

文章编号: 1001 - 893X(2012)03 - 0379 - 05

电子设备多学科优化设计技术及其应用*

冯刚英

(西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要: 多学科优化技术是有效提升电子设备综合设计水平的关键技术之一。结合电子设备多学科优化的技术需求, 概述了电子设备多学科优化设计技术研究取得的相关成果, 包括多学科建模技术、多学科优化策略及优化算法应用、优化流程定制及学科分层次优化关系建立技术等内容, 通过多学科优化设计平台实际应用, 实现了电子设备重量减轻, 性能提高。

关键词: 电子设备; 多学科优化设计; 多学科建模; 优化算法; 多学科优化设计平台

中图分类号: TN802; TP391.9 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-893x.2012.03.026

Multidisciplinary Design Optimization and its Application in Electronic Equipment

FENG Gang-ying

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Multidisciplinary Design Optimization (MDO) is one of the key technologies which can effectively enhance the integrated design level of electronic equipment. According to the requirements of MDO, relevant achievements of current MDO research are summarized, including multidisciplinary modeling, application of multidisciplinary optimization strategy and algorithm, optimization of processing customization and the establishment technology of graded optimization relations. Better performance and less weight of the electronic equipment are achieved by actual application of MDO.

Key words: electronic equipment; multidisciplinary design optimization (MDO); MDO modeling; MDO algorithm; MDO platform

1 引言

从 20 世纪 80 年代奠基并逐渐发展起来的多学科优化 (MDO) 技术, 已得到了长足的发展。1982 年, 美籍波兰人 J. Sobieszczanski - Sobieski 提出 MDO 设想; 1996 年, Sobieski 和 Haftka 两位 MDO 研究权威撰写了《航空航天领域中的多学科设计优化研究综述》, 对 MDO 的概念、基本方法等 6 个组成部分进行了探讨, 并指明了 MDO 研究的方向。目前, 已有美

国、欧洲、俄罗斯、日本等国家和地区大量科研院所投身于 MDO 的研究。工业界如波音公司旋翼设计优化、洛克希德·马丁公司 F-22 飞机结构/气动优化设计、欧盟空客公司牵头的翼身融合体布局多学科设计优化 (MOB) 等已有系统理论研究和工程应用案例^[1-2]。国内 20 世纪 90 年代中期, 包括清华大学在内的多个大专院校开展了大量优化理论、优化算法研究, 近些年来众多的科研院所也开展了大量的工程研究工作^[3-5]。

* 收稿日期: 2012-01-05; 修回日期: 2012-03-12

基金项目: 国家基础预研项目 (B1120060958)

Foundation Item: The National Basic Science and Research Program (B1120060958)

国内电子设备的研发,已具备较成熟的热、振动、电磁等单学科分析和优化设计能力,但各学科的优化相对独立,较少研究各学科间相互作用而产生的协同效应,很难获得面向全局的优化结果,而且设计周期较长,成本高^[1]。伴随电子设备逐步向综合化、模块化方向发展,一方面,电子系统集成度提高了,设备更加小型化、轻量化,各个现场可更换模块(LRM)内部的组装和布线密度不断增大,热流密度也不断增加;另一方面,面临严酷的抗冲击振动要求,以及更加复杂的电磁环境,电子设备研制中热设计、振动设计、电磁兼容设计等多学科问题就显得更为突出。开展电子设备多学科综合优化设计技术研究,目的就是解决电子设备小型化过程中需要解决的振动、热及电磁等多学科综合优化设计问题,以提升设计水平,缩短设计周期,节约研制成本。

2 电子设备多学科优化设计的关键技术

2.1 复杂系统的多学科综合建模技术

传统意义的电子设备各学科优化面临着模型种类多、学科模型不统一、模型间数据无法共享、模型间数据传递驱动困难、模型建立过程复杂等难题,建立良好的多学科综合设计模型是开展多学科综合优化的前提和基础。针对电子设备多学科综合优化模型的特点,利用多学科主模型技术,通过主模型实现信息传递、驱动相关参数建立各学科分析模型,在定义优化三要素的基础上实现优化模型的建立。主模型、学科分析模型和优化模型的建模方法共同构成了基于多学科主模型技术的电子设备综合优化建模方法^[6]。

