

# 机电能量转换

福州大学 卓忠疆 主编

•3

水利电力出版社

## 内 容 提 要

本书阐明了机电能量转换的基本原理及其分析方法,包括对偶与类比,机电系统运动方程及其解法,综合矢量法,感应电机、同步电机和直流电机的动态分析,电机的统一理论及电机的状态变量分析法等。力求用精练的文字和较小的篇幅反映国内外在这方面研究的最新成果。

本书是高等学校“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业选修课教材,亦可供“电气技术”和“电机”专业采用。与上述专业有关的研究生和技术人员也可参考。

## 机 电 能 量 转 换

福州大学 卓忠疆 主编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本 9.25印张 203千字

1987年9月第一版 1987年9月北京第一次印刷

印数0001—6480册 定价 2.20 元

书号 15143·6419

## 前 言

本书是根据《1983—1987年高等学校水利电力类专业教材编审出版规划》编写的。可作为高等院校“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业选修课教材。

鉴于上述两专业教学计划中课程较多，学时有限，本书力求用精炼的文字、较小的篇幅，从基本概念出发阐明较深入的内容。全书共分八章，先阐述机电能量转换的原理、旋转电机机电能量转换的条件和机电系统运动方程及其解法，使读者有一整体综合的概念，然后用综合矢量法导出电机常用的坐标变换关系，按不同类型电机的特点，选用不同坐标系进行暂态和动态分析，再用电机统一理论予以概括，并以状态方程数值解法处理变速等非线性问题结束全书。书中附有习题及其部分答案，便于自学。

本书亦可供“电气技术”、“电机”专业，用作选修课教材。

本书第一、二、四章由浙江大学钱庆镛同志编写，第三、八章由浙江大学王毓东副教授编写，绪论和第五、六、七章由福州大学卓忠疆教授编写并担任主编。

本书由福州大学林志铉副教授主审。对如何精选内容、精炼文字，提出许多宝贵意见，对此编者表示衷心感谢。

本书的教学大纲和初稿，曾经高等学校电力工程专业电机学教材编审小组扩大会议审议。编委和与会代表对本书提了不少宝贵意见，在此一并致谢。

由于水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

# 目 录

前 言

绪 论 ..... 1

第一章 机电能量转换的基本原理 ..... 4

1-1 机电装置中的能量平衡 ..... 6

1-2 保守系统和磁场储能 ..... 8

1-3 单边激励的机电装置 ..... 18

1-4 多边激励机电装置的电磁转矩普遍公式 ..... 28

1-5 用电场作为耦合场的机电装置 ..... 32

习题 ..... 35

第二章 旋转电机机电能量转换的条件 ..... 38

2-1 旋转电机的功率平衡 ..... 38

2-2 隐极电机电磁转矩的通用公式 ..... 41

2-3 产生平均电磁转矩的条件 ..... 44

2-4 产生恒定电磁转矩的条件 ..... 53

\*2-5 铁心转矩 ..... 55

习题 ..... 59

第三章 对偶和类比 ..... 61

3-1 对偶和类比的 概念 ..... 61

3-2 对偶电路 ..... 61

3-3 机械系统的元件 ..... 69

3-4 机电系统的类比 ..... 72

习题 ..... 81

第四章 机电系统运动方程及其解法 ..... 84

4-1 建立机电系统运动方程的两种方法 ..... 84

4-2 拉格朗日方程 ..... 85

\*4-3 变分原理和拉格朗日方程的应用条件 ..... 94

4-4	应用拉格朗日方程建立机电系统运动方程	98
4-5	机电系统运动方程解法概述	102
4-6	传递函数、框图和流图法	104
4-7	方程线性化和模拟计算机仿真	120
	习题	129
<b>第五章</b>	<b>综合矢量和感应电机的暂态分析</b>	<b>133</b>
5-1	综合矢量	133
5-2	应用综合矢量推导电机中常用的坐标变换的关系	137
5-3	功率不变的坐标变换	145
5-4	感应电机的磁链与电流的综合矢量关系式	148
5-5	感应电机运动方程的综合矢量表达式	153
5-6	研究感应电机暂态过程的基本方程	156
5-7	感应电动机接入电网的暂态过程	165
5-8	感应电动机机端三相短路的暂态过程	173
	习题	175
<b>第六章</b>	<b>同步电机的动态分析</b>	<b>177</b>
6-1	用 $dq0$ 坐标系统表示的同步电机运动方程	177
6-2	同步电机的标么值运动方程	185
6-3	同步电机的等效电路及电抗函数	189
6-4	同步电机的异步运行	195
6-5	同步电机的小值振荡	205
6-6	同步电机的自激	212
	习题	224
<b>第七章</b>	<b>电机的统一理论</b>	<b>226</b>
7-1	电机的统一理论概述	226
7-2	有关一般化电机的基本知识	227
7-3	一般化电机的电压方程	229
7-4	一般化电机的功率和转矩方程	234
7-5	气隙磁通密度按正弦分布时的运动电动势表达式	235

