



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117828313 B

(45) 授权公告日 2024. 05. 28

(21) 申请号 202410246694.0

(22) 申请日 2024.03.05

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117828313 A

(43) 申请公布日 2024.04.05

(73) 专利权人 中车工业研究院(青岛)有限公司

地址 266000 山东省青岛市城阳区棘洪滩

街道动车小镇科技馆229房间

(72) 发明人 邱岳 杨则云 章潇慧 徐刚

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限公司

公司 11227

专利代理师 陈颖

(51) Int. Cl.

G06F 18/20 (2023.01)

G06F 17/11 (2006.01)

G06F 30/15 (2020.01)

G06F 119/16 (2020.01)

G06F 111/06 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 110795783 A, 2020.02.14

CN 116341270 A, 2023.06.27

KR 20140065692 A, 2014.05.30

US 2018188780 A1, 2018.07.05

CN 117171864 A, 2023.12.05

CN 106295028 A, 2017.01.04

CN 110442971 A, 2019.11.12

CN 113591302 A, 2021.11.02

WO 2023207977 A1, 2023.11.02

CN 117540590 A, 2024.02.09

CN 110737964 A, 2020.01.31

CN 106599364 A, 2017.04.26

CN 217769719 U, 2022.11.08

CN 112149239 A, 2020.12.29

CN 103559366 A, 2014.02.05

代路;林原胜;柳勇;白凡;吴君;杨铁军.复

杂边界条件板壳耦合结构振动分析.振动与冲

击.2018, (15), 全文.

潘天堂;宋敬滨;陶长利.客车车身结构的模

态分析.拖拉机与农用运输车.2008, (06), 全文.

(续)

审查员 祁亚楠

权利要求书5页 说明书30页 附图9页

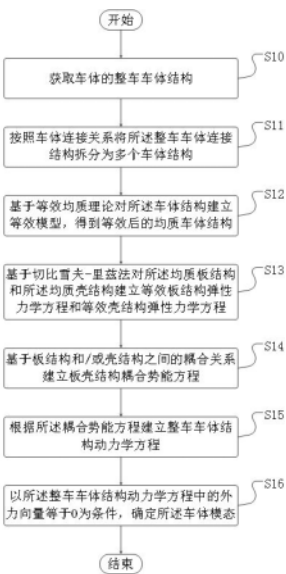
(54) 发明名称

一种确定车体模态的方法、装置、列车及介

质

(57) 摘要

本发明公开了一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质,涉及轨道交通技术领域。该方法通过将中空的整车车体结构拆分并等效为均质的结构,并对等效后的车体结构使用切比雪夫-里兹法建立方程,通过使用建立的等效板结构弹性力学方程、等效壳结构弹性力学方程、板壳结构耦合势能方程以及整车车体结构动力学方程,确定车体模态,此时避免了悬吊设备本身存在的振动,且将整车拆分同时避免了使用整车分析无法对车体进行精准的模态分析的问题。由此可知,本发明通过多个动力学方程的建立能够实现准确的确定车体模态。



[转续页]

[接上页]

(56) 对比文件

张无畏;胡腾飞;陈长胜;荣浩.箱桁组合梁铁路斜拉桥动力特性有限元建模方法研究.世界桥梁.2016, (02), 全文.

Silabhadra Das 等.Multi-modal Vibration Control of a Double Shell

Railway Car-Body Model using Passive Piezo-electric Shunt Circuit.《2019 12th Asian Control Conference 》.2019,全文.

杨世均.高速列车车体铝型材板SEA参数研究.《中国优秀硕士学位论文全文数据库 (信息科技辑)》.2021,全文.

1. 一种确定车体模态的方法,其特征在于,包括:

获取车体的整车车体结构;

按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构,其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构,其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态;

在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移;

对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵;

根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度;

其中,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括:

基于剪切变形理论,确定所述均质板结构的应变势能和动能;

根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程;

其中,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括:

基于弹性理论,确定所述均质壳结构的应变势能和动能,其中,所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量;

根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程;

其中,在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程之后,在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前,还包括:

获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能;

基于能量叠加原理,根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函;

其中,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态包括:

以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

2. 根据权利要求1所述的确定车体模态的方法,其特征在于,根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数包括:

利用遗传算法确定所述均质车体结构的材料参数数学模型;

确定所述弹性模量的取值范围和所述泊松比的取值范围;

选取所述遗传算法对应的配置参数,其中,所述配置参数至少包括群体规模、迭代次数、交叉概率、变异概率;

选取所述自由振动方程中含有所述弹性模量、所述泊松比、所述密度的方程作为目标函数;

以所述弹性模量的取值范围、所述泊松比的取值范围、所述目标函数为条件,按照所述迭代次数进行迭代;

获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数。

3. 根据权利要求2所述的确定车体模态的方法,其特征在于,在获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数之后,还包括:

按照所述材料参数对所述均质车体结构进行自由模态分析;

获取所述均质车体结构对应的等效分析数据;

基于所述分析数据和所述等效分析数据,以相同的载荷和阶数为条件,获取所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率;

根据所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率确定对应的频率误差;

判断所述频率误差是否处于预设范围内;

若是,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型正确;

若否,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型错误。

4. 根据权利要求1所述的确定车体模态的方法,其特征在于,当所述均质车体结构为所述均质板结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质板结构;

基于小变形假设确定所述目标均质板结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

基于线弹性理论模型对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;

根据所述偏导值确定所述目标均质板结构的应变;

基于广义虎克定律,根据所述目标均质板结构的应变构建所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程;

对所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程中的应力沿所述目标均质板结构的厚度方向进行积分,并得到所述目标均质板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

5. 根据权利要求1所述的确定车体模态的方法,其特征在于,当所述均质车体结构为所述均质壳结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质壳结构;

基于小变形假设确定所述目标均质壳结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

基于线弹性理论模型,对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;

根据所述偏导值确定所述目标均质壳结构的应变;

基于广义虎克定律,根据所述目标均质壳结构的应变构建所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程;

根据所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程确定所述目标均质壳结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

6. 根据权利要求4或5所述的确定车体模态的方法,其特征在于,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

基于分离变量法对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式解耦;

基于切比雪夫-里兹法对解耦后的所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式进行切比雪夫展开,得到切比雪夫级数向量;

根据傅里叶余弦级数向量和所述切比雪夫-里兹法的辅助函数构建所述均质车体结构对应的位移容许函数。

7. 根据权利要求1所述的确定车体模态的方法,其特征在于,还包括:

对所述整车车体结构进行有限元法分析,得到有限元法对应的振动频率;

采集对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率;

判断所述有限元法对应的振动频率与所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率之间的频率误差是否处于预设范围内;

若是,则确定对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述车体模态正确。

8. 一种确定车体模态的装置,其特征在于,包括:

第一获取模块,用于获取车体的整车车体结构;

拆分模块,用于按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构,其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

第一建立模块,用于基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构,其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

第二建立模块,用于基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

第三建立模块,用于基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

第四建立模块,用于根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

第一确定模块,用于以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态;

其中,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

第一有限元分析模块,用于对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

第一采集模块,用于采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

第一选取模块,用于在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移;

归一化模块,用于对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵;

第二确定模块,用于根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度;

其中,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括:

第十四确定模块,用于基于剪切变形理论,确定所述均质板结构的应变势能和动能;

第十五确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

第七建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程;

其中,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括:

第十六确定模块,用于基于弹性理论,确定所述均质壳结构的应变势能和动能,其中,所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量;

第十七确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

第八建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程;

其中,在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程之后,在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前,还包括:

第五获取模块,用于获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能;

第四构建模块,用于基于能量叠加原理,根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函;

其中,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态包括:

能量变分极值模块,用于以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

9.一种列车,其特征在于,包括:

存储器,用于存储计算机程序;

处理器,用于执行所述计算机程序时实现如权利要求1至7任意一项所述的确定车体模态的方法的步骤。

10.一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质上存储有计算机程序,所述计算机程序被处理器执行时实现如权利要求1至7任意一项所述的确定车体模态的方法的步骤。

一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质

技术领域

[0001] 本发明涉及轨道交通技术领域,特别是涉及一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质。

背景技术

[0002] 轨道列车运行过程中,铁轨作用力与列车的载重密切相关,在列车处于重负载的情况下,列车车轮和铁轨之间存在强烈的冲击动载荷,列车在经过轻量化设计后,车体底部的刚度降低,由于车身结构以及载荷的特殊性,使得车体底部出现大频率的垂向弹性形变,引起振动加速度增大,同时使得车体的振动加速度频率复杂化,导致高频振动成分突出,使得车体结构出现局部振动。现有的确定车体模态的方法为:通过悬吊设备将车体悬挂,或将车体视为一个整体进行模态分析,然而悬吊设备在悬吊车体的过程中本身就会存在一定的振动,且整车分析也无法对车体进行精准的模态分析。

[0003] 鉴于上述存在的问题,寻求如何准确的确定车体模态是本领域技术人员竭力解决的问题。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质,用于解决在使用悬吊设备悬吊车体的过程中车体本身会存在一定的振动,且整车分析也无法对车体进行精准的模态分析的问题。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供一种确定车体模态的方法,包括:

[0006] 获取车体的整车车体结构;

[0007] 按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构,其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

[0008] 基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构,其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

[0009] 基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

[0010] 基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

[0011] 根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

[0012] 以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态。

[0013] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0014] 对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

[0015] 采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

- [0016] 在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移；
- [0017] 对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵；
- [0018] 根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度。
- [0019] 另一方面,根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数包括:
- [0020] 利用遗传算法确定所述均质车体结构的材料参数数学模型;
- [0021] 确定所述弹性模量的取值范围和所述泊松比的取值范围;
- [0022] 选取所述遗传算法对应的配置参数,其中,所述配置参数至少包括群体规模、迭代次数、交叉概率、变异概率;
- [0023] 选取所述自由振动方程中含有所述弹性模量、所述泊松比、所述密度的方程作为目标函数;
- [0024] 以所述弹性模量的取值范围、所述泊松比的取值范围、所述目标函数为条件,按照所述迭代次数进行迭代;
- [0025] 获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数。
- [0026] 另一方面,在获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数之后,还包括:
- [0027] 按照所述材料参数对所述均质车体结构进行自由模态分析;
- [0028] 获取所述均质车体结构对应的等效分析数据;
- [0029] 基于所述分析数据和所述等效分析数据,以相同的载荷和阶数为条件,获取所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率;
- [0030] 根据所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率确定对应的频率误差;
- [0031] 判断所述频率误差是否处于预设范围内;
- [0032] 若是,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型正确;
- [0033] 若否,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型错误。
- [0034] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质板结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:
- [0035] 基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;
- [0036] 在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质板结构;
- [0037] 基于小变形假设确定所述目标均质板结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;
- [0038] 基于线弹性理论模型对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;
- [0039] 根据所述偏导值确定所述目标均质板结构的应变;
- [0040] 基于广义虎克定律,根据所述目标均质板结构的应变构建所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程;
- [0041] 对所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程中的应力沿所述目标均质板结

构的厚度方向进行积分,并得到所述目标均质板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0042] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质壳结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0043] 基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

[0044] 在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质壳结构;

[0045] 基于小变形假设确定所述目标均质壳结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

[0046] 基于线弹性理论模型,对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;

[0047] 根据所述偏导值确定所述目标均质壳结构的应变;

[0048] 基于广义虎克定律,根据所述目标均质壳结构的应变构建所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程;

[0049] 根据所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程确定所述目标均质壳结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0050] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0051] 基于分离变量法对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式解耦;

[0052] 基于切比雪夫-里兹法对解耦后的所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式进行傅里叶展开,得到傅里叶余弦级数向量;

[0053] 根据傅里叶余弦级数向量和所述切比雪夫-里兹法的辅助函数构建所述均质车体结构对应的位移容许函数。

[0054] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括:

[0055] 基于剪切变形理论,确定所述均质板结构的应变势能和动能;

[0056] 根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

[0057] 根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程。

[0058] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括:

[0059] 基于弹性理论,确定所述均质壳结构的应变势能和动能,其中,所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量;

[0060] 根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

[0061] 根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程。

[0062] 另一方面,在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程之后,在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前,还包括:

[0063] 获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能;

[0064] 基于能量叠加原理,根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均

质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函。

[0065] 另一方面,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态包括:

[0066] 以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

[0067] 另一方面,还包括:

[0068] 对所述整车车体结构进行有限元法分析,得到有限元法对应的振动频率;

[0069] 采集对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率;

[0070] 判断所述有限元法对应的振动频率与所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率之间的频率误差是否处于预设范围内;

[0071] 若是,则确定对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述车体模态正确。

[0072] 为解决上述技术问题,本发明还提供了一种确定车体模态的装置,包括:

[0073] 第一获取模块,用于获取车体的整车车体结构;

[0074] 拆分模块,用于按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构,其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

[0075] 第一建立模块,用于基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构,其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

[0076] 第二建立模块,用于基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

[0077] 第三建立模块,用于基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

[0078] 第四建立模块,用于根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

[0079] 第一确定模块,用于以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态。

[0080] 此外,该装置还包括以下模块:

[0081] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0082] 第一有限元分析模块,用于对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

[0083] 第一采集模块,用于采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

[0084] 第一选取模块,用于在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移;

[0085] 归一化模块,用于对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵;

[0086] 第二确定模块,用于根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度。

[0087] 另一方面,根据所述位移矩阵和所述均质车体结构动力学方程确定均质车体结构

的材料参数包括：

[0088] 第三确定模块,用于利用遗传算法确定所述均质车体结构的材料参数数学模型;

