DOI: 10.3901/JME.2015.01.196

大型相控阵天线结构与调整机构一体化设计*

胡乃岗 保宏 连培园 宗亚雳 周金柱

(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)

摘要: 针对某大型相控阵天线自重大、加强筋安装位置受限等特点导致天线阵面精度难以保证的工程背景,进行相控阵天线阵面结构方案优化设计。考虑到大型阵面的自重变形导致的柔性特点,提出综合考虑阵面变形后平面度和调整机构精度的一体化优化设计模型,对调整机构支腿的布局进行了优化设计。同时,考虑到加强筋安装位置和型材受限,利用连续化过滤函数,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,降低了解的规模。采用上述方法对某大型相控阵雷达进行了案例验证,收到满意的结果。

关键词: 相控阵天线; 调整机构; 拓扑优化; 条件数; 加强筋

中图分类号: O342

Synthetic Design of Structure and Adjustment Mechanism of Large Phased Array Antennas

HU Naigang BAO Hong LIAN Peiyuan ZONG Yali ZHOU Jinzhu

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

Abstract: Large phased array antennas often have large weight and the stiffeners attached to planes have discrete location restriction, so that it is difficult to meet the demand of high plane accuracy. A homology design of large phased array antennas is presented to tackle this problem. A new synthetic optimization model is proposed to design the locations of actuating links, which take both plate self-weight deformation and adjusting mechanism accuracy into consideration. For improving effectiveness and decreasing the computing cost of stiffener layout optimization, a continuous filter function is introduced to transfer the discrete optimization into continuous one. A large phased array antenna is simulated to verify the proposed method and satisfactory results are obtained.

Key words: phased array antenna; adjusting mechanism; topological optimization; condition number; stiffeners

0 前言

自20世纪60年代相控阵雷达问世以来,由于其用电扫描代替机械扫描的优越特性,被广泛应用于导弹制导、敌我识别、精密跟踪等领域^[1]。随着雷达所需天线增益、主瓣宽度要求的不断提高,相控阵天线也向着大口径、高频段的方向发展。这样的发展趋势随之对天线的结构设计提出了很高的要求。天线阵面由于自重引起的变形会很大程度上导致天线的增益下降,副瓣电平升高等不利情况出现,从而影响相控阵天线整体的电气性能^[2-5]。大口径相控阵天线的保型设计越来越成为大型相控阵天线设

计的一个重点和难点。

某相控阵天线阵面面积近 160 m^2 ,阵面质量约 30 t ,这在工程上很难实现整体精度的保证。为此,将其阵面分为9个超级子阵,如图1所示。最中间布置的为零号子阵,其余八个子阵依次分布在周围。单个子阵共分为95个阵列单元安装区域,每个阵列单元为矩形,均匀分布在子阵中。子阵面积为 18 m^2 ,总质量为 2.8 t ,其中无刚度贡献的馈电系统有 2.2 t 。为保障安装后的总体阵面精度,单个子阵背部安装有一个调整机构,包含六个可伸缩支腿。支腿一端通过球铰与阵面连接,另一端通过虎克铰与天线中心体连接,通过六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,以确保天线多个子阵阵面拼装后在不同仰角下的整体精度。最终要求子阵可以实现 x, y, z 各方向 $\pm 2.5\text{ mm}$ 平移,绕 x, y, z 各方向 $\pm 1^\circ$ 旋转。子阵与调整机构具体如图2所示。

* 新疆维吾尔自治区重点实验室专项(2014KL012)和国家自然科学基金(51035006, 51305323)资助项目。20140108收到初稿,20140918收到修改稿

图1 子阵分割示意图

图2 子阵与调整机构示意图

由于子阵下安装有调整平台, 所以对于本文中涉及的阵面保型设计应该由两部分组成: 一是阵面下调整机构的设计。二是通过在阵面上安装加强筋, 增加子阵的抗弯刚度, 以保证重力作用下子阵阵面精度要求。上述两部分应该共同作用, 才能更好地保证阵面的精度要求。

对于调整机构的设计, 以往的设计思路有一个前提, 就是调整机构所支撑的结构是刚性的。具体来说, 就是调整机构支腿上端的六个球铰的相对位置关系被认为是始终固定不变的, 无论阵面处于任何姿态下。但是在实际工程中, 大型天线结构要求很好的刚度, 而为了提高刚度, 需要增大板壳厚度与增大杆件横截面积, 这又增加了其自重载荷, 从而导致自重变形的增加。增加天线刚度与降低自重变形是天线结构设计中一对明显的矛盾^[6]。所以, 实际工程中, 很难保证天线阵面不变形。此时单纯考虑调整机构性能, 或者是只追求阵面精度的调整机构设计方法已经不适用。正确的设计思路应该是在设计中同时考虑阵面的自重变形和调整机构性能, 本文据此展开了研究工作。

