

高等学校教学参考书

磁路及带铁心电路

龚绍文 编

高等教育出版社

内 容 简 介

近年来出版的电路分析基础教材大都不包括磁路和带铁心电路的内容,本书就是作为对这些教材内容的补充而编写的。本书重点阐述磁路及带铁心电路的基本概念,基本定律和基本方法。全书分为两个部分,共六章。第一部分为磁路分析,内容包括磁路的基本概念和基本定律,铁磁性物质的磁特性,直流磁路计算和交流磁路计算;第二部分为带铁心电路分析,内容包括典型带铁心电路在正弦激励下的稳态分析和带铁心电路的过渡过程分析。每章后附有习题或思考题。

本书可作为高等工科院校无线电电子类专业大学生的教学参考书,也可供有关的技术人员参考。

责任编辑 王忠民

高等教育出版社出版
新华书店北京发行所发行
北京顺义县印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 6.125 字数 120,000

1985年2月第1版 1987年2月第3次印刷

印数 6,821—7,830

书号 15010·0597 定价 1.05 元

目 录

第一章 磁路分析中的基本概念和基本定律	1
§ 1-1 磁场的基本概念和基本定律	1
§ 1-2 磁路的基本概念和基本定律	5
§ 1-3 线性磁路的计算	12
§ 1-4 磁路与电路的比较	14
思考题与习题	17
第二章 铁磁性物质的磁特性	19
§ 2-1 铁磁性物质的磁化过程	19
§ 2-2 铁磁性物质磁特性的表征	24
§ 2-3 铁磁材料的分类	26
§ 2-4 铁氧体的磁性能	30
*§ 2-5 非晶态软磁合金	31
§ 2-6 非线性磁路和带铁心电路分析方法概述	32
思考题	35
第三章 直流磁路	37
§ 3-1 概述	37
§ 3-2 无分支直流磁路计算	42
§ 3-3 有分支直流磁路计算	52
§ 3-4 含有永久磁铁的简单磁路	58
§ 3-5 磁场能与电磁力	64
习题	68
第四章 交流磁路	71
§ 4-1 磁饱和对线圈电流的影响	72
§ 4-2 磁滞对线圈电流的影响 磁滞损失	75
§ 4-3 涡流对线圈电流的影响 涡流损失 铁损	78

§ 4-4 交流磁路计算	86
习题	91
第五章 正弦激励下带铁心电路的稳态分析	93
§ 5-1 铁心线圈电路	93
*§ 5-2 假定铁心磁特性为理想磁特性时铁心线圈电路的 分析	99
§ 5-3 铁心变压器	104
§ 5-4 几种常用的铁心变压器	116
*§ 5-5 半波和全波整流变压器分析	129
§ 5-6 铁磁谐振电路	139
§ 5-7 铁磁饱和稳压器电路	144
§ 5-8 铁心线圈的电感和增量电感	149
§ 5-9 交、直流同时磁化时的铁心线圈电路	154
*§ 5-10 假定铁心磁特性为理想磁特性时交、直流同时磁 化下铁心线圈电路的分析	156
习题	160
第六章 带铁心电路的过渡过程	164
§ 6-1 铁心线圈接通恒定电压	164
*§ 6-2 铁心线圈接通恒定电压后过渡过程的数值解法	177
§ 6-3 铁心线圈接通正弦交流电压	184
习题	187
参考文献	188

第一章 磁路分析中的基本概念和基本定律

§ 1-1 磁场的基本概念和基本定律

本章重点介绍磁路的基本定律，它们是进行磁路分析的基本依据。但磁路的基本定律是来源于磁场的某些规律的，磁路问题实质上是局限在一定范围内的磁场问题。所以，在讨论磁路问题之前，先对物理学中讲过的有关磁场的基本概念和基本定律作一些复习和补充。

