



武汉理工大学
Wuhan University of Technology

无损检测技术

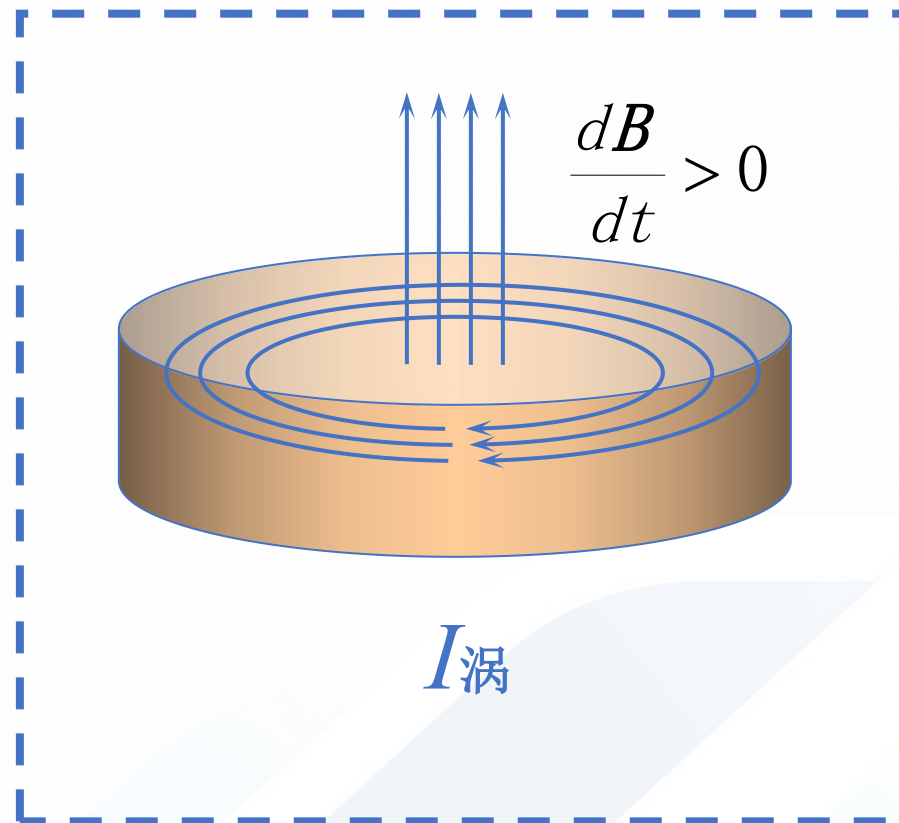
涡流检测技术(ET)

机电工程学院测控系

主讲人：魏 莉

什么是涡流

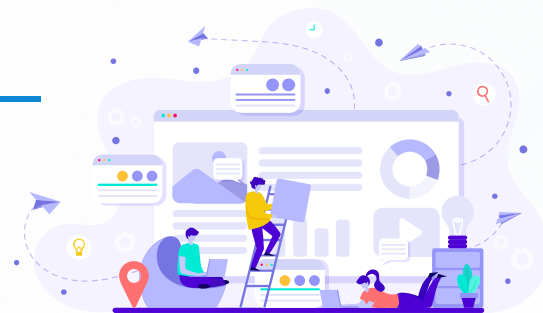
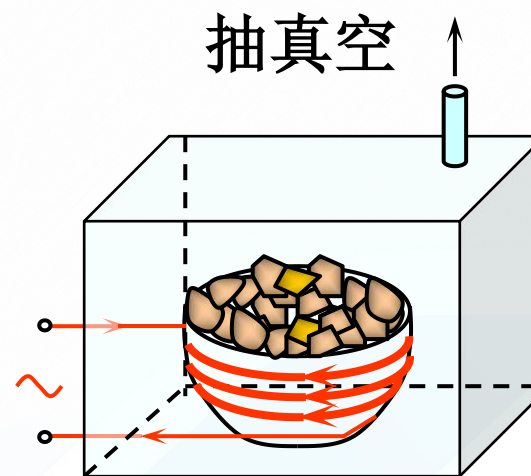
将导体放入变化的磁场中时，由于在变化的磁场周围存在着涡旋的感生电场，感生电场作用在导体内的自由电荷上，使电荷运动，形成涡流。



涡流的应用

(1) 工频感应炉的应用

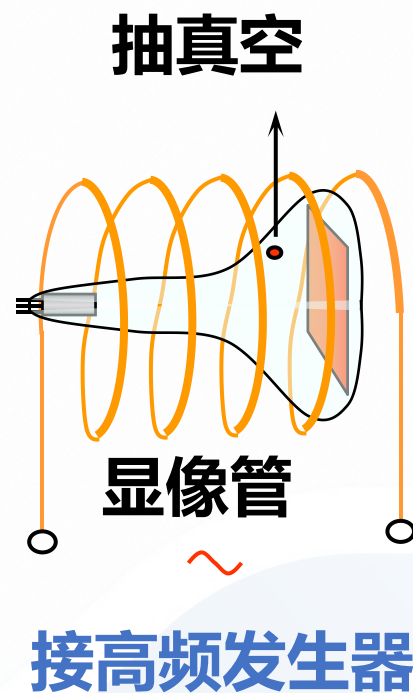
在冶金工业中，某些熔化活泼的稀有金属在高温下容易氧化，将其放在真空环境中的坩埚中，坩埚外绕着通有交流电的线圈，对金属加热，防止氧化。



涡流的应用

(2)用涡流加热金属电极

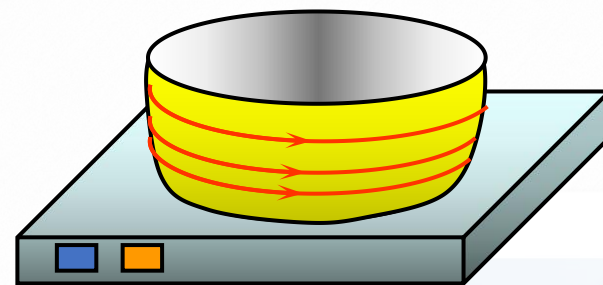
在制造电子管、显像管或激光管时，在做好后要抽气封口，但管子里金属电极上吸附的气体不易很快放出，必须加热到高温才能放出而被抽走，利用涡流加热的方法，一边加热，一边抽气，然后封口。



涡流的应用

(3)电磁炉

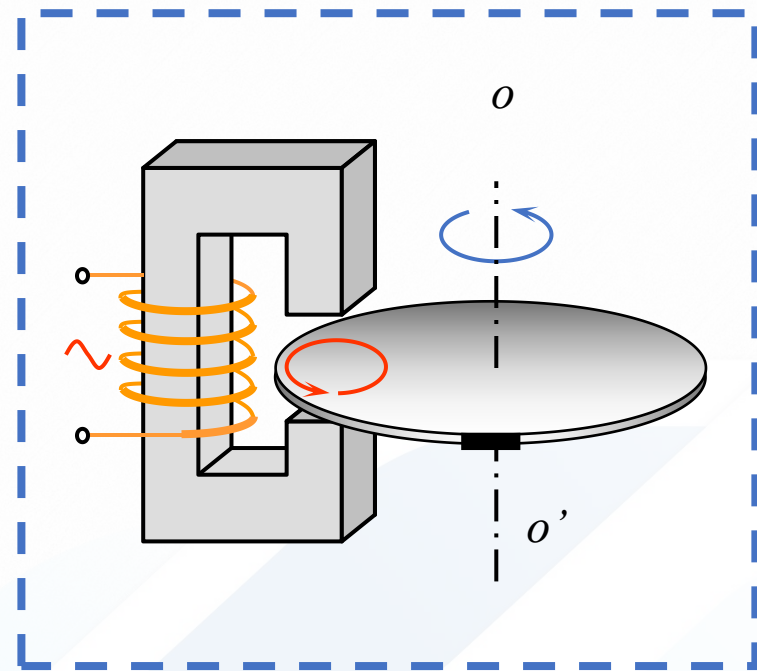
在市面上出售的一种加热炊具----电磁炉。这种电磁炉加热时炉体本身并不发热，在炉内有一线圈，当接通交流电时，在炉体周围产生交变的磁场，当金属容器放在炉上时，在容器上产生涡流，使容器发热，达到加热食物的目的。



涡流的应用

(4)电度表记录电量

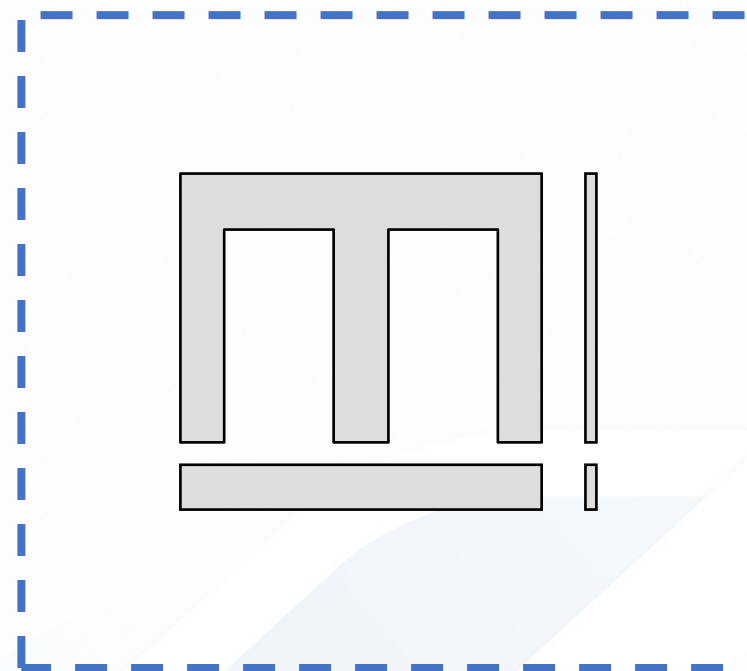
电度表记录用电量，就是利用通有交流电的铁心产生交变的磁场，在缝隙处铝盘上产生涡流，涡流的磁场与电磁铁的磁场作用，表盘受到一转动力矩，使表盘转动。



涡流的危害

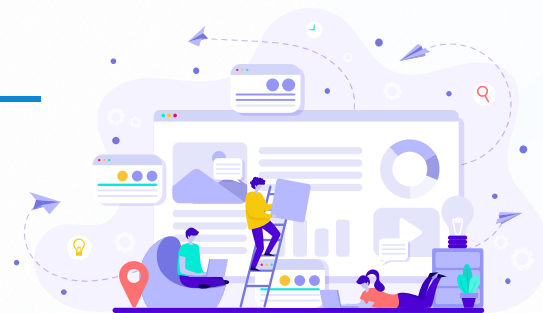
由于涡电流在导体中产生热效应，在制造变压器时，就不能把铁心制成实心的，这样在变压器工作时在铁心中产生较大的涡流，使铁心发热，造成漆包线绝缘性能下降，引发事故。

因此在制作变压器铁心时，用多片硅钢片叠合而成，使导体横截面减小，涡流也较小。



2.1 涡流检测概述

一、发展历程



1824年 加贝 涡流存在

1831年 法拉第 电磁感应现象

1873年 麦克斯韦方程 电磁场理论

1879年 休斯 首次应用判断不同金属和合金

1926年 涡流测厚仪

1935年 涡流探伤仪

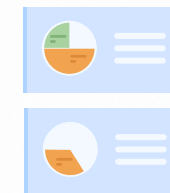
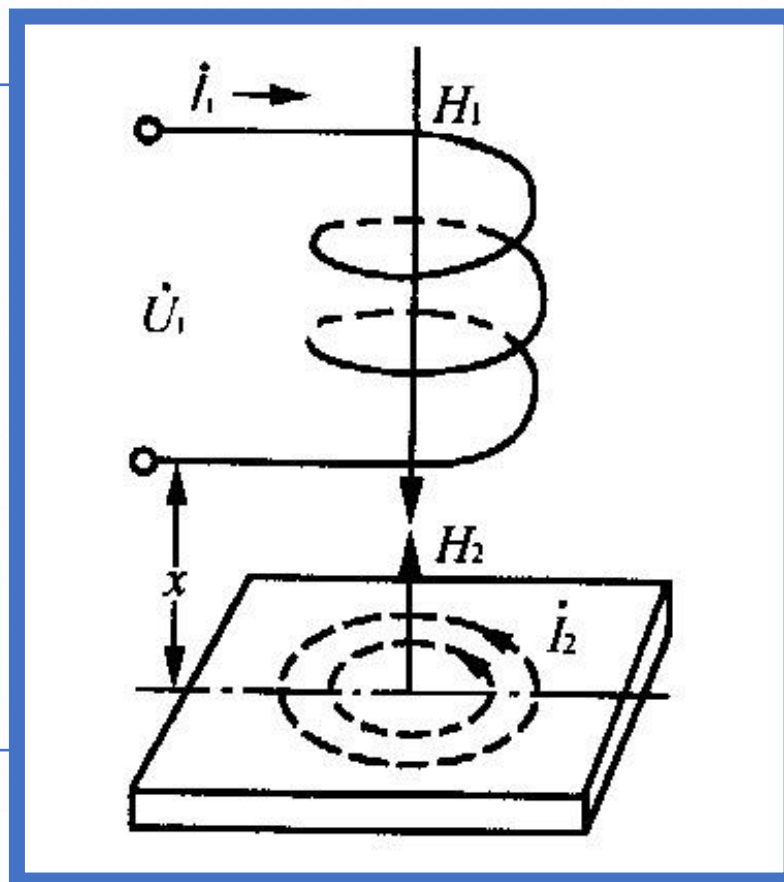
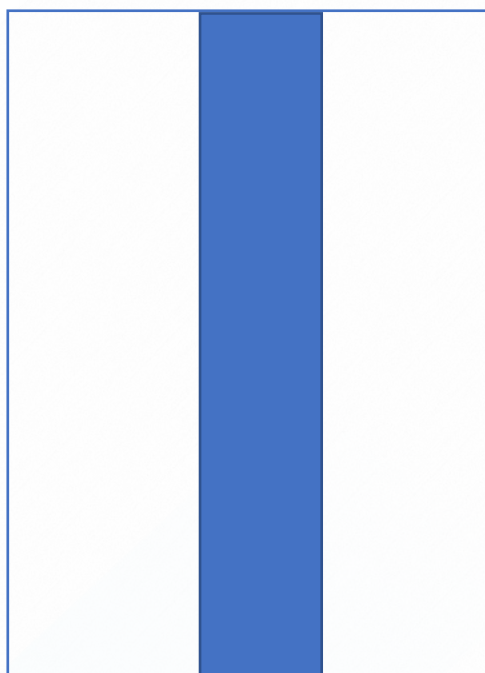
1942年 自动化检测

50年代 福斯特 阻抗分析法 理论和实践的完善

60年代 我国开始研究，主要应用于航天等领域

2.1 涡流检测概述

二、涡流检测原理



2.1 涡流检测概述

三、涡流检测方法



间接方法



2.1 涡流检测概述

四、涡流检测特点

优点：

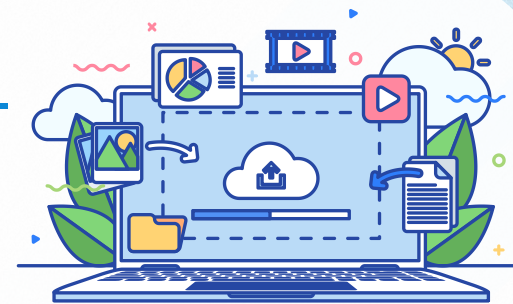
- 是一种表面或近表面的无损检测方法。表面检测灵敏度高
- 无耦合，非接触
- 速度快，易于自动化
- 可测参量多，应用面广
- 可用于高温检测以及异型或小零件检测
- 结果便于记录和分析
- 无污染



2.1 涡流检测概述

缺点:

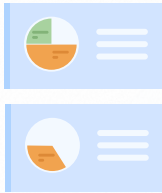
- 只能用于导电材料检测
- 对深层缺陷不敏感
- 区分不同参量的影响困难
- 难于进行定量分析
- 检测复杂形状零件效率低
- 检测结果不直观

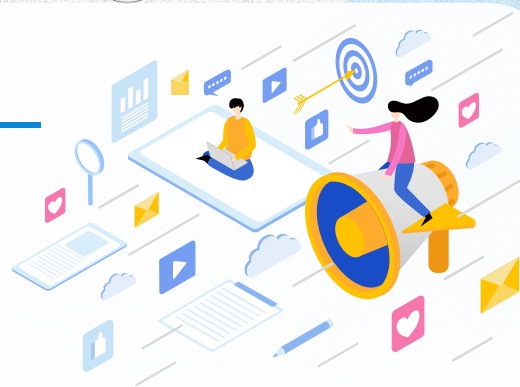


2.1 涡流检测概述

涡流检测应用范围

检测目的	影响涡流特性的主要因素	用途
探伤	缺陷形状、尺寸、位置	导电材料、零部件的缺陷检测； 设备、构件等在役检测
材质分选	电导率、磁参量	混料分选；材质检测
测厚	距离、薄板厚度	涂覆层厚度；板厚测量
尺寸检测	工件尺寸、形状	工件尺寸和形状的测控
物理量测量	工件与检测线圈间的距离	振动、位移、运动轨迹的检测





2.2 涡流检测基础知识

2.2.1 金属材料的电磁特性

一、金属材料的导电性能

材料按导电性分类：导体、绝缘体、半导体

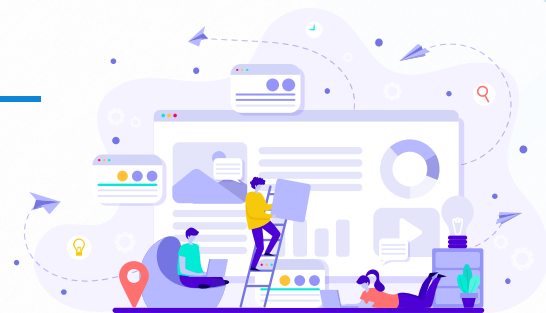
$$R = \rho \frac{l}{S} (\Omega) \quad \rho \text{ —— 电阻率 } (\Omega \cdot m)$$

$$\text{电导率: } \sigma = \frac{1}{\rho} (S / m)$$

例：退火工业纯铜的电阻率在温度20度时为 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$

或 $1.7241 \mu\Omega \cdot cm$ 或 $1.7241 \times 10^{-2} \Omega \cdot mm^2 / m$

2.2 涡流检测基础知识



IACS：国际退火铜标准

规定退火工业纯铜（电阻率在温度20度为 $1.7241 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ）的电导率作为100%IACS。其它金属的电导率表示为：

$$\sigma_x = \left[\frac{\text{标准退火铜电阻率}}{\text{金属的电阻率}} \right] \times 100\% \quad (\text{IACS})$$

2.2 涡流检测基础知识

影响金属导电性的主要因素包括：

- 温度：固态、液态
- 应力：拉伸、扭转、压应力
- 形变：范性形变
- 热处理：退火、淬火
- 成分：固溶体



2.2 涡流检测基础知识

二、金属材料的导磁性能

01 几个基本概念

- 磁场强度H: 作用于单位磁极的磁力大小
- 磁通 Φ : 穿过某一空间的磁力线
- 磁感应强度B: 穿过单位面积的磁通量

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

$$B = \mu H$$

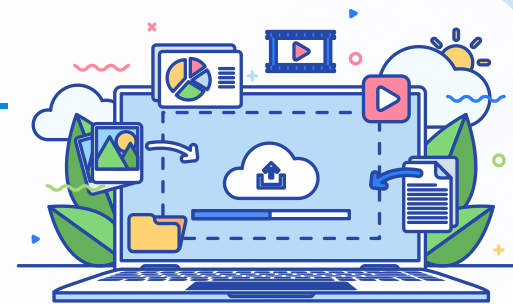
$$\mu = \mu_0 \mu_r$$



2.2 涡流检测基础知识

02

物质的导磁性能



磁导率：真空磁导率 μ_0 、相对磁导率 μ_r

按 μ_r 值的不同，磁介质分为三类：

$\mu_r > 1$ ：顺磁质，氧、铝、钨、铂、铬等。

$\mu_r < 1$ ：抗磁质，氮、水、铜、银、金等。

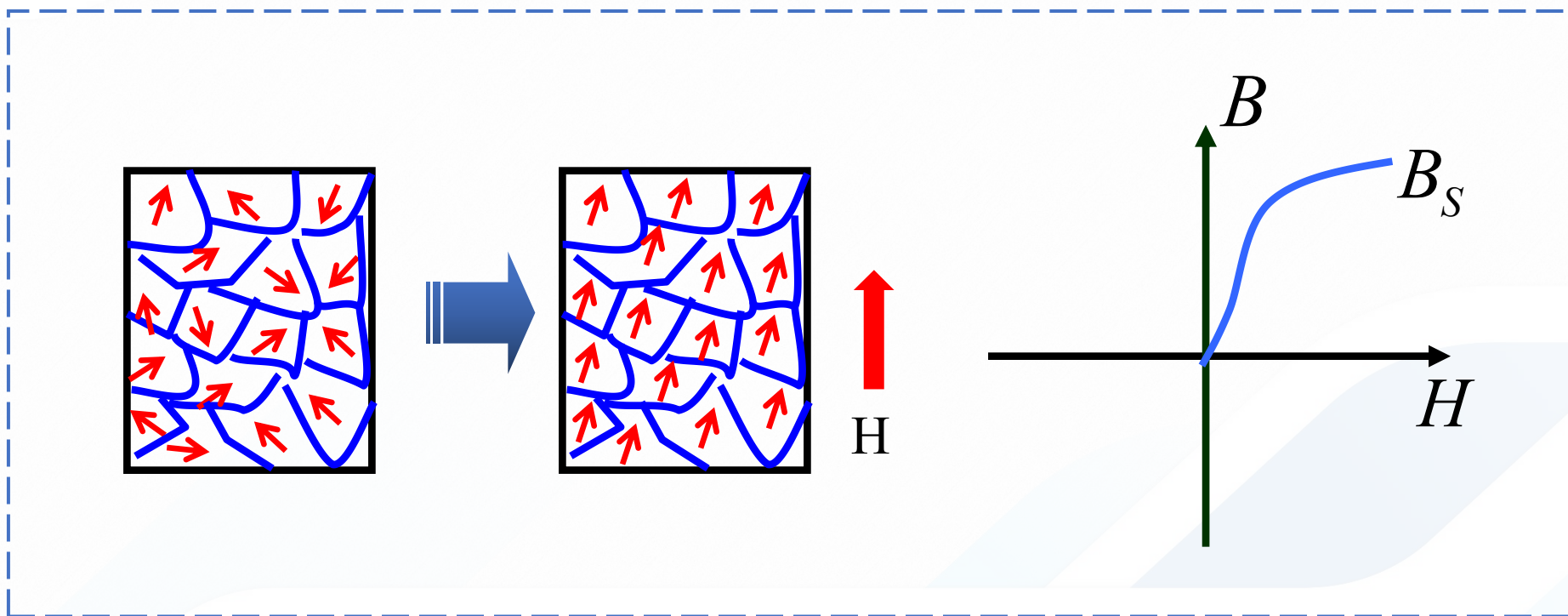
$\mu_r \gg 1$ ：铁磁质，铁、钴、镍等。

2.2 涡流检测基础知识

03

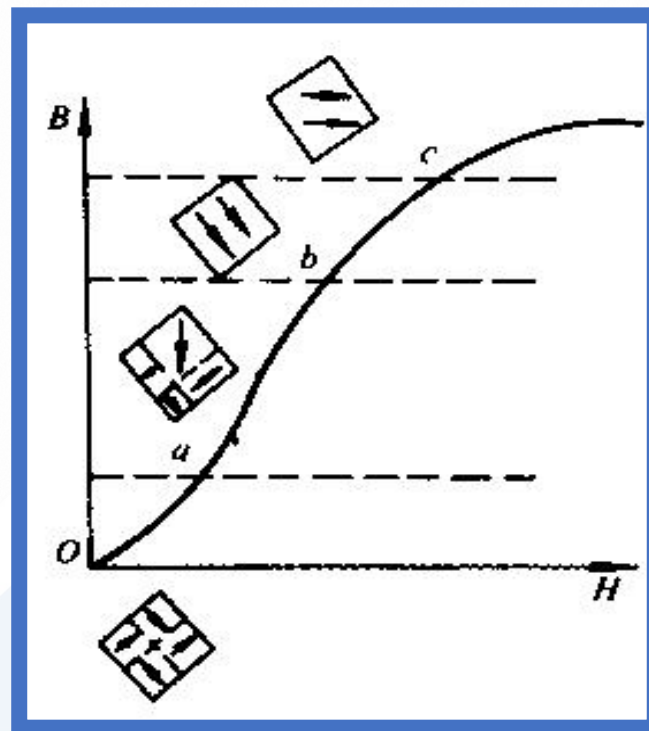
铁磁质

技术磁化的过程

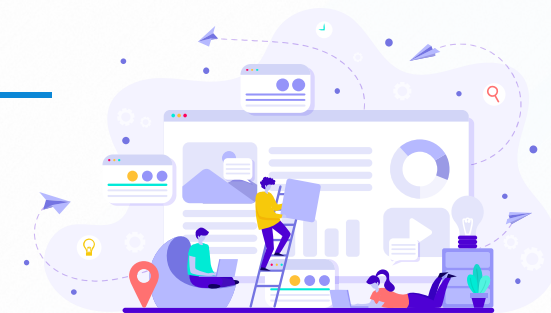


2.2 涡流检测基础知识

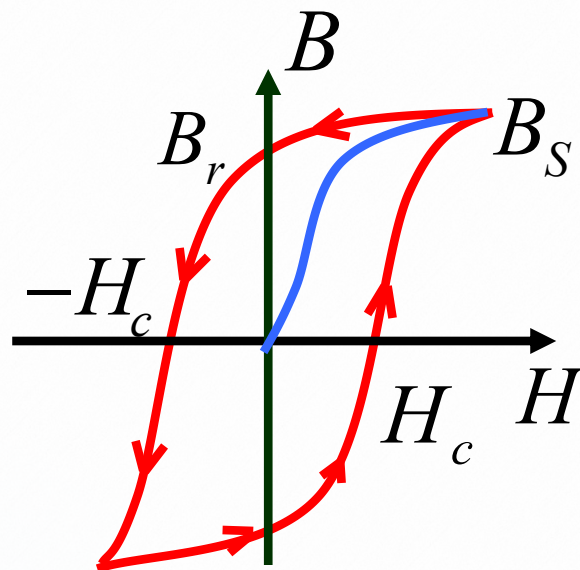
- 可逆磁化阶段：以可逆的磁畴壁位移为主，当磁场强度 H 退回零时，磁感应 B 也退回零；
- 急剧磁化阶段：这阶段主要是不可逆的畴壁位移起作用，当 H 退回零时，磁化强度并不循原路退回，而是沿另一条路退回，形成不可逆磁化。
- 近饱和磁化阶段：畴壁位移基本结束，主要是磁畴中磁矩的转动，形成曲线的“膝弯点”
- 饱和磁化阶段：磁畴排列方向与外磁场方向接近平行，这时再增大外磁场强度，磁化强度增加也不大，反映在 B 值的上升趋于平缓，很少增加数值。



2.2 涡流检测基础知识



磁滞回线



2.2 涡流检测基础知识

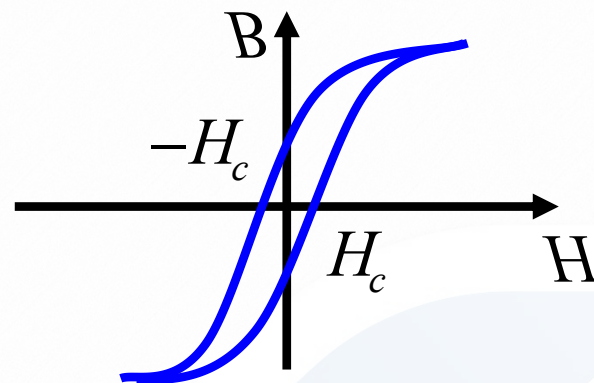
软磁材料

纯铁，硅钢，坡莫合金(Fe , Ni), 铁氧体等。

μ_r 大，易磁化、易退磁（起始磁化率大）。

饱和磁感应强度大，矫顽力(H_c)小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小。

作变压器，还用于继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。



2.2 涡流检测基础知识

硬磁材料

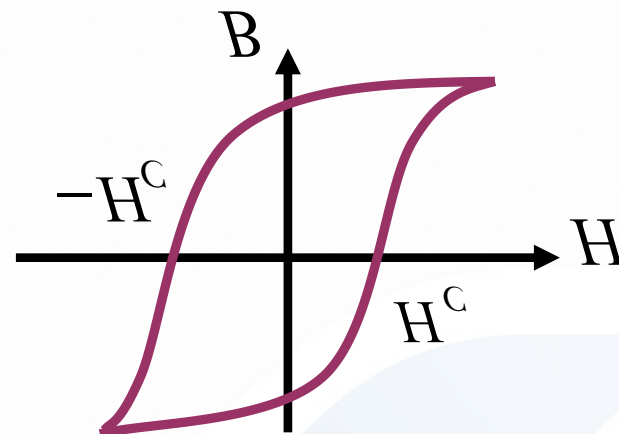
钨钢，碳钢，铝镍钴合金

矫顽力(H_c)大 ($>102\text{A/m}$)，剩磁 B_r 大。

磁滞回线的面积大，损耗大。

永久磁铁，还用于磁电式电表中的永磁铁。

耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

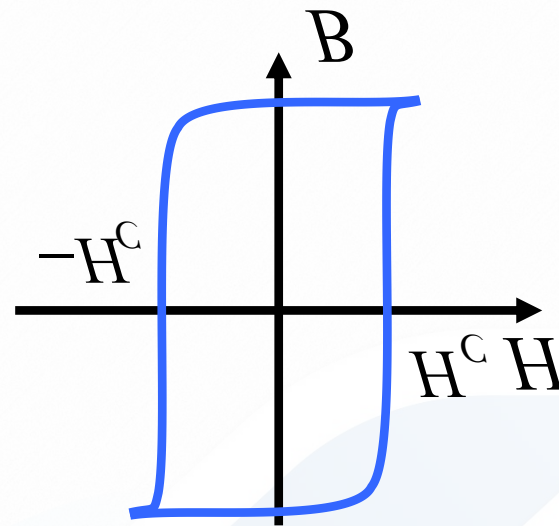


2.2 涡流检测基础知识

矩磁材料

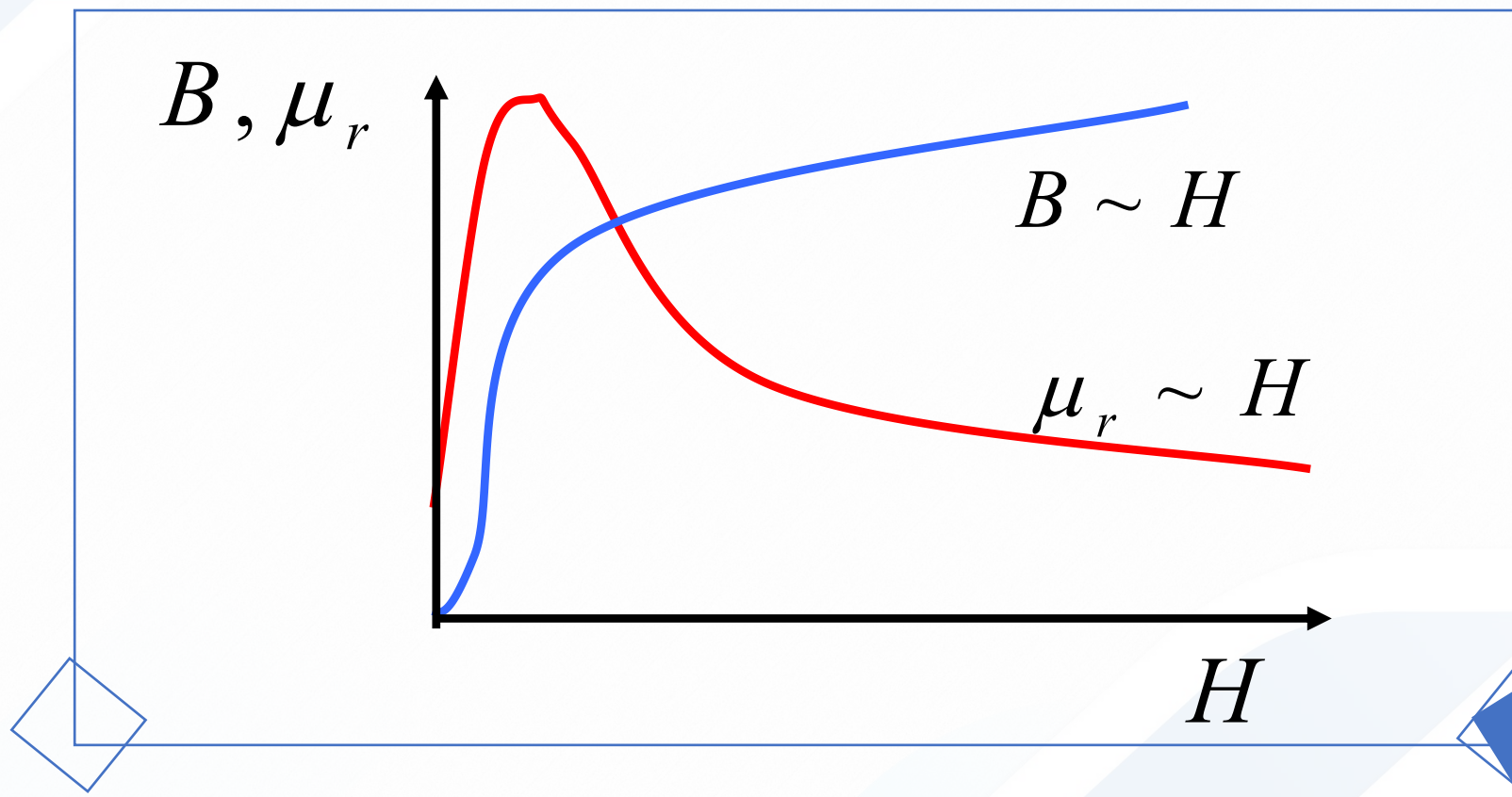
锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r = B_s$ ， H_c 不大，磁滞回线是矩形。用于记忆元件，当+脉冲产生 $H > H_c$ 使磁芯呈+B态，则-脉冲产生 $H < -H_c$ 使磁芯呈-B态，可做为二进制的两个态。



2.2 涡流检测基础知识

磁导率曲线



影响材料铁磁性的因素：温度、形变、材料组织等

2.2 涡流检测基础知识

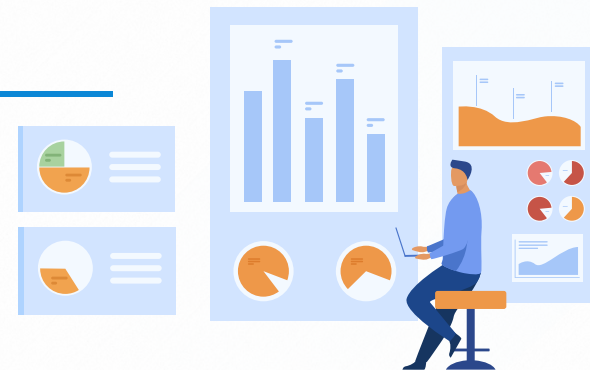
2.2.1 电磁现象基本规律

一、几个基本规律

1. 毕奥 - 萨伐尔定律:

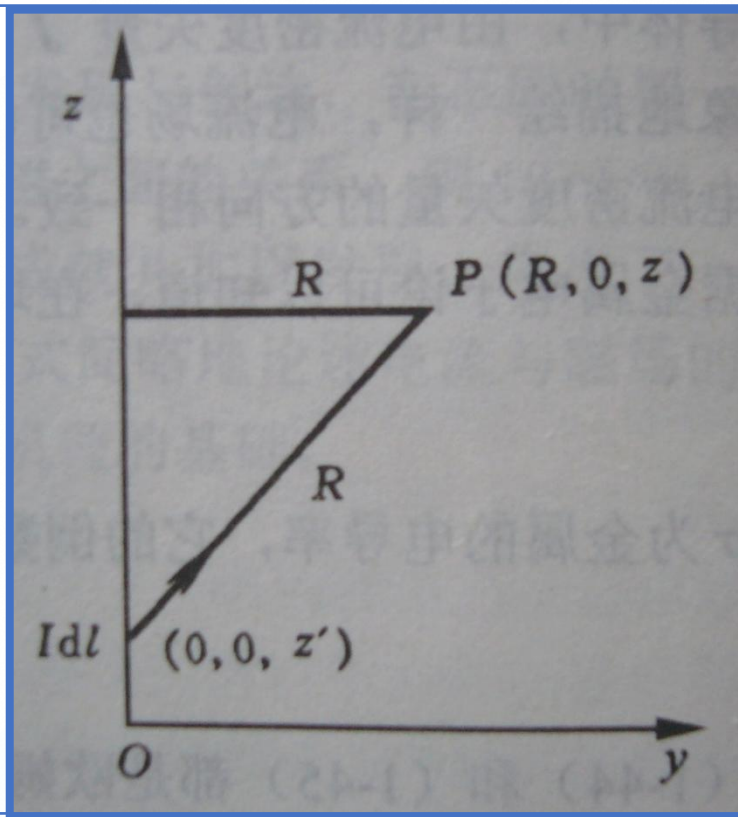
载流导线在真空中某点产生的磁感应强度为导线的每个电流元产生的磁感应强度的矢量和。

