

文章编号 :1000-4939(2005)04-0606-04

星载张力索网天线结构混合变量的多目标优化*

狄杰建 段宝岩 仇原鹰 罗 鹰

(西安电子科技大学 西安 710071)

摘要 以纵向拉索调整力大小和可调整的纵向拉索数目为设计变量 , 可调整的纵向拉索数目最少和网状反射面的均方根误差最小为目标函数 , 应力和频率为约束条件 建立了大型空间网状可展开天线的形面调整的多目标优化数学模型 , 并用遗传算法进行了优化求解。优化结果表明 : 该方法在提高天线表面精度的同时 , 能有效地减少可调整的纵向拉索数目 , 降低了工程人员在网面调整中的繁杂劳动。并且 , 网面调整的总次数也远少于实际工程中的调整 , 对工程应用具有一定的指导意义。

关键词 可展开天线 均方根误差 遗传算法 形面调整

中图分类号 :V443.4 文献标识码 : A

1 引言

随着航空航天技术的发展 , 太空天线要求口径大、频率高、质量轻。然而 , 由于发射装置的限制 , 必须让其做成可展式。目前 , 可展类型较为繁多^[1] , 其中周边式桁架可展开天线 (见图 1) 由于质量轻、收缩比大而成为各国竞相研究的热点。众所周知 , 天线的表面精度决定天线的工作性能^[2,3] , 但此类结构的反射面主要有悬索系统组成 , 是典型的几何非线性结构 , 使得天线的网面调整复杂化。国内 , 工程中天线网面的调整大多数依靠工程人员的工程经验 , 采取尝试法不断地进行测量调试 , 再测量再调试的数以百次地反复进行 , 其间也带有一定的盲目性 , 调整工作较繁杂。因而 , 如何有效地提高天线的表面精度 , 降低工程人员的繁杂劳动 , 是工程人员所关心的问题。显然 , 在保证天线精度良好的条件下 , 尽量减少每次调整中可调整的纵向拉索数目是一条行之有效的方法。这是一个同时含离散变量、连续变量的多目标优化问题 ; 另外 , 悬索系统的几何非线性使得分析变得更为困难 , 传统的梯度法已难以胜任。

而遗传算法^[4] (GA) 是一种随机搜索方法 , 它对搜索空间没有特殊的要求 , 目标函数无论可微不可微 , 显式、隐式均可进行计算。它同时搜索的是解空间的中的一群点 , 并构成不断进化的群体序列 , 具有较大可能获得全局最优解 , 具有隐含并行性 , 搜索效率高的特点 , 尤其是在处理混合变量优化问题^[5~7] 方面 , 方法的优越性更为明显。本文采用 GA 算法结合 Ansys 有限元分析软件 , 对网面纵向拉索的调整力和调整数目进行了优化 , 取得了良好的效果 , 对工程应用具有一定的指导意义。

2 天线结构特点

图 1 所示周边桁架式可展开天线属于张拉整体组合结构。由周边桁架、反射面悬索系统以及中心体组成。每个索网辐射单元均由上弦拉索、下弦拉索、 16 条纵向拉索组成。上弦拉索的一端固定在中央圆筒上部 , 另一端固定在周边构架单元的上斜杆顶端。下弦拉索的一端固定在中央圆筒略下一点位置 , 另一端固定在周边构架单元的下斜杆顶端。依靠纵向调整索可以将上弦拉索调整到所需曲率。因

* 基金项目: 总装备部资助预研项目 (41321070301) 来稿日期 2004-02-20 修回日期 2004-07-12

第一作者简介: 狄杰建 , 男 , 1974 年生 , 西安电子科技大学机电工程学院博士生 , 研究方向 : 结构优化 , 参数化造型。

此,调整每一组索网辐射单元的纵向调整索,可以使上弦索系达到所需的位置,从而可以保证整个上弦索系形成所需的反射面。由于天线反射面为悬索结构,是一种典型的几何非线性结构,其单元应变和位移之间不存在一般的线性关系^[8],正是这种非线性变位特性使得结构分析变得较为复杂,一般包括找形和力学分析两个阶段。找形阶段的分析采用文献[9]的方法。

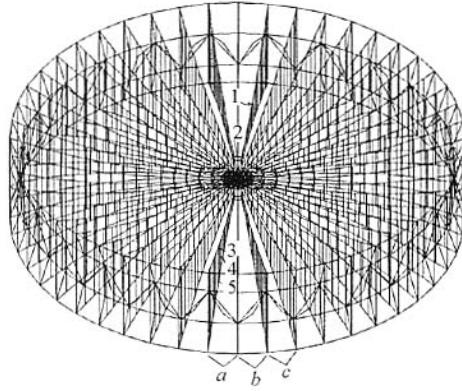


图1 周边式桁架可展开天线总体结构图(去除了反射网)

