

文章编号:1006-1355(2018)05-0220-05+233

某物联网机箱设备结构振动分析与减振研究

刘松涛, 刘 莹, 李鸿光, 李富才

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘要:物联网机箱设备作为物联网系统的核心部分,要求必须具备高可靠性,然而这些设备却经常工作在温度或振动条件恶劣的环境中。振动尤其是基础振动可能会导致触点松动、开路或其他接触问题,这些问题在系统故障原因中占很大的比例。由于机箱结构的复杂性,单个部件的振动分析并不能解决在系统工作中遇到的振动问题,因此,需要利用系统的模拟和实验来监测和增强结构的健康状况。首先利用有限元方法,从部件到系统依次进行动力学分析,计算某物联网机箱设备的固有频率、模态振型以及在系统级基础激励下的谐波响应,然后通过实验验证分析结果的有效性和准确性。通过仿真和实验,检测出整个系统的薄弱点,提出加强结构和减少振动的措施,并在仿真和实验两方面对其进行验证。结果表明,采取的措施有效降低了机箱设备的振动,提高了其安全性。

关键词:振动与波;物联网;机箱设备;振动分析;减振;模态阻尼

中图分类号:O422.6

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.05.039

Structural Vibration Analysis and Vibration Attenuation Study for Internet-of-things Chassis Devices

LIU Songtao, LIU Ying, LI Hongguang, LI Fucui

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University,
Shanghai 200240, China)

Abstract: As the core part of the Internet-of-Things (IoT) system, chassis devices require high reliability. Yet these devices often work in harsh thermal and vibration conditions. Vibration, especially the fundamental vibration, may cause loose contacts, open circuits, or some other contact problems, which occupy a large proportion of the system failure. Due to the complexity of the chassis structure, individual component vibration analysis is unlikely to solve the vibration problems encountered in the system. Therefore, systematic simulations and experiments are needed to monitor and enhance the health condition of the structure. In this paper, the finite element method is used firstly to analyze the dynamic performances of an IOT chassis device and its components. The natural frequencies, modals and harmonic response of the device under the system-level excitation are calculated. The validity and accuracy of the analysis results are verified by experiments. Through the simulation and experiment, the weak points of the whole system are detected, and the measures to strengthen the structure and reduce the vibration are put forward and verified by both simulation and experiment. The results show that the measures can reduce the vibration of the network equipment effectively, and its safety is improved.

Keywords: vibration and wave; internet of things (IoT); chassis device; vibration analysis; vibration attenuation; modal damping

随着物联网的快速发展,其应用已经涉及到智能控制、结构健康监测等多种领域^[1-3]。作为物联网系统的基本组成部分,机箱设备必须拥有数秒内能够路由数十亿个数据包的能力。连接这些在线设备并影响通信速度的网络质量决定了物联网的发

展。为了提高通信速度和网络质量,机箱设备通常必须放在现场,这意味着它们将暴露于前所未有的极端温度、湿度、腐蚀性烟雾和机械振动等条件下^[4]。在这些环境因素中,振动特别是基础振动可能导致触点松动、开路或其他接触问题,这些问题在系统故障原因中占很大比例。因此,需要系统级的仿真和实验来监测和增强物联网机箱设备的结构健康状况。

目前在焊接点、连接器、装配印刷电路板(PCBA)等许多方面对机箱内部器件的振动分析已经取得了许多成果^[5]。例如,F. X. Che等^[6]对倒装焊

收稿日期:2017-11-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11427801)

作者简介:刘松涛(1991-),男,河南省驻马店市人,硕士研究生,主要研究方向为机械系统减振降噪。

通信作者:李鸿光,男,教授,博士生导师。

E-mail: hgli@sjtu.edu.cn

点进行了振动疲劳实验和分析,并开发了一种准静态有限元分析方法,研究了焊点振动疲劳寿命预测中的应力应变行为。Bo Zhang等^[7]为采用3种芯片尺寸封装组装的标准PCBA板构建了有限元模型,并通过模态测试验证了分析结果。应该注意的是,在这些研究中讨论的有限元模型主要是整个系统的一部分,而一个系统作为许多部件的综合体,部件之间的特性相互影响,甚至部件间的结合面特性也会叠加到系统特性中。因此,在系统层面分析机箱设备的振动特性仍然是一项具有挑战性的研究任务。

