

反射面型天线结构多工况离散变量优化设计

李孝全 王 莉

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 根据反射面型天线结构受载和工作状态的复杂性, 以及总有一些变量只能按离散变量处理, 建立了符合工程结构的反射面型天线结构多工况离散变量优化设计数学模型, 编制了一套具有一定通用性及工程实用价值的优化设计软件, 并用其对八米反射面型天线进行了优化计算, 取得了比较满意的效果。

关键词: 反射面型天线; 多工况; 混合离散变量; 结构优化设计

中图分类号: V414.19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2001)02-0056-05

REFLECTIVE ANTENNA STRUCTURE'S DISCRETE VARIABLES OPTIMUM DESIGN UNDER MULTIPLE LOADING CONDITIONS

Li Xiaoquan Wang Li

(Missile Institute of Air Force Engineering University, Shaanxi sanyuan 713800)

Abstract: A mathematical model of discrete variables under multiple loading conditions, which is more applicable to practical engineering, is set up by this essay, in accordance with the complexity of reflective antenna structure carried and of working status. A set of optimum software, which is universal and of some practical value, is also put forth by this essay. The optimum computation about eight-meter reflective antenna shows that the results are satisfactory.

Key words: Reflective antenna; Multiple loading condition; Mixed discrete variables; Structure optimum design

1 引言

近年来, 随着结构优化理论研究的深入, 反射面型天线结构优化设计取得了较大的进展。首先是对其在单工况下进行了从连续变量到离散变量的研究, 研究层次从尺寸、形状优

收稿日期: 2000-01-12, 修回日期: 2000-11-08

作者简介: 李孝全, 男, 1968 年 12 月生, 讲师, 获机械制造及其自动化专业工学硕士学位, 现从事电力工程及其自动化专业教学工作

化到拓扑优化,甚至发展了拓扑、形状与机电综合等优化设计方法。后来考虑到反射面型天线结构可以实现方位—俯仰运动,其在正常工作时又受多种荷载作用,而且工作姿态是多种多样的,文献[1]在连续变量优化的基础上又研究了多工况优化设计方法,使得优化模型更加合理。然而,由于总有一些变量只能按离散变量处理^[2],所以优化结果在实际工程中却无法使用。但是对于反射面型天线结构多工况离散变量的优化设计,目前尚未查阅到有关文献资料,为了适应工程上的需要,从能够解决实际问题出发,本文较全面地模拟其在自重、风荷等多种荷载作用多工况下的响应,提出适合工程应用的优化设计方法,进行反射面型天线结构的优化设计,目的是将合理的、完善的优化模型与先进的优化方法结合起来,使通过先进的优化技术设计出的反射面型天线更加经济、可靠。

2 数学模型的建立

建立优化设计的数学模型,首先要考虑三个方面的问题,即选取设计变量、列出目标函数、给出约束条件^[2]。

2.1 设计变量

本文优化对象是较复杂的反射面型天线结构,故设计变量选为易于处理的线性元—杆元的横截面积和膜元的厚度。

2.2 目标函数

为在满足反射面型天线电气性能的前提下,最大限度地降低反射面型天线的制造成本,本文选重量作为目标函数。在列写目标函数的时候需要注意将设计变量归类,以简化目标函数,减轻求解问题的难度。

2.3 约束函数

反射面型天线结构多工况离散变量优化设计是在满足各工况下多种性态约束基础上的优化设计,可以转化为一种多约束问题。本文选精度要求作为主要约束,同时考虑强度和稳定性约束。由于是研究多工况离散变量的优化设计,当然还不能忽视离散性约束和多工况问题,最后还需考虑尺寸约束。

