

电机与拖动基础

南开大学

人工智能学院

自动化与智能科学系

段 峰

教授 博导



课堂纪律

- 关于缺课、迟到、早退
- 关于课堂纪律-手机静音
- 关于作业（不得抄袭）
- 关于实验
- 关于课件拷贝

不允许直接到笔记本里拷贝课件

课后的第二天到163邮箱里下载

登录: dianjiyutuodong@163.com

密码: diantuo2015

为什么学电机与拖动基础

- 传统运动机械动力源：热能



机械能



外燃机

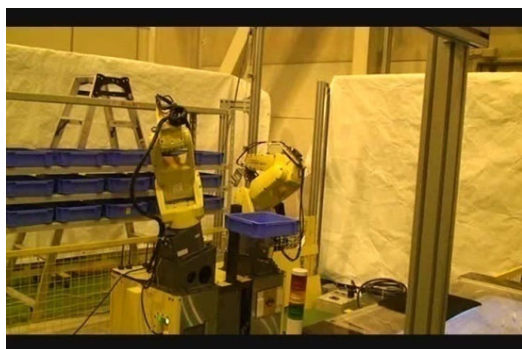


内燃机

- 现代运动机械动力源：电能



机械能



电能转化为力
(电机)





课程介绍

- **课程性质：**专业基础课 （自动化智能专业大二学生）
周学时3； 主讲54学时； 实验18学时； 3.5学分
- **课程组成：**
 - 电机学（直流电机、交流电机、变压器）
 - 电力拖动
- **课程基础：**《电路基础》、《模拟电子技术基础》、《磁路》、《动力学》等
- **课程目的：**使学生获得较好的工程实践训练，掌握电机拖动研究调试的基本方法和技能。培养能从事与电气工程及其自动化相关的系统和装置的运行、自动控制等领域工作的宽口径“复合型”工程技术人员。



教材及参考书目

- 教材： 《电机与拖动基础》 李发海等 清华大学出版社 2005
- 参考书：
 - 《电机与电力拖动》 冯畹芝 中国轻工业出版社
 - 《电机与电力拖动基础》 顾绳谷 合肥工大出版 1997
 - 《电机与拖动基础》 汤天浩 机械工业出版社 2004
 - 《电机与拖动》 唐介 高等教育出版社 2003

课程内容

- 预备知识：《磁路》、《电力拖动系统动力学》；
- 直流电机：结构、工作原理、功率特性、机械特性、运行特性；
- 变压器：结构、工作原理、等值电路、向量图、功率特性；
- 交流电机：结构、工作原理、等值电路、向量图、机械特性等；
- 实验课程：验证性实验（具体实验待定）
 - 三相鼠笼异步电动机的工作特性
 - 三相异步电动机的起动与调速
 - 直流他励电动机在各种运行状态下的机械特性
 - 三相异步电动机在各种运行状态下的机械特性
 - 异步电动机的M-S曲线测绘
- 考核方法：完成作业情况占10%，实验操作与报告占10%，阶段测验成绩（小论文）占10%，结业理论考试占70%。
- 简单介绍国际上最前沿的机器人研究（5-10分钟）
- 简单介绍如何做科研，如何发表，如何写论文（5-10分钟）



第一章 绪论

电 磁 力

基本概念

- 中国人很早就知道天然磁石会吸铁，并且发明了指南针

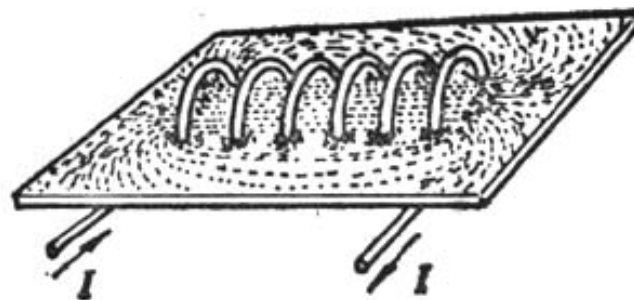
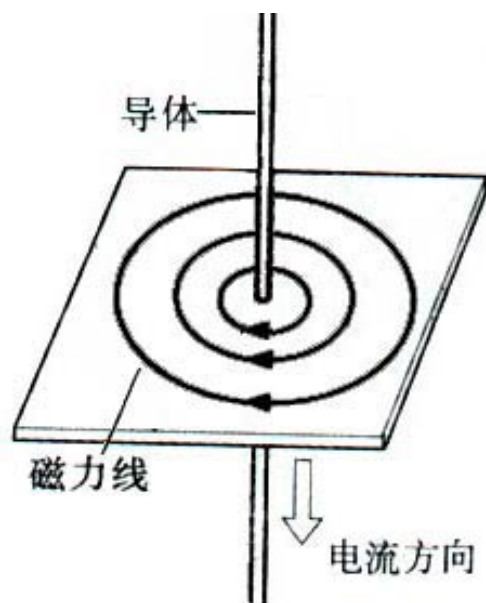
丹麦人奥斯特(Hans Oersted)在1820年发现了当电流通过导线时，附近的磁针会发生偏移。这个简单的实验证明了电与磁之间的联系，揭开了电磁学的序幕。



基本概念-磁场的描述

- 磁感应强度 B : 描述磁场**强弱**及**方向**的物理量

通常用**磁力线**形象地描述（疏密表示强弱，切线方向为此点的磁场方向）。



磁感应强度是一个向量，单位 T 特(斯拉)

基本概念-磁场的描述

- 磁(感应)通量 Φ : 穿过某一截面 S 的磁感应强度 B 的通量, 即穿过截面 S 的磁力线根数, 简称磁通, 用 Φ 表示

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

磁感应通量是一个标量, 单位 Wb 韦(伯)

在均匀磁场中, 若有 $\vec{B} \perp S$, 则

$$\Phi = BS \qquad B = \Phi/S$$

此时B为单位面积上的磁通, 称为磁通密度 (磁密)

$$\text{单位: } 1T = 1Wb/m^2$$

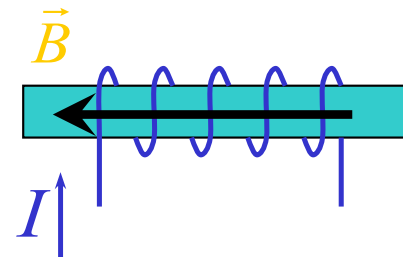
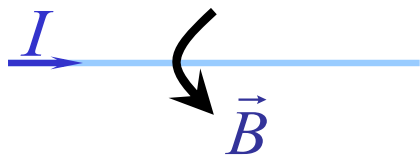
基本概念

- 法国人安培 (Andre Ampere) 关于电流和磁铁相互作用的一系列实验. 1822年安培发表了著名的安培定律, 并在 1826 年推出电流之间作用力的公式.



