



中國電子學會
Chinese Institute of Electronics

2007年 机械电子学学术会议 ——论·文·集——

[中国电子学会电子机械工程分会]

段宝岩 叶渭川 主编

2007年11月

中国·昆明



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

中国电子学会电子机械工程分会

2007 年机械电子学学术会议论文集

段宝岩 叶渭川 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

论文集汇集了最新科研成果, 主要内容包括: 电子机械工程的建模和仿真; 电子机械工程相关的机械结构系统的优化; 与电子机械工程相关的系统设计; 电子机械工程领域内的应用(制造过程/机械制造/精密加工/校准、测量及检验/尺寸非稳定材料处理/医疗、保健、医学及生物医学领域/建筑、结构及维护/玩具、娱乐和教育/工业及服务自动化/机器人等); 机电一体化系统中的振动和噪声控制; 电子设备中的电磁兼容设计及热设计; 嵌入式系统; 其他与机电一体化及光机电一体化相关的内容等。

适用于从事雷达、射电望远镜、大型天线、通信设备、机器人设计开发的工程技术人员阅读; 也可供电子机械工程学科和相关专业高等院校的教师和研究生及高年级本科生参考。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

2007 年机械电子学学术会议论文集/段宝岩, 叶渭川主编. —北京: 电子工业出版社, 2007.10

ISBN 978-7-121-05139-5

I. 2… II. ①段… ②叶… III. 机电一体化—学术会议—文集 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 153422 号

责任编辑: 竺南直 特约编辑: 刘 皎

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 31.75 字数: 810 千字

印 次: 2007 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 98.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

中国电子学会电子机械工程分会 2007 年机械电子学学术会议组织机构名单

大会领导机构

名誉主席：周文盛 叶尚辉 严敦善

大会主席：段宝岩

副主席：罗 群

秘书长：叶渭川

学术委员会

主任：施浒立

副主任：季 馨

委员：俞惟铨 周德俭 黄大贵 程辉明
陈慧宝 李文海 史金飞

组织委员会

主任：叶渭川

委员：黄 进 钱吉裕 戴林风

中国电子学会电子机械工程分会 第七届委员会全体成员名单

名誉主任委员：周文盛 叶尚辉 严敦善

顾问委员：张德骞 龚振邦 朱钟淦 李盛松

主任委员：段宝岩

常务副主任：罗 群

副主任委员：施泚立 俞惟铨 季 馨 周德俭 黄大贵

程辉明 陈慧宝 李文海 史金飞

委 员：平丽浩 张明灿 张 晖 汪小林 王 勇 申戈琍

吕超凡 赵亚维 金大元 王 璐 李小平 霍治生

郭字洲 李新年 徐 晓 卢彦庭 唐治安 周克洪

张 钰 刘敏捷 李永林 曾 伟 蒋瑞兴 楼佩煌

谭跃钢 孙百生 贾建援 刘晓平 陈志平 徐春广

陈维山 戴 勇 孙道恒 段吉安 黄美发 李 迎

刘 亮 司俊珊 曾 强 张莉芳 王建力 任 豫

夏和平 任秋成

秘书长：叶渭川

副秘书长：黄 进

前 言

伴随着国家“十一五”规划的实施和国民经济的快速发展,中国电子学会电子机械工程分会又迎来了新的一届全国学术会议。

在电子信息、装备制造、航空航天、能源、交通、环境、材料等领域科技迅猛发展的今天,电子机械工程也得到了较快发展,在继续深入研究机械结构与电磁性能关系的基础上,进而向更广领域拓展,如研究机械结构位移场、电磁场与热场的场耦合理论与方法,场耦合模型的建立及其求解策略与方法;研究机械结构因素(结构参数、制造精度)对电性能的影响,发现影响机理。其实质是研究不同学科间的交叉与融合问题,以期通过研究不同物理量或物理场之间的耦合问题来发现提高系统或设备整体性能的途径与方法。中国电子学会电子机械工程分会是国内电子机械工程领域最权威的学术组织,从1981年起每年都组织大型国内外学术交流活动,通过搭建一个真诚交流、潜心探讨、互相学习的平台来更好地推动和促进我国电子机械行业的发展。

