

# 起重运输机电传动

余敏年 主编

高等学校试用教材

西南交通大学出版社

# 起重运输机电气传动

余敏年 主编

西南交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书阐述起重运输机械电气传动的基本理论和设计计算方法。

全书共分八章。内容包括：起重运输机械电气传动基础，直流电动机和异步电动机电气传动基础，起重运输机常用电器、保护电器及辅助、执行电器，移动供电装置，导线截面选择，起重运输机典型电路图。书中附有必要的例题和习题。

本书可作为高等学校起重运输机械与工程机械专业试用教材，也可供从事起重运输机械电气传动设计、制造、安装和科研的工程技术人员参考。

## 起 重 运 输 机 电 气 传 动

QIZHONG YUNSHUJI DIANQI CHUANDONG

余敏年 主编

\*

西南交通大学出版社出版发行

(四川 峨眉山市)

四川省新华书店经销

西南交通大学出版社印刷厂印刷

\*

开本：787×1092 1/16 印张：15.875

字数 384 千字 印数：1—3000 册

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷

ISBN 7-81022-032-2/U 002

定价：3.50 元

# 前 言

本书根据铁道部专业教学指导委员会，审定通过的铁路高等院校起重运输机械与工程机械专业《起重运输机电气传动》课程教学大纲编写而成。

全书共分三篇（八章），内容包括起重运输机电气传动的设计计算基础、起重运输机常用电器、移动供电装置、导线截面选择、基本电路图和起重运输机械典型电路图等。书中的计算准则和设计计算方法符合我国编制的《起重机设计规范》（GB 3811-83）。

本书的初稿作为过渡性教材，先后在上海铁道学院、太原重型机械学院、葛洲坝水电工程学院和西南交通大学等院校起重运输机械与工程机械专业多届学生使用。各校一致认为本书在贯彻少而精、理论联系实际，贯彻国内外最新标准等方面颇具特色。这次编写过程中吸取了上述各校多年使用中反映出的不少有益意见和建议，力图结合我国起重运输机国情，将国外先进设计计算理论和方法融会贯通的编入教材。为便于读者使用和满足起重机厂技术人员设计需要，书中编入国内最新桥式起重机（EOTC型）和集装箱专用龙门起重机的典型图例；为便于教学和自学，各章附有思考题和习题；为便于设计使用，书中备有必要的数据和图表。

本书由西南交通大学余敏年主编。编者有：余敏年（绪论、第一、二、三、六、七章、八章大部分、附录）；余敏年、陈叶梅（第四、五章）；曹阳（思考题与习题）；刘锋（第八章第二节）；上海铁道学院李金润（第八章第四节部分内容）。本书除可作为高等学校专业教材外，还可供从事起重运输机电气系统设计人员之参考。

本书由上海铁道学院李金润主审，审稿时承蒙主审和参加审稿会的太原重型机械学院卢焕建副教授；北京钢铁学院周绍英副教授及西南交通大学张质文教授、王金诺教授对书稿认真审阅，改正了书稿中的某些缺点和不足之处，提出不少改进意见。我们谨向上述同志表示衷心感谢。

限于编者水平，书中不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

1988年5月于四川峨眉

# 目 录

## 绪 论

## 第一篇 起重运输机电气传动基础

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 电气传动系统的力学基础和调速的基本概念..... | 3  |
| 第一节 电气传动系统的运动方程.....         | 3  |
| 第二节 电气传动系统的稳定运行.....         | 4  |
| 第三节 电动机调速的基本概念和指标.....       | 8  |
| 思考题与习题.....                  | 10 |
| 第二章 直流电动机的电气传动基础.....        | 12 |
| 第一节 直流他激电动机的自然特性和人为特性.....   | 12 |
| 第二节 直流他激电动机的运转状态.....        | 15 |
| 第三节 直流他激电动机的调速方法和调速性能.....   | 21 |
| 第四节 直流他激电动机启动电阻的计算.....      | 24 |
| 第五节 直流串激电动机的自然特性和人为特性.....   | 28 |
| 第六节 直流串激电动机的运转状态.....        | 30 |
| 第七节 直流串激电动机的调速方法和调速性能.....   | 31 |
| 第八节 直流串激电动机启动电阻的计算.....      | 32 |
| 第九节 直流复激电动机.....             | 33 |
| 思考题与习题.....                  | 34 |
| 第三章 异步电动机的电气传动基础.....        | 36 |
| 第一节 异步电动机的自然特性和人为特性.....     | 36 |
| 第二节 异步电动机的运转状态.....          | 40 |
| 第三节 异步电动机的调速方法和调速性能.....     | 43 |
| 第四节 绕线式异步电动机启动电阻的计算.....     | 47 |
| 思考题与习题.....                  | 54 |

