

磁心气隙和电感器辐射的定量控制与研究

Quantify Control and Research of Core Gap and Inductor Radiation

须栋^{1,2,3}, 李玉凤^{1,2}, 贾显东^{1,2}, 茅柳强³, 刘瑒³

¹上海依林磁业有限公司

²依林磁业(昆山)有限公司

³耀润电子(集团)

摘要: 本文就磁心气隙有效使用、电子镇流器扼流圈的磁场辐射(辐射干扰)的定量控制做了探讨和研究,得到了一些有效的检测和控制方法。

关键词: 磁场辐射, 磁心气隙, 定量控制

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2015)04-6-109

1 前言

电子镇流器和紧凑型节能灯里的输入滤波器、三极管针脚滤波磁珠等只解决电路导线中传导干扰。磁性器件(主要磁心扼流圈和输出变压器)产生的电磁波干扰(辐射干扰),会影响其邻居电解电容和三极管等元器件,甚至殃及整个电器的稳定性和可靠性。在磁性材料性能达到使用要求后,磁心扼流器等器件的设计制作就成为关键问题。

为了绕制的方便,在电感器、变压器及滤波器等器件中,常采用两只形状相同的磁心配对构成闭合磁路。由于磁路各部份形状尺寸不同,且配合面不可避免有残余气隙,为改善性能,常常在磁路中人为开制气隙,因此要用有效磁导率来表征磁心的性能。

$$\mu_e = \frac{1}{\mu_0} \frac{L}{N^2} \frac{I_e}{A_e}$$

式中 L 为装有磁心的线圈的电感量(H), N 为线圈匝数, I_e 为有效磁路长度(m), A_e 为有效截面积(m^2)。在实际应用中都是用有效磁导率。

EMI/EMC 问题已为人们所重视,欧洲和美国对各种电子机器(整机)都有这方面的验收标准。但对元器件的 EMI/EMC 测量、控制及标准要求还没有或处于研究阶段。本文就磁心气隙对磁心扼流圈的影响,探讨一下定量控制磁辐射的方法。

2 理论探讨

图1表示磁心电感器的结构模型,图2表示电流线圈产生的磁场模型,当线圈中加入磁心后,吸纳了大部分磁力线,减少了辐射,组成了储能限流电感器。如果在E形磁心的两边脚垫入其它物质形成气隙来避免磁心饱和,提高磁心的使用功率,那就忽略了两边脚气隙的泄漏磁场或磁场辐射。

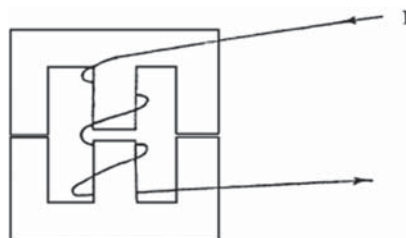


图1 磁心扼流器结构的示意

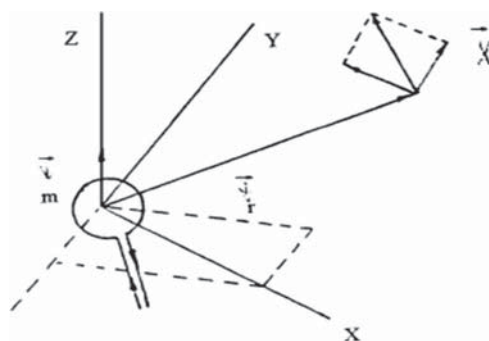


图2 电流线圈产生磁场的模式

2.1 电流线圈的磁辐射

环形电流线圈在空气中产生磁场与磁偶极子 m 产生磁场的磁势是一致的、同一模式的。

$$\vec{A} = \frac{\vec{m} \times \vec{r}}{r^2}, \quad \vec{m} = \frac{I}{C} \vec{S}$$

$\vec{S}$ 是由电流形成有方向的面积, $\vec{m}$ 是指向 Z 的正方向。

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad \sin \theta = z/r = \sqrt{x^2 + y^2}/r, \quad A = m \sin \theta / r = m \sqrt{x^2 + y^2} / r^3.$$