本文对某物联网机箱设备进行系统级振动特性分析和减振研究。首先,利用有限元方法,从部件到系统依次进行了动力学分析,计算了系统级基础激励下该机箱设备的固有频率、模态振型和諧响应,然后通过实验验证了分析结果的有效性和准确性。通过仿真和实验,检测出整个系统的薄弱点,并分析振动的来源和传递路径,针对性地提出了加强结构和减少振动的措施,并在仿真和实验两方面对其进行了验证。结果表明,采取的措施有效降低了机箱设备的振动,提高了其安全性。

1 有限元分析

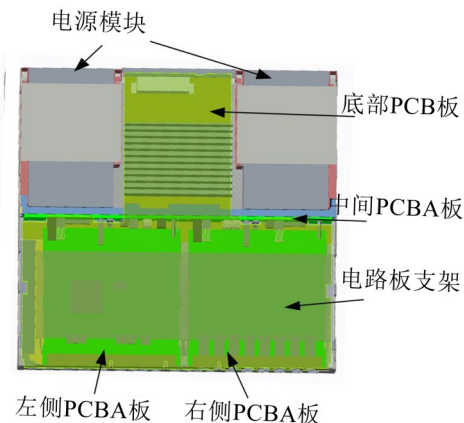
在本文中,针对此物联网机箱设备的有限元仿真在ANSYS Workbench中实现。简化后的机箱几何模型和划分后的网格如图1所示,机箱的尺寸为450 mm×450 mm×50 mm,主要由底板、骨架、左右两块电路板、电路板支架、电源模块和上机壳等六部分组成。为了更清楚地显示机箱内部的结构,在图1(a)中将上机壳隐藏,同时将电路板支架设置为半透明。在底板上固定有一块较大的T形PCBA板,在图中用深黄色显示;左右两块电路板穿过电路板支架与中间骨架相连,每块电路板都由PCBA板和背部的防火板组成,其中PCBA板用绿色显示,在测量

电路板的振动时主要测量的就是PCBA板。由于实验测量时要求激光束能直射到待测点,而左右两块PCBA板被上机壳和电路板支架遮挡,因此在机箱的上机壳上去掉了两个大的方孔对应的材料,如图1(b)所示,同时也在电路板支架上打了一系列的小孔。

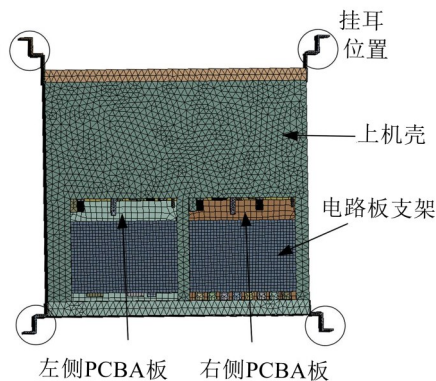
本文研究的是机箱装配体的振动特性和减振优化,但是由于机箱内部零件众多且接触情况复杂,如果直接进行装配体的有限元分析,不仅难以设置材料的参数,也容易设置错误的接触面参数。所以对于机箱的仿真分析,按照部件-半装配体-机箱整体的顺序逐步进行。首先通过对部件的分析,确定部件材料的参数;对部件的分析完成之后,逐步对部件进行装配分析,依次确定部件之间接触面的参数;将各个部件完全装配并全部确定接触参数之后,即得到可以代替实际机箱的分析模型。通过进行諧响应分析,找出机箱结构中振动剧烈的位置,分析振动的来源和传递路径,采取合理的优化措施进行减振,再进行仿真分析对减振措施进行验证。

在对机箱装配体进行分析时,用于固定机箱的四个挂耳的位置如图1(b)所示,挂耳的表面与固定装置绑定在一起,用来模拟边界条件。如果不考虑自动生成的接触元素,该模型中包含有286 400个节点、119 334个四面体网格和六面体网格。

在计算时各个组件的初始材料参数设置如表1所示。由于每个PCBA板都包含有芯片、散热片、连接器和防火钢板等零件,并不是由单一的材料组成,其实际的计算参数需要通过与实验的结果对比之后进行相应的调整。PCBA板通过螺钉和连接器固定在骨架上,为了方便计算,有限元模型中去掉螺钉和插针等细节特征,在ANSYS中把相应位置连接处两组件的表面绑定(bonded)在一起作为简化的接触条件。



