



21 世纪精品教材系列

# 电机与拖动

DIAN JI YU TUO DONG

主编◎孔祥

 吉林大学出版社

21 世纪精品规划教材系列

# 电机与拖动

主 编 孔 祥

副主编 赵付章 杨荣娟 马 涛

主 审 孙福成

 吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 / 孔祥主编. — 长春: 吉林大学出版社, 2016.3

ISBN 978-7-5677-5955-8

I. ①电… II. ①孔… III. ①电机②电力传动 IV.  
①TM3②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 059720 号

书 名: 电机与拖动

作 者: 孔祥 主编

责任编辑: 李伟华 责任校对: 李凤翔

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787×1092 毫米 1/16

印张: 19 字数: 380 千字

ISBN 978-7-5677-5955-8

封面设计: 可可工作室

北京楠海印刷厂印刷

2016 年 3 月 第 1 版

2016 年 3 月 第 1 次印刷

定价: 38.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 501 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-89580028/29

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: [jlup@mail.jlu.edu.cn](mailto:jlup@mail.jlu.edu.cn)

# 前 言

本书的特点主要体现在:

(1)侧重于基本原理和基本概念的阐述,并强调基本理论的实际应用。

(2)编写教材时,部分内容采用提出问题、分析问题、解决问题,最后总结出概念并推广到一般的写作方法。

(3)教材中编入了一些工程中已经应用且较为成熟的新技术,力求取材新颖。

(4)在每章末附有习题,以便于读者对本章内容练习提高。

(5)原理上以讲清楚概念、强化应用为重点,技能上加强内容的针对性和实用性。

(6)注重电机的基本工作原理,由浅入深,力求从基本概念上阐明问题,尽量避免复杂公式的推导。

全书共分 10 章,分别为电力拖动系统动力学、变压器、特殊用途的变压器、直流电机、直流电机的启动调速及四象限运行、三相异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、同步电机、特种电机、电动机的选择等。

本教材由孔祥任主编,孙福成任主审。参加本书编写的有中国能源建设集团甘肃省电力设计院马涛(第一章)、甘肃畜牧工程职业技术学院孔祥(第二、六、七、八章)、国网武威供电公司杨荣娟(第四、五章)、国网甘南供电公司赵付章(第三、九、十章)。在编写本书的过程中,还得到甘肃畜牧工程职业技术学院、国网甘南供电公司、国网武威供电公司、中国能源建设集团甘肃省电力设计院等单位热情的支持和帮助,许多同志提供了相关资料,在此一并深表感谢。

尽管编写时参考了本领域许多著作,整理和引用了国内外部分文献和技术资料,但由于本书所涉及内容大多数为新原理、新技术,限于作者的理论水平和实践经验,书中错误和缺点在所难免,敬请批评指正。

编 者

2016 年 2 月



# 目 录

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 第一章 电力拖动系统动力学 .....       | (1)   |
| 第一节 单轴电力拖动系统 .....        | (1)   |
| 第二节 多轴电力拖动系统 .....        | (3)   |
| 第三节 电力拖动系统稳定运行的条件 .....   | (7)   |
| 第二章 变压器 .....             | (10)  |
| 第一节 变压器的工作原理、分类和结构 .....  | (10)  |
| 第二节 变压器的空载运行 .....        | (17)  |
| 第三节 变压器的负载运行 .....        | (23)  |
| 第四节 标么值 .....             | (29)  |
| 第五节 变压器的参数测定 .....        | (31)  |
| 第六节 变压器的运行性能 .....        | (34)  |
| 第七节 三相变压器及其运行 .....       | (36)  |
| 第八节 变压器的并联运行 .....        | (44)  |
| 第九节 三绕组变压器 .....          | (48)  |
| 第三章 特殊用途的变压器 .....        | (51)  |
| 第一节 自耦变压器 .....           | (51)  |
| 第二节 仪用互感器 .....           | (53)  |
| 第三节 整流变压器 .....           | (55)  |
| 第四节 脉冲变压器 .....           | (65)  |
| 第四章 直流电机 .....            | (69)  |
| 第一节 直流电机的基本工作原理 .....     | (69)  |
| 第二节 直流电机的电枢绕组 .....       | (74)  |
| 第三节 直流电机的空载磁场 .....       | (81)  |
| 第四节 直流电机的电枢磁场 .....       | (84)  |
| 第五节 电枢电动势与电磁转矩 .....      | (88)  |
| 第六节 直流发电机工作原理 .....       | (90)  |
| 第七节 直流电动机的机械特性 .....      | (95)  |
| 第八节 串励和复励直流电动机 .....      | (97)  |
| 第九节 直流电机的换向 .....         | (99)  |
| 第五章 直流电机的启动调速及四象限运行 ..... | (106) |
| 第一节 直流电动机的启动 .....        | (106) |



