

中等专业学校教材

起重与工程机械电气设备

沈阳铁路机械学校 肇溥仁 主编

郑州铁路机械学校 刘更三 主审

中国铁道出版社

1992年·北京

(京) 新登字063号

内 容 简 介

本书共分四篇十一章，主要内容包括：电机的机械特性，起动、调速、电气制动的基本原理和方法及电力拖动的基本概念；工业电气设备中常用的电器结构、工作原理及使用；电力拖动基本电气控制线路原理及设计方法，起重与工程机械典型电气线路工作原理及故障分析、检查、处理；可控硅（晶闸管）整流、调压、逆变电路的基本原理，常用的可控硅触发电路的基本工作原理及起重与工程机械中典型可控硅电路的原理分析。

本书除为中等专业学校教学用书外，尚可供技工学校和现场职工培训教材用，也可供有关技术及使用维修人员参考。

中等专业学校教材

起重与工程机械电气设备

沈阳铁路机械学校 肇溥仁 主编

中国铁道出版社出版、发行

（北京市东单三条14号）

责任编辑 吴桂萍 封面设计 赵树祺

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米1/16 印张：15.25 插页：2 字数：376千

1992年6月 第1版 第1次印刷

印数：1—2500册

ISBN7-113-01208-6/U·372 定价：4.25元

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 第一篇 电力拖动与电动机 | 1 |
| 第一章 电力拖动基本概念 | 1 |
| 第一节 概 述..... | 1 |
| 第二节 电力拖动系统运动方程式..... | 2 |
| 第三节 生产机械的负载转矩特性..... | 3 |
| 第四节 电力拖动系统稳定运行的条件..... | 5 |
| 思考题..... | 6 |
| 第二章 异步电动机 | 8 |
| 第一节 概 述..... | 8 |
| 第二节 异步电动机的电磁转矩与机械特性..... | 20 |
| 第三节 异步电动机的起动..... | 28 |
| 第四节 异步电动机的调速..... | 37 |
| 第五节 异步电动机的反转与制动..... | 43 |
| 第六节 异步电动机的两种运行状态..... | 50 |
| 习题与思考题..... | 51 |
| 第三章 直流串励电动机 | 55 |
| 第一节 概 述..... | 55 |
| 第二节 串励电动机的机械特性..... | 59 |
| 第三节 串励电动机的起动..... | 62 |
| 第四节 串励电动机的调速..... | 64 |
| 第五节 串励电动机的反转与制动..... | 68 |
| 习题与思考题..... | 70 |
| 第二篇 电 器 | 72 |
| 第四章 控制电器 | 72 |
| 第一节 闸刀开关及转换开关..... | 72 |
| 第二节 控制器..... | 74 |
| 第三节 主令电器..... | 76 |
| 第四节 接 触 器..... | 79 |
| 第五节 控制继电器..... | 86 |
| 第六节 电 磁 铁..... | 90 |
| 第七节 电 阻 器..... | 92 |
| 习题及思考题..... | 94 |

| | |
|----------------------------|------------|
| 第五章 保护电器 | 95 |
| 第一节 熔断器 | 95 |
| 第二节 过流继电器 | 100 |
| 第三节 热继电器 | 102 |
| 第四节 自动开关 | 105 |
| 习题及思考题 | 105 |
| 第三篇 电路图 | 106 |
| 第六章 电动机控制线路的基本环节 | 106 |
| 第一节 电气控制线路的图示原则、图形及文字符号 | 106 |
| 第二节 鼠笼式电动机直接起动电气控制线路 | 109 |
| 第三节 三相鼠笼式异步电动机降压起动电气控制线路 | 114 |
| 第四节 绕线式异步电动机自动起动控制 | 117 |
| 第五节 控制电路设计的一般规律和方法 | 120 |
| 习题及思考题 | 122 |
| 第七章 起重与工程机械典型电路图 | 125 |
| 第一节 龙门起重机的电路图 | 125 |
| 第二节 电动轮胎起重机的电路图 | 149 |
| 第三节 电瓶叉车的电路图 | 151 |
| 第四节 塔式起重机的电路图 | 155 |
| 第五节 TYD-16型捣固车电气控制原理 | 158 |
| 习题及思考题 | 161 |
| 第八章 起重与工程机械电气线路的故障及处理 | 163 |
| 第一节 电气线路故障的分析、判断及检查方法 | 163 |
| 第二节 龙门起重机电气线路的故障及处理 | 164 |
| 第三节 蓄电池叉车电气线路的故障及处理 | 166 |
| 习题及思考题 | 167 |
| 第四篇 可控硅在起重与工程机械中的应用 | 168 |
| 第九章 可控硅的基本知识 | 168 |
| 第一节 可控硅元件 | 168 |
| 第二节 可控硅整流电路 | 175 |
| 第三节 可控硅调压电路 | 183 |
| 第四节 可控硅有源逆变电路 | 186 |
| 习题及思考题 | 192 |
| 第十章 可控硅触发电路 | 193 |
| 第一节 单结晶体管触发电路 | 193 |
| 第二节 同步电压为正弦波的触发电路 | 198 |
| 第三节 同步电压为锯齿波的触发电路 | 201 |
| 习题及思考题 | 203 |

| | | |
|--------|------------------------|-----|
| 第十一章 | 可控硅在起重与工程机械中应用举例 | 204 |
| 第一节 | 可控硅充电设备 | 204 |
| 第二节 | 可控硅有源逆变串级调速 | 210 |
| 第三节 | 可控硅交流调压调速起重机 | 215 |
| 第四节 | 可控硅脉冲调速电瓶叉车 | 222 |
| 第五节 | 同步发电机的自动电压调节装置 | 227 |
| 习题及思考题 | | 233 |
| 参考资料 | | 235 |

