



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109359340 B

(45) 授权公告日 2021. 04. 09

(21) 申请号 201811083944.4  
 (22) 申请日 2018.09.18  
 (65) 同一申请的已公布的文献号  
 申请公布号 CN 109359340 A  
 (43) 申请公布日 2019.02.19  
 (73) 专利权人 中国科学院力学研究所  
 地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号  
 专利权人 中车青岛四方机车车辆股份有限公司  
 (72) 发明人 黄国君 杨国伟  
 (74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
 事务所(普通合伙) 11390  
 代理人 胡剑辉

(51) Int.Cl.  
 G06F 30/15 (2020.01)  
 G06F 119/14 (2020.01)  
 (56) 对比文件  
 CN 104133933 A, 2014.11.05  
 CN 106441794 A, 2017.02.22  
 刘玉标 等. 定常横风作用下高速列车的安全性分析.《科学技术与工程》.2014,第75-81页.  
 宋军浩 等. 高速列车隧道通过中的气动效应动模型实验研究.《实验流体力学》.2017,第39-45页.  
 审查员 夏守璐

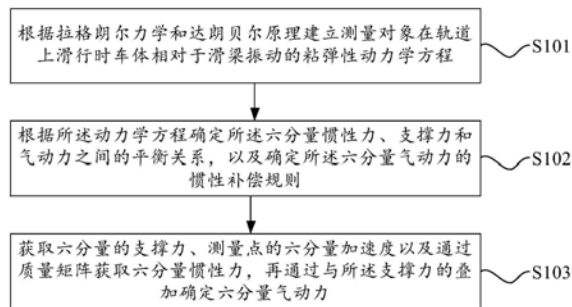
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

高速列车动模型六分量气动力的测量方法及装置

(57) 摘要

本发明实施例涉及一种高速列车动模型六分量气动力的测量方法及装置,所述方法包括:根据拉格朗日力学和达朗贝尔原理建立建测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程,其中,所述测量对象包括:高速列车动模型和双扩展天平组成的测量结构系统安装于牵引滑梁,所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标;根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力,可以在动模型实验中对高速列车动模型六分量气动力的测量。



1. 一种高速列车模型六分量气动力的测量方法,其特征在于,包括:

根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程,其中,所述测量对象包括:高速列车动模型和双扩展天平组成的测量结构系统安装于牵引滑梁,所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标;

根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;

获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力;

其中,根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的动态特性之一:质量矩阵;

所述质量矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$\text{其中, } \begin{aligned} M_{ij}^{uu} &= m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} &= m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} &= -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} &= m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{aligned}$$

$m$ 为系统的质量; $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量, $a_k a_k$ 为测点与系统质心之间距离的平方; $J_{ij}$ 为 $3 \times 3$ 阶对称系统惯性矩张量; $\delta_{ij}$ 为单位张量; $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的另一动态特性:刚度矩阵 $K$ ;

所述刚度矩阵 $K$ 为:

$$K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c$$

其中, $K^{(1)}$ 和 $K^{(2)}$ 为两个扩展天平的刚度矩阵, $K_c$ 为采用双天平支撑的附加交叉刚度矩阵。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述六分量加速度包括:三个平动线加速度和三个转动角加速度。

4. 根据权利要求3所述的方法,其特征在于,所述方法还包括:

根据所述三个平动线加速度和三个转动角加速度对六分量气动力进行补偿;

通过FFT低频滤波或小波分析分离轨道高频振动对六分量气动力测量的影响。

5. 一种高速列车动模型六分量气动力的测量装置,其特征在于,包括:

构建模块,用于根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程,其中,所述测量对象包括:高速列车动模型和双扩展天平组成的测量结构系统安装于牵引滑梁,所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标;

确定模块,用于根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;

获取模块,用于获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力;

所述确定模块,还用于根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的动态特性之一:质量矩阵;

所述质量矩阵为:

$$M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$\text{其中, } \begin{aligned} M_{ij}^{uu} &= m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} &= m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} &= -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} &= m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{aligned}$$