|      |                          |       |
|------|--------------------------|-------|
| 第二节  | 直流电动机的调速 .....           | (107) |
| 第三节  | 直流电动机的四象限运行 .....        | (113) |
| 第四节  | 电力拖动系统的过渡过程 .....        | (116) |
| 第六章  | 三相异步电动机 .....            | (123) |
| 第一节  | 三相异步电动机的基本工作原理 .....     | (123) |
| 第二节  | 三相异步电动机的基本结构和铭牌 .....    | (129) |
| 第三节  | 三相异步电动机的定子绕组和感应电动势 ..... | (135) |
| 第四节  | 三相异步电动机的空载运行 .....       | (142) |
| 第五节  | 三相异步电动机的负载运行 .....       | (144) |
| 第六节  | 三相异步电动机的功率和转矩 .....      | (150) |
| 第七节  | 三相异步电动机的工作特性 .....       | (153) |
| 第八节  | 三相异步电动机参数的测定 .....       | (155) |
| 第七章  | 三相异步电动机的电力拖动 .....       | (161) |
| 第一节  | 三相异步电动机的电磁转矩表达式 .....    | (161) |
| 第二节  | 三相异步电动机的机械特性 .....       | (165) |
| 第三节  | 三相异步电动机的启动 .....         | (169) |
| 第四节  | 三相异步电动机的制动 .....         | (178) |
| 第五节  | 三相异步电动机的调速 .....         | (185) |
| 第八章  | 同步电机 .....               | (200) |
| 第一节  | 同步电机的基本知识 .....          | (200) |
| 第二节  | 同步电机的运行原理 .....          | (207) |
| 第三节  | 同步发电机的运行特性 .....         | (227) |
| 第四节  | 同步发电机的并联运行 .....         | (241) |
| 第五节  | 同步电动机和同步调相机 .....        | (254) |
| 第九章  | 特种电机 .....               | (265) |
| 第一节  | 步进电机 .....               | (265) |
| 第二节  | 伺服电机 .....               | (269) |
| 第三节  | 测速发电机 .....              | (273) |
| 第四节  | 直线电动机 .....              | (275) |
| 第五节  | 微型同步电动机 .....            | (279) |
| 第六节  | 单相串励电动机 .....            | (283) |
| 第七节  | 交磁电机扩大机 .....            | (285) |
| 第十章  | 电力拖动系统中电动机的选择 .....      | (288) |
| 第一节  | 电动机的发热与冷却 .....          | (288) |
| 第二节  | 电动机的工作制与额定功率 .....       | (290) |
| 第三节  | 电动机额定功率的选择 .....         | (293) |
| 参考文献 | .....                    | (298) |



# 第一章 电力拖动系统动力学

## 第一节 单轴电力拖动系统

电力拖动系统一般是由电动机、传动机构、工作机构、控制设备和电源组成,如图 1-1 所示。



图 1-1 电力拖动系统组成

最简单的电力拖动系统是电动机与工作机构直接相连,工作机构是电动机的负载,这种简单系统称为单轴电力拖动系统,电动机与负载同轴相连,转速相同。图 1-2 所示为单轴电力拖动系统,主要的物理量有:电动机转速  $n$ ,电动机电磁转矩  $T$ ,工作机构的负载转矩  $T_L$ ,电动机空载转矩  $T_0$ 。图中的箭头方向为各量的正方向。

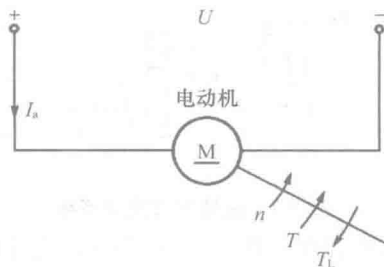


图 1-2 单轴电力拖动系统组成

为了分析问题的方便,通常称  $T_F + T_0 = T_L$  为负载转矩。电动机负载运行时,一般情况下,可以忽略  $T_0$ ,认为  $T_L = T_F$ 。