同时, 对于离散变量下的结构拓扑优化问题, 也是本文需要处理的问题之一。考虑到工程实际, 加强筋的截面形状应当从少数常用类型中选取, 从而节约开支和提高效率。ACHTZIGER 等^[7-8]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, 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^[9-10]。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, 拓扑优化将如何为工程实际服务, 是其应用的难点, 也是本文想尝试讨论的问题。

1 包含调整机构的整体有限元建模

在传统的调整机构设计流程中, 设计者一般只需要知道调整机构所支撑的平台的重力、重心即可通过机构学的数学运算获得不同调整机构形式下的运动性能, 从而进行优化设计。但是, 如上文所述, 为了获取在不同调整机构形式下阵面的变形信息, 必须对包含调整机构的阵面进行有限元建模。

本文在有限元仿真软件 ANSYS 中建立了阵面以及调整机构的有限元模型。其中, 阵面厚度为 15 mm, 材料为铝合金, 弹性模量 $E = 71 \text{ GPa}$, 密度 $\rho = 2\,700 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.3$; 调整机构支腿为圆柱形, 直径 50 mm, 材料为钢, 弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$, 密度 $\rho = 7\,000 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.3$ 。支腿的上端按照球铰处理, 与阵面底面相连接; 下端点按照虎克铰处理, 且作为总体结构的支撑点。

图3 阵面和支腿有限元模型约束示意图

阵面采用壳单元 Shell63 建模, 支腿采用梁单元 Beam188。对于支腿上端的球铰, 在 ANSYS 中将支腿上端点, 即图 3 中点 b , 和阵面的连接点 b' 进行自由度耦合, 耦合两个节点的三个方向的平动自由度, 即模拟球铰。对于下端虎克铰位置点 a , 约束其三个自由度的平动自由度, 且约束节点绕支腿轴向的旋转自由度, 从而模拟虎克铰。根据上述方法, 建立了调整机构支腿的有限元模型, 方便后续对阵面变形的有限元计算。

2 调整机构优化设计

2.1 调整机构优化设计数学模型

在优化数学模型提出之前, 如何评估平面的精度是首先要面对的问题。变形曲面相对于原始平面的精度为原始精度, 而相对于吻合平面的精度称之为吻合精度^[11]。考虑到调整平台在不同仰角下会施以不同的补偿量, 应该以吻合精度作为设计指标^[12]。具体表达式如下

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^N d_i^2} / N \quad (1)$$

式中, R 为吻合精度; N 为阵面有限元网格划分后的节点数目; d_i 为第 i 个节点变形后位置和吻合平面之间的距离。

对于描述调整机构性能的参数, 调整机构雅可比矩阵的条件数是运动学性能优化较为理想的目标函数^[13]。而且, 此条件数表征了雅可比矩阵的各向同性, 可以用来衡量力的变化系数。该值越接近 1, 所需的支腿驱动力就越小。这对工程实际中电动缸的选型相当有意义。

当同时考虑阵面自身的自重变形以及调整机构条件数时, 原来的单目标优化问题转换成了目前的多目标问题。本文利用指数函数的形式将多目标转换为单目标求解, 既能考虑到优化问题的多目标, 又能兼顾计算量和工程实际。此处, 机构条件数作为指数的幂, 当其增大时, 会显著地恶化目标函数, 产生惩罚的效果。所以, 同时考虑机构运动性能与阵面自重保型的调整机构一体化优化设计的数学模型如式(2)所示

$$\begin{aligned} \text{find } & \mathbf{D} = (x_1, x_2, \dots, x_{12}, y_1, y_2, \dots, y_{12}, h)^T \\ \text{min } & \nu = \sum_{l=1}^3 R_l \times 1.05^{\text{cond}(J(\mathbf{D}, \Omega))} \\ \text{s.t. } & (x_i, y_i) \in \Delta \quad i = 1, 2, \dots, 12 \\ & h_l < h < h_u \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $x_1, x_2, \dots, x_{12}, y_1, y_2, \dots, y_{12}$ 分别为调整机构球铰点和虎克铰点的 x 和 y 坐标; h 为支腿在垂直阵面方向上的投影长度; h_l 和 h_u 分别为 h 的设计上下限; Δ 为上球铰或者虎克铰允许布置的范围; Ω 是调整机构使得天线的工作空间; $\text{cond}(J(\mathbf{D}, \Omega))$ 代表调整机构雅可比矩阵的条件数。同时, 为了综合考虑天线阵面在多俯仰角下的性能, 目标函数中吻合精度 R 一项为天线仰角为 0° , 45° 以及 90° 三种工况下的线性组合, 分别对应式(2)中 l 取 1、2、3 时。如前文所述, 受到天线阵面馈电系统位置的限

