

磁性零件有效参数的计算

Calculation of the effective parameters of magnetic Piece Parts

有关使用有效参数的一些说明

在以材料特性为基础计算磁芯的磁特性时，可以采用所谓的有效参数，对于这种计算方法，磁芯被一个理想的环所代替，如果使环上绕的匝数和原来磁芯上的线圈匝数相同时，则可得到完全相同的电性能。

这个代用环的磁特性和尺寸参数叫做有效参数。有关这种特性的物理量符号加有下角标“e”来表示。

这些参数是：

- 磁场强度 H_e ；
- 磁通密度 B_e ；
- 有效磁导率 μ_e ；
- 磁路长度 l_e ；
- 横截面积 A_e ；
- 磁芯体积 V_e 。

在下面两个假设成立的情况下，从磁芯的尺寸和材料特性能够计算有效参数。

- 在磁芯的每一个横截面内磁通都是相同的（也就是无漏磁通）；
- 在整个横截面内，磁通是均匀分布的。

在应用有效参数计算磁滞损耗时，瑞利公式应是有效的：

$$\frac{B}{\mu_0} (= \mu_0 + v \hat{H}) H \pm \frac{v}{2} (\hat{H}^2 - H^2)$$

在利用有效参数的情况下，任意几何形状的磁芯的通用磁路方程可简化如下：

$$\oint H \cdot dl = N_i \quad \text{变为} \quad H_e \cdot l_e = N_i$$

$$\Phi = \int_A B \cdot dA \quad \text{变为} \quad \Phi = B_e \cdot A_e$$

$$P_h = f \int_V dV \Phi H \cdot dB \quad \text{变为} \quad P_h = f V_e \cdot \Phi H \cdot dB$$

注：1) 所用符号应符合“符号一览表”

借助于 $L = N \frac{\widehat{\Phi}}{\widehat{i}}$ 和 $\frac{\tan \delta h}{\mu_0} = \eta_B \cdot \widehat{B}_0$ 可推导出下面用于计算有效参数的公式。

由于实用的原因，尺寸参数一般以毫米表示，这样在电磁方程中就出现了相应的 10 的幂。

$$C_1 = \Sigma \frac{l}{A} \quad C_2 = \Sigma \frac{l}{A^2}$$

$$l_0 = \frac{C_1^2}{C_2}, \quad A_0 = \frac{C_1}{C_2}, \quad V_0 = l_0 A_0 = \frac{C_1^3}{C_2^2}$$

$$\widehat{H}_0 = \frac{N \widehat{i}}{l_0} 10^3 \quad \widehat{B}_0 = \frac{\mu_0 10^6}{4f A_0 N}, \quad \mu_0 = \frac{C_1}{\Sigma \frac{l}{\mu r A}}$$

$$\widehat{B}_0 = \frac{\widehat{u} 10^6}{\omega A_0 N} \textcircled{3}$$

对于横截面沿磁路方向为连续变化的磁芯和磁芯的某些部分，可以用积分来代替上述公式中的求和。

由这些有效参数可按下式计算其自感和磁滞损耗：

$$L = \frac{\mu_0 \mu N^2 A}{l_c} 10^{-3}, \quad P_h = \frac{n_B \widehat{u}^3}{2\omega^2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_0^3}{L^3 V_0}} 10^9$$

对于有小气隙的磁芯，这个方程也是适用的。计算 μ_e 时应考虑气隙的影响。

符号一览表

- A 磁芯给定部分的横截面积 (mm^2)
- A_0 有效横截面积 (mm^2)
- B 磁通密度的瞬时值 (T)
- B_c 有效磁通密度的瞬时值 (T)
- \widehat{B}_c 有效磁通密度峰值 (T)
- C_1 磁芯因数 (mm^{-1})
- C_2 磁芯因数 (mm^{-2})
- $\tan \delta_h$ 磁滞损耗角正切
- f 频率 (Hz)
- H 磁场强度瞬时值 (A/m)
- \widehat{H} 磁场强度峰值 (A/m)
- H_0 有效磁场强度的瞬时值 (A/m)
- \widehat{H}_0 有效磁场强度峰值 (A/m)
- μ_B 材料磁滞常数 (T^{-1})
- i 电流瞬时值 (A)
- \widehat{i} 电流峰值 (A)

注：2 有时采用磁导因数 $C = \frac{\mu_0}{C_1} 10^{-3}$ 主要用于从电感因数来计算有效参数。

3 仅适用正弦电压。

- l 磁芯横截面积相等部分的长度 (mm)
 l_e 磁芯有效磁路长度 (mm)
 L 自感 (H)
 μ_0 磁性常数, $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)
 μ_a 相对振幅磁导率
 μ_e 有效磁导率
 μ_i 相对起始磁导率
 μ_r 相对导磁率, 通用的符号
 N 匝数
 v 瑞利磁滞系数 (m/A)
 ω 角频率 = $2\pi f$ (rad/s)
 P_h 磁滞损耗 (W)
 U_{av} 半个周期的电压平均值 (V)
 \hat{u} 电压峰值 (V)
 V 体积 (mm^3)
 V_e 有效体积 (mm^3)
 Φ 磁通的瞬时值 (Wb)
 $\hat{\Phi}$ 磁通的峰值 (Wb)

磁性零件有效参数的计算

1 范围和目的

本标准规定了用铁磁材料以增加磁路磁导率的闭合磁路的有效参数计算的统一规则。

2 基本规则

2.1 所有结果应以mm表示并应精确到三位有效数字, 但为推算 l_e 、 A_e 和 V_e , C_1 和 C_2 的值应计算到五位有效数字。

对新型磁芯可采用以下的修约规则:

——当第一位有效数字为1.2或3时, 取舍到三位有效数字;

——在所有其它情况下取舍到二位有效数字。

注: ①规定这一精度的目的只是为了保证以不同基础计算的这些参数的统一, 并不意味着这些参数都能按这一精度测定。

②新型磁芯是指那些在本修正日期之后, 第一次在IEC标准中规定其特性的磁芯, 或在生产厂家出版物中最初发布的磁芯。

2.2 米制和英制的换算按1in (英寸) = 25.4mm进行, 并取舍至所需精度。

2.3 $\frac{\pi}{8}$ 取0.3927。

注: 1) 见IEC 205的第二次修正 (1981)

