

# 机电能量转换

〔日〕宫入庄太 著

机械工业出版社

本书较全面系统地介绍了能量的储存及其要素, 提出机电能量相互转换的理论基础, 推导了旋转型转换机械的特性以及能量转换的控制。

全书共分十三章, 前六章介绍保守系统、电路和磁路的对偶、电气系统和机械系统的相似性、拉格朗日运动方程式及其解法、传递函数和框图。第七至十二章介绍整流子电机的基础理论、座标变换、阻抗矩阵、导值电路以及直流电机、同步电机、异步电机的动力学。最后一章介绍状态变量法。书中内容简明, 说理清楚, 通俗易懂。译者对原文中个别段、句作了删节。

本书可作为工科大学机电类专业高年级或研究生的教学参考书。也可供研究所、工厂的技术人员学习参考。

## 電気・機械エネルギー変換工学

官入庄太 著

丸善株式会社

1976

### 机电能量转换

〔日〕官入庄太 著

霍兴义 任仲岳 译

唐任远 校

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 8 3/8·字数 181 千字  
1982 年 8 月北京第一版·1982 年 8 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,500·定价 0.90 元

统一书号: 15033·5227

## 序 言

近十年来,能量转换这个词大家已很熟悉。能量转换一般分为由热能、化学能、太阳能等直接转换成电能是直接能量转换 (direct energy conversion), 以及电能和机械能相互转换的机电能量转换 (electro-mechanical energy conversion)。从能量转换的观点来看,两者是相同的。但由于基础知识和涉及的范围差别很大,故现就按上述方法进行分类。

前者包括 MHD 发电、燃料电池等新技术,从生产的观点看,那是未来的事情。与此相反,后者在现在的生产实际中却是非常重要的领域。如果说没有它就谈不上今天的机器文明,也并不算夸张。也就是说,即使不看象电梯、电车等直接的东西,而从制造日常生活不可缺少的工业用品的生产来考虑,就可了解机电能量转换与我们的生活是多么息息相关了。

由于应用机电能量转换在规模和方法上也是千差万别的,因而本书集中介绍一些基本的基础知识:

- (1) 能量的储存及其要素;
- (2) 提出关于机械能量相互转换的基础理论;
- (3) 根据上述理论导出旋转型转换机械的特性;
- (4) 能量转换的控制,即电机控制的基础。

本书以学习过作者所著《大学教材·最新电机学》或相当于该程度的读者为对象,作为工科大学高年级或研究生课程的教科书而编写的。

编写本书时:

- (1) 在教材选择上注意了不受专业知识约束而作了一些

取舍,以保证掌握主要内容的同时,建立与各类专业书籍沟通的桥梁;

(2) 为使自学也能掌握本书,叙述力求简明易懂;

(3) 一定有不足之处,考虑可作适当的增删,希望讲授时作些补充和指导。

作者才疏学浅,不足之处请读者指正,如承赐教,则甚为幸也。

#### 关于这套大学教材

继大学教材《最新电机学》(1967年10月)和《工业电子学》(1974年3月)之后又出版了本书,这就使作者实现了完成一套大学教材的宿愿。

写书这件事不免贻笑于后人,作者现在东京工业大学任教,作为一个教育工作者,考虑到即将退休(1978年3月),在退休时:

(1) 希望将自己的知识用文字整理出来;

(2) 自己才学虽浅,但为了学生,希望提供自己粗浅的经验;

(3) 教学生涯中对电机教学方面的感受是什么,怎么样,想提出些具体看法。

大部分教材在讲坛上已试用过,并作过补充后再行试用,这几乎化了十年的时间。

在此,对出版这套书始终如一地协助的丸善有限公司出版部的有关各位表示深切的谢意。同时,对校阅及发现错误等的协助者,本校的片冈、深尾、西方,明治大学的松濑以及对原稿的整理、誊清的本校办公室主任八卷惠子表示衷心感谢。

