

面向大型反射面天线结构的机电综合设计与分析系统

王从思, 段宝岩, 仇原鹰, 邵晓东
(西安电子科技大学机电工程学院, 西安 710071)

摘要: 针对天线机电分离设计的现状, 研究了天线机电综合集成技术和天线组合结构理论, 并采用精确 PO 法分析天线远区辐射电场, 建立了面天线参数化设计的层次结构, 解决了由背架、反射面和中心体等组成的组合结构网格自动划分难题, 研制了天线结构分析与电磁计算综合集成系统。实现了天线虚拟样机的参数化设计、机电性能分析与判断, 可获得天线位移云图、应力云图与电场方向图等准确的重要指标信息。该系统可用来指导天线结构设计人员的工作, 改进天线设计手段和方法, 提升设计分析质量, 达到缩短设计周期、降低设计成本的目的。

关键词: 天线结构; 综合集成技术; 参数化设计; 组合结构; 网格划分; 机电性能

中图分类号: TN820.2; TP202 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1328(2008)06-2041-09

DOI:10.3873/j.issn.1000-1328.2008.06.067

0 引言

大型面天线因具有高增益、低噪音辐射、高可靠性以及增强的数据传输能力等特点, 在现代卫星通讯系统、射电天文研究和国防任务中得到了广泛应用^[1-4]。天线结构是典型的机电一体化结构(见图 1), 其机械性能与电性能相互影响、相互制约。近年来, 各研究所与科研单位都对大型面天线开展了深入研究。利用有限元理论、计算电磁学理论, 以及商用软件是解决现代天线综合设计工程问题的关键技术手段。

目前天线设计基本依靠理论初步计算以及设计经验进行。传统的设计流程遵循如下模式: 经验设计——样机生产——测试, 一旦测试不能通过, 就必须进行结构修改或采用补偿技术, 甚至可能需要按照设计流程重新开始。这样做的代价是冗长的设计周期和高昂的成本。同时这也产生了一些问题^[5], 如: 在各个设计阶段, 设计人员不能实时掌握天线机械性能和电性能; 反射面精度指标要求过高, 增加了结构设计和制造的难度和成本; 只注意单个零部件精度, 忽视了整机精度。实际工作中迫切需要一种面向大型面天线结构的机电综合集成设计与分析系

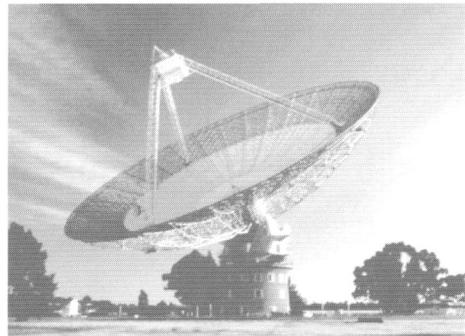


图 1 大型圆抛物面天线

Fig. 1 A large paraboloid antenna

统, 天线设计人员只需输入一些基本的控制参数, 便可得到典型结构的有限元建模方案, 快速建立合理的有限元模型, 准确进行有限元分析与机电耦合性能分析, 得到正确可靠的天线机械性能与电性能评价结果。

针对上述问题, 以及天线设计人员对提高设计效率与减少产品次品率的要求, 作者研究了天线机电综合集成技术和天线组合结构理论, 基于反射面位移场分布并采用精确 PO 法分析天线远区辐射电场, 建立了面天线参数化设计的层次结构, 解决了由

背架、反射面和中心体等组成的组合结构网格自动划分难题与技术软件固化问题,研制了天线结构分析与电磁计算综合集成系统。该综合集成系统实现了只要一次建模就可同时进行电磁性能分析与结构性能分析,大大加快了结构设计人员获得优化设计方案的速度并避免了模型不一致带来的设计冲突。该系统可辅助结构设计人员对天线结构参数进行修改,对结构形状、分布方式进行调整,对天线加工精度、装配精度提出合理要求,并为天线设计人员提供科学的方法指导。

1 综合集成系统的理论基础

1.1 机电综合分析数学模型

在机电综合分析过程中,结构分析模块与电磁分析模块共享天线结构模型,只需一次建模,无需在结构分析与电磁分析两个模型之间来回修正,同时共享模型的协同设计确保了模型数据的一致性,因为任何设计方案的修改都会影响到电磁性能与机械性能的仿真分析结果。对结构的参数化设计可同时得到各种不同方案的结构性能与电磁性能,可快速获取优化的天线结构设计方案。

基于天线系统机电耦合性能综合分析,建立了如下所示的统一数学分析模型

$$\begin{cases} \mathbf{P} = g_1(\epsilon, \mathbf{M}, \mathbf{K}) \\ \delta = g_2(\epsilon, \varphi) \\ \bar{\mathbf{E}} = g_3(\delta, \lambda, D, f) \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{P} 是天线系统受到的外载荷, \mathbf{M} 是天线系统质量阵, \mathbf{K} 为天线系统刚度阵, ϵ 是反射面节点法向偏差; δ 是节点偏差引起的口径相位误差, φ 是反射面节点的轴向夹角; $\bar{\mathbf{E}}$ 是天线远区辐射电场, λ 是在天线工作波段中选取的测试波长, D 是天线口径, f 为焦距。此分析模型包含了天线的结构因素(质量分布、结构形状等),反射面变形信息(反射面节点偏差等),以及天线远区辐射电场分布(口径面相位误差、电场分布等)。