单轴电力拖动系统中电磁转矩、负载转矩与转速变化的关系用运动方程式来表示

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-1)$$

在实际工程计算中,经常用转速  $n$  代替角速度  $\Omega$  来表示系统转动速度,用飞轮惯量或称飞轮矩  $GD^2$  代替转动惯量  $J$  来表示系统的机械惯性。存在以下关系



$$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$$

$$J = m\rho^2 = \frac{GD^2}{g} \frac{1}{4} = \frac{GD^2}{4g}$$

式中:  $m$ ——系统转动部分的质量, kg;

$\rho$ ——系统转动部分的转动惯性半径, m;

$G$ ——系统转动部分的重力, N;

$D$ ——系统转动部分的转动惯性直径, m;

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

将  $\Omega$ 、 $J$  的关系式代入运动方程式, 化简后得

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

式中,  $GD^2$  为转动部分的飞轮矩,  $\text{N} \cdot \text{m}^2$ ; 系数 375 的单位为  $\text{m}/(\text{min} \cdot \text{s})$ 。

当  $T > T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} > 0$ , 系统处于加速运动状态; 当  $T = T_L$  时, 面  $\frac{dn}{dt} = 0$ , 系统处于恒转速

运行; 当  $T < T_L$  时,  $\frac{dn}{dt} < 0$ , 系统处于减速状态。

实际的电力拖动系统大多数是电动机通过传动机构与工作机构相连。图 1-3 所示的电力拖动系统中, 传动机构为二级齿轮减速机构, 其速比分别为  $j_1$ 、 $j_2$ , 传动效率分别为  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ 。

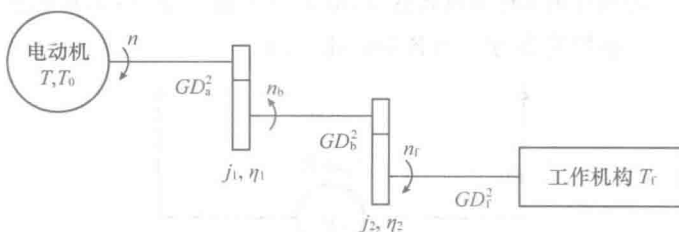


图 1-3 多轴电力拖动系统

这个系统中, 有三个转轴, 其转速分别为  $n$ 、 $n_b$  和  $n_f$ 。三个转轴上的转矩、飞轮矩也都不一样。在分析该系统时, 要分别对每一个转轴列出运动方程, 对三个运动方程联立求解, 便可得出系统的运行状态。显然, 对于多轴电力拖动系统, 上述方法相当繁琐, 特别是当转轴较多的时候。为了简化分析计算, 通常把负载转矩与系统飞轮矩等效折算到电动机轴上来, 即等效成单轴系统。这样, 只需列一个运动方程即可进行计算。图 1-3 所示的多轴电力拖动系统可以等效为图 1-4 所示的单轴系统。

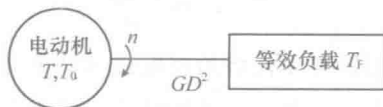


图 1-4 等效的系单轴电力拖动系统



等效折算的原则是：保持系统的功率及系统贮存的动能恒定。分析计算该类系统时，要进行两个折算：负载转矩的折算和系统飞轮矩的折算。

## 第二节 多轴电力拖动系统

### 一、转动系统转矩与飞轮矩的折算

#### 1. 转矩折算

转矩折算的原则是折算前后功率不变。理想情况下，不考虑传动机构的损耗，有

$$\begin{aligned} T_f \Omega_f &= T_F \Omega \\ T_F &= \frac{T_f \Omega_f}{\Omega} = \frac{T_f}{j} \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中： $\Omega_f$ ——工作机构转轴的角速度；

$\Omega$ ——电动机转轴的角速度；

$T_f$ ——工作机构的实际负载转矩；

$T_F$ ——折算到电动机轴上的负载转矩折算值；

$j = \frac{\Omega}{\Omega_f} = \frac{n}{n_f}$ ——传动机构总的速比，一般形式为  $j = j_1 j_2 j_3 \cdots j_n$ ，等于各级速比乘积。