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r_0}{r^2} \quad B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{Idl \times r_0}{r^2}$$

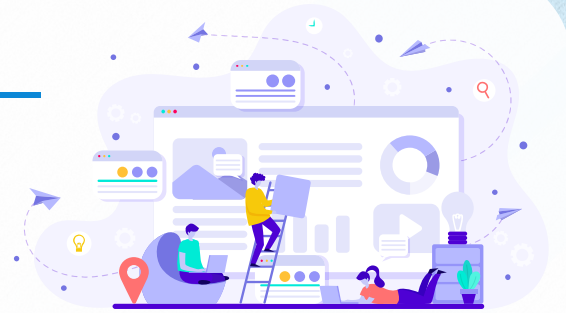


2.2 涡流检测基础知识

载流无限长直导线的磁场

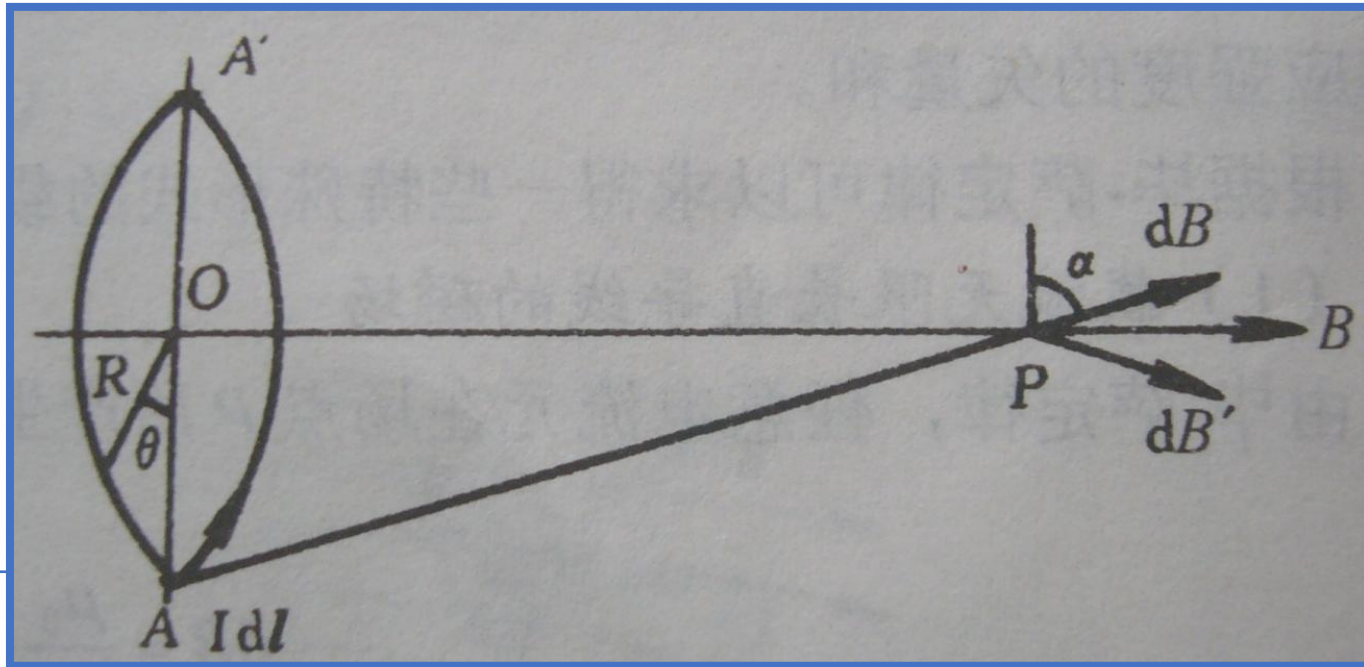


$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$



2.2 涡流检测基础知识

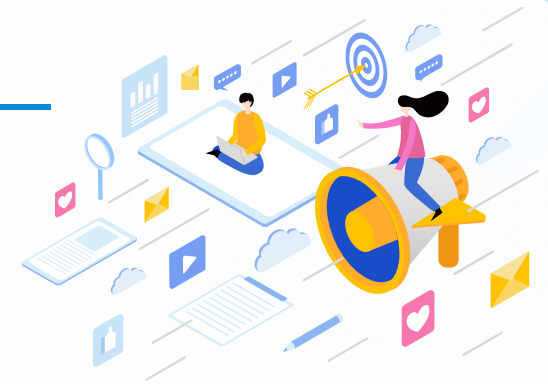
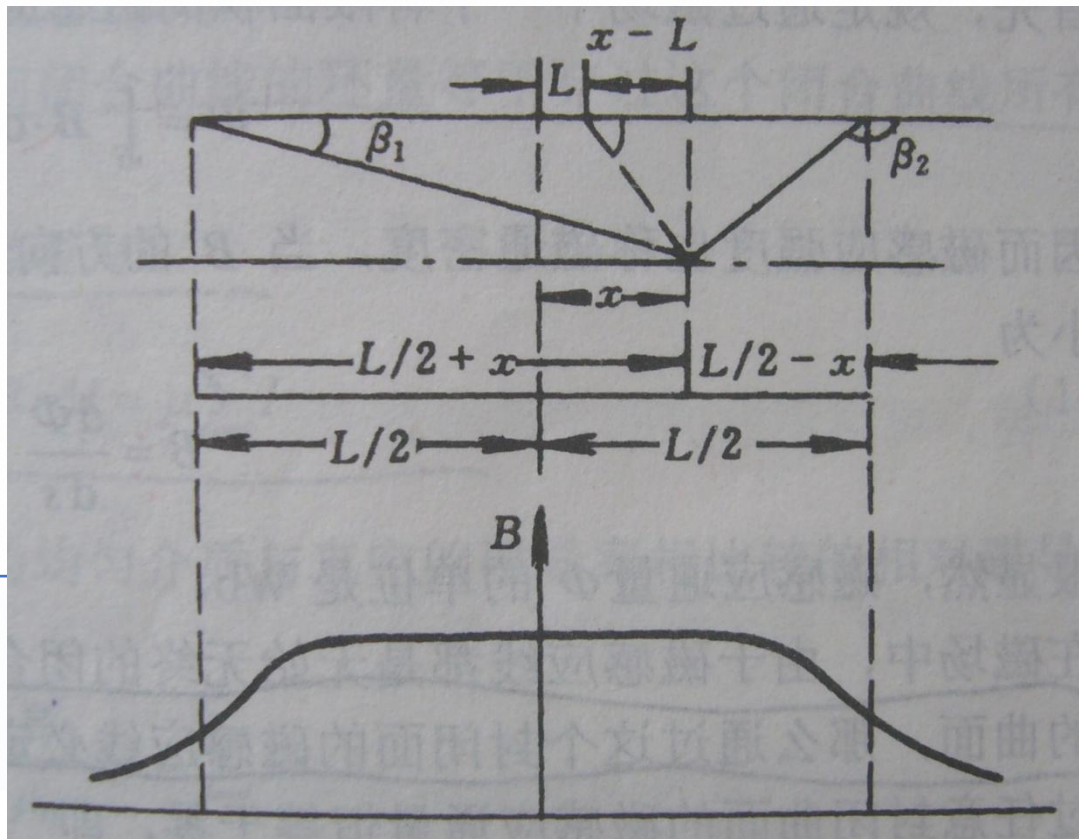
载流圆线圈轴线的磁场



$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

2.2 涡流检测基础知识

载流螺线管的磁场



2.2 涡流检测基础知识

2.安培环路定理:



在稳恒电流的磁场中，磁感应强度 B 沿任何闭合回路 L 的线积分，等于穿过这回路的所有电流强度代数总和的 μ_0 倍。

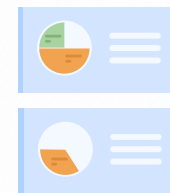
$$\oint_L B \cdot dl = \mu_0 \sum I$$

2.2 涡流检测基础知识

3.磁的高斯定理:

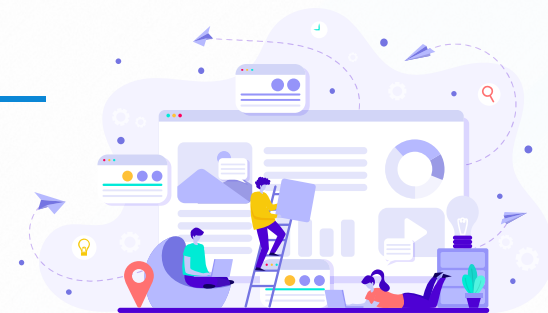
从一个闭合面 S 的某处穿进的磁感应线必定要从另一处穿出, 所以通过任意闭合面 S 的磁通量恒等于0。

$$\oint_S B \cdot dS = 0$$



2.2 涡流检测基础知识

4.电的高斯定理:



通过任意一个闭合曲面S的电位移矢量等于该面所包围的所有电荷电量的代数和。

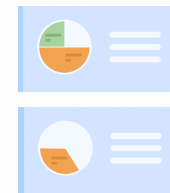
$$\oint_S D \cdot dS = q$$

2.2 涡流检测基础知识

5. 法拉第电磁感应定律:

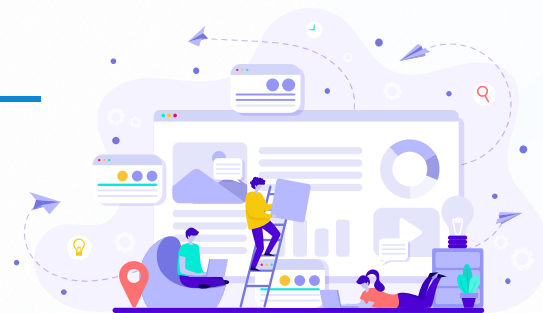
当通过一导体回路所包围的面积磁通量发生变化时，在回路中就会产生感生电动势和感生电流，描述该感生电动势和磁场变化之间的关系即为法拉第电磁感应定律。

$$\oint_l E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds$$



2.2 涡流检测基础知识

二、麦克斯韦电磁方程组（积分形式）



$$\oint_l H \cdot dl = I_0 + \int_s \frac{\partial D}{\partial t} \cdot ds$$

$$\oint_l E \cdot dl = - \int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds$$

$$\oint_s D \cdot ds = q_0$$

$$\oint_s B \cdot ds = 0$$

2.2 涡流检测基础知识

二、麦克斯韦电磁方程组（微分形式）

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho$$

——高斯定律

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

——磁通连续定律

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

——法拉第电磁感应定律

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

——安培全电流定律

附：微分算符：

$$\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$$

散度：

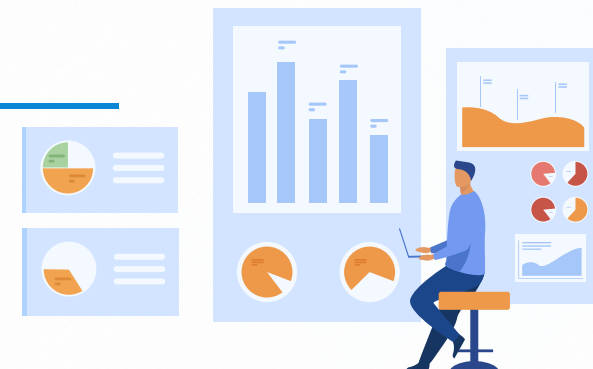
$$\nabla \cdot \vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

旋度：

$$\nabla \times \vec{A} = \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left(\frac{\partial A_y}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial x} \right) \vec{k}$$

2.2 涡流检测基础知识

物质方程



$$D = \varepsilon E = \varepsilon_r \varepsilon_0 E$$

$$B = \mu H = \mu_r \mu_0 H$$

$$J = \sigma E$$

2.2 涡流检测基础知识

三、电磁渗透方程



$$\nabla^2 \dot{H} = j\omega\mu\sigma \dot{H}$$

$$\nabla^2 \dot{E} = j\omega\mu\sigma \dot{E}$$

$$\nabla^2 \dot{J} = j\omega\mu\sigma \dot{J}$$

电磁渗透方程用于研究
导体内的电磁渗透现象
(电磁场分布规律)

附: $\nabla^2 \vec{E} = \vec{i} (\nabla^2 E)_x + \vec{j} (\nabla^2 E)_y + \vec{k} (\nabla^2 E)_z$

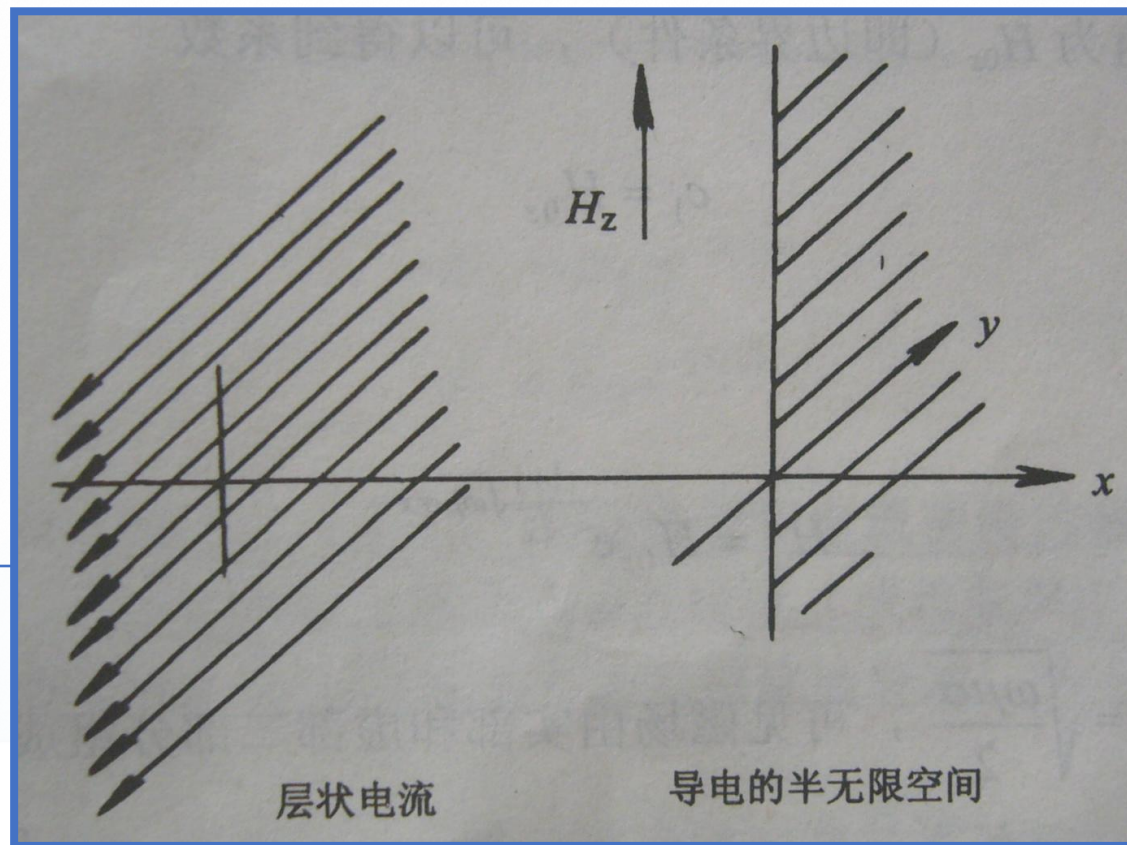
$$(\nabla^2 E)_x = \frac{\partial^2 E_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2}$$

$$(\nabla^2 E)_y = \frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_y}{\partial z^2}$$

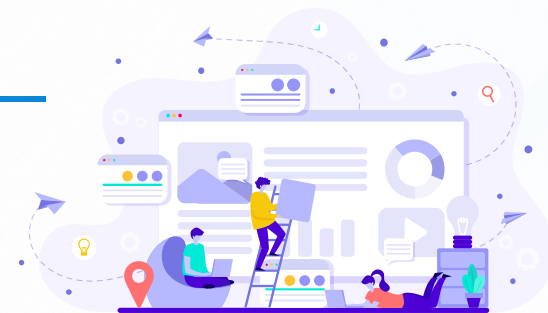
$$(\nabla^2 E)_z = \frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2}$$

2.2 涡流检测基础知识

四、半无限平面导体中的电磁场



2.2 涡流检测基础知识



$$\frac{d^2 H_z}{dx^2} = j\omega\mu\sigma H_z = K^2 H_z$$

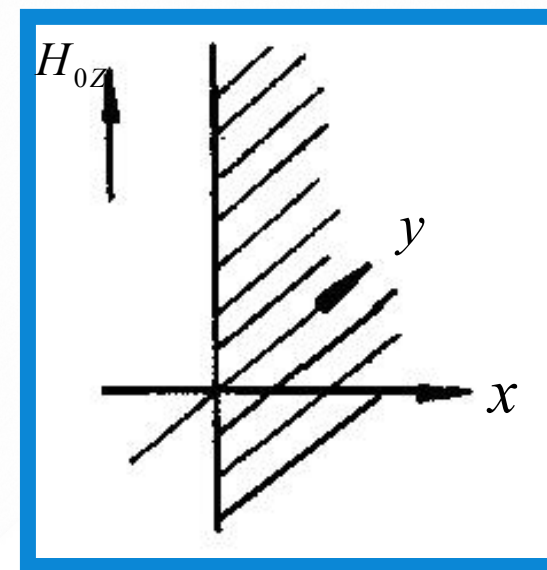
$$K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j)\sqrt{\pi f\mu\sigma}$$



$$H_z = c_1 e^{-Kx} + c_2 e^{+Kx} \quad c_2 = 0$$



$$H_z = H_{0z} e^{-\sqrt{\pi f\mu\sigma}x} e^{-j\sqrt{\pi f\mu\sigma}x}$$



2.2 涡流检测基础知识



导体中的涡流分布根据方程 $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ 求得，即：

$$\frac{dH_z}{dx} = -J_y$$

解得 $J_y = J_{0y} e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} x} e^{-j\sqrt{\pi f \mu \sigma} x}$

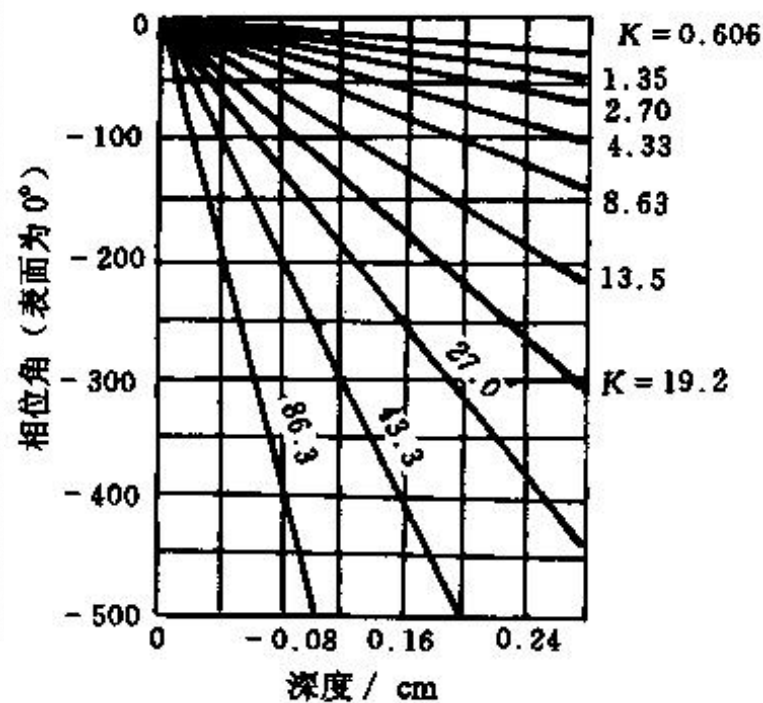
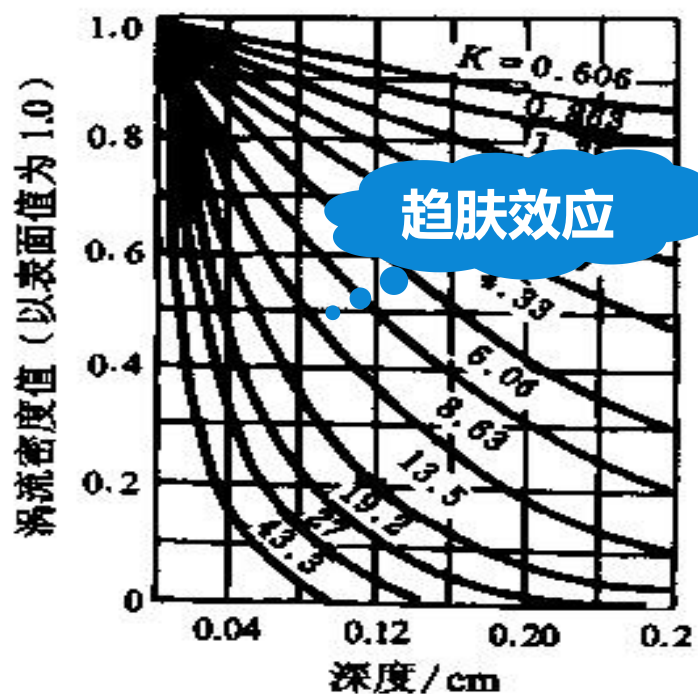
幅值

相位

2.2 涡流检测基础知识

$$J_y = J_{0y} e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} x} e^{-j\sqrt{\pi f \mu \sigma} x}$$

$$K = \sqrt{j\omega\mu\sigma} = (1+j)\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$



2.2 涡流检测基础知识



涡流的趋肤效应

当直流电流通过导线时，横截面上的电流密度是均匀的。但交变电流通过导线时，导线周围变化的磁场也会在导线中产生感应电流，从而会使沿导线截面的电流分布不均匀，表面的电流密度较大，越往中心处越小，尤其是当频率较高时，电流几乎是在导线表面附近的薄层中流动，这种现象称为**趋肤效应**。

简言之，涡流密度（磁场强度）随着进入导体深度的增加而衰减的现象称为涡流的趋肤效应。

2.2 涡流检测基础知识

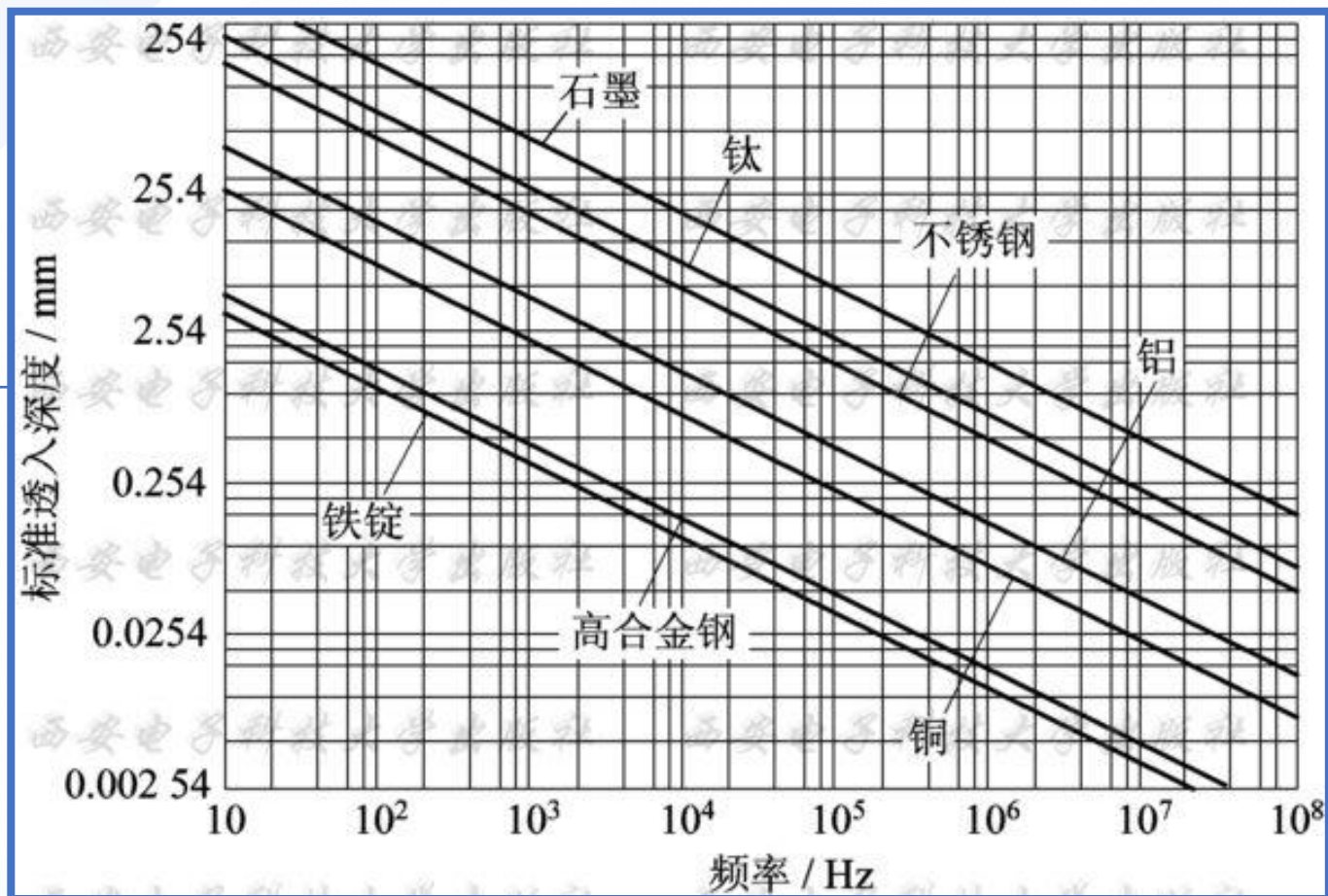
透入深度

趋肤效应的存在使感生涡流的密度从被检材料或工件的表面到其内部按指数分布规律递减。在涡流检测中，定义涡流密度衰减到其表面密度值的 $1/e$ (36.8%) 时对应的深度为标准透入深度，也称**趋肤深度**，用符号 δ 表示。

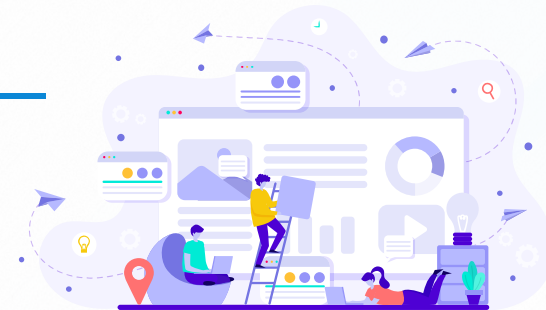
$$J_y = J_{0y} e^{-\sqrt{\pi f \mu \sigma} x} e^{-j \sqrt{\pi f \mu \sigma} x}$$

$$\sqrt{\pi f \mu \sigma} \cdot \delta = 1 \quad \Rightarrow \quad \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

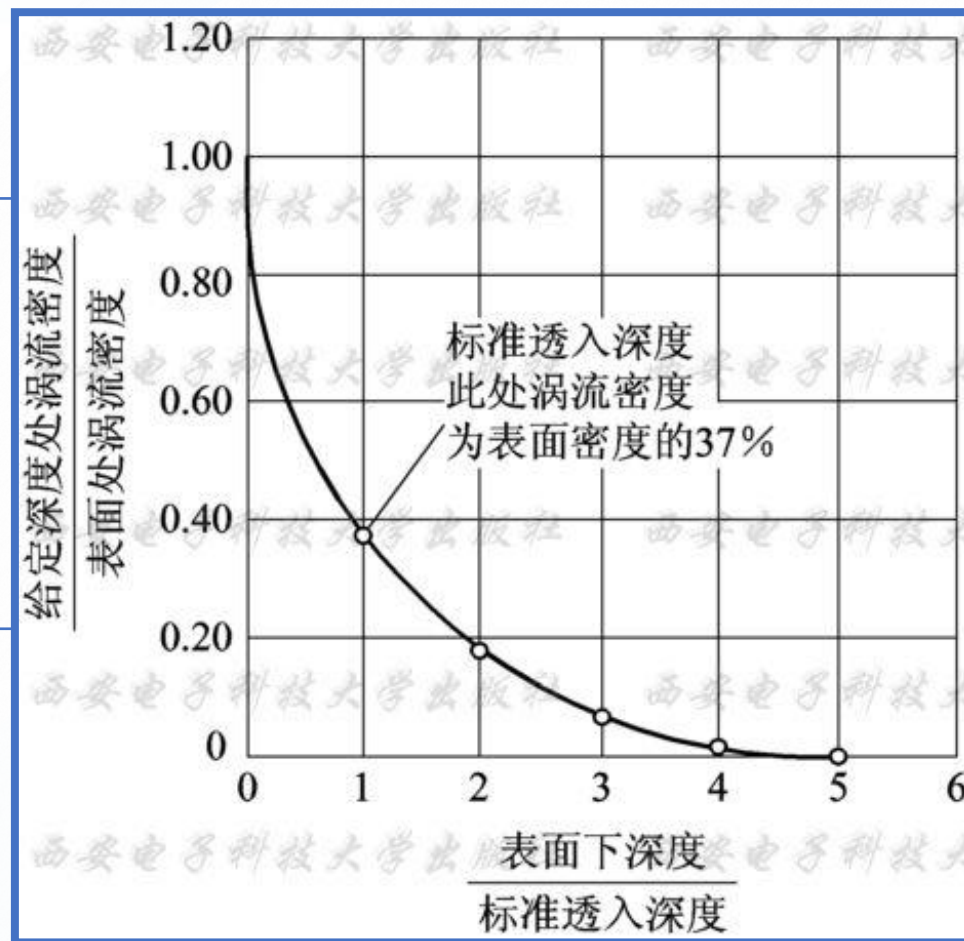
2.2 涡流检测基础知识



几种不同材料的标准透入深度与频率的关系



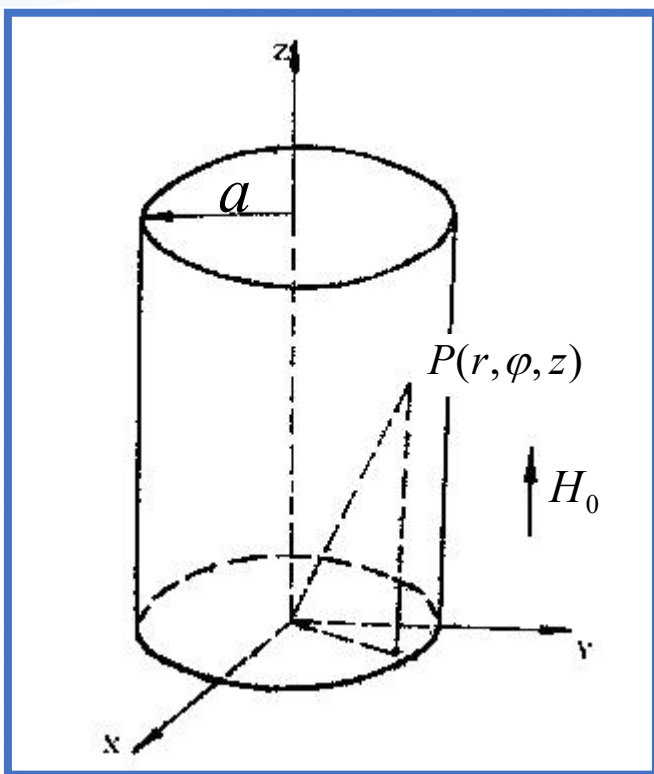
2.2 涡流检测基础知识



透入半无限大导体的涡流密度与透入深度的关系

2.2 涡流检测基础知识

五、导电长圆柱体中的电磁场



$$\nabla^2 \vec{H} = j\omega\mu\sigma \vec{H} \Rightarrow \nabla^2 H_z = j\omega\mu\sigma H_z$$

在柱坐标系中展开得：

$$\frac{d^2 H_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dH_z}{dr} - j\omega\mu\sigma H_z = 0$$

该方程为零阶贝塞尔方程，其通解为：

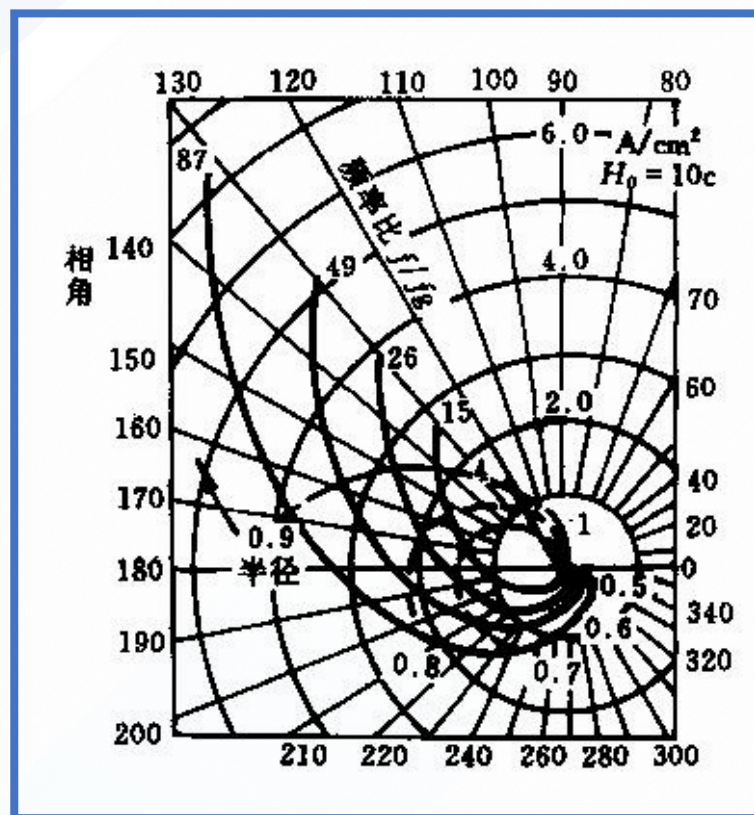
$$H_z = C_1 J_0(\sqrt{-j}kr) + C_2 K_0(\sqrt{j}kr)$$

结合边界条件得：

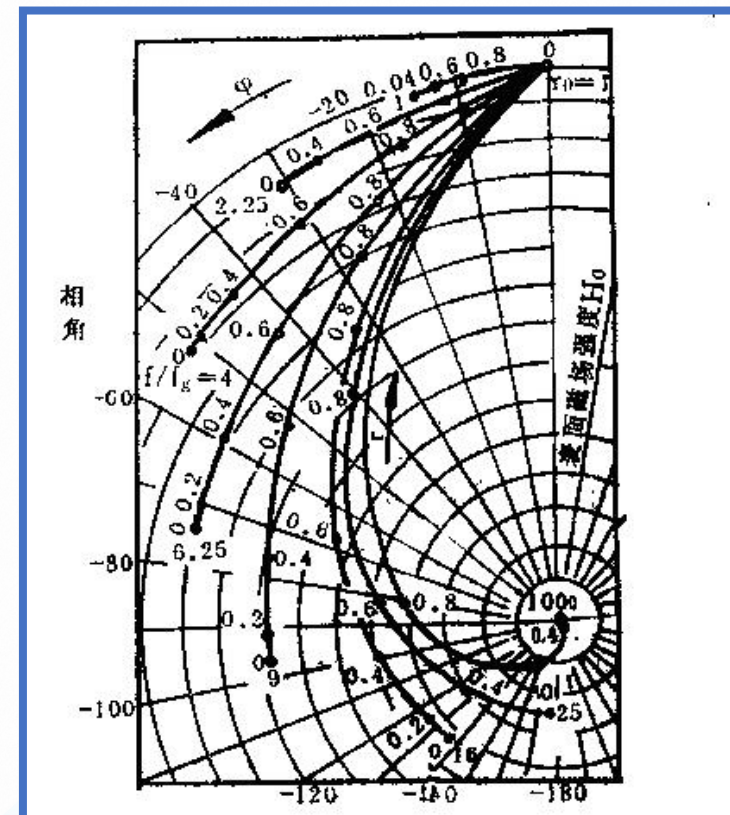
$$H_z = H_0 \frac{J_0(\sqrt{-j}kr)}{J_0(\sqrt{-j}ka)}$$

2.2 涡流检测基础知识

导体中的涡流分布根据方程 $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ 求得, 即: $J_{\varphi} = -H_0 \frac{J'_0(\sqrt{-jkr})}{J_0(\sqrt{-jka})}$