第一篇 电力拖动与电动机

利用电动机将电能转换成机械能，拖动生产机械做功的拖动形式，称为电力拖动。电动机是电力拖动系统中不可缺少的机电能量转换元件。由于生产机械对电机特性的要求不同，电力拖动系统中采用的拖动电机也不同。在铁路起重与工程机械中采用最多的是交流三相异步电动机，其次是直流串励电动机。本篇除简单介绍电力拖动的基本概念及运动方程式以外，将着重介绍这两种电动机的机械特性、运行状态以及起动、制动和调速等运行性能。

第一章 电力拖动基本概念

本章简单介绍电力拖动的定义及其构成、电力拖动运动方程式、生产机械的负载转矩特性以及电力拖动系统稳定运行的条件等基本内容。

第一节 概 述

各种生产机械，在完成生产工艺的过程中，都需要消耗能量，如机械能、化学能、热能等。但大多数生产机械需要的是机械能。以电能作为能源，利用电动机将电能转换为机械能，来拖动生产机械的拖动形式，就称为电力拖动。

电力拖动系统由电源、电动机、控制设备、传动机构和生产机械等基本环节所构成。如图 1—1 所示。其中，电动机是机电能量转换元件；控制设备用来控制电动机按生产工艺要求进行运转；传动机构将电动机与生产机械联接起来，实现能量的传递及速度、运动方向的变换等。

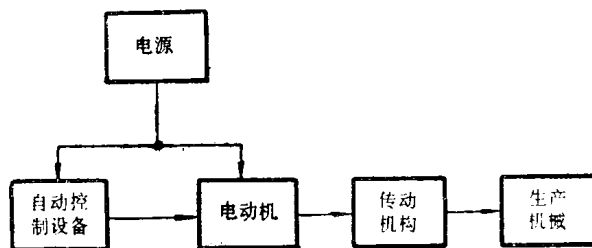


图 1—1 电力拖动系统构成

由图 1—1 可见，如果不讨论电源、控制设备及传动机构等环节，则电力拖动系统主要由电动机和生产机械两大基本环节所构成。而生产机械系指其工作机构而言。因此，简单地讲，电力拖动，就是利用电动机带动生产机械的工作机构运转。工作机构是指生产机械的运动部分，例如起重机的起升机构及大车和小车平移机构等。在电力拖动系统中，工作机构就是电动机的负载。如图 1—2 所示（见本章第二节）。

电动机带动负载，就是对工作机构发出一定的转矩 M ，并使它得到一定的转速 n 。可见 M 和 n 是生产机械对电动机提出的两项基本要求。生产机械对电动机则产生阻转矩，或称为负载转矩 M_z 。

但是，在电动机的内部， M 和 n 的乘积是功率 P 。而且在一定条件下， M 和 n 之间存在着确定的关系，这个关系叫做机械特性。另外，不同类型的生产机械，其负载转矩 M_z 与转速 n 之间也有不同的关系，这种关系称为生产机械的负载转矩特性。

然而，要研究电力拖动系统的运动规律，只知道电动机的机械特性和生产机械的负载转矩特性是不够的，还必须知道电动机和负载之间的关系，即必须知道电动机与负载之间的转矩与转速的关系。

第二节 电力拖动系统运动方程式

在电力拖动系统中，电动机与负载之间转矩与转速的关系，可以通过运动方程式表示出来。图1—2表示一个电力拖动系统。

根据刚体旋转运动定律（转动定律）知：

$$M - M_z = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

式中 M ——电动机的拖动转矩 ($N \cdot m$) ;
 M_z ——负载静阻转矩 ($N \cdot m$) ;
 J ——单轴旋转系统的转动惯量 ($kg \cdot m^2$) ;
 Ω ——电动机轴旋转的角速度 (rad/s) ;
 $\frac{d\Omega}{dt}$ ——电动机轴旋转的角加速度 (rad/s^2)。

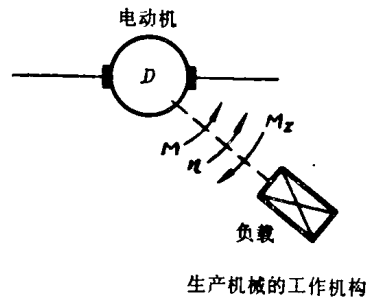


图1—2 电力拖动系统

式(1—1)为电力拖动系统运动方程式的一般形式。它与直线运动系统的运动方程式($F - F_z = m \frac{du}{dt}$)相似，实际上式(1—1)就是旋转运动系统的牛顿第二定律。由于式中单位计算使用不便，在电力拖动工程中，常用飞轮矩 GD^2 来表示旋转体的惯性作用，电动机轴的角速度也用转速 n 来表示，因而导出运动方程式的实用形式如下：

$$M - M_z = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1-2)$$

式中 $GD^2 = 4gJ$ ($N \cdot m^2$)
 $g = 9.80$ (m/s^2)
 $n = \frac{60\Omega}{2\pi}$ (rpm)

$$375 = \frac{4g \times 60}{2\pi} (m/min \cdot s)$$

式(1—2)就是电力拖动系统通用的运动方程式。它概括了电力拖动系统机械运动的普遍规律，是研究电力拖动系统各种运行状态的基础，也是生产实践中设计和计算的依据。

在理解和使用式(1—2)运动方程式时，必须注意以下几个问题：

1. GD^2 是一个整体符号，不能分开来理解。电动机转子以及机械部件的 GD^2 值，可由相应的产品目录和有关手册中查得，但其单位目前仍沿用公斤(力)·米²(即 $kgf \cdot m^2$)，使用时必须换算成法定计量单位的牛·米²(即 $N \cdot m^2$)。换算关系为：

