

# 天线结构 分析、优化与测量

（第二版）

ANALYSIS, OPTIMIZATION  
AND MEASUREMENT  
OF ANTENNA STRUCTURES



段宝岩◎编著

# 天线结构分析、优化与测量

(第二版)

段宝岩 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要包括三方面的内容,即天线结构力学分析、天线结构优化设计及天线反射面表面精度的现代测量技术。

天线结构力学分析涉及到天线结构的静动力分析、地震响应与随机风荷响应分析、可靠性分析。除此之外,还专门讨论了悬索式天线结构与桅杆天线结构的有限元力学分析。

天线结构优化设计主要包括天线结构优化设计的数学规划法、准则法及综合法,讨论了天线结构的动力优化、拓扑优化、机电综合优化及可靠性优化等问题。此外,还较深入地论述了刚架类与连续体类天线结构的优化设计问题。

天线反射面表面精度的现代测量技术主要介绍了无线电全息法与现代激光测距两种现代测量方法。

本书可供高等学校电子机械有关专业高年级本科生、研究生及天线结构设计工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

天线结构分析、优化与测量/段宝岩编著.—2版—西安:西安电子科技大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5606-4318-2

I. ①天… II. ①段… III. ①天线—结构力学 IV. TN82

### 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 323122 号

责任编辑 刘小莉 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社

(西安市太白南路2号)

邮 编 710071

电 话 (029)8227828

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司印刷厂

版 次 1998年8月第1版 1998年8月第1次印刷

2005年1月第2次印刷

2017年1月第2版 2017年1月第1次印刷

开 本 787×1092毫米 1/16 印张 23

字 数 535千字

印 数 2001~3 000册

定 价 46.00元

ISBN 978-7-5606-4318-2/TN

**XDUP 4610002-3**

\*\*\* 如有印制问题可调换 \*\*\*

## 作者简介



段宝岩，中国工程院院士，1955年生于河北冀州市。1977年考入西北电讯工程学院（原西军电、现西安电子科技大学），先后获工学学士、硕士及博士学位。1991—1994年在英国利物浦大学作博士后研究，2000年在美国康乃尔大学作客座教授。2002—2012年期间担任西安电子科技大学校长，现为西安电子科技大学教授，博士生导师，国家973首席科学家，全国天线产业联盟主席，国际工程技术学会会士（IET Fellow），教育部科技委国防与先进制造学部委员，机械学科教学指导委员会副主任，军委装备发展部科技委（兼）委员暨卫星有效载荷专业组成员，工信部电子科技委委员，《电子机械工程》与《电子学报》等10个国内外学术期刊编委。

曾被授予全国五一劳动奖章（2003）、全国劳动模范（2005）、全国师德先进个人（2004）、全国留学回国人员成就奖（2003）、全国优秀科技工作者（2011）等称号。入选2009年度科学中国人，2012年获香港何梁何利科学与技术成果奖。

他长期从事电子机械工程的教学与科研工作，致力于电子装备机电耦合理论、方法及应用的研究，开辟了我国电子装备机电耦合研究的新领域，系统地建立了电子装备电磁场、结构位移场、温度场之间的场耦合理论模型，揭示了机械结构因素对电性能的影响机理，提出了基于场耦合理论模型与影响机理的机电耦合设计理论与方法。该成果已成功应用于探月工程、神舟飞船工程、主力战舰及500米口径大射电望远镜等国家重大工程与装备中。以第一完成人获国家科技进步二等奖3项，省部级科技进步一等奖4项。发表SCI、EI检索论文180余篇，国际会议特邀报告8次，著书5部，授权发明专利30余项。

# 序

天线在通信、广播、电视、雷达、导航、电子对抗、遥感遥测和射电天文等领域有广泛的应用，凡是利用电磁波来传递信息的都离不开天线。另外，用电磁波传送能量时，也需要天线。

