



Y2067172

## 摘要

天线罩结构的强度、刚度和稳定性对其内部天线整体电性能的发挥有着极其重要的影响。因此天线罩的结构分析是工程界十分关心的问题。

首先，本文将目前国内外的各种球形天线罩，按结构形式进行分类，并在此基础上对各种天线罩结构原理、优缺点进行了分析说明，为大型截球形天线罩的结构分析做必要的准备；对各种大型球形天线罩的板块划分方法和原理进行详细的介绍，并对其制造安装及工艺成型技术，进行了较为深入的研究和分析。

然后，利用 ANSYS Mechanical APDL 语言对风载荷进行离散化处理；就风的基本特性进行了必要的描述和探讨，采用谐波合成法，用 MATLAB 软件，实现了随机风速的模拟。

最后，利用有限元分析软件和作者编制的风荷自动加载程序，对直径 40m 的光滑球形天线罩进行了静态分析、动态分析及稳定性分析；并对直径 9.144m 板块划分球形天线罩进行了静态分析，探索了分块对其力学性能的影响。

**关键词：** 大型球形天线罩 板块划分 介质罩 有限元 结构分析

## **Abstract**

The electrical performance of the antenna is affected by the stiffness, intensity and stability of the radome structure. Hence, the structural analysis of radome is very concerned by the designers.

Firstly, a variety of domestic and foreign spherical radomes are classified by the structure in this thesis. Based on this, the principle of various large spherical radome structure and their advantages and disadvantages are analyzed and explained, which makes a necessary preparation for the analysis of large spherical radome. The detailed introduction is given about the method and principle of its partitioning. The study and analysis are carried out on its manufacture, installation and forming process.

Secondly, a wind load is discretized in Ansys Parameter Design Language (APDL); the basic characters of wind are described and discussed. And the simulation of wind is accomplished by the wave superposition method in MATLAB software.

Finally, the static analysis, dynamic analysis and buckling analysis of the diameter 40m radome structure are carried out by using the finite element method and the procedure for applying wind load automatically, the influence of block on the mechanics properties of the radome is explored by the analysis of the diameter 9.144m radome.

**Keywords:** Large-scale spherical radome   Slab division   The dielectric radome  
Finite element method   Structural analysis

## 第一章 绪论

### 1.1 天线罩的产生及作用

天线罩是为保护天线免受自然环境影响的外壳。天线罩一词是从英文 Radome(Radardome)翻译过来的。它是由天然或人造电介质材料制成的覆盖物，或是由桁架支撑的电介质壳体构成的特殊形状的电磁窗口。它用来保护天线或整个微波系统(包括天线和通信系统)不受环境影响而损坏。用于雷达天线的罩有时又称雷达罩；而供彩电中心、微波塔楼、微波中继站、保护通信天线及微波设备电磁窗口用的罩称为天线罩及微波透波墙；天线馈源和相位校正透镜用的罩称为馈源罩。上述雷达罩、天线罩、微波透波墙和馈源罩都是在透过电磁波的情况下用的，可统称为天线罩<sup>[1]</sup>。

设计高性能的天线罩除了具有保护性、传导性、可靠性、隐蔽性和装饰性等功能外，从经济效益上考虑，还有保护天线系统免受强风、酸雨、大雪、冰雹和烈日等破坏性影响，延长整个系统各部分的使用寿命、降低使用成本和操作成本、简化设计、降低维修成本、保证天线表面和位置的精确度、创造良好的工作环境等方面的优点。但天线罩也将对理想的电磁辐射产生影响，使理想的天线性能稍有降低。因此，天线罩设计是结构设计与电性能设计相结合的复杂设计<sup>[2]</sup>。

天线罩是天线系统的重要组成部分，被称为天线系统的“电磁窗口”。天线罩对改善天线特别是天线馈线伺服系统的使用环境有积极的作用。其中飞行器天线罩位于飞行器的头部，多为锥形，有时也有半球形，具有导流、防热、透波、承载等多种功能。天线罩既是制导武器弹头结构的重要组成部分，又是保护天线系统不受高速飞行造成的恶劣气动环境影响、正常进行信号传输工作的屏障。在一些高寒地区、戈壁沙漠、海岛、特殊气候地理条件下，天线罩更是不可缺少的。一些测量精度要求很高的天线，如大型多目标相控阵测量天线、毫米波相控阵测量天线、精密跟踪测量天线，为了确保天线座、天线不受风力、阳光照射引起温差的变形而带来的精度下降，都要求配备天线罩。天线性能的提高，给天线罩的设计、材料选择和加工工艺以及测试方法带来了有挑战性的课题<sup>[3]</sup>。

### 1.2 天线罩的发展过程及现状

天线罩是随着微波天线的发展而发展起来的。在第二次世界大战前后，由于

形势的需要，雷达天线的发展突飞猛进，天线工作的波长日益变短，精度要求越来越高，于是保护天线用的天线罩应运而生<sup>[4]</sup>。较早期的天线罩是飞机上用的小型流线型罩，结构简单，其后出现了大型地面天线罩。如 1946 年，美国康奈尔(comdl)航空实验室进行了充气天线罩的研制，生产了直径 16.8m 的充气天线罩原理样机，并于 1948 年安装在美国纽约西部的港口布法罗(Bufflo)，1955 年就有数百个这样的天线罩为美国陆军服务。为了克服充气天线罩结构上的不足，使之适应更恶劣的环境，1952 年美国开始研制刚性天线罩。1954 年，成功研制了直径 9.5m 的 3/4 截球体增强塑料刚性天线罩。1955 年美国在北极安装了直径 16.8m 的刚性天线罩，并于 1956 年完成了直径 9.5m 金属桁架天线罩的模拟电信实验，使刚性天线罩的发展向前跨了一大步。当时最大的天线罩“赫斯台克”(Haystack)就采用了金属空间骨架的结构形式，直径达到了 45.75m。到了 70~80 年代金属空间骨架罩成为主流天线罩，用于通讯天线、雷达和射电天文望远镜<sup>[5]</sup>。近十几年来，随着新材料的不断涌现，工艺水平的提高，同时高性能雷达对天线罩的要求不断提高，使天线罩的研制开始向高性能方向不断努力，各种高性能的大型复合材料介质天线罩也应运而生。美国将椭球形天线罩与相位校正透镜相结合，用于机载预警雷达，使天线罩的设计达到了高峰<sup>[6]</sup>。

在国外，对于大型天线罩结构研究，美国起步较早。上世纪 70 年代，美国对大型金属空间桁架天线罩(MSF)在概念设计、理论分析方法、具体应用技术开发等方面进行了深入系统的研究，最终成功开发出了直径为 47.75m 的大型天线罩。80~90 年代 ESSCO 品牌的此类天线罩技术上逐渐成熟。美国通信天线公司(AFC)研制的大型介质天线罩也大量的用于军事、航空、气象、天文观测等领域。目前各种高性能的大型空间薄壁、金属空间骨架和各类介质夹层天线罩成为各国研究的重点。在结构强度分析方面，主要根据天线罩的材料特性，利用先进的有限元软件对大型桁架结构进行各种载荷组合下的强度分析和校核，从而使这些地面截球天线罩的环境设计温度可满足 -55~+70℃，抗风设计能力都达到 57~75m/s，甚至更高<sup>[7]</sup>。为了得到更高的电性能要求，减少电损耗，在复合材料成型工艺研究方面，利用复合材料液体模塑成型技术(Liquid Composite Molding)，简称(LCM)及新型的真空辅助注射技术(VARTM)，保证了天线罩材料的介电性能和均匀性要求，使成型的大型曲面介质复合材料板块的结构特性和电性能特性大大提高。Nippon 天线公司(EU)2004 年成功研制出直径 26.14m 几乎整体的大型刚性球形夹层天线罩。由于天线罩用于天线性能测试，对整个罩体的板块型面和边界对接精度要求很高，对接边界采用高精度的 5 坐标数控机床加工成型，使得板块之间镶嵌达到了无缝胶结，整罩无任何金属连接。这种天线罩的材料和成型工艺成本非常昂贵，但电性能达到非常理想的效果<sup>[8]</sup>。美国 2005 年 5 月成功制造和安装了“海基”X 波段的充气天线罩，天线罩重 18000 磅(8165kg)，高 103 英尺(31.4m)，直径 36m，采用

高科技整体复合材料膜制造，抗风能力达到  $57\text{m/s}$ 。国外对大型天线罩的结构、电性能及介质材料的工程应用方面都有相当丰富的理论和工程积累<sup>[9]</sup>。

在国内，我国天线罩的研究起步于 20 世纪 50 年代。1965~1972 年，南京十四所、上海玻璃钢研究所和上海耀华玻璃钢厂合作，研制出我国当时最大的玻璃钢蜂窝夹层桁架天线罩，直径达  $44\text{m}$ <sup>[10]</sup>。1975 后哈尔滨玻璃钢研究所以介质空间桁架薄壁天线罩和金属空间骨架天线罩为研究方向，上海玻璃钢研究所以介质夹层天线罩为研究方向<sup>[11]</sup>。到 20 世纪末，已生产直径  $3\sim28\text{m}$  的地面截球天线罩 200 多部。近年来随着我国大型高性能雷达的相继问世，对大型高性能天线罩的需求也十分迫切，尤其是对天线的低副瓣性能影响较小的大型天线罩，哈玻所相继研制出 C 波段、P/L 波段和 S 波段的大型高性能天线罩。另外上海之合玻璃钢有限公司、上海玻璃钢研究所等单位在高性能雷达天线罩方面也取得了一定的成果，成功研制了 L/S/X 大型宽频段高性能雷达天线罩。这些天线罩大都采用了玻璃钢蜂窝或泡沫夹层板结构，板块采用准随机、随机分割板块使电性能和结构强度得到了很大提高，抗风能力达到了  $67\text{m/s}$ ，上海之合玻璃钢有限公司 2005 年成功的研制了用于高增益天线的  $40\text{m}$  大型介质桁架天线罩。“十五”期间我国对远程精密跟踪测量雷达的研制加大了投入，与之配套的大型金属桁架天线罩也进入到工程研制阶段。中电 14 所、南京理工大学和相关单位对其进行了较为深入的研究试验，并利用有限元方法对天线罩结构载荷进行分析，在大型天线罩结构理论研究方面取得了丰富的成果，此工程现已进入现场施工阶段<sup>[12]</sup>。

我国大型天线罩的研制在结构工程研究方面已经取得了相当大的进步，与国外相比，在与天线罩密切相关的优化分析、基础材料方面还有差距，需要完善。一些用于大型天线罩的高性能的介质基础材料还不能自主生产，基础材料研制和加工工艺上的差距尤为明显，因此还需要工程科技工作者的不断努力。

### 1.3 本文的研究背景

近几十年来，经济发达国家根据雷达、天线等无线通信设备的功能用途，至今已研制了形形色色用途各异的天线罩。它们在航空航天、气象、军事、通讯领域发挥着巨大的经济社会效益，满足了高精度、高稳定性、高可靠性雷达设备对使用环境的特殊要求。大型天线罩工程涉及材料科学、电子、机械、计算机软件仿真分析、工程施工技术等，也是一个国家综合科技水平的标志。特别是近二十年，发达国家的天线罩技术已经取得了长足的进步。与发达国家相比，由于材料等基础科学的研究起步较晚，使得我国在天线罩的结构工程化研究上还有一定差距。

随着我国航空、气象及军事技术的进步和军事形势的发展，进行远程精密跟

踪测量雷达等高精度雷达和高增益天线的研究与制造已成为紧迫的任务，而这些天线系统口径大、精度要求高，特殊地理位置的自然环境对设备的影响较大，配备大型天线罩成为这些雷达、天线必不可少的要求。因此大型天线罩的工程应用需求变得越来越迫切，并且对天线罩的结构提出了越来越高的要求。

## 1.4 本文的主要工作

本学位论文以直径 40m 的光滑球形天线罩和直径 9.144m 的板块划分球形天线罩为工程背景，介绍了天线罩的结构分类、板块划分及制造安装；对随机风速及风载荷的模拟进行了详细的研究；并以商业有限元软件 ANSYS 为工具，对两个天线罩模型进行了结构分析。概括起来本文的工作可以归纳为以下几个方面：

**第一章 绪论。**介绍了天线罩的产生及作用，根据天线罩的发展过程及国内外的发展现状提出本文的研究背景，并阐述了本文的主要工作。

**第二章 天线罩的结构形式研究。**首先研究了天线罩的结构分类；根据天线罩内天线的电性能指标，推导出了天线罩的壁厚计算公式；接着详细的介绍了天线罩的板块划分方法及原则；最后总结了大型介质天线罩的材料成型工艺和现场的安装情况。

**第三章 风载荷的离散及随机风的数值模拟。**首先阐述风的特征、结构上风载荷的计算；接着用 ANSYS Mechanical APDL 语言对静风荷进行离散化处理；重点讨论脉动风的特性，介绍用谐波合成法模拟随机风速，给出将风速转化为风荷梯度的计算方法；最后用 MATLAB 编程，实现随机风速的数值模拟并给出了随机风速与风载荷的关系。

**第四章 天线罩的结构分析。**首先以有限元方法中的静态分析、模态分析、及瞬态分析理论为基础，结合 ANSYS 有限元分析软件和作者编制的风荷自动加载程序，对直径 40m 天线罩结构进行了静力分析、模态分析、随机风荷作用下的瞬态响应分析；接着对直径 9.144m 的板块划天线罩进行了结构分析，探索了板块划分对天线罩力学性能的影响；最后综合分析结果，验证结构是否满足刚度和强度设计要求。

**第五章 直径 40m 天线罩的稳定性分析。**首先介绍稳定性分析的基本理论和 ANSYS 中的屈曲分析；接着对直径 40m 天线罩结构进行在均匀外压作用下和 57m/s 风载荷作用下的稳定性分析，并给出前六阶的屈曲模态；最后与解析解进行对比，验证结构的稳定性。

**第六章 总结与展望。**总结本文研究工作的成果与结论，并对以后进一步的研究工作提出展望。

## 第二章 天线罩的结构形式研究

### 2.1 引言

随着现代科学技术的发展，天线的作用越来越重要。而天线罩是随着天线、通讯科技的发展需要而诞生的一种空间结构体。无论何种形式的天线罩都是天线前面的障碍物，对天线辐射波会产生吸收和反射，改变天线的自由空间能量分布，并在一定程度上影响天线的电气性能。因此随着天线性能要求的提高，对天线罩的研制也提出了新的课题：选用哪种类型的天线罩，天线罩的板块划分方法，天线罩组成材料的选取及天线罩的制造和安装等。这些因素直接影响天线罩的性能，进而对天线产生影响。因此，有必要对上述的诸因素进行深入的研究。

### 2.2 天线罩的结构分类

#### 2.2.1 按截面形式分类

大型天线罩按壁厚截面结构形式分类：均匀单层、A型夹层、B型夹层、C型夹层、多层结构、含金属物的人工介质以及空间骨架结构；根据夹层材料又分为泡沫夹层和玻璃蜂窝夹层。下图 2.1 描述了各种截面的结构形式。

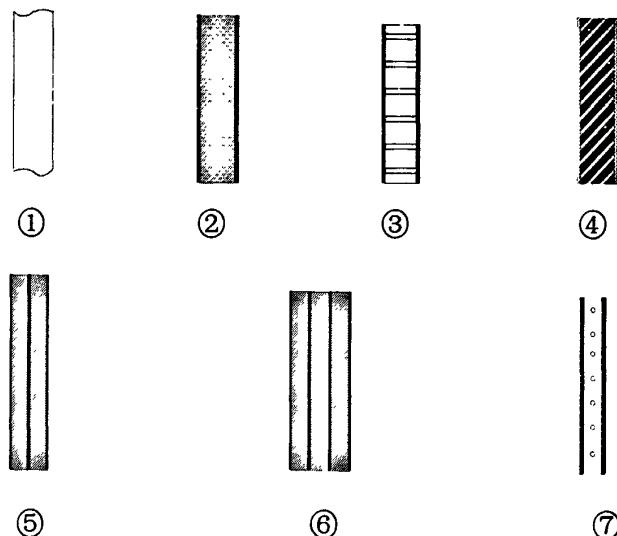


图 2.1 各种截面的结构形式

①-单层；②-介质芯 A 型夹层；③-蜂窝 A 型夹层；④-B 型夹层

⑤-C 型夹层；⑥-多层结构；⑦-具有金属含物夹层

各种截面形式的具体描述如下。

### ★均匀单层结构

均匀单层结构分为两种：一种是壁厚远小于介质波长，如  $1/10\sim1/20$  介质波长，称为薄壁结构。它比较适用于波长比较长的天线，通常 10cm 以下波段的天线采用这种结构形式。另一种是壁厚相当于介质波长一半的整数倍，称为半波壁结构。

### ★A 型夹层结构

A 型夹层结构包括介质芯 A 型夹层和蜂窝 A 型夹层。它是由两层比较致密的薄的表面层和低介电常数、低损耗角正切、低密度的中间层组成，这种结构形式具有较高的强度和质量比。

### ★B 型夹层结构

B 型夹层结构与 A 型夹层结构相反，表面层采用介电常数低的介质材料，而中间芯层采用较致密的高介电常数材料，为保证匹配，中间层介电常数为外层介电常数的均方值。

### ★C 型夹层结构

C 型夹层结构由两个 A 型夹层结构组成，加在一起共五层，结构强度有所改善，且有较好的宽频带特性。

### ★含金属物的介质层结构

含金属物的介质层结构的介质中的金属物呈球粒状或薄带状对称分布，调节金属物的形状及分布可以有效地改善介质层导纳特性。

### ★金属骨架结构

金属骨架结构采用增强塑料板或布以各种结构形式覆盖在梁架上，用结构梁架承载负荷。地面天线罩多采用此种结构形式，多呈球形或半球形。

除以上各种不同结构形式外，还有双层和多层结构，多层结构可以按照 A、B、C 型夹层结构形式任意组合，有时可达十余层<sup>[13]</sup>。

## 2.2.2 按结构特点分类

大型天线罩从结构特点上分为空间桁架式天线罩和薄壳式天线罩。

a) 空间桁架式天线罩采用自行式支撑结构设计，适用于大型的天线罩结构。根据雷达通讯设备的用途和工作环境，大型桁架天线罩从材质上主要分为金属桁架天线罩和介质桁架天线罩，工作波长高于 L 波段的常用金属桁架天线罩，低于 L 波段的常用介质桁架天线罩。

① 金属桁架天线罩<sup>[14]</sup>的金属肋比塑料肋的弹性模数大得多。建造一个金属空间桁架，其金属肋的横断面比塑料梁杆(肋)小得多，却可以承受同样的结构负荷，而且在高频运用条件下，其传输损耗比介质肋来得小。图 2.2 所示为一典型的金属

桁架天线罩。

金属空间桁架天线罩是一种高通滤波器，其用途广泛，尺寸可大可小，能够承受较大的风载，且宽带性能好，性价比高。一般来说，它是由许多平面基本三角形单元组合而成，而三角形单元主要由金属桁架、中极以及薄膜组成，如图 2.3 所示<sup>[15]</sup>。

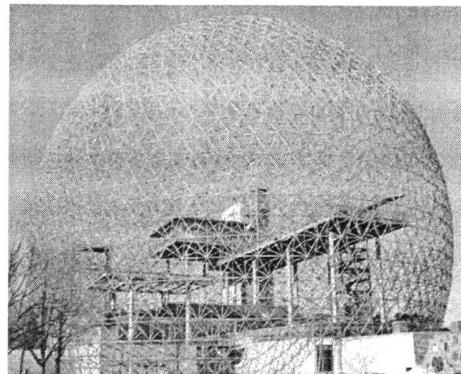


图 2.2 典型的金属桁架天线罩

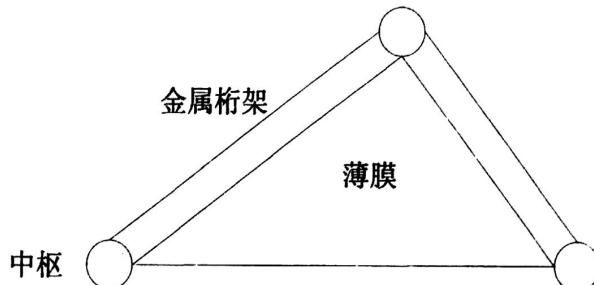


图 2.3 金属空间桁架天线罩三角形单元示意图

②介质空间桁架天线罩，通常是由许多自成平面(或球面的一部分)的介质层板构成的，其结构载荷由平板的翼缘（凸缘）承担。大型介质桁架天线罩的框架法兰材料和面板薄膜材料都采用玻璃钢制成的整体天线罩板块，球面结构形式多采用多边形随机分割。面板由曲面肋板块、圆顶型肋板块、加强肋和基础底座组成。曲面肋板块四周有边加强肋，加强肋上有孔，孔与孔相对应。曲面肋板之间通过加强肋用螺栓将其连接成环型壳体，圆顶型肋板块通过环型加强肋用螺栓与曲面肋板块构成的环型壳体连接成为球壳体；并形成一个骨架整体结构。曲面肋板块之间的连接缝隙、圆顶型肋板块与环型壳体之间的连接缝隙填以弹性防水腻子，上面有可伸缩的软盖条，形成光滑的球壳体。球壳体的底部为基础底座，基础底座用钢筋混凝土制成并预埋螺栓。预埋螺栓的位置与球壳体底部曲面肋板块四周边肋上的孔相对，通过螺栓将球壳体固定于基础底座上<sup>[16]</sup>。如图 2.4 为一种介质桁架罩。

