

· 机械电子工程 ·

面向元器件的PCB板布局优化方法

刘孝保, 杜平安

(电子科技大学机械电子工程学院 成都 611731)

【摘要】利用自由度凝聚方法和模态综合法,建立了一种面向元器件的PCB性能分析方法,并在此基础上建立了面向元器件的PCB布局优化方法。该优化方法面向元器件,可大大缩减结构分析自由度的数量,并能充分体现元器件的重用性。另外,在优化模型的求解和实现上,考虑元器件间的几何干涉提出了改进的遗传算法,并利用面向对象ANSYS二次开发方法开发了优化软件。通过优化算例结果表明该优化方法是有效的和可行的。

关键词 元器件; 自由度凝聚; 动态性能; 布局优化; 模态综合法

中图分类号 TP183

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.04.032

A Layout Optimization Method of Dynamical Property Oriented by Parts and Component of Electronic Equipment

LIU Xiao-bao and DU Ping-an

(School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract Based on condensation method of degree of freedom and component mode synthesis method, a component-oriented printed circuit board (PCB) dynamical property analysis method is built up, and then, a component-oriented PCB layout optimization method is presented. The optimum calculation program is developed based on the object-oriented secondary development method of ANSYS and modified genetic algorithm considering geometric interferences between components. Examples show this optimization method is a good way and available in engineering projects.

Key words component of electronic part and equipment; condensation of degree of freedom; dynamical property; layout optimization; method of component mode synthesis

PCB板是电子设备中的一种常见结构,通常作为元器件的安装支撑平台。元器件在PCB板上的布局情况将影响结构的刚度分布和质量分布,进而改变结构的动态性能,因此可通过优化电子元器件的布局提高PCB板结构的动态性能。PCB板布局优化的目的是通过改变元器件的安装位置来改善其整体动态性能^[1-3]。

本文利用自由度凝聚技术和模态综合方法,建立面向元器件的PCB板动态性能分析方法,并进而建立面向元器件的布局优化方法。在优化模型的求解上,考虑元器件之间的几何干涉问题,提出改进的遗传算法,并利用面向对象思想,结合ANSYS二次开发技术开发该优化方法的软件。

1 面向元器件的PCB板动态性能分析方法

元器件具有体积小、结构复杂、材料种类众多

的特点,且PCB通常由成百上千甚至更多的元器件构成,因此进行PCB板总体结构动态性能分析时将面临如下问题:1) 结构分析模型巨大,需耗费大量机时;2) 元器件的通用性得不到利用,即使相同的元器件,每次分析都必须重新离散和计算;3) 并行计算工作实施较为困难。

为此,利用自由度凝聚技术和模态综合原理,本文建立面向元器件的PCB动态性能分析方法。如图1所示,PCB板组件结构由元器件 S_1 和PCB板 p 构成。

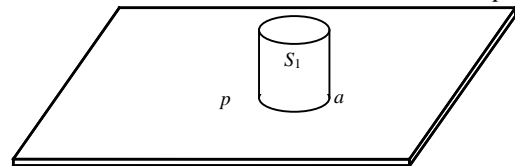


图1 PCB板组件示意图

首先对元器件 S_1 进行有限元离散,然后进行模态分析。根据模态截断原理^[4-5]和模态叠加原理^[6],

收稿日期: 2010-03-25; 修回日期: 2011-04-01

基金项目: 部级预研基金

作者简介: 刘孝保(1978-),男,博士,主要从事结构仿真优化方面的研究。

提取结构少数低阶模态(前 k 阶), 则元器件 S_1 因自身振动而引起的节点动力位移为:

$$\mathbf{u}_0^I = \sum_{i=1}^k \phi_i \mathbf{q}_i = \Phi_k \mathbf{q}_k \quad (1)$$

