



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107144627 A

(43)申请公布日 2017.09.08

(21)申请号 201710346820.X

(22)申请日 2017.05.16

(71)申请人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)
西源大道2006号

(72)发明人 于亚婷 李翰超 王振伟 高宽厚
袁飞 杜平安 田贵云

(74)专利代理机构 成都宏顺专利代理事务所
(普通合伙) 51227

代理人 周永宏

(51)Int.Cl.

G01N 27/83(2006.01)

G01L 1/18(2006.01)

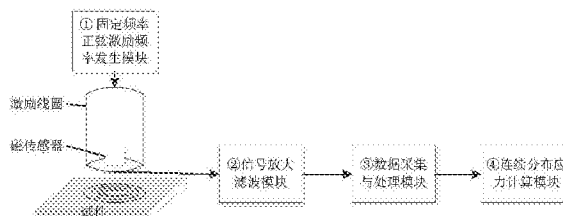
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

导电固体无损检测电路及基于其的连续应力定量评估方法

(57)摘要

本发明公开一种导电固体无损检测电路及基于其的连续应力定量评估方法,通过导体无损检测电路获取无损检测信号;通过实验和数值模拟相结合的方式,对导电固体连续应力分布进行定量评估;具体为:通过实验确定无损检测信号和外部载荷的关系式;通过压阻效应得到电导率的分布规律,通过数值计算模型得到连续应力分布与外部载荷之间的关系;根据估计的外力大小,得到该导体任意一点的应力;从而实现对导电固体连续应力分布的定量评估,本申请的方法对导电固体的早期损伤预测奠定基础,它可用于实现对导体和半导体关键构件的健康预测中,对于保障关键结构的安全具有非常重要的意义。



1. 导电固体无损检测电路,其特征在于,包括:检测探头、被测试件、第二模块;所述检测探头固定于被测试件表面;所述检测探头至少包括:第一模块、激励线圈以及磁传感器;所述第一模块用于产生固定频率的正弦激励信号为激励线圈提供准确的激励信号;所述激励信号输入激励线圈后在激励线圈与被测试件之间的空间形成耦合电磁场;所述磁传感器位于激励线圈内部,用于将该耦合磁场强度转化为电压信号;

所述第二模块与磁传感器相连,用于对磁传感器输出的电压信号进行放大滤波处理,得到第一无损模拟信号。

2. 根据权利要求1所述的导电固体无损检测电路,其特征还在于,还包括第三模块,所述第三模块与第二模块相连,用于对第二模块输出的第一无损模拟信号进行采集处理得到第二无损检测信号。

3. 基于根据权利要求2所述电路的一种导电固体连续分布应力定量评估方法,其特征还在于,包括:

S1、通过实验确定无损检测信号和外部载荷的关系式;

$$S = KF + a;$$

其中,S表示第二无损检测信号;F表示外部载荷;K表示系数;a为常数;

S2、根据压阻效应,得到外力作用下,该被测试件的电导率分布为;

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{l}{4I_z} hFz - \frac{l}{2I_z} hFxz \right);$$

其中, σ_0 表示中性层电导率;h表示目标系数; σ 表示电导率;表示x任一横截面;z表示任意横截面上的任意一点;

S3、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真,得到估计的外部载荷大小;

S4、根据步骤S3得到的外部载荷大小,得到任意一点连续应力。

4. 根据权利要求3所述的一种导电固体连续分布应力定量评估方法,其特征还在于,所述步骤S1包括以下分步骤:

S11、根据被测试件的材料物理属性制作试块;

S12、施加不同载荷时检测探头得到不同的磁感应强度信号;

S13、重复步骤S2若干次,得到无损检测磁感应强度信号S和外部载荷F的关系 $S = KF + a$,此关系式的确定系数为 R_{S0} 。

5. 根据权利要求3所述的一种导电固体连续分布应力定量评估方法,其特征还在于,所述步骤S3具体为:

S31、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真,得到h取不同值时,外力F和测点磁感应强度值 B_z 的关系曲线;

S32、设 $h = h_1$ 曲线与试验数据的确定系数为 R_{S1} , $h = h_2$ 曲线与实验数据的确定系数为 R_{S2} ;

S33、求得满足 $|R_{S1} - R_{S0}| < \lambda$ 且 $|R_{S2} - R_{S0}| < \lambda$ 的 R_{S1} 与 R_{S2} 对应的 h_1 与 h_2 的取值集合;