综合考虑以上三个问题可列出如下数学模型^[3]:

$$\text{求 } X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T = (A_1, A_2, \dots, A_{n_1}, T_1, T_2, \dots, T_{n_2})^T$$

$$\text{使得 } \min W = W_0 + \sum_{i=1}^{n_1} A_i L_i + \sum_{j=1}^{n_2} T_j S_j$$

$$s.t. \begin{cases} \delta_l \leq [\delta] & i = 1, 2, \dots, n_1 \\ [\sigma_i]^- \leq \sigma_{il} \leq [\sigma_i]^+ & l = 1, 2, \dots, p \\ \sigma_{jl} \leq [\sigma_j] & j = 1, 2, \dots, n_2 \\ A_i^L \leq A_i \leq A_i^H & n = n_1 + n_2 \\ T_j^L \leq T_j \leq T_j^H \end{cases} \begin{array}{l} \text{杆元设计变量数} \\ \text{工况数} \\ \text{膜元设计变量数} \\ \text{设计变量数} \end{array} \quad (1)$$

$$X \in D = \{\text{实际工程中可供选择的型材范围的集合}\}$$

在目标函数中, W_0 为被动构件重量, W 为目标函数(重量); $L_i = \sum_{e=1}^{G_i} l_e \rho_e$ ($i = 1, 2, \dots,$

n_1), $S_j = \sum_{e=1}^{B_j} s_e \rho_e$ ($j = 1, 2, \dots, n_2$)。 G_i 为第 i 个设计变量所包含的杆元数; B_j 为第 j 个设计变量所包含的膜元数; l_e 为第 e 个杆元的长度; s_e 为第 e 个膜元的面积; ρ_e 为第 e 个杆元或膜元的密度。

在约束函数中, δ_l 为第 l 工况下反射面相对于原设计抛物面沿轴向位移的均方根值; $[\delta]$ 为反射面型天线结构表面结点轴向均方根精度的容许值; σ_{il} 为第 l 工况下第 i 个杆的应力值; $[\sigma_i]^+$ 和 $[\sigma_i]$ 为第 i 个杆的许用拉应力和许用压应力; $[\sigma_j]$ 为第 j 个膜的许用应力; σ_{jl} 为第 l 工况下第 j 个膜的应力值; A_i^L 和 A_i^H 为第 i 个杆截面的下限值和上限值; T_j^L 和 T_j^H 为第 j 个膜厚度的下限值和上限值。

3 需要注意的问题

3.1 荷载分析

由(1)式可以看出, 约束函数是设计变量的高度非线性隐函数, 通常用结构分析的有限元法得到, 这就需要进行荷载分析。

3.1.1 自重荷载的处理

自重荷载的基本形式是反射面型天线朝天与指平时两种, 在任意仰角 α , 反射面型天线自重可分解为 $P_1 = P \sin \alpha$ 和 $P_2 = P \cos \alpha$, 由自重引起的位移可由下述两部分迭加而得:

$$\delta_{zz} = \delta_{ci} \sin \alpha + \delta_{zp} \cos \alpha \quad (2)$$

3.1.2 风荷的处理

同自重荷载处理的方式一样, 从任何方向吹来的斜吹风引起的位移 δ_f 可以由正向 1 米/秒风力引起的位移 δ_{zf} 和侧向 1 米/秒风力引起的位移 δ_{cf} 合成^[4], 即

$$\delta_f = \delta_{zf} V^2 \cos \theta + \delta_{cf} V^2 \sin \theta \quad (3)$$

式中 V 为风速, θ 为斜吹风方位角, 风力荷载及位移与风速平方成正比。

通过以上分析可以看出, 只要将朝天自重、指平自重、风正吹、风侧吹作为四种单项荷载, 分别计算出单项荷载作用下主力骨架结点的位移, 然后再在不同仰角下进行合成, 即可得到各结点的合成位移如下:

$$\delta = \delta_{ci} \sin \alpha + \delta_{zp} \cos \alpha + \delta_{zf} V^2 \cos \theta + \delta_{cf} V^2 \sin \theta \quad (4)$$

3.2 多工况的处理

反射面型天线结构多工况状态是由于反射面型天线可位于 0 度~90 度任意仰角状态所致, 从理论上说, 在包括自重、风荷等各种荷载作用下, 寻求一组设计变量, 使反射面型天线结构对于任意状态都是最优的, 这是根本不可能的。但若只考虑一种状态求出的结果显然不一定是最优的, 对于另一种状态, 它可能是不可行解。所以, 对于多工况, 可以这样处理: 考虑到某个反射面型天线其工作状态毕竟是有限的, 所以优化设计的目标是使反射面型天线结构在尽可能多的工作状态下满足各种约束, 并且结构重量最轻。但如果选的状态太多, 势必引起约束个数猛增, 导致计算量过大。综合考虑各种因数, 本文选取 0 度~90 度之间每隔 15 度的七种典型状态即七种工况作为计算的姿态, 这样既可适当减少计算量, 也比较符合工程实际。万方数据

