大型星载展开天线动力优化设计*

罗　鹰　段宝岩　杨东武　狄杰建

(西安电子科技大学机电工程学院　西安 710071)

摘　要

对周边桁架式星载展开天线的动力优化问题进行了研究. 分析了天线的结构特点, 对结构预应力设计变量进行了选择和归并. 讨论了以天线结构质量为目标函数, 以周边桁架各单元的截面积和反射索网中各拉索单元预应力为设计变量, 在优化中同时考虑天线结构的反射面精度要求、天线的动力性能和静力性能要求的展开天线动力优化设计问题, 建立了天线结构的动力优化数学模型. 最后, 将该模型应用于某 17 m 口径的天线结构, 并利用改进后的遗传算法对其进行了优化计算, 取得了比较满意的结果.

关键词　展开天线; 动力优化; 索网结构; 预应力; 遗传算法

1　引言

随着航天科学技术的飞速发展, 大型空间天线的应用需求变得愈加迫切. 但由于运载火箭尺寸的限制, 导致大型空间天线朝着可展开结构的方向发展. 其中周边桁架式可展开天线已成为各国竞相研究的重点, 这种天线具有尺寸大、重量轻、柔性大等特点, 是一种典型的几何非线性结构, 其结构力学性能分析远比一般传统结构困难和复杂 [1]-[3]. 图 1 为天线的结构示意图, 它主要由周边桁架、索网系统以及中心圆筒三部分组成. 由于周边桁架式展开天线的结构特点, 天线反射索网各单元预应力与周边构架单元的截面积对结构的刚度、强度以及反射网面精度等性能都具有影响, 因此为取得真正优化解, 必须在优化过程中同时考虑单元截面尺寸与索预应力两类设计变量. 目前国内外相关文献还很少见, 主要存在以下困难: 第一, 优化设计变量数量比较多, 如果都作为变量会造成计算规

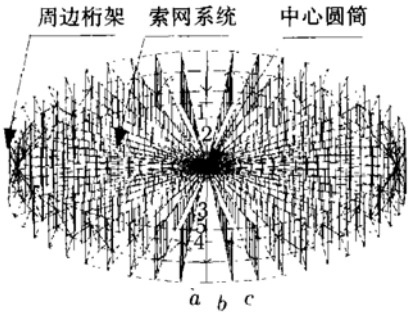

图 1　天线总体结构简图

Fig.1　The flexible deployed antenna

* 总装备部 "十五" 重点预研项目资助

2003-05-28 收到原稿, 2004-03-09 收到修定稿

模过大，难以求解；第二，预应力变量与截面尺寸变量在数值大小与性质上存在较大的差异，往往会造成模型性态差而导致收敛困难；第三，星载展开天线工作环境十分复杂，设计要求比较严格，既包括结构静、动力性能要求，又包括结构精度要求，进一步加大了优化计算难度. 本文针对周边桁架式可展开天线结构的特点，通过对这种天线结构的动、静力特性的分析比较，对优化变量进行了归并处理，提出了动力优化设计模型，数值试验结果说明了模型与算法的正确性.

2 设计变量的归并

周边桁架式展开天线的结构比较复杂，仅索单元就有近 3000 个，而周边桁架杆单元有近 400 个，因此必须对它们进行变量归并处理. 图 2 为单组曲面拉索的结构原理简图，它比较清楚地表明了天线曲面的形成原理. 即上悬拉索一端固定在中央圆筒的上部，另一端固定在周边桁架的上斜杆顶端. 下悬拉索一端固定在中央圆筒略下位置，另一端固定在周边桁架的下斜杆顶端. 依靠垂列线将上悬拉索调整到所需曲率. 对整个天线反射面而言，分别调整每一组曲面拉索，就能够使其形成所需的反射面. 另外，为避免由于各组曲面拉索之间的耦合，确保网面精度的准确调整，在各组曲面拉索之间没有设置环向拉索.

若天线共有 M 组曲面拉索，每组曲面拉索具有 n 根垂列线 (也称为调节索)，在拉索张力作用下，曲面拉索达到平衡 (图 3). 根据各节点在 x 方向的静力平衡条件可知，对于任意一段上悬索单元 (或下悬索单元) $(i, i+1)$，其轴向张力的水平分量是一个常数 H，说明如下.

