



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114413798 A

(43) 申请公布日 2022. 04. 29

(21) 申请号 202210094431.3

(22) 申请日 2022.01.26

(71) 申请人 西南交通大学

地址 610031 四川省成都市金牛区二环北路一段

(72) 发明人 冯洋 赵春发 宁晓芳 翟婉明  
何忠霖 陈杰

(74) 专利代理机构 成都弘毅天承知识产权代理有限公司 51230

代理人 轩勇丽

(51) Int. Cl.

G01B 11/30 (2006.01)

B61K 9/08 (2006.01)

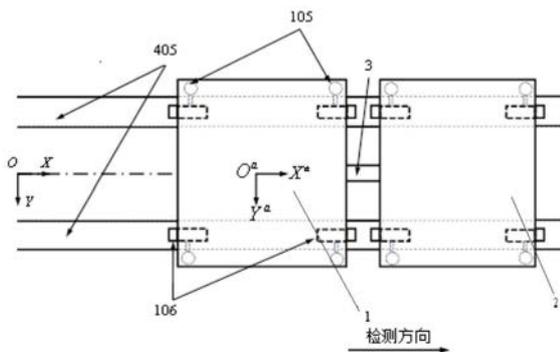
权利要求书4页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置及方法,属于超导磁悬浮轨道检测技术领域,包括检测小车,还包括用于驱动检测小车的动力小车,所述检测小车通过连接装置与动力小车连接,检测小车采用两系悬挂结构,检测小车包括一系悬挂检测系统、二系悬挂检测系统及数据处理集成模块,所述一系悬挂检测系统用来获取走行轨道数据,二系悬挂检测系统用来实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板上不共线的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差数据,数据处理集成模块用来数据传输、存储、分析处理。准确测试和掌握轨道不平顺的真实情况,不仅能提高超导电动磁悬浮(EDS)运营安全性和乘坐舒适性,还能指导线路维护。



1. 一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,包括检测小车,其特征在于,还包括用于驱动检测小车的动力小车,所述检测小车通过连接装置与动力小车连接,检测小车采用两系悬挂结构,检测小车包括一系悬挂检测系统、二系悬挂检测系统及数据处理集成模块,所述一系悬挂检测系统用来获取走行轨道数据,二系悬挂检测系统用来实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板上不共线的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差数据,数据处理集成模块用来数据传输、存储、分析处理。

2. 根据权利要求1所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,其特征在于,所述一系悬挂检测系统包括托架I,所述托架I的中心处顶壁设置有托架I加速度传感器,位于左侧和右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处分别设置有线结构光传感器,位于左侧和右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处分别设置有激光位移传感器;所述二系悬挂检测系统包括托架II,所述托架II的中心处顶壁设置有托架II加速度传感器,所述托架II的左右两侧壁上分别设置有超声定位采集仪。

3. 根据权利要求2所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,其特征在于,位于左侧或右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处设置有2-6个线结构光传感器,位于左侧或右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处设置有2-6个激光位移传感器;位于托架II的左或右侧壁上的超声定位采集仪有2-6个。

4. 根据权利要求2所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,其特征在于,所述托架I通过一系悬挂弹簧阻尼单元与检测小车走行轮连接,所述托架I与托架II通过二系悬挂弹簧阻尼单元连接,所述检测车走行轮上设置有检测小车导向轮;所述托架I上的中心处底壁上设置有托架I陀螺仪,所述托架II上的中心处底壁上设置有托架II陀螺仪。

5. 根据权利要求1所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,其特征在于,所述托架II上固定设置有数据处理集成模块,所述托架I加速度传感器、激光位移传感器、线结构光传感器、托架II加速度传感器及超声定位采集仪均与数据处理集成模块电性连接。

6. 基于权利要求1-5任一项所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测的方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1: 设置坐标系:将待检测的U型轨道中心线起点处设置绝对坐标系(0-XYZ),U型轨道上和托架I、托架II上分别设置随动坐标系( $0^T-X^TY^TZ^T$ ), ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ), ( $0^a-X^aY^aZ^a$ );

S2: 数据采集:线结构光传感器在检测小车运行过程中实时扫描左和右侧走行轨道表面粗糙度数据,激光位移传感器检测左和右走行轨道内侧轨数据,线结构光传感器和激光位移传感器所测数据的参考坐标系为( $0^b-X^bY^bZ^b$ );托架I加速度传感器测托架I的振动加速度,托架II加速度传感器测试托架II的振动加速度;选取‘8’字线圈的‘田’字形安装上不共线的4点#1、#2、#3、#4为特征标记点,4个特征标记点相对于绝对坐标系(0-XYZ)设计位置的4个标准坐标值( $X_1 Y_1 Z_1$ )、( $X_2 Y_2 Z_2$ )、( $X_3 Y_3 Z_3$ )和( $X_4 Y_4 Z_4$ );右侧超声定位采集仪采集右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征标记点在随动坐标系( $0^a-X^aY^aZ^a$ )下的坐标值( $X_{R1}^a Y_{R1}^a Z_{R1}^a$ )、( $X_{R2}^a Y_{R2}^a Z_{R2}^a$ )、( $X_{R3}^a Y_{R3}^a Z_{R3}^a$ )和( $X_{R4}^a Y_{R4}^a Z_{R4}^a$ ),左侧超声定位采集仪采集左侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征点在随动坐标系( $0^a-X^aY^aZ^a$ )下的坐标值( $X_{L1}^a Y_{L1}^a Z_{L1}^a$ )、( $X_{L2}^a Y_{L2}^a Z_{L2}^a$ )、( $X_{L3}^a Y_{L3}^a Z_{L3}^a$ )和( $X_{L4}^a Y_{L4}^a Z_{L4}^a$ );

S3: 数据处理:托架I右侧的线结构光传感器扫描右侧走行轨道凹凸高度差为 $\Delta m_R$ ,扫描

右侧走行轨道路径的平顺度为  $\gamma_R$ , 托架I左侧的线结构光传感器扫描左侧走行轨道的凹凸高度差为  $\Delta m_L$ , 扫描左侧走行轨道路径的平顺度为  $\gamma_L$ , 左右侧走行轨道扫描数据高度差为  $\Delta M$ , 托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器测量左右侧走行轨道轨距差为  $\Delta H$ ;

托架I右侧线结构光传感器和左侧线结构光传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差, 得到走行轨道高低、水平和方向不平顺修正值数据; 托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差, 得到走行轨道轨距不平顺修正值数据;

托架II左侧超声定位采集仪和右侧超声定位采集仪识别左右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板的4个特征标记点在随动坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 下的实时坐标, 并将实时坐标转换到大地坐标 ( $0-XYZ$ ), 与所测‘田’字形安装板在 ( $0-XYZ$ ) 坐标系下的标准坐标值比较, 得到‘田’字形安装板的3个轴向偏差和3个转动角度; 绕Z轴转角和绕Y轴转角  $\theta_z, \theta_y$  和X轴向上的平移影响悬浮导向轨间距不平顺  $\tau_1$ ; 绕X轴转角和绕Z轴转角  $\theta_x, \theta_z$  和Y轴向上的平移影响悬浮导向轨方向不平顺  $\Delta y$ ; 绕X轴转角和绕Y轴转角  $\theta_x, \theta_y$  和Z轴向上的平移影响悬浮导向轨高低不平顺  $\Delta z$ 。

7. 根据权利要求6所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测的方法, 其特征在于, 所述S3数据处理的具体步骤为:

S3-1: 走行轨道高低、水平、方向及轨距不平顺修正值数据值计算: 线结构光传感器和激光位移传感器数据在随动坐标系 ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ) 测得,  $\Delta m_R, \gamma_R, \Delta m_L, \gamma_L, \Delta M, \Delta H$  为标量, 在随动坐标系 ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ) 与绝对坐标系 ( $0-XYZ$ ) 中值大小相等, 不做坐标转换; 由于托架I有振动位移,  $a_{1y}, a_{1z}$  分别表示托架I的横向和垂向振动加速度, 对上述测量数据修正如下: 其中  $\Gamma$  表示修正后的值:

$$\Gamma \Delta m_R = \Delta m_R - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta m_L = \Delta m_L - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta M = \Delta M - \iint a_{1z} dt \quad (1)$$

$$\Gamma \Delta H = \Delta H - \iint a_{1y} dt = \Delta L_1 + \Delta L + \Delta L_2 - \iint a_{1y} dt \quad (2)$$