从场的角度看，后面讨论的磁路分析和带铁心电路分析问题多属于恒定场和似稳场的问题。本节主要复习一些恒定磁场的基本概念和基本规律。

(一) 恒定磁场中的基本概念有：

1. 磁感应强度 B

磁感应强度是一个描述磁场性质的物理量。它是一个矢量，一个点函数。它反映了运动电荷被引入磁场中要受到磁场力的作用这一性质。如有电荷 q ，在磁场中以速度 v 运动，则它所受磁场对它的作用力为

$$f = q [v \times B] \quad (1-1)$$

其中 B 为运动电荷所在处的磁感应强度（或称磁通密度）。

磁感应强度的单位在国际单位制(SI)中是 T（特斯拉），

在厘米克秒绝对电磁单位制 (CGSM) 中是 Gs (高斯)。两种单位制的换算关系为: $1\text{Gs} \triangleq 10^{-4}\text{T}^*$

了解了磁感应强度的分布情况就了解了磁场。由于磁感应强度是一个点函数, 又是一个矢量, 所以, 磁场可以形象地用一族磁力线来表示。规定磁力线上各点的切线方向与各点的磁感应强度的方向相一致, 并且可用磁力线的疏密表示某处磁感应强度的大小。

磁场是电流产生的。真空中的磁场, 在已知电流分布的情况下, 各点的磁感应强度可通过一实验定律——毕奥-萨伐尔定律求出。由毕奥-萨伐尔定律可以推知磁力线总是闭合的, 而且总是围绕着电流线的, 而电流线也总是闭合的, 所以, 磁力线与电流线总是相互钩链的, 它们的方向符合右手螺旋定则。一般地讲, 磁力线是分布在整个空间的, 靠近电流的区域较密, 远离电流的地方较疏。

2. 磁通量 Φ

磁通量是磁感应强度的通量, 简称磁通。即

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (1-2)$$

式中 A 为场中某一面积。

磁通量是磁感应强度对某一面积的积分值。它是一个标量, 没有方向, 但有正负。 $\mathbf{B}$ 与 $d\mathbf{A}$ 的夹角小于 90° 时为正, 大于 90° 时为负。

磁通可以形象地用穿过该面积磁力线的根数来表示。

磁通的单位在 SI 中是 Wb (韦伯), 在 CGSM 中是 Mx。

* 符号 $\triangleq$ 表示相当于, 以下均同。

(麦克斯韦)。1Mx $\triangleq$ 10^{-8} Wb。

磁通是通过磁感应强度来定义的。反过来，磁感应强度也可以通过磁通来理解。某点磁感应强度在数值上可以看成是通过与该点磁力线垂直的小面积内单位面积的磁通量。若磁场是均匀的，则

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (1-3)$$

式中 Φ 为与磁场垂直的面积 A 内的磁通。因此，磁感应强度又称为磁通密度。

磁感应强度单位与磁通单位的关系是：1T = 1 Wb/m²，
即 1 特斯拉 = 1 $\frac{\text{韦伯}}{\text{米}^2}$ 。

3. 磁场强度 H

磁场强度 H 是磁场中另一个重要的物理量。此物理量是由于它沿场中任意闭合路径的线积分只与产生磁场的宏观传导电流有关，而与场中的介质无关这一重要性质而被引入的。它也是一个矢量，一个点函数，它与产生磁场的宏观传导电流的关系如后面式(1-11)所示。

磁场强度的单位在 SI 中是 A/m (安/米)，在 CGSM 中是 Oe (奥斯特)。1Oe $\triangleq$ $\frac{10^3}{4\pi}$ A/m