式(1-3)为电动机轴上转矩折算公式。该式表明，折算后的负载转矩与传动机构的速比成反比。

实际上，传动机构总是有损耗，存在着传动效率。根据功率不变的原则，负载转矩的折算值为：

$$T_F = \frac{T_f}{j \eta} \quad (1-4)$$

式中， $\eta$  为传动机构总效率，等于各级传动效率的乘积， $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \cdots \eta_n$ 。

式(1-3)与式(1-4)之差为

$$\Delta T = \frac{T_f}{j \eta} - \frac{T_f}{j} = \frac{T_f}{j} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

式中， $\Delta T$  为传动机构转矩损耗， $\Delta T$  最终也是由电动机承担。

#### 2. 飞轮矩的折算

飞轮矩折算的原则是折算前后动能不变。

旋转体的动能为

$$\frac{1}{2} J \Omega^2 = \frac{1}{2} \times \frac{GD^2}{4g} \times \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

图 1-3 所示多轴电力拖动系统中，工作机构转轴  $n_f$  的飞轮矩为  $GD_f^2$ ，折合到电动机轴上



以后的飞轮矩为  $GD_F^2$ 。根据折算原则,可得

$$GD_F^2 = \frac{GD_l^2}{j_1^2} \quad (1-5)$$

式(1-5)为负载轴上飞轮矩的折算公式。该式表明,折算后的飞轮矩与速比的平方成反比。

同理,对于转轴  $n_b$ ,进行折算,可得

$$GD_B^2 = \frac{GD_b^2}{j_1^2} \quad (1-6)$$

因此,可以得到电力拖动系统折算到电动机轴上的总飞轮矩  $GD^2$ ,即

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_f^2}{(j_1 j_2)^2}$$

通常,电动机通过传动机构减速后驱动负载,即传动机构各轴的转速比电动机的转速低。由于飞轮矩的折算与速比平方成反比,因此各轴的飞轮矩折算到电动机轴上后数值都不大,只占系统总飞轮矩中的一小部分。而电动机转子本身的飞轮矩却占据了系统总飞轮矩中的大部分。

## 二、平移运动系统转矩与飞轮矩的折算

### 1. 平移运动系统转矩

图 1-5 拖动系统示意图,通过齿轮与齿条啮合,把电动机的旋转运动变成直线运动带动工作台。切削时工作与工作台的速度为  $v$ ,作用在工作上的刨刀切削力为  $F$ ,传动机构效率为  $\eta$ 。

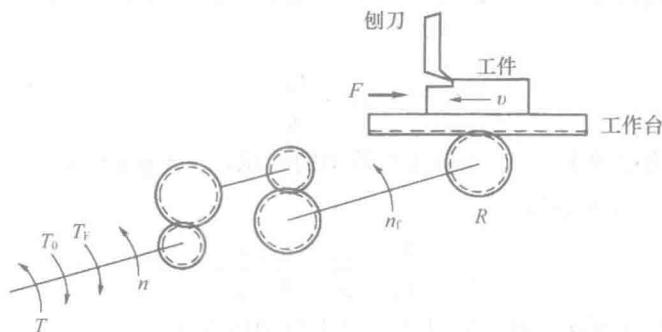


图 1-5 刨床电力拖动系统

切削功率为

$$P = Fv$$

切削力  $F$  反映到电动机轴上表现为转矩  $T_F$ ,反映到电动机轴上的切削功率为

$$T_F \Omega = T_F \frac{2\pi n}{60}$$



忽略传动系统的传动损耗,根据功率不变的原则,有

$$Fv = T_F \frac{2\pi n}{60}$$

可得

$$T_F = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n} \quad (1-7)$$

若考虑传动系统的传动损耗,则

$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} \quad (1-8)$$

式(1-7)和式(1-8)为工作机构平移时转矩的折算公式。

传动机构的转矩损耗  $\Delta T$  为

$$\Delta T = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} - 9.55 \frac{Fv}{n} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

转矩损耗  $\Delta T$  最终也是由电动机来承担。

## 2. 飞轮矩的折算

做平移运动部分的物体总重为  $G_l = m_l g$ , 其动能为

$$\frac{1}{2} m_l v^2 = \frac{1}{2} \times \frac{G_l}{g} v^2$$

折算前后的动能不变,因此

$$\frac{1}{2} \times \frac{G_l}{g} v^2 = \frac{1}{2} \times \frac{GD_F^2}{4g} \times \left( \frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