(a) 机箱几何模型



(b) 网格划分和边界条件

图1 机箱设备的模型

表1 机箱组件初始材料参数设置

机箱组件	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
底板	2 000	26	0.28
支架	2 770	61	0.33
PCBA 板	3 300	25	0.28
骨架	7 850	200	0.3
上机壳	7 850	200	0.3

设置完各个参数之后进行模态分析计算,采用分块兰索斯法提取包含许多局部模态的前60阶模态。得到系统的固有频率和模态振型之后,为了确定在不同频率简谐载荷下各部分结构的变形,需要进行谐响应分析,分析的结果可用于预测结构的持续动力特性,帮助验证系统能否克服共振、疲劳及其他受迫振动等有害因素。谐响应分析可采用完全法、缩减法和模态叠加法,本文使用模态叠加法进行求解,扫描频率为30 Hz到300 Hz,在整个模型上施加0.5 g的基础加速度对其进行激励,激励方向为竖直向下,与水平机箱垂直,激励位置为整个机箱。

由于系统中不同阶振动的强弱程度不同,随着频率变化系统中有的接触时强时弱,导致其阻尼随之变化,因此在模型中设置单一的常值阻尼与现实情况不符。为了更好地模拟实验结果,有限元模型应用模态阻尼的假设,根据不同的模态设置不同的模态阻尼比,利用ANSYS中的MDAMP命令将模态阻尼比输入到分析模型中,前五阶模态的阻尼比分别为0.003 5、0.1、0.4、0.04和0.006。各模态阻尼比的取值通过仿真与实验结果的对比调整之后确定。

2 实验分析

为了验证前面分析的有限元模型,实验分别测试了各个部件、半装配体和机箱整体的固有频率和模态振型,以及机箱的谐响应,然后将实验结果与数值分析结果进行比较。图2和图3分别展示了实验的原理图和现场安装图。

被测机箱安装在刚性固定装置上,该刚性固定装置与电动振动台的平台相连,平台的平面与运动方向垂直。参考加速度计安装在固定装置上用以测量基座振动,并与电荷放大器相连。扫描激光测振仪的激光发生器固定在刚性框架上,从4米高处发出的激光束照射到被测点上,然后通过振动分析仪进行数据分析。

如前面所述,由于扫描激光测振仪测量的位置需要激光能照射到,为了测量设备内部两块PCBA板的振动情况,在PCBA板的支架上打一系列的孔,孔的位置分布及相应编号如图4所示。

