



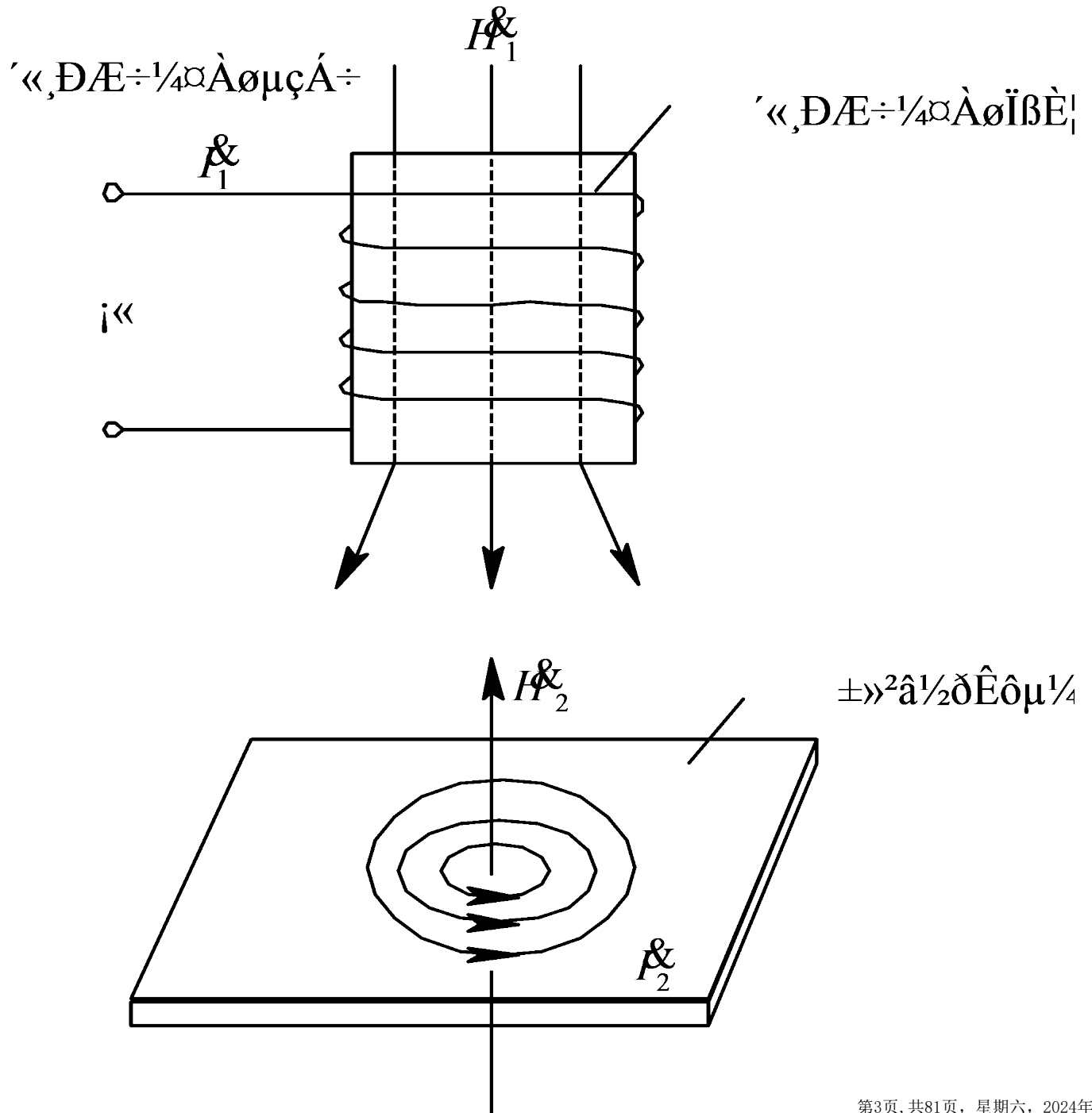
在金属导体内产生的涡流存在趋肤效应，即涡流渗透的深度与传感器激励电流的频率有关。