可得

$$GD_F^2 = 365 \frac{G_l v^2}{n^2} \quad (1-9)$$

**【例 1-1】** 图 1-5 所示刨床电力拖动系统,切削力  $F=8000 \text{ N}$ ,工作台与工件运动速度  $v=0.6 \text{ m/s}$ ,传动机构总效率  $\eta=0.75$ ,电动机转速  $n=2800 \text{ r/min}$ 。计算切削时折算到电动机轴上的负载转矩。

解:切削功率为

$$P = Fv = 8000 \times 0.6 = 4800 \text{ W}$$

折算后的负载转矩

$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta} = 9.55 \times \frac{4800}{2800 \times 0.75} = 21.83 (\text{N} \cdot \text{m})$$

## 三、升降系统的转矩与飞轮矩的折算

### 1. 负载转矩折算

图 1-6 所示为一起重机示意图,电动机通过传动机构驱动卷筒,缠绕在卷筒上的钢丝绳



悬挂一重物,重物的重力为  $G=mg$ ,速比为  $j$ ,重物提升时传动机构效率为  $\eta$ ,卷筒半径为  $R$ ,转速为  $n_f$ ,重物提升或下放的速度都为  $v$ 。

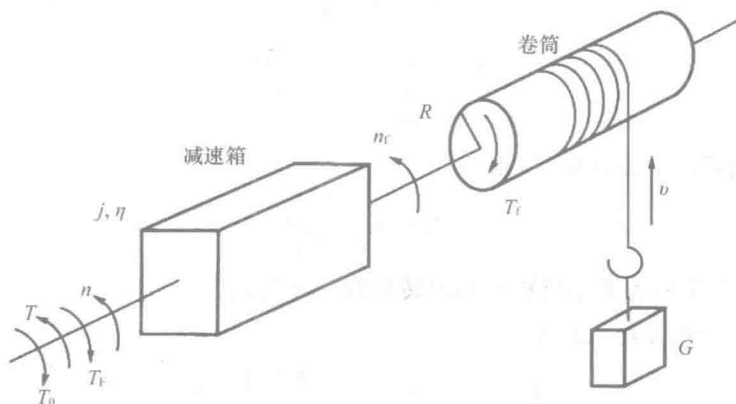


图 1-6 升降电力拖动系统

(1)提升重物时负载转矩的折算

卷筒的负载转矩为  $GR$ ,忽略传动机构损耗时,折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_F = \frac{GR}{j}$$

考虑传动机构的损耗时,折算到电动机轴上的负载转矩为

$$T_F = \frac{GR}{j\eta} \quad (1-11)$$

传动机构损耗所消耗的转矩为

$$\Delta T = \frac{GR}{j\eta} - \frac{GR}{j} = \frac{GR}{j} \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right)$$

(2)下放重物时负载转矩的折算

卷筒的负载转矩仍为  $GR$ ,不计传动机构损耗时,折算到电动机轴上的负载转矩也仍为  $\frac{GR}{j}$ ,负载转矩的方向也不变。

由于传动机构损耗转矩属于摩擦转矩,提升与下放重物两种情况下,各转轴的转动方向相反,因此损耗转矩大小相等,实际方向相反。

图 1-7 示出了电动机轴上的电磁转矩  $T$ 、负载转矩折算值  $\frac{GR}{j}$  及传动机构的损耗转矩  $\Delta T$  三者的方向,忽略了电动机的空载转矩  $T_0$ 。显然,提升重物时电动机承担  $\Delta T$ ,有  $T = \frac{GR}{j} + \Delta T$ ;而下放重物时,负载承担  $\Delta T$ , $T = \frac{GR}{j} - \Delta T$ ,即

$$T_F = \frac{GR}{j} - \Delta T \quad (1-12)$$

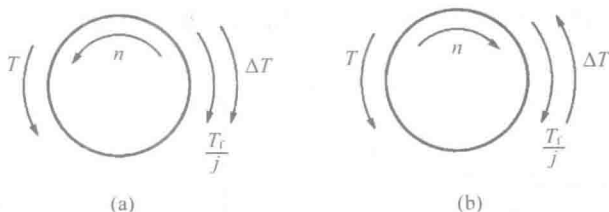


图 1-7 起重机工作时的转矩关系

(a)提升重物;(b)下放重物

## 2. 飞轮矩的折算

升降系统飞轮矩的折算与平移运动时相同。

需要说明的是,平移运动包含了提升和下放运动,提升和下放运动只是平移运动的一种特殊形式。因此,提升和下放运动中的负载转矩的折算和飞轮矩的折算,完全可以应用平移运动的计算方法。