[0089] 第四确定模块,用于确定所述弹性模量的取值范围和所述泊松比的取值范围;

[0090] 第二选取模块,用于选取所述遗传算法对应的配置参数,其中,所述配置参数至少包括群体规模、迭代次数、交叉概率、变异概率;

[0091] 第三选取模块,用于选取所述自由振动方程中含有所述弹性模量、所述泊松比、所述密度的方程作为目标函数;

[0092] 迭代模块,用于以所述弹性模量的取值范围、所述泊松比的取值范围、所述目标函数为条件,按照所述迭代次数进行迭代;

[0093] 第二获取模块,用于获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数。

[0094] 另一方面,在获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数之后,还包括:

[0095] 自由模态分析模块,用于按照所述材料参数对所述均质车体结构进行自由模态分析;

[0096] 第三获取模块,用于获取所述均质车体结构对应的等效分析数据;

[0097] 第四获取模块,用于基于所述分析数据和所述等效分析数据,以相同的载荷和阶数为条件,获取所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率;

[0098] 第五确定模块,用于根据所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率确定对应的频率误差;

[0099] 第一判断模块,用于判断所述频率误差是否处于预设范围内;

[0100] 若是,则触发第六确定模块,用于确定对所述车体结构建立的所述等效模型正确;

[0101] 若否,则触发第七确定模块,用于确定对所述车体结构建立的所述等效模型错误。

[0102] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质板结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0103] 第五建立模块,用于基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

[0104] 第八确定模块,用于在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质板结构;

[0105] 第九确定模块,用于基于小变形假设确定所述目标均质板结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

[0106] 第一偏导模块,用于基于线弹性理论模型对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;

[0107] 第十确定模块,用于根据所述偏导值确定所述目标均质板结构的应变;

[0108] 第一构建模块,用于基于广义虎克定律,根据所述目标均质板结构的应变构建所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程;

[0109] 第一得到模块,用于对所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程中的应力沿所述目标均质板结构的厚度方向进行积分,并得到所述目标均质板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0110] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质壳结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0111] 第六建立模块,用于基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

[0112] 第十一确定模块,用于在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质壳结构;

[0113] 第十二确定模块,用于基于小变形假设确定所述目标均质壳结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

[0114] 第二偏导模块,用于基于线弹性理论模型,对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值;

[0115] 第十三确定模块,用于根据所述偏导值确定所述目标均质壳结构的应变;

[0116] 第二构建模块,用于基于广义虎克定律,根据所述目标均质壳结构的应变构建所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程;

[0117] 第二得到模块,用于根据所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程确定所述目标均质壳结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0118] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0119] 解耦模块,用于基于分离变量法对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式解耦;

[0120] 傅里叶展开模块,用于基于切比雪夫-里兹法对解耦后的所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式进行傅里叶展开,得到傅里叶余弦级数向量;

[0121] 第三构建模块,用于根据傅里叶余弦级数向量和所述切比雪夫-里兹法的辅助函数构建所述均质车体结构对应的位移容许函数。

[0122] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括:

[0123] 第十四确定模块,用于基于剪切变形理论,确定所述均质板结构的应变势能和动能;

[0124] 第十五确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

[0125] 第七建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程。

[0126] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括:

[0127] 第十六确定模块,用于基于弹性理论,确定所述均质壳结构的应变势能和动能,其中,所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量;

[0128] 第十七确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能;

[0129] 第八建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程。

[0130] 另一方面,在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方

程之后,在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前,还包括:

[0131] 第五获取模块,用于获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能;

[0132] 第四构建模块,用于基于能量叠加原理,根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函。

[0133] 另一方面,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态包括:

[0134] 能量变分极值模块,用于以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

[0135] 另一方面,还包括:

[0136] 第二有限元分析模块,用于对所述整车车体结构进行有限元法分析,得到有限元法对应的振动频率;

[0137] 第二采集模块,用于采集对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率;

[0138] 第二判断模块,用于判断所述有限元法对应的振动频率与所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率之间的频率误差是否处于预设范围内;

[0139] 若是,则触发第十八确定模块,用于确定对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述车体模态正确。

[0140] 为解决上述技术问题,本发明还提供了一种列车,包括:

[0141] 存储器,用于存储计算机程序;

[0142] 处理器,用于执行计算机程序,实现确定车体模态的方法的步骤。

[0143] 为解决上述技术问题,本发明还提供了一种计算机可读存储介质,该计算机可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行时,实现上述全部确定车体模态的方法的步骤。

[0144] 本发明所提供的一种确定车体模态的方法,该方法通过将中空的整车车体结构拆分并等效为均质的结构,并对等效后的车体结构使用切比雪夫-里兹法建立方程,通过使用建立的等效板结构弹性力学方程、等效壳结构弹性力学方程、板壳结构耦合势能方程以及整车车体结构动力学方程,确定车体模态,此时避免了悬吊设备本身存在的振动,且将整车拆分同时避免了使用整车分析无法对车体进行精准的模态分析的问题。由此可知,本发明通过多个动力学方程的建立能够实现准确的确定车体模态。

[0145] 本发明还提供了一种确定车体模态的装置、列车及介质,效果同上。

附图说明

[0146] 为了更清楚地说明本发明实施例,下面将对实施例中所需要使用的附图做简单的介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0147] 图1为本发明实施例所提供的一种确定车体模态的方法流程图;

[0148] 图2为本发明实施例所提供的一种整车车体结构的示意图;

[0149] 图3为本发明实施例所提供的一种等效后的整车车体结构的横截面示意图;

- [0150] 图4为本发明实施例所提供的第一种均质板结构的耦合关系的示意图；
[0151] 图5为本发明实施例所提供的第二种均质板结构的耦合关系的示意图；
[0152] 图6为本发明实施例所提供的第一种均质壳结构的耦合关系的示意图；
[0153] 图7为本发明实施例所提供的第二种均质壳结构的耦合关系的示意图；
[0154] 图8为本发明实施例所提供的第三种均质壳结构的耦合关系的示意图；
[0155] 图9为本发明实施例所提供的一种确定车体模态的装置结构图；
[0156] 图10为本发明实施例所提供的一种列车的内部结构图。

具体实施方式

[0157] 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,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部实施例。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,都属于本发明保护范围。

[0158] 本发明的核心是提供一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质,其能够准确的确定车体模态。

[0159] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案,下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步的详细说明。

[0160] 高速列车在现代轨道运输体系中发挥着不可或缺的作用,在列车运行中,铁轨作用力与列车的载重密切相关,在列车处于重负载的情况下,轮轨之间存在强烈的冲击载荷,列车经过轻量化设计后,车体底部刚度会降低,而考虑到车身的结构以及某些载荷的特殊性,使得车体底部容易出现大频率的垂向弹性变形,此时振动加速度增大,同时使得车体的振动加速度频率成分复杂化,高频振动成分愈加突出,甚至出现车体结构局部或整体的振动,这样的振动对列车运行的安全性会产生不利影响。

[0161] 现存的确定车体模态的方法,大多通过悬吊设备吊挂车体结构,或是将列车车体视为一个整体确定车体模态,然而悬吊设备在悬吊车体的过程中本身就会存在一定的振动,且整车分析也无法对车体进行精准的模态分析。

[0162] 图1为本发明实施例所提供的一种确定车体模态的方法流程图,如图1所示,该确定车体模态的方法,包括:

[0163] S10:获取车体的整车车体结构;

[0164] S11:按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构;

[0165] 其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

[0166] S12:基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构;

[0167] 其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

[0168] 图2为本发明实施例所提供的一种整车车体结构的示意图,如图2所示,以一辆列车中间的一节列车的车厢为例,车体结构可以分为车底板、车体侧墙、车顶、外端墙四种类型,其中,需要说明的是,车体侧墙上一般均设置有玻璃,此时在车体侧墙上由于设置了材质与车体本身材料不同的玻璃,因此车体侧墙不是均质的材质;另外,车顶为弧形板;最后,车厢两端的外端墙为了保证乘客能够自由出入,需要在外端墙上预留乘客通过的孔洞,此

时外端墙也不是均质的材质;其中,车顶是由顶板以及圆弧壳组成的,因此,可以将车顶的圆弧壳部分归类为壳结构,将车底板、车体侧墙、车顶的顶板、外端墙归类为板结构。可以理解的是,有部分结构即使为板结构但在实际应用场景中需要将其归类为壳结构,因此,对于板结构以及壳结构的区分应当根据具体实施场景确定。

[0169] 可以理解的是,列车的整车车体结构的材质是中空挤压铝型材,且该材料以波纹夹心结构设置,此时,为了能够准确确定列车的模态,需要将列车的整车车体结构等效为质地均匀的材料;

[0170] 因此,在本实施例中,基于等效均质理论对拆分后的车体结构建立等效模型,图3为本发明实施例所提供的一种等效后的整车车体结构的横截面示意图,如图3所示,将实际场景下的波纹夹心结构的整车车体结构等效为均质车体结构,对应的,可以得到均质板结构和均质壳结构。

[0171] S13:基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

[0172] 其中,需要说明的是,切比雪夫-里兹法(Chebyshev-Ritz method)是一种数值逼近方法,常用于求解部分微分方程的近似解;

[0173] S14:基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

[0174] S15:根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

[0175] S16:以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定所述车体模态。

[0176] 在本实施例中,将中空的整车车体结构拆分并等效为均质的结构,并对等效后的车体结构使用切比雪夫-Ritz法建立方程,通过使用建立的等效板结构弹性力学方程、等效壳结构弹性力学方程、板壳结构耦合势能方程以及整车车体结构动力学方程,确定车体模态,此时避免了悬吊设备本身存在的振动,且将整车拆分同时避免了使用整车分析无法对车体进行精准的模态分析的问题。由此可知,本发明通过多个动力学方程的建立能够实现准确的确定车体模态。

[0177] 在一些实施例中,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-Ritz法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0178] 对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

[0179] 采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

[0180] 在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移;

[0181] 对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵;

[0182] 根据所述位移矩阵和所述均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度。

[0183] 在本实施例中,首先需要说明的是,对均质车体结构进行有限元分析时,是基于基尔霍夫理论实现的;

[0184] 且构建的均质车体结构对应的自由振动方程如下:

$$[0185] \quad [M] + [\ddot{X}] + [K][X] = 0;$$

[0186] 其中, $[M]$ 为质量矩阵, $[K]$ 为刚度矩阵, $[X]$ 为位移矩阵, $[\ddot{X}]$ 为第二阶固有模态下的节点位移矩阵;

[0187] 需要说明的是,第二阶固有模态下的节点位移矩阵是由第二阶固有模态下的节点位移构成的;

[0188] 可以理解的是,中空挤压铝型材的材料参数已知,可以对已知材料参数的中空挤压铝型材进行自由模态分析,此时能够得到中空挤压铝型材的车体结构的各阶振动频率和车体的固有模态;

[0189] 此时选取第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,并构成第二阶固有模态下的节点位移矩阵。

[0190] 另外,需要说明的是,当车体结构的材料参数已知时,通过自由振动方程即可得到车体结构的各阶振动频率和车体的固有模态,因此可通过逆向推导自由振动方程得到均质车体结构的材料参数,逆推原理如下:

[0191] 将均质车体结构的弹性模量 E , 泊松比 μ 和密度 ρ 作为未知量;

[0192] 将中空挤压铝型材进行自由模态分析并将分析数据导出,选取第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,形成第二阶固有模态下的节点位移矩阵;

[0193] 逆向推导自由振动方程,即可得到含有均质车体结构的材料参数的方程组。

[0194] 在上述实施例的基础上,根据所述位移矩阵和所述均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数包括:

[0195] 利用遗传算法确定所述均质车体结构的材料参数数学模型;

[0196] 确定所述弹性模量的取值范围和所述泊松比的取值范围;

[0197] 选取所述遗传算法对应的配置参数,其中,所述配置参数至少包括群体规模 N 、迭代次数 T 、交叉概率 Γ 、变异概率 Ψ ;

[0198] 选取所述自由振动方程中含有所述弹性模量、所述泊松比、所述密度的方程作为目标函数;

[0199] 以所述弹性模量的取值范围、所述泊松比的取值范围、所述目标函数为条件,按照所述迭代次数进行迭代;

[0200] 获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数。

[0201] 在本实施例中,均质车体结构的材料参数数学模型如下:

$$[0202] \quad GA = (C, E', P, N, \Phi, \Gamma, \Psi, T);$$

[0203] 其中, C 为个体编码方法, E' 为个体适应度评价函数, P 为初始种群, N 为群体规模, Φ 为选择算子, Γ 为交叉概率, Ψ 为变异概率, T 为迭代次数;

[0204] 明确需要被优化参数(弹性模量 E , 泊松比 μ), 并确定弹性模量 E 的取值范围为 $(10^{10}, 10^{11})$ 和泊松比 μ 的取值范围为 $(0, 0.5)$;

[0205] 确定遗传算法对应的配置参数,将群体规模 N 设定为 $N = 80$;迭代次数 T 设定为 $T = 120$;交叉概率 Γ 设定为 $\Gamma = 0.8$;变异概率 Ψ 设定为 $\Psi = 0.05$;

