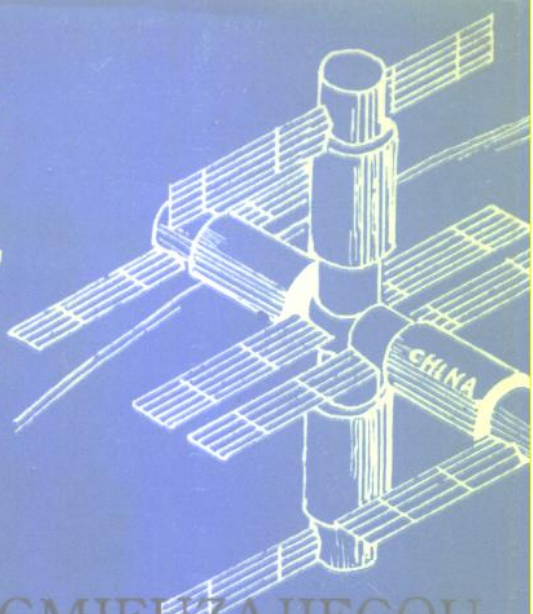
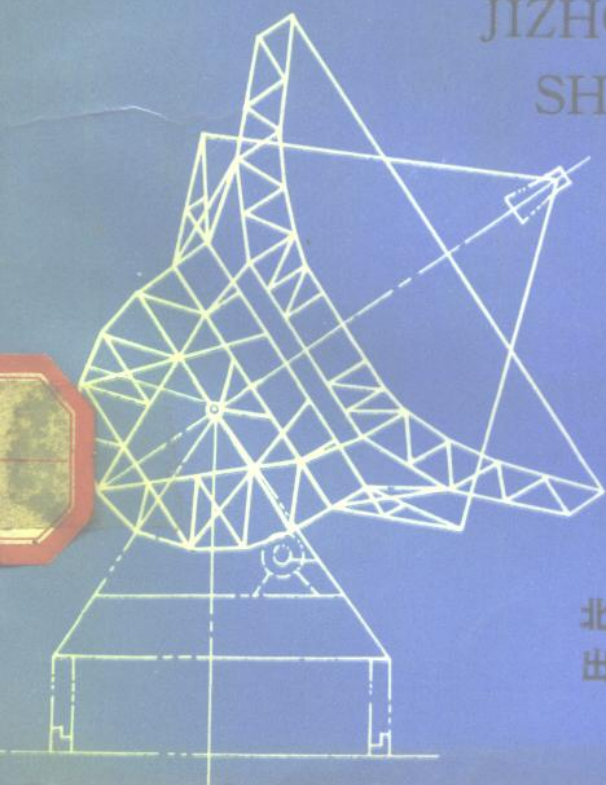


精密复杂结构的几种现代设计方法

陈树勋 著



JINGMIFUZAJIEGOU
DE
JIZHONGXIANDAI
SHEJIFANGFA



北京航空航天大学
出版社

精密复杂结构的 几种现代设计方法

陈树勋 著

北京航空航天大学出版社

(京) 新登字166号

内 容 简 介

本书从按预定位移关系设计结构出发,解决天线等精密结构的严格保型设计问题;给出严密推导的结构优化理性准则法——导重法,意义明确,算法简便可靠,普适性强,并可考虑设计变量变化引起的自重等载荷的变化;还给出了具有广泛应用背景的普遍型模糊规划的理论和解法,并将其应用于工程结构的多目标模糊优化设计;还对复杂结构电算中的一些难题进行了研究;如对常用的求解非线性方程组直接迭代步长因子法的收敛性,进行了探讨;并给出了大量算例和电算程序软件。本书内容丰富,学术价值高,工程实用性强。

本书可供电子机械、航空航天、建筑、力学等部门的工程技术人员参考,并可作为工科院校有关专业的研究生、高年级学生及教师的教学参考书。

精密复杂结构的几种现代设计方法

JINGMIFUZAJIEGOU DE JIZHONGXIANDAI-
SHEJIFANGFA

陈树勋 著

责任编辑 许传安

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售

北京密云华都印刷厂印刷

* * *

850×1168 1/32 印张:10.25 字数:275千字

1992年7月第一版 1992年7月第一次印刷 印数:2200册

ISBN 7-81012-318-1/TH·013 定价:6.80元

前 言

本书中精密结构指对变形有严格要求的工程结构。在航空航天、电子机械、天文物理等工程中存在着不少精密机械结构，例如在航空航天、卫星通讯、雷达技术及射电天文广泛采用的各种类型的反射面天线结构以及航空航天器结构、大型光学仪器结构等。这些结构为了实现其特殊功能对结构在外载及自重载荷作用下的变形有着很严格的要求，其结构设计与一般工程结构设计相比，既有共性又有较大难度，因而本书给出的设计理论和方法对一般工程结构设计无疑具有普遍适用的意义。