2.4 本计算方法仅适用于闭合磁路的各构件。

2.5 计算时所用的尺寸均取相应零件图上在公差范围的平均值。

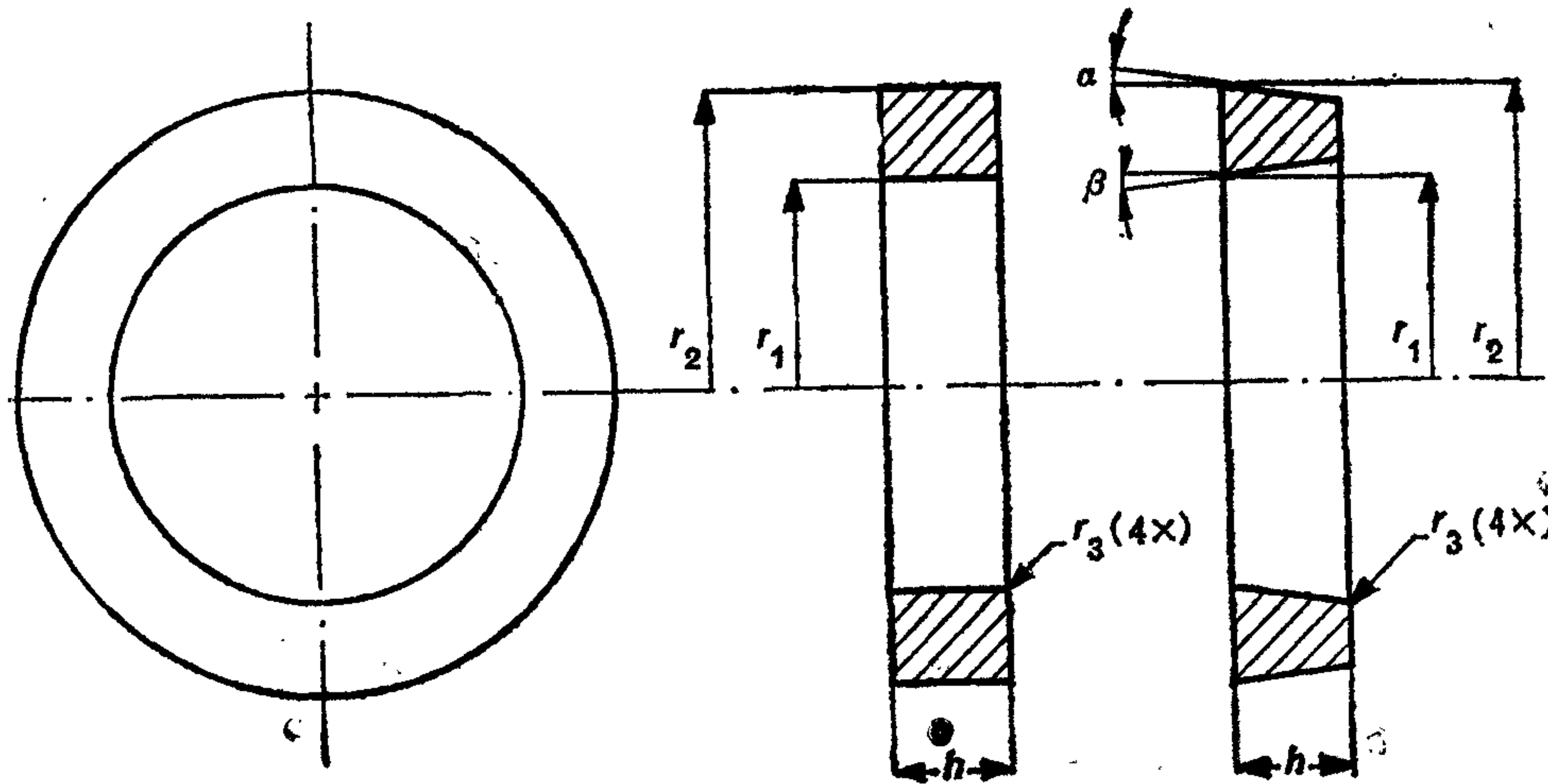
2.6 磁芯外形所有的不规则部分，如小的倒角、缺口、凹槽等等，在下面的章节中除非另有说明均可忽略不计。

2.7 在计算零件拐角处时，其平均磁路长度应取两相邻均匀部分截面中心连线的圆弧平均路径，而与此长度有关的截面积应取两相邻截面积的平均值。

3 各类磁芯的公式

下列各条款所用符号已在“有关使用有效参数的一些说明”中定义（见符号一览表）。

3.1 均匀圆环



$$C_1 = \frac{2\pi}{h_0 \log_e \frac{r_2}{r_1}} \text{ mm}^{-1}$$

$$C_2 = \frac{2\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)}{h_0^2 \log_e^2 \frac{r_2}{r_1}} \text{ mm}^{-2}$$

