

微波天线多场耦合理论模型与多学科优化设计的研究

段宝岩, 王 猛

(西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 建立了微波反射面天线、平板裂缝天线及有源相控阵天线的多场耦合理论模型, 并给出了相应的求解策略与方法, 研究了系统误差、随机误差及温度等因素对天线电性能的影响, 通过实验验证了模型及求解方法的正确性. 最后, 通过引入统一的设计向量建立了基于多场耦合理论的多学科优化设计模型, 降低了设计工作的重复性, 减少了后期的调试难度.

关键词: 微波天线; 多场耦合; 理论模型; 求解策略; 多学科优化设计

中图分类号: TN82 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 10-2051-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.10.028

Research of the Theoretical Model of Multi-field Coupling and Multidisciplinary Optimization Design on Microwave Antennas

DUAN Bao-yan, WANG Meng

(Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The multi-field coupling models of microwave reflector antennas, plate slot-array antennas and active phased array antennas have been developed in this communication, based on which the solution strategies and methods are presented to determine efficiently the effects of systematic errors, random errors and temperature etc. on the electrical performance of antennas. Some experiments are performed to validate these models and methodologies. Finally, a multidisciplinary optimization design model based on the multi-field coupling theory is derived with employing a common design vector, which can greatly reduce the repetitive works and ease the debugging of products.

Key words: microwave antennas; multi-field coupling; theoretical model; solution strategies; multidisciplinary optimization design

1 引言

多场耦合是指在一个系统中由两个或多个物理场通过交互作用而相互影响的物理现象^[1], 普遍存在于自然界及工程实际中. 随着科学技术的飞速发展, 多场耦合在工程中的影响表现愈加显著, 为此, 不仅需要了解多场问题中各场本身特性, 更要深入探索多物理场之间的相互作用及相互关系. 随着对问题认识的不断加深和经验的逐渐积累, 以及计算机技术、建模方法及数值求解策略的快速发展, 近年来越来越多的研究人员开始关注多场耦合问题^[2-10], 并在相关领域开展了深入研究. John Voeller 预测在未来 25 种重要新技术中, 多场耦合问题将会得到高度重视^[11]. 需要指出的是, 以往的多场耦合研究主要集中在航空、航天、机械等领域^[12], 考虑

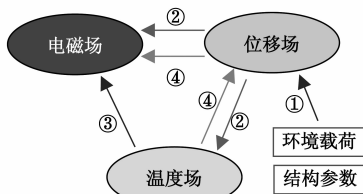
的主要是结构-热耦合^[13-14]、流固耦合^[15]等机械场内部之间的耦合问题, 很少涉及与微波电磁场间的耦合. 微波天线中存在着电磁场、结构位移场和温度场, 是机、电、热多学科相结合的系统, 其性能的成功实现不仅依赖于各学科本身的设计水平, 更取决于多学科间的交叉融合^[16-17]. 如天线机械结构不仅是其电性能实现的载体和保障, 且往往制约着电性能的实现. 因此需要建立微波天线的场耦合理论模型, 在得出该模型求解策略与方法的基础上, 综合运用多学科知识来进行优化设计, 以期使微波天线的电磁与结构性能达到全优.

2 微波天线多场耦合理论模型的建立

在大型反射面天线、平板裂缝天线、有源相控阵天线等典型微波天线中, 结构位移场、电磁场与温度场

之间的相互联系甚为紧密(见图1),亟待建立三场之间的场耦合理论模型^[17].其中,反射面天线与平板裂缝天线是两场耦合问题比较突出的两种微波设备.针对此耦合问题,需建立结构位移场与电磁场的两场耦合模型(即机电两场耦合模型),并基于此提出从结构设计变量到电性能的优化设计模型,为机电综合优化设计奠定理论基础.对有源相控阵天线而言,其场耦合关系则表现为结构位移场、电磁场与温度场的三场耦合,相互关系更为复杂,需建粒机电热三场耦合模型.

对于图1所示的三场问题,环境载荷与结构参数将引起结构变形,即结构位移场(路径①),位移场将通过位移影响电磁场与温度场(路径②).温度场带来的影响有两种形式,一是引起电磁器件(如T/R组件)本身性能的变化,从而间接影响设备的电磁性能,即影响电磁场(路径③),二是通过引起位移场变化来影响电磁场(路径④).下面分别对三类天线阐述如下.



- ① 环境载荷与结构参数会导致结构变形,从而引起电子装备的结构位移场
- ② 位移场通过位移的变化影响电磁场和温度场
- ③ 温度场通过温度的变化影响电子器件的性能,进而影响电磁场
- ④ 温度场作为热载荷会引起结构热变形,从而通过温度影响结构位移场,最终通过位移的变化影响电磁场分布

图1 微波天线三场耦合关系示意图

2.1 反射面天线

反射面天线(如图2所示)通常工作在较高频段,其电磁性能受到各种误差的影响,误差主要包括随机误差和系统误差.随机误差主要是在面板、背架及中心体的制造、装配等过程中产生的误差.它有三种描述方法:第一,根据具体的加工工艺手段,从众多数据中统计得出随机分布的均值与方差,假定一种合理的分布,然后可得出其具体的分布函数来.第二,基于均值与方差,由计算机随机产生出反映在面板上的分布函数.第三,应用分形函数等形式直接描述加工造成的幅度、频度与粗糙度,进而产生相应的分布函数.不论通过哪一种办法,都可将产生的分布函数(不妨记为 Δz_s)叠加到系统误差(不妨记为 Δz_s)所对应的反射面变形面上,作为统一误差参与到电性能的计算中去.系统误差是天线在自重、环境温度、风等外部环境载荷作用下产生的变形,如果不考虑随机风荷,则为确定性误差,它可以通过结构有限元分析得到.就随机误差而言,Ruze^[18]最早对此进行了研究,建立了天线效率与反射面型面误差之间的关系,即著名的 Ruze 公式,

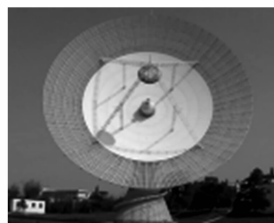


图2 某40m口径S/X双频段陆基圆抛物反射面天线

$$\eta_s = \frac{G}{G_0} = \exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma}{\lambda}\right)^2\right] \quad (1)$$

其中, G 和 G_0 分别为天线有表面误差和无表面误差时的增益, λ 为工作波长, σ 为表面半光程差的均方根值(rms).另外,随机误差也会导致副瓣区域的特性变差,Sami教授对此用概率统计的方法进行了研究^[19].但两人的工作中均未考虑系统误差的影响.而对于系统误差,Von Hoerner提出了最佳吻合的概念^[20],通过将副反射面实时移到最佳吻合抛物面焦点上的办法予以补偿,但并未考虑其与电性能的关系.