1820年法国物理学家毕奥和萨伐尔发现直流电流对磁针的作用可以看作是它的电流元的单独作用的总和。

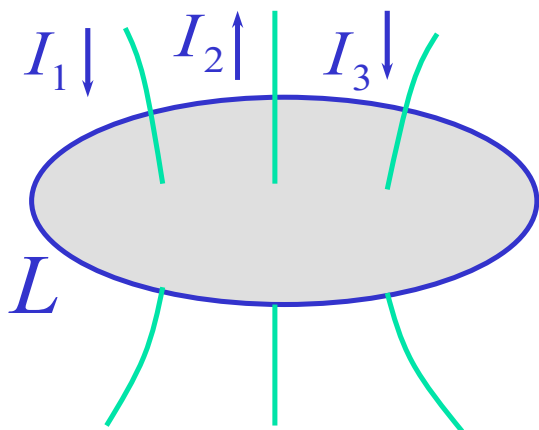
电流产生的磁场, 磁力线方向与电流方向满足**右手螺旋法则**, 大小关系用**毕奥-萨伐尔定律**描述



基本概念

- 安培环路定律(全电流定律): 在磁场中沿任意一个**闭合回路**的磁场强度线积分, 等于该回路所环链的所有电流的代数和

$$\oint_L \vec{H} dl = \sum \vec{I}$$



$$\oint_L \vec{H} dl = \sum \vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3$$

在理想磁场中的闭合回路计算简单, 工程中复杂磁场回路如何计算?

基本概念-磁场的描述

- 磁场强度 H : 描述导磁物质中磁场强弱和方向的基本物理量。

磁场强度是一个向量，单位 A/m 安(培)/米

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

μ 为导磁材料的磁导率

真空中的磁导率用 μ_0 表示

铁磁材料的磁导率 $\mu \gg \mu_0$

说明什么问题?

铁磁材料及其磁化特性

- 铁磁材料：铁、钴、镍及其合金的磁导率比真空磁导率大得多，一般称为铁磁材料

- 相对磁导率： $\mu_r = \mu / \mu_0$

μ 为铁磁材料磁导率， μ_0 为真空中的磁导率

铸铁	200	铸钢	1000
电工钢片	6000-7000	坡莫合金	100000

电机和变压器的磁通路通常用铁磁材料制成



磁化特性与磁化曲线

- 对于公式 $B = \mu H$ 中的 μ 在计算中一般看成常数
- 实际上 μ 不是常数，它与磁场强度、物质磁化状态的历史有关。
- **磁化曲线：** 通过实验，测出铁磁材料在不同磁场强度 B 下对应的磁密 H ，而画出的 $B-H$ 曲线。

横坐标为磁场强度，纵坐标为磁感应强度或磁密。

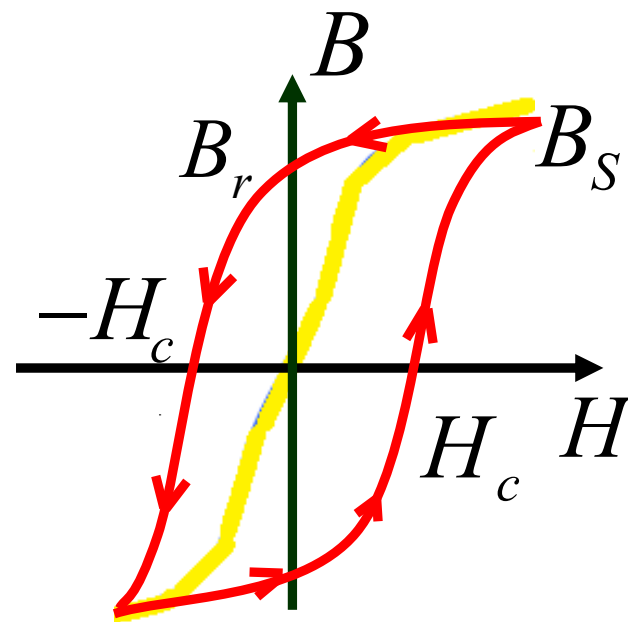
磁化特性与磁化曲线

起始磁化曲线

剩磁 B_r

矫顽力 H_c

饱和磁感应强度 B_s



B 的变化落后于 H ，从而具有剩磁，即磁滞效应

每个 H 对应不同的 B 与磁化的历史有关。

磁滞回线--不可逆过程

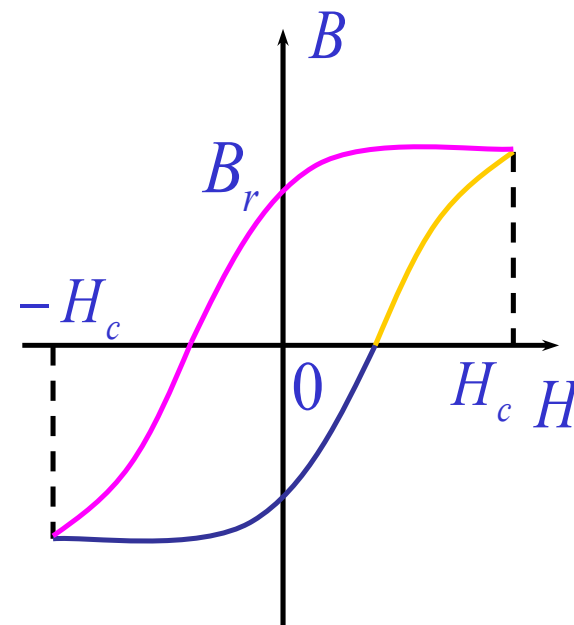
基本磁化曲线（黄色）

在交变电流的励磁下反复磁化使其温度升高的

磁滞损耗与磁滞回线所包围的面积成正比。

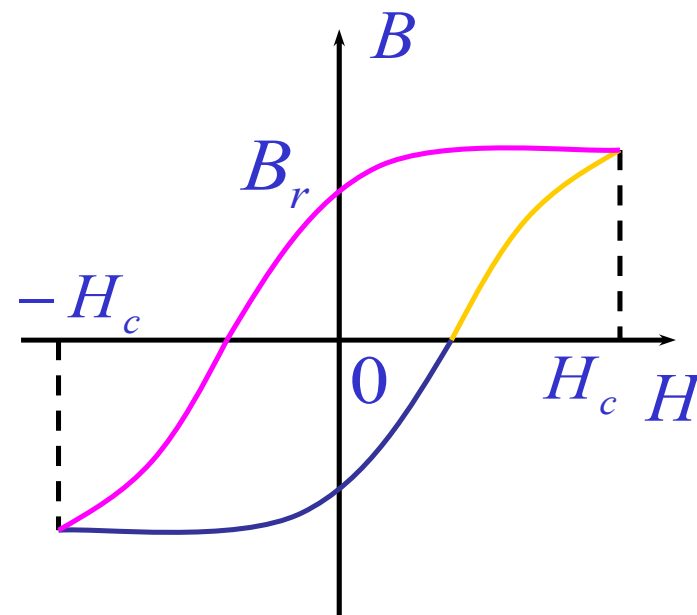
铁磁材料分类

- 软磁材料：磁滞回线较窄的铁磁材料。
如硅钢片、铁镍合金等
做电机、变压器铁心
- 硬磁材料：磁滞回线较宽的铁磁材料。
如钨钢、钴钢等
做永久磁铁
- 矩磁材料：磁滞回线较窄且接近矩形的铁磁材料。
如锂锰铁氧体等
做记忆元件（-B，+B代表二进制两个态）