$$1kgf \cdot m^2 = 9.80N \cdot m^2$$

2. 式中常数375是具有加速度的量纲。

3. M 和 M_z 是有方向的变量。当规定起升机构提升重物或平移机构前进时 n 的方向为

正时, 则 M 的方向与 n 的正方向相同时为正, 相反时为负。 M_z 的正负方向恰与上述规定相反。这一点, 在代入具体数值时须特别注意。

式(1-2)运动方程式表明: 电力拖动系统的运行状态, 是由作用在电动机轴上的所有转矩的代数和所决定的。因此, 运用这个运动方程式能方便地判断出系统处于何种运行状态。现举例说明如下:

当 $M > M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} > 0$, 系统加速运行;

当 $M < M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} < 0$, 系统减速运行;

当 $M = M_z$ 时, $\frac{dn}{dt} = 0$, $n = \text{常数}$ (或 $n = 0$), 系统恒速运行或静止, 称为稳定运行状态, 简称稳态^① (静止只是 $n = 0$ 时的一种特殊运行状态)。

第三节 生产机械的负载转矩特性

生产机械的机械特性, 就是生产机械的负载转矩 M_z 与其转速 n 之间的关系, 即 $M_z = f(n)$, 通常称为生产机械的负载转矩特性。

不同的机械负载, 具有不同的负载转矩特性。典型的负载转矩特性有三种类型: 恒转矩负载特性、恒功率负载特性及通风机型负载特性。

一、恒转矩负载特性

负载转矩 M_z 与转速 n 无关的特性, 即 $M_z = k$ (常数), 称为恒转矩负载特性。凡是负载转矩 M_z 不随转速 n 变化的生产机械都具有恒转矩负载特性。

恒转矩负载又可分为以下两种:

(一) 反抗性恒转矩负载

反抗性恒转矩负载, 其负载转矩 M_z 的作用方向总是反对运动的方向。磨擦性负载转矩就具有这种性质。例如起重机的平移机构, 就属于反抗性恒转矩负载。因此, 其特性应画在第一与第三象限, 如图1-3所示。

(二) 位能性恒转矩负载

位能性恒转矩负载, 其负载转矩 M_z 的作用方向是不随运动方向改变的。例如起重机的重物负载, 其转矩 M_z 的作用方向在提升与下放时相同。因此, 其特性应画在第一与第四象限, 如图1-4所示。

二、恒功率负载特性

在机床加工中, 粗加工时切削量选得较大, 因而阻力也大, 常采用低速; 精加工时切削量较小, 阻力也小, 往往用高速。这样, 在不同转速下, 负载转矩 M_z 基本上与转速 n 成反比, 即

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

$$\text{或负载功率} \quad P_z = M_z \Omega = M_z \frac{2\pi n}{60} = \frac{M_z n}{9.55} = \frac{k}{9.55} = \text{常数}$$

^① 实际上应称为平衡运行状态, 因为稳定运行状态还需具备其它条件 (见本章第四节)。

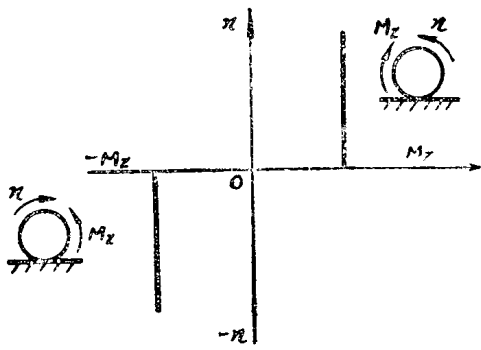


图 1-3 反抗性恒转矩负载特性

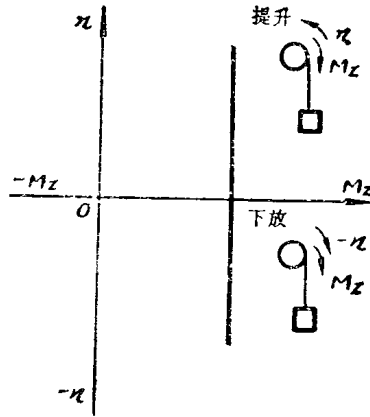


图 1-4 位能性恒转矩负载特性

也就是说，在调速时电动机输出的功率基本不变，则形成恒功率的负载特性。因此， M_z 与 n 的关系是一条双曲线，如图 1-5 所示。

三、通风机型负载特性

按离心力工作的通风机、水泵等生产机械，其内部空气或水等介质对叶片的阻力 M_z 基本上与转速 n 的二次方成正比，即

$$M_z = kn^2$$

因此，通风机型负载特性是一条抛物线，如图 1-6 所示。

上述三种都是典型的负载特性。实际负载可能是一种类型，也可能是几种类型的综合。例如，起重机主钩本身的负载转矩特性，即由主钩本身重量产生的位能性负载转矩 $M_{位}$ 和拖动系统由于摩擦引起的阻转矩（反抗性负载转矩） $M_{反}$ 所合成，而且其 $M_{反}$ 大于 $M_{位}$ 。因此