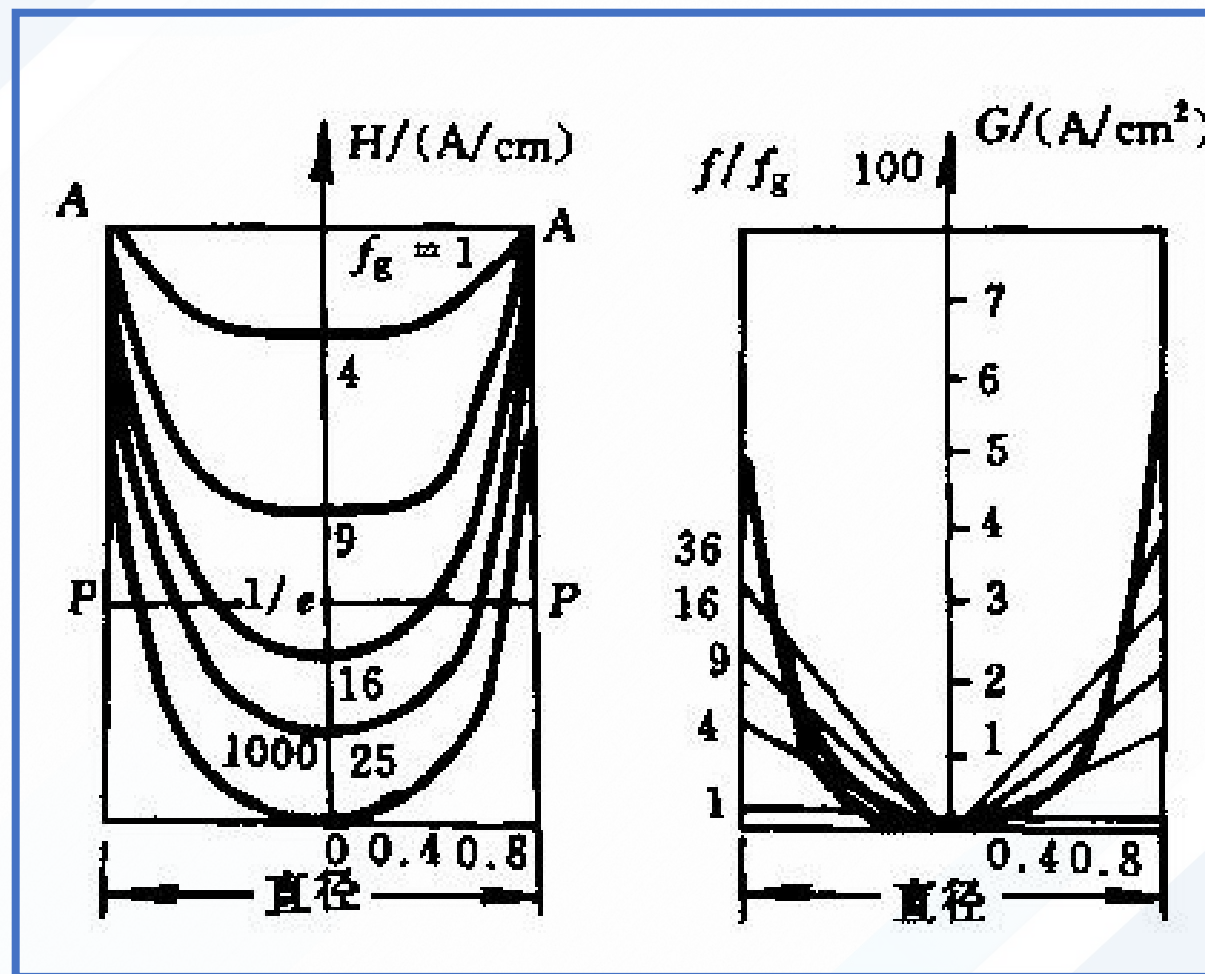
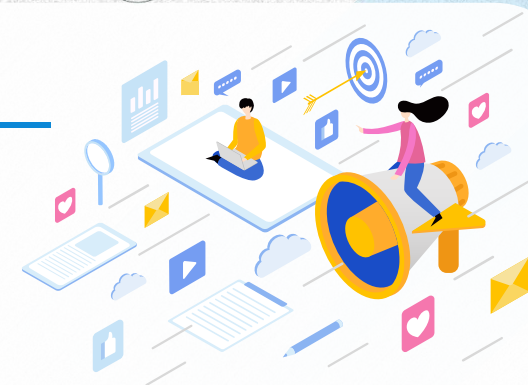


金属圆柱体涡流分布的幅值和相位



金属圆柱体磁场分布的幅值和相位

2.2 涡流检测基础知识



不同频率比时磁场和涡流的振幅与圆柱体径向位置的关系

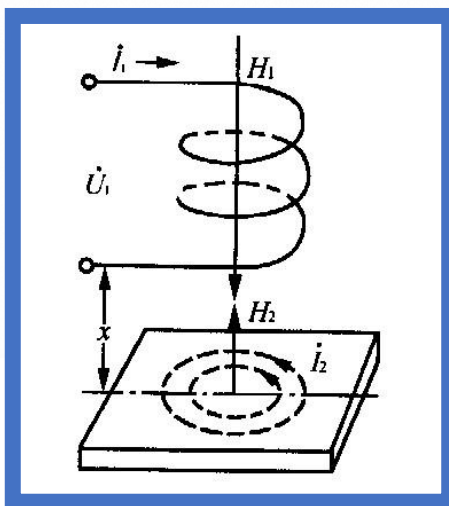
2.3 涡流阻抗分析法

阻抗分析法:

是以分析涡流效应引起线圈阻抗变化及其相位变化之间的密切关系为基础，从而鉴别各影响因素效应的一种分析方法。

一、线圈的阻抗和阻抗归一化

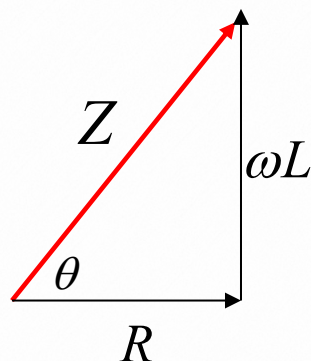
1. 线圈的阻抗



$$Z = R + j\omega L$$

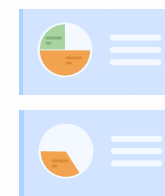
2.3 涡流阻抗分析法

$$Z = R + j\omega L$$

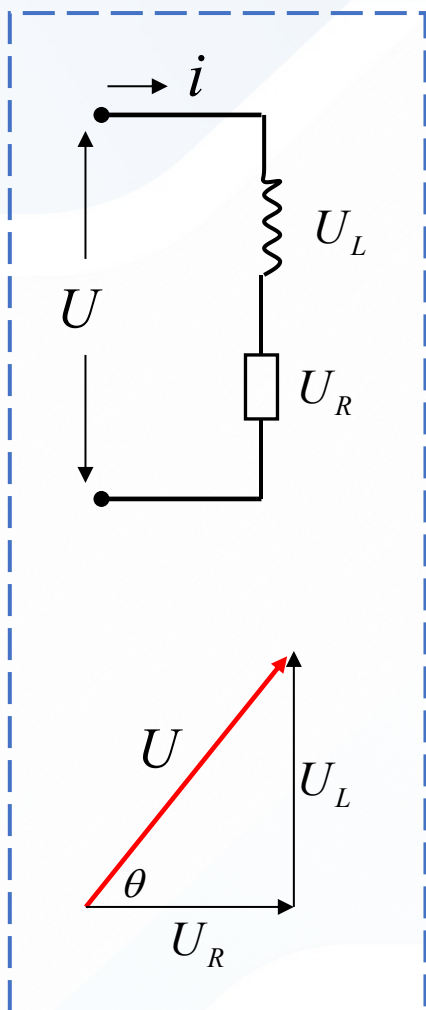


阻抗:
$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

相位角:
$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{U_L}{U_R} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$$



2.3 涡流阻抗分析法



设激励电流: $i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2}I \sin \omega t$

则电阻两端的交流电压降为:

$$u_R = Ri = R\sqrt{2}I \sin \omega t$$

电压电流
同相

电压有效值为: $U_R = RI$

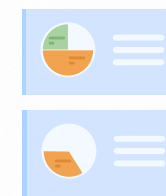
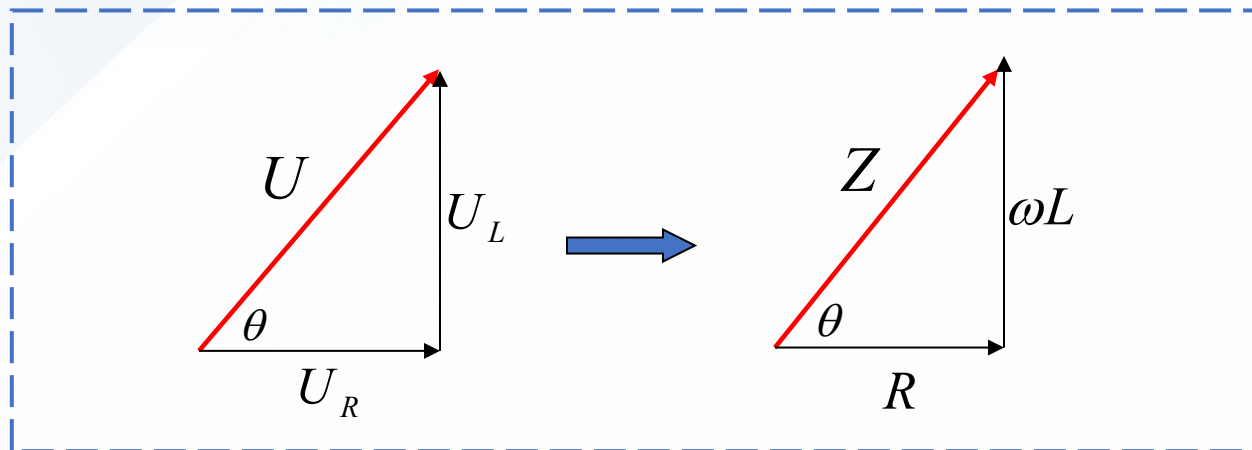
电感两端的交流电压降为:

$$u_L = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = \omega L \sqrt{2}I \cos \omega t = \omega L \sqrt{2}I \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

电压超前
电流 $\pi/2$

电压有效值为: $U_L = \omega LI$

2.3 涡流阻抗分析法



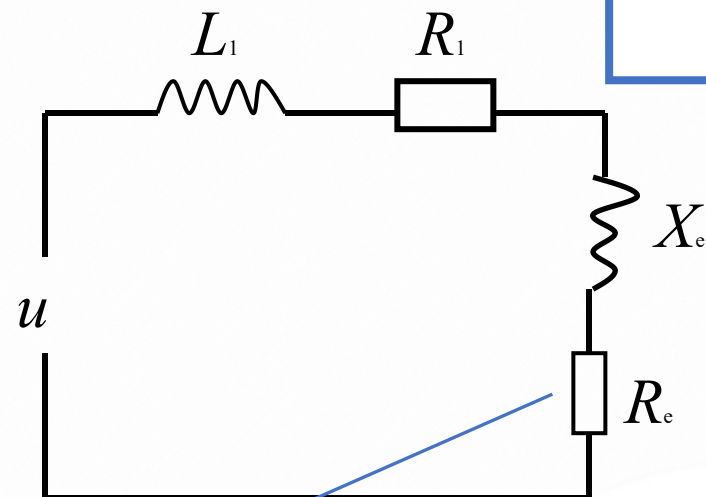
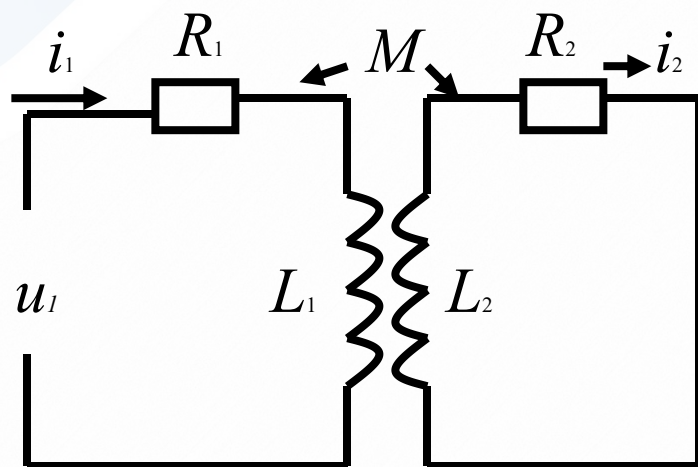
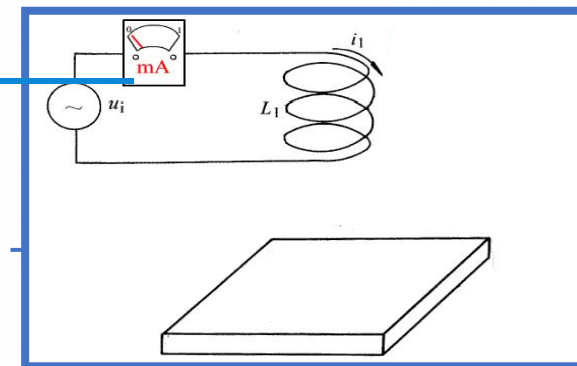
$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(RI)^2 + (\omega LI)^2} = I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

阻抗: $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$

相位差: $\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{U_L}{U_R} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$

2.3 涡流阻抗分析法

测量时线圈的有效阻抗



$$\begin{cases} R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ R_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$

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

2.3 涡流阻抗分析法

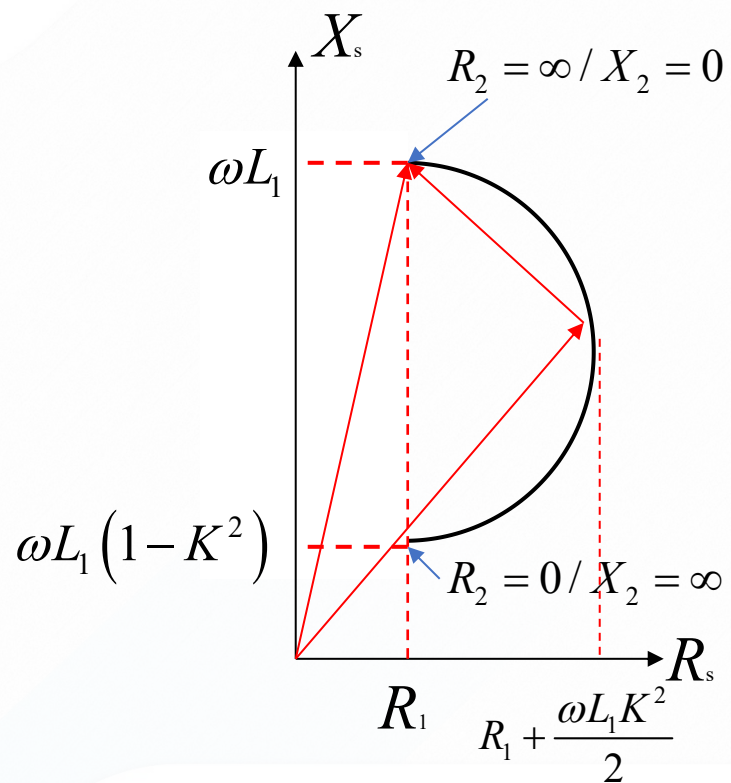


线圈的有效阻抗:

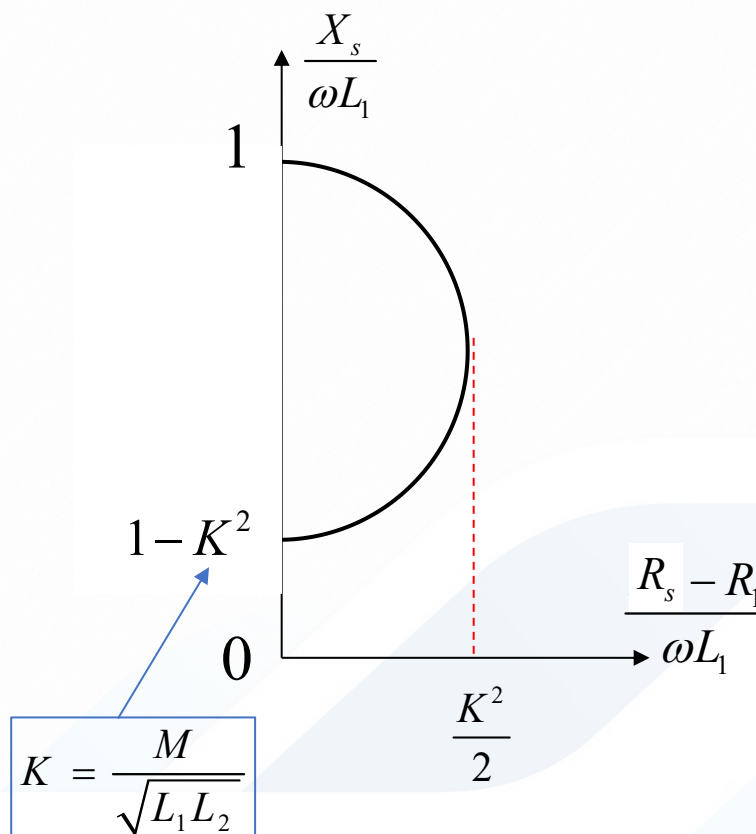
$$Z_s = \underbrace{(R_e + R_1)}_{R_s} + j \underbrace{(X_e + X_1)}_{X_s}$$

2.3 涡流阻抗分析法

阻抗平面图



归一化阻抗平面图



2.3 涡流阻抗分析法

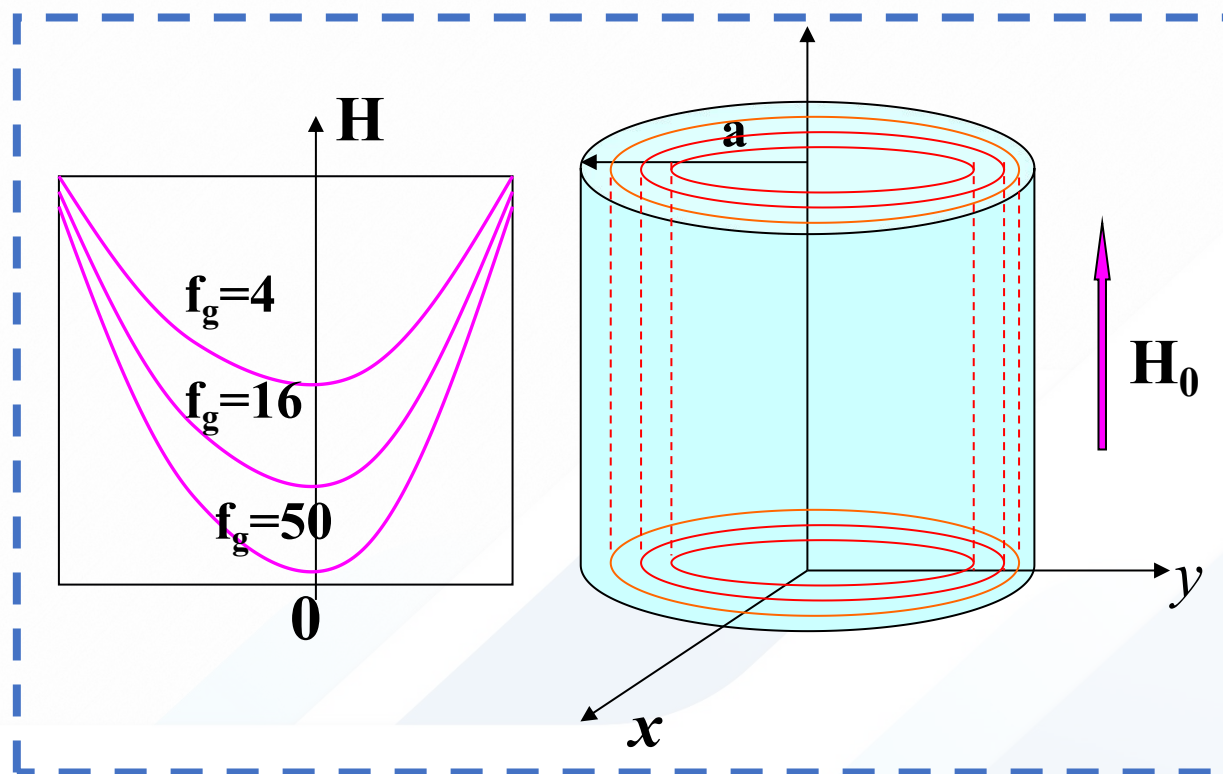
二、有效磁导率和特征频率

导电长圆柱体中的电磁场分布规律为：

$$H_z = H_0 \frac{J_0 \left(\sqrt{-j k r} \right)}{J_0 \left(\sqrt{-j k a} \right)}$$

式中：

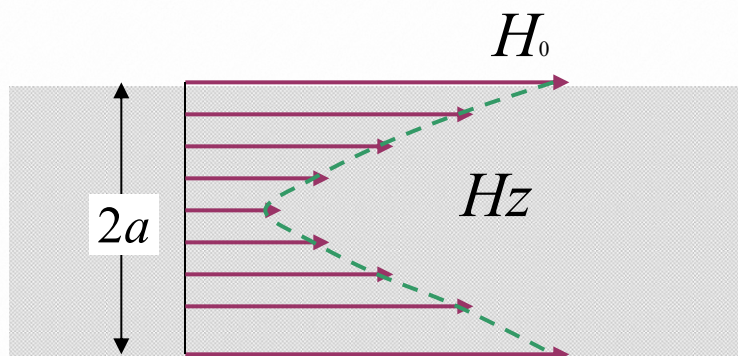
$$k = \sqrt{\omega \mu \sigma} = \sqrt{\omega \mu_r \mu_0 \sigma}$$



2.3 涡流阻抗分析法

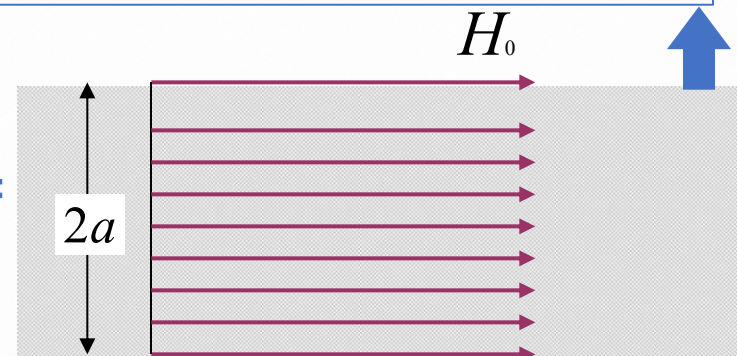
01 有效磁导率

磁场强度实际分布



μ 为常数

$=\Phi=$



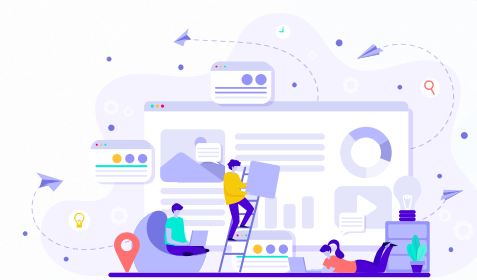
μ_{eff}

$$\dot{\Phi} = \dot{B}s = \mu_0 \mu_r \mu_{eff} H_0 \cdot \pi a^2$$

$$\dot{\Phi} = \int_s B_z ds = \int_s \mu_0 H_z ds = 2\pi\mu_0\mu_r H_0 \frac{a}{\sqrt{-jk}} \cdot \frac{J_1(\sqrt{-jk}a)}{J_0(\sqrt{-jk}a)}$$



2.3 涡流阻抗分析法



有效磁导率:

$$\mu_{eff} = \frac{2}{\sqrt{-jka}} \frac{J_1(\sqrt{-jka})}{J_0(\sqrt{-jka})}$$

式中:

$$k = \sqrt{\omega\mu\sigma} = \sqrt{\omega\mu_r\mu_0\sigma}$$



2.3 涡流阻抗分析法

02 特征频率

$$|\sqrt{-jka}| = \sqrt{\omega\mu\sigma a} = \sqrt{2\pi f\mu\sigma a^2} = 1$$

特征频率: $f_g = \frac{1}{2\pi\mu\sigma a^2}$

非铁磁材料: $f_g = \frac{5066}{\sigma d^2}$

$$(m / \Omega \cdot mm^2)$$

cm

$$f_g = \frac{8713}{\sigma d^2}$$

%IACS

cm

2.3 涡流阻抗分析法

$$ka = \sqrt{\frac{f}{f_g}}$$

频率比

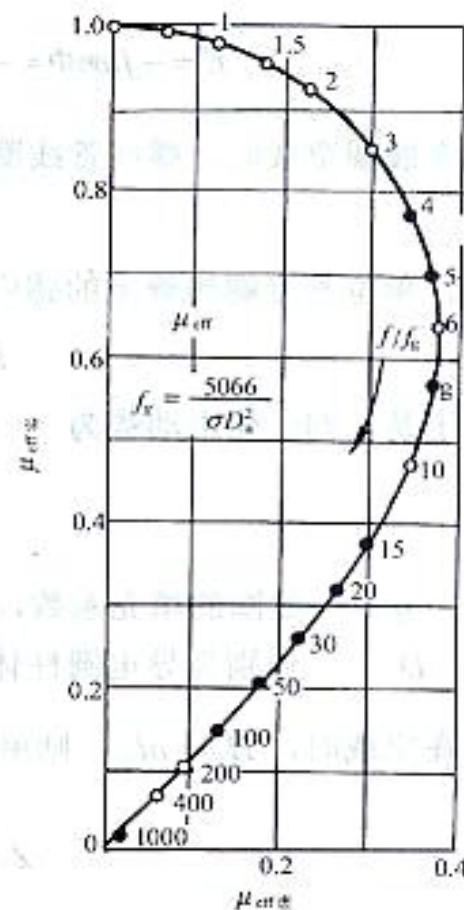
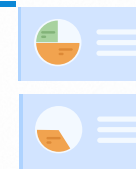


图2-9 μ_{eff} 与 f/f_g 的关系曲线



2.3 涡流阻抗分析法

不同频率比的有效磁导率

表 2-3 不同频率比的有效磁导率

频率比 f/f_g	有效磁导率 $\mu_{eff} \text{ (real)}$	有效磁导率 $\mu_{eff} \text{ (imag)}$	频率比 f/f_g	有效磁导率 $\mu_{eff} \text{ (real)}$	有效磁导率 $\mu_{eff} \text{ (imag)}$
0.00	1.000	0.0000	10	0.4678	0.3494
0.25	0.9989	0.0311	12	0.4202	0.3284
0.50	0.9948	0.0620	15	0.3701	0.3004
1	0.9798	0.1216	20	0.3180	0.2657
2	0.9264	0.2234	50	0.2007	0.1795
3	0.8525	0.2983	100	0.1416	0.1313
4	0.7738	0.3449	150	0.1156	0.1087
5	0.6992	0.3689	200	0.1001	0.09497
6	0.6360	0.3770	400	0.07073	0.06822
7	0.5807	0.3757	1,000	0.04472	0.04372
8	0.5361	0.3692	10,000	0.01414	0.01404
9	0.4990	0.3599			

2.3 涡流阻抗分析法

03

涡流试验相似律

对于二个不同的试验物体，假若各自对应的频率比 f/f_g 相同，则有效磁导率及圆柱体内的涡流的场强和涡流密度的几何分布也相同。这就是涡流试验的相似律。

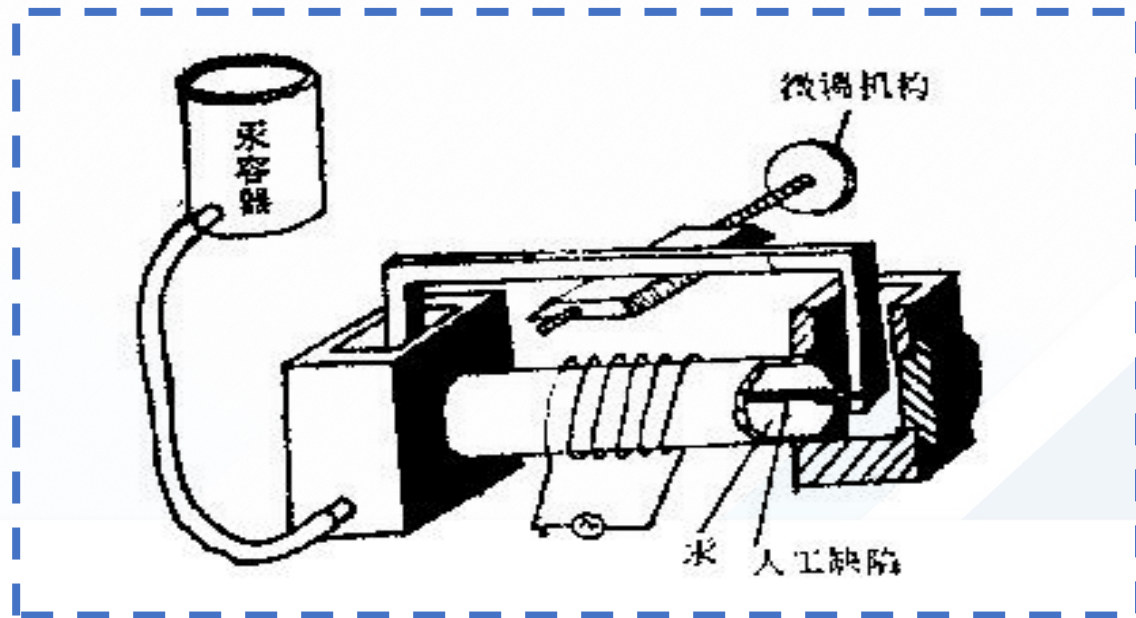
相似条件：

$$\frac{f_1}{f_{g1}} = \frac{f_2}{f_{g2}}$$

例如，一根直径 $d=10\text{cm}$ ， $\sigma = 35\text{m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$ 的铝棒，其 $f_g = 1.45\text{Hz}$ ，在 $f = 145\text{Hz}$ 的试验频率下所显示的有效磁导率、场强分布及涡流密度分布，与一根直径 $d=0.01\text{cm}$ ， $\sigma = 10\text{m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$ 、 $\mu_r = 100$ 的铁丝，其 $f_g = 50660\text{Hz}$ ，在 $f = 5.07\text{MHz}$ 的试验频率下所显示的结果完全相同，因为两者的频率比均为100。

2.3 涡流阻抗分析法

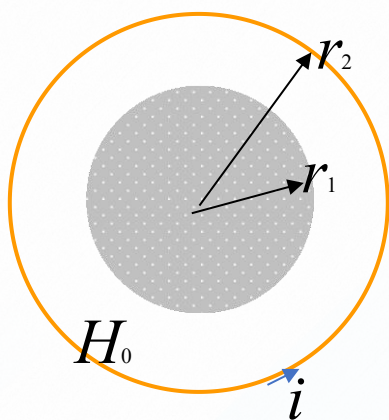
相似律运用到材料中不连续性缺陷的检测时，它的含义是：如果 f/f_g 相同，几何相似的不连续性(如以圆柱体的直径的百分率表示的一定深度、宽度的裂纹)将引起相同的涡流效应和相同的有效磁导率的变化。这样，如果通过带有人工缺陷的模型测量出 μ_{eff} 的变化量 $\Delta\mu_{\text{eff}}$ 对裂纹的深度、宽度及位置的关系，那么相似律便指出：这些测量结果是具有普遍通用性质的。



2.3 涡流阻抗分析法

三、复阻抗平面图

1. 穿过式线圈的感应电动势与阻抗



单位长度线圈上的感应电势为

$$\dot{E} = -n \frac{d\dot{\Phi}}{dt} = -j\omega n [\mu_0 \mu_r \mu_{eff} \dot{H}_0 \cdot \pi r_1^2 + \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2)]$$

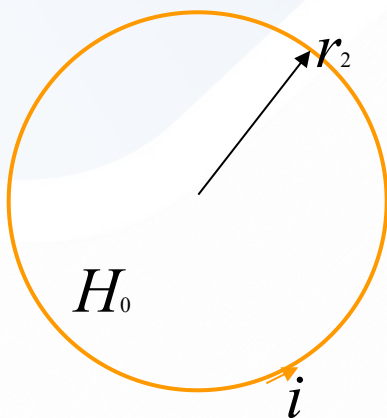
$$\dot{\Phi} = \mu_0 \mu_r \dot{H}_z \cdot \pi r_1^2 + \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2) = \mu_0 \mu_r \mu_{eff} \dot{H}_0 \cdot \pi r_1^2 + \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi (r_2^2 - r_1^2)$$

圆柱导体中的
磁通量

空气间隙部分
的磁通量

有效磁导率

2.3 涡流阻抗分析法



线圈空载时的磁通量:

$$\dot{\Phi} = \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi r_2^2$$

空载时的感应电势:

$$\dot{E}_0 = -n \frac{d\dot{\Phi}}{dt} = -j\omega n \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi r_2^2$$

归一化电动势:

$$\frac{\dot{E}}{\dot{E}_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{eff}$$

$$\eta = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \text{ ----- 填充系数;}$$

线圈归一化阻抗:

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{eff}$$

$$\dot{H}_0 = n \dot{I}_0$$

$$Z_0 = \frac{\dot{E}_0}{\dot{I}_0} = - \frac{-j\omega n \mu_0 \dot{H}_0 \cdot \pi r_2^2}{\dot{I}_0} = -j\omega n^2 \mu_0 \cdot \pi r_2^2 = -j\omega L$$

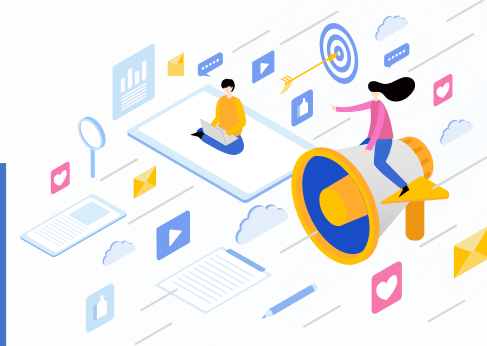
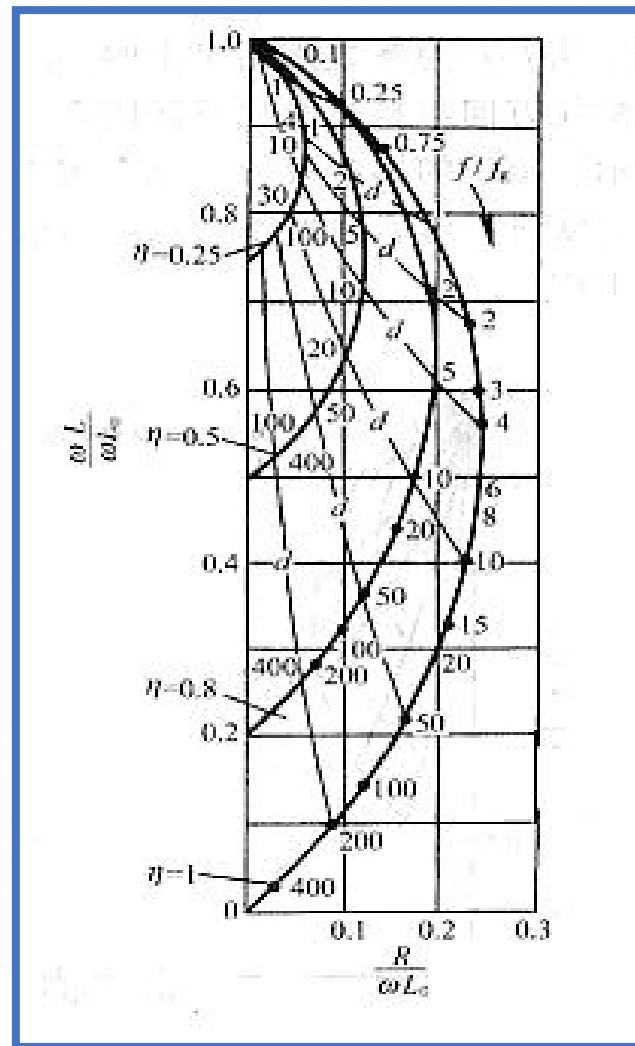
2.3 涡流阻抗分析法

2.穿过式线圈的阻抗分析

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{eff}$$

1、电导率的影响分析

$$f_g = \frac{1}{2\pi\mu\sigma a^2}$$



2.3 涡流阻抗分析法

2、磁导率的影响分析

$$f_g = \frac{1}{2\pi\mu\sigma a^2}$$

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 - \eta + \eta\mu_r\mu_{eff}$$

