

适于小农机产品快速配置设计的整机 模态综合技术研究*

赵颖娣, 陶国兴, 蒋建东*

(浙江工业大学 军工研究院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 为了快速评价产品模块组合的多种配置方案, 并且能够通过修改子模块结构及其配置方式, 达到满足产品整机动态特性的客户要求, 提出了一种基于试验/有限元模态分析模型的产品整机模态综合方法。以小型农业作业机为研究对象, 根据小农机的结构特征与工作模式, 对其进行了功能模块划分; 并根据产品模块的模态试验或有限元模态分析结果, 完成了小型农业作业机产品整机动态性能的快速模态综合求解, 并通过整机试验模态综合方法进行了求解结果的有效性验证。研究结果证明, 上述方法能够根据具体产品模块配置组合, 快速有效地进行配置样机的模态求解, 大大提高了产品配置设计效率。

关键词: 小型农业作业机; 模块化; 配置设计; 模态综合

中图分类号: TH122; TH6; S224.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)06-0648-05

Study on modal synthesis method for product rapid configuration design of small agricultural machinery

ZHAO Ying-di, TAO Guo-xing, JIANG Jian-dong

(Academe of War Industry, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: In order to cater for the dynamic characteristics forecasting demand of product in configuration design process, a product modal synthesis method based on the experiment/finite element modal analysis models of product modules was proposed. With small agriculture machinery design as example, according to the product structural characteristics and working modes, the function module partition was carried out, and the whole modal of configuration prototype was acquired through modal synthesis with product modular's modal test and finite element modal analysis. The results show that the above-mentioned methods can forecast the whole mode of the prototype, greatly improving the product configuration design efficiency.

Key words: small agricultural machinery(SAM); modular; configuration design; modal synthesis

0 引 言

小型农业作业机是实现高效设施农业生产机械化的重要的生产设备之一, 市场需求十分巨大。SAM 的主要特点是功能繁多、作业功能专业性强、作业环境随机性高, 但由于其需求变化多样、单品种批量小, 导致难以实施大批量生产。设计人员需要对 SAM 产品设

计不断地进行更新、优化, 才能满足不同客户日益提高的功能需求。整机的动态特性是客户关注产品性能的一个重要方面。因此在产品子模块配置的过程中, 需要快速预测并通过修改子模块结构及其配置方式得到满足客户需求的整机动态特性。

模态分析是现代结构动特性分析的基础, 是衡量产品动态特性的主要技术途径。结构的试验模态分析

收稿日期: 2011-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805131); 浙江省重点科技创新团队建设资助项目(2009R50001)

作者简介: 赵颖娣(1975-), 女, 陕西宝鸡人, 主要从事农业工程及装备设计方面的研究. E-mail: zyd@zjut.edu.cn

通信联系人: 蒋建东, 男, 副教授, 硕士生导师. E-mail: jiangjd@zjut.edu.cn

和动态特性有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)有机结合已运用于许多工程实践中^[1],如摩擦车车架、汽车车身、发动机等动态特性分析及优化设计。浙江大学的朱位秋等人、北京强度与环境研究所谭志勇等人对实验模态综合技术、自由界面试验模态综合和精确模态综合法及其在运载火箭、航天器上的应用进行了系统深入的研究^[2-5]。文献[4-6]利用试验模态纠正仿真模态,最终实现仿真模态综合,文献[3]对试验模态综合展开了最直接的研究。国外对模态综合技术的研究主要有美国航空暨太空协会 Doebling 对纯试验数据残余补偿试验模态综合方法的研究^[7];日本京都大学的 Komatsu 对试验模态综合在太阳能阵列结构上的应用的研究^[8];美国麻省理工大学(MIT)的 Blackwood 对薄壁管件的试验模态综合方法的研究^[9];美国科罗拉多大学的 Alvin 对“Minimal-order experimental component mode synthesis”的研究。目前子结构模态综合方法在农业作业机产品上的应用很少,只有少数简单部件的模态综合。华中科技大学的杨家军等^[10]为了优化小型甘蔗收割机切割器(由机架和切割器两个子结构组成)的动态性能,通过对机架和切割器两个子结构采用模态综合法得到小型甘蔗收割机整体动力学模型。广西工业大学的孙德鹏等^[11]划分小型甘蔗收割机主子结构,建立了子结构的运动方程并进行子结构的模态分析;综合主子结构与刀盘结构,建立了广义坐标下的整体系统动力学模型。同时,基于此模型对甘蔗收割机切割器进行了模态分析,讨论利用 ANSYS 在改善系统动态性能和优化结构上的可行性,从而达到快速求解、提高切割器动态性能的目的。

