

大型相控阵天线结构保型设计研究

保宏^{*1}, 冷国俊¹, 段学超¹, 杜敬利¹, 钟剑锋²

(1. 西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 西安 710071;
2. 南京电子技术研究所 天线微波国家重点实验室, 南京 210039)

摘要:针对某大型相控阵天线自重大、表面精度要求高、加强筋安装位置受限的特点,本文进行相控阵天线阵面保型的结构方案设计。考虑到加强筋安装位置和型材受限,提出了连续化过滤函数,使得型材变量与连续变量进行映射,将离散变量拓扑优化转换为连续变量拓扑优化求解,提高了求解效率,降低了求解的规模。同时,为降低支腿驱动力,以调整机构条件数为目标进行铰节点的布局优化,并进行了静、动力的计算,确定了支腿最大驱动力。对某大型相控阵雷达进行了案例验证,收到满意的结果,并且该方案将应用到工程实际中。

关键词:相控阵天线;保型设计;拓扑优化;矩阵条件数

中图分类号: O342 **文献标志码:** A **doi:** 10.7511/jslx201303021

1 引言

相控阵天线是重要类型电子装备。从总体设计角度考虑,为提高相控阵的辐射功率,常常采用增加辐射单元数量的方法,以获得满足雷达所需的增益、主瓣宽度等指标,因此,大口径、高频段的相控阵天线成为其发展的趋势。而天线口径增大,自重增加,使得天线阵面产生变形,该变形导致增益衰减,尤其是副瓣抬高,并最终影响雷达整体的接收性能^[1-3]。对于大型化、高频段相控阵天线,保型要求不断提高,结构设计对总体设计指标的影响以从技术保障逐渐上升为制约因素,因此,大口径天线形面的保型设计成为天线工程遇到难点^[4]。

天线阵面的保形设计,从本质上看是天线结构的优化设计。拓扑优化是目前研究的热点,其中常见的是将材料形状尺寸视为变量进行连续优化,但考虑到工程实际,需要对优化结果进行圆整,这会造成圆整的损失^[5]。如果其尺寸只能按照集合内离散选取,圆整的损失将进一步增大。据此,Wolfgang Achtziger 提出一种构建离散问题的松弛方法来求解,具体做法是将原离散变量的拓扑优化构

建一个混合整数规划,最终通过一个改进的分支定界法进行计算^[6,7],无论对分支定界法如何改善,它始终是遍历性方法,求解规模必然巨大^[8,10]。随着设计变量的个数的增加,重分析次数从几十万次到几百万次不等,因此,拓扑优化方法将如何为工程实际服务,是其应用的难点。

为此,本文提出了离散变量的拓扑优化方法,通过构造连续特征的基函数,将离散变量连续化,于是可以离散变量优化转换为连续变量优化求解问题,该方法大幅提高了求解的效率。并以大型相控阵结构保型设计为例,进行了其背架支撑结构和调整机构方案设计,取得了满意的结果,并为实际工程采纳。

2 保型补偿方案

某相控阵天线阵面面积近 160 m²,阵面重量约 30 t,电设计人员要求安装后的整体平面度达到 0.33 mm,这在工程上实现的难度太大。为此,将其阵面分为 9 个超级子阵,为保障安装后的阵面精度,单个子阵下面安装一个 Stewart 平台^[11],即通过 6 个支腿的伸缩即可对子阵阵面整体进行位置和姿态的调整,以确保天线阵面在不同仰角下的整体精度。子阵结构如图 1 所示,该子阵共分为 95 个辐射单元安装区域,面积为 18 m²,总质量为 3.5 t,其中无刚度贡献的馈电系统有 1.5 t。在自重作用下,子阵仰天状态下最大变形达到了 13.75 mm。因此需要对子阵阵面进行保型设计。

该保形设计包含两方面:一是通过在阵面上安

收稿日期:2011-12-01;修改稿收到日期:2012-10-09.

基金项目:国家自然科学基金(50775170,51105290,51035006,50805111,51175398)资助项目.

作者简介:保宏*(1971-),男,博士,教授

(E-mail: bh-029@163.com);

冷国俊(1983-),男,博士;

段学超(1981-),男,博士,副教授;

杜敬利(1978-),男,博士,教授.