天线的形状多种多样，常用的是各种线天线与面天线以及它们的组合和阵列。一副天线的尺寸可以长到几千米，高达几百米，也可以短到几毫米。

天线结构指的是天线本身和支持天线的结构物。天线结构型式繁多，大小不一。天线结构作为一种结构，与一般结构具有共同的问题，但也有其特殊性——天线结构是为实现天线电性能服务的，它的设计必须满足电性能的要求。

根据天线效率的要求，反射面天线的表面误差一般不得超过波长的  $1/30 \sim 1/60$ 。对于工作在毫米波段的大型反射面天线来说，这是一个很严格的要求。雷达天线与射电望远镜天线要求天线能绕方位轴与俯仰轴转动，工作在毫米波段的大型可动反射面天线，仅仅是本身重量引起的变形就有可能超出上述要求。为了克服自重变形的难关，S.Von Hoerner 于 1967 年提出了保型设计的概念，即设计一种抛物面天线结构，使变形后的反射面仍为一抛物面。保型设计必须采用优化方法来确定结构各杆件的截面尺寸，以达到“保型”。对于特大型反射面天线，为了避免天线运动带来的机械结构方面的一系列问题，不得不采用固定式。如美国的直径 1000 英尺(305 米)的 Arecibo 射电望远镜，其球形反射面结构就固定在山谷里。此外，架设在舰艇桅杆顶上的雷达天线，其重量有严格的限制，因为桅杆顶上每增加 1 千克重量就需要在舱底增加好几倍的压重，以保持舰艇的稳定性。这些例子都说明天线结构设计的特殊性，特别是天线结构的优化设计十分重要。因此，本书重点论述天线结构的力学分析、优化设计与反射面精度检测。

对于一般天线结构，进行有限元分析现在已不是什么困难的事。一方面，微机已具有优良的性能；另一方面，市场上已有多种功能强大的微机有限元分析软件可供应用，如 Algor、Cosmos、Ansys 等。问题在于天线结构的建模——如何根据结构实物建立合适的有限元模型。为此，本书第 1 章对有限元建模作了必要的论述，提出了一些指导性准则与方法，对初学者可能会有所帮助。

风荷是天线结构的一种主要载荷。从风的实测资料可以看出，在风的顺风向时程曲线中，风包含两种成分：平均风和脉动风。平均风亦称稳定风，它对结构的作用相当于静力的，只要知道平均风的数值，就可按静力方法进行结构计算。脉动风亦称阵风脉动，因它的周期短，它对结构的作用是动力的。在脉动风作用下，结构将产生随机振动。对于脉动风，应按随机振动理论来分析。为此，本书第 2 章介绍了天线结构的风激响应计算方法。

大型天线由于造价高昂，在地震时是否会发生破坏，是一个值得关心的问题。为安全起见，应进行结构地震响应分析，本书第2章也讨论了这一问题。

采用传统的安全系数法设计出来的结构，实际上不一定安全可靠，有一些很安全，而有一些却在规定的寿命期间内破坏了。这是因为，安全系数法把许多客观上存在的不确定因素作了极粗糙的简化，都视作定值量，没有考虑到数据的分散性。在设计中引入一个经验性安全系数，它的确带有一定的不确切性或盲目性。实际上，各种载荷都是随机过程。而影响结构抗力的诸因素，如构件尺寸、材料强度等也是随机变量。因此，应该用概率论和随机过程的数学方法来处理工程结构的载荷效应与结构抗力，以结构失效的概率来度量结构的安全度更为合适。目前，工程界已越来越普遍采用结构可靠性分析与设计方法，天线结构也应该如此，本书第3章对此作了简要论述。

柔索与纤绳式桅杆在天线结构中经常被采用，因此天线结构设计人员对这类结构很感兴趣。这类结构具有特殊性，其结构性能属于非线性范畴。虽然已有专著详细论述过这类结构，但篇幅过大，涉及面较广，而实际上天线结构真正需要的仅是其中的核心部分。本书第4、5章对这类结构的力学分析作了必要的阐述，简要而又充分。