作者从1978年开始在我国天线结构专家叶尚辉教授的指导下，从事天线结构保型及优化设计的理论研究和工程应用工作，提出了特别适用于天线结构优化设计的结构优化导重法和严格保型设计的理论解法。1985年开始，作者又在我国著名结构力学专家王光远教授的指导下从事工程结构设计理论研究，从结构的按预定位移关系设计与自适应设计的角度，将天线结构保型设计提高到对精密结构设计普遍适用的高度，提出了更为符合实际的解法，为其工程应用作出了努力。同时作者还致力于全面考虑工程优化设计中各种模糊因素的结构多目标优化设计的理论与解法研究，并将其提出的普遍型模糊规划应用于天线等结构的多目标模糊优化设计。多年来作者还围绕天线结构的动静力分析、保型及优化设计计算作了许多有价值的研究工作，如深入研究了求解非线性方程组直接迭代步长因子法的收敛性，解决了具有不对称小齿轮约束的天线结构分析中对称性利用的难题，研制了大量富有实用价值的序列计算程序软件。使用这些程序对天线结构和其它一般结构，成功地进行大量的分析和保型优化设计计算。

作者发现，虽然有不少工程技术人员和院校师生在从事这方面的工程设计和教学科研工作，并取得了不少研究成果，但却缺

乏系统深入的参考书，故将以上研究成果有机地组织起来，辅以必要的专业基本知识和数学理论预备知识，形成本书。希望本书既能成为反映这方面研究成果的文献专著，又能成为有关工程技术人员从事工程结构设计和高校师生从事教学、科研时可以直接利用的参考书。

作者以为，广义的现代设计法其特点是：利用现代科学的最新成果于广义的设计过程，集传统经验与现代科学之大成，熔软科学与硬科学于一炉，以形成解决各种疑难问题，设计真善美系统或事物的新的方法论、方法学。本书提出的设计理论和设计方法也正是在工程结构设计领域现代设计方法的一些体现。

作者将十分感谢读者提出的任何关于改进本书内容的建议。

愿借此机会向我尊敬的导师王光远教授、叶尚辉教授表示诚挚、衷心的感谢！

在本书内容的研究与写作过程中，孙清同志作了大量的资料搜索与整理工作，在此深表谢意。

谨以本书献给我可爱的祖国、尊敬的老师和亲友们！

陈 树 勋

于北京航空航天大学宇航学院

1990.5.

符 号 表

下面列出本书常用的主要符号。所有符号在文中首次出现时都作了定义，以后出现而又意义明确时，可能不再解释而直接使用。符号按其出现序列出，除特别注明外，同一符号在文中表示相同的含义。希望本符号表对符号的解释能够避免引起混乱。

字母之上加波浪线 $\sim$ 的表示矩阵，加横线一的字母表示向量，下加波浪线 $\sim$ 的字母表示模糊集合，如 $\bar{A}$ 表示 A 是矩阵， $\bar{A}$ 表示 A 是向量， $\tilde{A}$ 表示 A 是模糊集合，在不致引起误解的章节，如附录II广义逆阵中，矩阵也直接以字母表示。