多学科主模型采用了异构软件界面集成技术,将 CAD 软件嵌入建模模块中,用于建立分析和优化的三维几何模型。开发了零部件与特征库、建模规则库和材料库等数据库与几何模型关联,组成可共用于分析和优化的多学科主模型。仿真分析模型采用了 CAD/CAE 集成技术,通过各个仿真分析模块的前处理子模块建立相应的 CAE 仿真分析模型。综合优化模型采用了异构软件的数据接口技术,解析主模型建模模块、优化模型建模模块及各个分析模块预先设定的接口文件,依照用户的需求设置设计变量、目标和约束,建立综合优化模型。利用综合优化建模技术建立的综合优化模型,集成了各相关学科优

化所需的信息,通过流程定制技术确定具体研究对象,优化设计所涉及的学科(振动、热、电磁)和学科优化调用顺序,能实现产品综合性能仿真和优化。

2.2 电子设备多学科综合优化策略和优化算法定制

电子设备各学科的设计计算是通过数值仿真分析实现的,但单学科仿真分析的数值结果噪声大,这些数值噪声给优化计算带来了比较大的困难,表现为迭代过程出现振荡而不收敛,重分析次数过多导致计算量过大,最终使得基于梯度的通用优化算法往往失效;同时各学科之间存在耦合关系,往往需要反复迭代才能够完成一次可行设计,如果不对各学科间的这种耦合进行处理,巨大的计算复杂性意味着无法进行有效的系统综合优化设计。

开发基于局部近似的信赖域法和基于全局近似的概率协调策略的两种优化算法,解决了电子设备单学科仿真分析的数值噪声问题。基于局部近似的信赖域法采用单纯形梯度来消除数值噪声对灵敏度信息的不利影响,用 Lagrange 乘子协调各学科性能要求之间的矛盾关系,进而在信赖域方法的框架下完成寻优过程;基于全局近似的概率协调策略采用回归 Kriging 模型来过滤数值噪声,构造各学科响应量的全局近似模型,利用 Kriging 模型的概率背景,有效过滤数值噪声,采用 KS 包络函数凝聚多个约束函数,利用 KS 函数的保守性,补偿近似模型的误差^[7]。

2.3 多学科综合优化流程定制

电子设备综合设计过程中面临热、振动、电磁兼容等多个学科分析及优化,由于各学科分析采用不同商用软件,数据格式各异、种类繁多,信息交换必然面临大量数据传递的难题。要实现多学科综合优化设计,不同学科的分析流程、优化设计流程的定制和相关数据管理是技术关键。学科分析流程定制通过中间文件转换的技术途径,在用户界面指定分析输入文件及参数,读取路径,指定分析执行文件(.exe、.bat等)和结果输出路径、输出方式,实现学科分析过程自动化;优化流程定制通过界面选择可执行命令流,规定各个学科分析的顺序,并确定需传递的数据规模和数据种类。考虑产品复杂程度及优化问题需求,提供可选择的优化流程有 3 种:高精度优化、基于近似模型的渐进优化、变复杂度模型优化,3 种优化流程如图 1 所示^[1]。