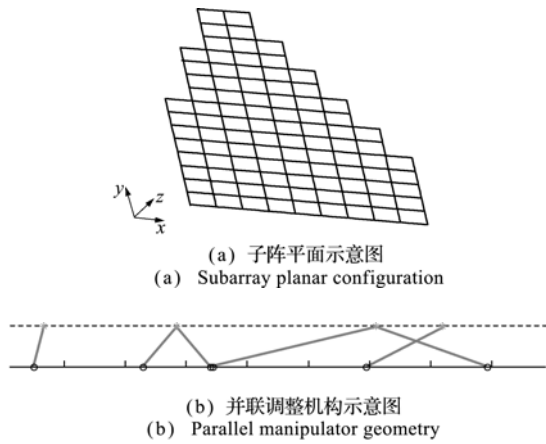


图1 子阵及调整机构示意图

Fig. 1 Block of subarray and parallel manipulator

装加强筋,增加子阵的抗弯强度,保证子阵阵面精度要求。二是 Stewart 平台结构设计。方案设计中遇到难点如下。

(1) 球铰位置以及加强筋位置的确定。受到相控阵天线馈电系统限制,球铰只能选择在各辐射单元的交点处,并且背架加强筋的安装位置也限于各辐射单元交界线,且加强筋的长度必须是最小辐射单元长宽值的整数倍。

(2) 考虑到工程实际,加强筋的截面形状应当从目前常用型材中选取。

(3) Stewart 平台机构的优化设计,如果铰链分布不合理,由于重力作用,导致个别支腿受力很大,这增加了电机和支腿选型难度,不利于工程实际。

3 球铰与加强筋布局优化

3.1 球铰约束点以及加强筋布局优化思路

由于球铰的位置选择和加强筋的拓朴优化是紧密相关,因此,球铰的位置和加强筋优化应同步进行。但受到馈电系统的限制,该子阵支撑结构优化是一个离散变量的优化,球铰可安装位置为 120 个,加强筋位置为 248 个。为此,本文提出采用映射关系将离散问题转换为连续问题的求解。首先,指定型材要求的加强筋位置的优化。为减少设计变量,直接以截面积作为设计变量,惯性矩作为一个截面积函数。将可选择型材构成一个集合,设惯性矩与截面积映射为

$$x_i = (A_x - A_{i-1}) / (A_i - A_{i-1}), \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$I(x_i) = I_{i-1} + (I_i - I_{i-1})x_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

式中 A_i 为第 i 类型材截面积, A_x 为当前截面积, m 为可选型材数, x_i 为偏离区间内两型材的比值。对于该映射关系,只有当截面积属于型材集合时,截面积与惯性矩一一对应。当最终优化结果中截面积的值在集合中不存在,就要强行归并到集合中

的值,即圆整,这会造成较大损失。因此,如何使得优化的结果仅为集合内型材是本文的关键。

3.2 构造阶梯函数实现型材过滤

构造阶梯函数:

定义截面积函数表达式为

$$A_p = \begin{cases} \frac{A_x}{1 + P_1(A_1 - A_x)}, & 0 \leq A_x \leq A_1 \\ A_i + \frac{(A_x - A_i)(1 + \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii})}{1 + \tilde{P}_i(A_x - A_i)}, & A_i < A_x \leq \tilde{A}_i \\ \tilde{A}_i + \frac{A_x - \tilde{A}_i}{1 + \tilde{P}_i(A_{i+1} - A_x)}, & \tilde{A}_i < A_x \leq A_{i+1} \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (3)$$

式中 A_p 表示映射后型材截面积, \tilde{A}_i 为第 i 和 $i+1$ 个型材截面积之间的插值, $\tilde{A}_{ii} = \tilde{A}_i - A_i$, \tilde{P}_i 和 P_{i+1} 是确保函数光滑连续的参数。

连续可导条件:

如果构造的函数应该不连续光滑,在计算参数敏感度时会引入数值噪声,影响优化最终的结果。该分段函数对应的敏感度方程为

$$\frac{\partial A_p}{\partial A_x} = \begin{cases} \frac{1 + P_1 A_1}{(1 + P_1(A_1 - A_x))^2}, & 0 \leq A_x \leq A_1 \\ \frac{1 + \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii}}{(1 + \tilde{P}_i(A_x - A_i))^2}, & A_i < A_x \leq \tilde{A}_i \\ \frac{1 + P_{i+1}(\tilde{A}_{i+1,i})}{(1 + P_{i+1}(A_{i+1} - A_x))^2}, & \tilde{A}_i < A_x \leq A_{i+1} \end{cases} \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (4)$$

