

气隙磁芯电感

南京航空航天大学

赵修科

jops@nuaa.edu.cn

gelblion@163.com

电感定义

- 电感也称自感系数，简称自感，习惯称电感，它是线圈磁链与产生此磁链的线圈电流的比值：

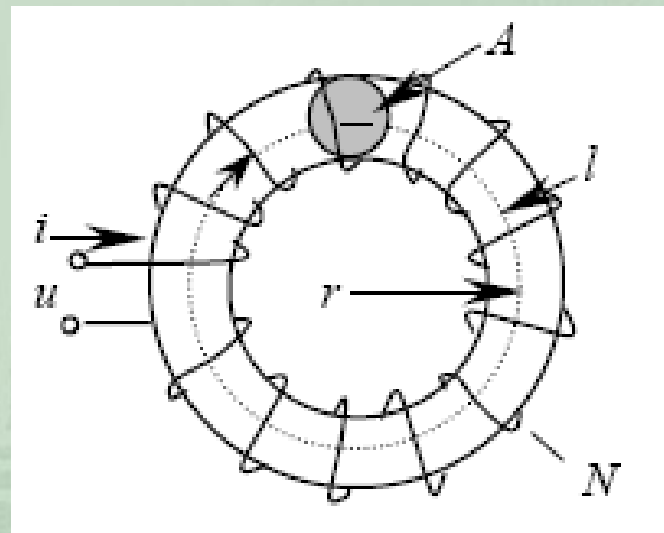
$$L = \frac{\psi}{i}$$

ψ 是线圈主磁链与散磁链总和，不存在‘漏磁’。

如果是环形闭合磁路磁芯

$$L = \frac{\psi}{i} = \frac{NBA}{Hl / N} = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r A}{l}$$

电感与磁芯 μ 成正比。如果 μ 随电流改变，电感量也随之变化，电感为非线性电感。



电感单位

电感单位为亨利，简称亨，符号为H。

定义：线圈通过1A电流，产生总磁链为1Wb，
则电感量为1H。

也可以这样定义：在1秒内线圈电流从零线性增长到1A，线圈两端感应电势为1V，则线圈电感量为1H，也等于1欧秒（ Ωs ）



电感能量

- 电流产生磁场，即建立磁场能量（环形为例）

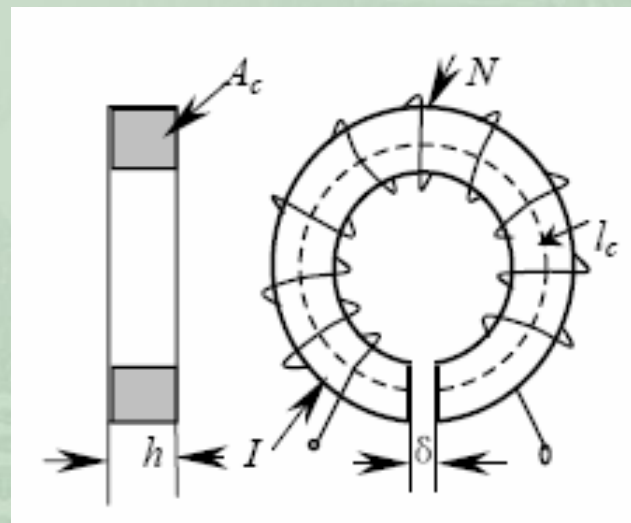
$$W_m = \int_0^B AlHdB = V \int_0^B HdB = \frac{VBH}{2} = \frac{LI^2}{2}$$

- 环形气隙磁场能量

$$W_m = \frac{V_c B^2}{2\mu_0\mu_r} + \frac{V_\delta B^2}{2\mu_0}$$

- 气隙能量与磁芯能量比

$$k = \frac{W_\delta}{W_c} = \frac{V_\delta \mu_r}{V_c} = \frac{\delta \mu_r}{l_c} \quad \left(\begin{array}{l} \text{忽略散磁} \\ \text{通} \end{array} \right)$$



