电动机的分类，电力拖动分为交流拖动系统和直流拖动系统。用交流异步电动机和交流同步机拖动生产机械的系统称为交流拖动系统；以直流电动机拖动生产机械的系统称为直流拖动系统。由于交流电动机具有结构简单、操作方便、造价低、易维护等优点和起动电流大、调速性能差的缺点，所以交流拖动多用于不要求调速的系统，如水泵、采掘机械等；而同步电动机用于压风、通风等大功率恒速系统。直流电动机具有调速性能好、但成本高、维护工作量大、并需要专门的直流电源等特点，多用于调速性能要求较高的系统中。随着电力半导体器件的开发和控制理论的发展，直流拖动系统被逐步应用于各种生产机械。

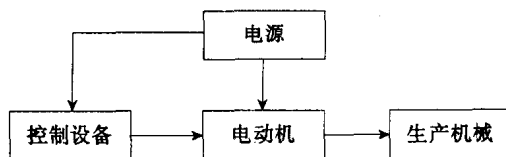


图 1-1 电力拖动系统示意图

根据系统中电动机的数量，电力拖动又分为单机拖动和多机拖动系统。单机拖动系统结构简单、应用较广。多机拖动常用于大功率和有特殊控制要求的系统中。

3) 生产机械

生产机械是电动机拖动的对象，如提升机、通风机、水泵等。有时生产机械需要改变运行方式传递动力，电动机将通过传动装置拖动生产机械。

4) 控制设备

控制设备是按照生产机械的要求去控制电动机的起动、调速、制动等运行过程。控制设备由各种控制电器和控制电动机组成。随着电子技术的发展和微型计算机的应用，控制设备将逐步成为一个完善的智能型自动化系统。

2. 拖动系统的运动方程式

在拖动系统中，电动机将电能转换为机械能，并通过一定的传动方式带动生产机械按照要求实现生产工艺过程。比如提升系统，电动机通过减速器带动卷筒按生产要求提升重物，如图 1-2 所示。

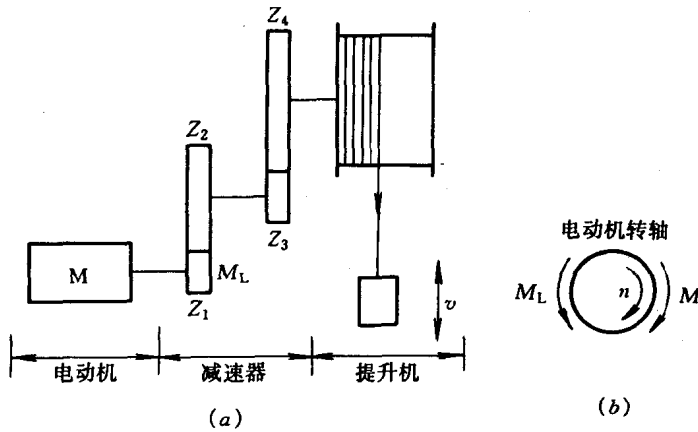


图 1-2 提升机传动系统示意图

a—系统示意图；b—电动机转轴

该系统存在三个转矩：

电磁转矩：由电动机将电能转化而来，也称为拖动转矩。

负载转矩：包括重物的重力和系统摩擦阻力产生的转矩，也称为静阻转矩。

惯性转矩：由提升速度 v 变化而产生。

根据动力学定律，该系统运动方程的一般形式为

$$M - M_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机的电磁转矩， $N \cdot m$ ；

M_L ——负载转矩， $N \cdot m$ ；

J ——系统转动惯量， $kg \cdot m^2$ ；

$\frac{d\omega}{dt}$ ——角速度的变化率， rad/s^2 ；

ω ——角速度，rad/s；

t ——时间，s。

式(1-1)中，右边一项即为惯性转矩，也称为动态转矩 M_{dyn} 。

$$M_{\text{dyn}} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-2)$$

上式表示：当系统转速发生变化时，转速的变化率与动态转矩成正比。在实际工程中，旋转速度常用每分钟的转数 n (r/min) 表示，则角速度可表示为

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{n}{9.55} \quad (1-3)$$

将式(1-3)代入式(1-1)得到用转速 n 表示的系统运动方程式为

$$M - M_L = \frac{J}{9.55} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

由上式可以看出，在提升过程中：

(1) 当 $\frac{dn}{dt} = 0$ 时，表示速度没有变化，系统处于匀速运动的稳定状态。这时 $M = M_L$ ，电动机的拖动转矩用于平衡静阻转矩，如图 1-2b 所示。