式中 $\tilde{A}_{i+1,i} = A_{i+1} - \tilde{A}_i$, 只要式(4)在分段点处连续,则说明式(3)表示的函数连续可导,于是推得其连续光滑的条件为

$$P_1 A_1 = \tilde{P}_1 \tilde{A}_{11}, \quad \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii} = P_{i+1} \tilde{A}_{i+1,i} \quad (5)$$

下面通过数值算例说明该截面积函数。假设型材的截面积,分别为 $A_1=1, A_2=2, A_3=3, A_4=4$, 在 (A_1, A_2) 、 (A_2, A_3) 和 (A_3, A_4) 之间分别取三个插值截面积 $\tilde{A}_1 = 1.05, \tilde{A}_2 = 2.05, \tilde{A}_3 = 3.05$, 且 $P_1 = 5$, 根据式(5)连续条件可得 $\tilde{P}_1 = 120, P_2 = 5.5, \tilde{P}_2 = 120, P_3 = 5.5, \tilde{P}_3 = 120, P_4 = 5.5$, 按照以上条件所构造出来的函数如图 2 所示。

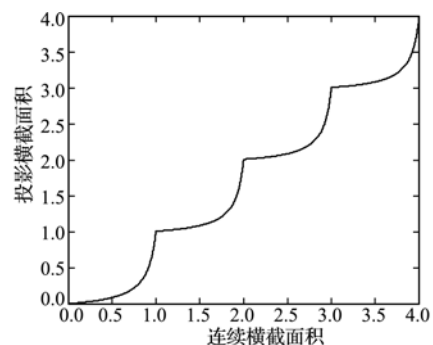


图2 阶梯函数连续化示意图

Fig. 2 Continuum form of multi-steps function

从图2可以看出,式(3)截面积函数中插值 \tilde{A}_i 起到了连接不同区间段曲线单调、连续作用。由图2可知,其导数值的大小,说明截面积对系统贡献大小。由于式(3)惩罚效果,会使优化后设计变量落入 $1\sim 1.05, 2\sim 2.05, 3\sim 3.05$ 之间,最后在该处进行圆整,最大程度降低了圆整造成的损失,起到对连续变量结果进行过滤的效果,这样就达到离散变量连续化目的,可见,插入值 \tilde{A}_i 和 P_i 起到的作用非常重要。

3.3 优化模型

面板加强筋选工字梁,考虑球铰位置和常用的型材,建立以表面变形最小为目标函数,加入约束质量约束、强度约束,优化模型如下。

$$\begin{aligned} \text{Find: } (X, Y, \Delta x, \Delta y, \Delta z, T, \text{Type}) = & \\ & (X_1, X_2, \dots, X_M, Y_1, Y_2, \dots, Y_M, \Delta x_1, \Delta x_2, \\ & \dots, \Delta x_M, \Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_M, \Delta z_1, \Delta z_2, \dots, \\ & \Delta z_M, T_1, T_2, \dots, T_N, \text{Type}_1, \text{Type}_2, \dots, \text{Type}_K) \\ \text{Min: } & \sum_{j=1}^{\text{NUM}_C} \alpha_j \text{RMS} \\ \text{s. t: } & \sigma_{\max}^j = \max(\sigma_e^j) \leq [\sigma] \\ & e = 1, \dots, NE; j = 1, 2, \dots, \text{NUM}_C \\ & W \leq W_0 \\ & X_{\min} \leq X \leq X_{\max}, Y_{\min} \leq Y \leq Y_{\max} \\ & \Delta x_{\min} \leq \Delta x \leq \Delta x_{\max}, \Delta y_{\min} \leq \Delta y \leq \Delta y_{\max} \\ & \Delta z_{\min} \leq \Delta z \leq \Delta z_{\max} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 X 和 Y 分别为支撑点横、纵坐标, Δx 为支撑点 X 方向刚体位移调整量, Δy 为支撑点 Y 方向刚体位移调整量, Δz 为支撑点 Z 方向刚体位移调整量,RMS为某工况下的表面均方根精度, α_j 为该工况的权值, σ_e^j 和 σ_{\max}^j 分别为单元应力值以及某工况下材料应力值,NE为单元总数,NUM_C为工况数,W为当前设计方案对应的质量, W_0 为质量上限,其中 N 为可选拓扑变量数量, K 为可选型材数量。本次设计工字梁采用两种型材,其截面积分别为2100 mm和1900 mm。