$\eta = 1$ 时:

$$\frac{Z}{Z_0} = \mu_r\mu_{eff}$$

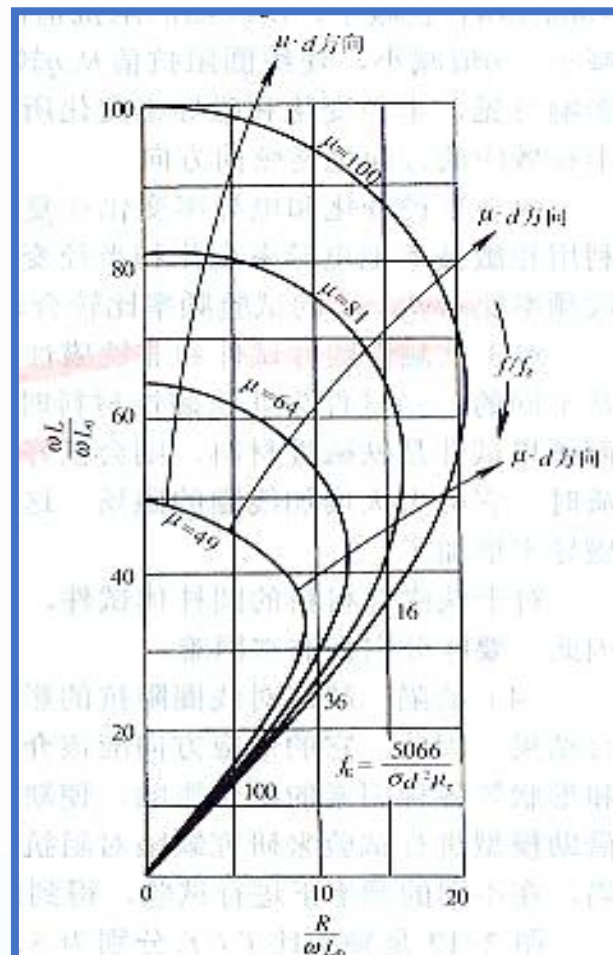


图2-11 $\eta=1$ 时，含铁磁性导电圆柱体的线圈复阻抗平面图

2.3 涡流阻抗分析法

3、试件几何尺寸的影响分析

$$f_g = \frac{1}{2\pi\mu\sigma a^2}$$

$$\frac{Z}{Z_0} = 1 - \eta + \eta \mu_r \mu_{eff}$$

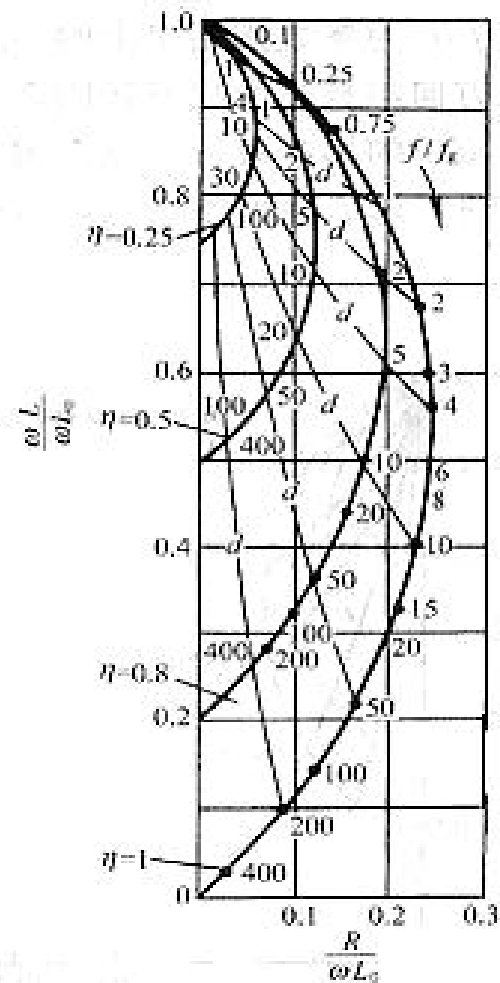
4、缺陷的影响分析

裂纹:

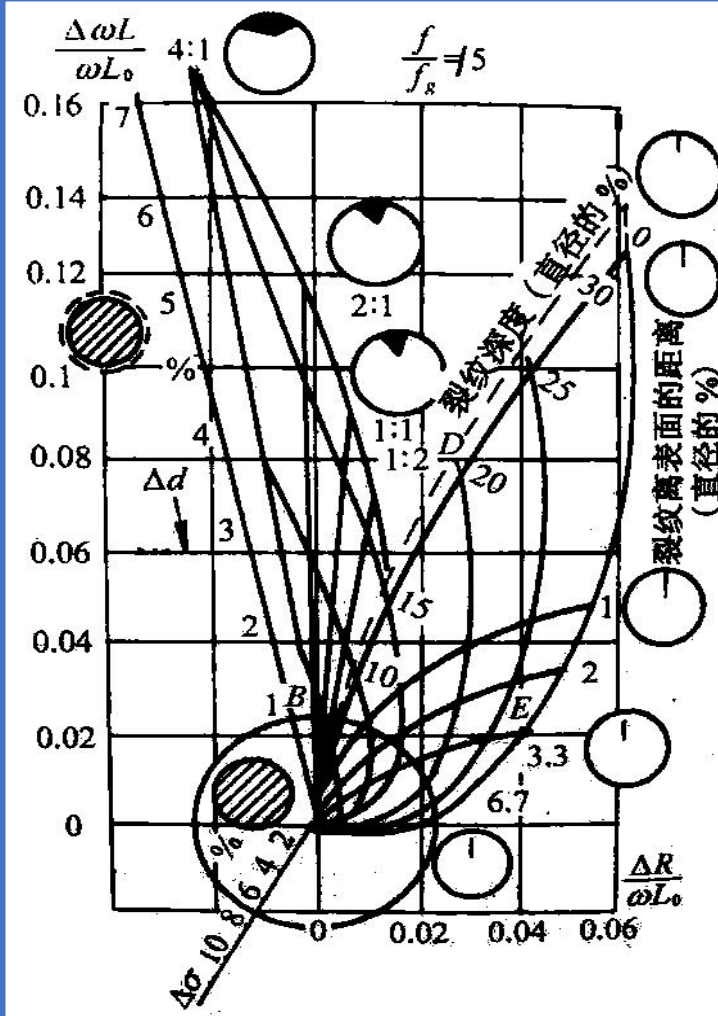
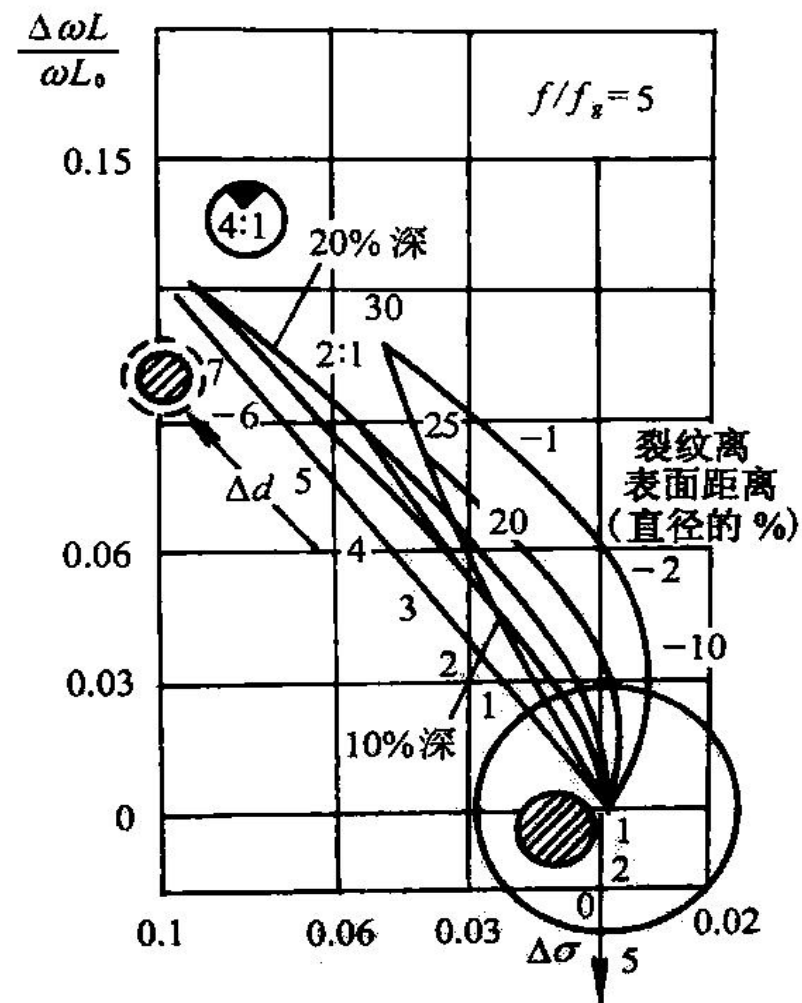
形状——宽: 深;

大小/深度——直径的%;

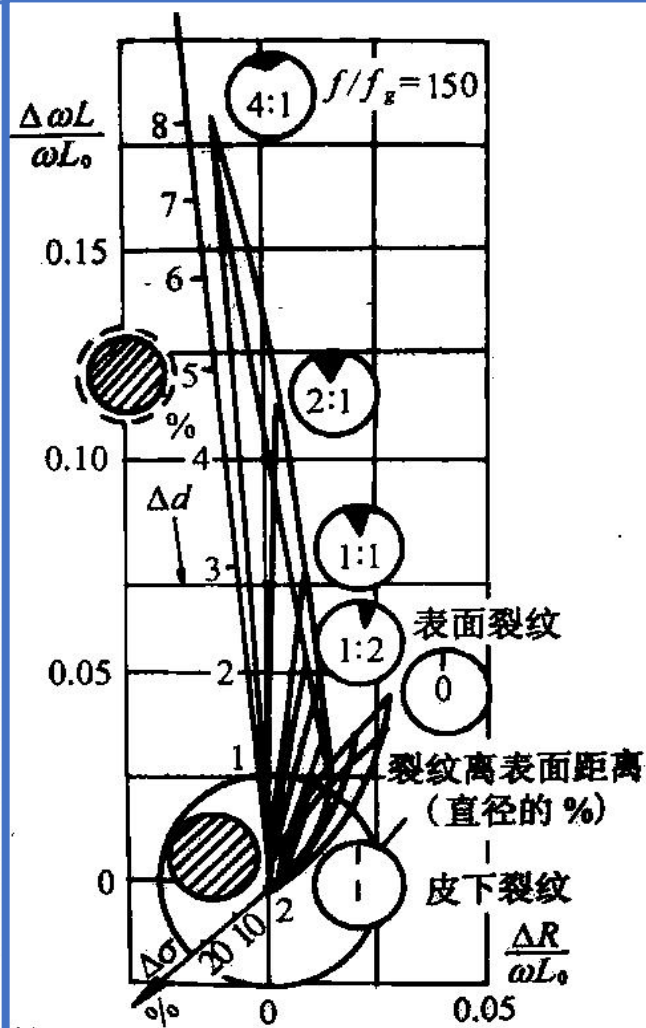
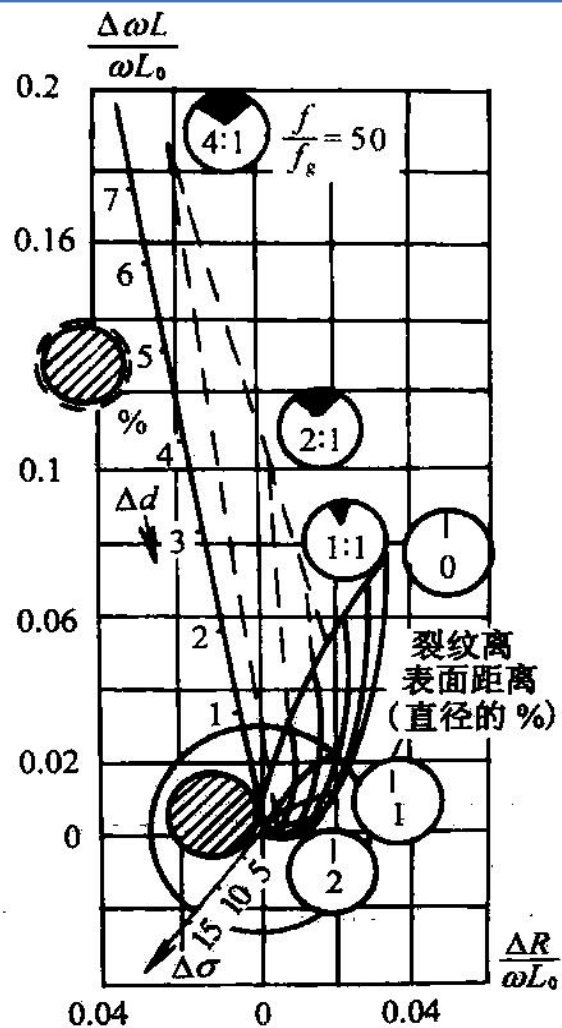
位置/表面、皮下——直径的%;



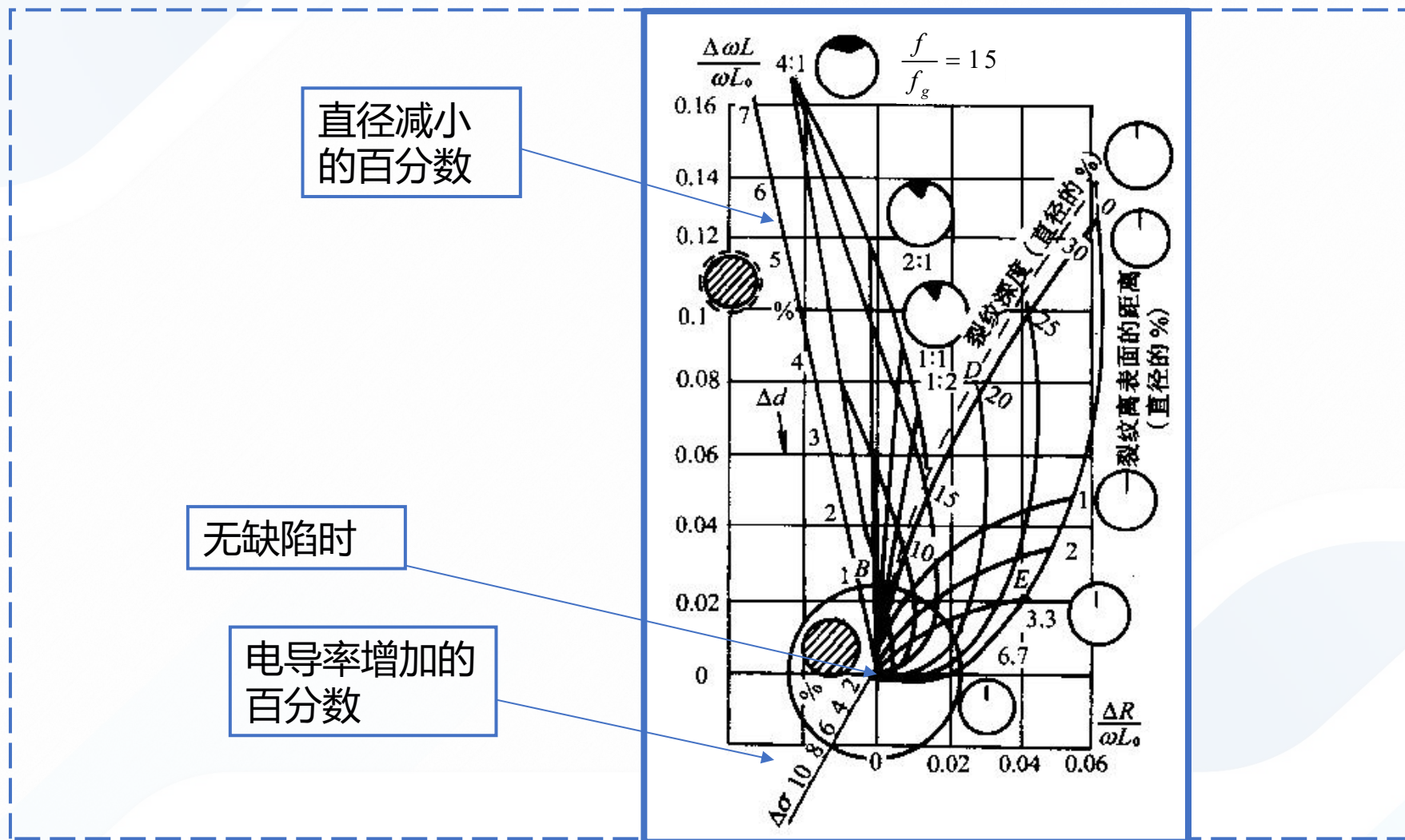
2.3 涡流阻抗分析法



2.3 涡流阻抗分析法



2.3 涡流阻抗分析法

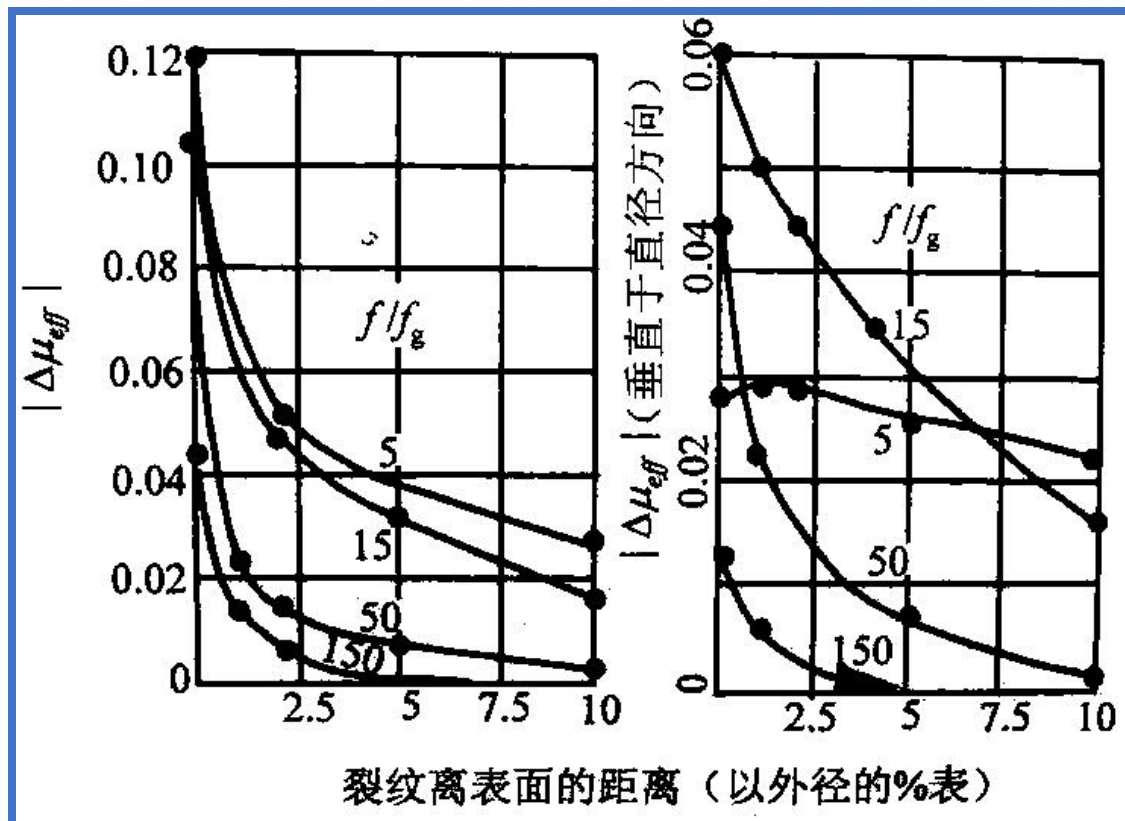


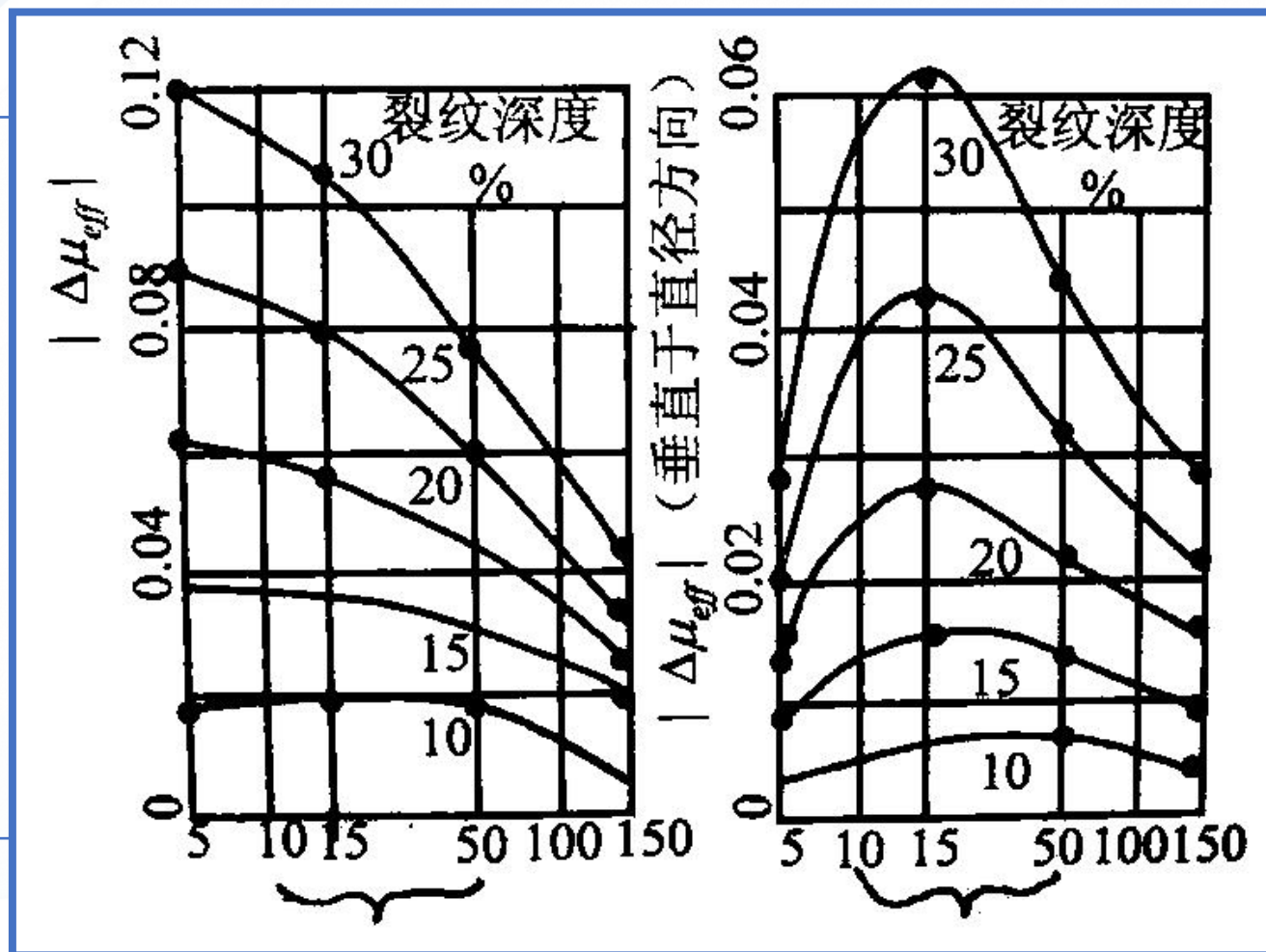
2.3 涡流阻抗分析法

5、试验频率的影响分析

频率选择一般原则：

- 检测深度、灵敏度要兼顾；
- 有利于获得最大信号变化；
- 有利于抗干扰。





2.3 涡流阻抗分析法

六、放置式探头阻抗分析

影响阻抗变化的因素

1. 电导率
2. 提离效应
3. 磁导率

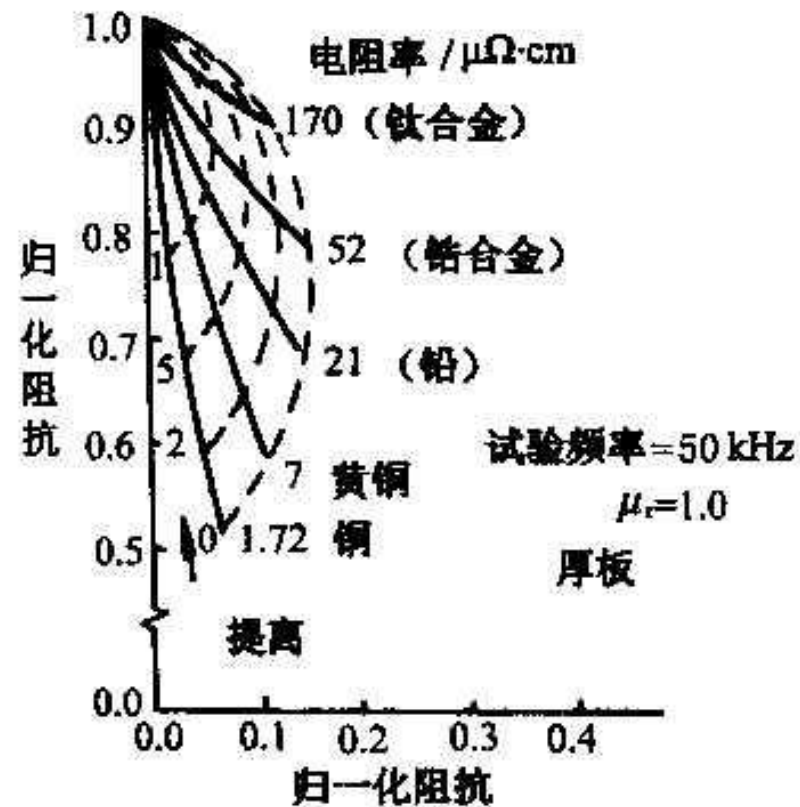
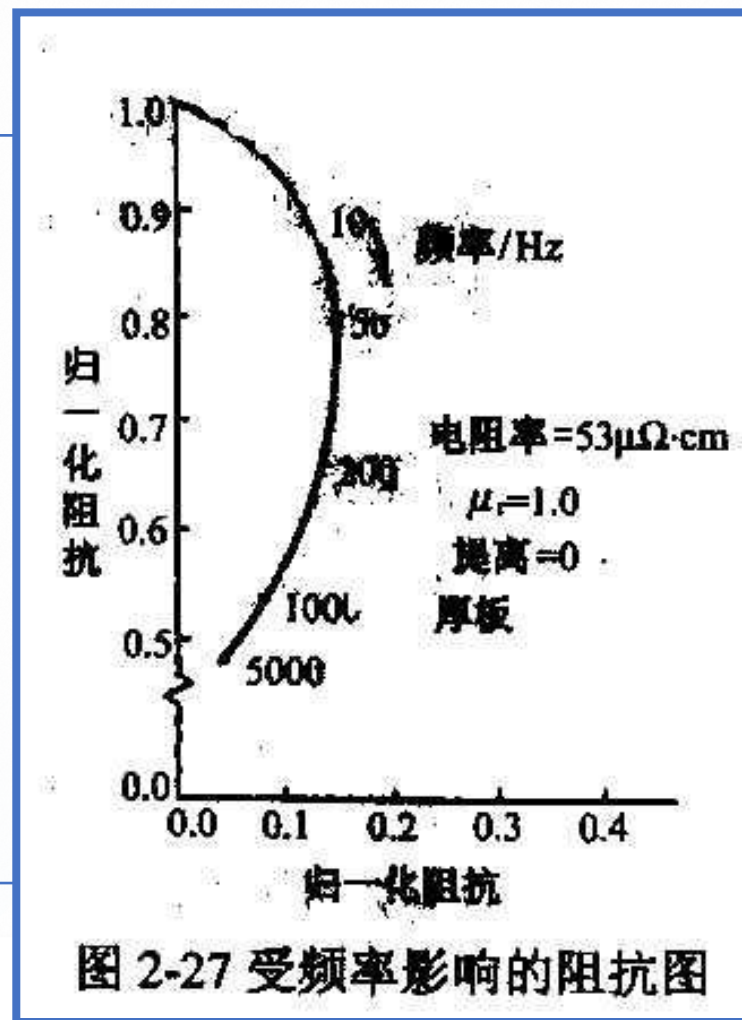


图 2-26 受电阻率影响的阻抗图

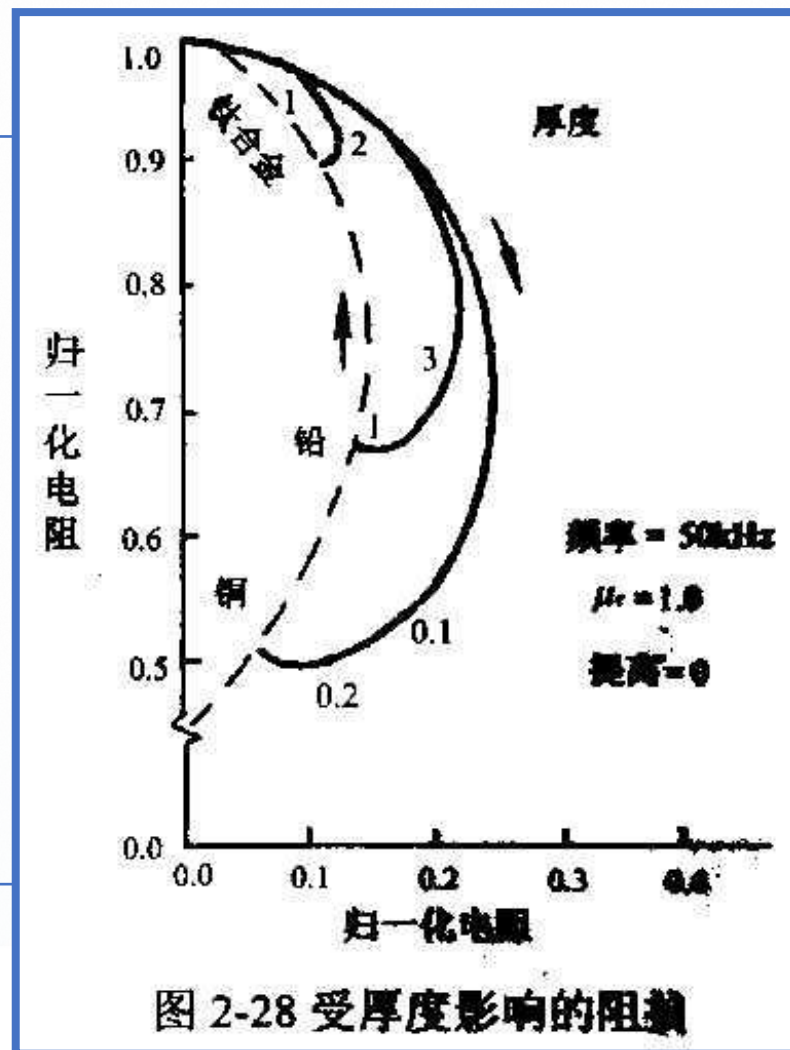
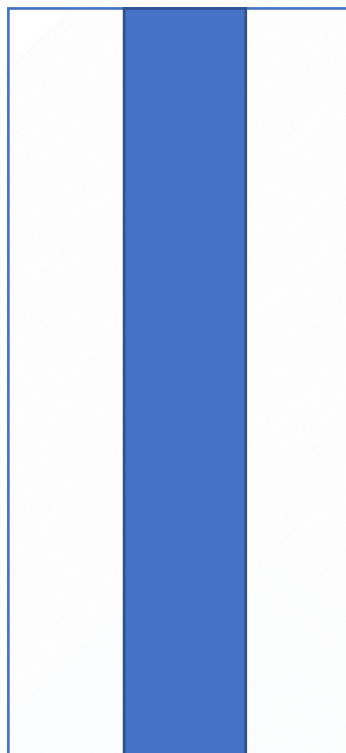
2.3 涡流阻抗分析法

4. 频率



2.3 涡流阻抗分析法

5. 厚度



2.3 涡流阻抗分析法

6. 探头直径

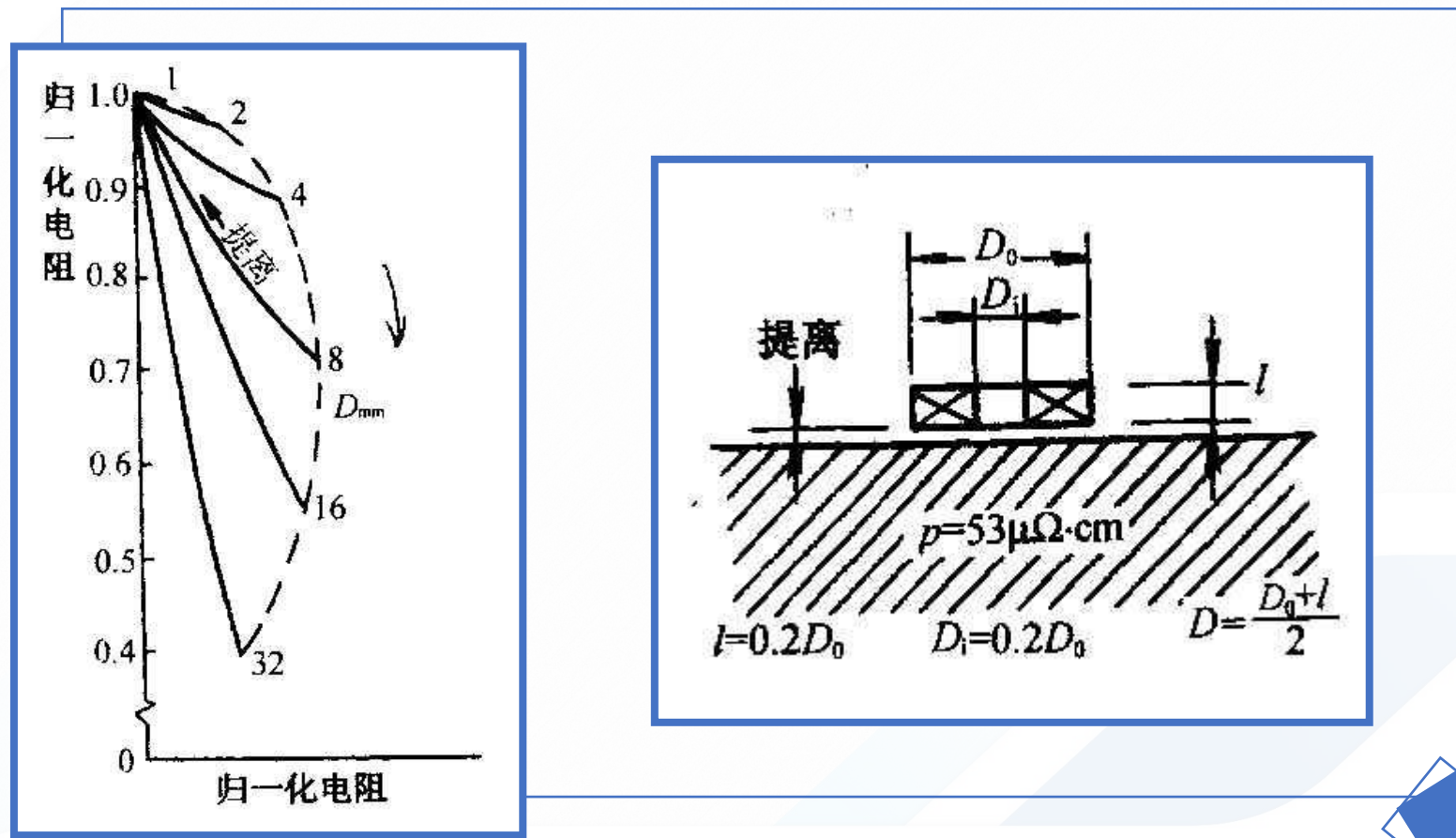


图 2-29 线圈直径对阻抗的影响

2.4 涡流检测设备

一、涡流传感器（检测线圈）

01 功能

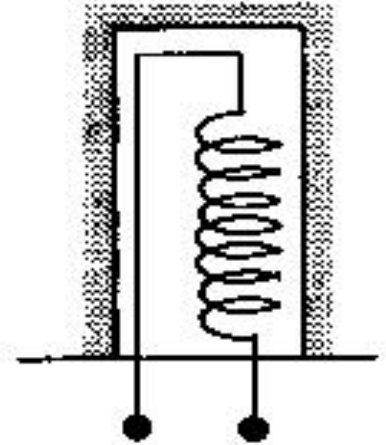
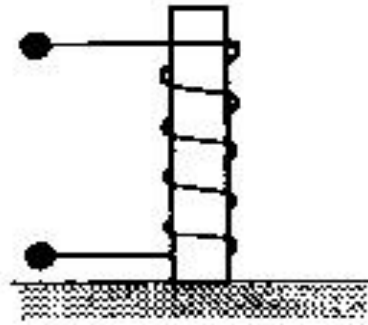
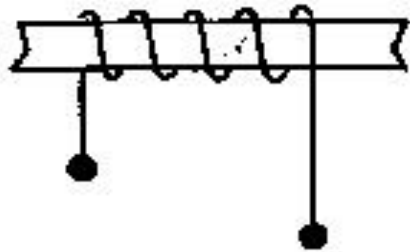
- 1) 激励形成涡流的功能;
- 2) 检取所需信号的功能;
- 3) 抗干扰的功能。

02 分类

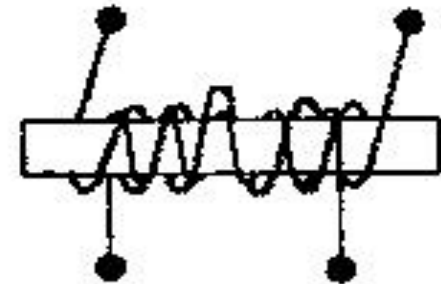
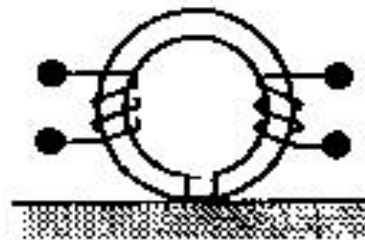
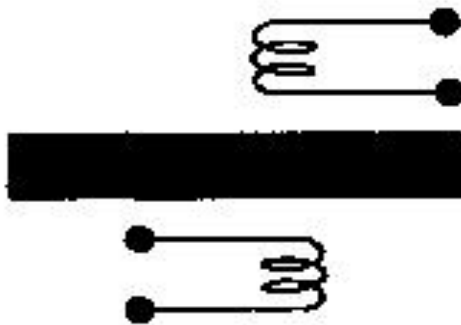
- 1) 按感应方式分类：自感式（参量式）
互感式（变压器式）