式中, Φ_k 为元器件 S_1 的主模态, \mathbf{q}_k 为广义模态坐标; \mathbf{u}_0^I 为由自身振动引起的动力位移。由元器件 S_1 连接界面引起的元器件结构内部节点动力位移为:

$$\mathbf{u}_B^I = \Phi_c \mathbf{u}_B \quad (2)$$

式中, Φ_c 为连接界面的约束模态; \mathbf{u}_B 为连接界面的动力位移。

根据运动学原理^[5], 元器件 S_1 的运动包括自身振动和因附加边界所引起的牵连运动, 即:

$$\mathbf{u}^I = \mathbf{u}_0^I + \mathbf{u}_B^I \quad (3)$$

因此, 考虑附加边界所引起的位移, 元器件 S_1 的动力位移为:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \mathbf{u}^I \\ \mathbf{u}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_k & \Phi_c \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_k \\ \mathbf{u}_B \end{bmatrix} = \mathbf{T} \mathbf{q} \quad (4)$$

式中, \mathbf{T} 为变换矩阵; \mathbf{q} 为广义坐标。

当系统处于无阻尼自由振动时, 元器件 S_1 在物理坐标下的运动方程为:

$$\mathbf{K} \mathbf{u} + \mathbf{M} \ddot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}^B \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, \mathbf{K} 、 \mathbf{M} 分别为元器件 S_1 的刚度阵和质量阵; \mathbf{u} 为物理位移向量; \mathbf{f}^B 为连接界面载荷向量。将式(4)代入式(5), 并左乘 \mathbf{T}^T , 可得元器件 S_1 在模态坐标下的运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{K}}^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \mathbf{u}^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \tilde{\mathbf{M}}^{IB} \\ \tilde{\mathbf{M}}^{BI} & \tilde{\mathbf{M}}^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{u}}^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}^B \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{M}}^{IB} &= \Phi_c^T (\mathbf{M}^{II} \Phi_c + \mathbf{M}^{IB}) \\ \tilde{\mathbf{M}}^{BI} &= (\Phi_c^T \mathbf{M}^{II} + \mathbf{M}^{BI}) \Phi_c \\ \tilde{\mathbf{M}}^{BB} &= \mathbf{M}^{BB} + \Phi_c^T \mathbf{M}^{II} \Phi_c + \Phi_c^T \mathbf{M}^{IB} + \mathbf{M}^{BI} \Phi_c \\ \tilde{\mathbf{K}}^{BB} &= \mathbf{K}^{BB} + \mathbf{K}^{BI} \Phi_c \end{aligned}$$

设元器件 S_1 有 n_0 个自由度, 连接界面具有 n_B 个自由度, 提取元器件的前 k 阶主模态, 经模态截断后的自由度为 n_k 。经过坐标变换后元器件的自由度数 $n = n_k + n_B$ 。由于模态截断, $n_k \ll n_0$ 且 $n_B \ll n_0$, 因此 $n \ll n_0$, 从而可达到自由度凝聚的目的。

2 面向元器件的PCB板动态性能布局优化方法

2.1 设计变量

对于PCB板 p 的布局优化, 设计变量为元器件的

安装位置参数 $\mathbf{r}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots)$, $\mathbf{r}_i = [x \ y \ \theta]$, x 、 y 、 θ 分别表示元器件的 x 、 y 方向坐标和转角。

2.2 目标函数

结构动态性能分析中最关键的是模态频率, 特别是低阶模态频率^[7]。本文以低阶模态频率 $\omega(\mathbf{r})$ 作为目标函数。

经自由度凝聚后元器件 S_1 、PCB板的运动方程分别为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_1^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{u}_1^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{M}_1^{IB} \\ \mathbf{M}_1^{BI} & \mathbf{M}_1^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{u}}_1^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_1^B \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_a^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{u}_a^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & \mathbf{M}_a^{IB} \\ \mathbf{M}_a^{BI} & \mathbf{M}_a^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{u}}_a^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_a^B \end{bmatrix} \quad (8)$$