本论文集收录的82篇论文,是审稿专家从143篇投稿论文中精心选取的,涉及电子机械工程的各主要领域,其学术水平和技术参考价值亦有一定提高。它反映出在电子机械工程分会的组织与推动下,各成员单位的学术气氛进一步浓郁、研究的深度不断加强、广度不断拓展、优秀研究成果不断涌现。相信在各成员单位的共同努力下,在广大科研人员的积极参与下,本领域的研究必定会对我国电子机械行业的发展和技术进步起到越来越大的推动作用。

为了进一步拓展本领域的学术交流,论文集首次采用公开刊号出版。借本次学术会议论文集编印发表之际,向积极组稿、撰稿和支持分会学术活动的委员们和单位致以诚挚的谢意!向为本论文集组稿和编辑等工作付出辛勤劳动的电子工业出版社编辑们及分会秘书处的同志们表示由衷的感谢!

预祝本届学术会议圆满成功!

中国电子学会电子机械工程分会

二〇〇七年十月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任 and 行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第一部分 系统与结构设计

电子产品多学科设计优化研究	徐德好 平丽浩 钱吉裕 (3)
全动天线结构系统防雷	李小平 (10)
机载雷达天线罩抗雷击及防静电设计	韦生文 龚光福 (16)
基于 Workbench 的多学科仿真分析平台开发	曾锐 平丽浩 (21)
雷达载车双闭环调平系统设计	万其 张启杰 (29)
电子设备安装架动力学分析与优化设计研究	冯刚英 王勇 任建峰 (34)
T/R 组件的机电一体化设计	陆萍 张福琼 (42)
CAID 技术在雷达结构造型中的应用	王子健 (46)
电动栏杆机系统设计中的关键技术分析	赵志强 (50)
仓储温湿度检测系统的设计	王利全 陈志平 施浒立 (58)
卫星跟踪稳定平台实现	汤铭 (64)
钛合金在雷达扫描器结构设计中的应用	唐治安 陈泽彪 孙晓刚 (69)
小口径天线主反射面除冰雪装置	胡海峰 (73)
某 16 米通信站天线俯仰缓冲器的设计	陈庚超 (81)
基于 CAN 总线的雷达阵列天线同步驱动系统设计	夏勇 李建峰 (85)
军用加固液晶显示器技术研究	黄朝晖 薛冰 熊昌国 李明武 (92)
单电机驱动大惯量天线转台抗风设计	季必玉 夏勇 (97)
水下舱内壁挂式设备的结构设计	王炜迪 (101)
基于 CPCI 总线的军用插件、插箱结构设计	程国辉 (106)
某车载雷达户外接收机箱的设计	刘国维 (113)
蜂窝夹层结构天线罩疲劳特性研究	刘捷 陈志刚 尚仰宏 (119)
使用 TOP-DOWN+模块化设计的方法进行大系统设计	洪林峰 (124)
快速拆装通信柜设计	刘江燕 (127)
弹载电子设备的结构设计	钟世友 (131)
某振子天线装配尺寸链的分析与设计	方伟 陈福林 (136)
一种三维高精度小型天线座结构设计	罗道江 (141)
一种车载天线的结构设计	闫颂 郑新芬 (146)
某雷达天线结构的优化设计	张雪芹 张盛华 袁健 (150)
优化高机动雷达天线车调平方案	熊纬 (155)

镁合金在雷达天线中的应用	唐宝富 (161)
电子设备电缆网的布线设计	董景宇 (166)

第二部分 先进制造技术

电气互联技术及其技术体系	周德俭 吴兆华 (175)
系统级封装 (SOP) 技术及应用	陈萍 (183)
TC4 钛合金的高速干式切削初探	陈泽彪 唐治安 (191)
UGS 环境下加工模板的设置和参数继承	刘建养 申戈琨 (195)
雷达精密深腔壳体零件数控加工动力学研究	陈晓梅 曾静 张蕾 卢泉亮 (201)
屏蔽盒数控铣加工工艺及方法	任力军 (207)
微波功率管的组装工艺	林伟成 (213)
高精度双曲率反射面天线成形技术研究	黄朝晖 王双宝 刘恺 (219)
8mm 平板裂缝天线的制造	童伟 申戈琨 (223)
数控铣削加工走刀方式的研究	童伟 申戈琨 (229)
密封件现场成型技术研究	张京 (235)
基于 Pro/E 的钣金零件展开方法探讨	杨丽 周飞 (241)