S3-2: 第i个‘田’字形安装板偏差数据值  $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$  计算: 以右侧悬浮导向轨检测数据为例, 测量‘田’字形安装板边缘点#1、#2、#3、#4在绝对坐标系下的标准设计坐标值分别为  $(X_1 Y_1 Z_1), (X_2 Y_2 Z_2), (X_3 Y_3 Z_3)$  和  $(X_4 Y_4 Z_4)$ , 超声定位采集仪采集到的4个点在坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 下的坐标值分别为  $(X_1^a Y_1^a Z_1^a), (X_2^a Y_2^a Z_2^a), (X_3^a Y_3^a Z_3^a)$  和  $(X_4^a Y_4^a Z_4^a)$ ; 坐标系 ( $0-XYZ$ ) 与坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 在  $t=0$  时刻三个轴的偏移量为:  $\Delta x^g, \Delta y^g, \Delta z^g$ , 其中  $a_{2y}, a_{2z}$  分别表示托架II的横向和垂向振动加速度,  $v$  为检测小车运行速度, 则坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 在  $X, Y, Z$  方向相对于坐标系 ( $0-XYZ$ ) 的偏移量定义如下:

$$X = \Delta x^g + v \cdot t \quad (3)$$

$$Y = \Delta y^g + \iint a_{2y} dt \quad (4)$$

$$Z = \Delta z^g + \iint a_{2z} dt \quad (5)$$

$$\text{间距偏移 } \tau_i : \begin{cases} \Delta x_{1i} = (x_{1i}^a + X) - x_{1i}, \Delta x_{2i} = (x_{2i}^a + X) - x_{2i} \\ \Delta x_{3i} = (x_{3i}^a + X) - x_{3i}, \Delta x_{4i} = (x_{4i}^a + X) - x_{4i} \\ \Delta x = (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4) / 4 \\ \tau_i = \tau_0 - \Delta x_i + \Delta x_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{方向偏移 } \Delta y_i: \begin{cases} \Delta y_{1i} = (y_{1i}^a + Y) - y_{1i}, \Delta y_{2i} = (y_{2i}^a + Y) - y_{2i} \\ \Delta y_{3i} = (y_{3i}^a + Y) - y_{3i}, \Delta y_{4i} = (y_{4i}^a + Y) - y_{4i} \\ \Delta y_i = (\Delta y_{1i} + \Delta y_{2i} + \Delta y_{3i} + \Delta y_{4i})/4 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{垂向偏移 } \Delta z_i: \begin{cases} \Delta z_{1i} = (z_{1i}^a + Z) - z_{1i}, \Delta z_{2i} = (z_{2i}^a + Z) - z_{2i} \\ \Delta z_{3i} = (z_{3i}^a + Z) - z_{3i}, \Delta z_{4i} = (z_{4i}^a + Z) - z_{4i} \\ \Delta z_i = (\Delta z_{1i} + \Delta z_{2i} + \Delta z_{3i} + \Delta z_{4i})/4 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $\tau_0$ 为‘田’字形安装板的标准间距； $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ 、 $\Delta z_i$ 为第*i*个‘田’字形安装板的纵向、横向和垂向偏移； $i=1 \cdots n$ ， $n$ 表示‘田’字形安装板的个数。

8. 根据权利要求6或7所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测的方法，其特征在于，为了测得‘田’字形安装板位置造成偏差产生的原因是3个方向上的平移，还可能是平移与转动的共同作用，假设每一种偏差都存在转动角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ ，通过如下方式计算，角度计算结果为零，则假设不成立，角度计算结果不为零，这假设成立：

第*i*个‘田’字形安装板4个特征标记点的设计标准坐标值可构成矩阵P：

$$P = \begin{bmatrix} x_{1i} & y_{1i} & z_{1i} \\ x_{2i} & y_{2i} & z_{2i} \\ x_{3i} & y_{3i} & z_{3i} \\ x_{4i} & y_{4i} & z_{4i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

在随动坐标系下的坐标值可构成矩阵 $P^a$

$$P^a = \begin{bmatrix} x_{1i}^a & y_{1i}^a & z_{1i}^a \\ x_{2i}^a & y_{2i}^a & z_{2i}^a \\ x_{3i}^a & y_{3i}^a & z_{3i}^a \\ x_{4i}^a & y_{4i}^a & z_{4i}^a \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据欧拉转角矩阵，逆时针为正，绕X、Y、Z轴的旋转矩阵为：

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

坐标转换如下：

$$P^a = R_x * R_y * R_z * P \quad (12)$$

(12)式可以求解 $\theta_x, \theta_y, \theta_z; \theta_z, \theta_y$ 和X方向上的平动主要影响‘田’字形安装板的间距进而影响‘8’字线圈的极距，故 $\theta_z, \theta_y$ 和X轴上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨间距不平顺 $\Delta x$ ； $\theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动主要影响‘田’字形安装板纵向方向的一致程度，故 $\theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨方向不平顺 $\Delta y$ ； $\theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动主要影响‘田’字形安装板垂向高低分布，故 $\theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨高低不平顺 $\Delta z$ ；获取的‘田’字形安装板的特征标记点空间位置偏移量 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ ，用于指导线路维护。

9. 根据权利要求6或7所述的一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测的方法，其特征在于，所述‘田’字形安装板是否发生形变的分析：

以右侧悬浮导向轨检测数据为例，假设#1、#2标记点构成的向量

$\vec{a} = (x_{R1}^a - x_{R2}^a \ y_{R1}^a - y_{R2}^a \ z_{R1}^a - z_{R2}^a)$ , #1、#3标记点构成的向量  $\vec{b} = (x_{R1}^a - x_{R3}^a \ y_{R1}^a - y_{R3}^a \ z_{R1}^a - z_{R3}^a)$ , #2、#3标记点构成的向量  $\vec{c} = (x_{R2}^a - x_{R3}^a \ y_{R2}^a - y_{R3}^a \ z_{R2}^a - z_{R3}^a)$ , #3、#4标记点构成的向量  $\vec{d} = (x_{R4}^a - x_{R3}^a \ y_{R4}^a - y_{R3}^a \ z_{R4}^a - z_{R3}^a)$ ;  $\vec{n} = (x \ y \ z)$  为特征点#1、#2、#3所在平面的法向量,法向量坐标值可由如下方程组得到:

$$\begin{cases} \vec{a} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{b} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{c} \cdot \vec{n} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

当  $\vec{d} \cdot \vec{n} = 0$ , 则特征标记点#1、#2、#3和#4共面, ‘田’字形安装板未发生形变;

$\vec{d} \cdot \vec{n} \neq 0$ , 则特征标记点#1、#2、#3和#4不共面, ‘田’字形安装板发生形变。

## 一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于超导磁悬浮轨道检测技术领域,具体涉及一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置及方法。

### 背景技术

[0002] 根据悬浮原理的不同,可将磁悬浮列车分为电磁悬浮列车(EMS),电动悬浮列车(EDS)和高温超导磁浮列车(HTS)三种类型。超导磁悬浮的主要形式有两种,一是基于动生原理的电动磁悬浮列车,二是基于感生原理的高温超导磁悬浮列车,高温超导磁悬浮列车尚处于试验验证和技术攻关阶段,而超导电动磁悬浮(EDS)在日本已经过了约半个世纪的试验和研究,先后建立了没有坡道和隧道的宫崎试验单线,线路87%为隧道的山梨试验双线,并且日本超导电动磁悬浮(EDS)仍是迄今为止载人速度超过600km/h的地面交通速度新纪录的保持者。国内超导电动磁悬浮(EDS)研究虽然起步较晚,但进程很快。西南交大、同济大学、北京交大、福建师范大学等高校,中车长客、航天科工三院等企业都在积极开展超导电动磁悬浮(EDS)相关研究并建立了试验线。

[0003] 超导电动磁悬浮(EDS)的最大悬浮高度可达100mm,较EMS(8-15mm)和HTS(15-20mm)的悬浮间隙而言,超导电动磁悬浮(EDS)撞击轨道的风险更低。超导电动磁悬浮(EDS)为自稳定系统,无需EMS系统复杂的间隙控制系统和HTS系统成本较高的永磁轨道,并且具有较大的浮重比与浮阻比。超导电动技术发展较为成熟,在日本已进入准商业化运营阶段,充分验证了其在高速和超高速领域的巨大潜力和优势。在更高速度的要求下,超导电动磁悬浮(EDS)更具竞争力和吸引力。

