

doi:10.16576/j.ISSN.1007-4414.2023.06.001

某机载 PCB 动态特性等效建模分析及实验验证*

舒文皓¹,高芳清^{1,2},李晨现¹

(1.西南交通大学力学与航空航天学院,四川成都 611756; 2.西南交通大学应用力学与结构安全四川省重点实验室,四川成都 611756)

摘要:针对某机载 PCB 上元器件的分布及其结构特点,提出一种基于元器件局部质量刚度等效的 PCB 动态特性等效建模方法。该方法以 PCB 基板的原始几何尺寸为基础,将元器件的刚度和质量等效地应用到基板和元器件的连接处,以模拟实际 PCB 上元器件对整体基板的影响。通过模态试验得到 PCB 基板和等效建模区域的杨氏模量和泊松比,然后将得到的等效模型用于有限元仿真,计算获得等效模型的模态频率和振型。最后将仿真结果与模态试验结果进行对比,以验证等效建模方法的可行性。结果表明,该等效建模方法在工程需求上满足要求,为以后类似的 PCB 产品快速等效建模以及获取动态特性提供了借鉴思路。

关键词:PCB;等效建模;模态试验;有限元仿真

中图分类号:TH17

文献标识码:A

文章编号:1007-4414(2023)06-0001-04

Equivalent Simulation Modeling Analysis on the Dynamic Characteristics of Airborne PCB

SHU Wen-hao¹, GAO Fang-qing^{1,2}, LI Chen-xian¹

(1.School of Mechanics and Aeronautics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China;

2.Key Laboratory of Applied Mechanics and Structural Safety of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

Abstract: According to the distribution and structural characteristics of components on an airborne PCB, an equivalent modeling method of PCB dynamic characteristics based on the local mass stiffness equivalence of components is proposed. This method is based on the original geometric dimensions of the PCB substrate. The stiffness and mass of the components are equivalent to the connection between the substrate and the components to equivalent the impact of the components on the overall substrate on the actual PCB. Based on the modal test, the Young's modulus and Poisson's ratio of the PCB substrate and the equivalent modeling area are obtained. Then the obtained equivalent model is used in the finite element simulation to calculate the modal frequency and mode shape of the numerical calculation of the equivalent model; and the results are compared with the modal test results. The results show that the equivalent modeling method meets the engineering requirements, and it provides a reference idea for rapid equivalent modeling to obtain dynamic characteristics of the similar PCB products in the future.

Key words: PCB; equivalent modeling; modal test; finite element simulation

0 引言

印制电路板(Printed Circuit Board,简称 PCB)在机载环境下易受环境振动影响,从而影响 PCB 的工作性能,严重时会造成 PCB 出现功能故障,长期振动环境会缩短其工作寿命^[1]。因此,把握 PCB 的动态性能对其设计、使用、功能保持、寿命保护等方面均具有不可忽视的重要性。而 PCB 材料的复合性、电子元件布局的复杂性使结构精细建模计算分析模拟比较困难。因此,在电路板的初期设计阶段,使用等效建模方法具有实用性、必要性、高效性。等效建模分析快速、简洁,可以较为精确把握低阶振动模态的特点,能够获取电路板的主要振动属性和相关特征参数,对动力学性能的前期或初期设计更加有利。

基于有限元方法建立 PCB 的结构动态特性分析模型是一种常用的方法^[2]。Pitarresi 等^[3]提出了五种有限元建模方法,王红芳等^[4]对这五种方法进行了对比分析。这五种建模方法的频率计算较为准确,但是参数获取难度较大。Amy 等^[5-6]基于元器件质量和刚度等效建立了航空电子设备的等效模型,并通过该等效模型预测了其振动响应。刘孝保、杜平安等^[7-8]基于平均等效思想构建了全局等效建模方法,但该方法对于质量刚度分布差距较大的 PCB 计算结果不够理想。胡超等^[9]建立了 PCB 有限元等效模型,并对其进行了冲击响应和随机振动响应仿真分析。柴国栋等^[10]基于结构方法对某大型电子设备 PCB 进行子结构建模,该方法大大节约了计算时间。