为切于围绕 z 轴的水平的圆上的矢量, $A_x = -my/r^3$, $\vec{A}_y = mx/r^3$, $A_z = 0$ 。则:

$$B_x = (\vec{\nabla} \times \vec{A})_x = \frac{d'A_z}{d'y} - \frac{d'A_y}{d'z} = \frac{3mxz}{r^5}$$

$$B_y = (\vec{\nabla} \times \vec{A})_y = \frac{d'A_x}{d'z} - \frac{d'A_z}{d'x} = \frac{3myz}{r^5}$$

$$B_z = (\vec{\nabla} \times \vec{A})_z = \frac{d'A_y}{d'x} - \frac{d'A_x}{d'y} = \frac{m(3z^2 - r^2)}{r^5}$$

以上为偏微分方程, d'/dx 表示只对 x 的微分。实际应用中, 电流为高频交流, $\vec{m}$ 有两个方向。

用磁心两边脚垫(线圈外磁路)气隙, 解决磁心的饱和问题, 除了 E 形磁心中脚处多了两个磁偶极子发射磁场, 假如中脚气隙形成的磁偶极子产生的磁场被全部吸收, 则同时在两边脚气隙形成的磁偶极子产生的磁场就是磁辐射的罪魁祸首。

我们采用 E 形磁心中脚磨气隙来解决磁心的饱和问题, 则两边脚几乎没有形成磁偶极子, 假如全部被吸收, 则就没有对空中产生磁辐射, 只有基础辐射。

2.2 磁心对磁力线的吸收

对于电路来说, 有 $V=IR$ 的等式, 对于磁路来说, 也有类似的等式, $U=\phi_m \cdot R_m$, $R_m=l/\mu S$ 。

串联磁路总磁阻等于各磁阻之和(磁心中脚开隙), 并联磁路总磁阻的倒数等于各磁阻倒数之和。外磁路无气隙时(可以看成磁心磁路和空气磁路并联):

$$U = NI = \phi_m \cdot \frac{R_0 R_m}{R_0 + R_m}$$

又, $R_0=l/(\mu_0 S_0)$, $R_m=l/(\mu_0 \mu_r S)$, $R_m \ll R_0$ 。

则, $U=\phi_m \cdot R_m$, $R_m=l/(\mu_0 \mu_r S)$ 。

磁心材料的相对磁导率 μ_r 越大越好吸纳, 效果越好。这里 U 为磁势, ϕ_m 为磁通量, l 为磁路长度, R_m 为磁心磁阻, R_0 为空气磁阻。 μ_0 为空气磁导率, μ_r 为磁材相对磁导率, S_0 、 S 为磁路的横截面积。

另外, 用介质屏蔽方法也可以证明, 磁场几乎全部通

过磁体形成回路, 不向外发射磁力线。

2.3 定量控制磁辐射

根据 $U=NI=\phi_m \cdot R_m$ 、 $\phi_m=B \cdot S$ 和安培环路定律 $\oint Hdl=NI$ 得到:

$$NI=H \cdot l=B \cdot S \cdot l/(\mu_0 \mu_r S)=\phi_m \cdot R_m$$

B 为通过磁心磁路的磁通密度。可见, B 值越大, 可用的安匝数就越大, 可用功率就越大。

根据应用频率, 电子镇流器选用的锰锌铁氧体材料磁心, 材料的饱和磁感应强度 B_s 在 500mT 到 600mT。材料的磁导率较高者为 10000—15000。但 μ_r 高, 则 B_s 低, 并且热饱和温度指标(居里温度 T_c) 低。所以镇流器的储能电感磁心只能选择高 B_s 高 T_c 的功率铁氧体材料了。

磁场饱和指标 B_s 和磁心尺寸决定了可用安匝数, 即可用功率。磁路原理允许串联一个磁阻, 一个空气隙磁阻。

$NI=\phi_m(R_m+R_g)=\phi_m[(1-g)/(\mu_0 \mu_r S)+g/(\mu_0 S_0)]$, 可得:

$$[(\mu_r-1)/(\mu_0 \mu_r S)]g=NI/\phi_m \cdot 1/\mu_0 \mu_r S$$

如果 $\mu_r \gg 1$, 则 $g=\mu_0 S(NI/BS - 1/\mu_0 \mu_r S)=(\mu_0 NI/B)-(1/\mu_r)$, g 和 NI 有一一对应关系, 见表 1。

