开磁路电感感值与饱和裕量计算方法研究

郑庆杰，陈为

福州大学电气工程与自动化学院，福州 310027

摘　要：在电力电子行业，储能与滤波电感有着极为广泛的应用。其中大部分电感都是闭合磁路电感，但是也有一部分是开放磁路电感，由于其具有良好的抗直流偏置能力，在很多场合都得到了大量应用。对于开放磁路电感来说，其设计难点主要是电感量的准确计算，但目前很多时候还是需要以样品测试结果为参考，这为其推广应用带来了一定困难。本文介绍了一种计算方法，它是基于理论分析，并结合电磁仿真软件Ansoft Maxwell和实验结果来进行验证，实验结果显示这套计算方法是准确有效地，可缩短项目研发时间。

关键词：开放磁路，电感，感值计算，抗偏置能力

The Study on the Inductance Calculation for Open Magnetic Loop Inductor

ZHENG Qingjie，CHEN Wei

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108

Abstract: The energy storage and filter inductor are very common in power electronics. Most of them are close magnetic loop inductor, but there also has some open magnetic loop inductor. It’s just because they have better DC bias capability, therefore they are been used in a great deal of applications. It’s difficult to calculate inductance for open magnetic loop inductor, usually the engineers must test the samples for inductance, therefor it’s hard for it’s application. This paper introduce a calculation method, it’s based on the theory analysis and electro-magnetic field simulation(Ansoft Maxwell) , at last verified it by the test results. The test results shows this calculation method is exact and effective, it could shorten project time for engineers.

Keywords: open magnetic loop, inductor, inductance calculation, DC bias capability

1 引言

随着电力电子领域关键器件（半导体与磁性器件等），软开关拓扑和控制方式的不断进步，电力电子行业逐步完善，在电源质量、性能指标和成本上的优势越来越明显，基本替代了原有低频线性电源。

半导体开关和磁性器件均是电力电子行业的关键器件。磁性器件在其中主要起到能量的隔离、缓冲作用（储能和滤波）。磁性器件对电源系统的效率和其他性能指标（温升、EMI 和纹波等）都有着直接和重要的影响。

在直流滤波电感应用上，由于其直流分量大交流分量小的特点，经常需要用到开磁路电感。开磁路电感最大的优势就是抗直流偏置能力强，可以缩减电感体积和成本。但是开磁路电感在实际应用中也有一些问题，比如感值和直流偏置计算困难，扩散磁通有干扰（会引起电气性能和 EMI 问题），某些情况下甚至会与周围其他器件构成近场互耦，如果周围有金属物体还会产生额外的涡流损耗。这些不利条件都限制了开磁路电感在某些领域的应用。

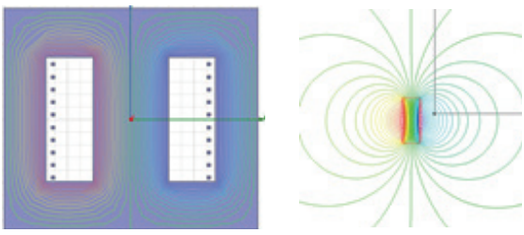
对于开磁路的感量和抗饱和能力计算问题，目前业内还没有比较准确的计算方法。在实际设计过程中还是主要以实测为主，这对产品的研发周期造成了很大困扰。本文基于磁路模型分析，并结合电磁仿真软件和实验数据，推导了开磁路电感的感量与抗偏置能力的计算公式，经过实