4. 磁导率 μ

磁导率是表征磁场中介质磁性质的物理量，也就是衡量磁介质导磁能力的物理量。它也是一个点函数。它决定了该点磁感应强度与磁场强度的关系，对各向同性的磁介质(工程上大都属于这一类)，即

$$B = \mu H \quad (1-4)$$

式(1-4)称为磁介质的性能方程。

应该指出,式(1-4)是由更一般的磁介质的性能方程

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M} \quad (1-5)$$

演变而来的。式中 μ_0 为真空磁导率,在 SI 中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。 $\mathbf{M}$ 是磁化强度矢量,它也是点函数。它的含义是磁场中该点附近磁介质中由于磁化而产生的单位体积内的磁偶极子的磁矩的矢量和。

$$\text{由式(1-5)得} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (1-6)$$

实验指出,对各向同性的磁介质。 $\mathbf{M}$ 与 $\mathbf{H}$ 有如下关系

$$\mathbf{M} = \kappa \mathbf{H} \quad (1-7)$$

式中, κ 称为磁化率。它是反映磁介质被磁化难易的物理量。对线性磁介质,它是常数,对于非线性磁介质,它不是常数,与 H 有关。因此

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \kappa)\mathbf{H} = \mu_0\mu_r\mathbf{H} = \mu\mathbf{H}$$

式中

$$\mu_r = 1 + \kappa \quad (1-8)$$

$$\mu = \mu_r\mu_0 \quad (1-9)$$

式中 μ_r 称为相对磁导率,它是个无量纲的数。

由上看出, κ, μ_r, μ 三个量中任一个都可表征磁介质的性质。一般用磁导率 μ 。

(二) 磁场中的基本规律有:

1. 磁通连续性原理

磁通连续性原理是磁场的基本规律之一,它的表达式是

$$\oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (1-10)$$

式中 $d\mathbf{A}$ 的方向是闭合面在 dA 处外法线的方向。

上式表明,在磁场中,通过任意闭合面的磁通量总是零。也就是说,磁力线在磁场中任何闭合面都是连续的。从场图的角度看,就是穿入某闭合面的磁力线,必同时穿出该闭合面。

此规律对于真空中和有介质存在的磁场都是成立的。

2. 安培环路定律

安培环路定律是磁场的另一基本规律。它反映了磁场与产生它的宏观传导电流之间的关系。它的表达式是

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum I \quad (1-11)$$

安培环路定律可陈述如下: 磁场强度沿任意闭合路径的线积分等于穿过该闭合路径所限定的面积的电流的代数和。闭合路径所限定的面积的方向按路径方向的右手定则确定。电流的方向与此面积的方向一致时取正号,否则,取负号。

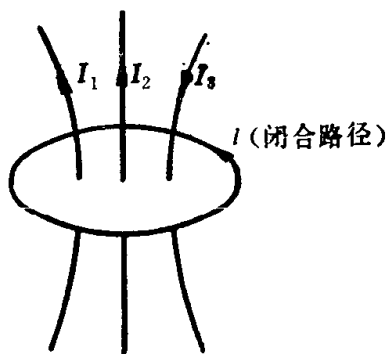


图 1-1

对图 1-1 而言,运用安培环路定律可写成

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_1 + I_2 - I_3$$

应该指出,安培环路定律告诉我们磁场强度沿场中任意闭合路径的线积分只与宏观传导电流有关,而与场中的磁介质无关,但是不能理解为磁场强度的分布与磁介质无关。

§ 1-2 磁路的基本概念和基本定律

(一) 磁路

工程上常利用载流导体在磁场中受力的现象和电磁感应现象制造许多机电能量变换器件和信号转换器件，如各种电机、电磁铁、继电器、电磁仪表、变压器、互感器、扼流圈、磁放大器等。为了提高效率，缩小体积，这些器件都要求能以较小的电流获得较大的磁通。这就要求设法把磁场（即磁力线）集中在一定的小的区域里。利用特殊的电流分布如螺线环等，特别是利用铁磁物质组成一定的结构，可以达到上述的目的。

利用铁磁性物质制成一定形状的回路，其周围绕有通电流的线圈或其中装有永久磁铁，人为地造成磁通的路径，使磁通主要集中在该路径中，这种结构的总体（有时包括一段空气隙）称为磁路。