表1 不同磁心的气隙 g 和安匝数 NI 的对应关系

	0.8mm	1.0mm	1.2mm	1.4mm	1.6mm	1.8mm	2.0mm
EE16	159	179	204	229	246	260	280
EE21	172	209	232	271	289	313	345
EE25	166	211	242	281	306	335	356

这里 B 是 NI 产生的, 对应磁心磁化曲线上的一点。 B 一定要小于 B_s , 一般选择 $1/3-2/3$ 的 B_s 值才能满足不饱和。一种磁心规格有多种气隙尺寸和安匝数组合形式。我们实际测量三种磁心气隙尺寸对应安匝数的数据。

3 实验与测量

我们根据上述理论, 对不同方法制作的扼流圈电感器设计了三组实验, 测量磁心气隙产生的磁场辐射。

3.1 磁场辐射与数据

(1)EE19 磁心扼流圈, 工作频率 27.2kHz, 11 瓦节能灯的测量数据, 见表 2。

(2)EE19 磁心扼流圈, 工作频率 32kHz, 9 瓦节能灯的测量数据, 见表 3。

(3)EE16 磁心扼流圈, 工作频率 32kHz, 9 瓦节能灯为基础的、相同匝数不同气隙的电感器测量数据, 见表 4。

表 2 不同气隙尺寸不同气隙位置的磁辐射

序号	扼流圈电感, mH	磁心气隙, mm	辐射电压, mVp			备注
			X方向	Y方向	Z方向	
1	4.24	0.3 × 2	0.62	0.4812	8.29	两边脚垫入无磁材料
2	4.21	0.4 × 2	0.61	0.000	8.98	同上
3	4.23	0.5 × 2	0.23	0.057	9.26	同上
4	4.24	0.6 × 2	0.62	0.114	9.63	同上
5	4.23	0.7 × 2	0.30	0.000	10.1	同上
6	4.22	0.6	0.13	0.003	0.113	磁心中脚磨气隙
7	4.22	0.8	0.23	0.003	0.141	同上
8	4.22	1.0	3.0	0.003	0.155	同上
9	4.22	1.2	0.18	0.001	0.141	同上
10	4.26	1.4	0.008	0.003	0.113	同上
11	—	1.4	0.04	0.007	0.030	磨气隙加磁粉屏蔽
12	—	1.4	0.38	0.006	0.085	磨气隙加铜箔屏蔽

表 3 不同气隙尺寸不同气隙位置的磁辐射

序号	扼流圈电感, mH	磁心气隙, mm	辐射电压, mVp			备注
			X方向	Y方向	Z方向	
1	4.24	0.3 × 2	0.62	0.001	18.7	两边脚垫入无磁材料
2	4.21	0.4 × 2	0.61	0.042	19.1	同上
3	4.23	0.5 × 2	0.62	0.001	19.8	同上
4	4.24	0.6 × 2	0.14	0.021	20.6	同上
5	4.23	0.7 × 2	0.042	0.000	21.2	同上
6	4.22	0.6	0.01	0.000	1.58	磁心中脚磨气隙
7	4.22	0.8	0.08	0.000	1.27	同上
68	4.22	1.0	0.00	0.005	1.57	同上
9	4.22	1.2	0.01	0.000	1.46	同上
10	4.26	1.4	0.000	0.005	1.22	磨气隙加磁粉屏蔽
11	—	1.4	0.20	0.001	1.05	磨气隙加铜箔屏蔽
12	—	—	0.82	0.006	15.7	原灯扼流圈