气隙磁芯磁化特性

- 气隙将磁芯磁导率线性化，对于环形气隙磁芯，如忽略边缘磁通

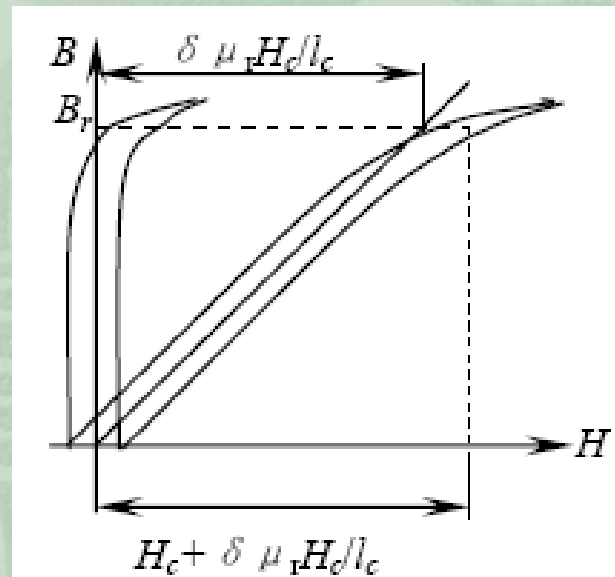
$$NI = H_c l_c + H_\delta \delta = \frac{B_c}{\mu_0 \mu_r} l_c + \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta$$

也可以写成：

$$NI = l_c \left(H_c + H_c \frac{\mu_r \delta}{l_c} \right)$$

B相同，**H**为两部分合成

1. 可见将磁化曲线线性化
2. 剩磁小了。



气隙磁芯等效磁导率

- 把带气隙磁芯磁导率看成整个磁系统的磁导率

$$NI = \frac{B_c}{\mu_0 \mu_r} l_c + \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta = \frac{B_c l_c}{\mu_0 \mu_r} \left(1 + \frac{\mu_r \delta}{l_c}\right) = \frac{B_c l_c}{\mu_0 \mu_e}$$

则有效磁导率

$$\mu_e = \frac{\mu_r}{1 + \frac{\mu_r \delta}{l_c}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\frac{1}{\mu_r} + \frac{\delta}{l_c}} \\ \frac{l_c}{\delta} \rightarrow \mu_r ? \quad \frac{l_c}{\delta} \end{array} \right.$$

(例如 $\mu_i = 2000, l_c = 20\text{cm}, \delta = 2\text{mm}, 0.2\text{mm}$)

气隙磁芯电感

- 当气隙较大时，有效磁导率为 l_c / δ ，在磁芯不饱和时电感量不随电流变化，为线性电感。电流连续Buck类直流滤波电感、升压电感，反激变压器等。按 $2I_{o\min}$ 决定电感量。
- 当输出电流小于最小电流时电流断续，为避免振荡需要假负载，降低了效率。希望在小于 $I_{o\min}$ 时电感量大，当大于 $I_{o\min}$ 时回到正常的电感量的非线性电感。磁粉芯就是非线性电感，但成本高。可以采用非均匀气隙电感。