对实际天线的反射面天线而言,以上两种误差是同时存在的.因此,欲考虑综合性能与结构参数及各种误差之间的关系就必须从机电交叉、两场耦合的角度出发,找出它们之间的定量关系,给出有效的求解策略与方法,并通过试验予以验证.基于这一想法,文献^[21-24]进行了比较系统的研究并得出了下面的场耦合模型.

2.1.1 机电两场耦合模型

对于图3(其中 xoy 为等相位口径面, f 为焦距,反射面的口径为 $D=2a$)所示的理想前馈式反射面天线,可得到由馈源辐射的电磁波经反射面反射后到达口径面时的电磁场矢量分布,进而由口径场的幅度(因这时的相位相同)分布,可得到反射面天线的辐射远场方向图,式中, (θ, φ) 为远区观察方向, A 为反射面投影到 xoy 面上的口径面面积, $f(\xi, \varphi')$ 为馈源初级方向图.

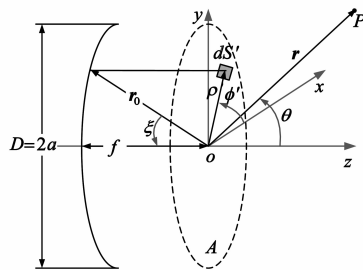


图3 前馈式反射面天线几何关系

$$E(\theta, \varphi) = \iint_A E_0(\rho', \varphi') \cdot \exp[jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')] \rho' d\rho' d\varphi' \quad (2)$$

$$E_0(\rho', \varphi') = \frac{f(\xi, \varphi')}{|r_0|} \quad (3)$$

反射面天线的电性能与结构相关的主要因素包括反射面面板、馈源位置与姿态等,而外部载荷作用会引起反射面变形、馈源位置偏移和姿态偏转等结构变化.假设实际工程中,自重、风及温度等外部载荷将使反射面发生变形 Δz_s 、馈源位置偏移 \vec{d} 和姿态偏转 $\Delta \xi, \Delta \varphi'$,为反映这些误差的影响,文献[25-34]建立了如式(4)所示的机电两场耦合模型,

$$E(\theta, \varphi) = \iint_A \frac{f_0(\xi - \Delta \xi(\delta(\beta)), \varphi' - \Delta \varphi'(\delta(\beta)))}{r_0} \cdot \exp[jk\rho' \sin\theta \cos(\varphi - \varphi')] \cdot \exp[j\varphi_f(\delta(\beta)) + \varphi_s(\delta(\beta)) + \varphi_r(\gamma)] \rho' d\rho' d\varphi' \quad (4)$$

式中, $\delta(\beta)$ 为与天线结构变形对应的结构位移场, β 为结构设计变量(包括尺寸、形状、拓扑及类型等四类变量), $f_0(\xi - \Delta \xi(\delta(\beta)), \varphi' - \Delta \varphi'(\delta(\beta)))$ 为反射面结构位移场引起的馈源指向误差对口径场幅度的影响项, $\varphi_f(\delta(\beta)) = k\vec{r}_0 \cdot \vec{d}(\delta(\beta))$ 为馈源位置误差对口径场相位的影响项, $\varphi_s(\delta(\beta)) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z_s(\delta(\beta)) \cos^2(\xi/2)$ 为主反射面表面变形对口径场相位的影响项, $\varphi_r(\gamma) = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta z_r(\gamma) \cos^2(\xi/2)$ 为反射面板的随机误差对口径场相位的影响项.

2.1.2 实验验证

为验证两场耦合模型(4)的正确性,特采用如图4所示的某3.7m口径、C/Ku双频段、环焦、卡塞格伦式双反射面天线加以验证.其副反射面直径为0.44m,焦距比为0.35,工作频率为12.5GHz,馈源为介质加载喇叭.口径场分布函数为,

$$f_s(\bar{\rho}') = \begin{cases} 1 - 0.9\exp(\bar{\rho}'^2 - 1), & \bar{\rho}' \geq 0.5 \\ 1 - 0.85\exp(0.13 - \bar{\rho}'), & \bar{\rho}' < 0.5 \end{cases}$$

式中, $\bar{\rho}' \in [0, 1]$ 是归一化半径.天线的主反射面由12块相同的扇形面板组成,背架结构包括12根辐射梁、1根环梁及中心体.每块扇形面板与辐射梁通过13个螺栓连接.



图4 某C/Ku波段3.7m口径反射面天线

为使反射面变形,并考虑到该天线口径场的幅度

分布是“双峰”形式,即单块面板的中间部分幅度大,故从面板背面施加载荷(图5中面板上的*点代表载荷施加位置),使13个螺栓的中间5处对应位置分别产生1.5mm与3mm的两种法向(相当于三个坐标方向)位移,而每一种工况所对应的结构变形均可通过有限元分析获得.整个天线结构的有限元模型由7569个节点和1237个单元组成,单元包括252个梁单元和985个壳单元.反射面的型面精度测量由激光全站仪完成,电性能由频谱仪测得.测试现场的环境温度为25℃,风速为4m/s.