本研究主要探讨适于小农机产品快速配置设计的整机模态技术。

1 小型农业作业机系统构架及其功能模块划分

本研究以适用于丘陵地形的小型农业作业机 JF-168 为研究对象,根据其系统构架组成特征与工作模式,按照产品模块化功能划分原理可将其划分为以下模块:系统操纵模块(System Manipulation Module, SMM)、系统支撑模块(System Supporting Module, SSM)、动力驱动模块(Power Driving Module, PDM)、动力传动模块(Power Transmission Module, PTM)、牵引行走模块(Traction Movement Module, TMM)、作业执行模块(Task Execution Module, TEM),如图 1 所示。其中 SMM 的主体构件为扶手,完成系统启/停、作业过程控

制与路线引导功能;SSM 的主体构件为机架,实现其他各功能模块的实体支撑与位置固定;PDM 的主体构件为小型汽油发动机,负责提供系统动力驱动任务;PTM 的主体构件为齿轮变速器,根据作业要求提供一定转速的动力输出;TMM 的主体构件为传动轴及行走轮,实现系统作业过程中的移动;TEM 作业执行模块的主体构件为旋耕刀架与刀具,完成对土壤的旋耕作业。

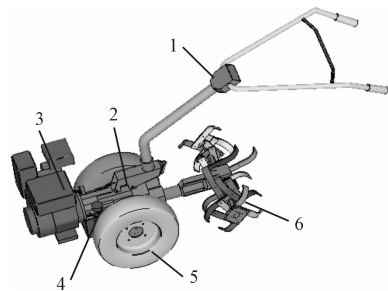


图 1 小型农业作业机 JF-168 功能模块组成

1—系统操纵模块(SMM);4—动力传动模块(PTM);3—系统支撑模块(SSM);5—牵引行走模块(TMM);7—动力驱动模块(PDM);6—作业执行模块(TEM)

由于 SAM 工作环境随机性较高,且存在较大差异,选择相应的功能模块来满足实际的工况需求是非常必要的工作。传统的 SAM 的组合设计主要依赖于各模块的性能测试,这样虽然能够较好地达到农机工作的实际需求,但每个模块的实验测试需要一定的成本,且占用大量的系统研发时间,难于实现 SAM 产品的快速组合设计。随着计算机辅助工程技术的不断发展,FEA 方法得到了广泛地应用。FEA 能够对系统各组成模块进行模拟性能测试,使模块的测试成本与占用时间大幅度降低,是机械系统快速组合设计的必要手段。

对于 SAM 产品的各组成模块,其结构特征与功能实现方式是存在较大差异的。例如牵引行走模块(扶手部分)相对比较简单,而动力传动模块(齿轮变速器)则要复杂得多。对于相对简单的模块,由于其功能约束较少,通过 FEA 方法进行模拟测试就能到达比较理想的效果;而对于比较复杂的模块,FEA 就不容易满足实际情况的需求了。因此,确定每个模块的结构复杂度,进而选择相应的测试方法,在保证 SAM 产品动态特性的前提下提高其组合设计的速度是非常必要的工作。

