

基于多场耦合的电子装备机箱结构优化设计

李鹏 段宝岩 胡凯博 罗先义
(西安电子科技大学机电工程学院 西安 710071)

摘要: 电子装备机箱结构设计受到结构强度、通风散热和电磁屏蔽三方面的约束。实际工作中的电子装备受到结构位移场、温度场和电磁场的共同作用, 它们都是机箱结构参数的函数。由于机箱的电磁场、温度场和结构位移场之间存在一定耦合关系, 该文建立了电子装备的多场耦合模型, 并在此基础上提出多场耦合的优化模型, 可用于实际机箱结构的优化设计。最后, 将其应用于某电子设备机箱实物的结构优化设计, 取得了满意的结果。

关键词: 电磁屏蔽; 电子装备; 多场耦合; 优化设计

中图分类号: TN80

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2764-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01183

The Optimization Design of Electronic Equipments' Case Based on Multi-field-coupled Model

Li Peng Duan Bao-yan Hu Kai-bo Luo Xian-yi

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Design of Electronic cabinet is constrained by structure intensity, ventilation and Shielding Effectiveness (SE). Practically, there are three fields affecting electronic equipment, electromagnetic, temperature, and elastic deformation fields which are functions of enclosure structure parameters. Because of the relationship between three fields, in this paper, a multi-field-coupled model called STEM is established. Furthermore, an optimization model based on STEM is proposed in this manuscript. Structure optimization is also proposed on a practical enclosure with satisfying result.

Key words: Electromagnetic shielding; Electronic equipment; Multi-field-coupled; Optimal design

1 引言

电子装备在各个领域应用广泛, 而机箱结构作为电子装备各个器件的物理总成和承载平台, 也得到广泛应用。随着电子技术的发展, 电子装备向着高频率、大功率、高密度、小型化、多功能的方向发展, 这必然对机箱结构提出了更高的要求。一方面: 结构强度要求高, 要求能在各种工况的冲击与振动下正常工作; 另一方面: 多功能和高频率使得电子装备电磁屏蔽的问题更加突出, 不但要求自身能够抗外界电磁环境干扰, 而且不能干扰临近电子设备^[1-3]; 第三: 大功率和高密度使得机箱内散热困难, 而过高的温度又会影响电子器件的效能^[4,5]。所以现代电子装备机箱要同时满足结构强度、电磁兼容和通风散热三方面的要求。

常规的机箱结构设计方法是结构强度、电磁兼容和通风散热三方面的要求分别考虑, 各自给出一套设计方案, 这些设计方案由于出发点和目的各不

相同, 相互之间会有冲突, 例如质量和刚度, 电磁屏蔽和散热(较大的孔缝有利于散热却不利于电磁屏蔽)。所以必须由设计总师根据经验进行平衡与取舍, 得出可行的设计方案。在早期各方面要求不高时, 这是一种有效的设计方法, 但是随着各方面要求的提高, 这种机电热分离的设计方法越来越难以满足各方面的要求, 这也成为严重制约现有电子装备性能提高和下一代电子装备研制的瓶颈^[6]。

本文针对电子装备设计中存在的机电热分离问题, 从多场耦合的角度开展研究, 建立了机箱结构的多场耦合模型, 并在此基础上建立了多场耦合的优化模型。将本文的理论和应用于一个工程案例, 通过对结构参数进行优化, 获得的改进设计方案在结构强度、通风散热和电磁屏蔽 3 个方面都有一定的提高。

2 多场耦合的建模、求解及优化

一个简单的机箱结构如图 1 所示, 机箱的右侧板有 3 个圆形散热孔, 机箱上盖板和前面板各有一个矩形散热缝, V_i 和 V_j 表示内部器件, 它们产生电磁辐射和热量, P_1 和 P_2 是机箱受到的外部载荷。结

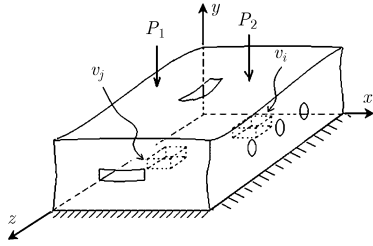


图 1 电子装备机箱的三场耦合示意图

构参数包括孔缝的位置和尺寸,机箱基本结构尺寸,以及内部部分特殊结构的尺寸。结构强度、通风散热和电磁屏蔽都受到结构参数的影响,机箱的结构变形,内部温度和电磁场都是结构参数的函数。同时由于载荷以及基座振动的作用,箱体发生的变形不但导致电磁场和温度场的边界条件改变,同时还导致电磁辐射器件和散热孔缝的位置变化。此外温度场的升高还会导致电磁元器件的电磁性能下降。可见电子装备机箱内的多个物理场是相互耦合的。当然,对于电子装备机箱,结构参数的影响要大于结构变形的影响。