7-6	从一般化电机推导交流电机运动方程简介	238
7-7	直流电机的运动方程	241
7-8	直流电机的暂态分析	244
	习题	252
第八章	电机的状态变量分析法	253
8-1	状态变量分析法的基本概念	254
8-2	电机的状态方程	259
8-3	状态方程的数值解法	269
8-4	计算实例	274
	习题答案	285
	参考文献	288

---

# 绪 论

## 一、研究机电能量转换的目的和意义

《机电能量转换》是研究机电耦合系统中能量传递和转换规律的一门学科。机电能量转换装置种类很多，旋转电机是机电装置中较复杂的一类，本书在泛论一般装置的基础上对它着重分析，以达到触类旁通的目的。这门课程最早出现于美国麻省理工学院(MIT)。二十几年来，国外一些大学用它替代传统的《电机学》，结果是各有利弊：利的一面是统一性、系统的观点和动态分析有所增强；弊的一面是物理概念、稳态运行和参数关系有所削弱。根据我国情况，把它作为《电机学》的一门选修课较为合适。在对电机有一般了解之后，用机电能量转换的基本原理加以概括，从而看出各种旋转电机在型式上略有差异而在原理上却无大不同，它们遵循着一些共同的规律，而这些规律还可推广到其他种类的机电装置中去。先了解个性继而概括出它们间的共性，会加深对个性的理解。先熟悉稳态运行并对动态问题有初步了解后再进行深入的分析，不但符合认识规律而且避免囫圇吞枣只知结论而不知其所以然的毛病。采用一个物理模型、一组方程和比较一致的分析方法，不但比《电机学》所用的方法较为新颖，而且更符合当前发展的电机控制等新技术。对电力专业来说，旋转电机是电力系统的重要元件。在学完《电机学》之后，选修这门课，可加强系统观点，并为深入分析旋转电机在电力系统运行中的问题打下坚实的基础。

## 二、机电能量转换理论的发展简史

机电能量转换理论是传统电机学理论的发展。

在1920至1940年间，由于美国和苏联建立了大型动力系统，使电机理论的发展达到了新的阶段。为了研究交流电机的暂态过程，不少学者创造了各种各样的坐标变换方法，其中最著名的有派克(R.H.Park)的 $dq0$ 变换，克拉克(E.Clark)的 $\alpha\beta0$ 变换，莱昂(W.V.Lyon)的 $+ - 0$ 变换和顾毓琇的 $fb0$ 变换等。在三十年代初期，克朗(G.Kron)首先提出分析电机的统一理论，三十多年中他发表了许多论文和专著，使电机理论的发展达到一个新的水平。

到五十年代末，美国麻省理工学院怀德(D.C.White)和伍德森(H.H.Woodson)的《机电能量转换》一书问世，该书用比较深入的基本概念和更具普遍性的原理论述各种机电能量转换装置，旋转电机仅作为这种装置的重要实例，使读者能从根本上洞悉机电装置的动力学，并为将来推广到其它领域奠定基础。在该书的影响下，六十年代以后，有关机电能量转换的这一类著作如雨后春笋，据统计约有三十种左右。