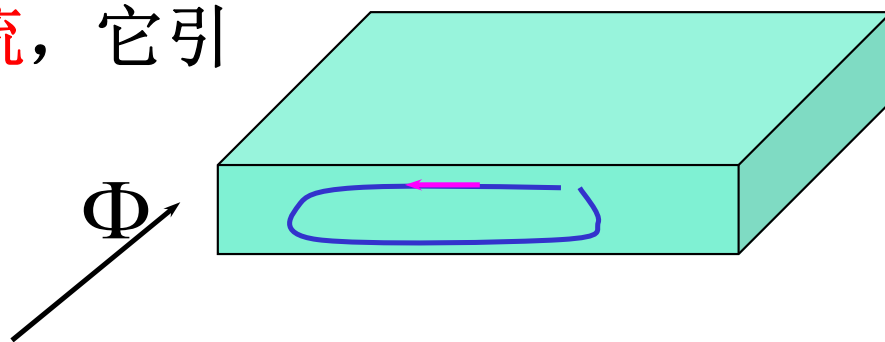


磁滞损耗和涡流损耗

- **磁滞损耗**：磁场强度从 $H_c \rightarrow -H_c \rightarrow H_c$ 变化一个周期，铁磁材料的储能不变；但它从磁场中吸收的能量大于释放的能量。这一部分**差值**叫磁滞损耗。



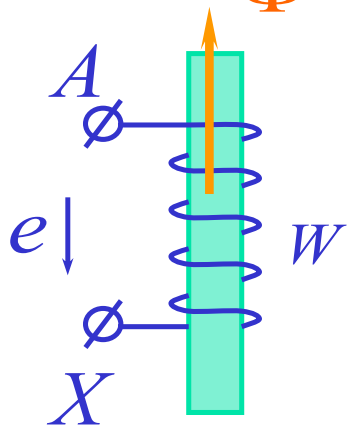
- **涡流损耗**：由于电磁感应的作用，变化的磁场在铁心内产生感生电流，叫**涡流**，它引起的损耗叫涡流损耗。



磁滞损耗和涡流损耗合称**铁耗**

励磁电流和磁化功率

励磁电流 \dot{I}_m { 磁化电流: \dot{I}_μ 流过励磁线圈而不向磁路提供有功功率, 只起铁心磁化作用的电流。
铁耗电流: \dot{I}_{Fe} 流过励磁线圈而向磁路提供有功功率损耗的电流。

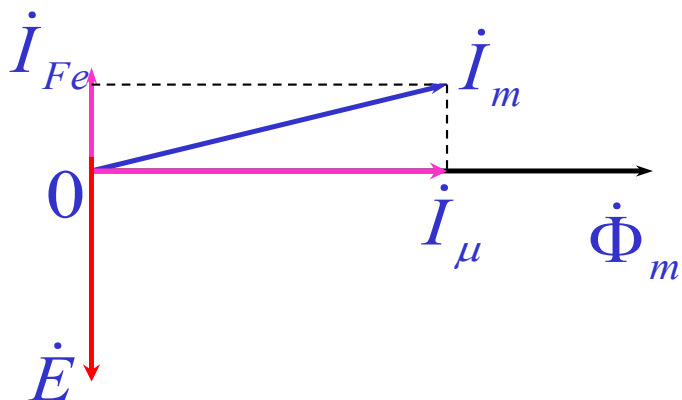


$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$

励磁电流为正弦电流时:

$$E = 4.44 f W \Phi_m$$

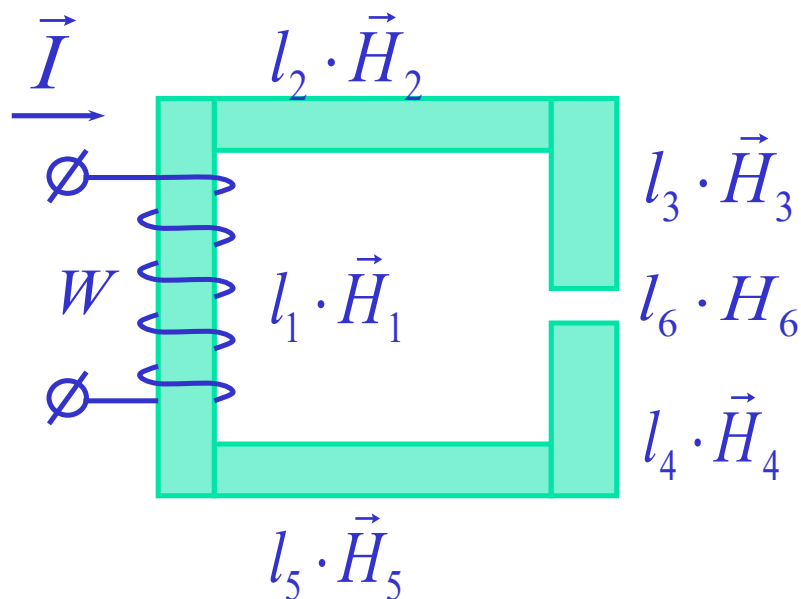
磁化功率: $Q = EI_\mu$



磁路欧姆定律

利用该公式计算较复杂，有时很难计算出结果，需简化。

例如： W 为线圈匝数，单位：匝



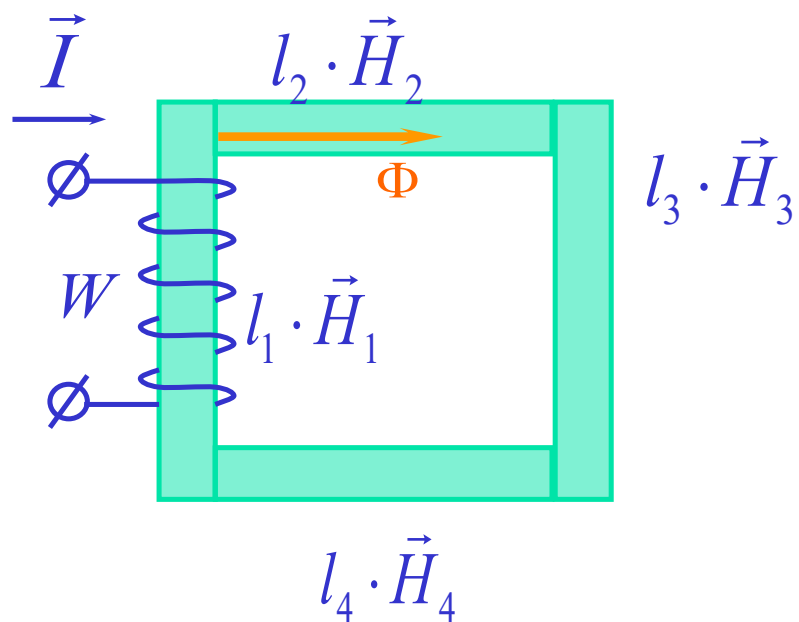
$$\sum_1^n \vec{H}_k \bullet l_k = \sum \vec{I} = \vec{I}W$$