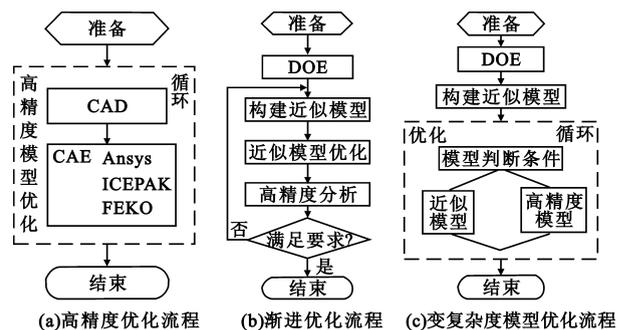


图 1 优化流程

Fig. 1 The flowchart of design optimization

2.4 多学科分层次优化目标函数、优化变量、约束条件关系的建立技术

综合模块化的电子设备,以现场可更换模块(LRM)加机箱的结构集成形式为典型代表。由于设备的构成模型复杂、仿真分析规模庞大、单次仿真计算时间长等计算问题,从而导致学科优化在技术上面面临实现困难。特别是进一步进行多学科优化时,更是存在寻优迭代次数多、优化精度和优化成功率低等诸多问题。在研究过程中,考虑对象产品结构可分解成机箱加模块的组成形式,所针对的优化目标(如重量及体积)也可分解,将系统级优化问题中优化目标与设计变量分解为若干子系统级优化目标及设计变量的优化问题,采用主模型统一提供数据信息。通过确定模型分层界面,明确各学科设计参数(变量、约束条件和目标)分解和传递,实现减小分析规模、缩短优化时间、确保计算能够收敛、达到总的优化目标要求,因此采用多学科分层次优化方法能保证多学科综合优化实施的可行性。

3 综合模块化电子设备多学科优化设计平台开发

综合优化设计平台是多学科优化技术实现的综合体现,多学科优化技术在各行业的应用都建立有相应的优化设计平台,例如:清华大学建立的虚拟样机多学科协同设计与仿真平台^[8]、北京航空航天大学建立了基于航空发动机的优化设计平台^[9]、国防科技大学建立的飞行控制器的多学科综合环境^[10]等。针对电子设备的特点,同时结合上述电子设备多学科优化设计中多项关键技术的研究成果,开发了电子设备多学科优化设计软件平台。该软件平台由综合建模模块、仿真分析模块、综合优化模块及相

应支撑数据库组成。

综合建模模块提供基于规则设计、基于装配树设计等方法,结合各类数据库,可以方便地定制特定电子设备的主模型。首先,建立常见零部件和特征的框架模型,按照规则定义语义,在框架模型上添加建模规则;然后,定制整机参数化设计的零部件库和特征库;最后,通过规则入库管理。上述功能通过“规则定义”子模块、“零部件库维护”子模块实现。用户在综合建模模块中,通过选择产品类型,选择产品组成的零部件和特征类型、数量、输入参数,即可快速地生成产品模型实例。

仿真分析模块在充分利用商业软件原有功能基础上,重点进行二次集成开发,实现各学科自动前后处理、模型转换和分析软件自动调用求解。力学分析模块补充开发了符合国家相关标准的随机振动和冲击数据加载、选用界面和调用接口等内容,实现随机振动激励响应和冲击激励响应分析的方便快速进行。热分析模块重点进行电子机箱冷板模型、传导接触热阻模型等相关等效计算软件开发,实现热分析模型简化,降低仿真时间。电磁分析模块重点研究缝隙模型、密封屏蔽装置转移阻抗等模型等效处理方法,解决了电磁仿真软件无法实现缝隙、密封条等模型建模求解问题。

综合优化模块建立系统级全局优化模型,采用优化策略和算法求出最佳的设计参数以满足设计目标。开发了专用于电子设备多学科优化的基于局部近似的信赖域法软件、基于全局近似的概率协调策略软件和多学科耦合系统的解耦方法软件。同时,开发仿真分析的流程定制、自动调用、流程控制软件和 CAD、力学、热、电磁和优化等异构软件之间的数据接口软件,实现优化过程中的数据流程有效管理。

4 实践应用

某电子设备设计过程中面临热、振动、电磁兼容等多学科综合设计问题,通过上述多学科优化设计技术的应用,在实现小型化、轻量化设计的同时,较好地满足了各项环境设计要求。

该设备采用上下穿通风冷的结构形式,在模块的外表面设计散热齿,在机箱的上下板上设计通风孔,其结构示意图如图 2 所示。由于体积和重量的限制,设计中必须采用高效散热技术来解决高热流密度 LRM 模块的散热问题,同时机箱需具备较高的