rms ——均方根值；

BFP ——最佳吻合抛物面；

u_A, v_A, w_A —— BFP 的顶点位移；

φ_x, φ_y —— BFP 的轴线转角；

h —— BFP 的焦距增量；

f ——抛物面天线的焦距；

x_i, y_i, z_i —— i 点坐标；

u_i, v_i, w_i —— i 点位移；

n_0 ——反射表面节点总数；

$X_i = x_i/f, Y_i = y_i/f, Z_i = z_i/f$ —— i 点坐标，无因次量；

$U_i = u_i/f, V_i = v_i/f, W_i = w_i/f$ —— i 点位移，无因次量；

$U_A = u_A/f, V_A = v_A/f, W_A = w_A/f, H_0 = h/f$ ——吻合参数，无因次量；

D_r ——天线表面点加权半光程差的 rms ；

D ——天线表面点加权半光程差的平方和；

$\bar{B}$ ——天线表面点光程差正比阵；

$\bar{V}$ ——天线表面点吻合几何阵；

- $\bar{H}$ ——无因次吻合参数向量;
 $\bar{Q}$ ——加权因子对角阵;
 Q_i ——第 i 环加权因子;
 $\bar{S}$ ——吻合阵;
 U ——结构位移向量;
 $\bar{K}$ ——结构总刚度矩阵;
 $\bar{P}$ ——结构载荷向量;
 N ——结构杆件总数;
 n ——杆截面变量数;
 m ——结构节点位移自由度总数, 优化性态约束总数;
 $\bar{A}$ ——杆截面设计向量;
 A_j ——第 j 类杆截面设计变量;
 c_j ——截面积为 A_j 的杆件数目;
 W_s ——自重载荷向量;
 $W_{s,i}$ ——第 i 自由度自重载荷;
 P_s ——外加载荷向量;
 $P_{s,i}$ ——第 i 自由度外加载荷;
 m_0 ——结构节点总数;
 $\bar{K}_e$ ——第 e 杆单元扩充为 $m \times m$ 阶的单元刚度;
 $\bar{R}_e$ ——第 e 杆单元扩充为 $m \times m$ 阶的方向余弦阵;
 A_e, E_e, l_e ——第 e 杆的截面积、弹性模量和长度;
 λ, μ, ν ——某杆件的 x, y, z 向方向余弦; (λ 在第三章中还表示 Kuhn-Tucker 乘子, 在第四、五章中还表示模糊集的水平截集的水平;)
 $\bar{K}_j$ ——杆截面为 $A_j = 1$ 的单元刚度之和;
 $W_{s,j}$ ——杆截面为 $A_j = 1$ 的自重载荷向量之和;
 $\bar{D}$ ——结构设计阵;
 D_j ——第 j 设计向量;
 k ——弹性系数对角阵;

$\tilde{C}$ ——桁架结构各杆方向余弦阵;

$\tilde{C}^+$ —— $\tilde{C}$ 的Moore-Penrose广义逆阵;

$[\sigma]^v$ ——各杆许用拉应力向量;

$[\sigma]^L$ ——各杆许用压应力向量;

δ_i ——天线表面 i 点相对BFP的半光程差;

$\tilde{Z}$ ——严格保型方程系数阵;

$\tilde{h}$ ——应力符号阵;

h_e —— e 杆的应力符号;

E ——应变能、弹性模量;

W ——结构重量、材料物理特性;

γ_j ——截面积为 A_j 的杆件比重;

l_j ——截面积为 A_j 的杆件总长度;

$\bar{A}^L$ ——杆截面变量的下限;

$\bar{A}^v$ ——杆截面变量的上限;

$\bar{N}$ ——杆内力列向量;

$\tilde{N}$ ——杆内力对角矩阵;

N_e —— e 杆的杆内力;

r ——表面点三向位移的模、谐调方程的秩;

S ——严格保型方程数目;

t ——到限不等式约束数目;

$\bar{S}$ ——杆截面倒数列向量;

S_e —— e 类杆截面倒数变量;

$\bar{x}$ ——优化设计向量;

G_{x_i} ——设计变量 x_i 的导重;

H_{x_i} ——设计变量 x_i 的容重;

g_a, g_t, g_h, g_r, g ——分别为截面、板厚、环高、环半径设计变量
总数和所有设计变量总数;

G, G_e ——分别为结构总导重及被动件总导重;

A_i, t_i, h_i, r_i, x_i ——分别为截面、板厚、环高、环半径变量

和任意变量;

$\dot{W}, \dot{W}_{x_i}$ ——分别为结构广义重量与变量 x_i 的广义重量;

$\bar{P}_{Ai}, \bar{P}_{hi}$ ——分别为截面 A_i 和环高 h_i 的导重载荷;

$\bar{R}_j^*, \bar{R}_j', \bar{R}_j^*$ —— j 杆方向余弦阵对 x, y, z 坐标变量的导数矩阵;

g_j ——第 j 约束函数;

$\bar{\lambda}$ ——Kuhn-Tucker 乘子列阵;

$G_{x_i}^j, G^j$ ——变量 x_i 的 j 约束导重及 j 约束总导重;

$\bar{B}$ ——求 $\bar{\lambda}$ 不等式方程组系数阵;

$\bar{C}$ ——求 $\bar{\lambda}$ 不等式方程组的常数向量;

