

农业机械设计中的结构动力学模型修正与优化

付素芳^{1,2}, 张秋菊¹ (1. 江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 河南科技学院, 河南新乡 453003)

摘要 介绍了模型修正基本理论和一般方法, 回顾了有限元技术及模型修正技术在农业机械设计方面的应用。

关键词 模态; 模型修正; 农业机械

中图分类号 O342 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2007)04-00949-02

Dynamics Model Updating and Optimizing of Structure in Agricultural Machinery Design

FU Su fang et al (School of Mechanical Engineering, Southern Yangtze University, Wuxi, Jiangsu 214122)

Abstract This paper presented fundamentals of model updating and methods of finite element analysis, and reviewed their application in agricultural machinery design.

Key words Model; Model updating; Agricultural machinery

基于动力学性能预测是进行农业机械结构动态设计的基本条件。而精确的理论模型是研究一个机械系统、预测其动态响应的前提。动力学建模主要有3种方法: 理论建模、实验建模、理论与实验综合建模。理论建模的主要方法是有限元法。有限元法是一种高效数值计算方法, 可以较准确地计算出各种载荷、边界条件下分析模型的动态响应。但有限元建模与实际对象之间往往存在误差, 如边界条件和连接条件的简化、几何模型和本构关系的不准确等^[1]。因此, 修正有限元模型非常必要。实验建模主要是基于实验模态分析方法; 由于受到实验测点布置、实验设备等影响, 它所识别出的只是结构的一些低阶的、不完全的模态参数, 但是数据准确可靠, 故可用来修正有限元模型。在进行农业机械结构动态设计时, 可以通过大型有限元分析软件(如 ANSYS、NASTRAN 等)建立结构的有限元模型, 计算理论模态参数, 然后结合实验模态参数对有限元模型进行动力学修正, 使其模态参数一致或基本一致, 并在此基础上进行参数优化。这种方法的使用对于农业机械结构动态设计具有重要意义。

1 模态分析理论基础

模态分析是深入了解结构动态特性的前提, 是实现结构动态优化设计的重要前期工作。模态分析主要用于研究线性系统的模态参数(即固有频率、阻尼系数以及模态振型等问题)^[2]。通常, 结构的模态参数可通过模态实验和模态计算2种途径得到。但由于实验模型和理论计算模型都有其误差, 因而, 实验模态和计算模态所得结果常不相吻合。在模态较为密集的频带, 这种差异更为显著。另一方面, 计算模态具有更高的阶次, 在有限频带内的模态数大于由实验测得的模态数。因此, 通过对模态计算与模态实验的相关性研究, 实现对两者模态对应关系的判别尤为重要^[3]。

1.1 模态计算 对于多自由度系统的振动微分方程, 有必要采用模态分析的方法。模态分析的实质是一种坐标变换过程, 即用自然坐标代替原来的物理坐标, 使原来的运动微分方程解耦, 进而将联立方程组变成 n 个独立的微分方程, 从而逐一求解。自由度为 n 的系统的自由振动方程为

$$[m]\{\ddot{x}\} + [k]\{x\} = 0 \quad (1)$$

对于正定系统, 其主振动为简谐运动 $\{x\} = \{\phi\} \sin(\omega t + \theta)$

$$[m]\{\ddot{\phi}\} + [k]\{\phi\} = 0 \quad (2)$$

式中, $\{\phi\}$ 为位移 $\{x\}$ 的振幅列向量; ω 为结构的固有频率。

$$[k] - \omega^2 [m] \{\phi\} = 0 \quad (3)$$

$$| [k] - \omega^2 [m] | = 0 \quad (4)$$

求解特征方程(4), 可得特征值 ω_i^2 (记 $\omega_i = \omega_i^2$)、特征向量 $\{\phi_i\}$ 。 $\{\phi_i\}$ 为对应于 ω_i^2 ($i=1, 2, \dots, n$) 的第 i 阶主振型。

大型工程设计所关心的问题是低阶特征解, 而 Lanczos 法^[4], 是一种计算部分特征解效率很高的解算方法。对农机结构的有限元模型进行模态分析时, 可以采用 Lanczos 法, 比如文献[3, 5]。

1.2 模态相关性理论^[3] 模态相关性判定主要有以下几种判据:

(1) 模态置信因子(MAC)。MAC 的值为 0~1, 数值越大, 说明计算得到的第 i 阶模态与实验测得的第 i 阶模态的相关性越好。

(2) 坐标模态置信因子(CoMAC)。CoMAC 为确定对低模态置信因子贡献较大的自由度, 即模态对中运动情况最不相符的坐标点及方向, 引入坐标模态置信因子(CoMAC)。CoMAC 的范围也为 0~1, 其大小表明了结构同一自由度位置上, 理论计算振型和实验得到某一阶振型的相似程度。