其中, λ 为一固定的较小的数值;

S34、将步骤S33得到的 h_1 与 h_2 的取值集合中的最大值作为h的上限值,最小值作为h下限值;

S35、根据步骤S34得到的h的上限值以及下限值,以及步骤S2得到的被测试件的电导率分布,得到对应的外部载荷的上限值与下限值;

S36、通过对步骤S35得到的外部载荷的上限值与下限值求平均值,得到估计的外部载荷大小。

导电固体无损检测电路及基于其的连续应力定量评估方法

技术领域

[0001] 本发明属于导电固体应力无损检测领域,特别涉及一种连续应力检测技术。

背景技术

[0002] (半)导电固体构件作为工程实际中的常见零部件,广泛应用于交通、航空航天、核能、电力等诸多工程领域的关键设备中,其安全性和耐久性均对关键设备性能产生重要影响。而(半)导电固体构件在冷加工的条件下会在制造过程中不可避免地产生加工残余应力,并在安装过程中会产生焊接残余应力与应力集中。上述(半)导电固体构件的应力非均匀分布会对金属构件的性能与安全性造成影响:一方面应力非均匀分布会导致出现不可忽略的加工变形,对后续的产品装配和产品使用产生影响;另一方面应力非均匀分布也会在外界载荷的作用下导致局部应力不断增大,最终导致裂纹出现,对(半)导电固体构件的完整性带来影响。

[0003] 目前检测应力非均匀分布的检测方法分为有损和无损两种检测方法。常用的有损检测方法均需破坏构件,影响了构件本身的性能,因此在工程应用中会逐步被无损检测取代。

[0004] 目前常用的应力无损检测方法有超声、X射线、涡流、磁记忆以及巴克豪森噪声等检测方法。X射线法局限于表层应力检测,对于深层检测则必须对构件进行破坏;磁记忆法和巴克豪森噪声法对于非磁性材料则效果并不理想;涡流检测技术因为压阻效应的存在,利用应力与电导率之间存在的关系和涡流检测原理,可实现对金属构件应力状态的总体表征,但如何对构件任意一点应力的定量表征是无损检测亟待解决的关键问题。

[0005] (1) 涡流无损检测原理

[0006] 如图1所示,激励电流通过探头的激励线圈,在激励线圈周围感生出交变磁场 B_1 ,当检测探头靠近金属构件时,感生出的交变磁场 B_1 会在被测对象表面及近表面(集肤深度范围内)感应出涡流,该涡流又会感生出交变磁场 B_2 。依据电磁感应定律知, B_2 与 B_1 方向相反,在激励线圈感生磁场和涡流感生磁场的共同作用下会形成叠加磁场。检测线圈阻抗将在叠加磁场的作用下发生变化。这种变化可通过式(1)表述:

$$[0007] \quad z \sim (N, I, r_1, r_2, l, h, t, \sigma, \mu, f) \quad (1)$$

[0008] 式中, t 、 μ 、 σ 分别为被测体厚度、磁导率和电导率, r_1 、 r_2 、 h 分别为线圈内径、外径和高度; N 为线圈匝数, I 、 f 分别为激励信号幅值和频率; l 为提离高度。

[0009] 因此通过式(1)可看出,在除被测体电导率 σ 外的所有参数均已知时,阻抗 z 为 σ 的单一变量函数。因而涡流无损检测技术可实现对金属构件电导率的检测。

[0010] (2) 压阻效应

[0011] 当(半)导体在受到外力作用时,外形尺寸和电阻率会发生改变,继而引起电阻值变化,这种效应称为压阻效应。以长方形(半)导体为例,其电阻值可表达为

$$[0012] \quad R = \frac{\rho \cdot l}{w \cdot th} \quad (2)$$

[0013] 式中, ρ 为(半)导体电阻率($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$); l 为(半)导体长度(m); w 为(半)导体宽度(m); th 为(半)导体厚度(m)。

[0014] 如果(半)导体在长度方向发生形变,其电阻的四个影响因素长度 l ,宽度 w ,厚度 th 和电阻率 ρ 均会变化,引起电阻的相对变化为:

$$[0015] \quad \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dth}{th} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3)$$