根据电涡流在导体内的渗透情况，电涡流传感器分为：

高频反射式

低频投射式

# 4.3.1 工作原理



传感器线圈通以正弦交变电流  $I_1$  时，  
线圈周围空间必然产生正弦交变磁场  
 $H_1$ ，

使金属导体产生感应电涡流  $I_2$ ，  
 $I_2$  又产生新的交变磁场  $H_2$ 。

根据楞次定律， $H_2$ 的作用将阻碍原磁场  $H_1$  的变化。

由于磁场 $H_2$ 的作用，涡流要消耗一部分能量，导致传感器线圈的等效阻抗发生变化。

由上可知，线圈阻抗的变化完全取决于被测金属导体的电涡流效应。

电涡流效应既与被测体的 $\rho$ 、 $\mu$ 以及几何形状有关，

还与**激磁线圈**的几何参数、激磁线圈中激磁电流频率  $f$  有关，同时还与激磁线圈与导体间的距离  $x$  有关。

传感器线圈受电涡流影响时的等效阻抗  $Z$  的函数关系式为：

$$Z=F(\rho, \mu, r, f, x)$$

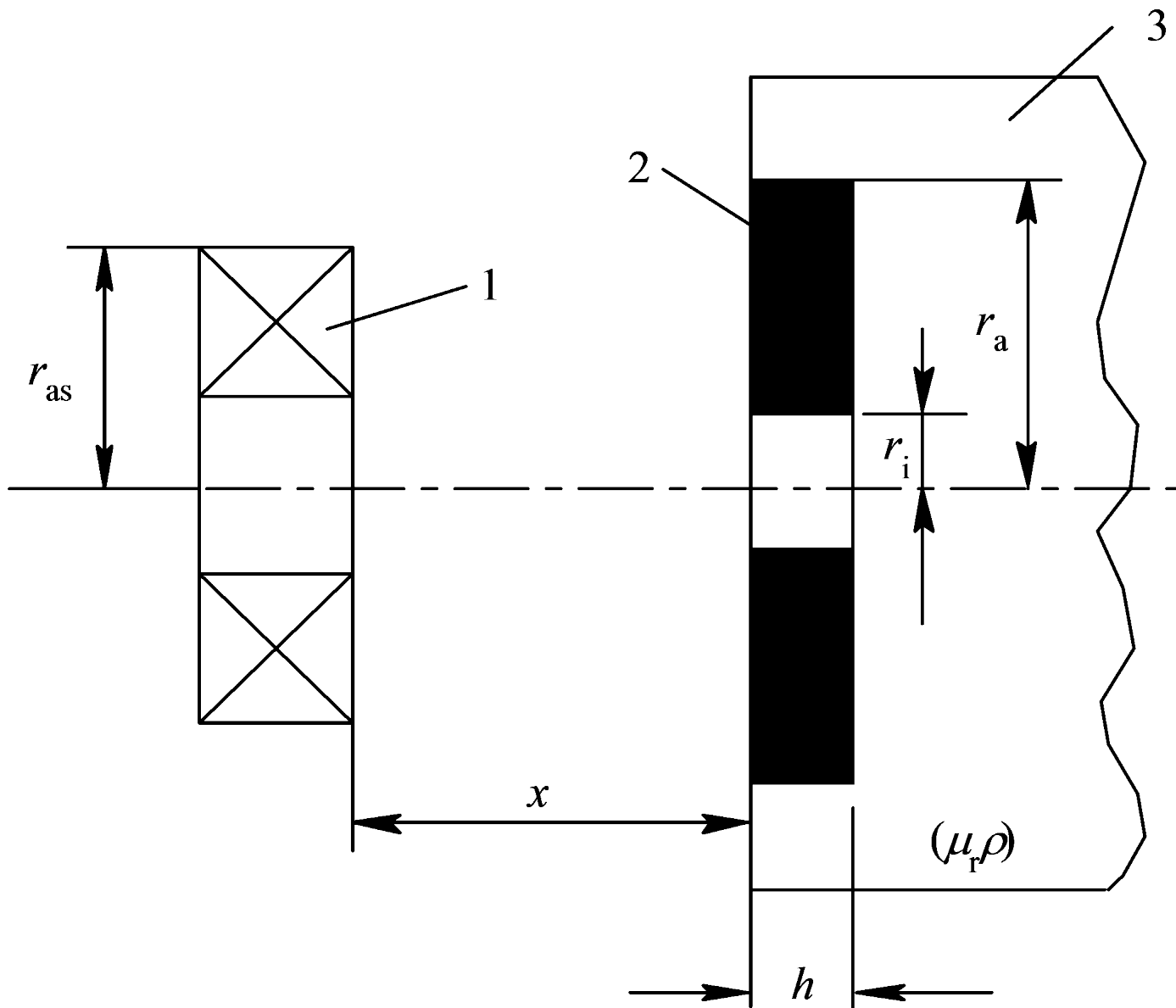
$r$  为**激磁线圈与被测体**的尺寸因子。

如果保持上式中其它参数不变，而只改变其中一个参数，传感器线圈阻抗  $Z$  就仅仅是这个参数的单值函数。



通过与传感器配用的测量电路测出阻抗  $Z$  的变化量，即可实现对该参数的测量。

### 4.3.2 基本特性



- 1:  $i^a \ll \Delta \epsilon \div \ddot{I} \beta \dot{E} | \xi \rangle$
- 2:  $i^a \parallel \hat{I} \hat{A} \cdot \rangle \cdot \xi \rangle$
- 3:  $i^a \pm \rangle \rangle^2 \hat{a}^{1/2} \ddot{\partial} \hat{E} \hat{o} \mu^{1/4} \dot{\lambda}$