4 Stewart 平台优化设计

当球铰位置确定后,不同胡克铰分布,影响该支腿支撑力和推力。笔者曾将胡克铰分布在同一圆周上,满足不同工况下支腿推力最大达到24 t,很难有现成产品,为此,需要对胡克铰的位置分布进行优化设计,令6个铰接点坐标分别为

$$\begin{cases} x_i = r_{bi} \cos \left[\frac{2\pi}{3}(i-1) - \frac{\alpha_b}{2} \right] \\ y_i = r_{bi} \sin \left[\frac{2\pi}{3}(i-1) - \frac{\alpha_b}{2} \right] \\ z_i = 0, i = 1, 2, \dots, 6 \end{cases} \quad (7)$$

调整机构驱动支腿的驱动力取决于调整机构的构型,因此需要找出广义负载力从天线阵面到驱动支腿的映射关系。令 $\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1, \dot{i}_2, \dot{i}_3, \dot{i}_4, \dot{i}_5, \dot{i}_6]^T$ 表示6条支腿的滑移速度, $\dot{\mathbf{P}} = [\mathbf{V}^T \ \boldsymbol{\omega}^T]^T$ 为天线阵面平动和转动角速度。两者之间存在如下关系^[13]

$$\dot{\mathbf{i}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{P}} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \dots & \mathbf{e}_6 \\ \mathbf{r}_1 \times \mathbf{e}_1 & \mathbf{r}_2 \times \mathbf{e}_2 & \dots & \mathbf{r}_6 \times \mathbf{e}_6 \end{bmatrix}^T$ 为雅可比矩阵,

其中, $\mathbf{e}_i = \mathbf{l}_i / \|\mathbf{l}_i\|$, $\mathbf{r}_i = \mathbf{R} \mathbf{p}_i$, \mathbf{R} 为调整平台的姿态旋转变换矩阵, \mathbf{p}_i 为第 i 个球铰的局部坐标值。若负载力矢量记为 $\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z]^T$,支腿驱动力矢量记为 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6]^T$,由虚功原理得

$$\mathbf{f} = (\mathbf{J}^T)^{-1} \mathbf{F} \quad (9)$$

式(9)表明,雅可比矩阵的条件数 ν 可以用来衡量力的变换系数。因此,建立如下的天线阵面调整机构的构型参数优化模型:

$$\begin{aligned} \text{Find } X_{\text{var}} = & (h_0, \alpha_b, r_{b1}, r_{b2}, \dots, r_{b6})^T \\ \text{Min } \nu = & \text{cond}(\mathbf{J}(X_{\text{var}}, \Omega)) \\ \text{s. t. } & 280 \leq h_0 \leq 330 \\ & 30 \leq \alpha_b \leq 60 \\ & 1000 \leq r_{bi} \leq 2500, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \end{aligned} \quad (10)$$

式中 h_0 为中心体到天线面板的高度, r_{b1} 为胡克铰的半径,为避免和其他子阵干涉,故给上界; Ω 为调整机构使得天线阵面的工作空间,而 Ω_0 为调整机构可达空间,所以 Ω 是其可达空间的 Ω_0 一部分,即 $\Omega \subset \Omega_0$ 。

5 计算结果及分析

5.1 天线阵面仿真结果及分析

天线阵面材料为铝,因为仰天工况受到重力最大,故仅在该工况进行优化设计。经分析未加加强筋时其仰天工况的位移其最大变形达到了13.869 mm,|max-min|(峰峰值)为16.41 mm,吻合精度表面均方根误差(RMS)为2.64 mm,远低于设计要求。通过本文方法,优化后总质量不变,约束点位置以及工字梁布局如图3所示。蓝色部分选择型材1,红色部分选择型材2,仰天工况最大变形为0.59 mm,峰峰值为0.70 mm,吻合精度为0.12 mm,优化后变形云图如图4所示。该结构在45°工况下进行校合,最大变形0.42 mm,峰峰值为0.50 mm,原始精度为0.12 mm,吻合精度为0.08 mm。二工况下最大等效Mises应力分别为3.78 MPa和2.67 MPa。