3 优化数学模型的建立

$$\text{Find } X = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_N \ N)^T,$$

$$\text{Min } f_1(X) = N \quad (1)$$

$$f_2(X) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \Delta u_i^2 + \sum_{i=1}^m \Delta v_i^2 + \sum_{i=1}^m \Delta w_i^2}{m}} \quad (2)$$

$$\text{s. t. } \frac{\sigma_e}{[\sigma]_a} - 1 \leq 0 \quad (e = 1, 2, \dots, p) \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\omega}_a^d}{\bar{\omega}_{\min}^d} - 1 \leq 0 \quad (4)$$

$$x_j \in [x_j^l \ x_j^u], \quad (j = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (5)$$

$$N \in (1, 2, 3, \dots, n) \quad (6)$$

1) 设计变量

x_i —调节索的调节力

N —调节索的数目(整型变量)

2) 目标函数

$f_1(X)$ —可调节的纵向拉索的总数作为其中一个目标函数。在提高天线表面精度的同时,尽量满足可调整纵向拉索数最少。

$f_2(X)$ —表面均方根误差作为第二个目标

函数。因为天线的表面精度决定它的工作性能,表面均方根误差(RMS)较好地反映与理想抛物面的偏差情况^[10]。因此,把被调整模型反射面和参考模型反射面之间的节点位移偏差作为目标函数。

$\Delta u_i \ \Delta v_i \ \Delta w_i$ 分别代表被调整模型反射面上第*i*个采样节点与参考模型反射面对应节点的X、Y、Z向坐标差,*m*代表采样节点数。

3) 约束条件

式(3)表示各绳索单元不能松弛,同时工作应力不超过许用应力。 σ_e 表示绳索单元应力, $[\sigma]_a$ 表示绳索单元许用应力,*p*表示总绳索单元数;式(4)表示天线在展开状态下的基频约束。结构的频率特性是星载展开天线重要指标,在调整中使基频远离外界激励频率,避免共振现象发生,减少振动,提高结构的动力性能。 $\bar{\omega}_{\min}^d$ 为展开状态下天线结构的基频, $\bar{\omega}_a^d$ 为天线设计规定的基频值,式(5)表示调节力设计变量的允许值。 $x_j^u \ x_j^l$ 分别为第*j*根调节索调节力的上下限值。

4 算例分析

本文以周边式桁架可展开天线的单片辐射单元为例进行说明。图2为其有限元模型,共有36个节点,16个用于调整的纵向拉索。要求通过调整纵向拉索,使得上弦拉索能接近理想抛物线,要求天线表面均方根误差低于3.50mm,基频大于0.7Hz。绳索材料全部是芳纶材料,索的半径*r*= 1×10^{-3} m,弹性模量*E*= 1.3×10^{11} N/m²,质量密度*ρ*= 1.44×10^3 kg/m³。两端四节点无*x*、*y*、*z*方向的位移。

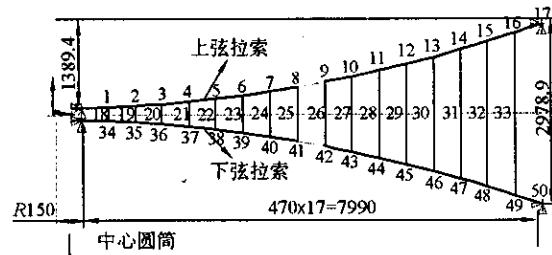


图2 悬索辐射单元

4.1 变量的二进制表示

$$S_1 = 1\bar{---}1\bar{---}011001$$

$$\bar{A} \quad \bar{B} \quad \bar{C}$$

A部分表示是否可调,“1”表示该绳索可调,“0”表示不可调。B部分表示可调纵向拉索状态,

“1”表示此纵向拉索缩短，“0”表示此竖向拉索放长。C 部分表示数值的大小，ABC 三部分确定了纵向调整拉索调整力设计变量。A 部分是“1”的总个数就是纵向可调整拉索的数目。而连续变量部分采用 $2^{l_i} \geq \frac{x_i^u - x_i^l}{\varepsilon_i} + 1$ 确定染色体长度 l_i 。其中 x_i^u 、 x_i^l 是第 i 个连续设计变量 x_i 的上下限值， ε_i 为第 i 个变量的精度要求。