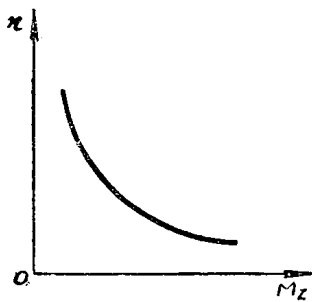


图 1-5 恒功率负载特性

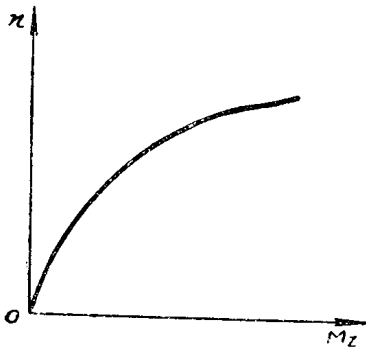


图 1-6 通风机型负载特性

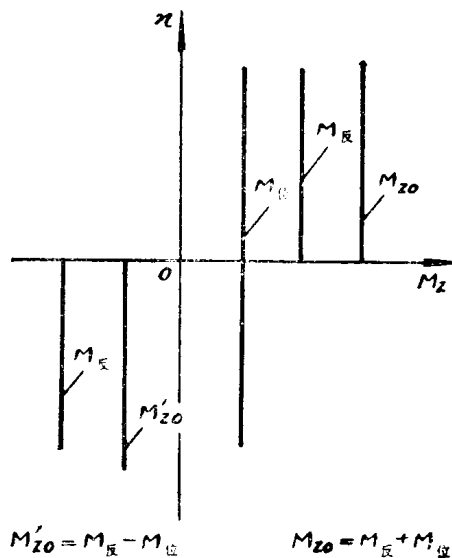


图 1-7 起重机主钩本身的负载特性

$$\begin{cases} \text{提升时: } M_{z0} = M_{反} + M_{位} & \text{在第一象限} \\ \text{下降时: } M'_{z0} = M_{反} - M_{位} & \text{在第三象限} \end{cases}$$

可见，主钩本身提升与下降时，表现的负载转矩特性，仍为反抗性负载特性，如图 1—7 所示。

第四节 电力拖动系统稳定运行的条件

由于运动方程式具体反映了电动机与负载之间的转矩和转速的关系。因此，当知道了电动机的机械特性和生产机械的负载转矩特性以后，就可以根据运动方程式来分析整个电力拖动系统的运行状态。现在拟就电力拖动系统的稳定运行状态进行讨论。

如果电力拖动系统原来处于平衡运行状态，若在某种外界扰动下离开原来的平衡状态时，能够自动地达到新的平衡状态，或在扰动消失后，能够恢复到原来的平衡状态，这种平衡状态称为稳定平衡运行状态或稳定运行状态，简称稳态。

〔例 1〕图 1—8 表示系统原来在机点平衡运行，电动机的机械特性与负载特性的交点 A 为平衡运行点（即满足 $M_A = M_z$ 条件）。现假设电网电压升高了（即扰动），相应的机械特性由 1 过渡到 2，但因惯性作用，电动机转速来不及变化，运行点瞬间由 A 过渡到 B 点。在新的特性上，由于 $M = M_B > M_z$ ， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，电动机将沿特性 2 加速，同时随 $n \uparrow \rightarrow M \downarrow$ ，直到 C 点， $M_C = M_z$ ，系统又达到新的平衡。当扰动消失后，电动机的机械特性又恢复为曲线 1。这时运行点过渡到 D 点，由于 $M_D < M_z$ ， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，转速开始下降，一直回到 A 点，使 $M_A = M_z$ ，转矩重新达到平衡。这说明系统在 A 点的平衡运行状态是稳定的，即 A 点是一个稳定的平衡运行点。

但是，系统处于平衡运行状态，并不一定在任何情况下都是稳定的。图 1—9 所示的情况，就属于不稳定的平衡运行状态。

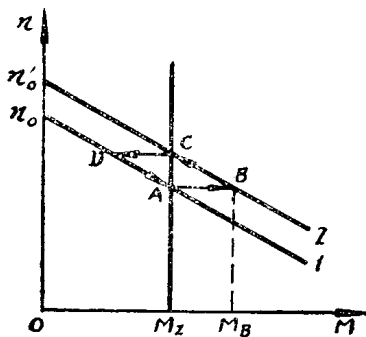


图 1—8 稳定运行状态

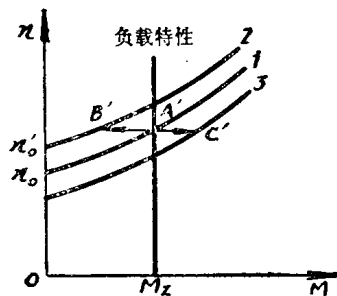


图 1—9 不稳定的平衡运行状态

〔例 2〕图 1—9 中电动机的机械特性 1 为上翘的，负载转矩为常值 M_z 。假设系统原来在 A' 点平衡运行 ($M_{A'} = M_z$)，如果电网电压升高了（扰动），运行点过渡到相应曲线 2 的 B' 点。但这时 $M_{B'} < M_z$ ， $\frac{dn}{dt} < 0$ ，转速将下降。由于电动机的机械特性曲线是上翘的，随 $n \downarrow \rightarrow M \downarrow$ ，导致转速越来越低。反之，如果电网电压降低了，运行点过渡到相应曲线 3 的 C' 点。但 $M_{C'} > M_z$ ， $\frac{dn}{dt} > 0$ ，转速将升高，且随 $n \uparrow \rightarrow M \uparrow$ ，以致转速越来越高。可见，在这种情况下不可能达到新的平衡。说明系统在 A' 点的平衡运行状态是不稳定的，即 A' 点是一个不稳定的平衡运行点。在 A' 点上，虽然可以得到暂时的平衡 ($M_{A'} = M_z$)，