[0206] 将上述实施例,逆推自由振动方程时得到的含有弹性模量、泊松比、密度的方程作为目标函数,寻求最优的参数使得目标函数的多项式取得最小值,按照所述迭代次数 $T = 120$ 进行迭代,最终得到的均质车体结构的材料参数为:弹性模量 $E = 38MPa$,泊松比 $\mu = 0.32$ 和密度 $\rho = 740kg / m^3$ 。

[0207] 在上述实施例的基础上,在获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数之后,还包括:

[0208] 按照所述材料参数对所述均质车体结构进行自由模态分析;

[0209] 获取所述均质车体结构对应的等效分析数据;

[0210] 基于所述分析数据和所述等效分析数据,以相同的载荷和阶数为条件,获取所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率;

[0211] 根据所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率确定对应的频率误差;

[0212] 判断所述频率误差是否处于预设范围内;

[0213] 若是,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型正确;

[0214] 若否,则确定对所述车体结构建立的所述等效模型错误。

[0215] 在本实施例中,仅以5阶的振动频率为例,表1为振动频率数据对比表,如下述表1所示:

[0216] 表1 振动频率数据对比表

[0217]

阶数	整车车体结构的振动频率	均质车体结构的振动频率	频率误差
1	16.365	16.003	2.21%
2	47.008	47.341	0.71%
3	99.776	99.635	0.14%
4	174.56	179.44	2.80%
5	247.63	255.09	3.01%

[0218] 在本实施例中对于频率误差的预设范围不做限定,在本实施例中可以将频率误差的预设范围设置为5%,由此根据表1可知,从第一阶至第五阶,整车车体结构对应的振动频率和均质车体结构对应的振动频率之间的频率误差完全处于预设范围内,此时确定对车体结构建立的等效模型正确。

[0219] 在上述实施例的基础上,当所述均质车体结构为所述均质板结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-Ritz法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0220] 基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

[0221] 在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质板结构;

[0222] 基于小变形假设确定所述目标均质板结构的几何中面对于所述目标参照点的切

比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式；

[0223] 基于线弹性理论模型对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导，得到全部的偏导值；

[0224] 根据所述偏导值确定所述目标均质板结构的应变；

[0225] 基于广义虎克定律，根据所述目标均质板结构的应变构建所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程；

[0226] 对所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程中的应力沿所述目标均质板结构的厚度方向进行积分，并得到所述目标均质板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0227] 本实施例中建立的笛卡尔坐标系如图2所示，基于切比雪夫-Ritz法将车体结构分解为若干矩形薄板结构（均质板结构）和圆柱壳面板（均质壳结构），并采用耦合弹簧技术建立各相邻薄板间的耦合连接关系，结合一阶剪切变形理论进行车体结构的建模，其中具有玻璃的车体侧墙采用变材料法进行建模。

[0228] 整车车体结构位于全局坐标系 $O-xyz$ 中，设定车身长为 L ；车宽为 A ；圆弧形壳结构的半径为 R ；车体侧墙的高为 B ；此时车高为 $B+R$ ；

[0229] 将整车车体结构分解为 i 个矩形薄板结构和对应的 i 个圆柱壳面板，且各矩形薄板结构和圆柱壳面板之间采用耦合方式弹性连接。对于第 i 个矩形薄板结构建立局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ ，此时矩形薄板结构的几何尺寸分别为：长 L_i ，宽 B ，厚 H_i ；另外，还设定变量 u_i 、 v_i 、 w_i 分别表示矩形薄板结构上的任意一点在 x_i 、 y_i 、 z_i 方向上的位移；对应的，选取的目标参照点可以记为 s ；

[0230] 基于小变形假设确定目标均质板结构的几何中面对于目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式表达式如下：

[0231] $U^e = [U, V, W]^T$ ；

[0232] 其中， U^e 为位移， U 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 x 方向的位移， V 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 y 方向的位移， W 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 z 方向的位移；

[0233] 对应的，

$$[0234] \quad \begin{Bmatrix} u^i \\ v^i \\ w^i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_0^i(x^i, y^i, t) \\ v_0^i(x^i, y^i, t) \\ w_0^i(x^i, y^i, t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} z\varphi_x^i(x^i, y^i, t) \\ z\varphi_y^i(x^i, y^i, t) \\ 0 \end{Bmatrix};$$

[0235] 其中， u_0^i 为第 i 个矩形薄板结构的几何中面对于目标参照点 s 的 x 方向的位移， v_0^i 为第 i 个矩形薄板结构的几何中面对于目标参照点 s 的 y 方向的位移， w_0^i 为第 i 个矩形薄板结构的几何中面对于目标参照点 s 的 z 方向的位移， φ_x^i 为目标参照点 s 绕 x 轴的转角位移， φ_y^i 为目标参照点 s 绕 y 轴的转角位移， t 为时间变量；

[0236] 第 i 个矩形薄板结构的应变可表示为：

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{xx}^0 + z\kappa_{xx}$$

$$\varepsilon_{yy} = \varepsilon_{yy}^0 + z\kappa_{yy}$$

$$[0237] \quad \gamma_{xy} = \gamma_{xy}^0 + z\kappa_{xy};$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{xz}^0$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{yz}^0$$

$$[0238] \quad \text{其中, } \varepsilon_{xx}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial x}, \varepsilon_{yy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \kappa_{xx} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \kappa_{yy} = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}, \kappa_{xy} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x},$$

$$\gamma_{xz}^0 = \varphi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x}, \gamma_{yz}^0 = \varphi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y}, \gamma_{xy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial w_0}{\partial y};$$

[0239] 需要说明的是, ε_{xx} 、 ε_{yy} 表示第 i 个矩形薄板结构在 x 方向和 y 方向上的法向应变; γ_{xy} 、 γ_{xz} 、 γ_{yz} 表示第 i 个矩形薄板结构的法向剪切应变; κ_{xx} 、 κ_{yy} 、 κ_{xy} 表示第 i 个矩形薄板结构的法向弯曲应变; ε_{xx}^0 、 ε_{yy}^0 表示第 i 个矩形薄板结构中面在 x 方向和 y 方向上的法向应变; γ_{xz}^0 、 γ_{yz}^0 、 γ_{xy}^0 表示第 i 个矩形薄板结构中面的法向剪切应变;

[0240] 基于广义虎克定律, 得到目标均质板结构 (第 i 个矩形薄板结构) 对应的应力-应变本构方程如下:

$$[0241] \quad \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix};$$

[0242] 其中, σ_{xx} 、 σ_{yy} 表示第 i 个矩形薄板结构在 x 方向和 y 方向上的法向应力; τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{xz} 表示第 i 个矩形薄板结构的剪切应力; Q_{11} 、 Q_{12} 、 Q_{22} 、 Q_{66} 表示第 i 个矩形薄板结构的材料刚度系数, 此时材料刚度系数可以表示为 Q_{gr} , 其中, $g = r = 1, 2, 6$, 上述材料刚度系数可以通过弹性模量 E , 泊松比 μ 和密度 ρ 确定, 公式如下:

$$[0243] \quad Q_{11} = Q_{22} = \frac{E}{1 - \mu^2};$$

$$[0244] \quad Q_{12} = \frac{\mu E}{1 - \mu^2};$$

$$[0245] \quad Q_{66} = \frac{E}{2(1 + \mu)};$$

[0246] 通过以下公式得到第 i 个矩形薄板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力:

$$[0247] \quad \begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ Q_x \\ Q_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_s A_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \kappa_s A_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_{xx} \\ \kappa_{yy} \\ \kappa_{xy} \\ \gamma_{xz}^0 \\ \gamma_{yz}^0 \end{Bmatrix};$$

[0248] 其中, N_x 、 N_y 、 N_{xy} 表示第 i 个矩形薄板结构对应受到的面内力; M_x 、 M_y 、 M_{xy} 表示第 i 个矩形薄板结构对应受到的弯力矩; Q_x 、 Q_y 表示第 i 个矩形薄板结构对应受到的剪切力; A_{11} 、 A_{12} 、 A_{22} 、 A_{66} 表示第 i 个矩形薄板结构的拉伸刚度系数, 此时拉伸刚度系数可以表示为 A_{gr} , 其中, $g = r = 1, 2, 6$; D_{11} 、 D_{12} 、 D_{22} 、 D_{66} 表示第 i 个矩形薄板结构的弯曲刚度系数, 此时弯曲刚度系数可以表示为 D_{gr} , 其中, $g = r = 1, 2, 6$;

[0249] 且确定拉伸刚度系数和弯曲刚度系数的公式如下:

$$[0250] \quad A_{gr} = \int_{-h/2}^{h/2} Q_{gr} dz;$$

$$[0251] \quad D_{gr} = \int_{-h/2}^{h/2} z^2 Q_{gr} dz;$$

[0252] 其中, h 为第 i 个矩形薄板结构的厚度;

[0253] 对应的, 当所述均质车体结构为所述均质壳结构时, 在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后, 在基于切比雪夫-Ritz法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前, 还包括:

[0254] 基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系;

[0255] 在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质壳结构;

[0256] 基于小变形假设确定所述目标均质壳结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式;

[0257] 基于线弹性理论模型, 对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导, 得到全部的偏导值;

[0258] 根据所述偏导值确定所述目标均质壳结构的应变;

[0259] 基于广义虎克定律, 根据所述目标均质壳结构的应变构建所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程;

[0260] 根据所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程确定所述目标均质壳结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0261] 在本实施例中,对于第 i 个圆柱壳面板设定变量 u_c^i 、 v_c^i 、 w_c^i 分别表示圆柱壳面板上的任意一点在 x_i 、 y_i 、 z_i 方向上的位移;对应的,选取的目标参照点可以记为 s ;

[0262] 基于小变形假设确定目标均质壳结构的几何中面对于目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式表达式如下:

$$[0263] \quad U^e = [U, V, W]^T;$$

[0264] 其中, U^e 为位移, U 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 x 方向的位移, V 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 y 方向的位移, W 为局部坐标系 $O-x_i y_i z_i$ 上 z 方向的位移;

[0265] 对应的,

$$[0266] \quad \begin{Bmatrix} u_c^i(x, \theta, z, t) \\ v_c^i(x, \theta, z, t) \\ w_c^i(x, \theta, z, t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{c0}^i(x, \theta, t) \\ v_{c0}^i(x, \theta, t) \\ w_{c0}^i(x, \theta, t) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} z\varphi_x^i(x, \theta, t) \\ z\varphi_\theta^i(x, \theta, t) \\ 0 \end{Bmatrix};$$

[0267] 其中, $u_{c0}^i(x, \theta, t)$ 为第 i 个圆柱壳面板的几何中面对于目标参照点 s 的 x 方向的位移, $v_{c0}^i(x, \theta, t)$ 为第 i 个圆柱壳面板的几何中面对于目标参照点 s 的 θ 方向的位移, $w_{c0}^i(x, \theta, t)$ 为第 i 个圆柱壳面板的几何中面对于目标参照点 s 的 z 方向的位移, $\varphi_x^i(x, \theta, t)$ 为目标参照点 s 沿 θz 平面的转角位移, $\varphi_\theta^i(x, \theta, t)$ 为目标参照点 s 沿 xz 平面的转角位移;

[0268] 第 i 个圆柱壳面板的应变可表示为:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^0 + z\chi_x$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^0 + z\chi_\theta$$

$$[0269] \quad \gamma_{x\theta} = \gamma_{x\theta}^0 + z\chi_{x\theta};$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{xz}^0$$

$$\gamma_{\theta z} = \gamma_{\theta z}^0$$

$$[0270] \quad \text{其中, } \varepsilon_x^0 = \frac{\partial u_{c0}^i}{\partial x} + \frac{w_{c0}^i}{R}, \varepsilon_\theta^0 = \frac{1}{R} \frac{\partial v_{c0}^i}{\partial \theta} + \frac{w_{c0}^i}{R}, \gamma_{x\theta}^0 = \frac{\partial v_{c0}^i}{\partial x} + \frac{\partial u_{c0}^i}{R \partial \theta},$$

$$\chi_\theta = \frac{\partial \varphi_\theta^i}{R \partial \theta}, \chi_{x\theta} = \frac{\partial \varphi_\theta^i}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_x^i}{R \partial \theta}, \gamma_{xz}^0 = \frac{\partial w_{c0}^i}{\partial x} + \varphi_x^i, \gamma_{\theta z}^0 = -\frac{v_{c0}^i}{R} + \frac{\partial w_{c0}^i}{R \partial \theta} + \varphi_\theta^i;$$

[0271] 需要说明的是, ε_x 、 ε_θ 表示第 i 个圆柱壳面板在 x 方向和 θ 方向上的应变; $\gamma_{x\theta}$ 、

$\gamma_{xz}, \gamma_{\theta z}$ 表示第 i 个圆柱壳面板的法向剪切应变; $\varepsilon_x^0, \varepsilon_\theta^0, \gamma_{x\theta}^0, \gamma_{xz}^0, \gamma_{\theta z}^0$ 表示相对于几何中面的应变分量; $\chi_x, \chi_\theta, \chi_{x\theta}$ 表示相对于几何中面的曲率变化; $u_{c0}^i, v_{c0}^i, w_{c0}^i$ 表示第 i 个圆柱壳面板中面参考点沿 x 方向、 θ 方向、 z 方向的切比雪夫多项式;