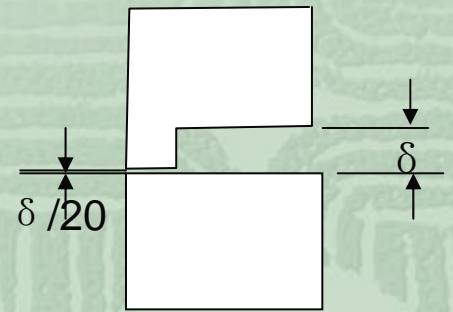
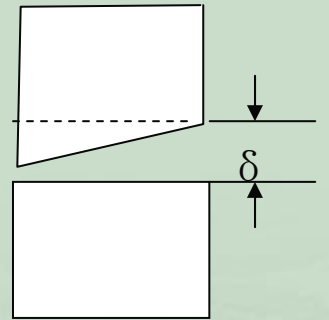
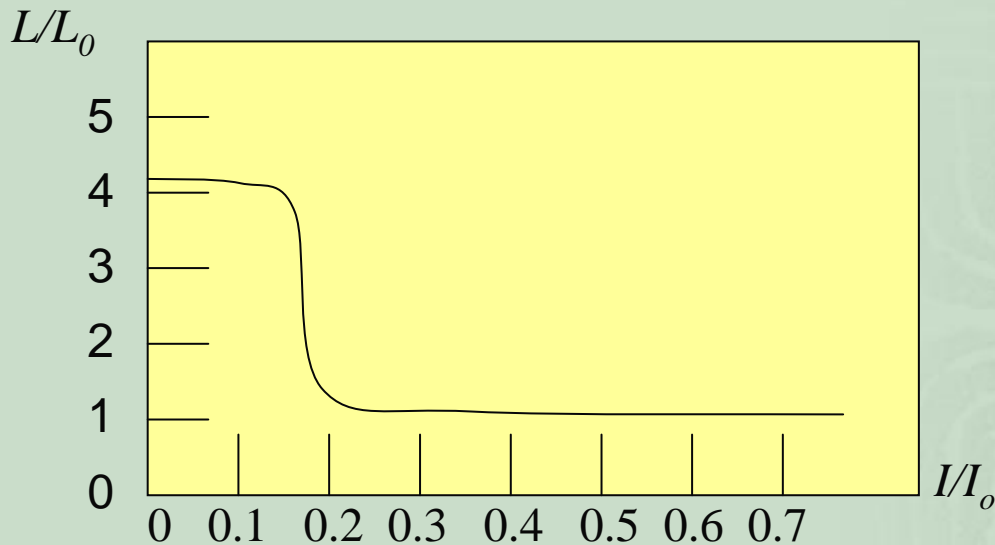
非均匀气隙磁芯电感

■ 非均匀磁芯气隙电感

斜坡气隙—类似磁粉芯特性

阶梯气隙—可设定特性

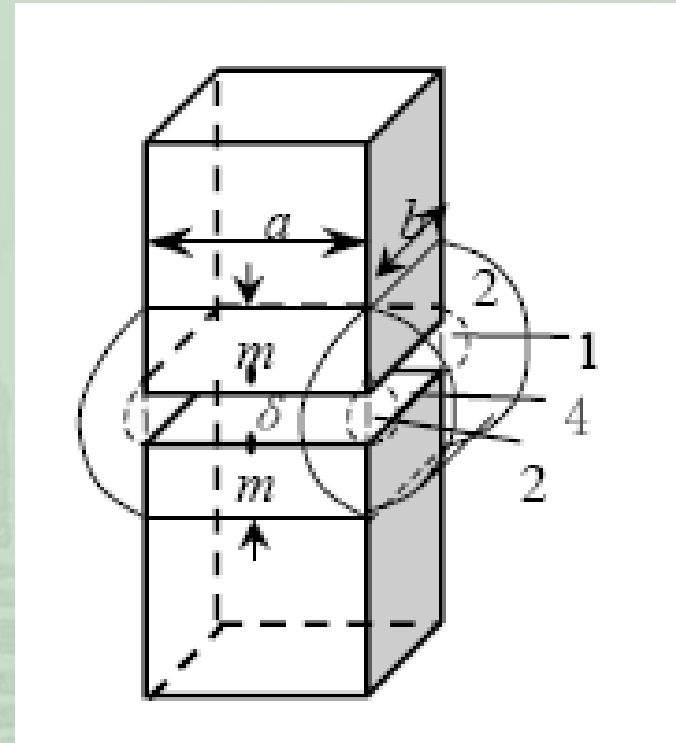
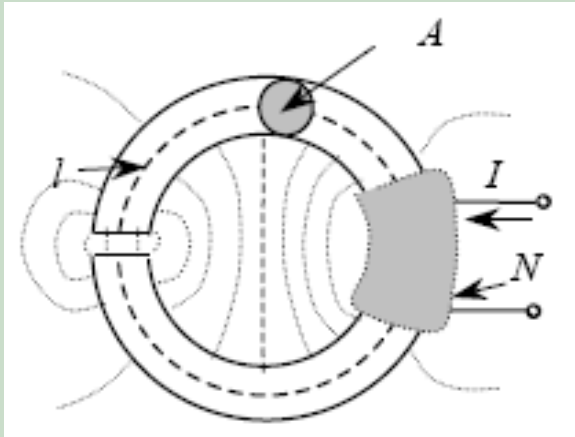
例如气隙宽度1/5,最小的气隙为
 $\delta / 20$,可以获得