到七十年代以后，有关的出版物虽处于饱和状态，但仍时有新著出现，这些新著约有以下几个特点：

(1) 动态系统多采用状态变量表示法；

(2) 对机电耦合系统的阐述，有些作者力求避免过多过繁的数学运算；

(3) 对于电机课题的分析，除综合论述共同性的问题外，仍按机种分别研究其稳态和动态性能；

(4) 除分析机电能量转换原理和装置外，也介绍动力电子学在机电系统中的应用；



( 5 ) 还有一个各走极端的趋势，或是用十分简短的篇幅介绍几种常用的电机，或是用更概括更具普遍性的电磁场理论分析机电能量转换问题。

总之，如前所述，根据国内情况，目前仍需要将《电机学》讲得细致些，再用这门少学时的选修课，加以概括，以提高综合和深入研究问题的能力。

# 第一章 机电能量转换的基本原理

现代人类的生产和生活中，最主要的动力能源是电能。实现机械能与电能转换的装置统称为机电能量转换装置，以下简称机电装置。它们大小不一，品种繁多，按其功能的不同可分为三大类：

(1) 机电信号变换器。它们是实现机电信号变换的装置，是在功率较小的信号下工作的传感器，通常应用于测量和控制装置中。例如拾音器、扬声器、旋转变压器等；

(2) 动铁换能器。它们是通电流激磁产生力，使动铁有限位移的装置。例如继电器、电磁铁等。常用继电器的原理图如图1-1(a)；

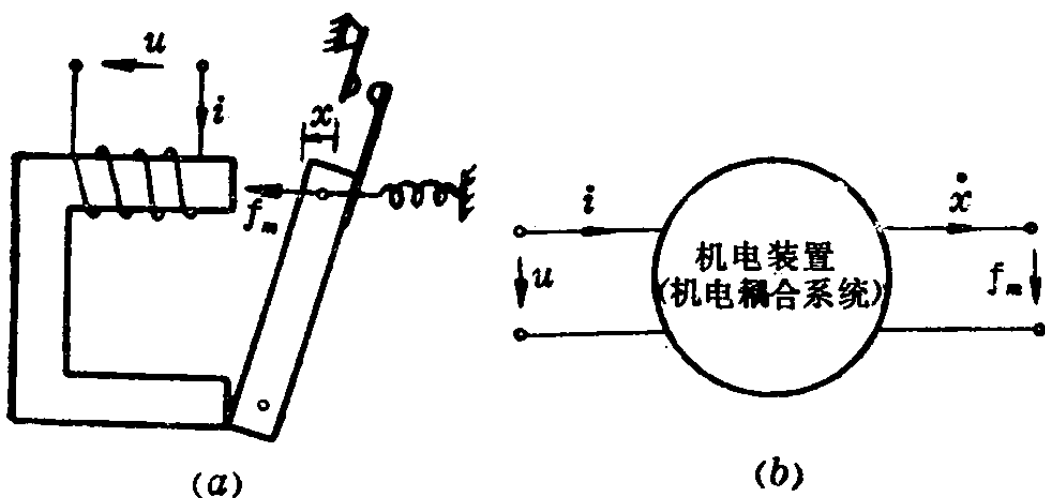


图 1-1 把继电器作为两端口装置

(3) 机电能量持续转换装置。例如电动机、发电机等。直流电动机的原理图如图1-2(a)。

机电装置实现机电能量转换的形式，大体有四种：①电

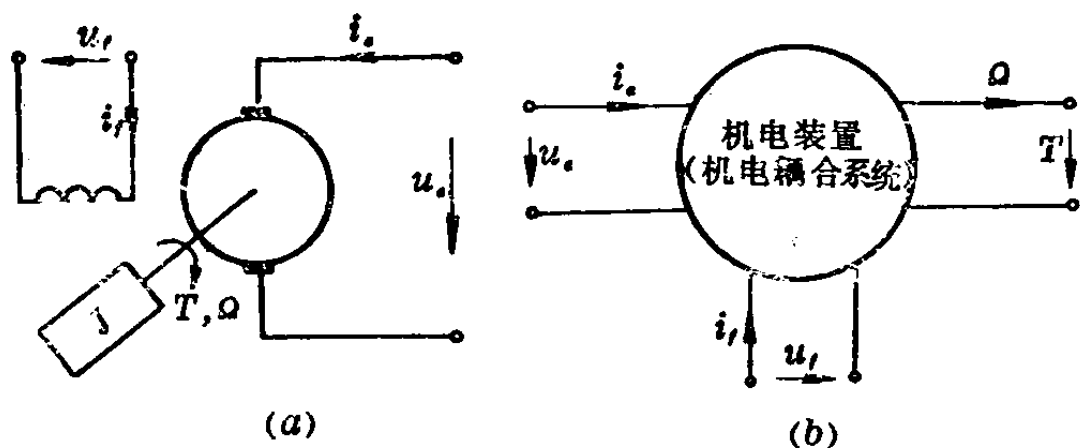


图 1-2 把直流电动机作为三端口装置

致伸缩与压电效应；②磁致伸缩；③电场力；④电磁力。前两种功率很小，又是不可逆的。应用第三种形式——电场力来实现机电能量转换的装置称为静电式机电装置，只能得到不大的力和功率。实用上绝大多数的机电装置是应用第四种形式——电磁力来实现机电能量转换的，称为电磁式机电装置。本书以电磁式机电装置作为主要研究对象。下面不加说明的机电装置仅指电磁式机电装置，或是电磁式与静电式两种机电装置。它们都是由载流的电系统、可动的机械系统和作为耦合媒介与储存能量的电磁场三部分组成；从总体看，它们每个又都有固定的和可动的两大部件。

严格说，耦合电磁场应该是电场和磁场的综合体。但在机电装置中，电频率较低，可动部件的运动速度大大低于光速，这样不仅可以忽略不计电磁辐射，认为机电装置是质量守恒的物理系统；而且可以把电场和磁场分别考虑，认为它们是彼此独立的。因此在电磁式机电装置中耦合电磁场仅是磁场，而在静电式机电装置中耦合场仅是电场。

在分析研究时，机电装置总可以归纳成具有若干个电端

口和机械端口的装置。在示意图上常用一个圆来表示机电装置的整体，从圆周上向圆外作若干对线段表示装置的输入和输出端口。例如继电器、电磁铁那样的动铁换能器可作为一对电端口和一对机械端口的两端口装置来对待，如图1-1(b)所示；大多数旋转电机可作为有两对电端口和一对机械端口的三端口装置，如图1-2(b)所示。