际验证误差率可以控制在 10% 以内。

2 电感磁路模型

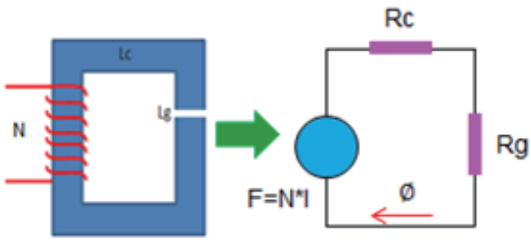
对于闭合磁路电感来说，由于磁芯的相对磁导率和空气比较起来还是要高一个数量级以上，相应的磁芯磁阻也会低一个数量级以上，通过电磁场仿真可以看出（见图 1（a）），对于闭合磁路电感来说，绝大部分磁力线都是走磁芯内部。这样其磁路模型（见图 2）计算就会简单很多，不管是磁芯部分磁阻还是气隙部分磁阻都很容易确定参数。确定了磁阻参数以后就可以很容易计算电感量（见式 1~4）。

但是对于开磁路电感来说就没有那么容易了，通过电磁场仿真可以看出（见图 1（b）），对于开磁路电感来说，由于扩散在空气中的磁路面积和长度很难确认，而且磁芯附近的漏磁通也比较严重，所以气隙部分磁阻 R_g 很难准确计算出来。如果不能准确计算磁阻，电感量自然也就很难得出。



（a）闭合磁路磁场分布　　（b）开磁路磁场分布

图 1 闭合磁路与开磁路电感磁场分布



（a）闭合磁路磁场分布　　（b）开磁路磁场分布

图 2 磁路模型

$$R_c = \frac{L_c}{\mu_c \cdot \mu_0 \cdot A_e} \quad \text{--- 式（1）}$$

$$R_g = \frac{L_g}{\mu_0 \cdot A_e} \quad \text{--- 式（2）}$$

$$F = N.I = \emptyset.(R_c + R_g) \quad \text{--- 式（3）}$$

$$L = \frac{N^2}{R_c + R_g} \quad \text{--- 式（4）}$$

式中 R_c 和 R_g 分别表示磁芯磁阻和气隙磁阻，L_c 和 L_g 分别表示磁芯有效磁路长度和气隙有效磁路长度，A_e 表示磁芯有效截面积，μ_0 表示空气磁导率，μ_c 表示磁芯相对磁导率，N 是绕组匝数，I 流过绕组电流，F 表示磁动势，Φ 表示磁通，L 表示电感量。

3 已有开磁路电感计算方法简介

目前常用的开磁路计算方法就是飞磁技术手册提供的一个近似算法 [1]。具体参数定义如图 3 所示，A_{rod} 是磁芯截面积，μ_{rod} 是棒状电感磁路等效磁导率，l_{rod} 是磁芯高度（也是绕组高度），另外还有一个限制条件绕组必须绕满磁芯。

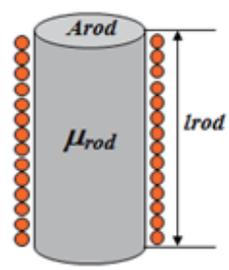


图 3 棒状电感模型

具体计算过程如下：

· 首先计算磁芯高度（绕组高度）与磁芯直径的比值，并在图 4 的横坐标中找到这个比值的对应位置

· 然后再在图 4 中找到磁性材料的实际初始磁导率曲线

· 他们的交叉点对应的纵坐标位置就是棒状电感磁路等效磁导率 μ_{rod}

· 将这个数值带入公式 5 中就可以计算出棒状电感的感量

$$L = \mu_0 \cdot \mu_{rod} \frac{N^2 A_{rod}}{l_{rod}} \quad \text{---式（5）}$$

根据这个方法我们找了一些样品进行验证，并确保都绕一层并且绕满此层。验证结果如表 1 所示。长度单位为

mm。从测试与计算结果的对比可以看出，感量计算误差范围非常大，可以从 2% 到 196%。这给实际应用带来了很大困扰，实际应用还是以测试为准。而工程人员希望这个计算误差最好在一定的可控范围内（一般是 10% 以内），这样才可以缩短前期的设计和制样时间。