(3) 增强的坐标模态置信因子(ECoMAC)。标准 CoMAC 考虑该自由度上模态振型系数的大小, 为计入模态振型系数差异对最终坐标模态置信因子的影响, 引入增强的坐标模态置信因子来评判。ECoMAC 的数值范围也为 0~1, 相关性较差自由度处的坐标模态置信因子接近于 0。

2 有限元建模与分析

2.1 软件说明 CAE 通用软件可对多种类型的工程和产品的物理力学性能进行分析、模拟、预测、评价和优化, 以实现产品技术创新。目前, 国际上著名的分析软件如 NASTRAN、ANSYS、ADINA、ABAQUS 等包含多种条件下的有限元分析程序, 而且带有功能强大的前处理程序(可自动生成单元网格、形成输入数据文件)和后处理程序(显示计算结果, 绘制变形图、等值线图、振型图以及动态显示结构的动力响应等^[6]), 使用方便, 计算精度高。有限元分析可以显著提高农业机械产品设计性能。比如, 陈伟叙等利用 ANSYS 建立有限元分析模型, 改进了农业机械的产品设计性能。

有限元分析软件一般由 3 部分组成:

(1) 有限元前处理。包括从构造几何模型、划分有限元

作者简介 付素芳(1968-), 女, 河南新乡人, 副教授, 从事机械结构动态优化设计方面的研究。

收稿日期 2006-11-07

网格,到生成、校核、输入计算模型的几何、拓扑、载荷、材料和边界条件数据。

(2) 有限元分析。进行单元分析和整体分析,求解位移、应力值等。

(3) 有限元后处理。对计算结果进行分析、整理,并以图形方式输出,以便设计人员对设计结果作出直观判断,对设计方案或模型进行实时修改。

2.2 建模与分析的一般流程 一般情况下,前处理软件都与CAD软件具有良好的接口,可与众多的有限元求解软件相结合。MSC公司的Patran是目前国际上公认的优秀的、应用广泛的前后处理软件。其建模与分析的步骤见图1。另外,可以利用有限元分析软件参数化设计语言建立参数化有限元模型。这样对于结构相同尺寸不同的分析模

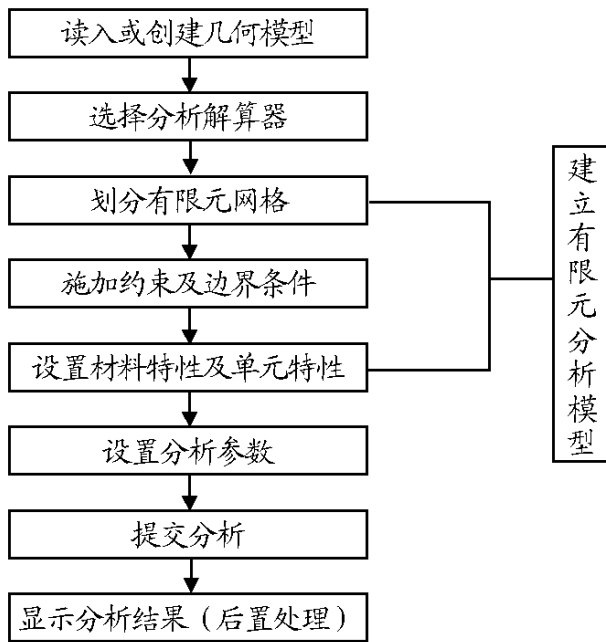


图1 有限元建模和分析的一般流程

$$[k] = [m_0][u_0][u] \left[\begin{matrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & s^2 & \\ & & & \cdot \end{matrix} \right] + \left[\begin{matrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & 0_s & \\ & & & \cdot \end{matrix} \right]$$

这种物理参数修改方法也是振动系统优化设计的有力工具,可选择或修改系统的物理参数,使振动系统具有预定的自然频率或振型等特性。在这类问题中,有必要研究自然频率、模态向量等模态参数随系统物理参数的变化情况,探讨模态参数对质量、刚度矩阵的灵敏度问题。

3.2 灵敏度分析 系统的动态性能对设计参数的灵敏度在结构动力修改、故障诊断、动力优化等领域中有广泛应用。基于模态参数的灵敏度分析是利用已计算得到的模态来计算模态灵敏度,计算较为简便,尤其是计算多个模态的灵敏度时,具有突出的优越性。这种基于模态的方法要先建立预测的有限元模型和实验模型之间的特征值及特征向量的残差,在修正过程中大多采用修正特征值,而特征向量的灵敏度没有封闭形式的解^[7]。