这样的耦合关系可以用下面的一组数学公式描述:

$$SE=20 \lg \left\{ \frac{\left| \sum_{i=1}^{Num} \mathbf{E}_{ci}^0(V_i(T)) \right|}{\left| \sum_{i=1}^{Num} \mathbf{E}_{ci}^0[\delta(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n), V_i(T+\Delta T)] \right|} \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{C}\dot{\delta} + \mathbf{K}\delta = \mathbf{P} + \mathbf{P}' \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v \quad (3)$$

其中式(1)是电磁屏蔽 SE 的公式,表示电场强度 \mathbf{E} 、结构变形 δ 、结构参数 $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)$ 和温度 T 之间的关系^[4], $V(T)$ 是器件性能与温度的函数, \mathbf{E}_{ci}^0 和 \mathbf{E}_{ci} 分别是空间某点在没有屏蔽和有屏蔽时的电场值, Num 是箱体中电磁辐射器件和敏感元件的总数。式(2)是结构动力学公式,式(3)是热传导公式,它们表示了变形 δ 、载荷 \mathbf{P} 和温度 T 之间的关系,其中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{K} 分别是质量阵、阻尼阵和刚度阵,它们都是结构参数的函数。 $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ 分别是结构的位移、速度和加速度。 \mathbf{P} 是外部载荷, \mathbf{P}' 是温度载荷。 ρ 是流体密度, λ 是热传导系数, c_p 是定压比热, q_v 是热源强度^[7], 结构参数是式(3)的边界条件。

对于三场耦合的数值计算,结构有限元模型首先发生变形,通过有限元方法可以求得载荷作用下的节点位移,然后根据变形后的机箱结构建立温度场和电磁场的分析模型,最后分别使用有限容积法

和矩量法求取。

在电子设备机箱结构的多场耦合模型的基础上,建立多场耦合的优化模型,开展机箱结构的优化设计。优化模型可以用式(4)的数学规划表述:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Find } \boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R]^T \\ & \text{Min } W(\boldsymbol{\beta}) \\ & \text{s.t. } -SE(\boldsymbol{\beta}) \leq -SE^a \\ & T_{i\max}(\boldsymbol{\beta}) \leq T_{i\max}^a \quad (i = 1, 2, \dots, Nu) \\ & \sigma_e - [\sigma_e] \leq 0 \quad (e = 1, 2, \dots, Ne) \\ & \beta_{j\min} \leq \beta_j \leq \beta_{j\max} \quad (j = 1, 2, \dots, R) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

设计变量 $\boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_R]^T$ 是结构设计参数,如机箱的长宽高尺寸参数,散热孔缝的尺寸位置,内部各个器件的位置等。优化目标通常是结构重量 $W(\boldsymbol{\beta})$ 最轻。约束条件包括电磁屏蔽 SE^a , 最高温度 $T_{i\max}$, 最大应力 σ_e 以及结构设计变量的上下限。当然,优化目标和约束条件是可以变化的,如也可以将电磁屏蔽作为目标,将重量作为约束;还可以综合考虑几个物理场的指标,通过权系数实现多目标优化。

本文使用 Isight 软件处理该优化问题,优化的流程如图 2 所示。

(1)参数化建模 首先使用 Pro/E 软件建立参数化的机箱结构模型,优化模型的设计变量必须实现参数化驱动。

(2)结构分析 将该参数化模型导入 ANSYS 的 Workbench 软件,加入载荷和约束,划分结构有限元网格,完成结构分析,输出结构变形后的节点信息并保存结果。

(3)温度分析 通过节点信息将变形的结构模型导入 IcePack 软件,完成热分析所需的相关设置,

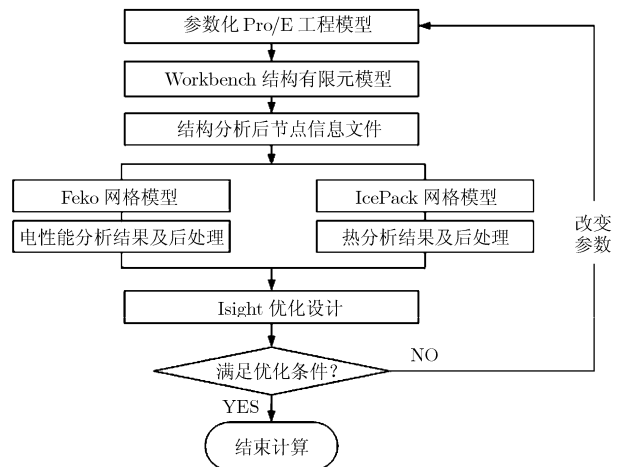


图 2 耦合优化的流程图

在变形网格模型的基础上划分热的分析网格, 完成计算并保存计算结果。

(4)电磁分析 通过节点信息将变形的结构模型导入 FEKO 软件, 完成电磁分析所需的相关设置, 在变形网格模型的基础上划分电磁分析网格, 完成计算即可得到变形机箱结构的电磁场分布 E , 进而根据式(1)求得电磁屏蔽 SE。