## 第三节 电力拖动系统稳定运行的条件

电动机及其驱动的生产机械能否稳定运行,取决于电动机的机械特性与负载特性之间的配合是否合适。所谓稳定运行,指的是电力拖动系统已运行于某一转速,若外界出现扰动,如负载突变等使转速产生的变化在扰动消失后能随之消失,即系统能自行恢复到原来的速度,则称系统的运行是稳定的;反之,称之为不稳定运行。

下面具体分析电力拖动系统的稳定运行条件。首先介绍生产机械的负载特性。典型的负载特性共有 4 种,如图 1-8 所示。

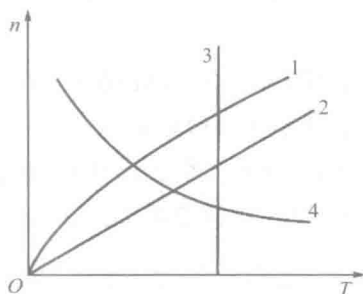


图 1-8 典型负载的机械特性

1-风机型;2-直线型;3-恒转矩型;4-恒功率型

特性 1 为风机、泵类负载,特征为转矩与转速的平方成正比,即  $T \propto n^2$ ;

特性 2 为  $T \propto n$  的负载,如电机等;

特性 3 为提升、牵引类负载,特征为恒转矩,即  $T$  不变。

特性 4 适用于金属切削机床等,特征为恒功率,即  $T \cdot n$  不变。



不失一般性,设电动机机械特性  $n=f(T)$  和负载机械特性  $n=f(T_L)$  分别如图 1-9(a) 和 (b) 所示。

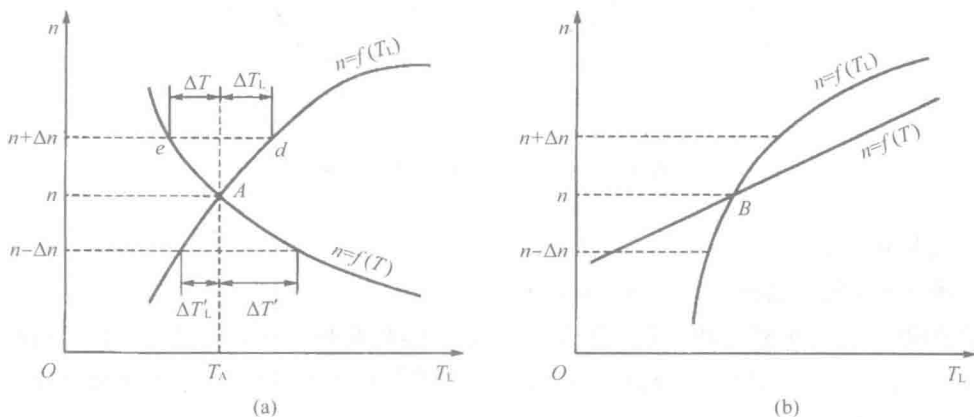


图 1-9 电力拖动系统稳定运行条件

(a) 稳定运行; (b) 不稳定运行

先分析图 1-9(a) 的情况。在两条特性曲线的交点 A 处,  $T=T_L=T_A$ ,  $J \frac{d\Omega}{dt} = \Delta T = 0$ ,  $\Omega$  为恒值, 电力拖动系统运行于转速  $n$ , A 点为稳态运行工作点。当外界扰动使工作点偏离 A, 转速从  $n$  变化到  $n+\Delta n$  后, 对应于电动机机械特性上的是 e 点,  $T < T_A$ ; 而对应于负载机械特性上的是 d 点,  $T_L > T_A$ 。则  $\Delta T = T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt} < 0$ , 系统将减速, 直至恢复原来转速, 重新工作于 A 点,  $T=T_L=T_A$ 。同理, 扰动使  $n$  降至  $n-\Delta n$  后, 系统可自行回到 A 点。也就是说, 对于图 1-9(a) 中所示的机械特性曲线, 系统能稳定工作于两曲线的交点 A, 并经得起扰动对转速的冲击, 故可以稳定运行。