铁磁性物质形成的路径之所以能集中磁力线是因为它们的磁导率比其周围的空气或其他非铁磁性物质的磁导率高得多的缘故。图 1-2 是几种常见的磁路结构。

磁路的形成不但有实用价值，而且给分析带来了方便。这是由于与磁场比较磁路有许多特点的缘故。这些特点是：

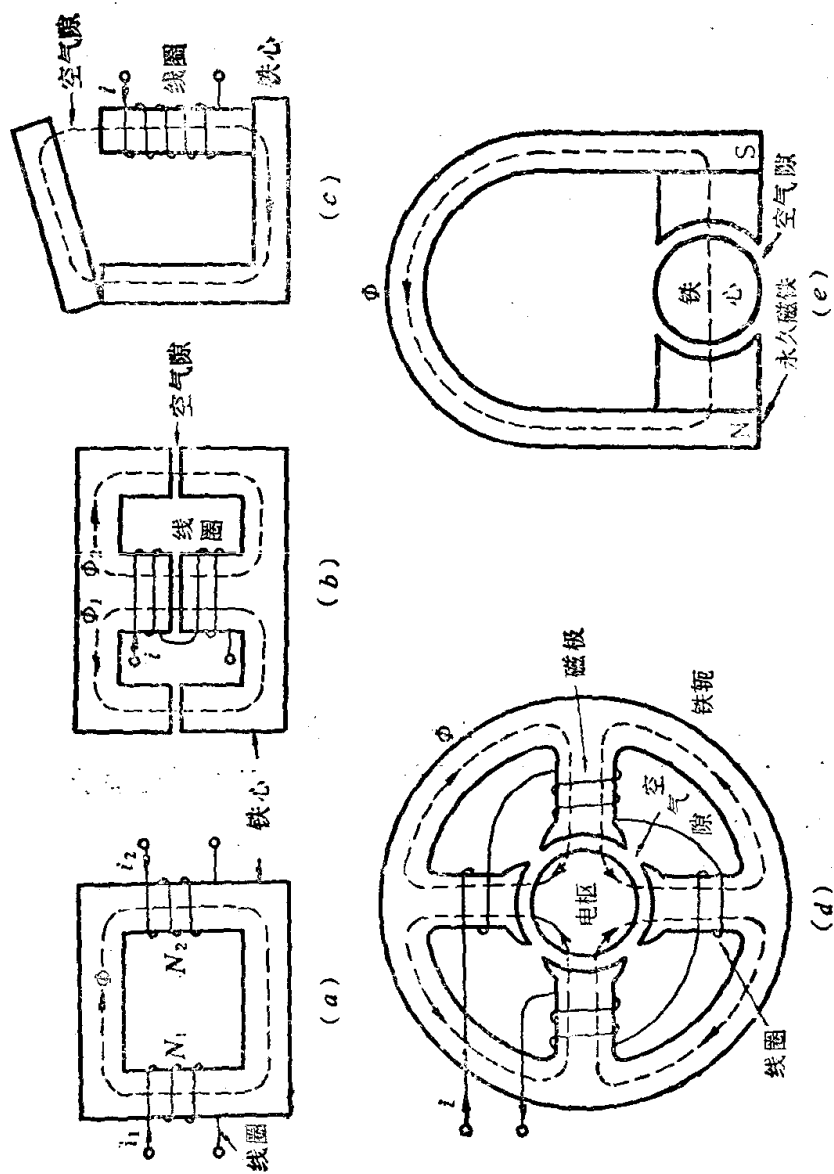
1. 可以认为磁通全部（或主要）集中在磁路里，磁路路径就是磁力线的轨迹。

2. 磁路常可分为几段，使每段具有相同的截面积和相同的磁介质。在这样的磁路段中磁场强度处处相同，方向与磁路路径一致。

3. 在磁路中任一截面上，磁通都是均匀分布的。

（二）磁路分析中的基本物理量

磁路分析中的物理量与磁场的物理量基本相同。其中，磁通 Φ ，磁感应强度 B ，磁场强度 H 的含义，符号和单位完全



(a) 变压器磁路; (b) 继电器磁路; (c) 四极电机的磁路; (d) 接触器磁路; (e) 永磁式电磁仪表的磁路
图 1-2 几种常见的磁路

一样。只需再补充两个概念,即磁通势和磁位差。

围绕磁路的某一线圈的电流 i 与其匝数 N 的乘积 Ni , 称为该线圈电流产生的磁通势, 用符号 F_m 表示, 也可直接用 Ni 表示, 即

$$F_m = Ni \quad (1-12)$$

磁通势的方向由产生它的线圈电流按右手螺旋定则确定。

磁通势的单位在 SI 中是 A(安)*。

某一磁路段中的磁场强度 H 与磁路段长度 l 的乘积, 称为该磁路段的磁位差, 也称为磁压、磁压降。用符号 U_m 表示, 即

$$U_m = Hl \quad (1-13)$$

磁位差的方向与磁场强度 H 一致。

磁位差的单位在 SI 中是 A(安)。

应该指出, 当磁路把磁场集中在有限的区域之后, 表征它的性状, 用场量的积分量更方便些, 因此, 在磁路分析中磁通和磁通势(或磁位差)是基本的求解量。当然, 在求解这些量的过程中也会用到磁感应强度, 磁场强度等概念。