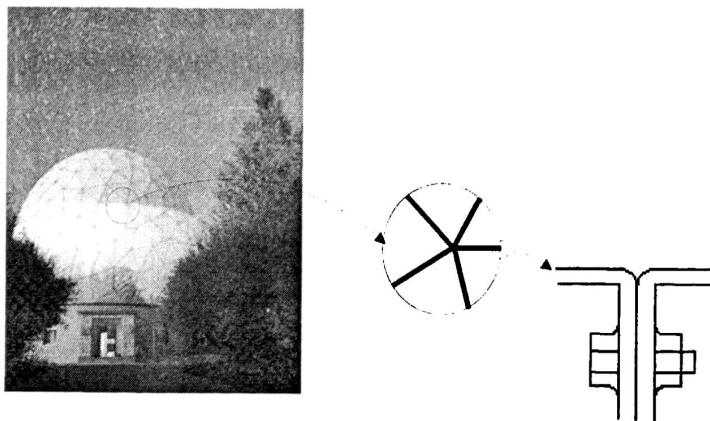


图 2.4 介质柄架天线罩

b)薄壳式天线罩又分为刚性壳体天线罩和充气式天线罩,纯刚性壳体天线罩主要用于小型天线罩,而充气式天线罩的尺寸相对较大。

①在壳体结构天线罩中,嵌板通常是弯曲的,其结构负载靠壳体作用来承担。这类天线罩没有加强肋,如玻璃钢泡沫型天线罩等。

玻璃钢泡沫型天线罩,球面结构形式多采用多边形半随机分割,面板截面常采用A型或C型夹层结构形式。A型夹层面板由两个等厚对称的高强度高密度的表皮和一个低密度的芯子组成。它的优点是强度重量比和刚度重量比大,适用于一定波长的大型地面天线罩。但缺点是工作频带窄,制造复杂、成本高。当A型夹层不能满足要求时,可采用由奇数层组成的多层次夹层结构。另外夹层天线罩的设计主要与天线的最高工作频率和风速的大小有关,随着夹芯层厚度的增加,临界扭曲破坏风速和安全系数裕度也相应增加。但天线的最大工作频率则相反,随着芯层厚度的增加而降低。因此当给定天线罩的临界扭曲安全系数,随着天线工作频率的增加天线罩承载的额定风速将减小。与单层介质板相比,A型夹层天线罩具有透波性好、频带宽等优点,因此广泛应用于高质量地面雷达天线罩的制造中。图2.5所示为某A型夹层泡沫天线罩。

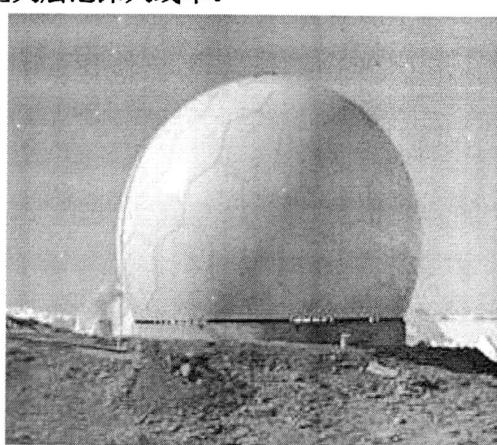


图 2.5 A 型夹层泡沫天线罩

②充气式天线罩采用膜材料整体焊接而成，球形薄膜在截口四周用压板固定于气密性的平台上。周围或用绳索拉紧，或用其他方法固定，内部充气。它的优点是罩壁薄且均匀，电气性能好，适于宽频带工作；罩体柔软便于折叠，重量轻、体积小，运输、储藏、安装方便。缺点是需要持续向罩内充气，以维持罩子形状和必要的刚性。若充气设备发生故障，会使罩子倒塌而损坏天线。如图 2.6 所示的充气天线罩，罩体采用高性能复合材料膜制造。

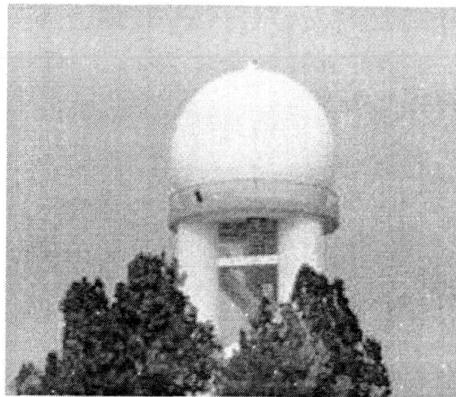


图 2.6 充气式天线罩

### 2.3 天线罩厚度的确定原则

对于天线罩的设计来说，首先要做的是根据特定的要求确定基本的结构形式。如天线罩的形状、结构尺寸、板块划分方式、板块的断面结构等<sup>[17]</sup>。这些结构参数的确定同时受到电气性能和结构性能的约束。下面根据电气性能的要求来确定天线罩厚度的初始值。

#### (1) 蒙皮厚度设计

在夹层结构中，板材的最大功率透过系数由下式决定：

$$\tau_{0\max}^2 = (1 - B_{1cb})(1 - B_{2cb}) \quad (2-1)$$

其中：  $\tau_{0\max}$  —夹心结构的最大功率透过系数；

$B_{1cb}$ —一次传输衰减因子，与电波极化方向无关；

$$B_{1cb} = B_c + 2B_b;$$

$B_{2cb}$ —多次反射引起的衰减因子，与电波极化方向有关。

$$B_b \approx \frac{2\pi d_b}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_b \operatorname{tg} \delta_b}{[\varepsilon_b - \sin^2 \theta_0]^{0.5}} \quad (2-2)$$

$$B_c \approx \frac{2\pi d_c}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_c \operatorname{tg} \delta_c}{[\varepsilon_c - \sin^2 \theta_0]^{0.5}} \quad (2-3)$$

$$B_{lcb} = \frac{2\pi d_c}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_c \operatorname{tg} \delta_c}{[\varepsilon_c - \sin^2 \theta_0]^{0.5}} + \frac{4\pi d_b}{\lambda_0} \frac{\varepsilon_b \operatorname{tg} \delta_b}{[\varepsilon_b - \sin^2 \theta_0]^{0.5}} \quad (2-4)$$

$$B_{2cb} = \frac{4r_{ab0}^2(1-r_{ab0}^2)B_b + [(r_{cb0}-r_{ab0})^2 + 4r_{ab0}r_{cb0}\sin^2 \phi_b]B_c + 4r_{cb0}r_{ab0}\sin 2\phi_b \psi_{cb}}{(1-r_{ab0}^2)(1-r_{cb0}^2)} \quad (2-5)$$

其中:  $\varepsilon_b$ 、 $\varepsilon_c$ —分别为蒙皮和夹心材料的介电常数;

$\operatorname{tg} \delta_c$ 、 $\operatorname{tg} \delta_b$ —分别为蒙皮和夹心材料的介质损耗角正切;

$d_b$ 、 $d_c$ —分别为蒙皮和夹心材料的厚度。

由上式可知, 夹层结构的传输系数与  $d_b$ 、 $d_c$ 、 $\operatorname{tg} \delta_c$ 、 $\operatorname{tg} \delta_b$  成比例关系, 也就是  $d_b$ 、 $d_c$ , 由结构强度和最佳透过条件共同决定。因此降低一次传输损耗的最有效办法就是选择低损耗材料, 对多次传输损耗也是如此。在低损耗材料的条件下, 特别是垂直极化波的多次反射引起的衰减不可忽略时, 蒙皮愈厚、衰减愈大<sup>[18]</sup>。

单层罩又分为薄壁罩和半波长壁罩, 薄壁和半波长壁的反射系数都趋近于零。薄壁是指壁的电气厚度小于  $\lambda/20$ 。

即有如下等式关系:

$$\sqrt{\varepsilon_b d_b} = \frac{\lambda}{20} \quad (2-6)$$

由于光速公式:  $c = \lambda v$

如天线设计频段为 6.0~8.5GHz, 中间频点为 7.25GHz。经过计算获得夹心结构的蒙皮厚度值为 1.035mm, 从成形工艺考虑取整为 1.000mm。

## (2) 夹芯厚度设计

当  $\phi b + \phi_{r \rightarrow a} = n\pi$  时, 对称 A—夹层平板有最大的功率透过系数, 此时:

$$\frac{d_c}{\lambda_0} = \frac{n\pi - \phi_{r \rightarrow a}}{2\pi(\varepsilon_c - \sin^2 \theta_0)^{0.5}} \quad (2-7)$$

$$\phi_{r \rightarrow a} = \operatorname{arctg} \frac{\left(r_{cb0} - \frac{1}{r_{cb0}}\right) r_{ab0} \sin 2\phi_b}{(1+r_{ab0}^2) - r_{ab0}(r_{cb0} + \frac{1}{r_{cb0}}) \cos 2\phi_b} \quad (2-8)$$

由上式可知,  $\phi_{r \rightarrow a}$  与夹芯厚度  $d_c / \lambda_0$  无关, 但因为  $r_{ab0}$ 、 $r_{cb0}$  与极化有关, 所以对于不同的极化, 在同一入射角下,  $\phi_{r \rightarrow a}$  的值不一样。固由此而决定的  $d_c / \lambda_0$  也不一样。在同样截面结构的情况下, 对称 A 型夹层平板的水平极化的透过系数略大于垂直极化的透过系数。所以在一般情况下, 可以由垂直极化的情况来决定平板的最佳夹芯厚度。对于垂直极化波,  $\phi_{r \rightarrow a}$  随入射角  $\theta_0$  的变化不明显, 即  $\phi_{r \rightarrow a}$  是  $\theta_0$  的缓变函数。所以,  $d_c / \lambda_0$  随入射角  $\theta_0$  的变化主要决定于  $(\varepsilon_c - \sin^2 \theta_0)^{0.5}$ 。

对于球形罩和柱形罩，电波对罩壁的入射角都较小，最大入射角约在 $50^{\circ}$ 以内。所以，最佳入射角可选在 $20^{\circ}\sim40^{\circ}$ 之间。将相关数据代入计算得到 $d_c/\lambda_0 = n/1.8$ ，从而可得出相应厚度的芯层<sup>[19]</sup>。

## 2.4 天线罩的板块划分方法及制造安装方式

地面天线罩大都架设在山顶高岗上，上山的道路一般也都是崎岖狭窄的土石路。并且由于地面天线罩本身的体积比较大，因此尽管整体成型的天线罩能使电气性能均匀一致，达到较高的水平，但考虑到运输等因素，天线罩大多都要进行板块划分，但板块划分又给制造安装带来了问题。一般来说，划分板块的规格越少，制造模具的规格种类就会越少，制造成本就会越小，安装也越容易。

### 2.4.1 天线罩板块划分方法

大型天线罩的板块划分无论采用何种形式的划分方法，都是以空间正多面体即正十二面体、正二十面体为基础，并在此基础上进行规则的或随机的划分<sup>[20]</sup>。这样可以使空间板块的形状种类相对减少，减少制造成本，同时满足电性能要求。

#### 1、经线划分法

对球形充气天线罩和较小型的球型玻璃凸缘天线罩，常用经线划分的方法<sup>[11]</sup>。

具体做法：将基圆分作若干等份，过各分点的经线，把罩体等分为若干块瓜瓣状单元件，如图 2.7(a)所示。为了避免顶点处密集的接缝，再加一块圆形顶盖单元件。如果忽略该圆形单元件，那么它就是迄今为止唯一的单种规格的单元件的分块形式，也可称为西瓜皮瓣分块法。对大型天线罩来说，采用此分块法会给制造和运输带来麻烦，同时由于从上到下的同一经度的经线接缝会引起较大的扩散副瓣，与极低副瓣的天线是不匹配的。

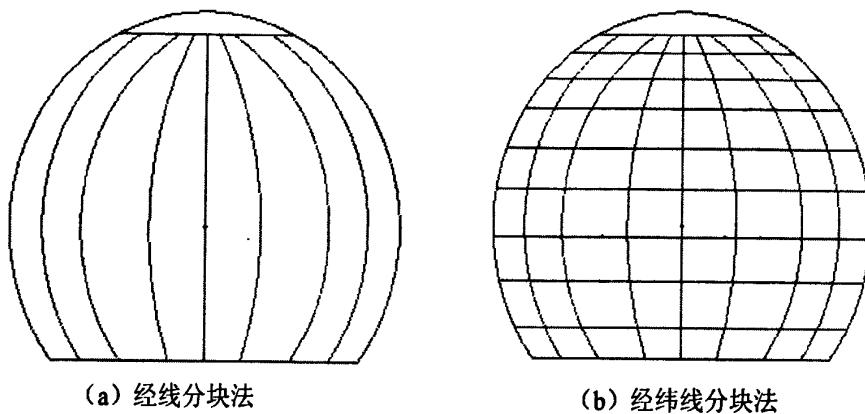


图 2.7 天线罩的划分方法

## 2、经纬线划分法

经纬线划分法<sup>[2]</sup>的优势是板块尺寸调节余度较大，可按要求随意调整。设计时尽可能将板块调节成细长结构，使宽度小于3.5m，长度尽可能长，以减少连接缝。

具体做法：它在经线分块的基础上为了方便大型天线罩的制造、运输和安装，再添加纬线，使板块尺寸减小。如图2.7(b)所示。

## 3、在球面正多面体基础上的经纬线划分法

此法属于从球面正多面形出发的分块方法。长期以来，人们试图找到一种大型球面天线罩的分块方法，希望这种分块方法得到只有一种规格的单元件，于是想到了按正多面形(如果一个凸多面体的表面都是全等的正多边形，并且所有的多面角全部相等，这样的凸多面体表面就称正多面形)分块。在天线罩设计中一般采用正十二面体。如图2.8所示为球面正十二面体。

前面已经提到的经向分块，虽然满足单元件为一种的要求，但就大型天线罩而言，从工艺、制造、运输、安装尤其电性能看，是不可取的。因此现阶段较为理想的分块方法是：先将球面分为正多面形，然后从正多面形出发，作进一步划分。这种分块形式既基本保证了单元之间的接缝在各个方向上均匀分布，使其对电气性能，特别是对副瓣和瞄准误差的影响减少，而且只要在正多面形的进一步划分中选择适当的处理，就可使单元类型减至最少。

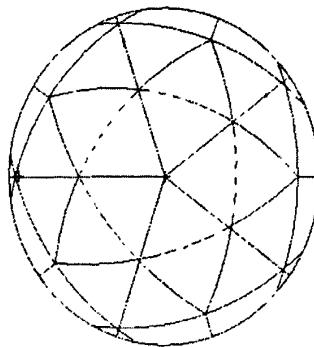


图 2.8 球面正十二面体

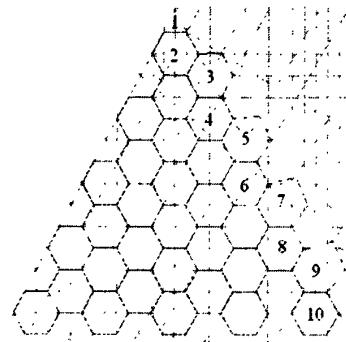


图 2.9 球面等腰三角形的不规则分块

### (1) 规则划分法

当天线罩直径比较小时, 例如  $R_0=8.0\text{m}$ 。先将球面分成十二个全等的球面正五边形, 再将每个正五边形分成具有公共顶点五个相等的球面等腰三角形。即把整个球面分割成 60 个全等的球面等腰三角形。这种划分仅有一种规格的单元件(基础部分除外)。

### (2) 不规则划分法

对于更大型的天线罩来说, 像上面所述那样划分 60 个球面等腰三角形是不行的, 因为每一块的面积太大。为了便了实现, 可在上述规则分块法的基础上再将每一个球面等腰三角形进行分块。如图 2.9 所示对球面等腰三角形进行再划分。

首先, 将球面等腰三角形底边上的高 14 等分(即把某一球面等腰三角形的高放在赤道线上, 将高分成 14 等份)。然后过各分点, 在球面上分别作垂直于此高且具有同一个南北极的一族子午圆(经线); 同时让其与球面等腰三角形的两个腰分别相交(注意该交点并不等分腰); 过这些交点再作与此高所在的赤道圆周具有同心轴的一族平行圆环(纬线); 这些圆环与底边及前面过各等分点所作的一族子午圆(经线)相交(但它们并不等分这些线)。最后适当连接有关各点, 即构成所要求的六边形及五边形。由图 2.9 可以看出, 这种分块方法共有十种基本单元件, 便于批量化生产。

## 4、在球面正二十面体基础上的有规则划分法

首先将球面分成 20 个等边的球面三角, 如下图 2.10 示。

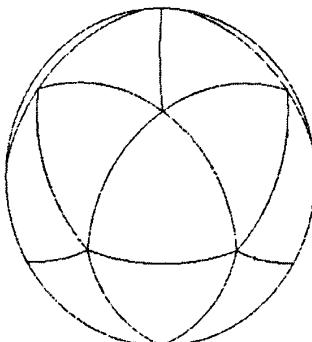


图 2.10 二十个球面等边三角形

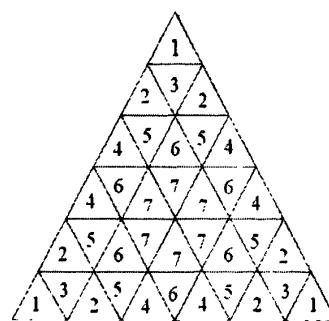


图 2.11 正二十面体的规则分块法

然后将每个球面等边三角形的每一边分成若干等份，例如 6 等份。如图 2.11 所示。这样又将球面等边三角形再分成有七种规格的 36 个球面三角形。第一种规格为 3 块；第二种为 6 块；第三种为 3 块；第四、五、六、七种均为 6 块。

这种分块方法的规律性较强，肋的取向基本上在三个方向构成有规律的排列，但是这种分块形式会形成大的扩散副瓣。对球面等边三角形的每边的等分数不同，可得到不同规格的单元件。图 2.12 所示的天线罩就是基于对球面三角形的每边进行不同的等分而设计制造的。

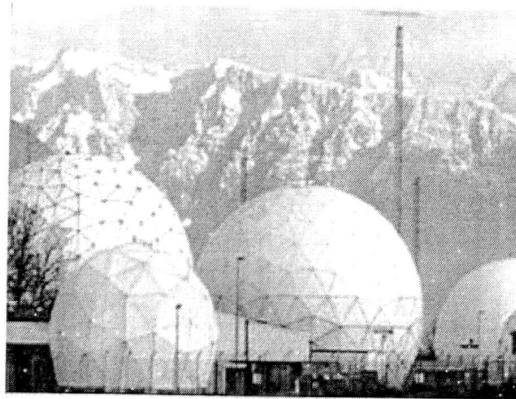


图 2.12 球面三角形分割所得到的天线罩

### 5、在球面正二十面体基础上的无规则划分法

同前，先将球面分成 20 个等边球面三角形。将其中心投影构成正 20 面体（图 2.13）；然后再从每个球面正三角形的三边分别作高(也是中线)，从而将每个球面正三角形分成三个相同的不等边球面四角形，如图 2.14 所示。每个球面四角形又分成两个三角形，其中一个是另一个的镜像。将这种划分得到的球面三角形称为“阴影线三角形”，全球共分为 120 个阴影线三角形。