在测量时,将机箱和刚性框架固定在水平台上,

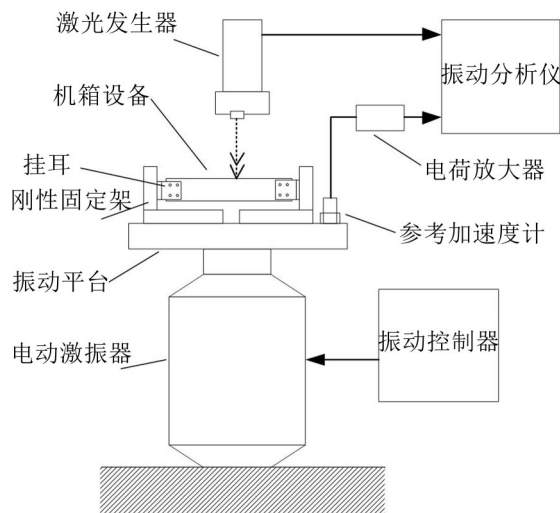


图2 实验装置示意图

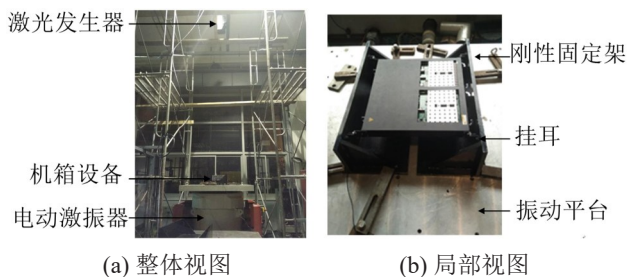


图3 实验装置的安装图

用幅值为0.5 g的正弦扫频信号激励水平平台,扫描的频率范围为30 Hz~300 Hz,扫描速率是1 Hz/s,可认为机箱受到的激励与水平平台受到的激励一致。以测量设备内部的两块PCBA板为例,扫描激光测振仪对图中的112个位置逐个进行扫描,然后根据实验结果计算出固有频率和模态振型。提取被测点的谐响应振幅和参考加速度计测得的平台的谐响应振幅,将二者之比作为振动放大倍数来反映振动的情况。利用图4中点111在扫描频率范围内的振动放大倍数曲线,将放大倍数曲线上的各个波峰与相应的频率振型与有限元中的结果进行对比,以检验有限元分析结果的准确性。

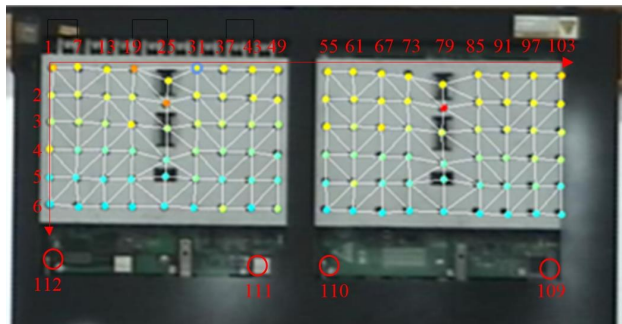


图4 PCBA板测量时孔的位置及相应编号

3 结果对比

在本节中,将有限元分析和实验的结果进行对

比。在整个研究过程中为了确定材料的参数和各个接触面之间的参数,依次对比了部件、半装配体和机箱整体的结果,而在减振时主要控制的就是PCBA板连接处的振动,因此限于篇幅及为了突出研究的重点,此处仅列出机箱内部左右电路板中的两块PCBA板的振动情况,选取这两块PCBA板的模态和PCBA板端部连接器处的点111的振动放大曲线进行对比。去除局部模态的前3阶固有频率、模态振型和振动放大倍数曲线如表2和图5所示。

从表2和图5可以看出,从仿真分析中提取的响应放大倍数与实验结果存在基本的相关性,实验与仿真计算得到的固有频率的差异不超过2%,模态振型基本一致,说明机箱设备的有限元模型设置是合理的。因此这个经过验证的有限元模型可用于对结构进行进一步优化。

表2 固有频率和仿真结果和实验结果对比

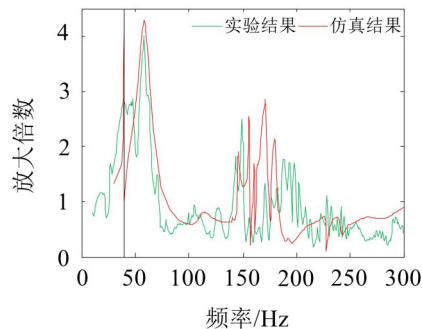
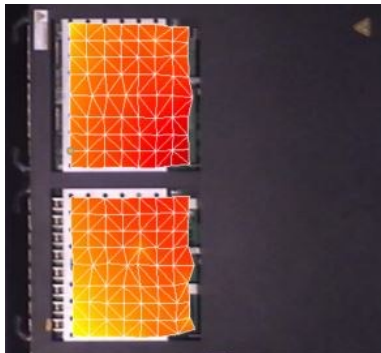
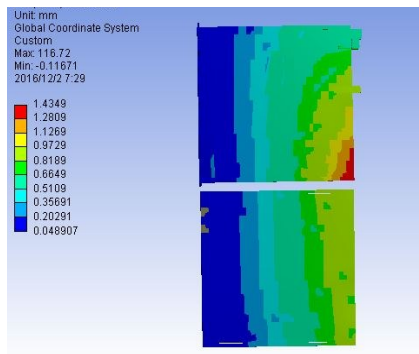
方法	阶数		
	1	2	3
仿真结果/Hz	39.613	59.12	102.45
实验结果/Hz	39.28	58.13	104.38
误差/(%)	0.85	1.70	1.85