1.2 面天线结构参数化设计

天线参数化建模的前提是要进行结构参数化设计,相对于前者,后者一直都是个难点问题^[6-8]。为此,作者在全面总结天线结构特点的基础上建立了面天线结构参数化设计的层次结构(见图 2)。其设

计思想主要包括以下几方面:① 天线产品整机的参数化设计以具有参数化功能的商品化 CAD 软件系统作为基础开发平台;② 实例组合 API 是一组应用程序的接口函数,向整机参数化程序提供组合应用实例基础功能的信息;③ 背架、反射面、中心体等逻辑组件是面向用户的整机参数化程序,用户通过交互输入来修改设计参数,程序自动生成组件在数据库中的逻辑模型;④ 产品整机模型生成程序读入数据库中的组件/产品逻辑模型,并利用 CAD 软件的功能生成天线的三维数字化模型,产品零部件的选取、装配、尺寸调整等工作根据读进的数据模型自动完成;⑤ 实例设计模块帮助设计师输入正确的装配约束,并自动记录新设计的实例;⑥ 逻辑组件设计模块帮助设计师查找现有的逻辑组件组合,并自动记录正在进行的天线产品设计。

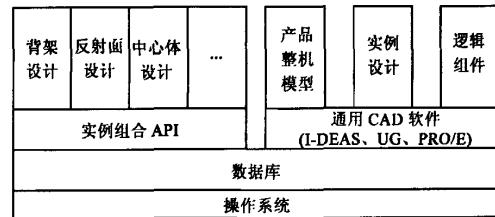


图 2 面天线结构参数化设计的层次结构

Fig. 2 Hierarchy of parametric design of antenna structure

面天线整机参数化建模的过程就是从面天线参数模型到实体模型的过程,其数据流程如图 3 所示。具体来讲就是从反射面、背架、中心体等参数信息的输入,得到面天线各个部件的参数模型。结合经验公式和专家知识推导支撑背架拓扑数据,即背架节点、连杆以及两者之间的关系信息,计算反射面分块面板数据和加强筋连杆节点信息,对中心体进行特征数据的获取,从而得到面天线各部件的逻辑模型。然后进行装配体系设计,生成以反射面、背架、中心体为子装配的面天线整机装配模型。最后调用 Open I-DEAS 接口生成面天线系统的整机实体模型。

1.3 天线结构有限元建模

天线结构的有限元节点和单元规模非常庞大,求解过程较为复杂,其中静态分析属于较简单的线性有限元分析,而模态分析的结果是工程师非常关心的内容之一。天线模态分析时的大型广义特征值问题可表示为

$$\mathbf{KX} - \omega^2 \mathbf{MX} = 0 \quad (2)$$

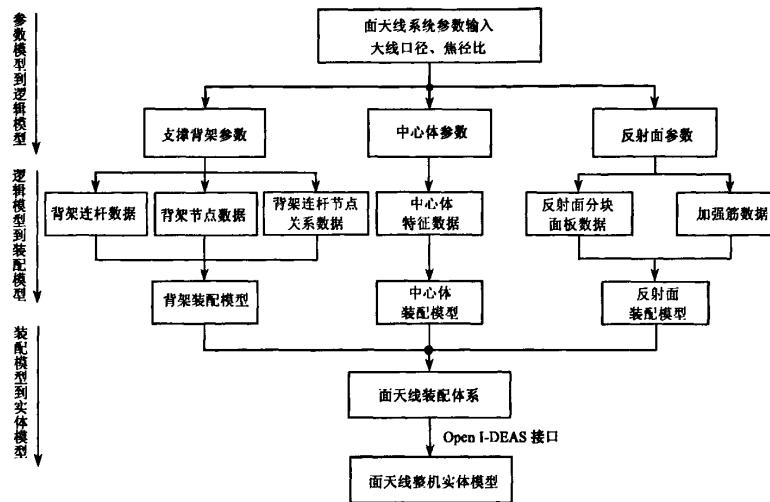


图3 面天线结构参数化设计的数据流程

Fig.3 Flow of parametric design of antenna structure

其中 X 是 n 阶特征向量, ω 是向量 X 对应的特征值。由于矩阵 K 和 M 阶数很高, 因此寻找高效、准确的求解方法是非常重要的。为提高计算效率, 且能够提供结构最低几阶的模态, 采用子空间迭代法^[9]来求解式(2)。这在天线模态分析中是至关重要的, 因为多数关心天线前几阶固有频率和振型^[10]。

此外因工程中天线系统是个复杂结构, 建立其有限元模型时还应注意^[11,12]: ① 简化模型。对于静定或超静定系统, 接头简化为铰链, 结构简化为由杆单元组成的桁架; 对于几何可变系统, 简化为刚架; 构件或零件上的一些细节应忽略、删去; 如果反射面板件既受到面内作用的载荷, 又有垂直于板面作用的载荷, 则应用壳单元来模拟。② 利用结构对称性。这可以显著降低结构有限元模型的计算规模, 但必须正确利用结构对称性, 否则可能导致错误的结果。圆抛物面天线结构具有周期旋转对称性, 但其支座往往不是旋转对称而是反射对称的, 所以应当作反射对称处理。