(三) 磁路的基尔霍夫定律

1. 根据前述磁路的特点, 在磁路中, 磁通连续性原理演变为如下形式,

$$\sum \Phi = 0 \quad (1-14)$$

即: 对于磁路中的任一包围面, 在任何时刻, 穿过该包围面的各分支磁路段磁通量的代数和等于零。这是由于, 在磁路中,

* 有的书中, 为了与电流的单位相区别, 磁通势的单位用 At(安匝)。

把穿过一个包围面中无限多个小截面的磁通量之和变成了穿过该包围面与磁路路径相交的有限截面的磁通量之和。

这一规律在形式上与电路中的基尔霍夫第一(电流)定律(KCL)相似,所以常称为磁路的基尔霍夫第一定律,也可仍称为磁通连续性原理。

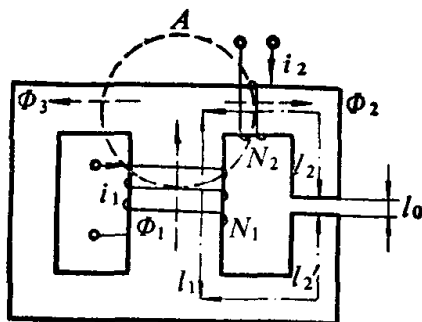


图 1-3 磁路定律例图

对于图 1-3 所示的磁路,在图示的参考方向下,对包围面 A 写磁路的基尔霍夫第一定律方程为(假定穿出包围面的磁通为正)

$$-\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0$$

2. 根据前述磁路的特点,在磁路中,安培环路定律演变为如下形式

$$\sum Hl = \sum Ni \quad (1-15)$$

即:对于磁路中的任一闭合路径,在任一时刻,沿该闭合路径的各段磁路磁位差的代数和等于围绕此闭合路径的所有磁通势的代数和。这是由于,在磁路中, H 与 dl 的点积变成了 H 与 l 的乘积,因此,线积分变成了相加,以及宏观传导电流的代数和 $\sum I$ 变成了磁通势的代数和 $\sum Ni$ 的缘故。

上式中等号右端各项的正负号由各磁通势的方向与沿闭合路径选定的循行方向是否一致来确定,一致者取正号,不一致者取负号;等号左端各项的正负号由磁场强度 H 与上面选定的循行方向是否一致来确定,一致者为正号,不一致者为负号。