* 收稿日期:2023-04-19

基金项目:工信部基金子项目:电子产品板级结构振动耐久寿命仿真方法研究(编号: MJZ-2018-S-51)。

作者简介:舒文皓(1998-),男,四川广安人,硕士研究生,研究方向:结构动力学。

通信作者:高芳清(1969-),男,湖北孝感人,副教授,研究方向:结构动力学。

汤贺鑫等^[11]基于模态试验对某车载热像仪主处理板建立了动态特性等效模型,虽然此等效模型的计算结果与试验吻合,但模型较为复杂。

笔者建立了某机载 PCB 的有限元等效模型。根据其元器件的分布以及结构特点,提出一种基于元器件局部质量刚度等效的 PCB 动态特性等效建模方法。通过约束状态下的电路板模态试验得到 PCB 基板和等效建模区域的杨氏模量和泊松比,再将获取的等效模型参数用于有限元仿真,并与模态试验结果进行对比,证明该等效方法的正确性。

1 PCB 板动态特性等效模型

1.1 等效方法概述

PCB 板等效建模方法是通过将元器件的刚度和质量等效至基板和元器件的连接处来等效实际 PCB 板上元器件对整体基板的影响。具体内容是通过增加器件连接处基板的杨氏模量和密度来模拟连接处的物理效应。而 EMRS(Equivalent Modeling Regions, 局部等效建模区域)的弹性模量和密度的确定是这种建模方法的关键。

此次分析的 PCB 为某机载座椅弹射装置的主处理电路板,如图 1 所示。基板的主要尺寸为 129 mm×76 mm×2 mm,在基板上附着有多种功能芯片和表面封装器件以及大量的电容、电感等部件。为简化建模并保证计算结果的准确性,在考虑主处理板上主要元器件刚度和质量分布对基板的影响的同时忽略尺寸较小的贴片电阻器等元器件的影响,从而建立等效模型。将整个主处理版等效为尺寸大小与基板相同的光板,将尺寸较大的芯片和表面封装器件的质量刚度等效至相同尺寸的基板区域并作为单独的 EMRS;将电容、二极管等数量众多但分布集中的器件的刚度和质量等效至其分布集中的基本区域并作为集中的 EMRS。其局部等效的几何模型如图 2 所示,6 个主要的元器件中有 2 个元器件相同,因此可以处理为 5 个 EMRS,集中器件可以处理为单独的 EMRS,共有 6 种 EMRS。等效方法保证了电路板上主要元器件和分布集中元器件的基本尺寸的一致性。一般来说 PCB 板结构的动态性能评价指标为其固有频率,因此 PCB 板的等效模型需保证等效模型的固有频率与 PCB 板模态试验相等。基于以上原则,等效模型的数学模型可表示为:

$$f(V_b, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6; E_b, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6; \rho_b, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6, \nu_b) \approx f_0 \quad (1)$$

式中: f 为固有频率; V 为区域尺寸; E 为材料杨氏模量; ρ 为材料密度;下标 b 表示主处理板基板模型;下标 1、2、3、4、5、6 表示图 2 中的 EMRS 模型,下标 0 表示试验模态数据。

式(1)中,材料的密度计算为:

$$\rho_i = M_i / V_i \quad (2)$$

式中: M_i 表示等效区域和基板的质量。当 $i=b$ 时, M 表示基板的质量,它可以通过对不含元器件的裸板称重得到,不含元器件的电路板如图 3 所示。当 $i=1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时,需要对 EMRS 区域的元器件称重,并与该区域的基板质量相加得到等效质量。

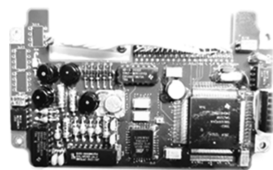


图 1 机载印制电路板实物图

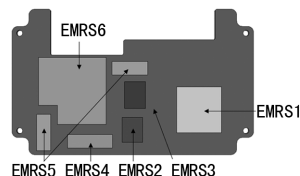


图 2 机载印制电路板等效模型

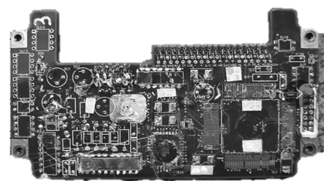


图 3 不含元器件电路基板实物图

经过整理计算得到基板和各 EMRS 的密度相对于 PCB 基板材料的放大倍数,结果如表 1 所列。

表 1 基板和 EMRS 等效密度 / (kg/m³)

名称	密度 ρ	放大倍数
PCB	2 400	1.00
EMRS1	8 056	3.36
EMRS2	6 329	2.64
EMRS3	6 526	2.72
EMRS4	7 481	3.12
EMRS5	8 337	3.47
EMRS6	5 205	2.17

由此,式(1)表达式可以简化为:

$$f(E_b, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6; \nu_b) \approx f_0 \quad (3)$$