同理, 图 1-9(b) 所示的电机机械特性和负载机械特性的匹配不能稳定运行, 即任意扰动使速度变化偏离了工作点 B 后, 就再也不能回到 B 点。

综上分析可知, 系统能稳定运行, 就要求在  $\Delta n > 0$  时, 有  $\Delta T < 0$ , 使速度自行下降, 而当  $\Delta n < 0$  时, 有  $\Delta T > 0$ , 使速度自行上升。其数学表达式为

$$\frac{d}{dn}(\Delta T) = \frac{d}{dn}(T - T_L) < 0$$

即

$$\frac{dT}{dn} < \frac{dT_L}{dn} \quad (1-13)$$

这就是电力拖动系统稳态运行应满足的条件, 即负载机械特性曲线的斜率要大于电动机机械特性曲线的斜率。

当然, 也要满足电动机运行的要求, 即



$$T = T_L$$

对照图 1-8 中的典型负载机械特性,可知在一般负载条件下,电动机具有下降的机械特性就基本上可以满足稳定运行的需要。特殊情况下,对于具有上升机械特性的电动机,只要能够满足式(1-12),系统依然可以稳定运行。

## 习 题

1. 为什么要进行电力拖动系统的等效折算? 折算的原则是什么?
2. 电动机经过速比  $j=10$  的减速器驱动工作机构,工作机构的实际转矩为  $40 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,飞轮矩为  $1.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。不计传动机构损耗,试计算折算到电动机轴上的转矩与飞轮矩。
3. 电力拖动系统中电动机的转速为  $1450 \text{ r/min}$ ,工作机构转速为  $145 \text{ r/min}$ ,传动效率为  $0.9$ ,工作机构的实际转矩为  $120 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,电动机的电磁转矩为  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。忽略电动机空载转矩,试分析该系统是运行于何种状态(加速、恒速还是减速过程)。
4. 起重机提升重物与下放重物时,传动机构损耗由电动机还是由重物负担?
5. 如图 1-10 所示的车床电力拖动系统中,切削力  $F=2000 \text{ N}$ ,工件直径  $d=150 \text{ mm}$ ,电动机转速  $n=1450 \text{ r/min}$ ,减速箱的三级速比分别是:  $j_1=2, j_2=1.5, j_3=2$ ,各转轴的飞轮矩为  $GD_a^2=3.5 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_b^2=2 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_c^2=2.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2, GD_d^2=9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ ,各级传动效率均为  $\eta=0.9$ 。计算:

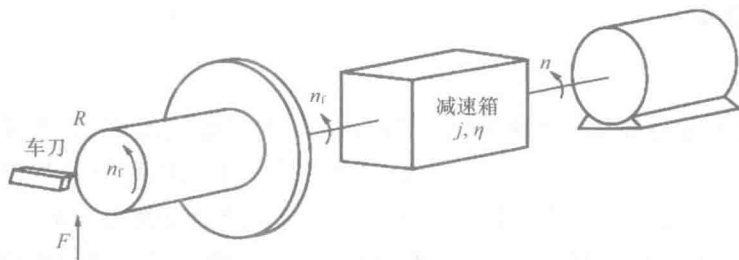


图 1-10 车床切削示意图

- (1) 切削功率;
- (2) 电动机输出功率;
- (3) 系统总飞轮矩;
- (4) 忽略电动机空载转矩时,电动机电磁转矩;
- (5) 车床开车但未切削时,若电动机加速度  $\frac{dn}{dt}=800 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{s})$ ,忽略电动机空载转矩,但不忽略传动机构的转矩损耗,求电动机电磁转矩。



## 第二章 变压器

变压器是一种应用非常广泛的静止电气设备,其最主要的功能是使交流电压按照使用要求升高或降低。我们知道,在电力系统中,输送一定的电能时,输电线路的电压越高,线路中的电流和损耗就越小。为此需要用升压变压器把交流发电机发出的电压升高到电压等级较高的输电电压,通过高压输电线路将电能经济地送到用电地区,然后再用降压变压器逐步将电压降低,供用户安全、方便地使用。在其他工业部门中,各种电气设备的电能利用,以及其他凡需要改变交流电压等级的场合,变压器都获得广泛的应用。

变压器种类很多,但基本原理相同。本章主要分析一般用途的电力变压器,对其他用途的变压器只作简单介绍。

### 第一节 变压器的工作原理、分类和结构

#### 一、原理、分类

##### 1. 工作原理

变压器是怎样把电能从一次侧传递到二次侧的?普通电力变压器能不能传递直流电?

