

# 提离对脉冲涡流壁厚检测的影响

石 坤<sup>1</sup>, 林树青<sup>1</sup>, 何得峰<sup>2</sup>, 范智勇<sup>1</sup>, 李 浩<sup>2</sup>, 吴 鑫<sup>2</sup>

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

**摘 要:**很多常规方法对设备在线运行状态下的壁厚检测都无能为力。而脉冲涡流具有频谱宽、信号穿透能力强和衰减时间长等优点, 完全适合不拆除保温层在线高温或低温金属的壁厚检测, 成为近年来国际上重点研究的一项高新技术。然而, 实际设备的保温层厚度并不完全一样, 因此相对的提离高度也就不同。为了获知提离对脉冲涡流壁厚检测的影响, 就此进行了试验研究。结果表明, 提离高度与误差之间存在相应的函数关系, 并进行了定量分析, 并得到了对检测结果进行合理修正的办法。

**关键词:**脉冲涡流检测; 提离影响; 误差

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)12-0931-06

## Effect of Lift-off to Thickness Inspection by Pulsed Eddy Current

SHI Kun<sup>1</sup>, LIN Shu-Qing<sup>1</sup>, HE De-Feng<sup>2</sup>, FAN Zhi-Yong<sup>1</sup>, LI Hao<sup>2</sup>, WU Xin<sup>2</sup>

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Commonly conventional techniques are helpless to measure wall thickness of equipment in line. However, with the advantage of wide frequency spectrum, strong penetration and longer attenuation, pulsed eddy current (PEC) is very adaptable to measure wall thickness of metal in high or low temperature without insulation removal. The high-tech of PEC is becoming research focus of the world. As the practical insulation thickness different, so the lift-off between metal and probe is different. Researchers made many trials in order to know how lift-off influences measuring. Finally they found the relationship between lift-off and error, made quantitative analysis, established the formula of correcting data of inspection.

**Keywords:** Pulsed eddy current testing; Lift-off effect; Discrepancy

一般来说, 大部分金属容器或管道腐蚀后的直接后果是造成金属表面或管道壁厚的减薄。因此, 对于特种设备而言, 无论是定期检验还是在线检验, 壁厚检测都是非常重要的。常用的壁厚检测的方法是超声波测厚, 这种方法需要与金属表面直接耦合, 对高温金属壁厚检测的效果不佳。此外, 由于很多压力容器和压力管道等设备都带有保温层, 在要求不拆除保温层的条件下, 用超声波测厚就无能为力了。脉冲涡流壁厚检测通过磁场的作用, 不需要直接接触被检设备, 不受保温层材料的影响, 因此具有

超声波检测无法比拟的优势。然而, 由于设备的保温层在使用一段时间后会变得很不规则, 给检测带来了一定的影响。为了摸清保温层厚度(即提离高度)对检测的影响规律, 笔者在实验室进行了模拟试验和仿真分析。

### 1 脉冲涡流壁厚检测原理

给激励线圈施加一个具有一定占空比的方波, 激励线圈就会激发出具有一定周期频率的脉冲电流, 此电流可以感生出一个脉冲磁场, 即激励磁场。激励磁场可以穿过一定厚度的金属保护层和非金属绝热层而被传导到被检设备的金属表面, 并在金属内部诱发产生涡流, 即脉冲涡流。此脉冲涡流由金

收稿日期: 2009-08-01

作者简介: 石 坤(1971—), 男, 高工, 室主任, 主要从事无损检测新技术的开发和应用, 目前致力于脉冲涡流检测技术的研究。

属的表面向内逐渐减弱。此外,脉冲涡流也会产生一个磁场,是激励磁场的逆磁场,方向与激励磁场相反,且强度由金属表面向内逐渐减弱。当涡流信号到达金属的边界时会发生突然衰变,意味着涡流信号渗透传播过程的结束,脉冲涡流检测的工作原理见图1。由于不同厚度的金属涡流信号的衰变时间不同,因此,通过检测涡流磁场电压信号在金属内部的衰减变化,即可找出金属厚度与时间的对应关系。一般来说,涡流信号在被测金属中的衰减时间与涡流的强度没有关系,而是和被测物体本身的特性,如电导率、磁导率以及被测物件的壁厚成一定的函数关系。

