



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105606391 A

(43) 申请公布日 2016. 05. 25

(21) 申请号 201610157502. 4

(22) 申请日 2016. 03. 18

(71) 申请人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街 145 号哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72) 发明人 曲先强 秦培江 谢耀国 马永亮  
韩超帅 崔洪斌 李新飞 朱德强

(51) Int. Cl.

G01M 99/00(2011. 01)

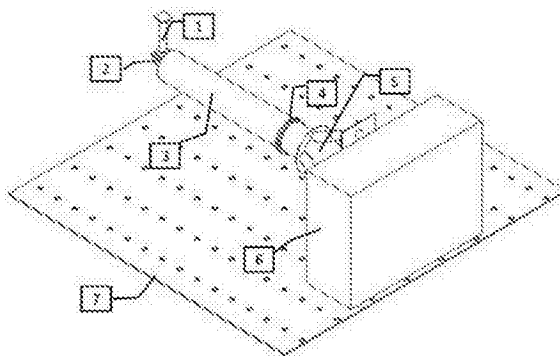
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

### (54) 发明名称

大型风机塔架强度试验装置及试验方法

### (57) 摘要

本发明提供一种大型风机塔架强度试验装置及试验方法,目的在于实现大型风机塔架疲劳强度试验,通过地脚螺栓固定剪力墙,然后将试验件横置与剪力墙固定,接着将力臂筒与试验件通过法兰连接,最后将液压作动器与力臂筒通过角凳相连。利用液压作动器数控加载,在关心区域通过布置应变片测出应变值,进而得出疲劳寿命理论值与试验值。并且提出了一种新的单面四片法,解决了复杂焊缝交点的布片方式及热点应力求解的难题,本发明可以最大程度的接近真实载荷对风机结构危险区域进行寿命检验,方法简单、准确度高、经济性强、可行性高,为大型风机塔架的强度试验提供了可行的方案。



1. 大型风机塔架强度试验装置,其特征在于:在地基所在的平面垂直安装剪力墙,在剪力墙上垂直安装带有过渡段的试验件,试验件的筒体部分通过法兰盘与力臂筒连接,力臂筒的端部通过角凳与液压作动器连接,所述试验件上贴有三向应变片。

2. 根据权利要求1所述的大型风机塔架强度试验装置,其特征在于:所述试验件上贴有三向应变片是指:对于试验件上的单焊缝,在每个关心点贴两个三向应变片,且两个三向应变片与焊趾之间的距离分别是 $0.5t$ 和 $1.5t$ , $t$ 是指两个三向应变片所在面的壁厚;对于试验件上的多焊缝的交点处,在每两条焊缝之间的面上贴四个三向应变片,且四个三向应变片中的一号三向应变片的位置是与两条焊缝之间的距离均是 $0.5T$ 、四号三向应变片的位置是与两条焊缝之间的距离均是 $1.5T$ 、二号三向应变片和三号三向应变片以一号三向应变片与四号三向应变片连线为对角线组成正方向布置, $T$ 是指四个三向应变片所在面的壁厚。

3. 一种应用权利要求2所述的大型风机塔架强度试验装置的试验方法,其特征在于:

第一步:液压作动器加载载荷,利用力臂筒的长度控制弯矩大小模拟真实风载成分,且载荷为正弦形式,幅值为所需载荷,频率为风载荷模拟频率;

第二步:在第一步所加载荷下,对试验件进行焊趾处热点应力计算:

对于单焊缝,焊趾处热点应力 $HS$ 的计算公式是:

$$HS = 1.5 * S_A - 0.5 * S_B$$

其中: $S_A$ 是距离焊趾 $1.5t$ 处的第一主应力值, $S_B$ 距离焊趾 $0.5t$ 处的第一主应力值,且第

一主应力值由公式  $\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{E}{(1-\mu^2)} \left[ \frac{(1+\mu)}{2} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) \pm \frac{(1+\mu)}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \right]$  和  $S = \max(|\sigma_{\max}|, |\sigma_{\min}|)$  求出, $S$ 表示第一主应力值, $\varepsilon_{0^\circ}$ 、 $\varepsilon_{45^\circ}$ 、 $\varepsilon_{90^\circ}$ 分别为三向应变片的三个方向的应变值, $\mu$ 为泊松比, $E$ 为弹性模量;

对于多焊缝交点处,按照单焊缝焊趾处热点应力的计算方法,通过一、二号应变片求出热点应力 $HS1$ ,三、四号应变片求出热点应力 $HS2$ ,通过一、三号应变片求出热点应力 $HS3$ ,通过二、四号应变片求出热点应力 $HS4$ ,则焊趾处热点应力 $HS5$ 的计算公式是:

$$HS5 = \max(|HS5-1|, |HS5-2|, |HS5-3|)$$

其中: $HS5-1 = 1.5 * HS1 - 0.5 * HS2$ ,

$$HS5-2 = 1.5 * HS3 - 0.5 * HS4,$$

$HS5-3 = 1.3 * S1 - 0.3 * S4$ , $S1$ 和 $S4$ 分别为一号应变片和四号应变片的第一主应力值;