第三部分 环境适应性设计

弹载电子设备抗强冲击设计概述	季馨 (249)
通信设备的电磁兼容性结构设计	董爱华 (254)
导热系数测试的试验方法研究	景莘慧 严晓辉 (261)
冲击冷却过程的场协同分析	钱吉裕 平丽浩 (265)
混波室和 GTEM 小室辐射发射测试比较	周香 (272)
某设备的机箱屏蔽结构设计	黄梦彬 (279)
无环控冷却条件下的机载雷达发射机的热设计	沈爱强 (283)
军用加固便携式设备电磁兼容设计	刘崑 (288)
车载电子设备的电磁兼容性加固	顾彦博 (292)
振动测试技术在某型号雷达调试过程中的应用	王晓红 (298)
固态功率组件热耦合效应研究	杨双根 (304)
印制单元板模块热分析	张遵鸥 (310)

功率放大器散热优化设计	张彦斌 (316)
功率器件在真空环境中的热分析及研究	邢旭东 陈怀超 (323)
微波交通检测器的电磁兼容设计	蒋铁珍 孙俊 (329)
圆柱形热过孔的等效热阻分析方法及数值模拟验证	胡家渝 吕倩 (336)
天线阵发射模块散热器的设计	王新军 (341)
三维立体封装 (3D) 结构与热设计面临的挑战	王文利 梁永生 (348)

第四部分 建模仿真与其他

误差设计新理念与方法	施浒立 赵彦 (355)
车载机柜动态特性仿真分析与研究	吕超凡 冯建华 (363)
综合平台电子系统布线设计与 EMC 仿真	方卫中 (372)
基于 Compass 的卫星地面站监控系统研究	崔君霞 施浒立 (385)
机电一体化系统中的软件系统设计探讨	张静 陈志平 施浒立 (391)
基于 FPGA 的 H 桥电机 PWM 控制器设计	汪万根 刘梅英 (395)
用广义延拓逼近法优化设计凸轮轮廓	钟山 黄美发 钟艳如 匡兵 许敏 (400)
基于图论的装配公差建模方法	匡兵 黄美发 钟艳如 (406)
机载雷达扫描器运动学仿真	姚黎 (413)
MSC 软件在天线结构设计分析中的应用	王建宅 郭海鹰 (420)
天线反射面的刚度仿真	王亚锋 鞠金山 (427)
某星载电子设备动力学仿真	管宇辉 徐伟杰 (433)
某电子设备的热设计仿真实例	白秀茹 (442)
某雷达风道设计的阻力特性的仿真与验证	宋东峰 张兴唐 冯大成 江水明 (449)
上升型小波变换及其在突变信号检测中的应用	程扬波 (455)
基于拉氏变换初值定理的冲激响应不变法的修正	龚陶波 李志扬 (463)
无人机载 SAR 雷达波束稳定技术	乐敬明 (468)
基于矩量法的金属圆柱散射体散射特性研究	邓斌 李建新 胡明春 (472)
火灾下防火卷帘主轴的极限承载能力有限元分析	冯艺 黄美发 钟艳如 (479)
基于方差和自适应滤波对火焰状态的识别	张芳 黄大贵 黄逸平 (484)
基于布尔处理的键盘矩阵解读方法之探讨	张春峰 (489)

第一部分

系统与结构设计

电子产品多学科设计优化研究

徐德好 平丽浩 钱吉裕

(南京电子技术研究所 南京 210013)

摘要: 本文针对电子产品多学科综合优化要求, 介绍多学科综合设计优化平台的构建方法, 并在此平台上完成了天线子阵的设计与优化, 给出了优化结果。最后介绍了多学科综合设计优化未来发展的思路。