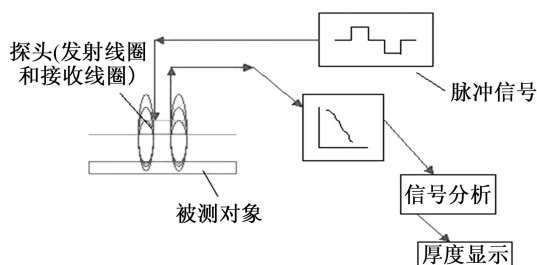


图1 脉冲涡流检测工作原理示意图

电磁检测往往会产生集肤效应,即涡流总是密集于工件表面。当材料不同或电流频率不同时,工件横截面上的电流密度分布也有很大不同,而且按负指数规律从工件表面向工件内部衰减。涡流的衰减公式为:

$$J_x = J_0 e^{-x\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (1)$$

式中  $J_0$  为导体表面的涡流密度;  $J_x$  为距导体表面为  $x$  处的涡流密度;  $f$  为交流电流的频率;  $\mu$  为材料的磁导率;  $\sigma$  为材料的电导率。

涡流在导体内的衰减程度用渗透深度  $\delta$  来表示。其定义为:涡流密度衰减到导体表面处的  $1/e$  时,涡流渗透入导体的距离(此定义也可理解为在距离表面某一特定的距离  $\delta$  处,涡流密度衰减到表面处的  $1/e$ ):

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (2)$$

根据以上分析,当假定涡流密度衰减到表面处的  $1/e^n$  ( $n$  为  $0 \sim \infty$ ) 时,对应的深度为:

$$\delta = \frac{n}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (3)$$

对式(4)进行转换,有:

$$\frac{\pi}{n^2} \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \delta^2 = \frac{1}{f} = \tau \quad (4)$$

$$\tau = c \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot \delta^2 \quad (5)$$

式中  $\tau$  是指某一频率的衰减时间;  $c$  为  $\pi/n^2$ ;  $\mu_0$  为绝对磁导率;  $\mu_r$  为相对磁导率;  $\delta$  为壁厚。可见,在同样的频率下,涡流传播时间越长,代表金属厚度越厚。

## 2 试验

### 2.1 钢板提离试验

试验选用两块试板,材料都是 16MnR。其中,试板 I 的厚度为 10 mm,试板 II 的厚度为 20 mm。

#### 2.1.1 试验及数据

设提离值为  $LO$ ,试验取提离为 48 mm 的测试数据为基准值( $LO_r$ ),设其为 100%,其它值定义为 PEC。选择不同的提离距离进行试验,试验数据如表 1 和 2。

表1 试板 I 的试验数据

LO/mm	PEC/%	LO/mm	PEC/%	LO/mm	PEC/%
0	113	56	100	112	98
8	110	64	99	122	—
16	107	72	99	132	98
24	104	80	99	139	—
32	103	88	99	148	97
40	102	100	99	164	95
48	100	105	—	180	91

表2 试板 II 的试验数据

LO/mm	PEC/%	LO/mm	PEC/%	LO/mm	PEC/%
0	105	56	99	112	—
8	104	64	100	122	74
16	104	72	100	132	—
24	102	80	100	139	91
32	101	88	100	148	—
40	101	100	—	164	—
48	100	105	57	180	—

#### 2.1.2 数据分析

把在不同提离下测得的值与基准值相减,即为各提离高度下的误差,设为  $\Delta$ ,即  $\Delta = PEC - 100$ 。令  $t = LO - LO_r$ ,研究误差  $\Delta$  和与基准提离高度差值  $t$  之间的定量关系  $\Delta = f(t)$ ,见表 3 和 4。

运用 Matlab 分析处理数据,对  $\Delta$  和  $t$  进行曲线拟合,得到图 2。由图 2 的拟合曲线可见:

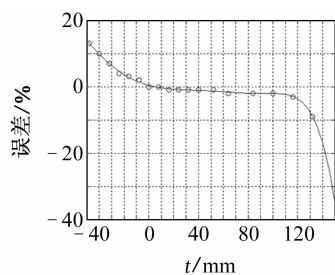
(1) 对于试板 I,在  $t \in [-48, 0]$  (即  $LO \in [0, 48]$ ) 上误差  $\Delta$  近似一次曲线;在  $t \in [0, 116]$  (即  $LO$