$m$ 为系统的质量; $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量, $a_k a_k$ 测点与系统质心之间其距离的平方; $J_{ij}$ 为 $3 \times 3$ 阶对称系统惯性矩张量; $\delta_{ij}$ 为单位张量; $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量。

6. 根据权利要求5所述的装置,其特征在于,所述确定模块,还用于根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的刚度矩阵 $K$ ;

所述刚度矩阵 $K$ 为:

$$K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c$$

其中, $K^{(1)}$ 和 $K^{(2)}$ 为两个扩展天平的刚度矩阵, $K_c$ 为采用双天平支撑的附加交叉刚度矩阵。

7. 根据权利要求5所述的装置,其特征在于,所述六分量加速度包括:三个平动加速度和三个转动角加速度。

8. 根据权利要求7所述的装置,其特征在于,所述装置还包括:

补偿及滤波模块,用于根据所述三个平动加速度对六分量稳态气动力进行补偿;通过FFT低频滤波或小波分析分离高频轨道振动对六分量气动力测量的影响。

## 高速列车动模型六分量气动力的测量方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明实施例涉及列车模拟测量技术领域,尤其涉及一种高速列车动模型六分量气动力的测量方法及装置。

### 背景技术

[0002] 当车速大于300km/h时,高速列车的气动阻力占总阻力的比例可超过85%。作为高速列车最重要的环境载荷之一,6分量气动(总)力包括各方向平动气动力及力矩是高速列车气动设计的最重要参数。高速列车气动特性的动模型实验与静模型实验(风洞实验)相比,不仅可以模拟列车与空气和地面相对运动的稳态过程,而且可以模拟列车与隧道、列车交会等结构相对运动的瞬态过程,更为接近实际工况。

[0003] 然而,现有技术中,在动模型实验中缺少高速动模型气动力测量的相关技术方案。

### 发明内容

[0004] 本发明实施例提供一种高速列车动模型六分量气动力的测量方法及装置,可以实现在动模型实验中对高速动模型六分量气动力的测量。

[0005] 第一方面,本发明实施例提供一种高速列车模型六分量气动力的测量方法,包括:

[0006] 根据拉格朗日力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程,其中,所述测量对象包括:高速列车动模型和双扩展天平组成的测量结构系统安装于牵引滑梁,所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标;

[0007] 根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;

[0008] 获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力。

[0009] 在一个可能的实施方式中所述方法还包括:

[0010] 根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的动态特性之一:质量矩阵;

[0011] 所述质量矩阵M为6×6阶对称矩阵,可分解为:

$$[0012] \quad M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0013] \quad \text{其中,} \quad \begin{aligned} M_{ij}^{uu} &= m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} &= m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} &= -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} &= m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{aligned} \quad (i, j, k = 1, 3)$$

[0014] m为系统的质量; $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量, $a_k a_k$ 为其距离的平方(满足矢量求和约定); $J_{ij}$ 为3×3阶对称系统惯性矩张量; $\delta_{ij}$ 为单位张量; $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量

[0015] 在一个可能的实施方式中,所述方法还包括:

[0016] 根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的刚度矩阵K;

[0017] 所述刚度矩阵K为6×6阶对称刚度矩阵：

$$[0018] \quad K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c$$

[0019] 其中， $K^{(1)}$ 和 $K^{(2)}$ 为两个扩展天平的6×6阶对称刚度矩阵； $K_c$ 为采用双天平支撑的附加交叉6×6阶对称刚度矩阵，如果取箱梁的中心点为测点M，即 $l_1 = l_2 = 1$ ，当两个扩展天平具有相同的弹簧刚度： $K^{(1)} = K^{(2)} = K^{(0)}$ ，并且 $l$ 远大于箱梁高度 $h$ 时， $K_c$ 的非零分量为：

$$[0020] \quad K_{c44} = 2l^2 k_{33}^{(0)} \quad K_{c46} = K_{c64} = -2l^2 k_{13}^{(0)} \quad K_{c66} = 2l^2 k_{11}^{(0)}$$