基于频响函数的灵敏度分析是对任意频率点上的预测,它通过测量幅频响应曲线来定义形状相关系数和幅值相关系数,并确定相关系数对设计参数的灵敏度。徐张明等基于频响函数相关性的灵敏度分析,是利用扩展加权的最小二乘法,将有限元模型修正问题转化为计算目标函数的最小值问题,依赖预测和测量的频响相关系数,进行迭代修正计算^[8]。

型,只需改变相应参数化尺寸的值,就可以自动迅速获得新的分析模型,从而提高设计效率。

3 结构动力学模型修正与优化

3.1 模型修正原理^[9] 当实验结果与分析结果相差很小时,基于正交性条件,采用摄动法求得所需修改的质量矩阵 $[m]$ 和刚度矩阵 $[k]$,并由此确定系统的 $[m]$ 、 $[k]$ 。设 $[m_0]$ 、 $[k_0]$ 分别为通过对结构的分析计算得到的质量矩阵和刚度矩阵的近似值, $[u_0]$ 、 $\begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & 0_s & \\ & & & \cdot \end{bmatrix}$ 为其相应的模态矩阵和频率矩阵; $[u]$ 、 $\begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & s^2 & \\ & & & \cdot \end{bmatrix}$ 为通过振动测试得到的实验模态分析结果, $[m]$ 、 $[k]$ 分别为修改后系统的真实、精确的质量矩阵和刚度矩阵;且有如下关系式:

$$[u] = [u_0] + [u]$$

$$\begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & s^2 & \\ & & & \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & 0_s & \\ & & & \cdot \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cdot & & & \\ & \cdot & & \\ & & s^2 & \\ & & & \cdot \end{bmatrix}$$

$$[m] = [m_0] + [m]$$

$$[k] = [k_0] + [k]$$

则通过数学计算可以得到:

$$[m] = [m_0][u_0] (2[1] - [u_0]^T [m_0] [u] - [u]^T [m_0] [u_0]) [u_0]^T [m]$$

$$[k] = [k_0][u_0] (2[1] - [u_0]^T [k_0] [u] - [u]^T [k_0] [u_0]) [u_0]^T [k]$$

则通过数学计算可以得到:

$$[m] = [m_0][u_0] (2[1] - [u_0]^T [m_0] [u] - [u]^T [m_0] [u_0]) [u_0]^T [m]$$

$$[k] = [k_0][u_0] (2[1] - [u_0]^T [k_0] [u] - [u]^T [k_0] [u_0]) [u_0]^T [k]$$

3.3 模型修正与优化 基于灵敏度分析结果修正原始的有限元模型,可以有效提高有限元模型模拟实际结构的精度。基于精确的有限元模型和灵敏度分析,采用数字仿真的方法,可以较为准确地预测农机系统的动态特性及其在各种载荷下的动态响应,而且可以按照对其响应的要求,修改与优化设计参数进行。应用实例有“基于灵敏度分析的某农用车车架的动力修改”^[9]、“基于灵敏度分析的发动机机体动力修改”^[5]等。

4 结语

实验模态数据是有限元模型修正的依据,灵敏度分析为结构动力学修正指明了方向。通过有效的动力学修正得到的精确有限元计算模型,是进行结构动态响应分析以及优化设计的基础。希望该研究能为进行农业机械动态设计及其产品设计性能提高提供思路和设计依据。

参考文献

[1] 朱安文,曲广吉,高耀南,等. 结构动力模型修正技术的发展[J]. 力学进展,2002, 32(3): 337-348.
 [2] ALLEMANG R J, BROWN D L. 实验模态分析[J]. 李德葆,译. 动态分析与测试技术,1994(1): 64-70.
 [3] 马炳杰,冯慧华,廖日东. 基于模态相关性和模型修改的发动机整机模态分析[J]. 车辆与动力工程,2006(2): 38-42.

(上接第950 页)

- [4] 徐稼轩, 郑铁生. 结构动力分析的数值方法 M . 西安: 西安交通大学出版社, 1993 .
- [5] 崔志琴, 赵冬青, 苏铁熊. 基于灵敏度分析的发动机机体动力修改 J] . 车用发动机, 2003(3) :22 - 24 .
- [6] 师汉民, 谌刚, 吴雅. 机械振动系统——分析·测试·建模·对策: 上册

[M] . 武汉: 华中科技大学出版社, 2001 .

- [7] 张令弥, 张柏庆, 袁向荣. 特征向量导数计算各种模态法的比较和发展 [J] . 应用力学学报, 1994 , 11(3) :68 - 74 .
- [8] 徐张明, 沈荣瀛, 华宏星. 基于频响函数相关性的灵敏度分析的有限元模型修正 J] . 机械强度, 2003 , 25(1) :5 - 8 .
- [9] 张洪伟, 张以都, 王锡平, 等. 基于灵敏度分析的某农用车车架的动力修改 J] . 机械设计, 2006 , 23(6) :49 - 51 .