[0004] 超导电动磁悬浮(EDS)在一定的运行速度下,悬浮系统才能产生与车重相等的力,从而使车体悬浮,起浮速度约为100km/h。为了补充低速运行时支撑,导向力的不足,在转向架下方设有支撑轮,在左右方向装有导向车轮。2个‘8’字线圈内嵌于‘田’字形安装板组成安装绕组模块,安装绕组模块定位于轨道盖板,轨道盖板与轨道梁通过螺栓连接,组成U型轨两侧的悬浮导向轨(详见图1-3)。内嵌式‘8’字线圈的机械安装精度便于控制,且被‘田’字形安装板保护,因此在本发明中不考虑‘8’字的位移和形变,悬浮导向轨的不平顺只考虑‘田’字形安装板的位置偏差,‘田’字形安装板的形变用于指导线路维护。根据楞次定律,闭合回路导体中感应电流总是阻碍原磁通的变化,轨道上连续铺设闭合的‘8’字线圈,由车载超导磁体提供的‘8’字线圈中的磁通在列车运行速度作用下不断发生变化,在‘8’字线圈中产生阻碍磁通变化的感应电流,感应电流产生感应磁场。‘8’字线圈上侧产生与超导磁体磁极相反的磁场而产生吸引力,下侧产生与超导磁体磁极相同的磁场而产生排斥力。当车辆位于轨道中心时,‘8’字线圈中左右侧导向力大小相等方向相反,相互抵消;当车辆偏离中心时,左右侧‘8’字线圈磁通发生变化,系统将在每侧的‘8’字线圈中产生磁场,使得偏离侧的‘8’字线圈感应磁场与车载超导磁体产生吸引力,靠近侧的‘8’字线圈感应磁场与超导磁体产生排斥力,使得车辆重新回到轨道中心位置。

[0005] 轨道不平顺是限制运行速度,影响车辆系统动力学性能和乘坐舒适度的重要因素

之一。因此,准确测试和掌握轨道不平顺的真实情况,不仅能提高运营安全性和乘坐舒适性,还能指导线路维护。U型轨道(详见图1-3)由低速时使用的走行轨道和高速时使用的悬浮导向轨组成,走行轨道由于制造,安装以及线路沉降等原因难免在高度,水平,方向,轨距等方面存在一定的偏差。悬浮导向轨上安装‘8’字线圈的‘田’字形安装板在制造、安装及长期运行过程中受电磁力作用可能产生平移和转动,最终导致‘8’字线圈的空间位置与标准设计位置存在3个平动3个转动共6个自由度上的偏差。U型轨道底部走行轨道和两侧‘8’字线圈的‘田’字形安装板的空间几何位置相对于标准设计位置产生的偏差统称为超导电动磁悬浮的轨道不平顺。

[0006] 传统轮轨不平顺偏移量的测量方法主要有弦测法和惯性基准法,检测方法应用广泛,但本发明所研究对象超导电动磁悬浮(EDS)的交通制式和轨道结构均与轮轨系统相差甚远。申请号为CN109987116A的专利公开了一种可用于检测高温超导磁悬浮永磁轨道几何不平顺的轨检车,而超导电动磁悬浮(EDS)轨道不平顺检测方面,还处于空白,因此探索一种适合超导电动磁悬浮(EDS)轨道不平顺的检测装置和方法是非常必要的,也是顺应轨道交通高速发展需求的。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于:针对上述超导电动磁悬浮(EDS)的交通制式和轨道结构均与轮轨系统相差甚远的现象,导致的无法精确的检测超导电动磁悬浮(EDS)轨道不平顺的问题,本发明提供一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置及方法。

[0008] 本发明的第一个目的是提供一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,采用的技术方案如下:

[0009] 一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,包括检测小车,还包括用于驱动检测小车的动力小车,所述检测小车通过连接装置与动力小车连接,检测小车采用两系悬挂结构,检测小车包括一系悬挂检测系统、二系悬挂检测系统及数据处理集成模块,所述一系悬挂检测系统用来获取走行轨道数据,二系悬挂检测系统用来实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板上不共线的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差数据,数据处理集成模块用来数据传输、存储、分析处理。

[0010] 优选地,所述一系悬挂检测系统包括托架I,所述托架I的中心处顶壁设置有托架I加速度传感器,位于左侧和右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处分别设置有线结构光传感器,位于左侧和右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处分别设置有激光位移传感器;所述二系悬挂检测系统包括托架II,所述托架II的中心处顶壁设置有托架II加速度传感器,所述托架II的左右两侧壁上分别设置有超声定位采集仪。

[0011] 优选地,位于左侧或右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处设置有2-6个线结构光传感器,位于左侧或右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处设置有2-6个激光位移传感器;位于托架II的左或右侧壁上的超声定位采集仪有2-6个。左右侧的激光位移传感器、线结构光传感器及超声定位采集仪数量越多,检测的数据越准确。

[0012] 优选地,所述托架I通过一系悬挂弹簧阻尼单元与检测小车走行轮连接,所述托架I与托架II通过二系悬挂弹簧阻尼单元连接,所述检测车走行轮上设置有检测小车导向轮;所述托架I上的中心处底壁上设置有托架I陀螺仪,所述托架II上的中心处底壁上设置有托

架Ⅱ陀螺仪。

[0013] 优选地,所述托架Ⅱ上固定设置有数据处理集成模块,所述托架I加速度传感器、激光位移传感器、线结构光传感器、托架Ⅱ加速度传感器及超声定位采集仪均与数据处理集成模块电性连接。

[0014] 本发明的第二个目的是提供一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测的方法,包括以下步骤:

[0015] S1:设置坐标系:将待检测的U型轨道中心线起点处设置绝对坐标系(大地坐标)(0-XYZ),U型轨道上和托架I、托架Ⅱ上分别设置随动坐标系( $0^T-X^TY^TZ^T$ ), ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ), ( $0^a-X^aY^aZ^a$ );

[0016] S2:数据采集:线结构光传感器在检测小车运行过程中实时扫描左和右侧走行轨道表面粗糙度数据,激光位移传感器检测左和右走行轨道内侧轨数据,线结构光传感器和激光位移传感器所测数据的参考坐标系为( $0^b-X^bY^bZ^b$ );托架I加速度传感器测托架I的振动加速度,托架Ⅱ加速度传感器测试托架Ⅱ的振动加速度;选取‘8’字线圈的‘田’字形安装板不共线的4点#1、#2、#3、#4为特征标记点,每个位置‘田’字形安装板的4个特征标记点相对于绝对坐标系(0-XYZ)设计位置的4个标准坐标值( $X_1 Y_1 Z_1$ )、( $X_2 Y_2 Z_2$ )、( $X_3 Y_3 Z_3$ )和( $X_4 Y_4 Z_4$ );右侧超声定位采集仪采集右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征标记点在随动坐标系( $0^a-X^aY^aZ^a$ )下的坐标值( $X_{R1}^a Y_{R1}^a Z_{R1}^a$ )、( $X_{R2}^a Y_{R2}^a Z_{R2}^a$ )、( $X_{R3}^a Y_{R3}^a Z_{R3}^a$ )和( $X_{R4}^a Y_{R4}^a Z_{R4}^a$ ),左侧超声定位采集仪采集左侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征点在随动坐标系( $0^a-X^aY^aZ^a$ )下的坐标值( $X_{L1}^a Y_{L1}^a Z_{L1}^a$ )、( $X_{L2}^a Y_{L2}^a Z_{L2}^a$ )、( $X_{L3}^a Y_{L3}^a Z_{L3}^a$ )和( $X_{L4}^a Y_{L4}^a Z_{L4}^a$ );

[0017] S3:数据处理:托架I右侧的线结构光传感器扫描右侧走行轨道凹凸高度差为 $\Delta m_r$ ,扫描右侧走行轨道路径的平顺度为 $\gamma_r$ ,托架I左侧的线结构光传感器扫描左侧走行轨道的凹凸高度差为 $\Delta m_l$ ,扫描左侧走行轨道路径的平顺度为 $\gamma_l$ ,左右侧走行轨道扫描数据高度差为 $\Delta M$ ,托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器测量左右侧走行轨道轨距差为 $\Delta H$ ;

[0018] 托架I右侧线结构光传感器和左侧线结构光传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差,得到走行轨道高低、水平和方向不平顺修正值数据;托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差,得到走行轨道轨距不平顺修正值数据;

[0019] 托架Ⅱ左侧超声定位采集仪和右侧超声定位采集仪识别左右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板的4个特征标记点在随动坐标系( $0^a-X^aY^aZ^a$ )下的实时坐标,并将实时坐标转换到大地坐标(0-XYZ),与所测‘田’字形安装板在(0-XYZ)坐标系下的标准坐标值比较,得到‘田’字形安装板的3个轴向偏差和3个转动角度;绕Z轴转角和绕Y轴转角 $\theta_z, \theta_y$ 和X轴向上的平移主要影响悬浮导向轨间距不平顺 $\Delta x$ ;绕X轴转角和绕Z轴转角 $\theta_x, \theta_z$ 和Y轴向上的平移主要影响悬浮导向轨方向不平顺 $\Delta y$ ;绕X轴转角和绕Y轴转角 $\theta_x, \theta_y$ 和Z轴向上的平移主要影响悬浮导向轨高低不平顺 $\Delta z$ 。当横向获取的‘田’字形安装板特征标记点空间位置偏移过大和‘田’字形安装板表面发生形变时记录里程,用于指导线路维护。

[0020] 说明:通过识别‘田’字形安装板的特征标记点坐标,来分析‘8’字线圈空间位置也可以参照申请号为CN202110032170.8的专利。

[0021] 优选地,所述S3数据处理的具体步骤为:

[0022] S3-1: 走行轨道高低、水平、方向及轨距不平顺修正值数据值计算: 线结构光传感器和激光位移传感器数据在随动坐标系 ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ) 测得, 由于  $\Delta m_R$ 、 $\gamma_R$ 、 $\Delta m_L$ 、 $\gamma_L$ 、 $\Delta M$ 、 $\Delta H$  为标量, 在随动坐标系 ( $0^b-X^bY^bZ^b$ ) 与绝对坐标系 ( $0-XYZ$ ) 中值大小相等, 不做坐标转换; 又由于托架 I 有振动位移,  $a_{1y}$ 、 $a_{1z}$  分别表示托架 I 的横向和垂向振动加速度, 因此对上述测量数据修正如下: 其中  $\Gamma$  表示修正后的值:

$$[0023] \quad \Gamma \Delta m_R = \Delta m_R - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta m_L = \Delta m_L - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta M = \Delta M - \iint a_{1z} dt \quad (1)$$

$$[0024] \quad \Gamma \Delta H = \Delta H - \iint a_{1y} dt = \Delta L_1 + \Delta L + \Delta L_2 - \iint a_{1y} dt \quad (2)$$

[0025] S3-2: 第  $i$  个‘田’字形安装板偏差数据值  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ 、 $\Delta z_i$  计算: 以右侧悬浮导向轨检测数据为例, 测量‘田’字形安装板边缘点 #1、#2、#3、#4 在绝对坐标系下的标准设计坐标值分别为  $(X_1 \ Y_1 \ Z_1)$ 、 $(X_2 \ Y_2 \ Z_2)$ 、 $(X_3 \ Y_3 \ Z_3)$  和  $(X_4 \ Y_4 \ Z_4)$ , 超声定位采集仪采集到的 4 个点在坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 下的坐标值分别为  $(X_1^a \ Y_1^a \ Z_1^a)$ 、 $(X_2^a \ Y_2^a \ Z_2^a)$ 、 $(X_3^a \ Y_3^a \ Z_3^a)$  和  $(X_4^a \ Y_4^a \ Z_4^a)$ ; 坐标系 ( $0-XYZ$ ) 与坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 在  $t=0$  时刻三个轴的偏移量为:  $\Delta x^g$ 、 $\Delta y^g$ 、 $\Delta z^g$ , 其中  $a_{2y}$ 、 $a_{2z}$  分别表示托架 II 的横向和垂向振动加速度,  $v$  为检测小车运行速度, 则坐标系 ( $0^a-X^aY^aZ^a$ ) 在  $X, Y, Z$  方向相对于坐标系 ( $0-XYZ$ ) 的偏移量定义如下:

$$[0026] \quad X = \Delta x^g + v \cdot t \quad (3)$$

$$[0027] \quad Y = \Delta y^g + \iint a_{2y} dt \quad (4)$$

$$[0028] \quad Z = \Delta z^g + \iint a_{2z} dt \quad (5)$$

$$[0029] \quad \text{间距偏移 } \tau_i : \begin{cases} \Delta x_{1i} = (x_{1i}^a + X) - x_{1i}, \Delta x_{2i} = (x_{2i}^a + X) - x_{2i} \\ \Delta x_{3i} = (x_{3i}^a + X) - x_{3i}, \Delta x_{4i} = (x_{4i}^a + X) - x_{4i} \\ \Delta x = (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4) / 4 \\ \tau_i = \tau_0 - \Delta x_i + \Delta x_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0030] \quad \text{方向偏移 } \Delta y_i : \begin{cases} \Delta y_{1i} = (y_{1i}^a + Y) - y_{1i}, \Delta y_{2i} = (y_{2i}^a + Y) - y_{2i} \\ \Delta y_{3i} = (y_{3i}^a + Y) - y_{3i}, \Delta y_{4i} = (y_{4i}^a + Y) - y_{4i} \\ \Delta y_i = (\Delta y_{1i} + \Delta y_{2i} + \Delta y_{3i} + \Delta y_{4i}) / 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$[0031] \quad \text{垂向偏移 } \Delta z_i : \begin{cases} \Delta z_{1i} = (z_{1i}^a + Z) - z_{1i}, \Delta z_{2i} = (z_{2i}^a + Z) - z_{2i} \\ \Delta z_{3i} = (z_{3i}^a + Z) - z_{3i}, \Delta z_{4i} = (z_{4i}^a + Z) - z_{4i} \\ \Delta z_i = (\Delta z_{1i} + \Delta z_{2i} + \Delta z_{3i} + \Delta z_{4i}) / 4 \end{cases} \quad (8)$$

[0032] 其中  $\tau_0$  为‘田’字形安装板的标准间距;  $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ 、 $\Delta z_i$  为第  $i$  个‘田’字形安装板的纵向、横向和垂向偏移;  $i=1 \cdots n$ ,  $n$  表示‘田’字形安装板的个数。

[0033] 由于造成‘田’字形安装板的位置偏差  $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  的原因可能是 3 个方向上的平移, 还可能是平移与转动的共同作用, 为了测得‘田’字形安装板位置偏差的同时厘清造成偏差产生的原因是 3 个方向上的平移, 还可能是平移与转动的共同作用, 假设每一种偏差都存在转动角  $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ , 通过如下方式计算, 角度计算结果为零, 则假设不成立, 角度计算结果不为零, 这假设成立:

[0034] 第  $i$  个‘田’字形安装板 4 个特征标记点的设计标准坐标值可构成矩阵  $P$ :

$$[0035] \quad P = \begin{bmatrix} x_{1i} & y_{1i} & z_{1i} \\ x_{2i} & y_{2i} & z_{2i} \\ x_{3i} & y_{3i} & z_{3i} \\ x_{4i} & y_{4i} & z_{4i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0036] 在随动坐标系下的坐标值可构成矩阵 $P^a$

$$[0037] \quad P^a = \begin{bmatrix} x_{1i}^a & y_{1i}^a & z_{1i}^a \\ x_{2i}^a & y_{2i}^a & z_{2i}^a \\ x_{3i}^a & y_{3i}^a & z_{3i}^a \\ x_{4i}^a & y_{4i}^a & z_{4i}^a \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0038] 根据欧拉转角矩阵,逆时针为正,绕X、Y、Z轴的旋转矩阵为:

$$[0039] \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0040] 坐标转换如下:

$$[0041] \quad P^a = R_x * R_y * R_z * P \quad (12)$$

[0042] (12)式可以求解 $\theta_x, \theta_y, \theta_z; \theta_z, \theta_y$ 和X方向上的平动主要影响‘田’字形安装板的间距进而影响‘8’字线圈的极距,故 $\theta_z, \theta_y$ 和X轴上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨间距不平顺 $\Delta x; \theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动主要影响‘田’字形安装板纵向方向的一致程度,故 $\theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮(EDS)悬浮导向轨方向不平顺 $\Delta y; \theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动主要影响‘田’字形安装板垂向高低分布,故 $\theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮(EDS)悬浮导向轨高低不平顺 $\Delta z$ ;获取的‘田’字形安装板的特征标记点空间位置偏移量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ,用于指导线路维护。

[0043] 优选地,所述‘田’字形安装板是否发生形变的分析:

[0044] 以右侧悬浮导向轨检测数据为例,假设#1、#2标记点构成的向量 $\vec{a} = (x_{R1}^a - x_{R2}^a, y_{R1}^a - y_{R2}^a, z_{R1}^a - z_{R2}^a)$ , #1、#3标记点构成的向量 $\vec{b} = (x_{R1}^a - x_{R3}^a, y_{R1}^a - y_{R3}^a, z_{R1}^a - z_{R3}^a)$ , #2、#3标记点构成的向量 $\vec{c} = (x_{R2}^a - x_{R3}^a, y_{R2}^a - y_{R3}^a, z_{R2}^a - z_{R3}^a)$ , #3、#4标记点构成的向量 $\vec{d} = (x_{R3}^a - x_{R4}^a, y_{R3}^a - y_{R4}^a, z_{R3}^a - z_{R4}^a)$ ;  $\vec{n} = (x, y, z)$ 为特征点#1、#2、#3所在平面的法向量,法向量坐标值可由如下方程组得到:

$$[0045] \quad \begin{cases} \vec{a} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{b} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{c} \cdot \vec{n} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

[0046] 当 $\vec{d} \cdot \vec{n} = 0$ ,则特征标记点#1、#2、#3和#4共面,‘田’字形安装板未发生形变;

[0047]  $\vec{d} \cdot \vec{n} \neq 0$ ,则特征标记点#1、#2、#3和#4不共面,‘田’字形安装板发生形变。

[0048] 相较于现有技术,本发明的有益效果是:

[0049] (1) 本发明提供一种检测超导电动磁悬浮(EDS)低速时走行轨道不平顺和高速时悬浮导向轨道不平顺的检测装置和检测方法,精准的获取了低速时走行轨制造、安装及线路沉降原因造成的高度、水平、方向、轨距四个方面的偏差和高速时悬浮导向轨上安装‘8’字线圈的‘田’字形安装板在制造、安装及长期运行过程中受电磁力作用产生的旋转和平移

导致‘8’字线圈的空间位置与设计位置的偏差,从而准确测试和掌握轨道不平顺的真实情况,不仅能提高超导电动磁悬浮(EDS)运营安全性和乘坐舒适性,还能指导线路维护。

[0050] (2) 本发明通过托架I搭载1个托架I加速度传感器获取托架I的振动加速度,左右的激光位移传感器和左右的线结构光传感器,获取走行轨数据;托架II搭载1个托架II加速度传感器获取托架II的振动加速度,搭载左右的横向安装的超声定位采集仪,实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差。

[0051] (3) 本发明通过采用一系悬挂弹簧阻尼单元与二系悬挂弹簧阻尼单元的来衰减振动,减小由于检测车本身的振动而导致测量结果的误差。

## 附图说明

[0052] 图1是本发明研究对象超导电动磁悬浮(EDS)的U型轨道立体结构;

[0053] 图2是本发明研究对象超导电动磁悬浮(EDS)的U型轨道结构的主视图;

[0054] 图3中(a)是‘8’字线圈结构和‘田’字形安装板,(b)是2个‘8’字线圈内嵌于‘田’字形安装板组成的悬浮导向绕组模块,(c)是‘田’字形安装板与轨道盖板组成的安装模块;

[0055] 图4是本发明的检测装置总体结构图;

[0056] 图5是本发明的检测小车结构侧视图以及各部件安装位置和随动坐标系位置;

[0057] 图6是本发明的检测小车结构主视图以及各部件安装位置和随动坐标系位置;

[0058] 图7是本发明的检测原理图;

[0059] 图8是本发明的走行轨道轨距不平检测原理图;

[0060] 图9是本发明的绝对坐标系和托架II上随动坐标系在初始位置时的坐标偏移示意图;

[0061] 图10是本发明识别的‘8’字线圈‘田’字形安装板特征标记点#1、#2、#3和#4示意图;

[0062] 图11是本发明所识别的‘田’字形安装板特征标记点在X,Y,Z三个方向上的平动示意图;

[0063] 图12是本发明所识别的‘田’字形安装板特征标记点绕X,Y,Z三个轴转动示意图;

[0064] 图13是本发明通过设计检测装置和方法拟得到的走行轨道高低、方向、水平和轨距不平顺示意图;

[0065] 图14是本发明通过设计检测装置和方法拟得到的左右侧悬浮导向轨间距、高低、方向不平顺示意图。

[0066] 图中标记为:1-检测小车,101-托架I,1011-托架I加速度传感器,1012-托架I陀螺仪,1013-激光位移传感器,1014-线结构光传感器,102-托架II,1021-托架II陀螺仪,1022-托架II加速度传感器,1023-超声定位采集仪,1024-数据处理集成模块,103-一系悬挂弹簧阻尼单元,104-二系悬挂弹簧阻尼单元,105-检测小车导向轮,106-检测小车走行轮,2-动力小车,201-动力车导向轮,202-动力车走行轮,3-连接装置,4-U型轨道,401-悬浮导向轨,402-梁,403-推进线圈,404-悬浮导向圈,405-走行轨道。

## 具体实施方式

[0067] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,对本发明进行进一步详细

说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明,即所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。

#### [0068] 实施例1

[0069] 为了解决无法精确的检测超导电动磁悬浮(EDS)轨道不平顺的问题,本发明提供一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测装置,如图4-8所示,包括检测小车,还包括用于驱动检测小车的动力小车,所述检测小车通过连接装置与动力小车连接,检测小车采用两系悬挂结构,检测小车包括一系悬挂检测系统、二系悬挂检测系统及数据处理集成模块,所述一系悬挂检测系统用来获取走行轨道数据,二系悬挂检测系统用来实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板的不共线的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差数据,数据处理集成模块用来数据传输、存储、分析处理。

[0070] 其中,所述一系悬挂检测系统包括托架I,所述托架I的中心处顶壁设置有托架I加速度传感器,位于左侧和右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处分别设置有线结构光传感器,位于左侧和右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处分别设置有激光位移传感器;所述二系悬挂检测系统包括托架II,所述托架II的中心处顶壁设置有托架II加速度传感器,所述托架II的左右两侧壁上分别设置有超声定位采集仪。

[0071] 动力小车设置上有动力车导向轮和动力车走行轮。

[0072] 托架I搭载1个托架I加速度传感器获取托架I的振动加速度,左右的激光位移传感器和左右的线结构光传感器,获取走行轨数据。托架II搭载1个托架II加速度传感器获取托架II的振动加速度,搭载左右的横向安装的超声定位采集仪,实时采集‘8’字线圈‘田’字形安装板的4个特征标记点坐标,获取‘田’字形安装板的位置偏差。

[0073] 其中,所述托架II上固定设置有数据处理集成模块,所述托架I加速度传感器、激光位移传感器、线结构光传感器、托架II加速度传感器及超声定位采集仪均与数据处理集成模块电性连接。

#### [0074] 实施例2

[0075] 为了使检测的数据更加的精确,在实施例1的基础上,进一步地,位于左侧或右侧的走行轨道正上方与托架I重合范围处设置有2-6个线结构光传感器,位于左侧或右侧的走行轨道内侧壁正上方与托架I相交处设置有2-6个激光位移传感器;位于托架II的左或右侧壁上的超声定位采集仪有2-6个。左右侧的激光位移传感器、线结构光传感器及超声定位采集仪数量越多,检测的数据越准确。

[0076] 其中,如图5-6所示,所述托架I通过一系悬挂弹簧阻尼单元与检测小车走行轮连接,所述托架I与托架II通过二系悬挂弹簧阻尼单元连接,所述测车走行轮上设置有检测小车导向轮;所述托架I上的中心处底壁上设置有托架I陀螺仪,所述托架II上的中心处底壁上设置有托架II陀螺仪。一系悬挂弹簧阻尼单元与二系悬挂弹簧阻尼单元的作用均为衰减振动,减小由于检测车本身的振动而导致测量结果的误差。

#### [0077] 实施例3

[0078] 一种超导电动磁悬浮轨道不平顺检测和分析方法,如图7-14所示,包括以下步骤:

[0079] S1:设置坐标系:将待检测的U型轨道中心线起点处设置绝对坐标系(大地坐标)(O-XYZ),U型轨道上和托架I、托架II上分别设置随动坐标系( $0^T-X^T Y^T Z^T$ ), ( $0^b-X^b Y^b Z^b$ ), ( $0^a-X^a Y^a Z^a$ ),如图7所示;

[0080] S2:数据采集:线结构光传感器在检测小车运行过程中实时扫描左和右侧走行轨道表面粗糙度数据,激光位移传感器检测左和右走行轨道内侧轨数据,线结构光传感器和激光位移传感器所测数据的参考坐标系为 $(0^b-X^bY^bZ^b)$ ;托架I加速度传感器测托架I的振动加速度,托架II加速度传感器测试托架II的振动加速度;选取‘8’字线圈的‘田’字形安装上不共线的4点#1、#2、#3、#4为特征标记点,每个位置‘田’字形安装板的4个特征标记点相对于绝对坐标系 $(0-XYZ)$ 设计位置的4个标准坐标值 $(X_1 Y_1 Z_1)$ 、 $(X_2 Y_2 Z_2)$ 、 $(X_3 Y_3 Z_3)$ 和 $(X_4 Y_4 Z_4)$ ;右侧超声定位采集仪采集右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征标记点在随动坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 下的坐标值 $(X_{R1}^a Y_{R1}^a Z_{R1}^a)$ 、 $(X_{R2}^a Y_{R2}^a Z_{R2}^a)$ 、 $(X_{R3}^a Y_{R3}^a Z_{R3}^a)$ 和 $(X_{R4}^a Y_{R4}^a Z_{R4}^a)$ ,左侧超声定位采集仪采集左侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板4个特征点在随动坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 下的坐标值 $(X_{L1}^a Y_{L1}^a Z_{L1}^a)$ 、 $(X_{L2}^a Y_{L2}^a Z_{L2}^a)$ 、 $(X_{L3}^a Y_{L3}^a Z_{L3}^a)$ 和 $(X_{L4}^a Y_{L4}^a Z_{L4}^a)$ ;

[0081] S3:数据处理:托架I右侧的线结构光传感器扫描右侧走行轨道凹凸高度差为 $\Delta m_R$ ,扫描右侧走行轨道路径的平顺度为 $\gamma_R$ ,托架I左侧的线结构光传感器扫描左侧走行轨道的凹凸高度差为 $\Delta m_L$ ,扫描左侧走行轨道路径的平顺度为 $\gamma_L$ ,左右侧走行轨道扫描数据高度差为 $\Delta M$ ,托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器测量左右侧走行轨道轨距差为 $\Delta H$ (如图13所示,);