却经不起“风吹草动”，稍有一点外界扰动（如电网电压波动、负载变化等），就失去平衡状态，再也达不到新的平衡，即达不到稳定的平衡运行状态。

以上两例表明：系统的平衡运行状态与稳态（即稳定的平衡运行状态）是不同的。平衡只需满足 $M = M_z$ 的条件即可；而稳态除满足 $M = M_z$ 以外，还需具有扰动后重新达到平衡的能力。同时，从上面两例中还可以看出，系统能否处于稳定平衡运行状态，完全取决于电动机的机械特性与负载转矩特性的相互配合，或者说取决于该两特性与 n 轴间夹角的正切 $\frac{dM}{dn}$ 与 $\frac{dM_z}{dn}$ 的相对大小。当电动机的机械特性与 n 轴间夹角的正切 $\frac{dM}{dn}$ 小于负载转矩特性与 n 轴间夹角的正切 $\frac{dM_z}{dn}$ 时，系统就处于稳定的平衡运行状态（如图1—8或图1—10中的 a 、 c 所示）。反之，当电动机的机械特性与 n 轴间夹角的正切 $\frac{dM}{dn}$ 大于负载转矩特性与 n 轴间夹角的正切 $\frac{dM_z}{dn}$ 时，系统就处于不稳定的平衡运行状态（如图1—9或图1—10中的 b 所示）。由此可以总结出电力拖动系统稳定运行的充分而必要的条件是：

在运行点处 $M = M_z, \quad \frac{dM}{dn} < \frac{dM_z}{dn}$

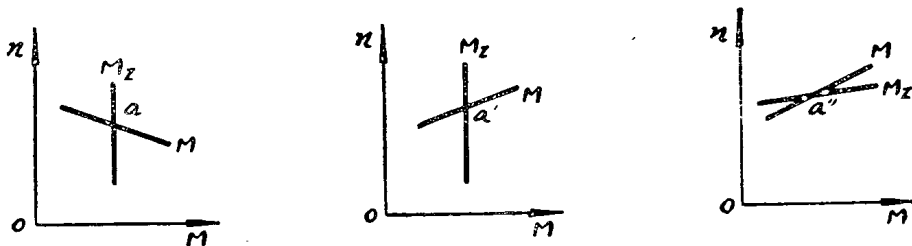


图1—10 系统稳定运行与不稳定运行的判断

| | | |
|---|--|---|
| <p>(a) $\frac{dM_z}{dn} = 0, \frac{dM}{dn} < 0$</p> <p>$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_z}{dn}$</p> <p>能稳定运行</p> | <p>(b) $\frac{dM_z}{dn} = 0, \frac{dM}{dn} > 0$</p> <p>$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_z}{dn}$</p> <p>不能稳定运行</p> | <p>(c) $\frac{dM_z}{dn} > 0, \frac{dM}{dn} > 0$</p> <p>$\frac{dM_z}{dn} > \frac{dM}{dn}$</p> <p>仍能稳定运行</p> |
|---|--|---|

对于恒转矩负载的生产机械来说，由于 $\frac{dM_z}{dn} = 0$ ，系统稳定运行的充分而必要的条件是：在运行点处

$$M = M_z \quad \frac{dM}{dn} < 0$$

这就要求电动机的机械特性是向下倾斜的（斜率为负值）。恰好一般电动机具有这种特性。因此，一般电力拖动系统在恒转矩负载下都能稳定运行。这就是通常把平衡运行状态称为稳定运行状态的原因所在。但实际上，平衡与稳定的概念是有明显区别的。

思 考 题

1. 什么叫电力拖动？电力拖动系统包括哪几个环节？各环节的作用是什么？试举例说明。
2. 电力拖动系统的运动方程式是怎样的？式中电动机的拖动转矩 M 与负载的静阻转矩 M_z 的含意是什么？ M 与 M_z 的正方向是怎样规定的？如果实际方向与规定的正方向相反，说明什么问题？

3. 怎样从运动方程式上看出电力拖动系统是处于加速的、减速的、稳态的或静止的哪种运行状态？

4. 生产机械的负载转矩特性有哪几种类型？它们的特点各是什么？

5. 起重机的负载转矩是属于什么类型的？起重机的起升机构与平移机构的负载转矩特性有什么不同？主钩空钩本身是属于什么性质的负载？

6. 电力拖动系统稳定运行的必要条件是什么？充分而必要的条件是什么？

7. 平衡运行状态与稳定运行状态有什么不同？为什么通常把平衡运行状态称为稳定运行状态？

8. 试判断图 1—11 中 (a)、(b)、(c)、(d) 各系统的稳定性。并具体说明其理由？

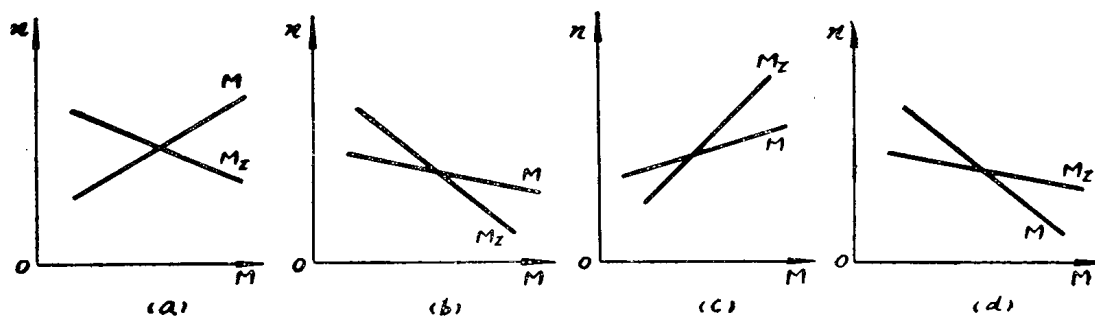


图 1—11

第二章 异步电动机

异步电动机又称感应电动机，是现代化工农业生产及起重与工程机械中应用最普遍的电动机。异步电动机由三相电源供电。由于它具有结构简单、价格低廉、运行可靠、重量轻、操作及维护方便等优点，在有三相交流电源的场合，除了对调速性能要求较高的生产机械采用直流电动机拖动以外，大都采用异步电动机拖动。