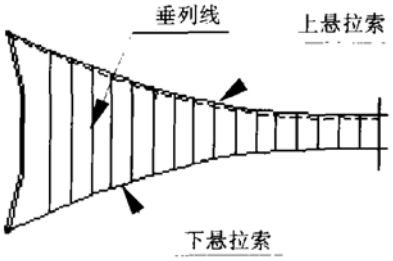

图 2 一组天线曲面拉索原理图
Fig.2 A set of cable system

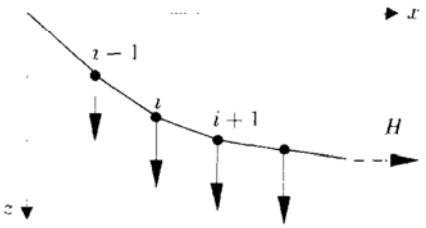

图 3 任一上悬拉索受力示意图
Fig.3 A upper cable force diagram

假设任一上悬拉索 (或下悬拉索) 原长为 L_0，施加预应力后上悬拉索中各单元张力分别为 $F_{(i,i+1)}$，节点坐标分别为 (x_i, z_i)、(x_{i+1}, z_{i+1})，各单元长度分别为 $l_{(i,i+1)}$，在优化过程中，各单元的原始长度 $l^0_{(i,i+1)}$ 将随单元张力的增减而变化，根据索的变形协调条件，有

$$\frac{F_{(i,i+1)}}{EA} = \frac{l_{(i,i+1)} - l^0_{(i,i+1)}}{l^0_{(i,i+1)}} \approx \frac{l_{(i,i+1)} - l^0_{(i,i+1)}}{l_{(i,i+1)}}, \quad i = 0, 1, 2, \cdots, n. \tag{1}$$

则有

$$l^0_{(i,i+1)} = l_{(i,i+1)} - \frac{F_{(i,i+1)} l_{(i,i+1)}}{EA}.$$

其中，

$$l_{(i,i+1)} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}.$$

设单元方向角为 $\theta_{(i,i+1)}$, 则

$$\cos\theta_{(i,i+1)} = \frac{|x_{i+1} - x_i|}{l_{(i,i+1)}}, \tag{2}$$

$$F_{(i,i+1)} = \frac{H}{\cos\theta_{(i,i+1)}}. \tag{3}$$

于是有

$$l^0_{(i,i+1)} = l_{(i,i+1)} - \frac{Hl_{(i,i+1)}}{EA\cos\theta_{(i,i+1)}}. \tag{4}$$

根据几何协调条件，有

$$\sum_{i=0}^{n} l^0_{(i,i+1)} = L_0, \tag{5}$$

则

$$\sum_{i=0}^{n} l_{(i,i+1)} - H\sum_{i=0}^{n}\frac{l_{(i,i+1)}}{EA\cos\theta_{(i,i+1)}} = L_0,$$

$$H = \frac{\sum_{i=0}^{n} l_{(i,i+1)} - L_0}{\sum_{i=1}^{n}\dfrac{l_{(i,i+1)}}{EA\cos\theta_{(i,i+1)}}}. \tag{6}$$

同样，假设任一中间调节索原长为 $l^0_{(i,j)}$, 施加预应力后单元张力为 $F_{(i,j)}$, 单元长度为 $l_{(i,j)}$, 可得:

$$H = \frac{l_{(i,j)} - l^0_{(i,j)}}{\dfrac{l_{(i,j)}(\tan\theta_{(i-1,i)} - \tan\theta_{(i,i+1)})}{EA}}. \tag{7}$$

由此可见，对该展开天线的任一组曲面拉索必然存在惟一的索张力水平分量与之对应. 因此，只要给定一个水平分力，就能够找到与之相对应的平衡结构形状. 推广到整个天线反射索网系统，若存在 M 组曲面拉索，则只需给定 M 个水平分力，就能完全确定悬索系统中各索单元的内力及反射网面的形状.