4 优化措施

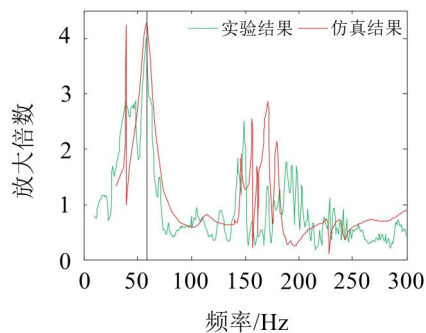
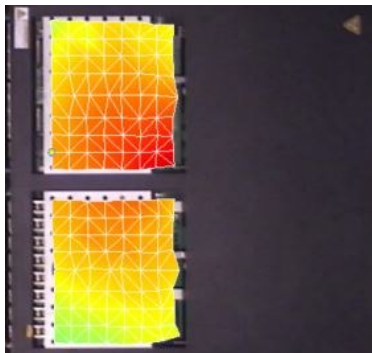
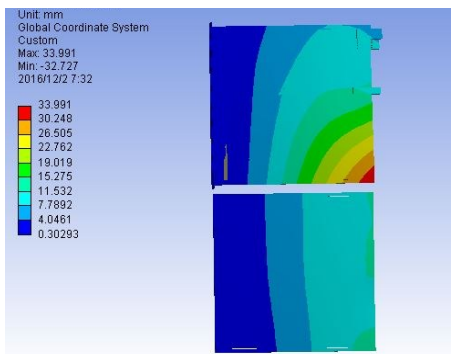
通过实验和有限元分析的结果,可以找出设备在不同固有频率下振动剧烈的位置,分别为上机壳中间部分、骨架一侧的中间部分和PCBA板端部远离连接器的部分,如图6所示。

结合设备内部的结构,分析振动的来源和传递路径,提出如下的减振措施:

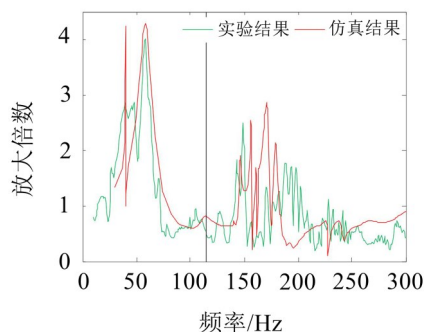
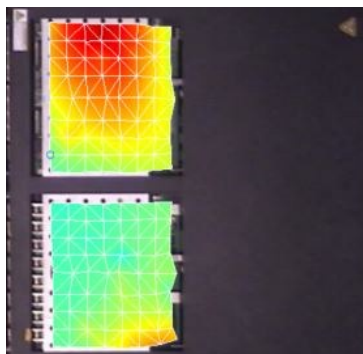
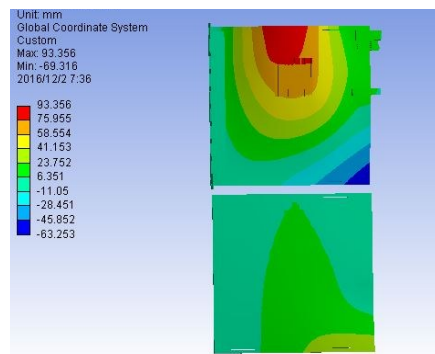
(1) 在上机壳表面贴上约束阻尼层。阻尼层由



(a) 点111第1阶振型与振动放大倍数对比



(b) 点111第2阶振型与振动放大倍数对比



(c) 点111第3阶振型与振动放大倍数对比

图5 PCBA板实验和仿真结果的对比

于其内部分子相互运动时阻力的作用会消耗大量的能量,使振动的能量耗散,起到减振的作用。(2)用螺钉连接机壳与中间骨架两侧以增加刚度。增加刚度可以提高结构的固有频率,进而提高设备的抗振抗冲击性能^[9]。(3)在PCBA板端部振动剧烈处增加导向销与中间骨架相连,其原理与措施(2)一致。但