第三步:利用试验件与真实风机塔架模型的比例系数,求出真实风机塔架的焊趾处热点应力;

第四步:计算理论寿命值 $N$ :

$$\log N = \log a - m \log(2 * H)$$

其中: $\log a$ 是常数, $m$ 是 $S-N$ 寿命曲线的斜率, $H$ 为焊趾的热点应力值,对于单焊缝, $H = HS$ ;对于多焊缝交点处, $H = HS5$ ;

第五步:将计算的理论寿命值 $N$ 与总的加载循环周期次数即试验寿命值相比,得出理论寿命值与试验寿命值的比值。

## 大型风机塔架强度试验装置及试验方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及大型风机塔架强度试验,尤其涉及一种大型风机塔架强度试验装置及试验方法。

### 背景技术

[0002] 随着陆地能源的匮乏和开发难度的增加,人类对能源开发的目光逐渐转向海洋。风能是在可知范围内对环境影响最小的绿色能源,风机则是将风能转化成电能的有效装置。对于导管架风机结构而言,最容易产生疲劳破坏的地方为支撑桁架与塔筒的过渡连接部分,对于该部分的疲劳强度校核尤其重要。目前,由于试验的耗费大,大部分研究均处于数值模拟阶段。对于疲劳校核来说,数值模拟过程中做了很多假设,而数值模拟的误差有可能导致所涉及结构的破坏。因此在设计阶段,不能仅仅局限于数值模拟,对大型风机塔架模型疲劳试验十分必要。

[0003] 风机主要承受的载荷为风载荷,而且载荷水平较高,现有的加载系统大部分为点加载、面加载,加载系统整体高度不高。风机塔架由于塔筒很高,试验模型垂向长度也会比较大,这给试验带来了不便。如何对纵向大尺度结构进行疲劳试验,成为了一个亟待解决的问题。

[0004] 与本发明申请有关的公开文件有:1、近海风机基础-塔架结构体系振动监测与动力响应分析(中国水利水电科学研究院学报2013年6月第11卷第2期);2、海上风机支撑结构动力特性模型试验研究(地震工程学报2014年12月第36卷第3期)。文献1对已经存在运行的风机进行了长期的桩基础-塔架结构体系振动监测数据,是对已经设计完毕在海场运行的现有风机的监测,而本文涉及的是设计阶段,对设计方案进行前期模型疲劳试验,主要是在人为可控加载环境下进行的准确定量试验分析,而非自然环境下对已建完风机进行监测,涉及的方面不同;文献2是在结构动力特性试验平台上,建立了以基础-塔架-顶部集中质量为一体的风机简化分析模型,模型为单桩形式,因此不包含导管架,研究的内容为桩基与砂土的作用。本文研究的为导管架结构应力水平的变化,试验结构以及研究内容有很大差别。

[0005] 综上所述,已公开发表的文献及已申请的专利与本发明均不同。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是为了提供一种设备投资少、操作简便、准确度高、贴近真实载荷的大型风机塔架而提供一种大型风机塔架强度试验装置及试验方法。

[0007] 本发明的目的是这样实现的:大型风机塔架强度试验装置,在地基所在的平面垂直安装剪力墙,在剪力墙上垂直安装带有过渡段的试验件,试验件的筒体部分通过法兰盘与力臂筒连接,力臂筒的端部通过角凳与液压作动器连接,所述试验件上贴有三向应变片。

[0008] 本发明还包括这样一些结构特征:

[0009] 1.所述试验件上贴有三向应变片是指:对于试验件上的单焊缝,在每个关心点贴两个三向应变片,且两个三向应变片与焊趾之间的距离分别是 $0.5t$ 和 $1.5t$ , $t$ 是指两个三向

应变片所在面的壁厚;对于试验件上的多焊缝的交点处,在每两条焊缝之间的面上贴四个三向应变片,且四个三向应变片中的一号三向应变片的位置是与两条焊缝之间的距离均是0.5T、四号三向应变片的位置是与两条焊缝之间的距离均是1.5T、二号三向应变片和三号三向应变片以一号三向应变片与四号三向应变片连线为对角线组成正方向布置,T是指四个三向应变片所在面的壁厚。

[0010] 2.一种大型风机塔架强度试验方法,

[0011] 第一步:液压作动器加载载荷,利用力臂筒的长度控制弯矩大小模拟真实风载成分,且载荷为正弦形式,幅值为所需载荷,频率为风载荷模拟频率;

[0012] 第二步:在第一步所加载荷下,对试验件进行焊趾处热点应力计算:

[0013] 对于单焊缝,焊趾处热点应力HS的计算公式是:

$$[0014] \quad HS = 1.5 * S_A - 0.5 * S_B$$

[0015] 其中: $S_A$ 是距离焊趾1.5t处的第一主应力值, $S_B$ 距离焊趾0.5t处的第一主应力值,

且第一主应力值由公式 
$$\frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{E}{(1-\mu^2)} \left[ \frac{(1+\mu)}{2} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) \pm \frac{(1+\mu)}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \right]$$

和  $S = \max(|\sigma_{\max}|, |\sigma_{\min}|)$  求出,S表示第一主应力值, $\varepsilon_{0^\circ}$ 、 $\varepsilon_{45^\circ}$ 、 $\varepsilon_{90^\circ}$  分别为三向应变片的三个方向的应变值, $\mu$ 为泊松比,E为弹性模量;

[0016] 对于多焊缝交点处,按照单焊缝焊趾处热点应力的计算方法,通过一、二号应变片求出热点应力HS1,三、四号应变片求出热点应力HS2,通过一、三号应变片求出热点应力HS3,通过二、四号应变片求出热点应力HS4,则焊趾处热点应力HS5的计算公式是:

$$[0017] \quad HS5 = \max(|HS5-1|, |HS5-2|, |HS5-3|)$$

[0018] 其中: $HS5-1 = 1.5 * HS1 - 0.5 * HS2$ ,

[0019]  $HS5-2 = 1.5 * HS3 - 0.5 * HS4$ ,

[0020]  $HS5-3 = 1.3 * S1 - 0.3 * S4$ ,S1和S4分别为一号应变片和四号应变片的第一主应力值;

[0021] 第三步:利用试验件与真实风机塔架模型的比例系数,求出真实风机塔架的焊趾处热点应力;

[0022] 第四步:计算理论寿命值N:

$$[0023] \quad \log N = \log a - m \log(2 * H)$$

[0024] 其中: $\log a$ 是常数,m是S-N寿命曲线的斜率,H为焊趾的热点应力值,对于单焊缝, $H = HS$ ;对于多焊缝交点处, $H = HS5$ ;

[0025] 第五步:将计算的理论寿命值N与总的加载循环周期次数即试验寿命值相比,得出理论寿命值与试验寿命值的比值。

[0026] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:本发明试验装置,通过横置风机塔架模型解决了大尺度风机塔架模型载荷难以施加的问题,利用模型结果反推真实结构,间接求解疲劳寿命,设备投资少、操作简便、可行性高。通过可循环使用的力臂筒调节力与力矩的比例,并用液压作动器数控加载,经济性强、准确度高、贴近真实载荷。并且提出了一种新的单面四片法,解决了对复杂焊缝交点处检测热点应力的布片方式及计算方法的难题,为大型风机塔架的强度试验提供了可行的方案。

## 附图说明

- [0027] 图1为本发明的试验机构等轴测视图；
- [0028] 图2为本发明的试验机构正视图；
- [0029] 图3为本发明的试验机构侧视图；
- [0030] 图4为本发明的单焊缝处贴片布置图；
- [0031] 图5为本发明的三条焊缝交点处贴片布置图；
- [0032] 图6为本发明的焊缝交点热点应力推导示意图。
- [0033] 图中：1、液压作动器；2、将力臂筒与作动器连接的角凳；3、力臂筒；4、力臂筒与过渡段的连接部分—法兰盘；5、试验件—过渡段；6、固定过渡段的剪力墙；7、带桩眼的地基，a、b、c、d分别表示一号、二号、三号、四号三向应变片。