官入庄大

一九七六年三月

# 目 录

## 序 言

<b>第一章 保守系统</b> .....	<b>1</b>
1.1 保守系统概述 .....	1
1.2 铁芯电抗器的磁场能量及其分布 .....	3
1.3 磁场能量产生机械力的物理概念 .....	8
1.4 磁场能量产生机械力的数学式推导 .....	9
1.5 电场能量和机械力 .....	14
1.6 铁芯转矩形成的理论 .....	18
习 题 .....	23
<b>第二章 电路和磁路的对偶</b> .....	<b>26</b>
2.1 对偶电路 .....	26
2.2 对偶电路的一般求法 .....	29
2.3 电路和磁路的对偶 .....	31
习 题 .....	39
<b>第三章 电气系统和机械系统的相似性</b> .....	<b>40</b>
3.1 机械量和电量的对应关系 .....	40
3.2 机械系统的电模拟电路 .....	45
习 题 .....	49
<b>第四章 拉格朗日运动方程式</b> .....	<b>50</b>
4.1 研究动力学的两种方法 .....	50
4.2 拉格朗日运动方程式 .....	51
4.3 拉格朗日函数和运动路径 .....	60
4.4 汉弥尔登函数 .....	62
习 题 .....	62

<b>第五章 运动方程式的解法</b> .....	<b>65</b>
5.1 运动方程式的种类 .....	65
5.2 非线性微分方程式线性化举例 .....	67
5.3 拉普拉斯变换概述 .....	71
5.4 卷积 .....	75
5.5 海维赛展开定理 .....	77
习题 .....	82
<b>第六章 传递函数和框图</b> .....	<b>85</b>
6.1 传递函数 .....	85
6.2 框图和信号流图 .....	87
6.3 负反馈网络 .....	90
6.4 微分方程式的框图化 .....	92
6.5 框图的简化 .....	95
习题 .....	98
<b>第七章 整流子电机的基础理论</b> .....	<b>99</b>
7.1 动力学中的完整约束系统和非完整约束系统 .....	99
7.2 整流子电机的基础理论 .....	101
习题 .....	107
<b>第八章 直流电机动力学</b> .....	<b>109</b>
8.1 直流电机的框图及其应用 .....	109
8.2 等值电路 .....	114
8.3 等值静电电容 .....	116
8.4 恒电压起动 .....	119
8.5 直流电机的斩波器驱动 .....	122
8.6 用 PLL 进行速度控制 .....	124
习题 .....	131
<b>第九章 坐标变换</b> .....	<b>133</b>
9.1 序言 .....	133
9.2 绝对变换 .....	133

9.3	相对变换和单元变换 .....	140
9.4	对称座标法 .....	142
9.5	$\alpha\beta$ 变换 .....	147
9.6	$dq$ 变换 .....	151
	习 题 .....	154
<b>第十章</b>	<b>阻抗矩阵和等值电路 .....</b>	<b>155</b>
10.1	等值电路的构成及其条件 .....	155
10.2	单相变压器的等值电路 .....	157
10.3	旋转电机构成等值电路的问题 .....	160
10.4	$fb$ 轴等值电路变换为 $dq$ 轴等值电路 .....	162
	习 题 .....	165
<b>第十一章</b>	<b>同步电机动力学 .....</b>	<b>166</b>
11.1	双反应理论 .....	166
11.2	标么值法 .....	179
11.3	电气暂态现象 .....	184
11.4	稳定度 .....	189
	习 题 .....	195
<b>第十二章</b>	<b>异步电机动力学 .....</b>	<b>197</b>
12.1	序言 .....	197
12.2	暂态现象的基本方程式和模拟计算 .....	202
12.3	等值电路 .....	207
12.4	用变频换流器调节三相异步电机的速度 .....	214
12.5	负荷变动时的速度变化 .....	218
	习 题 .....	221
<b>第十三章</b>	<b>状态变量法 .....</b>	<b>224</b>
13.1	序言 .....	224
13.2	状态变量和动态方程式 .....	225
13.3	状态方程式的解法 .....	228
13.4	状态转移矩阵 .....	231

## VIII

13.5 由传递函数推导状态方程式 .....	236
13.6 正则变换 .....	239
习 题 .....	243
附 录 .....	244
索 引 .....	249



# 第一章 保守系统

## 1.1 保守系统概述

若施外力  $f$ (牛)于一弹簧上,使之压缩  $\Delta x$ (米),则所施能量  $f \cdot \Delta x$ (焦)以变形能的形式储存于弹簧中。当有电流  $i$ (安)流过电感为  $L$ (亨)的线圈时,在此线圈中储存有  $(1/2)Li^2$ (焦)的能量。象这种能储存能量的元件称为储能元件,而储能元件的集合称为保守系统(conservative system)。