5.2 Stewart 平台优化设计仿真结果

天线阵面优化中确定了球铰位置为 $x_1 = l, y_1 = 5\tau, x_2 = 3l, y_2 = \tau, x_3 = 6l, y_3 = 2\tau, x_4 = 7l, y_4 = 4\tau, x_5 = 6l, y_5 = 10\tau, x_6 = 3l, y_6 = 11\tau$, 这里 $l=0.544\text{ m}, \tau=0.272\text{ m}$ 为子阵单元的长和宽。采用遗传算法进行求解,得到胡克铰半径分别为 $(30, 2039, 1175, 2459, 1195, 1086, 1013)^T$ 单位为 mm 。 $\alpha_6 = 326^\circ$ 求得胡克铰和球铰位置后,可分析天线不同工况下支腿的受力情况。本文分析当调整机构阵面处于仰天和指平状态下各支腿的驱动力。当阵面处于仰天状态时,重力沿-Z方向,各支腿受

力见表1。

当阵面处于指平 90° 的状态时,考虑到各子阵分布情况不同时,分析了重力沿 $\pm X$ 或 $\pm Y$ 方向情况,各支腿受力见表2。

由表1和表2可知,当天线阵面仰天时,支腿所需驱动力较大。因此,在该状态下,规划天线平动和转动运行梯形速度曲线,利用牛顿欧拉方程可确定该运动轨迹的各个支腿驱动力,如图5所示。

综合可得,在重力作用下,支腿驱动力的最大值为 31102 N ,约合 3.17 t 。据此选择相应的电动缸型号。

表1 仰天状态下支腿长度和驱动力(单位:mm,N)

Tab.1 Leng and force of the leg in horizol direction (unit:mm,N)

支腿号	1	2	3	4	5	6
长度	1127	491	2014	652	1373	748
驱动力	-4097	-19014	16964	-29030	13307	-18621

表2 指平状态下驱动力(单位:N)

Tab.2 Driving force of the legs in vertical direction (unit:N)