PCB板与元器件连接边界 \mathbf{u}_a^B 是设计变量的函数, 因此连接界面 a 上的位移协调条件为:

$$\mathbf{u}_1^B = \mathbf{u}_a^B(\mathbf{r}) \quad (9)$$

利用元器件连接界面独立坐标和模态坐标组成整体结构的广义坐标系 \mathbf{q} 为:

$$\mathbf{q} = (\mathbf{q}_1^T \ \mathbf{q}_2^T \ (\mathbf{u}_a^B)^T)^T = (\mathbf{q}_k^T \ (\mathbf{u}_a^B)^T)^T \quad (10)$$

利用式(10)所定义的广义坐标系和位移协调条件式(9), 按照有限元“对号入座”方法将式(7)和式(8)进行组装, 可得整体结构运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{M}_1^{IB} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_2 & \mathbf{M}_a^{IB} \\ \mathbf{M}_1^{BI} & \mathbf{M}_a^{BI} & \mathbf{M}_a^{BB} + \mathbf{M}_1^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_1 \\ \dot{\mathbf{q}}_2 \\ \dot{\mathbf{u}}_a^B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{K}_a^{BB} + \mathbf{K}_1^{BB} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1 \\ \mathbf{q}_2 \\ \mathbf{u}_a^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{f}_a^B + \mathbf{f}_1^B \end{bmatrix} \quad (11)$$

利用连接界面上力的平衡关系, 可得:

$$\mathbf{f}_1^B + \mathbf{f}_a^B = \mathbf{0} \quad (12)$$

因此, 组装后的模型同样是无阻尼自由振动。通过式(11)可求解出整体结构的模态频率, 即目标函数 $\omega(\mathbf{r})$ 。

3 基于遗传算法的优化实现方法

3.1 基于干涉约束的遗传算法

遗传算法是一种自适应全局概率搜索算法^[8-10], 其通用计算流程如图2所示。

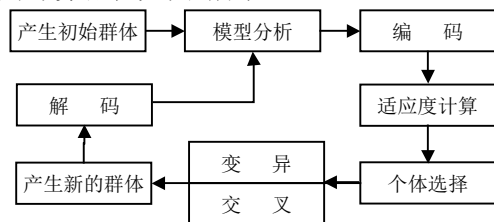


图2 遗传算法的计算流程

首先通过随机的方式产生初始种群(设计变量的初始值), 并对其进行编码和模型分析, 然后进行适应度计算, 保留高适应度种子, 淘汰低适应度种子, 最后通过交叉和变异的方法产生新的种子以保持种群数量稳定。循环进行上述过程; 通过上述一代代的“优胜劣汰”, 最后获得全局最优解。

由于元器件之间存在几何干涉, 因此需要对上述遗传算法进行修改。改进后的遗传算法在产生种群时, 需要计算元器件之间是否存在几何干涉; 如果存在干涉, 则需要重新交叉变异产生新的种子。修改后的流程如图3所示。

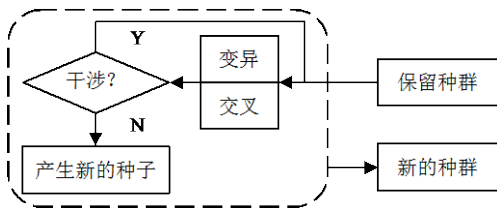


图3 改进遗传算法新种群产生流程

3.2 面向对象的ANSYS二次开发编程实现方法

本文利用ANSYS的APDL和C#进行联合编程, 既使程序具有较大的灵活性, 又能充分利用成熟的有限元分析资源, 程序结构如图4所示。

优化模型的建立和求解都利用ANSYS的APDL完成^[11], 同时利用文本文件进行APDL和C#之间的参数传递。由C#编程控制ANSYS的APDL设计变量输入参数, 并读取ANSYS计算结果, 然后产生输出下一次迭代的设计变量参数。通过上述循环迭代过程, 最终实现优化问题的求解。