异步电动机又可分为鼠笼式和绕线式两种。鼠笼式电动机较绕线式电动机构造简单、维护方便、坚固耐用而价廉，但起动及调速性能不如后者。因此，在要求起动电流小、起动转矩大及需要经常调速的生产机械中，多采用绕线式异步电动机来拖动。

本章除简单介绍异步电动机的构造、原理、技术数据及工作方式以外，将重点介绍异步电动机的电磁转矩和机械特性，以及异步电动机的起动、调速、反转与制动等运行性能。

第一节 概 述

一、异步电动机的结构简介

异步电动机主要由定子和转子两个部分构成。定子与转子中间有一个很小的空气隙。定子和转子都由用硅钢片叠成的铁心和沿铁心圆周均匀分布的绕组所组成。定、转子铁心与空气隙构成电机的磁路。定子绕组是电机的主要电路和核心部分，三相绕组可以接成星形或三角形，其主要作用是通过电流、产生旋转磁场和感应电势。转子绕组的主要作用是产生感应电势、电流和电磁转矩，从而实现机电能量的转换过程。转子根据其绕组型式不同，又可分为鼠笼式和绕线式两种。鼠笼式转子是由若干导体经两个端环形成自行闭合的松鼠笼型短路绕组而得名。绕线式转子三相绕组可接成星形，三根引出线分别接到三个滑环上，通过三组电刷引出。这种转子的特点是，可以通过滑环和电刷，将附加电阻串入转子回路，以改善起动性能和调节转速。其接线示意图如图 2—1 所示。

二、异步电动机的工作原理

异步电动机的工作原理，可以用图 2—2 来说明。

当定子三相对称绕组加上对称的三相电压后，绕组中便有对称的三相电流流过，此电流在气隙中产生一个以同步转速 n_0 旋转的旋转磁场，转子的导体与旋转磁场的磁通相对切割而产生感应电势 E_2 和电流 I_2 ，转子电流与旋转磁场相互作用产生电磁转矩 M ，使电动机的转子顺旋转磁场的方向转动起来。如果电动机轴上加有机械负载，电动机便拖动机械负载运转并输出机械功率。即电动机将输入的电能转换成机械能输出。

异步电动机在负载运行时，其转速 n 总是低于旋转磁场的同步转速 n_0 ，即这两种转速之间总是存在着差异（ $n < n_0$ ，否则定、转子间便没有相对运动，就不可能产生感应电势 E_2 、电流 I_2 和电磁转矩 M ），因此把它称为异步电动机。又因这种电动机的转子电流是由电磁感

应现象而产生的，所以又称为感应电动机。

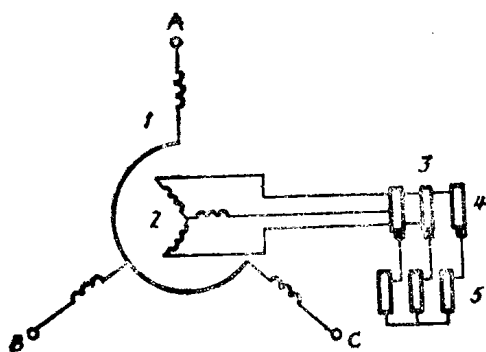


图 2-1 绕线式异步电动机的接线示意图
1——定子，2——转子，3——滑环，4——电刷，5——附加电阻。

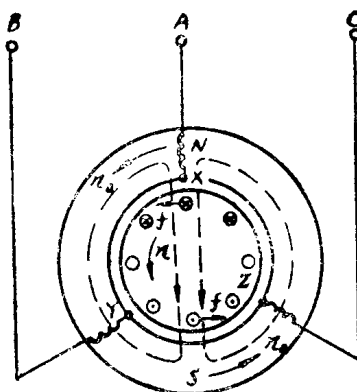


图 2-2 异步电动机的工作原理

三、异步电动机的转差率

异步电动机的转速 n 与同步转速 n_0 之间相差的程度，可用转差率 S 来表示。转速差 $n_0 - n$ （称相对转速）与同步转速 n_0 的比值，称为转差率。即

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (2-1)$$

$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (2-2)$$

式中 f_1 ——电源电压的频率；

p ——电动机的磁极对数。

可见，当 f_1 和 p 确定后，同步转速 n_0 就固定了。但电动机的转速 n 却随负载而变。转速 n 变化后，转差率 S 也随之改变。因此，转差率 S 的大小同样能反映异步电动机的转速 n 。一般异步电动机在额定负载时的转差率 S_n 约为 $0.01 \sim 0.05$ 。空载时 $S < 0.005$ 。

转差率 S 是分析异步电动机运行性能的一个重要物理量。电动机的运行状态不同时，对应的转差率 S 的数值范围也不同。例如，异步电动机起动或转子被堵转时的转速 $n = 0$ ，转差率 $S = 1$ ；电动机转速趋近于同步转速 n_0 时，转差率 S 便趋近于 0 。可见，异步电机在电动机状态下运行时，其转速 n 的变化范围为 $0 \sim n_0$ ，相应的转差率 S 的变化范围为 $1 \sim 0$ 。当异步电机在外力作用下运行时，其转差率 S 可能超出上述范围。例如，电机转向与旋转磁场方向相反时， $S > 1$ ；当电机转向与旋转磁场方向相同，而转速 n 超过同步转速 n_0 时， $S < 0$ 。但是，在这两种情况下，电动机都处于制动运行状态（制动运行状态将在本章第五节中介绍）。