(5)最后使用 Isight 软件, 选用合适的优化算法, 调用上述的分析过程, 实现优化迭代的过程, 最终完成优化设计。

通过自行编写各软件之间的接口程序和操作界面, 在现有商用软件基础上进行二次开发, 可以高效的实现多场耦合优化设计。

3 仿真案例

利用前文所述的多场耦合优化模型, 针对某电子设备机箱实物, 进行优化设计。机箱的基本结构如图 3 所示, 长宽高分别为 575 mm、482 mm、532 mm, 材料是铝。如图 3 中机箱立体图所示, 机箱内部分为两部分: 上部安装有 12 块 PCB 板和 2 个电源, 下部是散热风道, 有一块倾斜的挡风板; 机箱前面板上端有两组散热孔, 下端有 2 个风扇; 后面板上端有 3 个风扇; 在 PCB 板下面, 挡风板上还有 2 个风扇。机箱工作时, 电源模块和 PCB 板的器件发热, 风从前面板下端进入, 由于挡风板作用, 风经过 PCB 板和电源, 再从机箱后面板上端吹出, 从而达到散热目的。机箱上的散热孔还会

造成电磁泄漏。该机箱安装于飞机上, 对基频和重量有一定的要求。故本文中以重量最轻为目标, 以机箱内最高温度、电磁屏蔽和一阶固有频率为约束条件, 对机箱的散热孔尺寸位置、机箱壁厚、挡风板长度进行三场耦合优化设计。

针对这一具体对象建立优化模型如下:

(1)设计变量 共有 3 类 8 个设计变量。第 1 类是散热孔尺寸位置, 包括: 开孔长度 L , 开孔宽度 W , 孔与左侧板距离 $d1$, 孔与电源距离 $d2$, 孔行间距 $d3$, 孔列间距 $d4$; 第 2 类是机箱壁厚 $D1$; 第 3 类是挡风板长度 $D2$ 。则设计变量可以表示为

$$\beta = [L, W, d1, d2, d3, d4, D1, D2]^T \quad (5)$$

(2)目标函数 以重量最轻为目标:

$$\text{Min } W(\beta) \quad (6)$$

(3)约束条件 结构约束条件为一阶固有频率和最大应力。

$$f - [f_e] \leq 0 \quad (7)$$

$$\sigma_{\max} - [\sigma_e] \leq 0 \quad (8)$$

温度场约束条件为机箱内的最高温度, 经过初步分析发现最高温度出现在电源处, 故电源 1 和电源 2 的最高温度均为约束条件, 电源功耗均为 160 W:

$$T_{\max} \leq T_e \quad (i=1,2) \quad (9)$$

电磁场的约束条件为电磁屏蔽, 优化时的频率为 300 MHz:

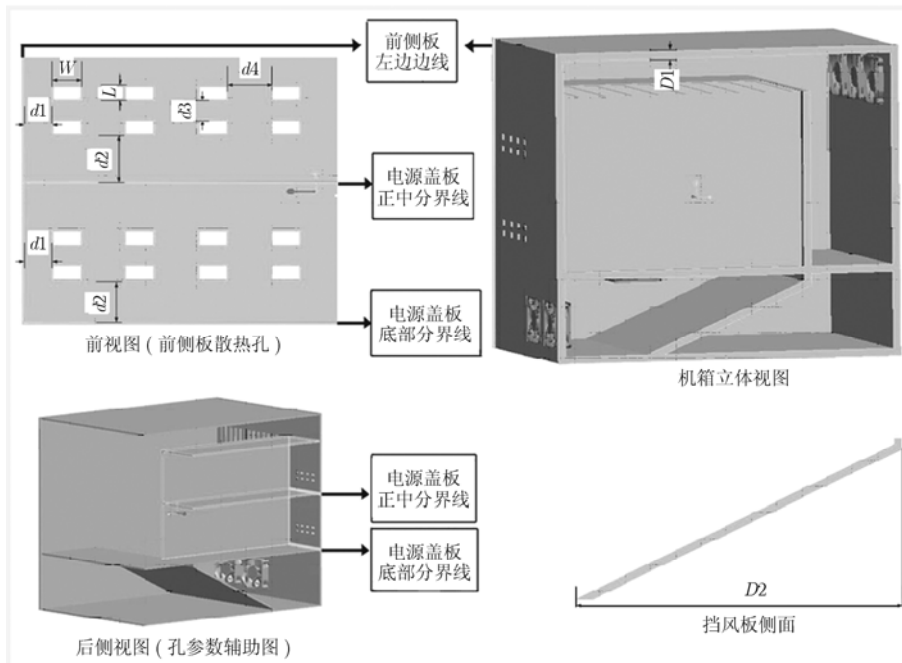


图 3 仿真案例的机箱结构示意图

$$-SE(\beta) \leq -SE^e \quad (10)$$

式中 f_e, σ_e, T_e, SE^e 分别为允许的最大基频、应力、温度和电磁屏蔽。

优化的数学模型文中省略，同样采用 Hooke-Jeeves 方法^[9]进行优化，设计变量、目标和约束的优化结果见表 1。

表 1 数值优化结果

项目	名称	初值	优化结果	下限	上限
设计变量	机箱壁厚 $D1$ (mm)	4.5	3.75	2	6
	挡风板长度 $D2$ (mm)	300	50	50	400
	开孔长度 L (mm)	10	20	5	30
	开孔宽度 W (mm)	10	5	5	50
	孔与左侧板距离 $d1$ (mm)	20	50	5	80
	孔与电源距离 $d2$ (mm)	20	20	5	80
	孔行间距 $d3$ (mm)	15	15	5	50
	孔列间距 $d4$ (mm)	15	15	5	30
目标	重量 W (kg)	72.25	67.71	/	/
	最大应力 σ (MPa)	81.9	118		150
约束	固有频率 f (Hz)	73.80	73.69	70	
	电磁屏蔽 SE (dB)	28.80	42.07	35	
	电源 1 温度 T_1 ($^{\circ}$)	71.9	65.33		75
	电源 2 温度 T_2 ($^{\circ}$)	73.98	70.52		75

由表 1 可见，相对于设计初值，优化的结果重量减轻 6.3%，主要原因是壁厚变薄和挡风板长度变短，所以最大应力增加，但并未超过约束条件，同时对一阶固有频率影响不大。同时散热孔由正方形变成矩形，虽然孔面积一致，但是狭长的孔比方形的孔电磁泄漏更小，所以电磁屏蔽提高了。同时最高温度也略有下降。

4 结束语

通过本文的理论分析、数值仿真和实验验证，可以得到以下结论：

复杂电子装备的电磁屏蔽在理论上实际是一个多场耦合问题，涉及结构位移场，电磁场和温度场。本文建立了其多场耦合模型，基于此模型又建立了优化模型，并得到了较好的优化结果。将耦合优化

模型应用于某实际机箱的改进设计，改进后的机箱在结构强度、通风散热和电磁屏蔽 3 个方面都有一定的提高。

需要注意的是，多场耦合问题是一个复杂而且很有难度的问题，本文对其的研究是比较初步的，更多深入的研究还有待开展。

参考文献

- [1] Archambeault B. Modeling and simulation validation for EMC applications[C]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, WA, USA, Aug. 1999: 492-496.
- [2] Bogorad A L, Deeter M P, and August K A, et al. Shielding Effectiveness and closeout methods for composite spacecraft structural panels[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2008, 50(3): 547-555.
- [3] 石峥, 杜平安, 刘建涛. 缝隙结构电磁屏蔽特性数值仿真建模方法研究[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(24): 7732-7737.
Shi Z, Du P A, and Liu J T. Study on modeling method for electromagnetic shielding simulation of aperture[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(24): 7732-7737.
- [4] 平丽浩, 钱吉裕, 徐德好. 电子设备热控新技术综述[J]. *机械电子工程*, 2008, 24(1): 1-10.
Ping L H, Qian J Y, and Xu D H. A review of the thermal control technologies for electronic systems[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2008, 24(1): 1-10.
- [5] 曹志坤, 谷波, 顾众. 基于改进的支持向量机制冷陈列柜优化模型[J]. *上海交通大学学报*, 2009, 43(9): 1427-1431.
Cao Z K, Gu B, and Gu Z. Optimization model of refrigerated display cabinet based on modified support vector machine[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(9): 1427-1431.
- [6] 曾锐, 平丽浩, 鞠文耀. 电子设备多场耦合求解方法研究[J]. *现代雷达*, 2008, 30(11): 103-106.
Zeng R, Ping L H, and Ju W Y. A study on uncoupling method for electronic equipment multifield coupling problem[J]. *Modern Radar*, 2008, 30(11): 103-106.
- [7] 陶文铨. 数值传热学(第 2 版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 1-25.
- [8] Deb K. Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples[M]. New Delhi: Prentice-Hall of India, 1998: 105-136.

李 鹏: 男, 1981年生, 博士生, 研究方向为电子装备多场耦合问题。

段宝岩: 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电子装备机电耦合理论及应用、天线结构与伺服系统、工程结构优化设计等。

胡凯博: 女, 1985年生, 硕士生, 研究方向为电子装备的电磁兼容问题。

罗先义: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为电子装备的多学科优化问题。