



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 108959686 A

(43)申请公布日 2018.12.07

(21)申请号 201810342174.4

(22)申请日 2018.04.17

(71)申请人 中国科学院沈阳自动化研究所
地址 110016 辽宁省沈阳市沈河区南塔街
114号

(72)发明人 富佳 骆海涛 刘广明 轿利闯

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限公司 21002

代理人 李巨智

(51) Int. Cl.

G06F 17/50(2006.01)

G01M 7/00(2006.01)

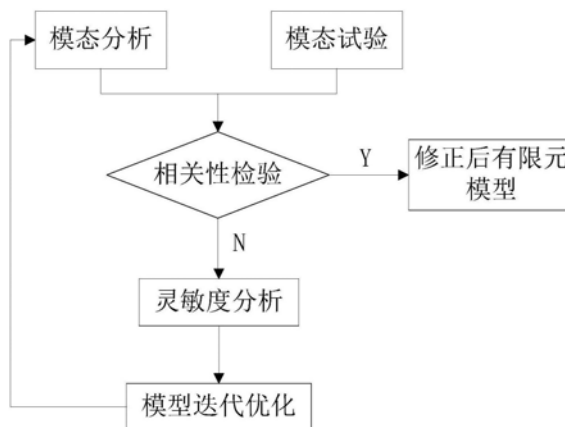
权利要求书2页 说明书4页 附图4页

(54)发明名称

一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,在三维软件中对装配体进行实体建模,对装配体模型通过模态试验系统进行模态试验,采用前后处理软件建立装配体有限元仿真模型,并通过有限元分析软件进行模态分析求解,通过LMS.VirtualLab仿真分析软件,将模态试验结果和模态仿真分析结果进行相关性检验,进行模态灵敏度分析,找出对模态频率比较灵敏的参数变量,通过优化迭代将有限元模型基频与模态试验基频相匹配。本发明仿真分析技术相比于物理试验具有成本低、周期短等诸多好处,在仿真结果误差允许的范围,仿真分析结果可以作为振动特性分析的参考依据,该方法对相关测试工作具有重要的参考价值。



1. 一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤1:在三维软件中对装配体进行实体建模,对装配体模型通过模态试验系统进行模态试验,得到模态试验结果;

步骤2:采用前后处理软件建立装配体有限元仿真模型,并通过有限元分析软件进行模态分析求解,得到模态仿真分析结果;

步骤3:通过LMS.VirtualLab仿真分析软件,将模态试验结果和模态仿真分析结果进行相关性检验,如果同阶频率值的误差率及振型MAC值均在要求范围内,则当前建立的有限元模型满足要求,不需要修正;否则执行步骤4;

步骤4:进行模态灵敏度分析,找出对模态频率比较灵敏的参数变量,通过优化迭代将有限元模型基频与模态试验基频相匹配。

2. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述模态试验系统包括激振系统、拾振系统以及模态分析系统;其中激振系统主要包括模态力锤,拾振系统主要包括加速度传感器和智能采集系统,模态分析系统,主要包括LMS.TestLab软件模态测试顾问和LMS.TestLab软件自带的模态分析软件。

3. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述模态试验为通过力锤激励,对加速度传感器测试及分析,LMS.TestLab软件采用传递函数集总平均后定阶处理,拟合后提取模态参数,并经过模态质量归一化处理,得到模态频率及模态振型特征。

4. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述采用前后处理软件建立装配体有限元仿真模型是将各个结构件简化为实体、壳和集中质量,采用RBE2单元模拟螺栓连接,采用Bush单元模拟柔性连接。

5. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述模态仿真分析结果包括各阶模态频率和振型。

6. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述相关性检验是计算模态仿真分析频率与试验模态频率在对应阶次上的差值,通过同阶频率值的误差率来判定两者之间的相关性。

7. 根据权利要求1或6所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述同阶频率值的误差率为:

$$\Delta_f = \frac{f_A - f_T}{f_A} \times 100\%$$

其中: f_A 为仿真分析模态频率; f_T 为试验模态频率, Δ_f 为同阶频率值的误差率。

8. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述振型MAC值为:

$$MAC_{Test,FE} = \frac{[V_{Test}^T \cdot V_{FE}]^2}{[V_{Test}^T \cdot V_{Test}] \cdot [V_{FE}^T \cdot V_{FE}]}$$