作为储能元件来说,在电系统中有线圈、电容器,在机械系统中有上面所述的弹簧、运动着的旋转体和物体、被吊起的物体等。

表 1-1 列出了这些元件及其所储存能量的大小。假如把表 1-1 中的  $i$  和  $\dot{x}$  都用  $\dot{x}$  表示,  $x$  和  $q$  都用  $x$  表示,则储存能量  $W$  可表示为

$$W = f(x, \dot{x}) \quad (1-1)$$


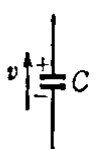


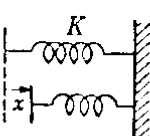
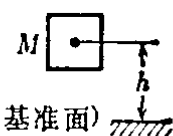
而整个保守系统的能量  $W$  可表示为

$$W = f(x_1, x_2, x_3, \dots; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dots) \quad (1-2)$$

从上式及式(1-1)可明显地看出:  $W$  是  $x_i$  和  $\dot{x}_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots$ )的函数,它仅与  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$  状态有关,而与达到  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$  状态的经过全然无关。这样的函数被称为状态函数(state function),所以储存能量  $W$  是状态函数。

另外,储能元件处于储能状态时,对外将表现出力或电压等作用。例如,当弹簧具有变形能  $W = x^2/2K$  时,它表现出来的力  $f$  可用下式表示

表 1-1 储能元件

电气系统		机械系统			
线圈	电容	旋转体	直线运动体	弹簧	静物
					
$W = \frac{1}{2} Li^2$ (焦) $L$ ——电感 (亨) $i$ ——电流 (安)	$W = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C}$ $= \frac{1}{2} Cv^2$ (焦) $C$ ——电容 (法) $v$ ——充电 电压 (伏)	$W = \frac{1}{2} J\omega_m^2$ (焦) $J$ ——转动惯 量(公 斤·米 <sup>2</sup> ) $\omega_m$ ——旋转角 速度 (弧度/ 秒)	$W = \frac{1}{2} M\dot{x}^2$ (焦) $M$ ——质量 (公斤) $\dot{x}$ ——速度 (米/ 秒)	$W = \frac{1}{2} \frac{x^2}{K}$ (焦) $x$ ——伸缩 长 (米) $K$ ——柔度 (米/ 牛)	$W = Mgh$ (焦) $h$ ——高度 (米) $M$ ——质量 (公斤) $g$ ——重力加 速度= 9.8(米 /秒 <sup>2</sup> )

$$f = \frac{x}{K} = \frac{1}{K} \sqrt{2KW} = \sqrt{\frac{2K}{W}} \quad (1-3)$$

其他元件也一样。一般说来，凡是与储存能量的大小有关并且以其函数形式表达的力或电压，都可称为保守力 (conservative force)，可表示为

$$f = f(x_1, x_2, x_3, \dots; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, \dots) \quad (1-4)$$

它也是状态函数。

和保守力相反，还有与  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$  等状态无关的大小恒定的力，或者仅仅是时间的函数的力，则称其为非保守力 (nonconservative force)，可表示为

$$f = \text{常数} \quad \text{或} \quad f = f(t) \quad (1-5)$$

保守系统是电能和机械能进行转换的重要场所。为此，本书一开始就从它着手。

实际上,纯粹的保守系统是不能单独存在的。例如,线圈不仅是纯粹的电感,而且还有电阻。因为在这里只在概念上考虑纯粹的保守系统,象这样的耗能元件都放到系统之外去考虑。

当保守系统处于能量状态  $W_1$  时,它不可能瞬时地过渡到另外的能量状态  $W_2$ 。能量的转移是需要时间的。这个转移的过程就是暂态现象,是控制理论的主要研究对象。

[例题 1-1] 在图 1-1 中,开关 S 原来合到 a 端。在时间  $t=0$  时,

$$i_1(0_-) = i_0, i_2(0_-) = 0 \quad (\text{a})$$

在此时刻,瞬时地将开关 S 合到 b 端,则

$$i_1(0_+) = 0, i_2(0_+) = i_0 \quad (\text{b})$$

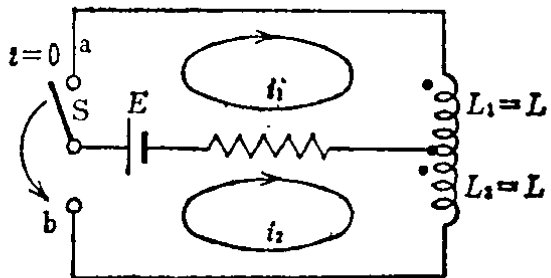


图 1-1

试问为什么电流会瞬时地

从  $L_1$  转移到了  $L_2$  (设  $L_1, L_2$  完全耦合,  $L_1 = L_2 = L$ )?