[0272] 基于广义虎克定律得到的目标均质壳结构(第 i 个圆柱壳面板)对应的应力-应变本构方程,进而得到第 i 个圆柱壳面板对应受到的面内力、弯力矩、剪切力公式为:

$$[0273] \quad \begin{Bmatrix} N_x \\ N_\theta \\ N_{x\theta} \\ M_x \\ M_\theta \\ M_{x\theta} \\ Q_x \\ Q_\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{12} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_s A_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_s A_{66} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_\theta^0 \\ \gamma_{x\theta}^0 \\ \chi_x \\ \chi_\theta \\ \chi_{x\theta} \\ \gamma_{xz}^0 \\ \gamma_{\theta z}^0 \end{Bmatrix};$$

[0274] 其中, $N_x, N_\theta, N_{x\theta}$ 表示第 i 个圆柱壳面板对应受到的面内力; $M_x, M_\theta, M_{x\theta}$ 表示第 i 个圆柱壳面板对应受到的弯力矩; Q_x, Q_θ 表示第 i 个圆柱壳面板对应受到的剪切力; $A_{11}, A_{12}, A_{22}, A_{66}$ 表示第 i 个圆柱壳面板的拉伸刚度系数,此时拉伸刚度系数可以表示为 A_{gr} , 其中, $g = r = 1, 2, 6$; $D_{11}, D_{12}, D_{22}, D_{66}$ 表示第 i 个圆柱壳面板的弯曲刚度系数,此时弯曲刚度系数可以表示为 D_{gr} , 其中, $g = r = 1, 2, 6$;

[0275] 且确定拉伸刚度系数和弯曲刚度系数的公式如下:

$$[0276] \quad \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\mu^2} & \frac{\mu E}{1-\mu^2} & 0 \\ \frac{\mu E}{1-\mu^2} & \frac{E}{1-\mu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\mu)} \end{bmatrix} dz;$$

$$[0277] \quad \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\mu^2} & \frac{\mu E}{1-\mu^2} & 0 \\ \frac{\mu E}{1-\mu^2} & \frac{E}{1-\mu^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{E}{2(1+\mu)} \end{bmatrix} z^2 dz;$$

[0278] 在上述实施例的基础上,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-Ritz法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0279] 基于分离变量法对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式解耦;

[0280] 基于切比雪夫-Ritz法对解耦后的所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式进行傅里叶展开,得到傅里叶余弦级数向量;

[0281] 根据傅里叶余弦级数向量和所述切比雪夫-Ritz法的辅助函数构建所述均质车体结构对应的位移容许函数。

[0282] 在本实施例中,位移容许函数公式如下:

$$[0283] \quad q(x, y, t) = [\Phi(x, y), \Phi_c(x, y), \Phi_s(x, y)] [A_l^i] e^{j\omega t};$$

[0284] 其中, q 表示 u_0^i 、 v_0^i 、 w_0^i 、 φ_x^i 、 φ_y^i 等参数, j 为虚数单位, $\Phi_c(x, y)$ 和 $\Phi_s(x, y)$ 为由正弦函数与余弦函数乘积组成的函数向量; A_l^i 表示由位移系数组成的广义系数向量, 其中 l 表示 u 、 v 、 w 、 x 、 y 等参数; ω 为圆频率;

[0285] 对应的, 基于分离变量法对切比雪夫多项式和转角切比雪夫多项式解耦后得到以下公式:

$$[0286] \quad u_0^i(x, \beta, t) = [\Phi(x, \beta)] [A_u^i] e^{j\omega t};$$

$$[0287] \quad v_0^i(x, \beta, t) = [\Phi(x, \beta)] [A_v^i] e^{j\omega t};$$

$$[0288] \quad w_0^i(x, \beta, t) = [\Phi(x, \beta)] [A_w^i] e^{j\omega t};$$

$$[0289] \quad \varphi_x^i(x, \beta, t) = [\Phi(x, \beta)] [A_x^i] e^{j\omega t};$$

$$[0290] \quad \varphi_y^i(x, \beta, t) = [\Phi(x, \beta)] [A_y^i] e^{j\omega t};$$

$$[0291] \quad \text{其中, } \Phi(x, \beta) = \begin{bmatrix} 1, \mathcal{G}_1(x), \dots \\ \mathcal{G}_m(x), \dots \\ \mathcal{G}_{M'}(x) \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 1, \mathcal{G}_1(\beta), \dots \\ \mathcal{G}_n(\beta), \dots \\ \mathcal{G}_{N'}(\beta) \end{bmatrix};$$

[0292] 位移系数组成的广义系数向量表示如下:

$$[0293] \quad A_l = [A_l^f; A_l^c; A_l^s];$$

[0294] 其中, A_l^f 为第一广义系数向量; A_l^c 为第二广义系数向量; A_l^s 为第三广义系数向量;

$$[0295] \quad \text{其中, } A_l^f = \begin{bmatrix} A_{00}^{l,i}, \dots, A_{0n}^{l,i}, \dots, A_{0N'}^{l,i}, \dots, A_{m0}^{l,i}, \dots, A_{mn}^{l,i}, \dots \\ A_{mN'}^{l,i}, \dots, A_{M'0}^{l,i}, \dots, A_{M'n}^{l,i}, \dots, A_{M'N'}^{l,i} \end{bmatrix}^T;$$

$$[0296] \quad A_l^c = \begin{bmatrix} A_{10}^{l,c,i}, \dots, A_{1n}^{l,c,i}, \dots, A_{1N'}^{l,c,i}, \dots, A_{p0}^{l,c,i}, \dots, A_{pn}^{l,c,i}, \dots \\ A_{pN'}^{l,c,i}, \dots, A_{P0}^{l,c,i}, \dots, A_{Pn}^{l,c,i}, \dots, A_{PN'}^{l,c,i} \end{bmatrix}^T;$$

$$[0297] \quad A_l^s = \begin{bmatrix} A_{01}^{l,s,i}, \dots, A_{m1}^{l,s,i}, \dots, A_{M'1}^{l,s,i}, \dots, A_{0p}^{l,s,i}, \dots, A_{mp}^{l,s,i}, \dots, \\ A_{M'p}^{l,s,i}, \dots, A_{0P}^{l,s,i}, \dots, A_{mP}^{l,s,i}, \dots, A_{M'P}^{l,s,i} \end{bmatrix}^T;$$

[0298] 其中, $\otimes$ 表示克罗内克张量积; $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_m, \lambda_n, \lambda_M, \lambda_N$ 表示二维傅里叶级数的展开系数; M' 和 N' 表示 x 和 β 方向上的截断数, $\mathcal{G}_p(s)$ 表示切比雪夫-Ritz法的辅助函数;

[0299] 且切比雪夫-Ritz法的辅助函数表示为:

$$[0300] \quad \mathcal{G}_0(s) = 1, \mathcal{G}_1(s) = \chi(s), \mathcal{G}_p(s) = 2\chi(s)\mathcal{G}_{p-1}(s) - \mathcal{G}_{p-2}(s);$$

$$[0301] \quad \text{其中, } \chi \text{ 为区间变换值, } \chi(s) = \frac{2}{\gamma}s - 1;$$

[0302] 需要说明的是, γ 为积分上限, p 为切比雪夫表达式项数,

$$s = x, \beta; \gamma = a_i, b_i; p \geq 2;$$

[0303] 在上述实施例中, 基于所述切比雪夫-Ritz法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括:

[0304] 基于剪切变形理论, 确定所述均质板结构的应变势能和动能;

[0305] 根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件, 确定弹性势能;

[0306] 根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程。

[0307] 对于均质板结构其中 $\beta = y$, 对于均质壳结构其中 $\beta = \theta$; κ 变更为 χ ;

[0308] 同样的, 在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程之后, 在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前, 还包括:

[0309] 获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能;

[0310] 基于能量叠加原理, 根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函。

[0311] 均质板结构的应变势能 U_p^i 为:

$$[0312] \quad U_p^i = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \left\{ N_{xs} \varepsilon_{xs}^0 + N_{yy} \varepsilon_{yy}^0 + N_{xy} \gamma_{xy}^0 + M_{xx} \kappa_{xx} \right. \\ \left. + M_{yy} \kappa_{yy} + M_{xy} \kappa_{xy} + Q_{xx} \gamma_{xz}^0 + Q_{yy} \gamma_{yz}^0 \right\} dx dy;$$

[0313] 当 $\Theta(x, y) = [\Phi(x, y)]$ 时, 得均质板结构的应变势能更新为:

$$\begin{aligned}
 [0314] \quad U_p^i = \frac{e^{j2\omega t}}{2} \int_0^a \int_0^b & \left\{ \begin{aligned}
 & \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[A_{66} \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + A_{55} \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T + A_{11} \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial x} \\
 & + \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial y} \left[A_{22} \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + A_{44} \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T + A_{66} \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial x} \\
 & + 2 \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[(A_{12} + A_{66}) \mathbf{A}_u \mathbf{A}_v^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial y} + 2 \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[A_{55} \mathbf{A}_w \mathbf{A}_x^T \right] \boldsymbol{\Theta}^T \\
 & + \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial y} \left[(D_{22} + D_{66}) \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial y} + 2 \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial y} \left[A_{44} \mathbf{A}_w \mathbf{A}_y^T \right] \boldsymbol{\Theta}^T \\
 & + \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[D_{11} \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + D_{66} \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial x} \\
 & + \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[D_{11} \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + D_{66} \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial x} \\
 & + 2 \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}}{\partial x} \left[D_{12} \mathbf{A}_x \mathbf{A}_y^T + D_{66} \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \right] \frac{\partial \boldsymbol{\Theta}^T}{\partial y}
 \end{aligned} \right\} dx dy;
 \end{aligned}$$

[0315] 均质板结构的动能 T_p^i 为:

$$\begin{aligned}
 [0316] \quad T_p^i &= \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 \right] dx dy \\
 &= \frac{\omega^2 e^{j2\omega t}}{2} \int_0^a \int_0^b \boldsymbol{\Theta} \left[\begin{aligned}
 & I_0 \left(\mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T + \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T \right) + \\
 & + I_1 \left(\mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \right)
 \end{aligned} \right] \boldsymbol{\Theta}^T dx dy;
 \end{aligned}$$

[0317] 其中, I_0 为均质板结构的第一质量惯性矩, I_1 为均质板结构的第二质量惯性矩, a 为均质板的长度, b 为均质板的宽度;

[0318] 且, 均质板结构的第一质量惯性矩的公式为:

$$[0319] \quad I_0 = \int_{-h/2}^{h/2} \rho dz;$$

[0320] 且, 均质板结构的第二质量惯性矩的公式为:

$$[0321] \quad I_1 = \int_{-h/2}^{h/2} \rho z^2 dz;$$

[0322] 均质板结构的弹性势能 V_p^i 为:

$$\begin{aligned}
 V_p^i = & \frac{h}{2} \int_0^b \left\{ \begin{aligned} & \boldsymbol{\Theta}(0, y) \begin{bmatrix} k_{x0}^u \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T + k_{x0}^v \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + k_{x0}^w \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T \\ & + k_{x0}^x \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + k_{x0}^y \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}^T(0, y) \\ & + \boldsymbol{\Theta}(a, y) \begin{bmatrix} k_{xa}^u \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T + k_{xa}^v \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + k_{xa}^w \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T \\ & + k_{xa}^x \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + k_{xa}^y \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}^T(a, y) \end{aligned} \right\} dy \\
 [0323] \quad & + \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & \boldsymbol{\Theta}(x, 0) \begin{bmatrix} k_{y0}^u \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T + k_{y0}^v \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + k_{y0}^w \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T \\ & + k_{y0}^x \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + k_{y0}^y \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}^T(x, 0) \\ & + \boldsymbol{\Theta}(x, b) \begin{bmatrix} k_{yb}^u \mathbf{A}_u \mathbf{A}_u^T + k_{yb}^v \mathbf{A}_v \mathbf{A}_v^T + k_{yb}^w \mathbf{A}_w \mathbf{A}_w^T \\ & + k_{yb}^x \mathbf{A}_x \mathbf{A}_x^T + k_{yb}^y \mathbf{A}_y \mathbf{A}_y^T \end{bmatrix} \boldsymbol{\Theta}^T(x, b) \end{aligned} \right\} dx;
 \end{aligned}$$

[0324] 其中, k_{x0}^l 、 k_{xa}^l 、 k_{y0}^l 、 k_{yb}^l 为边界弹簧参数, 其中, $l = u, v, w, x, y$;

[0325] 对应的, 基于所述切比雪夫-Ritz法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括:

[0326] 基于弹性理论, 确定所述均质壳结构的应变势能和动能, 其中, 所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量;

[0327] 根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件, 确定弹性势能;

[0328] 根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程。

[0329] 均质壳结构的应变势能 U_v^i 为:

$$[0330] \quad U_v^i = \frac{1}{2} \int_S \{ \mathbf{N}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{M}^T \boldsymbol{\chi} + \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\gamma} \} dS;$$

[0331] 其中, s 为均质壳结构的中性面面积, $\mathbf{N} = \{N_x, N_\theta, N_{x\theta}\}^T$,

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \{M_x, M_\theta, M_{x\theta}\}^T, \quad \mathbf{Q} = \{Q_x, Q_\theta\}^T, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x^0, \varepsilon_\theta^0, \gamma_{x\theta}\}^T, \quad \boldsymbol{\chi} = \{\chi_x, \chi_\theta, \chi_{x\theta}\}^T, \\
 \boldsymbol{\gamma} &= \{\gamma_x, \gamma_\theta, \gamma_{x\theta}\}^T;
 \end{aligned}$$