抗冲振能力,并满足复杂的电磁兼容性要求。在设计过程中需要综合考虑高组装密度和高热流密度对设备的抗振动能力、散热能力以及电磁兼容性方面的影响,协调 3 个学科之间的不同要求,这是典型的多学科优化设计问题。

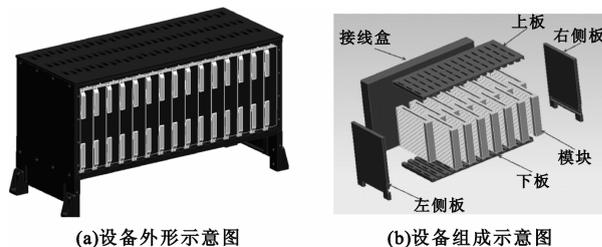
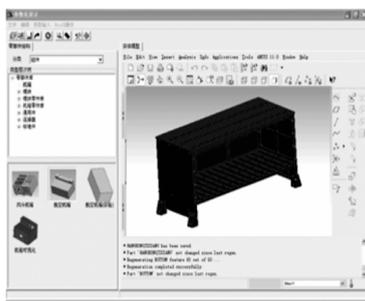
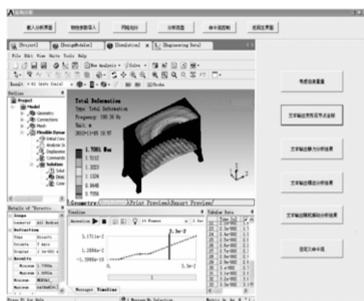


图 2 设备示意图
Fig. 2 The sketch map of the equipment

运用上述的多学科优化设计技术以及开发的多学科优化设计平台,进行分层次优化,即机箱的多学



(a)综合建模



(b)仿真分析

迭代次数	重量/kg	屏蔽效能/dB	内部温度/℃	对比因子	改善	评价
1	1.46	52.0	71.000000	0.0	1.0	1
2	1.46	43.0	62.0	1.0	1.0	2
3	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
4	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
5	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
6	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
7	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
8	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
9	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
10	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
11	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
12	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
13	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
14	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
15	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
16	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
17	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
18	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
19	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3
20	1.21	46.0	62.0	1.0	1.3	3

(c)综合优化

图 3 机箱多学科综合优化
Fig. 3 MDO of the chassis

4.2 模块的多学科优化

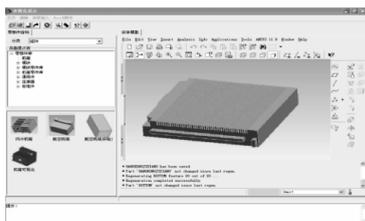
以该设备中某信号处理模块为例,外表面的散热齿与机箱上下板的通风孔构成了整个设备的风道,冷却风从中流过带走模块工作时产生的热量。经过分层次定义及指标分解,将该模块的多学科设计问题定义如下:

(1)优化目标:重量不大于 0.4 kg;

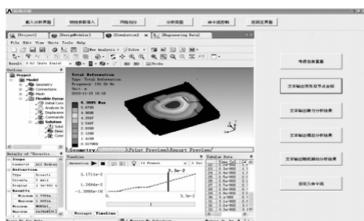
(2)设计变量:散热齿肋高尺寸变化范围 2 ~ 7 mm,肋宽尺寸变化范围 1.5 ~ 3 mm,肋间距尺寸变化范围 4 ~ 8 mm;

(3)约束:中心位置贴装的某器件最高壳温不超过 85 ℃。

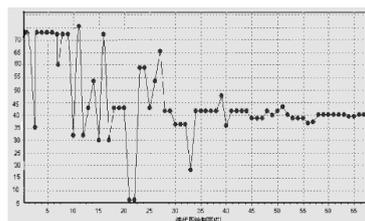
通过多学科优化设计平台,开展综合建模、仿真分析和综合优化,实现了模块级优化目标,如图 4 所示。