## 具体实施方式

- [0034] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步详细描述。
- [0035] 大型风机塔架过渡段疲劳试验方法为：
- [0036] 1、试验装置的安装；
- [0037] 根据所采用的技术方案，在实验室内搭载冲击试验装置。首先用箱型桩组成剪力墙6，然后将试验件5横置与剪力墙6用螺栓固定住；接着将力臂筒3与试验件5在法兰盘4处连接，最后将液压作动器1与力臂筒3通过角凳2相连。
- [0038] 2、试验测点布置；
- [0039] (1)应变测点数量及位置通过以下方法确定
- [0040] 通过数值仿真方法，在应力水平较高的地方贴应变片。对于单焊缝，每个关心的点贴两个三向应变片，分别距离焊趾 $0.5t$  ( $t$ 为贴片位置的壁厚)与 $1.5t$ 处，应变片的连线垂直于焊缝方向，如图4所示；对于多焊缝交点处，分别垂直每一条焊缝贴片，每两条焊缝夹一个面，每个面上贴四个片。一号片位置分别距离各焊缝 $0.5t$ 厚度 ( $t$ 为所在面厚度)，四号片位置分别距离各焊缝 $1.5t$ 厚度，二、三号片与一、四号片以一、四号片连线为对角线组成正方形布置，如图5所示，每个面上的贴片位置与距离，如图6所示。
- [0041] (2)应变片的贴片方法
- [0042] 先用角磨机将贴片位置的喷漆磨掉并将此处磨光滑，然后用粗砂纸继续打磨，然后用细砂纸进行抛光，抛光的时候，细砂纸打磨方向与两个应变片的连线方向成 $45^\circ$ 夹角。然后用酒精清洗一遍，再用丙酮清洗一遍，等表面干燥后用固定胶将贴片贴上，用手按压至固定胶凝固，然后将三向片的引线通过导线接在应变测量箱上。
- [0043] 3、载荷加载步骤
- [0044] 在开机无外载荷的情况下对动态应变采集系统平衡清零，然后对液压作动器的应变反馈系统清零。首先进行静力试验，用静载荷加载，载荷梯度为十分之一的所需载荷，先施加压载，从0吨加载到所需载荷，然后从所需载荷降到0吨；再加载拉载，从0吨加载到所需载荷，然后从所需载荷降到0吨。
- [0045] 然后进行疲劳试验，载荷为正弦形式，幅值为所需载荷，频率为风载荷模拟频率。
- [0046] 4、数据处理方法

[0047] 根据单焊缝及多焊缝交点焊趾处热点应力计算方法对焊缝焊趾计算其热点应力,比较有限元计算与静力试验得到的热点应力水平。然后按照挪威船级社DNV规范RP-C203计算疲劳理论寿命。寿命值计算公式如下所示:

$$[0048] \quad \log N = \log \bar{a} - m \log(2 * H)$$

[0049] 其中,  $\log \bar{a}$  是常数,  $m$  是 S-N 寿命曲线的斜率,  $H$  为焊趾的热点应力值, 对于单焊缝,  $H = HS$ ; 对于多焊缝交点处,  $H = HS_5$ 。

[0050] 在进行疲劳试验时, 当测量的应变值瞬间下降较大程度时, 截止此时, 一共加载的循环周期次数即此处的试验寿命值, 比较理论寿命值与试验寿命值。

[0051] 然后将实验结果通过比例系数反推到真实构件, 校核真实构件的疲劳寿命。

[0052] 本发明的试验装置包括: 1、液压作动器; 2、角凳; 3、力臂筒; 4、法兰盘; 5、试验件; 6、剪力墙; 7、地基。

[0053] 本发明提出的多焊缝焊趾交点处热点应力计算方法为单面四片法, 即通过每两条焊缝间贴四个三向应变片推导焊缝交点焊趾处的热点应力的方法。

[0054] 本发明的目的是这样实现的: 首先用箱型桩组成剪力墙用地脚螺栓与地基固定, 然后将试验件横置与剪力墙用螺栓固定, 接着将力臂筒与试验件在法兰处连接, 最后将液压作动筒与力臂筒通过角凳相连。利用液压作动器加载动载荷与静载荷, 利用力臂筒的长度控制弯矩大小模拟真实风载成分。分别通过单焊缝及多焊缝交点焊趾处热点应力计算方法, 在应力较大的区域布置应变片并计算疲劳寿命值。最后通过模型与真实构件之间的应力比例关系, 将模型试验结果反推至真实模型。

[0055] 所述的液压作动器加载动载荷与静载荷的方法是: 在无外载荷的情况下对动态应变采集系统平衡清零。然后对加载系统进行清零, 再加载。这样就能消除试验件横置导致的自重对应变结果的影响。

[0056] 所述的布置应变片的方案是: 通过数值仿真方法, 在应力水平较高的地方贴应变片。对于单焊缝, 每个关心的点贴两个三向应变片, 分别距离焊趾  $0.5t$  ( $t$  为贴片位置的壁厚) 与  $1.5t$  处, 应变片的连线垂直于焊缝方向, 如图4所示; 对于多焊缝交点处, 分别垂直每一条焊缝贴片, 每两条焊缝夹一个面, 每个面上贴四个应变片 (a、b、c、d)。一号应变片位置分别距离各焊缝  $0.5t$  厚度 ( $t$  为所在面厚度), 四号应变片位置分别距离各焊缝  $1.5t$  厚度, 二、三号应变片与一、四号应变片以一、四号应变片连线为对角线组成正方形布置, 如图5所示, 每个面上的贴片位置与距离, 如图6所示, 即单面四片法的布片方式。

[0057] 所述的单焊缝交点焊趾处热点应力计算方法是: 将试验应变值代入主应力计算公式得到第一主应力值, 第一主应力计算公式如下:

$$[0058] \quad \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = \frac{E}{(1-\mu^2)} \left[ \frac{(1+\mu)}{2} (\varepsilon_{0^\circ} + \varepsilon_{90^\circ}) \pm \frac{(1+\mu)}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{45^\circ})^2 + (\varepsilon_{45^\circ} - \varepsilon_{90^\circ})^2} \right]$$