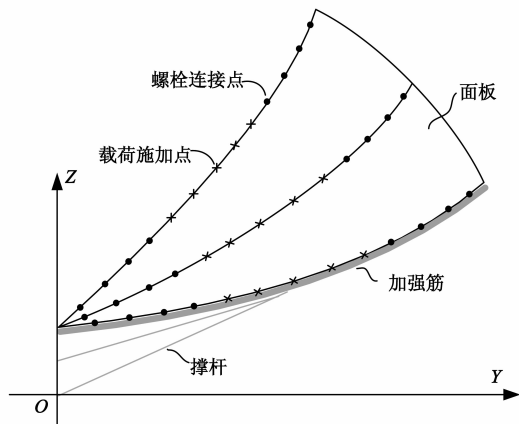


图5 载荷施加位置示意图

表1为原有状态(工况1)和以上两种工况下的计算与实测结果的对比情况.计算分两种情况进行,一是利用机电两场耦合模型得到,二是利用常规方法得到.机电耦合模型在三种工况下相对于实测结果的天线的增益、第一副瓣电平及主波束宽度的最大相对误差分别为1.13%、4.67%及2.63%.而常规方法的最大相对误差分别为1.28%、5.32%及2.63%.显然,相对于常规方法,机电两场耦合模型的计算值与实测结果更为接近,从而验证了机电两场耦合理论模型的正确性.

2.2 平板裂缝天线

2.2.1 机电两场耦合模型

平板裂缝天线(如图6所示)是一种薄壁、多层腔体结构.它由激励、耦合及辐射波导组成,依靠众多辐射缝辐射的能量在空间形成方向图.与反射面天线类似,平板裂缝天线结构误差也分为随机误差和系统误差两大类.随机误差为天线加工、装配过程中引入的各波导和缝隙的尺寸、位置等误差.系统误差为天线在实际工作环境中受到外部载荷(振动、冲击、惯性载荷)引起的结构变形.由于此类天线多用于机载雷达或导弹末制导系统中,结构误差可使阵面辐射缝的位置和姿态以及互耦效应发生变化,从而导致天线电性能下降.因此,需首先分析结构误差所带来的辐射缝位置偏移和指向偏转对电性能的影响,同时考虑缝腔变形对辐射

缝辐射电压的影响,建立阵面结构位移场和天线电磁场的机电两场耦合模型^[35-38].

表 1 某 3.7m 口径反射面天线在不同工况下的分析和实测结果对比情况

情况	增益 /dB	相对误差 /%	3dB 波宽 /°	相对误差		相对误差	
				左一副瓣 /dB	右一副瓣 /dB	左一副瓣 /%	右一副瓣 /%
工况 1 实测	52.23	—	0.380	—	-14.54	—	-14.18
工况 1 耦合	52.82	1.13	0.39	2.63	-14.59	0.34	-14.27
工况 1 常规	52.90	1.28	0.39	2.63	-14.66	0.83	-14.31
工况 2 实测	52.12	—	0.396	—	-15.24	—	-15.41
工况 2 耦合	52.70	1.11	0.399	0.76	-14.82	2.76	-14.69
工况 2 常规	52.77	1.25	0.400	1.01	-14.78	3.02	-14.59
工况 3 实测	51.79	—	0.408	—	-14.81	—	-14.69
工况 3 耦合	51.90	0.21	0.403	1.22	-14.62	1.28	-14.29
工况 3 常规	52.03	0.46	0.402	1.72	-14.48	2.23	-14.18

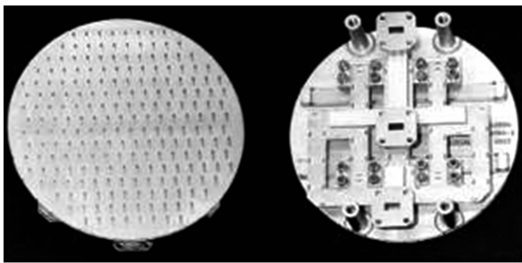


图 6 某平板裂缝天线实物图

如图 7 所示,天线的辐射阵面位于 xoy 平面内, z 轴正方向为阵面法线方向,原点 o 为阵面的几何中心.辐射阵面为开有大量辐射缝的平板,通过辐射缝将电磁能量辐射到外部空间.为了清晰描述天线的坐标关系,图中只给出了第 n 个缝隙(辐射缝),缝隙中心的坐标为 $\mathbf{r}_n = (x_n, y_n, 0) (n = 1, 2, \dots, N)$, N 为阵面缝隙的总数.于是,在观察方向 $P(\theta, \varphi)$ 处,平板裂缝天线的场强方向图为

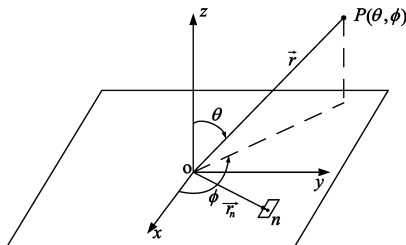


图 7 平板裂缝天线几何关系

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N V_n \cdot f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) \cdot e^{j\eta_n + jk\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{r}}} \quad (5)$$

式中, V_n 与 $\eta_n (n = 1, 2, \dots, N)$ 分别为第 n 个缝隙辐射电压的幅度和相位, $f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) (n = 1, 2, \dots, N)$ 为第 n 个缝隙的单元方向图, l_n, w_n 分别为第 n 个缝隙的

长度和宽度, θ, φ 为空间 P 点的观察方向, k 为传播常数, $\hat{\mathbf{r}} = \frac{\mathbf{r}}{r} = (\sin\theta \cos\varphi, \sin\theta \sin\varphi, \cos\theta)$ 为矢径 \mathbf{r} 的单位矢量. $f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi)$ 的具体函数形式为,

$$f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) = jk(H_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) \sin\varphi \hat{a}_\theta + H_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) \cos\varphi \cos\theta \hat{a}_\varphi) \quad (6)$$

$$H_n(l_n, w_n, \theta, \varphi) = \frac{\frac{2\pi}{l_n} \cos\left(\frac{kl_n \sin\theta \cos\varphi}{2}\right)}{\left(\frac{\pi}{l_n}\right)^2 - (k \sin\theta \cos\varphi)^2} \cdot \frac{\sin(k \sin\theta \sin\varphi w_n / 2)}{k \sin\theta \sin\varphi w_n / 2} \quad (7)$$

式中, $\hat{a}_\theta, \hat{a}_\varphi$ 分别表示在球坐标系下 θ, φ 方向的单位矢量,缝电压 V_n 将影响 P 点的幅度和相位, $f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi)$ 只影响 P 点幅度,辐射缝的位置 \mathbf{r}_n 只影响 P 点相位.