[0021] 式中 $k_{11}^{(0)}$ 、 $k_{33}^{(0)}$ 、 $k_{13}^{(0)}$ 为扩展天平弹簧刚度 $K^{(0)}$ 的对应分量。

[0022] 在一个可能的实施方式中，所述方法还包括：

[0023] 根据所述三个平动线加速度和三个转动角加速度对六分量气动力进行惯性补偿；

[0024] 通过FFT低频滤波或小波分析分离高频轨道振动对六分量气动力测量的影响。

[0025] 第二方面，本发明实施例提供一种高速列车动模型六分量气动力的测量装置，包括：

[0026] 构建模块，用于根据拉格朗日力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程，其中，所述测量对象包括：高速列车动模型和双扩展天平组成的测量结构系统安装于牵引滑梁，所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标；

[0027] 确定模块，用于根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系，以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则；

[0028] 获取模块，用于获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力，再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力。

[0029] 在一个可能的实施方式中，所述确定模块，还用于根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的动态特性之一：质量矩阵；

[0030] 所述质量矩阵M为6×6阶对称矩阵，可分解为：

$$[0031] \quad M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0032] \quad \text{其中，} \begin{cases} M_{ij}^{uu} = m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} = m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} = -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} = m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{cases} \quad (i, j, k = 1, 3)$$

[0033]  $m$ 为系统的质量； $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量， $a_k a_k$ 为其距离的平方（满足矢量求和约定）； $J_{ij}$ 为3×3阶对称系统惯性矩张量； $\delta_{ij}$ 为单位张量； $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量。

[0034] 在一个可能的实施方式中，所述确定模块，还用于根据动力学方程的建立过程确定动车模振子的刚度矩阵K；

[0035] 所述刚度矩阵K为6×6阶对称矩阵：

$$[0036] \quad K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c$$

[0037] 其中， $K^{(1)}$ 和 $K^{(2)}$ 为两个扩展天平的6×6阶对称刚度矩阵； $K_c$ 为采用双天平支撑的附加交叉6×6阶对称刚度矩阵，如果取箱梁的中心点为测点M，即 $l_1 = l_2 = 1$ ，当两个扩展天平具有相同的弹簧刚度： $K^{(1)} = K^{(2)} = K^{(0)}$ ，并且 $l$ 远大于箱梁高度 $h$ 时， $K_c$ 的非零分量为：

$$[0038] \quad K_{c44} = 2l^2 k_{33}^{(0)} \quad K_{c46} = K_{c64} = -2l^2 k_{13}^{(0)} \quad K_{c66} = 2l^2 k_{11}^{(0)}$$

[0039] 式中  $k_{11}^{(0)}$ 、 $k_{33}^{(0)}$ 、 $k_{13}^{(0)}$  为扩展天平弹簧刚度  $K^{(0)}$  的对应分量。

[0040] 在一个可能的实施方式中,所述六分量加速度包括:三个平动加速度和三个角加速度。

[0041] 在一个可能的实施方式中,所述装置还包括:

[0042] 补偿和滤波模块,用于根据所述三个平动加速度和三个转动角加速度对六分量气动力进行惯性补偿;通过FFT低频滤波或小波分析分离高频轨道振动对六分量气动力测量的影响。

[0043] 本发明实施例提供的高速列车动模型六分量气动力的测量方案,根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程;根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力,可以实现在动模型实验中对高速动模型六分量气动力的测量。

#### 附图说明

[0044] 图1为本发明实施提供一种高速列车动模型六分量气动力的测量方法的流程示意图;

[0045] 图2为本发明实施提供一种高速列车动模型六分量气动力测量的应用场景图;

[0046] 图3为本发明实施提供一种高速列车动模型六分量气动力的测量装置结构示意图。

#### 具体实施方式

[0047] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0048] 为便于对本发明实施例的理解,下面将结合附图以具体实施例做进一步的解释说明,实施例并不构成对本发明实施例的限定。

[0049] 图1为本发明实施提供一种高速列车动模型六分量气动力测量方法的流程示意图,如图1所示,该方法包括:

[0050] S101、根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程。

[0051] 图2为本发明实施提供一种高速列车模型六分量气动力测量的应用场景图,所述测量对象包括:动模型和双扩展天平组成的测量结构安装于牵引滑梁,牵引滑梁沿着轨道滑行,同时存在一定的轨道不平顺等引起的振动,因此动模型测量结构体系构成一个在轨道上移动的刚体振子。 $X$ 、 $Y$ 和 $Z$ 直角坐标系分别为固定的实验室直角坐标系、牵引滑块中某一参考点 $R$ 为原点的牵引滑梁刚体直角坐标系以及以车模中某一测点 $M$ 为原点的车模刚体

直角坐标系。假设牵引滑梁和车模的振动为小幅振动(几何线性),根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理,可得到车体相对于滑梁的粘弹性振动的动力学方程:

$$[0052] \quad M \cdot (\ddot{X}_M - \ddot{X}_R) + C \cdot (\dot{X}_M - \dot{X}_R) + K \cdot (X_M - X_R) = -M \cdot \ddot{X}_R + f_a(X_M, \dot{X}_M, \ddot{X}_M, \dots) \quad (1)$$

[0053] 由上式可得:

$$[0054] \quad M \cdot \ddot{X}_M + F_{sM} = f_a(X_M, \dot{X}_M, \ddot{X}_M, \dots) \quad (2)$$

$$[0055] \quad F_{sM} = C \cdot (\dot{X}_M - \dot{X}_R) + K \cdot (X_M - X_R) \quad (3)$$

[0056] 其中,  $F_{sM}$  为M点的合成支撑力6分量向量,由两个6分力测力传感器测得的各分力求合力并向M点取矩得到:

$$[0057] \quad F_{sM} = \begin{pmatrix} F_{sZ1}^{(1)} + F_{sZ1}^{(2)} \\ F_{sZ2}^{(1)} + F_{sZ2}^{(2)} \\ F_{sZ3}^{(1)} + F_{sZ3}^{(2)} \\ M_{sZ1}^{(1)} + M_{sZ1}^{(2)} + F_{sZ3}^{(1)}l_1 - F_{sZ3}^{(2)}l_2 + F_{sZ2}^{(1)}h_1 + F_{sZ2}^{(2)}h_2 \\ M_{sZ2}^{(1)} + M_{sZ2}^{(2)} - F_{sZ1}^{(1)}h_1 - F_{sZ1}^{(2)}h_2 \\ M_{sZ3}^{(1)} + M_{sZ3}^{(2)} - F_{sZ1}^{(1)}l_1 + F_{sZ1}^{(2)}l_2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

[0058] 式中:  $F_{sZj}^{(i)}$  为第i个扩展天平测得的第j个支撑力或支撑力矩分量(车模坐标系统);  $l_1$ 和 $h_1$ 为第i个扩展天平中的传感器中心与支撑点M的水平和垂直间距(扩展天平与支撑点M皆位于箱梁顶的中线上)如图2所示。

[0059] S102、根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则。

[0060] 根据动力学方程的推导过程可同时确定车模振子的质量矩阵;

[0061] 所述质量矩阵M为6×6阶对称矩阵,可分解为:

$$[0062] \quad M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0063] \quad \text{其中,} \quad \begin{aligned} M_{ij}^{uu} &= m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} &= m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} &= -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} &= m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{aligned} \quad (i, j, k = 1, 3) \quad (5)$$

[0064]  $m$ 为系统的质量; $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量, $a_k a_k$ 为其距离的平方(满足矢量求和约定); $J_{ij}$ 为3×3阶对称系统惯性矩张量; $\delta_{ij}$ 为单位张量; $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量。

[0065] 可选地,在本实施例中还可以对质量矩阵进行标定,具体包括:

[0066] 质量矩阵中的 $m$ 可通过直接称重得到;也可与 $a_i$ 和 $J_{ij}$ 一起通过实验前的自由振动现场标定。此时牵引滑梁处于静止状态,只有动车模相对于牵引滑梁的小幅粘弹性振动,气动力可忽略不计,方程(2)只剩下支撑力和惯性力之间的平衡:

$$[0067] \quad M \times \ddot{X}_M + F_{sM} \approx 0 \quad (6)$$

[0068] 同步测量6分量的支撑力和6分量的加速度,由(4)式获得测点M的合成支撑力 $F_{sM}$ ,就可依据方程(5-6)反演出 $m$ 、 $a_i$ 和 $J_{ij}$ ,进而获得质量矩阵的全部分量。