是由于实验时无法添加导向销,只能进行有限元仿真进行计算对比,可在后续的设计中加以考虑,前两种优化措施如图7所示。

分别对每种措施进行实验和仿真分析,并提取对应点在优化前后的振动放大曲线进行对比,结果如图8所示。

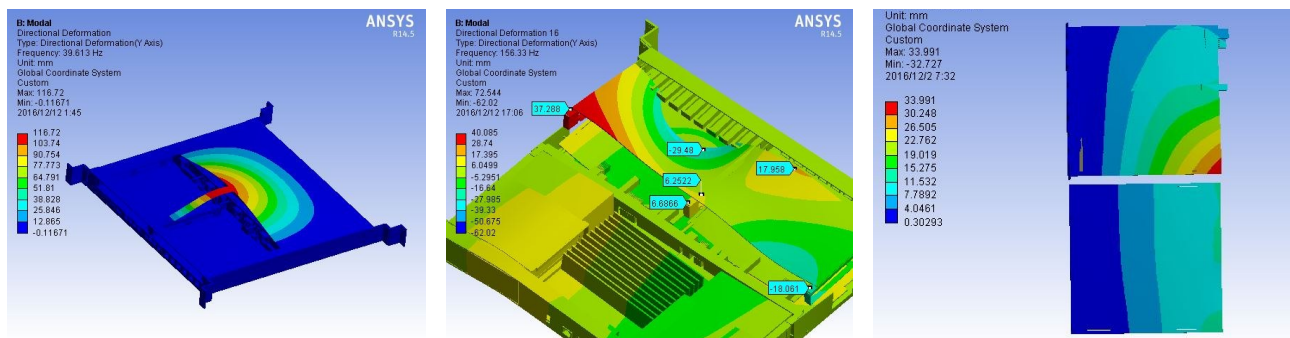


图6 整体模型在不同固有频率下的振动剧烈部位



(a) 在上机壳贴阻尼层



(b) 在中间骨架两侧增加螺钉

图7 仿真模型和实际结构中的优化措施

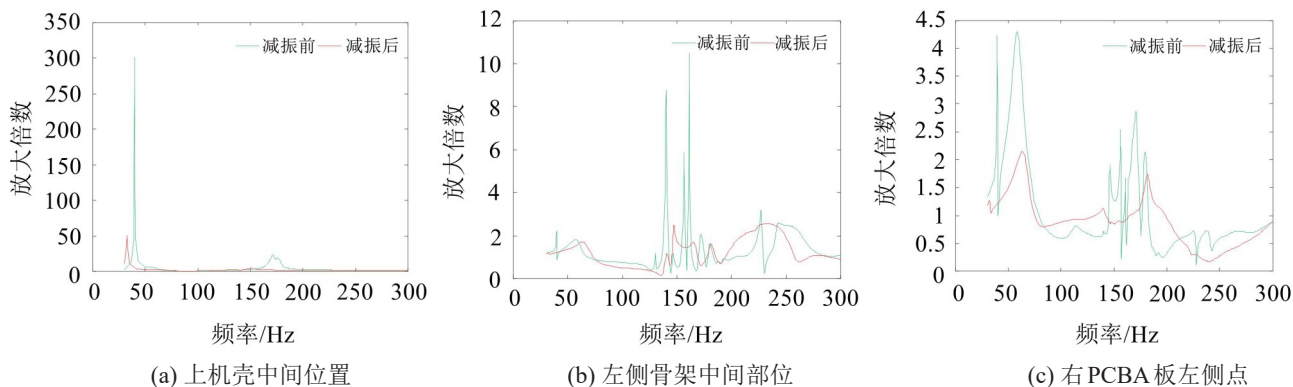


图8 优化前后的谱响应结果

图8中的结果表明,优化之前振动剧烈的部位在优化之后其振动情况被有效抑制,一阶谐振响应被极大削弱,大部分的高阶振动也有明显的降低。说明采取的减振优化措施是有效的,优化后的机箱设备安全性得到提高。

5 结语

为了监测和提高物联网机箱设备的结构健康状况,本文针对某型号的机箱进行了系统级的仿真和实验。从部件到装配体逐步进行仿真分析,通过与

实验结果的对比,不断调整完善模型内部的材料参数和接触条件设置,尽可能使其与实际的条件相符,最终完成一个能代替实际结构的仿真模型,并以此为基础进行减振研究。有限元模型通过固有频率、模态振型和谱响应与实验结果进行对比来进行验证。基于验证后的模型,检测出整个系统的薄弱点,通过分析振动的来源和传递路径,分别对不同的振动剧烈部位提出针对性的减振优化措施,并从实验和仿真两方面进行检验,两种方法都证明了减振方法的有效性。

(下转第233页)