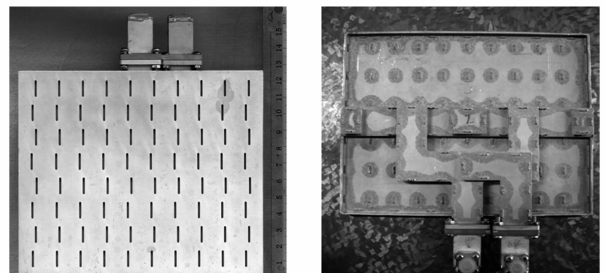
基于环境载荷对天线结构变形(辐射缝位置和指向、缝腔变形)的影响,通过分析辐射缝电压误差和结构误差而产生的天线口面幅相分布误差,文献^[35]建立了如下的机电两场耦合模型,

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi, \delta(\beta), \gamma) \cdot V'_n(\delta(\beta), \gamma) e^{j\eta'_n(\delta(\beta), \gamma)} \cdot e^{j\varphi_n(\delta(\beta), \gamma)} \quad (8)$$

式中, $A_n = e^{jk\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{r}}_0}$, $\delta(\beta)$ 为与天线结构变形相对应的结构位移场, β 为结构设计变量, γ 为制造、装配等过程中引起的随机误差, $f_n(l_n, w_n, \theta, \varphi, \delta(\beta), \gamma), V'_n(\delta(\beta), \gamma)$ 及 $\eta'_n(\delta(\beta), \gamma)$ 分别为天线变形和随机误差引起的单元方向图、缝电压幅度及缝电压相位影响项, $\varphi_n(\delta(\beta), \gamma)$ 为口面空间相位受天线变形引起的变化项.在上述机电两场耦合模型中,辐射缝电压受到缝腔内部变形和辐射缝外部空间辐射互耦的影响,导致其幅度和相位的变化.耦合模型中同时考虑了天线制造和装配过程中引起的随机误差.

2.2.2 实验验证

为验证耦合模型(8),特采用图 8 所示的某弹载 Ku 频段平板裂缝天线进行验证.该天线中心频率为 15GHz,带宽为 400MHz,工作时要求天线增益不低于 25dB,最大副瓣电平不高于 -17dB,电压驻波比小于



(a) 正视图 (b) 背视图

图 8 某平板裂缝天线结构实物图

1.5. 该天线电磁传输的基本路线是电磁信号按顺序经和差网络、激励波导、激励缝、耦合波导、耦合缝、辐射波导, 馈电给辐射缝, 通过控制各缝隙的偏置(倾角)和长度得到预期的辐射缝电压, 以满足设计的阵面口径分布, 达到电性能指标要求. 当然各类缝隙带来的波导不连续, 会造成电磁信号产生回波. 该天线可分别采用和差网络的和口与差口向两个子阵馈电, 以实现和方向图与差方向图.

该天线由辐射层、耦合层、激励层和 1 根激励波导组成, 其中每个辐射层波导包括 8 个辐射缝, 每个耦合层波导包括 5 个耦合缝, 每个激励层波导有 1 个激励缝. 辐射缝形成 8×10 的阵列辐射板, 其阵面尺寸为 $150\text{mm} \times 126\text{mm}$, 厚度为 1mm , 各层波导间的壁厚为 1mm , 天线外层波导边的厚度为 2mm , 结构材料为铝合金. 根据天线薄壁、空腔结构的特点, 该天线有限元模型采用三角形壳单元, 单元总数与节点总数分别为 36127 个与 18137 个. 为使天线发生变形, 特设计了图 9 所示的装夹, 即在天线的四角位置采用卡口爪子将天线固定, 而后利用装夹上的调节螺栓从天线背面加力以使天线变形. 同时, 基于结构有限元分析得到整体变形信息. 试验分三种工况进行, 一是螺栓旋进量为零, 第二、三种工况的旋进量分别为 1.0mm 和 1.5mm . 阵面变形情况由激光跟踪仪测得, 电性能由频谱仪测得.

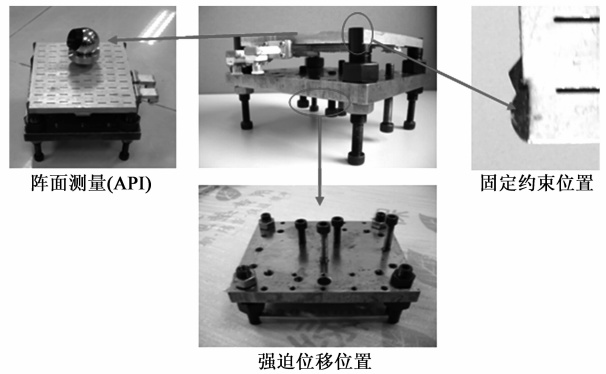


图9 天线试验的装夹设备实物图

表 2 给出了三种工况下的计算与实测结果的对比情况, 分两种情况进行, 一是利用机电耦合模型得到, 二是利用常规方法得到. 机电耦合在三种工况下相对于实测结果的天线的增益、第一副瓣电平及主波束宽度的最大相对误差分别为: 增益 1.46% 、最大副瓣电平 6.40% 、 3dB 波束宽度 2.95% . 而常规方法在三种工况下相对于实测结果的最大相对误差分别为: 增益 1.57% 、最大副瓣电平 9.13% 、 3dB 波束宽度 5.09% . 显然, 相对于常规方法, 利用机电耦合模型得到的计算值与实测结果更为接近, 从而验证了机电耦合模型的正确性.