制, 调整机构的球铰只能布置在各辐射单元的交点处。为了减少计算工作量, 在本文中将球铰的位置处理成在阵面内部可连续变化, 最终对优化结构采用就近原则映射到相应的交点处。

2.2 调整机构优化设计仿真及结果

利用一体化设计模型, 即式(2), 对阵面下的调整机构支腿布局进行优化设计。需要注意的是, 此小节结构有限元模型中并未安装加强筋, 而是只是对调整机构位置进行设计。优化采用遗传算法进行。图 4 展示了优化结果中阵面下六根支腿和阵面的相对位置关系。图 4 中, 圆圈代表支腿上端的球铰位置, 星号代表支腿下端虎克铰位置, 圆圈与星号之间连线为调整机构支腿, 不规则外框即为天线子阵的边界。

图 4 一体化设计下调整机构投影示意图

作为对比, 同样进行了只是以阵面吻合精度为目标的机构支腿位置优化设计, 称之为保精度方案。所得的优化结果如图 5 所示。

图 5 保精度设计下调整机构投影示意图

图 5 所示的保精度设计方案为了满足多工况下精度, 尤其是天线指平工况, 存在一些跨度比较大的支腿, 符合阵面精度最大化的要求。而图 4 所示的一体化设计方案由于考虑到了调整机构的条件

数, 支腿分布比较均匀, 才能保证机构较高的调整精度。同时, 一体化设计下调整机构条件数为 2.546, 保精度设计方案下为 34.118。可以明显地看出, 一体化设计方法能够很明显地减小机构的条件数, 很大程度上提高了调整机构的运动性能。对于阵面精度而言, 由于阵面没有安装加强筋, 所以此时精度与工程要求相差甚远, 有待于后文中进行加强筋布局优化来提高, 故而此处不具体列出优化结果的阵面精度数值。

3 加强筋布局优化设计

3.1 加强筋连续化思路

由于受到馈电单元位置的限制, 阵面加强筋只能布置在馈电单元之间的缝隙中。对于图 1 所示的阵面, 加强筋可选择的位置有 251 个。在实际工程中, 处于经济和便捷的考虑, 一般希望结构中所需要的组件均可从现有型材中选择, 这就导致加强筋的尺寸只能从某一特定集合中选取。这同样增加了对加强筋布局设计的难度。

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的函数。将可选择型材构成一个集合, 如图 6 所示。

图 6 型材编号及相应截面积

惯性矩与截面积映射关系为^[14-15]

$$x_i = (A_x - A_{i-1}) / (A_i - A_{i-1}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$I(x_i) = I_{i-1} + (I_i - I_{i-1})x_i \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

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。需要指出的是, 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, 有必要对连续空间进行型材过滤。

3.2 构造阶梯函数实现型材过滤

3.2.1 构造阶梯函数

定义截面积函数表达式为^[14-15]

$$A_p = \begin{cases} \frac{A_x}{1 + P_1(A_1 - A_x)} & 0 \leq A_x \leq A_1 \\ A_i + \frac{(A_x - A_i)(1 + \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii})}{1 + \tilde{P}_i(A_x - A_i)} & A_i < A_x \leq \tilde{A}_i \\ \tilde{A}_i + \frac{A_x - \tilde{A}_i}{1 + P_i(A_{i+1} - A_x)} & \tilde{A}_i < A_x \leq A_{i+1} \end{cases} \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (5)$$

式中, A_p 为映射后型材截面积; $\tilde{A}_i$ 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 是确保函数光滑连续的条件。

3.2.2 连续可导条件

如果构造的截面积函数不连续光滑, 在计算参数灵敏度时会引入数值噪声, 影响优化最终的结果。下面给出该函数连续可导的条件。

该分段函数对应的微分方程为^[14-15]

$$\frac{\partial A_p}{\partial A_x} = \begin{cases} \frac{1 + P_1 A_1}{(1 + P_1(A_1 - A_x))^2} & 0 \leq A_x \leq A_1 \\ \frac{1 + \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii}}{(1 + \tilde{P}_i(A_x - A_i))^2} & A_i < A_x \leq \tilde{A}_i \\ \frac{1 + P_{i+1}(\tilde{A}_{i+1,i})}{(1 + P_{i+1}(A_{i+1} - A_x))^2} & \tilde{A}_i < A_x \leq A_{i+1} \end{cases} \quad i = 1, \dots, m-1 \quad (6)$$