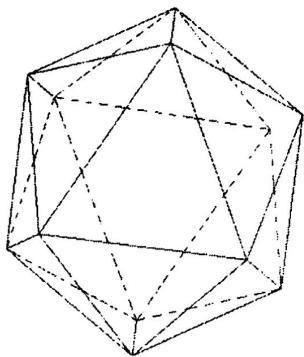


图 2.13 正二十面体

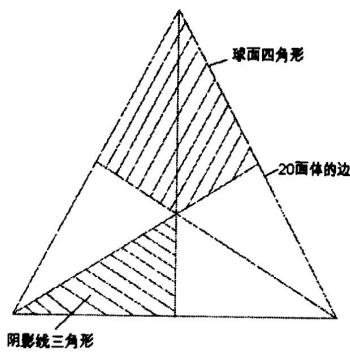


图 2.14 二十面体的阴影线三角形

根据球半径的大小，又可以将一个球面四边形再进行划分，可以分划为  $14\frac{1}{3}$  、

17、18或 $28\frac{1}{3}$ 个不等的球面三角形。下图 2.15 是将球面四边形 ADFG 进行 $14\frac{1}{3}$ 划分。

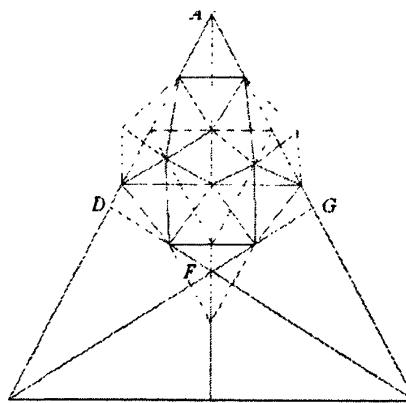


图 2.15 球面四边形 $14\frac{1}{3}$ 划分

电性能要求地面天线罩的板块具有一定的不规则性(即连接缝尽量避免平行边), 板块之间接缝要少(即板块尺寸规格尽可能少), 以减少连接螺栓对电性能的不利影响。因此, 三角形板块已不能满足电性能较高的天线罩的性能要求, 必须对板块进行随机化处理。下表为不同划分形式的板块面积及种类。

表 2.1 不同划分形式的板块面积及种类

划分形式	整球板块数量	平均面积	规格种类	边界板块种类
12 面体	12	$4\pi r^2/12$	1	1
20 面体	20	$4\pi r^2/20$	1	1
32 面体	32	$4\pi r^2/32$	2	2
60 面体	60	$4\pi r^2/60$	2	3
20 面体边长 2 等分	80	$4\pi r^2/80$	4	4
92 面体	92	$4\pi r^2/92$	3	3
20 面体边长 2 等分	180	$4\pi r^2/180$	9	6
随机划分 2°	180	$4\pi r^2/180$	3	4
212 面体	212	$4\pi r^2/212$	4	5
60 面体边长 2 等分	240	$4\pi r^2/240$	4	5
随机划分 1°	362	$4\pi r^2/362$	8	7
212 面体加密	392	$4\pi r^2/392$	6	6
60 面体边长 3 等分	540	$4\pi r^2/540$	9	9

将“足球”形板块按图 2.16(a)所示图形进行划分, 其中  $AP=BQ$ ,  $BE=CF$ , 中间为球面正五边形和正六边形。按图 2.16(b)、(c)所示图形进行连接即可。根据

罩体直径调整中间小六边形的边长，可得到各种不同板块尺寸。整罩共  $7 \times 20 + 6 \times 12 = 212$  块板块，尺寸规格为 4 种。

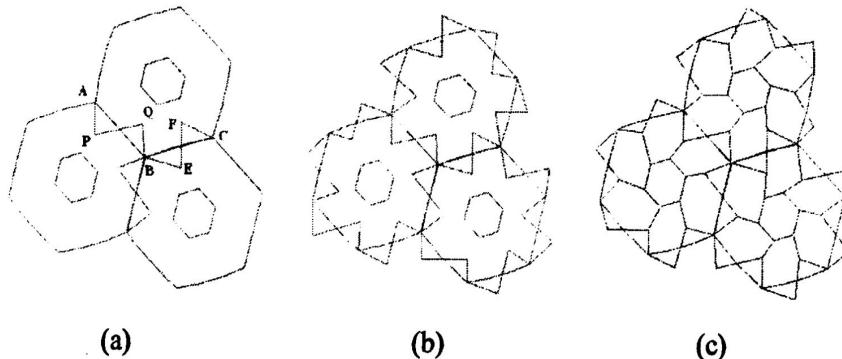


图 2.16 无规则划分法

212 面体的天线罩尺寸规格少，易于批量化生产，在实际中应用比较广泛。图 2.18 为某 212 面体天线罩。

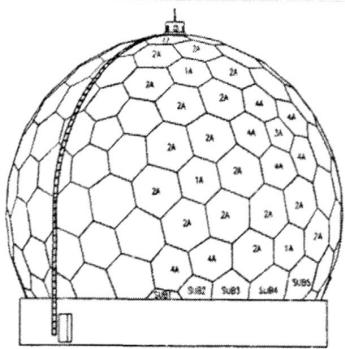


图 2.17 二百一十二面体球罩分布

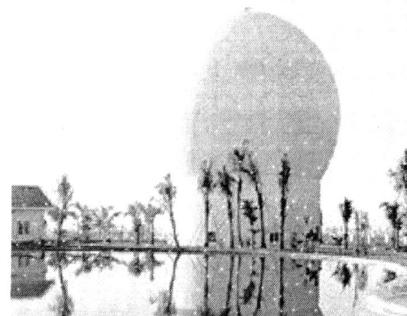


图 2.18 某二百一十二面体天线罩

## 6、多边形随机划分法

多边形随机划分是在多边形准随机划分的基础上，对单元基本划分的随机调整，而得到的一种划分方法<sup>[1]</sup>。例如，某直径为 9.144m 的 A 型夹层泡沫天线罩的板块划分方法即为多边形板块的随机划分。在截高为 7.904m 时，天线罩共分为 49 块，有四边形 5 块，六边形 44 块，其中六边形又分为 8 种，分块后的天线罩如图 2.19 所示。经检验，此种分块方式可以较好的满足天线罩的电性能的要求，并具有一定的强度和刚度，抗风能力达到 57m/s 以上。

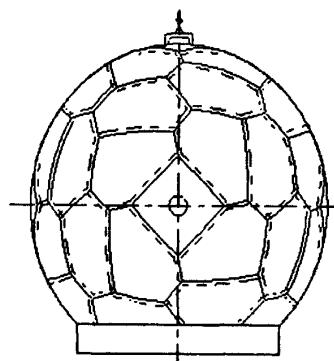


图 2.19 天线罩的随机划分

#### 2.4.2 天线罩的工艺制造及安装方式

无论金属桁架结构天线罩还是介质天线罩，透波介质材料的性能和工艺在天线罩工程中起着关键的作用。

工艺方法一般以手糊成型工艺为主<sup>[21]</sup>。根据天线罩板块的结构特点和电气性能的要求，对于介质板型玻璃钢天线罩常采用湿法手糊工艺；而夹层结构玻璃钢天线罩常采用湿法、半湿法手糊工艺，并结合真空袋压或加压袋压技术，以保证夹层结构的蒙皮和芯材间的紧密结合。

手糊成型工艺一般采用不饱和聚酯树脂和环氧树脂作为基体<sup>[22]</sup>，增强材料常用玻璃纤维布。成型过程依次为：向模具上涂脱模剂，喷涂胶衣，铺放增强材料并浸渍树脂，然后用刮板和辊子使纤维浸透，并驱除气泡。

真空按压或加压袋压技术，是将气体的压力传递到未固化的玻璃钢制品表面，达到赶除空气、层合致密的一种方法，且设备费用较低，适用于双曲面的玻璃钢大型天线罩的成型。

天线罩的安装质量是保证天线罩功能发挥的最后一道关口，是保证天线罩性能稳定可靠的重要方面。一方面由于天线罩多数安装在高山沿海一带，气候条件十分恶劣。在这种情况下，保证罩子的安装质量就成为很困难的问题；另一方面随着天线技术的发展对天线罩的性能要求也不断提高，天线罩结构和单元板块的分割也发生了很大的变化，使得天线罩的安装难度不断增加。所以应有一支精干的安装队伍，具有良好的技术和组织能力及安装经验，确保安装工作在短时间内完成。

除航海雷达、气象雷达安装的地方有时有使用吊车条件外，一般情况，天线罩的安装都在无吊车的情况下进行。满堂红架是安装天线罩，特别是安装直径 20m 以上随机分割的天线罩，常常采用的方法。

一般常规罩在罩内侧架设满堂红脚手架，就可完成天线罩的安装。对于高性

能天线罩，螺丝安装都是从罩外向内安装，因此还应在罩外再架设一个简易的可移动的脚手架。天线罩安装脚手架强度值高于一般的建筑用脚手架，以便于单元板块吊装。

板块组装要按照预先设计好的板块顺序进行。安装第一层时先选择背风和非电磁窗工作位置；安装含有门的板块，然后按画好的基准线将第一层板块拼好，并用螺栓连接。为防止板块外倾，须用绳索将板块与架杆固定。其他层的安装与第一层的安装方法相同。在安装时要求一天内完成一层，并将镶嵌件如梯架、照明线等同时安上。放置平台以方便施工，内侧布置之字形梯子。大型的天线罩其顶部罩体的安装尤为困难，一般采用地面组装，整体吊装的方法进行<sup>[23]</sup>。

## 2.5 天线罩的辅助结构

为保证大型天线罩的正常使用，根据天线罩的结构形式配备相应的辅助设施。如基础结构、出入门、照明、避雷、预警、通风等辅助结构。辅助结构是天线罩不可分割的组成部分，对天线罩的安装、安全、维修、保障天线罩使用寿命都有重要的作用。

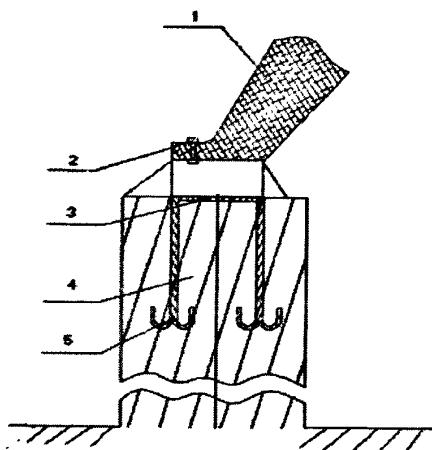


图 2.20 某介质天线罩与基础连接结构形式

1.边界罩 2.连接螺栓 3.预埋环 4.基础墩 5.预埋地锚

天线罩与基础的连接是天线罩稳定的基础。工程经验表明，天线罩的破坏经常从罩体的根部开始。基础的结构形式至关重要。介质天线罩底部常制作成内突形，用螺钉连接在钢筋混凝土结构上的钢制环形梁上，接缝处涂密封硅胶。

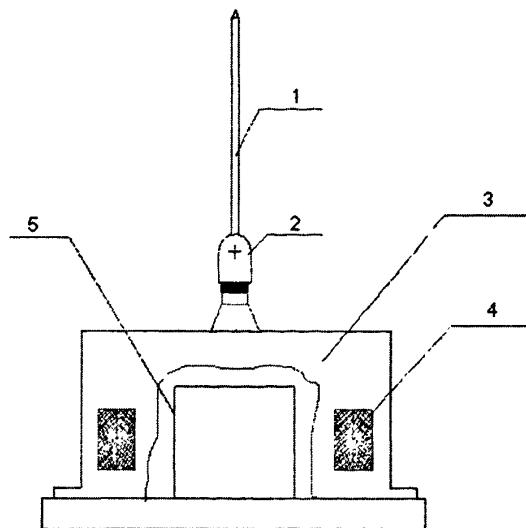


图 2.21 天线罩避雷、预警、通风结构

1.避雷针 2.预警灯 3.通气罩 4.防护网 5.内防护罩

大部分的天线罩避雷、预警、通风装置都安装在天线罩顶部。如图 2.21 为某种介质天线罩避雷、预警、通风结构。从经济性上考虑，大型介质天线罩常采用顶部被动通风设计。利用基础底部通风口与顶部通风，直接在钢筋混凝土基础的围墙上预留若干通风窗，并设置开关装置。通风孔与通风窗加装金属防鼠网。在天线主要工作方位的相反方向安装天线避雷铜带。平台基础上预留避雷地网接头，天线、天线罩和地基避雷网相连。避雷针安装在顶部通风罩上。同时内部保护罩可以防水和风沙。大型天线罩的预警灯在不影响电性能的情况下，可在罩体顶部或侧面四周均匀安装 4~8 个，对罩体进行整体预警<sup>[16]</sup>。

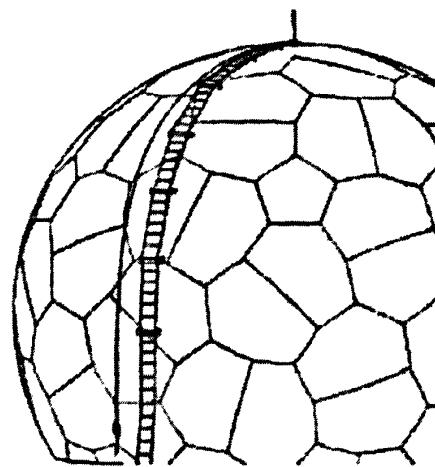


图 2.22 天线罩的维修爬梯

为了确保雷达天线罩的正常使用，必须对局部破坏或脱落的罩体、腐蚀的连接螺栓、板块联接密封脱落等情况进行维修。结构上设计内部和外部维修软梯（如图 2.22 所示），外部软梯可沿罩体 360 度转动，保证罩体外部任意位置的维修。罩

体内部维修有时可借助天线辐射梁架设维修爬梯，维修爬梯随天线方位俯仰转动，保证覆盖整个罩体内部<sup>[2]</sup>。

## 2.6 本章小结

首先本章对国内外各种球形天线罩进行分类、比较分析，给出了地面各种大型球形天线罩的结构特点：金属骨架适于高频和宽频带工作，制造容易，价格较廉；夹层天线罩的强度重量比和刚度重量比大，抗风能力强，使用周期长；而充气天线罩，其罩壁薄且均匀，电气性能好，适于宽频带工作。

接着又介绍了多种球面天线罩的板块划分方法，并对每种方法进行了详细说明。通过对比这些划分方法的异同，对大型天线罩的结构和建模有了定性的认识，同时为天线罩结构设计和力学分析奠定充分的数据基础。

最后介绍了大型天线罩的制造安装方法。可靠、安全、经济的天线罩施工方法，在大型天线罩安装施工中有着重要的意义，为具体工程的实现奠定了基础。

## 第三章 风载荷的离散及随机风的数值模拟

### 3.1 引言

风载荷是天线罩的主要载荷之一，尤其是处在沿海和野外山头上的天线罩，风载荷将成为其最主要的载荷。一般来讲，风载荷由两部分组成：一是平均风（稳态风）；一是脉动风（瞬态风）。根据天线罩结构的特点，结合有关资料<sup>[24][25]</sup>研究结果对风荷作如下假设：(1)风荷为平稳的且为高斯（正态）分布的随机过程；(2)任一瞬时，天线罩球面各点处的风是完全相关的，而且当风的波长越长、天线罩结构尺寸越小时，这种相关性就越强。

一方面，天线罩外表面是一球曲面，各个点处的风压大小不相同，为了将风载荷真实的施加到天线罩上，就要对风载荷进行离散化处理；另一方面，脉动风荷载是随机荷载，又是风力中的动力成份，它使结构产生随机振动。因此，在计算结构随机风振之前，必须对风的概率特性作一全面了解，从而对随机风进行模拟。

### 3.2 风的概述

#### 1、基本风速

风在流动过程中必然会遇到各种障碍物，风速将会减小，其减少的程度与障碍物的尺度、密集度和几何布置密切相关。一般来说，地面上的障碍物大且密集，则认为该地面是粗糙的。风吹过粗糙的表面，能量损失多，风速减少快；相反，则风速减速慢。同时，地面障碍物高度不同，对风速的影响也不同。风速随高度的增加而增大。因此，有必要规定某一高度，并在一定条件下分析风速和风压，这一高度处的风速和风压常称为基本风速和基本风压。对标准条件下测得的风速记录数据经过数据统计分析，进而得到该地的最大平均风速。标准条件是指标准的地面粗糙度类别、标准高度、基准重现期、平均风时距和平均风概率分布<sup>[26]</sup>。

#### 2、标准高度

在同一地点，离地越高，地面的障碍物对风速的影响越小，能量消耗逐渐减小，相应的风速随着距地面高度的增加而变大。我国规范规定离地 10m 高为标准高度。需说明，标准高度取值的差异并不影响风速本身的大小，仅与风速样本的取值条件有关，不同的高度值可通过换算得到。

#### 3、基准重现期

在工程中，不能直接选取各年最大平均风速的平均值进行设计，而应该取大于平均值的某一风速作为设计的依据，使结构设计风压值有一定的保证率。即从概率的角度分析，在间隔一定的时间之后，出现大于某一风速的年最大平均风速值，我们称这个间隔期为重现期。我国规范规定基本风速的重现期为 50 年，取一年最大的平均风速作为一个数理统计的样本。重现期为 T 的基本风速，在任一年中超越该风速一次的概率为  $1/T$ ，保证率  $p$  为

$$p = 1 - \frac{1}{T} \quad (3-1)$$

#### 4、梯度风高度

在靠近地表的某一高度范围内，由于地表摩擦阻力的影响，风速的平均值将随高度的降低而减小。至地表附近某高度风速为零，高度达到 300~600m 时，摩擦阻力的影响将消失，风速趋于常数，这一高度称为梯度风高度。该高度以下即为大气边界层。在大气边界层内，当风受到结构物阻碍时，它的部分动能将转化为作用在结构物上的外力，这种外力即所谓的风荷载。大多数工程结构都处于大气边界层以内，因此结构风工程也只针对大气边界层进行研究。

#### 5、平均风速

平均风速随高度变化的规律一般可有两种表达形式，即按边界层理论得出的对数风剖面和按实测结果推得的指数风剖面。如下二式所示：

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_1} = \left[ \frac{z}{z_1} \right]^\alpha \quad (3-2)$$

$$\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}_1} = \left[ \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_1}{z_0})} \right] \quad (3-3)$$

其中， $\bar{V}(z)$  为高度  $z$  处的平均风速， $\bar{V}_1$  为标准高度  $z_1$  处（一般为 10m）的平均风速， $z_0$  为地面粗糙长度，一般略大于地面有效障碍物高度的  $1/10$ 。 $\alpha$  为地面粗糙度系数，我国载荷规范（1985 稿）建议，地面粗糙度分为 A、B、C 三类。A 类指海面、小岛及大沙漠等，取  $\alpha = 0.12$ ；B 类指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇、大城市郊区和空旷平坦地区，取  $\alpha = 0.16$ ；C 类指平均建筑高度为 15 米以上或有密集建筑群大城市市区，取  $\alpha = 0.20$ <sup>[27]</sup>。

### 3.3 脉动风

#### 3.3.1 脉动风的特性

大气湍流(Atmospheric Turbulence)指的是空气质点作随机变化的一种运动状态，这种状态服从某种统计规律。从风的实测结果可知，风速随时间而随机变化，这正是由风气流中的湍流所引起的。湍流脉动是各种尺度的涡旋相互叠加和相互作用的表现，风流的湍流特性对结构的空气动力特性会产生很大影响。因此，可以认为，大气湍流的特性对风荷载产生很大影响。大气湍流的特性通常是由其湍流整体尺度、湍流强度、湍流脉动风速自谱和互谱来描述的<sup>[28]</sup>。

脉动风实际是三维的风湍流，它应包括顺风向、横风向和垂直向的湍流。由于垂直和横风向的湍流较小，因此一般只讨论顺风向湍流。

脉动风在频域内的描述可以通过风速谱密度函数和相关函数来表达，谱密度函数表示的是脉动风的随机过程在频域内关于振动幅值的统计信息，有许多风工程专家对风速谱进行了研究，得到了不同形式的风速谱表达式。我国规范采用达文波特风速谱，达文波特谱比其他谱值偏大，而谱值偏大的范围正好是风频率与结构自振频率接近的地方，影响较大，故采用达文波特谱可能会过高估计结构的动力响应，其结果可能会偏于保守<sup>[29]</sup>。

#### 3.3.2 脉动风的功率谱

从大量风的实测记录的样本时程曲线统计分析可知，若不考虑平均风部分，脉动风速本身可用零均值的高斯平稳随机过程来描述，且具有明显的各态历经特性。若按各态历经过程考虑，可以时间的平均代替样本的平均，过程的平均值 $\bar{v}$ 和标准偏差 $\sigma$ 可完整地定义风速的大小。

通常，同一平稳随机函数 $X$ 在不同时刻的变量相互密切程度可用相关函数来描述<sup>[30]</sup>，其自相关函数 $R_{xx}(\tau)$ 定义为乘积 $x(t)x(t+\tau)$ 的集合平均值：

$$R_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)x(t+\tau) dt \quad (3-4)$$

它是时延 $\tau$ 的函数，反映了相隔 $\tau$ 的两个时刻的随机变量之间线性相关程度。自相关函数的 Fourier 变换可得到功率谱密度(自谱)：

$$S_{xx}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xx}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (3-5)$$

由 Fourier 逆变换可知：

$$R_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(f) e^{i2\pi f\tau} df \quad (3-6)$$