1) 对于具有清角的矩形截面的圆环：

$$h_0 = h$$

2) 对于具有一个平均曲率半径为 r_3 的圆角的矩形截面的圆环：

$$h_0 = h(1 - k_1); \quad k_1 = \frac{0.8584r_3^2}{h(r_2 - r_1)}$$

3) 对于具有清角的梯形截面的圆环：

注：2) 见IEC 205的第一次修正。

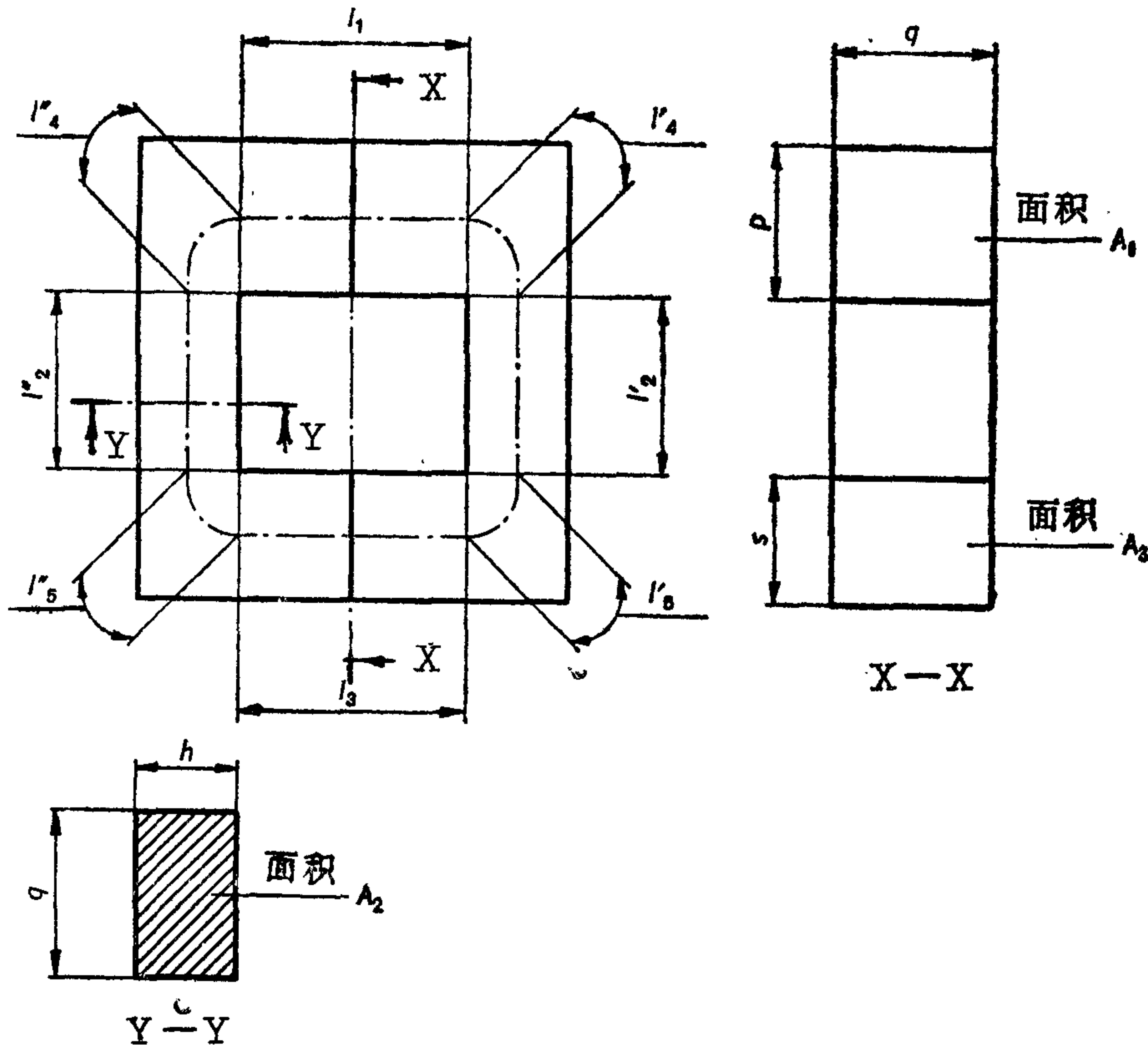
$$h_0 = h(1 - k_2) \quad k_2 = \frac{h(\tan\alpha + \tan\beta)}{2(r_2 - r_1)}$$

4) 对于具有一个曲率半径为 r_3 的圆角的梯形截面的圆环:

$$h_0 = h(1 - k_1 - k_2)$$

注: 当绕组在磁环上为均匀分布时, 可以想象, 磁环内部的所有点上的磁力线都平行于它的表面, 没有漏磁通离开或进入。这样, 就完全可以适用理论上更为确切的有效参数推导方法, 而不必涉及本标准“有关使用有效参数的一些说明”中关于在整个横截面上磁通均匀分布的假设。

3.2 矩形截面的U形磁芯对



与面积 A_2 有关的磁路长度:

$$l_2 = l_2' + l_2''$$

拐角处的平均磁路长度:

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4}(p + h) \text{ mm}$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{4}(s + h) \text{ mm}$$

与 l_4 和 l_5 有关的平均面积:

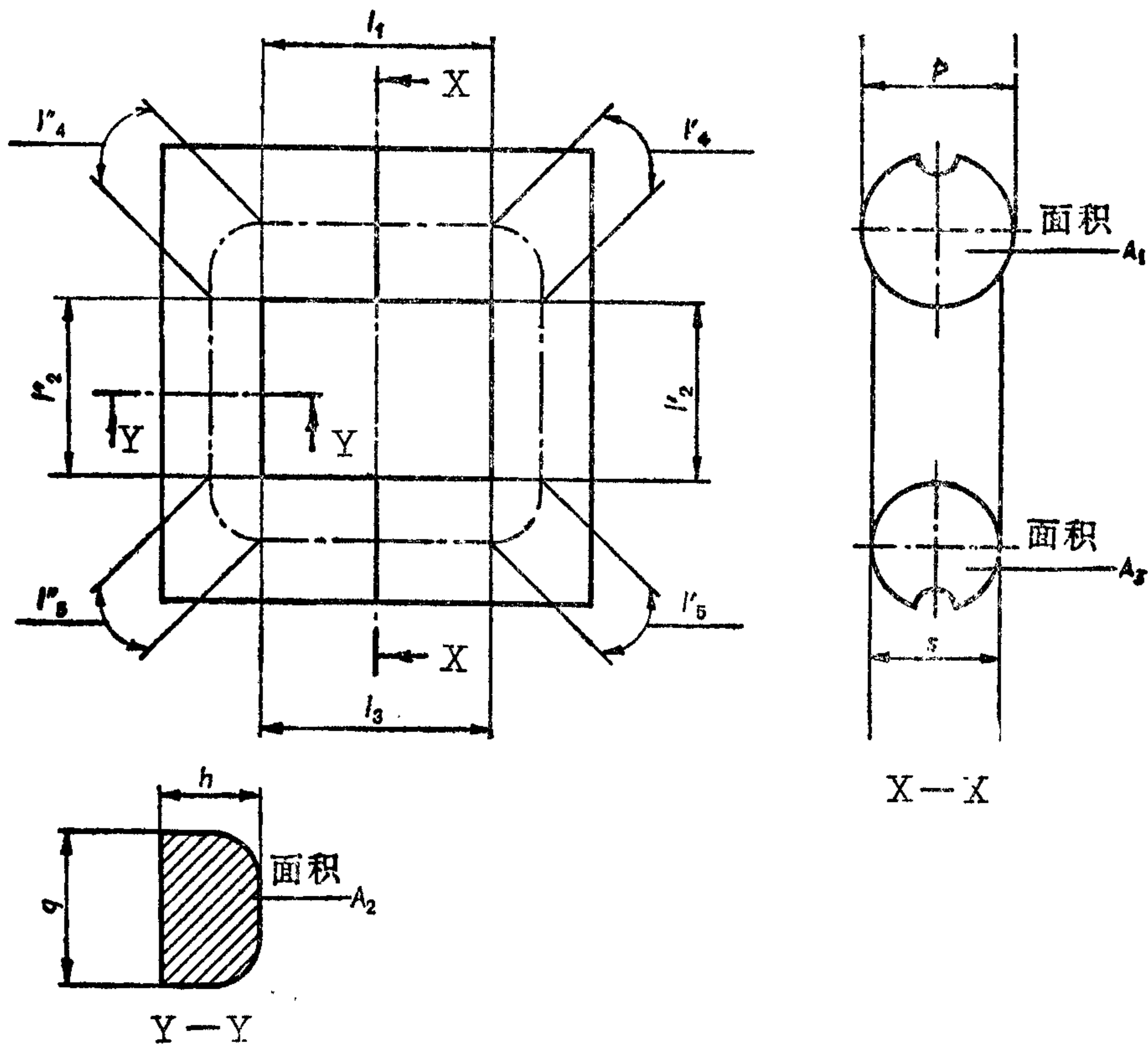
$$A_4 = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ mm}^2$$