表 4 相同匝数不同气隙尺寸不同气隙位置的磁辐射

序号	扼流圈电感, mH	磁心气隙, mm	辐射电压, mVp			备注
			X方向	Y方向	Z方向	
1	6.58	0.3 × 2	0.03	0.057	13.2	两边脚垫入无磁材料
2	5.32	0.4 × 2	0.64	0.156	15.1	同上
3	4.44	0.5 × 2	1.10	0.636	17.5	同上
4	3.89	0.6 × 2	0.37	0.014	18.8	同上
5	3.67	0.7 × 2	0.78	0.566	19.9	同上
6	6.51	0.6	0.01	0.000	1.56	磁心中脚磨气隙
7	5.30	0.8	0.24	0.006	1.46	同上
68	4.48	1.0	0.003	0.010	1.00	同上
9	3.96	1.2	0.08	0.040	1.00	同上
10	3.67	1.4	0.02	0.127	1.33	同上
11	—	1.4	0.04	0.014	1.06	磨气隙加磁粉屏蔽
12	—	1.4	0.01	0.037	1.09	磨气隙加铜箔屏蔽

(4) 测试条件

a) 测试条件与环境见表 5。

表 5 条件与环境

工作频率 kHz	立方装置尺寸 mm	探测线圈尺寸, mm
27.2	150	直径1mm导线绕成直径150mm环形线圈
32	75	直径1mm导线绕成直径75mm环形线圈

温度：20℃，湿度：39%。

b) 测试仪器及主要附件：HP34410A 数字多用表，输入阻抗：1MΩ、15PF，HP 频谱分析仪探测线圈。

c) 测试方法：GB8554-1987(IEC1007) 电子和通信设备用变压器和电感器测试方法和试验程序（磁场部分）。

3.2 测量数据分析

(1) 磁辐射测量的三组数据表明，外磁路垫气隙与内磁路磨气隙在 Z 方向有明显差别，后者比前者磁辐射量降低了 90% 以上，有效地降低了对电解电容、三极管等的干扰，提高了整个电路的可靠性。

(2) 由前两组（表 2 表 3）数据比较表明，工作频率越高，磁辐射量越大。同尺寸的磁心频率增加 5kHz(16%)，磁辐射量增加 100%。

(3) 由第三组（表 4）数据表明，外磁路垫气隙越大，磁辐射量越大；而内磁路磨气隙变化，磁辐射量基本不变。

(4) 内磁路磨气隙后包铁氧体粉带、包铜带屏蔽还可以进一步降低磁辐射。但工业生产中已没有多大意义，只在军品中使用，作为进一步的可靠性保障。

4 磁心气隙的利与弊

4.1 磁心气隙与损耗因子 $\tan\delta$

它表示小信号下材料的损耗特性，由于磁芯损耗引起信号相移；其表示为： $\tan\delta = R_s/\omega L_s$ 。

式中， R_s 表示磁芯及线圈损耗的等效电阻， L_s 表示装有磁芯的线圈的自感量， $\tan\delta$ 称损耗因子，表示损耗功率与贮能的比值，其磁芯损耗包括磁滞损耗、涡流损耗、剩余损耗，即： $\tan\delta = \tan\delta_h + \tan\delta_e + \tan\delta_r$ 气隙对损耗因子的影响为 $(\tan\delta)_{gap} = \tan\delta \cdot \mu/\mu_i$ 磁芯开制气隙后，可以增加磁场和温度的稳定性，损耗因子有所下降。

4.2 磁心气隙与磁滞现象

磁心开气隙后，磁滞回线发生了变化，见图 3，提高

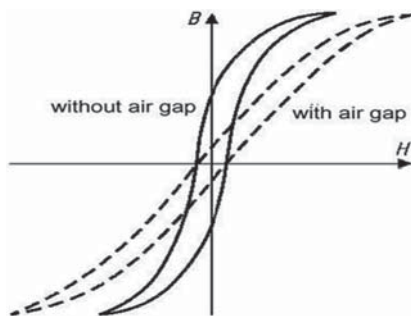


图 3 有气隙和无气隙磁心的磁滞回线

了磁心抗磁饱和能力。

4.3 磁心气隙的直流偏置特性

磁心开气隙，降低电感因数 AL 值和器件的电感量，但提高了 (NI) 安匝数和应用功率，同时提高了器件电感量或 AL 值的温度稳定性，气隙尺寸到一定比率 (g/l_c)，室温与 100℃ 的电感量一样，电感量不受温度影响。见图 4。