本章将叙述机电装置的能量转换过程。着重讨论耦合磁场的作用，要求学会用机电能量转换关系求出电磁转矩的普遍公式。对极少见的静电式机电装置仅在章末作简略介绍。

## 1-1 机电装置中的能量平衡

在质量守恒的物理系统中，能量守恒原理是一个必须遵守的普遍规律。它也是分析研究机电装置的一个基本出发点。

在机电装置中电能与机械能的转换是依赖于耦合场的作用来实现的。耦合场一方面从输入系统吸收电能（或机械能），对它的储能进行补充；另一方面又释放储能给输出系统，使后者输出机械能（或电能）。所以耦合场及其储能的存在是机电能量转换的关键。此外，在能量转换过程中，总会产生一些损耗，并以热能的形式散发出来。于是在机电装置中略去电磁辐射能量，存在着电能、机械能、电磁场储能和热能这四种形式的能量。根据能量守恒原理，按电动机惯例写出机电装置的能量方程式为：

$$\left( \begin{array}{c} \text{电源输入} \\ \text{的电能} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{耦合场储} \\ \text{能的增量} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{输出的} \\ \text{机械能} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{转换成热的} \\ \text{能量损耗} \end{array} \right) \quad (1-1)$$

式中最右边一项能量损耗，按其起因的不同可分为

三类：

- ( 1 ) 电系统 ( 如绕组 ) 通电流时产生的电阻损耗；
- ( 2 ) 机械系统由于通风和摩擦使一部分机械能转换成热能的损耗，称为机械损耗；
- ( 3 ) 耦合电磁场在介质中产生的损耗，即磁场耦合时铁心磁滞和涡流损耗，或电场耦合时在绝缘材料内产生的介质损耗。

如果把损耗按上述三项分类，并分别归并到相应的能量项目中去，式 ( 1-1 ) 可以化为如下形式：

$$\left( \begin{array}{l} \text{输入的电能} \\ - \text{电阻损耗} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{耦合场储能的增量} \\ + \text{相应的介质损耗} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{输出的机械能} \\ + \text{机械损耗} \end{array} \right) \quad (1-2)$$

与上式对应的能量平衡图如图1-3，其中电阻损耗和机械损耗已从机电耦合系统中移出；而介质损耗归并为耦合场吸收的能量，因此在图中用虚线表示，仍与机电耦合系统相连。在分析机电能量转换的机理时，还可进一步忽略不计耦合场的介质损耗。