1.4 组合结构网格自动划分

天线反射面和中心体多是由曲面体构成, 包含梁、杆、板、壳等类型结构, 因此组合结构的曲面网格自动划分是综合集成分析中的一个关键问题。

在天线组合结构理论研究基础上, 确立了如下的组合曲面网格划分基本过程: ① 采用边界表示法^[13]来表示不同类型结构曲面构成的组合曲面的形体几何和拓扑信息, 并利用该表示法中的层次性将组合曲面进行分解。② 形体边界由若干相互邻

接的曲面构成, 曲面边界由一个或多个闭合环构成, 闭合环由一系列首尾衔接的曲线连接而成, 曲线边界由两个端点构成。③ 对组合曲面的边进行划分, 形成离散形式的曲面边界。④ 将组合曲面包含的性质单一的各成员曲面片依次映射到其参数空间, 并根据曲面特征适当地设置虚边界, 在参数空间中形成完整的闭合域边界^[14]。⑤ 在参数空间中对成员曲面片单独进行网格划分, 并将划分结果映射回物理空间^[15]。⑥ 将成员曲面的划分结果进行综合, 得到最终的组合曲面网格划分结果。

下面用图4所示的一简单空间三板组合结构来说明组合结构的网格自动划分原理。两立板与底板 $abcd$ 分别交于 ef 与 gh , 建立其有限元模型后, 若采用 ANSYS 软件的网格自动划分将得到图5(a)所示结果。由图可知, 同为壳单元的三块板仅在空间上相交, 各个壳单元网格是单独划分的, 边界网格未能保持一致, 在求解时就会因结构约束不足而出现错

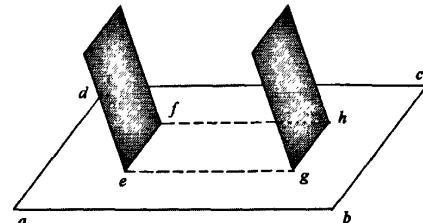


图4 空间三板组合结构

Fig.4 The composite structure of three space planes

误,无法进行计算。为保持单元边界网格一致就必须使各单元在相交边界上拥有实际的公共交点或交线。面 $abcd$ 中的两条公共线 ef 与 gh 并没有贯穿这个面,无法直接切割面 $abcd$ 而得到实际的公共交线。因此,采取两种途径来解决此问题:一是利用交线 ef 与 gh 构造一个新面 $eghf$,通过剪切的布尔运算,即用面 $abcd$ 减去面 $eghf$,得到四条公共交线 eg 、 gh 、 hf 、 fe ,再由这四条公共交线建立一个新面 $eghf$,将面 $abcd$ 补充完整;另一种方法是利用交线 ef 与 gh 构造一个新面 $eghf$,但是通过搭接的布尔运算直接得到四条公共交线 eg 、 gh 、 hf 、 fe 。通过这两种方法都可以得到实际的公共交线 ef 与 gh 。采用上述方法建模后再划分网格,可得到图 5(b)所示网格结构,可以看出,采用天线组合结构网格划分后,各边界网格均达到了一致。

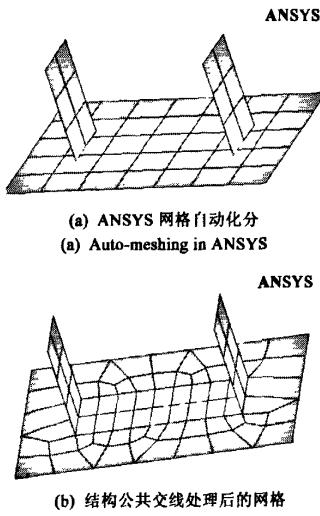


图 5 组合结构的有限元网格划分
Fig.5 Meshing of composite structures

1.5 物理光学法计算方向图

根据物理光学法(Physical Optics, PO)与天线口径场分布^[16-18],得到面天线远区电场为

$$E = \iint_A Q(\rho') e^{j\rho'(\rho')} e^{jk\rho' \cdot \hat{r}} ds' \quad (3)$$

式中口径场振幅分布 $Q(\rho')$ 定义为

$$Q(\rho') = B + C \left(1 - \frac{\rho'^2}{r_0^2}\right)^p \quad (B + C = 1) \quad (4)$$

其中, P 表示口径场分布参数, B 、 C 由照射锥削(Edge Taper, ET)决定, $\delta(\rho')$ 表示口面半径 ρ' 对应的相位误差, r_0 为口面半径。

为便于公式推导与电场计算,引入了第一类 Bessel 函数^[19,20]

$$J_n(x) = \frac{(-j)^n}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{jx \cos \varphi} \cos(n\varphi) d\varphi \quad (5)$$

式中 n 为 Bessel 函数的阶数。

2 机电综合分析系统的构建

2.1 系统整体结构

针对传统天线设计模式的弊端,利用计算机仿真技术在设计前期对系统电磁性能进行模拟分析(design-level analysis),找出结构设计薄弱环节,有针对性地加以改进,将很多的设计风险扼杀在萌芽状态,从而大大缩短设计周期和降低设计成本。研制面天线结构综合集成系统的目的就是在此。该机电综合设计与分析软件系统是一个面向天线设计人员,基于商用软件 ANSYS、I-DEAS 与 Delphi 的通用分析平台,包含了参数化设计系统、有限元建模与分析系统和天线机电耦合性能分析系统等子模块,提供了网格自动划分、静力分析、动力分析、模态分析与方向图计算等功能。软件系统的整体结构方案如图 6 所示。