周边构架单元结构如图 4 所示，整个展开天线周边就是由若干个这样的单元连接组合而成，各个构架单元结构完全相同. 根据结构受力情况与加工要求，在优化设计中将周边桁架各单元的截面积变量归并为 6 类设计变量:

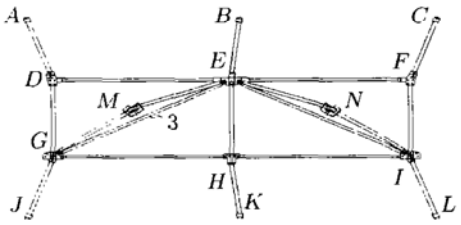

图 4　周边桁架单元结构图

Fig.4　The framework of antenna

变量 1　DG, EH, FI	变量 2　DE, EF, GH, HI
变量 3　EG, EI	变量 4　AD, BE, CF, GJ, HK,LI
变量 5　EM, EN	变量 6　MG, NI

3 动力优化模型

在航天技术方面, 对结构重量要求十分严格. 据相关研究表明, 卫星重量每减轻 1 kg, 运载火箭就能够减轻 500 kg, 可见减轻卫星重量的重要性. 另外, 考虑到星载展开天线工作环境的复杂性, 在设计中需要对天线的各方面性能进行严格的规定. 经过全面考虑, 本文建立了如下优化设计模型.

$$\text{Find} \quad A_1, A_2, \cdots, A_N;\ H_1, H_2, \cdots, H_M$$

$$\min \quad W = \rho \sum_{i=1}^{N} A_i \sum_{j \in i} L_j, \tag{8}$$

$$\text{s.t.} \quad D - D^{\mathrm{L}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{p}}} \delta_i^2}{n_{\mathrm{p}}}} - D^{\mathrm{L}} \leqslant 0, \tag{9}$$

$$\sigma_e - [\sigma_1] \leqslant 0, \quad e = 1, 2, \cdots, N_{\mathrm{T}}, \tag{10}$$

$$\sigma_r - [\sigma_2] \leqslant 0, \quad r = 1, 2, \cdots, N_{\mathrm{C}}, \tag{11}$$

$$-\omega_{\min} + \underline{\omega} \leqslant 0. \tag{12}$$

$$A_i \in [A^{\mathrm{L}}, A^{\mathrm{U}}], \quad i = 1, 2, \cdots, N, \tag{13}$$

$$H_j \in [H^{\mathrm{L}}, H^{\mathrm{U}}], \quad j = 1, 2, \cdots, M. \tag{14}$$

其中, A_i 为构件截面积, N 为截面积设计变量总数; H_j 为预应力设计变量, M 为预应力设计变量总数; W 为周边桁架结构质量, ρ 为材料密度, L_{ij} 为与设计变量 A_i 相对应的周边桁架单元长度; D 为反射索网的实际精度, 即上悬拉索各节点的均方根误差, D^{L} 为设计允许精度值, δ_i 为索网上悬节点 i 的坐标误差值, n_{p} 为上悬拉索节点总数; σ_e 为展开状态工作时周边桁架单元 e 中的实际应力值, $[\sigma_1]$ 为周边桁架单元最大允许应力值, N_{T} 为桁架单元总数; σ_r 为展开状态下索单元 r 中的实际应力, $[\sigma_2]$ 为索单元最大允许应力值, N_{C} 为索单元的总数. $\omega_{\min}$ 为天线展开状态下的天线结构基频, $\underline{\omega}$ 为天线设计规定的基频值; A^{U} 和 A^{L} 分别为周边桁架各单元截面积变量的上、下限值; H^{U} 和 H^{L} 分别为预应力变量的上、下限值.

由于在优化过程中没有对中间索网结构与中心圆筒进行任何修改, 因此在上述优化模型中将周边桁架的质量作为优化目标, 天线结构整体质量随周边桁架质量的下降而下降. 式 (9) 为天线反射面精度约束, 天线对反射网面的精度要求很高, 完全有必要通过优化索网中各单元的预应力, 保证天线具有较高的精度. 式 (10)、(11) 分别为天线结构中周边桁架单元与拉索单元的强度约束, 从而确保结构各单元在预应力作用下不会发生破坏. 式 (12) 则为天线最低固有频率约束, 结构动力特性是星载展开天线设计中的重要指标, 通过优化设计可使天线固有频率远离激励 (卫星姿态调整或变轨等) 频率, 从而避免谐振现象发生, 抑制或减少振动, 提高结构动力性能.

4　优化模型的求解

对优化模型的分析可知，求解该优化模型存在许多困难. 首先，模型呈现出高度非线性特点，而且优化设计变量的类型复杂，既包括周边桁架单元的截面积，又包括拉索预应力，两类变量在量纲、量级以及性质上都存在较大的差异；其次，求解规模大，由于结构的特殊性 (几何非线性)，使得天线结构的有限元分析必须包括“找形”和力学分析两个步骤，增加了求解难度与费用. 还有就是约束条件复杂，即包括静力约束，又包括动力约束. 因此，若采用传统优化方法进行求解显得比较困难. 通过分析比较，本文在计算中选择了遗传算法，获取了比较满意的优化结果.