气隙的边缘磁通

■ 磁没有绝缘，空气隙周围空间也是磁路的一部分——边缘磁通。气隙越大，边缘磁通范围越大。

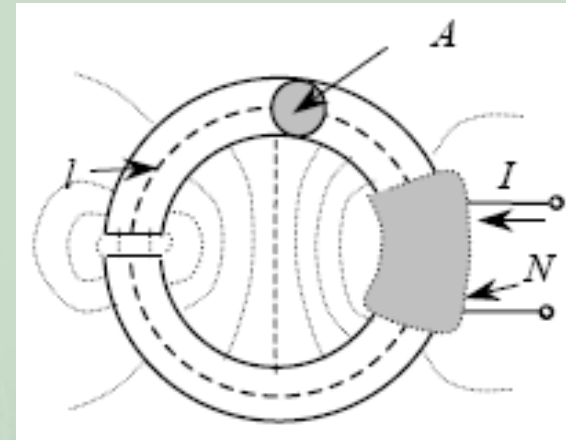
边缘磁通与气隙磁通并联，在线圈包围的磁芯中磁通增加，总磁链 ψ 增加，电感量加大。



维持电感量措施

- 边缘磁通相当于气隙等效面积 A_δ 增加，电感加大：

$$L = \frac{\Psi}{I} = N^2 \frac{\mu_0 A_\delta}{\delta}$$



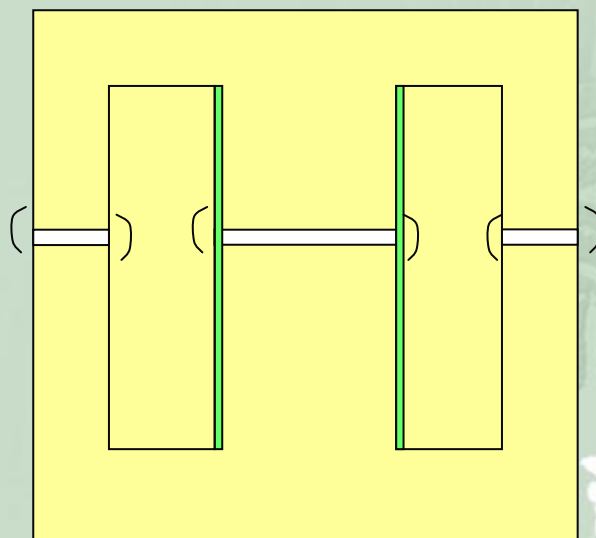
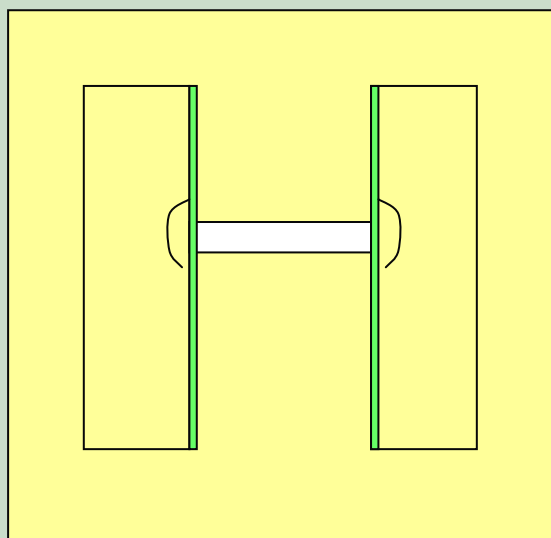
- 所有磁通都通过磁芯，磁芯截面没有变，磁感应增加。维持L不变，只有增加气隙 δ 。如果减少匝数，将增加B，可能引起饱和和损耗大。