表3 试板 I 误差  $\Delta$  和与基准提高高度差值  $t$  的对应值

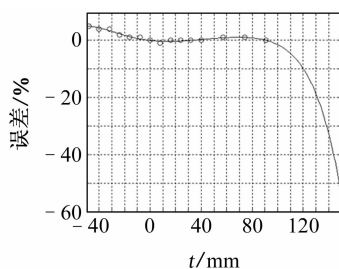
LO	$t$	$\Delta$	LO	$t$	$\Delta$	LO	$t$	$\Delta$
0	-48	13	48	0	0	100	52	-1
8	-40	10	56	8	0	112	64	-2
16	-32	7	64	16	-1	132	84	-2
24	-24	4	72	24	-1	148	100	-2
32	-16	3	80	32	-1	164	116	-3
40	-8	2	88	40	-1	180	132	-9

表4 试板 II 误差  $\Delta$  和与基准提高高度差值  $t$  的对应值

LO	$t$	$\Delta$	LO	$t$	$\Delta$	LO	$t$	$\Delta$
0	-48	5	40	-8	1	80	32	0
8	-40	4	48	0	0	88	40	0
16	-32	4	56	8	0	105	57	1
24	-24	2	64	16	-1	122	74	1
32	-16	1	72	24	0	139	91	0



(a) 试板 I



(b) 试板 II

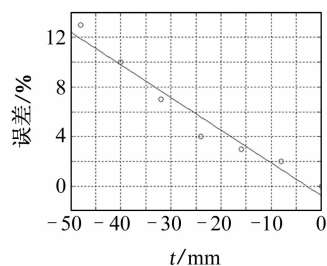
图2 拟合曲线

$\in [48, 164]$  上误差  $\Delta$  接近于零; 在  $t \in [116, +\infty)$  (即  $LO \in [164, +\infty)$ ) 上曲线突然下滑, 误差迅速增大。

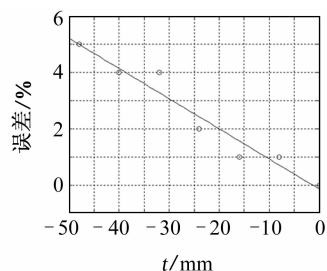
(2) 对于试板 II, 在  $t \in [-48, 0]$  (即  $LO \in [0, 48]$ ) 上误差  $\Delta$  近似一次曲线; 在  $t \in [0, 90]$  (即  $LO \in [48, 140]$ ) 上误差  $\Delta$  接近于零; 在  $t \in [90, +\infty)$  (即  $LO \in [140, +\infty)$ ) 上曲线突然下滑, 误差迅速增大。

从以上数据看出, 无论试板 I 还是试板 II, 在

$t \in [-48, 0]$  上误差  $\Delta$  近似一次曲线, 故对此区间进行线性拟合, 得图 3。



(a) 试板 I



(b) 试板 II

图3  $t \in [-48, 0]$  时的线性拟合

经过模拟, 可确定两试板的线性拟合曲线方程为:

$$\text{试板 I: } \Delta = -0.2634t - 0.7500 \quad (6)$$

$$\text{试板 II: } \Delta = -0.1071t - 0.1429 \quad (7)$$

通过以上方程可以进行误差补偿, 从而保证检测的准确性。

### 3 提离试验的仿真

#### 3.1 建立仿真模型

脉冲涡流的电磁场属于三维涡流场, 但一般来说对三维场的分析比较复杂。如果将模型简化为线圈正对一足够大的圆盘状导体来进行分析, 这样便将三维涡流场的问题简化为轴对称二维涡流场的问题, 其示意图见图 4。

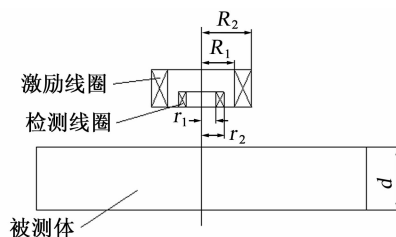


图4 简化的脉冲涡流检测图

#### 3.2 设定仿真的参数

利用 ANSYS 软件对脉冲涡流磁场进行仿真分析, 主要研究接收线圈的电压信号与被测金属壁厚

表 5 16MnR 钢试板提高试验的仿真参数

参数	参数值	参数	参数值
检测线圈内半径	20 mm	检测线圈厚度	10 mm
检测线圈高度	15 mm	激励线圈内半径	50 mm
激励线圈厚度	20 mm	激励线圈高度	40 mm
外层空气域半径	1 000 mm	内层空气域半径	630 mm
线圈相对磁导率	1	线圈电阻率	$1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
被测体相对磁导率	400	被测体电阻率	$1.4 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$
脉冲幅值	6 A	脉冲频率	2 Hz
求解子步数	200	求解终止时间	0.5 s
被测体厚度	10 mm/20 mm	被测体半径	210 mm