当  $\tau = 0$  时，

$$R_{xx}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(f) df \quad (3-7)$$

实用上，功率谱的形状常作为随机振动的标志。在风工程中，Davenport 根据世界上不同地点、不同高度测得的多次风记录的谱分析结果，得出顺风向水平脉动风速的功率谱函数为：

$$S_v(f) = 4K\bar{v}^2(10) \frac{x^2}{f \cdot (1+x^2)^{\frac{4}{3}}} \quad (3-8)$$

$$x = L_v^* \cdot f / \bar{v}(10) \quad (3-9)$$

式中： $K$  为反映地面粗糙度的系数。丛林、丘陵、田野、乡村等地， $K$  取 0.015； $L_v^*$  是湍流整体尺度，Davenport 将其取为 1200m； $\bar{v}(10)$  是离地面 10m 高度处的平均风的风速。

Davenport 谱由于形式简单，代表性强而获得广泛采用，我国的有关规范就是以 Davenport 谱为依据的。以双对数坐标表示的 Davenport 风谱见图 3.1。

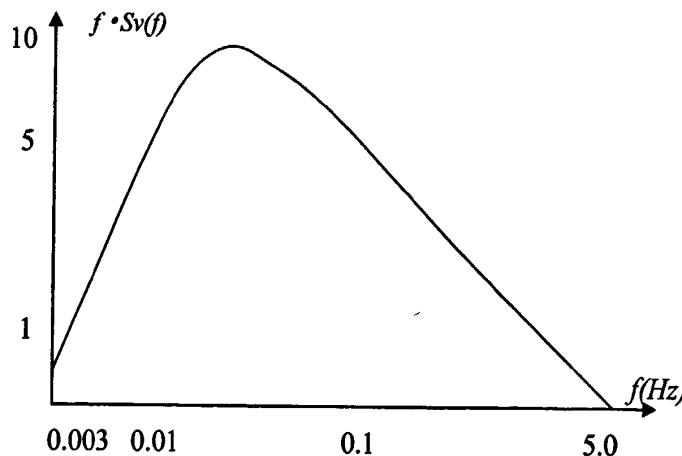


图 3.1 Davenport 随机风速谱

但是，许多实测结果表明，Davenport 谱在高频处 ( $f > 0.05\text{Hz}$ ) 过高估计了湍流能量，而这些频率范围对高耸结构来说有重要意义。因为高耸结构的自振频率大多落在此范围内。对于高耸结构，应该使用沿高度变化的风速谱，如 Kaimal 谱、

Simiu 谱等<sup>[31]</sup>。为此我们采用根据实测得到的修正 Davenport 谱为：

$$S_v(z, f) = \frac{2x^2}{(1+3x^2)^4} \cdot \frac{\sigma_u^2}{f}, \quad x = L_v(z) \frac{f}{\bar{V}(z)} \quad (3-10)$$

其中， $L_v(z)$  是湍流尺度， $\sigma_u^2$  是标准偏差。

与自相关类似，两个不同随机函数 X, Y 乘积的集合平均值称为互相关函数  $R_{xy}(\tau)$ ：

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x(t)y(t+\tau)dt \quad (3-11)$$

相应的互功率谱密度函数(互谱)为：

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) e^{-i2\pi f \tau} d\tau \quad (3-12)$$

由于风的互相关函数一般不对称，所以互谱  $S_{xy}(f)$  通常是个复数：

$$S_{xy}(f) = Co_{xy}(f) - iQ_{xy}(f) \quad (3-13)$$

其中，实部  $Co_{xy}(f)$  称为共谱密度函数，为偶函数；虚部  $Q_{xy}(f)$  称为重谱密度函数，为奇函数。

互谱密度函数可写成复极坐标形式：

$$S_{xy}(f) = |S_{xy}(f)| e^{i\psi(f)} = \sqrt{S_{xx}(f) \cdot S_{yy}(f)} \cdot ch(f) \cdot e^{i\psi(f)} \quad (3-14)$$

根据 Davenport 的建议， $ch(f)$  可取为频率和两点间距的函数：

$$ch(f) = \exp\left(-\frac{C_z \cdot f \cdot \Delta z}{\bar{V}}\right) \quad (3-15)$$

其中  $C_z$  为衰减系数， $\Delta z$  为垂直间距， $\bar{V}$  为平均风速。

根据文献[32]，我们可得到通过无量纲坐标  $f^* = \frac{f \cdot \Delta z}{\bar{V}(z)}$  所作的相位角关系。 $f^*$

从 0 到 0.1，相位角均值近似增加；在 0.1 到 0.125 之间线性减小；在大于 0.125 后，

就完全不相关了，并且在  $-\pi \sim \pi$  之间均匀分布。相位角对  $f^*$  的公式如下：

$$\psi(f) = \begin{cases} \frac{\pi}{4} \cdot \frac{f \Delta z}{\bar{V}(z)} & \frac{f \Delta z}{\bar{V}(z)} \leq 0.1 \\ -10\pi \frac{f \Delta z}{\bar{V}(z)} + 1.25 & 0.1 < \frac{f \Delta z}{\bar{V}(z)} \leq 0.125 \\ \text{随机数} & \frac{f \Delta z}{\bar{V}(z)} > 0.125 \end{cases} \quad (3-16)$$

此公式可供风模拟时使用。

### 3.4 随机风速的数值模拟

根据有关文献<sup>[34]</sup>的研究，将脉动风作为高斯过程及平稳随机过程来考虑。

观察  $n$  个具有零均值的平稳随机过程  $v_j(t) (j=1, 2, \dots, n)$ ，其谱密度函数矩阵为：

$$\underline{S}(\omega) = \begin{bmatrix} S_{11}(\omega) & S_{12}(\omega) & \cdots & S_{1n}(\omega) \\ S_{21}(\omega) & S_{22}(\omega) & \cdots & S_{2n}(\omega) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1}(\omega) & S_{n2}(\omega) & \cdots & S_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

单元  $S_{jk}(\omega) (j=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, n)$  是相关函数的富里叶变换。如前所述，其互谱一般是复数，所以该矩阵是复数形式，由于  $S_{jk}(\omega) = S_{kj}^*(\omega)$  是共轭的，可以证明上述矩阵是非负定的<sup>[35]</sup>。

按照 Cholesky 分解法， $\underline{S}(\omega)$  可分解为：

$$\underline{S}(\omega) = H(\omega) \cdot H^*(\omega)^T \quad (3-18)$$

其中  $H(\omega)$  为下三角矩阵：

$$H(\omega) = \begin{bmatrix} H_{11}(\omega) & 0 & \cdots & 0 \\ H_{21}(\omega) & H_{22}(\omega) & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{n1}(\omega) & H_{n2}(\omega) & \cdots & H_{nn}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

要模拟的风速具有如下形式：

$$v_j(t) = \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N |H_{jm}(\omega_l)| \cdot \sqrt{2\Delta\omega} \cos[\omega_l \cdot t + \psi_{jm}(\omega_l) + \theta_{ml}] \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3-20)$$

其中风谱在频率范围内划分成  $N$  个相同部分， $\Delta\omega$  为频率增量， $|H_{jm}(\omega_l)|$  为上述下三角矩阵元素的模， $\psi_{jm}(\omega_l)$  为两个不同作用点之间的相位角。 $\theta_{ml}$  为介于 0 和  $2\pi$  之间均匀分布的随机数，以避免在模拟过程中产生周期性。

理论上可证明  $v_j(t)$  的集合平均  $E[v_j(t)]$  为零，而互相关函数  $R_{jk}(\tau)$  在  $j > k$  时，等于直接由风谱的富里叶逆变换所得的目标互相关函数。具体推导过程可见文献 [33]。根据文献[33]，脉动风的均方差  $\sigma_u$  与标准平均风速间满足关系：

$$\sigma_u = \sqrt{6k\bar{v}}(10) \quad (3-21)$$

式中： $k$  为地面系数，在有少量树木的开阔草地取 0.005，在有灌木和高树地带取 0.015。

根据以上理论，编写了风速样本生成程序。图 3.2 和图 3.3 分别是在高度为 7m，

随机风速为 8 级风(20m/s)时, 所绘制模拟样本图和分布直方图。

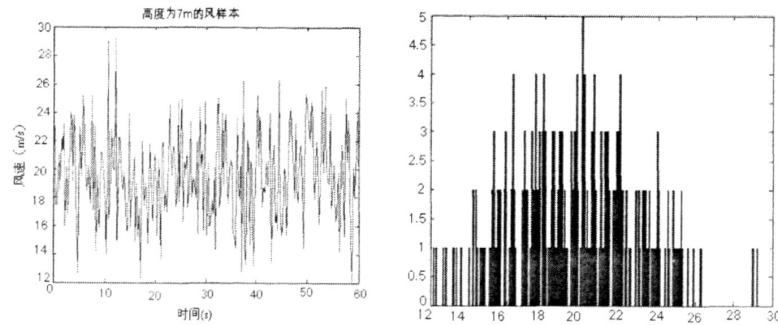
图 3.2 模拟风速  $v=20\text{m/s}$  图

图 3.3 速度分布统计直方图

上述的风模拟方法具有以下特点: 考虑了随高度变化的风谱, 由于不对称的互相关函数, 在互功率谱中包括了应同时存在的共谱和重谱(通常被忽略), 以及与频率有关的相位关系等。我们可在计算机容量许可下, 通过提高风谱在频率范围内的划分数目, 使求得的模拟风更接近自然风的特性<sup>[36]</sup>。

### 3.5 随机风载荷与随机风速的关系

#### 3.5.1 风载荷

物体受到的风力由摩擦阻力与压差阻力所组成。摩擦阻力是由于液体具有粘性, 在物体表面附近的边界层内各流层间具有粘滞力所引起的。对于流线型物体, 压差阻力很小, 主要考虑摩擦阻力; 而对于非流线型物体, 摩擦阻力比压差阻力小得多, 因此主要考虑压差阻力。压差阻力是由于作用于物体的法向压力不均匀而引起的。压差阻力包括形状阻力(涡流阻力)、诱导阻力、波阻力等。诱导阻力在飞机飞行中会遇到; 波阻力在超音速飞行及船舶在水中航行时遇到; 天线罩结构的风力主要是形状阻力(涡流阻力)。涡流阻力是由于边界层从物体表面分离而在物体后面形成旋涡而产生的。

根据大量的风的实测资料可以看出, 在风的顺风向时程曲线中, 包含两种成分: 长周期部分, 其值常在 10 分钟以上, 称为平均风; 另一种是短周期部分, 是在平均风基础上的波动, 其周期一般只有几秒至几十秒, 称为脉动风。图 3.4 是风的一个时程曲线示意图。

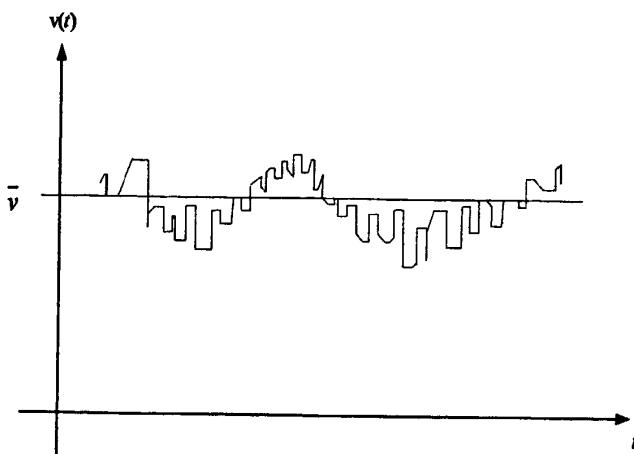


图 3.4 自然风的两种成分

作用于结构上任一点坐标  $(x, y, z)$  的随机风速  $V(x, y, z)$  为平均风速  $\bar{V}(z)$  和脉动风速  $v(x, y, z, t)$  之和：

$$V(x, y, z, t) = \bar{V}(z) + v(x, y, z, t) \quad (3-22)$$

平均风是在给定的时间间隔内，把风对结构的作用力的速度、方向以及其他物理量都看成不随时间而改变的量，考虑到风的长周期大大地大于一般结构的自振周期，因而这部分风虽然其本质是动力的，但其作用与静力作用相近，因此可认为其作用性质相当于静力。脉动风是由于风的不规则性引起的，它的强度是随时间按随机规律变化的。由于它的周期较短，因而应按动力来分析，其作用性质是动力的，是顺风向振动引起的主要成分。在脉动风作用下结构将产生振动，常简称为结构风振。

除顺风向振动以外，在横风向，由于升力的作用，也会引起横向风振，同时外扭矩还将引起扭转振动。因而风对结构的作用，在受力方向、作用性质等等都是多方面的，也是十分复杂的。在横风向，根据各个范围的不同，有周期性振动，也有随机振动。反映在荷载上，它可能是周期性荷载，可能是随机荷载，其类型根据雷诺数的大小而确定。

综上所述，风对结构作用的计算有三个不同的方面。对于顺风向平均风，采用静力计算方法，对于顺风向的脉动风或横风向的脉动风，则应按随机振动理论计算；对于横风向周期性的风力，或引起扭转振动的外扭矩，通常作为确定性荷载对结构进行动力计算<sup>[37]</sup>。

如此一来，与风速分为平均风速和脉动风速相对应，结构上的风荷载也分为平均风荷载和脉动风荷载。其作用性质分别为静力和动力。

为了反映结构上的静力风压受各种因素的影响情况，同时又便于工程结构抗风设计的应用，将脉动风荷载的影响表示为风振系数的形式组合到平均风荷载中

得到等效的静力形式风荷载，我国风荷载规范规定计算静力风压的公式为：

$$\bar{w} = \mu_z \mu_s \beta_z w_0 \quad (3-23)$$

式中： $w_0$ —为建筑物所在地的基本风压，我国的取值是根据比较空旷平坦地面离地面10米高度处的平均最大风速推算出的风压值( $\alpha$ 取0.16，空旷平坦地梯度风高度取350米)，对于重现期为50年和100年的结构，对基本风压可乘以1.1和1.2。

$\mu_z$ —Z高度处的风振系数；

$\mu_s$ —风压的结构体型系数；

$\beta_z$ —风压高度变化系数，由下式确定：

$$\mu_s = \left( \frac{z}{H_r} \right)^{\alpha} \times (35)^{2 \times 0.16} \quad (3-24)$$

式中：

$z$ —高度(米)；

$\alpha$ —地貌粗糙度系数；

$H_r$ —梯度风高度(米)。

风对结构的静力作用可以用平均风作用下结构所承受的阻力 $F_d$ 、升力 $F_L$ 和升力矩 $M$ 来表示。

$$F_d = C_d \cdot \bar{w} \cdot A \quad (3-25)$$

$$F_L = C_L \cdot \bar{w} \cdot A \quad (3-26)$$

$$M = C_M \cdot \bar{w} \cdot A \cdot B \quad (3-27)$$

其中， $C_d$ 、 $C_L$ 、 $C_M$ 分别为阻力系数、升力系数和升力矩系数，统称静力三分力系数，它们和结构的截面形状、来流方向以及雷诺数有关； $A$ 为结构迎风面积， $B$ 为结构顺风方向的水平投影长度。

### 3.5.2 天线罩上风载荷的计算

风载荷是天线罩使用环境下的主要载荷，对天线罩进行结构分析之前，首先要计算天线罩上的风载荷。风载荷可用三角级数形式表示<sup>[20]</sup>：

$$P(\varphi, \theta) = q \sum_{n=0}^N P_n(\varphi) \cos n\theta \quad (3-28)$$

取 $n=1$ ，其中

$$P_0 = A_0 + A_2 \sin^2 \varphi; \quad A_1 = 0.1801;$$

$$P_1 = A_1 \sin \varphi + 3A_3 \sin^3 \varphi; \quad A_2 = 0.78;$$

$$A_0 = -1.3; \quad A_3 = \frac{1}{4} \times 0.5599$$

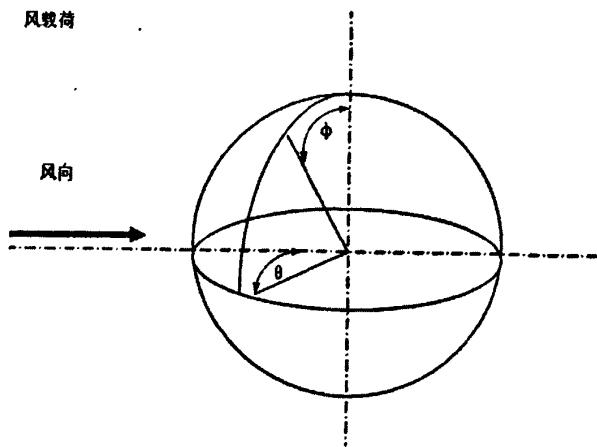


图 3.5 天线罩风载荷示意图

天线罩在使用过程中，风压的大小，直接关系到结构的安全稳定性，必须按照相关规范进行设计。作用在建筑物表面的风载荷  $W$  ( $\text{Kg/m}^2$ ) 应按下式计算：

$$W = k \cdot K_z \cdot W_0 \quad (3-29)$$

其中：  $W$  — 风载荷，  $\text{Kg/m}^2$ ；

$k$  — 风载体形系数；

$K_z$  — 风压高度变化系数；

$W_0$  — 基本风压，  $\text{N/m}^2$ 。

对于大型天线罩来说，其表面风压的分布函数为：

$$P_0 = q_0 \left( -1.3 + 0.1801 \sin \phi \cos \theta + 0.78 \sin^2 \phi + \frac{3}{4} \times 0.5599 \sin^3 \phi \cos \theta \right) \quad (3-30)$$

其中：  $q_0$  为基本风压，  $q_0 = \frac{1}{2} \rho v^2$ ； 空气密度  $\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$ ；  $v$  为风速（当考虑随机风荷时，公式中的风速用随机风速表示即可）。

天线罩的设计风压为：

$$P = P_0 \times K$$

$K$  — 超载系数，一般取 1.4。

### 3.6 风载荷的离散

有限元法的基本思想<sup>[38]</sup>是将待求解模型离散成许多相互联系的小单元进行求解，即对模型进行有限元网格划分。由于天线罩所受的风压是关于 $\theta$ 、 $\varphi$ 的函数，进行有限元网格划分后，不同位置的单元，所受的风压并不相同，因此需要把风载荷做离散化处理。

本文采用 ANSYS Mechanical APDL 语言的 DO 循环命令<sup>[39]</sup>，结合取值函数 CENTRX(E)得到每个单元 E 在中心位置的直角坐标系下的 X、Y、Z 坐标。由(3-30)式可知，风压与球坐标的 Y、Z 分量 $\theta$ 、 $\varphi$ 有关，故再根据直角坐标与球坐标的关系求出 $\sin \varphi$  和 $\cos \theta$ ，带入(3-30)式，即可算出每个单元的风压。对单元施加风压时，先把每个单元的风压存入一个数组中，然后再结合 DO 循环，对单元从第一个到最后一个进行遍历施加。以下是此方法的 APDL 语言：

```
*get,en,elem,0,count           !得到单元的总数存入 en 中
*dim,zhj,array,en,3           !定义数组 zhj,en 行，3 列
*dim,qiu,array,en,2            !定义数组 qiu,en 行，2 列
*dim,yal,array,en,1            !定义数组 yal,en 行，1 列
*do,i,1,en,1                  !得到每个单元中心点的 X、Y、Z 坐标
zhj(i,1)=centrx(i)
zhj(i,2)=centry(i)
zhj(i,3)=centrz(i)
*enddo
*do,i,1,en,1                  !直角坐标与球坐标的转换
qiu(i,1)=sqrt(1-(zhj(i,3)/r)*(zhj(i,3)/r))
qiu(i,2)=zhj(i,1)/(r*qiu(i,1))
*enddo
*dim,yal_1,array,en,1
*dim,yal_2,array,en,1
*dim,yal_3,array,en,1
*do,i,1,en,1
yal_1(i,1)=qiu(i,1)*qiu(i,2)
yal_2(i,1)=qiu(i,1)*qiu(i,1)
yal_3(i,1)=qiu(i,1)*qiu(i,1)*qiu(i,1)*qiu(i,2)
*enddo
*do,i,1,en,1                  !计算每个单元的风压
```

```

yal(i,1)=.1.3+0.1801*yal_1(i,1)+0.78*yal_2(i,1)+0.75*0.5599*yal_3(i,1)
*enddo
*dim,fengya,array,en,1           !将风压存入数组
*do,i,1,en,1
fengya(i,1)=yal(i,1)*v*v*0.5*I.21
*enddo