2.4 涡流检测设备



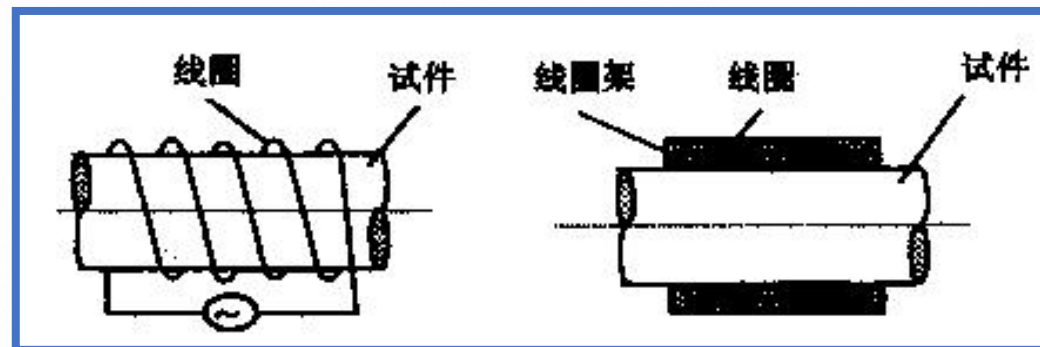
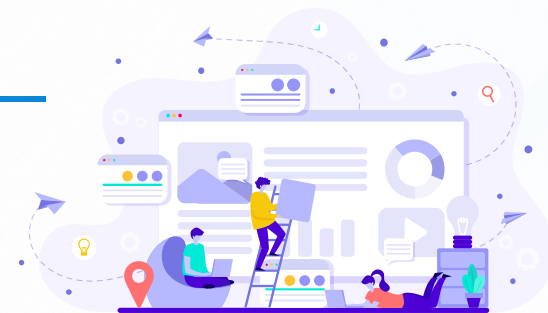
自感式（参量式）检测线圈



互感式（变压器式）检测线圈

2.4 涡流检测设备

2) 按应用方式分类：外通过式、内穿过式、放置式



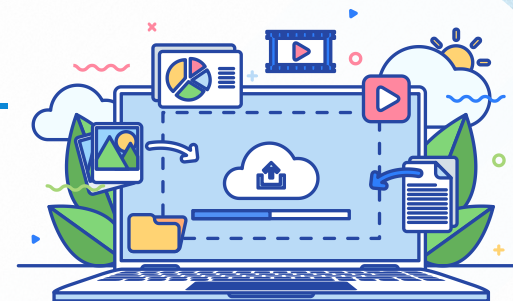
外通过式线圈结构示意图



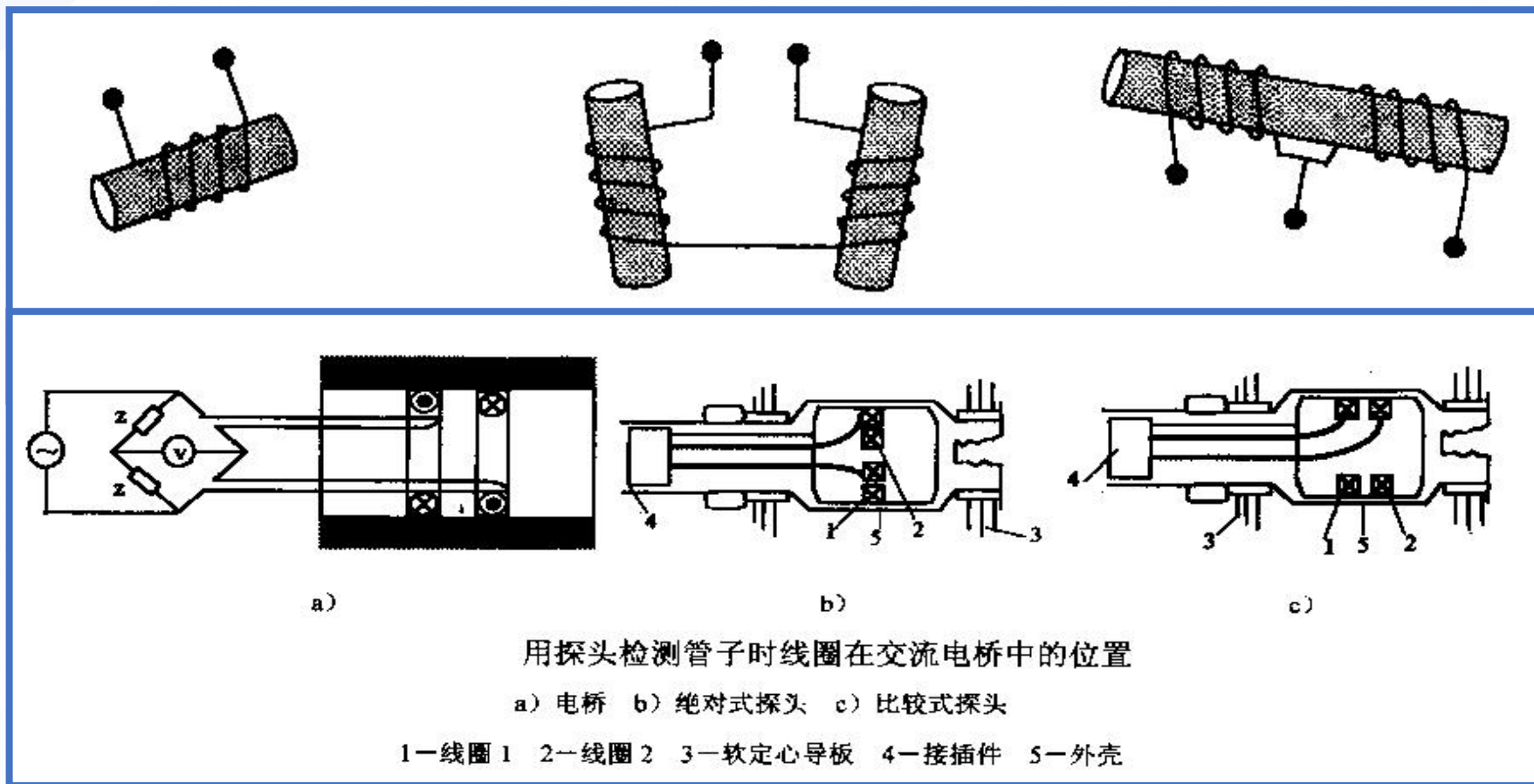
内穿过式线圈结构示意图

放置式线圈结构示意图

2.4 涡流检测设备



3)按比较方式分类：绝对式、标准比较式、自比较式



2.4 涡流检测设备

03

各类检测线圈的特点

- 检测缺陷的发现效率、方便性;
- 抗干扰能力;
- 能力、缺陷的定位、检测灵敏度.....

绝对式线圈:

- 优点:**
- 1) 对材料性能或形状的突变或缓慢变化均能作出反应;
 - 2) 混合信号较易区分出来;
 - 3) 能显示缺陷的整个长度。

缺点:

- 1) 温度不稳定时易发生漂移;
- 2) 对探头的颤动敏感。

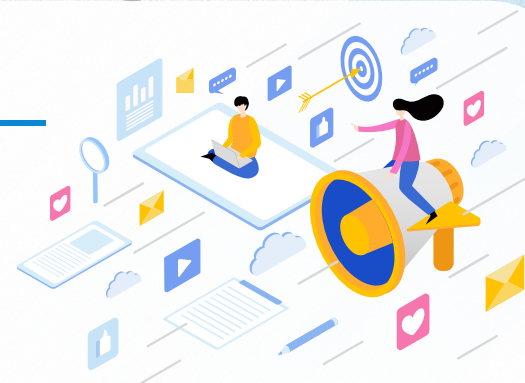


2.4 涡流检测设备

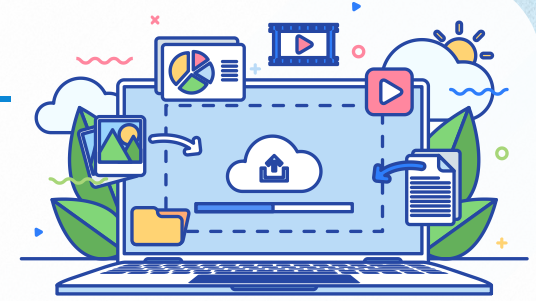
差动式线圈:

优点: 1) 不会因温度不稳定发生漂移;
2) 对探头的颤动不敏感。

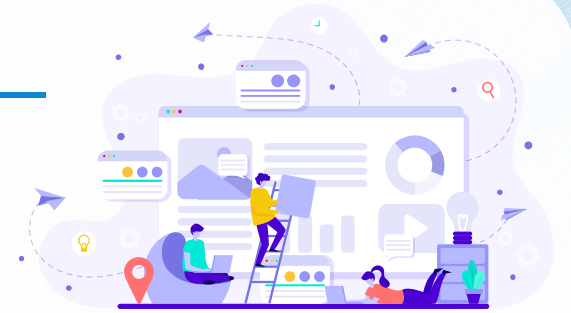
缺点: 1) 对平缓变化不敏感, 长而平缓的缺陷可能漏检;
2) 只能探出长缺陷的起点和终点;
3) 可能产生难以解释的信号。



2.4 涡流检测设备



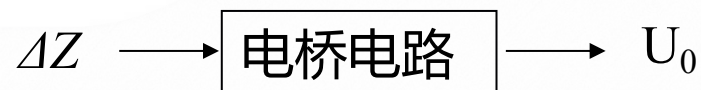
2.4 涡流检测设备



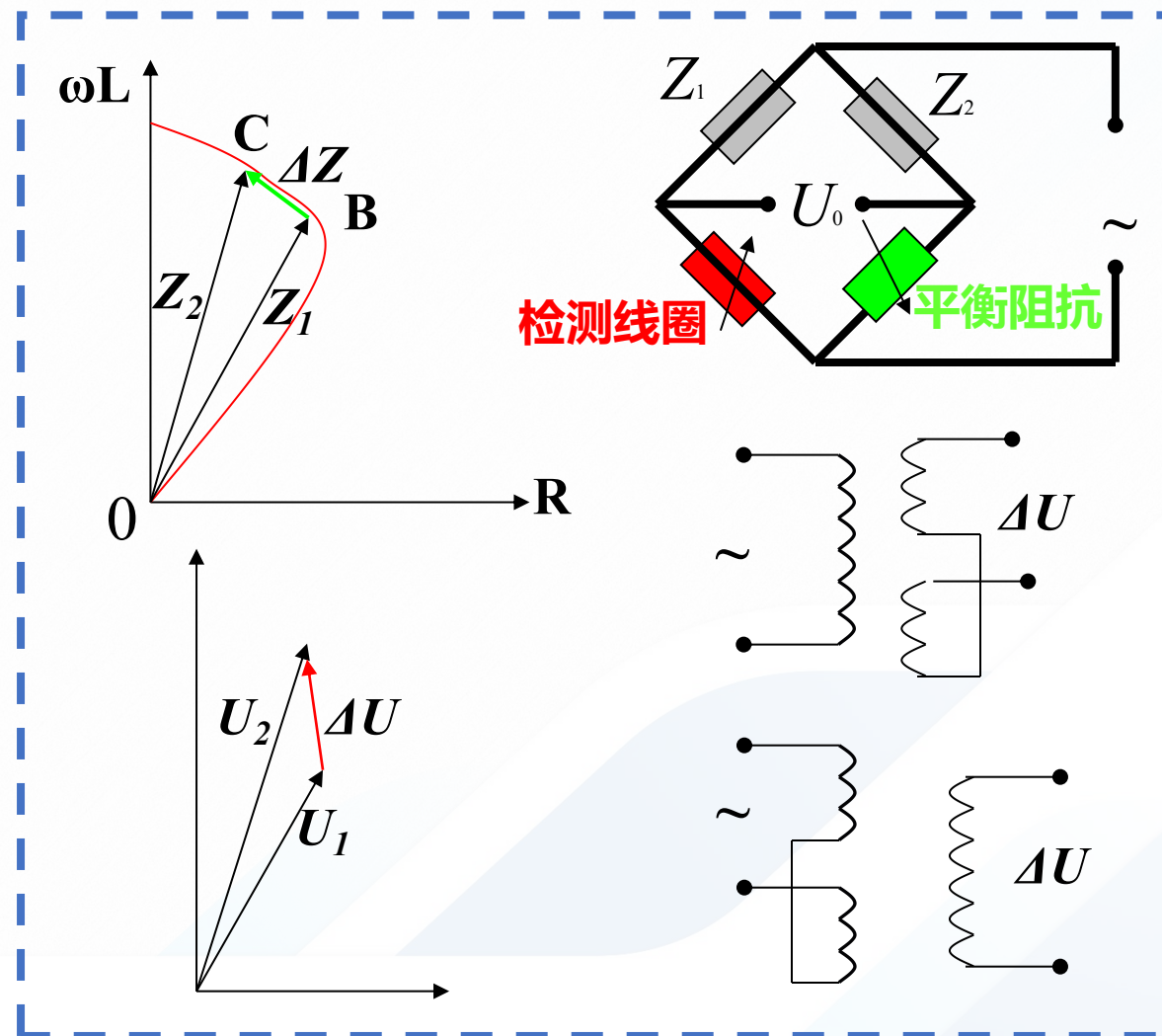
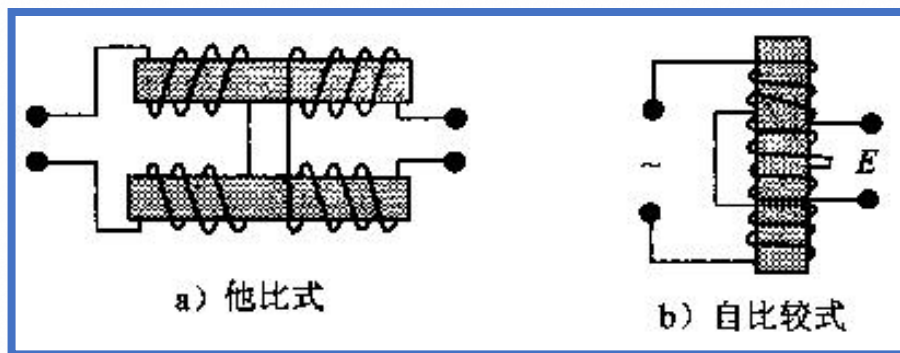
2.4 涡流检测设备

04 信号的检出方法

自感式线圈:



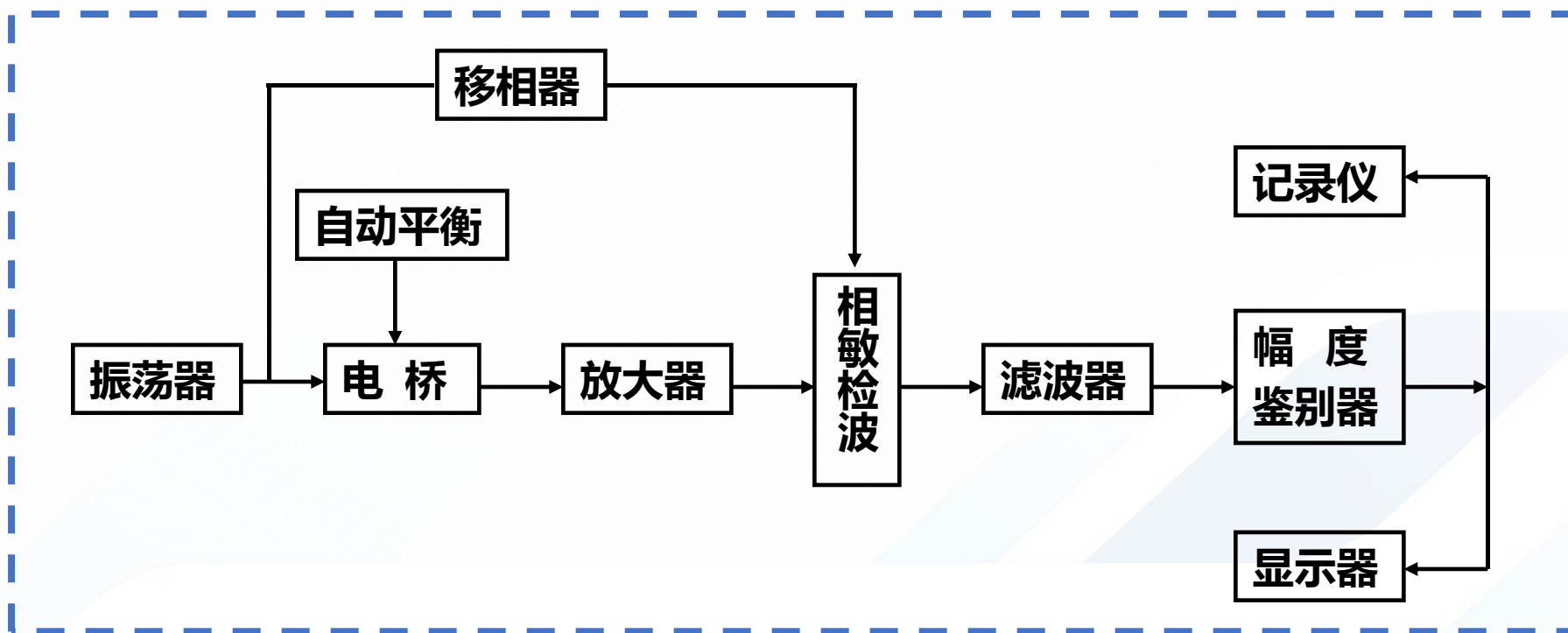
互感差动式线圈: ΔU



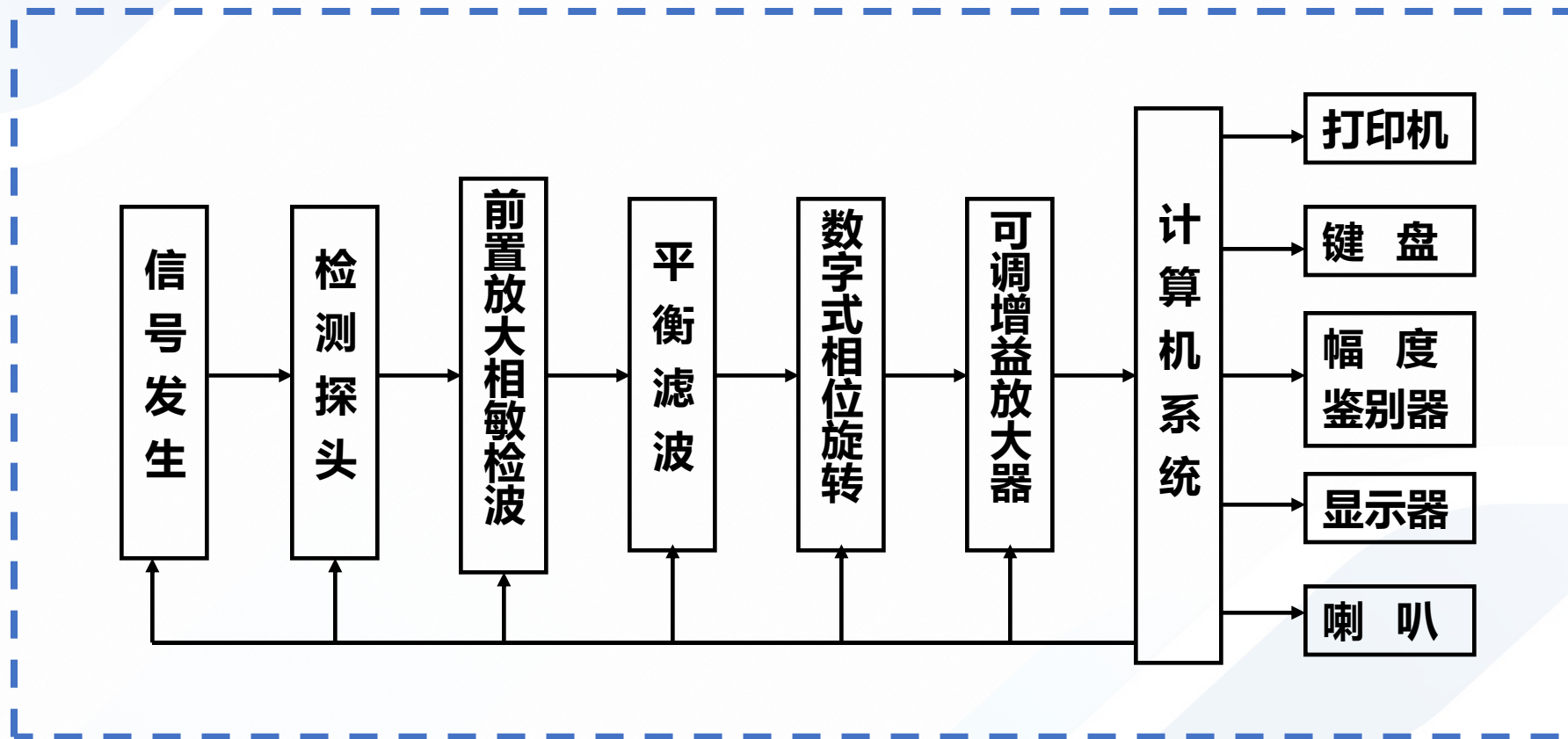
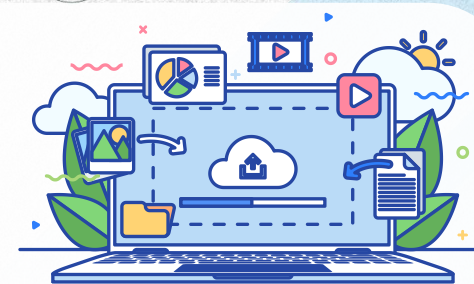
2.4 涡流检测设备

二、涡流检测系统

01 基本结构



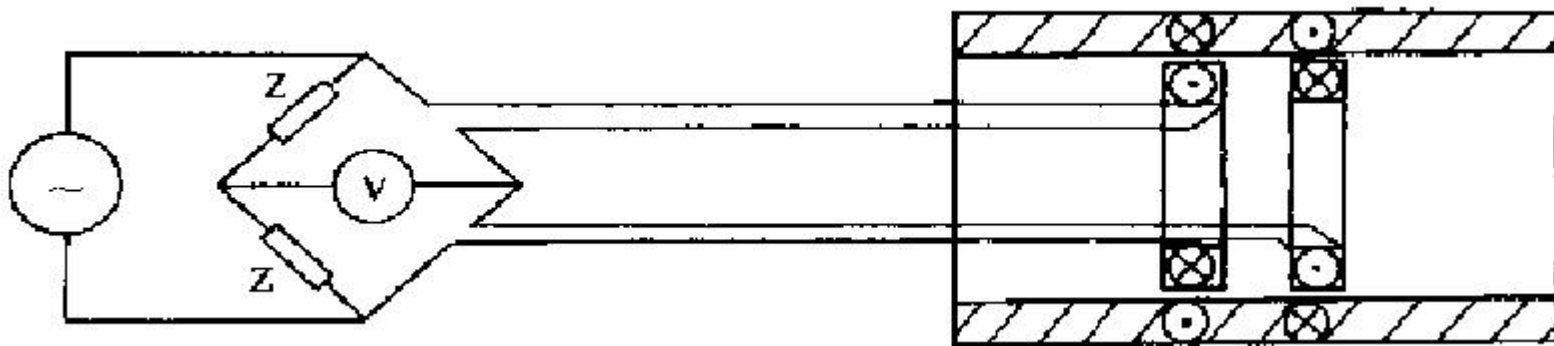
2.4 涡流检测设备



2.4 涡流检测设备

02 涡流检测仪基本电路

1) 电桥



2.4 涡流检测设备

2) 处理单元:



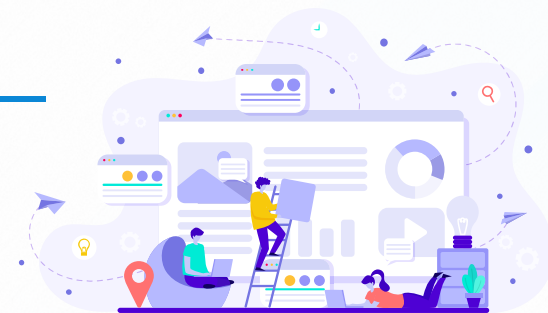
相敏检波器



滤波器



幅值鉴别器



信号处理方法:

相位分析法、频率分析法、幅度分析法

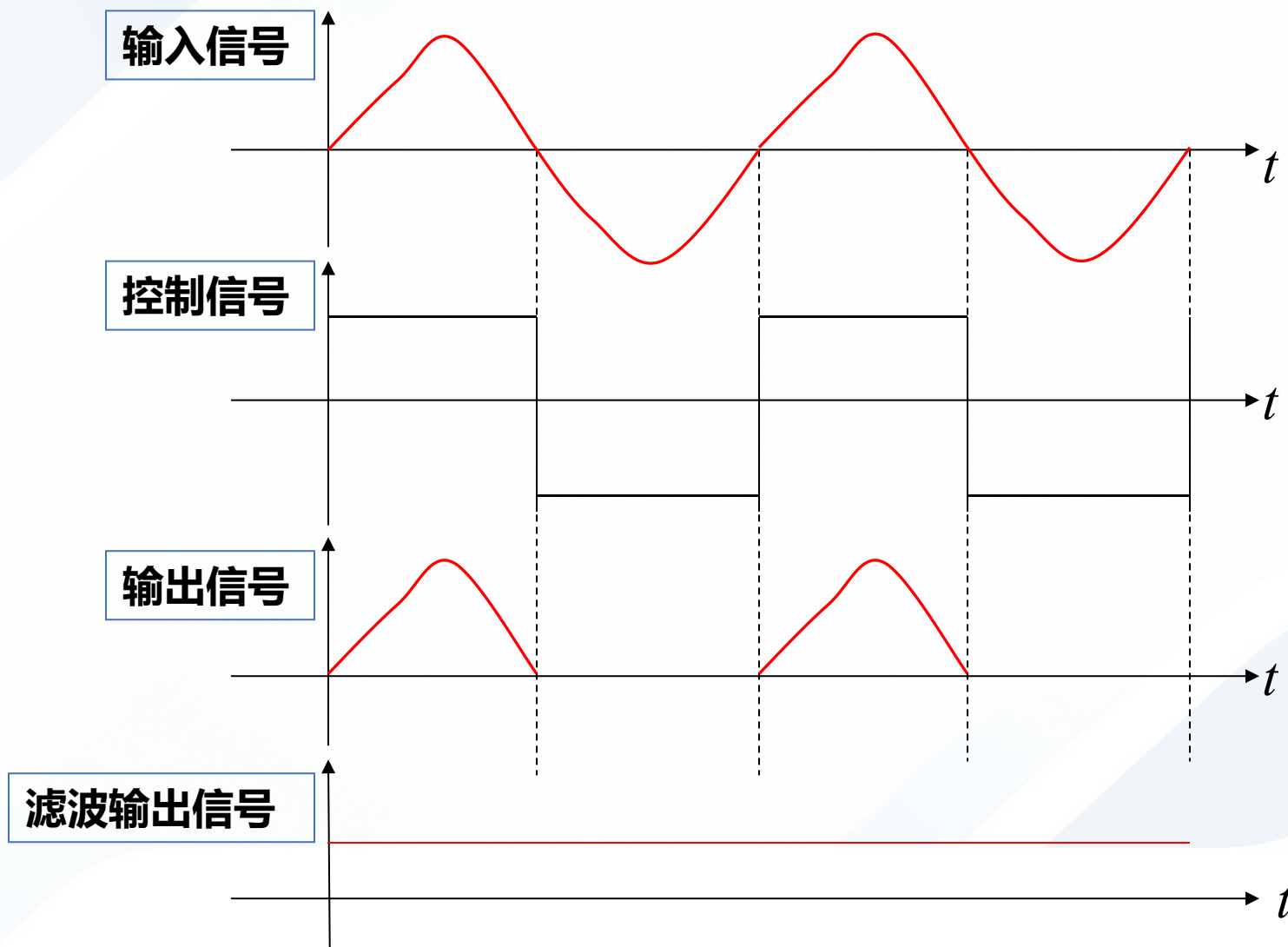


相敏检波器、

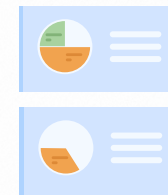
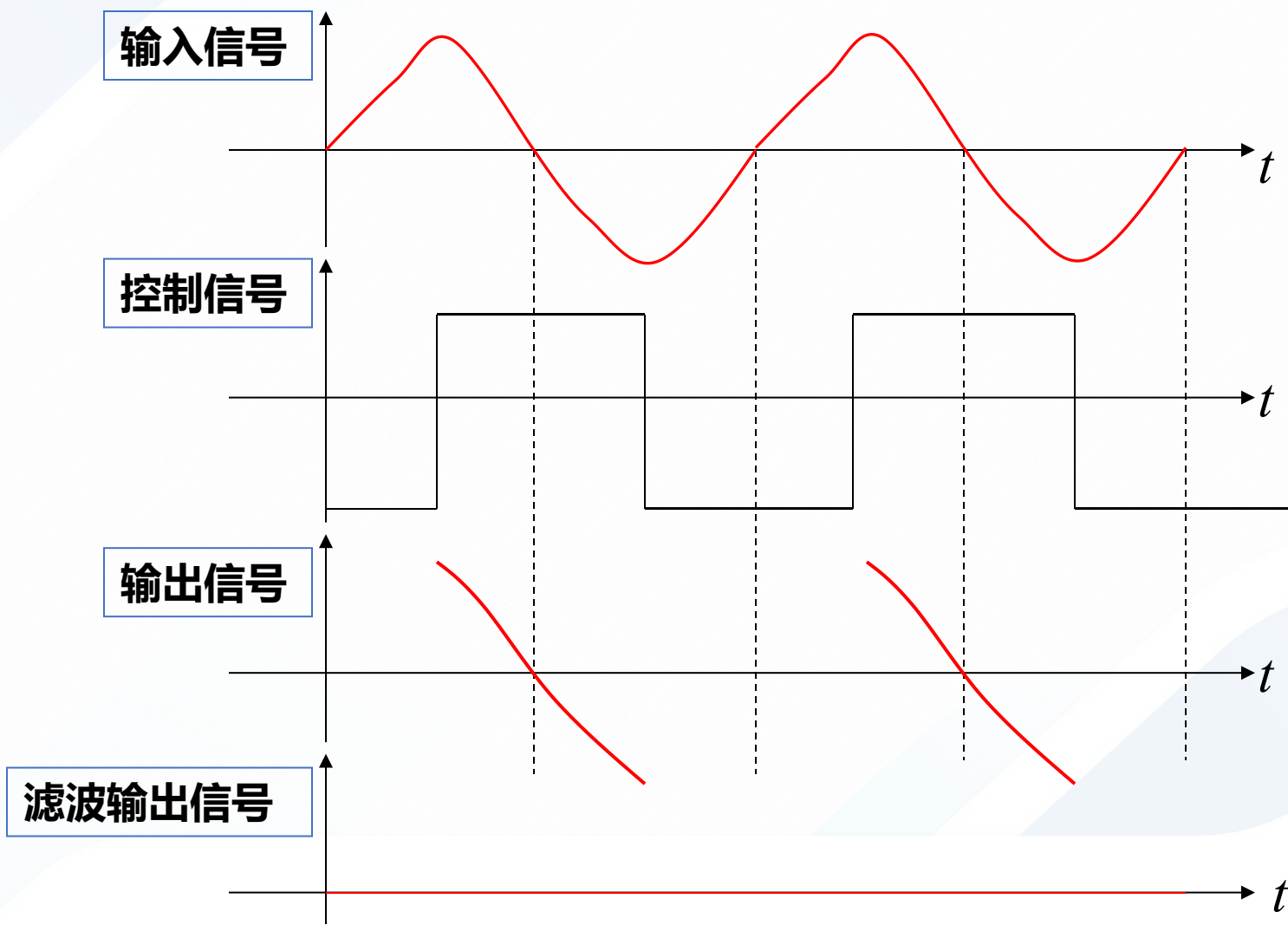
滤波器、

幅度鉴别器

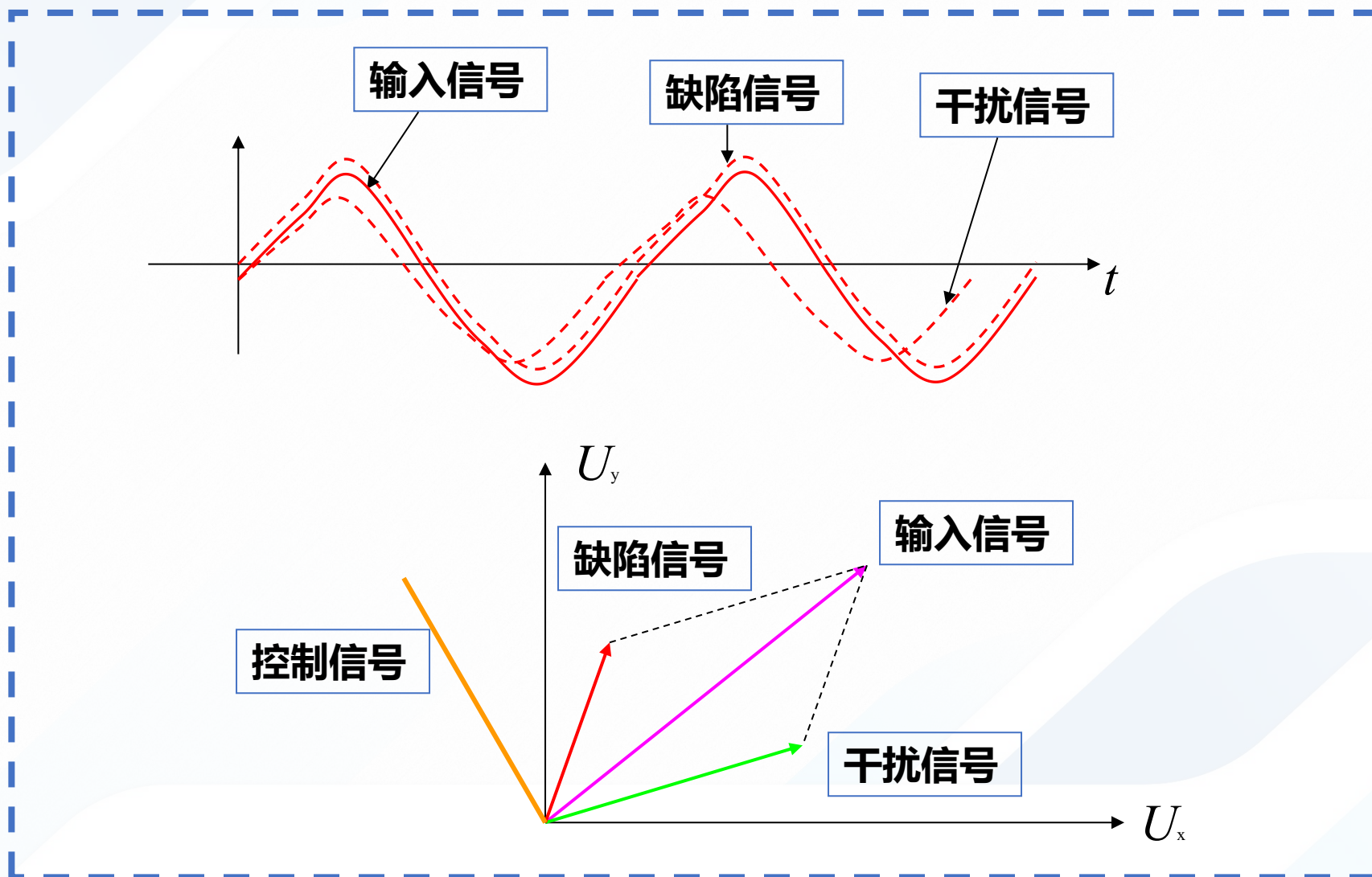
2.4 涡流检测设备



2.4 涡流检测设备

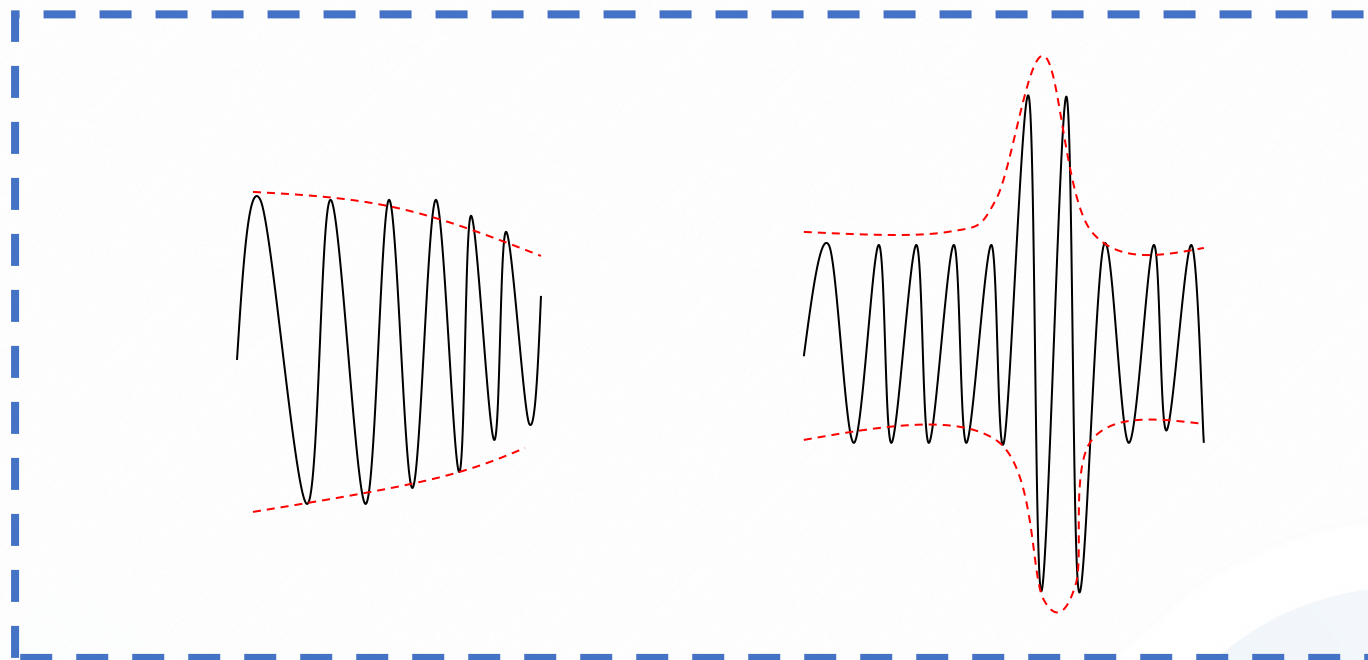


2.4 涡流检测设备

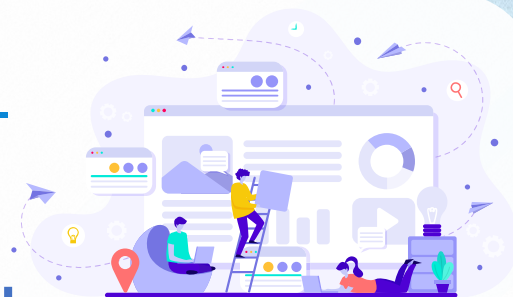


2.4 涡流检测设备

频率分析法：滤波器

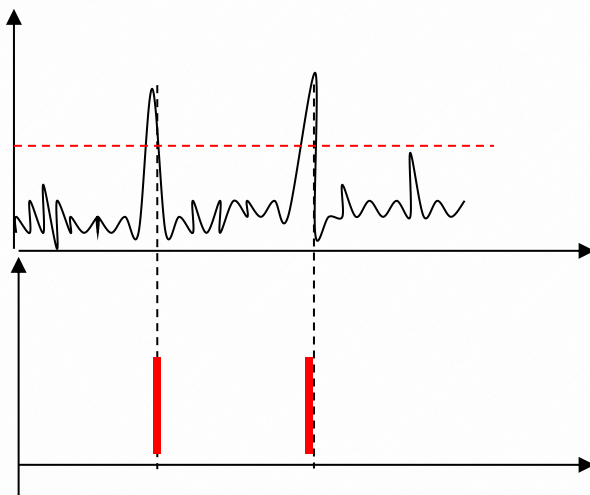


滤波是指让被测信号中的有效成分通过：
而将其中不需要的成分抑制或衰减掉的一种过程。



2.4 涡流检测设备

幅度分析法 : 幅度鉴别器



2.4 涡流检测设备

三、涡流检测辅助装置

- ◆ 进给装置
- ◆ 报警装置
- ◆ 磁饱和装置（铁磁性材料检测）
- ◆ 耦合装置

为什么在检测铁磁材料时要对其进行磁化饱和？

- 消除磁性不均匀对测量信号的影响
- 提高涡流渗透深度



2.5 涡流检测应用

一、涡流检测基本试验技术

01 试验规范

为了有效进行检测并得出可靠的检测结果，试验前必须对每一具体的试验根据其检测的种类、目的和要求，就试验方法、仪器设备、检测条件及验收标准等一系列与试验有关的细则作出明确的规定。这种细则的拟定称为规范的制定。