随着时代的发展，对工程结构的要求越来越高，结构设计需要考虑的因素也越来越多，用传统的设计方法往往难以应付。要把结构设计得尽量符合理想，就需要有现代化的结构优化理论与方法。前面已经提到，天线结构更需要结构优化理论与方法，因此结构优化在天线结构设计中具有重要的地位与作用。

现代结构优化理论与方法，可以认为始于1960年Schmit等人将数学规划法应用于结构优化，他们为结构优化建立了一种普遍适用的方法。但是，现代结构优化理论与方法在初期进展并不顺利。70年代准则法获得广泛重视与应用。此后经过学者们的努力，把力学概念与优化技术很好地结合起来，使数学规划法的效率大大提高，成为当前结构优化方法的主流。

准则法在早期有同步失效准则与满应力准则，这些都是感性准则法，缺乏坚实的理论基础。而理性准则法是以约束优化极值必要条件——Kuhn-Tucker条件为基础，用准则的满足代替了使目标函数取极值，因此具有充分的理论基础。它的最大优点是收敛快，要求重分析次数与变量数目没有多大关系；其缺点是不同性质的约束要用不同的准则。

数学规划法具有更坚实的理论基础和广泛的适应性。数学规划的方法五花八门，有很多种。按优化的数学模型中是否有约束条件，可分为约束和无约束两大类，相应的优化方法有约束优化与无约束优化两类（工程问题大多数为约束优化问题）；按优化方法是否利用梯度信息，可分为直接法与梯度法；按设计变量的类型，可分为整数规划、随机规划、连续变量优化与离散变量优化。详细介绍优化方法不是本书的宗旨，因目前这类专著已有不少。本书仅对天线结构优化设计有关的方法作一介绍。综合法是本书作者提出的一种方法，实质上可归属于序列二次规划一类。

结构优化分为四个层次：①结构类型优化；②拓扑优化；③形状优化；④尺寸优化。尺寸优化是结构优化的最低层次。结构类型优化目前还很少有人探讨，本书对其余三种优化均有论述，其中拓扑优化是作者在国内最早开始进行探讨的。

天线结构是机电一体化产品，而机电一体化设计是很有意义但却比较困难的工作，大有发展余地，本书在这方面作了良好的开端。

本书第 2 篇天线结构优化设计内容多为作者科研工作的总结，具有明显的特色和学术水平。

反射面天线表面精度测量，对于大型高精度天线是一项关键技术。表面精度测量的方法很多，本书介绍的是两种先进的现代方法。

综观全书，取材新颖，内容先进、充实、实用，是本学科领域中一本很有价值的专著，它的出版将为提高我国天线结构设计水平发挥有益的作用。



西安电子科技大学

1998 年 5 月 29 日

## 前 言

为配合西安电子科技大学出版社出版发行“雷达技术丛书”，应邀对第一版《天线结构分析、优化与测量》作了修改补充，即《天线结构分析、优化与测量》第二版，以飨读者。

为使本书跟上本领域最新科技发展的步伐，在新版书中增加了部分内容，如第14章增加了较多内容，这些内容多为作者的科研体会与成果。就微波天线而言，较为详细而系统地阐述了反射面天线、平面裂缝阵天线以及有源相控阵天线的机电耦合理论模型、结构因素对电性能影响机理，以及基于耦合模型和影响机理的机电耦合优化设计等内容。同时，对第一版中存在的某些不合适、不准确的内容作了修改，便于读者阅读。

虽然作者尽可能使第二版内容既有理论高度，又接地气，便于应用，譬如增加模型、理论与方法的数理推导和实际工程应用的案例分析，但因作者水平所限，书中难免存在这样或那样不妥甚至错误的地方，恳请读者雅正。