表 2 某平板裂缝天线在不同工况下的分析和实测结果情况对比

情况	增益 /dB	相对误差 /%	方位面				俯仰面			
			最大副瓣 /dB	相对误差 /%	3dB 波宽 /($^{\circ}$)	相对误差 /%	最大副瓣 /dB	相对误差 /%	3dB 波宽 /($^{\circ}$)	相对误差 /%
实测	26.20	—	-18.48	—	9.25	—	-22.78	—	7.79	—
工况 1	耦合	0.99	-17.80	3.68	9.20	0.54	-22.73	0.22	8.02	2.95
	常规	1.30	-17.74	4.16	9.18	0.76	-22.70	0.35	8.04	3.21
实测	26.14	—	-16.95	—	9.23	—	-22.20	—	8.10	—
工况 2	耦合	1.19	-16.82	0.77	9.48	2.71	-21.69	2.30	8.21	1.36
	常规	1.30	-16.34	3.60	9.55	3.47	-21.14	4.77	8.29	2.35
实测	26.06	—	-17.96	—	9.12	—	-22.42	—	8.05	—
工况 3	耦合	1.46	-16.81	6.40	9.31	2.08	-21.83	2.63	8.22	2.11
	常规	1.57	-16.32	9.13	9.38	2.85	-21.75	3.00	8.46	5.09

2.3 有源相控阵天线机电热三场耦合模型

如图 10 所示的有源相控阵天线中, 外载荷(振动、冲击等)作用将导致阵面变形, 从而使众多 T/R 组件的位置与姿态发生改变, 从而影响天线远场方向图. 其次, 该天线阵面中存在大量的发热器件, 发热总量通常可达几千瓦甚至兆瓦, 温度分布的不均匀会使阵面发生变形, 从而引起远场方向图的变化. 再者, 温度的升

高会使阵面中 T/R 组件本身的电性能下降, 也将影响天线的远场方向图. 上述三方面的关系已在图 1 所示的影响关系图中给出.

如图 11 所示, 假设 N 个辐射单元位于有源相控阵天线(APAA)口径所包围的区域内, 处于 Oxy 平面内. 设第 n 个辐射单元的激励电流(复加权系数)为 $I_n \exp(j\varphi_n) \hat{\tau}_n$, 其中 $\hat{\tau}_n$ 为单元极化的单位矢量. 对于有源相

控阵天线,控制单元激励电流的相位,可改变有源相控阵天线辐射的最大值方向,

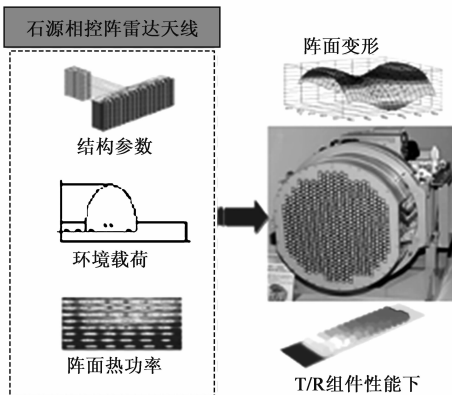


图10 某有源相控阵天线示意图

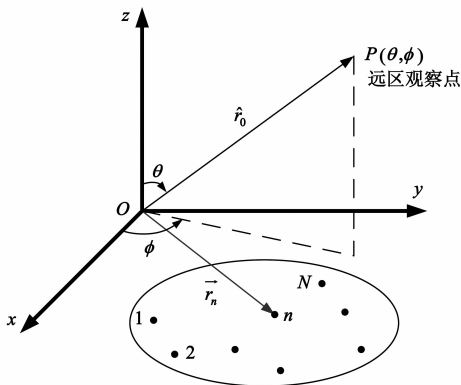


图11 有源相控阵天线空间坐标关系

这就是相控阵天线单元配相和波束扫描的原理. 设第 n 个辐射单元方向图函数为 $f_n(\theta, \varphi)$, 其位置矢量为 $\mathbf{r}_n = x_n\hat{i} + y_n\hat{j} + z_n\hat{k}$ (坐标原点到单元相位中心的矢径), 则在远区观察方向 $P(\theta, \varphi)$ 的场强可写为,

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot f_n(\theta, \varphi) \cdot I_n e^{j\varphi_n} \quad (9)$$

式中, $A_n = \exp(jk\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{r}}_0)$ 为单元空间相位因子, \mathbf{r}_n 为坐标原点到单元相位中心的矢径, $\hat{\mathbf{r}}_0$ 为观察方向 $P(\theta, \varphi)$ 的单位矢量, $f_n(\theta, \varphi)$ 为单元阵中方向图, I_n, φ_n 为激励电流的幅、相分布.

同时考虑系统误差与随机误差,文献[39-40]提出了如下的机电热三场耦合模型,

$$E(\theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N A_n \cdot f_n(\theta, \varphi, \delta(\beta, T), \gamma) \cdot I_n(\delta(\beta, T), \gamma, T) \exp[j\check{\alpha}_{nB}(T)] \cdot \exp[j\check{\alpha}'_n(\delta(\beta, T), \gamma)] \quad (10)$$

式中, $A_n = \exp(jk\mathbf{r}_n \cdot \hat{\mathbf{r}}_0)$ 为与单元对应的空间相位因子, $\delta(\beta, T)$ 为与天线变形相对应的结构位移场, β 为结构设计变量, T 是天线阵面温度分布, γ 为制造、装配等过程中引起的随机误差, $f_n(\theta, \varphi, \delta(\beta, T), \gamma)$ 为受结构变

形和随机误差影响的辐射单元阵中方向图, $I_n(\delta(\beta, T), \gamma, T)$ 与 $\varphi_{nB}(T)$ 分别表示受结构变形和随机误差, 以及温度分布影响的激励电流的幅度与相位, $\check{\alpha}'_n(\delta(\beta, T), \gamma)$ 为受结构变形和随机误差影响的辐射单元在口面形成的新的空间相位差.

3 微波天线多场耦合问题的求解方法

微波天线的多场耦合问题与其它领域的多场耦合问题有所不同,这里主要是电磁场、结构位移场及温度场的顺序耦合,求解可采用顺序解耦的方法进行,即将两个或多个物理场按一定顺序进行求解,把前一个物理场的分析结果作为载荷施加到下一个物理场的分析中,在多场之间传递耦合信息.具体包括:

结构位移场模块即结构分析模块.输入量包括天线的结构形式,材料属性,外部载荷.输出量为结构变形.模块处理的核心是结构动力学特性分析.

温度场模块即热分析模块.输入量包括天线的结构形式,材料属性,边界条件.输出量为温度分布.模块处理的核心是传热方程的求解.

电磁场模块即电性能计算模块.输入量包括天线加载激励,边界条件;输出量为电性能指标.模块处理的核心是不同天线的电性能计算,具体形式视天线的具体形式而有所不同.

基于以上三个模块,可总结出微波天线多场耦合问题的求解策略与方法的分析流程,如图12所示.