[解] 因为从  $t=0^-$  的状态变化到  $t=0^+$  的状态,没有经过时间,能量是不变的。因此,当  $i_1(0_+) = 0$  时,为保持该时刻的能量不变,必然是  $i_2(0_+) = i_0$ 。

## 1.2 铁芯电抗器的磁场能量及其分布

普通的发电机、电动机等电磁器械在机电能量转换中起着最重要的作用,它们都是以气隙中贮藏的磁场能量作为媒介的。本节将阐明铁芯电抗器中能量的形式和储存的场所。

图 1-2(a) 表示一个铁芯长为  $l_i$ 、气隙长为  $l_g$ 、截面积为  $S$  的铁芯,在其上绕有  $N$  匝的线圈。当加上电压  $v$  时,输入功率  $W_i$  为

$$W_i = \int_0^{\infty} v i dt (\text{焦}) \quad (1-6)$$

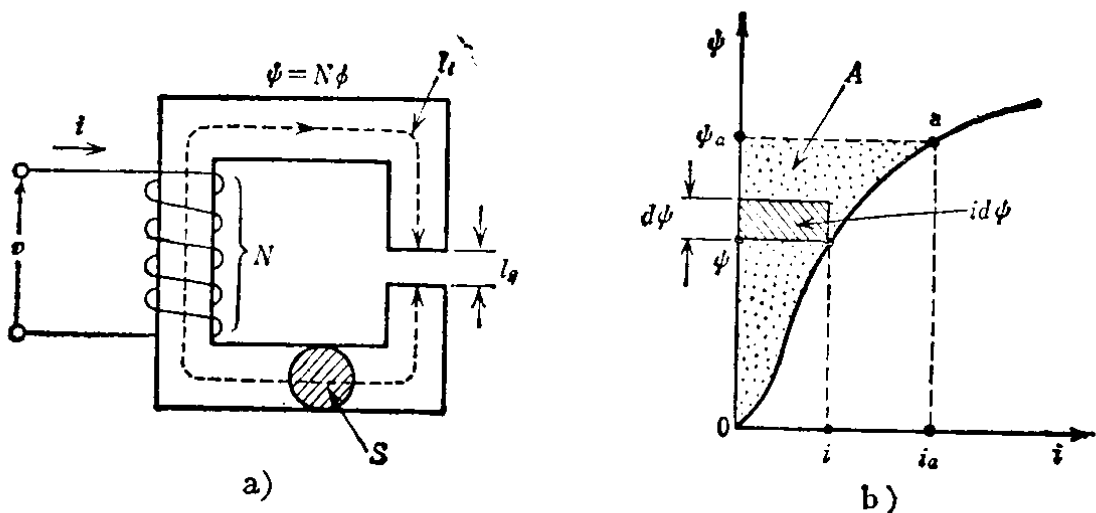


图 1-2 电抗器及其磁化曲线

假如忽略线圈电阻，这个能量必然在电抗器中的某处以磁场能量  $W_m$  形式保存着。即

$$W_m = W_i = \int_0^{\infty} v i dt \quad (1-7)$$

图 1-2 (b) 是图 (a) 所示磁路的磁化曲线。假设当  $t = \infty$  时，电流  $i = i_a$ ，磁链  $\psi = \psi_a$ ，即对应图中的 a 点。

由于忽略了线圈电阻，所以线圈的反电势  $e_i$  和  $v$  相等，按法拉第定律可得

$$v = e_i = N \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-8)$$

将上式代入式(1-7)，则得

$$W_m = \int_0^{\infty} \frac{d\psi}{dt} i dt = \int_0^{\psi_a} i d\psi \quad (1-9)$$

式(1-9)右边的积分为图 1-2 (b) 中的面积 A。也就是说，磁场能量可以用磁化曲线 ( $i \sim \psi$ ) 和纵轴 ( $\psi$ ) 所围成的面积来表示。