[0082] 托架I右侧线结构光传感器和左侧线结构光传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差,得到走行轨道高低、水平和方向不平顺修正值数据;托架I右侧激光位移传感器与左侧激光位移传感器所测数据与托架I加速度传感器测量值二次积分作差,得到走行轨道轨距不平顺修正值数据;

[0083] 托架II左侧超声定位采集仪和右侧超声定位采集仪识别左右侧悬浮导向轨上‘田’字形安装板的4个特征标记点在随动坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 下的实时坐标,并将实时坐标转换到大地坐标 $(0-XYZ)$ ,与所测‘田’字形安装板在 $(0-XYZ)$ 坐标系下的标准坐标值比较,得到‘田’字形安装板的3个轴向偏差和3个转动角度;绕Z轴转角和绕Y轴转角 $\theta_z, \theta_y$ 和X轴向上的平移主要影响悬浮导向轨间距不平顺 $\Delta x$ ;绕X轴转角和绕Z轴转角 $\theta_x, \theta_z$ 和Y轴向上的平移主要影响悬浮导向轨方向不平顺 $\Delta y$ ;绕X轴转角和绕Y轴转角 $\theta_x, \theta_y$ 和Z轴向上的平移主要影响悬浮导向轨高低不平顺 $\Delta z$ 。当从横向获取的‘田’字形安装板特征标记点空间位置偏移过大和‘田’字形安装板表面发生形变时记录里程,用于指导线路维护。

[0084] 说明:通过识别‘田’字形安装板的特征标记点坐标,来分析‘8’字线圈空间位置也可以参照申请号为CN202110032170.8的专利。

[0085] 其中,所述S3数据处理的具体步骤为:

[0086] S3-1:走行轨道高低、水平、方向及轨距不平顺修正值数据值计算:线结构光传感器和激光位移传感器数据在随动坐标系 $(0^b-X^bY^bZ^b)$ 测得,由于 $\Delta m_R, \gamma_R, \Delta m_L, \gamma_L, \Delta M, \Delta H$ 为标量,在随动坐标系 $(0^b-X^bY^bZ^b)$ 与绝对坐标系 $(0-XYZ)$ 中值大小相等,不做坐标转换;又由于托架I有振动位移, $a_{1y}, a_{1z}$ 分别表示托架I的横向和垂向振动加速度,因此对上述测量数据修正如下:其中 $\Gamma$ 表示修正后的值:

$$[0087] \quad \Gamma \Delta m_R = \Delta m_R - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta m_L = \Delta m_L - \iint a_{1z} dt \quad \Gamma \Delta M = \Delta M - \iint a_{1z} dt \quad (1)$$

$$[0088] \quad \Gamma \Delta H = \Delta H - \iint a_{1y} dt = \Delta L_1 + \Delta L + \Delta L_2 - \iint a_{1y} dt \quad (2)$$

[0089] S3-2:第i个‘田’字形安装板偏差数据值 $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i$ 计算:以右侧悬浮导向轨检测数据为例,测量‘田’字形安装板边缘点#1、#2、#3、#4(如图10所示,)在绝对坐标系下的

标准设计坐标值分别为 $(X_1 \ Y_1 \ Z_1)$ 、 $(X_2 \ Y_2 \ Z_2)$ 、 $(X_3 \ Y_3 \ Z_3)$ 和 $(X_4 \ Y_4 \ Z_4)$ ,超声定位采集仪采集到的4个点在坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 下的坐标值分别为 $(X_1^a \ Y_1^a \ Z_1^a)$ 、 $(X_2^a \ Y_2^a \ Z_2^a)$ 、 $(X_3^a \ Y_3^a \ Z_3^a)$ 和 $(X_4^a \ Y_4^a \ Z_4^a)$ ;坐标系 $(0-XYZ)$ 与坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 在 $t=0$ 时刻三个轴的偏移量为: $\Delta x^g$ ,  $\Delta y^g$ ,  $\Delta z^g$ ,如图9所示,其中 $a_{2y}$ 、 $a_{2z}$ 分别表示托架II的横向和垂向振动加速度, $v$ 为检测小车运行速度,则坐标系 $(0^a-X^aY^aZ^a)$ 在 $X, Y, Z$ 方向相对于坐标系 $(0-XYZ)$ 的偏移量定义如下:

$$[0090] \quad X = \Delta x^g + v \cdot t \quad (3)$$

$$[0091] \quad Y = \Delta y^g + \int \int a_{2y} dt \quad (4)$$

$$[0092] \quad Z = \Delta z^g + \int \int a_{2z} dt \quad (5)$$

$$[0093] \quad \text{间距偏移 } \tau_i : \begin{cases} \Delta x_{1i} = (x_{1i}^a + X) - x_{1i}, \Delta x_{2i} = (x_{2i}^a + X) - x_{2i} \\ \Delta x_{3i} = (x_{3i}^a + X) - x_{3i}, \Delta x_{4i} = (x_{4i}^a + X) - x_{4i} \\ \Delta x = (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \Delta x_4) / 4 \\ \tau_i = \tau_0 - \Delta x_i + \Delta x_{i+1} \end{cases} \quad (6)$$

$$[0094] \quad \text{方向偏移 } \Delta y_i : \begin{cases} \Delta y_{1i} = (y_{1i}^a + Y) - y_{1i}, \Delta y_{2i} = (y_{2i}^a + Y) - y_{2i} \\ \Delta y_{3i} = (y_{3i}^a + Y) - y_{3i}, \Delta y_{4i} = (y_{4i}^a + Y) - y_{4i} \\ \Delta y_i = (\Delta y_{1i} + \Delta y_{2i} + \Delta y_{3i} + \Delta y_{4i}) / 4 \end{cases} \quad (7)$$

$$[0095] \quad \text{垂向偏移 } \Delta z_i : \begin{cases} \Delta z_{1i} = (z_{1i}^a + Z) - z_{1i}, \Delta z_{2i} = (z_{2i}^a + Z) - z_{2i} \\ \Delta z_{3i} = (z_{3i}^a + Z) - z_{3i}, \Delta z_{4i} = (z_{4i}^a + Z) - z_{4i} \\ \Delta z_i = (\Delta z_{1i} + \Delta z_{2i} + \Delta z_{3i} + \Delta z_{4i}) / 4 \end{cases} \quad (8)$$

[0096] 其中 $\tau_0$ 为‘田’字形安装板的标准间距; $\Delta x_i$ 、 $\Delta y_i$ 、 $\Delta z_i$ 为第 $i$ 个‘田’字形安装板的纵向、横向和垂向偏移; $i=1 \cdots n$ , $n$ 表示‘田’字形安装板的个数。

[0097] 由于造成‘田’字形安装板的位置偏差 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ 的原因可能是3个方向上的平移,还可能是平移与转动的共同作用(如图11-12所示,),为了测得‘田’字形安装板位置偏差的同时厘清造成偏差产生的原因是3个方向上的平移,还可能是平移与转动的共同作用,假设每一种偏差都存在转动角 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ ,通过如下方式计算,角度计算结果为零,则假设不成立,角度计算结果不为零,这假设成立:

[0098] 第 $i$ 个‘田’字形安装板4个特征标记点的设计标准坐标值可构成矩阵 $P$ :

$$[0099] \quad P = \begin{bmatrix} x_{1i} & y_{1i} & z_{1i} \\ x_{2i} & y_{2i} & z_{2i} \\ x_{3i} & y_{3i} & z_{3i} \\ x_{4i} & y_{4i} & z_{4i} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0100] 在随动坐标系下的坐标值可构成矩阵 $P^a$

$$[0101] \quad P^a = \begin{bmatrix} x_{1i}^a & y_{1i}^a & z_{1i}^a \\ x_{2i}^a & y_{2i}^a & z_{2i}^a \\ x_{3i}^a & y_{3i}^a & z_{3i}^a \\ x_{4i}^a & y_{4i}^a & z_{4i}^a \end{bmatrix} \quad (10)$$

[0102] 根据欧拉转角矩阵,逆时针为正,绕 $X, Y, Z$ 轴的旋转矩阵为:

$$[0103] \quad R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x & 0 \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

[0104] 坐标转换如下：

$$[0105] \quad P^a = R_x * R_y * R_z * P \quad (12)$$

[0106] (12)式可以求解 $\theta_x, \theta_y, \theta_z; \theta_z, \theta_y$ 和X方向上的平动主要影响‘田’字形安装板的间距进而影响‘8’字线圈的极距,故 $\theta_z, \theta_y$ 和X轴上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨间距不平顺 $\tau_i$ ;  $\theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动主要影响‘田’字形安装板纵向方向的一致程度,故 $\theta_x, \theta_z$ 和Y方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨方向不平顺 $\Delta y$ ;  $\theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动主要影响‘田’字形安装板垂向上的高低分布,故 $\theta_x, \theta_y$ 和Z方向上的平动共同造成超导电动磁悬浮悬浮导向轨高低不平顺 $\Delta z$ ; 获取的‘田’字形安装板的特征标记点空间位置偏移量 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ ,用于指导线路维护。