为计算等效模型的固有频率,还需要得到 PCB 基板的杨氏模量和泊松比以及 EMRS 区域的等效杨氏模量。

1.2 基于模态试验 PCB 基板的杨氏模量和泊松比推导

为获取等效模型基板的杨氏模量和泊松比的真实值,需要根据模态试验的结果求得基板的物理参数。首先将 PCB 基板材料当成各项同性材料处理,对图 2 不含元器件的 PCB 基板进行实际约束边界条件下的模态试验,使用约束工装固定不含元器件 PCB 基板,如图 4 所示。使用自动力锤敲击图 4 中的

固定点,通过非接触式激光测振仪获取基板平面各点的响应,测试安装图如图5所示。对测量的锤击力和速度响应之间的频率响应函数进行曲线拟合,得到PCB基板的试验模态参数,试验获取的模态频率结果如表2所列。

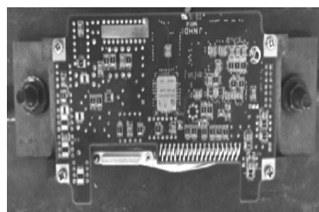


图4 PCB基板约束安装图 图5 PCB基板约束模态试验测试安装图

表2 约束模态条件下PCB基板前6阶模态频率 /Hz

模态阶数	频率	模态阶数	频率
1	354.69	4	1 410.94
2	632.81	5	1 798.44
3	998.52	6	2 178.32

通过拟合模态试验得到各阶固有频率,从而得到对应的杨氏模量,如式(4)所示:

$$y = \sum_{i=1}^6 \left[\frac{(E_i)_b - E_b}{(E_i)_b} \right] \quad (4)$$

式中:\$(E_i)_b\$为拟合第\$i\$阶固有频率得到的杨氏模量;\$E_b\$为考虑拟合6阶固有频率得到的PCB基板杨氏模量。

根据最小二乘法,令式(4)取得最小值,则需要得到:

$$\frac{\partial y}{\partial E_b} = 2 \sum_{i=1}^6 \frac{E_b - (E_i)_b}{(E_i)_b} = 0 \quad (5)$$

由式(5)可得,考虑6阶模态试验的PCB基板杨氏模量为:

$$E_b = \frac{\prod_{j=1}^6 (E_j)_b}{\sum_{i=1}^6 \frac{\prod_{j=1}^6 (E_j)_b}{(E_i)_b}} \quad (6)$$

同样得到6阶模态试验的PCB基板泊松比为:

$$\nu_b = \frac{\prod_{j=1}^6 (\nu_j)_b}{\sum_{i=1}^6 \frac{\prod_{j=1}^6 (\nu_j)_b}{(\nu_i)_b}} \quad (7)$$

根据PCB基板模态试验和式(6)、(7)推导可得PCB基板真实的杨氏模量和泊松比分别为19.5 GPa

和0.44。

将得到的PCB基板杨氏模量和泊松比代入基板有限元模型中,并通过有限元软件求解。PCB基板有限元模型采用与原PCB板基板相同尺寸大小的光板建立,选用壳单元作为基本有限元单元,厚度为2 mm,如图6所示。



图6 PCB基板有限元模型

求解采用的网格为四边形网格,最终网格单元数为20 234个,并且在计算前进行了网格无关性验证,将网格单元数增至原来的2倍左右,前6阶频率结果偏差在1%以内。经过计算得到约束边界下的PCB基板前6阶模态频率结果,并与约束模态试验结果进行对比,如表3所列。

表3 PCB基板试验和数值计算前6阶模态

模态阶数	试验频率/Hz	计算频率/Hz	误差/%
1	354.69	348.53	-1.74
2	632.81	633.11	0.05
3	998.52	998.24	-0.03
4	1 410.94	1 430.12	1.30
5	1 798.44	1 796.73	-0.10
6	2 178.32	2 112.81	-3.10

从表4可以看出:在约束模态下,将模态试验获得的PCB基板杨氏模量和泊松比带入数值计算后的结果与试验结果相比,前6阶固有频率的相对误差最高为3.1%,符合工程误差范围内,因此可以认为得到的PCB基板杨氏模量和泊松比具有合理性,可以带入等效模型计算。

1.3 基于模态试验EMRS等效杨氏模量推导

为获取EMRS等效杨氏模量,需要根据整体PCB模态试验的结果拟合前6阶模态频率得到。

同样将EMRS当成各项同性处理,对图1中的PCB板进行实际约束边界条件下的模态试验,过程和不含元器件的PCB基板试验相同。得到的含元器件的PCB前6阶固有频率如表4所列。