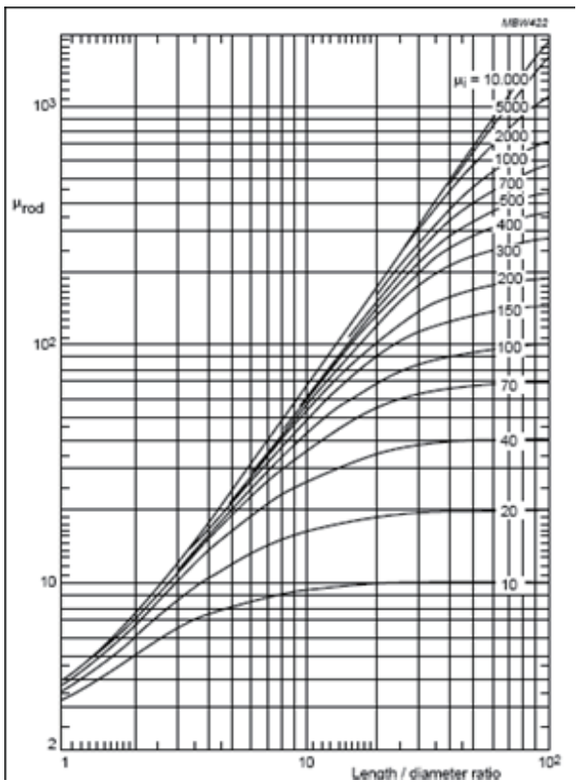


图 4 棒状电感等效磁导率查询表

表 1 基于飞磁查表法计算结果与测试结果对比

样品编号	磁芯直径	磁芯高度	绕组匝数	计算感量 uH	测试感量 uH	计算误差
1	3	20	17	9.53	3.22	195.96%
2	6	30	26	28	13.6	105.88%
3	8	28.2	23	18.6	12	55.00%
4	5	30.2	25	26.5	11.4	132.46%
5	4	15	12	2.75	1.6	71.88%
6	10	24	9	2.04	2	2.00%
7	10	40	34	63.6	37.2	70.97%
8	8	28.5	25	22	15.5	41.94%

4 开磁路电感感值计算推导过程

首先以棒状电感为例进行分析。由磁路模型公式 4 可以看出，虽然气隙磁阻无法准确计算，但是感量与匝数的平方依然是成正比例关系。除此之外其他可能影响感量的因素还包括磁芯直径 D1，磁芯长度 Le，磁芯磁导率 μc 等。下面首先针对磁芯直径进行分析，由于结构形状可能影响磁场分布，因而需要先做一些假设：首先假设 Le/D1 是个固定值 4，磁芯相对磁导率 1000，绕组匝数 20，均匀绕制（绕满）。具体棒状电感结构图及磁力线分布情况请参考图 5，所有电磁场仿真都是基于 XZ 轴的旋转坐标系。

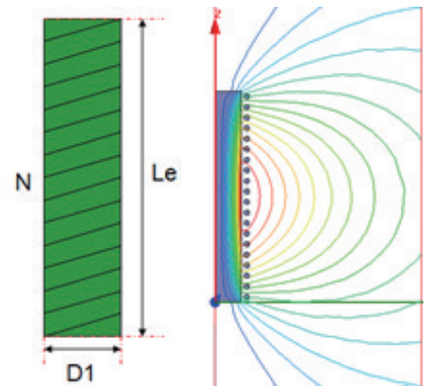


图 5 棒状电感结构图及磁力线分布情况

表 2 棒状电感感值仿真结果

Le/D1	Le(mm)	D1(mm)	μc	N	Lm（uH）
4	12	3	1000	20	3.9786
4	16	4	1000	20	5.3442
4	20	5	1000	20	6.7204
4	24	6	1000	20	8.1074
4	28	7	1000	20	9.5044
4	32	8	1000	20	10.8948
4	36	9	1000	20	12.268
4	40	10	1000	20	13.6854