[0016] 长度方向应变 ε :

$$[0017] \quad \frac{dl}{l} = \varepsilon \quad (4)$$

[0018] 宽度方向与厚度方向应变:

$$[0019] \quad \frac{dw}{w} = -\mu \frac{dl}{l} \quad (5)$$

$$[0020] \quad \frac{dth}{th} = -\mu \frac{dl}{l} \quad (6)$$

[0021] 式中, μ 为(半)导体泊松比;负号代表(半)导体长度值增大时,厚度值和宽度值均减小。

[0022] 由式(3)~(6)可得

$$[0023] \quad \frac{dR}{R\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\rho\varepsilon} \quad (7)$$

[0024] 其中, $1+2\mu$ 由(半)导体几何尺寸变化引起; $\frac{d\rho}{\rho\varepsilon}$ 由(半)导体电阻率变化引起。

[0025] 对于金属导体,其压阻效应由两部分组成,一部分是在外力作用下(半)导体几何尺寸变化引起的,另一部分是(半)导体电阻率变化引起的。当涡流无损检测技术应用于(半)导体应力检测时,由于金属构件的实际尺寸远远大于金属导体中涡流所覆盖的范围,因此几何尺寸变化所引起的金属导体电阻值的变化对涡流检测信号产生的影响可忽略不计;对于半导体,压阻效应主要是由电阻率变化引起的。

发明内容

[0026] 本发明充分利用涡流无损检测技术在金属构件应力识别方面的优势,并将其与数值模拟方法充分融合,提出一种导电固体无损检测电路及基于其的连续应力定量评估方法。

[0027] 本发明采用的技术方案是:导电固体无损检测电路,包括:检测探头、被测试件、第二模块;所述检测探头固定于被测试件表面;所述检测探头至少包括:第一模块、激励线圈以及磁传感器;所述第一模块用于产生固定频率的正弦激励信号为激励线圈提供准确的激励信号;所述激励信号输入激励线圈后在激励线圈与被测试件之间的空间形成耦合电磁场;所述磁传感器位于激励线圈内部,用于将该耦合磁场强度转化为电压信号;

[0028] 所述第二模块与磁传感器相连,用于对磁传感器输出的电压信号进行放大滤波处理,得到第一无损模拟信号。

[0029] 进一步地,还包括第三模块,所述第三模块与第二模块相连,用于对第二模块输出的第一无损模拟信号进行采集处理得到第二无损检测信号。

[0030] 本申请的另一技术方案为：基于所述电路的连续应力定量评估方法，包括：

[0031] S1、通过实验确定无损检测信号和外部载荷的关系式；

[0032] $S = KF + a$ ；

[0033] 其中，S表示第二无损检测信号；F表示外部载荷；K表示系数；a为常数；

[0034] S2、根据压阻效应，得到外力作用下，该被测试件的电导率分布为；

[0035]
$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{l}{4I_z} hFz - \frac{l}{2I_z} hFxz \right) ;$$

[0036] 其中， σ_0 表示中性层电导率；h表示目标系数； σ 表示电阻率变化量；表示x任一横截面；z表示任意横截面上的任意一点；

[0037] S3、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真，得到估计的外部载荷大小；

[0038] S4、根据步骤S3得到的外部载荷大小，得到任意一点连续应力。

[0039] 进一步地，所述步骤S1包括以下分步骤：

[0040] S11、根据被测试件的材料物理属性制作试块；

[0041] S12、施加不同载荷时检测探头得到不同的磁感应强度信号；

[0042] S13、重复步骤S2若干次，得到第二无损检测信号S和外部载荷的关系 $S = KF + a$ ，此关系式的确定系数为 R_{S0} 。

[0043] 进一步的，所述步骤S3具体为：

[0044] S31、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真，得到h取不同值时，外力F和测点磁感应强度值 B_z 的关系曲线；

[0045] S32、设 $h = h_1$ 曲线与试验数据的确定系数为 R_{S1} ， $h = h_2$ 曲线与实验数据的确定系数为 R_{S2} ；

[0046] S33、求得满足 $|R_{S1} - R_{S0}| < \lambda$ 且 $|R_{S2} - R_{S0}| < \lambda$ 的 R_{S1} 与 R_{S2} 对应的 h_1 与 h_2 的取值集合；