(2) 当 $\frac{dn}{dt} > 0$ 时，表示系统为加速运动过程。这时 $M > M_L$ ，说明电动机的拖动转矩有一部分用于系统的加速。

(3) 当 $\frac{dn}{dt} < 0$ 时，表示系统为减速运动过程。这时 $M < M_L$ ，说明惯性转矩的一部分用来平衡静阻转矩。

二、机械特性

由以上分析可知，系统中拖动转矩或负载转矩的改变，将导致系统速度的变化。它们之间的关系称为系统的转矩—转速特性，也就是机械特性。在实际工作中，只有将电动机的机械特性和生产机械的机械特性适当配合，才能实现电力拖动系统的正常运行。

1. 电动机的机械特性

电动机的机械特性是指电动机的电磁转矩 M 与转速 n 之间的关系，即

$$n = f(M)$$

电动机的机械特性可用特性方程式或特性曲线图表示，它是生产机械选配电动机和分析拖动系统的重要依据。

不同类型的电动机在不同的运行条件下，具有不同的机械特性。矿山常用的几种电动机机械特性曲线如图 1-3 所示。

为了描述电动机的特性，可用机械特性的硬度来说明电动机具有的特性。机械特性的硬度是指电动机转矩的改变引起转速变化的程度。硬度用字母 β 表示，其定义为

$$\beta = \frac{dM}{dn}$$

即特性曲线上某点转矩对转速的导数。

由图 1-3 可见，不同的电动机其硬度系数不同。根据 β 的大小，电动机的机械特性可分为三种类型：

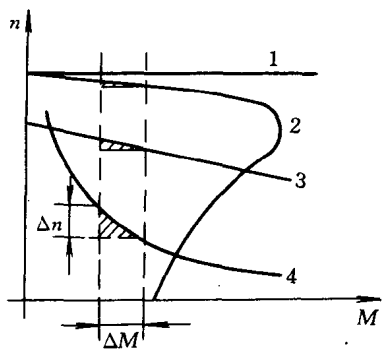


图 1-3 常用电动机的机械特性

1—同步电动机；2—异步电动机；
3—直流他励电动机；4—直流串励电动机

(1) 绝对硬特性。当转矩变化时，电动机的转速恒定不变，其 $\beta \rightarrow \infty$ ，这是同步电动机具有的机械特性。如图 1-3 曲线 1 所示。

(2) 硬特性。当转矩变化时，电动机的转速变化不大，由于特性曲线是下降的，即随着转矩的增加转速降低，故 β 为负值。一般 $\beta = -(40 \sim 10)$ 。异步电动机机械特性曲线的平直部分和直流他励电动机具有这种特性，如图 1-3 曲线 2、3 所示。

(3) 软特性。当转矩变化时，电动机的转速变化很大，一般 $\beta = -(5 \sim 1)$ 。直流串励电动机具有这种特性，如图 1-3 曲线 4 所示。

硬特性的电动机具有转速比较稳定、受负载变化影响较小的特点，适用于提升机、通风机、空气压缩机和水泵等机械设备的电力拖动。软特性的电动机具有转矩增加转速自动降低的特点，适用于电机车等要求平稳起动的机械。

在生产实践中，为了满足生产机械运行的要求，可以人为地改变电动机的机械特性。所以，按电动机的运行条件，机械特性又可分为固有机机械特性和人为机械特性。

(1) 固有机机械特性。固有机机械特性也称为自然特性，它是在电动机额定电压、额定频率（交流电动机）、额定励磁电流（直流电动机）下，且电动机回路无附加电阻或电抗时得到的机械特性。

(2) 人为机械特性。人为机械特性也称人工特性，是通过改变电动机的电压、频率、励磁电流以及串接电阻的方法而得到的机械特性。利用人为特性可以满足不同生产工艺过程的需要。