其中: V_{Test} , V_{FE} 分别表示试验和仿真模态振型向量, $MAC_{Test,FE}$ 为振型MAC值。

9. 根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述优化迭代是以灵敏度分析所得对模态频率比较灵敏的参数作为变量,以模态试验所得对应阶

次的模态频率作为目标函数,采用序列二次规划法(SQP,Sequential Quadratic Programming)进行迭代优化计算。

10.根据权利要求1所述的基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,其特征在于:所述模态灵敏度分析为分析各阶模态频率对装配体系统参数的敏感程度,采用LMS Virtual.Lab中Sensitivity进行模态灵敏度分析。

一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法

技术领域

[0001] 本发明涉及复杂装配体的有限元模型修正领域,具体地说是基于灵敏度分析的有限元模型修正方法。

背景技术

[0002] 在工业制造领域CAE技术的迅猛发展,通过有限元仿真分析,研究机构的振动特性,指出结构设计中薄弱部位,可提出优化方案,避免机构在工作中共振现象的发生。同时,有限元分析作为近代工程领域应用最广泛的数值分析方法,其可靠性已被广泛验证。通过有限元仿真分析可以减少物理试验的次数,以达到节约成本的目的,评估配置的合理性降低风险,提高产品的质量,缩短开发周期。

[0003] 随着机械装配需求逐步提高,机械的设计开发需要向更快、更安全可靠的方向发展,对振动特性的要求越来越高。模态分析作为近代研究结构动力特性的一种方法,被广泛应用于工程振动领域。模态分析用于确定结构或机器部件的振动特性,对机械结构设计具有重要意义,同时模态分析还是其他动力学分析的基础。

[0004] 近十几年来计算机可视化、虚拟现实、电脑智能化技术的发展,计算机在各个领域取代实验已有很大发展,仿真分析技术相比于试验方法具有成本低、周期短等诸多好处。但对于复杂的实际结构,有限元模型的精度,受到许多因素的影响。物理仿真模型的误差包括简化假定,如模态分析中结构模型属于线性数学模型,忽略了实际结构中的一些非线性因素的影响离散化精度与网格大小有关,网格越密集,自由度越多,精度越高。但网格密集后,计算效率就降低,工程中需要权衡计算精度与计算效率之间的利弊。再次是建模误差,有限元模型中的物理参数(密度、弹性模量、泊松比)不可能完全跟实际情况吻合,这之中必增大了模态分析结果与实际模态试验结果的误差。

发明内容

[0005] 针对现有技术的不足,本发明提供一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,用少量的结构试验所获得的数据对有限元模型进行修正,获得比较准确的有限元模型,解决了有限元建模仿真不精确问题。

[0006] 本发明为实现上述目的所采用的技术方案是:

[0007] 一种基于灵敏度分析的有限元模型修正方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤1:在三维软件中对装配体进行实体建模,对装配体模型通过模态试验系统进行模态试验,得到模态试验结果;

[0009] 步骤2:采用前后处理软件建立装配体有限元仿真模型,并通过有限元分析软件进行模态分析求解,得到模态仿真分析结果;

[0010] 步骤3:通过LMS.VirtualLab仿真分析软件,将模态试验结果和模态仿真分析结果进行相关性检验,如果同阶频率值的误差率及振型MAC值均在要求范围内,则当前建立的有限元模型满足要求,不需要修正;否则执行步骤4;

[0011] 步骤4:进行模态灵敏度分析,找出对模态频率比较灵敏的参数变量,通过优化迭代将有限元模型基频与模态试验基频相匹配。

[0012] 所述模态试验系统包括激振系统、拾振系统以及模态分析系统;其中激振系统主要包括模态力锤,拾振系统主要包括加速度传感器和智能采集系统,模态分析系统,主要包括LMS.TestLab软件模态测试顾问和LMS.TestLab软件自带的模态分析软件。

[0013] 所述模态试验为通过力锤激励,对加速度传感器测试及分析,LMS.TestLab软件采用传递函数集总平均后定阶处理,拟合后提取模态参数,并经过模态质量归一化处理,得到模态频率及模态振型特征。