## 第二篇 起重运输机常用电器

|                |    |
|----------------|----|
| 第四章 控制电器.....  | 55 |
| 第一节 刀开关.....   | 55 |
| 第二节 组合开关.....  | 60 |
| 第三节 控制按钮.....  | 60 |
| 第四节 主令控制器..... | 62 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第五节 凸轮控制器.....         | 64  |
| 第六节 接触器.....           | 67  |
| 第七节 中间继电器.....         | 72  |
| 第八节 时间继电器.....         | 73  |
| 思考题与习题.....            | 78  |
| 第五章 保护电器及辅助、执行电器.....  | 79  |
| 第一节 熔断器.....           | 79  |
| 第二节 过电流继电器.....        | 86  |
| 第三节 热继电器.....          | 88  |
| 第四节 自动空气开关.....        | 92  |
| 第五节 行程开关.....          | 94  |
| 第六节 电阻器.....           | 98  |
| 第七节 频敏变阻器.....         | 103 |
| 第八节 制动器的操作元件.....      | 106 |
| 思考题与习题.....            | 111 |
| 第六章 移动供电装置和导线截面选择..... | 112 |
| 第一节 移动供电装置.....        | 112 |
| 第二节 导线和滑线的截面选择.....    | 119 |
| 第三节 电线和电缆.....         | 124 |
| 思考题与习题.....            | 132 |

### 第三篇 电 路 图

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| 第七章 基本电路图.....                          | 133 |
| 第一节 电路图的构成和图示原则.....                    | 133 |
| 第二节 磁力启动器的电路图.....                      | 133 |
| 第三节 低压启动补偿器电路图.....                     | 135 |
| 第四节 凸轮控制器电路图.....                       | 135 |
| 第五节 保护柜的电路图.....                        | 138 |
| 第六节 磁力控制屏的电路图.....                      | 141 |
| 第七节 PQY 1~4、PQS 1~3 系列交流起重机控制屏电路图 ..... | 145 |
| 第八节 涡流制动器调速电路图.....                     | 151 |
| 第九节 饱和电抗器—电容器开环异步电动机调速电路图.....          | 157 |
| 第十节 可控硅有源逆变器控制的串级调速电路图.....             | 161 |
| 第十一节 起重电磁铁电路图.....                      | 163 |
| 思考题与习题 .....                            | 165 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第八章 起重运输机械典型电路图.....          | 166 |
| 第一节 桥式起重机与龙门起重机的电路图.....      | 166 |
| 第二节 集装箱龙门起重机电路图.....          | 177 |
| 第三节 轮胎起重机电路图.....             | 185 |
| 第四节 电瓶叉车电路图.....              | 189 |
| 第五节 连续运输机电路图.....             | 200 |
| 第六节 链斗式装车机和卸车机的电路图.....       | 203 |
| 思考题与习题.....                   | 207 |
| 附录一 电工系统图常用图形符号.....          | 209 |
| 附录二 电力设备通用文字符号.....           | 212 |
| 附录三 电动机的过载和发热验算.....          | 215 |
| 附录四 YZ、YZR、YZRW 系列电动机参数 ..... | 219 |
| 附录五 配 YZR 系列电动机的通用电阻器型号 ..... | 222 |
| 主要参考文献                        |     |

## 绪 论

在起重运输机械中，凡是以电动机作为原动机来带动各个机构进行工作的传动方式，统称为“电气传动”。在现代的起重运输机械上除安装电动机以外，还有各种电器，它们按一定的规律组成系统，对生产过程进行“自动控制”，所以从广义上来讲也经常把“电气传动与自动控制”简称为“电气传动”、“电力拖动”等。

应该强调的是在这里所指的传动与一般机械传动中所指的传动含义不同，因为电气传动不是电气设备和机械的简单组合，而是由电动机、机械传动机构和电动机的控制系统所组成的一种综合装置。电动机及其控制系统的特性决定于工作机械的特性、精度和一系列技术指标，而负载的惯性，传递精度等反过来又对电动机及其控制系统产生重要的影响。因此，在研究起重运输机械电气传动时，必须注意电动机与负载的内在联系，也即把它们作为整体来考虑。

基于上述情况，起重运输机电气传动按其结构可分为两大类：第一类是基本的，也是经典的系统，又称为开环系统。如图 0-1 所示，电动机的输入端经过开关和控制电器由电源供电，而输出端则通过传动机构以一定的传动比与工作机械相连接。保护电器主要用以保护电动机，必要时自动切断电源。

这一类系统主要用在对启动、制动、调速没有特殊要求的一般起重运输机械上，如通用桥式起重机、龙门起重机、带式输送机、叉车等。系统中的开关和控制都是由人工操作的，即图 0-1 中的  $y_1$  和  $y_2$  都是由人工来给定。