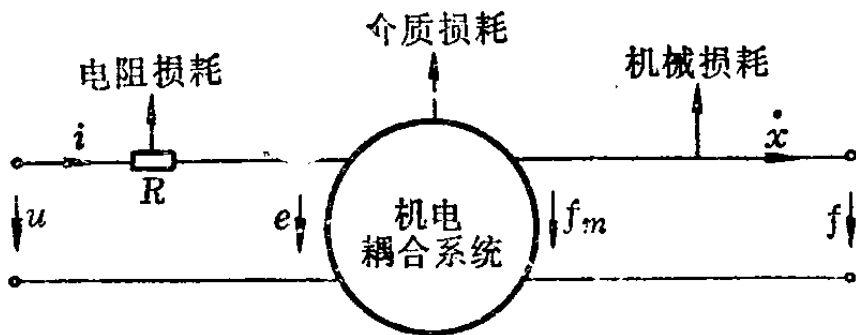


图 1-3 机电装置中的能量平衡

把式 ( 1-2 ) 各项能量写成  $dt$  时间内的微分形式，则得机电装置能量微分平衡式为：

$$dW_{ei} = dW_f + dW_{mec} \quad (1-3)$$

式中， $dW_{ei}$  表示扣除电阻损耗后在  $dt$  时间内输入耦合场的

净电能； $dW_{mec}$ 表示 $dt$ 时间内转换为机械能的总能量； $dW_f$ 表示 $dt$ 时间内耦合场吸收的总能量。忽略不计耦合场的介质损耗<sup>①</sup>，在电磁式机电装置中 $dW_f$ 就是耦合磁场储能的增量，即 $dW_f = dW_m$ ；在静电式机电装置中就是耦合电场储能的增量，即 $dW_f = dW_e$ 。

式(1-3)是本章的分析出发点。这里应当指出，式(1-1)是机电装置中能量关系的客观描述，它表明了机电能量转换过程中，机电装置实际是一个有损耗系统。但如直接用式(1-1)去分析研究问题，主次不分，往往难于求解。由于机电能量转换过程是通过耦合场的变化给电系统和机械系统带来的反应与作用来实现的，而能量损耗对机电能量转换过程并无实质性的影响，所以我们把损耗分类并进行归并和扣除，使式(1-1)化为式(1-3)。这体现了把握主要矛盾的科学分析方法，表明对待一个实际机电装置，可先将该装置抽象成无损耗的机电系统，只着眼于依赖耦合场储能作中间媒介来实现机电能量转换的过程，突出问题的核心——耦合场对电系统和机械系统的反应和作用，来明确机电能量转换的基本机理，以便进行深入的分析。核心问题清楚了，只要再加上能量损耗，就能很方便地求得实际机电装置的全部工作情况。

## 1-2 保守系统和磁场储能

### 一、保守系统和状态函数

在理想的物理系统中，有许多无损耗、可储能的元件，

① 某些机电装置，其铁耗不允许忽略不计时，可以根据铁耗的作用，把它作为等效机械损耗或作为等效电阻损耗，归并到真实的机械损耗或电阻损耗中去，并移出机电耦合系统，使 $dW_f = dW_m$ 。

如表1-1所示。在电系统中：线圈通过电流时，会产生磁场来储存一定的磁能；电容器充电时，会产生电场来储存一定的电场能。在机械系统中：旋转体或平移运动的物体会储存一定的动能；弹簧被外力  $f$  压缩  $x$  长度时，所加的能量  $fx$  会以位能形式储存起来；被升高的静物储存着位能；……。这些元件在一定条件下可以储存能量，当条件变化时又可以部分或全部释放所储能量，它自身并不消耗能量，故称为储能元件。全部由储能元件所组成的，与周围系统没有能量交换的自守物理系统称为保守系统。

当我们把决定储能元件储能大小的变量全部用  $x$  或  $\dot{x}$  来表示时，如表 1-1 中的磁能改写成  $W = \frac{1}{2} L \dot{x}^2$ ，电场能改写成  $W = \frac{x^2}{2C}$  等等，则整个保守系统的能量  $W$  可表示为