G_j —— $\bar{G}$ 阵的第 j 元素;

R_j —— j 杆等效应力;

R ——结构的特征应力;

φ_j —— j 杆的压杆稳定折减系数;

Ψ_j —— j 杆许用应力与标定材料许用应力之比;

W_0, D_0, R_0, ω_0 ——结构重量、精度、特征应力及动力基频的约束界 (工程提出的最起码要求);

$\tilde{f}$ ——模糊目标函数向量;

$\tilde{f}_i$ ——第 i 模糊目标函数;

$\tilde{F}_i$ ——第 i 目标的模糊满意区间;

$\tilde{g}_j$ ——第 j 约束函数;

$\tilde{G}_j$ ——第 j 约束函数的模糊允许区间;

$\mu_{\tilde{A}}(\tilde{B})$ ——模糊子集 $\tilde{B}$ 对模糊子集 $\tilde{A}$ 的隶属度;

α_i ——第 i 目标的满意度;

β_j ——第 j 约束的满足度;

θ_i ——第 i 目标的模糊满意域;

ω_j ——第 j 约束的模糊可用域;

$\tilde{\Theta}$ ——总模糊满意域;

$\tilde{\Omega}$ ——总模糊可用域;

α ——总满意度;

β ——总满足度;

γ ——总满足满意度;

Ψ ——模糊满足满意域;

λ_h ——第 h 次非模糊规划的约束水平;

$\tilde{\Theta}_a$ ——制约模糊满意域;

$\tilde{\Theta}_b$ ——非制约模糊满意域;

α_a ——制约总满意度;

α_b ——非制约总满意度;

S_{cs} ——满足满意解集;

$\tilde{x}^0$ ——设计变量模糊允许区间列向量;

$\tilde{I}_j$ ——天线多目标优化性态约束的模糊允许区间;

$I_{j,\lambda}$ —— $\tilde{I}_j$ 的 λ 截集;

$x_{i,\lambda}^0$ —— x_i^0 的 λ 截集;

$I_{i,\lambda}^U$ —— $I_{j,\lambda}$ 的上界;

$x_{i,\lambda}^U, x_{i,\lambda}^L$ —— $x_{i,\lambda}^0$ 的上界与下界;

$J_f(\bar{x}^*, h)$ ——对应于 x^* 的 $\bar{f}(\bar{x})$ 在 $\bar{x}$ 处的拟雅可比矩阵;

$\rho(\bar{A})$ ——方阵 $\bar{A}$ 的谱半径;

λ_i ——方阵的第 i 特征值;

α_k ——第 k 次迭代的步长因子;

A_λ ——模糊子集 A 的水平截集;

$\text{Supp } \underline{A}$ ——模糊子集 $\underline{A}$ 的支集;

$\text{Kern } \underline{A}$ ——模糊子集 $\underline{A}$ 的核;

$O_{r \times n}^{m \times r}$ —— $m \times n$ 阶秩为 r 的矩阵空间;

$\text{rank } A$ ——矩阵 A 的秩;

A^- ——矩阵 A 的 $\{1\}$ -逆;

A_1^- ——矩阵 A 的自反广义逆, $\{1, 2\}$ -逆;

A_3^- ——矩阵 A 的 $\{1, 3\}$ -逆;

A_4^- ——矩阵 A 的 $\{1, 4\}$ -逆;

A_R^- ——矩阵 A 的右逆;

A_L^- ——矩阵 A 的左逆;

A^+ ——矩阵 A 的 Moore-Penrose 广义逆。

目 录

符号表

绪 言	(1)
-----------	-------

第一章 精密天线结构设计的特点

(7)

§ 1-1 天线结构简介	(7)
§ 1-2 天线结构设计的特点	(10)
§ 1-3 天线反射面精度计算	(12)

第二章 按预定变形设计结构及天线结构严格保型设计

(23)

§ 2-1 概述	(23)
§ 2-2 桁架结构计算矩阵关系	(24)
§ 2-3 结构模型与设计方程	(28)
§ 2-4 数学模型与严格保型方程	(31)
§ 2-5 严格保型设计的直接解法	(35)
§ 2-6 严格保型设计的最优解	(36)
§ 2-7 算例	(38)
§ 2-8 圆抛物面天线保型位移的预定	(44)
§ 2-9 严格保型设计的变量归并连接	(48)
§ 2-10 变量归并连接算例	(54)
§ 2-11 理论的推广	(57)
§ 2-12 结语	(63)