4.2 目标函数的处理

因为调整索数 f_1 与表面均方根误差 f_2 是两个不同的目标函数，存在量纲与量级上的差别，这可能导致迭代收敛的困难。为此，首先将目标函数 f_i 作如下归一化处理。

$$\bar{f}_i = \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad i = 1, 2$$

然后采用加权系数法将双目标化为单目标进行求解。

$$f(X) = w_1 \bar{f}_1 + w_2 \bar{f}_2$$

其中 $w_1 \geq 0$ ， $w_2 \geq 0$ 且 $w_1 + w_2 = 1$ 。

4.3 约束函数的处理

利用 GA 方法求解优化问题时通常有两种处理约束函数的方法：一种是作为惩罚项附加到目标函数，但惩罚系数的选择较为困难；另一种方法就是把产生的设计变量代入约束方程中去检验，如果违背约束，则返回重新选择设计。本文采用第二种方法，即把应力和频率约束作为校核条件。尽管这种方法在计算上比较耗时，但随着计算机运算能力和运算速度的提高，这已不再是问题了。

为探寻不同系数对各目标的影响趋势，初步选取 $w_1 = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 五种情况。本文把用优化迭代所获得的最优解或者满意解来指导网面调整的进行称之为一次调整。图 3 表示对天线进行一次网面调整前优化迭代（a）表示上述五种情况下天线表面误差变化情况。

从图 3(a) 中可以看出 $w_1 = 0$ 时，天线表面误差下降速率最快，且相应地可调整拉索数也并不多（见图 3(b)）。鉴于考虑到网面调整的效率，我们在后续的优化调整数值模拟中选用 $w_1 = 0$ 的情况。从图 3(b) 中可以看出，在前 30 次迭代过程中，天线表面误差下降速率很快，后面的迭代过程中，天线表面误差下降不是很明显。为便于计算，本文拟每优化迭代 50 次后用优化索的最优解或满意解指导相应的网面调整。然后以调整后的模型为下一次优化的对象。

图 4 为天线的表面精度和可调整纵向拉索数目

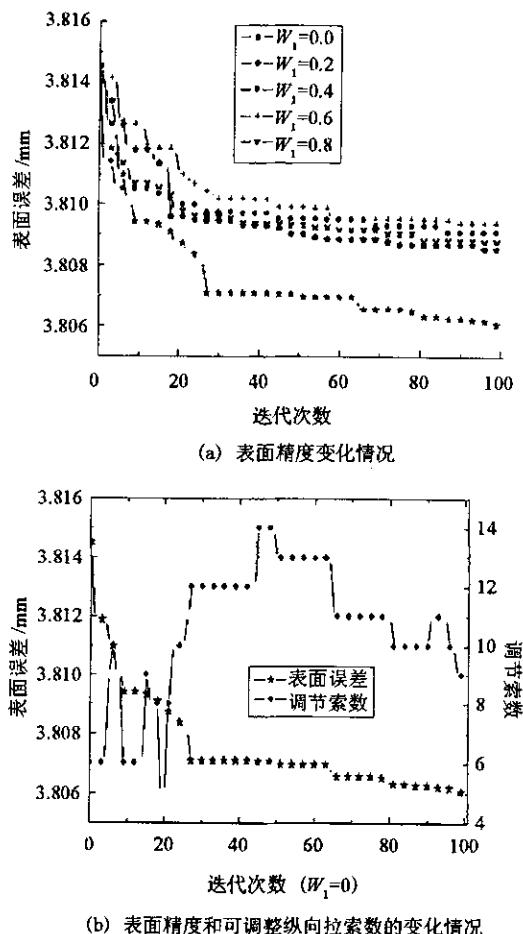


图 3 一次网面调整前的优化迭代

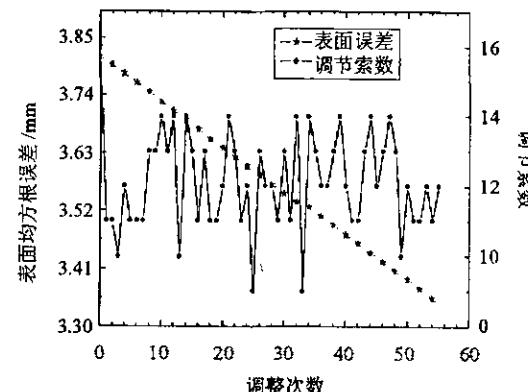


图 4 表面精度和可调整绳索数目随网面调整次数的变化情况

随着网面调整次数的变化情况。从图 4 中可以看出，经过 37 次调整后，天线的表面精度提高为 3.50mm，满足了所需的精度要求。实际工程中，即使小口径的天线的调整也要数以百次的进行。可见，该方法在提高天线表面精度的同时，不仅降低了每次网面调整中可调整纵向拉索的数目。而且，网面调整的总次数相对较少即可达到精度要求，降低了调整周期，提高了调整效率。