[0069] 根据动力学方程的推导过程可同时确定车模振子的刚度矩阵K;

[0070] 所述刚度矩阵K为6×6阶对称矩阵:

$$[0071] \quad K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c \quad (7)$$

[0072] 其中,  $K^{(1)}$  和  $K^{(2)}$  为两个扩展天平的6×6阶对称刚度矩阵;  $K_c$  为采用双天平支撑的附加交叉6×6阶对称刚度矩阵:

$$[0073] \quad K_c = \sum_{n=1}^2 K_c^{(n)}$$

$$[0074] \quad K_c^{(n)} = \begin{pmatrix} K_{cij}^{(n)uu} & K_{cij}^{(n)u\theta} \\ K_{cij}^{(n)\theta u} & K_{cij}^{(n)\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$K_{cij}^{(n)uu} = 0$$

$$K_{cij}^{(n)u\theta} = K_{ip}^{(n)uu} \varepsilon_{jqp} a_q^{s(n)}$$

$$[0075] \quad K_{cij}^{(n)\theta u} = K_{cji}^{(n)u\theta} \quad (i, j, k, p, q, r = 1, 3) \quad (8)$$

$$K_{cij}^{(n)\theta\theta} = K_{pq}^{(n)uu} \varepsilon_{irp} \varepsilon_{jq} a_r^{s(n)} a_r^{s(n)} + K_{pj}^{(n)u\theta} \varepsilon_{irp} a_r^{s(n)} + K_{pi}^{(n)u\theta} \varepsilon_{jrp} a_r^{s(n)}$$

[0076] 其中  $a_i^{s(n)}$  为第n个支撑点相对于测点M的位置向量; 扩展天平刚度矩阵的分解:

$$[0077] \quad K^{(n)} = \begin{pmatrix} K_{ij}^{(n)uu} & K_{ij}^{(n)u\theta} \\ K_{ij}^{(n)\theta u} & K_{ij}^{(n)\theta\theta} \end{pmatrix} (i, j, k = 1, 3) \quad (9)$$

[0078] 如果取箱梁的中心点为测点M, 即  $l_1 = l_2 = 1$ , 当两个扩展天平具有相同的弹簧刚度:  $K^{(1)} = K^{(2)} = K^{(0)}$ , 并且  $l$  远大于箱梁高度  $h$  时,  $K_c$  的非零分量为:

$$[0079] \quad K_{c44} = 2l^2 k_{33}^{(0)} \quad K_{c46} = K_{c64} = -2l^2 k_{13}^{(0)} \quad K_{c66} = 2l^2 k_{11}^{(0)} \quad (10)$$

[0080] 式中  $k_{11}^{(0)}$ 、 $k_{33}^{(0)}$ 、 $k_{13}^{(0)}$  为扩展天平弹簧刚度  $K^{(0)}$  的对应分量。

[0081] S103、获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力, 再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力。

[0082] 根据所述三个平动加速度和三个角加速度对六分量气动力进行惯性补偿; 通过FFT低频滤波或小波分析分离高频轨道振动对六分量气动力测量的影

[0083] 本发明实施例提供的高速列车模型六分量气动力的测量方法, 根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程; 根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系, 以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则; 获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力, 再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力, 可以在动模型实验中对高速动模型六分量气动力的测量。

[0084] 图3为本发明实施提供一种高速列车动模型六分量气动力的测量装置的结构示意图, 如图3所示, 该装置具体包括:

[0085] 构建模块301, 用于根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原, 其中所述测量对象包括: 动模型和双扩展天平组成的测量结构安装于牵引滑梁, 所述动力学方程中包括参考点与测量点在坐标系中的六分量坐标;



[0086] 确定模块302,用于根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;