考虑到磁通势和磁位差的符号,式(1-15)也可写成

$$\sum U_m = \sum F_m \quad (1-16)$$

这一规律在形式上与电路中的基尔霍夫第二(电压)定律(KVL)相似,所以常称为磁路的基尔霍夫第二定律,也可仍称为安培环路定律。

应该指出,磁路中磁位差这一概念只与某一具体磁路段相联系,而不能像电路中称两点的电位差那样称两点的磁位差。因为磁场是有旋场,磁场强度沿任一闭合路径的线积分不等于零,亦即磁场中磁位差与路径有关。所以,磁位差的符号也常直接用(Hl)代表。当然,如果闭合积分路径不与电流线圈交链,两点的磁位差与路径无关。

对于图 1-3 所示磁路右边的闭合路径,若选定其循行方向为顺时针,则磁路的基尔霍夫第二定律方程为

$$H_1 l_1 + H_2(l_2 + l'_2) + H_0 l_0 = N_1 i_1 - N_2 i_2$$

运用磁路的基尔霍夫第二定律需要知道各磁路段的长度,但是,磁路中沿内表面和外表面的长度不同,一般在计算时,取磁路的几何中心线作为平均磁路长度。

(四) 磁路的欧姆定律 磁阻

磁路的两个基本定律只与磁路的结构有关,而与磁路中填充的介质无关,可以说是磁路中的拓扑约束。像电路分析中除了拓扑约束外还有元件的约束一样,磁路中也有类似的约束关系。这就是组成磁路的各磁路段的磁通、磁压关系,这类关系应由磁场中的介质性能方程演变而来。

图 1-4 为某磁路中的一个磁路段。沿磁力线方向的长度为 l ,与磁力线垂直的截面积为 A ,假定磁路段内介质材料是均匀的,线性的,其磁导率为 μ 。该磁路段的磁通、磁压关系

可如下求得：

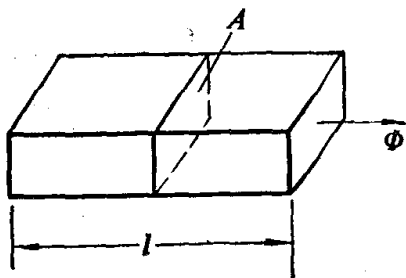
由于

$$B = \mu H$$

$$\Phi = BA$$

故

$$\Phi = \mu \frac{A}{l} H l = \frac{H l}{\frac{l}{\mu A}}$$



又

$$U_m = H l$$

图 1-4 磁阻概念说明

令

$$R_m = \frac{l}{\mu A} \quad (1-17)$$

则

$$U_m = R_m \Phi \quad (1-18)$$

式中 R_m 称为该磁路段的磁阻。它可理解为该磁路段对磁通的阻力。反映了该段磁路的性质。在相同的磁压降下， R_m 大时，磁通小，反之，磁通大。

磁阻的大小取决于该段磁路的尺寸和介质性质，它的公式(1-17)与电阻的公式相似。

磁阻的单位在 SI 中是 $1/H$ (1/亨)。

磁阻的倒数称为磁导，用符号 $\mathcal{A}$ 表示。即

$$\mathcal{A} = \frac{1}{R_m} = \mu \frac{A}{l} \quad (1-19)$$

磁导的单位在 SI 中是 H(亨)。

式(1-18)所示的磁路段的磁通、磁压关系与电路中的欧姆定律在形式上相似，所以常称为磁路的欧姆定律。

如果磁路中各段的磁阻皆为常数，亦即各段都是由磁导率为常数的材料组成的，称为线性磁路；否则，称为非线性磁路。

§ 1-3 线性磁路的计算

磁路计算的基本任务是在已知磁路结构,材料,尺寸的情况下,求解各部分的磁通和磁势(或磁压降)。与电路相似,磁路的基尔霍夫定律和各段磁路的磁通、磁压关系是磁路分析计算的基本依据。下面举例说明怎样依据这些定律计算线性磁路。