```

### 3.7 本章小结

首先系统描述了风速及风荷的基本理论，把风分成平均风和脉动风，平均风对结构的作用性质相当于静力。而脉动风的强度是随时间按随机规律变化的，其作用性质是动力的。

接着从大量风的实测记录样本时程曲线统计分析可知，若不考虑平均风部分，脉动风速本身可用零均值的高斯平稳随机过程来描述，且具有明显的各态历经特性。文中介绍了风速的自谱和互谱、基于三角级数叠加的谐波合成法，并用 MATLAB 编程实现了脉动风速的数值模拟。

最后根据风的脉动性质，将结构上所受的风载荷分为平均风载荷和脉动风载荷。由于天线罩所受的风压是关于  $\theta$ 、 $\varphi$  的函数，不同位置的单元，所受的风压并不相同，因此对风载荷进行离散。用 ANSYS Mechanical APDL 语言对风载荷进行离散化处理，存入数组中，为天线罩的风荷载响应分析奠定了基础。

## 第四章 天线罩的结构分析

### 4.1 引言

地面天线罩是地面天线的保护罩，直接暴露于大气中。作用于罩体的载荷有风载荷、雪载、自重、温度载荷及地震载荷。其中，风载荷是主要的载荷。在国内外有关罩体的设计资料中，有的要求罩体具有的抗风能力高达  $57\text{m/s}$ ，由它引起的罩体应力远远高于其他载荷引起的应力。若是天线罩被风吹跨，后果极其严重，整个罩体坍塌，雷达天线被摔坏或肢解，天线功能完全丧失，造成了很大的损失<sup>[11]</sup>。

本章将具体介绍天线罩的静力分析、模态分析、瞬态分析以及板块划分对天线罩力学性能的影响，以评估天线罩结构在特定风速下的刚度及强度是否达到设计要求。

### 4.2 直径 40m 天线罩静态响应分析

结构静力分析用来计算在固定不变的载荷作用下结构的响应，即由于稳态外载引起的系统或部件的位移、应力、应变<sup>[41]</sup>。同时，结构静力分析还可以计算那些固定不变的惯性载荷以及那些可以近似等价为静力作用的随时间变化的载荷对结构的影响（如重力和离心力）。

工程上利用计算机有限单元法对介质球形壳体天线罩进行静力强度分析<sup>[42]</sup>，是一种非常有效的新途径。

#### 4.2.1 直径 40m 天线罩的有限元模型

根据天线罩电性能、材料和工艺设计方案，建立天线罩夹层结构模型，利用 ANSYS 软件，对天线罩进行仿真分析。天线罩的有限元建模采用 Shell99 单元，Shell99 是一种分层壳单元<sup>[43]</sup>。

本次设计的天线罩直径 40m， $3/4$  截球。天线罩总厚度为 110mm。其中每层玻璃钢蒙皮的厚度为 0.5mm，共四层；每层刚性聚氨酯泡沫的厚度为 54mm，共两层。

材料的力学性能参数：

蒙皮：  $E=17.4\text{GPa}$ ,  $\nu=0.28$ ,  $\rho=1800\text{Kg/m}^3$

聚氨酯泡沫塑料： 压缩弹性模量为  $20\text{MPa}$ , 剪切模量为  $2\text{MPa}$   
密度为  $60\text{Kg/m}^3$

风速  $v=57\text{m/s}$ , 风的方向水平向右, 如图 3.5 所示。

ANSYS 中直角坐标系的 X 轴与风的方向平行, Y 轴垂直 X 轴向里, Z 轴垂直于 XOY 平面竖直向上。

天线罩面按经度, 每隔  $5^\circ$  划分, 网格划分后的有限元模型如图 4.1 所示:

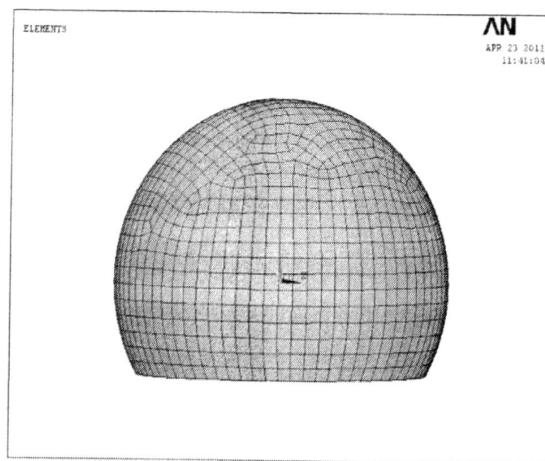


图 4.1 天线罩的有限元模型

#### 4.2.2 直径 40m 天线罩在重力作用下的响应分析

仅在重力作用下, 直径 40m 天线罩的变形及各层的应力云图, 如图 4.2~4.8 所示。

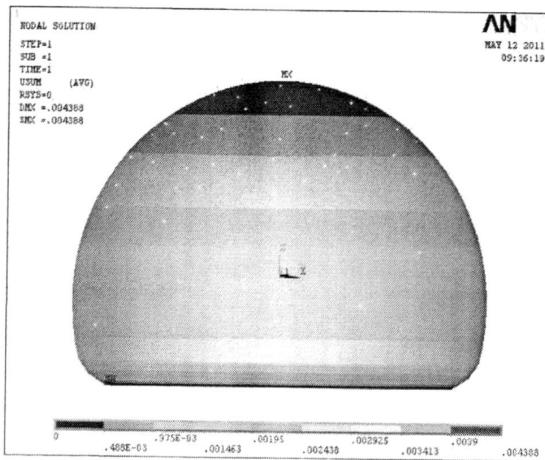


图 4.2 直径 40m 天线罩在自重作用下整体的变形云图

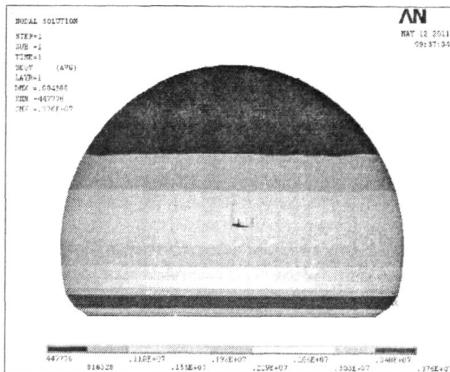


图 4.3 天线罩材料第一层（玻璃钢）的应力图

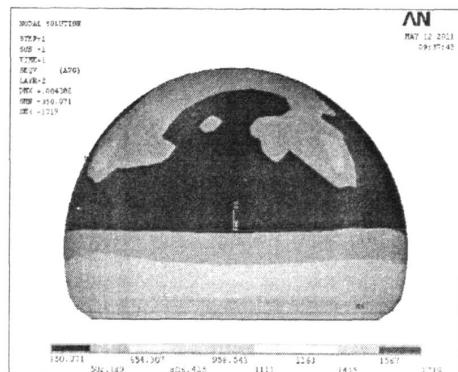


图 4.4 第二层（泡沫）的应力图

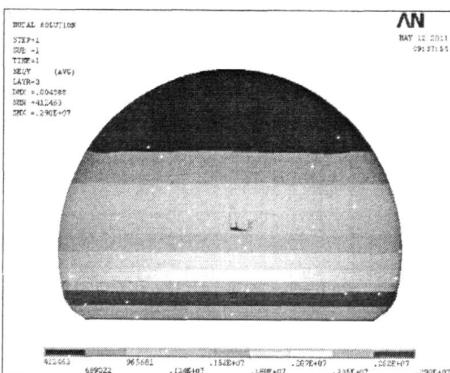


图 4.5 天线罩材料第三层（玻璃钢）的应力图

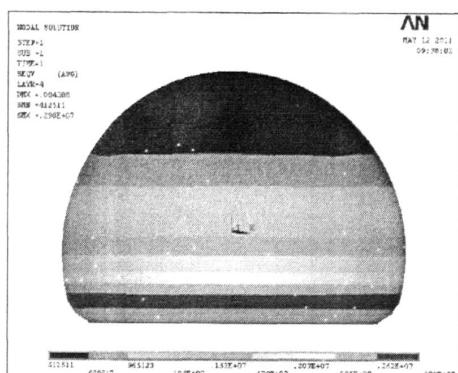


图 4.6 天线罩材料第四层（玻璃钢）的应力图

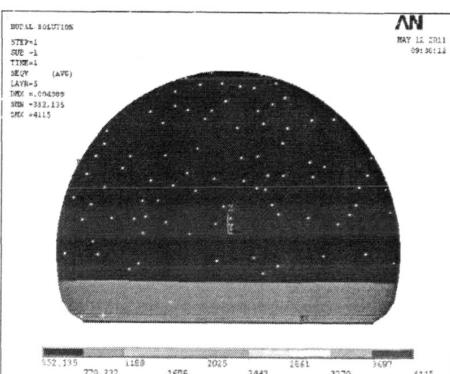


图 4.7 第五层（泡沫）的应力图

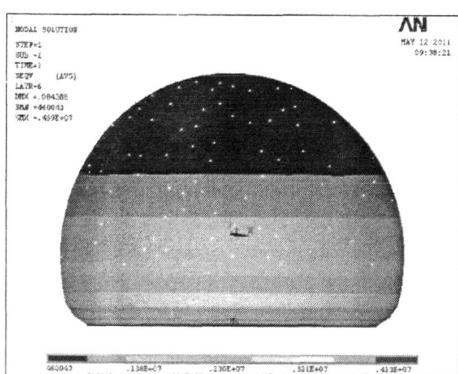


图 4.8 天线罩材料第六层（玻璃钢）的应力图

由上分析可知，在重力作用下，天线罩的最大位移为 4.39mm，发生在天线罩的顶部；天线罩蒙皮的最大应力为 4.59MPa，出现在天线罩与基础相连的根部；夹心层的最大应力为 0.042MPa，也出现在天线罩与基础相连的根部。这些应力值与玻璃钢与泡沫的许用应力相比，是安全的。

#### 4.2.3 直径 40m 天线罩在重力及静风载组合作用下的响应分析

直径 40m 天线罩上的风压分布矢量图及天线罩在重力与风载作用下的变形和

各层应力云图如图 4.9~4.16 所示:

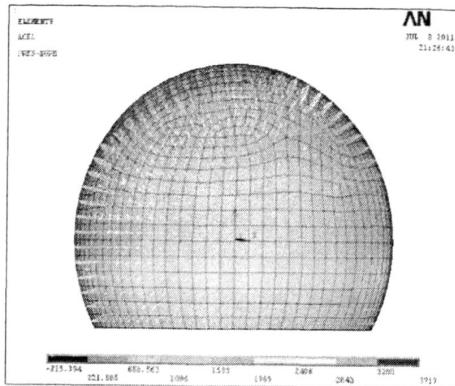


图 4.9 天线罩上的风压分布矢量图

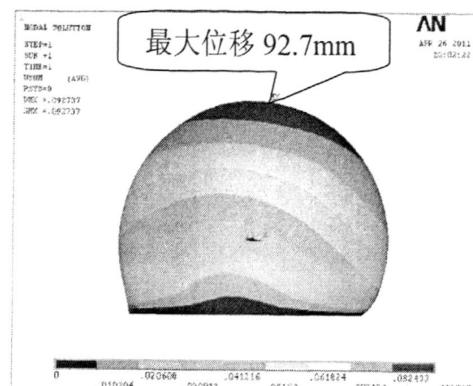


图 4.10 组合作用下的变形云图

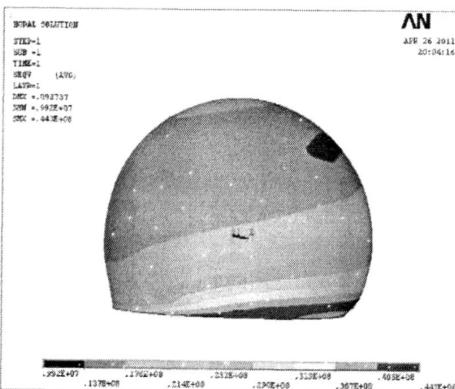


图 4.11 组合作用下最内层（第一层）玻璃钢的应力图

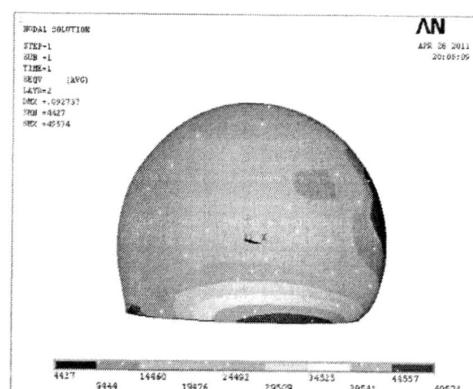


图 4.12 组合作用下第二层的应力图

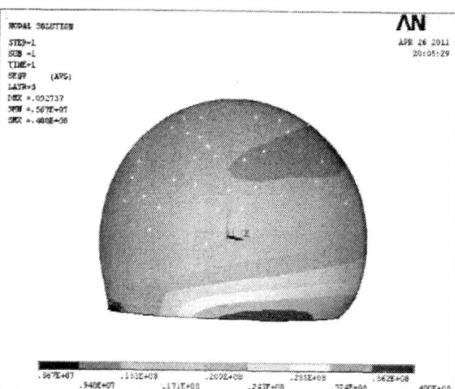


图 4.13 组合作用下第三层的应力图

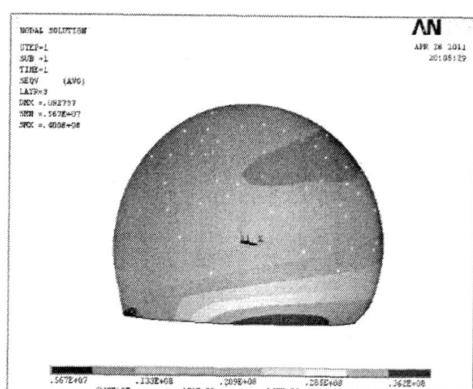


图 4.14 组合作用下第四层的应力图

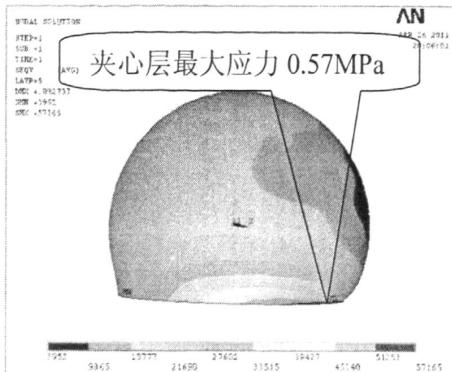


图 4.15 组合作用下第五层的应力图

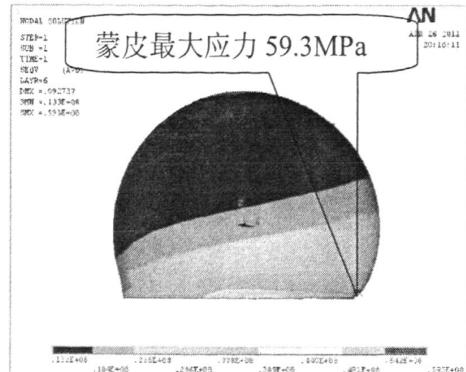


图 4.16 组合作用下第六层（最外层玻璃钢）的应力图

由上分析可知，直径 40m 天线罩在重力和风载作用下的最大变形为 92.7mm，出现在天线罩的顶部，位移与天线罩直径的比值  $92.7/40000=2.3E-3$ ，数值相对较小，说明天线罩的刚性满足天线罩的使用环境要求。天线罩蒙皮的最大应力为 59.3MPa，出现在天线罩与基础相连的根部；夹心层的最大应力为 0.57MPa，也出现在天线罩与基础相连的根部。这些应力与选用材料的许用应力相比，是安全的。

### 4.3 直径 40m 天线罩的模态分析

结构的模态分析就是确定结构的固有频率和振型<sup>[44]</sup>。固有频率和振型是结构的重要动力参数，模态分析也是进一步进行结构动力分析的基础。ANSYS 中的模态分析是线性分析，任何非线性特性都将被忽略。

固有振动特性分析是通过研究无阻尼的自由振动，得到振动系统的自然属性，即固有频率和振型。

要研究某系统的固有振动特性，首先要建立该系统的动力方程。多自由度的运动微分方程可以应用牛顿第二定律、达朗伯原理、拉格朗日方程和哈密顿原理等来建立。

根据达朗伯原理<sup>[45]</sup>，只要引入相应的惯性力，就可以将弹性体的动力问题化为相应的静力问题，即化为弹性体的平衡问题来处理。

于是，由达朗伯原理，就有：

$$[K]\{\ddot{x}(t)\} = \{F(t)\} - [M]\{\ddot{x}(t)\} - [C]\{\dot{x}(t)\} \quad (4-1)$$

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (4-2)$$

这就是弹性体的动力方程，即用有限元法来解弹性体的动力问题的基本方程。

矩阵  $[K]$ ， $[M]$  和  $[C]$  称为刚度矩阵，质量矩阵和阻尼矩阵。其中  $\{F(t)\}$  为节点负荷列向量， $\{x(t)\}$ ， $\{\dot{x}(t)\}$ ， $\{\ddot{x}(t)\}$  分别为节点的位移、速度和加速度列向量<sup>[46]</sup>。

对于无阻尼无外载荷的自由振动问题阻尼项和外力项均为零。于是，动力方程成为：

$$[\ddot{M}]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (4-3)$$

由于弹性体的自由振动总可以分解为一系列简谐振动的叠加，为了决定弹性体自由振动的固有频率及相应的模型，考虑如下简谐振动的解：

$$\{\delta(t)\} = \{g\} \sin \omega t \quad (4-4)$$

其中  $\{g\}$  是位移  $\{\delta(t)\}$  的振幅列向量，它与时间  $t$  无关， $\omega$  是固有原频率， $t$  是时间。将式(4.3)代入(4.4)中并消去  $\sin \omega t$  因子，就得到：

$$([K] - \omega^2[M])\{g\} = 0 \quad (4-5)$$

于是，要找如式(4-4)的简谐振动就化为要  $\omega^2$  和非零向量  $\{g\}$ ，使其满足(4-5)式。这样的问题称为广义特征值问题。而这样的  $\omega^2$  和  $\{g\}$  分别称为广义特征值和广义特征向量，求得的  $\omega$  就是真的固有频率， $\{g\}$  就是给出相应的振型。

此外，刚度矩阵  $[K]$  在未经过行列处理时是对称半正定阵。若在实际问题中有位移约束条件，建立了位移约束条件且排除刚体位移时，在经过行列处理后的刚度矩阵  $[K]$  就是对称正定阵。

$$\lambda = \omega^2 \quad (4-6)$$

$$\text{可将式(4-5)改写为: } ([K] - \lambda[M])\{g\} = 0 \quad (4-7)$$

可以决定出弹性体的  $n$  个固有圆频率值：

$$\omega = \sqrt{\lambda_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (4-8)$$

而  $n$  就是用有限元法求解的节点位移参数的总自由度。

显然特征值仅决定于系统本身的刚度、质量等物理参数。 $n$  个自由度的系统有  $n$  个固有频率<sup>[47]</sup>。

在 ANSYS 模态分析中，经计算解得结构前 6 阶固有频率见表 4.1。

表 4.1 直径 40m 天线罩结构固有频率表

序号	固有频率(Hz)	振型描述
1	4.411	整罩在 ZX 面内的左右摆动
2	4.414	整罩在 YZ 面内的前后摆动
3	8.159	整罩在 ZX 面内的提拉按压振动
4	11.214	整罩绕 Z 轴的左右扭动
5	11.714	整罩在 XY 平面内的左上角和右上角的提拉振动
6	11.730	整罩在 ZX 平面内的左上角和右上角的提拉振动