异步电动机的转子感应电势 E_2 和电流 I_2 的频率 f_2 （简称转子频率），也与转差率 S 有关。当转子不动时，转子频率 f_2 等于电源电压 U_1 的频率 f_1 ；当转子以转速 n 顺着旋转磁场的方向旋转时，它们之间的相对转速为 $n_2 = n_0 - n$ 。因此，转子频率 f_2 应为：

$$f_2 = \frac{pn_2}{60} = \frac{p(n_0 - n)}{60} = \frac{pn_0}{60} \cdot \frac{(n_0 - n)}{n_0} = f_1 S$$

即

$$f_2 = S f_1 \quad (2-3)$$

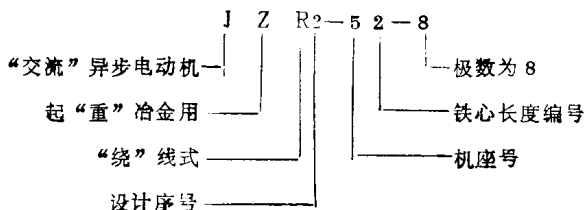
由式(2-3)知, 转子频率 f_2 等于定子频率 f_1 (即电源电压频率) 与转差率 S 的乘积。所以, 转子频率 f_2 也称为转差频率。

四、异步电动机的技术数据

为了便于了解电动机的技术数据和使用条件, 在每台电动机的机座上都装有一块铭牌, 可供使用时参考。

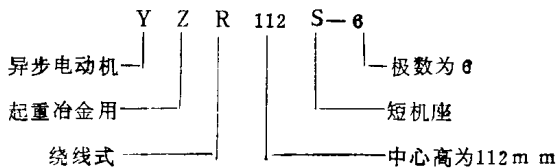
异步电动机的铭牌上标有以下技术数据:

1. 型号 表示电动机的类型、结构特征、使用范围及设计序号、规格尺寸等, 一律用汉语拼音字母和阿拉伯数字组成。举例说明如下:



起重机用绕线式异步电动机, 除JZR₂、JZR系列外, 还有新设计制造的YZR系列; 起重机用鼠笼式异步电动机有JZ₂、JZ系列及新产品YZ系列。一般用途的封闭型鼠笼式异步电动机有JO₂、JO及Y等系列。

YZR系列型号中标有中心高度, 且对中、小型电机的机座长度采用国际通用符号表示, 即S——短机座; M——中机座; L——长机座。例:



2. 额定功率 P 。指电动机在额定情况下运行时, 轴上输出的机械功率, 单位为kW。

3. 额定电压 U 。指电动机在额定运行时加于定子绕组上的线电压, 单位为V。

4. 额定电流 I 。指电动机定子绕组上加额定电压、轴上输出额定功率时, 定子绕组中的线电流, 单位为A。

5. 额定频率 f_1 。我国标准工业用电频率(工频)为50Hz, 国内异步电动机的额定频率均为50Hz。

6. 额定转速 n 。指电动机定子绕组上加额定频率的额定电压、轴上输出额定功率时, 电动机的转速, 单位为r/min。

7. 额定功率因数 $\cos \varphi$ 。指电动机定子绕组上加额定电压、轴上输出额定功率时, 定子每相绕组的功率因数。异步电动机的功率因数约为0.75 (小电机) ~ 0.9 (大电机)。

8. 额定效率 η 。指电动机在额定电压以及轴上输出额定功率情况下, 输出的机械功率与输入的功率(有功功率)之比值。

对于三相异步电动机来讲, 其额定功率可用下式计算, 即

$$P_e = \sqrt{3} U_e I_e \eta_e \cos \varphi_e$$

9. 绕组接法 指电动机在额定电压下, 定子三相绕组应该采用的联接方法, 如星形

(Y) 联接、三角形 (Δ) 联接。有的铭牌上标有两个电压或两个电流值，接法为 Δ/Y ，则表示可接在不同线电压的两种电源中使用，而且前一个数值是指在 Δ 联接时的额定值，后一个数值是指在 Y 联接时的额定值。使用时必须按铭牌上的规定进行联接。因为三相异步电动机的定子绕组应该接成星形或三角形，需视其额定电压与电源电压的配合情况而定。例如，星形联接时额定电压为 380V 的定子绕组，改接成三角形联接时，就可以用于 220V 的三相电源中。为满足这种改接的需要，通常把三相绕组的六根出线头都引到电机座的接线板上，以便进行不同的联接，如图 2—3 所示。

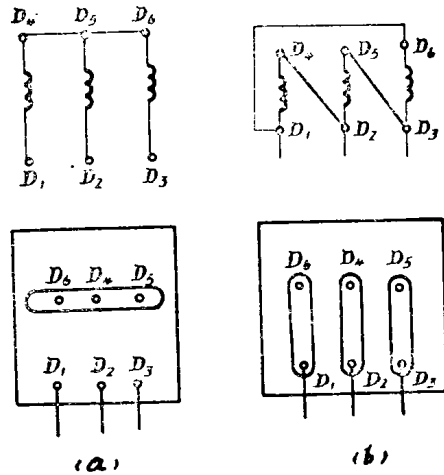


图 2—3 三相异步电动机的接线板
(a) Y 联接；(b) Δ 联接。

10. 绝缘 表示电机绕组的绝缘等级。它决定了电机的允许温升。

电机的允许温升，是指电机绕组的绝缘温度允许比周围环境温度高出的数值。

国家规定，标准环境温度为 $+40^{\circ}\text{C}$ ，因此，绝缘材料的最高允许温度减去 40°C ，便是电机的允许温升。各级绝缘材料的最高允许温度如表 2—1 所示。电机的允许温升也可参考表 2—1。当实际的环境温度与标准环境温度不同时，电机的实际允许温升便与表 2—1 中所列数值不同，此时电机带负载的能力也将有所改变。