编著者

2016年6月



## 第一版前言

天线被广泛应用于通信、雷达及射电天文等领域，而作为天线主体之一的天线结构，在保证天线整体的电性能发挥着极其重要的作用。天线结构不同于一般工程结构，对其有某些特殊的要求。因此，如何科学而合理地设计天线结构，是工程界十分关心的问题。天线结构设计涉及到多个学科，对于天线结构设计的一般性问题已有相应的著作论述，因此本书将重点论述三个方面的问题：天线结构的力学分析、优化设计与表面精度测量。

天线结构的有限元分析目前应用已较普及，但是如何正确地由具体结构建立有限元分析模型，则是一个较为困难而又十分重要的问题，亟待解决。天线结构的随机地震响应分析与随机风荷响应分析是另一个需认真考虑的问题，尤其对大型天线结构来说，这两类响应问题更显得重要。提高天线结构设计的可靠性是广大工程技术人员所渴望的，而其前提是进行可靠性分析。悬索式天线结构与桅杆式天线结构是两类较为特殊的天线结构类型，在工程实际中也得到了较为广泛的应用。对于以上几个问题，本书第 1~5 章在综合了国内外新近研究成果的基础上，分别作了较为深入的讨论。

当今，优化设计已成为天线结构设计中不可缺少的一个重要环节，但在国内对这方面的认识还不够深刻，应用还不够普遍，专门论著尚为少见，因此本书的第 2 篇将其作为重点进行深入论述。第 6~9 章较详细地介绍了几种行之有效的方法，如准则法、数学规划法（常用的几种）及综合法等。第 10 章论述了刚架类天线结构的优化设计问题，其中涉及到最新的考虑翘曲（Warping）影响时任意梁截面的优化问题。天线结构的动力优化设计在第 11 章进行了讨论。连续体天线结构的形状优化设计是另一类重要的问题，第 12 章对此作了论述，包括网格自动划分、几何描述、敏度分析及优化数值方法等问题。天线结构拓扑优化是更高层次的问题，第 13 章重点论述了该类问题，包括预定应力场下的优化方法、0-1 型二次规划法以及多工况下的线性规划方法，此外，还论述了将极大熵原理应用于拓扑优化设计的问题，并提出了一些有意义的新的研究热点问题。天线结构的最终任务是确保天线的电气性能指标，而天线反射面板实际上是电磁场的边界条件之一，因此，第 14 章从机电交叉学科的角度展开研究，论述了天线结构机电综合优化设计的问题。第 15 章还着重论述了天线结构可靠性优化设计问题。

本书第 3 篇着重介绍了国内外关于天线反射面板精度测量的几种现代方法，其中包括广泛应用的无线电全息测量法和现代激光测量法，并对美国 Green Bank 100 m 天线的激光检测情况作了介绍。

本书第 1 章和第 5 章由叶尚辉教授执笔，其余各章由段宝岩执笔。

本书优化篇中的大部分工作是作者在西安电子科技大学做博士生期间与工作期间完成的。作者在学习和工作期间，得到了导师叶尚辉教授的指导与帮助，在本书问世之际，谨向叶教授致以崇高的敬意和深切的谢忱！

作者特别感谢英国利物浦大学的 Andrew B. Templeman 教授。作者在英国做博士后期间，是由 Templeman 教授的指引，才进入了极大熵原理及其应用的研究领域。本书第 13 章 13.5 节的内容即是对那段工作的总结。