由上表可知，结构的 1、2 阶振型 5、6 阶振型分别正交。下前六阶的振型图如图 4.17~4.22 所示。

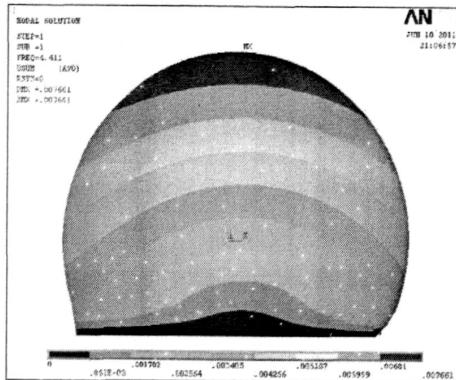


图 4.17 天线罩第一阶振型

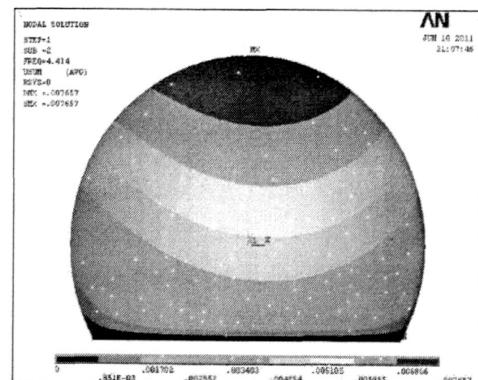


图 4.18 天线罩第二阶振型

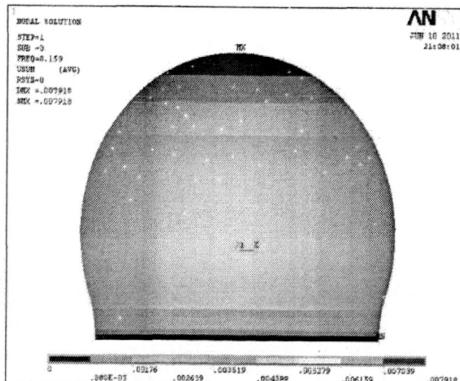


图 4.19 天线罩第三阶振型

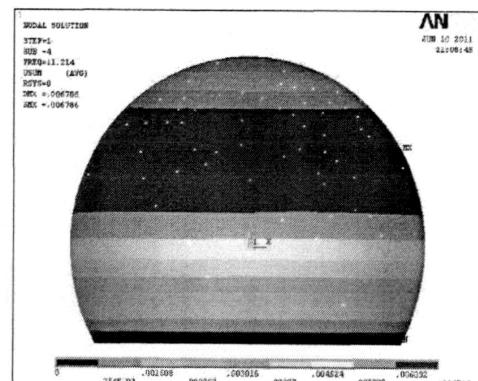


图 4.20 天线罩第四阶振型

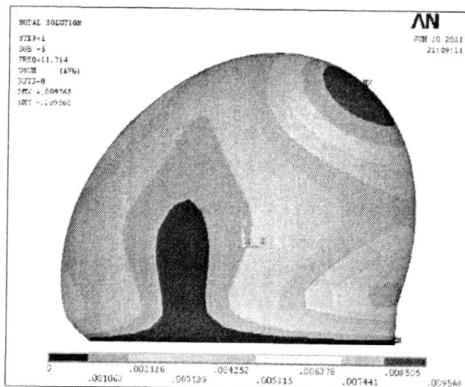


图 4.21 天线罩第五阶振型

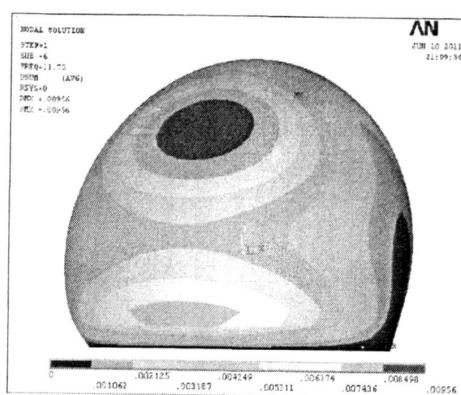


图 4.22 天线罩第六阶振型

#### 4.4 直径 40m 天线罩在随机风荷作用下的瞬态响应分析

由于脉动风将导致天线罩结构系统的振动，所以在进行动态响应分析时应考虑天线罩的阻尼。系统振动时的微分方程：

$$[K]\{U\} + [C]\{\dot{U}\} + [M]\{\ddot{U}\} = \{F(t)\} \quad (4-9)$$

式中： $\{U\}$ 、 $\{\dot{U}\}$ 、 $\{\ddot{U}\}$  分别为节点的位移、速度和加速度列向量； $[K]$ 、 $[C]$ 、 $[M]$  分别为刚度矩阵、阻尼矩阵、质量矩阵； $\{F(t)\}$  为载荷列向量。

在本例的计算中，采用瑞利阻尼<sup>[48]</sup>，即用整体质量矩阵 $[M]$  和整体刚度矩阵 $[K]$  的线性组合来表示整体阻尼矩阵 $[C]$ ，公式如下：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4-10)$$

上式中的系数 $\alpha$  和 $\beta$  可用下式确定：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2(\lambda_i \omega_j - \lambda_j \omega_i)}{(\omega_j + \omega_i)(\omega_j - \omega_i)} \omega_i \omega_j \\ \beta = \frac{2(\lambda_i \omega_j - \lambda_j \omega_i)}{(\omega_j + \omega_i)(\omega_j - \omega_i)} \end{cases} \quad (4-11)$$

式中： $\omega_i$  和 $\omega_j$  分别为第 $i$  和 $j$  阶固有频率， $\lambda_i$  和 $\lambda_j$  分别为第 $i$  和第 $j$  阶振型的阻尼比，即实际阻尼与该振型的临界阻尼的比值。当 $\lambda_i = \lambda_j$  且只考虑系统前两阶固有频率时，式(4-11)简化为：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2\omega_1 \omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \lambda \\ \beta = \frac{2\lambda}{\omega_1 + \omega_2} \end{cases} \quad (4-12)$$

在前面已经计算出天线罩的第一、第二阶固有频率分别为：

$$\omega_1 = 2\pi \times 4.4107 = 27.67 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = 2\pi \times 4.4144 = 27.72 \text{ rad/s}$$

代入式(4.12)并取  $\lambda = 0.02$ ，得到天线罩阻尼系数  $\alpha = 0.5542$ ， $\beta = 7.217e-4$ 。

当风速按随机问题考虑时，风载荷也成为随机量。将随机风载荷作为外载荷施加在系统上，利用直接积分法，求解系统的响应。提取天线罩上最大位移节点 111（天线罩顶部），绘制位移响应曲线如图 4.23 所示。图中，顺风向位移（总体坐标系 X 方向）响应均值为 84.30mm，与图 4.24 显示的等效静风荷引起的位移 83.3mm 吻合，但图 4.23 更形象地反映了位移的动态变化过程。

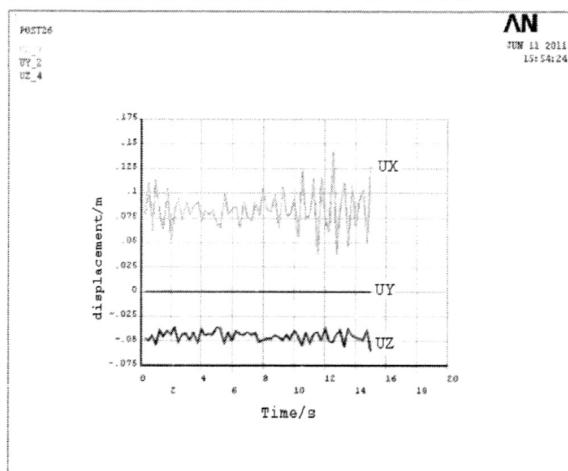


图 4.23 随机风作用下节点 111 的位移响应曲线

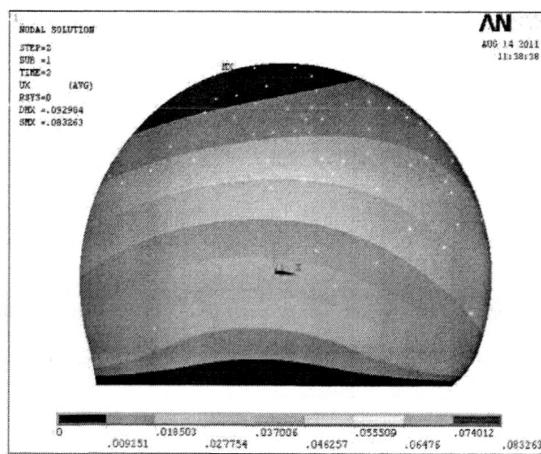


图 4.24 等效静风荷作用下天线罩 X 向的位移

虽然最大位移节点 111 随机振动位移幅值 140.39mm，但考虑到 57m/s 风速保精度的设计要求，综合天线罩随机振动过程中，罩子上各节点产生动态位置误差，通过计算罩子表面动态误差均方根来评价精度。下图是此工况下，天线罩位移的均方根误差曲线。从图 4.25 看，在 15s 的整个风振过程中的每个采样时刻，天线

罩所有节点顺风向(X)位移的均方根都没有超出 0.002m。

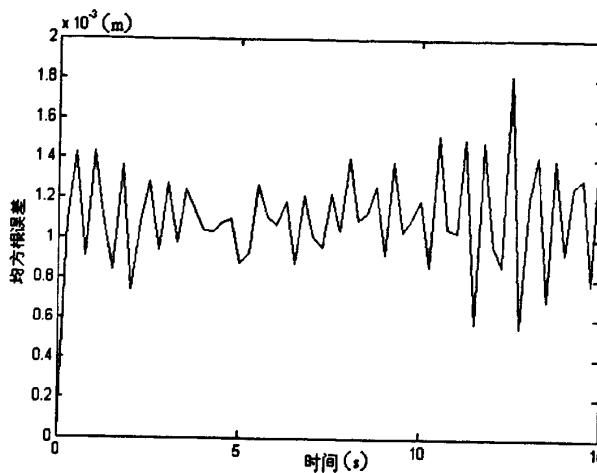


图 4.25 随机风荷作用下天线罩顺风方向(X)位移均方根误差曲线

## 4.5 直径 9.144m 板块划分天线罩的分析及分块的影响

由前几节的分析可以看出，无论在自重还是自重和风载荷同时作用时，天线罩的刚度和强度都有很大的安全裕度。但在实际中，为了制造、运输、安装的方便，通常情况下要对天线罩进行板块划分处理。又由第二章第四节知道，天线罩的板块划分工作复杂繁琐，为了研究板块划分对天线罩刚度和强度的影响，现取一直径为 9.144m 的全分块天线罩进行分析。

### 4.5.1 直径 9.144m 板块划分天线罩的结构响应分析

#### 4.5.1.1 板块划分天线罩的有限元模型

天线罩共分为 49 块。每个分块的截面均为 A 型夹层，总厚度为 28mm。其中每层玻璃钢蒙皮的厚度为 1mm，刚性聚氨酯泡沫的厚度为 26mm，各板块之间拉出法兰（即搭边），相邻分块之间通过法兰的搭接进行连接，如下图 4.26 所示。

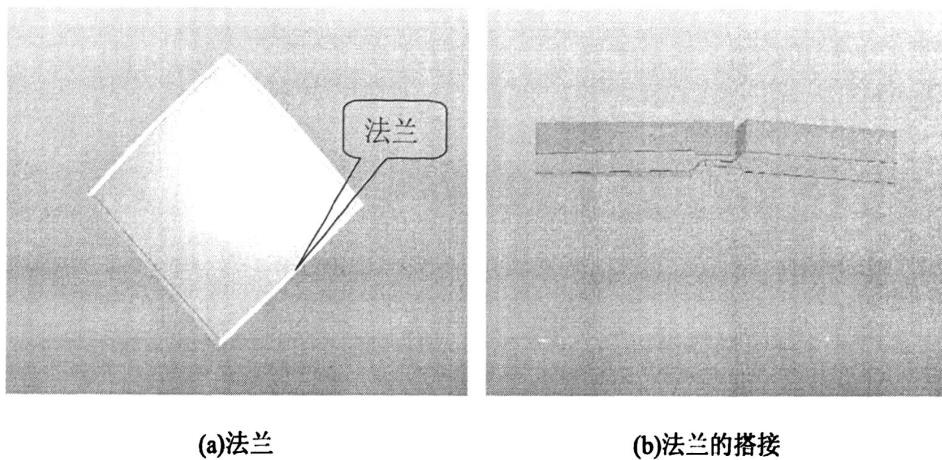


图 4.26 分块之间的连接

根据天线罩电性能、材料和工艺设计方案，建立天线罩夹层结构模型，利用 ANSYS 软件，对天线罩进行仿真分析。天线罩的有限元建模采用 Solid46 单元，Solid46 单元是一种分层实体单元。

本次计算的材料参数：

蒙皮：  $E=17.4\text{GPa}$ ,  $\nu=0.28$ ,  $\rho=1800\text{Kg/m}^3$

聚氨酯泡沫塑料：压缩弹性模量为  $20\text{MPa}$ , 剪切模量为  $2\text{MPa}$   
密度为  $100\text{Kg/m}^3$

风速  $v=57\text{m/s}$

49 分块天线罩的有限元模型如下所示：

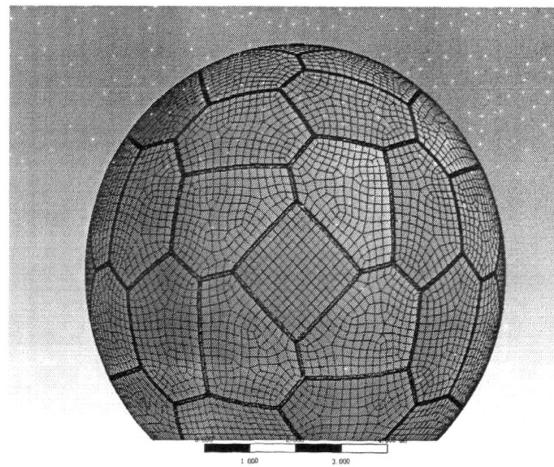


图 4.27 四十九分块天线罩的有限元模型

#### 4.5.1.2 直径 $9.144\text{m}$ 板块划分天线罩的模态分析

在 ANSYS 模态分析中，经计算解得结构前 6 阶固有频率见表

表 4.2 直径 9.144m 板块划分天线罩结构固有频率表

序号	固有频率(Hz)	振型描述
1	12.762	整罩在 ZX 面内的左右摆动
2	12.763	整罩在 YZ 面内的前后摆动
3	31.893	整罩在 ZX 面内的提拉按压振动
4	39.281	整罩绕 Z 轴的左右扭动
5	54.322	整罩在 XY 平面内的左上角和右上角的提拉振动
6	54.325	整罩在 ZX 平面内的左上角和右上角的提拉振动

图 4.28~4.33 是板块划分天线罩前六阶的振型图。

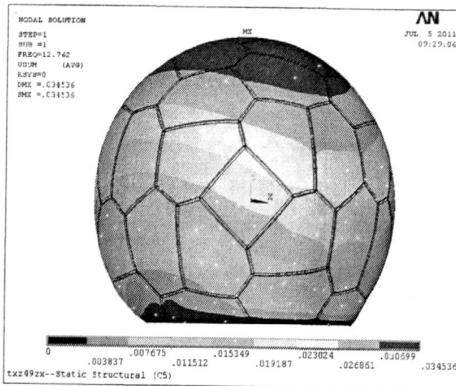


图 4.28 分块天线罩第一阶振型

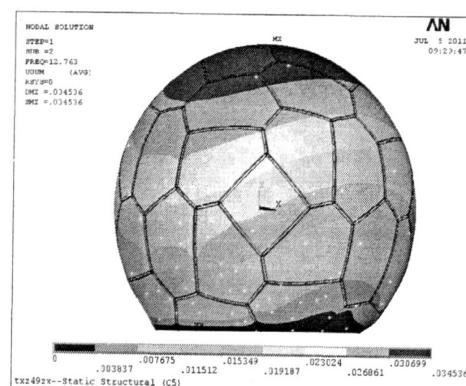


图 4.29 分块天线罩第二阶振型

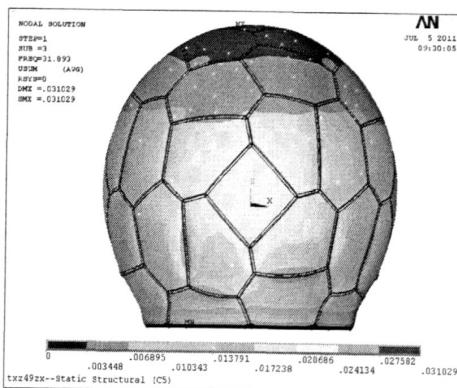


图 4.30 分块天线罩第三阶振型

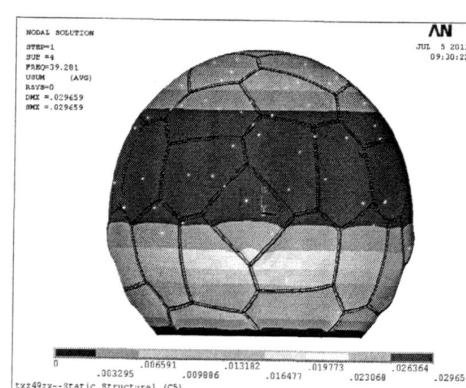


图 4.31 分块天线罩第四阶振型

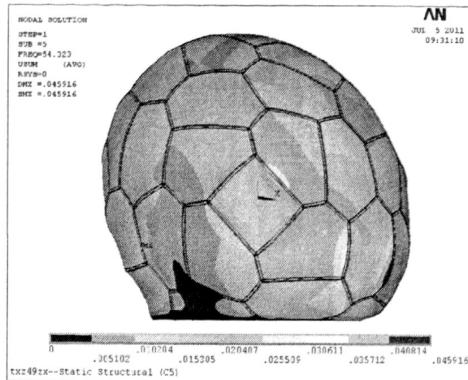


图 4.32 分块天线罩第五阶振型

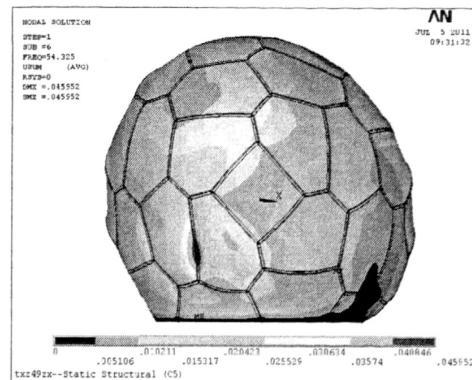


图 4.33 分块天线罩第六阶振型

#### 4.5.2.1 直径 9.144m 板块划分天线罩在重力及静风载组合作用下的响应分析

与前面不分块时的分析方法一样,在此不再重复,具体分析结果如图 4.34~4.38 所示下:

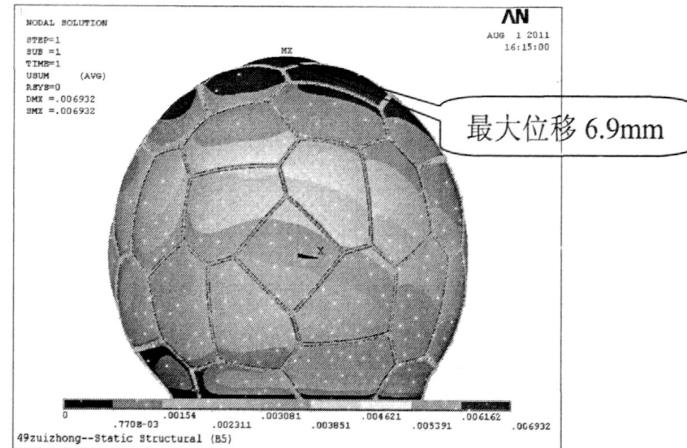


图 4.34 分块天线罩在自重和风载荷组合作用下的变形云图

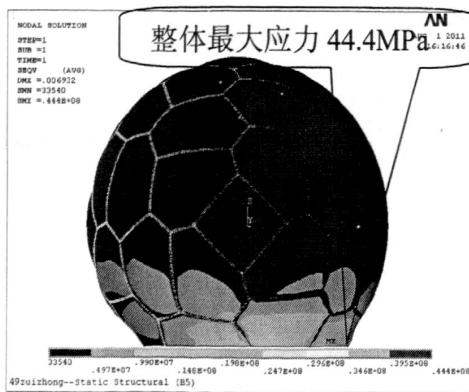


图 4.35 组合作用下整体的应力云图

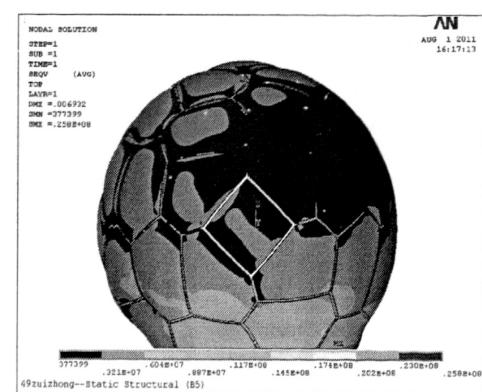


图 4.36 组合作用下外蒙皮的应力云图



图 4.37 组合作用下内蒙皮的应力云图

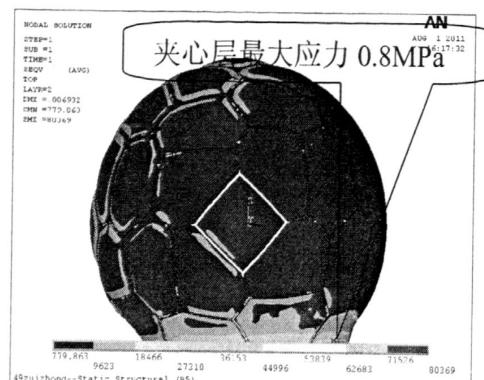


图 4.38 组合作用下泡沫夹层的应力云图

由图 4.34~4.38 可以看出, 直径 9.144m 板块划分球形天线罩在重力及风载组合作用下最大变形出现在天线罩的顶部, 变形量为 6.9mm, 最大应力为 44.4MPa, 出现在天线罩体的玻璃钢搭边与地基相连处。由于搭边材料为强度较大的玻璃钢, 分块模型各分块之间通过玻璃钢搭边相连, 易出现应力集中, 从而使此处的应力值较大。但是此应力值与材料的许用应力相比, 仍有较大的安全余量。