[0014] 所述采用前后处理软件建立装配体有限元仿真模型是将各个结构件简化为实体、壳和集中质量,采用RBE2单元模拟螺栓连接,采用Bush单元模拟柔性连接。

[0015] 所述模态仿真分析结果包括各阶模态频率和振型。

[0016] 所述相关性检验是计算模态仿真分析频率与试验模态频率在对应阶次上的差值,通过同阶频率值的误差率来判定两者之间的相关性。

[0017] 所述同阶频率值的误差率为:

$$[0018] \quad \Delta_f = \frac{f_A - f_T}{f_A} \times 100\%$$

[0019] 其中: f_A 为仿真分析模态频率; f_T 为试验模态频率, Δ_f 为同阶频率值的误差率。

[0020] 所述振型MAC值为:

$$[0021] \quad MAC_{Test,FE} = \frac{[V_{Test}^T \cdot V_{FE}]^2}{[V_{Test}^T \cdot V_{Test}] \cdot [V_{FE}^T \cdot V_{FE}]}$$

[0022] 其中: V_{Test} , V_{FE} 分别表示试验和仿真模态振型向量, $MAC_{Test,FE}$ 为振型MAC值。

[0023] 所述优化迭代是以灵敏度分析所得对模态频率比较灵敏的参数作为变量,以模态试验所得对应阶次的模态频率作为目标函数,采用序列二次规划法(SQP,Sequential Quadratic Programming)进行迭代优化计算。

[0024] 所述模态灵敏度分析为分析各阶模态频率对装配体系统参数的敏感程度,采用LMS Virtual.Lab中Sensitivity进行模态灵敏度分析。

[0025] 本发明具有以下有益效果及优点:

[0026] 本发明可适用于各种结构件和装配体的有限元模型修正,模型修正后的仿真分析结果可以作为振动特性分析的参考依据,该方法对相关测试工作具有重要的参考价值。

附图说明

[0027] 图1是本发明的方法流程图;

[0028] 图2是关节机械臂结构图;

[0029] 图3是优化前MAC矩阵图;

[0030] 图4是前两阶模态分析和试验频率振型对比图;

[0031] 图5是材料弹性模量灵敏度矩阵图。

具体实施方式

[0032] 下面结合附图及实施例对本发明做进一步的详细说明。

[0033] 如图1所示为本发明的方法流程图。

[0034] 本发明的有限元模型修正方法的过程主要分以下四步：

[0035] 步骤一，在三维软件中对装配体进行实体建模，使用模态测试系统对实物进行约束状态的模态测试，并通过LMS.TestLab软件模态测试顾问和其自带的模态分析软件，得到装配体各阶模态频率及模态振型特征。

[0036] 步骤二，采用HyperWorks软件进行装配体模型前后处理工作，整个结构简化为实体、壳和集中质量单元，采用RBE2刚性单元来模拟螺栓连接，采用Bush单元模拟柔性连接。通过MSC.Nastran有限元分析软件作为求解器进行求解计算。MSC.Nastran提供了三类模态特征值解法，分别为跟踪法、变换法和兰索士(Lanczos)法，其中兰索士法针对计算非常大的稀疏矩阵特征值问题最有效，本发明采用兰索士模态求解法，得到有限元分析模型的各阶模态频率和振型。

[0037] 步骤三，通过LMS.VirtualLab仿真分析软件，将步骤一模态试验结果和步骤二模态仿真分析结果进行相关性检验，对比各阶频率值与振型MAC值。MAC值总是介于0和1之间，一般是将仿真分析模态与试验模态放到一个MAC(i, j)矩阵中进行观察。如果MAC(i, j)矩阵中对角线上的数值大于0.8，则说明仿真分析模态与对应的试验模态相关性比较好，同时矩阵中其余位置的数值不大于0.3，说明不同阶数所对应的模态之间独立性好，互相之间没有受到彼此的影响。

[0038] 步骤四，为仿真模态和试验模态在频率上接近，需要对有限元模型进行优化改进。首先，对其进行模态灵敏性分析，找出对模态频率比较灵敏的参数变量，以模态试验所得对应阶次的模态频率作为目标函数，采用序列二次规划法优化迭代将有限元模型基频与模态试验基频相匹配。