另外还需要考虑一个问题, 就是由于保精度风速较低而保强度风速较高, 但不排除某个

应力或稳定性约束在保精度风速下达到临界。如果这样,那么只要实际风速大于保精度风速,那个临界约束就不满足了,因而强度或稳定性条件就得不到满足。显然,这样的优化结果是不可行的。本文采用一种方法可以较好地解决这一问题,即对精度约束采用保精度风速,对应力和稳定性约束采用保强度风速,但精度约束和应力、稳定性约束的姿态是一样的。

4 程序及算例

4.1 算法及程序

根据式(1)这一数学模型的特点,本文选择一种改进的复合形法—离散复合形法进行优化。这种方法比连续变量复合形法要优越得多,它既能求解离散变量问题,也能求解连续变量问题,甚至可以求解二者均有的混合离散变量问题。详细内容可参见文献[5]。

建立了数学模型且选择了优化方法,本文用 Fortran 语言编制了相应的反射面型天线结构多工况离散变量优化设计软件。该软件约 2800 条语句,由 1 个主程序和 50 个子程序组成。子程序部分包括 3 个用户自编的目标函数和约束函数子模块。其流程框图如图 1 所示。

4.2 算例

为了考核该软件,本文先对常用的 10 杆平面桁架和 25 杆空间桁架问题进行了计算,结果表明本优化方法适合一般结构的优化设计问题。那么它是否适用于反射面型天线结构呢?我们可以通过以下两个例子来检验一下。

例 1:八米反射面型天线背架结构

如图 2 所示为八米反射面型天线结构简图,根据对称性只取 1/4 部分进行计算。为减少设计变量将 97 根杆件分为 12 类,设计变量的具体数值从文献[6]中选取。计算结果见表 1,朝天优化结果略。

通过本例的计算结果可以看出,设计变量的取值与其它文献基本吻合,只是结构重量偏大(因为设计变量选取的值较少),精度比初始值提高了 10.5%,比连续变量多工况结果^[1]提高了 2.2%,比离散变量单工况结果^[4]下降了 1%,可见,本程序适合天线结构单工况情况。

例 2:八米反射面型天线结构

本文通过此例证明本程序适合反射面型天线结构多工况情况。本例与例 1 不同之处是考虑了面板刚度,并以 20m/s 作为保精度设计风速,以 50m/s 作为保强度设计风速,仰角与各工况的角度相同,风向角分别为 0,80,60,0,60,60,90。计算结果见表 2。

最优方案下各工况的精度分别为:0.029738,0.072930,0.064925,0.021035,0.061593,0.060380,0.068112,比连续变量多工况优化结果的精度值^[1]分别提高了 9.9%,8.8%,

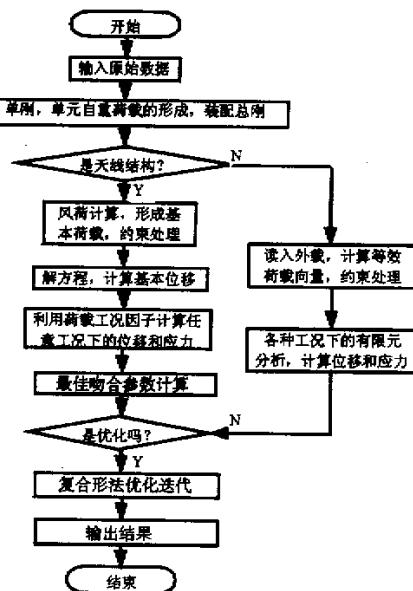


图 1 反射面型天线结构优化设计流程图

8.6%, 8.5%, 8.1%, 8.5%, 8.0%。通过本例结果可以看出,优化后设计变量变化趋势表明天线结构由外环到内环截面呈递增关系,这一点与实际情况是相吻合的。