2.5 涡流检测应用

试验规范通用内容:

- ①试验目的(探伤、材质鉴别、测厚);
- ②试件(名称、材料、材料规格以及数量等)
- ③验收标准(或试验要求);
- ④检测装置(仪器、线圈、附加装置等);
- ⑤试验条件(如探伤时要求的试验频率、灵敏度、试验速度及试件的表面粗糙度等);
- ⑥标准试件或对比试件(如探伤时对比试件的材料、形状、尺寸和加工方法等);
- ⑦试验所要求的记录内容, 试验人员的资格等。

2.5 涡流检测应用

一、涡流检测基本试验技术

02 试验准备

为了保证试验的顺利进行和提高检测结果的可靠性，试验前应作必要的准备工作，其内容包括：

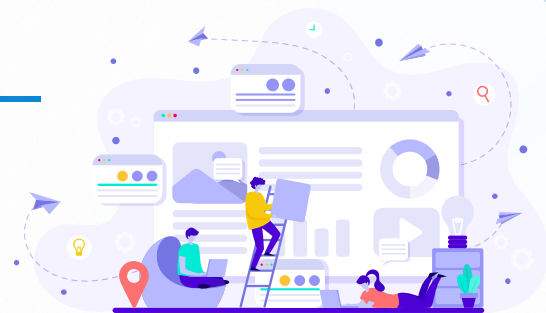
试验方法和设备的选择

试验方法和设备应在全面分析下列因素之后加以确定：①试验目的；

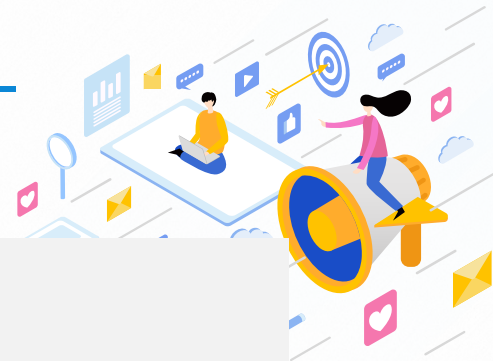
②试验材质；

③试验的形状、大小及数量；

④检测参数及其大小。



2.5 涡流检测应用

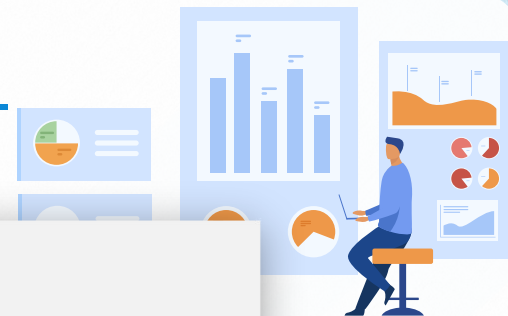


➤ 线圈选择

线圈是涡流检测的信号传感器，它的性能直接影响测量精度和试验结果的可靠性。选择线圈的主要考虑因素是；

- ①试件的形状和大小；
- ②线圈的参数及拾取信号的方式必须与仪器适配；
- ③探伤时要适合于被检缺陷。

2.5 涡流检测应用



➤ 试件条件

试验前，必须对粘附在试件上的金属粉、氧化皮、油脂等进行清除，否则，这些粘附物干扰仪器的检测信号，影响检测结果，尤其是非铁磁性材料试件上的磁性粘附物，对试验的影响是很严重的。

➤ 对比试件的准备

对比试件(或标准试件)作为调节检测仪器和判废标准的工具，对试验结果影响极大。如试验规范已作了明确规定，则必须严格按照规范进行制作。

2.5 涡流检测应用



➤ 仪器预调

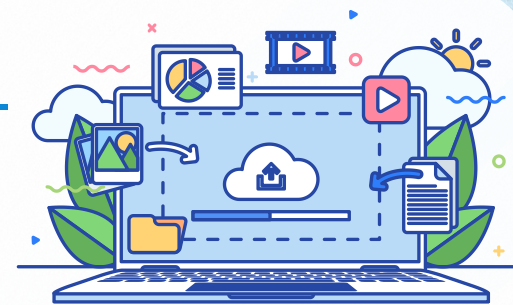
在正式试验前，应对仪器进行预调，以便使仪器的性能趋于稳定，保证试验结果的可靠性和良好的重复性。仪器预调时间一般为20~30min，通常试验条件(参数)的选择应在仪器经过预调、性能稳定后进行。

➤ 附加装置的调整

配备有进给装置的自动检测仪，为了减少管棒材试件通过线圈时的偏心和振动，需要调节进给装置的滚轮高度和动作机构。

2.5 涡流检测应用

03 试验条件的选择



在试验的准备工作完中之后，需要调节仪器，确定和选择试验条件(参数、状态)。

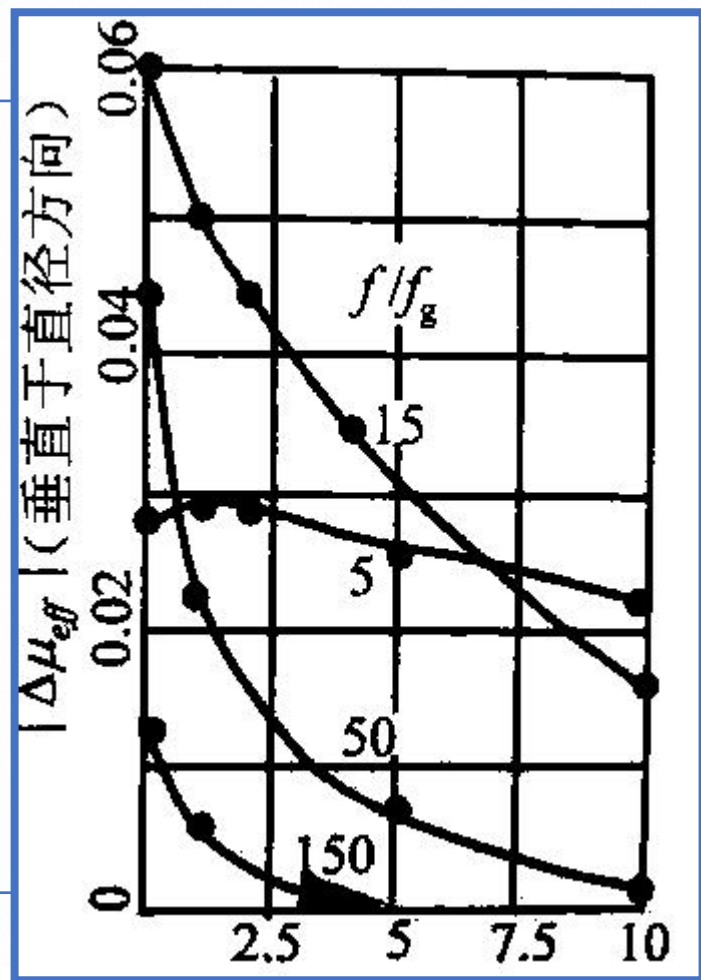
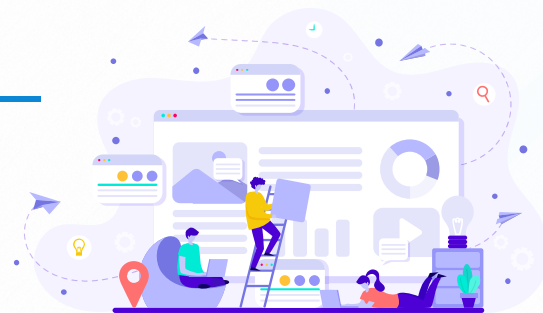
试验条件的主要内容有以下几项：

➤ 试验频率的选择

涡流检测的灵敏度在很大程度上依赖于试验频率。通常，试验频率依据下列因素进行选择：

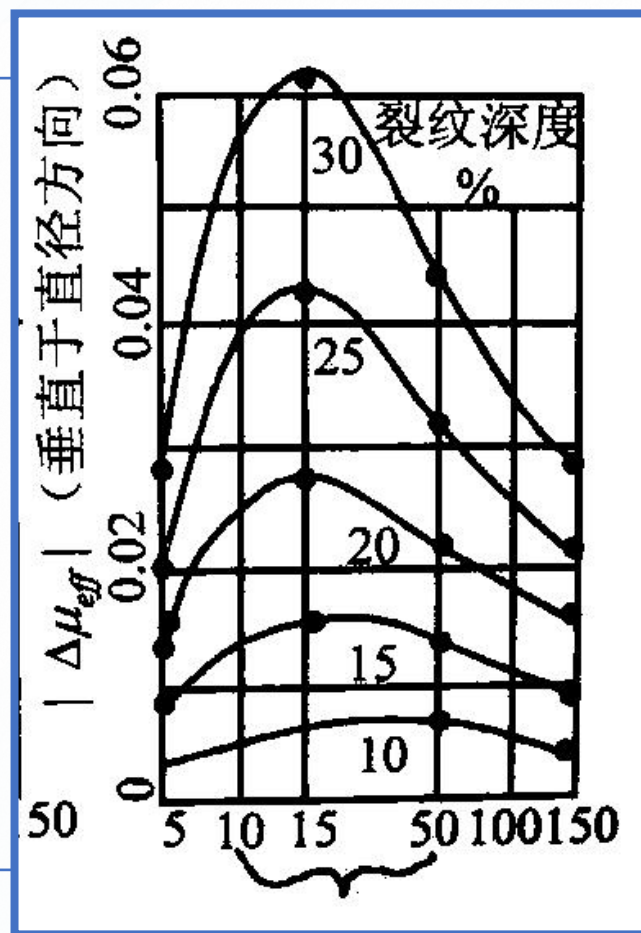
①趋肤效应(渗透深度)和检测灵敏度。

2.5 涡流检测应用

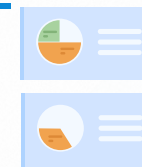


裂纹离表面的距离（以外径的%表）

2.5 涡流检测应用



裂纹离表面的距离（以外径的%表）



2.5 涡流检测应用

②**检测因素的阻抗特性。**利用检测因素对线圈阻抗的影响选择频率的方法可分两种：其一，选择检测因素产生最大阻抗变化时的频率。其二，选取检测因素与其它干扰因素所引起的阻抗变化之间有最大相位差时的频率，这种频率选择方法适应于具有相位分析功能的检测设备。利用被检信号与干扰信号之间在相位上的差异，通过相敏技术抑制干扰信号，取得较好的检测效果。例如，在探伤时需要抑制由于直径少量变化所引起的干扰，可以用来提取垂直于直径效应方面的分量来进行检测。

此外，在进行自动检测，进给速度达到每分数米以上时选择频率还应考虑到检测速度的影响。如果缺陷很短，而进给速度又很大，此时必须提高试验频率以提高检测灵敏度。

2.5 涡流检测应用

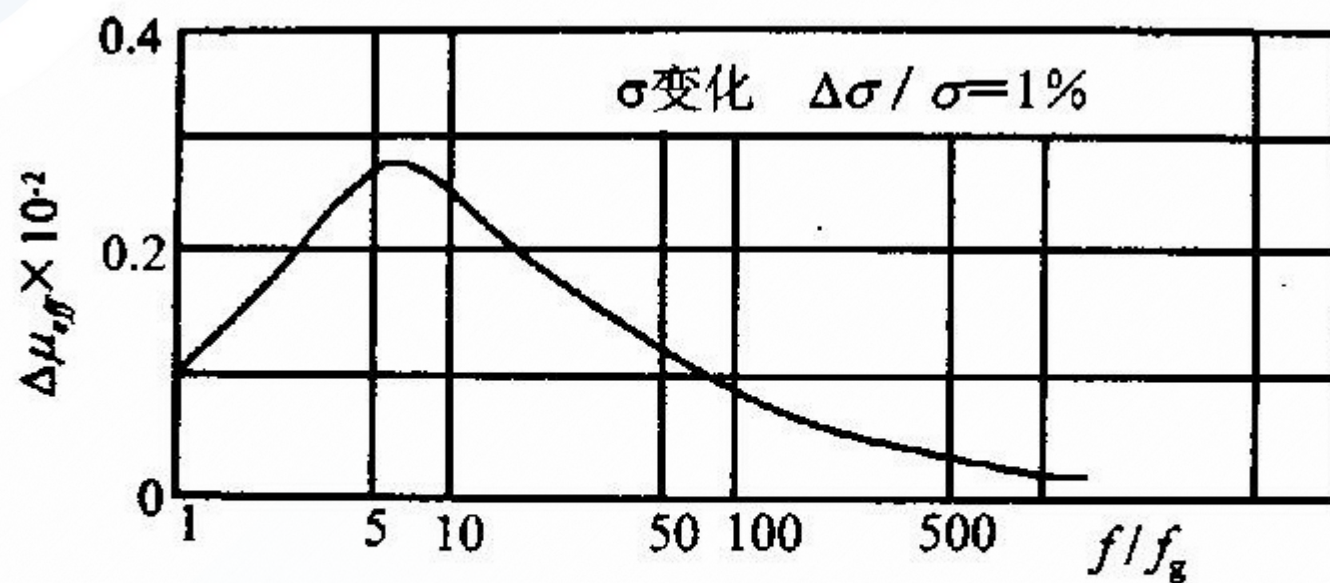
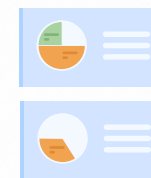
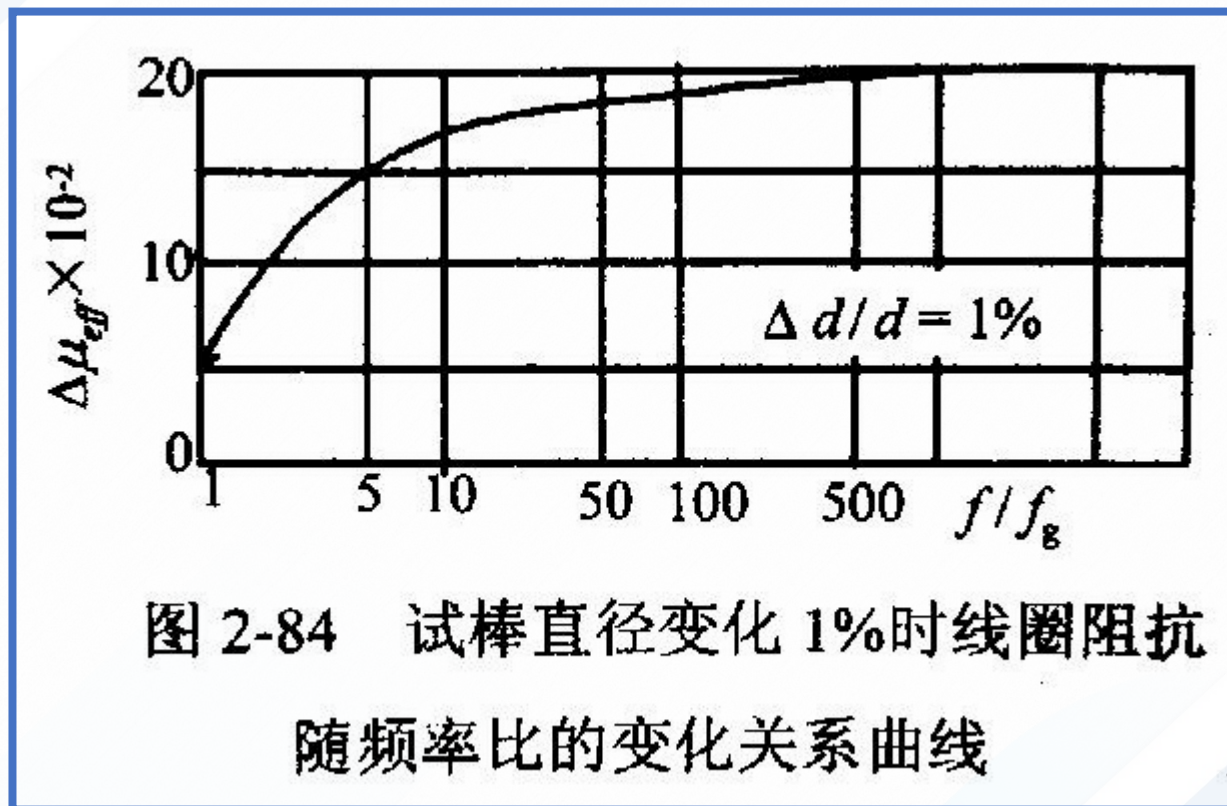
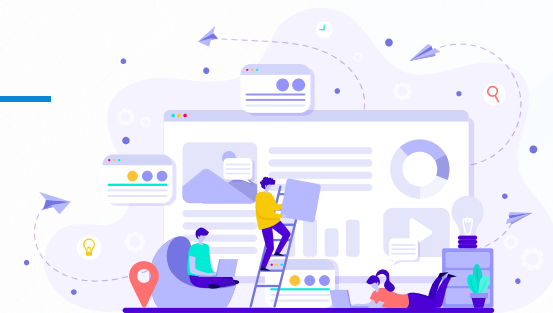


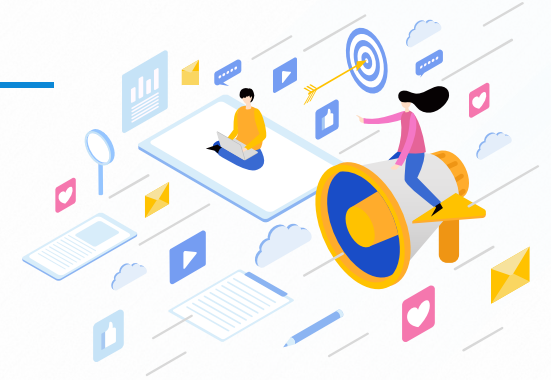
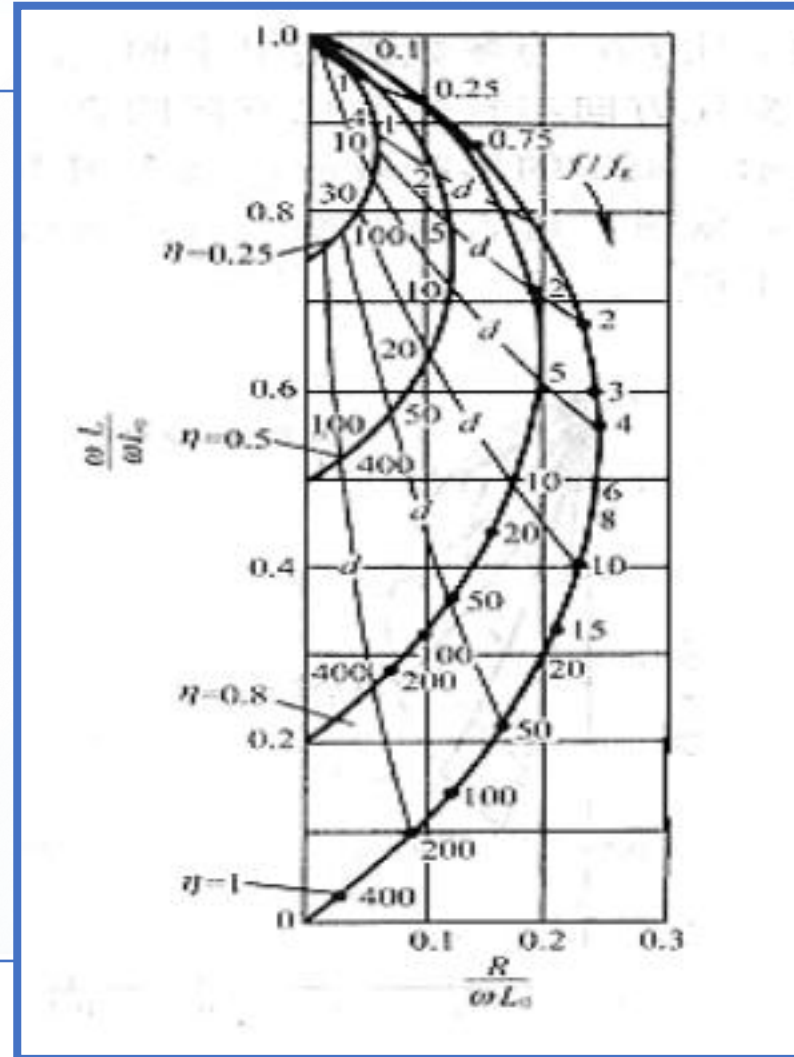
图 2-83 非磁性圆棒试件电导率变化 1%时，线圈阻抗随频率比变化的关系曲线



2.5 涡流检测应用

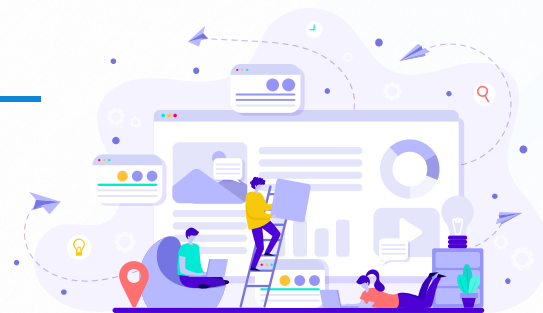


2.5 涡流检测应用



2.5 涡流检测应用

平衡回路的调节



平衡回路的调节是指在采用对比试样的无缺陷部位(或标准试件)进行试验时，对平衡回路进行的调节。以便在检测空载或对无缺陷试件检测时，检测线圈的输出信号为零。

2.5 涡流检测应用

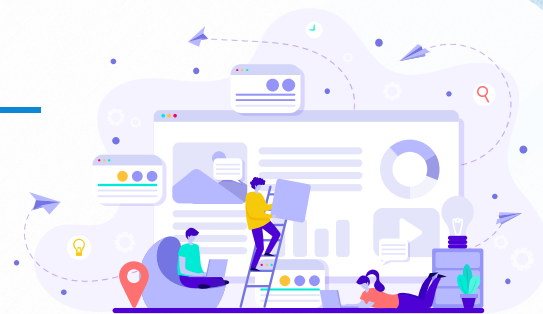
灵敏度的选择

灵敏度的确定与检测要求及使用的仪器有关。一般是根据要求检测的缺陷大小，调节与之相适应的人工缺陷指示的大小在指示仪表满刻度的50%~60%的位置上(记录仪灵敏度也按这种方法调节)。这样，既可以在量程上留有余量，又能保证读数的精确。



2.5 涡流检测应用

相位的设定



这里的相位，是指采用相敏检波进行相位分析的检测仪中移相器的相位角。一般应该选取能够最有效地检出对比试件中人工缺陷的相位角。相位角的选择方法有两种：

- ①把缺陷信号置于信噪比最大时的相位：这种方法可以使输出信号中降低因试件摇摆、振荡产生的噪声。
- ②选取能够区分并检测缺陷的种类和位置的相位角：这种选择方法必须兼顾到缺陷的检测效果和不同种类、不同位置缺陷的良好区分效果。例如在管件探伤时，内、外表面裂纹位置的区分。

2.5 涡流检测应用

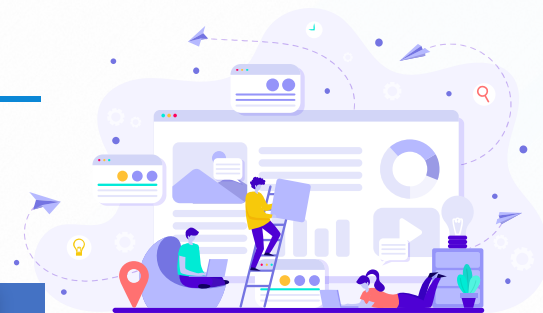
滤波器的设定

是指在用对比试件进行探伤时，人工缺陷以最大信噪比被检出时滤波器的中心频率和频带宽度的设定。

抑制器的设定

抑制器的设定是指从显示或记录仪器中消除低电平噪声的调节。由于在相位设定和滤波器调节时抑制器必置零，因此抑制的调节应在上述操作之后。由于抑制作用，缺陷和缺陷信号的对应关系一般会发生变化(即破坏了两者的线性关系)。这一点在试验时应予以注意。

其它附加装置的调节



2.5 涡流检测应用

04 试验结果及其处理



- 试验结果的再试验
- 退磁
- 标记与记录

2.5 涡流检测应用

①标记

根据试验结果，对各类试件分别涂上代表不同意义的各种字符标记。

②记录

试验结束后，需要根据试验要求记录的内容，主要有如下几项：

- 试验日期；
- 试验名称；
- 试件的型号、规格、尺寸及数量等；
- 仪器的型号、线圈的形式；

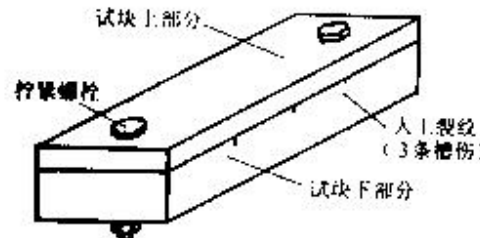
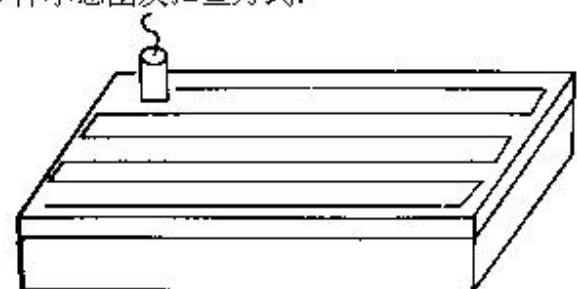
2.5 涡流检测应用

- 试验条件(包括探伤仪的试验频率、灵敏度、相位、滤波器、抑制器、报警灵敏度、试件进给速度、磁饱和电流等等);
- 验收标准(如探伤判废标准)和对比试件编号、标准伤的型式和尺寸
- 试验结果, 包括各种数据、图表以及验收结论等;
- 有关人员签名: 操作者、报告签发者、审核考等。

2.5 涡流检测应用

中央机翼下壁板涡流检测工艺卡

JCGYK/320-ET/0530-2003

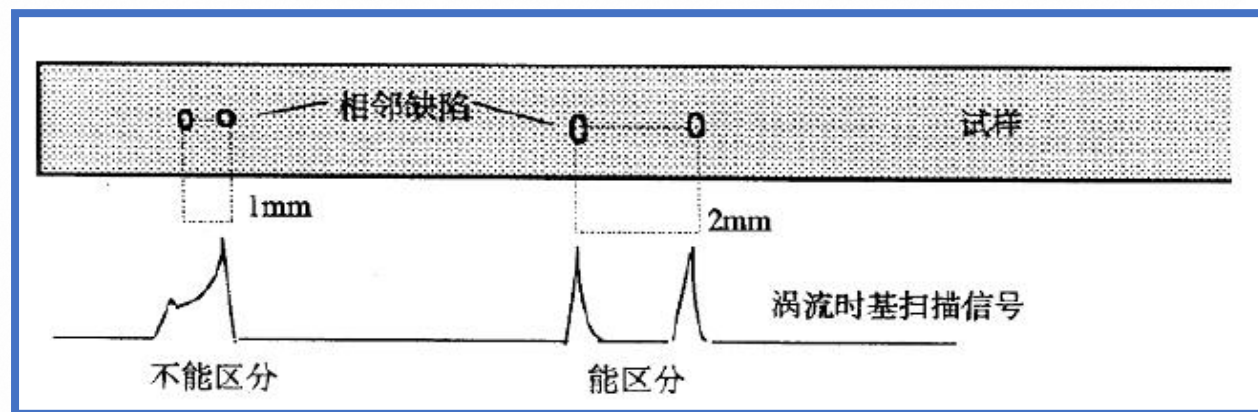
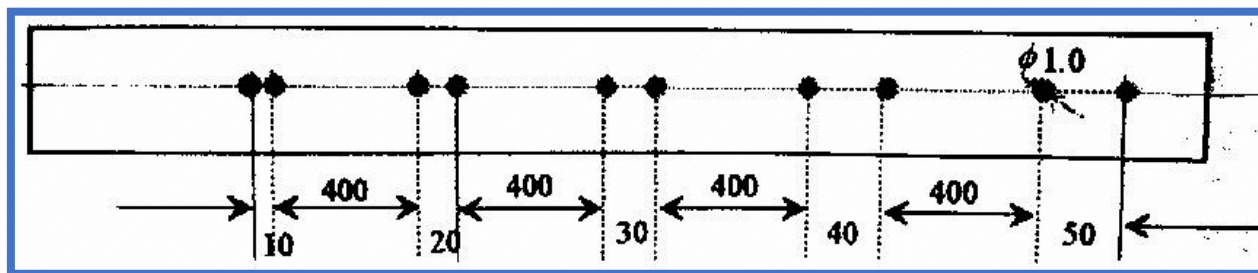
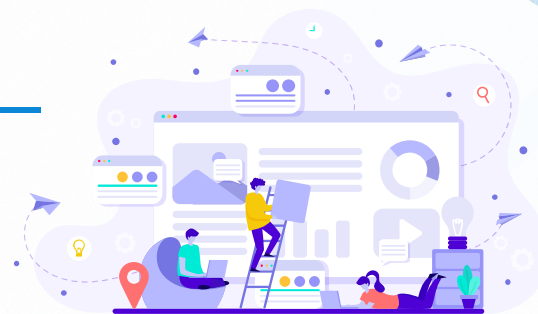
零件名称	中央机翼下壁板	材料	2A12
仪器	MIZ-20A	探头及编号	绝对式线圈 S/N: 40070
检测仪器参数: 频率: $f=800\text{Hz}$ 相位: $P=273^{\circ}$ 增益: $G=72\text{dB}$ 垂直水平比: $V/H=2.0$ 线圈形式: Absolute (绝对式)		对比试块: C201A320-14 	
检测步骤: 开机, 仪器自检 检测参数设置与调整 用平探头扫查对比试样, 获得深度为 1mm、2mm、3mm 人工槽形缺陷响应信号 右机翼翼展方向扫查下壁板, 扫查间距 30mm, 扫查速度不大于 3m/min 重复扫查出现异常信号部位, 并记录缺陷位置、大小、深度 连续工作时, 每隔 1h 核验仪器工作状态是否正常		零件示意图及扫查方式: 	
说明: 当根据扫查方式获得的响应信号的相位角不容易判定腐蚀深度时, 可参考利用检测线圈在该位置上的提高信号的相位角进行判定			
编制/日期/级别		审核/日期/级别	
×××/×××/Ⅱ级		×××/×××/Ⅲ级	
		批准/日期	
		×××/×××/	

2.5 涡流检测应用

05 对比试件和标准缺陷

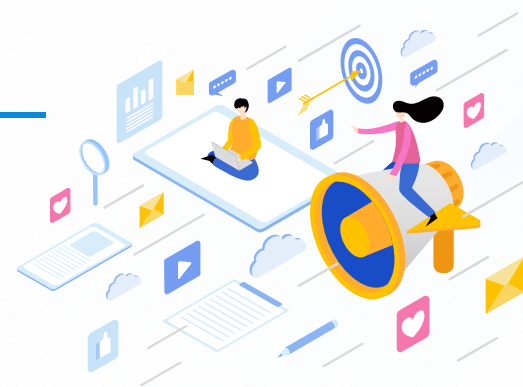
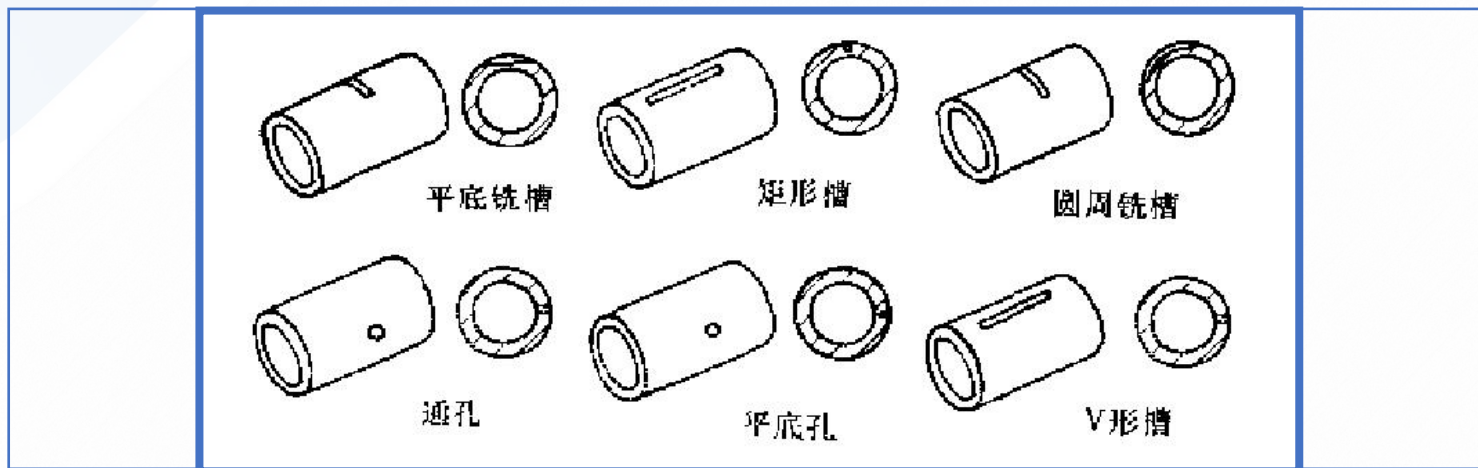
对比试件的3个主要用途