作者还应感谢日本北海道工业大学吉田纪昭教授。作者在日本从事合作研究期间，吉田教授提供了许多关心、支持与帮助。本书第 10 章的大部分内容是在日期间的工作总结。

由于时间仓促，加之作者水平有限，书中难免存在不少缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

编著者

1998 年 3 月

# 目 录

## 第 1 篇 天线结构力学分析

第 1 章 天线结构静力分析 .....	2
1.1 概述 .....	2
1.2 有限元分析模型的建立 .....	7
1.3 有限元网格划分 .....	22
1.4 节点载荷 .....	25
参考文献 .....	33
第 2 章 天线结构的随机地震响应分析与随机风荷响应分析 .....	34
2.1 概述 .....	34
2.2 随机响应分析的基本理论与方法 .....	35
2.3 桁架式天线结构的随机地震响应分析 .....	41
2.4 天线结构风荷响应的随机振动分析 .....	47
2.5 某大型轮轨式天线结构的地震响应分析 .....	52
参考文献 .....	58
第 3 章 天线结构的可靠性分析 .....	59
3.1 概述 .....	59
3.2 工程结构在随机载荷作用下的可靠性分析 .....	61
3.3 某圆抛物面天线结构在随机风荷作用下的可靠性分析 .....	66
参考文献 .....	70
第 4 章 悬索式天线结构的力学分析 .....	71
4.1 概述 .....	71
4.2 悬索结构的数学与力学描述 .....	73
4.3 大型球面射电望远镜线馈源结构的力学分析 .....	76
参考文献 .....	82
第 5 章 桅杆天线结构的力学分析 .....	83
5.1 桅杆计算的力学模型 .....	83
5.2 梁单元特性分析 .....	85
5.3 纤绳单元特性 .....	91

5.4 桅杆的力学分析 .....	94
参考文献 .....	96

## 第 2 篇 天线结构优化设计

<b>第 6 章 天线结构优化设计概述</b> .....	98
6.1 工程结构优化设计概念 .....	98
6.2 天线结构优化设计特点 .....	100
6.3 天线结构优化设计模型 .....	105
参考文献 .....	106
<b>第 7 章 天线结构优化设计的数学规划法</b> .....	107
7.1 概述 .....	107
7.2 天线结构优化设计的 SLP 方法 .....	108
7.3 天线结构几何优化设计的复合型方法 .....	116
参考文献 .....	129
<b>第 8 章 天线结构优化设计的准则法</b> .....	130
8.1 概述 .....	130
8.2 优化模型的描述与迭代格式的建立 .....	131
8.3 各设计变量导重的计算 .....	137
8.4 优化设计过程中的迭代控制与导重的意义 .....	146
8.5 天线结构优化设计实例 .....	148
参考文献 .....	151
<b>第 9 章 天线结构几何优化设计的综合法</b> .....	152
9.1 概述 .....	152
9.2 天线结构优化设计的数学描述 .....	153
9.3 目标函数与约束函数的近似处理 .....	153
9.4 变尺度法思想的应用 .....	154
9.5 问题的等价处理 .....	157
9.6 线性互补问题的求解 .....	159
9.7 拟运动极限步 .....	161
9.8 综合法的特点 .....	162
9.9 灵敏度信息的推导 .....	162
9.10 算例及分析 .....	171
参考文献 .....	176
<b>第 10 章 刚架类天线结构优化设计</b> .....	178
10.1 概述 .....	178
10.2 杆件型刚架结构优化设计 .....	179
10.3 型材型刚架结构优化设计 .....	182
10.4 计及翘曲影响、具有任意梁截面的刚架结构优化设计 .....	194
参考文献 .....	209