\vec{I} 叫励磁电流； $\vec{H}_k \bullet l_k$ 为每一段的磁位降；

$\sum \vec{I}$ 是全电流； $\vec{F} = \vec{I}W$ 是磁势。

磁路欧姆定律

以无分支铁心磁路为例，如图：



$$B = \Phi / S = \mu H$$

$$\oint_S H dl = HL = NI = F$$

$$F = \frac{B}{\mu} L = \frac{L}{\mu S} \Phi \iff R = \frac{L}{\mu S}$$

令 $R_m = \frac{L}{\mu S}$ 称为磁阻

$$F = \Phi R_m \quad \text{称为磁路欧姆定律}$$



串联磁路和并联磁路

- 串联磁路：在整个回路中磁通 Φ 不变

此时 $F = \Phi \sum R_m$

- 并联磁路：在磁路的任何一个闭合面上，磁通的代数和等于零。即磁路基尔霍夫定律。

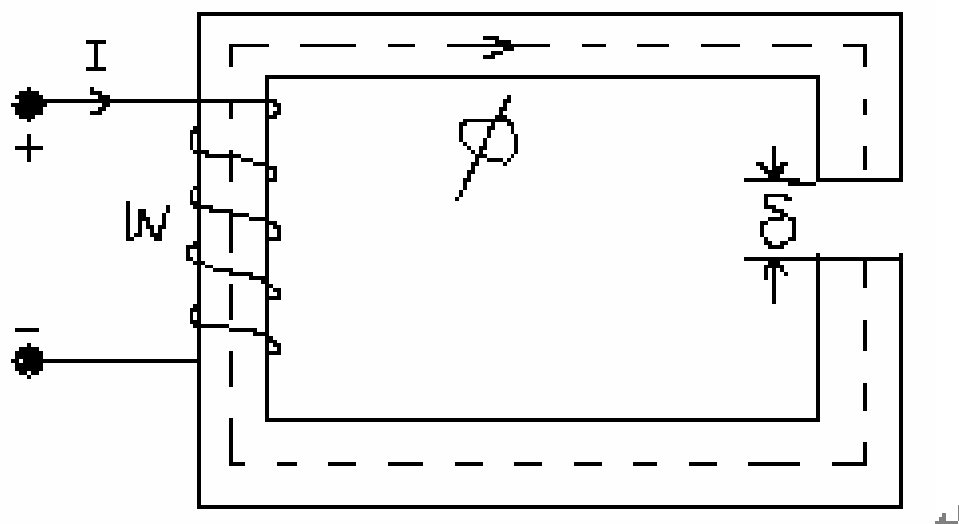
$$\sum \Phi = 0$$

电路与磁路的对偶关系

电 路		磁 路	
电动势	E	磁动势	F
电流		磁通	
电流密度		磁感应强度	
电导率		磁导率	
电阻		磁阻	
电压降		磁压降	
欧姆定律		磁路欧姆定律	
基尔霍夫第一定律		磁路基尔霍夫第一定律	
基尔霍夫第二定律		磁路基尔霍夫第二定律	

例题

0—12. 对于图 0—8, 如果铁心用 D_{23} 硅钢片迭成, 截面积 $A_{Fe} = 12.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 铁心的平均长度 $l_{Fe} = 0.4 \text{ m}$, 空气隙 $\delta = 0.5 \times 10^{-3} \text{ m}$, 线圈的匝数为 600 匝, 试求产生磁通 $\phi = 11 \times 10^{-4} \text{ Wb}$ 时所需的励磁磁势和励磁电流。





解：在铁心迭片中的磁密为↵

$$B_{Fe} = \frac{\phi}{A_{Fe}} = 11/12.25 = 0.9 \quad (\text{T}) \quad \leftarrow$$

根据 D_{23} 硅钢片磁化曲线查出 $H_{Fe} = 306 \quad (\text{A/m}) \quad \leftarrow$

在铁心内部的磁位降 $F_{Fe} = H_{Fe} * l_{Fe} = 306 * 0.4 = 122.4 \quad (\text{A}) \quad \leftarrow$

在空气隙处，当不考虑气隙的边缘效应时↵

$$B_a = B_{Fe} = 0.9 \quad (\text{T}) \quad \leftarrow$$

$$\text{所以 } H_a = \frac{B_a}{\mu_0} = \frac{0.9}{4\pi \times 10^{-7}} = 7.15 \times 10^5 \quad (\text{A/m}) \quad \leftarrow$$

$$\text{故 } F_a = H_a \times \delta = 7.15 \times 10^5 \times 0.5 \times 10^{-3} = 357.5 \quad (\text{A}) \quad \leftarrow$$

则励磁磁势 $F = F_a + F_{Fe} = 357.5 + 122.4 = 479.9 \quad \text{安匝} \quad \leftarrow$

$$\text{励磁电流 } I_f = \frac{F}{W} = \frac{479.9}{600} = 0.799 \quad (\text{A}) \quad \leftarrow$$