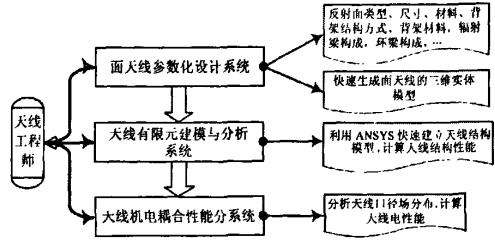


图 6 综合集成系统的整体方案

Fig.6 Total scheme of integrate mechatronic system

2.2 机械结构性能分析

天线机械性能主要包括结构固有频率、固有振型、结构强度和刚度、反射面精度等。用户不必具备丰富的力学知识和有限元建模经验,也不必对有限元软件的操作技能有娴熟的掌握,只需输入必要的模型分析参数,面天线有限元建模与分析模块就可以自动将几何模型划分为结构有限元网格模型,并对生成的有限元模型进行评价分析。

2.2.1 前处理

通过查询预先建立的面天线零部件单元库,系统自动为用户建立面天线零部件的有限元模型。读取用户界面内输入的天线结构参数,查询数据库,确定反射面形状、骨架类型,自动生成中心体、辐射梁、

环梁、副梁、货架与反射面,生成天线结构的三维造型。并自动生成天线整机的有限元模型。

2.2.2 有限元分析计算

天线结构有限元分析的类型包含静态分析、模态分析和瞬态分析以及温度分析等四个方面。模态

分析用于确定某一范围内的固有频率和振型,防止在使用和运输过程中由于共振而无法工作或者遭到破坏。瞬态分析主要确定天线在连续随机激励和随机风荷作用下的响应,分析天线刚度与强度是否满足要求。其分析流程见图7。

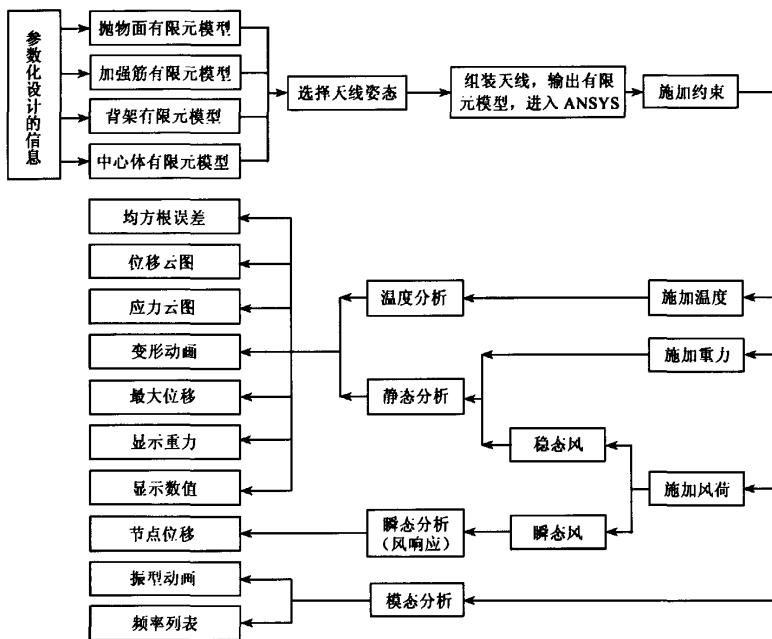


图7 面天线结构有限元分析流程

Fig. 7 Flow of antenna structure analysis

2.2.3 后处理

此模块利用 ANSYS 软件的通用后处理器和时间历程后处理器^[21],结合 APDL 语言实现了天线结构在各种载荷下进行不同类型求解时都能得到对应的数据结果,并为天线结构电性能计算模块提供天线数据信息,为评价天线性能提供依据。同时采用可视化技术从大量的有限元计算结果数据中提取出有价值的信息,以图形方式显示位移云图、应力云图、变形(振型)动画等。

2.3 电磁性能分析

根据天线机电耦合性能综合分析模型,基于天线反射面变形信息,计算出当前设计与工作条件下的天线电性能,判断当前天线结构设计是否合理,提出修改指导意见。用户只要具有一定的天线电磁设计知识便可选定工作参数,电磁分析模块自动读取有限元分析结果文件,并运行后台 Delphi 核心算法程序,给出电性能分析结果。

2.3.1 前处理

变形反射面分析模型把天线口面分成 num 个环域,同时假设每个环域的误差与其它环域的相互独立,且节点变形后位置的法线方向余弦近似等于原设计抛物面上相应节点位置的法线方向余弦^[22]。馈源选为常用的接近于圆对称的 $\cos^k \alpha$ 馈源,用来确定天线在最大辐射方向上的增益。口径场分析参数由工程师选定输入。

2.3.2 变形反射面拟合

变形反射面的拟合方程为

$$z \approx \frac{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2}{4(f + \Delta f)} + \Delta z + y\phi_x - x\phi_y, \quad (6)$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 为拟合抛物面顶点在局部坐标系中的位移, ϕ_x 、 ϕ_y 分别为拟合抛物面焦轴绕局部坐标系的 x 、 y 轴的转角, Δf 为焦距变化量。

$$\text{利用 } \frac{1}{4(f + \Delta f)} \approx \frac{1}{4f} \left(1 - \frac{\Delta f}{f}\right)$$