# 电涡流式传感器简化模型

在被测金属导体上形成的电涡流可

等效为一个短路环，

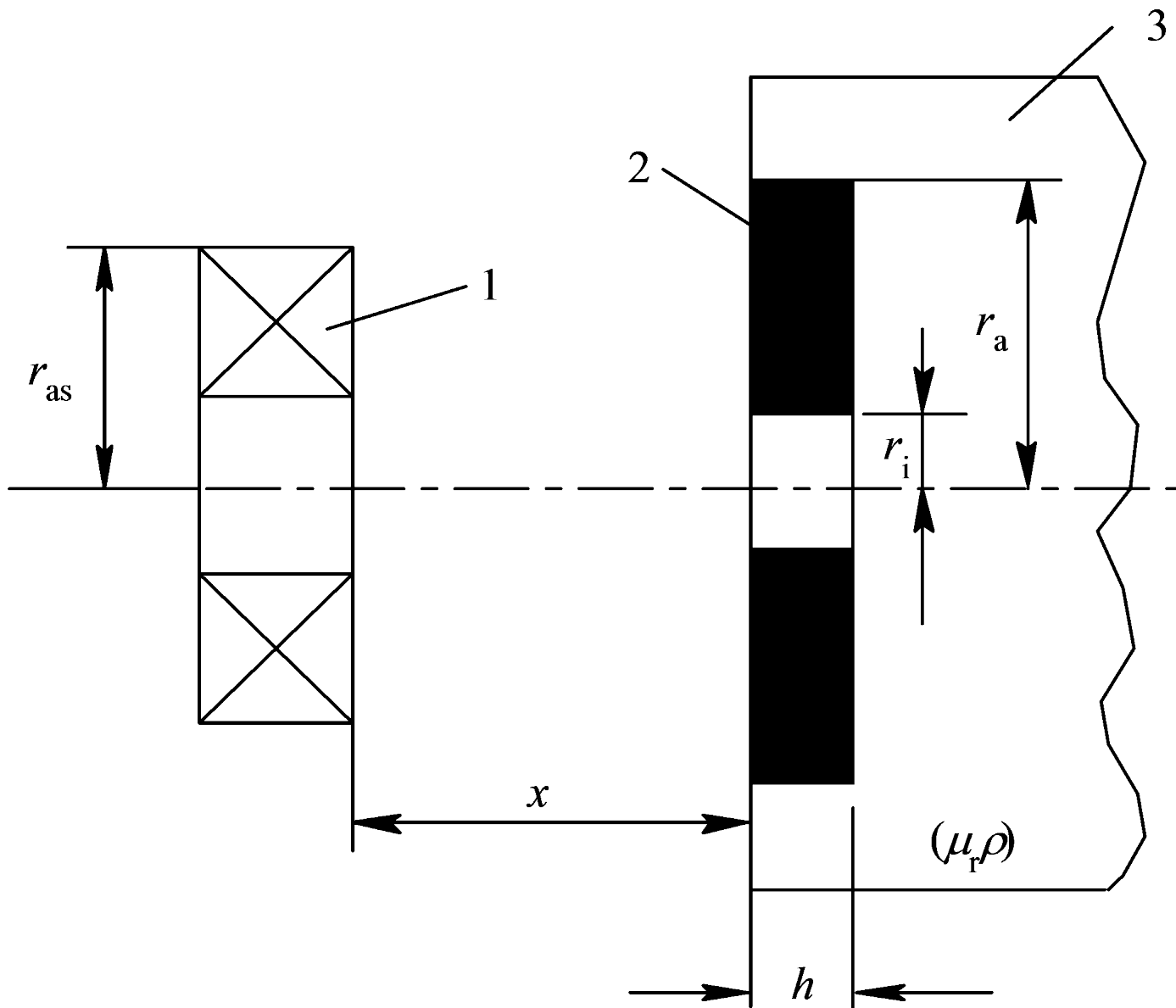
即假设电涡流仅分布在环体之内。

## 电涡流的轴向贯穿深度 $h$

贯穿深度是指把电涡流强度减小到表面强度的  $1/e$  (0.37) 处的表面厚度。

$$h = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_r f}}$$

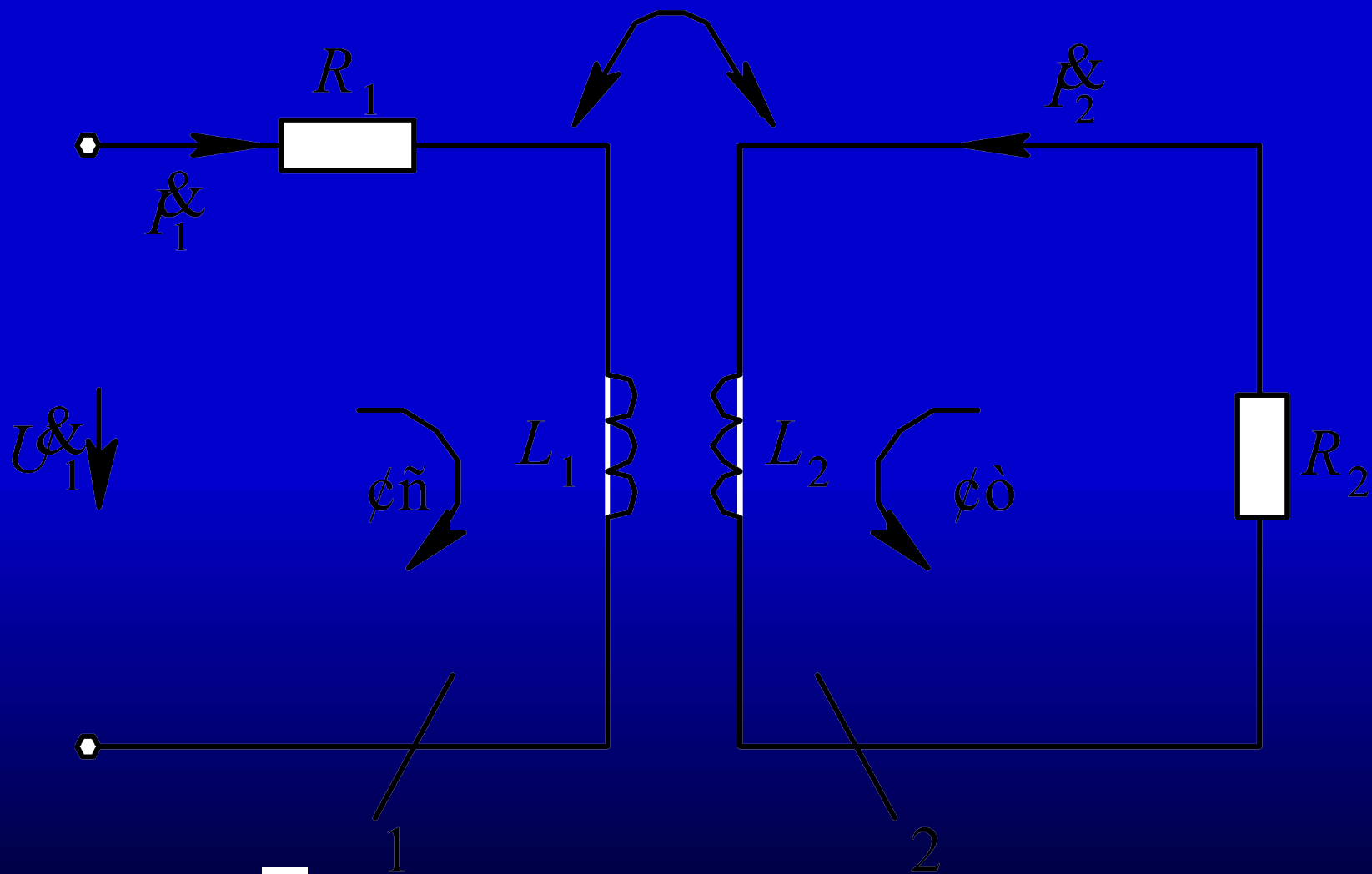
$f$  为线圈激磁电流的频率。



- 1:  $i^a \ll \Delta \epsilon \div \ddot{I} \beta \dot{E} | \mathcal{L} \rangle$
- 2:  $i^a \parallel \hat{I} \hat{A} \cdot \rangle \cdot \mathcal{L} \rangle$
- 3:  $i^a \pm \rangle \rangle^2 \hat{a}^{1/2} \ddot{\partial} \hat{E} \hat{o} \mu^{1/4} \dot{\lambda}$