[0047] 其中， λ 为一固定的较小的数值；

[0048] S34、将步骤S33得到的 h_1 与 h_2 的取值集合中的最大值作为h的上限值，最小值作为h下限值；

[0049] S35、根据步骤S34得到的h的上限值以及下限值，以及步骤S2得到的被测试件的电导率分布，得到对应的外部载荷的上限值与下限值；

[0050] S36、通过对步骤S35得到的外部载荷的上限值与下限值求平均值，得到估计的外部载荷大小。

[0051] 本发明的有益效果：本发明提出的导电固体无损检测电路及基于其的连续应力定量评估方法，通过实验和数值模拟相结合的方式，获取应力和涡流无损检测磁感应强度之间的关系；通过压阻效应得到电导率的分布规律，通过数值计算模型得到连续应力分布与外部载荷之间的关系；通过估计外力大小，得到该(半)导体任意一点的应力；从而实现对将(半)导电固体连续应力分布的定量评估，本申请的方法对(半)导电固体的早期损伤预测奠定基础，他可用于实现对导体和半导体关键构建的健康预测中，对于保障关键结构的安全具有非常重要的意义。

附图说明

- [0052] 图1为无损检测原理图；
 [0053] 图2为导电固体连续分布应力的定量评估方法的模块化电路示意图；
 [0054] 图3为外力F和测点磁感应强度值Bz的关系曲线；
 [0055] 图4为本申请实施例提供的三点弯曲实验示意图；
 [0056] 图5为本申请实施例提供的弯矩分布示意图；
 [0057] 图6为本申请实施例提供的简支梁任一横截面上的应力分布示意图。

具体实施方式

[0058] 为便于本领域技术人员理解本发明的技术内容，下面结合附图对本发明内容进一步阐释。

[0059] 如图2所示为导电固体连续分布应力的定量评估方法的模块化电路示意图；本申请的技术方案为：导电固体无损检测电路，包括：检测探头、被测试件、第二模块、第三模块；所述检测探头固定于被测试件表面；所述检测探头至少包括：第一模块、激励线圈以及磁传感器；所述第一模块用于产生固定频率的正弦激励信号为激励线圈提供准确的激励信号；所述激励信号输入激励线圈后在激励线圈与被测试件之间的空间形成耦合电磁场；所述磁传感器位于激励线圈内部，用于将该耦合磁场强度转化为电压信号；

[0060] 所述第二模块与磁传感器相连，用于对磁传感器输出的电压信号进行放大滤波处理，得到第一无损检测信号；所述第三模块与第二模块相连，用于对第二模块输出的信号进行采集处理，得到第二无损检测信号；

[0061] 还包括第四模块，所述第四模块与第三模块相连，用于根据第三模块输出的第二无损检测信号计算出被测试件任意一点的应力，具体的处理过程在本申请提出的另一技术方案中进行详细阐述，本申请的另一技术方案为：基于该模块化电路的一种导电固体连续分布应力定量评估方法，具体包括以下步骤：

[0062] S1、通过实验确定无损检测信号和外部载荷的关系式；通过研究发现，当外部载荷F的作用点和涡流无损检测系统检测信号S采集点确定时，外部载荷F与涡流无损检测电信号S呈现线性分布关系，如图3中虚线所示，★为实验数据。即

$$[0063] \quad S = KF + a \quad (8)$$

[0064] 其中，S表示第二无损检测信号；F表示外部载荷；K表示系数；a为常数；

[0065] 具体包括以下分步骤：

[0066] S11、根据被测试件的材料物理属性制作试块；

[0067] S12、施加不同载荷时检测探头得到不同的磁感应强度信号；

[0068] S13、重复步骤S2若干次，得到S和外部载荷F的关系 $S = KF + a$ ，此关系式的确定系数为 R_{s0} 。

[0069] S2、由压阻效应可知，单向应力状态下的电阻率变化量和应力呈现线性关系。因此在外力作用下，该金属导体的电导率分布可设定为：

$$[0070] \quad \sigma = \sigma_0 + h \cdot \sigma_0 \cdot \sum(x, y, z) = \sigma_0 \left(1 + \frac{l}{4I_z} hFz - \frac{l}{2I_z} hFxz \right) \quad (9)$$

[0071] 其中， σ_0 表示中性层电导率；h表示目标系数； σ 表示电阻率变化量；表示x任一横截面；z表示任意横截面上的任意一点；

[0072] 图4所示三点弯曲实验,无损检测线圈位于图4中F的正下方,试件上的弯矩图以 $x=0$ 界面对称分布,最大弯矩位置为外部载荷F所在位置,并在简支部位减小为零。取右半部分梁为研究对象,其弯矩分布如图5所示。根据材料力学知识,图4所示简支梁任一横截面上的应力分布如图6所示。中性层的应力为零,中性层以上为压应力,中性层以下为拉应力。因此任一横截面 x 上的任意一点 z 的应力可表达为:

$$[0073] \quad \sigma(x, z) = \frac{M \cdot z}{I_z} = \left(\frac{Fl}{4} - \frac{Fx}{2} \right) \frac{z}{I_z} = \frac{l}{4I_z} F \cdot z - \frac{1}{2I_z} F \cdot x \cdot z \quad (10)$$