假设: SAM 产品的功能模块数为 n ,需要进行实验测试的模块数为 n_1 ($n_1 \leq n$), FEA 模拟测试的模块数为 n_2 ($n_2 \leq n$)。若 n_2 越大,则系统组合设计时间越少,当 $n_2 = n$ 时,快速组合设计效能达到最大化;反之,

若 n_1 越大,则系统组合设计时间越多,当 $n_1 = n$ 时,快速组合设计效能达到最小,即与传统实验性能测试方法的效果是相同的。

2 小型农业作业机的模态分析技术

2.1 SAM 产品模块的有限元模态分析

本研究利用 FEA 与实验测试获得系统各组成模块的基本特征参数,然后进行模态综合计算,获得其各阶固有频率、振型及其他相关技术参数。其中,FEA 是采用 ANASYS/HYPTERGRID 软件建模分析,获得所需的模态数据,其流程如图 2 所示。

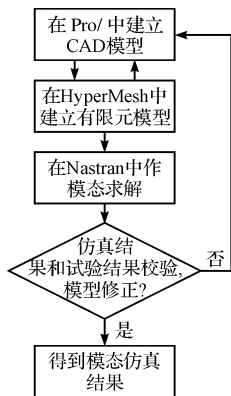


图 2 SAM 产品模块有限元模态分析流程

2.2 SAM 产品模块的实验模态分析

测试系统主要包括 LMS Test. Lab 模态测试和分析系统、激振装置、ICP 型加速度传感器、ICP 型力传感器、LMS SCADAS III 数据采集前端、微机,测试系统组成如图 3 所示,SAM 产品试验模态分析流程如图 4 所示。

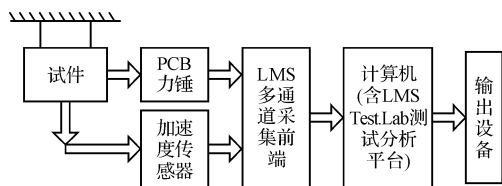


图 3 SAM 产品模态分析测试系统简图

3 基于 SAM 产品模块混合模态的整机模态综合求解

模态综合法首先由解析模态综合法发展起来,即人们首先用各子结构的解析模态去综合整体结构的模态,其目的是减小解题规模、缩短机时。LMS Virtual. Lab Structures 提供了一套集成解决方案,可以快速创建专门属性的子系统或者系统级仿真模型,笔者正是利

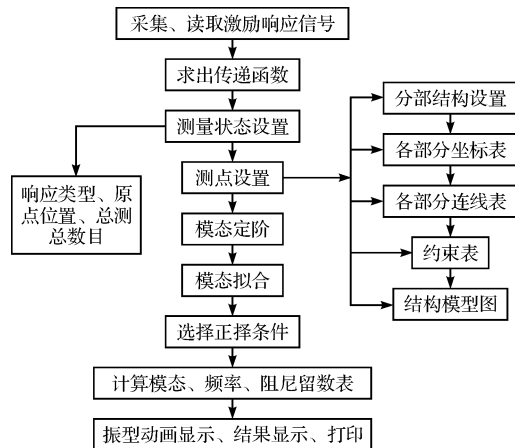


图 4 SAM 产品试验模态分析流程图

用 LMS Virtual. Lab Structures 的上述优点,在 Assembly Analysis 中对小型农业作业机子结构进行基于自由界面的模态综合,以得到整机的模态模型,其流程如图 5 所示。