变压器的工作原理如图 2-1 所示。接电源的绕组称为一次绕组(也称原方绕组),接负载的绕组称为二次绕组(也称副方绕组)。在一次绕组上外施交流电压  $u_1$ ,便有交流电流  $i_1$  流入,在铁心中产生交变磁通  $\Phi$ 。该磁通  $\Phi$  同时匝链二次绕组,在二次绕组中感应出电动势  $e_2$ 。由电磁感应定律可知:感应电动势的大小正比于绕组的匝数。因而改变二次绕组的匝数,可改变感应电动势  $e_2$  的大小。如果二次绕组接上负载,二次绕组上便有电能输出。这就是变压器的基本工作原理。

把两个绕组中电压较高的一个绕组称为高压绕组,电压较低的一个绕组称为低压绕组。变压器利用高、低压绕组中磁的联系(互感作用)能把一种电压、电流的交流电能转变为相同频率的另一种电压、电流的电能。输出电压比输入电压高的变压器(即二次绕组匝数比一次绕组匝数多的变压器)称为升压变压器,反之,输出电压比输入电压低的变压器(即二次绕组匝数比一次绕组匝数少的变压器)称为降压变压器。

变压器的用途十分广泛,种类很多。容量小的只有几伏安,大的可达数十万千伏安;电压等级可从数伏至数十万伏。

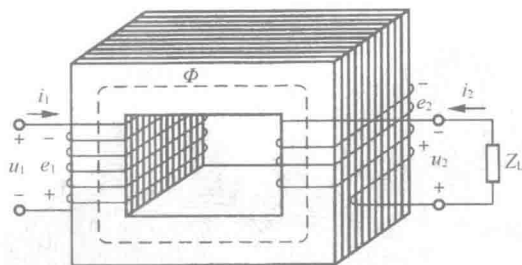


图 2-1 变压器的工作原理图

## 2. 分类

变压器怎样分类？

变压器有多种分类方法。

(1)按用途分,主要有电力变压器、调压变压器、仪用互感器、矿用变压器、试验用变压器及特殊变压器(如整流变压器、电焊变压器、脉冲变压器等)。有时也简单地分为电力变压器与专用变压器(特种变压器)两大类。

(2)按相数分为:单相变压器、三相变压器。

(3)按绕组数分为:双绕组变压器、三绕组变压器、自耦变压器。

(4)按铁心结构分为:芯式变压器和壳式变压器。

(5)按冷却方式和冷却介质分为:用空气冷却的干式变压器,用油冷却的油浸式电力变压器和充特种气体的充气式变压器(如充 SF6 的中小容量变压器)。

(6)按容量分为:一般 800~63 000 kV·A 的变压器称为大型变压器,90 000 kV·A 及以上的变压器称为特大型变压器。中小型变压器的分类一般按照习惯,没有准确的分类。

## 二、结构

### 1. 油浸式电力变压器

油浸式变压器是目前应用最广泛的一种变压器。其结构包括哪些主要部分,各有什么用途呢?

油浸式变压器的外形如图 2-2 所示。基本结构可分成三部分:铁心(导磁部分)、绕组(导电部分)、油箱及附件。

#### (1)铁心

铁心既是变压器的磁路,又是套装绕组的骨架。铁心总是闭合的。为了减小涡流引起的铁损耗(铁心损耗),采用厚度为 0.35 mm 或 0.5 mm 的高磁导率的硅钢片叠成。铁心上装绕组的部分称为铁心柱,连接铁心柱的部分称为铁轭。铁心柱和铁轭包围的空间称为窗口。

最新研制的采用铁硼系列非晶合金材料制作的铁心,空载损耗能降低 75% 左右,有取代硅钢片的发展趋势。