遗传算法 (Genetic Algorithms, GA) 是由 Holland 教授于 1975 年受生物进化论的启发而提出的. GA 是基于适者生存原理的一种高度并行、随机和自适应的优化算法，这种算法不是直接处理优化中各设计变量，而是将各设计变量通过编码转换成遗传空间中由基因个体排列组成的染色体后进行进化操作，这就使其能够不受函数约束条件 (连续性、可导性等) 的限制，从而获得问题的最优解或满意解.

首先，为消除两类变量在量级上的差异，特引入两组 $[0,1]$ 之间的连续设计参数.

(1) 单元截面积设计参数 α_i

$$\alpha_i = \frac{A_i - A_i^{\mathrm{L}}}{A_i^{\mathrm{U}} - A_i^{\mathrm{L}}}, \qquad i = 1, 2, \cdots, N. \tag{15}$$

其中，A_i 为第 i 个单元截面设计变量值；A_i^{U} 和 A_i^{L} 分别为单元 i 的截面设计变量上、下限值；N 为天线周边桁架截面设计变量的总数.

(2) 拉索预张力设计参数 β_j

$$\beta_j = \frac{H_j - H_j^{\mathrm{L}}}{H_j^{\mathrm{U}} - H_j^{\mathrm{L}}}, \qquad j = 1, 2, \cdots, M. \tag{16}$$

其中，H_j 为第 j 个索张力设计变量值；H_j^{U} 和 H_j^{L} 分别为 H_j 的上、下限；M 为结构索单元预张力设计变量总数.

其次，由于两类优化设计变量性质不同，它们对结构性能的影响存在比较大的差别，因此，为避免两类变量在遗传操作，特别是在交叉操作过程中的相互干扰，提高优化计算效率，本文采用了多层二进制编码的方法，即将不同类型变量在不同层面上分别进行编码处理. 与此相对应，交叉操采用了分层多点交叉的方法. 即根据各类设计变量编码层次的不同，分别在不同层次上进行多点交叉操作，以减少类型不同变量之间的相互影响.

5　算例分析

某周边桁架式可展开天线结构设计参数如下：天线口径 17 m，反射面高为 1.3894 m，反射网面由 48 组曲面拉索组成. 周边桁架材料为碳纤维，杆截面全部为圆管，弹性模量为 $3.2 \times 10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$，密度为 $1.8 \times 10^3\ \mathrm{kg/m^3}$，前 4 类杆壁厚为 0.001 m，而后两类杆壁厚为 0.0005 m. 中间拉索采用芳纶纤维材料，截面为圆，弹性模量为 $1.3 \times 10^{11}\ \mathrm{N/m^2}$，半径为

0.001 m, 密度为 1.44×10^3 kg/m^3. 另外中心体同样采用碳纤维制造. 按照设计要求, 天线反射面精度为 0.0035 m, 天线的最低固有频率不小于 0.7 Hz.

由设计条件可知, 截面设计变量中各单元壁厚已知, 因此在优化过程中, 本文将单元外半径作为截面尺寸设计变量, 通过对外半径尺寸的优化来达到对单元截面积的优化. 根据上述要求建立以天线结构质量最小为目标, 以天线结构最低固有频率、反射面精度、各单元强度要求为约束条件的优化数学模型, 并且根据该模型进行优化计算, 其优化迭代过程如图 5 所示. 由图可见, 优化目标在逐渐下降, 周边桁架重量由最初的 87.87 kg 降低到最后的 16.97 kg, 而且该结果也远远小于设计规定值 34 kg. 此时, 周边桁架六类单元外半径 (单位: m) 分别为 (0.0037, 0.0049, 0.002, 0.0031, 0.0031, 0.015), 而拉索单元的最大应力为 308.59 MPa, 远低于芳纶纤维材料的强度约束 2760 MPa. 另外, 优化过程的约束函数的变化过程分别如图 6 和图 7 所示, 由图可见, 虽然起始设计点不满足约束条件, 但通过优化很快就能够将其引入可行域, 最终天线反射面的精度稳定在 0.001 86 m, 天线基频稳定在 0.708 Hz; 由此可见, 展开天线结构优化设计对降低结构质量, 提高设计是完全可行的, 也是有效的.