[0059]  $\mu$  为泊松比, 取 0.3,  $E$  为弹性模量, 取 210GPa,  $\varepsilon_{0^\circ}$ 、 $\varepsilon_{45^\circ}$ 、 $\varepsilon_{90^\circ}$  分别为单个应变片的各个方向的应变值。第一主应力  $S = \max(|\sigma_{\max}|, |\sigma_{\min}|)$ ,

[0060] 热点应力值  $HS = 1.5 * S_A - 0.5 * S_B$ ,

[0061] 其中:  $S_A$  是距离焊趾  $1.5t$  处的第一主应力值,  $S_B$  距离焊趾  $0.5t$  处的第一主应力值。

[0062] 所述的多焊缝交点焊趾处热点应力计算方法是: 按照单焊缝焊趾处计算热点应力

的方法,首先通过一、二号应变片求出HS1,三、四应变片求出热点应力HS2,通过一、三号应变片求出热点应力HS3,通过二、四号应变片求出热点应力HS4,然后通过如下公式求出HS5。 $HS5-1=1.5*HS1-0.5*HS2$ 、 $HS5-2=1.5*HS3-0.5*HS4$ 、 $HS5-3=1.3*S1-0.3*S4$ , $HS5=\max(|HS5-1|, |HS5-2|, |HS5-3|)$ ,S1和S4分别为一号应变片和四号应变片的第一主应力值,即单面四片法的计算法则。

[0063] 所述的反推到真实模型的方法是,通过有限元计算缩尺模型与真实模型的应力比例系数,用模型试验得到的应力乘以比例系数,反推得到真实模型的主应力水平,从而根据规范公式求出真实模型的疲劳寿命。

[0064] 本发明涉及的是一种大型风机塔架疲劳强度试验检测方法,具体的说是一种大型风机塔架通过缩比模型测量疲劳强度的检测方法。本发明还涉及到风机塔架缩比模型试验的固定安装及连接装置。

[0065] 本发明提供的是一种大型风机塔架的疲劳寿命检测方法及装置。目的在于实现大型风机塔架疲劳强度试验。本发明通过地脚螺栓固定剪力墙,然后将试验件横置与剪力墙固定,接着将力臂筒与试验件通过法兰连接,最后将液压作动器与力臂筒通过角凳相连。利用液压作动器数控加载,在关心区域通过布置应变片测出应变值,进而得出疲劳寿命理论值与试验值。并且提出了一种新的单面四片法,解决了复杂焊缝交点的布片方式及热点应力求解的难题,本发明可以最大程度的接近真实载荷对风机结构危险区域进行寿命检验,方法简单、准确度高、经济性强、可行性高,为大型风机塔架的强度试验提供了可行的方案

[0066] 大型风机塔架强度试验装置,包括液压作动器、角凳、力臂筒、法兰盘、试验件、剪力墙、地基,在实验室内搭载疲劳试验装置,首先用箱型桩组成剪力墙,利用地脚螺栓将剪力墙与地基刚固,然后将试验件横置与剪力墙用高强螺栓固定住,接着将力臂筒与试验件在法兰盘连接,最后将液压作动筒与力臂筒通过角凳相连。

[0067] 大型风机塔架强度试验检验方法,利用液压作动器加载动载荷与静载荷,利用力臂筒的长度控制弯矩大小模拟真实风载成分,分别通过单焊缝及多焊缝交点焊趾处热点应力计算方法,在应力较大的区域布置应变片并计算疲劳寿命值,最后通过模型与真实构件之间的应力比例关系,将模型试验结果反推至真实模型。

[0068] 所述的多焊缝交点焊趾处热点应力计算方法:

[0069] (1)布片方式:

[0070] 每两条焊缝夹一个面,每个面上贴四个片,一号片位置分别距离各焊缝0.5t厚度(t为所在面厚度),四号片位置分别距离各焊缝1.5t厚度,二、三号片与一、四号片以一、四号片连线为对角线组成正方形布置,即单面四片法;

[0071] (2)计算法则:

[0072] 每一面按照单焊缝焊趾处计算热点应力的方法,首先通过一、二号应变片求出热点应力HS1,三、四应变片求出热点应力HS2,通过一、三号应变片求出热点应力HS3,通过二、四号应变片求出热点应力HS4,然后通过如下公式求出HS5, $HS5-1=1.5*HS1-0.5*HS2$ 、 $HS5-2=1.5*HS3-0.5*HS4$ 、 $HS5-3=1.3*S1-0.3*S4$ , $HS5=\max(|HS5-1|, |HS5-2|, |HS5-3|)$ 。