下面基于此流程,分别对反射面天线,平板裂缝天线以及有源相控阵天线的多场耦合模型求解方法逐一阐述.

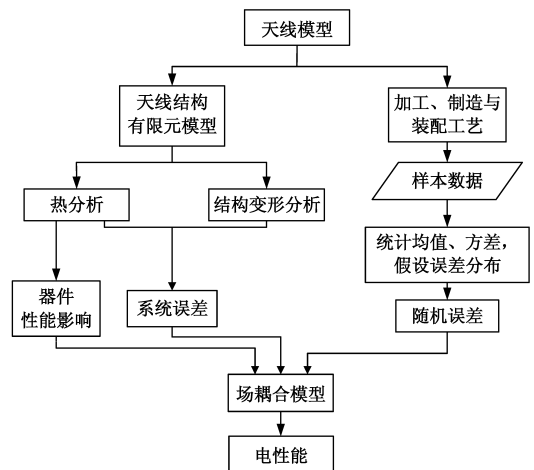


图12 微波天线多场耦合问题求解策略与方法的流程图

3.1 反射面天线机电两场耦合模型的求解策略与方法

(1)建立反射面天线结构的有限元模型,根据工作环境,施加载荷,进行结构分析,得到天线结构的变形

信息.

(2)根据反射面板的加工、制造与装配工艺,统计得出均值与方差,并假定合理分布,得出均值与方差.

(3)提取结构变形信息中主反射面的结构网格和馈源(副面)的位置和指向变化;

(4)应用网格转换矩阵^[41],通过结构网格得到电磁网格和内部计算点,其中内部计算点的位移通过有限元形函数插值得到,并叠加上相应的面板随机误差,获得内部计算点在天线口径面上的相位误差,根据馈源的位置和指向误差计算相应的天线口径面幅相误差;

(5)根据结构有限元分析时的单元具体形式(主反射面网格可为三角形、四边形、六边形等),选择相应的高斯积分公式^[41];

(6)按照天线主瓣波束宽度确定远场的离散精度^[42],设置馈源的初级方向图函数或口径场分布函数;

(7)利用场耦合模型(4),计算天线远场方向图,得到主要电性能指标.

3.2 平板裂缝天线机电两场耦合模型的求解方法

(1)建立平板裂缝天线的结构有限元模型,施加环境载荷(振动、冲击、惯性等)

进行结构分析,得到天线结构的系统变形,包括天线阵面上辐射缝位置的偏移和指向的偏转、馈电网络的结构变形.

(2)根据天线的加工工艺,统计得出天线辐射缝及馈电网络的尺寸、位置误差等随机误差.

(3)将天线阵面上的辐射缝系统误差和随机误差叠加,得到天线口径面的幅相误差,将馈电网络的系统变形和随机误差叠加,计算缝电压幅相误差;

(4)将口径面和缝电压幅相误差代入场耦合模型(8)中,求解场耦合模型,便得到天线电性能.

3.3 有源相控阵天线机电热三场耦合模型的求解策略与方法

有源相控阵天线的场耦合关系与前两种天线有些不同,需要研究天线温度场与结构位移场对天线电性能的影响,主要是针对有源相控阵天线进行机电热三场耦合分析求解,具体步骤如下.

(1)建立有源相控阵天线结构有限元模型,施加环境载荷进行结构分析及热分析,得到天线阵面的位移场及温度场,包括各阵元的位置偏移和指向偏转以及各 T/R 组件的温度分布情况.

(2)根据阵面面板的加工、制造工艺得出面板的随机误差.

(3)将天线阵面上的各阵元的系统误差及随机误差相加,得到天线口径面的空间相位差.

(4)利用得到的温度分布,计算出各 T/R 组件的幅

相误差.

(5)将口径面的空间相位差和馈电的幅相误差代入到场耦合模型(10)中,便得到天线电性能.

4 基于场耦合理论模型的多学科优化设计模型

多物理场耦合问题的优化设计是建立在场耦合理论模型及其求解策略与方法基础上的.因此,首先需建立基于场耦合理论模型的多学科优化模型,它包括设计变量、目标函数及约束函数.因为涉及到电磁场、结构位移场及温度场的数值计算问题,需建立与之相应的网格模型.这还不够,需考虑到三种网格模型之间在优化(尤其是形状与拓扑优化)设计迭代过程中的滑移问题.为此,特引入一个统一的设计向量,该向量可通过设计元^[43-44]与三种网格建立起映射关系.

符合这一要求的优化模型可数学描述为,

$$\text{Find } \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{\text{nus}})^T$$

$$\text{Min. } z(\mathbf{X}), \mathbf{X} \in R^n. \quad (11)$$

$$\text{S.T. } g_i(\mathbf{X}) \leq 0, g_i \in R^n, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (12)$$

$$h_j(\mathbf{X}) \leq 0, h_j \in R^n, (j = 1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

$$\mathbf{X}_L \leq \mathbf{X} \leq \mathbf{X}_U \quad (14)$$

式中, nus 为设计变量总数, $z(\mathbf{X})$ 为目标函数(可以是天线增益的负值,或第一副瓣电平,或天线的造价), $g_i(\mathbf{X})$ 与 $h_j(\mathbf{X})$ 分别为非线性不等式与等式约束(可能是位移、应力、固有频率), $\mathbf{X}_L, \mathbf{X}_U$ 为统一设计向量 \mathbf{X} 的下、上界.

统一设计向量 \mathbf{X} 是各物理场中设计参数的代表.为了减少统一设计向量数,提高多场分析效率,可采用设计元的方法将统一设计向量与各物理场中的设计参数有机联系起来.设计元的主要作用是将优化模块与场分析模块建立起信息联系^[45].