[0332] 根据各向同性材料的本构方程可知, 各向同性回转类结构的应变能可分解为拉伸势能 U_s^i 和弯曲势能 U_b^i , 根据能量项中切比雪夫多项式项的数学形式进行分类, 分成6个能量分项, 即:

$$[0333] \quad U_s^i = \frac{1}{2} \iint_S [U_{s1}^i + U_{s2}^i + U_{s3}^i + U_{s4}^i + U_{s5}^i + U_{s6}^i] R dx d\theta;$$

[0334] 其中, U_{s2}^i 、 U_{s3}^i 、 U_{s4}^i 、 U_{s5}^i 、 U_{s6}^i 为拉伸势能分量, 其中, $i = 1, 2, 3, 4, 5$, 并记

$\Phi = [\Phi]$, 拉伸势能具体表示如下:

$$[0335] \quad U_{s1}^1 = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \left[A_{11} \mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_u^{iT} + A_{66} \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_v^{iT} + K_S A_{66} \mathbf{B}_w^i \mathbf{B}_w^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]^T;$$

$$[0336] \quad U_{s2}^2 = \frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \left[A_{22} \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_v^{iT} + A_{66} \mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_u^{iT} + K_S A_{66} \mathbf{B}_w^i \mathbf{B}_w^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \right]^T;$$

$$[0337] \quad U_{s3}^3 = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \left[2A_{12} \mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_v^{iT} + 2A_{66} \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_u^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \right]^T;$$

$$[0338] \quad U_{s4}^4 = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \left[2K_S A_{66} \mathbf{B}_w^i \mathbf{B}_x^{iT} + \frac{2}{R} A_{12} \mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_w^{iT} \right] \Phi^T;$$

$$[0339] \quad U_{s5}^5 = \Phi \left[2K_S A_{66} \mathbf{B}_w^i \mathbf{B}_\theta^{iT} + \frac{2}{R} A_{22} \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_w^{iT} - \frac{2}{R} K_S A_{66} \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_w^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \right]^T;$$

[0340] 弯曲势能 U_b^i 矢量化之后的表达式为:

$$[0341] \quad U_b^i = \frac{1}{2} \iint \left[U_{b1}^i + U_{b2}^i + U_{b3}^i \right] R dx d\theta;$$

[0342] 其中, U_{b1}^i 、 U_{b2}^i 、 U_{b3}^i 为拉伸势能分量, 表示为:

$$[0343] \quad U_{b1}^i = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \left[D_{11} \mathbf{B}_x^i \mathbf{B}_x^{iT} + D_{66} \mathbf{B}_\theta^i \mathbf{B}_\theta^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right]^T;$$

$$[0344] \quad U_{b2}^i = \frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \left[(D_{22} + D_{66}) \mathbf{B}_\theta^i \mathbf{B}_\theta^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \right]^T;$$

$$[0345] \quad U_{b3}^i = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \left[2D_{12} \mathbf{B}_x^i \mathbf{B}_\theta^{iT} + 2D_{66} \mathbf{B}_\theta^i \mathbf{B}_x^{iT} \right] \left[\frac{\partial \Phi}{R \partial \theta} \right]^T;$$

[0346] 均质壳结构的动能 T^i 为:

$$[0347] \quad T^i = \frac{1}{2} \iint \Phi \left\{ I_0 \left[\mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_u^{iT} + \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_v^{iT} + \mathbf{B}_w^i \mathbf{B}_w^{iT} \right] + I_2 \left[\mathbf{B}_x^i \mathbf{B}_x^{iT} + \mathbf{B}_\theta^i \mathbf{B}_\theta^{iT} \right] + 2I_1 \left[\mathbf{B}_u^i \mathbf{B}_x^{iT} + \mathbf{B}_v^i \mathbf{B}_\theta^{iT} \right] \right\} \Phi^T R dx d\theta;$$

[0348] 其中, $\mathbf{B}_u^i$ 、 $\mathbf{B}_v^i$ 、 $\mathbf{B}_w^i$ 分别为 u 方向、 v 方向、 w 方向的拉伸形函数的系数向量, $\mathbf{B}_x^i$ 、 $\mathbf{B}_\theta^i$ 为对应方向的弯曲形函数的系数向量, I_0 为均质壳结构的第一惯性矩, I_1 为均质壳结构的第二惯性矩, I_2 为均质壳结构的第三惯性矩, 其表达式为:

$$[0349] \quad [I_0, I_1, I_2] = \int_{-h/2}^{h/2} \rho [1, z, z^2] dz;$$

[0350] 对于结构边界, 引入了无质量边界弹簧进行等效处理。此时, 人工弹簧在子结构边

界处所产生的弹性势能为:

$$[0351] \quad V_c^i = \frac{1}{2} \int \left\{ \begin{aligned} & \left[k_u^0 \Phi B_u^i B_u^{iT} \Phi^T + k_v^0 \Phi B_v^i B_v^{iT} \Phi^T \right. \\ & \left. + k_w^0 \Phi B_w^i B_w^{iT} \Phi^T + k_x^0 \Phi B_x^i B_x^{iT} \Phi^T + k_\theta^0 \Phi B_\theta^i B_\theta^{iT} \Phi^T \right]_{\alpha=0} \\ & + \left[k_u^1 \Phi B_u^i B_u^{iT} \Phi^T + k_v^1 \Phi B_v^i B_v^{iT} \Phi^T \right. \\ & \left. + k_w^1 \Phi B_w^i B_w^{iT} \Phi^T + k_x^1 \Phi B_x^i B_x^{iT} \Phi^T + k_\theta^1 \Phi B_\theta^i B_\theta^{iT} \Phi^T \right]_{\alpha=L_\alpha} \end{aligned} \right\} R d\theta;$$

[0352] 其中, k_u^0 、 k_v^0 、 k_w^0 为结构边界左侧的拉伸方向人工弹簧刚度系数, k_x^0 、 k_θ^0 为结果左侧弯曲方向人工弹簧刚度系数, k_u^1 、 k_v^1 、 k_w^1 为, k_x^1 、 k_θ^1 为结构右侧相应方向的人工弹簧刚度系数;

[0353] 另外, 对应的, 还需要说明的是, 图4为本发明实施例所提供的第一种均质板结构的耦合关系的示意图, 如图4所示, 当耦合关系为同一平面内邻近板的耦合时, 其耦合势能可以表示为:

$$[0354] \quad V_{c1}^{c,c+1} = \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\Theta A_u^c - \Theta A_u^{c+1})^2 + k_c^v (\Theta A_v^c - \Theta A_v^{c+1})^2 + k_c^w (\Theta A_w^c - \Theta A_w^{c+1})^2 \\ & + k_c^x (\Theta A_x^c - \Theta A_x^{c+1})^2 + k_c^y (\Theta A_y^c - \Theta A_y^{c+1})^2 \end{aligned} \right\} dx;$$

$$+ \frac{h}{2} \int_0^b \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\Theta A_u^c - \Theta A_u^{c+1})^2 + k_c^v (\Theta A_v^c - \Theta A_v^{c+1})^2 + k_c^w (\Theta A_w^c - \Theta A_w^{c+1})^2 \\ & + k_c^x (\Theta A_x^c - \Theta A_x^{c+1})^2 + k_c^y (\Theta A_y^c - \Theta A_y^{c+1})^2 \end{aligned} \right\} dy;$$

[0355] 其中, k_c^u 、 k_c^v 、 k_c^w 、 k_c^x 、 k_c^y 为模拟第一种耦合关系的相应方向的人工弹簧刚度系数, A_u^c 、 A_v^c 、 A_w^c 、 A_x^c 、 A_y^c 为耦合结构的形函数的系数向量, A_u^{c+1} 、 A_v^{c+1} 、 A_w^{c+1} 、 A_x^{c+1} 、 A_y^{c+1} 为被耦合结构的形函数的系数向量;

[0356] 图5为本发明实施例所提供的第二种均质板结构的耦合关系的示意图, 如图5所示, 当耦合关系为相互垂直的两板之间的耦合时, 其耦合势能可以表示为:

$$[0357] \quad V_{c2}^{r,r+1} = \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\Theta A_u^r - \Theta A_u^{r+1})^2 + k_c^v (\Theta A_v^r - \Theta A_v^{r+1})^2 \\ & + k_c^w (\Theta A_w^r + \Theta A_v^{r+1})^2 + k_c^x (\Theta A_x^r - \Theta A_x^{r+1})^2 \end{aligned} \right\} dx;$$

[0358] 其中, A_u^r 、 A_v^r 、 A_w^r 、 A_x^r 为第二种耦合关系的耦合结构的形函数的系数向量, A_u^{r+1} 、 A_v^{r+1} 、 A_w^{r+1} 、 A_x^{r+1} 为第二种耦合关系的被耦合结构的形函数的系数向量;

[0359] 将外部分布激励记为 f , 横向载荷 (z 方向) 所做功 W_p^i 的公式为:

$$[0360] \quad W_p^i = \frac{1}{2} \iint_{S_f} f w dS_f = \frac{1}{2} \iint_{S_f} f \boldsymbol{\Theta} \mathbf{A}_w dS_f;$$

[0361] 当第*i*个圆柱壳面板受外力作用时,外力所做的功可以表示为:

$$[0362] \quad W_f^i = \frac{1}{2} \iint_{S_0} F_0 w_{c0}^i R d\theta dx = \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^{2\pi} F_0 \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^i R d\theta dx;$$

[0363] 其中, F_0 为面载荷外力幅值大小, S_0 为载荷作用面积, w_{c0}^i 为第*i*个圆柱壳面板在受力点在 w 方向的位移;

[0364] 图6为本发明实施例所提供的第一种均质壳结构的耦合关系的示意图,如图6所示,当耦合关系为同一平面内邻近结构的耦合时,其耦合势能可以表示为:

$$[0365] \quad V_{p1}^{c,c+1} = \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^{c+1})^2 + k_c^v (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^{c+1})^2 \\ & + k_c^w (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^{c+1})^2 \\ & + k_c^x (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^{c+1})^2 + k_c^\theta (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^{c+1})^2 \end{aligned} \right\} dx$$

$$+ \frac{h}{2} \int_0^{\theta_0} \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^{c+1})^2 + k_c^v (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^{c+1})^2 \\ & + k_c^w (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^{c+1})^2 \\ & + k_c^x (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^{c+1})^2 + k_c^\theta (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^{c+1})^2 \end{aligned} \right\} R d\theta;$$

[0366] 图7为本发明实施例所提供的第二种均质壳结构的耦合关系的示意图,如图7所示,当耦合关系为相互垂直的两板之间的耦合时,其耦合势能可以表示为:

$$[0367] \quad V_{p2}^{r,r+1} = \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^r - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^{r+1})^2 + k_c^v (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^r - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^{r+1})^2 \\ & + k_c^w (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^r + \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^{r+1})^2 + k_c^x (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^r - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^{r+1})^2 \end{aligned} \right\} dx;$$

[0368] 图8为本发明实施例所提供的第三种均质壳结构的耦合关系的示意图,如图8所示,当耦合关系为圆柱壳面板与板之间耦合时,其耦合势能可以表示为:

$$[0369] \quad V_{p3}^{d,d+1} = \frac{h}{2} \int_0^a \left\{ \begin{aligned} & k_c^u (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_u^{c+1})^2 + k_c^v (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^c + \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_v^{c+1})^2 + k_c^w (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^c + \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_w^{c+1})^2 \\ & + k_c^x (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^c + \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_x^{c+1})^2 + k_c^\theta (\boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^c - \boldsymbol{\Phi} \mathbf{B}_\theta^{c+1})^2 \end{aligned} \right\} dx;$$

[0370] 根据上述实施例,可得整个车体结构在外部激励载荷作用下的拉格朗日能量泛函 L_s 可以表示为:

$$\begin{aligned}
 L_s = & \sum_{i=1}^I (U_v^i + V_c^i - W_f^i - T^i) + \sum_{c=1}^C V_{p1}^{c,c+1} + \sum_{r=1}^R V_{p2}^{r,r+1} + \sum_{d=1}^D V_{p3}^{d,d+1} \\
 & + \sum_{i=1}^I (U_p^i + V_p^i - T_p^i - W_p^i) + \sum_{c=1}^C V_{c1}^{c,c+1} + \sum_{r=1}^R V_{c2}^{r,r+1} ;
 \end{aligned}$$

[0372] 其中, I 为均质壳结构对应的子板的总数, C 为耦合关系为相互垂直的两板之间的耦合的边数, R 为耦合关系为相互垂直的两板之间的耦合的边数, D 为耦合关系为圆柱壳面板与板之间耦合的边数;

[0373] 这里需要特别说明的是,对于车体侧墙,采用变材料法进行建模,也即对于玻璃区域采用玻璃材料参数进行数值建模,而对车体侧墙其它区域则采用等效材料参数进行建模。特别地,若不考虑车体侧墙玻璃时,高侧墙将等效为多开孔矩形板,在实际建模中,将玻璃区域材料参数设置为0即可建立多开孔侧墙结构动力学模型;

[0374] 在一些实施例,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定所述车体模态包括:

[0375] 以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

$$[0376] \quad \frac{\partial L_s}{\partial v} = 0, v = A_{mn}^{l,i}, A_{pn}^{l,c,i}, A_{pn}^{l,s,i}, B_{mn}^{l,i}, B_{pn}^{l,c,i}, B_{pn}^{l,s,i};$$

[0377] 对应的,整车车体结构动力学方程为:

$$[0378] \quad (K - \omega^2 M) B = F;$$

[0379] 其中, F 为外力向量, B 为整车车体结构的广义系数向量;