2. 生产机械的机械特性

电力拖动系统中的生产机械泛指电动机带动运转的对象，如水泵、通风机、提升机等。这些机械的转矩 M_L 与转速 n 之间的关系称为生产机械的机械特性，可表示为

$$n = f(M_L)$$

不同类型的生产机械具有不同的特性。矿山常用机械的机械特性可分为以下三类：

1) 恒转矩特性

恒转矩特性是指转速改变时转矩不发生变化，即负载转矩保持定值，如图 1-4 所示。属于这类负载的生产机械很多，如提升机、带式输送机、采煤机等。

恒转矩特性又分为两种：位势转矩特性和阻转矩特性。

位势转矩特性：其特点是转矩方向与转速方向无关，即负载转矩的作用方向始终保持不变，负载具有储能特性。如提升机提升负载过程中，当提升载荷时，负载转矩方向与转速方向相反，电动机对负载做功，负载获得位能；当下放载荷时，负载转矩方向不变，转速方向改变与转矩方向相同，负载的位能转化为动能。其特性如图 1-4a 所示。由于负载转矩的方向不随转向变化，故特性位于第一和第四象限。

阻转矩特性：这种负载转矩的特点是，当转速方向改变时，负载转矩方向将随之改变。同时负载转矩的方向始终与转向相反，起阻碍运动的作用。显然这种转矩是由物体运动中

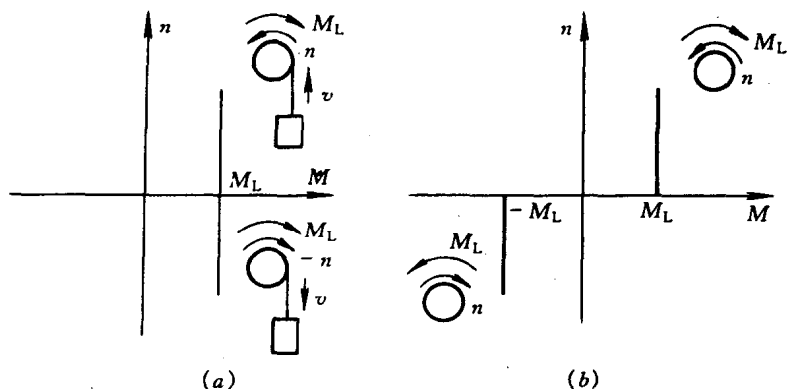


图 1-4 恒转矩负载特性

a—位势转矩特性；b—阻转矩特性

的摩擦阻力产生的，故也称摩擦转矩。其特性如图 1-4b 所示，位于第一及第三象限。

2) 变转矩特性

变转矩特性的特点是，负载转矩的大小近似与转速的平方成正比，如图 1-5 所示。当转速较低时，转矩很小；随着转速的升高，转矩很快增大。通风机、水泵具有这种特性，故这种特性也称通风机特性。

3) 恒功率特性

恒功率特性的特点是，负载转矩的大小与转速成反比。由于负载功率为

$$P_L = M_L \omega = M_L \frac{2n\pi}{60} = \frac{M_L n}{9.55}$$

当功率恒定时，转矩 M_L 与转速 n 成反比。其特性如图 1-6 所示。

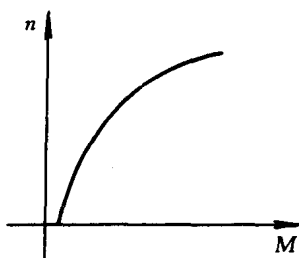


图 1-5 变转矩负载特性

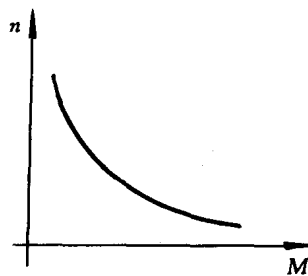


图 1-6 恒功率负载特性

属于这类负载的机械如切削车床等。当车床在粗加工时，由于切削量大，切削负载转矩大，车床转速低；在精加工时，切削量小，切削转矩小，车床高速运行，从而保持功率近似恒定。

三、拖动系统的稳定工作点

当电动机拖动生产机械运行时，尽管电动机和生产机械都有自己的机械特性，但生产

机械产生的负载转矩会通过一定的传动方式作用在电动机轴上。也就是说拖动系统的机械特性是由电动机的机械特性和生产机械的机械特性共同组成。所以，可将两个特性画在同一 $M-n$ 坐标图上来分析系统的运行状况。图 1-7 为某电动机拖动一恒转矩负载在特定条件下运行的状况。由图可见，系统会以 n_A 的转速稳定运转。这时转速 n_A 与负载转矩 M_L 就构成系统的静态工作点，如图 1-7A 点。可见静态工作点就是由两条特性曲线的交点构成，它表示电动机以何种转速带动生产机械稳定运行。