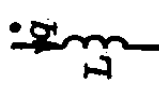


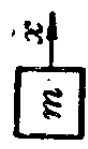
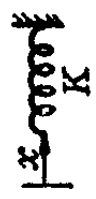
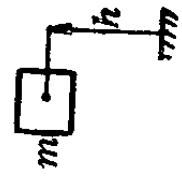
$$W = W(x_1, x_2, \dots; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots) \quad (1-4)$$

由式可见，保守系统的全部储能  $W$  是  $x_i$  和  $\dot{x}_i$  ( $i=1, 2, \dots$ ) 的函数，它仅与  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$  的即时状态有关，而与达到  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$  状态的经过无关。对于这些  $x_i$ 、 $\dot{x}_i$ ，即描述系统即时状态的一组独立变量，称为状态变量。由一组状态变量所确定的、描述系统即时状态的单值函数，例如储能  $W$ ，称为系统的状态函数。

正如磁场对铁磁物质或载流导体有力的作用，使其运动做功以显示磁场具有储能那样，储能元件处于储能状态时，对外会表现出力或电压（广义力）的作用。例如弹簧力  $f =$

$$Kx = K \sqrt{\frac{2W}{K}} = \sqrt{2KW}； \text{ 电容器上的电压 } u = \sqrt{2W/C}。$$

表 1-1 储能元件及其储能

电 系 统		机 械 系 统			
空心线圈	电 容 器	旋 转 体	平 移 运 动 体	弹 簧	静 物
 $W = \frac{1}{2} L \dot{q}^2$ <p><math>L</math>: 电感 <math>\dot{q}</math>: 电流</p>	 $W = \frac{1}{2} C u^2 = \frac{q^2}{2C}$ <p><math>C</math>: 电容 <math>u</math>: 电压 <math>q</math>: 电荷</p>	 $W = \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2$ <p><math>J</math>: 转动惯量 <math>\dot{\theta}</math>: 旋转角速度</p>	 $W = \frac{1}{2} m \dot{x}^2$ <p><math>m</math>: 质量 <math>\dot{x}</math>: 速度</p>	 $W = \frac{1}{2} K x^2$ <p><math>K</math>: 刚性常数 <math>x</math>: 伸缩长</p>	 $W = mgh$ <p><math>h</math>: 高度 <math>g</math>: 重力加速度</p>



凡是与储能有关，并能以储能的函数表达的力或电压，都可称为保守力。则按式(1-4)，保守力可表示为

$$f = f(x_1, x_2, \dots; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots) \quad (1-5)$$

它也是状态函数。

保守系统的一个重要特点就是，系统的储能以及与储能相联系的保守力都是状态函数，即两者都仅与系统即时状态有关，而与系统的历史以及达到即时状态的路径无关。这是下面分析磁场储能和电磁力的依据之一。

上节提的无损耗机电系统，若割断它与周围的联系就是一个保守系统。若考虑系统的损耗，及其与周围的能量交换，则实际机电系统都是非保守系统，并且除保守力以外，还有与状态变量无关的力，后者称为非保守力，如摩擦力、电源电压等。

## 二、磁能和磁共能

前面提过，耦合场及其储能的存在是机电能量转换的关键，因此有必要深入了解磁场储能(以下简称磁能)的情况。

### 1. 单绕组机电装置的磁能表达式

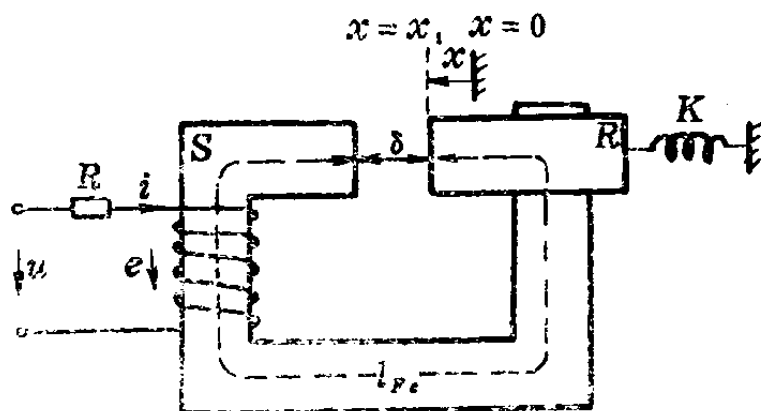


图 1-4 电磁铁