第二类是自动化的系统又称为闭环系统。如图 0-2 所示。除了包含有开环系统中的内容外，还增加了一个信息处理单元——控制装置，它按照一定的规律建立起控制指令。其中输入量  $\omega$  是由手动或上一级给定的。另一个输入量  $x_2$  是反馈量。控制装置的输出指令  $y$  控制该系统中相应的电器进行工作，从而实现自动控制或调节的作用。在这类系统中测量装置是必不可少的，它不但向显示、报警和记录装置提供信息，向控制装置提供反馈信息，必要时还向下一级或上一级装

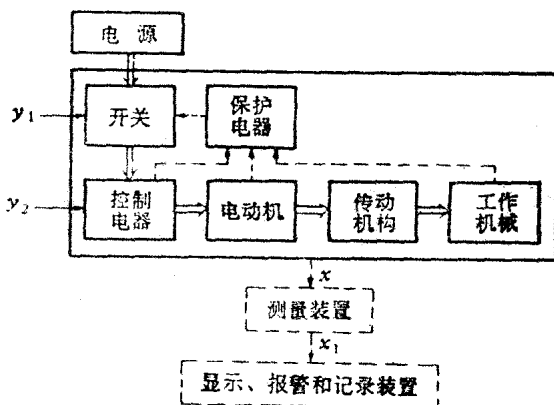


图 0-1 开环电力传动系统的组成

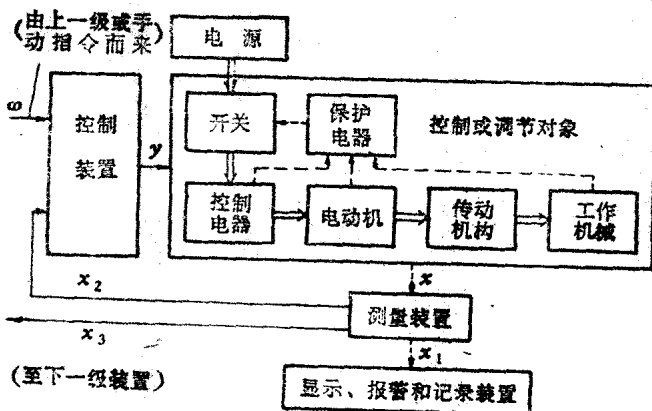


图 0-2 自动化电气传动系统的组成



置提供信息。

这一类系统主要用在启动、制动和调速有一定要求的起重运输机械上，如集装箱龙门起重机，微机控制的起重运输机械等。

电气传动又可分为直流和交流两大类：直流传动以直流电动机为动力，交流传动以交流电动机为动力。目前，由于交流电动机具有结构简单、制造方便、维修容易、价格便宜等优点，因此得到广泛的应用。但是直流他激电动机具有良好的机械特性，可以方便地在很宽的范围内平滑调速，所以在频繁启动、制动及调速要求很高的场合，直流他激电动机仍占居主要地位，它广泛地应用在自动控制要求较高的各种起重运输机械上。

《起重运输机电气传动》是起重运输机专业的一门必修课。在学习本课程前，必须具备电工基础、电子技术、起重运输机械等方面的基础知识。本门课程要求学生掌握起重运输机械中常用的各种电动机的运转、调速性能，各种负载的机械特性，各种电器元件的原理、构造和性能，各种常用线路的组成和分析方法。由于本课程实践性较强，结合教学进度，安排有必要的实验。通过学习，学生应能设计一般起重运输机械的电气系统，并具备一定的计算和安装、调试电气设备的能力。

# 第一篇 起重运输机电气传动基础

## 第一章 电气传动系统的力学基础和调速的基本概念

在生产实践中,电动机的运行总是和起重运输机的各个机构联系在一起的。电动机和工作机构两者之间的机械传动构成一个机电运动的整体称为电气传动系统。

### 第一节 电气传动系统的运动方程

#### 一、基本形式和实用形式

传动系统的运动方程是系统机械运动基本规律的微分方程。在图 1-1 所示的直线运动系统中,当外力  $F$  大于物体运动中所受的摩擦阻力  $F_m$  时,物体加速运动。若在与  $F$  相反的方向施加一大小等于  $m dv/dt$  的惯性力  $F_i$ ,则此力系将成为平衡力系。根据图 1-1 中所假设的方向,可写出力的平衡方程:

$$F = F_m + m \frac{dv}{dt} \quad (N) \quad (1-1)$$

这就是动力学中的达朗倍尔 (Dalembert) 原理。式中  $m$  为运动物体的质量 (kg),  $v$  为物体的运动速度 (m/s)。

与此对应,对于作旋转运动的物体,如图 1-2 所假设的方向,由达朗倍尔原理得:

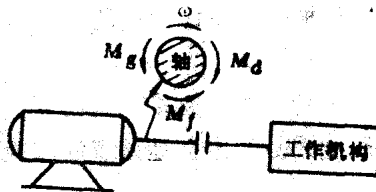
$$M_d = M_f + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1-2)$$