由于静态工作点表示系统的一种平衡状态，即系统的转速相对不变，根据运动方程式，确定静态工作点的条件是

$$M = M_L$$

系统的静态工作点从理论上分析，可能是稳定运行的工作点。但在实际工作中，系统会受到某种干扰，如电源电压的变化、负载的突变等，静态工作点将会偏离原来的位置，使系统工作状况发生变化。因此，静态工作点被分为稳定工作点与不稳定工作点。

所谓稳定工作点，是指当拖动系统受到瞬时外来干扰后，系统能自动恢复到原来的静态工作点。否则为不稳定工作点。

工作点的稳定性，可根据系统的运行状态，在机械特性曲线上分析。如图 1-8 所示，若系统工作在 A 点，当外来干扰使系统的转速由 n 降低到 n_1 ，这时电动机的电磁转矩 M 大于负载转矩 M_L ，由系统运动方程式 (1-4) 可知， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，系统将加速，当干扰消失后，转速将趋向 A 点。同理，当干扰使转速由 n 升高到 n_2 时， $M < M_L$ ， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，系统将减速，干扰消失后，转速趋向 A 点。故 A 点为稳定的静态工作点。

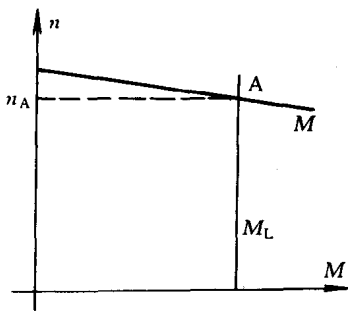


图 1-7 拖动系统的静态工作点

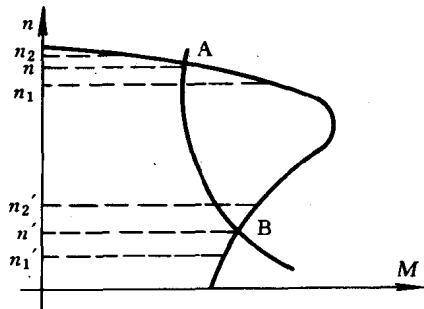


图 1-8 拖动系统工作点分析

当系统工作在 B 点时，若外来干扰使 n' 降低到 n'_1 ，由图可见，这时 $M_L > M$ ，由运动方程式 (1-4) 可知， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，系统将进一步减速而远离工作点 B；若外来干扰使 n' 升高到 n'_2 时， $M > M_L$ ， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，系统进一步加速而远离工作点 B。故 B 点为不稳定静态工作点。

由以上分析可知，当系统由于外来干扰使转速降低时，若 $M > M_L$ ，则 $\frac{dn}{dt} > 0$ ；或当系统由于干扰引起转速升高时，若 $M < M_L$ ，则 $\frac{dn}{dt} < 0$ 。这种情况下的工作点都能回到原来的位

置，属于稳定的静态工作点，否则就为不稳静态工作点。

工作点的稳定性是由电动机的机械特性和生产机械的机械特性二者之间的配合关系所决定的。对于同一类型的生产机械，选择不同的电动机可使系统的工作点稳定或不稳定。如图 1-9 所示。工作点 P 对于电动机 M_1 是稳定的，对于 M_2 是不稳定。同样对于同一台电动机，所拖动的生产机械不同，也可使系统的工作点稳定或不稳定。如图 1-10 所示，工作点 P 对 M_{L1} 的生产机械是稳定的，对 M_{L2} 是不稳的。

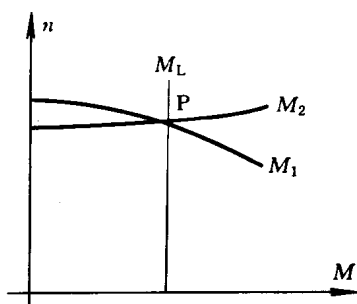


图 1-9 电动机特性与工作点稳定性的关系

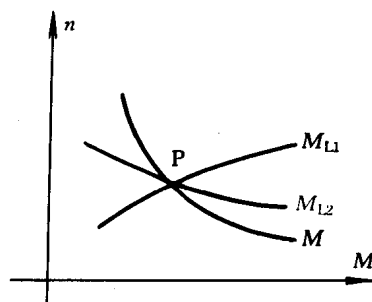


图 1-10 负载特性与工作点稳定性的关系

第二节 直流电动机的电力拖动

直流电动机可将直流电能转换为机械能，所以它需要直流电源供电。

直流电动机的结构主要是由定子和转子两部分组成。定子用于产生磁场；转子通过换向器输入直流电流与磁场作用产生电磁转矩。直流电动机的转子通常称为电枢。

根据定子励磁绕组和电枢绕组连接方式的不同，直流电动机可分为他励、串励、并励和复励四种。他励电动机的励磁绕组与电枢绕组由电源分别供电，串励、并励和复励电动机的两个绕组分别接成串联、并联和混合串并联形式，由同一个电源供电。