下面我们将进一步阐明这个磁场能量  $W_m$  分布在哪里。

图 1-2 (a) 中，假定铁芯各部分的磁场强度都相等并为  $H_i$ ，气隙部分的磁场强度为  $H_g$ ，则由全电流定律得：

$$Ni = \oint H dl = H_i l_i + H_g l_g \quad (1-10)$$

忽略气隙部分的边缘效应，假定铁芯和气隙的截面积相等并为  $S$  (平方米)，则

$$\begin{aligned} H_i &= \frac{\phi/S}{\mu_i} = B/\mu_i \\ H_g &= \frac{\phi/S}{\mu_0} = B/\mu_0 \end{aligned} \quad (1-11)$$

式中  $\mu_i$ ——铁芯磁导率；  
 $\mu_0$ ——气隙磁导率  $= 4\pi \times 10^{-7}$ ；  
 $B$ ——磁通密度 [特 (Tesla) = 韦/米<sup>2</sup>]。

从以上两式得

$$i = \frac{1}{N} B \left( \frac{l_i}{\mu_i} + \frac{l_g}{\mu_0} \right) \quad (1-12)$$

又  $\psi = N\phi = NSB$ ,  $d\psi = NSdB$

将上式及式(1-12)代入式(1-9)，得

$$W_m = (Sl_i) \int_0^{B_a} \frac{1}{\mu_i} B dB + (Sl_g) \int_0^{B_a} \frac{1}{\mu_0} B dB \quad (1-13)$$

假如磁化曲线是线性的，则上式的积分可以求得为

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{B_a^2}{\mu_i} (l_i S) + \frac{1}{2} \frac{B_a^2}{\mu_0} (l_g S) \quad (1-14)$$

上式右边第一项是铁芯中的磁场能量，第二项是气隙部分的磁场能量，分别用  $W_i$ 、 $W_g$  表示，它们的比值为

$$\frac{W_g}{W_i} = \frac{\mu_i}{\mu_0} \frac{l_g}{l_i} = \mu_s \frac{l_g}{l_i} \quad (1-15)$$

式中  $\mu_s = \frac{\mu_i}{\mu_0}$  为相对磁导率。

[数值例题] 若  $l_i = 100$  毫米， $l_g = 1$  毫米， $B_a = 1$  特， $\mu_s$  随铁芯材料的不同而异，一般为  $1000 \sim 2000$ ，现假定是  $1000$ ，

则由式(1-15)得

$$\frac{W_g}{W_i} = 10$$

综上所述磁场能量储藏在铁芯和气隙两部分中，其中大部分集中在气隙中。通常把上面所说的磁场能量叫做磁能。

[例题 1-2] 图 1-3 曲线 I 绘出了图 1-2(a) 电抗器铁芯部分的磁化曲线，试以此曲线为基础，用图解法求出包含气隙部分在内的全部磁路的磁化曲线。

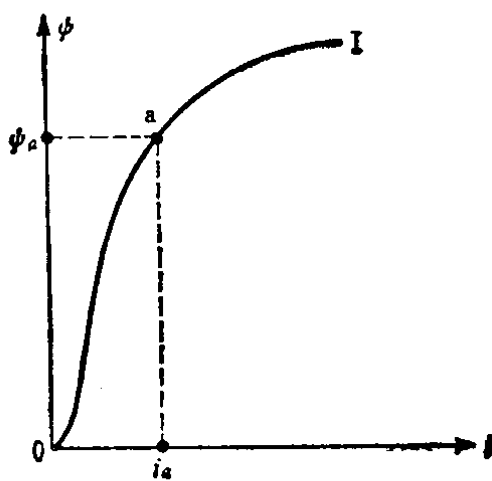


图 1-3 磁化曲线

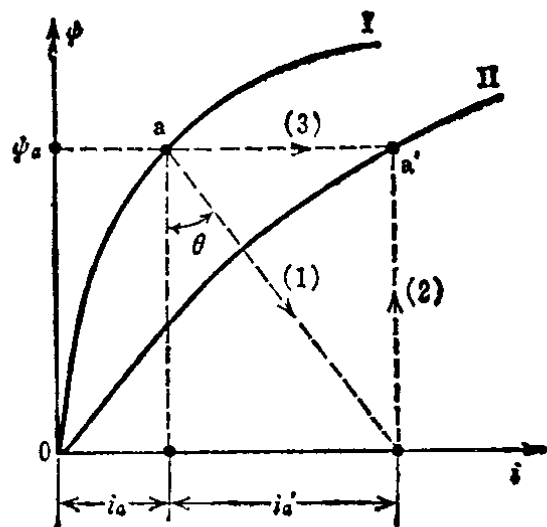


图 1-4 求  $a'$  点的方法(1, 2, 3 是作图顺序)