式中, $\tilde{A}_{i+1,i} = A_{i+1} - \tilde{A}_i$ 。只要式(6)在分段点处连续, 则说明式(5)表示的函数连续可导, 于是推得其连续光滑的条件为

$$\begin{aligned} P_i A_i &= \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii} \\ \tilde{P}_i \tilde{A}_{ii} &= P_{i+1} \tilde{A}_{i+1,i} \end{aligned} \quad (7)$$

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 $A_1 = 1, A_2 = 2, A_3 = 3$, 在 (A_1, A_2) 和 (A_2, A_3) 之间分别取两个插值截面积 $\tilde{A}_1 = 1.05, \tilde{A}_2 = 2.05$, 且 $P_1 = 10$, 根据式(7)连续条件可得 $\tilde{P}_1 = 200, P_2 = 10.526, \tilde{P}_2 = 200, P_3 = 10.526$ 。按照以上条件所构造出来的函数如图 7 所示。

从图 7 可见, 式(5)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。从图中可见, 其导数值的大小, 说明截面积对系统贡献大小。由于式(5)惩罚效果, 会使优化后设计变量落入 1.00~1.05, 2.00~2.05, 3.00~3.05 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。

图 7 阶梯函数连续化示意图

3.3 加强筋优化仿真及结果

图 8 所示为空心矩形加强筋, 型材参数见表 1。

图 8 空心矩形加强筋截面示意图

表 1 两种型材参数 mm

梁截面参数	W_1	W_2	t_1	t_2	t_3	t_4
型材 1	40	200	5	5	30	10
型材 2	40	180	5	5	25	5

受到相控阵天线馈电系统限制, 背架加强筋的安装位置仅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。在加强筋截面形状的选择上, 放弃了工程上使用较多的工字型截面梁。通过分析可以发现对于阵面上的不同区域由于阵面下支腿的存在而且支腿的朝向不一致, 会导致有些区域受到扭转力矩, 而不仅仅是自重导致的弯曲。相比较工字梁而言, 空心矩形截面梁不仅有良好的抗弯效果, 同时有更好的抗扭能力。所以, 最终采用空心矩形截面梁。考虑工程实际, 为了节约开支和提高效率, 加强筋的类型从表 1 中的两种中选择。同时, 结构总重不应超过 3.4 t。此处的加强筋优化模型如式(8)所示

$$\begin{aligned}
 & \text{find} \quad A = (A_1, A_2, \dots, A_N)^T \\
 & \min \quad \sum_{l=1}^3 R_l \\
 & \text{s.t.} \quad W \leq W_0 \\
 & \quad \sigma_e \leq [\sigma] \quad e=1, 2, \dots, N_E \\
 & \quad A_l \in \{0, A_1, A_2\}
 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, A_l 为第 i 个加强筋的截面积; 目标函数为三个俯仰角下阵面精度之和, W_0 质量上限 3.4 t。 σ_e 和 $[\sigma]$ 分别为第 i 个单元的实际应力值和材料许用应力, N_E 为单元总数。采用序列二次规划方法, 优化相对步长取 0.001, 收敛精度取 0.001 mm, 敏度信息由有限差分法提供。

未加强筋时阵面仰天工况下的变形吻合精度为 69.07 mm, 此时子阵总质量为 2.8 t。通过本文构建的优化模型, 针对上节中得到的两种不同的调整机构分布进行加强筋优化设计, 得到加强筋布局以及支撑结构如图 9、10 所示。图 9、10 中, 实线部分选择型材一, 虚线部分选择型材二, 点画线为调整机构六根支腿的位置, 圆圈所标注端点为下铰点, 三角形所标注端点为上铰点。保精度设计最终结构总重为 3.36 t; 一体化设计为 3.298 t, 都满足质量约束。各个工况下阵面精度值见表 2 原始位置所对应数值。此处的原始位置是针对下文中的调整机构的调整位置而言的。图 11 示出了一体化设计下子阵仰天工况下 Z 向变形。

图 9 一体化设计下子阵加强筋布局及机构铰点位置

图 10 保精度设计下子阵加强筋布局及机构铰点位置

图 11 一体化设计下子阵仰天工况下 Z 向变形云图

如前文所述,调整机构的条件数描述的是机构的调整精度,所以保精度设计下如此大的条件数势必会导致调整精度的损失,会导致在机构调整空间边缘处的精度损失。因为本案例中对调整机构的要求是可以实现子阵 x, y, z 各方向 ± 2.5 mm 位置调整,绕 x, y, z 各方向 $\pm 1^\circ$ 旋转。通过对机构运动空间的搜索,确定了在运动空间边缘处进行结构精度验证,即 x, y, z 三个方向均偏移 2.5 mm,绕 x 轴旋转 1° ,绕 y 轴旋转 -1° 。在此调整位置的阵面精度如表 2 所示。