[0107] 所述‘田’字形安装板是否发生形变的分析：

[0108] 以右侧悬浮导向轨检测数据为例,假设#1、#2标记点构成的向量 $\vec{a} = (x_{R1}^a - x_{R2}^a, y_{R1}^a - y_{R2}^a, z_{R1}^a - z_{R2}^a)$ , #1、#3标记点构成的向量 $\vec{b} = (x_{R1}^a - x_{R3}^a, y_{R1}^a - y_{R3}^a, z_{R1}^a - z_{R3}^a)$ , #2、#3标记点构成的向量 $\vec{c} = (x_{R2}^a - x_{R3}^a, y_{R2}^a - y_{R3}^a, z_{R2}^a - z_{R3}^a)$ , #3、#4标记点构成的向量 $\vec{d} = (x_{R4}^a - x_{R3}^a, y_{R4}^a - y_{R3}^a, z_{R4}^a - z_{R3}^a)$ ;  $\vec{n} = (x, y, z)$ 为特征点#1、#2、#3所在平面的法向量,法向量坐标值可由如下方程组得到：

$$[0109] \quad \begin{cases} \vec{a} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{b} \cdot \vec{n} = 0 \\ \vec{c} \cdot \vec{n} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

[0110] 当 $\vec{d} \cdot \vec{n} = 0$ ,则特征标记点#1、#2、#3和#4共面,‘田’字形安装板未发生形变；

[0111]  $\vec{d} \cdot \vec{n} \neq 0$ ,则特征标记点#1、#2、#3和#4不共面,‘田’字形安装板发生形变。如图14所示。

[0112] 以上所述实施例仅表达了本申请的具体实施方式,其描述较为具体和详细,但不能因此而理解为对本申请保护范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请技术方案构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。