的对应关系。通过设定仿真参数(表 5),建立与真实试验接近的仿真环境。

### 3.3 仿真结果处理

#### 3.3.1 激励脉冲电流

仿真试验中所选取的激励脉冲电流幅值为 6 A, 占空比为 50%, 频率为 2 Hz, 上升时间为 0.01 s, 下降时间为 0.01 s, 其在 ANSYS 中的波形见图 5。

#### 3.3.2 检测线圈上的电压

检测线圈上的电压随着时间的增加而震荡衰减, 如图 6 所示。

#### 3.3.3 仿真分析

仿真中采集了一个周期的数据, 在这一个周期

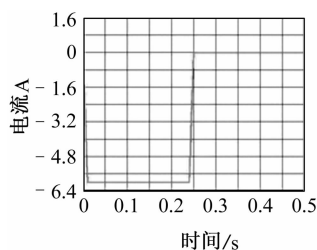


图 5 电流

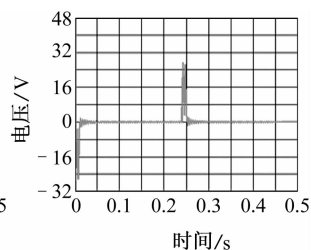


图 6 电压

中, 激励脉冲电流包括一个下降沿和一个上升沿, 这两处都可激发脉冲涡流。试验只提取了后半周期的数据。此外, 由于脉冲涡流是震荡衰减的, 因此检测线圈上的电压也表现为震荡衰减。基于以上分析, 在研究检测线圈上的衰减规律时, 只需研究其正幅值的衰减规律。

运用 ANSYS 软件仿真 16MnR 钢试板提高试验, 得到检测线圈上的电压、提高高度及时间的数据(表 6 和 7)。由表可见, 检测线圈上电压变化非常有规律。从 0.4~0.5 s 的过程中, 在同一时刻, 检测线圈上的电压随着提高高度的增加而减小; 而对同一提高高度, 时间越迟, 检测线圈上的电压越小。

经过对表中数据通过 Matlab 拟合, 便得到不同时刻检测线圈上的电压( $U$ )与提高高度( $LO$ )的关系曲线, 即  $U = f(LO)$ 。图 7 为试板 I 和试板 II 检测

表 6 试板 I 检测线圈上的电压与提高高度及时间的关系

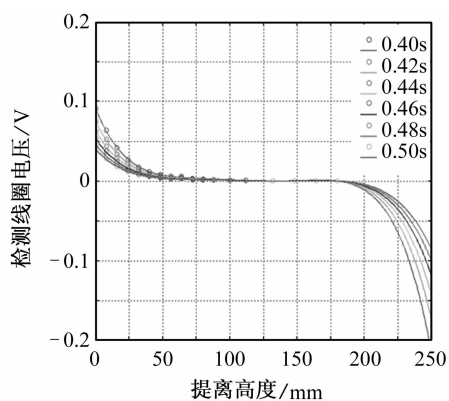
V

提高高度 /mm	提高时间/s					
	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0	0.090 762	0.074 573	0.062 340	0.052 863	0.045 368	0.039 334
8	0.064 195	0.052 847	0.044 266	0.037 612	0.032 344	0.028 098
16	0.041 620	0.034 237	0.028 665	0.024 350	0.020 938	0.018 190
24	0.026 994	0.022 160	0.018 522	0.015 712	0.013 495	0.011 712
32	0.017 824	0.014 595	0.012 172	0.010 307	0.008 838	0.007 661
40	0.012 056	0.009 845	0.008 191	0.006 922	0.005 926	0.005 129
48	0.008 363	0.006 810	0.005 654	0.004 768	0.004 075	0.003 522
56	0.005 943	0.004 827	0.003 999	0.003 366	0.002 873	0.002 479
64	0.005 943	0.004 827	0.003 999	0.003 366	0.002 873	0.002 479
72	0.003 203	0.002 590	0.002 138	0.001 794	0.001 527	0.001 314
80	0.002 419	0.001 953	0.001 609	0.001 348	0.001 146	0.000 986
88	0.001 857	0.001 497	0.001 231	0.001 031	0.000 875	0.000 752
100	0.001 282	0.001 031	0.000 847	0.000 708	0.000 601	0.000 516
112	0.000 910	0.000 731	0.000 600	0.000 501	0.000 424	0.000 364
132	0.000 539	0.000 432	0.000 354	0.000 296	0.000 250	0.000 215
148	0.000 367	0.000 294	0.000 241	0.000 201	0.000 170	0.000 146
164	0.000 257	0.000 206	0.000 168	0.000 140	0.000 119	0.000 102
180	0.000 183	0.000 147	0.000 120	0.000 100	0.000 085	0.000 073