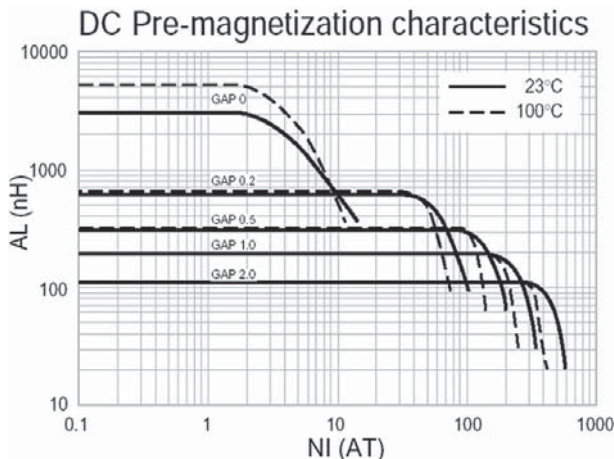


图 4 磁心气隙与电感因数、安匝数的关系

4.4 磁心气隙位置与电感器的电感量

器件成本是制造商很关注的，成本低则竞争力强，我们受用户委托做了实验。见表 5、表 6。

两组数据中很明显，气隙在线包中间的 EE 形磁心电感量低，而气隙在线包外 EI 形磁心电感量高。但磁辐射和漏感也同样，并且 EI 形的稳定性和可靠性随着频率提高和温度变化而明显下降。达到同样的电感量，EI 形磁心电感器虽然可以减少匝数，省线而节约成本，但是该电感器随着安装位置不同、邻近元器件不同和外壳材料不同而变化，是一个变感器，并埋下了 EMI 的大隐患。

表 5 同气隙的磁心 EE28 和 EI28 电感器的电感量对比

序号	型号	EE28	EI28	备注
1#		3.74mH	5.15mH	1.5mm中脚气隙
2#		3.73mH	5.16mH	1.5mm中脚气隙
3#		3.76mH	5.13mH	1.5mm中脚气隙
4#		3.66mH	5.06mH	1.5mm中脚气隙
5#		3.74mH	5.27mH	1.5mm中脚气隙
测试条件	1kHz 0.3V 25℃ 200Ts	00.30线径		
测试仪器	TH2775B	线圈密绕		

表 6 同气隙的磁心 EE19 和 EI19 电感器的电感量对比

序号	型号	EE19	EI19	备注
1#		1.44mH	2.46mH	1.2mm中脚气隙
2#		1.45mH	2.49mH	1.2mm中脚气隙
3#		1.50mH	2.48mH	1.2mm中脚气隙
4#		1.51mH	2.42mH	1.2mm中脚气隙
5#		1.52mH	2.53mH	1.2mm中脚气隙
测试条件	1kHz 0.3V 25℃ 200Ts	00.30线径		
测试仪器	TH2775B	线圈密绕		

4.5 磁心气隙磁辐射与高频感应加热

高频感应加热基本原理是：利用高频电流在感应器中产生的交变磁场，使置于其中的金属工件内部感生出强大的涡流，从而产生高热量，使工件迅速达到所需处理温度。

高频磁场在导体中感生出的涡流具有集肤效应集肤深度 $\delta \propto 1/f_i/2$ 相对于中频感应加热 (1~10kHz)，高频感应加热 (100~500kHz) 在效率、能耗、体积、重量等方面，均有显著的优势，较适合于工件的表面热处理。磁心气隙只能在可控（位置、尺寸）范围内应用，否则会在周围导电的材料（三极管底板、电解电容外壳、金属散热片、电源外壳）上形成涡流，加热甚至烧熔。大磁心的分散气隙设计也要注意磁场频率和气隙位置。

4.6 中脚（中柱）气隙的限制

目前低矮形、平面型磁心因其效率高、散热好等等优点为大家广泛采用。考虑到杂散磁通，大的气隙在平面设

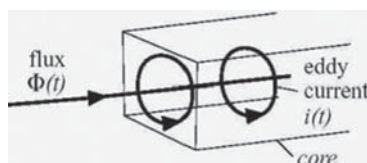


图 5 高频感应发生示意图

计中是不利的。杂散磁通影响取决于绕线窗口高度和气隙长度之比，在平面磁心中这个比值较小。如果窗口高度仅为气隙长度的几倍，且窗口宽度是磁心中柱宽度的几倍，那么相当大的磁通量将从磁心的顶部穿越到磁心的底部。较多的杂散磁通和穿越磁通会在绕组中感生出较大的涡流损耗。见图 6 结构。