$$A_5 = \frac{A_2 + A_3}{2} \text{mm}^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_1}{A_1} \text{mm}^{-1}$$

$$C_2 = \sum_1^5 \frac{l_1}{A_1^2} \text{mm}^{-3}$$

3.3 圆形截面的U形磁芯 对



在计算 A_2 时不考虑为了便于制造而引起的凸起。

与面积 A_2 有关的磁路长度：

$$l_2 = l_2' + l_2''$$

拐角处的平均磁路长度：

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4} (p + h) \text{mm}$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{4} (s + h) \text{mm}$$

与 l_4 和 l_5 有关的平均面积：

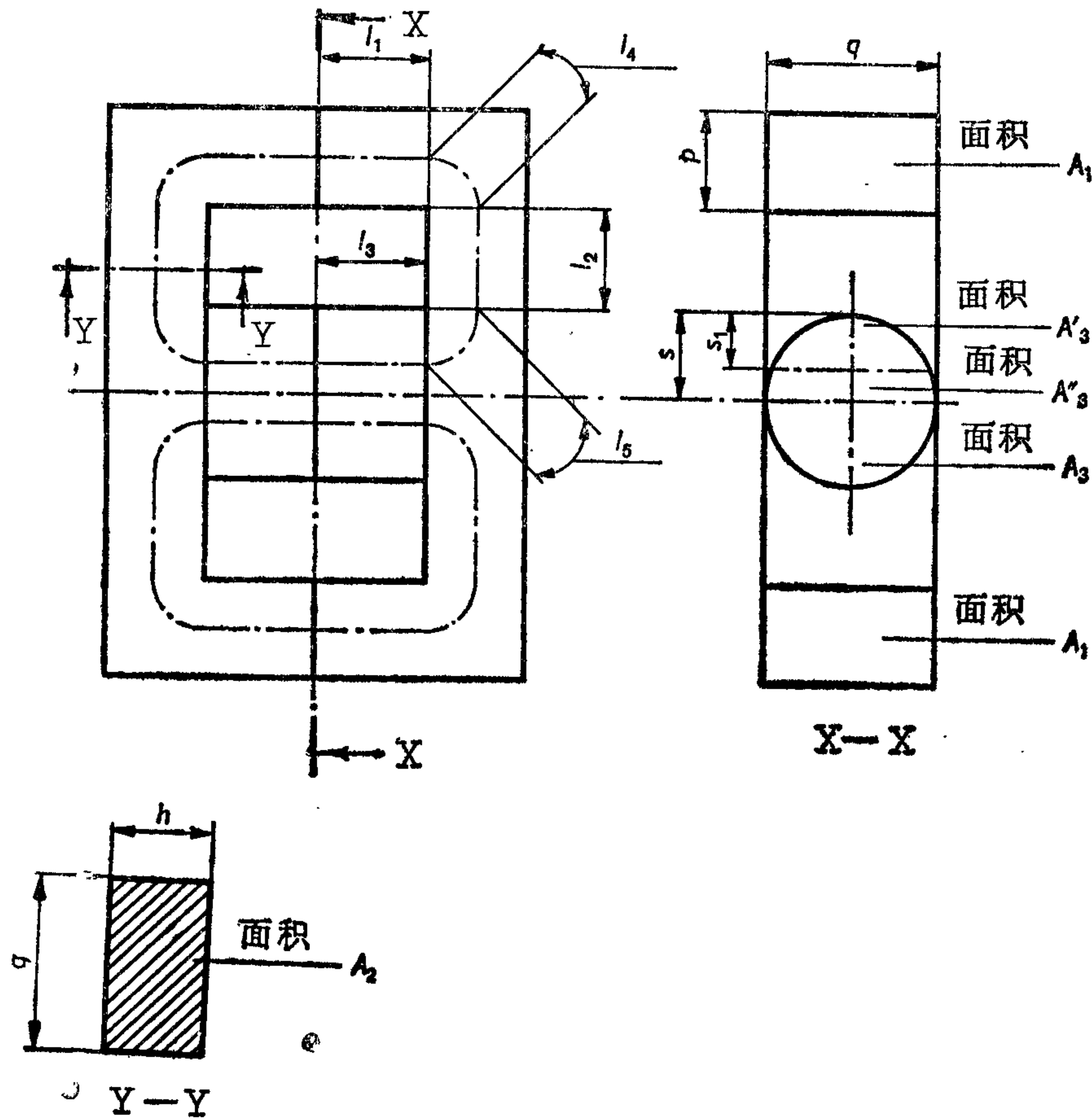
$$A_4 = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{mm}^2$$

$$A_5 = \frac{A_2 + A_3}{2} \text{ mm}^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_j}{A_j} \text{ mm}^{-1}$$

$$C_2 = \sum_1^5 \frac{l_j}{A_j^2} \text{ mm}^{-3}$$

3.4 短形截面的E形磁芯对



半个中心柱的面积: A_3

拐角处平均磁路长度:

$$l_4 = \frac{\pi}{8} (p + h) \text{ mm}$$

$$l_5 = \frac{\pi}{8} (s + h) \text{ mm}$$

与 l_4 和 l_5 有关的平均面积:

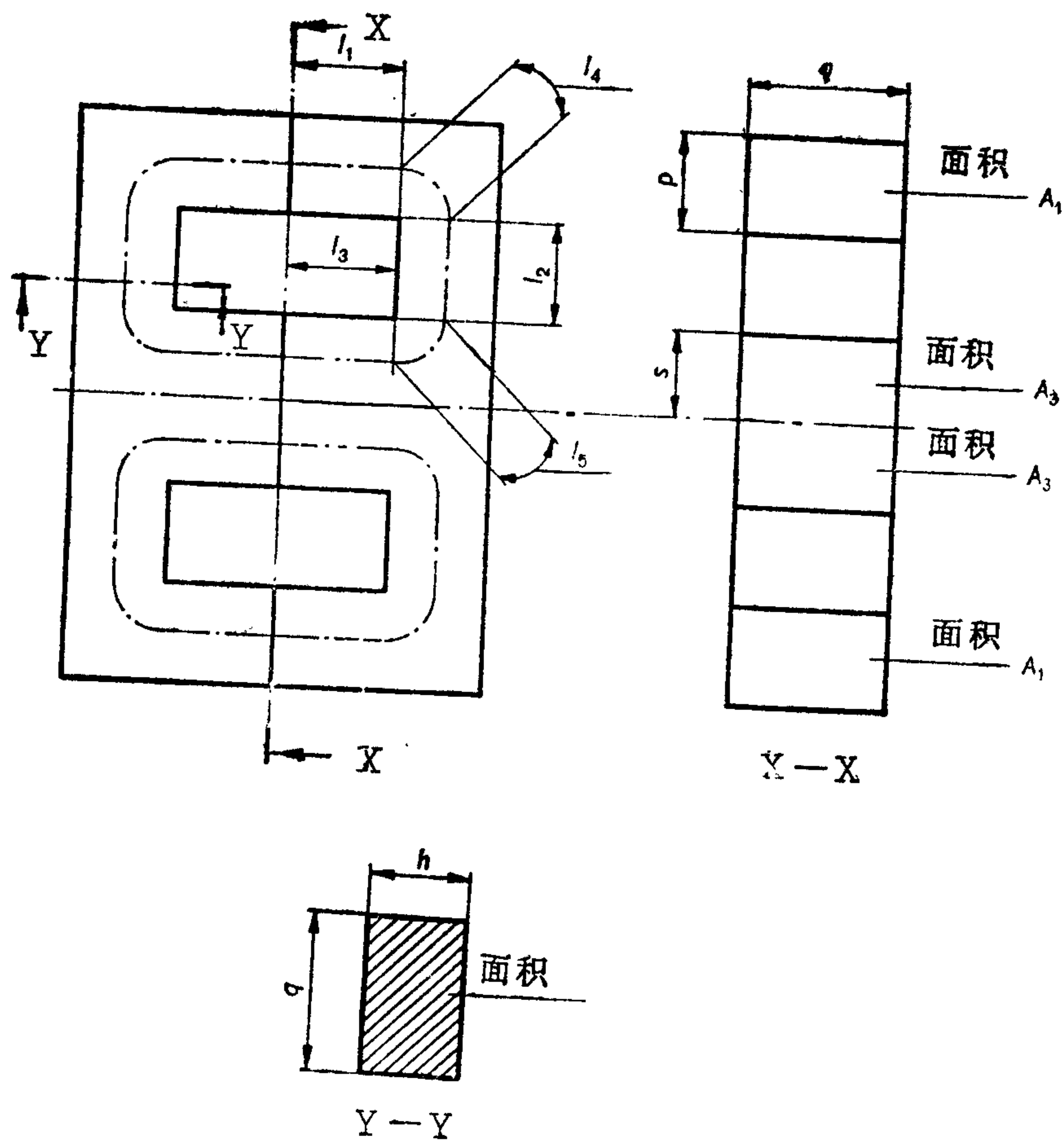
$$A_4 = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ mm}^2$$

$$A_5 = \frac{A_2 + A_3}{2} \text{mm}^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i} \text{mm}^{-1}$$

$$C_2 = \sum_1^5 \frac{l_i}{2A_i^2} \text{mm}^{-3}$$

3.5 图形截面的E形磁芯对



半个中心柱的面积

$$A_3 = A'_3 + A''_3$$

满足 $A'_3 = A''_3$ 的条件为:

$$s_1 = 0.5959s$$

拐角处平均磁路长度:

$$l_4' = \frac{\pi}{8} (p + h) \text{ mm}$$

$$l_5' = \frac{\pi}{8} (2s_1 + h) \text{ mm}$$

与 l_4' 和 l_5' 有关的平均面积

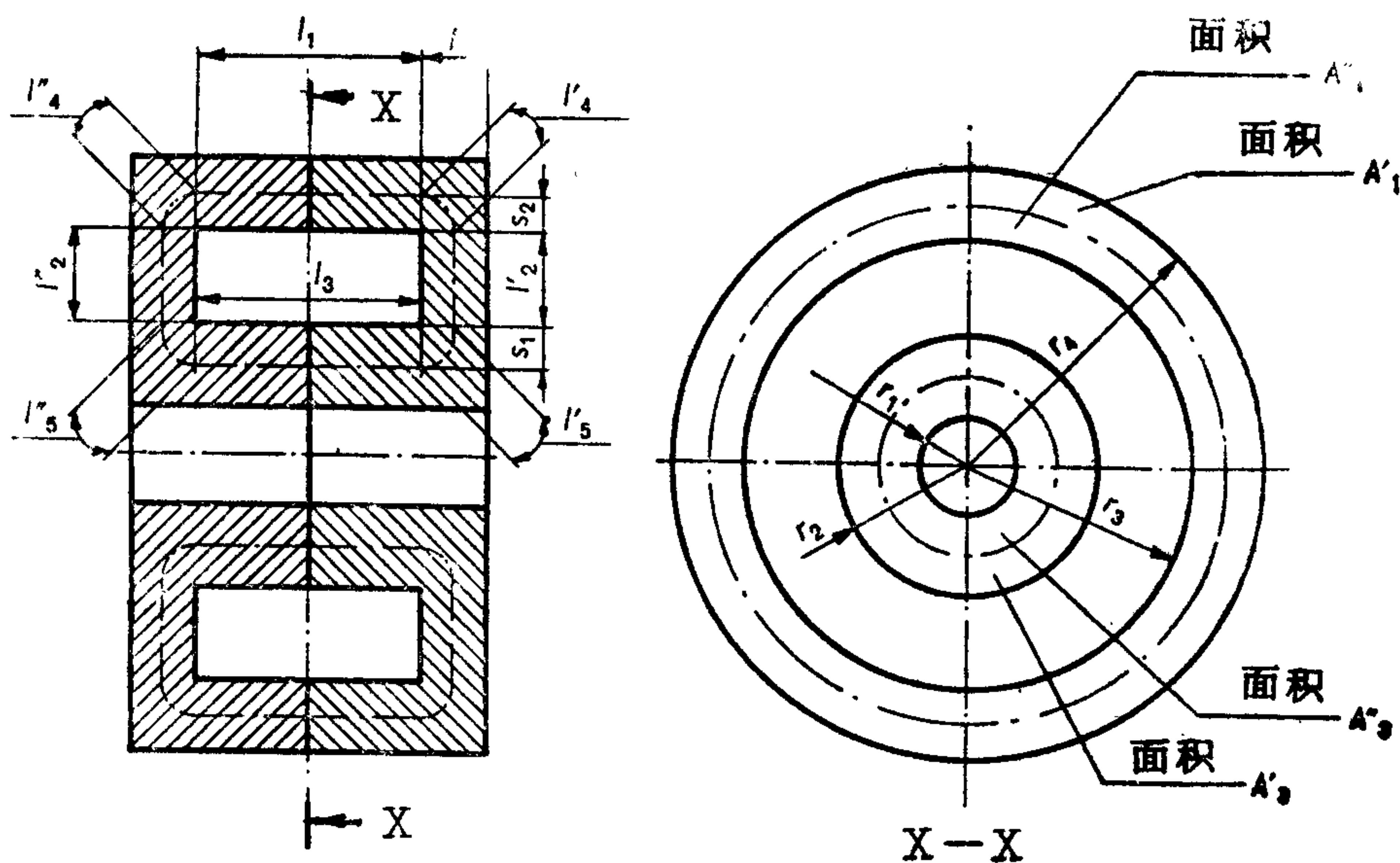
$$A_4 = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ mm}^2$$

$$A_5 = \frac{A_2 + A_3}{2} \text{ mm}^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i} \text{ mm}^{-1};$$

$$C_2 = \sum_1^5 \frac{l_i}{2A_i^2} \text{ mm}^{-3}$$

3.6 完整的罐形磁芯:



外环的面积:

$$A_1 = A_1' + A_1''$$

满足 $A_1' = A_1''$ 的条件为:

$$s_2 = -r_3 + \sqrt{\frac{r_3^2 + r_4^2}{2}}$$

中心柱面积:

$$A_3 = A_3' + A_3''$$

满足 $A_3' = A_3''$ 的条件为:

$$s_1 = r_2 - \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}}$$

环的面积:

$$A_1 = \pi (r_4 - r_3) (r_4 + r_3) \text{ mm}^2$$

对二个平面:

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{1}{\pi h} \log_e \frac{r_3}{r_2} = \frac{0.7330}{h} \log_{10} \frac{r_3}{r_2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\frac{l_2}{A_2^2} = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \times \frac{r_3 - r_2}{r_3 r_2} \text{ mm}^{-3}$$

中心柱面积:

$$A_3 = \pi (r_2 - r_1) (r_2 + r_1) \text{ mm}^2$$

拐角处平均磁路长度:

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4} (2s_2 + h) \text{ mm}$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{4} (2s_1 + h) \text{ mm}$$

与 l_4 和 l_5 有关的面积:

$$A_4 = \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_3^2 + 2r_3 h) \text{ mm}^2$$

$$A_5 = \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_1^2 + 2r_2 h) \text{ mm}^2$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i} \text{ mm}^{-1}; \quad C_2 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i^2} \text{ mm}^{-3}$$

注: 这个计算忽略了槽沟的影响, 这种影响可用如下的修正来考虑:

从 A_1 减去 $ng (r_4 - r_3)$

$$\frac{l_2}{A_2} \text{ 乘以 } \frac{1}{1 - \frac{ng}{2\pi r_3}}$$

$$\frac{l_2}{A_2^2} \text{ 乘以 } \frac{1}{(1 - \frac{ng}{2\pi r_3})^2}$$

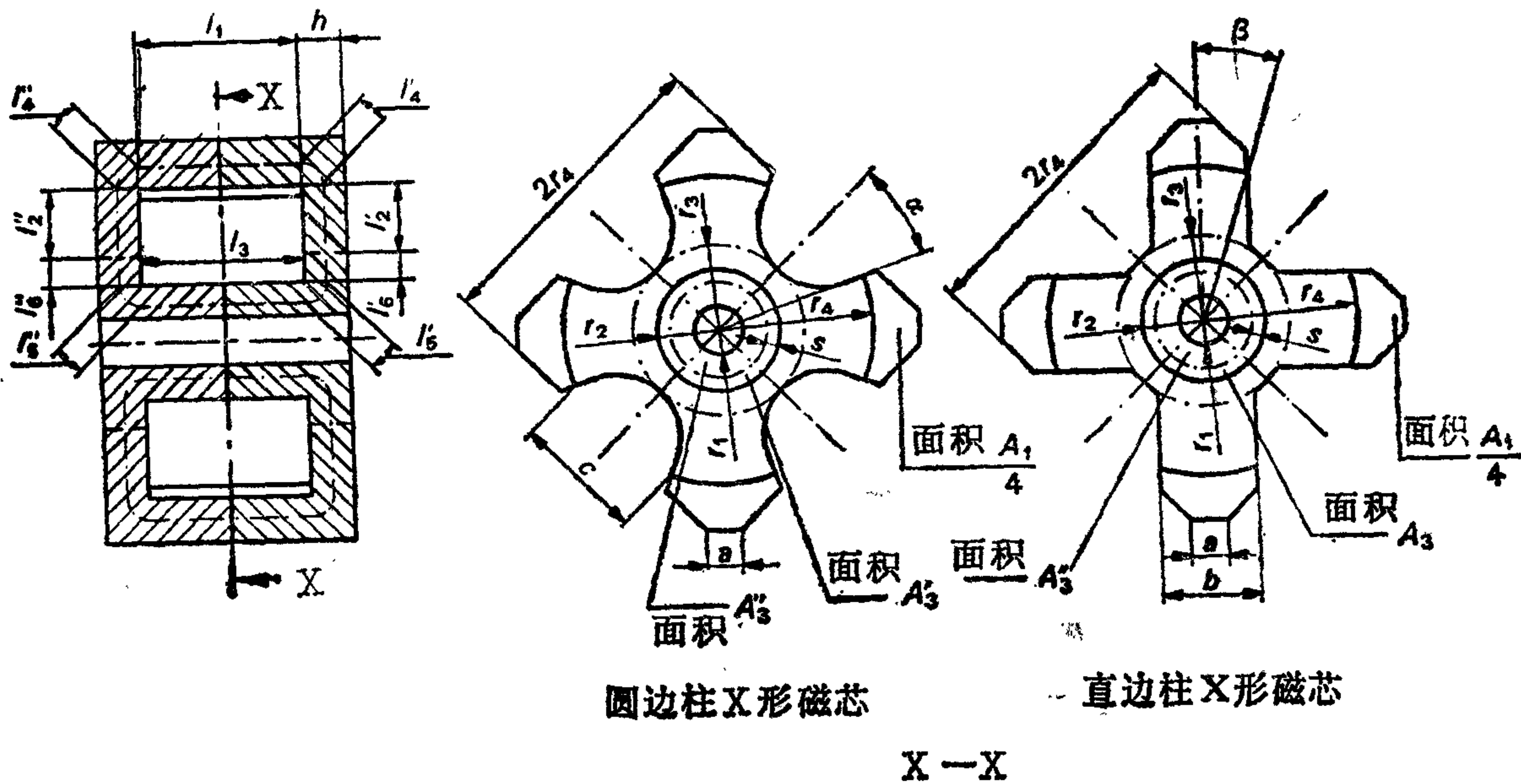
$$A_4 \text{ 乘以 } 1 - \frac{ng}{\pi(r_3 + r_4)}$$

n = 槽数:

g = 槽的宽度

3)

3.7 完整的交叉形磁芯 (X磁芯)



中心柱的面积:

$$A_3 = A_3' + A_3'' \text{ mm}^2$$

满足 $A_3' = A_3''$ 的条件为:

$$s = r_2 - \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}} \text{ mm}$$

边柱的总面积:

——对圆边柱的磁芯:

$$A_1 = 4 \left(r_4^2 - \frac{\pi}{4} \cdot r_4^2 - \frac{1}{4} a^2 - \frac{c \cdot r_4^2}{\sqrt{4r_4^2 - c^2}} + \frac{\alpha \cdot \pi}{180} \cdot r_4^2 \right) \text{ mm}^2$$

此处:

$$\alpha = \arcsin \frac{c}{2r_4}$$

——对直边柱的磁芯:

$$A_1 = 4 \left\{ b r_4 \cdot \sqrt{2} - \pi r_4^2 \cdot \frac{\beta}{180} - \frac{b}{4} \sqrt{(4r_4^2 - b^2)} - \frac{1}{4} (a^2 + b^2) \right\} \text{ mm}^2$$

此处:

$$\beta = \arcsin \frac{b}{2r_4}$$

与 l_2 有关的磁芯因数:

——对圆边柱的磁芯:

注: 3) 见IEC 205的第一次补充 (1968)

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{66}{h(45-\alpha)} \log_{10} \frac{2r_4}{r_3+r_4} \text{mm}^{-1}$$

$$\frac{l_2}{A_2^2} = \frac{1}{(\pi h \frac{45-\alpha}{45})^2} \left[\frac{2}{r_3+r_4} - \frac{1}{r_4} \right] \text{mm}^{-1}$$

——对直边柱的磁芯:

$$l_2 = l_2' + l_2'' = 2(r_4 - r_3) \text{mm}$$

$$A_2 = 4 \cdot b \cdot h \text{mm}^2$$

中心柱的面积:

$$A_3 = \pi(r_2^2 - r_1^2) \text{mm}^2$$

拐角处的平均磁路长度:

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4} \left[h + \frac{4}{5} \{ r_4(\sqrt{2}-1) - \frac{1}{2}a \} \right] \text{mm}$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{2} \left[\frac{h}{2} + r_2 - \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}} \right] \text{mm}$$

与 l_4 有关的总面积:

——对圆边柱的磁芯:

$$A_4 = 4 \left(\frac{A_1}{8} + \pi \cdot h \cdot r_4 \cdot \frac{45-\alpha}{180} \right) \text{mm}^2$$

此处:

$$\pi = \arcsin \frac{c}{2r_4}$$

——对直边柱磁芯:

$$A_4 = 4 \left(\frac{A_1}{8} + \pi \cdot h \cdot r_4 \cdot \frac{\beta}{180} \right) \text{mm}^2$$