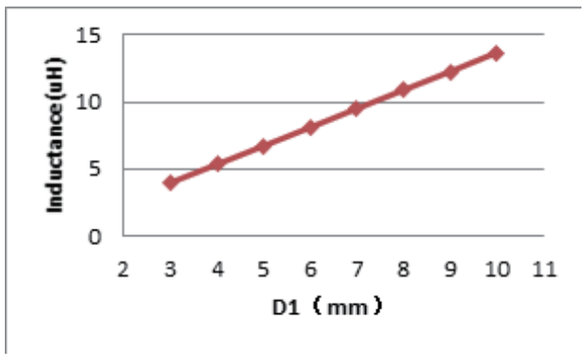


图 6 棒状电感感值与磁芯直径之间关系

在确认了这些参数以后就可以使用 Ansoft Maxwell 软件进行仿真，仿真结束后用矩阵法或能量法对数据后处理就可以得到电感感量，具体仿真结果请参考表 2 和图 6。由表 2 和图 6 可以看出，在这些假设条件下，棒状电感感

值与磁芯直径之间基本就是线性关系。而其他参数的影响却不容易确定，因而此时可将棒状电感感值的计算公式写为如下式 6 的形式。如果可以得到 f(M)，就可以准确计算电感量了。

$$L_m = f(M).N^2.D_1 \qquad \text{--- 式（6）}$$

针对 f(M) 再进行一系列电磁场仿真，此时就把 Le/D1 比值和磁芯磁导率作为变量。虽然仿真结果很难用一个独立的公式表达，但是可以用一系列的特性曲线来表达他们之间的关系。仿真结果如图 7 所示，这样在计算棒状电感电感量时，只需先根据 Le/D1 比值和磁芯磁导率查询 f(M) 的特征值，然后再代入公式 6 就可以求解棒状电感（绕组绕满）电感量。但是对于绕组没有绕满、工字形（鼓形）磁芯和方形磁芯来说，公式还需进一步优化才可以适用所有情况。

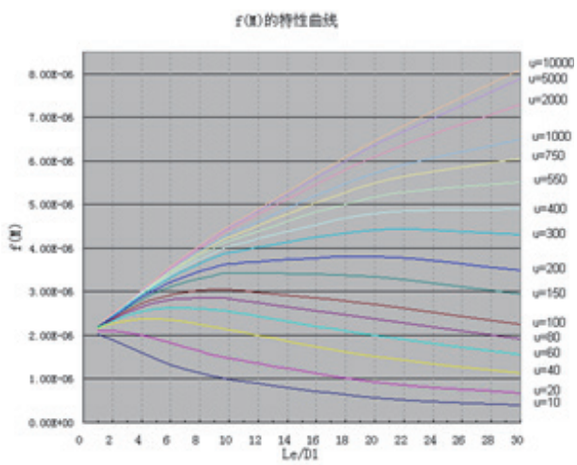


图 7 f(M) 的特性曲线

5 特殊情况下的公式优化

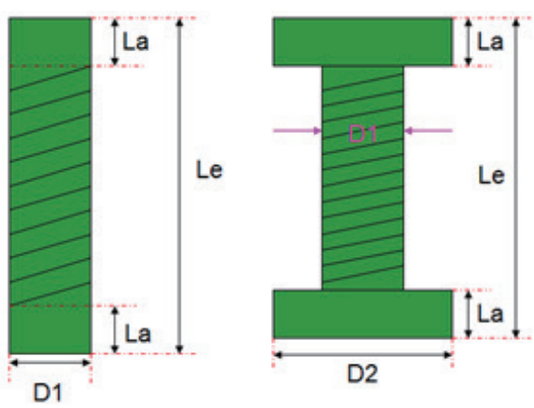
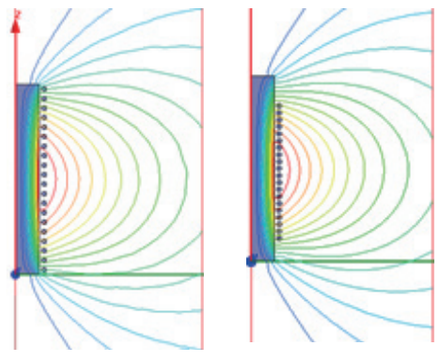