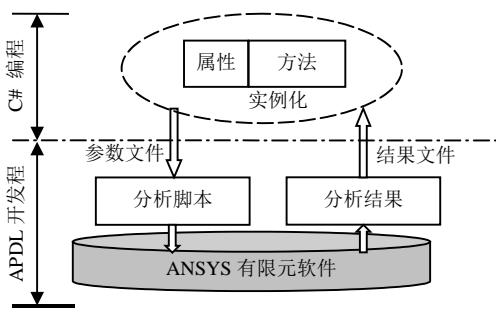


图4 面向对象ANSYS编程结构框图

4 优化分析实例

4.1 分析实例1

为验证面向元器件的布局优化模型的可用性和可行性, 本文以图5所示的电路板为例, 进行优化设计分析。

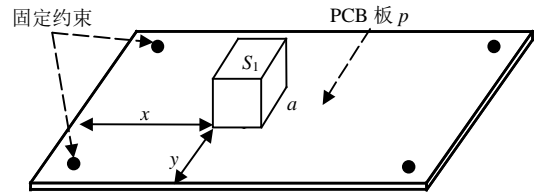


图5 优化结构示意图

优化结构由PCB板 p 和元器件 S_1 组成, 材料和尺寸参数如表1所示。

表1 结构材料和尺寸参数

参数名称	p	S_1
结构尺寸/m	0.2×0.1×0.002	0.02×0.02×0.02
弹性模量 $E/\text{Pa} \times 10^{10}$	2.5	7
泊松比 ν	0.29	0.33
密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	1 971	2 650.5

经过自由度凝聚后, 结构自由度对比如表2所示。

表2 结构自由度对比

结构名称	自由度	
	凝聚前	凝聚后
PCB板 p	861×6	10
元器件 S_1	125×3	5
连接界面	25×3	25×3
整体结构	47 544	90

从表2中可以看出, 经过自由度凝聚, 整体结构的自由度数量大为减少, 从而简化了结构优化模型的自由度数量。

经本文设计的布局优化软件分析, 可得到最优解为: $x=0.09$, $y=0$ 和 $x=0.09$, $y=0.08$ 。为便于结果对比, 利用ANSYS二次开发, 对结构进行离散穷举分析, 结构一阶模态频率与优化变量 x 、 y 的关系如图6所示。

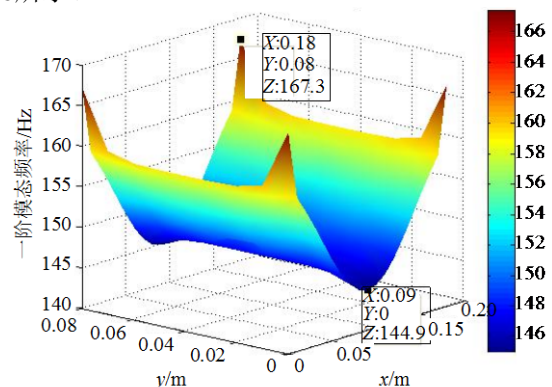


图6 模态频率与 x 、 y 的关系图

从图6中可以看出, 模态频率最小出现在板的两个长边中部($x=0.09$, $y=0$)和($x=0.09$, $y=0.08$), 即当元器件位于结构的中部侧边时, 获得最优解, 与布局优化计算结果完全吻合。

4.2 分析实例2

为验证多元器件的布局优化, 本文采用与实例1相同的模型和材料参数, 并在实例1的基础上增加元器件 S_2 , 且 S_2 的模型参数和元器件 S_1 相同。因此, 优化模型变成了一个具有4个设计变量(x_1, y_1, x_2, y_2)的布局优化模型, 如图7所示。