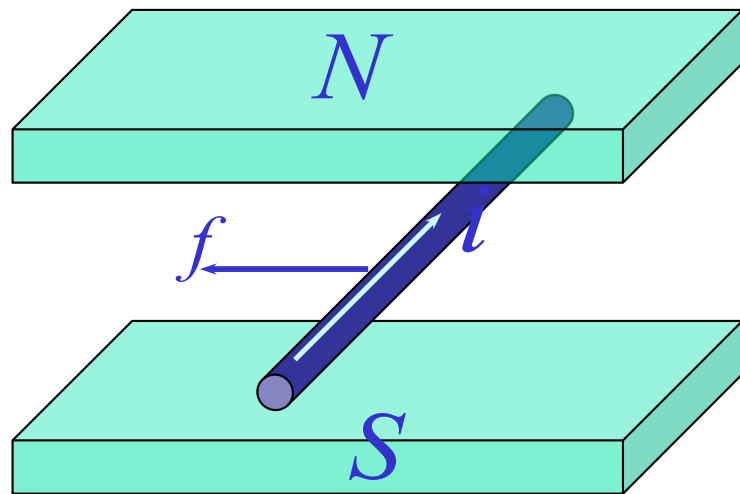


回顾

电 磁 力

基本概念-安培力

- 安培力：在磁场中磁场对载流导体施加的力

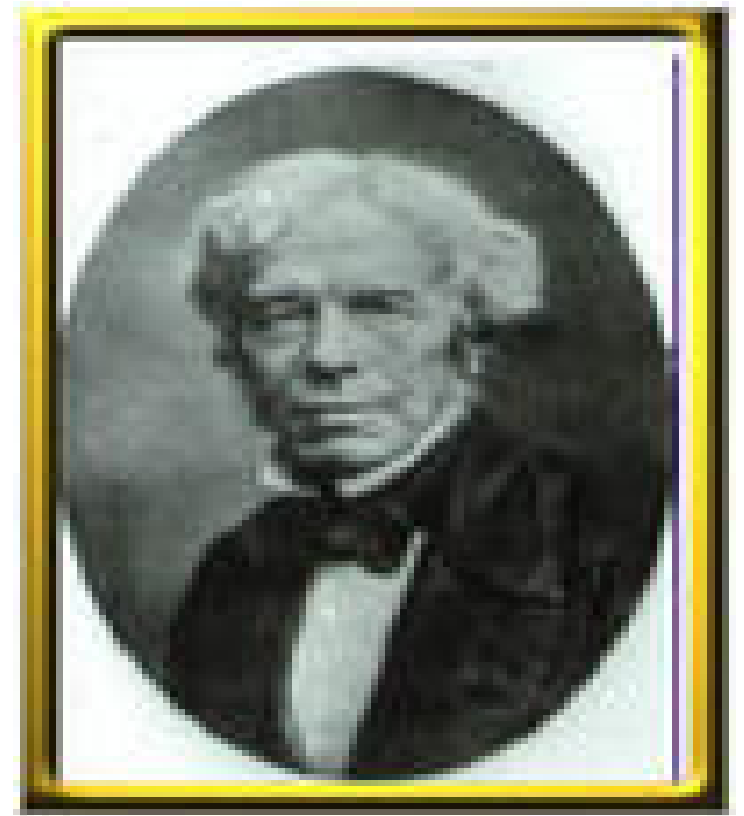


$$f = Bli$$

安培力的方向与磁场和电流的关系遵循左手定则

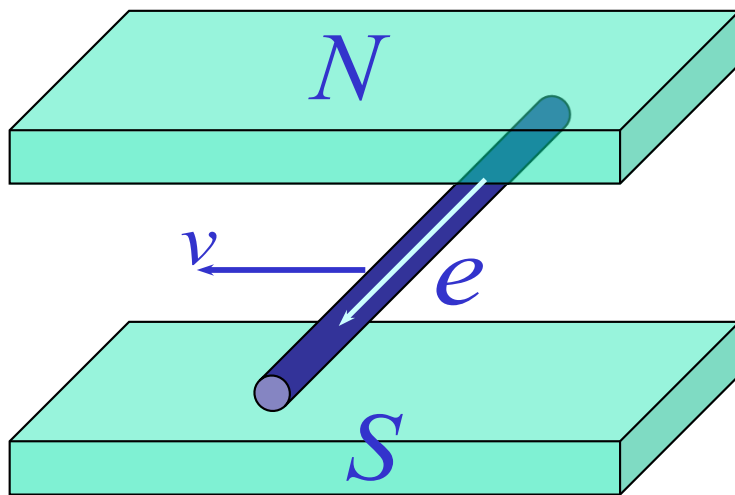
电磁感应定律

- 1831年英国物理学家法拉第发现电磁感应现象
- 变化的磁场产生电场，使磁场中的导体产生感应电动势。



电磁感应定律

- 切割电动势：导体与磁场有相对运动



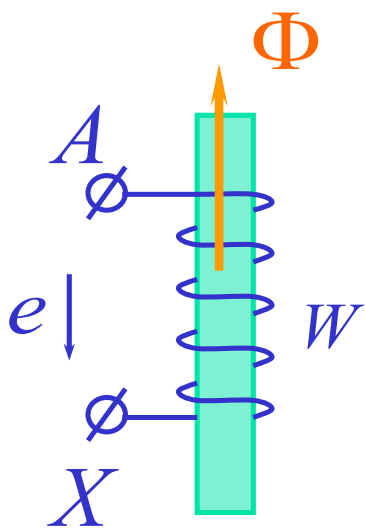
$$e = Blv$$

切割电动势的方向与磁场和运动方向的关系遵循右手定则

电磁感应定律

- 感应电动势：磁场的变化在导体中产生感应电动势

感应电动势的方向与磁场和线圈缠绕方向的关系遵循右手螺旋法则



$$e = -W \frac{d\phi}{dt}$$

Φ 减小时, e 为正

Φ 增大时, e 为负

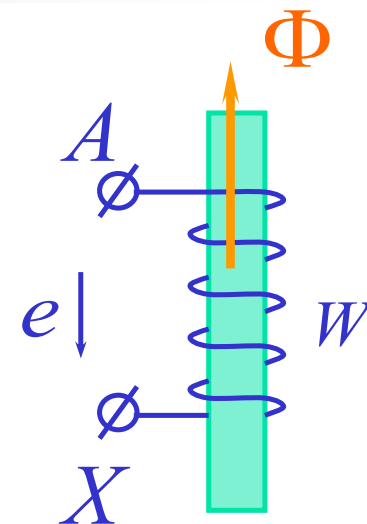
注：电机、变压器的工作原理就在于此

电磁感应定律

- 正弦交变磁场产生的感应电动势：

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t$$

$$\Rightarrow e = -W \frac{d\phi}{dt} = W\omega\Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$



相位： e 滞后 ϕ 90°

有效值：
$$E = \frac{W\omega\Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f W \Phi_m}{\sqrt{2}} \approx 4.44 f W \Phi_m$$