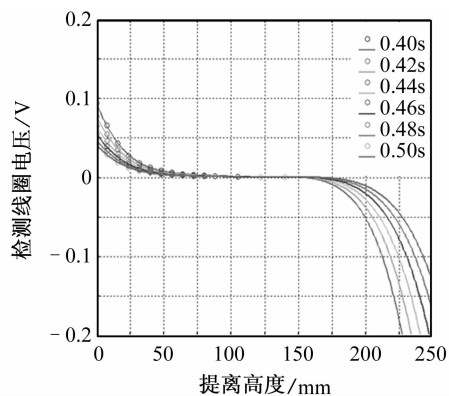
表 7 试板Ⅱ检测线圈上的电压与提离高度及时间的关系

V

提离高度 /mm	提离时间/s					
	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
0	0.093 408	0.077 127	0.064 717	0.055 026	0.047 307	0.041 056
8	0.066 100	0.054 690	0.045 982	0.039 175	0.033 746	0.029 344
16	0.042 942	0.035 522	0.029 864	0.025 444	0.021 920	0.019 063
24	0.027 931	0.023 074	0.019 378	0.016 494	0.014 198	0.012 339
32	0.018 504	0.015 261	0.012 797	0.010 879	0.009 353	0.008 120
40	0.012 560	0.010 340	0.008 658	0.007 350	0.006 311	0.005 473
48	0.008 743	0.007 186	0.006 008	0.005 094	0.004 369	0.003 784
56	0.006 235	0.005 117	0.004 273	0.003 618	0.003 100	0.002 683
64	0.004 547	0.003 727	0.003 108	0.002 630	0.002 251	0.001 946
72	0.003 384	0.002 770	0.002 308	0.001 951	0.001 668	0.001 441
80	0.002 563	0.002 097	0.001 746	0.001 474	0.001 260	0.001 088
88	0.001 973	0.001 613	0.001 342	0.001 133	0.000 968	0.000 835
105	0.001 184	0.000 967	0.000 804	0.000 678	0.000 579	0.000 499
122	0.000 747	0.000 610	0.000 507	0.000 427	0.000 364	0.000 314
140	0.000 479	0.000 391	0.000 324	0.000 274	0.000 233	0.000 201



(a) 试板Ⅰ



(b) 试板Ⅱ

图 7 电压-提离高度-时间

线圈上的电压与提离高度及时间的关系曲线。

仿真所得,不同时刻检测线圈上的电压与提离高度的关系实际上就是脉冲涡流检测值  $PEC$  与提离高度的关系,即  $PEC=f(LO)$ 。误差补偿函数为  $\Delta=f(t)$ ,即  $PEC-100=f(LO-LO_r)$ ,从中不难看出, $PEC=f(LO)$ 与  $PEC-100=f(LO-LO_r)$ 应当具有相同的数学规律。比较图 2 及图 7 发现曲线具有相同的规律,而且曲线的起始段的斜率变化相互对应,都说明仿真结果和试验结果是一致的。

#### 4 钢管提离试验

试验选用了 6 种规格的钢管,分别是  $\phi 325 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,  $\phi 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,  $\phi 133 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ,  $\phi 89 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,  $\phi 57 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$  和  $\phi 810 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ,材料有 20G 钢、20 号和 X70 钢。

##### 4.1 试验及数据

与钢板提离试验相同,试验取提离高度为 48 mm( $LO_r$ )的数据为基准值,设定值为 100%。对不同规格的钢管不同的提离进行试验,测得数据如表 8。

##### 4.2 数据分析

对  $\Delta$  和  $t$  的对应值进行分析。运用 Matlab 进行数据拟合,得到  $\Delta$  和  $t$  的拟合曲线。再对拟合曲线分析,即可找到曲线上的稳定区间( $\Delta < 5\%$ )和误差区间(即关系方程)(表 9)。