表4 PCB前六阶模态频率 /Hz

模态阶数	频率	模态阶数	频率
1	320.31	4	1 532.81
2	718.81	5	1 723.64
3	962.52	6	2 324.31

通过拟合模态试验得到各阶固有频率,从而得到各部分的EMRS对应的等效杨氏模量,其等效杨氏模量和相对于PCB基板材料的放大倍数如表5所列。

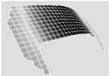

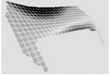

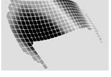







表5 EMRS 等效杨氏模量

名称	杨氏模量/GPa	放大倍数
PCB	19.5	1.00
EMRS1	86.9	4.46
EMRS2	76.9	3.94
EMRS3	78.8	4.04
EMRS4	80.6	4.13
EMRS5	84.2	4.32
EMRS6	68.1	3.49

2 等效建模仿真及结果分析

将表1、3、6的PCB基板杨氏模量以及EMRS等效杨氏模量和泊松比带入图2所示的有限元模型进行计算,并与PCB模态试验结果进行对比,结果如表6所列。

表6 约束条件下模态试验与等效模型计算的PCB前6阶模态

模态阶数	频率/Hz	误差/%	试验模态振型图	等效模型振型图
1阶	320.31vs 311.33	2.88		
2阶	718.81vs 690.53	4.10		
3阶	962.52vs 955.73	0.71		
4阶	1 532.81vs 1 460.20	4.97		
5阶	1 723.61vs 1 789.20	-3.67		
6阶	2 324.31vs 2 276.10	2.12		

从表6可以看出:在约束模态下,运用等效建模方法仿真计算得到的模态频率与试验结果相比,前6阶固有频率的相对误差最高为4.97%,符合工程误差范围内。且由表6可知,数值仿真计算和模态试验得

出的振型吻合较好,因此通过等效建模方法获取PCB的结构动态特性是可行的。

3 结语

根据某机载PCB上元器件的分布以及其结构特点,提出一种基于元器件局部质量刚度等效的PCB动态特性等效建模方法。该方法通过增加器件连接处基板的杨氏模量和密度来模拟连接处的物理效应。利用PCB基板约束模态试验以及最小二乘法得出PCB基板杨氏模量和泊松比;然后同样利用PCB整体模态试验得出等效建模区域的等效杨氏模量和泊松比;将得到的等效建模参数带入有限元模型中计算并与PCB模态试验结果进行对比;结果表明该等效方法满足实际工程需求,为以后类似的PCB产品快速建模以及获取动态特性提供参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 霍曼,邓中卫.国外军用飞机航空电子系统发展趋势[J].航空电子技术,2004,35(4):5-10.
- [2] 杨强,杜平安,周元,等.PCB板动态分析等效建模方法[J].电子科技大学学报,2015,44(3):475-480.
- [3] Pitarresi J M, Primavera A A. Comparison of Modeling Techniques for the Vibration Analysis of Printed Circuit Cards[J]. Journal of Electronic Packaging, 1992, 114(4):378.
- [4] 王红芳,赵玫.基于动态特性的印制板结构改进[J].振动与冲击,2000,19(1):49-51.
- [5] Amy R A, Aglietti G S, Richardson G. Simplified modelling of printed circuit boards for spacecraft applications[J]. Acta Astronautica, 2009, 65(1-2):192-201.
- [6] Amy R A, Aglietti G S, Richardson G. Sensitivity analysis of simplified Printed Circuit Board finite element models[J]. Microelectronics Reliability, 2009, 49(7):791-799.
- [7] 刘孝保,杜平安,夏汉良,等.一种面向动态分析的PCB板等效建模方法[J].仪器仪表学报,2011,32(4):863-869.
- [8] 杜平安,刘建涛,刘孝保.电子器件振动特性有限元模型参数的等效计算方法[J].电子学报,2010,38(8):1867-1873.
- [9] 胡超,刘芳,周嘉诚,等.基于模态分析的印刷电路板力学性能研究[J].电子元件与材料,2021,40(6):597-602.
- [10] 柴国栋,王顺慧,柴国强.基于子结构法的电子设备模态分析[J].机械强度,2015,37(4):790-792.
- [11] 汤贺鑫,张巍,管照阳,等.基于模态试验的PCB板结构动态性能的等效建模[J].红外技术,2022,44(3):225-230.