[0039] 实施例：

[0040] 本发明针对五关节机械臂结构进行基于灵敏度分析的有限元模型修正。

[0041] 首先，在三维软件中对机械臂进行实体建模，机械臂是通过转动关节来实现末端的空间位置变化，该机械臂具有五个转动关节，即五个自由度，包括一个方位关节、一个回转关节和三个俯仰关节。对该关节机械臂在三维软件Solidworks中进行实体建模，其结构详见图2。通过LMS.TestLab软件对机械臂实物进行约束状态的模态测试，具体的实施方法为：在机械臂均布加速度传感器，通过模态力锤激振，观察各测点信号的相干性，只有相干系数0.8以上的信号才有效，对符合要求的信号进行传递函数处理，完成模态定阶及拟合工作。拟合后提取模态参数，并经过模态质量归一化处理。

[0042] 然后，采用HyperWorks软件进行机械臂模型前后处理，采用MSC.Nastran有限元分析软件作为求解器进行求解计算。整个机械臂机构简化为实体、壳和集中质量，用RBE2单元来模拟螺栓连接。机械臂各个关节减速器的刚度对整体刚度影响很大，对机械臂各个关节减速器进行静力学分析，通过刚度计算理论得到减速器的刚度数据。在有限元模型的建立过程中，采用三向弹簧阻尼器CBUSH单元模拟关节内减速器扭转刚度。并通过Nastran求解器采用Lanczos法对机械臂有限元模型进行模态分析。

[0043] 通过LMS.VirtualLab仿真分析软件，将步骤一机械臂模态试验结果和步骤二机械臂模态仿真分析结果进行相关性检验，对比各阶频率值与振型MAC值。相关性分析是计算模

态仿真分析频率与试验模态频率在对应阶次上的差值,通过误差率来判定两者之间的相关性。

$$[0044] \quad \Delta_f = \frac{f_A - f_T}{f_A} \times 100\%$$

[0045] 式中: f_A 为机械臂仿真分析模态频率; f_T 为机械臂试验模态频率。

[0046] 振型MAC值是一种模态判定准则,是评价试验模态与仿真分析模态之间相关性应用比较广泛的手段,通过比较振型来评估模态的正确性。模态判定准则的定义如下:

$$[0047] \quad MAC_{Test,FE} = \frac{[V_{Test}^T \cdot V_{FE}]^2}{[V_{Test}^T \cdot V_{Test}] \cdot [V_{FE}^T \cdot V_{FE}]}$$

[0048] 式中: V_{Test} , V_{FE} 分别表示试验和仿真模态振型向量。

[0049] MAC值总是介于0和1之间,一般是将仿真分析模态与试验模态放到一个矩阵中进行观察。如果MAC(i, j)矩阵中对角线上的数值大于0.8,则说明仿真分析模态与对应的试验模态相关性比较好,同时矩阵中其余位置的数值不大于0.3,说明不同阶数所对应的模态之间独立性好,互相之间没有受到彼此的影响。

[0050] 将机械臂的试验模态与仿真模态分析结果进行振型相似度计算后,优化前MAC值矩阵如图3所示,机械臂前两阶模态振型和频率对比如图4所示。通过仿真模态和试验模态相关性分析,前两阶MAC值比较大,达到0.8以上,可以认为试验模态的振型和有限元计算模态的振型是相似的。第一阶模态频率相差3.19Hz,第二阶模态频率相差5.54Hz,因此需要对有限元模型进行优化改进,以便仿真模态与试验模态在频率上接近。

[0051] 经过分析,有限元模型中用RBE2单元进行的连接可能连接刚度偏弱,可以增大材料的弹性模量,以补偿偏弱的连接刚度。由于机械臂零件很多,需要选择出对模态频率影响比较大的零件的弹性模量,可以通过模态灵敏度分析,找出对模态频率比较灵敏的弹性模量。经过灵敏度分析,如图5所示,得到各个零件的弹性模量对前两阶的模态频率的灵敏度。将对模态频率影响比较大的部件弹性模量(E) 14、(E) 12、(E) 40、(E) 43、(E) 20和(E) 22,采用序列二次规划法进行迭代优化计算。经过优化计算后,仿真模态和试验模态的振型相似度MAC值有所提高,而且缩小了仿真模态的频率与试验模态的频率,频率误差降到1%以下。