[0087] 获取模块303,用于获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力。

[0088] 可选地,所述确定模块302,还用于根据动力学方程的推导确定质量矩阵;

[0089] 所述质量矩阵M为6×6阶对称矩阵,可分解为:

$$[0090] \quad M = \begin{pmatrix} M_{ij}^{uu} & M_{ij}^{u\theta} \\ M_{ij}^{\theta u} & M_{ij}^{\theta\theta} \end{pmatrix}$$

$$[0091] \quad \text{其中,} \quad \begin{aligned} M_{ij}^{uu} &= m\delta_{ij}, & M_{ij}^{u\theta} &= m\varepsilon_{kij}a_k \\ M_{ij}^{\theta u} &= -M_{ij}^{u\theta}, & M_{ij}^{\theta\theta} &= m(a_k a_k \delta_{ij} - a_i a_j) + J_{ij} \end{aligned} \quad (i, j, k = 1, 3)$$

[0092] m为系统的质量; $a_i$ 为测点与系统质心之间的相对位置向量, $a_k a_k$ 为其距离的平方(满足矢量求和约定); $J_{ij}$ 为3×3阶对称系统惯性矩张量; $\delta_{ij}$ 为单位张量; $\varepsilon_{kij}$ 为顺序张量。

[0093] 可选地,所述确定模块302,还用于根据动力学方程的推导确定动车模振子的刚度矩阵K;

[0094] 所述刚度矩阵K为6×6阶对称矩阵:

$$[0095] \quad K = K^{(1)} + K^{(2)} + K_c$$

[0096] 其中, $K^{(1)}$ 和 $K^{(2)}$ 为两个扩展天平的6×6阶对称刚度矩阵; $K_c$ 为采用双天平支撑的附加交叉6×6阶对称刚度矩阵,如果取箱梁的中心点为测点M,即 $l_1 = l_2 = 1$ ,当两个扩展天平具有相同的弹簧刚度: $K^{(1)} = K^{(2)} = K^{(0)}$ ,并且1远大于箱梁高度h时, $K_c$ 的非零分量为:

$$[0097] \quad K_{c44} = 2l^2 k_{33}^{(0)} \quad K_{c46} = K_{c64} = -2l^2 k_{13}^{(0)} \quad K_{c66} = 2l^2 k_{11}^{(0)}$$

[0098] 式中 $k_{11}^{(0)}$ 、 $k_{33}^{(0)}$ 、 $k_{13}^{(0)}$ 为扩展天平弹簧刚度 $K^{(0)}$ 的对应分量。

[0099] 可选地,所述六分量加速度包括:三个平动加速度和三个角加速度。

[0100] 可选地,所述装置还包括:

[0101] 补偿和滤波模块304,用于根据所述三个平动加速度和三个角加速度对六分量气动力进行补偿;通过FFT低频滤波或小波分析对六分量气动力进行惯性补偿。

[0102] 本发明实施例提供的高速列车动模型六分量气动力的测量装置,根据拉格朗尔力学和达朗贝尔原理建立测量对象在轨道上滑行时车体相对于滑梁振动的粘弹性动力学方程;根据所述动力学方程确定所述六分量惯性力、支撑力和气动力之间的平衡关系,以及确定所述六分量气动力的惯性补偿规则;获取六分量的支撑力、测量点的六分量加速度以及通过质量矩阵获取六分量惯性力,再通过与所述支撑力的叠加确定六分量气动力,可以在动模型实验中对高速动模型六分量气动力的测量。

[0103] 专业人员应该还可以进一步意识到,结合本文中所公开的实施例描述的各示例的单元及算法步骤,能够以电子硬件、计算机软件或者二者的结合来实现,为了清楚地说明硬件和软件的可互换性,在上述说明中已经按照功能一般性地描述了各示例的组成及步骤。这些功能究竟以硬件还是软件方式来执行,取决于技术方案的特定应用和设计约束条件。专业技术人员可以对每个特定的应用来使用不同方法来实现所描述的功能,但是这种实现不应认为超出本发明的范围。