[0380] 另外,还包括:

[0381] 对所述整车车体结构进行有限元法分析,得到有限元法对应的振动频率;

[0382] 采集对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述切比雪夫-Ritz法对应的振动频率;

[0383] 判断所述有限元法对应的振动频率与所述切比雪夫-Ritz法对应的振动频率之间的频率误差是否处于预设范围内;

[0384] 若是,则确定对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述车体模态正确。

[0385] 需要说明的是,镶嵌的玻璃窗口处于侧墙上的子结构的几何中间位置,窗口长度 $L_i=1m$,窗口宽度 $B_i=2m$ 。

[0386] 在本实施例中,仅以10阶的振动频率为例,表2为第一种有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据对比表,如下述表2所示:

[0387] 表2 第一种有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据对比表

[0388]

阶数	有限元法对应的振动频率数据	切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据
1	9.1902	9.1590
2	9.8464	9.8152
3	11.023	10.979
4	12.438	12.365
5	12.644	12.568
6	13.088	12.997
7	13.454	13.313
8	13.740	13.625
9	14.690	14.538
10	14.935	14.751

[0389] 在本实施例中,仅以10阶的振动频率为例,表3为第二种有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据对比表,如下述表3所示:

[0390] 表3 第二种有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据对比表

[0391]

阶数	有限元法对应的振动频率数据	切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据
1	5.8568	5.8614
2	5.9101	5.9321
3	8.9736	8.9431
4	9.0810	9.0556
5	9.5236	9.5043
6	10.411	10.392
7	11.766	11.717
8	12.806	12.728
9	13.475	13.371
10	14.132	13.992

[0392] 由此可知,有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据进行对比之后,确定有限元法对应的振动频率数据和切比雪夫-Ritz法对应的振动频率数据符合误差分析的要求,因此确定得到的车体模态正确。

[0393] 在上述实施例中,对于确定车体模态的方法进行了详细描述,本发明还提供确定车体模态的装置对应的实施例。需要说明的是,本发明从两个角度对装置部分的实施例进行描述,一种是基于功能模块的角度,另一种是基于硬件的角度。

[0394] 图9为本发明实施例所提供的一种确定车体模态的装置结构图,如图9所示,本发明还提供了一种确定车体模态的装置,包括:

[0395] 第一获取模块90,用于获取车体的整车车体结构;

[0396] 拆分模块91,用于按照车体连接关系将所述整车车体结构拆分为多个车体结构,其中,所述车体结构包括板结构和壳结构;

[0397] 第一建立模块92,用于基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型,得到等效后的均质车体结构,其中,所述均质车体结构包括均质板结构和均质壳结构;

[0398] 第二建立模块93,用于基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程;

[0399] 第三建立模块94,用于基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程;

[0400] 第四建立模块95,用于根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程;

[0401] 第一确定模块96,用于以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态。

[0402] 此外,该装置还包括以下模块:

[0403] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括:

[0404] 第一有限元分析模块,用于对所述均质车体结构进行有限元分析,构建所述均质车体结构对应的自由振动方程;

[0405] 第一采集模块,用于采集对所述整车车体结构进行自由模态分析后的分析数据;

[0406] 第一选取模块,用于在所述分析数据中选取第二阶固有模态下的节点位移;

[0407] 归一化模块,用于对所述第二阶固有模态下的节点位移进行归一化处理,得到位移矩阵;

[0408] 第二确定模块,用于根据所述位移矩阵和均质车体结构动力学方程确定所述均质车体结构的材料参数;其中,所述材料参数至少包括弹性模量、泊松比、密度。

[0409] 另一方面,根据所述位移矩阵和所述均质车体结构动力学方程确定均质车体结构的材料参数包括:

[0410] 第三确定模块,用于利用遗传算法确定所述均质车体结构的材料参数数学模型;

[0411] 第四确定模块,用于确定所述弹性模量的取值范围和所述泊松比的取值范围;

[0412] 第二选取模块,用于选取所述遗传算法对应的配置参数,其中,所述配置参数至少包括群体规模、迭代次数、交叉概率、变异概率;

[0413] 第三选取模块,用于选取所述自由振动方程中含有所述弹性模量、所述泊松比、所述密度的方程作为目标函数;

[0414] 迭代模块,用于以所述弹性模量的取值范围、所述泊松比的取值范围、所述目标函数为条件,按照所述迭代次数进行迭代;

[0415] 第二获取模块,用于获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数。

[0416] 另一方面,在获取迭代结果,并根据所述迭代结果确定所述均质车体结构的所述材料参数之后,还包括:

[0417] 自由模态分析模块,用于按照所述材料参数对所述均质车体结构进行自由模态分析;

[0418] 第三获取模块,用于获取所述均质车体结构对应的等效分析数据;

[0419] 第四获取模块,用于基于所述分析数据和所述等效分析数据,以相同的载荷和阶数为条件,获取所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构对应的振动频率;

[0420] 第五确定模块,用于根据所述整车车体结构对应的振动频率和所述均质车体结构

对应的振动频率确定对应的频率误差；

[0421] 第一判断模块,用于判断所述频率误差是否处于预设范围内；

[0422] 若是,则触发第六确定模块,用于确定对所述车体结构建立的所述等效模型正确；

[0423] 若否,则触发第七确定模块,用于确定对所述车体结构建立的所述等效模型错误。

[0424] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质板结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括：

[0425] 第五建立模块,用于基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系；

[0426] 第八确定模块,用于在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质板结构；

[0427] 第九确定模块,用于基于小变形假设确定所述目标均质板结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式；

[0428] 第一偏导模块,用于基于线弹性理论模型对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值；

[0429] 第十确定模块,用于根据所述偏导值确定所述目标均质板结构的应变；

[0430] 第一构建模块,用于基于广义虎克定律,根据所述目标均质板结构的应变构建所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程；

[0431] 第一得到模块,用于对所述目标均质板结构对应的应力-应变本构方程中的应力沿所述目标均质板结构的厚度方向进行积分,并得到所述目标均质板结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0432] 另一方面,当所述均质车体结构为所述均质壳结构时,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括：

[0433] 第六建立模块,用于基于所述均质车体结构建立笛卡尔坐标系；

[0434] 第十一确定模块,用于在所述笛卡尔坐标系内确定目标参照点并选取目标均质壳结构；

[0435] 第十二确定模块,用于基于小变形假设确定所述目标均质壳结构的几何中面对于所述目标参照点的切比雪夫多项式以及转角切比雪夫多项式；

[0436] 第二偏导模块,用于基于线弹性理论模型,对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式求偏导,得到全部的偏导值；

[0437] 第十三确定模块,用于根据所述偏导值确定所述目标均质壳结构的应变；

[0438] 第二构建模块,用于基于广义虎克定律,根据所述目标均质壳结构的应变构建所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程；

[0439] 第二得到模块,用于根据所述目标均质壳结构对应的应力-应变本构方程确定所述目标均质壳结构对应受到的面内力、弯力矩、剪切力。

[0440] 另一方面,在基于等效均质理论对所述车体结构建立等效模型之后,在基于切比雪夫-里兹法对所述均质板结构和所述均质壳结构建立等效板结构弹性力学方程和等效壳结构弹性力学方程之前,还包括：

[0441] 解耦模块,用于基于分离变量法对所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项

式解耦；

[0442] 傅里叶展开模块,用于基于切比雪夫-里兹法对解耦后的所述切比雪夫多项式和所述转角切比雪夫多项式进行傅里叶展开,得到傅里叶余弦级数向量；

[0443] 第三构建模块,用于根据傅里叶余弦级数向量和所述切比雪夫-里兹法的辅助函数构建所述均质车体结构对应的位移容许函数。

[0444] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质板结构建立所述等效板结构弹性力学方程包括：

[0445] 第十四确定模块,用于基于剪切变形理论,确定所述均质板结构的应变势能和动能；

[0446] 第十五确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能；

[0447] 第七建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效板结构弹性力学方程。

[0448] 另一方面,基于所述切比雪夫-里兹法对所述均质壳结构建立所述等效壳结构弹性力学方程包括：

[0449] 第十六确定模块,用于基于弹性理论,确定所述均质壳结构的应变势能和动能,其中,所述应变势能包括拉伸势能分量和弯曲势能分量；

[0450] 第十七确定模块,用于根据无质量边界弹簧的放松位移边界条件,确定弹性势能；

[0451] 第八建立模块,用于根据所述应变势能、所述动能、所述弹性势能建立所述等效壳结构弹性力学方程。

[0452] 另一方面,在基于板结构和/或壳结构之间的耦合关系建立板壳结构耦合势能方程之后,在根据所述耦合势能方程建立整车车体结构动力学方程之前,还包括：

[0453] 第五获取模块,用于获取所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能；

[0454] 第四构建模块,用于基于能量叠加原理,根据所述均质板结构的应变势能、动能、弹性势能以及所述均质壳结构的应变势能、动能、弹性势能构建拉格朗日能量泛函。

[0455] 另一方面,以所述整车车体结构动力学方程中的外力向量等于0为条件,确定车体模态包括：

[0456] 能量变分极值模块,用于以所述整车车体结构动力学方程中的所述外力向量等于0为条件,对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算,得到所述车体模态。

[0457] 另一方面,还包括：

[0458] 第二有限元分析模块,用于对所述整车车体结构进行有限元法分析,得到有限元法对应的振动频率；

[0459] 第二采集模块,用于采集对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率；

[0460] 第二判断模块,用于判断所述有限元法对应的振动频率与所述切比雪夫-里兹法对应的振动频率之间的频率误差是否处于预设范围内；

[0461] 若是,则触发第十八确定模块,用于确定对所述拉格朗日能量泛函进行能量变分极值运算后得到的所述车体模态正确。

[0462] 由于装置部分的实施例与方法部分的实施例相互对应,因此装置部分的实施例请

参见方法部分的实施例的描述,这里暂不赘述。

[0463] 图10为本发明实施例所提供的一种列车的内部结构图,如图10所示,一种列车包括:

[0464] 存储器100,用于存储计算机程序;

[0465] 处理器101,用于执行计算机程序时实现如上述实施例中所提到的确定车体模态的方法的步骤。

[0466] 其中,处理器101可以包括一个或多个处理核心,比如4核心处理器、8核心处理器等。处理器101可以采用数字信号处理(Digital Signal Processing,DSP)、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array,FPGA)、可编程逻辑阵列(Programmable Logic Array,PLA)中的至少一种硬件形式来实现。处理器101也可以包括主处理器和协处理器,主处理器是用于对在唤醒状态下的数据进行处理的处理单元,也称中央处理器(Central Processing Unit,CPU);协处理器是用于对在待机状态下的数据进行处理的低功耗处理器。在一些实施例中,处理器101可以集成有图像处理(Graphics Processing Unit,GPU),GPU用于负责显示屏所需要显示的内容的渲染和绘制。一些实施例中,处理器101还可以包括人工智能(Artificial Intelligence,AI)处理器,该AI处理器用于处理有关机器学习的计算操作。

[0467] 存储器100可以包括一个或多个计算机可读存储介质,该计算机可读存储介质可以是非暂态的。存储器100还可包括高速随机存取存储器,以及非易失性存储器,比如一个或多个磁盘存储设备、闪存存储设备。本实施例中,存储器100至少用于存储以下计算机程序,其中,该计算机程序被处理器101加载并执行之后,能够实现前述任意一个实施例公开的确定车体模态的方法的相关步骤。另外,存储器100所存储的资源还可以包括操作系统和数据等,存储方式可以是短暂存储或者永久存储。其中,操作系统可以包括Windows、Unix、Linux等。数据可以包括但不限于确定车体模态的方法等。

[0468] 在一些实施例中,列车还可包括有显示屏、输入输出接口、通信接口、电源以及通信总线。

[0469] 本领域技术人员可以理解,图10中示出的结构并不构成对列车的限定,可以包括比图示更多或更少的组件。

[0470] 本发明实施例提供的列车,包括存储器100和处理器101,处理器101在执行存储器100存储的程序时,能够实现确定车体模态的方法。

[0471] 最后,本发明还提供一种计算机可读存储介质对应的实施例。计算机可读存储介质上存储有计算机程序,计算机程序被处理器执行时实现如上述方法实施例中记载的步骤。

[0472] 可以理解的是,如果上述实施例中的方法以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用,可以存储在一个计算机可读存储介质中。基于这样的理解,本发明的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来,该计算机软件产品存储在一个存储介质中,执行本发明各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括:U盘、移动硬盘、只读存储器(Read-Only Memory),ROM、随机存取存储器(Random Access Memory,RAM)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0473] 以上对本发明所提供的一种确定车体模态的方法、装置、列车及介质进行了详细介绍。说明书中各个实施例采用递进的方式描述,每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处,各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。对于实施例公开的装置而言,由于其与实施例公开的方法相对应,所以描述的比较简单,相关之处参见方法部分说明即可。应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以对本发明进行若干改进和修饰,这些改进和修饰也落入本发明的保护范围内。

[0474] 还需要说明的是,在本说明书中,诸如第一和第二等之类的关系术语仅仅用来将一个实体或者操作与另一个实体或操作区分开来,而不一定要求或者暗示这些实体或操作之间存在任何这种实际的关系或者顺序。而且,术语“包括”、“包含”或者其任何其他变体意在涵盖非排他性的包含,从而使得包括一系列要素的过程、方法、物品或者设备不仅包括那些要素,而且还包括没有明确列出的其他要素,或者是还包括为这种过程、方法、物品或者设备所固有的要素。在没有更多限制的情况下,由语句“包括一个……”限定的要素,并不排除在包括所述要素的过程、方法、物品或者设备中还存在另外的相同要素。