[0074] 式中, l 为金属导体的长度; M 表示弯矩; I_z 表示转动惯量。

[0075] S3、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真,得到估计的外部载荷大小;所述步骤S3具体为:

[0076] S31、通过对步骤S2得到的被测试件的电导率分布进行计算机仿真,得到 h 取不同值时,外力 F 和测点磁感应强度值 B_z 的关系曲线;

[0077] S32、如图3所示,设 $h=h_1$ 曲线与试验数据的确定系数为 R_{S1} , $h=h_2$ 曲线与实验数据的确定系数为 R_{S2} ;

[0078] S33、求得满足 $|R_{S1}-R_{S0}| < \lambda$ 且 $|R_{S2}-R_{S0}| < \lambda$ 的 R_{S1} 与 R_{S2} 对应的 h_1 与 h_2 的取值集合;

[0079] 其中, λ 为一固定的较小的数值; λ 越小, h 的范围越小,检测结果越精确;因此可以根据检测需要确定 λ 的值。

[0080] S34、将步骤S33得到的 h_1 与 h_2 的取值集合中的最大值作为 h 的上限值,最小值作为 h 的下限值;

[0081] S35、根据步骤S34得到的 h 的上限值以及下限值,以及步骤S2得到的被测试件的电导率分布,得到对应的外部载荷的上限值与下限值;

[0082] S36、通过对步骤S35得到的外部载荷的上限值与下限值求平均值,得到估计的外部载荷大小。

[0083] 本实施例中为便于说明,如图6所示, λ 取0.01时,取其中一组 $h_1=1/300$, $h_2=1/350$ 作为 h 的上下限为例进行计算;可得 $h_1=1/300$ 时 $F_1=138N$, $h_2=1/350$ 时 $F_2=163N$,则以 $F_1=138N$ 与 $F_2=163N$ 作为外力的上下限,得到 $F_m=150.5N$ 。此时外力的实际值如图中的实验曲线所示为 $F_e=149N$,两者误差为1%,可知通本申请的方法的到的外力大小与实际值是非常接近的,从而也验证了本申请方法的有效性。

[0084] S4、根据步骤S3得到的外部载荷大小,根据式(10)得到任意一点的应力。

[0085] 本发明方法可用于实现对导电固体和半导体固体关键构建的健康预测中,对于保障关键结构的安全具有非常重要的意义;通过实验和数值模拟相结合的方式,估计外力大小,从而得到该(半)导体任意一点的应力;从而实现将对(半)导电固体连续应力分布的定量评估。

[0086] 本领域的普通技术人员将会意识到,这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的原理,应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。对于本领域的技术人员来说,本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的权利要求范围之内。