支腿号	1	2	3	4	5	6
重力沿-X	-16177	5655	1887	-9127	25645	-2072

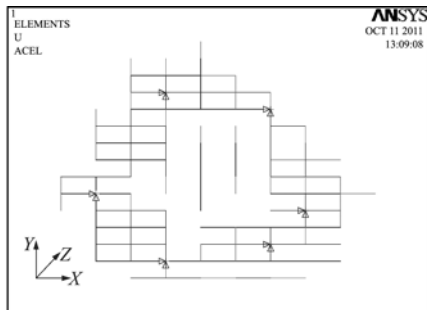


图3 约束点位置以及工字梁布局
Fig.3 Distribution of constrain points and I-shape beams

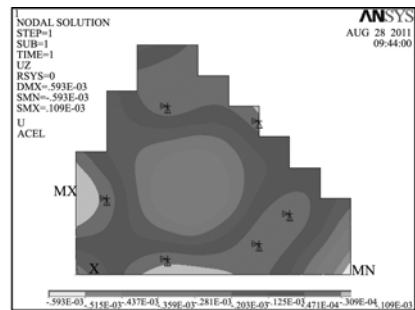


图4 仰天 Z向变形
Fig.4 Deformation of horizon in Z direction

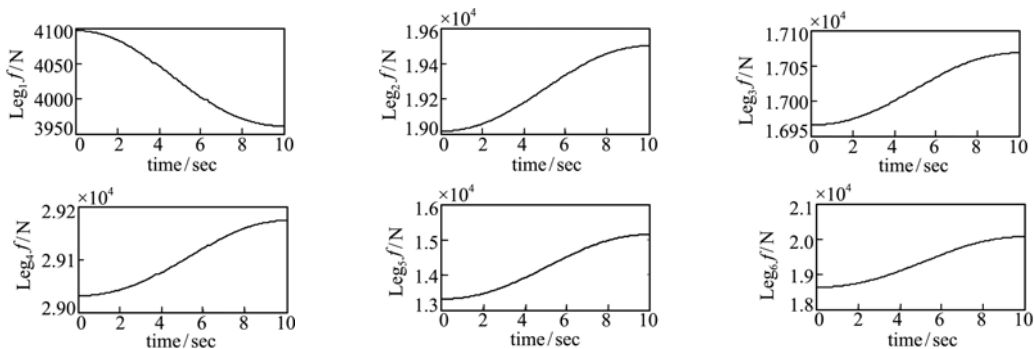


图5 6条支腿驱动力矩的绝对值
Fig.5 Absolute value of driving moments for the six legs

6 结 语

本文使用优化设计的方法,对一个具体大型相控阵天线支撑结构和调整机构进行了方案设计,提出应用连续映射函数将多离散变量的拓扑优化映

射为连续变量拓扑优化的思路和方法;区别于一般的混合整数规划的求解方案,降低了原问题的求解规模,提高了求解的效率,其结果也更符合工程实际情况,并且由此方法得到的设计方案满足设计指标。同时,也说明结构优化对工程方案的制定有很

大益处。

参考文献(References):

- [1] 南京电子技术研究所. 相控阵天线手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. (Nanjing Research Institute of Electronics Technology. *Phased Array Antenna Handbook* [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2007. (in Chinese))
- [2] 陈竹梅, 平丽浩, 徐东海, 等. 机载大尺寸天线平面度控制与测试研究[J]. 现代雷达, 2010, **32**(4): 82-87. (CHEN Zhu-mei, PIN Li-hao, XU Dong-hai. A study on control measures and measurement technology of flatness of airborne large size antenna [J]. *Modern Radar*, 2010, **32**(4): 82-87. (in Chinese))
- [3] 徐东海. 大型机载雷达天线结构分析[J]. 电子机械工程, 2003, **19**(3): 25-27. (XU Dong-hai. Analysis of electromagnetic performances of planar phased Array antennas with radiating element errors[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2003, **19**(3): 25-27. (in Chinese))
- [4] 叶尚辉. 天线结构设计[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1980. (YE Shang-hui. *Design of the Antenna Structure* [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1980. (in Chinese))
- [5] Groenwold A A, Stander N, Snyman J A. A pseudo-discrete rounding method for structural optimization [J]. *Struct Optim*, 1996(11): 218-227.
- [6] W Achtziger, M Stolpe. Global optimization of truss topology with discrete bar areas-Part I: Theory of relaxed problems[J]. *Comput Optim Appl*, 2008, **40**: 247-280.
- [7] W Achtziger, M Stolpe. Global optimization of truss topology with discrete bar areas-Part II: Implementation and numerical results[J]. *Comput Optim Appl*, 2009, **44**: 315-341.
- [8] Panagiotis A, Makris Christopher G, Provatidis Demetrios A, Rellakis. Discrete variable optimization of frames using a strain energy criterion[J]. *Struct Multidisc Optim*, 2006, **31**: 410-417.
- [9] Ng K M. A Continuation Approach for Solving Non-linear Optimization Problems with Discrete Variables [D]. Stanford University, 2002.
- [10] Walter Murray, Kien-Ming Ng. An algorithm for non-linear optimization problems with binary variables [J]. *Comput Optim Appl*, 2010, **47**: 257-288.
- [11] 保宏. 大型射电望远镜馈源指向系统的控制、优化与实验[D]. 西安电子科技大学, 2005. (BAO Hong. Control, Optimization and Experiment of the Feed Tracking System for Large Radio Telescope [D]. Xidian University, 2005. (in Chinese))

On homology the design of large phased array antenna structure

BAO Hong^{*1}, LENG Guo-jun¹, DUAN Xue-chao¹, DU Jing-li¹, ZHONG Jian-feng²

(1. Key Laboratory of Electronic Equipment Structure Design, Ministry of Education, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. State Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Considering the special characteristics of a large phased antenna with great in weight, high precision in antenna surface, and ribbed stiffener restricted in location, homology design of antenna structure is studied in this paper. A discrete variables topology optimization method is presented for solving these problems above. For improving effective and decreasing cost in computing, a continuous filter function is proposed that the discrete topology optimization into continuous topology optimization. Furthermore, in order to reduce driven-force of machine, an optimization model, location of prismatic joints, is established. Since static and dynamical of the machine is analysis to determined maximal driven force. A large phased array antenna is selected to verify the proposed method. Finally, a satisfied result is obtained and will be applied into the engineering.

Key words: phased array antenna; homology design; topological optimization