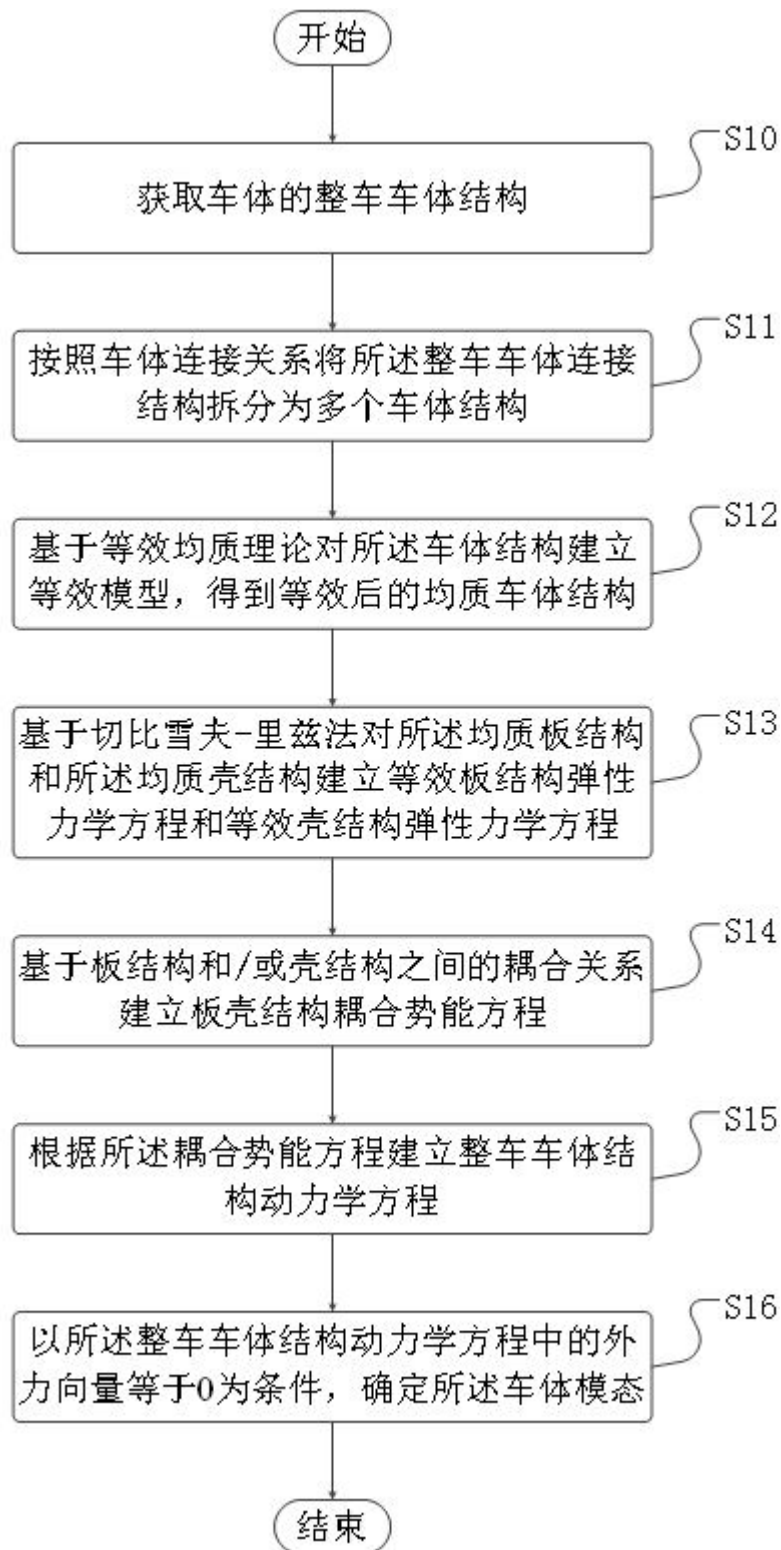


图 1

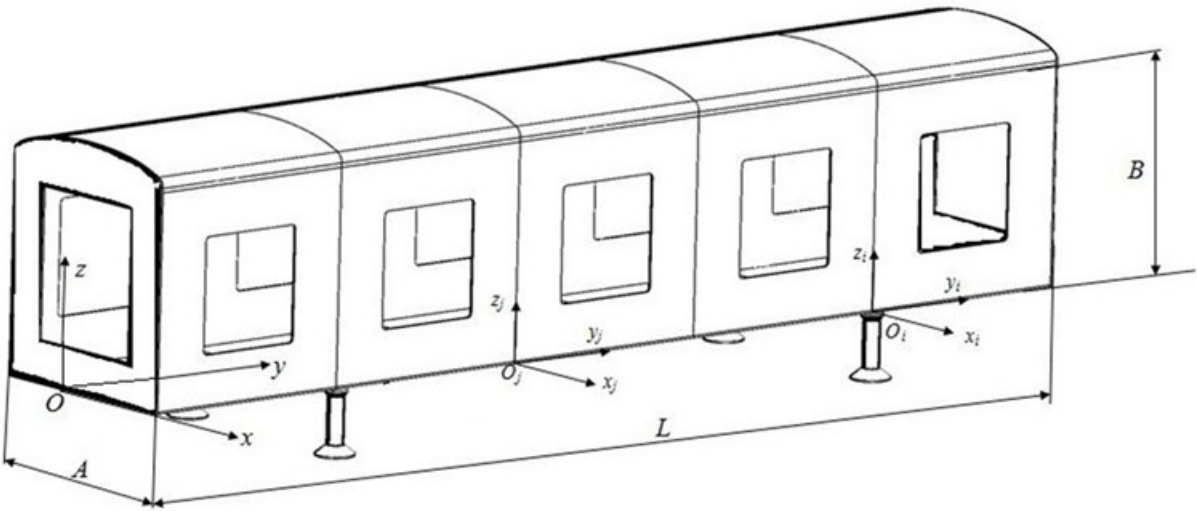


图 2

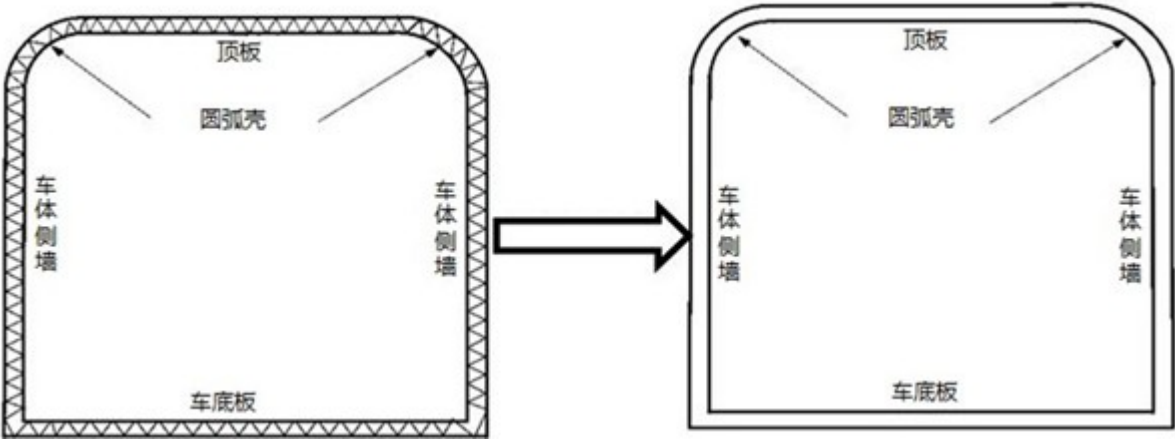


图 3

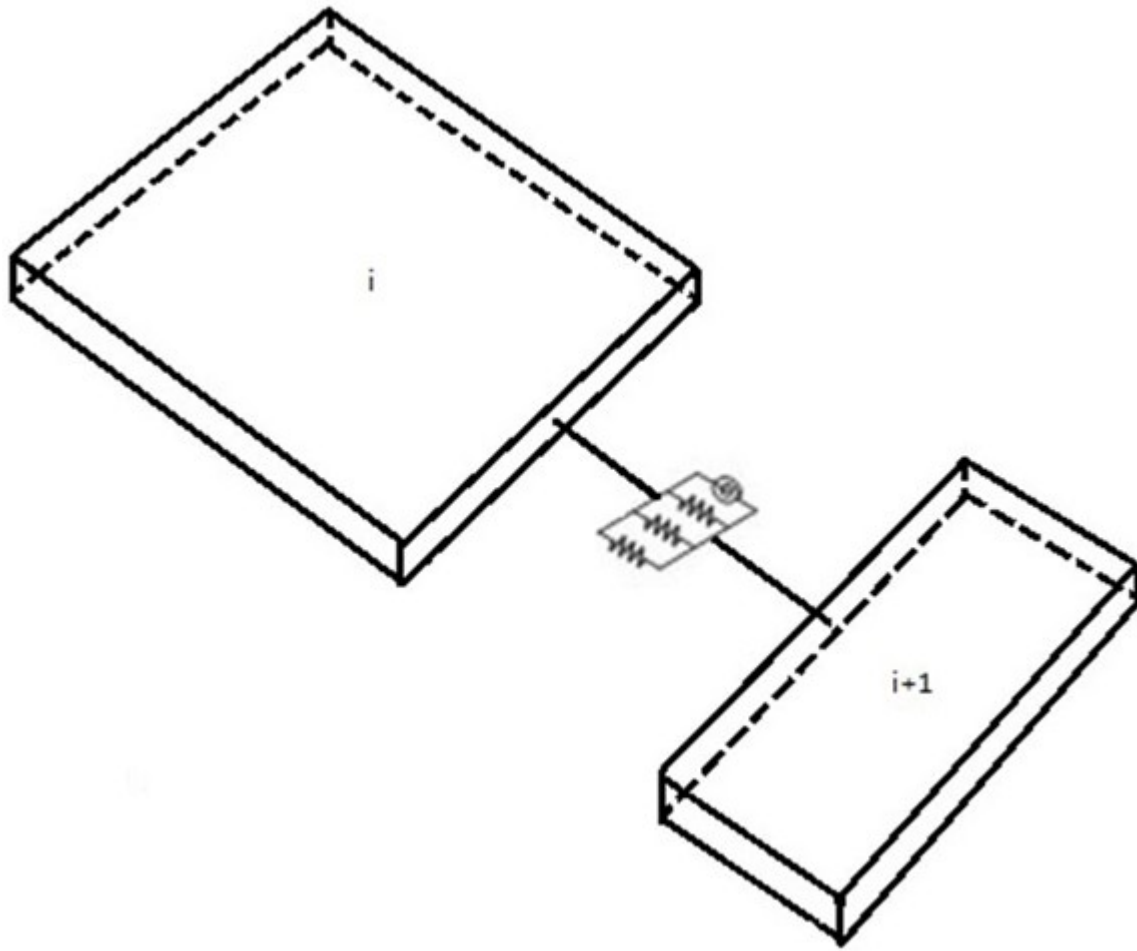


图 4

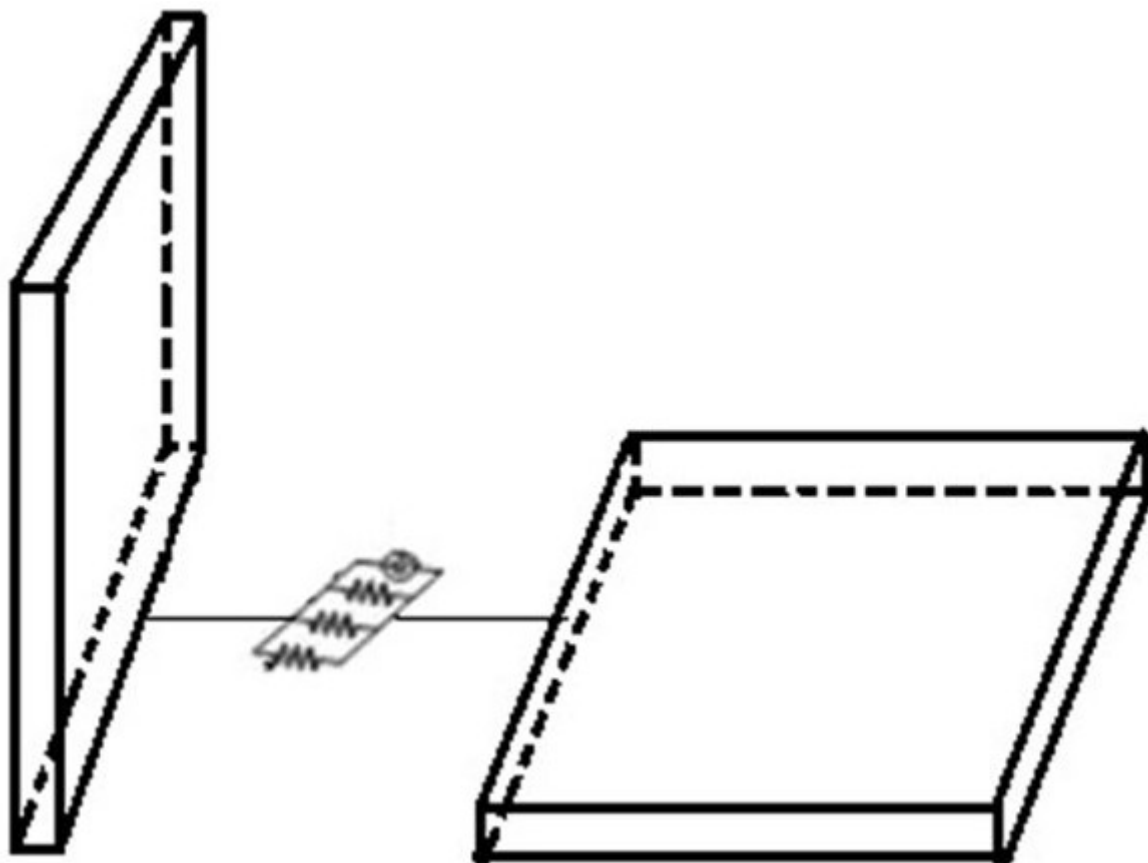


图 5