关键词: 天线子阵, 多学科优化设计, 优化, 冷板

Research of Multi-disciplinary Design and Optimization of Phased Sub-array Antenna

Xu Dehao Ping Lihao Qian Jiyu

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: Phased array antenna consists of several sub-array antennas, and each sub-array antenna includes radiating elements, T/R module, cold plate and beam control device, etc. Design of phased array antenna is a typical multi-disciplinary problem, relating to electromagnetics, calorific, hydrokinetics, mechanics, etc. The performance of antenna depend upon plus of T/R, veracity of phase, position precision of radiating element. It is indispensable to improve the fixing precision, and enhance the stiffness of the underprop and minish the distortion of the underprop, to ensure the radiating elements locate well and truly. In addition, it is necessary to ensure all T/R modules work under the uniform temperature because the temperature has a direct impact on the performance of phase and plus of T/R module.

This paper describes the engineering optimization requirement of a phased sub-array antenna, and present the method process of multi-disciplinary optimization.

Key words: Phased Array Antenna, Multi-Disciplinary, MDO

1 概述

任何复杂系统的开发都是多目标、多约束的优化问题。而复杂电子电系统的开发还涉及到多物理场的耦合问题, 或是一多学科问题, 所涉及的学科可能包括: 电磁场、微波、通信、结构力学、流体力学、热学等。当前, 复杂机电系统的开发面临两个问题: 其一, 使用性能一般与数字仿真性能有较大差距; 其二, 可预见的系统综合性能指标却很难实现。

对于第一个问题，是目前的单学科仿真分析的缺陷。没有多场耦合分析，很难得到真实使用状态下的性能。自然界中任何物体均同时处于多个场作用下，其存在状态也是多场耦合、相互影响的结果。

第二个问题，是系统的多学科综合优化问题。众所周知，最优的零部件并不一定能组成最优的系统，合格的结构设计性能加上合格的电讯设计性能并不一定能得到合格的产品。要实现系统综合性能指标的优化，一方面需要学科间的数据耦合，另外需要实现多学科的并行分析。

而过去的设计模式（见图 1）下，将同时影响产品性能的各因素人为地割裂开来，并没有充分考虑或无法考虑各个学科之间的相互影响将产生的协同效应，无法预知使用状态下真实性能，更难得到系统的整体最优解。同时，整个产品研制流程大大延长。