电磁感应定律

■ 正弦电流产生的磁通：

$$i = I_m \sin \omega t$$

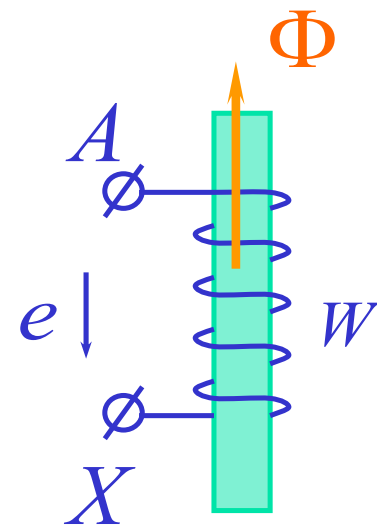
$$\Phi = BS$$

$$B = \mu H$$

$$WI = HL$$

$$R_m = \frac{l}{\mu S}$$

$$\Rightarrow \phi = \frac{WI_m}{R_m} \sin \omega t$$



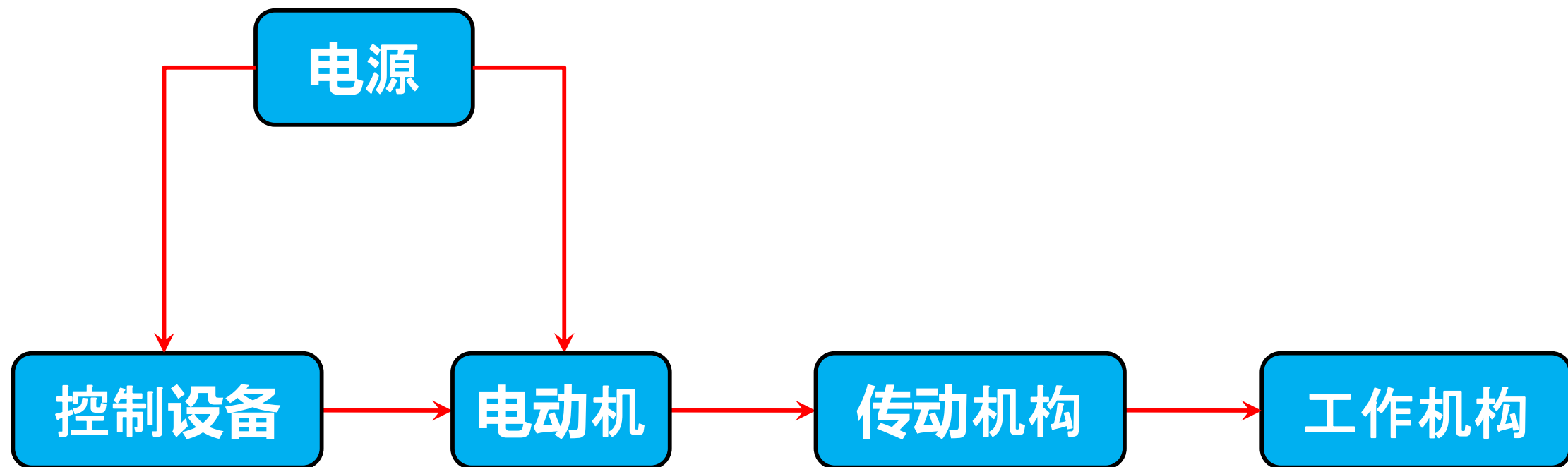


第二章 电力拖动系统动力学

- **电机：** 能量转化的装置
 - 发电机： 机械能转化为电能
 - 电动机： 电能转化为机械能
- **变压器：** 电能传递的装置（广义下的电机）
 - 作用是变电压、变电流、变相位等
- **拖动：** 电机与生产机械结合的运动特性

电力拖动系统动力学

■ 电力拖动系统的组成与结构



电力拖动系统动力学



www.tw-litian.com

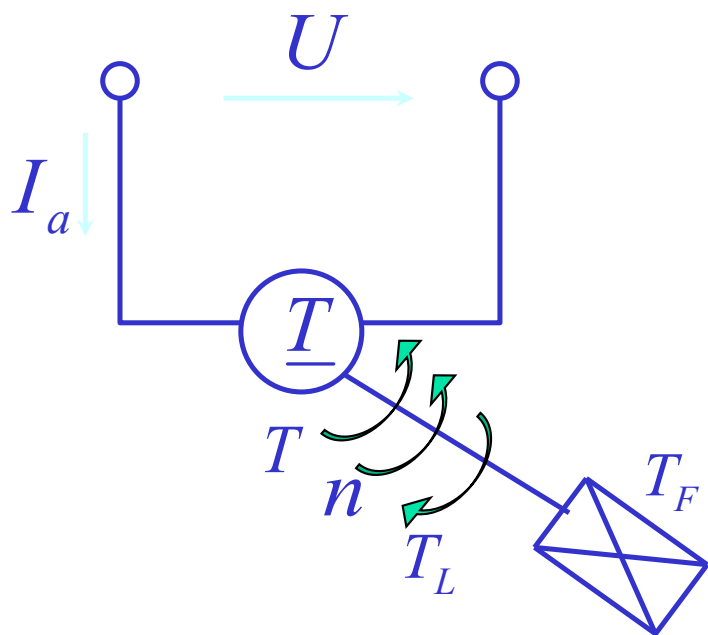
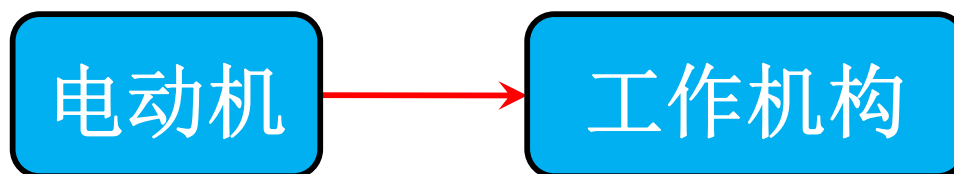


BMLink.com



第一节 单轴旋转系统的运动方程

■ 单轴电力拖动系统的组成



$$T_L = T_0 + T_F$$

T	——电磁转矩
T_L	——负载转矩
T_0	——空载转矩
T_F	——负载本身的转矩

第一节 单轴旋转系统的运动方程

■ 单轴电力拖动系统转动方程式

$$T - T_L = J \frac{d\Omega}{dt}$$

J ——转动惯量

Ω ——角速度

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

$$J = mr^2 = m \frac{D^2}{4} = \frac{G}{g} \frac{D^2}{4}$$

m ——转动部分质量

r ——转动惯量半径

$$\boxed{T - T_L} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

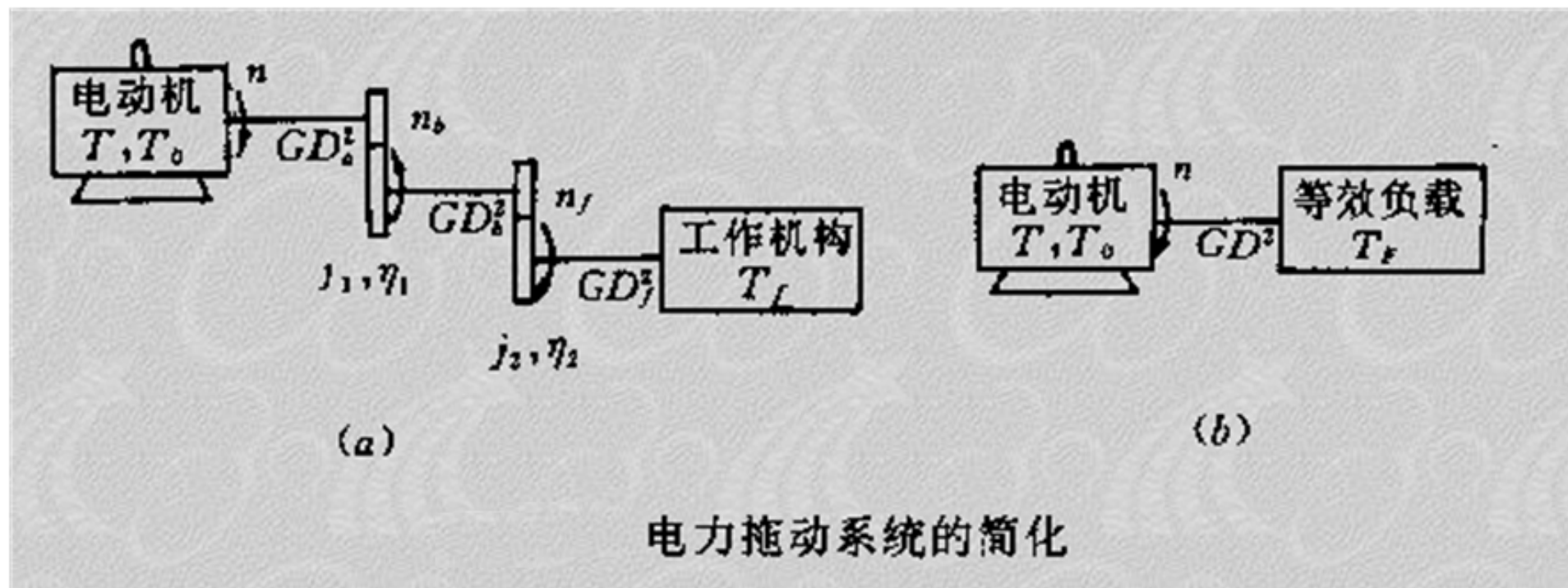
动转矩

G ——转动部件的重量

D ——转动惯性直径

n ——转速

第二节 多轴系统的运动方程



速比 $j = \frac{n}{n_f}$



第二节 多轴系统的运动方程

电 磁 力

- (1) 转矩按速比的反比折算
(折算前后功率不变)
- (2) 飞轮矩按速比平方的反比折算
(折算前后动能不变)