场分析模块采用一种多场耦合分析模型,除结构位移场、电磁场、温度场分析模型外,还增加了结构位移场与电磁场、结构位移场与温度场、以及温度场与电磁场网格之间的运动信息模型,即

位移场

$$S(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{X}_e, \mathbf{X}_t) = 0 \quad (15)$$

电磁场

$$E(\mathbf{X}, \mathbf{V}, \mathbf{X}_e) = 0 \quad (16)$$

温度场

$$T(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{X}_t) = 0 \quad (17)$$

位移场与电磁场

$$R_{SE}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{X}_e) = 0 \quad (18)$$

位移场与温度场

$$R_{ST}(\mathbf{X}, \mathbf{U}, \mathbf{X}_t) = 0 \quad (19)$$

温度场与电磁场

$$R_{TE}(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{X}_e) = 0 \quad (20)$$

式中, $\mathbf{U}, \mathbf{V}, \mathbf{W}$ 分别为结构位移场节点的位移向量、电磁场节点的电磁向量以及温度场节点的温度向量. $\mathbf{X}_e, \mathbf{X}_t$ 分别为电磁场、温度场的网格移向量. 式(18) (20) 分别描述了结构位移场与电磁场、结构位移场与温度场、温度场与电磁场之间信息的传递情况. 注意, 这里的设计向量 \mathbf{X} 是提供给优化模型的.

5 结束语

微波天线中的多场耦合问题具有多学科交叉的特点, 涉及到电磁场、结构位移场与温度场的耦合计算和优化设计问题. 因此, 深入研究各场本身以及各场之间的耦合关系, 建立耦合模型, 并给出求解策略与方法, 然后进行多学科优化是解决多场耦合问题的有效途径, 本文不仅描述了场耦合理论模型, 还给出了多学科优化模型与求解策略.

从对反射面天线、平板裂缝天线的两场耦合模型以及有源相控阵天线的三场耦合模型的分析中可以看出, 结构位移场与温度场的改变均会影响电性能, 具体表现为增益的降低、副瓣电平的抬高以及主波束宽度的展宽. 找出其中的影响关系, 并在设计阶段进行耦合分析, 可大大降低工作的重复性, 减少后期的调试难度.

微波天线中的多场耦合问题随着频率与集成度的提高, 问题会愈加明显, 设计难度也会愈加增大, 有必要对其在极端频率和极端环境(如太空、临近空间)时的耦合问题展开更为深入的研究.

参考文献

- [1] Felippa C A, Park K C and Farhat C. Partitioned analysis of coupled mechanical systems[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001, 190(24-25): 3247-3270.
- [2] Spear M. Multiphysics modeling [J]. *Process Engineering*, 2004, 85(2): 20-22.
- [3] Yaralioglu G G, Ergun A S, Bayram B, et al. Calculation and measurement of electromechanical coupling coefficient of capacitive micromachined ultrasonic transducers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2003, 50(4): 449-456.
- [4] Morand H, Obayon R. *Fluid-Structure Interaction* [M]. John Wiley & Sons, 1995.
- [5] Matthies H G, Niekamp R and Steindorf J. Algorithms for strong coupling procedures [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, (195): 2028-2049.
- [6] Dughiero F, Forzan M and Lupi S, et al. Numerical and experimental analysis of an electro-thermal coupled problem for transverse flux induction heating equipment[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(5): 3106-3109.
- [7] Tadmor E B, Kosa G. Electromechanical coupling correction for piezoelectric layered beams [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2003, 12(6): 899-906.
- [8] Pham T H, Wendling P F, Salon S J, et al. Transient finite element analysis for an induction motor with external circuit connections and electromechanical coupling[J]. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 1999, 14(4): 1407-1412.
- [9] Cho M R. A review of electrocoupling mechanisms mediating facilitated wound healing[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2002, 30(4): 1504-1515.
- [10] Piperno S, Farhat C, Larrotourou B. Partitioned procedures for the transient solution of coupled aeroelastic problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1995, (124): 79-112.
- [11] Voeller J. 25 technologies to watch *Civil Engineering*[J]. *Civil Engineering*, 2001, 71(8): 64-69.
- [12] 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 Rui, PING Li-Hao, JU Wen-Yao. A Study on Uncoupling Method for Electronic Equipment Multifield Coupling Problem [J]. *Modern Radar*, 2008, 30(11): 103-106. (in Chinese)
- [13] Loehner R, Yang Chi. Fluid-structure-thermal interaction using a loose coupling algorithm and adaptive unstructured grids [C]. // 29th Fluid Dynamics Conference, AIAA 98-2419. Albuquerque, NM, 1998: 1-17.
- [14] Baum J D, Luo Hong. Recent developments of a coupled CFD/CSD methodology [C]. // 15th Computational Fluid Dynamics Conference, AIAA 2001-2618, Anaheim, 2001: 1-11.
- [15] Luker J J, Hustell L J. Air force research laboratory progress in fluids-structures interaction [C]. // 29th Fluid Dynamics Conference, AIAA 98-2420. Albuquerque, NM, 1998: 1-8.
- [16] Duan B Y, Wang C sing MEFCM [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, 57(10): 3409-3413.
- [17] 段宝岩, 宋立伟. 电子装备机电热多场耦合问题初探 [J]. *电子机械工程*, 2008, 24(3): 1-7, 46.
DUAN Bao-Yan, SONG Li-Wei. On Coupled Multi-field Problems in Electronic Equipments [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2008, 24(3): 1-7, 46. (in Chinese)
- [18] Ruze J. The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern [J]. *Suppluui Nuovo Cimento*, 1952, 9: 364-380.
- [19] Yahya Rahmat-Samii An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors [J]. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1983, 1(1): 92-98.
- [20] S Von Hoerner. Homologues deformations of tilttable tele-