# 电涡流式传感器简化模型

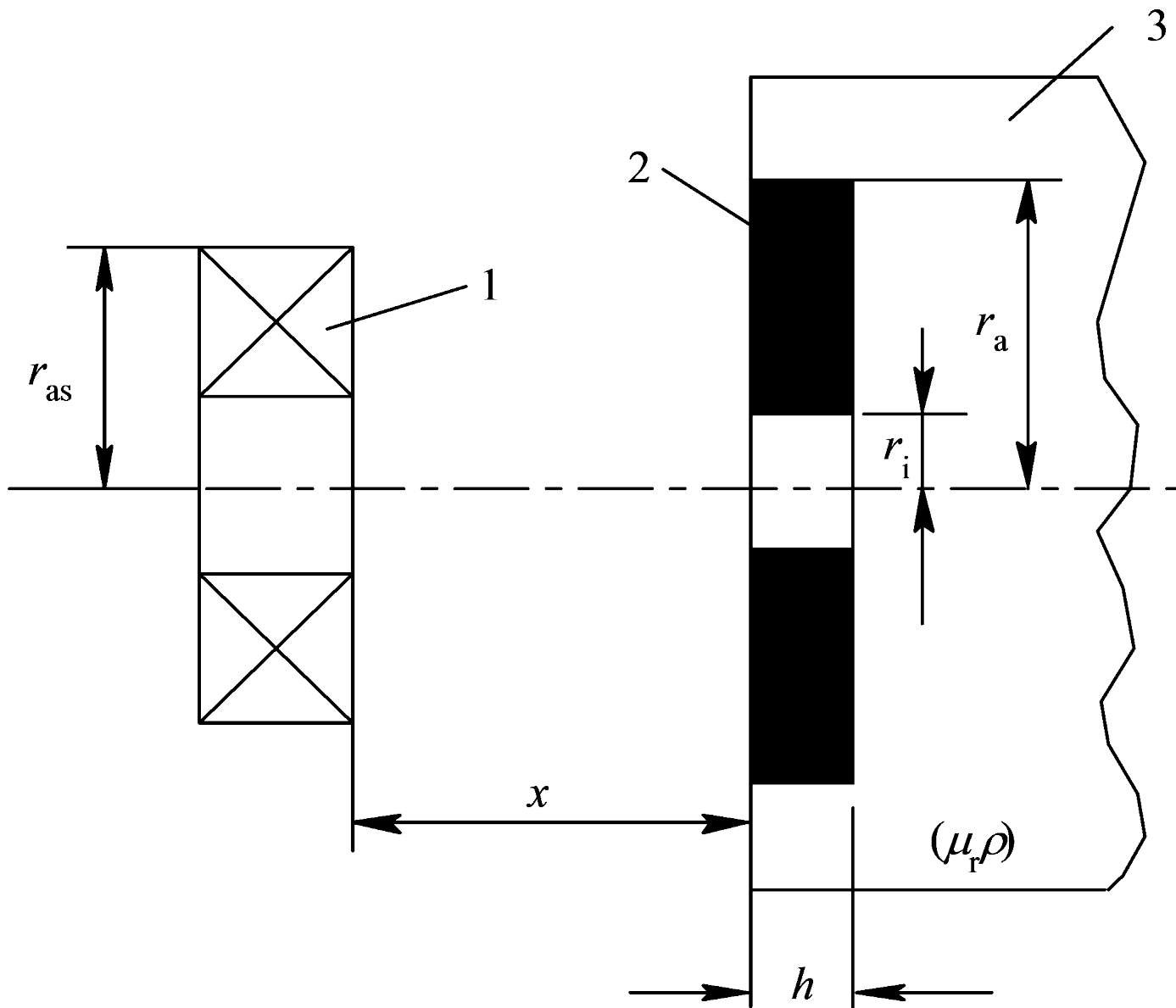
# 电涡流的等效电路图。 $M$



« $\mu_0 \mu_r \frac{1}{2} I_1^2 \frac{d\phi_1}{dx} + \frac{1}{2} I_2^2 \frac{d\phi_2}{dx} + I_1 I_2 \frac{dM}{dx}$ »

$R_2$ 为电涡流短路环等效电阻

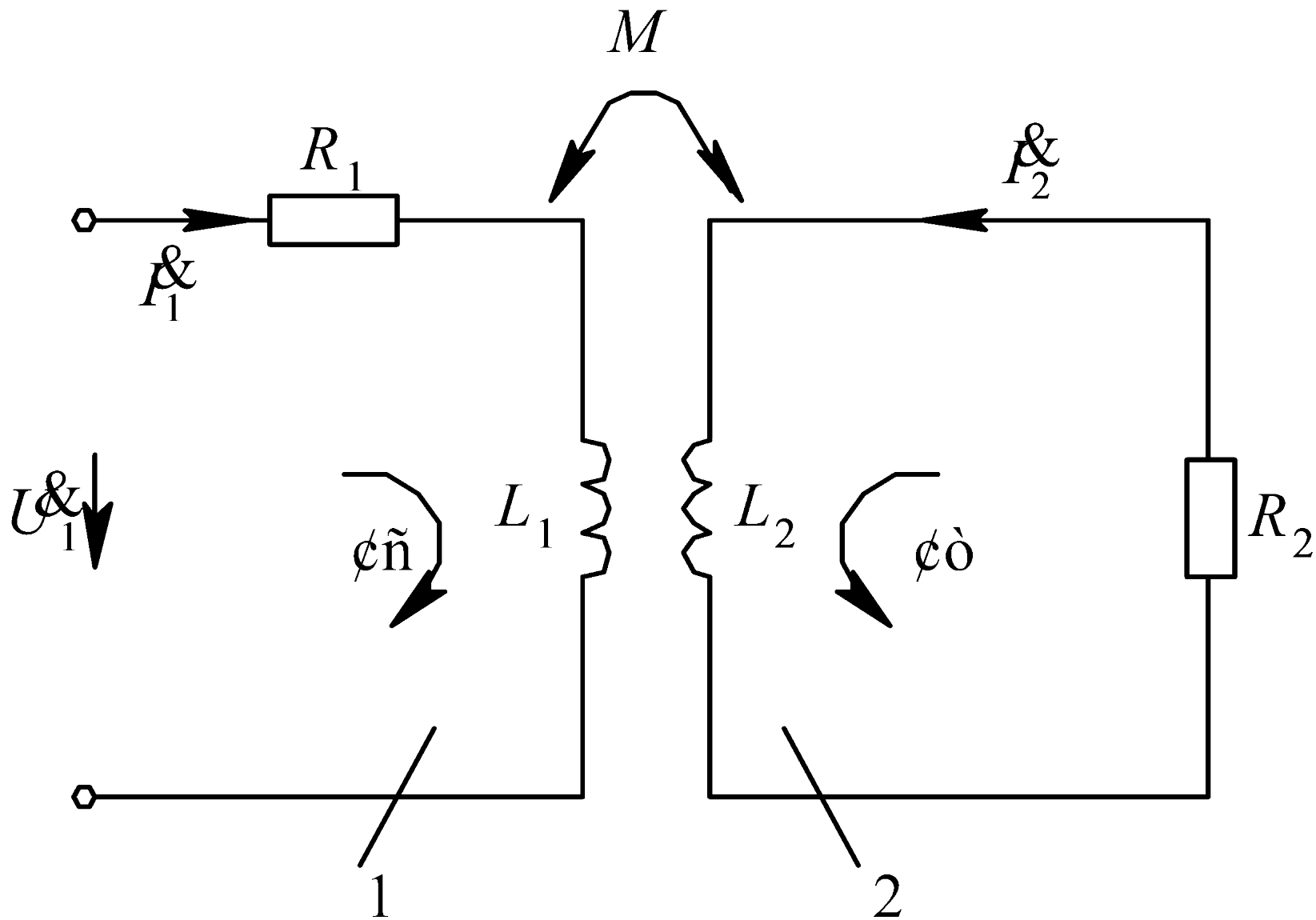
$$R_2 = \frac{2\pi\rho}{h \ln \frac{r_a}{r_i}}$$