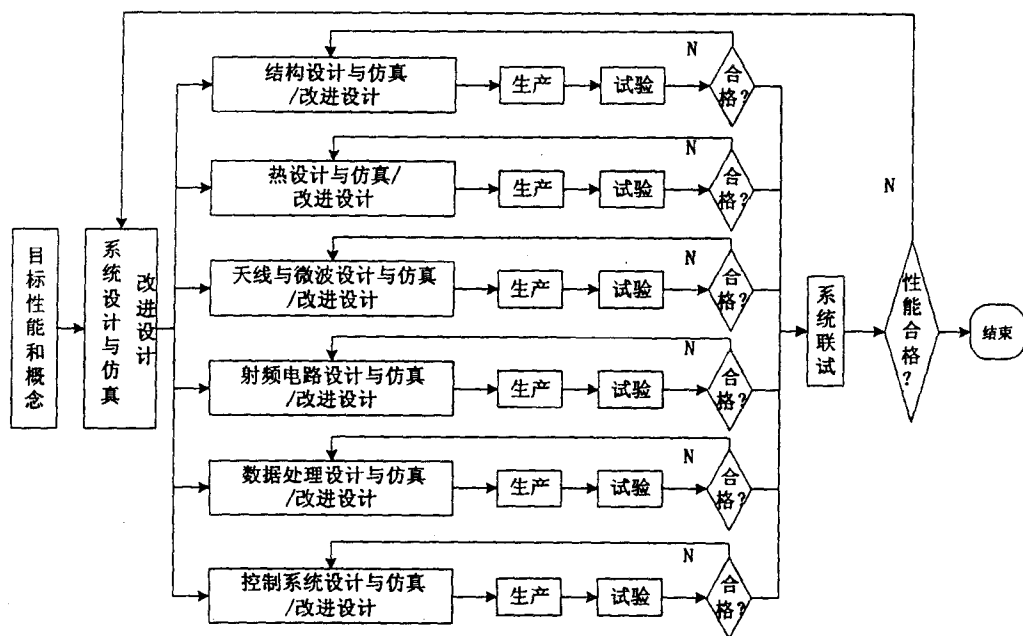


图 1 传统电子设备设计流程

电子产品的研发，其设计约束可能是体积重量、环境条件等；优化目标可能是设备电磁性能最优、可靠度最高、全寿命周期费用最小等。因此，产品开发中，需要利用系统设计和 MDO 设计思想，合理平衡相互冲突的技术指标和经济指标。电子产品 MDO 流程如图 2 所示。

虽然多学科分析与优化的思想很早就被人们认识到，但直到最近 10 年才正式将 MDO 作为一个新的领域。近年，国外无论是基础技术研究、软件平台还是工程应用方面都有了长足的发展。另外，MDO 的研究也促使企业界从传统的设计模式向并行化、一体化的先进模式转化。

国内在 MDO 方面的研究近年也有较快的发展，主要集中在航空航天以及微机电系统行业，在电子行业鲜有报道。研究的内容还多集中在 MDO 算法方面。

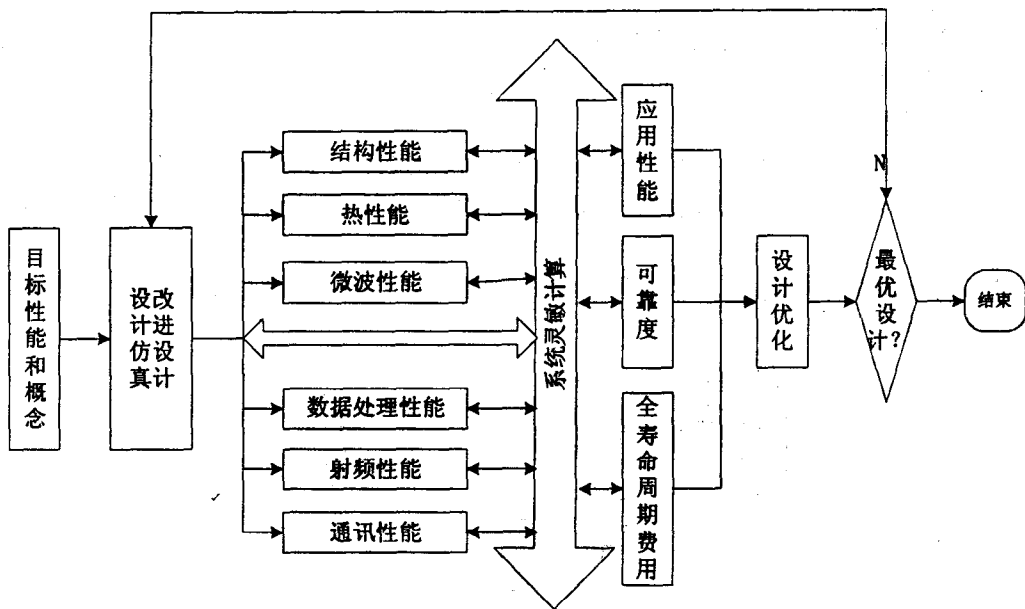


图2 电子产品 MDO 流程

2 MDO 设计方法及工程实现

多学科优化设计可用以下简单的数学模型表示：

$$\text{Min } f(X) \quad X \in R^n$$

$$\text{s.t.} \quad g_i(X) \leq 0 \quad (i=1,2,\dots,m)$$

$$h_j(X) = 0 \quad (j=1,2,\dots,p < n)$$

其中， $f(X)$ 为目标函数， $X \in R^n$ 表示向量 X 属于 n 维欧氏空间 R^n 中的一个设计点。 $g_i(X) \leq 0$ ($i=1,2,\dots,m$)和 $h_j(X) = 0$ ($j=1,2,\dots,p < n$)组成了设计点的可行域，即设计约束。