- scopes[J]. ASCE J Structural Division, 1967, 93 (ST5): 461 - 485.
- [21] Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas[J]. International Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization. 2007, 33(6): 519 - 528.
- [22] Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y, et al. On coupled structural-electromagnetic optimization and analysis of large reflector antennas[C]. The 8th International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing (ICFDM2008), September 23 - 26, 2008, Tianjin, China.
- [23] Wang C S, Bao H. Analysis and coupling optimization design of intelligent antenna structural systems in satellite[C]. The 26th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2008), June 10 - 12, 2008, San Diego, CA, AIAA - 2008 - 5485.
- [24] Wang C S, Bao H, Wang W. Coupled structural - electromagnetic optimization and analysis of space intelligent antenna structural systems[C]. The 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis (ESDA08), July 7 - 9, 2008, Haifa, Israel.
- [25] 王从思, 段宝岩. 反射面天线机电场耦合关系式及其应用[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1431 - 1435.
WANG Cong-Si, DUAN Bao-Yan. On development and application of mechanical-electromagnetic-field coupling model of reflector antennas[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(6): 1431-1435. (in Chinese)
- [26] Wang, W Duan B Y, Li P, et al. Optimal surface adjustment by error transformation matrix for segmented reflector antenna [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2010, 52(3): 80 - 87.
- [27] 李鹏, 郑飞, 段宝岩. 考虑馈源位置误差的面天线机电耦合优化设计[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1377 - 1382.
LI Peng, ZHENG Fei, DUAN Bao-Yan. Electromechanical coupling optimization design of reflector antennas including feed position error[J]. Chinese Journal of Electronics, 2010, 38(6): 1377 - 1382. (in Chinese)
- [28] 王从思, 段宝岩, 郑飞等. 大型空间桁架面天线的结构—电磁耦合优化设计[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1776 - 1781.
WANG Cong-Si, DUAN Bao-Yan, ZHENG Fei. Mechatronic Optimization Design and Analysis of Large Space Parabolic Antennas with Active Truss Support Structures [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 36(9): 1776 - 1781. (in Chinese)
- [29] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. Coons 曲面结合 B 样条拟合大型面天线变形反射面[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(1): 233 - 237.
WANG Cong-Si, DUAN Bao-Yan, QIU Yuan-Ying. On New Fitting Method of Large Distorted Antenna Reflectors Based on Coons Surface and B-Spline[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(1): 233 - 237. (in Chinese)
- [30] 宋立伟, 段宝岩, 郑飞等. 表面误差对反射面天线电性能的影响[J]. 电子学报, 2009, 37(3): 552 - 556.
SONG Li-Wei, DUAN Bao-Yan, ZHENG Fei. The Effect of Surface Error on Reflector Antenna Performance[J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 37(3): 552 - 556. (in Chinese)
- [31] 王伟, 段宝岩, 马伯渊. 一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用[J]. 电子学报, 2008, 38(6): 1114 - 1118.
WANG Wei, DUAN Bao-Yan, MA Bo-Yuan. A method for panel adjustment of large reflector antenna surface and its application [J]. Chinese Journal of Electronics, 2008, 38(6): 1114 - 1118. (in Chinese)
- [32] 宋立伟, 郑飞. 基于离散网格的机电耦合问题分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(2): 347 - 352.
SONG Li-Wei, ZHENG Fei. Analysis of the coupled problems between structure and electromagnetism based on discrete meshes[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(2): 347 - 352. (in Chinese)
- [33] 宋立伟, 段宝岩, 郑飞. 反射面表面与馈源误差对天线方向图的影响[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(6): 1269 - 1274.
SONG Li-Wei, DUAN Bao-Yan, ZHENG Fei. Effects of reflector errors and phase center errors of feed on the far-field pattern of reflector antennas[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(6): 1269 - 1274. (in Chinese)
- [34] 宋立伟, 段宝岩, 郑飞. 变形反射面天线馈源最佳相位中心的研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(10): 894 - 897.
SONG Li-Wei, DUAN Bao-Yan, ZHENG Fei. A Study on the Optimal Feeds Phase Center for Distorted Reflector Antennas [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(10): 894 - 897. (in Chinese)
- [35] Song L W. Performance of planar slotted waveguide arrays with surface distortion[C]. Progress In Electromagnetic Research Symposium 2010, March 22 - 26, Xi'an, China.
- [36] Song L W. Analysis of integrated structure-electromagnetic wave basing on the same discrete meshes[C]. Progress In Electromagnetic Research Symposium 2010, March 22 - 26, Xi'an, China.
- [37] 童伟. 毫米波平板裂缝天线制造精度的分析和控制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
TONG Wei. Analysis and Control of the Manufacture Precision on Millimeter Wave Antennas[D]. Xidian University, Xi'an, 2009. (in Chinese)
- [38] Song L W, Duan B Y, Zheng F, et al. Performance of planar

- slotted waveguide arrays with surface distortion [J], IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(9): 3218 – 3223.
- [39] Wang C S, Duan B Y, Zhang F S, et al. Coupled structural-electromagnetic-thermal modeling and analysis of active phased array antennas[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2010, 4(2): 247 – 257.
- [40] Wang C S, Duan B Y, Zhang F S, et al. Analysis of performance of active phased array antennas with distorted plane error[J]. International Journal of Electronics, 2009, 96(5): 549 – 559.
- [41] 李鹏, 张志华, 王伟等. 基于不同网格形式的反射面天线方向图分析[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(2): 347 – 351.
LI Peng, ZHANG Zhi-Hua, WANG Wei, et al. Far field pattern numerical analysis of reflector antenna based on different grid forms[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(2): 347 – 351. (in Chinese)
- [42] 李鹏, 郑飞, 季祥. 大型宽带反射面天线的机电耦合分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 38(3): 473 – 479.
LI Peng, ZHENG Fei, JI Xiang. Electromechanical coupled analysis of large broad band reflector antennas[J]. Journal of Xidian University, 2009, 38(3): 473 – 479. (in Chinese)
- [43] Duan B Y, Ye S H. A mixed method for shape optimization of skeletal structures[J]. International Journal of Engineering Optimization, 1986, 10(3): 183 – 197.
- [44] Rauli M, Maute K. Symbolic geometric modeling and parameterization for multiphysics shape optimization[C]. In: 9th AIAA/ISSMO Conference on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, USA, 2002, AIAA2002 – 5648: 1 – 10.
- [45] Kalyanmoy D. Optimization for Engineering Design: Algorithms and Examples[M]. New Delhi: Prentice-Hall of India, 1998: 105 – 136.

作者简介



段宝岩 男, 1955 年生于河北冀县, 西安电子科技大学电子机械学科教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 中国电子学会会士, 电子机械工程分会主任委员, 《Chinese Journal of Electronics》副主编, 《电子机械工程》编委会主任, 《Journal of Mechatronics and Applications》编委, 《计算力学学报》编委. 主要研究领域为电子机械工程、电子装备机电耦合、工程结构优化设计等.

E-mail: byduan@xidian.edu.cn



王猛 男, 1986 年出生于山东德州, 西安电子科技大学博士研究生, 目前从事电子装备多场耦合理论的研究.

E-mail: lemonwm@163.com