表 8 钢管提高试验数据

规格/mm	提高高度/mm																			
	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	110	120	128	136	146	154
20G $\phi$ 325 $\times$ 10	102	100	100	99	99	100	100	102	104	105	108	111	114	—	—	—	—	—	—	—
20G $\phi$ 219 $\times$ 10	102	101	99	98	98	98	100	100	102	103	105	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20G $\phi$ 133 $\times$ 10	103	100	99	98	98	99	100	101	102	103	106	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20 号 $\phi$ 89 $\times$ 4	119	111	106	101	99	99	100	101	101	102	103	102	102	103	101	101	—	—	—	—
20 号 $\phi$ 57 $\times$ 3.5	127	118	108	102	100	100	100	100	100	102	101	102	100	98	99	—	—	—	—	—
X70 $\phi$ 810 $\times$ 25	108	106	104	103	102	101	100	100	99	99	99	99	99	99	99	100	100	102	102	104

表 9 钢管提高试验关系

材 料	规格 /mm	基准 提高 /mm	误差 区间	误差 关系
20G	$\phi$ 325 $\times$ 10	48	[48,96]	$\Delta=0.002\ 6t^2+0.160\ 7t+0.261\ 9$
	$\phi$ 219 $\times$ 10	48	[48,80]	$\Delta=0.003\ 3t^2+0.055\ 4t-0.171\ 4$
	$\phi$ 133 $\times$ 10	48	[48,80]	$\Delta=0.004\ 5t^2+0.032\ 1t+0.171\ 4$
20 号	$\phi$ 89 $\times$ 4	48	[0,48]	$\Delta=0.014\ 1t^2+0.294\ 6t+0.452\ 4$
	$\phi$ 57 $\times$ 3.5	48	[0,48]	$\Delta=0.019\ 2t^2+0.361\ 6t+0.595\ 2$
X70	$\phi$ 810 $\times$ 25	48	[0,48]	$\Delta=0.001\ 9t^2-0.071\ 4t+0.166\ 7$

## 5 结论

对于 16MnR 钢板而言,在一定范围内的提高对检测结果影响不大;与减小提高相比,增加提高对检测结果影响相对较小;在基准提高以下范围内补偿曲线为线性函数,且系数同板厚大致成正比。

不同材料的钢管具有不同的误差补偿关系;同

(上接第 930 页)

(2) 包含脱焊损伤时,根据其损伤程度,结构前几阶模态整体振型不变,但损伤处有局部变化,当损伤达到一定程度时,将较早出现局部模态。

(3) 结构模态振型的变化及其局部模态的出现不仅与损伤程度有关,与其位置也有关。

(4) 当结构出现局部模态时,在频率图中可见,相应的频率会急剧下降。

### 参考文献:

- [1] 王展光,单建,何德坪. 金字塔栅格夹心夹层板动力响应分析[J]. 力学季刊,2006,27(4):707—713.
- [2] Gregory W Kooistra, Wadley Haydn N G. Lattice truss structures from expanded metal sheet[J]. Materials and Design,2007,28(2):507—514.
- [3] Liu J S, Lu T J, Torquato S. Simulated properties of

种材料不同规格的钢管具有不同的误差补偿关系;材料不同误差区间也不同;钢管的误差补偿函数是一个与基准提高差值  $t$  (即  $LO-LO_r$ ) 有关系的二次函数;二次补偿函数的二次系数与钢管的管径有关系,管径越大,曲率越小,二次系数也越小。当曲率接近零时,补偿函数为线性函数,即为金属板的误差补偿函数。

### 参考文献:

- [1] 李家伟,陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 任吉林,林俊明,高春法. 电磁检测[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [3] Sophian A, Tian G Y, Talyor D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulse eddy current NDT[J]. NDT & E International,2003,36(1):37—41.
- [4] Kagome and tetragonal truss core panels[J]. International Journal of Solids and Structures,2004,(41):619—635.
- [5] Wicks N, Hutchinson J W. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material [J]. International Journal of Solids and Structures,2001,(41):5105—5124.
- [6] Valdevit L, Hutchinson J W, Evans A G. Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores[J]. International Journal of Solids and Structures,2004,(41):619—635.
- [7] Sugimura Y. Mechanical response of single-layer tetrahedral trusses under shear loading[J]. Mechanics of Materials,2004,(36):715—721.
- [7] 李斌潮,张钱城,卢天健. 基于实验模态分析的点阵夹层结构动态性能预测[J]. 固体力学学报,2008,29(4):373—278.