[解] 要在气隙部分产生磁链  $\psi_a$ ，除图 1-4 所示的  $i_a$  外，还需要增加电流  $i'_a$ ，即

$$N i'_a = H_g l_g = \frac{\phi_a / S}{\mu_0} l_g = \frac{\psi_a}{N S \mu_0} l_g$$

$$\therefore i'_a = \frac{\psi_a}{N^2 S \mu_0} l_g$$

$$\frac{i'_a}{\psi_a} = \frac{l_g}{N^2 S \mu_0} \equiv \operatorname{tg} \theta \quad (1-16)$$

式中  $\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{l_g}{N^2 S \mu_0}$  ——和磁链无关的常数。

因此, 对应于  $\psi = \psi_a$  的磁化曲线上一点  $a'$ , 可用图 1-4 所表示的作图法求出。

[例题 1-3] 图 1-5 曲线 I 表示图 1-2(a) 电抗器铁芯部分的磁化曲线, 曲线 II 则表示包含气隙部分在内的全部磁路的磁化曲线, 问该图中  $A$  和  $B$  两部分各表示什么?

[解]  $A$  表示储存在铁芯部分的磁场能量。  $B$  表示储存在气隙中的磁场能量。

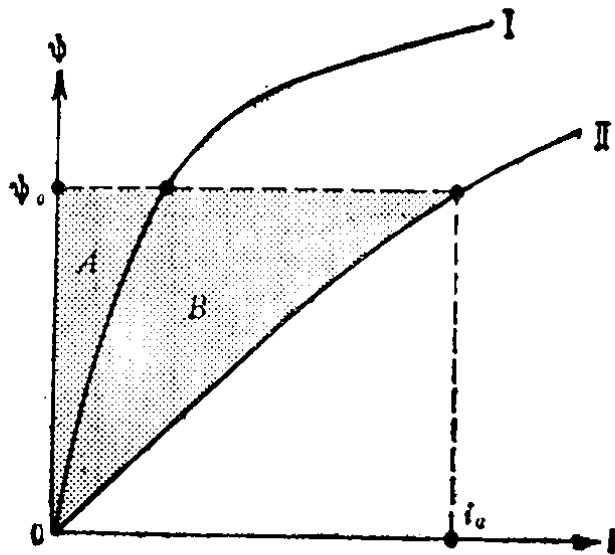


图 1-5

[例题 1-4] 试说明在电力电抗器的铁芯上设有空气隙的理由。

[简解] 参见图 1-6<sup>⊖</sup>。

$$\begin{aligned}
 P &= EI = XI^2 = \omega LI^2 = 2\omega \left( \frac{1}{2} LI^2 \right) \\
 &= 2\omega W_{\text{max}} \text{ (伏安)} \quad (1-17)
 \end{aligned}$$

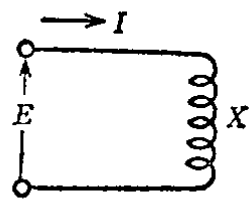


图 1-6

式中  $W_{\text{max}}$ ——电抗器磁场能量的平均值。

由此可见, 若要增大电抗器容量  $P$ , 就必须增大  $W_{\text{max}}$ , 所以, 如例题 1-3 所示, 设一个气隙显然是个好办法。

<sup>⊖</sup> 原书无此说明——校者注。

### 1.3 磁场能量产生机械力的物理概念

在图 1-7 的直流电磁铁上,当流过电流  $i$  时产生电磁力,衔铁  $M$  就被吸引到左面。现在来研究这个电磁铁的作用,从物理概念上分析磁场能量转换为机械能的过程和产生机械力的情况。

让我们用外力控制住衔铁  $M$  使之不动,然后加上电源电压  $v$ ,使流过电流  $i = i_0$ ,这时,磁路中贮藏的磁场能量可用图 1-8 的面积  $Ob_1a_1$  表示。