[0052] 本发明介绍了一种基于模态灵敏度分析的有限元模型校正方法,经过模态仿真分析和模态试验相关性检验和MAC判定准则分析,最终得到接近真实机械臂实物的有限元仿真模型。仿真分析技术相比于物理试验具有成本低、周期短等诸多好处,在仿真结果误差允许的范围内,仿真分析结果可以作为振动特性分析的参考依据,该方法对相关测试工作具有重要的参考价值。

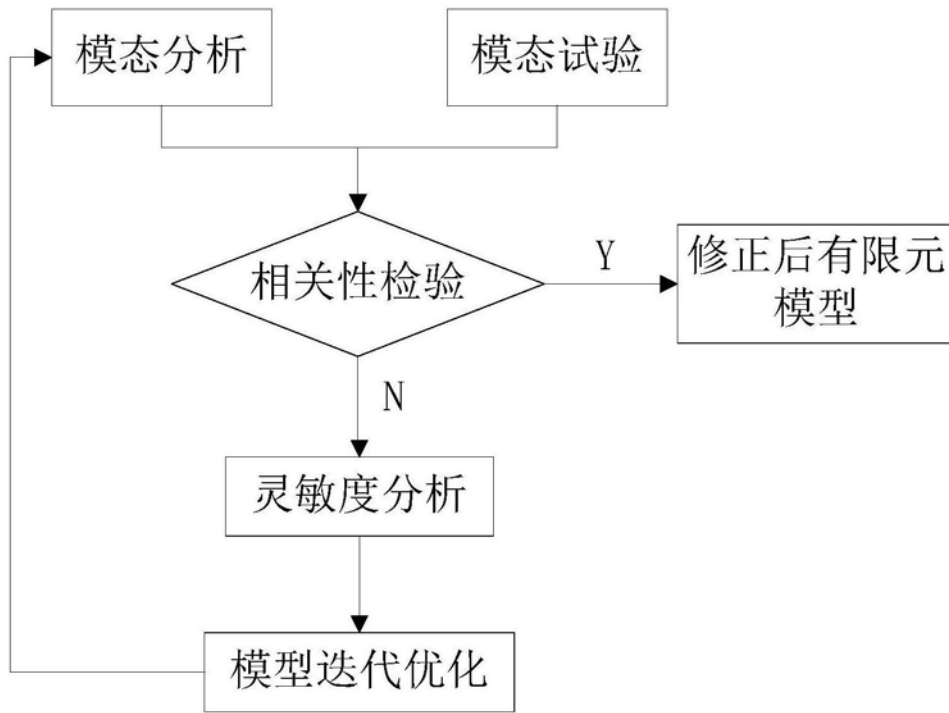


图1

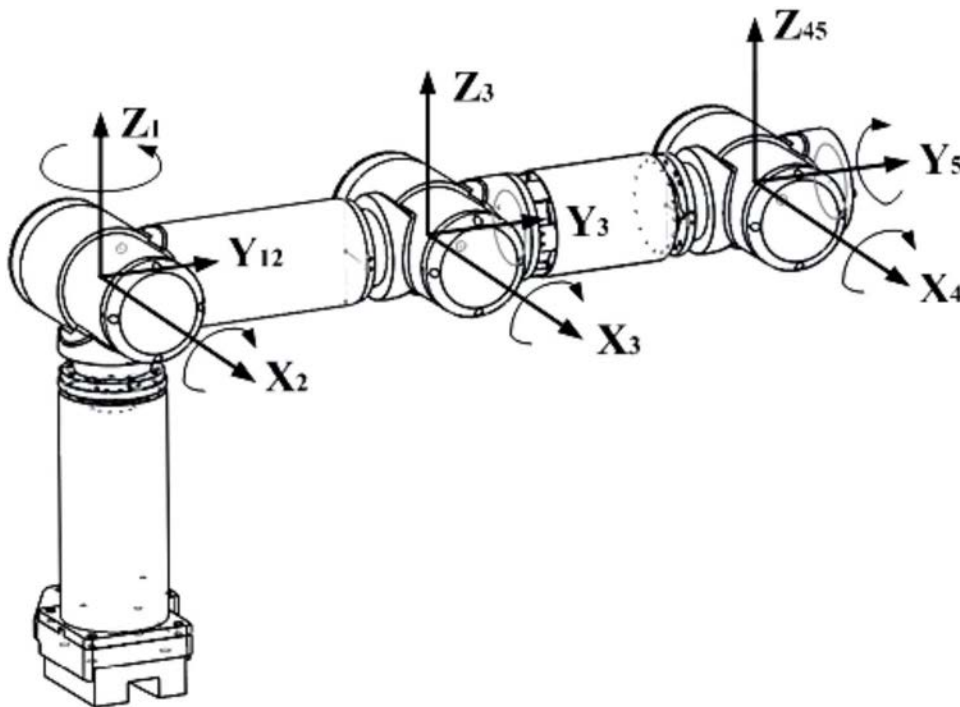


图2

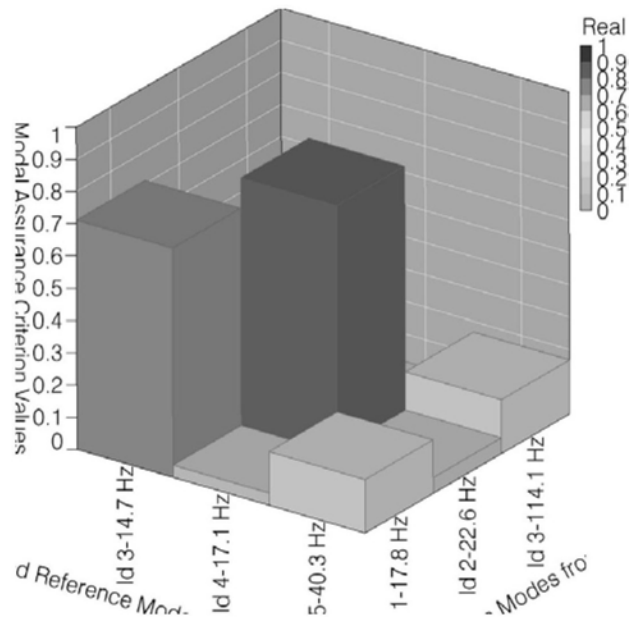