式中  $M_d$ ——电动机输出的转矩 (N·m);  
 $M_f$ ——在电动机轴上的负载转矩 (N·m);  
 $J d\omega/dt$ ——即  $M_g$ , 称为惯性转矩 (N·m);  
 $\omega$ ——转动体的角速度 (rad/s);  
 $J$ ——即  $m\rho^2$ , 转动体的转动惯量 (kg·m<sup>2</sup>);



$F$ ——外力;  $F_m$ ——摩擦阻力;  
 $F_i$ ——惯性力。

图 1-1 直线运动系统



$M_d$ ——电机转矩;  $M_f$ ——负载转矩;  
 $M$ ——惯性转矩。

图 1-2 旋转运动系统

其中  $\rho$ ——回转半径 (m);  
 $m$ ——旋转体部分质量 (kg);  
 $t$ ——过渡过程进行的时间 (s)。

为了使运动方程式更适于工程计算, 作如下推导:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{mD^2}{4} \frac{d}{dt} \left( \frac{2\pi n}{60} \right) = \frac{mD^2}{38.3} \frac{dn}{dt} = \frac{mgD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-3)$$

式中,  $GD^2$  为飞轮矩 ( $N \cdot m^2$ ), 则运动方程式的实用形式为:

$$M_d = M_t + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (1-4)$$

## 二、由运动方程式来分析电动机的运转状态

运动方程式可以把电动机的稳定运转状态和过渡状态都表示出来。

当  $dn/dt = 0$  时,  $n = \text{常量}$ , 电动机处于稳定运转状态, 此时  $M_d = M_t$ , 即电动机发出的拖动转矩  $M_d$  的大小由机械负载转矩  $M_t$  所决定, 并与之相等。此时系统作匀速运动或静止。

当  $dn/dt \neq 0$  时,  $n$  为变量, 电动机处于过渡状态。产生过渡状态的条件是  $M_d \neq M_t$ , 这里有两种情况:

1.  $M_d - M_t > 0$  时,  $dn/dt > 0$  电动机处于加速状态;
2.  $M_d - M_t < 0$  时,  $dn/dt < 0$  电动机处于减速状态。

## 第二节 电气传动系统的稳定运行

为了使电气传动达到稳定运行, 必须根据工作机械的机械特性正确选择电动机的型式。

### 一、机械特性

机械特性是指转矩和转速两个物理量之间的关系特性。不同的电动机有不同的机械特性, 不同的工作机械 (电动机的负载) 也有不同的机械特性, 只有将电动机的机械特性和工作机械的机械特性很好地配合起来才能实现合理的运行。

#### (一) 电动机的机械特性

电动机的机械特性用电动机的转速  $n$  与转矩  $M$  的关系  $n = f(M)$  来表征, 其中转矩  $M$  是电磁转矩。

电动机机械特性的重要指标是硬度, 它表示转矩随转速变化的程度, 其大小用硬度系数  $\beta$  来表示。硬度系数的定义是该点的转矩变化与转速变化之比, 即

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta n} \quad (1-5)$$

根据硬度大小, 可把电动机的机械特性分成三类:

1. 绝对硬特性：转矩改变时转速不变。同步电动机的特性如图 1-3 (a) 中的直线 1 就属于这类，它的硬度系数  $\beta = \infty$ 。

2. 硬特性：转速随转矩的变化而改变，但程度不大。直流他激电动机与异步电动机工作部分的特性均属这类，如图 1-3 (a) 中的曲线 2 和图 1-3 (b) 中的曲线 3， $\beta$  均为  $10 \sim 40$ 。

3. 软特性：转速随转矩的变化有较大的改变。直流串激电动机属于这类，如图 1-3 (b) 中的曲线 5，其  $\beta < 10$ 。

直流复激电动机的特性如图 1-3 (b) 中的曲线 4 所示，是属第二类还是第三类，要根据其机械特性硬度的具体情况而定。

## (二) 工作机械的机械特性

所谓工作机械是泛指电动机带动运转的对象，例如起重机的运行机构、起升机构、变幅机构等等。这些机构的转矩在一般情况下是反抗电动机作用的，因此称为电动机的转矩负载用  $M_f$  表示。它与转速的关系是  $n = f(M_f)$  或  $\omega = f(M_f)$ ，称为工作机械的机械特性。不同类型的工作机械其机械特性也不同，通常根据转矩的性质或工作机构的性质来分类。