第二节 多轴系统的运动方程

- 转矩按速比的反比折算（折算前后功率不变）

无机械损耗

$$T_F \Omega = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f \Omega_f}{\Omega} = \frac{T_f n_f}{n} = \frac{T_f}{j}$$

有机械损耗

$$T_F \Omega \eta = T_f \Omega_f$$

$$T_F = \frac{T_f}{j \eta}$$

第二节 多轴系统的运动方程

- 飞轮矩按速比平方的反比折算（折算前后动能不变）

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

工作轴的飞轮矩

$$GD_F^2 = \frac{GD_f^2}{j^2}$$

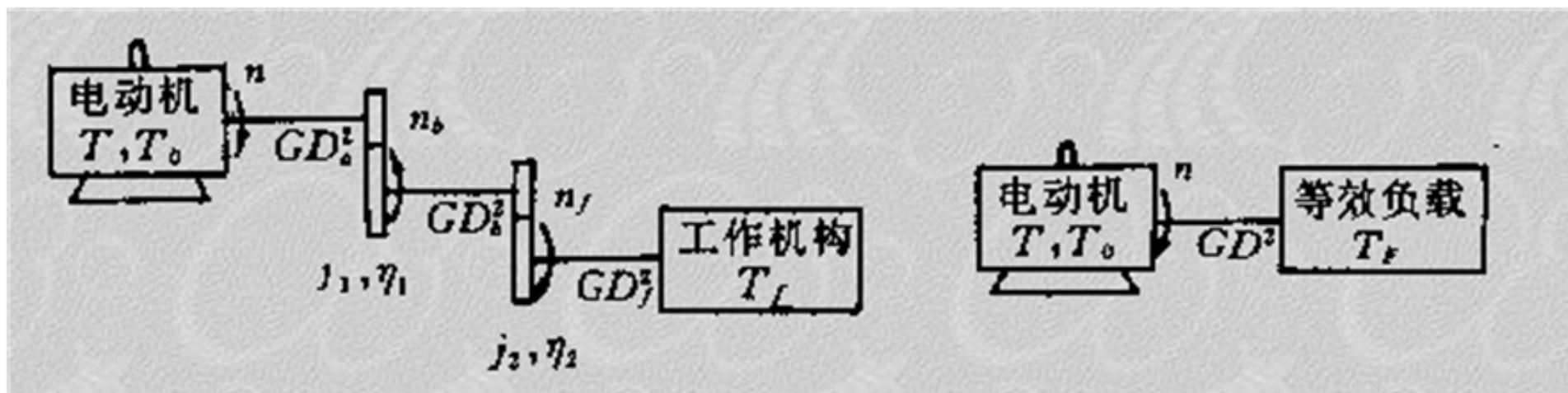
系统总的飞轮矩

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

第二节 多轴系统的运动方程

如图所示的电力拖动系统中，已知飞轮矩 $GD_a^2=14.5 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_b^2=18.8 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ， $GD_f^2=120 \text{ N}\cdot\text{m}^2$ ，传动效率 $\eta_1=0.91$ ， $\eta_2=0.93$ ，转矩 $T_f=85 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，转速 $n=2450/\text{min}$ ， $n_b=810 \text{ r/min}$ ， $n_f=150 \text{ r/min}$ ，忽略电动机空载转矩，求：

- (1) 折算到电动机轴上的系统总飞轮矩 GD^2 ；
- (2) 折算到电动机轴上的负载转矩 T_F 。



第二节 多轴系统的运动方程

(1) 系统总飞轮矩

$$\begin{aligned}GD^2 &= GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{\left(\frac{n}{n_b}\right)^2} + \frac{GD_f^2}{\left(\frac{n}{n_f}\right)^2} \\&= 14.5 + \frac{18.8}{\left(\frac{2450}{810}\right)^2} + \frac{120}{\left(\frac{2450}{150}\right)^2} \\&= 14.5 + 2.05 + 0.45 = 17[\text{N} \cdot \text{m}^2]\end{aligned}$$

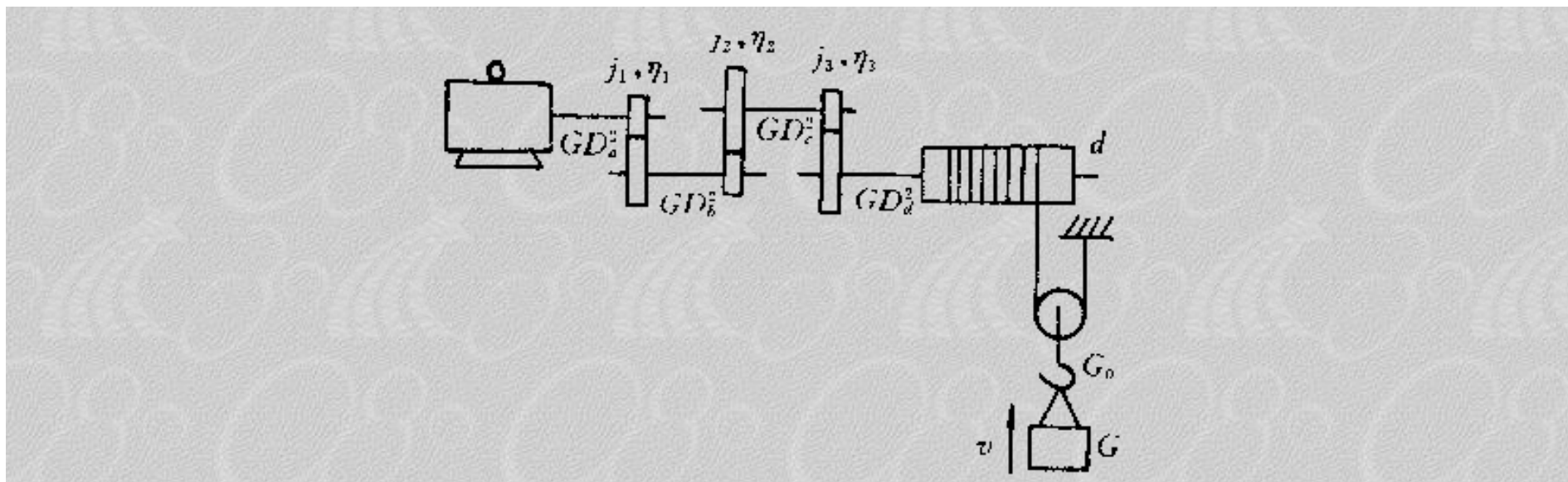
(2) 折算到电动机轴上的负载转矩

$$T_F = \frac{T_f}{\frac{n}{n_f} \eta_1 \eta_2} = \frac{85}{\frac{2450}{150} \times 0.91 \times 0.93} = 6.15[\text{N} \cdot \text{m}]$$