电子行业的优化问题，各学科或系统中的各子系统的设计变量往往具有耦合关系。优化过程中，需要建立各学科间的信息流，通过多次迭代才能得到整体优化解。因此，电子行业 MDO 研究主要有三个方面：（1）面向设计的各单学科的分析方法和软件集成；（2）探索有效的 MDO 算法；（3）MDO 分布式计算机网络环境。本文主要针对第 1 个方面进行探讨，并探索建立多学科综合设计优化平台。

多学科综合设计优化平台需要综合集成不同学科专业计算分析工具，并针对产品开发应用需求，形成一个面向设计师的设计、仿真和优化的集成开发环境，在此环境下一方面可以仿真在多物理场下产品的实际性能，另外还可以实现各种几何拓扑结构的参数优化、参数敏感性分析、多方案对比分析，最终实现多方案寻优功能。

多学科综合设计优化平台的一个很重要的功能是需要实现多物理场的耦合。耦合分析就是考虑两个或多个物理场之间相互作用的分析。例如：考虑流体和固体结构之间互相作用，求解流场运动与结构变形互相影响就是典型的流-固耦合分析。其他耦合的例子还有热-固耦合、热-电耦合、电-磁耦合分析等等。

耦合分析通常有两种方法：紧耦合（或称强耦合）和松耦合（或称弱耦合）。紧耦合一般

只需要进行一个分析过程来实现多物理场耦合。松耦合则包括两个或多个按一定顺序排列的分析，通过将前一个分析的结果作为载荷施加到下一个分析中的方式进行耦合，每一个分析可能属于不同的物理场。松耦合按数据的传递方向又分为单向耦合与双向耦合。电子产品的学科耦合多为松耦合。

多学科综合设计优化平台另一个重要功能是流程管理。不同的电子设备的设计分析流程是不一样的。平台的流程管理功能是需要平台中建立流程和编辑流程，并在其中定义和管理信息流。