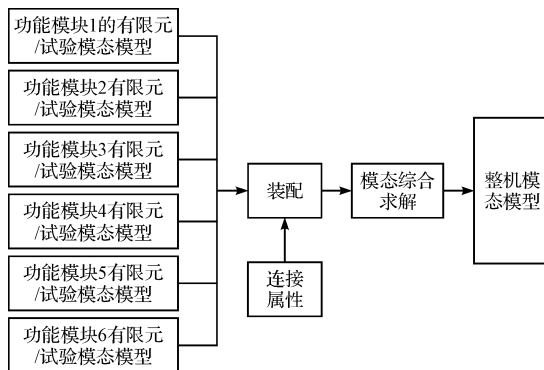


图 5 基于 SAM 产品模块混合模态的整机模态综合求解

在 LMS Virtual. Lab Structures 的 Assembly Analysis 进行自由界面的模态综合,主要包括以下几个步骤:①小型农业作业机子结构模态模型的导入;②小型农业作业机子结构连接界面特性的设置;③小型农业作业机子结构的自由界面模态综合求解。

3.1 小型旋耕机 JF168 的整机试验模态分析

为验证 AM 产品的功能模块多种模态组合的整机模态综合分析结果的可信度,笔者先进行小型旋耕机 JF168 的整机试验模态测试,所得到的模态值作为评价不同模态综合分析方案的评价基准。

模态分析试验主要包括:①试验装置的搭建,主要是机具悬挂、传感器安置、测试系统校准等;②采集数据,主要靠硬件完成;③识别系统,即分析输出数据中机具振动特性;④验证结果,并分析改进试验。模态分析试验包括 LMS Test. lab 仿真软件、ICP 型加速度传感器、LMS SCADAS III 数据采集系统、机具激振装置、ICP 型力传感器等。本研究由 Pro/E 进行三维实体建

模,并进行简略有限元分析,选取激振点并将其导入 LMS Test. Lab 模态软件,扶手部件上布置 16 个测点。轮胎部件上布置 10 个测点,发动机部件上布置了 18 个测点,齿轮箱体和旋耕刀组部件上布置 29 个测点,总共布置测点 73 个,如图 6 所示。测试分析得到的前 10 阶模态值如表 1 所示。

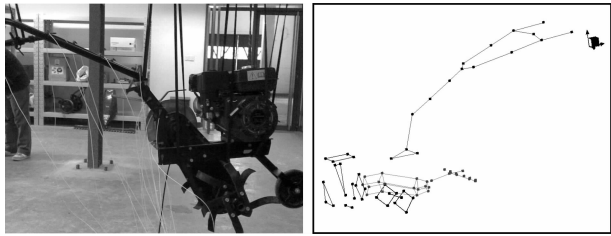


图 6 小型农业作业机 JF-168 整机试验模态测试

3.2 功能模块多种模态组合的整机模态综合分析

对于现有的小型旋耕机 F-168 的 6 个功能模块,根据其面向工作环境的不同可以分为以下整机模态综合组合方案(如图 7 所示):

(1) 如图 7(a)所示,FEA 分析的模块个数为 6,实验测试分析的模块数为 0,记作:6+0;此时 SAM 整机产品完全依赖 FEA 分析结果,产品设计的快速性最好。

(2) 如图 7(b)所示,FEA 分析的模块个数为 5,实验测试分析的模块数为 1,记作:5+1;此时 SAM 有 5 个依赖 FEA 分析结果,产品设计的快速性仅次于方案①。

(3) 如图 7(c)所示,FEA 分析的模块个数为 4,实验测试分析的模块数为 2,记作:4+2;此时 SAM 有 4 个功能模块依赖 FEA 分析结果,产品设计的快速性较好。

(4) 如图 7(d)所示,FEA 分析的模块个数为 3,实验测试分析的模块数为 3,记作:3+3;此时 SAM 产品模块依赖 FEA 与实验测试分析的个数是相等的,产品设计的快速性较好。

(5) 如图 7(e)所示,FEA 分析的模块个数为 2,实验测试分析的模块数为 4,记作:2+4;此时 SAM 产品模块依赖 FEA 分析结果的个数为 2,产品设计的快速性下降。

(6) 如图 7(f)所示,FEA 分析的模块个数为 1,实验测试分析的模块数为 5,记作:1+5;此时 SAM 产品模块依赖 FEA 分析结果的个数为 1,产品设计的快速