第二节 多轴系统的运动方程

某起重机的电力拖动系统如图所示。电动机 $P_N=20$ kW, $n_N=950$ r/min, 传动机构的速比 $j_1=3$, $j_2=3.5$, $j_3=4$, 各级齿轮传动效率都是 $\eta=0.95$, 各转轴上的飞轮矩 $GD_a^2=123$ N·m², $GD_b^2=49$ N·m², $GD_c^2=40$ N·m², $GD_d^2=465$ N·m², 卷筒直径 $d=0.6$ m, 吊钩重 $G_0=1962$ N, 被吊重物 $G=49050$ N, 忽略电动机空载转矩, 忽略钢丝绳重量, 忽略滑轮传递的损耗, 求:

- (1) 以速度 $v=0.3$ m/s提升重物时, 负载(重物及吊钩)转矩、卷筒转速、电动机输出转矩及电动机转速;
- (2) 负载及系统的飞轮矩(折算到电动机轴上);
- (3) 以加速度 $a=0.1$ m/s²提升重物时, 电动机输出的转矩。



第二节 多轴系统的运动方程

解

(1) 以速度 $v=0.3 \text{ m/s}$ 提升重物时, 负载 (重物及吊钩) 转矩

$$T_f = \frac{1}{2}(G_0 + G) \cdot \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \times (1962 + 49050) \times \frac{0.6}{2} = 7651.8 \text{ N} \cdot \text{m}$$

卷筒转速

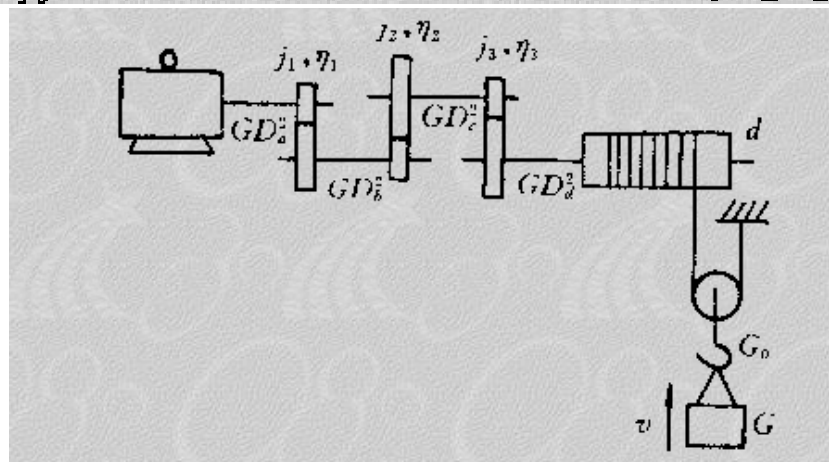
$$n_f = \frac{60(2v)}{\pi d} = \frac{60 \times 2 \times 0.3}{\pi \times 0.6} = 19.1 \text{ r/min}$$

电动机输出转矩

$$T_2 = T_f = \frac{T_f}{j\eta} = \frac{7651.8}{3 \times 3.5 \times 4 \times 0.95^3} = 212.5 \text{ N} \cdot \text{m}$$

电动机转速

$$n = n_f j = 19.1 \times 3 \times 3.5 \times 4 = 802.2 \text{ r/min}$$



第二节 多轴系统的运动方程

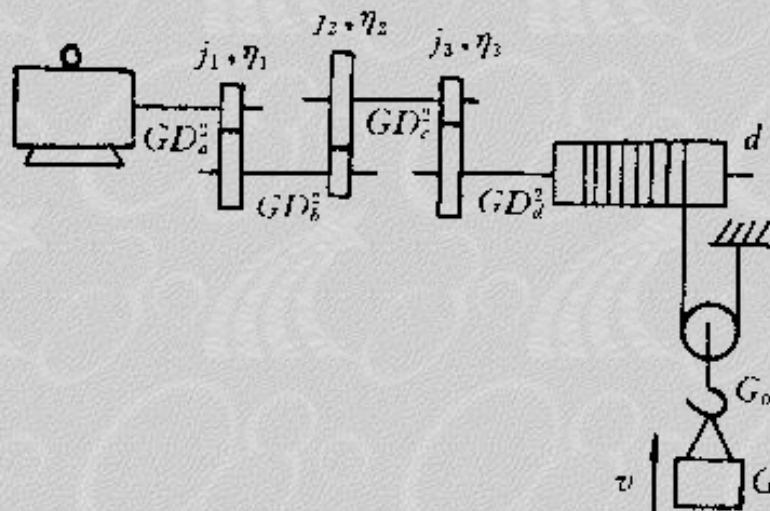
(2) 负载及系统的飞轮矩

吊钩及重物飞轮矩

$$GD_F^2 = 365 \frac{(G_0 + G)v^2}{n^2} = 365 \times \frac{(1962 + 49050) \times 0.3^2}{802.2^2}$$
$$= 2.6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

系统总的飞轮矩

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \frac{GD_d^2}{(j_1 j_2 j_3)^2} + GD_F^2$$
$$= 123 + \frac{49}{3^2} + \frac{40}{(3 \times 3.5)^2} + \frac{465}{(3 \times 3.5 \times 4)^2} + 2.6$$
$$= 131.7 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$



第二节 多轴系统的运动方程

■ 平移系统的折算

$$P = Fv$$

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

若不考虑传动系统的传动损耗，根据功率不变的原则，有

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

$$T_F = \frac{Fv}{\frac{2\pi n}{60}} = 9.55 \frac{Fv}{n}$$

若考虑传动系统的传动损耗，则

$$T_F = 9.55 \frac{Fv}{n\eta}$$

第二节 多轴系统的运动方程

■ 平移系统的折算

做平移运动部分的物体总重为 $G_f = m_f g$ ，其动能为

$$\frac{1}{2} m_f v^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2$$

折算到电动机轴上后的动能为

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \cdot \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2$$

折算前后的动能不变，因此

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \cdot \frac{G_f}{g} v^2 &= \frac{1}{2} \cdot \frac{GD_F^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \\ GD_F^2 &= 4 \frac{G_f v^2}{\left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2} = 365 \frac{G_f v^2}{n^2} \end{aligned}$$

第二节 多轴系统的运动方程

(3) 以加速度 $a=0.1 \text{ m/s}^2$ 提升重物时, 电动机输出转矩的计算
电动机转速与重物提升速度的关系为

$$n = n_f j_1 j_2 j_3 = 60 \times \frac{2v}{\pi d} j_1 j_2 j_3$$

电动机加速度与重物提升加速度的关系为

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{d}{dt} \left(\frac{120v}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \right) = \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 \frac{dv}{dt} \\ &= \frac{120}{\pi d} j_1 j_2 j_3 a \end{aligned}$$

电动机加速度大小为

$$\frac{dn}{dt} = \frac{120}{\pi \times 0.6} \times 3 \times 3.5 \times 4 \times 0.1 = 267.4 \text{ r/min} \cdot \text{s}$$

电动机输出转矩为

$$T = T_F + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = 212.5 + \frac{131.7}{375} \times 267.4 = 306.4 \text{ N} \cdot \text{m}$$