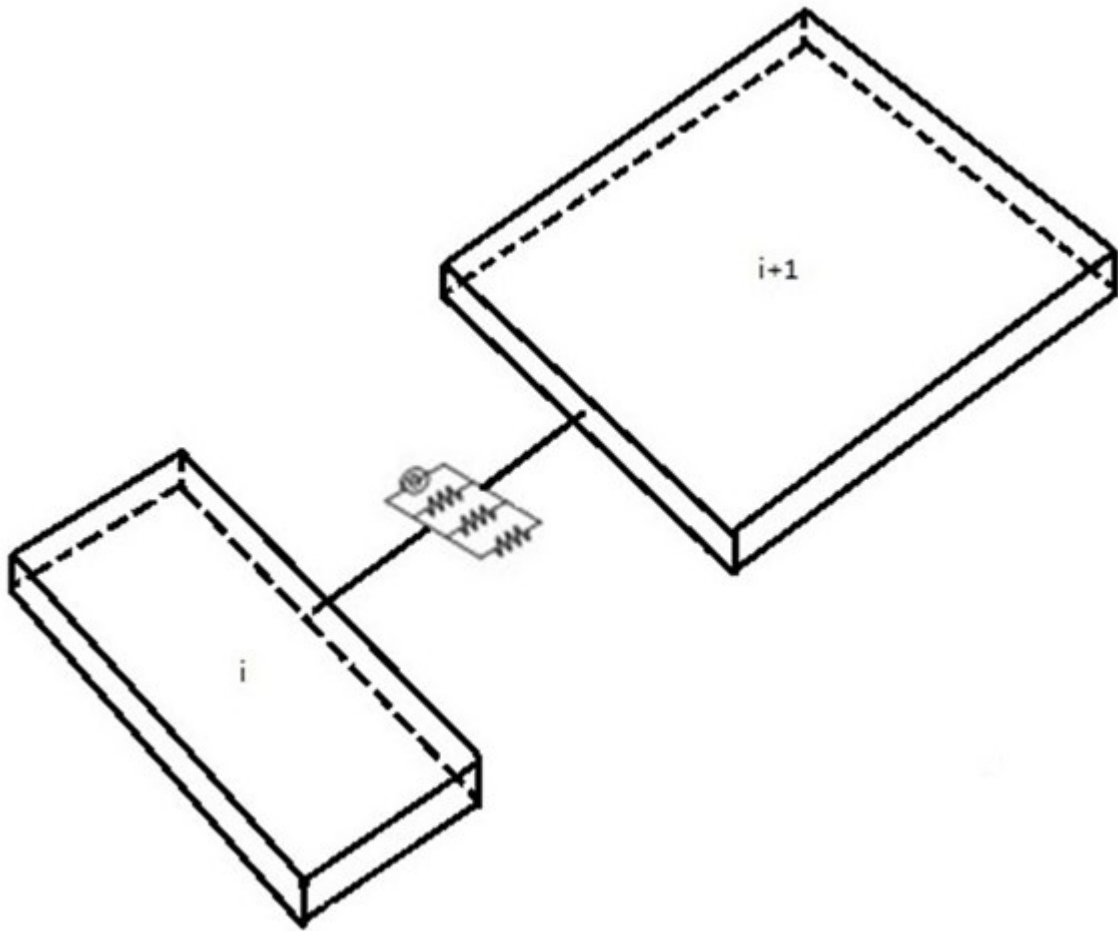


图 6

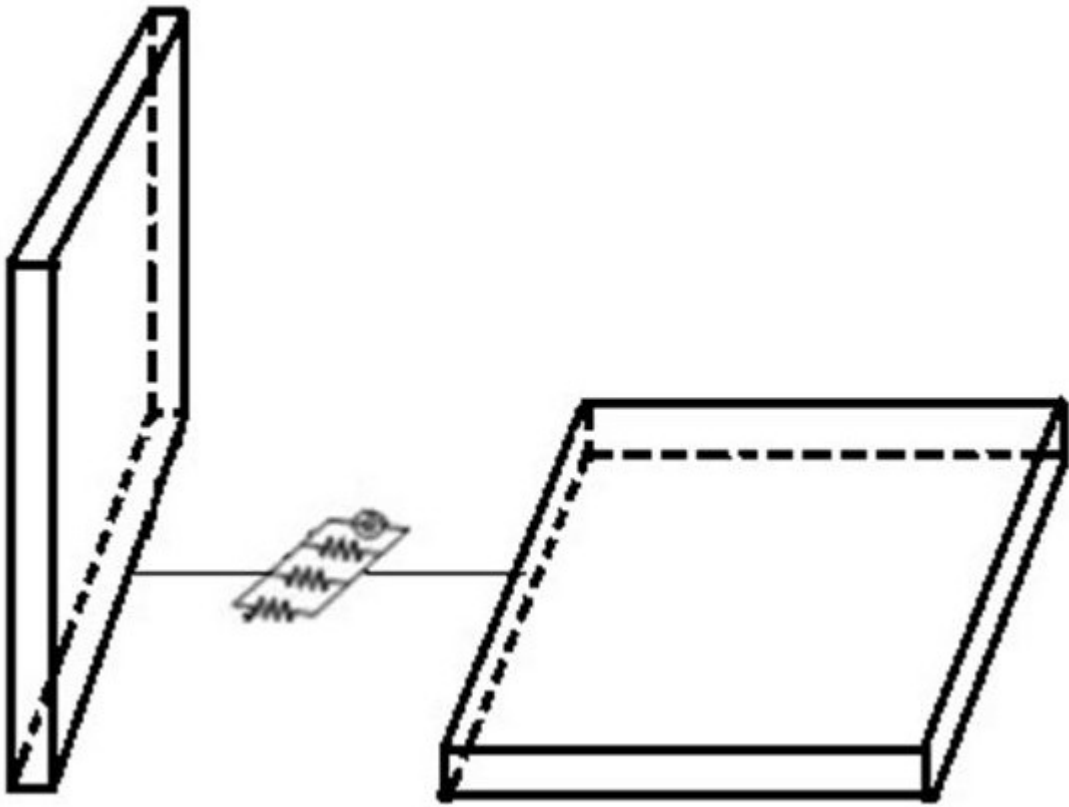


图 7

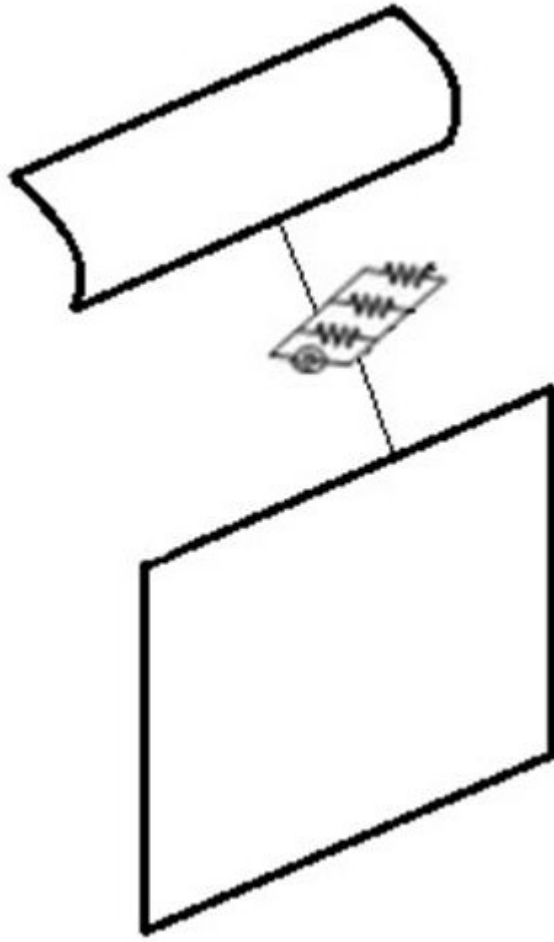


图 8

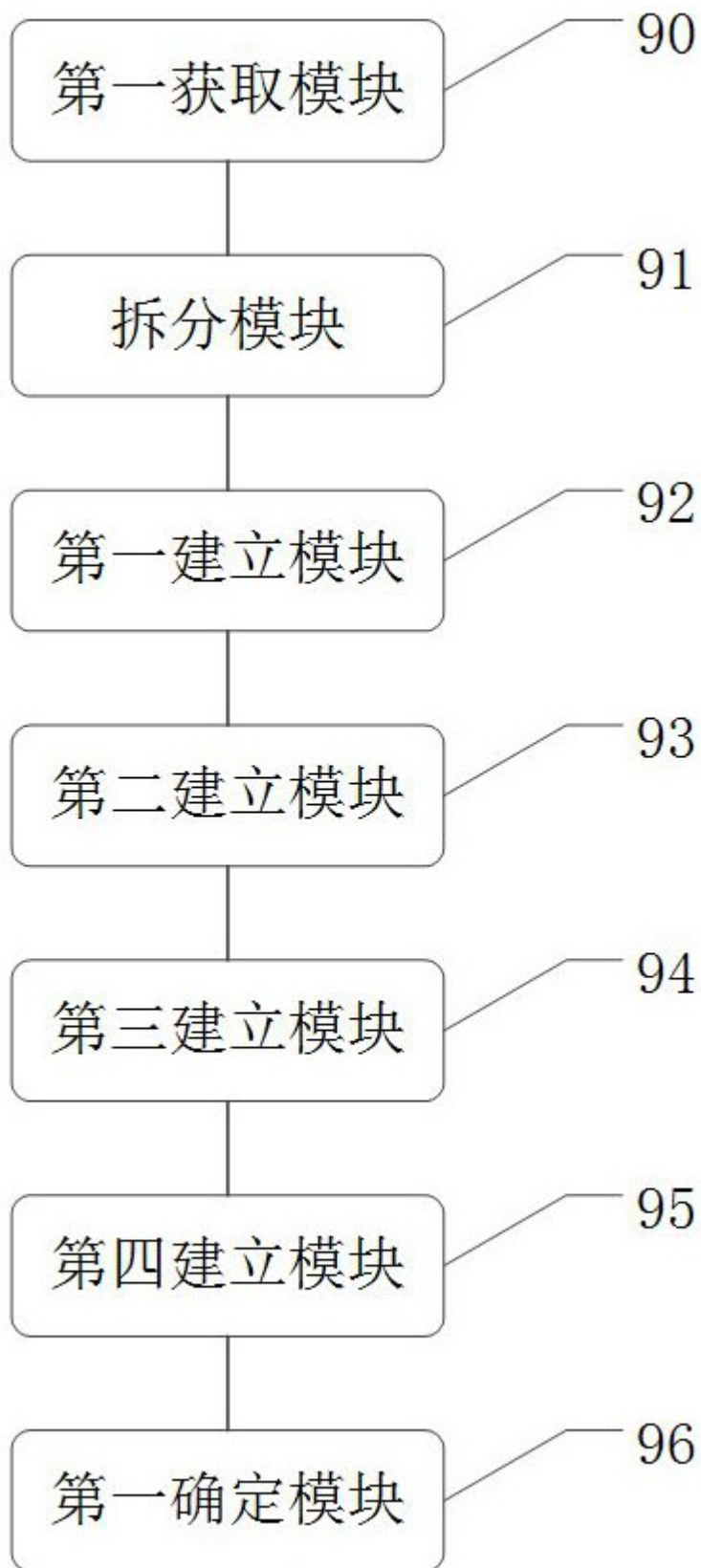


图 9

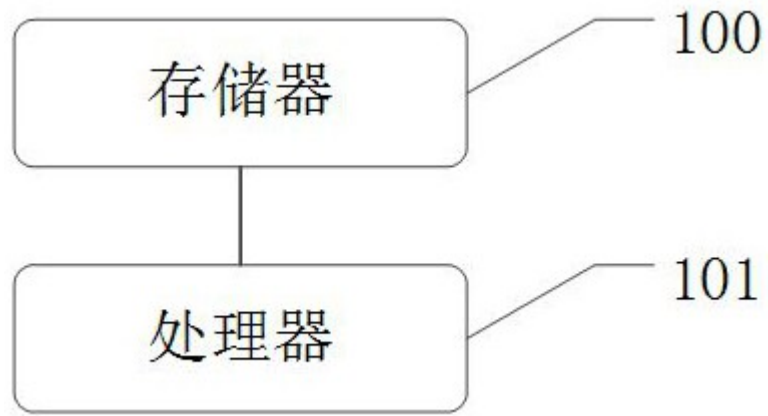


图 10