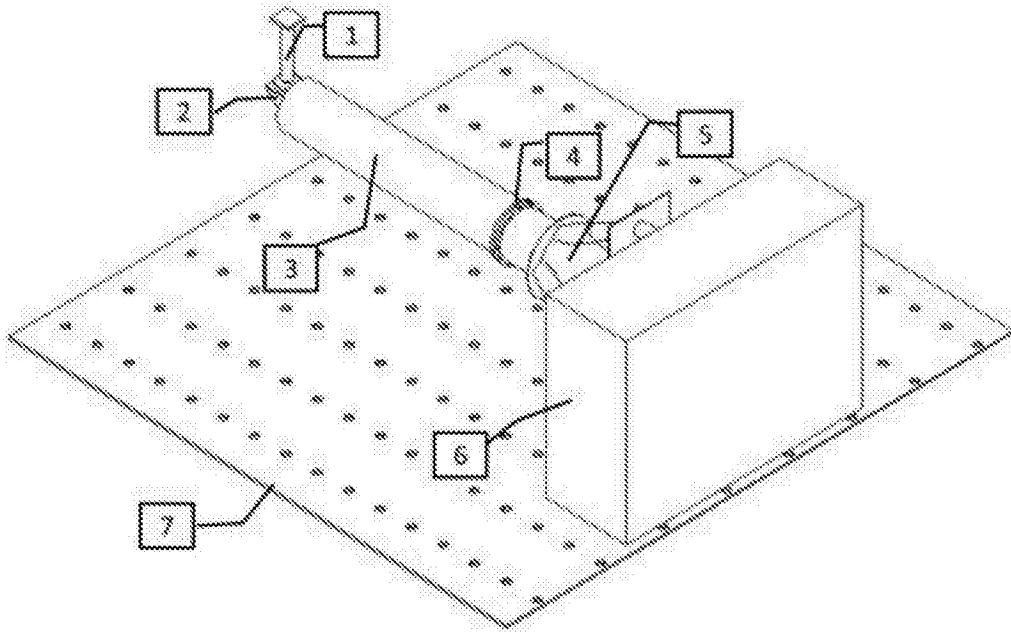


图1

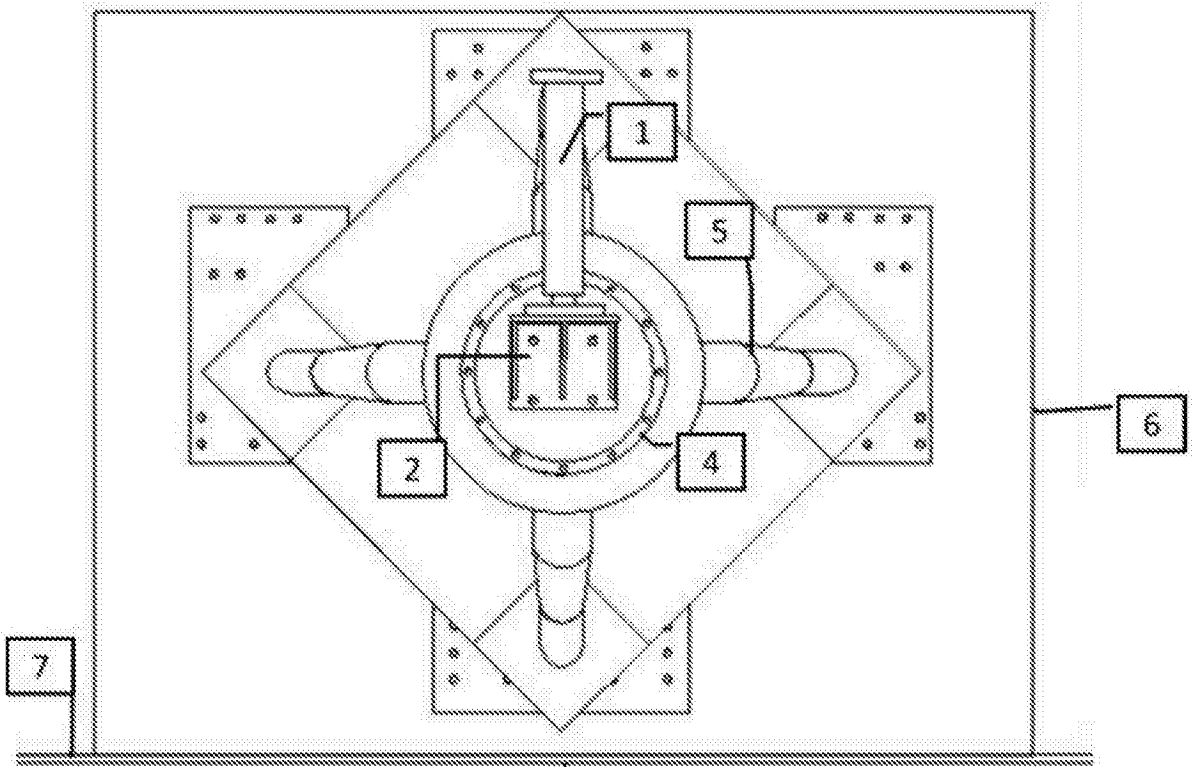


图2