$$N = \frac{L \Delta I}{A_e \Delta B} \approx \frac{LI}{A_e B}$$

（电磁感应定律求）

边缘磁通对电感性能影响

- 气隙边缘磁通穿过线圈，高频磁通在线圈中引起涡流损耗，通常称为被动损耗。
- 边缘磁通对周围电气元件引起干扰。

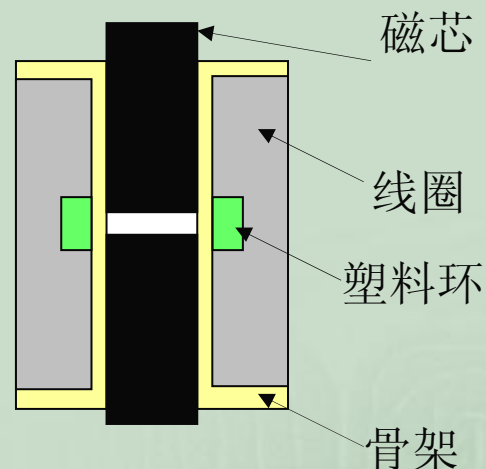
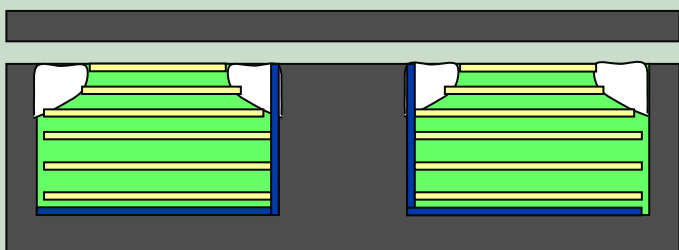