此处:

$$\beta = \arcsin \frac{b}{2r_4}$$

与 l_5 有关的总面积:

$$A_5 = \frac{\pi}{4} (r_2^2 - r_1^2) + \pi h r_2 \text{mm}^2$$

同中心柱相连接的圆环处的磁路长度:

$$l_6 = l_6' + l_6'' = 2(r_3 - r_2) \text{mm}$$

与 l_6 有关的磁芯因数:

$$\frac{l_6}{A_6} = \frac{0.733}{h} \log_{10} \frac{r_3}{r_2} \text{mm}^{-1}$$

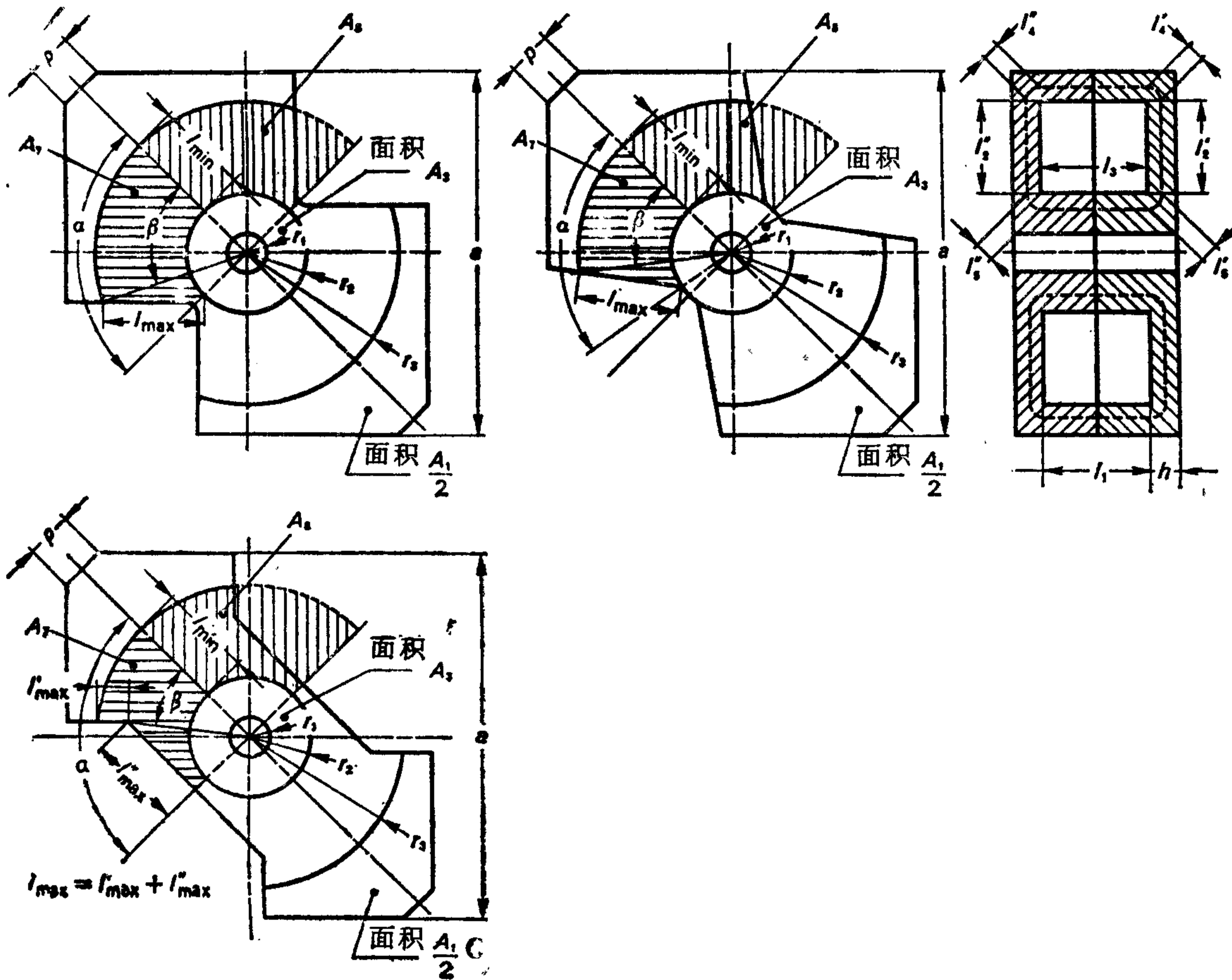
$$\frac{l_6}{A_6} = \frac{1}{2\pi^2 h^2} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) \text{mm}^{-3}$$

$$C_1 = \sum_1^6 \frac{l_i}{A_i} \text{mm}^{-1}$$

$$C_2 = \sum_1^6 \frac{l_i}{A_i^2} \text{mm}^{-3}$$

4)

3.8 完整的方形磁芯 (RM磁芯)



边柱的总面积:

$$A_1 = \frac{1}{2} a^2 \left\{ 1 + \text{tg}(\beta - 45) \right\} - \pi \cdot r_3^2 \cdot \frac{\beta}{90} - \frac{1}{2} p^2 \text{mm}^2$$

与 l_2 有关的磁芯因数:

$$\frac{l_2}{A_2} = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2} \times f}{C \times \pi \times h}$$

$$\frac{l_2}{A_2^2} = \frac{\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) \times f}{2 (C \times \pi \times h)^2}$$

注: 4) 见 IEC 205 的第二次补充 (1974)

此处:

$$l_2 = l_2' + l_2''$$

$$f = \frac{l_{\min} + l_{\max}}{2 \times l_{\text{mm}}}$$

$$C = \frac{A_7}{A_8}$$

注: 表面 A_7 和 A_8 可用计算或测量的方法来确定。如用面积仪在放大10倍的磁芯图上进行测量。

中心柱的面积:

$$A_3 = \pi (r_2^2 - r_1^2) \text{ mm}^2$$

拐角处的平均磁路长度和与此有关的平均面积:

$$l_4 = l_4' + l_4'' = \frac{\pi}{4} \left(h + \frac{1}{2} a - r_3 \right)$$

$$A_4 = \frac{1}{2} \left(A_1 + 2\pi r_3 \cdot h \times \frac{\beta}{90} \right)$$

$$l_5 = l_5' + l_5'' = \frac{\pi}{4} \left(2r_2 + h - \sqrt{2r_1^2 + 2r_2^2} \right)$$

$$A_5 = \frac{\pi}{2} (r_2^2 - r_1^2) + \pi \cdot r_2 \cdot h \cdot \frac{\alpha}{90}$$

$$C_1 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i} \text{ mm}^{-1} \quad C_2 = \sum_1^5 \frac{l_i}{A_i^2} \text{ mm}^{-3}$$

注: 这个计算没有考虑卡簧凹槽和螺栓凹槽。这对计算结果可能有一些影响, 尤其是对于较小的磁芯。