第三章 结构优化设计的导重法及天线结构优化设计

(65)

§ 3-1 概述	(65)
§ 3-2 单性态约束结构优化的导重法及天线结构近似保型优化 设计	(68)
§ 3-3 各设计变量导重的计算	(78)
§ 3-4 迭代控制与导重的意义	(91)

§ 3-5	天线结构近似保型优化设计算例	(96)
§ 3-6	多性态约束结构优化的导重法	(102)
§ 3-7	结构优化的特征应力约束	(107)
§ 3-8	一般天线结构多性态约束优化设计	(110)
§ 3-9	天线结构多约束最轻设计算例	(117)
§ 3-10	多种单元结构优化的导重法	(123)
§ 3-11	结语	(132)

第四章 普遍型模糊规划 (133)

§ 4-1	概述	(133)
§ 4-2	结构优化设计中的模糊性	(134)
§ 4-3	普遍型模糊规划的数学模型	(139)
§ 4-4	目标的满意度与约束的满足度	(142)
§ 4-5	普遍型模糊规划解的理论	(148)
§ 4-6	模糊满意域与模糊可用域	(151)
§ 4-7	对称型解法——模糊判决法	(158)
§ 4-8	不对称型解法——最优约束水平法	(164)
§ 4-9	优化目标与约束的相互转化	(172)
§ 4-10	算例	(173)
§ 4-11	结语	(181)

附录 结构数设计思想简介 (182)

第五章 天线结构的多目标模糊优化设计 (186)

§ 5-1	概述	(186)
§ 5-2	天线结构优化设计的多个目标	(187)
§ 5-3	天线结构多目标模糊优化的数学模型	(190)
§ 5-4	各模糊满意区间与各模糊允许区间	(192)
§ 5-5	天线结构多目标模糊优化的解法	(196)
§ 5-6	天线结构多目标模糊优化解法与导重法的衔接	(198)
§ 5-7	算例	(201)
§ 5-8	结语	(215)

第六章 优化设计中求解非线性方程组的直接迭代步长因子法(216)

- § 6-1 概述 (216)
- § 6-2 单变量非线性方程求解的直接迭代步长因子法 (217)
- § 6-3 求解多变量非线性方程组直接迭代法的收敛条件 (223)
- § 6-4 求解非线性方程组的直接迭代步长因子法 (226)
- § 6-5 步长因子取值范围的复平面图解 (233)
- § 6-6 实际计算中步长因子确定方法 (237)
- § 6-7 步长因子取法探索过程 (239)

第七章 天线结构分析与保型优化设计的电算及其程序(245)

- § 7-1 概述 (245)
- § 7-2 天线结构分析技巧——如何只计算 $1/4$ (251)
- § 7-3 OAS系列程序简介 (260)

附录 I 模糊数学基本知识(273)

- § I-1 模糊子集的概念 (273)
- § I-2 隶属函数的确定 (277)
- § I-3 模糊子集的基本运算规则 (281)
- § I-4 水平截集与分解原理 (285)
- § I-5 扩展原理 (288)

附录 II 广义逆矩阵与线性方程组求解(295)

- § II-1 概述 (295)
- § II-2 几种广义逆矩阵及其求法 (297)
- § II-3 广义逆矩阵与解线性方程组 (306)

参考文献(309)

绪 言

近年,随着系统论、信息论、控制论、概率论、模糊数学、计算数学、计算力学、计算机科学以及人工智能等应用学科的日益成熟和发展,工程系统设计理论正面临着突飞猛进的局面。未来的工程设计将在以下几方面表现出其特色:

1. 信息处理的科学化:要求全面、正确、如实地处理工程设计中的各种信息。这些信息既有确定性信息,还有大量的包括随机性、模糊性、不确知性信息等在内的不确定性信息。如不考虑客观存在的不确定性信息,将会在工程设计中导致实质性的矛盾。

2. 大系统多目标优化:要求必须把整个工程当做一个有机联系的大系统来考虑。工程设计方案的好坏不能单从某个局部的具体目标来判断,而要考虑工程系统的多方面指标,进行多目标优化。

3. 结构行为的自控化:对已建成结构,附加消极或积极的控制机构,以控制结构的反应。进一步还可设计具有自适应能力的结构,如大型天线结构的保型设计就是一种自适应设计。

4. 设计过程人工智能化:研究计算机辅助设计、工程设计专家系统,使计算机在一定程度上具有人类的智能,以在一定范围内代替人进行工程设计。这就必须使其能够较好的处理模糊性等不确定性信息。