性较差。

(7) 对于小型旋耕机 F-168 整机的试验模态分析,FEA 分析的模块个数为 0,实验测试分析的模块数为 6,记作:0+6;此时 SAM 产品完全依赖实验测试分析结果,产品设计的快速性最差。

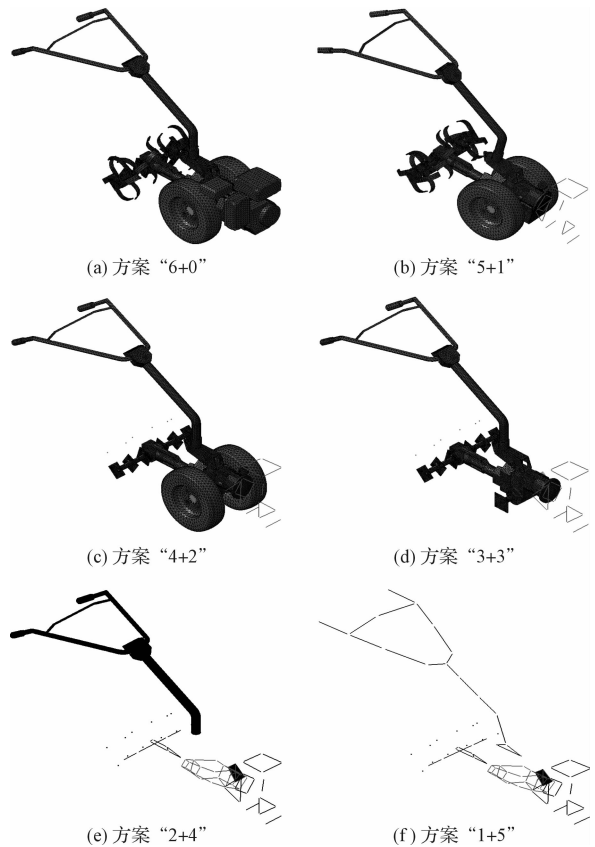


图 7 多种整机模态综合分析方案

本研究依据上述组合方案及其模态分析实现方法,得到每种组合的前 10 阶固有频率数据,如表 1 所示。

根据上面的分析可知,方案(0+6)完全依赖于实测分析结果,实际工作有效性是最高的,因此笔者以该方案为有效性基准,即其设计有效性比率为 100%。本研究根据表中所提供的数据,以实测频率为基准得到每种方案的各阶频率比值,然后取算术平均值,即获得该种方案模态综合的可信度分别为:70.07%、74.33%、84.79%、95.88%、97.25%、98.90%、100.00%。

根据小型农业作业机的有限元模态分析及现场模态测试可知,SAM 产品设计工作的可信度达到 95% 以上时即可满足产品设计要求。显然,后 4 种方案皆可满足有效性的要求,其中快速性最好的为方案 3+3。