- 检验和鉴定设备性能
- 设备的调节和检查
- 产品的验收标准



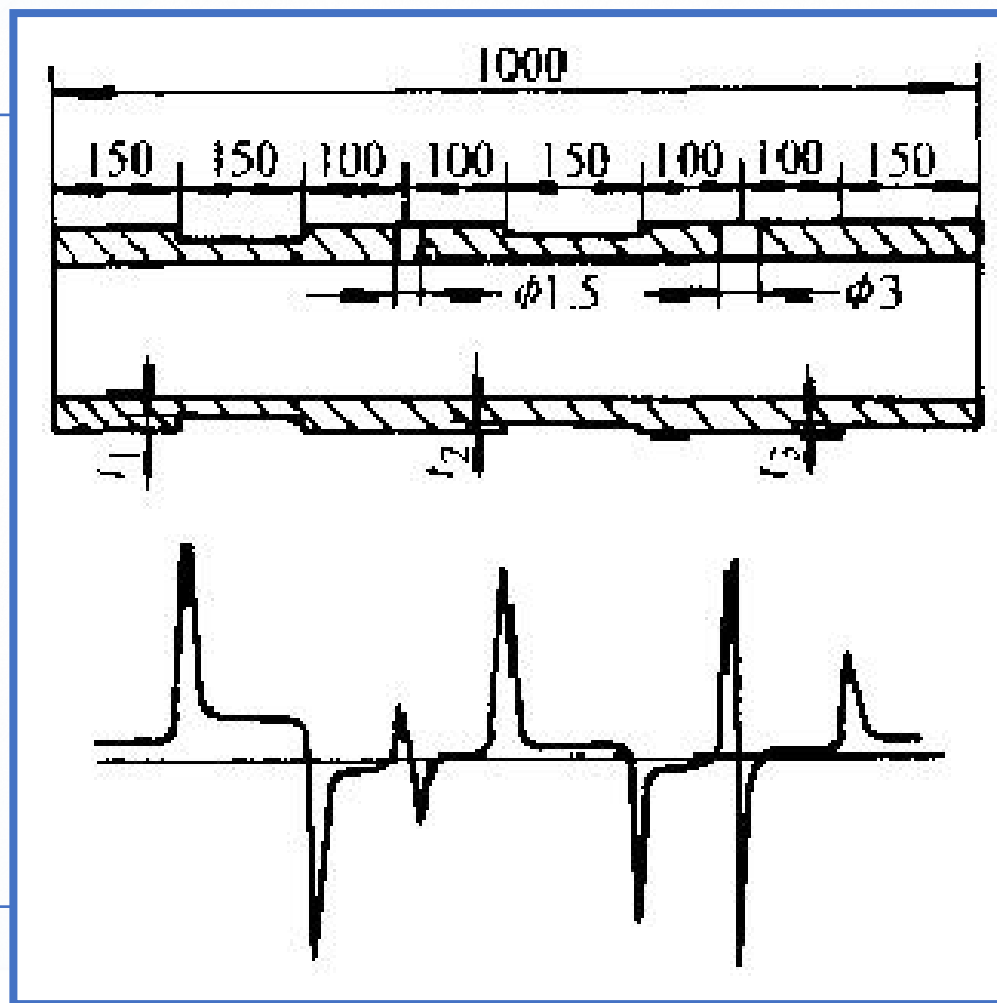
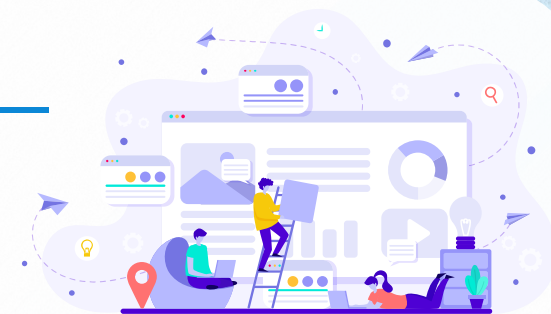
2.5 涡流检测应用

人工缺陷



- ◆ 对比试样应与被检测对象具有相同或相近规格、牌号、热处理状态、表面状态和电磁性能;
- ◆ 对比试样上加工的人工缺陷应采用适当的方法进行测定, 并满足相关标准或技术条件的要求;
- ◆ 对比试样上人工缺陷的尺寸不应解释为检测设备可以探测到的缺陷最小尺寸。

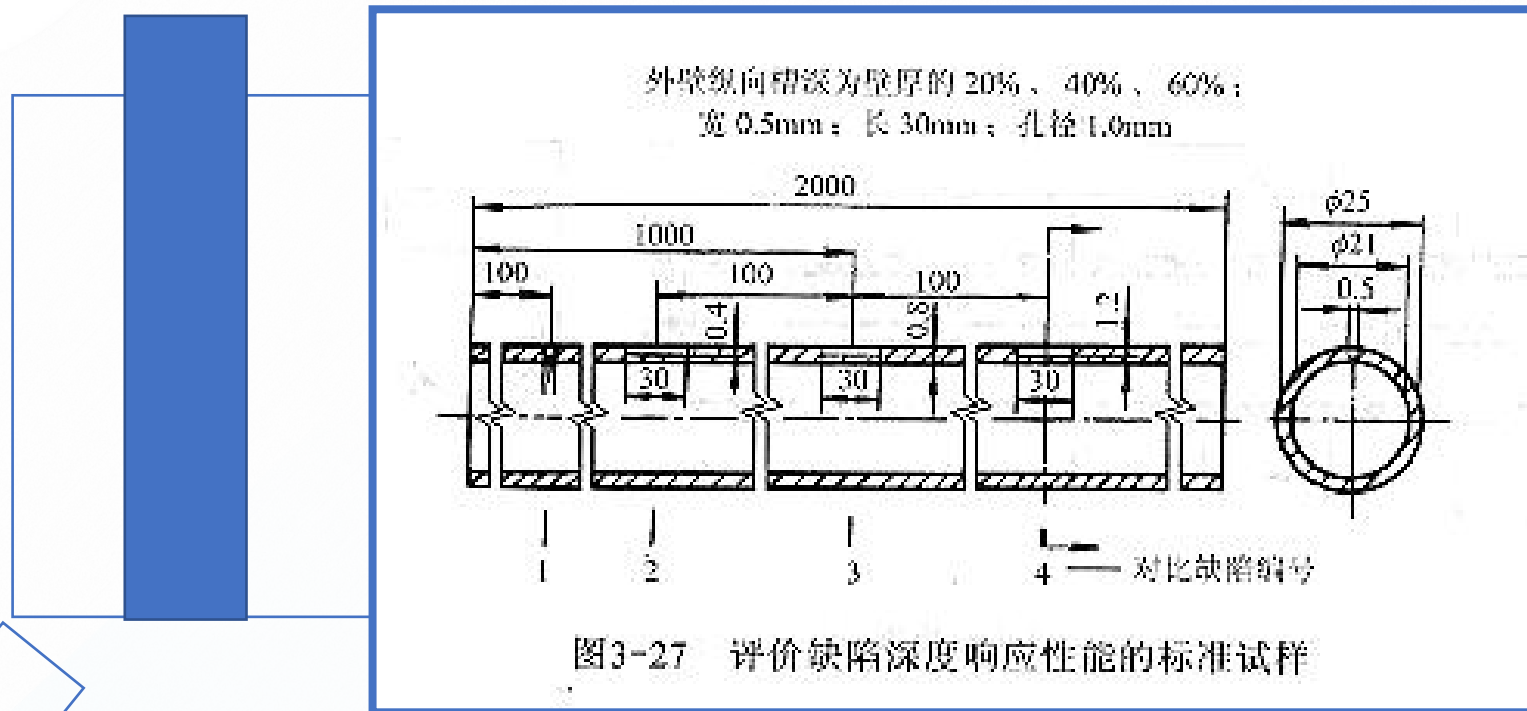
2.5 涡流检测应用



校准管人工缺陷信号波形

2.5 涡流检测应用

✓ 对缺陷深度响应性能的评价



✓ 对内部缺陷和表面缺陷响应能力的评价

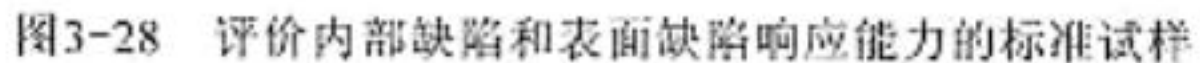
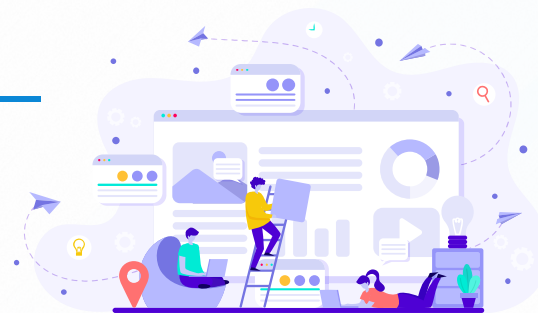


图3-28 评价内部缺陷和表面缺陷响应能力的标准试样

2.5 涡流检测应用

✓ 对缺陷长度响应性能的评价

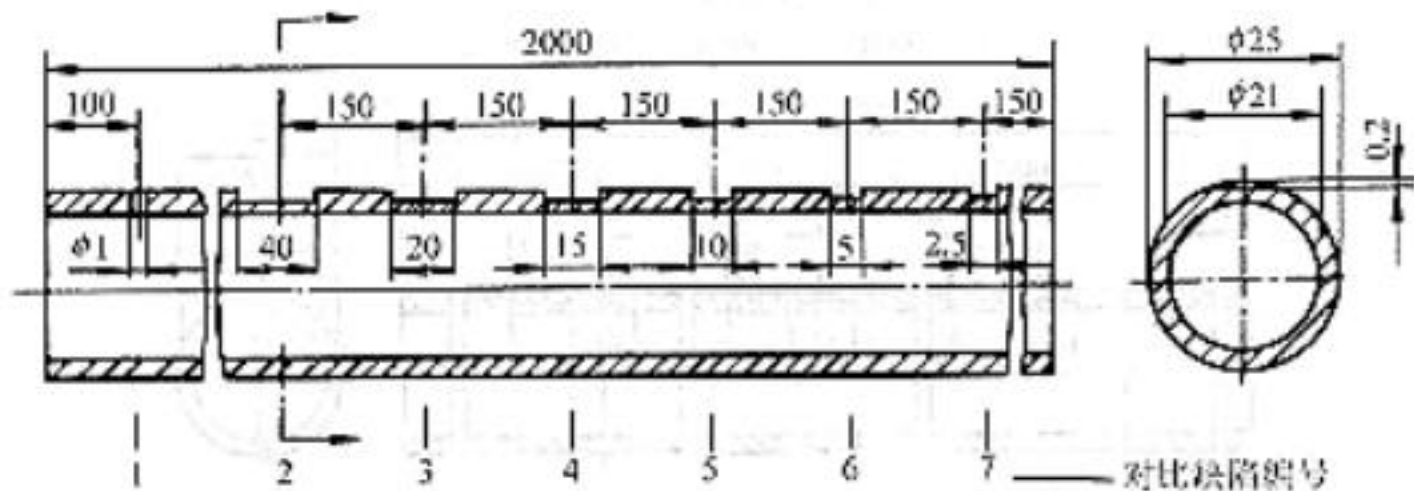
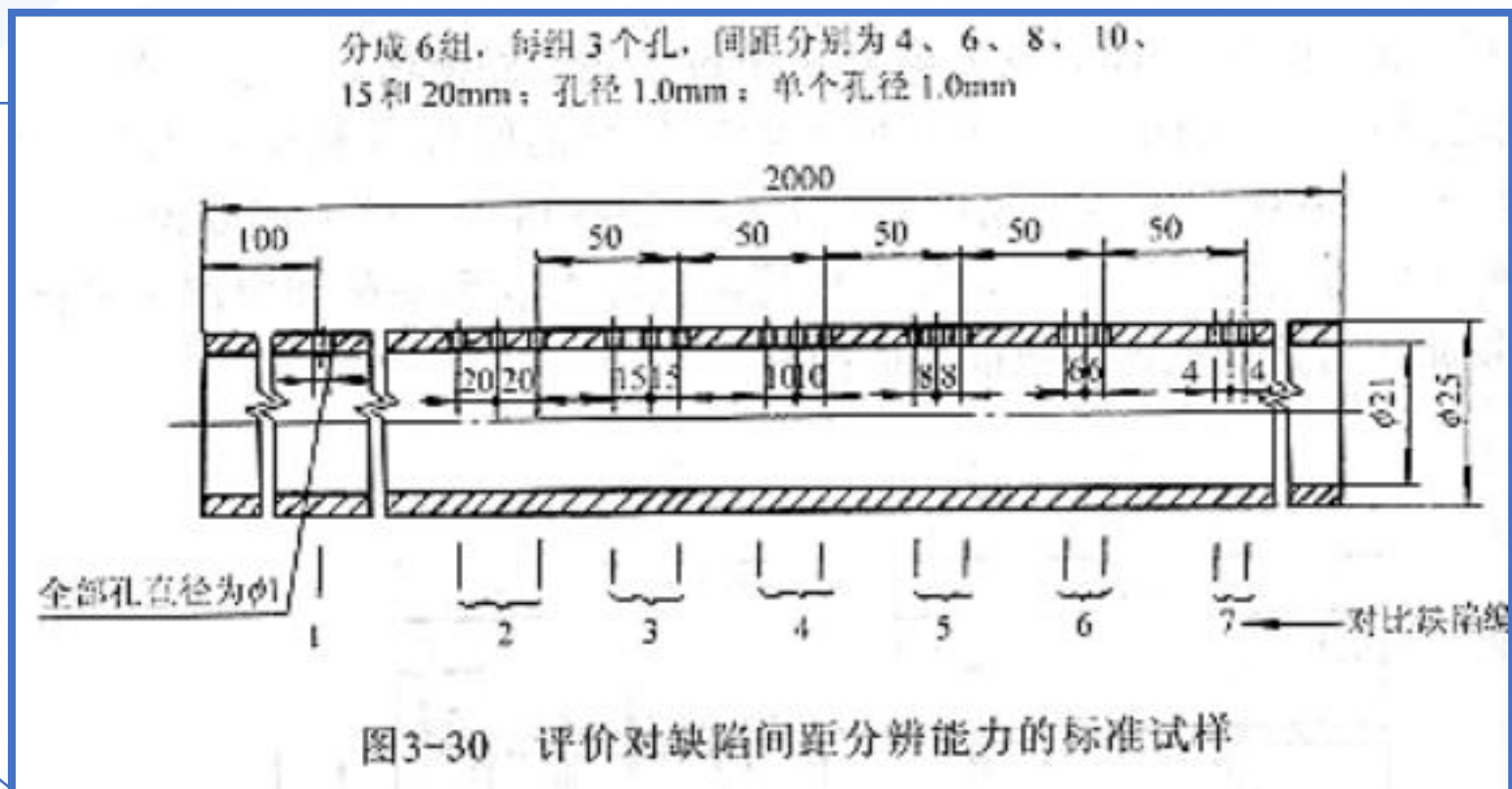


图3-29 评价对缺陷长度响应能力的标准试样

2.5 涡流检测应用

✓ 对缺陷间距分辨能力的评价



2.5 涡流检测应用

✓ 周向灵敏度差的测试与评价

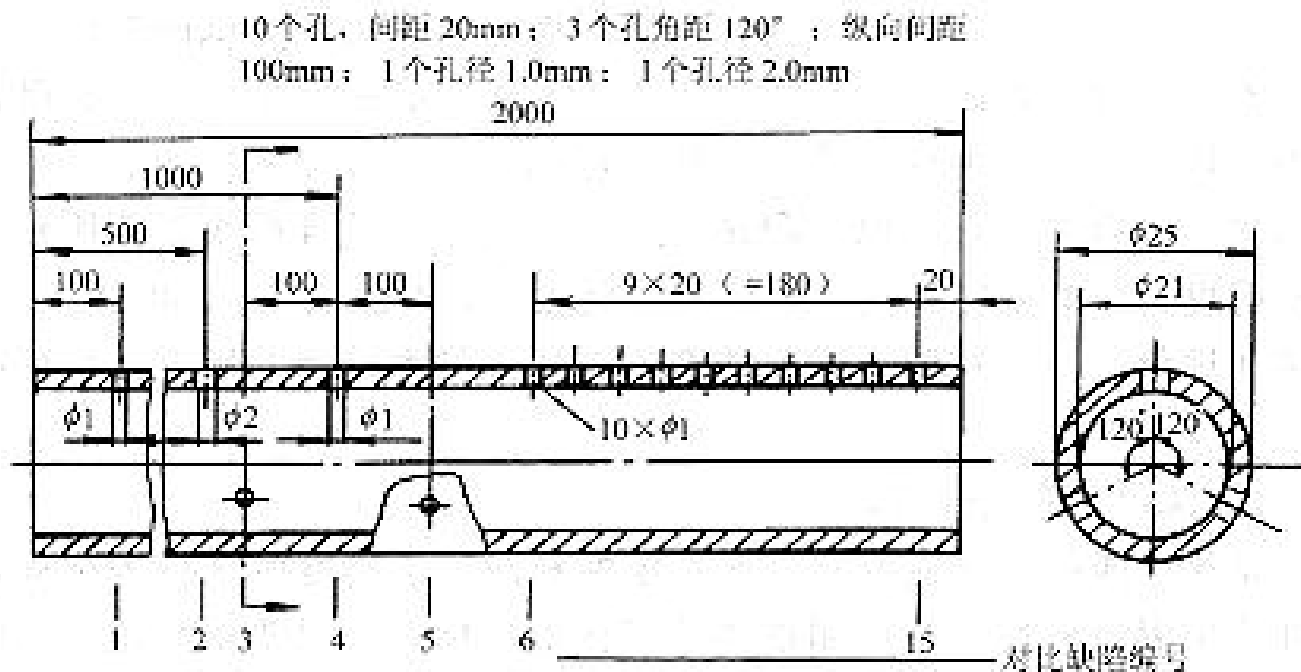
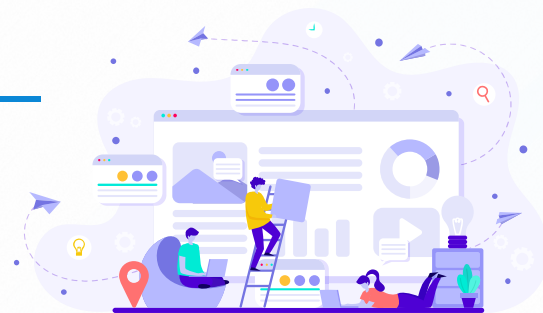
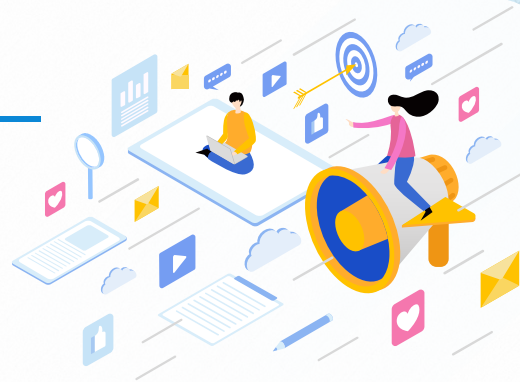
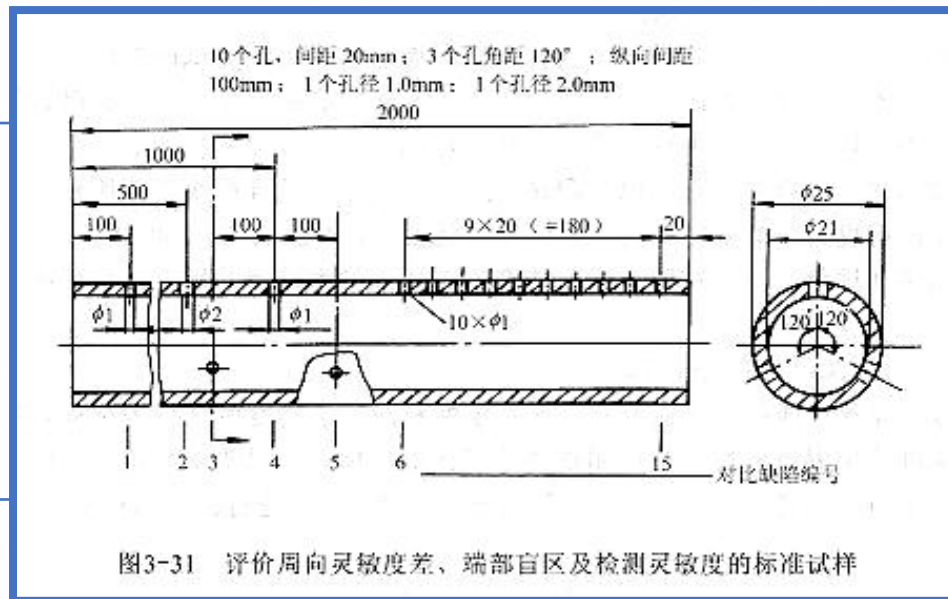


图3-31 评价周向灵敏度差、端部盲区及检测灵敏度的标准试样

2.5 涡流检测应用

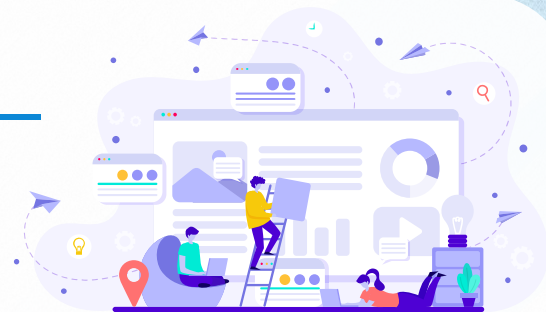
✓ 端部盲区的测试与评价



- ◆ 涡流仪灵敏度调节性能的测试与评价
- ◆ 涡流仪相位调节性能的测试与评价
- ◆ 检测系统工作稳定性的测试与评价

2.5 涡流检测应用

06 检测标准



保证可靠性、方法的一致性、以便推广

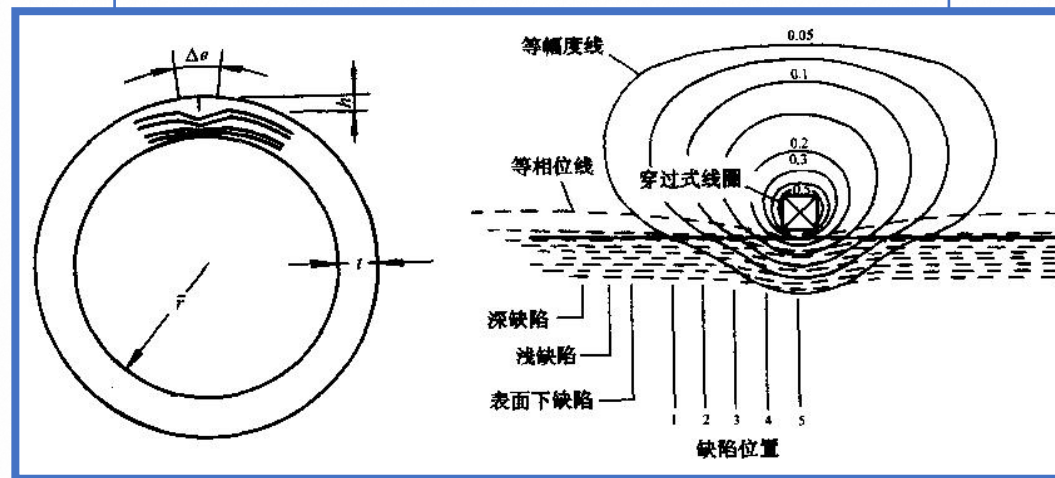
例如：GB/T12969.2-1991钛及钛合金管材涡流检测标准，适用于外径10mm~60mm、壁厚0.5mm~45mm的冷凝器和热交换器管道；GB/T11260-1996圆钢穿过式线圈涡流检测标准，适用于直径2mm~100mm圆钢/钢丝的缺陷涡流检测。

- ◆ 检测对象和应用范围
- ◆ 对比试件
- ◆ 检测方法的基本原理
- ◆ 检测设备
- ◆ 检测中术语解释
- ◆ 仪器的调整，检测步骤

2.5 涡流检测应用

二.环绕式线圈涡流探伤

- ◆ 环绕式线圈包括外通过式线圈和内穿过式线圈。主要用于金属管、棒、线材的在线、设前和在役检测。
- ◆ 环绕式线圈形成涡流的方向和分布与检测的灵敏度密切相关，检测时为了获得较高的灵敏度，必须尽可能使涡流流动方向垂直于缺陷。



2.5 涡流检测应用

- ◆ 线圈截面尺寸对检测灵敏度和分辨率具有很大的影响。一般来说，线圈长度越大，灵敏度越高，分辨率则相对较低。在分辨率和信号幅度之间最好的折中是选择线圈的长度和厚度等于缺陷的深度。一般地说，线圈的长度和厚度应该近似等于壁厚。差动探头中两线圈之间的跨度应该近似等于缺陷的深度或者壁厚。
- ◆ 探头与管子之间的间隙应尽量小，以提高检测灵敏度，但是间隙太小，会给传动带来困难。在大多数采用内穿过式探头检测管子时，通常耦合间隙为 $1/2$ 的壁厚。

2.5 涡流检测应用

01

金属管道生产过程及其缺陷形成



无缝管是将圆管坯经穿孔机或挤压机加工成毛管，再经轧管机压延成形，小直管和薄壁管还要进行反复地冷轧——退火工艺。无缝管的常见自然伤有折叠、结疤(钢管表面的条状或块状折叠)、直道缺陷(钢管内外表面呈纵向的凹陷或凸起)、凹坑(压痕)、裂缝、导板划痕、横裂或分层等。

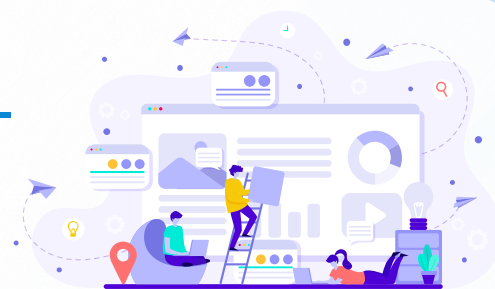
焊接管是将金属带材经变形加工成管状，在焊缝部位焊接成形。焊管常见的自然伤有夹渣、裂纹、气孔、焊接不良引起的表面裂纹、未熔合。

裂纹是最常见的自然伤，它是由于材质不良、加热不当、内应力、热处理不当或皮下气泡暴露于表面等因素造成的。折叠大都是轧制过程造成的缺陷，夹渣则是冶炼或加热时带入炉渣或耐火材料所致，夹渣或氧化皮脱落则形成麻点或凹坑。

2.5 涡流检测应用

02

涡流设备和探头的选择



- ◆ 金属管道在、离线涡流探伤的检测设备包括检测线圈和探伤仪。
- ◆ 探伤仪器最好选用多通道，也可根据实际情况选择双通道或者单通道涡流仪。
- ◆ 探头性能的好坏与探伤的灵敏度、可靠性密切相关。管材在、离线探伤可采用多种形式的涡流传感器，如穿过式、扇形式、平面组合式、阵列式和旋转探头等。

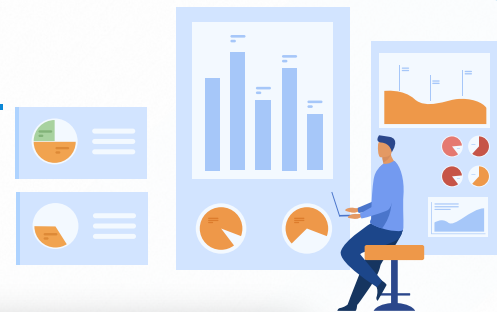
2.5 涡流检测应用

- ◆ 一般地说，外通过式线圈在电和机械结构上都比较简单，形状与试件吻合，能使用高速进给提高效率，穿过式线圈对试件表面和近表面缺陷有较好的反应。直径较小的管材通常选用外通过式线圈，以便对工件进行100%检查，且速度快、效率高。例如，JB/T4730.6-2005承压设备涡流检测标准，要求承压设备用铁磁性无缝钢管、焊接管采用外通过式线圈时，钢管最大外直径一般应小于180mm。
- ◆ 焊管在线探伤时，由于焊接过程中焊缝不能保持一个方位，常发生偏转，严重时可超过180°。而焊管的缺陷主要发生在焊缝，使用穿过式线圈检测时，无论焊缝偏向角度多大，都可保证检测的可靠性。

2.5 涡流检测应用

03

检测频率的选择



- ◆ 频率的选择决定于检测对象。如果测量直径的变化，需要对提高有较高灵敏度的仪器，这就要求使用高的检测频率。检测缺陷则要求仪器对缺陷所处的位置有足够的穿透深度，表面缺陷可以使用更高的频率，对表面下的缺陷，既要保证足够穿透深度，即采用足够低的工作频率，又要使缺陷和其它干扰因素之间有足够的相位差，以便分辨。以上这些因素表明：检测频率的选择通常采用折中方法。
- ◆ 管材探伤检测频率的选择要满足如下要求：
 - ①缺陷信号和其他信号之间要有足够的相位差以便进行相位鉴别；
 - ②内壁和外壁缺陷之间也要有相当的相位差以便分清内外壁缺陷。

2.5 涡流检测应用

- 方法1：根据特征频率参数计算检测频率；
- 方法2：利用“频率选择图”确定检测频率；
- 方法3：利用涡流透入深度公式计算检测频率；
- 方法4：国外经验公式：

$$f = \frac{10\rho}{t^2} (Hz) \quad \text{式中, } \rho \text{——电阻率 } (\mu\Omega \cdot cm)$$

t——壁厚 (英寸 *inch*)

$$1inch = 25.4mm$$

2.5 涡流检测应用

- 方法5：在实践中对各类型和尺寸的管子检测证明，工作频率 f_{90} ，即选择频率使得在填充因素变化(或内壁缺陷信号)和外壁缺陷信号之间产生90°的相移。 f_{90} 是根据经验从管子厚度和趋肤深度一定的比例推导出来的，通常选择这个比略大于1，即

$$\frac{t}{\delta} = 1.1 \Rightarrow f_{90} \approx \frac{3\rho}{t^2} (kHz)$$

式中， ρ 为电阻率，单位为 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ， t 是管子壁厚，单位为 mm 。

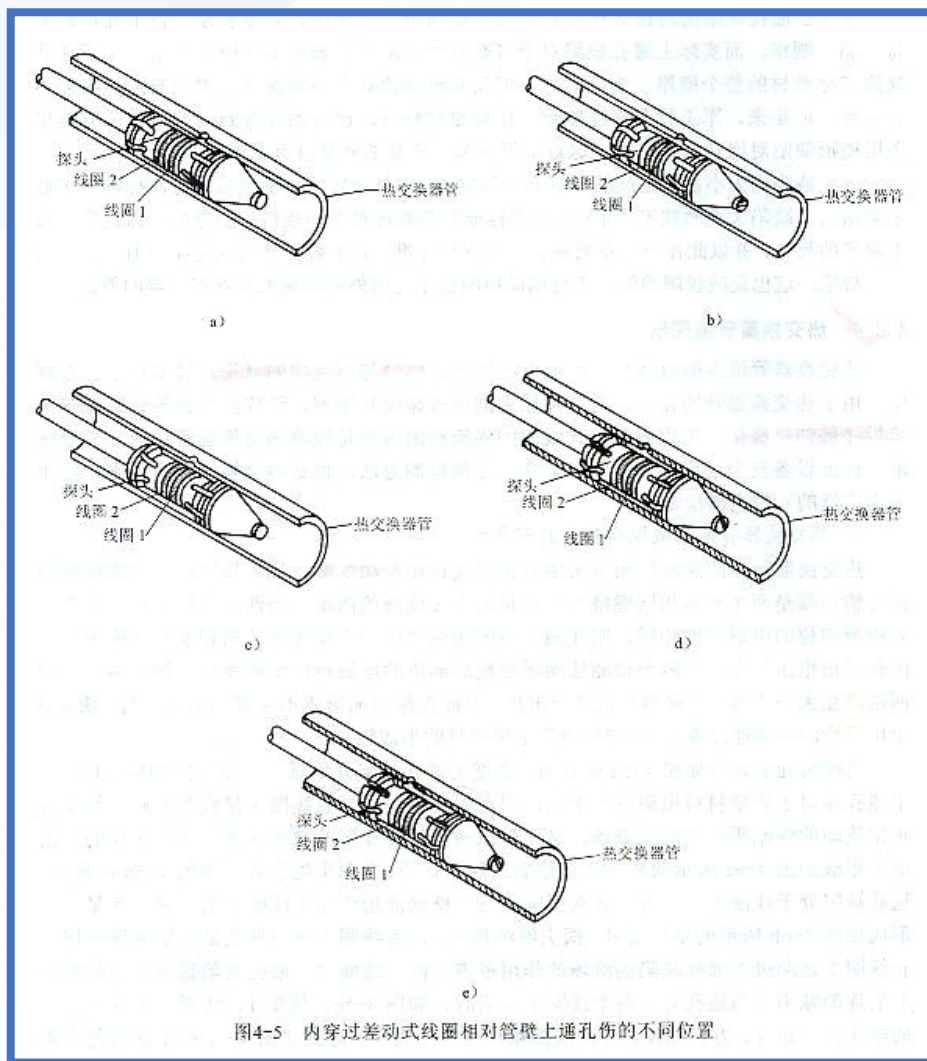
上式适用于外通过式和内穿过式线圈。使用工作频率 f_{90} ，对外壁和内壁缺陷都有较高的灵敏度。

2.5 涡流检测应用

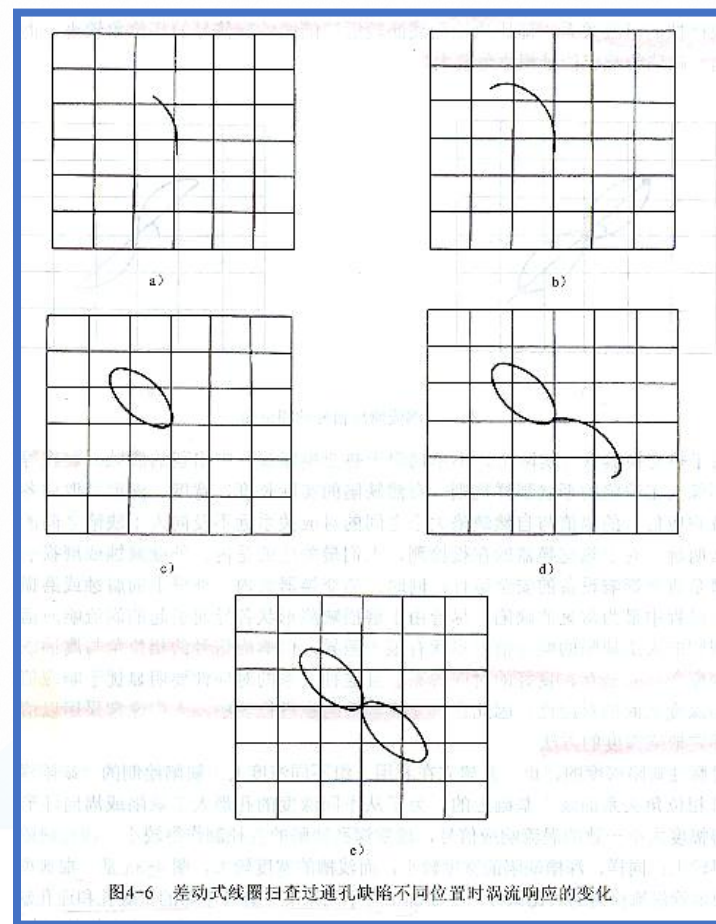
- **方法6：**多频涡流检测主检频率选择为使对比试样上深度为20%壁厚的平底孔的涡流信号比通孔的涡流信号相位角沿顺时针方向相差为 $50^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 。见JB/T4730.6-2005标准



2.5 涡流检测应用

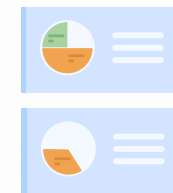
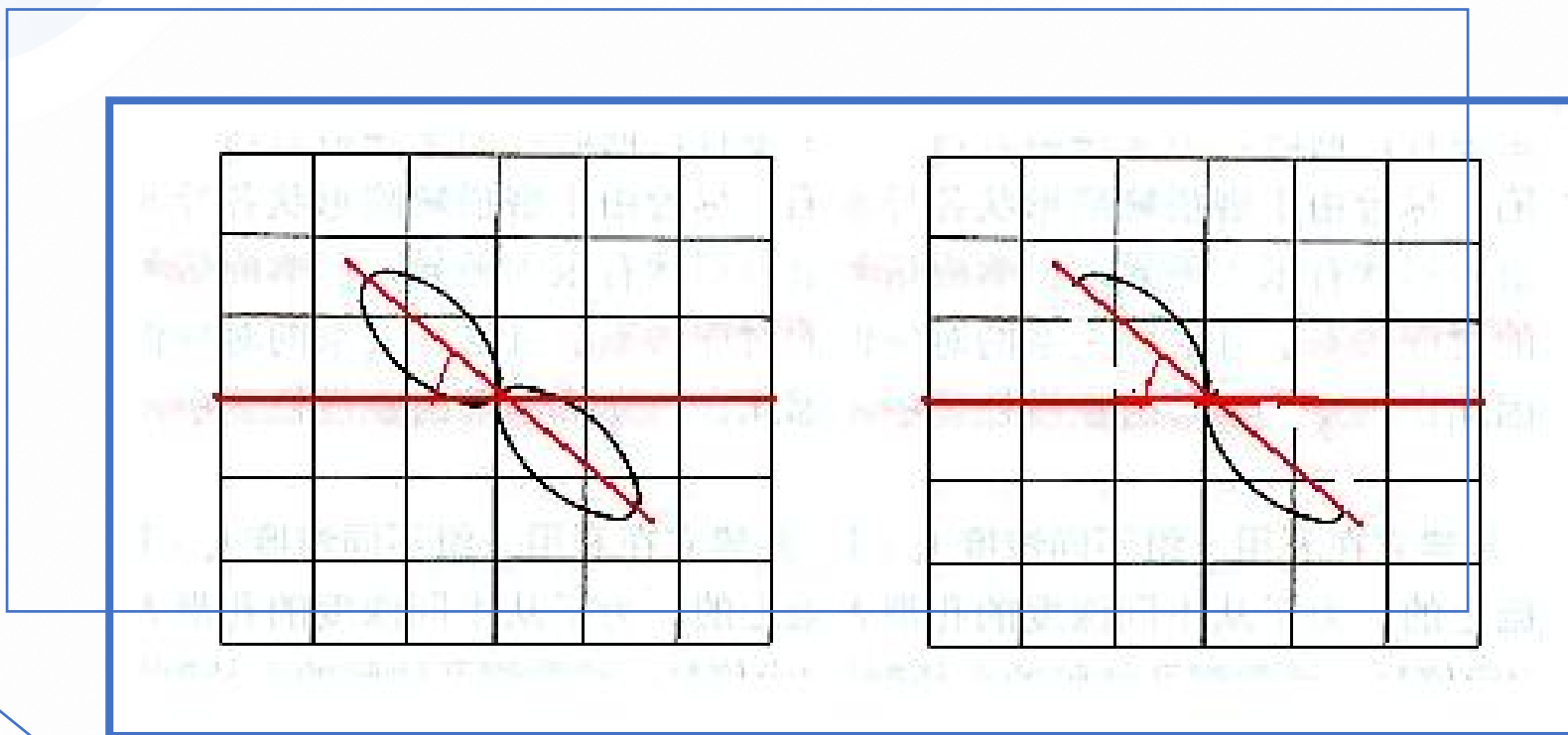