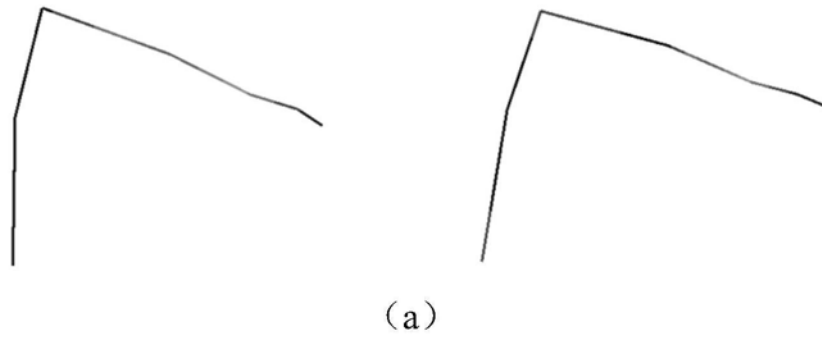


图3

Reduced Verification Modes from FEM_MODE SET, Id 1 - 17.8 Hz Reduced Reference Modes from TEST_MODE SET, Id 3 - 14.7 Hz



Reduced Verification Modes from FEM_MODE SET, Id 2 - 22.6 Hz Reduced Reference Modes from TEST_MODE SET, Id 4 - 17.1 Hz