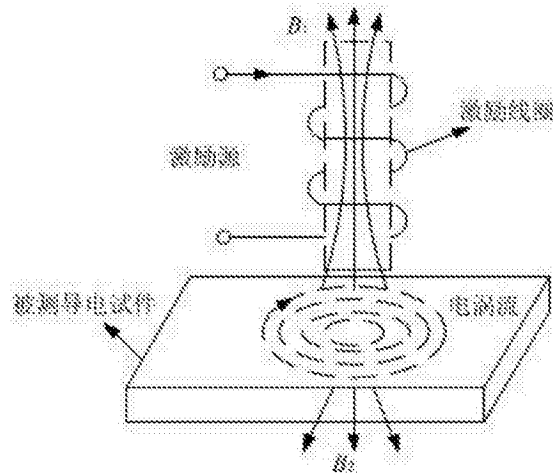


图1

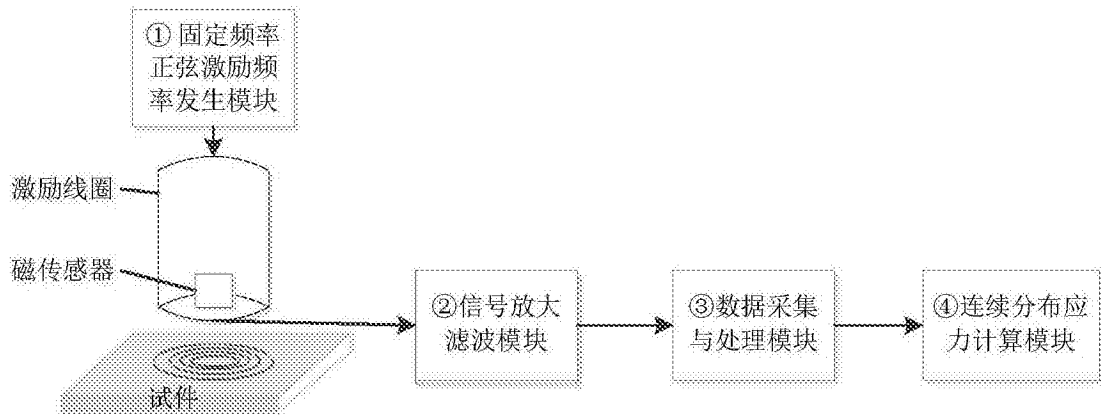


图2

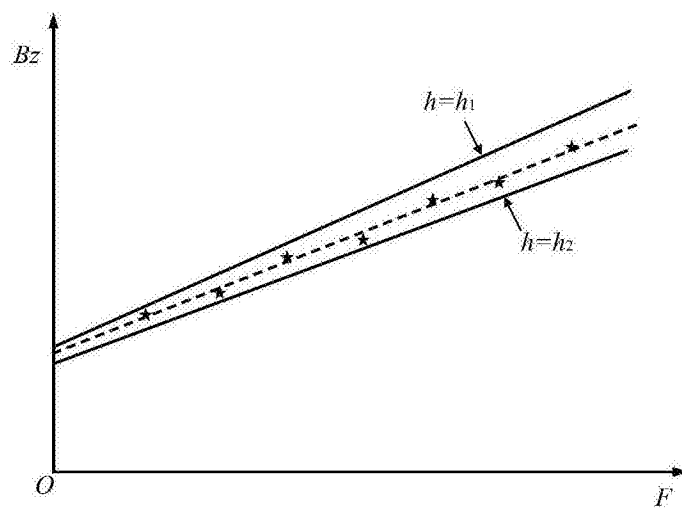


图3

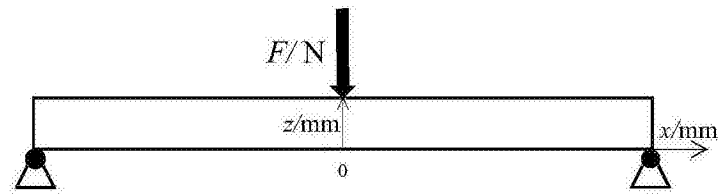


图4

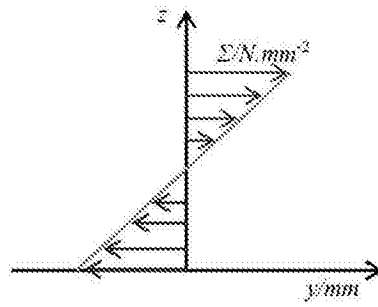


图5

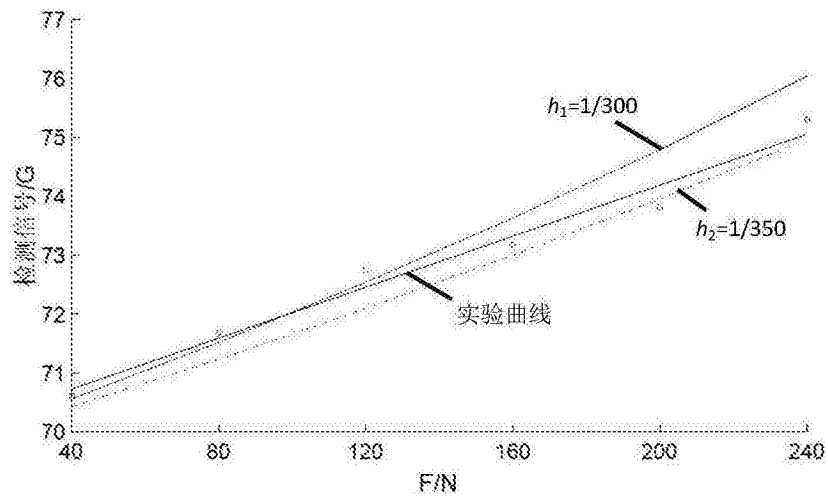


图6