- 1:  $j^a \ll \Delta \epsilon \div \ddot{I} \beta \hat{E} | \mathcal{L} \rangle$
- 2:  $j^a \parallel \hat{I} \hat{A} \cdot \rangle \cdot \mathcal{L} \rangle$
- 3:  $j^a \pm \rangle \rangle^2 \hat{a}^{1/2} \partial \hat{E} \hat{o} \mu^{1/4} \hat{l}$

# 电涡流式传感器简化模型





1;  $i_1$  «,  $\mathcal{E} \div \mathcal{I} \beta \mathcal{E} | \mathcal{L} \gg 2; i_2 \mu \mathcal{C} \hat{\mathcal{I}} \mathcal{D} \mathcal{A} \div \mathcal{I} \hat{\mathcal{A}} \cdot \gg$ .

根据基尔霍夫第二定律

$$\left. \begin{aligned} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 &= U_1 \\ -j\omega M \dot{I}_1 + R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$\omega$ ——线圈激磁电流角频率；

$R_1$ ——线圈电阻；

$L_1$ ——线圈电感；

$L_2$ ——短路环等效电感；

$R_2$ ——短路环等效电阻；  $\psi$

$M$ ——互感系数。

等效阻抗  $Z$  为

$$Z = \frac{U_1}{I_1} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2 + j\omega \left[ L_1 - \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} L_2 \right]$$
$$= R_{eq} + j\omega L_{eq}$$