取泰勒级数第一项

$$(x_p - \Delta x)^2 \approx x_p^2 - 2x_p\Delta x$$

$$(y_p - \Delta y)^2 \approx y_p^2 - 2y_p\Delta y$$

通过分析反射面变形前后的节点坐标, 基于最小二乘法可确定式(6)中的全部待定系数^[23]。

2.3.3 口径相位差分析

由反射面的几何特点^[24], 可知第 i 环域变形引起的口径相位误差为

$$\delta_i = \frac{4\pi}{\lambda} \epsilon_i \cos \phi_i \quad (7)$$

式中, $\phi_i = \arctan(\rho'_i/2f)$ 。其中 ϕ_i 表示第 i 环域中心与焦点的连线对于焦轴的夹角, ρ'_i 为第 i 环域中心对应的口面半径, ϵ_i 为第 i 环域法线方向的表面变形误差, 等于所在环域内所有节点误差的均值。这里假设表面误差不改变反射线方向^[25]。

2.3.4 后处理

对远区辐射场强进行归一化处理, 即给出天线归一化辐射方向图^[26]。系统采用直角坐标方向图, 它虽不如极坐标方向图直观, 但可精确表示强方向性天线的方向图^[27]。采用全局变量存储副瓣信息, 便于用户了解副瓣电平及其位置信息。为分析时变载荷(如风载荷)下天线电性能变化情况, 也提供了时变分析数据接口与天线增益变化历程曲线。

3 工程案例应用

现以某 7.3m 圆抛物面天线为例, 进行机电综合集成设计与分析。该天线焦距为 2.533592 6m, 工作频段为 Ku 频段、C 频段发射, 副瓣包络是 CCIR. 580-2, 工作风速为 20m/s, 生存风速为 55m/s, 工作环境温度范围为 -45℃ 至 60℃, 表面法向精度指标是 0.5mm。反射面为实板型, 背架属桁架类。整个天线沿中心体圆周均匀布有 16 片辐射梁, 48 根环形梁, 其有限元模型参数见表 1。

表 1 天线结构有限元模型参数

Table 1 Model parameters of antenna structure

天线结构	单元	单元类型	单元数	材料
反射面	壳	Shell63	6400	铝板
Z 型铝加强筋	梁	Beam4	2560	铝型材
上、下弦杆	梁	Beam4	176	矩形钢管
部分下弦杆	杆	Link8	16	矩形钢管
腹杆	杆	Link8	80	矩形钢管
上弦杆外缘	梁	Beam4	16	钢板
环形梁	杆	Link8	48	钢管

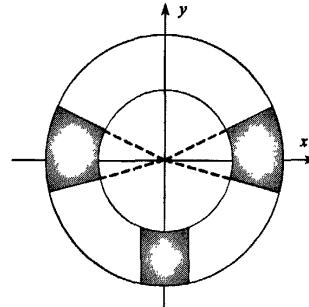


图 8 中心体的约束

Fig. 8 Constraint of center body

根据天线工作的实际情况, 在中心体底面上的阴影部分施加位移约束(见图 8)。利用该机电综合集成设计与分析系统, 建立了分别如图 9、图 10 所示的天线反射体三维实体模型和有限元网格模型, 并分别分析了仰天(仅受自重作用)与指平(受自重与正吹稳态风荷共同作用, 风速为 20m/s)两种工况下的天线机电性能。仰天状态下的天线应力云图和 Z 方向的位移云图分别如图 11 和图 12 所示, 而指平状态下的分别如图 13 和图 14 所示。这里取天线测试频率为 14GHz、6GHz(Ku、C 波段), 照射锥削 ET 为 -10dB, 口径场分布参数 $P = 2$, 两种工况下的功率方向图分别见图 15 和图 16, 其它主要的电性能指标见表 2 和表 3。

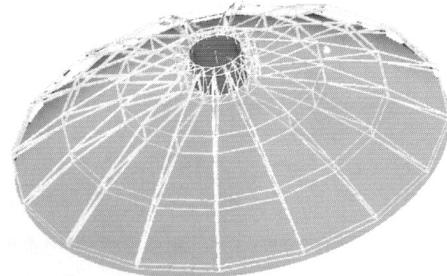


图 9 天线反射体的三维实体模型图

Fig. 9 3D solid model of antenna reflector

根据图 11 与图 12 可知, 仰天线钢结构件的最大应力发生在辐射梁上弦杆的根部, 铝结构件的最大应力发生在反射面与调整螺栓的连接处; 仰天线的最大位移发生在天线最大直径和单片反射面中线的交点上, 其大小为 0.1426mm, 反射面的法向均方根为 0.05977mm, 轴向均方根为 0.06156mm。据图 13 与图 14 可知, 指平天线钢结构件的最大应力发生在中心体与辐射梁的结合部, 铝结构件的最

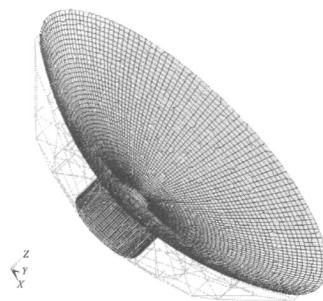


图 10 天线有限元网格模型

Fig. 10 Finite element model of antenna structure

大应力发生在反射面和调整螺栓的连接处;指平天线的最大位移发生在天线最大直径边缘且处于铅垂面的上方,其大小为 0.7167mm,反射面的法向均方根为 0.2241mm,轴向均方根为 0.2122mm。分析该 4 个图中的数据,可知天线结构是满足设计要求。