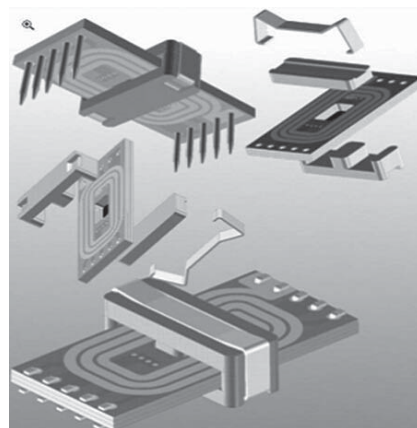


图 6 平面变压器用铁氧体磁心

5 定量控制磁辐射的方法

5.1 磁心所用铁氧体材料选择

选择适合应用场所的材料即可，并不是牌号越高越好。输出电感器和开关电源主变压器要求，在工作频率范围内和工作温区内（一般为 80 至 100℃，便携式为 40 至 70℃）有低的功率损耗，且 0~100℃ 温度系数为负值；高饱和磁通密度。适合的材料为：(1) 频率 $f < 200\text{kHz}$ ，选择 TDK PC40 级别的材料；(2) 频率 $f < 300\text{kHz}$ ，高性能，选择 TDK PC44 级别的材料；(3) 频率 f 在 300kHz~1MHz，选择 TDK PC50 级别的材料；(4) 频率 $f < 300\text{kHz}$ ，宽温，选择 TDK PC95 级别的材料；(5) 频率 f 在 100kHz 下应用，PC30 级别的材料也会很好。

表 7 功率铁氧体材料的实际发展

牌号	材料功耗	饱和磁通密度	磁心实测功耗
PC30	550kW/m ³	390mT	660kW/m ³
PC40	410kW/m ³	390mT	480kW/m ³
PC44	300kW/m ³	390mT	380kW/m ³
PC47	250kW/m ³	420mT	330kW/m ³
PC90	320kW/m ³	450mT	390kW/m ³

注：测试条件： $P_{cv}(100^\circ\text{C}, 100\text{kHz}/200\text{mT})$ ； $B_L(100^\circ\text{C}, 1194\text{A/m})$

5.2 磁心所用的形状尺寸选择

磁心规格和输出功率的关系（100kHz 开关电源为例）

表 8 磁心规格和输出功率

POWER RANGE (W)	CORE TYPE
<5	RM4; P11/7; T14; EF13; U10
5 to 10	RM5; P14/8
10 to 20	RM6; E20; P18/11; T23; U15; EFD15
20 to 50	RM8; P22/13; U20; RM10; ETD29; E25; T26/10; EFD20
50 to 100	ETD29; ETD34; EC35; EC41; RM12; P30/19; T26/20; EFD25
100 to 200	ETD34; ETD39; ETD44; EC41; EC52; RM14; P36/22; E30; T56; U25; U30; E42; EFD30
200 to 500	ETD44; ETD49; E55; EC52; E42; P42/29; U37
<500	E65; EC70; U93; U100

5.3 无泄漏磁场的电感器或变压器的气隙尺寸等技术数据

我们按照磁学原理批量生产制造无泄漏电感器、变压器，这里给大家共享一些数据。

(1) 无泄漏磁场的 EE16 磁心扼流圈的部分数据

表 9 无泄漏磁场的 EE16 磁心扼流圈的部分数据

	电流 I , A	匝数 N , Ts	电感量 L , mH
0.8mm 气隙	0.5	318	4.0
	0.6	265	2.8
	0.7	227	2.0
	0.8	198	1.6
1.0mm 气隙	0.5	358	4.5
	0.6	298	3.1
	0.7	255	2.3
	0.8	223	1.7
1.2mm 气隙	0.6	340	4.1
	0.7	291	2.5
	0.8	255	1.9
	0.9	226	1.5