(a)综合建模



(b)仿真分析



(c)综合优化

图 4 模块多学科综合优化
Fig. 4 MDO of the unit

该电子设备通过上述两级多学科优化设计,最终实现了设备重量减轻 21.5%,同时热、振动和电磁兼容性能满足设计指标要求。

5 结束语

多学科综合优化设计技术是在多学科仿真分析技术的基础上发展并建立起来的,通过多年的研究,已在技术上得到长足发展,并取得了大量的成果。通过电子设备多学科优化设计技术研究,开发的优化设计平台已在多个工程案例中成功应用,进一步证明了多学科优化设计技术对提高电子设备综合性能指标、缩短研制周期、降低研制成本有着非常重要的意义,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 卢凉,方伟,冯刚英. 多学科优化技术在航空电子设备设计中的应用[J]. 电讯技术,2009,49(4):20-24.
LU Liang, FANG Wei, FENG Gang-ying. Application of multidisciplinary design optimization in avionics equipment design[J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(4): 20-24. (in Chinese)
- [2] 王振国,陈小前,罗文彩,等. 飞行器多学科设计优化理论与应用研究[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
WANG Zhen-guo, CHEN Xiao-qian, LUO Wen-cai, et al. Research on the Theory and Application of Multidisciplinary Design Optimization of Flight Vehicles[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [3] 余雄庆. 多学科设计算法及其在飞机设计中的应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1999.
YU Xiong-qing. Application of Multidisciplinary Design Optimization algorithm for Aircraft Design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999. (in Chinese)
- [4] 陈小前. 飞行器总体优化设计理论与应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2001.
CHEN Xiao-qian. Study and Application of Theories of Optimization in the Integrated Design of Flying Vehicles[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001. (in Chinese)

- [5] 陈炉云,郭维,王德禹. 多学科设计优化技术在舰船设计中的应用[J]. 船海工程,2006(4):28-30.
CHEN Lu-yun, GUO Wei, WANG De-yu. Application of multidisciplinary design optimization in ship design[J]. Ship & Ocean Engineering, 2006(4): 28-30. (in Chinese)
- [6] 方伟. 电子设备多学科主模型及其建立技术[J]. 电讯技术,2011,51(10):127-131.
FANG Wei. Multidisciplinary Master Model (MMM) for electrical equipment and tis Modeling Technology [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(10): 127-131. (in Chinese)
- [7] 曹鸿钧. 于 Kriging 模型的后优化近似研究[J]. 机械设计与研究,2004(5):10-13.
CAO Hong-jun. The research of the Kriging approximate model for optimization[J]. Machine Design & Research, 2004(5): 10-13. (in Chinese)
- [8] 张和明,曹军海,范文慧,等. 虚拟样机多学科协同设计与仿真平台实现技术[J]. 计算机集成制造系统,2003,9(12):1105-1111.
ZHANG He-ming, CAO Jun-hai, FAN Wen-hui, et al. Realization of Collaborative Design and Simulation Platform for Multidiscipline Virtual Prototyping[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9(12): 1105-1111. (in Chinese)
- [9] 韩明红,邓家祺. 复杂工程系统多学科设计优化集成环境研究[J]. 机械工程学报,2004,4(9):100-105.
HAN Ming-hong, DENG Jia-ti. Study On Integrated Framework of Multidisciplinary Design Optimization for Complex Engineering System[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 4(9): 100-105. (in Chinese)
- [10] 曾庆华. 飞行控制器的多学科综合环境研究[J]. 航空计算技术,2002,32(4):65-68.
ZENG Qing-hua. The Multidisciplinary Synthesis Environment Research of Flight Controller's Design[J]. Aeronautical Computer Technique, 2002, 32(4): 65-68. (in Chinese)

作者简介:

冯刚英(1970—),女,四川成都人,高级工程师,主要研究方向为电子设备结构总体设计及电子设备多学科优化设计。

FENG Gang-ying was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1970. She is now a senior engineer. Her research concerns system structure design and MDO of electronic equipment.

Email: lisadt@yahoo. cn