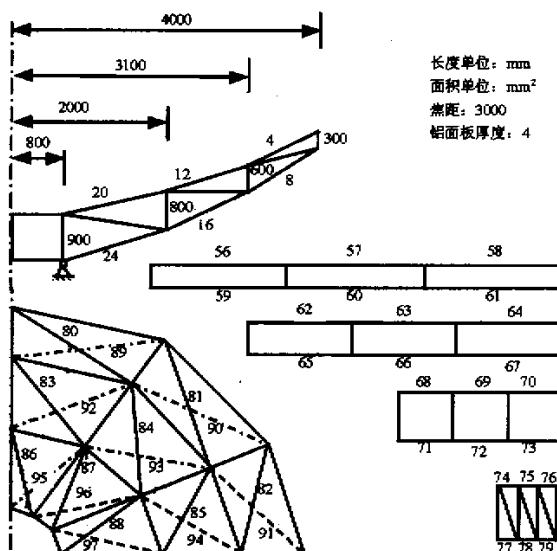


图 2 八米反射面型天线 1/4 结构简图

表 1 八米反射面型天线背架指平工况优化结果

变量	杆件截面积(cm^2)				
	初始	文献[1]	文献[7]	文献[8]	本文
A_1	1.5	0.1080	0.195	0.357	0.2208
A_2	2.0	0.20055	0.137	0.972	0.4012
A_3	3.0	0.62495	0.586	1.330	3.464
A_4	1.0	0.10	0.108	0.238	0.2208
A_5	1.5	0.19411	0.389	0.357	0.2208
A_6	1.5	0.43993	0.285	0.384	0.5543
A_7	3.0	2.7742	3.375	2.008	2.806
A_8	1.0	0.10664	0.111	0.278	0.2208
A_9	1.5	0.10	0.110	0.357	0.2208
A_{10}	2.0	0.10	0.114	0.475	0.2208
A_{11}	3.0	0.80303	0.776	0.709	0.866
A_{12}	1.0	0.12823	0.105	1.265	0.2208
重量	128.92	28.10	30.26	56.55	52.767

表 2 八米反射面型天线多工况优化结果

变量	杆件截面积(cm^2)		
	初始	文献[1]	本文
A_1	3.0	0.89048	1.048
A_2	4.0	1.1798	1.697
A_3	6.0	1.7918	1.949
A_4	2.0	0.59548	0.7015
A_5	3.0	0.88517	0.866
A_6	3.0	2.5598	2.806
A_7	6.0	4.5501	5.413
A_8	2.0	0.59266	0.7015
A_9	3.0	0.89198	1.048
A_{10}	4.0	1.1866	1.048
A_{11}	6.0	1.8423	1.949
A_{12}	2.0	0.59437	0.2208
重量	397.71	237.29	239.6153

由以上两个例子结果可以看出,本文所建立的数学模型及离散复合形法算法可以运用在反射面型天线结构多工况离散变量优化设计中,而且精度较高,这一研究成果使反射面型天线结构的优化设计从过去的理论研究走向了实际应用。

(下转第 78 页)

[参 考 文 献]

- [1] 张亚林.天线结构多工况优化设计[D].西安:西安电子科技大学硕士论文,1993
- [2] 王光远,陈树勋.工程结构系统软件设计理论及应用[M].北京:国防工业出版社,1996
- [3] 李孝全,王莉.天线形状优化模型的建立[J].电子机械工程,1999,5:15-18
- [4] 曾余庚.旋转抛物面天线风荷计算[J].西北电讯工程学院学报,1986,2:24-29
- [5] 陈立周等.工程离散变量优化设计方法——原理及应用[M].北京:机械工业出版社,1989
- [6] 陈榕林,陆同理.常用机械设计新旧标准对照手册[M].北京:中国建材工业出版社,1992
- [7] 薛向东.桁架结构离散变量优化设计[D].西安:西北电讯工程学院硕士论文,1986
- [8] 曾余庚,刘京中.天线结构几何优化设计[J].西北电讯工程学院学报,1985,3:18-23

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>