#### 4.5.2.2 直径 9.144m 不分块天线罩的结构响应分析

为了研究分块对力学性能的影响, 下面给出直径为 9.144m 不分块天线罩的模态分析及在重力和静风载组合作用下的分析结果, 以便进行对比。

##### 1、模态分析

不分块天线罩的前六阶阵型如图 4.39~4.44 所示:

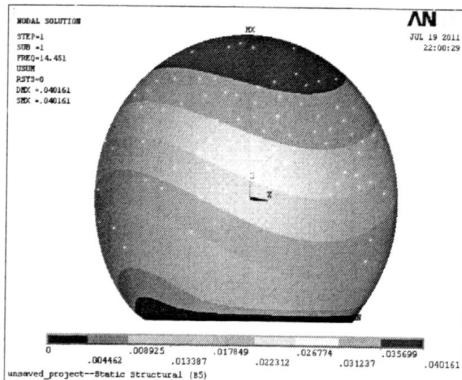


图 4.39 不分块天线罩第一阶振型

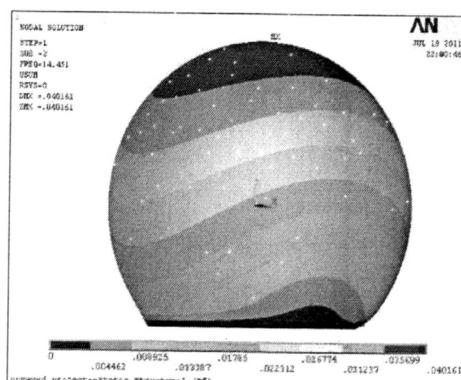


图 4.40 不分块天线罩第二阶振型

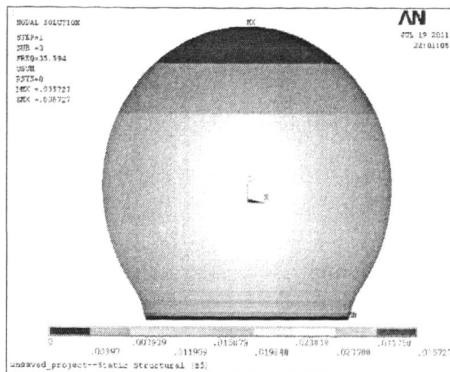


图 4.41 不分块天线罩第三阶振型

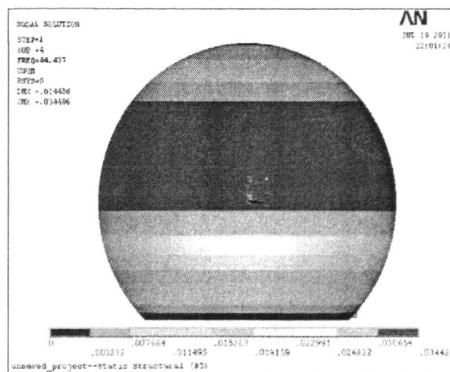


图 4.42 不分块天线罩第四阶振型

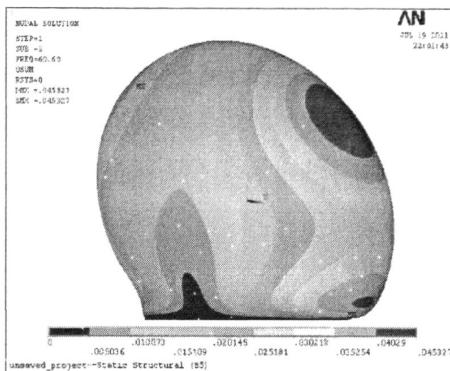


图 4.43 不分块天线罩第五阶振型

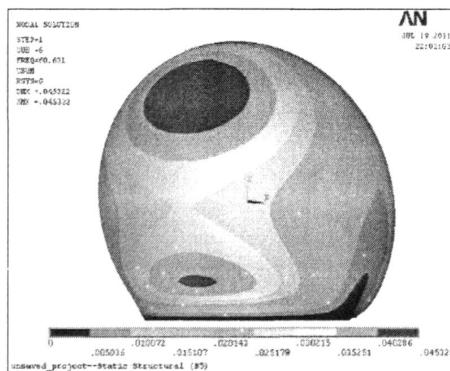


图 4.44 不分块天线罩第六阶振型

## 2、在自重及静风载组合作用下的分析

不分块天线罩在自重及风载荷组合作用下的变形及应力云图如图 4.45~4.48 所示：

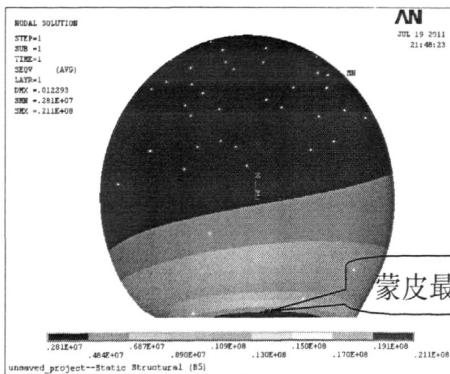


图 4.45 组合作用下外蒙皮的应力云图

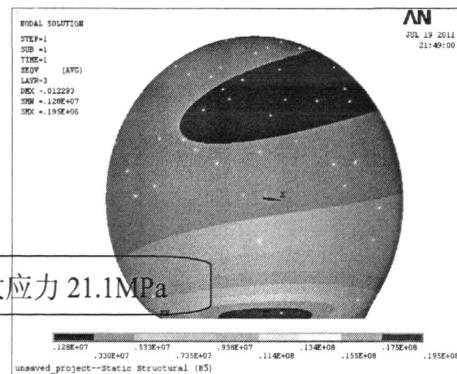


图 4.46 组合作用下内蒙皮的应力云图

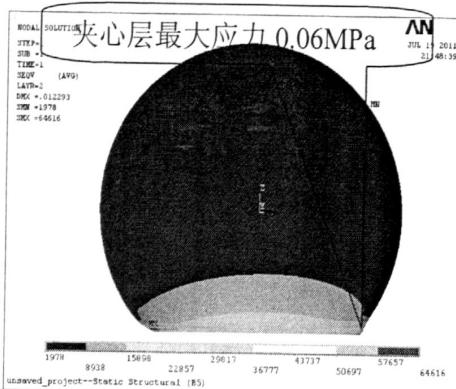


图 4.47 组合作用下泡沫夹层的应力云图

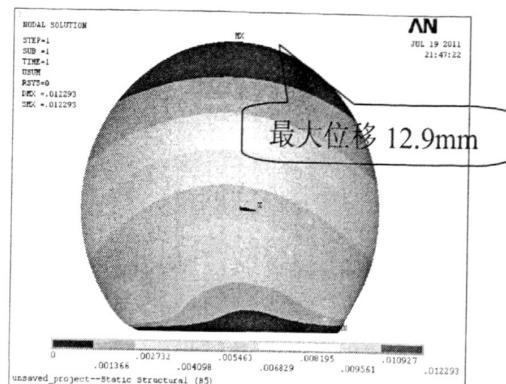


图 4.48 组合作用下整体变形云图

由图 4.45~4.48 可知，在重力作用下，直径 9.144m 不分块天线罩的最大位移为 12.9mm，发生在天线罩的顶部；天线罩蒙皮的最大应力为 21.1MPa，出现在天线罩与基础相连的根部；夹心层的最大应力为 0.06MPa，也出现在天线罩与基础相连的根部。

#### 4.5.2 板块划分对天线罩力学性能的影响

##### 1、模态及振型对比

全分块与光球的模态及振型如下表所示：

表 4.3 固有频率及振型对比表

	频率(Hz)		振型描述	
	49 分块	光球	49 分块	光球
第一阶	12.762	14.451	整罩在 ZX 面内的左右摆动	
第二阶	12.763	14.451	整罩在 YZ 面内的前后摆动	
第三阶	31.893	35.594	整罩在 ZX 面内的提拉按压振动	
第四阶	39.281	44.437	整罩绕 Z 轴的左右扭动	
第五阶	54.322	60.630	整罩在 XY 平面内的左上角和右上角的提拉振动	
第六阶	54.325	60.631	整罩在 ZX 平面内的左上角和右上角的提拉振动	

表 4.4 板块划分天线罩相对于光球天线罩的固有频率偏差表

偏差	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶	第六阶
49/光球	-11.6%	-11.6%	-10.3%	-11.6%	-10.4%	-10.4%

由上面分析对比可知，两种模型的固有频率相差不大，振型基本一致。光球天线罩的质量为 1400.2Kg，49 分块天线罩的质量为 1882.7Kg，故 49 分块天线罩

的质量比光球天线罩的质量大，由表 4.3 可以看出分块天线罩的各阶固有频率与光球天线罩相比依次降低。因此，固有频率的变化趋势是合理的。

## 2、在风载荷作用下的变形及应力对比

表 4.5 应力及变形对比表

	49 个分块	光球
变形(mm)	6.9	12.3
内蒙皮应力(MPa)	23.9	19.5
外蒙皮应力(MPa)	25.8	21.1
泡沫夹层应力(MPa)	0.80	0.06

由以上分析可以看出，两种模型天线罩的最大变形与直径之比分别为  $0.75e-3$ ,  $1.34e-3$ ，数值均相对较小，说明两种模型天线罩的刚性满足天线罩的使用环境要求。两种模型天线罩在自重和风载荷作用下整体的最大应力分别为 44.4MPa, 21.1MPa，这些值与材料的许用应力相比是安全的。

光球天线罩的最大应力出现在天线罩体与地基相连的根部；分块天线罩的最大应力出现在天线罩体的玻璃钢搭边与地基相连处。由于搭边材料为强度较大的玻璃钢，分块模型各分块之间通过玻璃钢搭边相连，故容易出现应力集中，从而使分块天线罩泡沫层的应力较光球有较大的提高，但是这些应力值与泡沫材料的许用应力相比，仍有较大的安全余量。

对于 49 分块的天线罩模型，连接各个分块的玻璃钢搭边相当于一个刚度很大的骨架，对结构起一定的支撑作用。因此，49 分块的天线罩模型在风载和自重组合作用下的变形比光球的要小。

由上分析可知，板块划分天线罩的刚度和强度是满足要求的。

## 4.6 本章小结

在 ANSYS 环境下，运用结构有限元建模关键技术，建立了天线罩整体结构的有限元模型并对其进行了结构响应分析，校核了结构的刚度和强度并得出了以下结论：

(1) 利用有限元软件对直径 40m 的天线罩进行了结构分析。通过分析可以看出介质天线罩仅在自重载荷下结构变形和应力较小；在自重和风载组合作用下，罩体的变形明显加大，安全裕度降低，特别是超大型的天线罩。

(2) 以有限元分析中模态分析理论知识为基础，对直径 40m 的天线罩结构进行了模态分析，并给出了结构前 6 阶固有频率和振型描述。

(3)计算了直径 40m 的天线罩的阻尼系数，对此天线罩进行在随及风载荷作用下的结构响应分析，对比典型风速等效静风荷的分析结果发现，在本算例中，顺风向（总体坐标系 X 方向）位移响应均值与等效静风荷引起的位移吻合。

(4)对直径 9.144m 的板块划分天线罩进行了结构响应分析，并与其相对应的光球天线罩的结构响应分析结果进行了比较，得出了如下结果：对天线罩进行板块划分处理对其强度和刚度的影响不大，并且由于板块划分后连接各个板块的玻璃钢搭边相当于一个刚度很大的骨架，一定程度上还能提高结构的刚度。

## 第五章 直径 40m 天线罩的稳定性分析

### 5.1 引言

结构的稳定性问题是结构分析和设计中的重要研究课题。结构在外载荷作用下突然失去原有形状的现象称为屈曲失稳。失稳破坏常常在强度足够的情况下突然发生，是机械、建筑、航天等诸多工程领域中结构发生稳定性破坏的一种重要形式。由前面的分析知道，天线罩的强度和刚度均满足结构的要求，但由于直径 40m 天线罩的壁厚很薄，属于薄壳结构<sup>[49]</sup>，因此，有必要对其进行稳定性分析。

### 5.2 稳定性分析简介

屈曲分析(稳定性分析)大量存在于钢结构中。现代结构中，大跨度结构、高层结构越来越多(如各种特大型桥梁、超高层建筑等)，这些结构多是全钢结构或以钢结构为主体的。

屈曲分析是研究结构或构件的平衡状态是否稳定的问题。处于平衡位置的结构或构件在任意的微小外界扰动下，将偏离其平衡位置。当外界扰动除去后，仍能自动恢复到初始平衡位置时，说明初始平衡位置是稳定的。如果不能回复到初始平衡位置，说明初始平衡状态是不稳定的。结构或构件由于平衡形式的不稳定性，从初始平衡位置转变到另一平衡位置，称为屈曲(又称为失稳)。在工程结构中，构件、部件及整个结构体系都不允许发生屈曲。屈曲不仅使工程结构发生过大的变形，而且往往导致结构的破坏。

图 5.1 描述了工程结构中常见的两种失稳类型(Force 表示荷载，Deflection 表示变形)。图 5.1(a)为分支点失稳，又称为第一类稳定问题；图 5.1(b)为极值点失稳，又称第二类稳定问题。

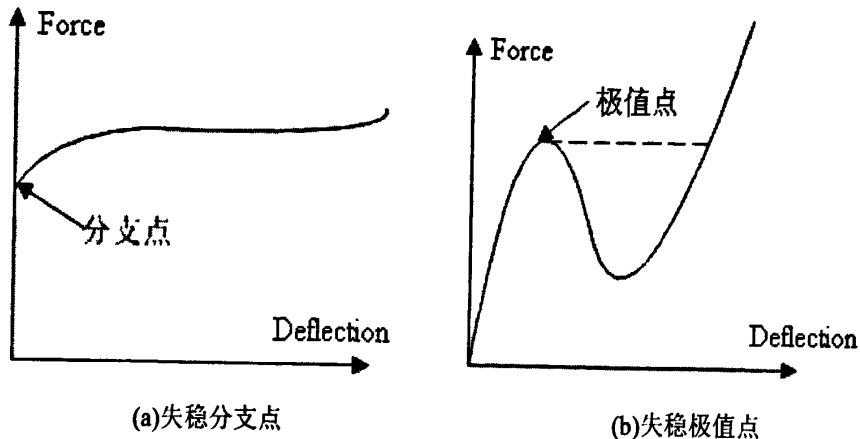


图 5.1 失稳类型

结构或构件保持初始平衡状态，在任意外界扰动下不发生屈曲的最大荷载称为临界荷载。屈曲分析主要用来确定结构开始变得不稳定时的临界荷载和屈曲模态形状。ANSYS 提供特征值屈曲分析(线性屈曲分析)和非线性屈曲分析两种方法来确定结构的临界荷载和结构发生屈曲响应时的特征形状。

### 5.2.1 特征值屈曲分析

特征值屈曲分析用于预测一个理想弹性结构的理论屈曲强度(分叉点),如图5.2所示。该方法相当于弹性屈曲分析方法<sup>[50]</sup>。为了推导特征值问题,首先求解线弹性载荷状态 $\{P_0\}$ 的载荷与位移的关系,即

$$\{P_0\} = \{K_e\} \{u_0\} \quad (5-1)$$

假设位移很小，在任意状态下( $\{P\}$ ,  $\{u\}$ ,  $\{\sigma\}$ )增量平衡方程由下式给出。

$$\{\Delta P\} = \left[ [K_e] + [K_\sigma(\sigma)] \right] \{\Delta u\} \quad (5-2)$$

式中,  $\{u_0\}$  为施加载荷  $\{P_0\}$  的位移结果,  $\{\sigma\}$  为应力,  $[K_e]$  为弹性刚度矩阵,  $[K_\sigma(\sigma)]$  为某应力状态  $\{\sigma\}$  下计算的初始应力矩阵。

假设加载行为是一个外加载荷 $\{P\}$ 的线性函数：

$$\{P\} = \lambda \{P_0\} \quad \{u\} = \lambda \{u_0\} \quad \{\sigma\} = \lambda \{\sigma_0\} \quad (5-3)$$

则可得：

$$[K_\sigma(\sigma)] = \lambda [K_\sigma(\sigma_0)] \quad (5-4)$$

因此增量平衡方程为,

$$\{\Delta P\} = \left[ [K_c] + \lambda [K_c(\sigma_a)] \right] \{\Delta u\} \quad (5-5)$$

在开始不稳定(屈曲载荷 $\{P_{cr}\}$ )时, 在 $\{\Delta P\} \approx 0$ 的情况下, 结构会产生变形 $\{\Delta u\}$ , 前屈曲范围内的增量平衡方程可以表示为:

$$[[K_e] + \sigma [K_o(\sigma)]]\{\Delta u\} = 0 \quad (5-6)$$

上述关系代表经典的特征值问题。为了满足上面关系必须有:

$$[[K_e] + \lambda [K_o(\sigma)]] = 0 \quad (5-7)$$

在 $n$ 个自由度的有限元模型中, 上述方程产生特征值 $\lambda$ 的 $n$ 阶多项式, 这种情况下特征值向量 $\{\Delta u\}_n$ 表示屈曲时叠加到系统上的变形, 由计算出的 $\lambda$ 最小值给定弹性临界载荷 $\{P_{cr}\}$ 。图 5.2 所示为屈曲曲线图。

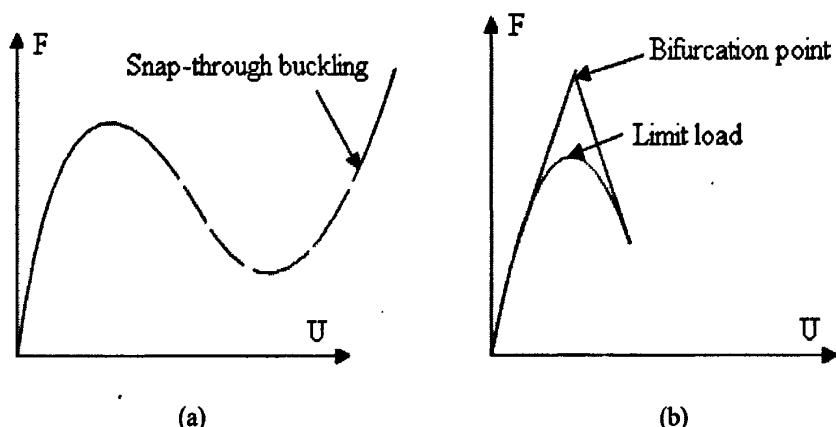


图 5.2 屈曲曲线

特征值屈曲分析一般用于理想弹性结构的理论屈曲分析, 用来估计理想弹性结构的理论屈曲强度。它虽然方便快捷, 但是, 初始缺陷和非线性使得很多实际结构都不是在其理论弹性屈曲强度处发生屈曲。因此, 特征值屈曲分析经常得出保守结果, 通常不能用于实际的工程分析。但是考虑到特征值屈曲荷载是预期的线性屈曲荷载的上限, 特征值矢量屈曲形状可作为非线性屈曲分析时施加初始缺陷或扰动荷载的依据。所以预先进行特征值屈曲分析有助于非线性屈曲分析, 掌握特征值屈曲分析还是必要的、有益的。

### 5.2.2 非线性屈曲分析

非线性屈曲分析是在大变形效应开关打开的情况下所作的一种静力分析, 该分析过程一直进行到结构的限制荷载或最大荷载。分析过程中可包含塑性等非线性选项。非线性屈曲分析考虑了结构的初始缺陷, 结果比特征值屈曲分析精确, 常用于对实际结构进行分析、设计。

该方法用一种逐渐增加载荷的非线性静力分析方法来求得使结构开始变得不稳定时的临界荷载。一种近似的非线性求解是将荷载分成一系列的荷载增量。可

以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前，程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可避免地随着每一个载荷增量积累误差，导致结果最终失去平衡，如图 5.3(a)所示。而通过使用牛顿—拉普森(N.R)平衡迭代克服了这种困难，它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛(在某个容限范围内)。图 5.3(b)描述了单自由度非线性分析中牛顿—拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，N.R 方法估算出残差矢量，这个矢量是回复力(对应于单元应力的载荷)和所加载荷的差值。然后程序使用非平衡载荷进行线性求解，且核查收敛性。如果不满足收敛准则，重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。其具体步骤如下：