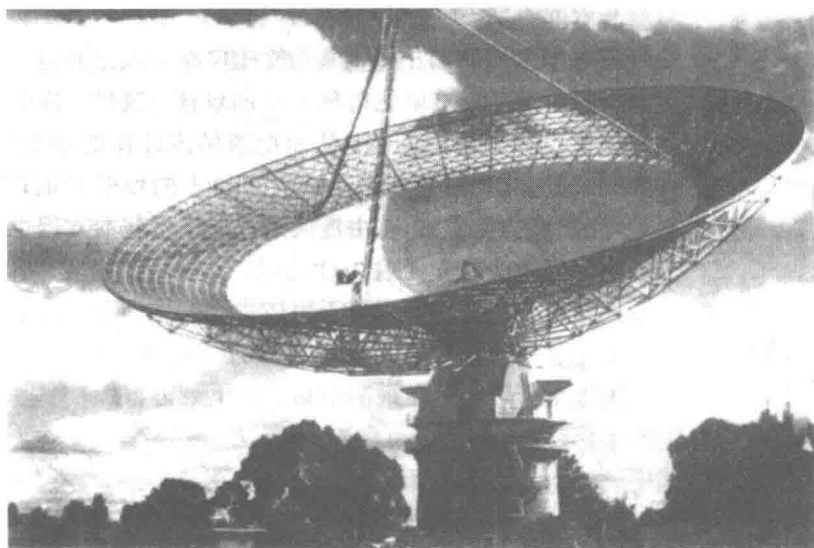
<b>第 11 章 天线结构动力优化设计</b> .....	210
11.1 概述 .....	210
11.2 天线结构动力优化设计的数学描述 .....	210
11.3 特征值问题与敏度分析 .....	211
11.4 问题的求解 .....	213
11.5 天线结构动力优化实例 .....	216
参考文献 .....	223
<b>第 12 章 连续体天线结构形状优化设计</b> .....	224
12.1 概述 .....	224
12.2 有限元网络的自动划分 .....	225
12.3 连续体形状优化的几何描述 .....	230
12.4 连续体形状优化的敏度分析 .....	233
12.5 多工况形状优化设计的混合法 .....	239
12.6 数值计算结果 .....	241
参考文献 .....	244
<b>第 13 章 天线结构拓扑优化设计</b> .....	246
13.1 概述 .....	246
13.2 预定应力场下杆系结构的拓扑优化设计 .....	248
13.3 杆系结构 0-1 型拓扑优化的二次规划方法 .....	254
13.4 多工况下杆系结构拓扑优化设计的线性规划方法 .....	258
13.5 基于极大熵原理的桁架结构拓扑优化设计 .....	276
13.6 两类天线结构的拓扑优化设计 .....	285
参考文献 .....	288
<b>第 14 章 天线结构机电综合优化设计</b> .....	290
14.1 概述 .....	290
14.2 面向效率的反射面天线机电耦合模型 .....	291
14.3 面向远场方向图的反射面天线机电场耦合模型 .....	297
14.4 平面裂缝天线机电场耦合模型 .....	303
14.5 有源相控阵天线机电热三场耦合模型 .....	319
14.6 基于场耦合模型的机电综合优化设计 .....	324
参考文献 .....	326
<b>第 15 章 天线结构可靠性优化设计</b> .....	329
15.1 概述 .....	329
15.2 基于单元可靠性的桁架结构优化设计 .....	330
15.3 基于失效模式可靠性的刚架结构优化设计 .....	333
15.4 基于体系可靠性的结构优化设计 .....	335
15.5 基于精度可靠性的天线结构优化设计 .....	337
15.6 基于可靠性约束显式化的结构可靠性优化设计 .....	339
参考文献 .....	341

### 第 3 篇 天线反射面表面精度的现代测量技术

第 16 章 反射面精度的现代测量技术 .....	344
16.1 概述 .....	344
16.2 天线反射面表面精度测量的无线电全息法 .....	345
16.3 天线反射面表面精度测量的现代激光技术 .....	349
参考文献 .....	352

# 第 1 篇

## 天线结构力学分析



# 1

## 第 1 章

# 天线结构静力分析

## 1.1 概 述

### 1.1.1 有限元分析提要

有限元方法是求解复杂工程问题的一个有效的数值方法, 天线结构力学分析也广泛使用了有限元方法。

有限元方法的基本思想是分片插值, 即将一形状复杂的求解域分解为有限个形状简单的子域(称为单元), 然后用比较简单的函数来表示每个单元的场。这些单元彼此仅在节点上相连。只要知道节点的场值, 就可得出单元内任一点的场值。这样, 各单元的集合就代表原来整体求解的问题, 从而把求解连续体的场变量(应力、位移等)问题简化为求解有限个单元节点上的场变量值; 将无穷维自由度问题简化为有限个自由度问题; 求解的基本方程也由原来的微分方程转换为代数方程组。