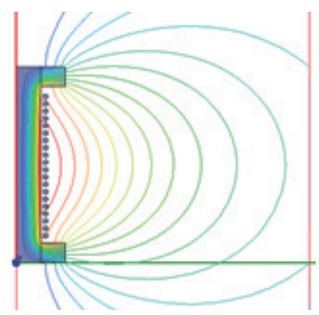
图 8 绕组不绕满和工字形开磁路电感

对于开磁路电感来说，并不一定绕组都会绕满磁芯柱，有些甚至是有一个磁芯帽台在上下端部，也就是所谓的工字形或鼓形磁芯，具体请参考图 8。

对于这些不同结构磁芯和绕组分布来说，其磁力线的分布情况差异非常大，对其感量影响也非常大，具体可参考图 9 和表 3。



（a）绕组绕满　（b）绕组没绕满（La=1.6mm）



（c）工字形磁芯（D2=8mm,La=1.6mm）

图 9 各种结构磁力线分布情况对比

表 3 开磁路电感感值仿真结果

Le/D1	Le(mm)	D1(mm)	μc	N	Lm（uH）
4	16	4	1000	20	5.3442
4	16	4	1000	20	6.9404
4	16	4	1000	20	11.9058

由图 9 可以看出，相对于图 9(a) 的棒状磁芯绕组绕满情况，在图 9(b) 里绕组并没有绕满磁芯，而是两端各留了 1.6mm 左右，这样在其端部就有更多的磁力线提前溢出，相当于缩减了磁路等效气隙长度，因而其电感量由 5.3442uH 提高到了 6.9404uH。再看图 9(c)，他是在图 9(b) 的基础上在两端增加了小台面，直径 D2=8mm，La=1.6mm，也就是所谓的工字形或鼓形磁芯，这两个小台面可以起到很好聚磁作用，让磁力线更集中，也可以达到进一步缩减磁路等效气隙长度的目的。这样其电感量就会得到进一步的

提高，从仿真结果可以看出，图 9（c）的电感量达到了 11.9058uH，相对于图 9（a）和图 9（b）有非常大的提升。鼓形磁芯相对于棒状磁芯来说还有一个好处就是可以缩减磁芯上下部分的漏磁，这对某些场合有敏感器件或金属导体的来说，可以起到一定的抑制效果。

接下来再来推导绕组不绕满情况下的感值计算公式，对于如图 9（b）的这种情况，我们依旧做了多组感值数据仿真，每次只改变端部留空的距离 L_a，从仿真结果可以推导得出如下公式 7：

$$L_m = f(M).N^2.D_1.(1+\frac{2.L_a}{L_e}) \qquad \text{--- 式（7）}$$

也就是说相对于绕组绕满来说，磁芯两段留空是有利于提高电感量的。但是留空可能会导致绕组层数的增加，从高频涡流损耗角度来说这会引起涡流损耗增加。所以实际应用中需要去平衡是否留空，以及留空多少。

对于鼓形磁芯，通过逐步改变 D_2 的参数，通过仿真同样也可以推导得出基于鼓形磁芯的感量计算公式 8：

$$L_m = f(M).N^2.D_1.\left(1+\frac{2.L_a}{L_e}\right).\frac{3(D_2-D_1)+L_e}{L_e} \qquad \text{--- 式（8）}$$