例 1-1 磁路如图 1-5 所示。已知磁路的铁心段长度 $l=20\text{ cm}$, 截面积 $A=1\text{ cm}^2$, 空气隙长度 $l_0=0.2\text{ mm}$, 铁心材料的相对磁导率 $\mu_r=1000$, 线圈匝数 $N=1000$, 若要求在磁路中产生磁通 $\Phi=0.4\pi\times 10^{-4}\text{ Wb}$, 问需在线圈中通入多大电流 I , 并求空气隙的磁压降 U_{m0} 。

解 计算磁路问题首先要给磁路分段, 本题可分为铁心部分和空气隙两段。令铁心段的磁阻为 R_{m1} , 空气隙段的磁阻为 R_{m0} 。

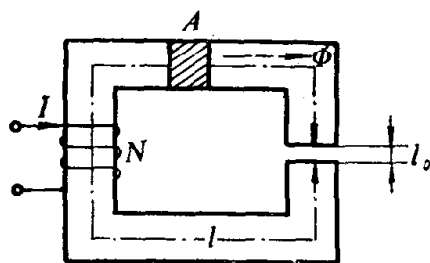


图 1-5

与电路分析相似, 在磁路计算之前, 也要规定各磁路段磁通、磁压降的参考方向。由于磁路结构一般比电路简单, 有时可直接判断出磁通、磁压降的真实方向。

因此, 在本例中, 磁通、磁压降采用关联的参考方向, 并与真实方向一致。磁通 Φ 的参考方向如图 1-5 中所示。

根据磁阻公式(1-19)

$$R_{m1} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 A}$$

$$= \frac{20 \times 10^{-2}}{10^3 \times 4 \pi \times 10^{-7} \times 10^{-4}} = \frac{5}{\pi} \times 10^6 \quad 1/\text{H}$$

$$R_{m0} = \frac{l_0}{\mu_0 A} = \frac{2 \times 10^{-4}}{4 \pi \times 10^{-7} \times 10^{-4}} = \frac{5}{\pi} \times 10^6 \quad 1/\text{H}$$

根据磁路的基尔霍夫第二定律,有

$$F_m = U_{m1} + U_{m0}$$

而

$$U_{m1} = R_{m1} \Phi, U_{m0} = R_{m0} \Phi$$

故

$$F_m = R_{m1} \Phi + R_{m0} \Phi = (R_{m1} + R_{m0}) \Phi$$

$$= \left(\frac{5}{\pi} \times 10^6 + \frac{5}{\pi} \times 10^6 \right) \times 0.4 \pi \times 10^{-4}$$

$$= 400 \quad \text{A}$$

因此

$$I = \frac{F_m}{N} = \frac{400}{1000} = 0.4 \quad \text{A}$$

$$U_{m0} = R_{m0} \Phi = \frac{5}{\pi} \times 10^6 \times 0.4 \pi \times 10^{-4} = 200 \quad \text{A}$$

请注意,此例中空气隙只有 0.2 mm,但其磁压降却占总磁势的一半,可见空气隙对磁路磁通的影响是很大的。

例 1-2 磁路如图 1-6 所示。磁路是对称的,无空气隙。

中间柱截面积 $A = 1 \text{ cm}^2$, 两侧截面积均为 $A_1 = A_2 = \frac{1}{2} A$,

中间柱的平均磁路长度为 $l = 4 \text{ cm}$, 两侧平均磁路长度 $l_1 = l_2 = 16 \text{ cm}$, 铁心材料的相对磁导率 $\mu_r = 1000$, 线圈匝数 $N = 1000$, 已知线圈电流 $I = 0.5/\pi \text{ A}$, 求侧柱的磁通为多少?

解 本题磁路可分为三段: 令中间柱磁阻为 R_m , 右侧柱磁阻为 R_{m1} , 左侧柱磁阻为 R_{m2} 。各变量的参考方向如图 1-6 所示。