通常希望将气隙开在中柱上，减少干扰，但损耗增加。

减少边缘磁通损耗的措施

■ 线圈避开气隙

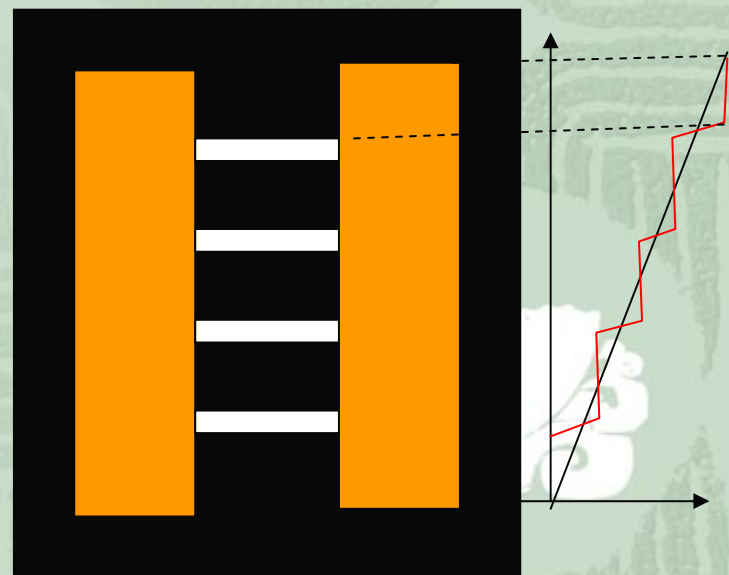
骨架套塑料环
在气隙附近不放导线



■ 分割气隙

将一个气隙分成几个气隙,边缘磁通范围大大缩小。磁势与磁压降分布,窗口中散磁小。

中柱边柱都有气隙

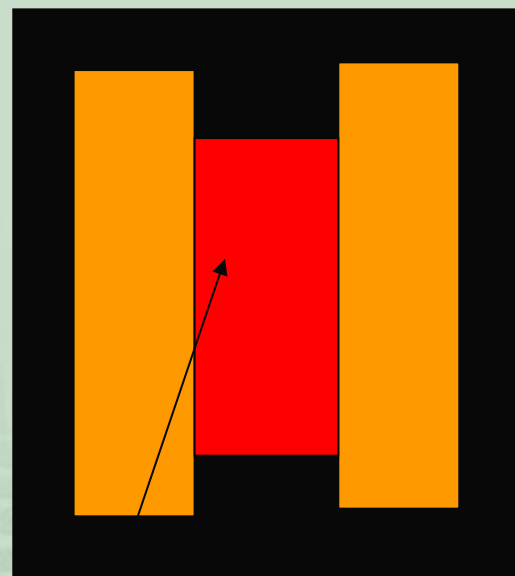


减少边缘磁通的措施（续）

- 气隙用低磁导率磁粉芯代替
- 采用较大截面积的磁芯，较小的气隙电感。
- 平面磁芯。

$$L = N^2 \frac{\mu_0 A_\delta}{\delta} \quad N = \frac{LI}{A_e B}$$

- 反激变压器大电流铜箔远离气隙，让多股线靠近气隙。



磁粉芯



气隙电感的机械噪声

- 直流滤波电感，高频 ($>10\text{kHz}$)一般听不到可闻噪声。如果听到低频噪声，是系统振荡引起的。
- 低频交流滤波电感噪声，可以听到基波倍频噪声。

噪声来源

- 电磁力引起的噪声；
- 材料磁致伸缩引起的噪声；
- 通流线圈在气隙边缘磁场中受到电磁力。
 - 减少噪声从以上三方面入手



直流滤波电感设计要点

■ 直流滤波电感量(Buck)
$$L \geq \frac{U'_o(1-D_{\min})}{\Delta I f} = \frac{U'_o(1-D_{\min})}{0.2I_o f}$$

式中:
$$\Delta I = 0.2I_o \quad U'_o = U_o + \Delta U_R$$

$$D_{\min} = U'_o / U_{i \max}$$

■ 参数选取: 市售功率磁芯
$$B \leq 0.9B_{s100}$$

■ 损耗: 主要是铜损: 直流滤波电感只考虑直流损耗; 反激连续模式, 不仅考虑直流, 也要考虑交流邻近效应损耗。

■ 断续模式按损耗 $100\text{mW}/\text{cm}^3$ (自冷) 选取磁通密度, 既要考虑线圈损耗, 也要考虑磁芯损耗。

气隙磁芯线圈电感量计算

- 当气隙小于1/20气隙外廓尺寸：矩形截面 $a \times b$ ，圆直径 d 时：

$$L = \frac{N^2 \mu_0 \mu_e A_e}{l_e} \approx \frac{N^2 \mu_0 A_e}{\delta} \quad \mu_e = \frac{1}{\frac{1}{\mu_r} + \frac{\delta}{l_c}}$$

- 当气隙大于1/20气隙外廓尺寸：矩形截面 $a \times b$ ，圆直径 d 时：

$$L \approx \frac{N^2 \mu_0 A_e}{\delta} k \begin{cases} k = (1 + \delta/a)(1 + \delta/b) \text{ 矩形} \\ k = (1 + \delta/d)^2 \text{ 圆} \end{cases}$$



交流滤波电感

- 基本关系 基波电抗 $Z = \omega L$

$$\text{视在功率} \quad S = \omega L I^2 \quad (\text{VA})$$

- 基波端电压

$$U = I \omega L = 4.44 f B A_e N$$

- 磁芯选择

作为滤波电感，通常输入电压包含高频调制频率，磁感应 B 基波是正弦，磁滞损耗与正弦相似，涡流损耗显著增加，更薄的钢带或更高电阻率。

气隙边缘磁通引起损耗严重时，应当分段气隙。

谢谢！

祝大家身体健康！