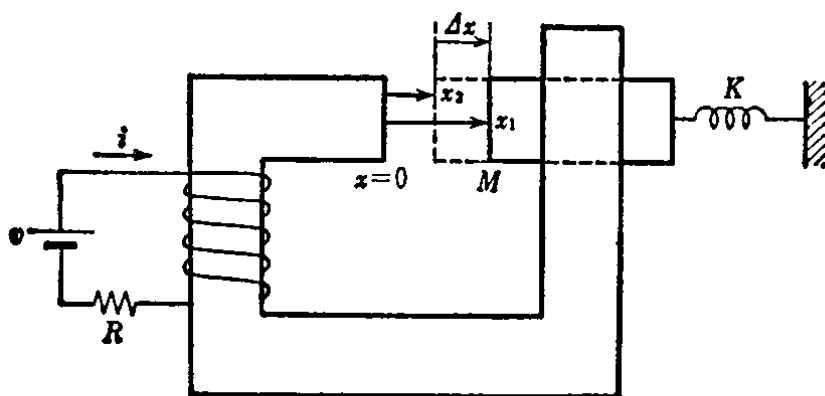


图 1-7 直流电磁铁

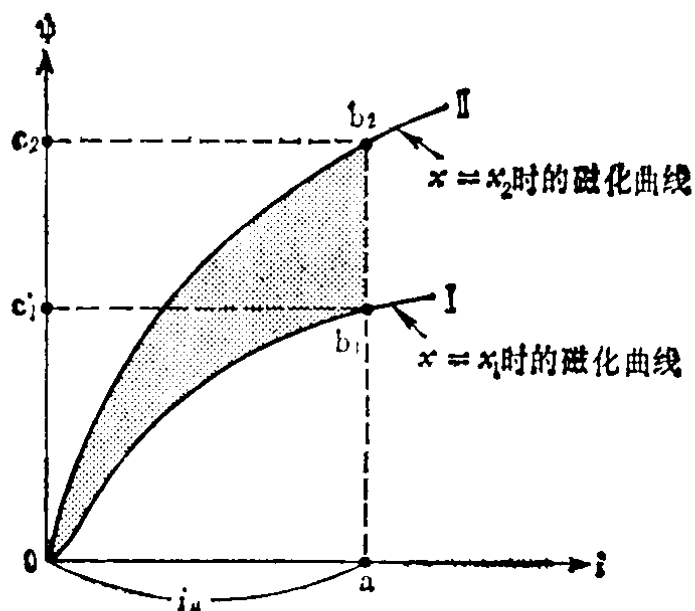


图 1-8



在这样的状态下，将控制衔铁  $M$  的外力慢慢解除（以保持  $i$  不变），使  $M$  从位置  $x = x_1$  处开始移动，弹簧  $K$  也就被  $M$  拉伸，在弹簧力和电磁铁产生的吸引力相平衡的位置  $x = x_2$  处静止下来。这个状态用图 1-8 的  $b_2$  点表示，这时，磁路中的磁场能量用图 1-8 的面积  $Ob_2c_2$  表示。另一方面，到达磁化状态  $b_2$  点时，由电源供给的能量则是面积  $Ob_1b_2c_2$ 。因此，由电源供给的能量和磁路储存的能量之差——面积  $Ob_1b_2$ （阴影部分）——必然被转换成弹簧  $K$  中的机械能了。

因此，若作用在衔铁上沿  $x$  方向的力为  $f$ ，而衔铁位移为  $\Delta x (= x_2 - x_1 < 0)$  时，则弹簧贮藏的能量是

$$f \Delta x = \text{面积 } Ob_1b_2 \quad (1-18)$$

在现阶段用数学式表示面积  $Ob_1b_2$  是困难的，因此在这里近似地假定磁化曲线  $Ob_1$ 、 $Ob_2$  都是直线，则

$$\triangle Ob_1b_2 \text{ 的面积} = \frac{1}{2} i \overline{b_1b_2} (i = i_a) \quad (1-19)$$

由于  $b_1$  和  $b_2$  两点的电流不变

$$\overline{b_1b_2} = \Delta \psi (i, x) = \frac{\partial \psi}{\partial x} \Delta x \quad (1-20)$$

将上式代入式 (1-19)，再代入式 (1-18)，则机械力  $f$  为

$$f = \frac{1}{2} i \frac{\partial \psi}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} i \psi \right) = \frac{\partial W_m}{\partial x} \quad (1-21)$$

上式是在取  $i$  和  $x$  为彼此独立的变量、并假定磁化曲线是直线的情况下得到的。

#### 1.4 磁场能量产生机械力的数学式推导

下面我们将对上一节讨论的结果进行数学推导。

图 1-7 中的衔铁  $M$  变化  $dx$  期间，由电源供给的电流  $dW_{elec}$  等于这期间所做的功  $dW_{mech}$  和磁场能量的增量  $dW_m$