$R_{eq}$ —线圈受电涡流影响后的等效电阻

$$R_{eq} = R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} R_2$$

线圈的等效品质因数Q值为

$$Q = \frac{\omega L_{eq}}{R_{eq}}$$

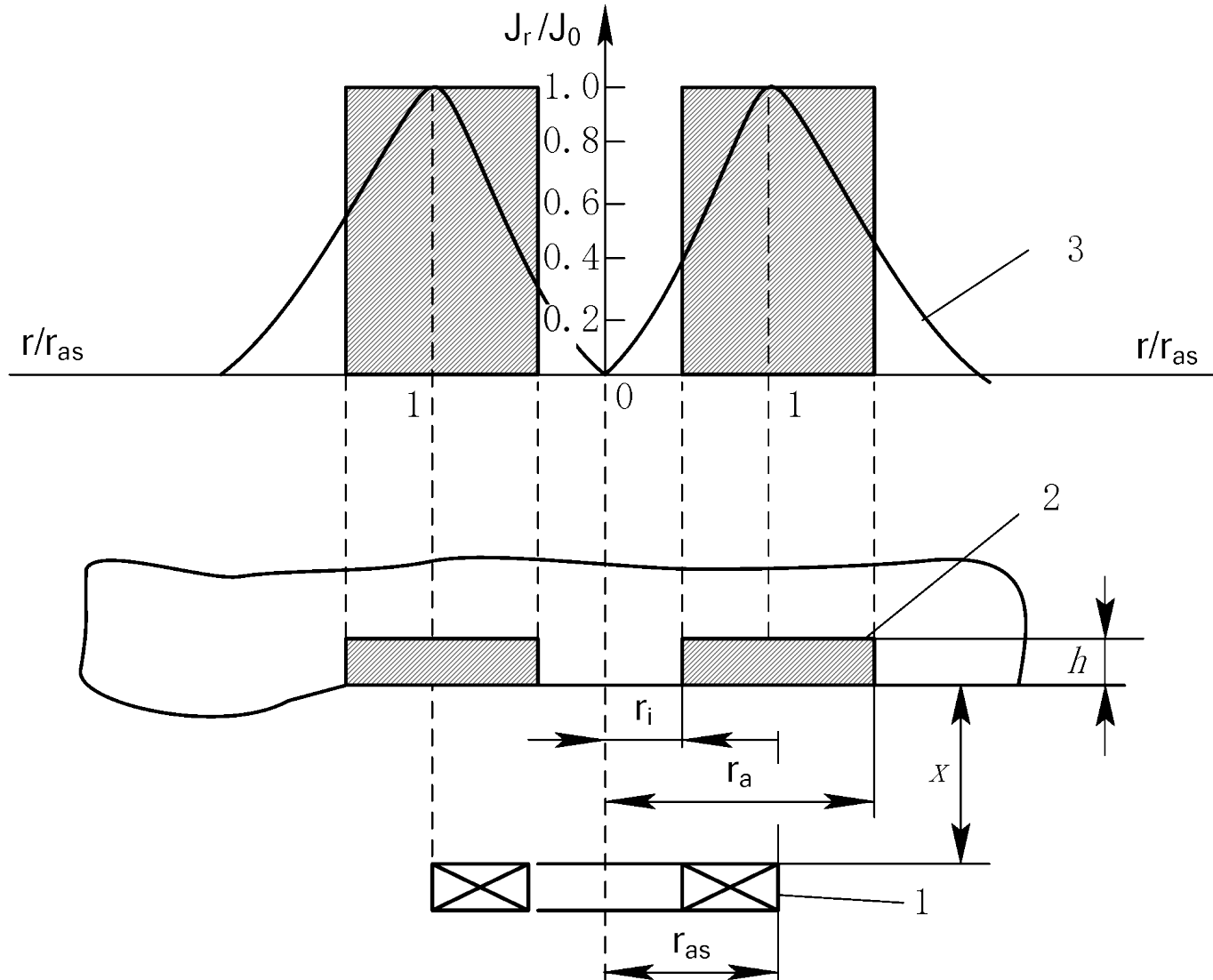
### 4.3.3 电涡流形成范围

#### 1. 电涡流的径向形成范围

线圈与导体系统产生的电涡流密度既是线圈与导体间距离  $x$  的函数，又是沿线圈半径方向  $r$  的函数。

当  $x$  一定时，电涡流密度  $J$  与半径  $r$  的关系曲线如图4-25所示。





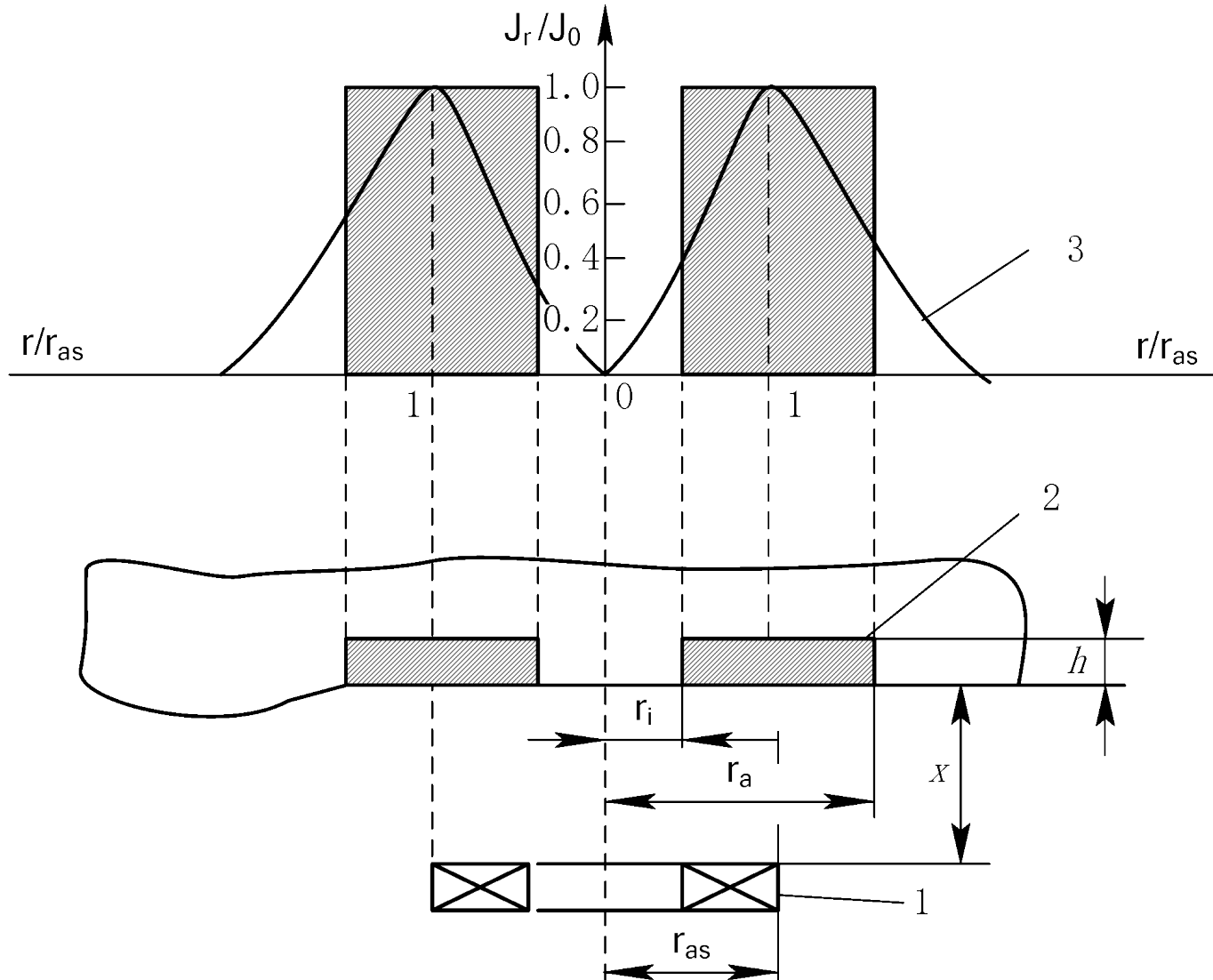
1-电涡流线圈；2-等效短路环；3-电涡流密度分布

## 电涡流密度 $J$ 与半径 $r$ 的关系曲线

$J_0$  为金属导体表面电涡流密度，  
即电涡流密度最大值。

$J_r$  为半径  $r$  处的金属导体表面电涡流密度。

① 电涡流径向形成范围大约在传感器线圈外径 $r_{as}$ 的1.8~2.5倍范围内，且分布不均匀。



1-电涡流线圈； 2-等效短路环； 3-电涡流密度分布

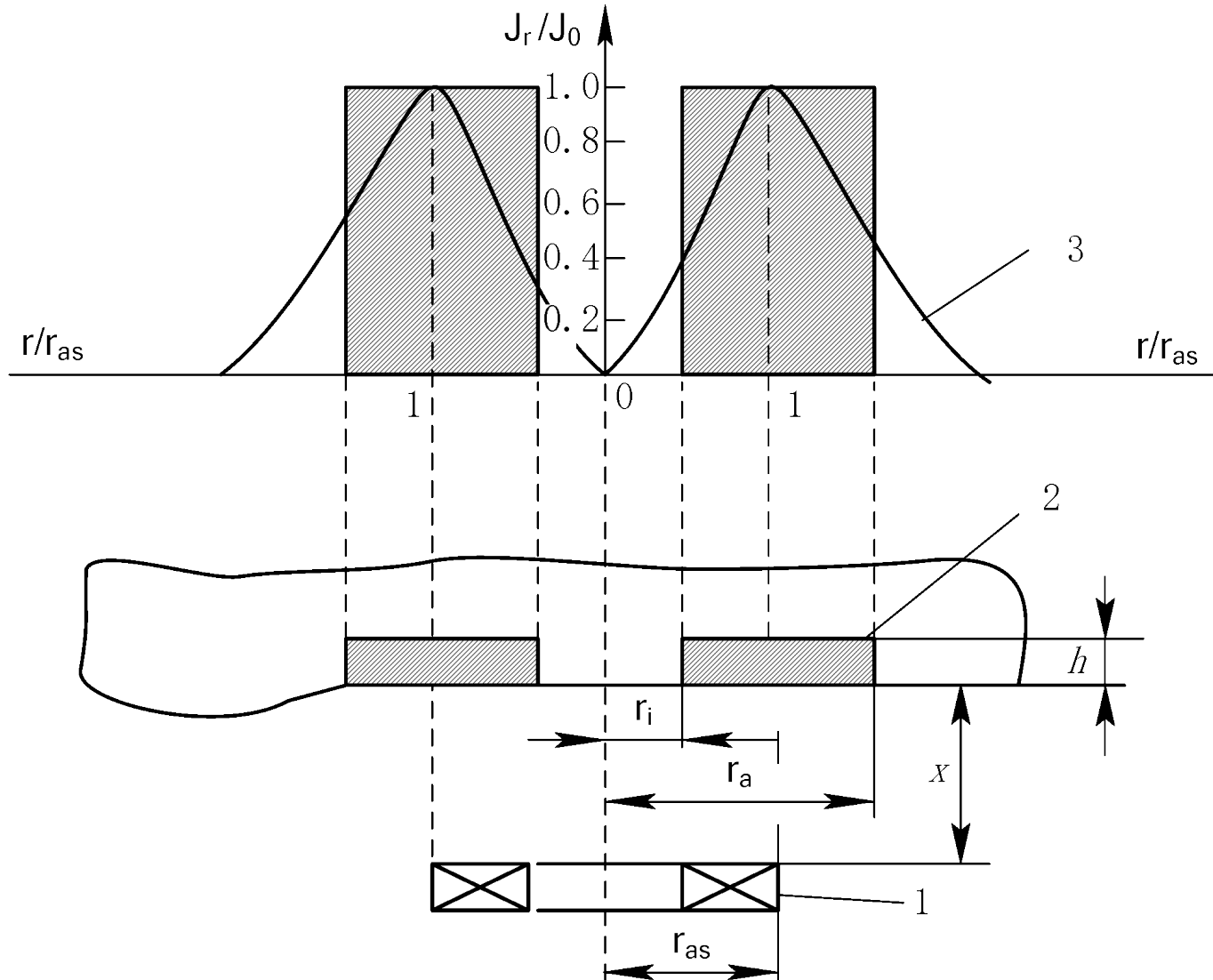