同样, 为提高展开天线的最低固有频率, 现以天线结构基频最大为优化目标, 以天线结构质量、反射面精度、各单元强度要求为约束条件重新建立优化模型, 同样利用遗传算法对该模型进行优化计算, 其优化迭代过程如图 8 所示. 结构基频 (优化目标) 随着优化迭代的进行逐渐增大, 虽然初始设计点由于不满足约束条件, 按优化规则其频率设定为零, 但是通过优化算法, 很快就出现了可行解, 并且最后天线最低固有频率接近于 1.0 Hz, 高于设计规定的 0.7 Hz. 此时, 周边桁架 6 类单元外半径 (单位: m) 分别为 (0.003 742, 0.018 258, 0.002, 0.005 484, 0.003 742, 0.005 484), 而预张力设计变量则接近其上限值 2000 N. 天线反射面精度与结构质量的变化过程分别如图 9 和图 10 所示, 在优化过程中, 反射面精度基本在 0.002 m 周围作微幅调整, 而结构质量则在 30 kg 附近变化. 另外, 通过对优化数据的分析可知, 结构最低固有频率具有随水平预应力增大而呈非线性增加的趋势.

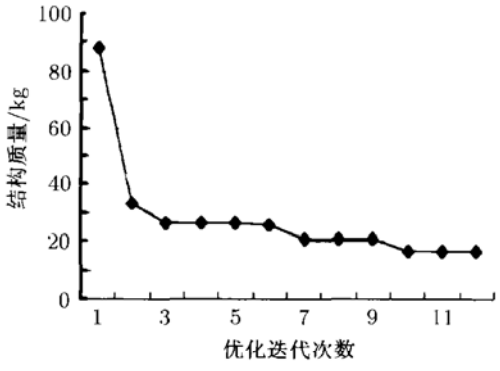

图 5 优化目标的变化过程图
Fig.5 The graph of optimum objection

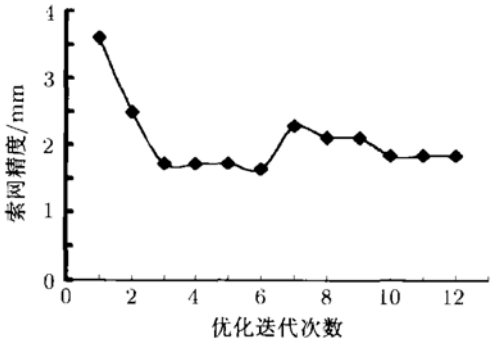

图 6 索网精度的变化过程图
Fig.6 The graph of precision

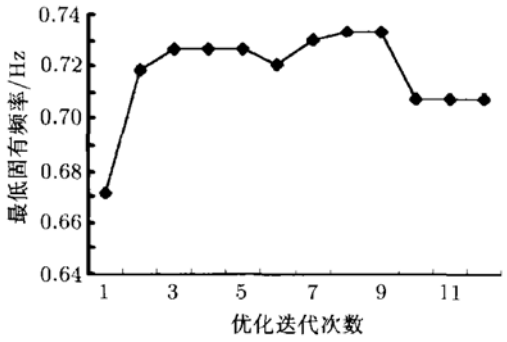

图 7　天线基频变化过程图
Fig.7　The graph of eigenfrequency

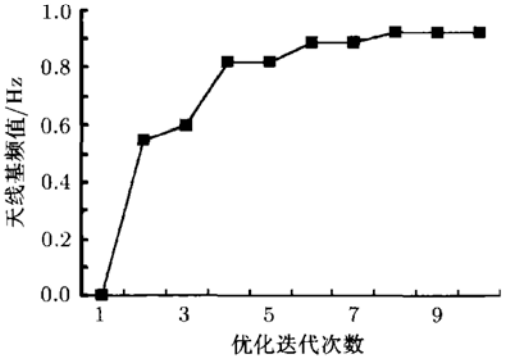

图 8　优化目标 (基频) 的变化过程图
Fig.8　The graph of optimum eigenfrequency

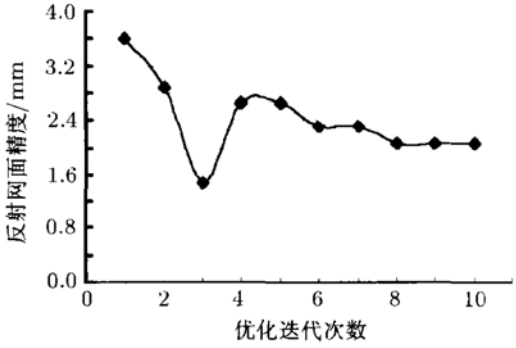

图 9　反射面精度变化过程图
Fig.9　The graph of precision

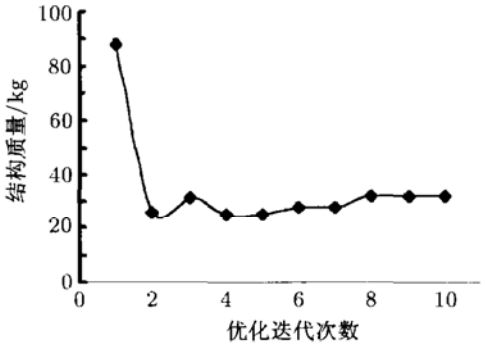

图 10　结构重量变化过程图
Fig.10　The graph of weight

5　结束语

本文根据周边桁架式可展开天线的结构特点，建立了展开天线的动力优化数学模型，并且针对具体的算例进行了优化设计，通过对数据结果的分析比较可得到以下几点体会.

首先，拉索张力与周边构架单元截面积是影响结构特性的可变参数，但对天线反射面精度起主要作用的还是拉索张力，本文对拉索张力变量以及单元截面积变量的选择与归并处理只是作者个人的意见，今后还应该进一步探讨更为合理的变量归并方法和途径. 其次，展开天线结构刚度的大小 (固有频率的高低) 直接影响到对天线结构的控制特性. 刚度要求越高就要求拉索预应力越大，而这又必然导致对天线展开驱动力的更高要求. 显然，这是一对矛盾，作者认为要解决该问题，可能还需要从对结构本身的修改上想办法.

另外，本文只涉及空间展开天线的展开工作状态，而对其收拢状态同样应该具有频率与强度等要求，如何使天线展开与收拢状态同时反映在同一个优化模型中，则是需要继续深入研究的课题.

参　考　文　献

[1] Chen W, Au D K. Determination of initial cable forces in prestressed concretecable-stayed bridges for given design deck profiles using the force equilibriumm method. *Comp. Struc.*, 2000, **74**:1—9

[2] Kwan A S K. A new approach to geometric nonlinearity of cable structures. *Comp. Struc.*, 1998, **67**:243—252