目前在大功率应用场合也会用到一些方块磁芯来做开磁路电感，所以本文也将其考虑在内。其结构如图 10 所示，由于其截面不是圆型，需要先做基于面积的等效直径折算。

同样也是根据仿真结果进行感量公式推导，依次调整磁芯截面的长宽比 b/a，就会得到一组感量仿真数据，根据这些数据可以推导得到相应的方块电感感量计算公式 9：

$$L_m = f(M).N^2.D_1.\left(1+\frac{2.L_a}{L_e}\right).\frac{0.05b+1.05a}{a} \qquad \text{--- 式（9）}$$

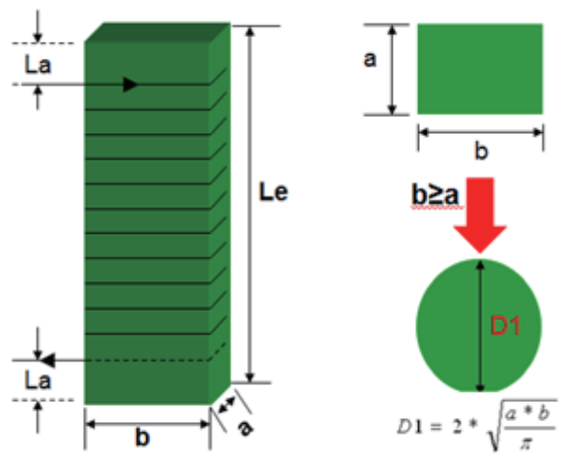


图 10 方块磁芯电感及其等效截面积

表 4 棒状电感感值的实际验证

棒状电感感值计算公式验证										
L=f(M)*N*N*D1*(1+2*la/le)*[3*(D2-D1)/le+1]										
编号	D1	D2	le	la	f（M）	N	计算感值L	测试感值L	误差率	磁导率
1	3	3	20	0	3.6074	17	3.12762E-06	3.22E-06	-2.87%	2000
2	6	6	20.3	3	2.7857	12	3.11823E-06	3.40E-06	-8.29%	700
3	6	6	30	3	3.2143	21	1.0206E-05	1.03E-05	-0.43%	700
4	6	6	30	4	3.2143	19	8.81875E-06	8.83E-06	-0.13%	700
5	6	6	30	0	3.2143	26	1.30372E-05	1.36E-05	-4.14%	700
6	8	8	28.2	0	2.8143	23	1.19101E-05	1.20E-05	-0.75%	700
7	5	5	30.2	0	3.357	25	1.04906E-05	1.14E-05	-7.98%	700
8	4	4	15	0	2.8571	12	1.64569E-06	1.60E-06	2.86%	700
9	5	5	25	2	3.2143	17	5.38781E-06	5.25E-06	2.62%	700
10	12	12	30	2	2.57	23	1.84896E-05	1.86E-05	-0.59%	700
11	10	10	24	0	2.55	8.5	1.84238E-06	2.00E-06	-7.88%	700
12	8	8	20	3	2.57	21	1.1787E-05	1.10E-05	7.55%	700
13	7.8	7.8	25.2	3	2.7714	32	2.74061E-05	2.67E-05	2.64%	700
14	10	10	40	0	2.9643	34	3.42673E-05	3.72E-05	-7.88%	700
15	10	10	40	5.3	2.9643	26	2.53489E-05	2.80E-05	-9.47%	700
16	8	8	28.5	0	2.8183	25	1.40915E-05	1.55E-05	-9.09%	700
17	4	4	20	1	3.2143	20.5	5.94356E-06	6.51E-06	-8.70%	700