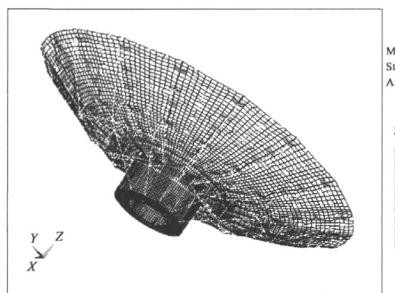


图 11 仰天天线的应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of vertically oriented antenna

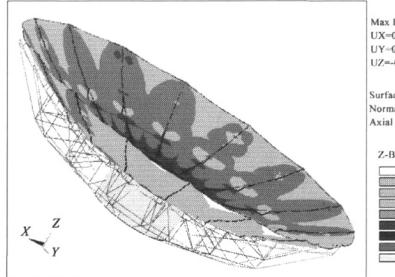


图 12 仰天天线的 Z 向位移云图

Fig. 12 Z -displacement nephogram of vertically oriented antenna

由图 15 可知,Ku 波段的仰天天线最大副瓣位置明显远离主波束,且不再是第一副瓣;而 C 波段的天线第一副瓣就是最大副瓣。由图 16 可知,Ku、

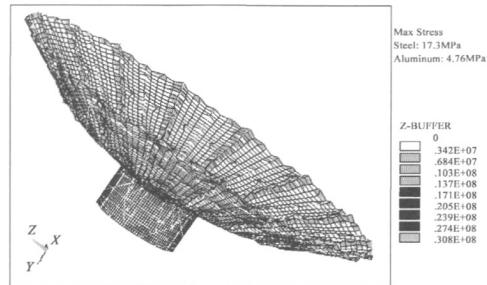


图 13 指平天线的应力云图

Fig. 13 Stress nephogram of horizontally oriented antenna

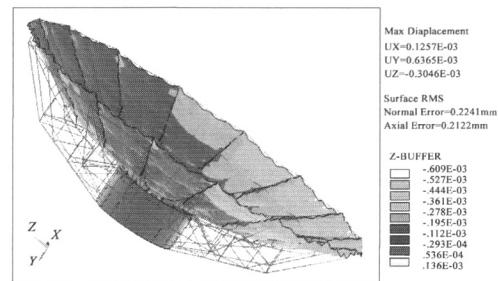


图 14 指平天线的 Z 向位移云图

Fig. 14 Z -displacement nephogram of horizontally oriented antenna

C 波段的天线最大副瓣电平较高,对应的方向图主波束明显变宽,表明轴向局域集中了很多辐射能量,也就是此时天线方向性很差。这是由于自重与风荷作用的不对称,导致天线反射面形状发生较大的变化,已不再是同族的近似抛物面形状,使得天线辐射或接收的电磁波能量不能集中在焦轴方向,但其增益大小还是满足电磁设计要求的。

表 2 仰天天线的电性能

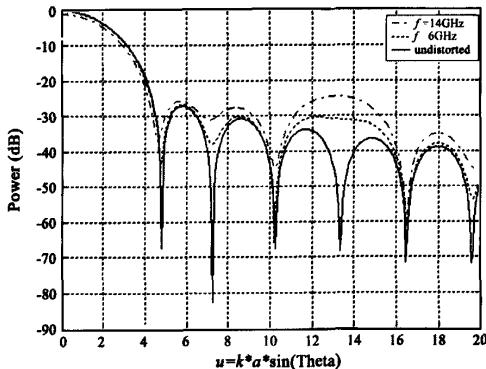
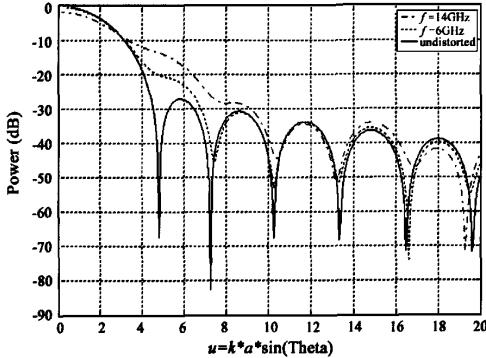
Table 2 Electrical performances of vertically oriented antenna

频率 (GHz)	增益 (dB)	增益损 失(dB)	半功率波 瓣宽度(°)	最大副瓣 电平(dB)
14	58.7557	-0.0043	0.2127	-26.52
6	51.4000	-0.0008	0.3920	-27.18

表 3 指平天线的电性能

Table 3 Electrical performances of horizontally oriented antenna

频率 (GHz)	增益 (dB)	增益损失 (dB)	半功率波 瓣宽度(°)	最大副瓣 电平(dB)
14	58.6995	-0.0605	0.3503	-14.28
6	51.3896	-0.0112	0.5116	-24.65

图 15 仰天天线的功率方向图, $ET = -10\text{dB}$, $P = 2$ Fig. 15 Pattern of vertically oriented antenna,
 $ET = -10\text{dB}$, $P = 2$ 图 16 指平天线的功率方向图, $ET = -10\text{dB}$, $P = 2$ Fig. 16 Pattern of horizontally oriented antenna,
 $ET = -10\text{dB}$, $P = 2$