按转矩的性质可以分为恒转矩负载和变转矩负载两种：

1. 恒转矩负载：其转矩不随转速变化，如图 1-4 (a) 所示。属于这类负载的有起重机的起升机构、运行机构及皮带运输机等。

2. 变转矩负载：其工作机械的转矩随转速而变化。根据变化规律的不同又可分为：

(1) 与转速成正比例的转矩负载，如图 1-4 (b) 中线 1 所示。例如在实验室作模拟负载的他激发电机供给固定负载（电阻不变）的特性属于此类。

(2) 与转速的二次方成比例的转矩负载，如图 1-4 (b) 中的曲线 2 所示。例如通风机、水泵、油泵等，这类负载的性质多数与气体或液体的粘性阻力有关。

(3) 恒功率负载。它的特点是转矩与转速成反比关系，但其乘积（功率）近似保持不变，如图 1-4 (b) 中的曲线 3 所示。例如卷取机（造纸，卷纸等）及力矩马达式电缆卷筒等属于这一类。因为要求随着卷筒直径的不同而仍然能够保持张力和线速度不变（松紧一致）则转矩与角速度就必须同时改变：卷筒小时转矩小，角速度大；卷筒大时转矩大，角速度就要小。如图 1-5 所示，即  $M$  大时  $\omega$  小， $M$  小时  $\omega$  大，而乘积  $P = M \cdot \omega$  保持不变，所以称为恒功率负载。

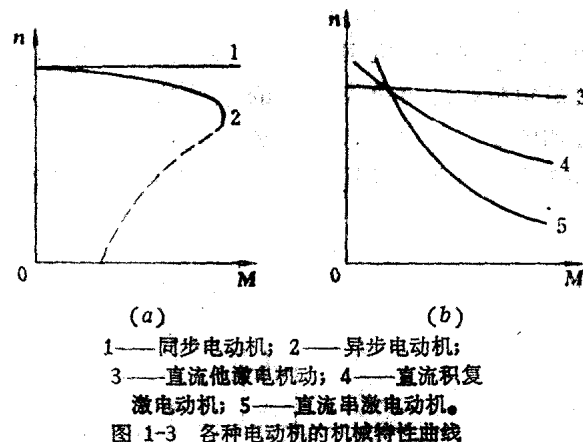
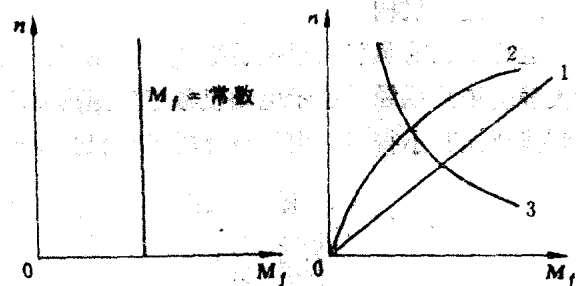


图 1-3 各种电动机的机械特性曲线



(a) 恒转矩负载的机械特性；(b) 变转矩负载的机械特性  
图 1-4 工作机械的机械特性

按工作机构的性质可以分为阻转矩负载和位转矩负载两种。

1. 阻转矩负载：这类负载所产生的转矩方向始终与运动方向相反，也就是说转速方向改变时转矩方向也改变，其特点是转矩负载始终是起阻碍运动作用的称阻转矩或反作用转矩。例如摩擦负载，运行机构的负载等属于这一类。特性如图 1-6 所示，其特性分布在第一和第三象限内。

2. 位转矩负载：这类负载所产生的转矩方向始终与运动方向无关，如起升机构的负载，无论上升( $n > 0$ )或下降( $n < 0$ )，转矩负载始终与负载产生的转矩方向一致(受重力作用)，其特性如图 1-7 所示。这类负载大多数和位(势)能有关，故称为位(势)转矩负载，作为动力时又称为动力负载其特性分布在第一和第四象限内。

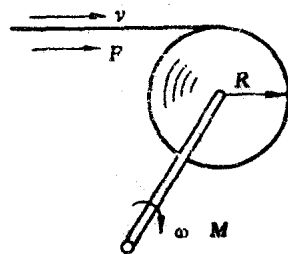


图 1-5 恒功率负载示意图

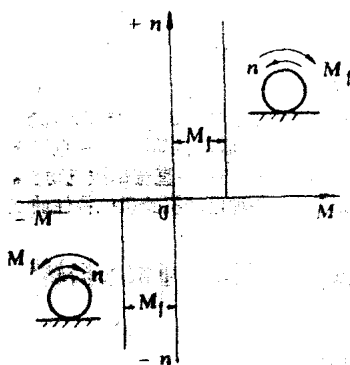


图 1-6 阻转矩负载特性

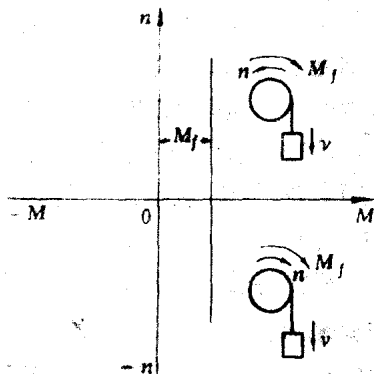


图 1-7 位转矩负载特性

现将起重运输机械各种机构转矩负载的机械特性分叙如下：

### 1. 起升机构

起升机构的负载属于恒转矩负载；起升时都是阻转矩负载，下降时多数是位转矩负载，空载下降时是位转矩负载还是阻转矩负载由效率、吊具重量对满载的比值来决定，如图 1-8 所示。通常电动机最大静转矩负载为额定转矩的 0.7~1.4 倍。