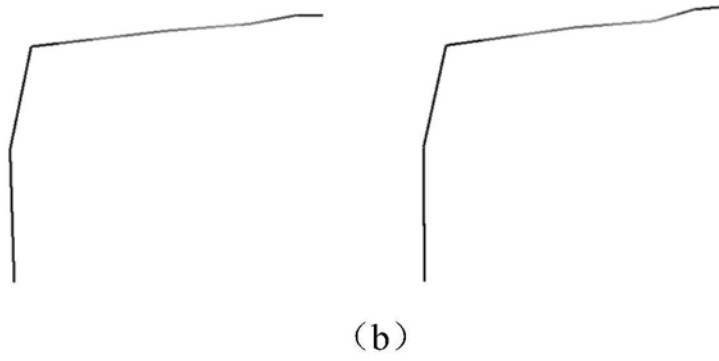


图4

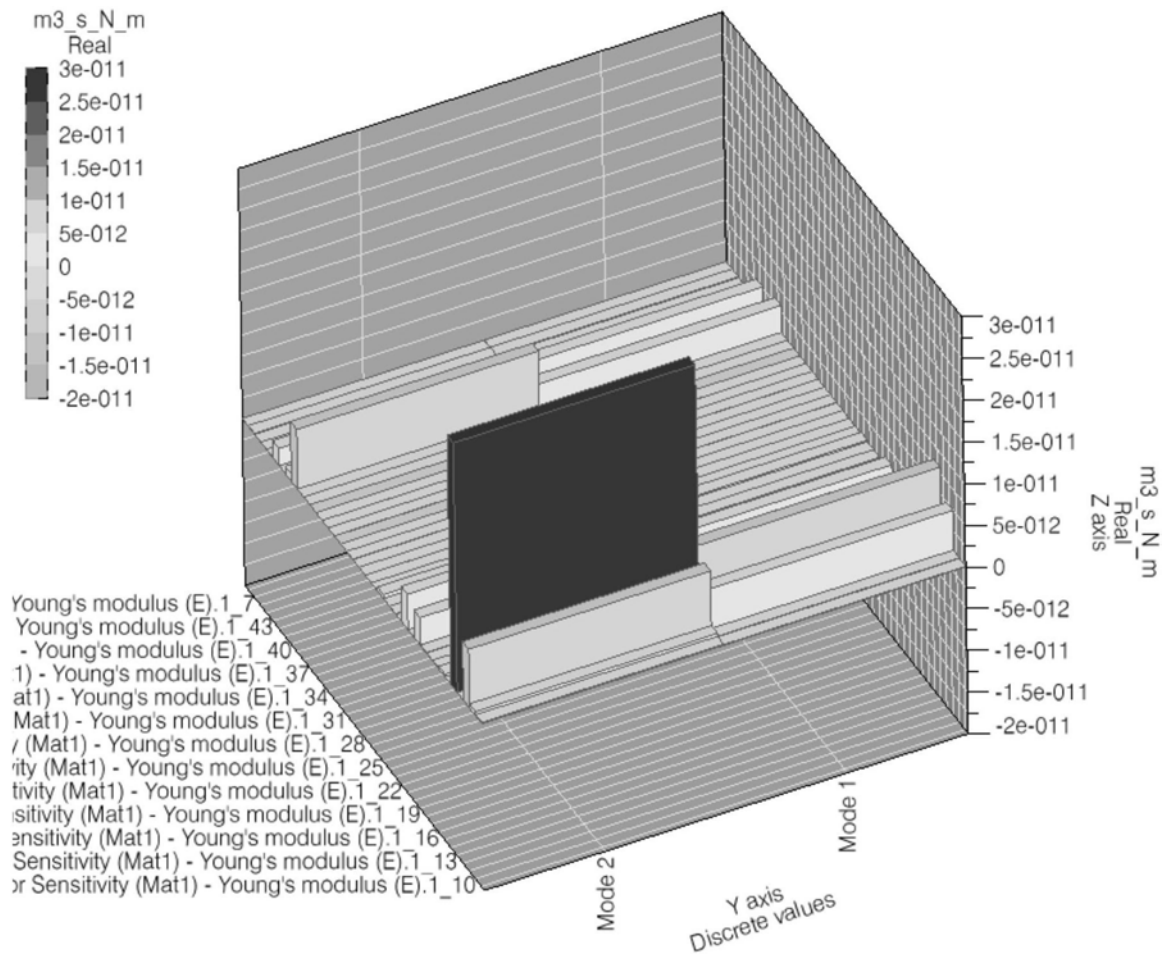


图5