[3] Sadek E A. Dynamic optimization of framed structures with variable layout. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 1986, **23**: 1273—1294

[4] Grandhi R. Structural optimization with frequency constraints a review. *AIAA*, 1993, **31**(12):2296—2303

[5] Shi Lianshuan, Sun Huanchun, Feng Enmin. A design method for shape optimization of structures with discrete variables under dynamic stress and displacement constraints. *Chin. J. Comp. Mech.*, 2001, **18**(2):419—423. in Chinese (石连拴, 孙焕纯, 冯恩民. 具有动应力和动位移约束的离散变量结构形状优化设计方法. 计算力学学报, 2001, **18**(4):419—423)

[6] Luo Ying, Duan Baoyan. Layout optimization of large flexible deployed antenna. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(2):132—137. in Chinese (罗鹰, 段宝岩. 周边桁架式展开天线几何布局优化. 空间科学学报, 2004, **24**(2):132—137)

THE DYNAMIC OPTIMUM DESIGN OF LARGE DEPLOYED ANTENNA FOR SATELLITE

LUO Ying DUAN Baoyan YANG Dongwu DI Jiejian

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xian 710071)

Abstract

The deployable antenna has been applied widely with development of space science and technology. Recently, the cable net structure becomes more and more popularized for it is not only with light weight and little furl volume, but also able to be made in large size. Considering the flexible cable net deployable antenna, the structural characteristics of the large deployed antenna for satellite have been discussed. And an optimum design model searching for minimum weight (volume), considering both the size variables and prestress variables is studied. The reflect precision, eigenfrequency, strength and cable's allowable stress is taken into account in the optimal design. The improved GA method is used to solve it with reasonable results.

Key words Deployed antenna, Dynamic optimum, Flexible mesh, Prestress, Genetic Algorithms