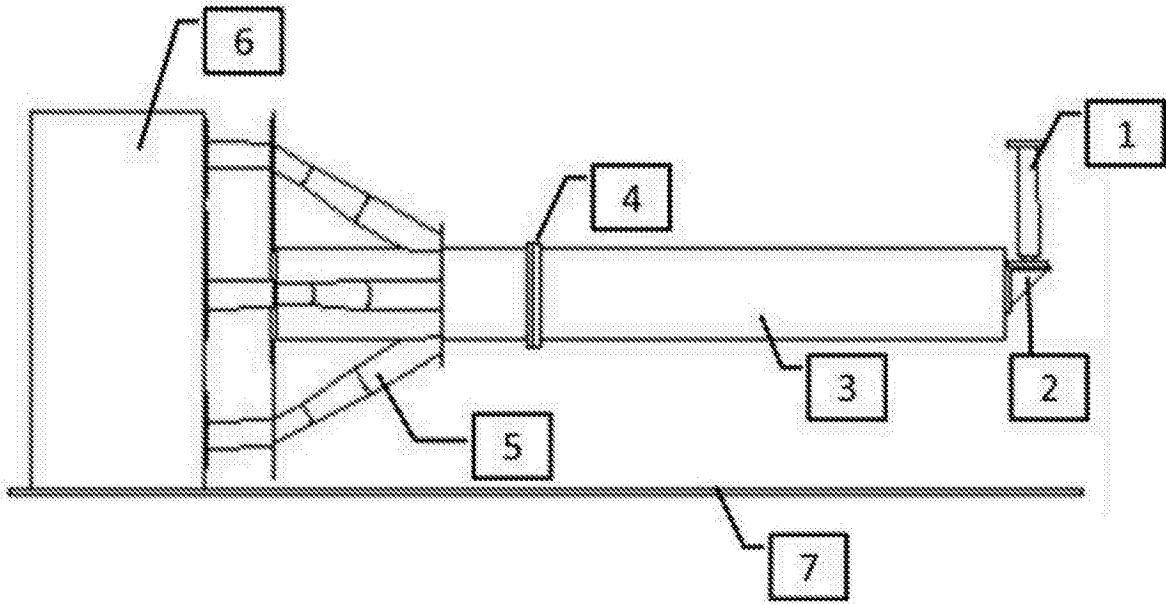


图3

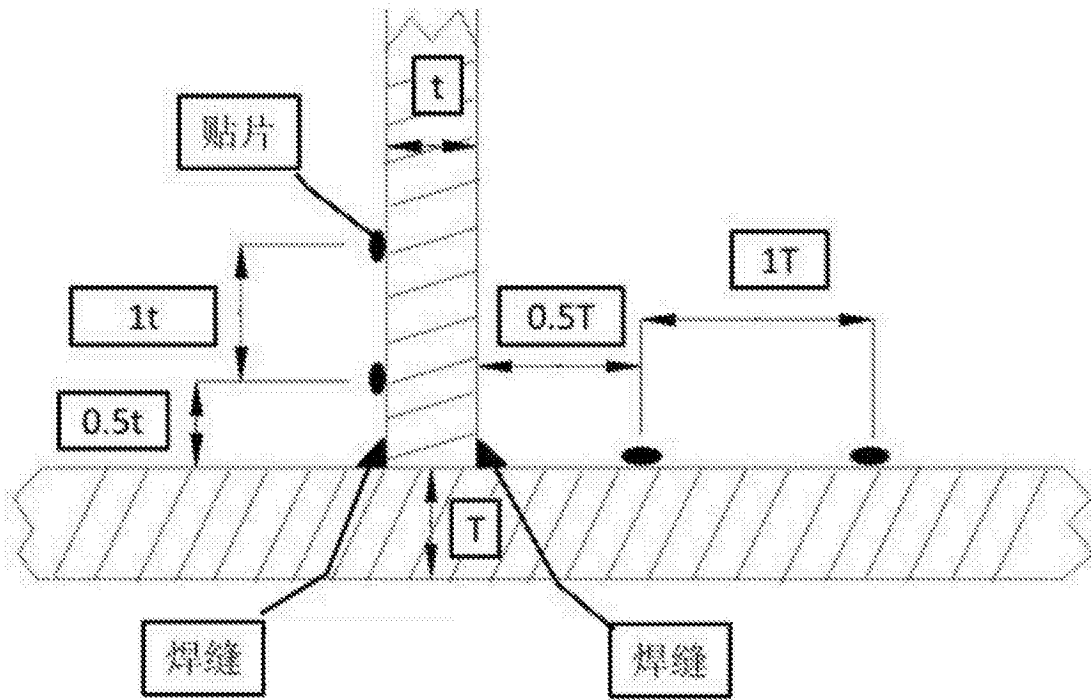