电机绝缘材料的最高允许温度和允许温升

表 2—1

| 绝缘材料等级 | Y | A | E | B | F | H | C |
|------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 最高允许温度($^{\circ}\text{C}$) | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | 180以上 |
| 允许温升($^{\circ}\text{C}$) | 50 | 65 | 80 | 90 | 115 | 140 | 140以上 |

11. 转子额定电压 U_2 。指绕线式电动机定子绕组上加额定电压，转子绕组开路时，滑环之间的电压。单位为伏 (V)。

12. 转子额定电流 I_2 。指绕线式电动机输出额定功率时，转子绕组的线电流，单位为安 (A)。

13. 工作方式 (或定额) 额定值是设备制造厂家规定的某设备的正常运行状态—额定运行状态下的参数值。因此，电机的额定值，就是电机运行的基本依据。一般希望电机在额定状态下运行。因为在额定运行状态下，电机能可靠运行，而且性能良好、效率高。但实际上，电机不可能总是运行在额定状态。若运行时电机的电流超过额定电流，称为过载运行；小于额定电流，称为欠载运行。长期过载运行会使电机过热而损坏，长期欠载运行则浪费电机容量，而且运行效率不高。

五、异步电动机的工作方式

根据电动机带负载运行的持续时间不同，对电机发热的影响也就不同，故其所能承担的

负载功率也不一样。为了充分利用电机材料，电机制造厂把电动机分成连续、短时和断续三种工作方式（或工作制），以便供用户在不同类型的负载时合理选用。

1. 连续（长期）工作方式

电动机连续运行的时间很长，可使其温升达到该负载所对应的稳定温升时，称为连续工作方式（或长期工作方式）。例如：通风机、水泵、大型机床的主轴电机等，都属于连续工作方式。

2. 短时工作方式

电动机的工作时间很短，运行时温度达不到该负载所对应的稳定温升，但停车的时间却较长，其温度在此期间内足以降到周围的介质温度，这种工作方式称为短时工作方式。例如：水闸闸门开闭、机床夹紧装置用的电动机，就属于这种短时工作方式。

我国规定的短时工作制的标准时间有15、30、60及90min。

3. 断续（重复短时）工作方式

电动机的工作时间 t_g 与停歇时间 t_0 相互交替，且都比较短。工作时电机升温，但温升达不到该负载所对应的稳定值，停歇时电机降温，但也降不到周围介质温度，经过若干个周期后，电机温升达到一个稳定的波动状态（即在最高温升 τ_{max} 与最低温升 τ_{min} 之间波动），而平均温升不变，这种工作方式就称为断续工作方式（或重复短时工作方式）。例如：起重机、电梯、冶金辅助设备的电动机，就属于断续工作方式。

由于电机的温升是按指数曲线上升和下降的，按国家规定，断续工作时：

$$t_g + t_0 \leq 10\text{min}$$

显然，此时的最高温升 τ_{max} 仍低于该负载长期运行时所对应的稳定温升 τ_w 。

在考虑电机容量时，人们最关心的是最高温升 τ_{max} 是否低于电机绝缘的允许温升。改变 t_g 与 t_0 之间的比率，就会影响最高温升 τ_{max} 。为了充分利用电机容量，提出了负载持续率（又称暂载率或接电持续率） $ZC\%$ 这一指标。

在断续工作方式中，电机带负载工作的时间 t_g 与整个工作周期（ $t_g + t_0$ ）之比值，称为负载持续率 $ZC\%$ ，用公式表示，则：

$$ZC\% = \frac{t_g}{t_g + t_0} \times 100\% \tag{2-4}$$

我国规定，标准负载持续率 $ZC\%$ 有15%、25%、40%和60%四种。

式（2-4）表明电机工作时间占周期时间的百分比。可以看出，如果周期时间和负载功率不变，则 $ZC\%$ 越大，最高温升 τ_{max} 越高。或者说，同一台电机在不同的 $ZC\%$ 下工作时，所允许的负载功率（即额定输出功率）亦不同。 $ZC\%$ 越低时，工作期间允许的负载功率将越大。

起重机用的JZR、JZ及YZR、YZ等系列电动机，铭牌上的功率都按 $ZC\%$ 为25%时标定。因此，同一台电动机，在实际运用中，若实际的负载持续率 $ZC_z\% >$ 标定的25%时，电动机允许的负载功率应比铭牌标定值相应降低些；若实际的 $ZC_z\% <$ 标定的25%时，电动机允许的负载功率可比铭牌标定值适当提高些。

在选择电机容量时，若实际的 $ZC_z\%$ 与标准的 $ZC\%$ 不同时，也应将实际功率 P_z 换算成相近的标准 $ZC\%$ 下的功率 P_1 。然后再按产品目录选择功率相等或稍大些的电动机。

功率换算的原则是：两种情况下电机的损耗相等（发热量相当）。

当实际的 $ZC_z\%$ 与标准 $ZC\%$ 值相差不大时，电动机的功率可按下式进行换算，即