表 1 7 种组合方案的前 10 阶固有频率

阶数	实验频率 f/Hz	6+0 组合 频率 f/Hz	5+1 组合 频率 f/Hz	4+2 组合 频率 f/Hz	3+3 组合 频率 f/Hz	2+4 组合 频率 f/Hz	1+5 组合 频率 f/Hz	0+6 组合 频率 f/Hz
1	14.58	10.03 (68.80%)	10.81 (74.12%)	12.35 (84.70%)	14.04 (96.33%)	14.17 (97.22%)	14.45 (99.12%)	14.58 (100%)
2	26.35	18.33 (69.58%)	19.51 (74.05%)	22.33 (84.75%)	25.31 (96.05%)	25.69 (97.48%)	25.96 (98.53%)	26.35 (100%)
3	39.71	27.90 (70.27%)	29.74 (74.89%)	33.75 (85.00%)	38.20 (96.19%)	37.96 (96.90%)	39.55 (99.59%)	39.71 (100%)
4	41.75	29.79 (71.35%)	31.31 (75.00%)	35.48 (84.98%)	40.08 (96.00%)	40.62 (97.30%)	41.16 (98.58%)	41.75 (100%)
5	53.53	37.49 (70.04%)	39.60 (73.98%)	44.91 (83.90%)	51.38 (95.98%)	52.13 (97.38%)	52.91 (98.84%)	53.53 (100%)
6	85.47	59.83 (70.00%)	63.25 (74.00%)	71.84 (84.05%)	82.04 (95.99%)	83.00 (97.11%)	83.63 (97.85%)	85.47 (100%)
7	96.19	67.31 (69.98%)	71.17 (73.99%)	81.02 (84.23%)	92.37 (96.03%)	93.48 (97.18%)	94.89 (98.65%)	96.19 (100%)
8	108.50	75.97 (70.02%)	80.53 (74.22%)	92.03 (84.82%)	104.29 (96.12%)	105.73 (97.45%)	107.5 (99.08%)	108.50 (100%)
9	116.04	81.38 (70.13%)	86.33 (74.40%)	98.24 (84.66%)	110.82 (95.55%)	112.79 (97.20%)	115.16 (99.24%)	116.04 (100%)
10	119.83	84.76 (70.73%)	89.45 (74.65%)	104.02 (86.81%)	115.71 (96.56%)	116.57 (97.28%)	119.25 (99.52%)	119.83 (100%)
模态综合的可信度		70.07%	74.33%	84.79%	95.88%	97.25%	98.90%	100.00%

4 结束语

本研究提出一种采用产品模块试验/有限元求解的混合模态进行小型农业作业机整机模态综合求解的方法,根据小农机的结构特征与工作模式,对其进行功能模块划分;并根据产品模块的模态试验或有限元模态分析结果,完成小型农业作业机产品整机动态性能的快速模态综合求解。整机试验模态综合求解结果证明,上述方法能够根据具体产品模块配置组合,快速有效地进行配置样机的模态求解,大大提高了产品配置设计效率。

参考文献 (References):

- 究现状及进展[J]. 火箭推进,2010,36(3):39-44.
- [5] 邱吉宝,王建民,谭志勇,等. 航天器结构动态优化设计仿真技术[J]. 强度与环境,2003,30(2):6-16.
- [6] 王乎懋,郭晓斌,李东敬,等. 罗茨鼓风机模态综合法动态特性分析[J]. 山东科技大学学报,2010,29(2):63-67.
- [7] DOEBLING S W, PETERSON L D, ALVIN K F. Estimation of reciprocal residual flexibility from experimental modal data[J]. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**,1996,34(8):1678-1685.
- [8] KOMATSU K, SANO M, SANBONGI S, et al. Experimental component mode synthesis applied to the solar array type structure[DB]. NASA Astrophysics Data System. 1988,89:24702.
- [9] BLACKWOOD G, VON F A H. Experimental component mode synthesis of structures with sloppy joints [C]//The 29th Structural Dynamics and Materials Conference. Williamsburg, VA:[s. n.],1988:1565-1575.
- [10] 杨家军,谢化斌,汤双清. 小型甘蔗收割机切割器结构动态设计[J]. 湖北工学院学报,2003,18(2):3-5.
- [11] 孙德鹏. 模态综合法和 ANSYS 在甘蔗收割机切割系统上的应用[J]. 农机化研究,2008(3):171-174.
- [1] 任建峰. 电子设备 PCB 组件的动态特性研究[J]. 机电工程技术,2010,39(12):101-105.
- [2] 童鲁海. 管壳式换热器的振动特性分析及模态试验[J]. 机电工程,2009,26(7):46-48.
- [3] 谭志勇,应祖光. 采用两类子结构模态综合理论的试验模态综合技术[J]. 强度与环境,1997(2):30-37.
- [4] 谭永华,杜飞平,陈建华,等. 航天器子结构模态综合法研

[编辑:李 辉]