分析表 2 与表 3 可知:① 天线反射面的法向均方根误差满足 0.5mm 的表面精度要求(仰天 RMS 为 0.05977mm, 指平 RMS 为 0.2241mm)。② 天线增益损失的大小与工作频点关系密切, 且与照射锥削的选择也相关。③ 指平下的天线最大副瓣电平明显高于仰天状态下的, 这是由于风荷作用下的天线变形较大, 且远大于仰天自重下的表面变形。④ 指平下的天线半功率波瓣宽度要大于仰天下的, 这是由于正吹风荷的作用使指平天线的方向性较仰天天线的更差些。综上可知, 天线机械性能和电性能都是满足设计要求的, 天线结构设计也是合理的。

4 结束语

面天线结构机电综合集成设计与分析系统以研究所部分有代表性的在研面天线型号任务为工程背

景, 总结了大型面天线结构设计中存在的共性技术问题, 全面研究了相应的解决方案, 同时系统平台的各项性能测试均达到了指标要求。

结构设计人员在天线仿真设计阶段, 实时了解当前结构形式下的天线电性能, 对于分析当前结构设计方案的合理性有着重要的指导意义。利用该机电综合分析系统, 用户可通过一组参数控制面天线模型的建立, 快速、方便地生成满足要求的面天线数字化模型, 并以可视化形式形象、准确地给出天线机械结构性能与电性能分析结果。通过应用该系统平台, 用户能快速设计出天线结构的虚拟电子样机, 明显提高设计效率, 减少设计缺陷, 优化产品性能, 大幅缩短大型面天线设计制造周期, 提高产品质量、降低成本, 并能显著提高面天线的创新设计能力。

参考文献:

- [1] Sinton S, Rahmat-Samii Y. Random surface error effects on offset cylindrical reflector antennas [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 2003, 51(6): 1331 - 1337.
- [2] Duan B Y, Qi Y H, Xu G H. Study on optimization of mechanical and electronic synthesis for the antenna structural system [J]. Mechatronics, 1994, 4(6): 553 - 564.
- [3] Alpatova A V, Gorin A M, Kad'kalo I N. Calculation of non-axi-symmetrical parabolic reflector antennas [C]// The 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, 9 - 12 Sept. 2003, 1: 248 - 250.
- [4] Imbriale W A. Distortion compensation techniques for large reflector antennas [C]. IEEE Proceedings of Aerospace Conference, 10 - 17 March 2001, 2: 799 - 805.
- [5] 面天线虚拟制造项目组. 用户访谈报告 [R]. 西安电子科技大学, 2002. [Antenna Structural Synthesis Design System Project Group. The Report of User Interviews [R]. Xi'an, China: Xidian University, 2002 (in Chinese).]
- [6] Foster P R. Computer modelling of antennas: a comparison of available techniques [C]// 18th International Conference on Antennas & Propagation (ICAP93), Edinburgh, April 1993, 370(2): 755 - 760.
- [7] Rao S. Parametric design of multiple beam reflector antennas [C]. 2002 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, June 2002, 1: 650 - 653.
- [8] Monedero J. Parametric design: a review and some experiences [J]. Automation in Construction, 2000, 9(4): 369 - 377 + 9.
- [9] Arroyo J, Zapata J. A systematic root-finding strategy for the subspace iteration method with general complex sparse matrices [C]// Proceedings of the 1997 IEEE AP - S/URSI Radio Science Meeting, Montreal, Québec, Canada, July 1997: 70 - 76.
- [10] Liu J S, Hollaway L. Integrated structure-electromagnetic optimization of large reflector antenna systems [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 1998, 16(1): 29 - 36.
- [11] Paynter G F, Burnside W D, Lee T H. A systematic approach to de-

- sign and analysis of antennas on complex platforms[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2001, 43(6): 38 – 44.
- [12] Johnson J M, Rahat-Samii Y. Genetic algorithm optimization and its application to antenna design[C]// *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium Digest*, Jun 1994, 1: 326 – 329.
- [13] Kada M. Automatic generalization of 3D building models[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIV, Part 4, 243 – 248.
- [14] Chan K C, Tan S T. Hierarchical structure to winged-edge structure: a conversion algorithm[J]. *The Visual Computer*, 1988, 4(3): 133 – 141.
- [15] Jha V K, Sankar T S, Bhat R B. Computer aided synthesis of a satellite antenna structure with probabilistic constraints[J]. *Shock and Vibration Bulletin*, 1983(53): 79 – 90.
- [16] Smith W T, Stutzman W L. A Comparison of Physical Optics and Geometrical Optics Methods for Computation of Reflector Surface Error Effects[R]. Virginia Tech EE Dept. SATCOM Rep. 87 – 2, Satellite Communicat. Grp., NASI – 18471, 1987.
- [17] Leo Diaz, Thomas Milligan. *Antenna Engineering Using Physical Optics: Practical CAD Techniques and Software*[M]. Norwood, MA, Artech House, 1996.
- [18] Schlobohm B, Arndt F, Kless J. Direct PO optimized dual-offset reflector antennas for small Earth stations and for millimeter wave atmospheric sensors[J]. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1992, 40(6): 1310 – 1317.
- [19] Rahmat-Samii Y, Galindo-Israel V. Shaped reflector antenna analysis using the Jacobi-Bessel series[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1980, 28(4): 425 – 435.
- [20] Yurchenko V B, Altintas A, Nosich A I. Numerical optimization of a cylindrical reflector-in-radome antenna system[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1999, 47(4): 668 – 673.
- [21] ANSYS GUI Help Manual[R]. ANSYS Release 8.1, 2003.
- [22] 魏文元, 宫德明, 陈必森. *天线原理*[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004. [WEI Wen-yuan, GONG De-ming, CHEN Bi-si. *Antenna Theory*[M]. Xi'an: Xidian University Press, China, 2004 (in Chinese).]
- [23] Wang C S, Duan B Y, Qiu Y Y. Application of divided-fitting method based on coons surface in reflector antenna analysis[C]// *The 2005 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP 2005)*, August 3 – 5, 2005, 1: 245 – 248.
- [24] Dong Tao, Xu Xiao-wen, Xiao Jiang. Analysis of the radiation characteristics of the reflector antenna with surface distortion and holes using PTD[C]// *Proceedings of 2003 6th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, 2003: 145 – 148.
- [25] Levy R. *Structural Engineering of Microwave Antennas for Electrical*[M]. Mechanical and Civil Engineers, IEEE Press, 1996.
- [26] Boag A, Letrou C. Fast radiation pattern evaluation for lens and reflector antennas[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 2003, 51(5): 1063 – 1068.
- [27] Kim J W, Kim B S, Lee C W. Computation of the average power pattern of a reflector antenna with random surface errors and misalignment errors[J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1996, 44(7): 996 – 999.