直流电动机具有良好的调速性能。不同类型的直流电动机其机械特性不同。在实际生产中，可根据生产机械的要求，按电动机的机械特性选配合适的直流电动机。由于矿山生产中大型设备所用的直流电动机多为他励和串励，故本节主要介绍这两种电动机的机械特性。

一、直流他励电动机的机械特性和起动

1. 机械特性方程式

直流他励电动机电路原理如图 1-11 所示。图中 R_s 为电枢绕组电阻， R_A 为电枢回路附加电阻， R_B 为励磁回路附加电阻（包括励磁绕组电阻）。由直流电动机原理可得到以下三个基本方程式：

$$\text{转矩方程} \quad M = C_M \phi I \quad (1-5)$$

$$\text{感应电动势方程} \quad E = C_e \phi n \quad (1-6)$$

$$\text{电枢回路电压方程} \quad U = E + IR \quad (1-7)$$

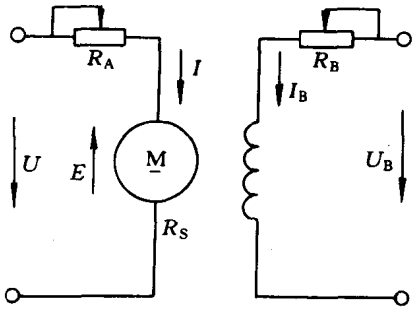


图 1-11 直流他励电动机
电路原理图

式中 U ——电枢端电压, V;
 I ——电枢电流, A;
 E ——电枢绕组感应电势, V;
 ϕ ——主磁极的磁通量, Wb;
 R ——电枢回路总电阻, 包括电枢绕组电阻 R_s 和附加电阻 R_A , Ω ;
 C_e 、 C_M ——电动机结构常数, 分别为

$$C_e = \frac{pN}{60a}$$

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a}$$

p ——电动机磁极对数;
 N ——电枢绕组有效导体数;
 a ——电枢绕组并联支路数。

将式 (1-7) 代入式 (1-6) 得到以电枢电流 I 为变量的方程式为

$$n = \frac{E}{C_e \phi} = \frac{U - IR}{C_e \phi} = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e \phi} I \quad (1-8)$$

式 (1-8) 表示电枢电流 I 与转速 n 之间的关系, 称为电动机机械特性的电流表达式。

将式 (1-5) 代入式 (1-8) 得到转矩 M 与转速 n 之间的关系, 即 $n = f(M)$ 的机械特性方程式

$$n = \frac{U}{C_e \phi} - \frac{R}{C_e C_M \phi^2} M \quad (1-9)$$

由直流他励电动机原理图 1-11 可知, 当电路参数 U 、 R 和 ϕ 不变时, 机械特性方程为一直线, 直线的斜率为 $\frac{R}{C_e C_M \phi^2}$ 。

在式 (1-8) 和式 (1-9) 中, 如果令

$$\frac{U}{C_e \phi} = n_0 \quad (1-10)$$

$$\frac{R}{C_e \phi} I = \frac{R}{C_e C_M \phi^2} M = \Delta n \quad (1-11)$$

则可得到机械特性的转速表达式

$$n = n_0 - \Delta n \quad (1-12)$$

上式中 n_0 称为理想空载转速, 其大小取决于电动机端电压 U 和磁通 ϕ 的数值。 Δn 称为转速降落, 它与负载电流 I 或转矩 M 、电阻 R 及磁通 ϕ 的大小有关。

2. 固有特性

当他励电动机的供电电压 U 、磁通 ϕ 均为额定值 U_N 、 ϕ_N , 电枢回路不串接附加电阻时, 所得到的机械特性称为固有特性, 其方程为

$$n = \frac{U_N}{C_e \phi_N} - \frac{R_s}{C_e C_M \phi_N^2} M \quad (1-13)$$

这时的理想空载转速为