热交换器管道涡流探伤信号的形成



2.5 涡流检测应用

热交换器管道的单频涡流探伤



2.5 涡流检测应用

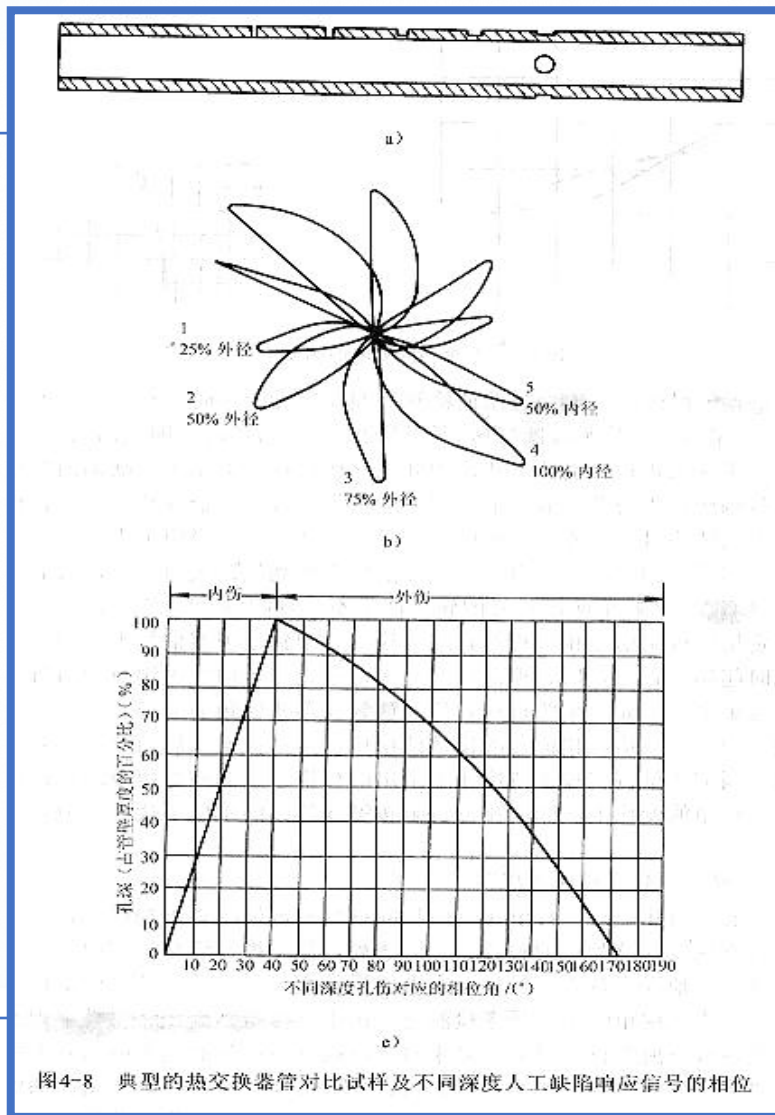
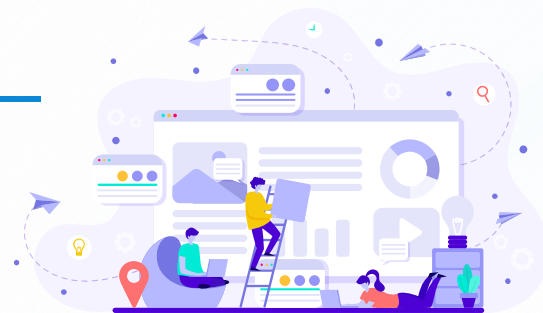
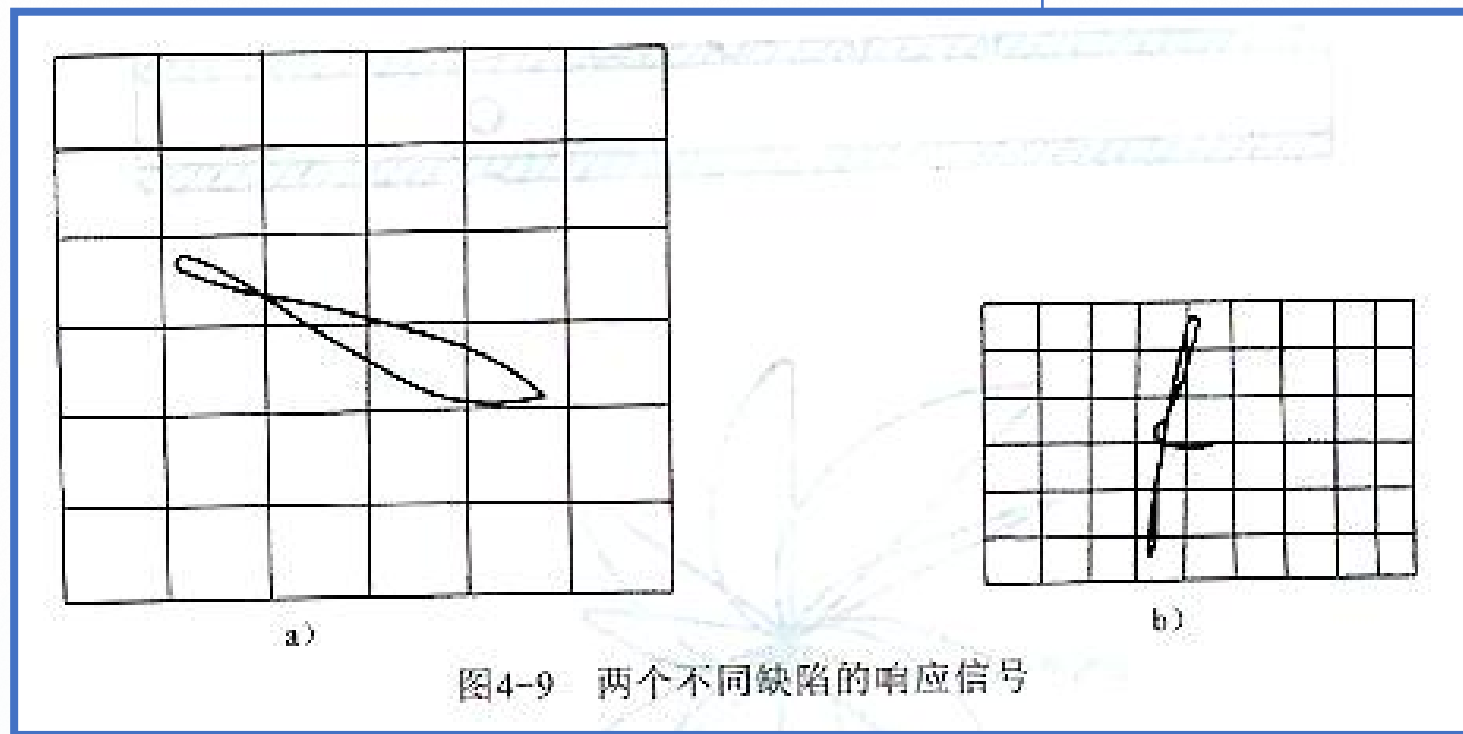
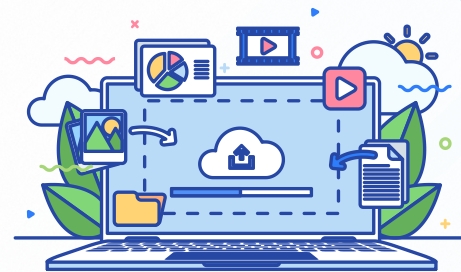


图4-8 典型的热换热器管对比试样及不同深度人工缺陷响应信号的相位

2.5 涡流检测应用



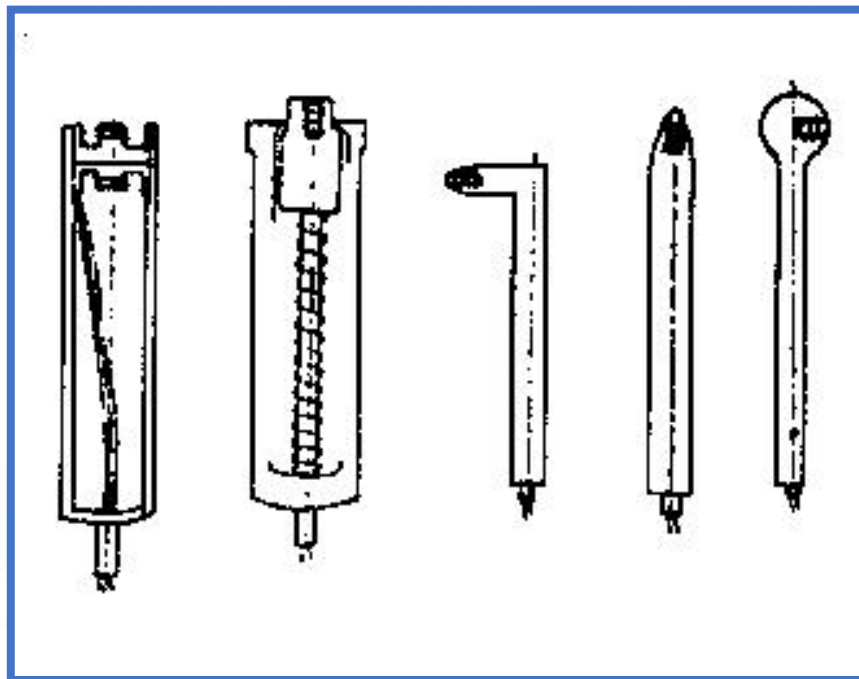
2.5 涡流检测应用

三.放置式线圈涡流探伤

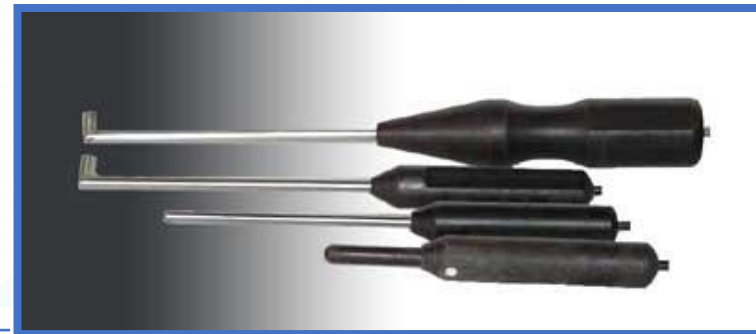
1.放置式线圈的特性

放置式线圈常用于工件表面缺陷，工件厚度测量或者材料性质鉴定等。缺陷可以是表面的或者近表面的，如裂纹、气孔和夹杂等，由于放置式线圈用途广泛，所以形态、结构

各异，据其特征可分为多种类型，如大饼式探头、平面探头、弹簧探头和笔式探头等。



2.5 涡流检测应用



2.5 涡流检测应用

2. 影响缺陷检测灵敏度

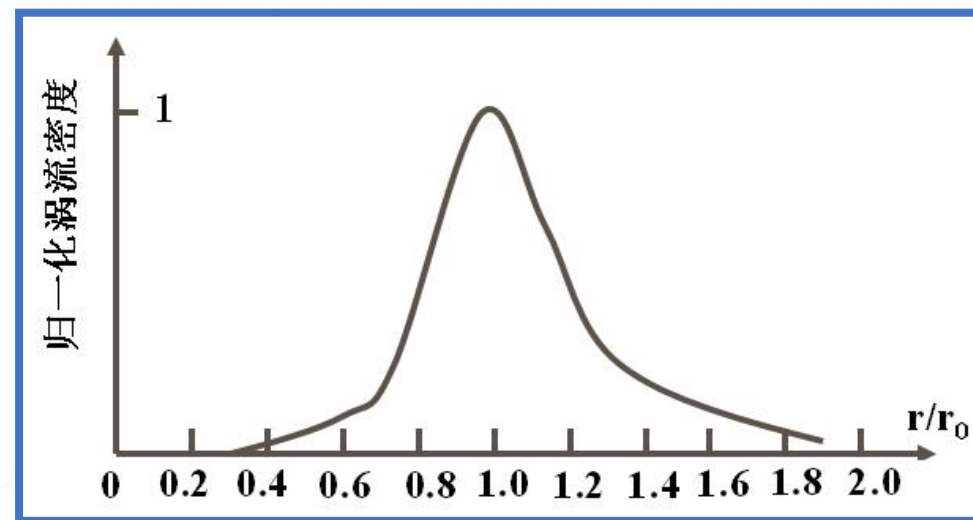


- ◆ 线圈的灵敏度、涡流及其磁通正比于到线圈中心的距离。可见缺陷处于试件相对于线圈中心的不同位置，检出灵敏度是不一样。在线圈的中心位置没有涡流，缺陷的检出灵敏度等于零。

- ◆ 通常探头的阻抗要求和仪器及其信号电缆的阻抗匹配。利用导线直径和关系式：

$$L \propto N^2 \bar{D}^2$$

可以比较容易地估计导线的尺寸和要达到一定的电感量所需要的圈数。



2.5 涡流检测应用

◆ 检测频率

◆ 探头直径

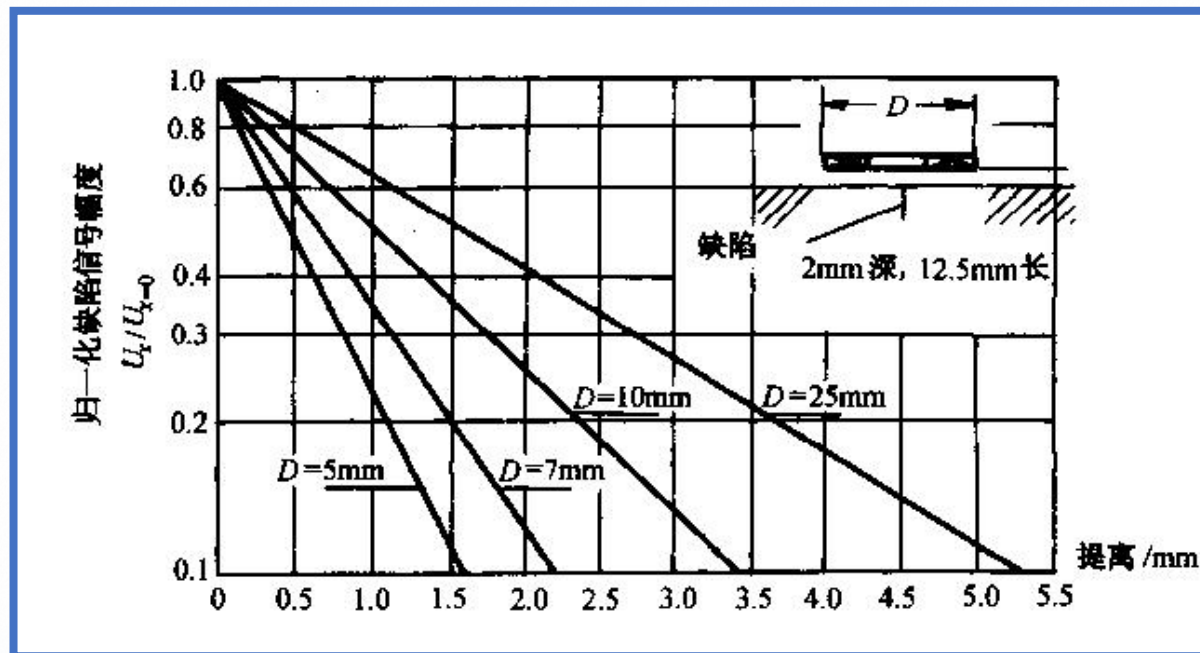
实际上涡流探头的直径都很小，磁通量也小。为了增加检测深度，可以增大探头的直径。但是探头直径增大，必定降低对短小缺陷的检测灵敏度，而涡流检测的深度一般小于探头直径。

◆ 提离距离

线圈从工件表面离开，即提离距离增加时，线圈和工件之间的互感减小，工件中磁通密度也减小，这样，对缺陷的检出灵敏度就降低，可以想象，线圈直径不同，磁通密度随着提离的变化也不一样，灵敏度的变化也不一样。

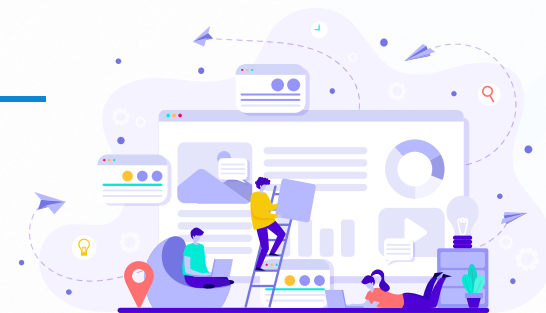
2.5 涡流检测应用

四种不同直径的探头的灵敏度随提高变化



由图可见，探头直径越小，灵敏度下降越快。

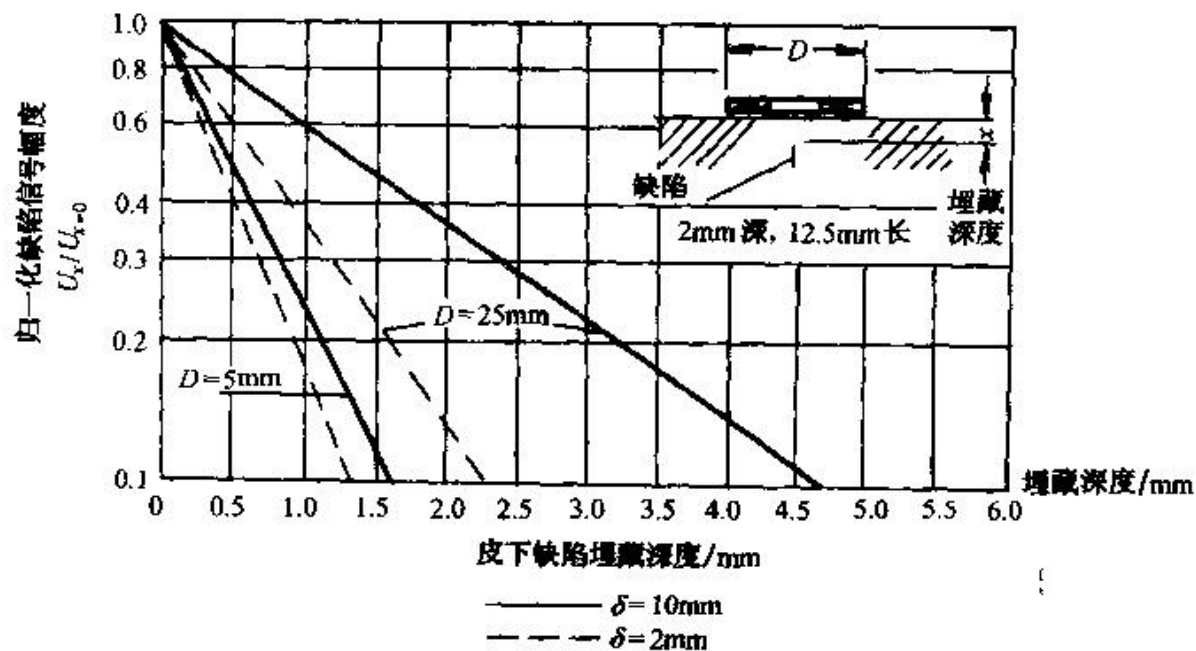
例如，对于直径为5mm的探头，提离为1mm时，缺陷信号幅度下降到表面1/4。



2.5 涡流检测应用

◆ 缺陷埋藏深度

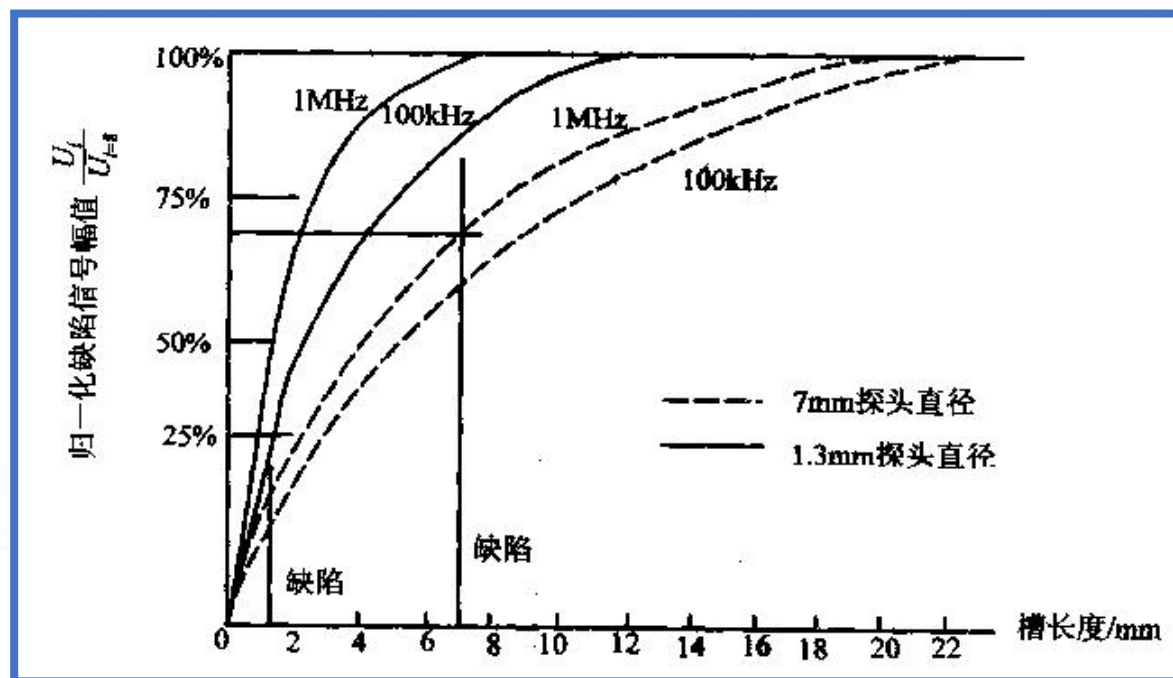
工件中皮下缺陷埋藏深度越大，磁通密度越小，再加上趋肤效应引起的衰减，缺陷的检出灵敏度也会下降。



2.5 涡流检测应用

◆ 缺陷长度

涡流的流动局限于探头磁场变化的区域，区域的大小是线圈尺寸和几何形状的函数。对放置式线圈而言，缺陷灵敏度反比于线圈直径；作为一般规律，为了得到高的灵敏度，探头直径应该等于或者小于所要检测的缺陷长度。缺陷长度对灵敏度的影响如图所示。



2.5 涡流检测应用

◆探头敏感区域

由于探头线圈磁场的发散比探头直径大，一般来讲，磁场作用范围是涡流检测探头直径的2倍；或等于探头直径加上4倍渗透深度。

在高频时，渗透深度很小，探头的敏感区域可近似等于探头直径。但是在低频时，磁场扩散很大，通常使用铁氧体环等材料使磁场集中，这样既集中了磁场又不影响渗透深度。

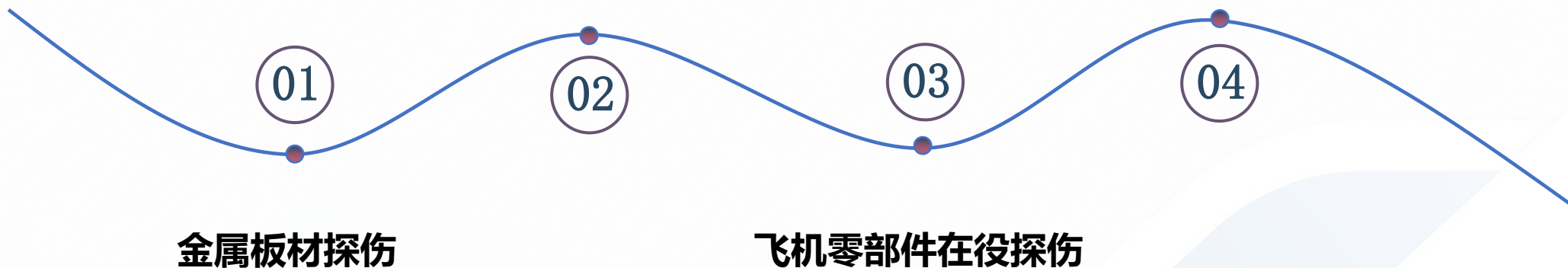
2.5 涡流检测应用

3. 放置式线圈探伤应用



球体、滚柱、销钉等零部件探伤

运行中零部件疲劳裂纹监测



2.5 涡流检测应用

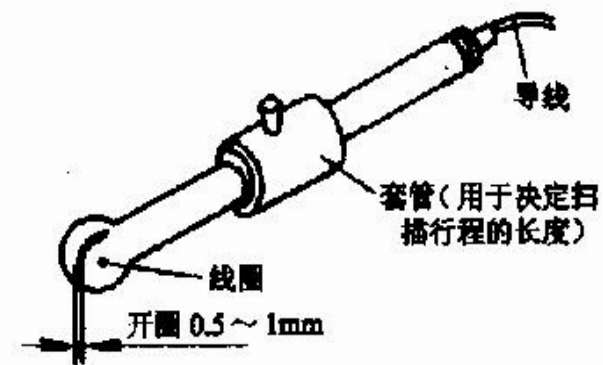
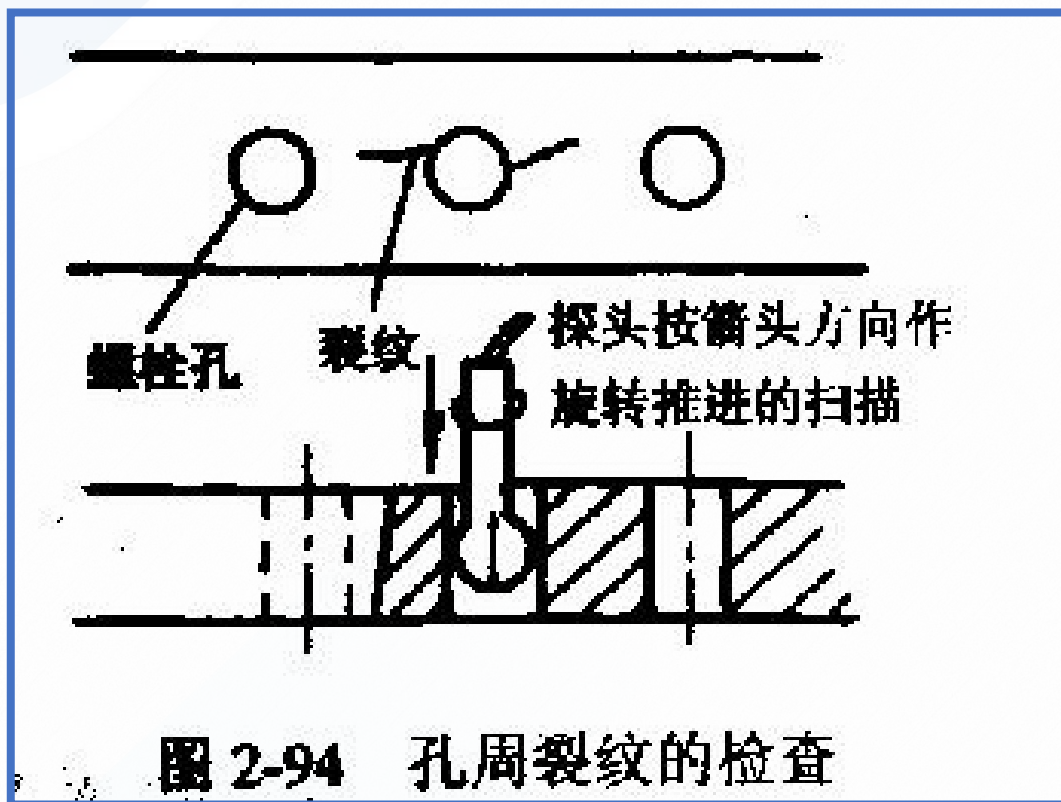
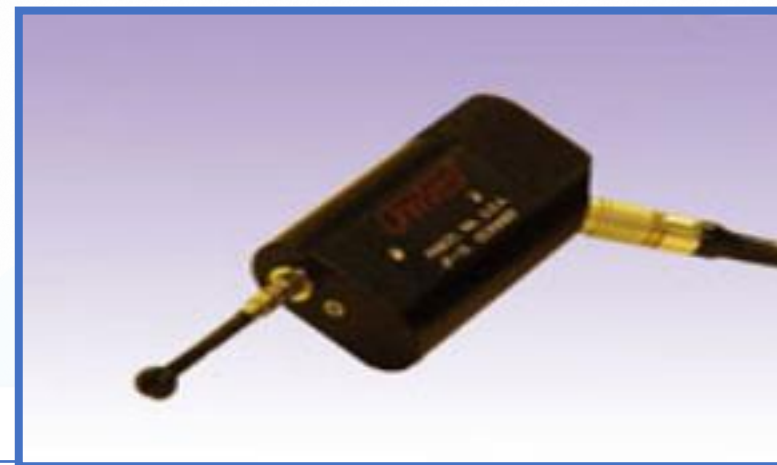


图 2-95 头部开槽，用于检查孔周裂纹的探头



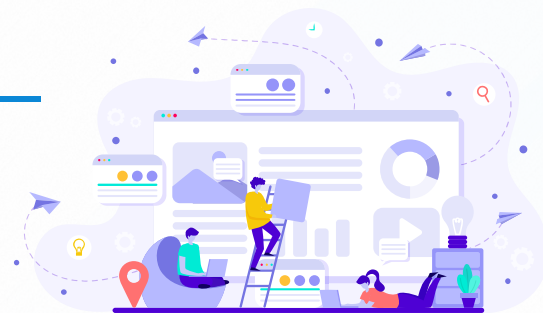
2.5 涡流检测应用

轴和叶片的检测



2.5 涡流检测应用

电厂汽轮机转子叶片检测



材料: 2Cr13

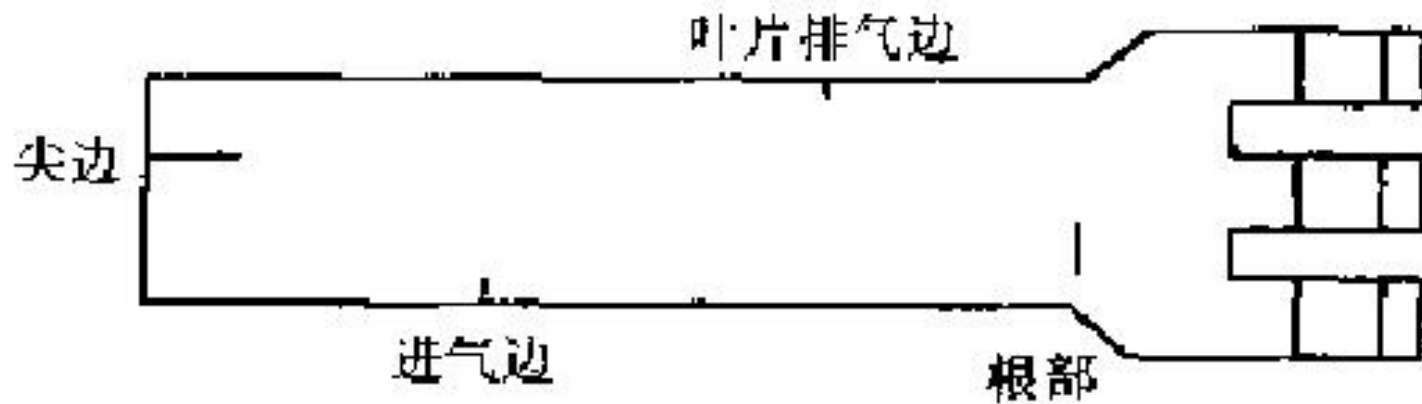
数量: 380片

尺寸: 一级 540mm, 110片

二级 373mm, 114片

三级 248mm, 156片

2.5 涡流检测应用



尺寸	尖边	排气边	进气边	根部
长	10mm	2mm	2mm	5mm
宽	0.12mm	0.12mm	0.12mm	0.12mm
深	1mm	1mm	1mm	1mm

2.5 涡流检测应用

电厂汽轮机转子叶片检测

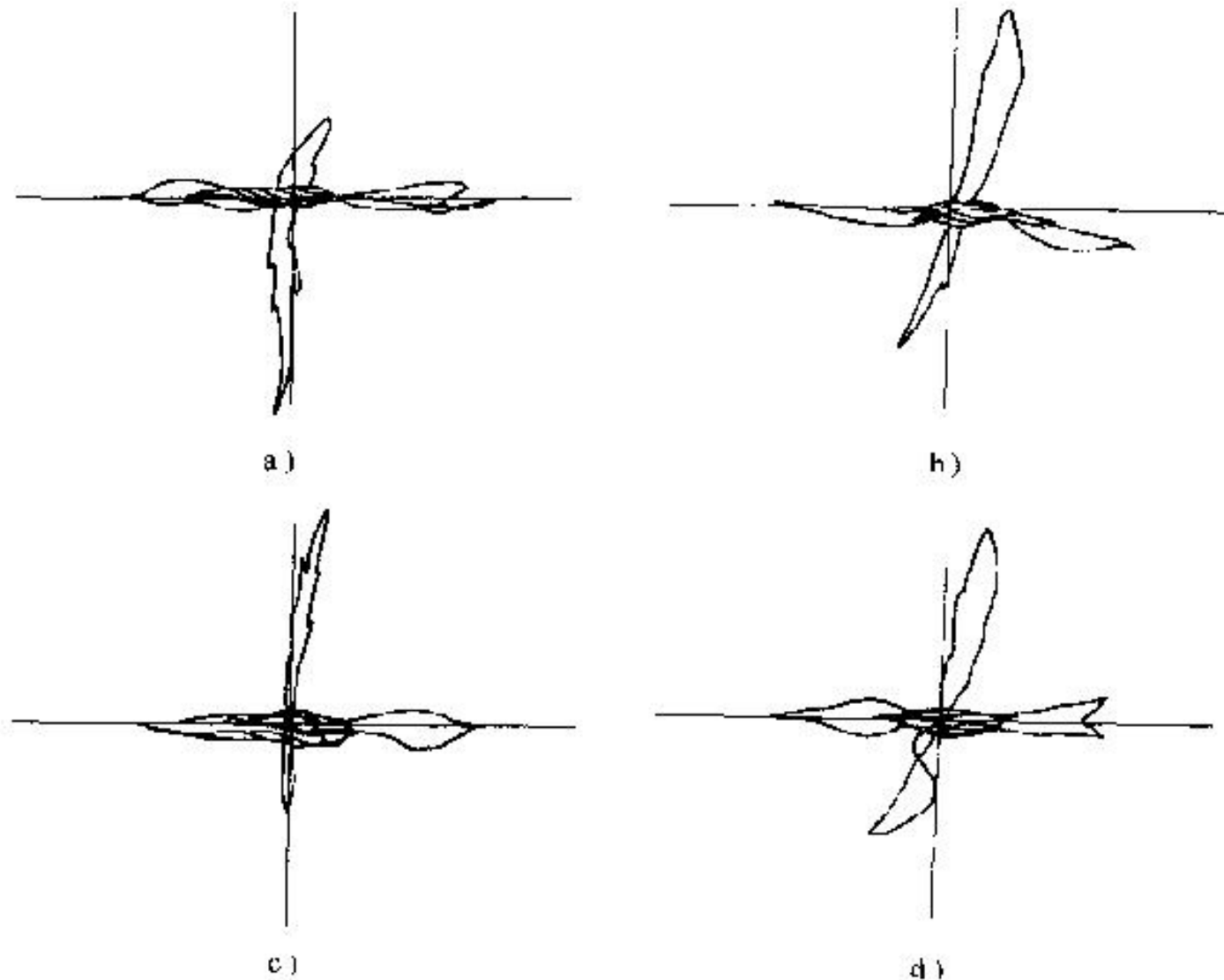


图 7-18 汽轮叶片缺陷信号响应显示

- a) 叶片尖边缺陷显示信号 b) 叶片排气边缺陷显示信号
c) 叶片进气边缺陷显示信号 d) 叶片根部缺陷显示信号



武汉理工大学
Wuhan University of Technology

谢谢观看！

机电工程学院测控系

主讲人：魏莉