### 2. 运行机构

运行机构的负载属于恒转矩负载；用于室内的起重机都是阻转矩负载，如图 1-9 所示。最大静转矩负载经常小于电动机额定转矩的 0.7 倍。因按可能产生的最大值进行计算，所以实测值要比其小得多。用于室外的起重机负载除摩擦阻力外还有风阻力。港口起重机的风阻

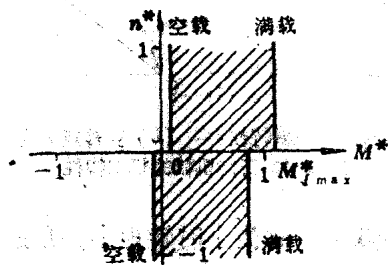


图 1-8 起升机构负载的机械特性

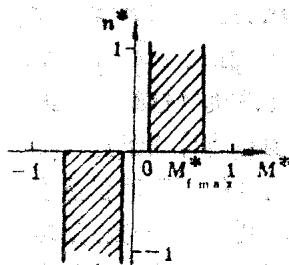


图 1-9 运行机构负载的机械特性

力占 60% 以上, 当顺风运行时, 阻力负载有可能变成动力负载。

### 3. 旋转机构

旋转机构的负载有摩擦阻力、滚道坡度阻力、旋转中心偏心阻力和风阻力等, 其中风阻力占 60~80% 或更高。除摩擦阻力为阻力负载外, 其余各项是阻力负载还是动力负载都与机构所处的位置和运动方向有关。机械特性需根据具体情况绘制。

### 4. 变幅机构

变幅机构的负载是幅度的函数, 随变幅机构平衡系统不同而异, 难以绘出典型的负载机械特性, 通常希望在最大幅度时, 不平衡力矩向后 (动力负载); 在最小时, 不平衡力矩向前 (阻力负载), 两者数值相近, 如图 1-10 所示, 但一般达不到这一理想状态。

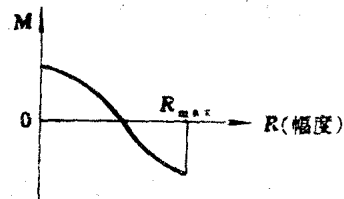
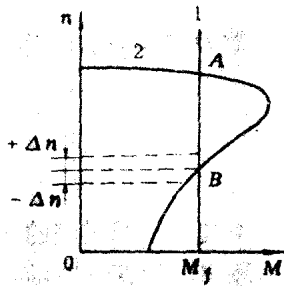
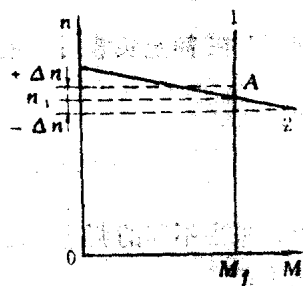


图 1-10 变幅电动机负载图

## 二、电气传动系统稳定运行的条件

由前述可知, 电动机和工作机械的机械特性各有多种形式。因此, 根据负载的性质正确地选择电动机的型式, 是实现稳定运行的重要条件。

两个机械特性曲线相交是稳定运行的必要条件, 但并不是充分条件。必须满足的条件是, 电动机稳定运行后, 由于某种干扰使转速稍有变化时, 电动机发出的转矩必须使转速恢复到原值。这种能否使转速恢复的能力是与两个特性曲线的交点处二特性相互配合的情况有关。例如图 1-11 (a) 所示是用他激电动机带动恒转矩负载。二个特性曲线的交点为 A, 在 A 点可以得到稳定运行。因为在转速稍有增大时, 电动机发出的转矩小于转矩负载, 两个转矩的合成是负的, 结果使电动机转速逐渐下降稳定到 A 点; 相反, 当转速稍有减少时, 合成转矩是正值也会使转速增加到 A 点。图 1-11 (b) 是用异步电动机带动恒转矩负载, 二个特性曲线的交点是 A 与 B, 交点 A 的情况与上述情况相同, 因而可以得到稳定运行。但 B 点情况却不同, 在转速稍有增大时, 电动机发出的转矩大于转矩负载, 合成转矩继续增加, 一直加到 A 点才能稳定; 在转速稍有减少时, 合成转矩是负的, 它使转速继续降低, 一直降到转速为零, 即电动机停止为止。因而在 B 点是得不到稳定运行的。如果用异步电动机来带动一个直流他激发电机, 后者的转矩负载随转速升高而加大, 这时在电动机机械特性临界转差率以下的部分也可稳定运行, 如图 1-12 所示。读者可自行分析。



(a) 他激电动机带恒转矩负载;