整个平台的构架如图 3 所示。平台的构架是面向设计的。各学科属性模型的建立均在统一的界面下进行。

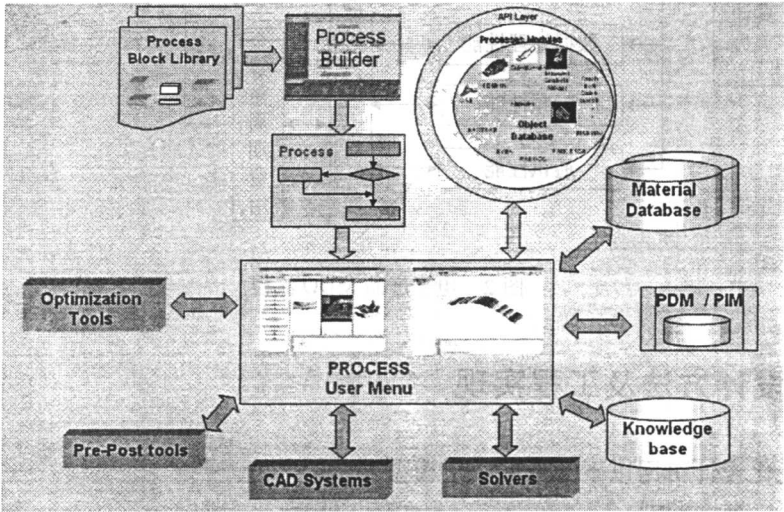


图 3 多学科综合设计优化平台构架

3 天线子阵的综合设计优化

本文所研究的天线子阵为一维直线相控阵列，它包含天线辐射单元、T/R 组件、冷板、波控组件、电源等。天线子阵原理组成如图 4 所示。

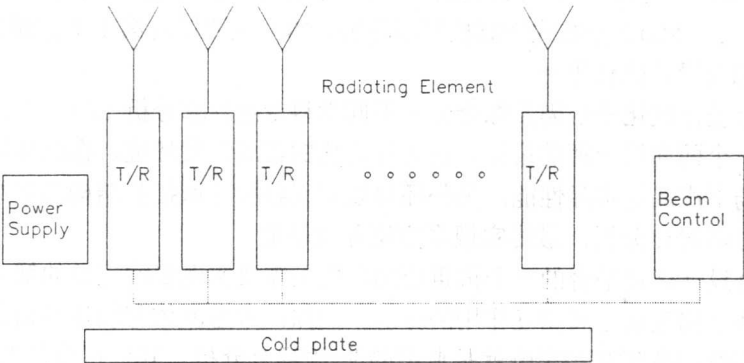


图 4 天线子阵组成图

天线子阵是天线的组成单元，其性能直接影响天线的增益和副瓣。其设计是一典型的多学科问题，涉及结构力学、流体动力学、热学以及电磁学。

天线性能同辐射单元的位置精度、各 T/R 组件的增益、T/R 组件的相位精度密切相关。要保证各天线辐射单元精确地分布在设计位置上，一方面，需要提高安装精度，另外更需要提高辐射单元安装支撑架的刚度，以减小外力引起的天线阵面变形。阵面变形对天线性能的影响可由仿真计算得到；而 T/R 组件的增益和相位性能同温度的关系则需要由试验获得。图 5 是 T/R 组件发射相位同温度的关系曲线，横坐标为温度（℃），纵坐标为相位（°）。

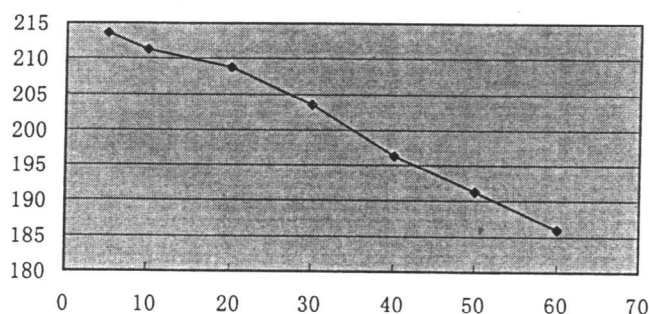


图 5 T/R 组件发射相位同温度的关系曲线

如上所述，相控阵天线要获得较高性能，需要精确控制各 T/R 组件的相位。假定所有 T/R 组件固有特性一致，那么要提高天线的性能，就需要提高冷板的温度一致性。这是本问题的第一个耦合关系。

另外，天线子阵中的冷板既是冷却功能件，又是天线子阵的支撑框架。因此冷板的力学性能决定了辐射单元的位置精度。冷板的力学变形将使固定在它上面的辐射单元偏离微波设计中的理想值，如图 6 所示。这是本问题的第二个耦合关系。

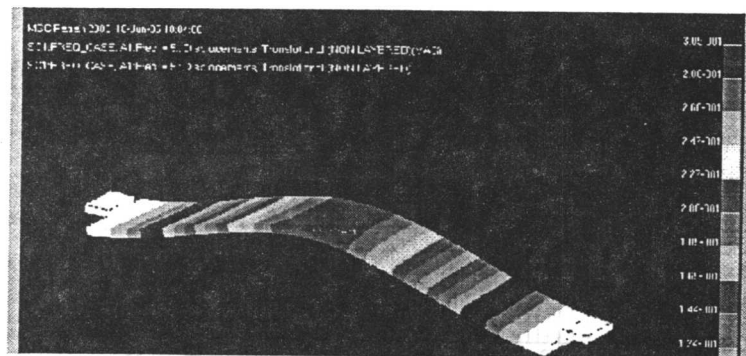


图 6 冷板的力学变形

冷板的力学模型为两端固支的一块平板，但内部流体的压力也会导致冷板的变形。因此，流场 CFD 的压力分布也是力学分析的一个边界条件。这是本问题的第三个耦合关系。

本问题中，天线子阵的综合设计优化是在规定的环境条件下，实现天线子阵增益最大、重量最小。而冷板的冷却性能和力学性能决定了 T/R 组件的相位精度以及辐射单元的位置精度，因此，天线子阵的综合设计优化问题最终转化为冷板的综合设计优化。

冷板内部各导流鳍片的高度决定冷板各处流速的分布，也就确定了冷板各处 T/R 组件的