(2) 无泄漏磁场的 EE21 磁心扼流圈的部分数据

(3) 无泄漏磁场的 EE25 磁心扼流圈的部分数据

(4) 上述数据测试条件和方法

a. 所选材料、尺寸符合 5.1、5.2。

b. 所选偏置电流值为高频振荡电流峰值波包的波峰值。

c. 在波峰值的安匝数条件下的直流叠加必须小于 95%，95—85% 范围，取值 90%。保证开气隙后仍有磁饱和现象。否则就不可控制了，磁场就泄漏了。

d. 测试仪器 MJ1771 磁化电流仪，4225LCR 测量仪。

e. 温度 25℃，湿度 60%。

表 10 无泄漏磁场的 EE21 磁心扼流圈的部分数据

	电流 I , A	匝数 N , Ts	电感量 L , mH
1.0mm 气隙	0.8	261	4.1
	1.0	209	2.6
	1.2	174	1.8
	1.4	149	1.3
1.2mm 气隙	1.0	232	2.8
	1.2	193	1.9
	1.4	165	1.4
1.4mm 气隙	1.0	270	3.4
	1.2	225	2.4
	1.4	193	1.7
	1.5	180	1.5

表 11 无泄漏磁场的 EE25 磁心扼流圈的部分数据

	电流 I , A	匝数 N , Ts	电感量 L , mH
1.4mm 气隙	1.4	200	2.16
	1.8	156	1.3
	2.0	140	1.0
1.6mm 气隙	1.6	191	1.7
	1.8	170	1.4
	2.0	153	1.1
1.8mm 气隙	1.6	209	2.3
	1.8	186	1.8
	2.0	157	1.5
2.0mm 气隙	1.6	222	2.5
	1.8	197	2.0
	2.0	156	1.6

5.4 磁心器件应用时的取与舍

由表 12 可知，只要材料符合使用频率范围，其磁心的损耗不用较真。牌号差异引起的损耗差异最多不超过使用功率的百分之二。有适当的气隙时，总损耗会更低，差异会更低。

6 结论

磁心气隙有利有弊，利大于弊。气隙尺寸增加，1) 可以提高直流叠加；2) 可以提高使用功率；3) 温度变化 ΔL 值不变化；4) 会降低器件损耗；5) 会降低转换效率。

磁心气隙会产生磁辐射（辐射干扰），1kHz—500kHz 的磁辐射都会在邻近的金属上产生涡流，造成加热烧焦，

表 12 部分磁心品种的磁心参数

形状 Type	Al value(nH/n ²) ± 25%			参数Core parameters					Weight (g/set)
	R2K	R2K5	R3K5	C ₁ (mm ⁻¹)	l _e (mm)	A _e (mm ²)	A min(mm ²)	V _e (mm ³)	
EE16A	1050	1300	1540	1.83	35.1	19.2	19.2	674	3.5
EE19A	1140	1400	1670	1.73	39.7	23.0	22.5	912	4.7
EFD20	1330	1590	1990	1.50	47.6	31.7	29.5	1510	7.5
EE25D	1770	2200	2600	1.14	46.9	41.0	36.5	1920	10.0

表 13 不同材料磁心的功率损耗

(100℃, 100kHz, 无气隙, $\mu_e/\mu_i=1$)

	使用功率	PC30	PC40	PC44	PC90	PC47
EE16	10W	0.445	0.324	0.256	0.263	0.222
EE19	20W	0.602	0.438	0.347	0.356	0.301
EE25	30W	1.267	0.922	0.730	0.749	0.634
EFD20	30W	0.997	0.725	0.574	0.588	0.498

并可以影响邻近器件的内部金属结构。

高频电感器、变压器用磁心气隙尺寸适当, 位置适当(不在外磁路开隙), 完全可以做成无磁场泄露的好产品,

稳定性可靠性兼备。

高频电感器、变压器用磁心只要有气隙了, 材料能适应使用频率了, 磁心损耗无需太计较。当然, 更高的适用的要求会带来更好的稳定性可靠性。

参考文献

- [1] 须栋等, 节能灯、电子镇流器和扼流器磁辐射定量控制研究。【中国照明电器】2000 年第二期。
- [2] 须栋等, 软磁铁氧体磁心结构与使用。[电子变压器与电源]2012 年。
- [3] 刘九皋等, 材料器件应用简介。教材, 2013 年。