进行工程结构现代设计理论及方法的研究,就是要从这些方面作出努力,为工程设计理论的飞跃助一臂之力。本书所介绍的研究成果也正是在这些方面作出了贡献。

本书以天线结构设计中提出的问题是线索进行深入研究,所提出的理论与方法对于一般工程结构尤其是高精度结构设计具有普遍的指导意义和应用价值。

为接收和发射电磁波而广泛应用的天线是包括电磁与结构两大部分的复杂系统,天线工程设计自然应从电磁-结构这个大系统的观点来统一考虑。对于广泛使用的前馈式反射面天线,先对电磁系统进行优化设计可确定天线反射面的最优形状,以此最优形状作为结构设计的理论反射曲面,在结构系统的优化设计中,只要使设计的结构变形后反射面尽可能地接近这一设计曲面,即可保证电气性能。所以,这类天线的大系统优化设计可采用二级决策^[16],将整个系统分为电磁与结构两个相对独立的子系统而依次进行优化决策。

反射面天线结构是一种多工况、多变量、多约束、多目标的大型复杂结构。天线结构的设计涉及到电磁学、结构力学、计算数学与计算力学、不确定性数学、计算机科学等多种学科。由于天线结构需要在各种复杂而严峻的工作条件下工作,它不但要满足一般结构设计所要考虑的刚度、强度、稳定性及动力特性等条件,而且其反射面还要满足由电性能决定的很高的精度要求。这就使得天线结构设计既具有一般结构设计的共性,又在某些方面较一般结构设计难度偏大,天线结构设计理论与方法的研究中往往存在一些较深入的结构设计问题^[30]。

为解决大型高精度保型天线结构的严格保型设计问题,作者从一般桁架结构按预定位移设计的理论研究着手,提出的理论在实质上是一类“结构分析的反问题”,提出的方法用于一般精密结构的设计可以使结构的变形自动满足工程设计提出的由等式方程决定的严格要求。这也可看作结构行为自控化的一个方面。最后,作者给出了天线结构严格保型设计的简捷方法。本方法可使设计的天线反射体在任何姿态的自重及外载作用下变形后,表面各点都落在预定的理想同族反射曲面上,首次严格地实现了冯·霍纳

(Von.Hoener)1967年提出的天线结构保型设计思想。结构严格保型设计虽然由于制造、安装等方面的技术困难往往难以实现,但本文的研究为结构的严格保型设计提供了理论与计算实践的依据,为某些有严格变形条件的精密结构设计提供一条新的途径^[74,77]。变量连接的研究则为其工程实现作出了努力^[75]。

为解决大型高精度保型天线的近似保型和一般天线结构优化问题,作者提出了严密推导的结构优化理性准则法——导重法。在结构优化中,由于构件尺寸等设计变量的变化必然要引起结构自重等载荷的变化。天线结构的自重载荷是其主要载荷。优化敏度计算中,自重等载荷随设计变量变化的导数不容忽略。但是一般结构优化常用的虚功准则法由于位移用虚功表达不得不忽略这种导数,这就使得结构优化虚功准则法用于天线结构优化时计算结果与该条件下的最优解相差甚远。作者提出的导重法是严格按照库恩-塔克(Kuhn-Tucker)不等式约束极值条件推导出的理性准则法。在多性态约束的多个Kuhn-Tucker乘子求法上本方法采用了二次规划中解线性互补问题的Lemker算法,有效地自动区分了临界约束与非临界约束。所以它克服了一般结构优化准则法用于优化天线结构时的上述缺陷及其在区分临界约束与非临界约束上的困难,从而兼蓄了数学规划法与准则法两者的优点,既能使优化效果大为改善,又能使迭代很快收敛。近年大量的计算实践表明了导重法的优越性。导重法所涉及的设计变量不但包括构件尺寸,还包括了节点坐标。所涉及的目标和性态约束可包括结构重量、精度、动力基频和结构特征应力等。结构特征应力是笔者提出用以代替各构件强度与稳定性约束函数的单值函数,只要结构特征应力小于许用应力就可保证各构件的强度与稳定性约束条件得以满足,且不影响迭代的收敛。计算实践表明了这种替代的可行性。这种替代的目的是为了解决大型多单元结构优化中构件应力约束数目过多的问题^[82]。导重法作为天线结构优化设计成熟可靠的基本方法,为其计算机辅助设计以及工程设计人工