表 2 两种设计方案下阵面精度 mm

阵面精度	保精度设计		一体化设计	
	原始位置	调整位置	原始位置	调整位置
0°	0.484	2.514	1.224	1.247
45°	0.224	1.812	1.545	1.207
90°	0.382	0.397	1.636	1.658

对于保精度设计方案, 0° 和 45° 下的调整位置相比较原始位置精度有很明显的恶化趋势,降低到 1/4 左右,这就极大减小了前期保型优化的优势;而对于一体化设计下,调整位置的精度相比于原始位置没有恶化,甚至在 45° 下有了略微的提升。

所以,对于保精度设计,虽然在调整机构的原始位置保型效果很好,但是在机构调整空间的边缘处,保型效果会有明显的恶化;而对于一体化设计结果,不论是机构原始位置或是调整空间边缘,均能稳定地保证阵面的精度,这种稳定性在工程中具有很大意义。

4 结论

本文利用优化设计方法对某大型相控阵天线进行了支撑结构方案以及加强筋布局优化设计。

(1) 提出了综合考虑阵面自重变形和调整机构精度的机构一体化设计方法。不仅提高了阵面精度,而且在整个机构调整空间均能保证子阵精度的稳定。能够直接应用于工程实践。

(2) 利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。

参 考 文 献

- [1] 束咸荣,何炳发,高铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
SHU Xianrong, HE Bingfa, GAO Tie. Phased array radio antenna[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007.
- [2] 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: Electronic Industry Press, 2007.
- [3] 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 Zhumei, PING Lihao, XU Donghai, et al. A study on control measures and measurement technology of flatness of airborne large size Antenna[J]. Modern Radar, 2010, 32(4): 82-87.
- [4] 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 Donghai. Research on the antenna structure of a large airborne radar[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2003, 19(3): 25-27.
- [5] 王从思,平丽浩,保宏. 相控阵天线辐射单元误差对电性能的影响分析[C]// 机械电子学学术会议, 2009 年 8 月 31 日,太原,中国. 北京:电子工业出版社, 2009: 507-512.
WANG Congsi, PING Lihao, BAO Hong. Analysis of electromagnetic performances of planar phased array antennas with radiating element errors[C]// Mechatronics Conference, August 31, 2009, Taiyuan, China. Beijing: Electronic Industry Press, 2009: 507-512.
- [6] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1998.
DUAN Baoyan. Antenna structure analysis, optimization and measurement[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1998.
- [7] ACHTZIGER W, STOLPE M. Global optimization of truss topology with discrete bar areas—Part I: Theory of relaxed problems[J]. Comput. Optim. Appl., 2008, 40: 247-280.
- [8] ACHTZIGER W, STOLPE M. Global optimization of truss topology with discrete bar areas — Part II :

- Implementation and numerical results[J]. Comput. Optim. Appl., 2009, 44: 315-341.
- [9] MAKRIS P A, PROVATIDIS C G, RELAKIS D A. Discrete variable optimization of frames using a strainenergy criterion[J]. Struct. Multidisc. Optim., 2006, 31: 410-417.
- [10] NG K M. A continuation approach for solving nonlinear optimization problems with discrete variables[D]. Stanford: Stanford University, 2002.
- [11] 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 Shanghui. Antenna structure design[M]. Xi'an: Northwest Institute of Telecommunication Engineering Press, 1980.
- [12] 冷国俊. 大型反射面保型与机电综合优化设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- LENG Guojun. Homology design on reflector and electromechanical synthetic optimization of large antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [13] 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: 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]. Xi'an: Xidian University, 2005.
- [14] 保宏, 冷国俊, 段学超, 等. 大型相控阵天线结构保型设计研究[J]. 计算力学学报, 2013, 30(3): 444-448.
- BAO Hong, LENG Guojun, DUAN Xuechao, et al. On homology the design of large phased array antenna structure[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(3): 444-448.
- [15] 冷国俊, 保宏, 杜敬利, 等. 大型相控阵雷达高维离散变量拓扑优化[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 174-179.
- LENG Guojun, BAO Hong, DU Jingli, et al. Topology optimization with multiple discrete variables in large phased array radar[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 174-179.
-
- 作者简介: 胡乃岗(通信作者), 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为大型天线结构优化设计, 机电集成优化。
- E-mail: hng013@126.com