表 5 工字形电感感值的实际验证

工字型电感计算公式验证										
L=f(M)*N*N*D1*(1+2*la/le)*[3*(D2-D1)/le+1]										
编号	D1	D2	le	la	f（M）	N	计算感值L	测试感值L	误差率	磁导率
1	7	18	24	3.2	2.7857	75	3.30E-04	3.35E-04	-1.50%	750
2	7	18	24	3.2	2.7857	93	5.07E-04	4.91E-04	3.33%	600
3	10	18	20	3	2.4286	18.5	2.38E-05	2.47E-05	-3.76%	650
4	10	16	18	2.5	2.3571	22	2.92E-05	2.76E-05	5.63%	700
5	5.8	10	16	3	2.6429	16	9.64E-06	1.03E-05	-6.36%	750
6	10	16	22	3	2.5	28	4.54E-05	4.49E-05	0.95%	750
7	2.5	6	8.3	2.2	2.8571	15	5.57E-06	5.81E-06	-4.13%	750
8	4	9	12	2.5	2.7143	29	2.91E-05	3.00E-05	-2.98%	750
9	2.4	5	10	2.5	3.0714	14	3.86E-06	4.12E-06	-6.37%	750
10	3.5	8	10	2.2	2.693	21	1.41E-05	1.47E-05	-4.31%	750
11	5.5	10	16	3	2.6429	29	3.10E-05	3.29E-05	-5.71%	750
12	9	16	22	3	2.55	27	4.16E-05	4.28E-05	-2.76%	750

表 6 方块形电感感值的实际验证

方块电感计算公式验证											
L=f(M)*D1*N^2*(1+2*la/le)(0.05b/a+1.05)，其中b≥a，D1=2*(a*b/π)^0.5											
编号	a	b	le	N	la	D1	μ	f(M)	计算感值	实测感值	实测误差率
1	27.6	30.2	92.8	44	0	32.57711	2000	2.679	1.87E-04	2.04E-04	-8.50%
2	17	33	70.3	33	0	26.72612	2000	2.6	8.68E-05	9.64E-05	-9.96%
3	40	60	200	34	0	55.279	2000	2.857	2.05E-04	2.20E-04	-6.64%
4	17	33	70.3	33	5	26.72612	2000	2.6	9.91E-05	1.07E-04	-7.08%
5	27.6	30.2	92.8	44	5	32.57711	2000	2.679	2.07E-04	2.25E-04	-8.10%
6	40	60	200	34	5	55.279	2000	2.875	2.17E-04	2.31E-04	-6.05%
7	17	33	70.3	29	0	26.72612	2000	2.6	6.70E-05	7.18E-05	-6.64%
8	25	50.3	115	26	5	40.01368	2000	2.7143	9.18E-05	9.45E-05	-2.83%
9	6.5	11.8	40	27	0	9.882168	2000	3	2.47E-05	2.50E-05	-1.38%
10	5.2	12.6	33	22	0	9.13359	2000	2.8571	1.48E-05	1.55E-05	-4.57%

5 感值计算公式的实验验证

在基于电磁仿真的开磁路电感感值计算公式推导出来以后，接下来将进行试验验证。表 4 是棒状电感的实际验证，尺寸单位都是 mm。计算公式即可以用式 7 也可以用式 8，只是用式 8 时 D2=D1，最后一项等于 1。表 5 是工字形（鼓形）电感的实际验证，尺寸单位都是 mm。计算公式用的是式 8，只是用式 8 时 D2 ≠ D1，最后一项大于 1。

表 6 是方块形电感的实际验证，尺寸单位都是 mm。计算公式用的是式 9，在使用式 9 时需要先用面积等效法折算出一个等效直径 D1。

6 饱和裕量的计算

对于电感来说还有一个重要指标就是电感的抗饱和能力，一般用饱和裕量或直流偏置来表达，具体意义就是电感在不饱和的情况下的最大电流耐受能力。由式（1）、（2）、（4）及式（10）可以推导得到式（11）。由于空气不存在饱和问题，所以只要从磁性材料的饱和特性角度就可以推测出饱和裕量。实际计算中只需将磁芯的 B_s、电感量 L、匝数和磁芯截面积 A_c 带入公式（11）就可以计算出电感可以耐受的最大偏置电流。

$$B_c = \frac{N.I}{A_c.(R_c + R_g)} \quad \text{--- 式（10）}$$

$$L.I = N.A_c.B_c \quad \text{--- 式（11）}$$

下转162页