由于数据太多,本文以其中一根纵向拉索为例来进行说明。图5为从中央圆筒起第五根纵向拉索(见图2)的调整力变化情况。短矩形框表示调整力的改变量,长矩形框表示经调整平衡后纵向拉索中张力的大小。工程中调整的实现,可以根据材料力学把力转化为相应的绳索长度的变化来指导网面的调整。图6给出了第五根纵向拉索在各次网面调整过程中相应地的原长和变形后的长度。

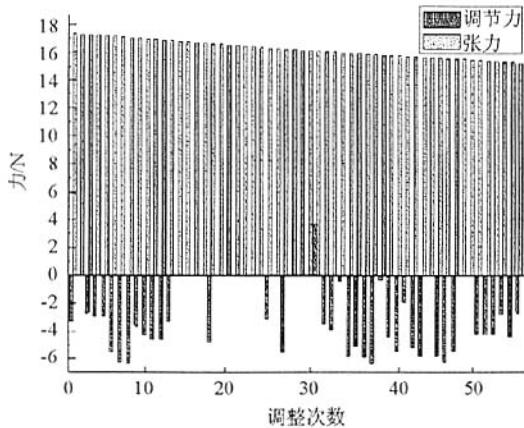


图5 第5根纵向拉索调整力的变化情况

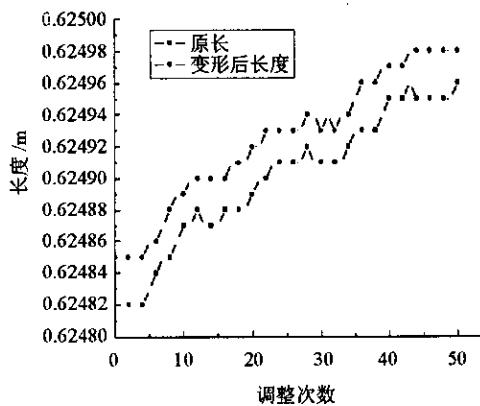


图6 第5根纵向拉索原长和变形后的长度

从图6中可以看出,该纵向拉索在调整中多次没有进行调整,对应于图5中的调整力为0。在网面

调整的整个过程中,该纵向拉索的原长和变形后的长度都是在变长的,说明该纵向拉索在网面调整中不断放松的。

5 结束语

本文利用遗传算法,将含有离散变量、连续变量的多目标优化问题转化为单目标进行了优化求解,理论上在提高网状可展开天线的表面精度的同时,能有效地减少了可调整纵向拉索数目,对实际工程中天线的网面调整具有一定的指导意义,减少了工程中调整测量、再调整再测量的繁杂过程。但实用性还有待于进一步试验确认。

参 考 文 献

- 1 刘明治,高桂芳.空间可展开天线研究进展[J].宇航学报,2003,24(1):82~87
- 2 Mitsugi J , Yasaka T , Miura K . Shape control of the tension truss antenna[J]. AIAA Journal ,1990 28(2) :316 ~ 322
- 3 Miura K , Miyazaki Y . Concept of the tension truss antenna[J]. AIAA Journal ,1990 28(6) :1098 ~ 1104
- 4 周明 孙树栋著.遗传算法原理及其应用[M].北京:国防工业出版社 2002
- 5 Hajela P . Genetic search —an approach to the nonconvex optimization problem[J]. AIAA Journal ,1990 28(7) :1205 ~ 1210
- 6 Lin C Y ,Hajela P . Genetic algorithms in optimization problems with discrete and integer designvariables[J]. Eng Opt ,1992 ,(19) :309 ~ 327
- 7 Wu S , Chow P . Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithm[J]. computers and structures ,1995 ,55(4) :695 ~ 702
- 8 王勣成 邵敏.有限单元法基本原理和数值算法[M].北京:清华大学出版社 2002
- 9 黄小玲.星载改进型网状可展开天线结构的分析与优化[D].西安:西安电子科技大学 2003
- 10 Fichter W B. Reduction of root mean square errors in faceted space antennas[J]. AIAA Journal ,1984 22(11) :1679 ~ 1684

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>