天线结构的力学分析属于固体力学问题。固体力学有限元法已有许多专著<sup>[1][2]</sup>作了详细的分析, 这里不再重复。

天线结构静力分析最后归结于解下列方程:

$$K\delta = P \quad (1-1)$$

式中:  $K$ ——刚度矩阵;

$\delta$ ——节点位移列阵;

$P$ ——节点载荷列阵。

天线结构动力分析则归结于解下列方程:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = F \quad (1-2)$$

式中:  $M$ ——质量矩阵;

$C$ ——阻尼矩阵;



$\ddot{\delta}$ 、 $\dot{\delta}$ ——节点的加速度列阵、速度列阵；

$F$ ——节点的载荷列阵。

应用有限元法对天线结构进行力学分析的一般步骤如下：

- ① 计算力学模型的建立——将一实际结构进行简化，得到一近似的力学模型。
- ② 结构离散化——将计算力学模型分解为各种类型的若干单元，并进行节点编号与单元编号。这一步骤称为有限元网络划分。
- ③ 建立边界条件——根据结构与外界的约束性质，建立合适的边界条件。要注意约束是否充分。
- ④ 计算节点载荷——将非节点载荷转换为等效的节点载荷。
- ⑤ 组成结构的整体刚阵——由各单元的刚阵对号入座、叠加，组成结构总刚阵。
- ⑥ 求解有限元方程——得出各节点的位移、各单元的应力等。
- ⑦ 对求出的解进行整理——用科学可视化方法，以形象的彩色图来表示位移、应力等。

上述步骤中的①、②、③、④称为有限元分析的前处理，也就是数据输入；步骤⑦称为有限元分析的后处理。

结构离散化的工作量一般都非常大，若采用手工输入，则繁琐费时，且易出错，严重地影响了工作效率。现在，商品化有限元分析软件都具有前处理功能，只需输入少量数据即可自动生成所需的输入数据，大大减轻了人力劳动。但有限元网格剖分的质量对有限元分析结果的精确性有一定影响，如何正确地进行网格剖分，将在下面有关章节中讨论。

由于有限元分析的规模一般都很大，求解后得出的位移、应力、振型等数据非常庞大，难以一下子获得分析结果的整体印象，因此一般采用科学计算可视化(VISC)方法，用形象、具体的图形形式来表达一大堆抽象的计算数据所蕴含的内容，从而使我们能更快地分析计算结果，更有效地控制计算过程。科学计算可视化提供了一种发现不可见信息的方法，丰富了科学发现的过程，给人们以深刻的洞察力。正因为如此，它已成为目前研究的热点，并形成了相对成熟的技术。现代有限元分析软件都具有一定的后处理功能，如用等应力线、等位移线方法来表示输出结果，对不同的应力区或位移区填充不同的颜色，根据颜色即可判断应力或位移值的大小及分布；用动画的方法来显示振动的振型，形象生动。有限元分析软件的这种后处理功能给用户提供了很大的方便。

目前，应用有限元方法来求解工程问题已不再新鲜，市面上流行的各种有限元分析软件系统，功能强大，人机交互性好，使用简单，使有限元分析的应用日益普及，但是如何将实际结构简化为计算模型仍是一个有待解决的问题。有限元分析模型的建立是十分重要的一步，工程经验表明，若模型建立得不正确，计算结果将与实际相距甚远，分析计算就失去应有的作用。因此可以毫不夸张地说，计算模型正确与否是结构有限元分析成败的关键。

### 1.1.2 有限元分析软件

目前，国际上商品化的大型通用有限元分析软件已很多，著名的有 NASTRAN、