作者简介: 王从思(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为天线机电综合优化、天线机电热耦合分析与相控阵天线技术等。

通信地址: 西安电子科技大学 191 信箱(710071)

电话:(029)88203040

E-mail: congswang@tom.com

Large Reflector Antenna Structures Oriented Integrated Mechatronic Design and Analysis System Platform

WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, QIU Yuan-ying, SHAO Xiao-dong

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

Abstract: For solving the separate problem of antenna structural and electromagnetic design, the electromechanical synthesis technology and composite structure theory of reflector antennas are studied. Based on the structural displacement field, PO method is adopted to analyze the far radiated field. The hierarchical structure relationship of antenna parametric design is also determined. The key difficulty of automatic meshing of composite structures is solved, which consist of back-up structure, reflector and center body etc. An integrated mechatronic design and analysis system is developed including the structure finite element analysis and EM calculation, which can implement the parametric design of antenna simulated prototype and accurate analysis and evaluation of the mechanical and electrical performances, and provide the precise and detailed information about the displacement nephogram, stress nephogram and radiation pattern of parabolic reflector antennas. The analysis results of a 7.3m antenna show that the platform can offer the theoretical guidance and assistance to the antenna structural designers, improve antenna design quality and efficiency, and reduce the design period and manufacture cost.

Key words: Antenna structure; Synthesis technology; Parametric design; Composite structure; Electromechanical performance

作者: 王从思, 段宝岩, 仇原鹰, 邵晓东, WANG Cong-si, DUAN Bao-yan, QIU Yuan-ying, SHAO Xiao-dong
 作者单位: 西安电子科技大学机电工程学院, 西安, 710071
 刊名: 宇航学报 [ISTIC PKU]
 英文刊名: JOURNAL OF ASTRONAUTICS
 年, 卷(期): 2008, 29(6)
 被引用次数: 3次

参考文献(27条)

1. Sinton S;Rahmat-Samii Y Random surface error effects on offset cylindrical Reflector antennas[外文期刊] 2003(06)
2. Duan B Y;Qi Y H;Xu G H Study on optimization of mechanical and electronic synthesis for the antenna structural system[外文期刊] 1994(06)
3. Alpatova A V;Gorin A M;Kad'kalo I N Calculation of non-axi-symmetrical parabolic reflector antennas 2003
4. Imbriale W A Distortion compensation techniques for large reflector antennas 2001
5. 面天线虚拟制造项目组 用户访谈报告 2002
6. Foster P R Computer modelling of antennas:a comparison of available techniques 1993
7. Rao S Parametric design of multiple beam reflector antennas 2002
8. Monedero J Parametric design:a review and some experiences[外文期刊] 2000(04)
9. Arroyo J;Zapata J A systematic root-finding strategy for the sub-space iteration method with general complex sparse matrices 1997
10. Liu J S;Hollaway L Integrated structure-electromagnetic optimization of large reflector antenna systems 1998(01)
11. Paynter G F;Bumsdie W D;Lee T H A systematic approach to design and analysis of antennas on complex platforms 2001(06)
12. Johnson J M;Rahat-Samii Y Genetic algorithm optimization and its application to antenna design 1904
13. KadaM Automatic generalization of 3D building models
14. Chan K C;Tan S T Hierarchical structure to winged-edge structure:a conversion algorithm[外文期刊] 1988(03)
15. Jha V K;Sankar T S;Bhat R B Computer aided synthesis of a satellite antenna structure with probabilistic constraints 1983(53)
16. Smith W T;Stutzman W L A Comparison of Physical Optics and Geometrical Optics Methods for Computation of Reflector Surface Error Effects[Virginia Tech EE Dept. SATCOM Rep. 87-2, Satellite Communical. Grp, NAS1-18471] 1987
17. Leo Diaz;Thomas Milligan Antenna Engineering Using Physical Optics:Practical CAD Techniques and Software 1996
18. Schlobohm B;Amdt F;Kless J Direct PO optimized dual-offset reflector antennas for small Earth

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>