(b) 异步电动机带恒转矩负载。

图 1-11 电气传动稳定运行的条件

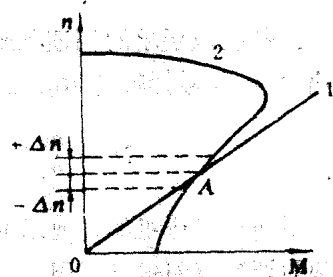


图 1-12 异步电动机带一台他激发电机的机械特性

综上所述, 可得到判定电气传动能否在机械特性曲线交点稳定运行的方法是: 在交点转

速  $n$  的上下取两个转速变量  $\pm \Delta n$  时, 两个机械特性曲线转矩间的关系应满足:

特性曲线交点转速之上 ( $n + \Delta n$  时)  $M_d - M_l < 0$ ;

特性曲线交点转速之下 ( $n - \Delta n$  时)  $M_d - M_l > 0$ 。

在起重运输机械中, 转矩负载不随转速而变的负载较多, 这时要得到稳定运行, 电动机必须具有向下倾斜的机械特性; 反之, 则达不到稳定运行。

### 第三节 电动机调速的基本概念和指标

电气传动系统工作时, 电动机的转速可能发生改变, 根据其产生的原因可以分为速度变化和速度调节(调速)两种情况。

由于工作机械的负载发生变化而引起电动机的转速改变时称为速度变化。此时电动机的运转是在同一条特性曲线上, 从某一个运转点转移到另一个运转点。而转速变化的程度则决定于机械特性曲线的硬度。如图 1-13, 当负载由  $M_{l1}$  减到  $M_{l2}$  时转速也随之由  $n_1$  变到  $n_2$ 。

由于生产过程的需要, 人为的对电动机加以电器附加作用改变电机参数使转速得到改变称为速度调节。调节转速时, 电动机的运转是从一条机械特性曲线转移到另一条机械特性曲线, 如图 1-14 所示, 此时负载不变, 当改变电动机的机械特性后可获得不同的速度。

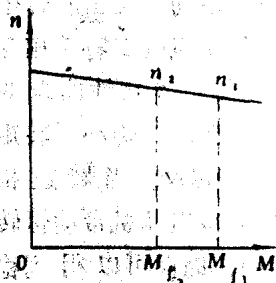


图 1-13 速度的变化

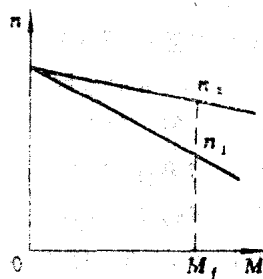


图 1-14 速度的调节

通常由以下几个基本指标来比较, 衡量不同的调速方案, 即调速范围、调速的级数与平滑性、调速的相对稳定性、调速的经济性。

#### 一、调速范围

工作机械要求的调速范围通常以系数  $D$  来表示, 其定义为电动机在额定负载时, 最高转速  $n_{max}$  与最低转速  $n_{min}$  之比, 即

$$D = \frac{n_{max}}{n_{min}} \quad (1-6)$$

不同的工作机械, 要求的调速范围不同, 不同类型的电动机以及采用不同的调速方法能达到的调速范围也都不同。一般起重运输机械的调速范围从几到几十。

#### 二、调速静差度

为了比较调速前后电动机运行在不同机械特性曲线上转速变化的大小, 采用静差度  $\mu$  表

示, 其定义为电动机在某条机械特性曲线上运行时, 由理想空载转速 (指直流他激电动机, 若异步电动机应为同步转速) 减到额定转速时的转速降落  $\Delta n$  与理想空载转速  $n_0$  的比值,

$$\mu = \frac{\Delta n_0}{n_0} \quad (1-7)$$

式中  $\mu$ ——静差度。

我们称  $n_0$  为理想空载转速 (图 1-15) 是因为在电动机运转过程中当负载等于“零”时, 总还存在一定的摩擦阻力、风阻力等, 故转矩并不绝对等于“零”。为了确定转矩和电流绝对等于“零”时的转速, 必须加“理想”二字。

从图 1-15 中可以清楚地看出, 调速时若理想空载转速不变, 特性越软, 静差度越大, 转速变化也较大, 稳定性较差。调速时若机械特性的硬度不变, 如图中特性曲线 1 和特性曲线 3, 其中  $\Delta n_0 = \Delta n'_0$ , 而  $n'_0 < n_0$  因此  $\mu' > \mu$ , 即转速变化的相对值增大, 静差度加大, 稳定性也较差。例如转速为 1000 r/min 时, 转速降落 10 r/min, 只占 1%, 而在 100 r/min 时就占 10% 了, 所以必须说明, 在调压调速中, 凡静差度都是指速度最低那条机械特性的静差度。

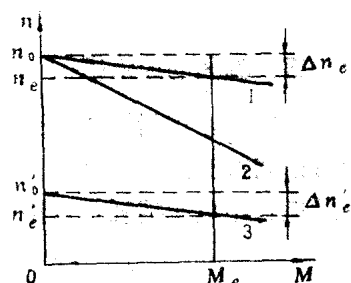


图 1-15 电机的调速静差度

静差度的大小是由工作机械的要求来决定, 它反映了工作机械对调速精度的要求。但是, 静差度越小, 调速范围就越窄, 二者是相互制约的, 其关系推导如下, 如图 1-15 所示。