图4

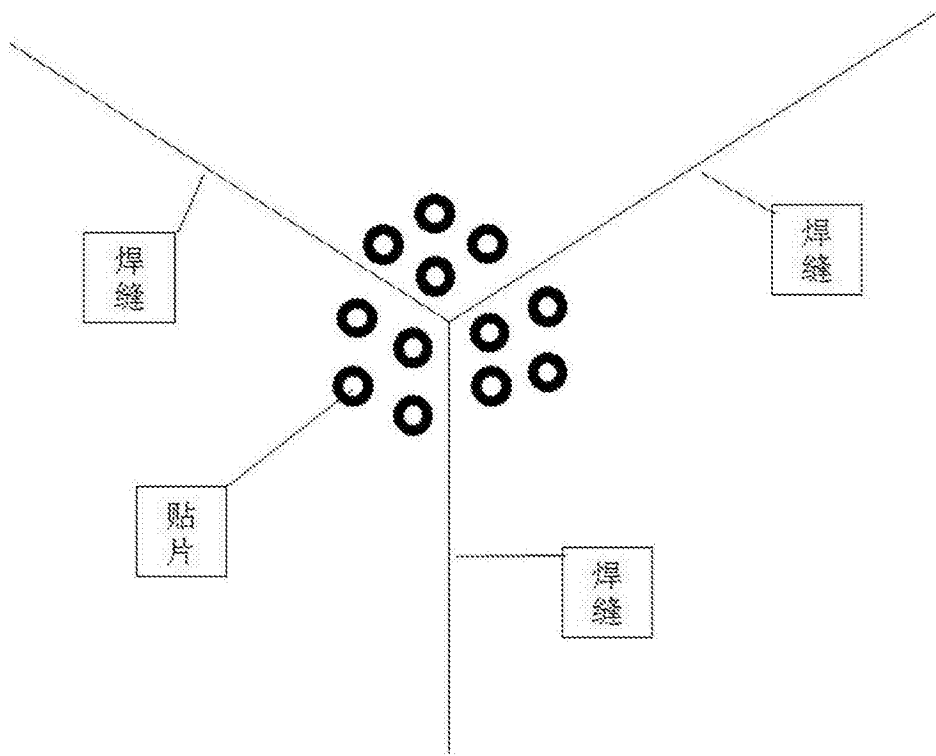


图5

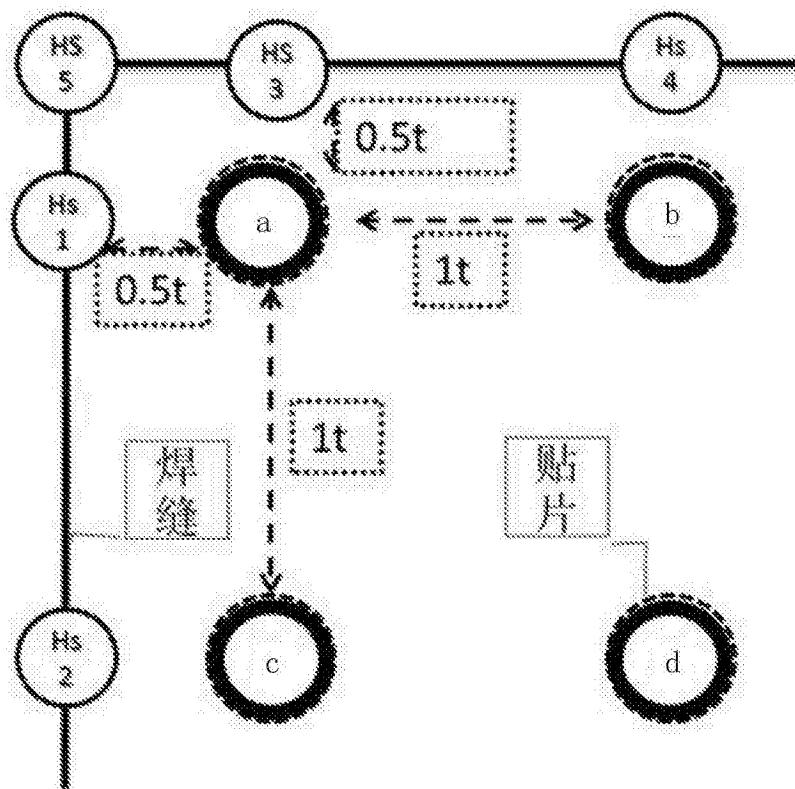


图6