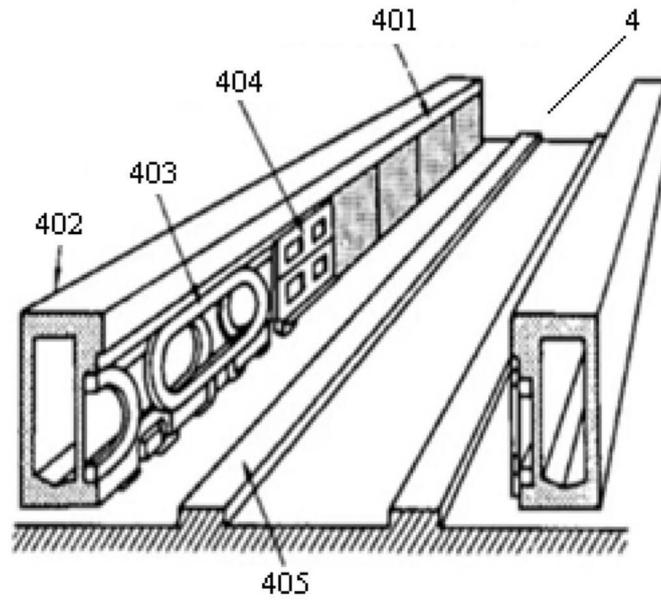


图1

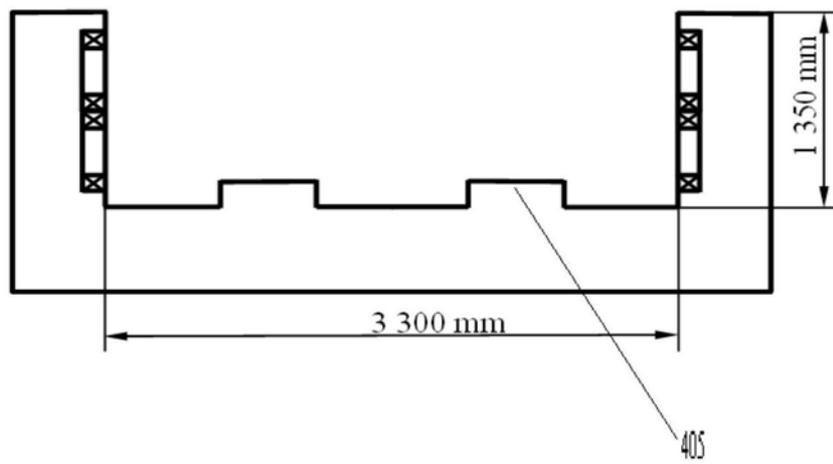


图2

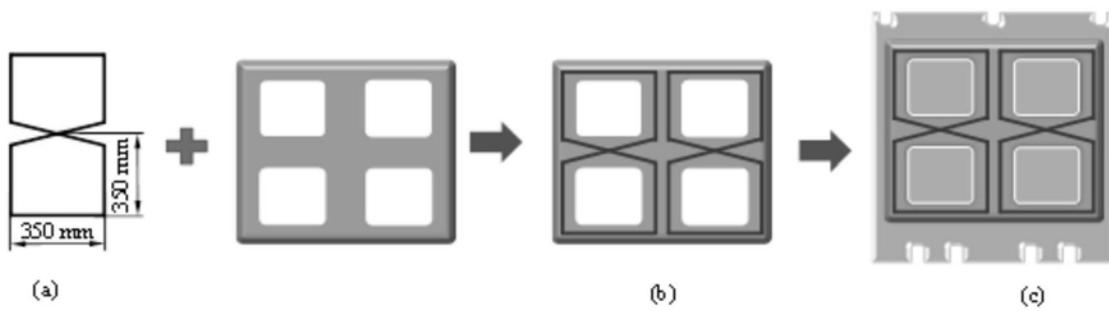


图3

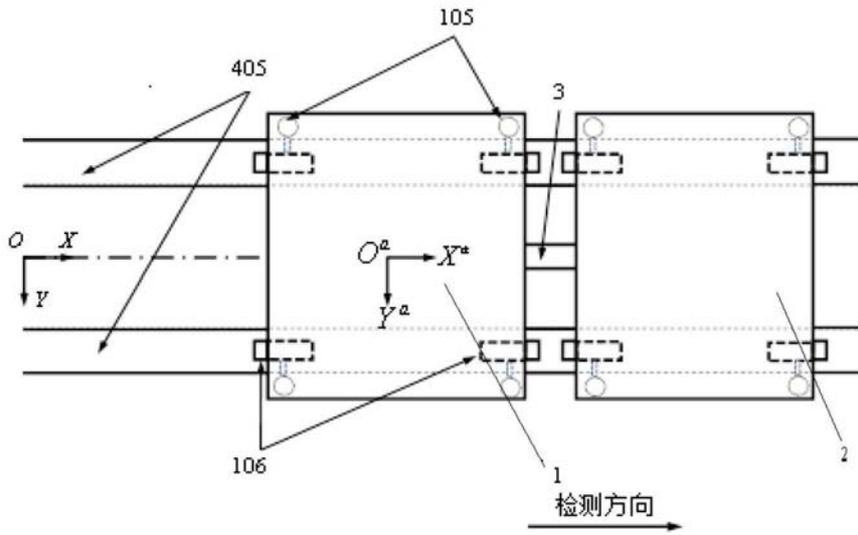


图4

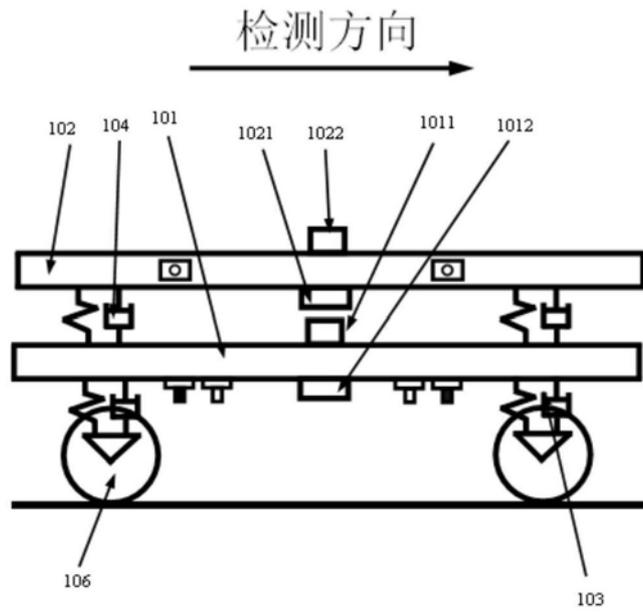


图5

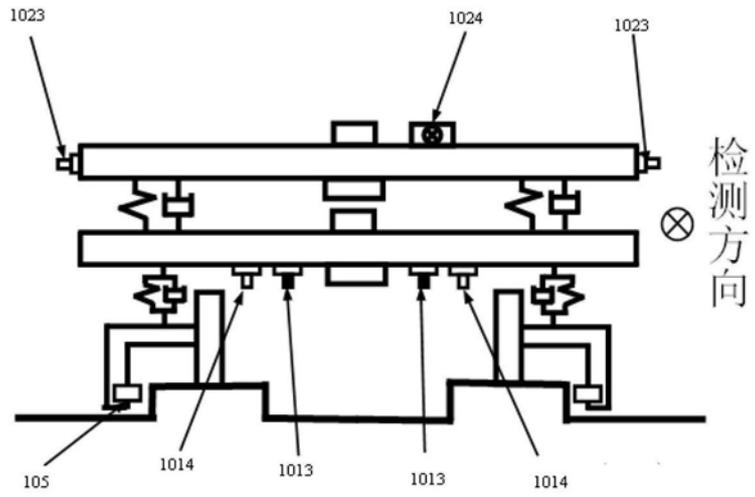


图6

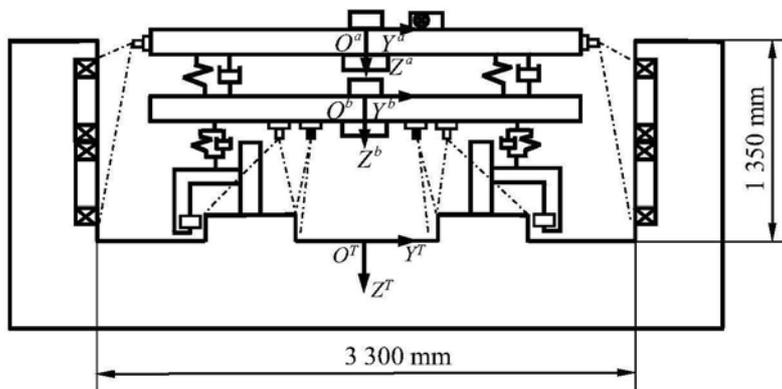


图7

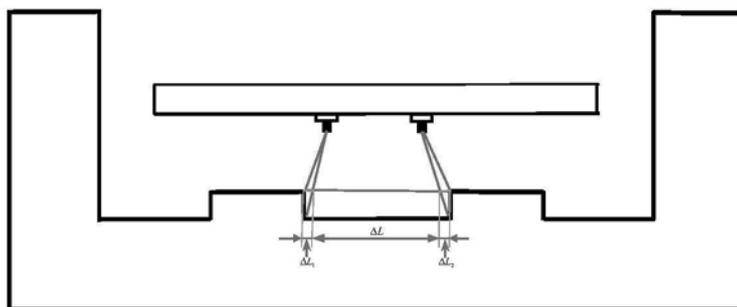


图8

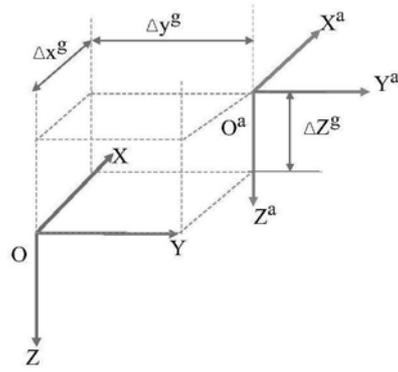


图9

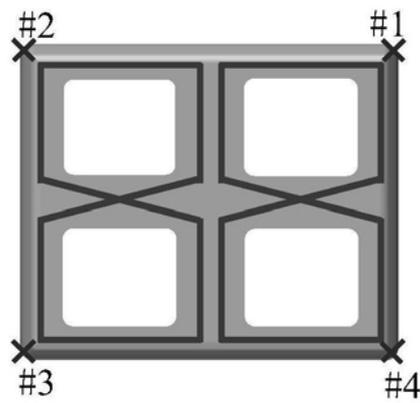


图10

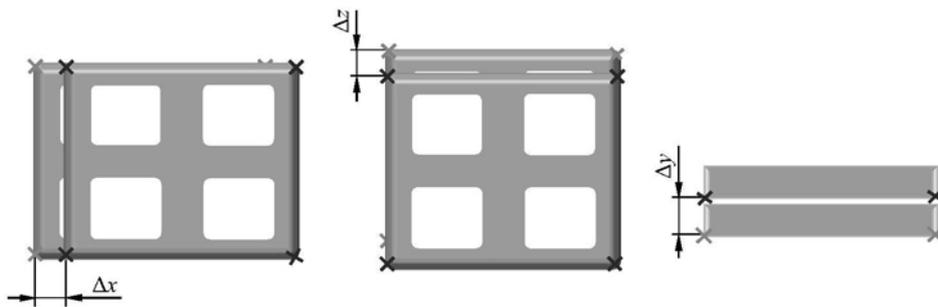


图11

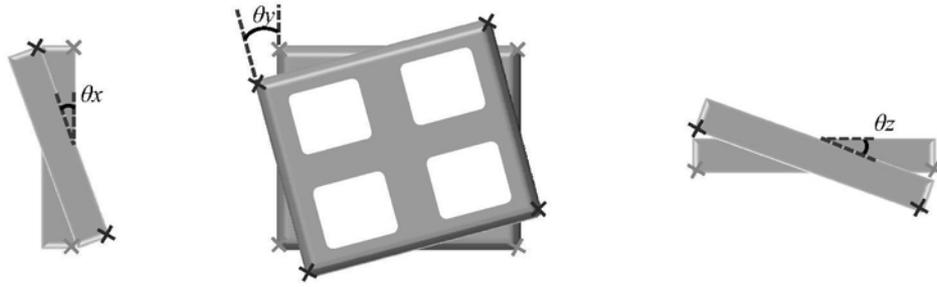


图12

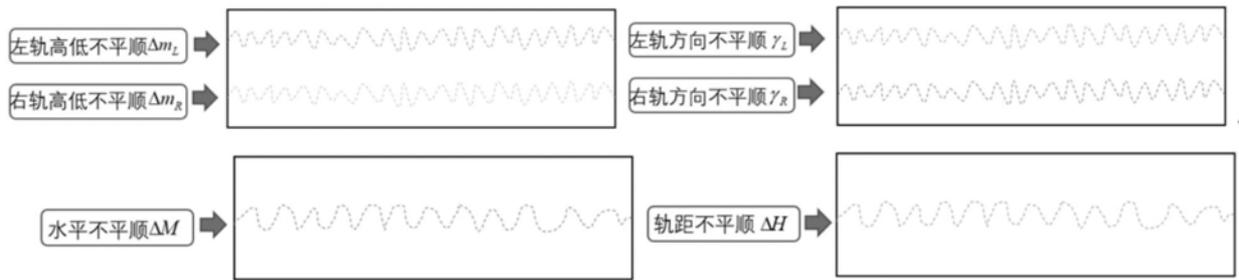


图13

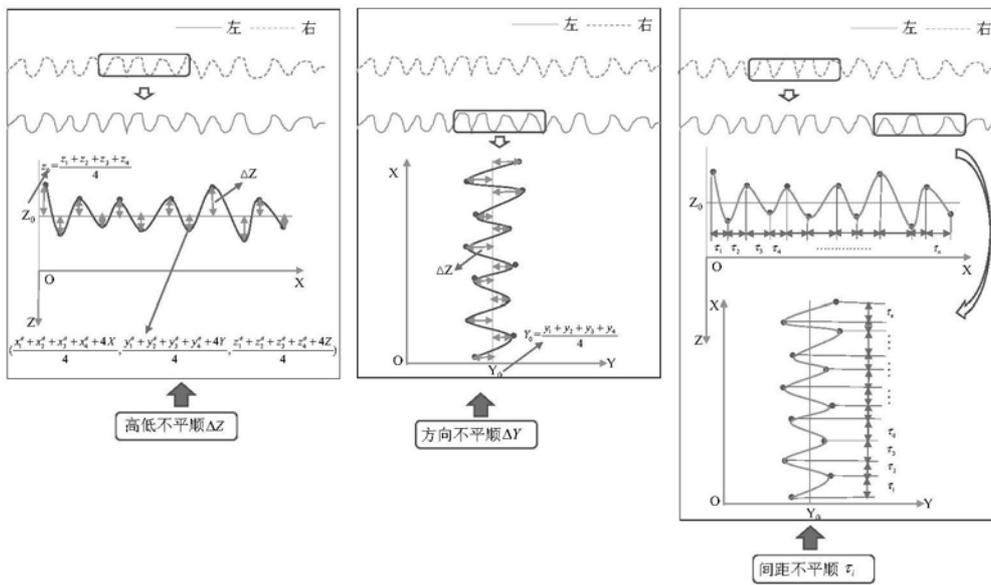


图14