[0104] 以上所述的具体实施方式,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施方式而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

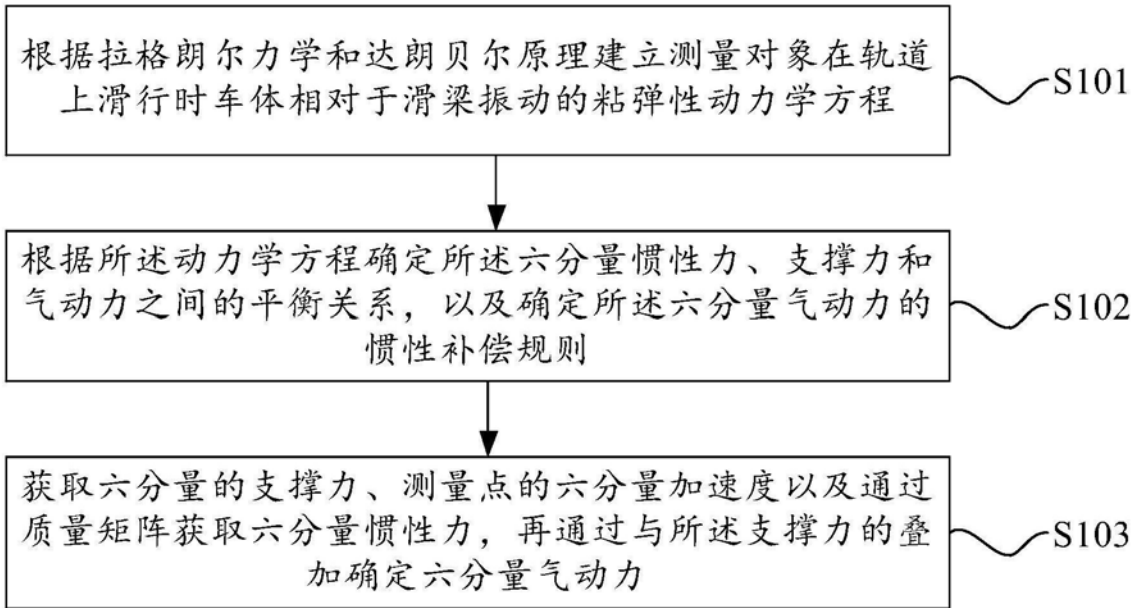


图1

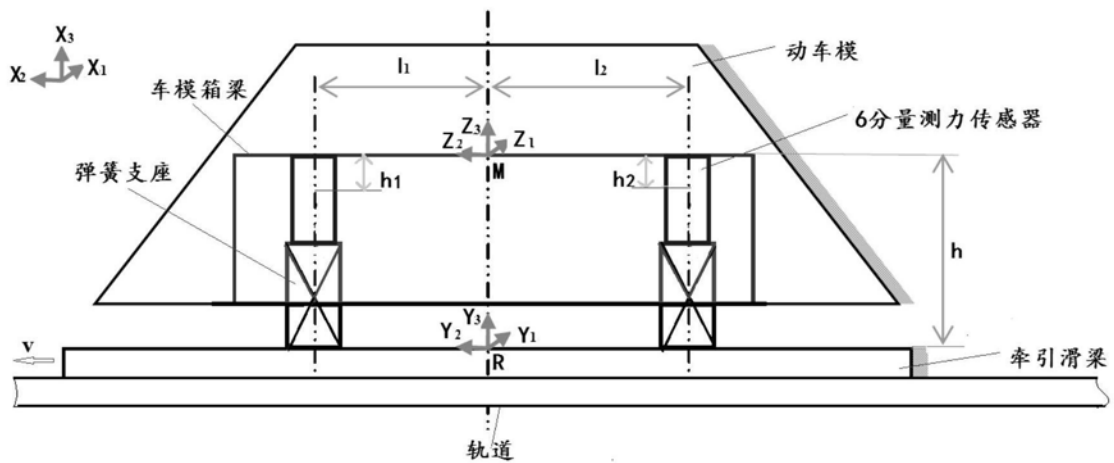


图2



图3