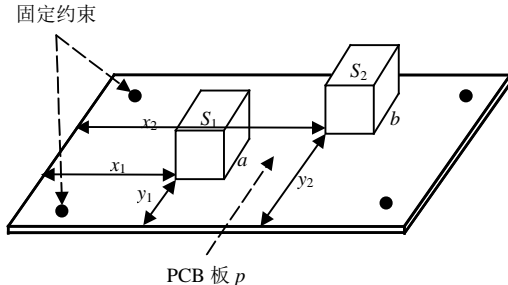


图7 优化结构示意图2

经离散和组装后, 利用改进后的遗传算法计算获得该模型的优化解为($x_1=0.09, y_1=0, x_2=0.09, y_2=0.08$)和($x_1=0.09, y_1=0.08, x_2=0.09, y_2=0$), 即当元器件分别位于结构的中部侧边时, 获得最优解。因为上述两处是结构最薄弱之处, 所以在其上放置元器件为最优位置。

5 结论

本文根据自由度凝聚技术和模态综合方法建立了面向元器件的PCB板布局优化方法。该优化方法面向元器件, 充分体现了元器件结构计算结果的重要性, 同时也大大缩减了优化模型的自由度数量。在优化模型的求解上, 考虑元器件之间的干涉问题, 提出了改进的遗传算法。最后通过两个优化实例证明了该布局优化方法的正确性和可行性。

参考文献

- [1] 李晓明, 高泽溪, 吕善伟. 电路板上电子元件位置的优化[J]. 电子学报, 1999, 27(7): 76-78.
LI Xiao-ming, GAO Ze-xi, LÜ Shan-wei. Optimal placement of electronic components in electronic board[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(7): 76-78.
- [2] 王周緬, 马良. PCB布线的元胞蚂蚁算法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2007, 43(2): 170-174.

- WANG Zhou-mian, MA Liang. Application of cellular ant colony optimization to pcb routing[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2007, 43(2): 170-174.
- [3] 朱继元, 周德俭, 吴兆华. 板级电路振动分析及元器件布局优化技术研究[J]. 电子机械工程, 2007, 23(1): 1-4.
ZHU Ji-yuan, ZHOU De-jian, WU Zhao-hua. A study on vibration analysis technique of PCB and component placement optimization technology[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2007, 23(1): 1-4.
- [4] 李琳, 盛君. 混合界面直接分支模态综合法[J]. 应用力学学报, 2005, 22(2): 315-319.
LI Lin, SHENG Jun. Mixed interface direct component modal synthesis method[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2005, 22(2): 315-319.
- [5] 楼梦麟. 结构动力分析的子结构方法[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
LOU Meng-lin. Substructure method of dynamic structural analysis[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997.
- [6] CRAIG JR R R, BAMPTON M C C. Coupling of substructures for dynamic analysis[J]. AIAA Journal, 1968, (6): 1313-1319.
- [7] MASSON G, AIT BRIK B, COGAN S, et al. Component mode synthesis (CMS) based on an enriched ritz approach for efficient structural optimization[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 296(4-5): 845-860.
- [8] CHEN Su-huan YANG Zhi-jun. The layout optimization of stiffeners for plate-shell structures[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 18(4): 365-373.
- [9] 唐飞, 腾弘飞. 一种改进的遗传算法及其在布局优化中的应用[J]. 软件学报, 1999, 10(10): 1096-1102.
TANG Fei, TENG Hong-fei. A modified genetic algorithm and its application to layout optimization[J]. Journal of Software, 1999, 10(10): 1096-1102.
- [10] 霍军周, 李广强, 腾弘飞. 用并行遗传/Powell/蚁群混合算法求解卫星舱布局问题[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(5): 679-684.
HUO Jun-zhou LI Guang-qiang, TENG Hong-fei. Layout optimization of a satellite module using a parallel genetic-Powell-ant colony hybrid algorithm[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2006, 46(5): 679-684.
- [11] 刘文广, 吴凡. 基于APDL的PCB元件布局优化[J]. 电子工艺技术, 2009, 30(3): 151-153.
LIU Wen-guang, WU Fan. Optimization of components distribution on PCB based on APDL[J]. Electronics Process Technology, 2009, 30(3): 151-153.

编辑 黄 莘