将式 (1-6) 改写成:

$$D = \frac{n_0}{n'_0 - \Delta n'_0} = \frac{n_0}{n'_0 \left(1 - \frac{\Delta n'_0}{n'_0}\right)}$$

式中  $n_0$ ——调速前电动机的额定转速;

$n'_0$ ——调速后电动机的理想空载转速;

$\Delta n'_0$ ——调速后电动机额定负载的转速降落。

令调速后电动机转速的静差度为  $\mu = \Delta n'_0 / n'_0$ , 代入上式后, 得出调速范围与静差度的关系如下:

$$D = \frac{n_0 \mu}{\Delta n'_0 (1 - \mu)} \quad (1-8)$$

该式说明如下几个问题:

1. 在给定静差度和额定转速降落  $\Delta n'_0$  (特性硬度) 时, 欲提高调速范围  $D$ , 应采用额定转速较高的电动机 (在工作机械允许的范围内);

2. 在给定电动机额定转速  $n_0$  和额定转速降落  $\Delta n'_0$  时, 调速范围  $D$  越宽, 静差度  $\mu$  越大, 稳定性越差;

3. 在给定电动机额定转速  $n_0$  时, 欲提高调速范围  $D$  和减小静差度  $\mu$ , 应减小调速后人为机械特性的转速降落  $\Delta n'_0$ , 即提高特性的硬度。为此, 对于调速精度要求较高, 调速范围要求较宽的拖动系统, 应采用硬度较高的人为机械特性调速。



### 三、调速的级数与平滑性

(一) 有级调速：又称间断调速，它的转速是有限的几级如二级、三级或更多一些级数。

(二) 无级调速：又称连续性调速，是指电动机的转速可以平滑地调节。

衡量调速中速度逐级变化的程度采用“平滑性”的概念。它是用相邻两级（第  $i$  和  $i-1$  级）转速之比  $\varphi$  来表示，即

$$\varphi = \frac{n_i}{n_{i-1}} \quad (1-9)$$

显然， $\varphi$  值越小越平滑。例如最高转速  $n_i = 1000 \text{ r/min}$ ，则当前一级转速  $n_{i-1} = 500 \text{ r/min}$  时， $\varphi = 2$ ；当  $n_{i-1} = 900 \text{ r/min}$  时， $\varphi = 1.11$ ；当  $\varphi \rightarrow 1$  时即为无级调速。

### 四、调速的经济指标

调速的经济指标包括设备的原始投资和运行费用两方面，后者又包括电能消耗和设备维护费用两部分。

运行中电能消耗可以用调速系统的运行效率  $\eta$  来表征，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1-10)$$

式中  $P_1$ ——电动机的输入功率；

$P_2$ ——电动机的输出功率。

这项指标需要根据具体的调速方法来进行分析。

### 思考题与习题

1-1 起重运输机械的电气传动包括哪些内容？什么叫开环系统？什么叫闭环系统？

1-2 什么叫机械特性的硬度？举例说明之。

1-3 什么叫恒转矩负载、变转矩负载、阻转矩负载和位转矩负载？

1-4 起重运输机各种机构（起升、运行、回转、变幅）转矩负载的机械特性各有什么特点？试画出其机械特性曲线。

1-5 电车从平路开向下斜坡时，如图 1-16 所示，转矩负载的性质发生了什么变化？

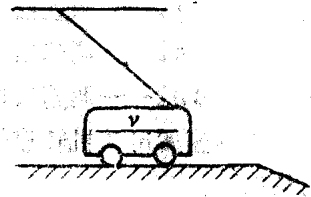


图 1-16

1-6 试用运动方程式说明系统处于静止、恒速旋转、加速、减速各种工作状态的条件是什么？在图 1-17 几种情况下系统的运行状态是加速？减速？还是匀速？（箭头表示转矩的实际作用方向）？

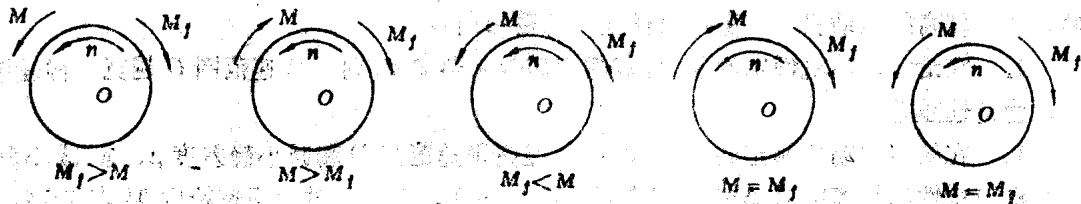


图 1-17