## 电涡流密度 $J$ 与半径 $r$ 的关系曲线

② 电涡流密度在  $r_i=0$  处为零。

③ 电涡流的最大值在  $r=r_{as}$  附近的一个狭窄区域内。

④ 可以用一个平均半径为  $r_{as}$   $\left( r_{as} = \frac{r_i + r_a}{2} \right)$

的短路环来集中表示分散的电涡流（图中阴影部分）。



1-电涡流线圈； 2-等效短路环； 3-电涡流密度分布

# 电涡流密度 $J$ 与半径 $r$ 的关系曲线

## 2. 电涡流强度与距离的关系

当  $x$  改变时，电涡流密度也发生变化，即电涡流强度随距离  $x$  的变化而变化。

# 金属导体表面的电涡流强度

$$I_2 = I_1 \left[ 1 - \frac{x}{\sqrt{x^2 + r_{as}^2}} \right]$$

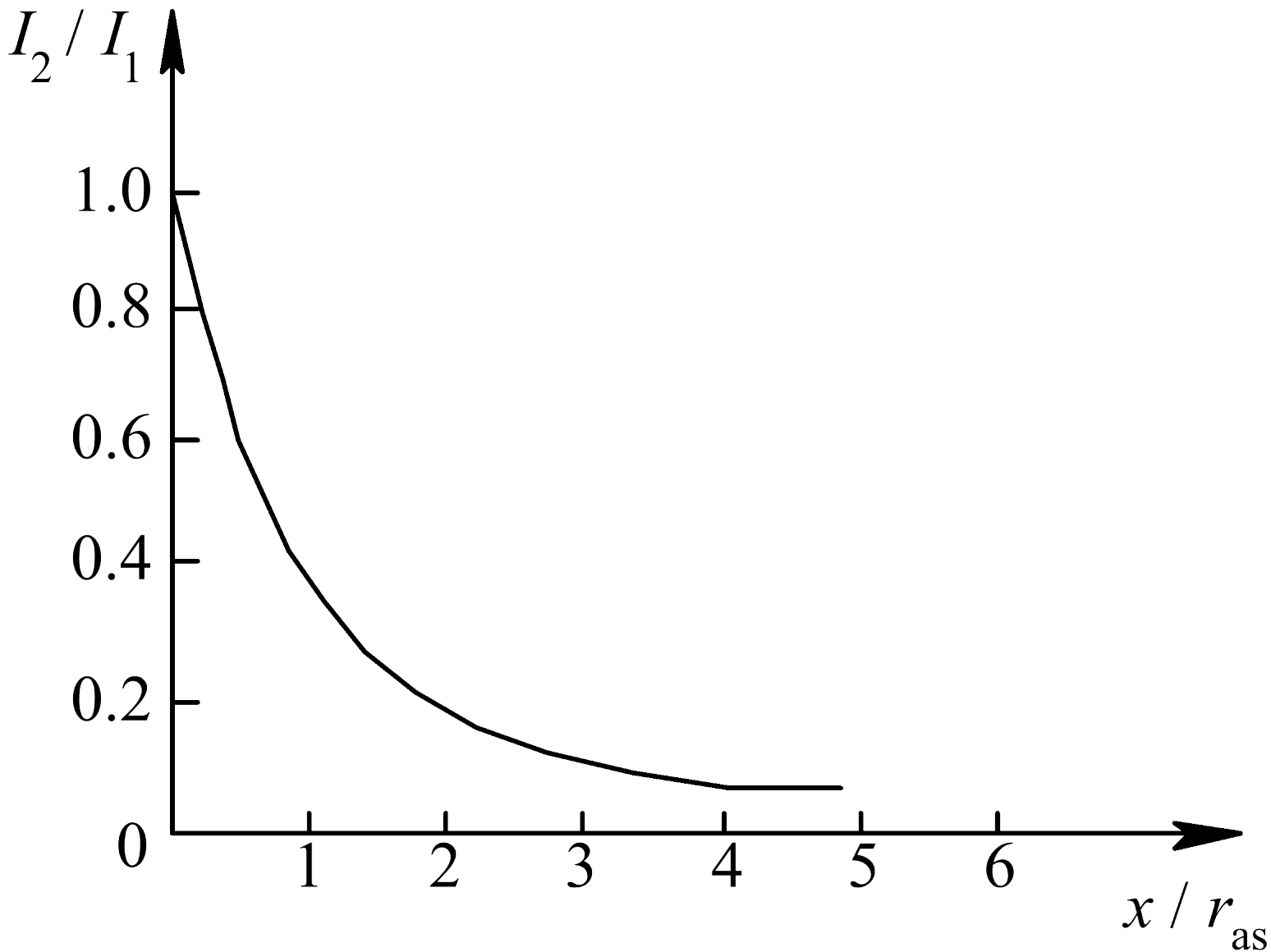


$I_1$ ——线圈激励电流；

$I_2$ ——金属导体中等效电流；

$x$ ——线圈到金属导体表面距离；

$r_{as}$ ——线圈外径。



# 电涡流强度与距离归一化曲线

# 金属导体表面的电涡流强度

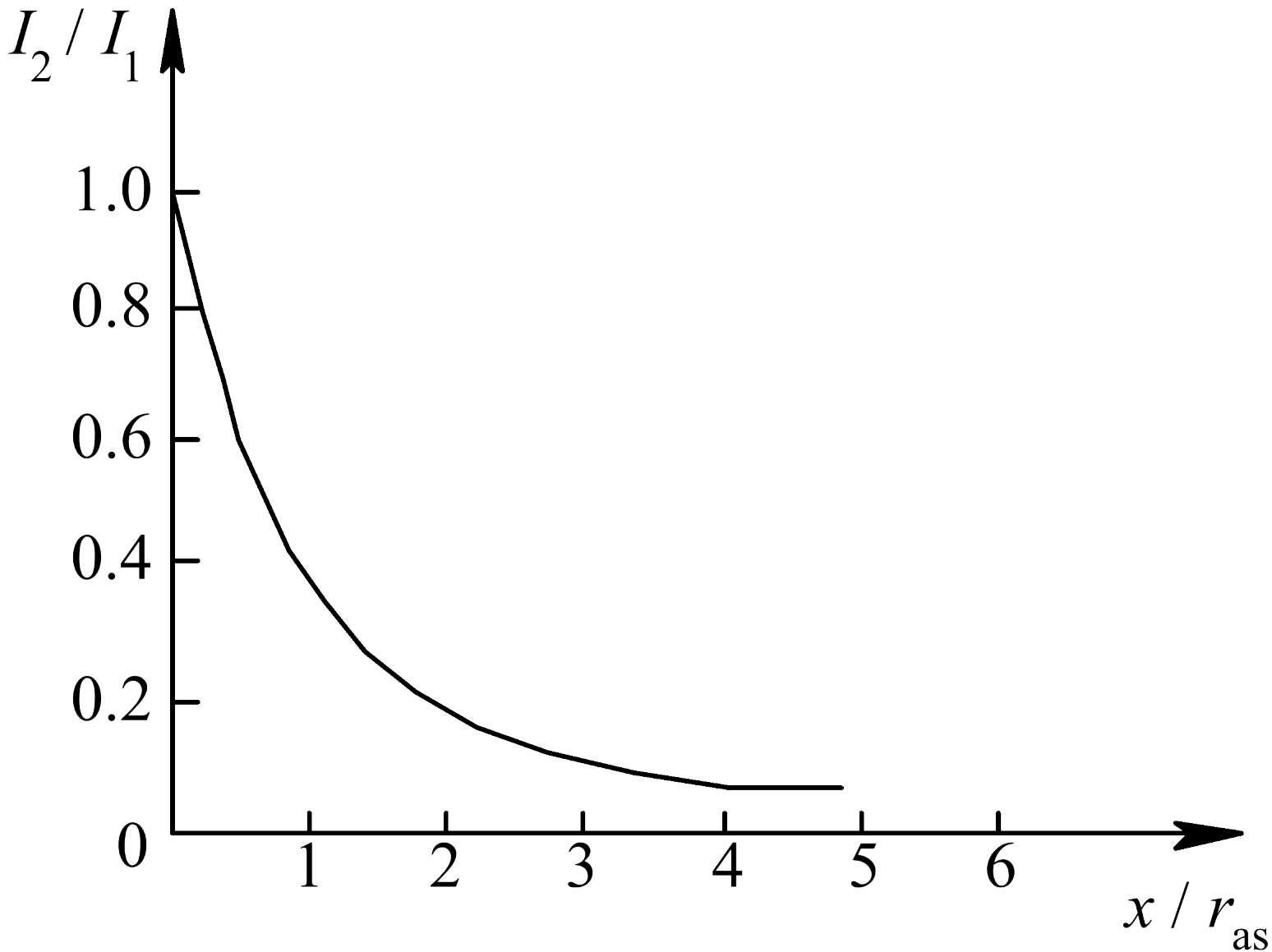
$$I_2 = I_1 \left[ 1 - \frac{x / r_{as}}{\sqrt{\left( \frac{x}{r_{as}} \right)^2 + 1}} \right]$$

① 电涡流强度与距离  $x$  呈非线性关系，且随着  $x/r_{as}$  的增加而迅速减小。

② 当利用电涡流式传感器测量位移时，只有在  $x/r_{as} \ll 1$  (一般取  $0.05 \sim 0.15$ ) 的条件下才能得到较好的线性和较高的灵敏度。

# 金属导体表面的电涡流强度

$$I_2 = I_1 \left[ 1 - \frac{x / r_{as}}{\sqrt{\left( \frac{x}{r_{as}} \right)^2 + 1}} \right]$$



# 电涡流强度与距离归一化曲线

### 3. 电涡流的**轴向贯穿深度**

贯穿深度是指把电涡流强度减小到表面强度的  **$1/e$**  处的表面厚度。

由于金属导体的**趋肤效应**，电磁场不能穿过导体的无限厚度，仅作用于表面薄层和一定的径向范围内。

导体中产生的电涡流强度随导体厚度的增加按指数规律下降。

$$J_d = J_0 e^{-d/h}$$



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/466224150201011001>