- (1)以增量形式逐渐施加载荷；
- (2)在每一载荷增量中完成平衡迭代来使增量求解达到平衡；
- (3)求解平衡方程；

$$[K_T]\{\Delta u\} = \{F\} - \{F_{nr}\} \quad (5-8)$$

式中  $[K_T]$  为切线刚度矩阵；  $\{\Delta u\}$  为位移增量；  $\{F\}$  为外部载荷向量；  $\{F_{nr}\}$  为内部力向量；

- (4)进行迭代，直到  $\{F\} - \{F_{nr}\}$  在允许的范围内。

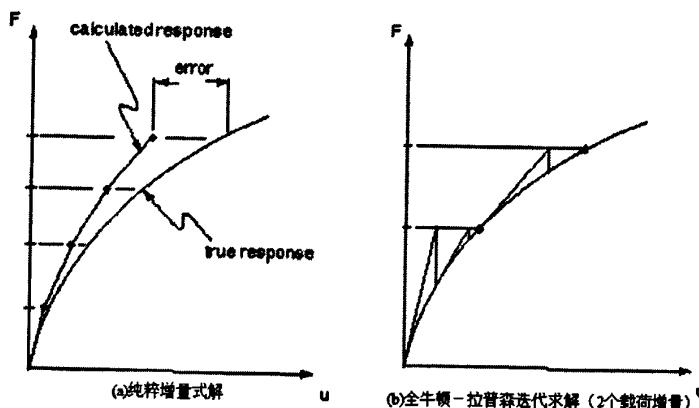


图 5.3 纯粹增量近似与牛顿—拉普森近似的关系。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析，如果仅仅使用 N.R 方法，正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵，导致严重的收敛问题。这样的情况包括独立实体从固定表面分离的静态接触分析，结构或者完全崩溃，或者“突然变成”另一个稳定形状的非线性弯曲问题。对这样的情况，可以采用另外一种迭代方法：弧长方法，来帮助稳定求解。

弧长法和 N.R 法相似，然而其引入了一个附加的未知项：载荷因子力

$\lambda (-1 < \lambda < 1)$ , 力的平衡方程变为:

$$[K_T]\{\Delta u\} = \lambda\{F_n\} - \{F_{nr}\} \quad (5-9)$$

为了容纳附加的未知项, 必须引入一个约束方程(即弧长半径 $l$ ):

$$l = \sqrt{\Delta u^2 + \lambda^2} \quad (5-10)$$

其中弧长半径 $Z$ 将载荷因子力和弧长迭代中的位移增量 $\{\Delta u\}$ 相联系。

弧长方法导致 N.R 平衡迭代沿一段弧收敛, 从而即使当正切刚度矩阵的倾斜为零或负值时, 也往往阻止发散。弧长法和 N.R 方法的对比如图 5.4 所示。

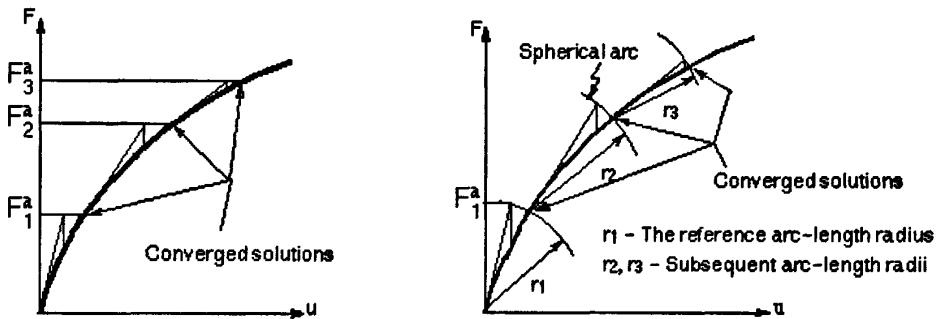


图 5.4 传统的 N.R 方法与弧长方法的比较

### 5.3 直径 40m 天线罩结构稳定性分析

在 ANSYS 中对整体结构进行屈曲分析。首先, 分析了直径 40m 天线罩在均匀外压作用下的稳定性。根据天线罩在承受 57m/s 风荷时要能够正常稳定工作的要求, 进一步对 57m/s 静风载荷作用条件下的稳定性进行分析。

#### 5.3.1 稳定性的相关计算

球壳在满足强度要求的条件下可能发生失稳屈曲而破坏, 需对球壳进行稳定性校核。球壳的稳定性计算较为复杂, 一般采用球壳承受均匀外压来分析其稳定性, 经验临界压力公式为<sup>[51]</sup>:

$$\begin{cases} P_{cr} = 14.82E\left(\frac{t}{2R}\right)^{2.5} \left(\frac{t}{2R} \geq 0.0045\right) \\ P_{cr} = 0.01249E\left(\frac{t}{2R}\right)^{1.19} \left(\frac{t}{2R} < 0.0045\right) \end{cases} \quad (5-11)$$

其中,  $E$  和  $t$  分别为壳体的弹性模量和厚度。对于夹层结构,  $E$  和  $t$  分别为壳体的等效弹性模量和厚度。对于图 5.5 所示的 A 型复合材料夹芯结构, 其等效弹性模量和厚度可通过以下公式计算<sup>[13]</sup>:

$$\begin{cases} 2(aE_{f,\varphi} + bE_{c,\varphi}) = tE_\varphi \\ 2(aE_{f,\theta} + bE_{c,\theta}) = tE_\theta \\ 8[(a+b)^3 - b^3]E_{f,\varphi} + 8b^3E_{c,\varphi} = t^3E_\varphi \end{cases} \quad (5-12)$$

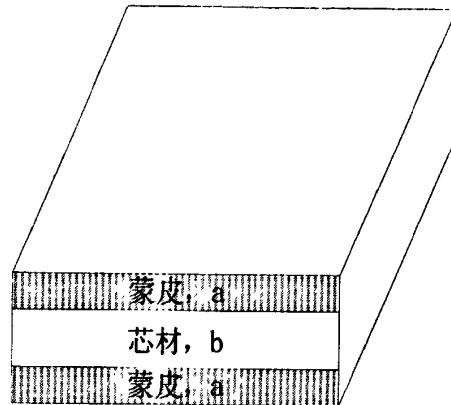


图 5.5A 型夹芯结构截面示意

式中,  $E_\varphi$  为  $\varphi$  方向的等效弹性模量;  $E_\theta$  为  $\theta$  方向的等效弹性模量。  $E_{f,\varphi}$ 、 $E_{f,\theta}$  为蒙皮  $\varphi$ 、 $\theta$  方向的弹性模量;  $E_{c,\varphi}$ 、 $E_{c,\theta}$  为芯材  $\varphi$ 、 $\theta$  方向的弹性模量。进行稳定性计算时, 对于各向同性材料  $E = E_\theta = E_\varphi$ , 对于正交各向异性材料,  $E$  取  $E_\varphi$  和  $E_\theta$  中较小值, 此时可算得稳定系数为  $K_{cr} = P_{cr} / q$ 。

天线罩直径 40m, 3/4 截球。天线罩总厚度为 110mm。其中每层玻璃钢蒙皮的厚度为 0.5mm, 共四层; 每层刚性聚氨酯泡沫的厚度为 54mm, 共两层。

材料的力学性能参数:

蒙皮:  $E=17.4\text{GPa}$ ,  $\nu=0.28$ ,  $\rho=1800\text{Kg/m}^3$

聚氨酯泡沫塑料: 压缩弹性模量为 20MPa, 剪切模量为 2MPa  
密度为  $100\text{Kg/m}^3$

由式(5.12)式算得等效弹性模量  $E=3.57\times 10^8\text{Pa}$ 。此天线罩为 C 型夹芯结构, 即由两层 A 型夹芯结构组成。因此, 其等效弹性模量  $E=7.14\times 10^8\text{Pa}$ 。

由于  $\frac{t}{2R}=0.00275<0.0045$ , 所以

$$P_{cr} = 0.01249E\left(\frac{t}{2R}\right)^{1.19} = 8.00\times 10^4 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

### 5.3.2 直径 40m 天线罩在均匀外压作用下的稳定性分析

利用有限元线性特征值法进行模型屈曲分析, 对模型加均匀外压(此处施加的压力为 40m 天线罩在 57m/s 风速下所受风压的平均值, 为  $1038 \text{ N/m}^2$ ), 算得一阶失稳波形如图 5.6 所示, 稳定系数为 14.17, 而此时解析法计算结果为 8.00。

比较结果发现，有限元算法和解析算法结果有较大差别。其主要原因是解析公式是经过全球壳模型推导并乘以修改因子而得出，并非是真正的截球壳的临界压力公式。在进行稳定计算时，解析解等于忽略了截球的影响。即解析法未考虑边界约束条件的影响，而边界约束提高了模型的稳定性能<sup>[52]</sup>。同时，解析法中的常数项是按经验而得，对不同的分析情况，其结果有一定的差别。有限元算法是以经典的薄壳稳定线性理论为基础，所以有限元法得到的稳定系数数值解要比由经验公式求得的解析解的大。由此可见，模型的实际稳定系数应界于以上两者之间。用解析法经验公式计算稳定性，其结果是偏安全的，用有限元算法则能更加接近实际结果。

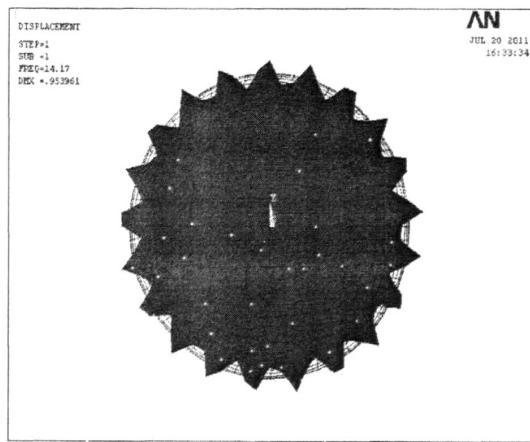


图 5.6 均匀外压作用下天线罩一阶失稳波形（俯视图）

由于在均匀外压作用下，直径40m天线罩边缘一圈与地基相连处的应力是相等的，故其失稳变形是均匀的，又因为刚性聚氨酯泡沫夹芯横向剪切模量较低，造成失稳波形呈现多角形。所以，图5.6所示的直径40m天线罩在均匀外压下的失稳变形是合理的。

### 5.3.3 直径 40m 天线罩在 57m/s 风载荷作用下的稳定性分析

天线罩在使用过程中，风压的大小，直接关系到结构的安全稳定性，必须按照相关规范进行设计。

对于大型天线罩来说，其表面风压的分布函数为：

$$P_0 = q_0 \left( -1.3 + 0.1801 \sin \phi \cos \theta + 0.78 \sin^2 \phi + \frac{3}{4} \times 0.5599 \sin^3 \phi \cos \theta \right) \quad (5-13)$$

其中： $q_0$  为基本风压， $q_0 = \frac{1}{2} \rho v^2$ ；空气密度  $\rho = 1.25 \text{Kg/m}^3$ ， $v$  为风速。

天线罩的设计风压为：

$$P = P_0 \times K$$

$K$ —超载系数，一般取 1.4。

风载荷作用下的天线罩，大部分区域受拉，局部区域(迎风面)受压，因此天线罩的失稳主要体现为局部失稳。

天线罩在承受 57m/s 风速的风载荷下的前 6 阶稳定性系数如下表 5.1 所示：

表 5.1 直径 40m 天线罩在风载荷作用下前 6 阶稳定性系数

阶数	稳定性系数
1	3.07
2	3.07
3	3.32
4	3.32
5	3.38
6	3.38

由上表可以看出，该结构的第一阶临界载荷等于第二阶，第三阶等于第四阶，以此类推。这是因为该结构的横截面是对称的，两个方向的主惯性矩相等。下面是第一阶、第三阶和第五阶屈曲模态。

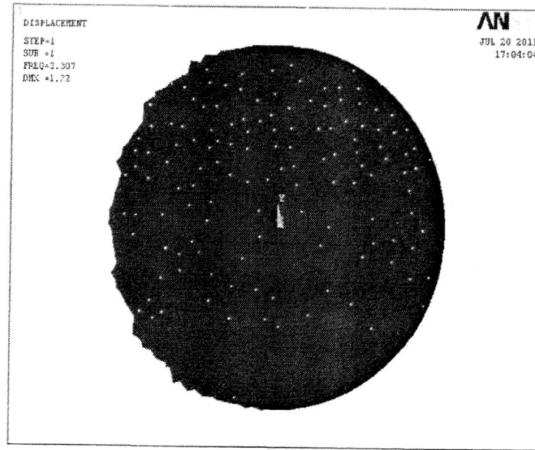


图 5.7 风载荷作用下天线罩第一阶屈曲模态（俯视图）

对比图 5.6 与 5.7 可知，直径 40m 天线罩边缘一圈与地基相连处的应力是相等的，故其失稳变形是均匀的，如图 5.6 所示；而图 5.7 所示为直径 40m 天线罩承受 57m/s 风载荷的屈曲模态图，天线罩边缘一圈与地基相连处的应力大小是不同的，所以失稳波形不均匀。并且，天线罩失稳时最大变形出现的位置与承受风载荷时天线罩最大应力出现的位置是一致的。

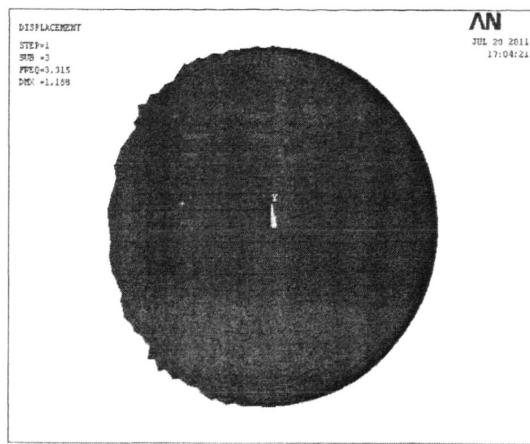


图 5.8 风载荷作用下天线罩第三阶屈曲模态（俯视图）

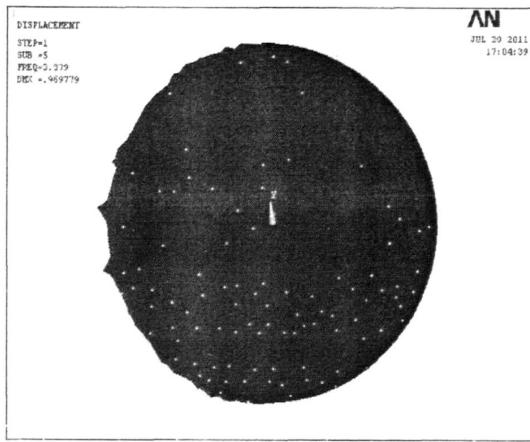


图 5.9 风载荷作用下天线罩第五阶屈曲模态（俯视图）。

不同阶数对应于不同的局部可能失稳部位。屈曲载荷系数在 1 以下时意味着结构失稳，系数在 1 以上表示不失稳。系数越大，表示稳定性越好。

一般情况下，只考虑结构的第一阶稳定性系数。天线罩对应的第一阶稳定性系数为 3.07。而此时的理论解为 1.93。天线罩的第一阶稳定性系数应介于两者之间。因此，结构稳定性是可以保证的。

#### 5.4 本章小结

本章首先介绍了稳定性分析的基本理论和 ANSYS 中的屈曲分析。接着对直径 40m 的天线罩整体结构进行了在特定均匀外压作用下和特定风载荷作用下的稳定性分析，并且得出了以下结论：

- (1)此天线罩在承受均匀外压时，安全裕度较大。57m/s 风载荷作用时，安全系数有所降低。但仍能满足稳定性要求。
- (2)由于风载荷在天线罩上的分布是不均匀的，所以此天线罩在风载荷作用下

的失稳变形也是不规则的。此天线罩失稳时最大变形出现的位置与承受风载荷时天线罩最大应力出现的位置是一致的。

(3)在进行稳定性分析时，解析公式未考虑边界约束条件的影响，而边界约束提高了模型的稳定性能。有限元算法是以经典的薄壳稳定线性理论为基础，所以有限元法得到的稳定系数数值解要比由经验公式求得的解析解的大。模型的实际稳定系数应界于以上两者之间。在 57m/s 风载荷作用时，此天线罩的第一阶稳定性系数应界于两者之间，因此，结构稳定性是可以保证的。

## 第六章 总结与展望

### 6.1 总结

本论文以直径 40m 的光滑球形天线罩和直径 9.144m 的板块划分球形天线罩为工程背景, 以有限元理论为基础, 使用 ANSYS 分析软件及根据 ANSYS Mechanical APDL 语言编制风荷自动加载程序对天线罩结构进行了结构分析。

现将本论文的工作进行如下总结:

(1)查阅文献了解天线罩的产生及作用, 熟悉了天线罩结构形式的发展过程, 根据国内外的发展现状提出了本文的研究背景。

(2)根据天线罩内天线的电性能要求, 导出了天线罩壁厚的计算公式; 依据天线罩的结构形式和截面特点对天线罩进行分类, 总结了各种类型的优缺点; 参照天线罩的板块划分方法及原则, 给出了六种常见的划分方式, 并对每种方法进行了详细的说明。

(3)根据风荷的基本理论, 结合天线罩上风压的特点对风载荷进行离散化处理。即用 ANSYS Mechanical APDL 语言编程, 算出天线罩上每个微元面积的风压, 存入数组, 从而实现了对天线罩上不同的微元面积施加不同的风压; 接着根据风的脉动性质, 将脉动风速用具有明显的各态历经特性的零均值高斯平稳随机过程来描述, 然后用 MATLAB 编程实现了随机风速的数值模拟, 给出了天线罩上风载荷的计算公式。

(4)以有限元分析为基础, 对直径 40m 天线罩结构进行了静态分析和模态分析, 并给出了结构的固有频率和振型描述; 依据其模态分析的结果, 计算直径 40m 天线罩的阻尼系数, 并进行了瞬态响应分析。根据仿真分析的结果, 验证结构满足了刚度、强度的要求, 并给出了直径 40m 天线罩上最大位移节点的位移均方根误差曲线, 由曲线可以看出, 此天线罩能够满足其工作精度的要求。结合具体的工程实例, 对直径 9.144m 天线罩进行板块划分, 并进行结构分析, 通过与其不分块天线罩的对比得到: 板块划分使天线罩的最大变形减小了 45%; 使天线罩的最大应力提高了 20%, 但此应力值仍在材料的许用应力范围内。

(5)以 ANSYS 屈曲分析理论知识为基础, 对直径 40m 天线罩进行稳定性分析。给出了此天线罩结构在均匀外压下的稳定性系数; 并对其在 57m/s 风载荷作用下进行稳定性分析, 得到了结构的屈曲模态图。综合解析解与 ANSYS 分析结果可知直径 40m 天线罩的稳定性满足要求。

## 6.2 展望

由于时间的原因和作者知识的局限，本文还有许多方面有待进一步研究和改进，例如：

(1)本文只涉及天线罩板块划分的基本概念及划分原则的介绍，对天线罩具体的划分方案还没有进行系统的研究，所以在对天线罩模型进行结构分析前的处理工作比较漫长繁琐。

(2)大型天线罩结构工程的目的是确保无线电设备正常运行，涉及各种因素，有条件的情况下应对天线罩的工艺成型过程以及整体结构进行定量的结构和电性能试验分析，从而验证结构工艺的可行性。

## 致 谢

本论文能够顺利完成离不开导师仇原鹰教授悉心的指导。感谢导师在我攻读硕士学位期间从科研、学习乃至思想等方面都给予了我耐心细致的关怀和教导。导师不断地以自身对科学的热忱，治学严谨的态度感染着我；导师高尚正直的品格、谦虚朴实的作风是我做人做事的典范；导师渊博的知识、严谨的治学态度和敏锐的洞察力是我工作的楷模；导师孜孜不倦、兢兢业业的工作态度为我树立了榜样。在此，对导师在学习、科研和生活上给予的关怀和帮助再次表示最衷心的感谢！

同时也衷心感谢师母盛英老师。盛老师不仅在学习上关心我们，而且在科研和生活上给予我们很多的关怀和帮助，在这里在此对师母表示感谢！

感谢实验室的陈瑞、刘鸽、吴永康、吕慧、李龙、李春贺、王飞、于亮亮、葛持恒等同学！他们刻苦钻研的精神给我留下深刻的印象。从他们的身上我学到的不仅有丰富、深厚的理论知识，还有工作中相互交流的方式、方法。

感谢我的父母、亲友一直给予我的理解、关心和支持。

感谢曾经给予我帮助和支持我的所有老师、同学和亲人！



## 参考文献

- [1] 杜耀惟. 天线罩电性能设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 34-179
- [2] 朱波芳. 玻璃钢地面雷达天线罩[C]. 哈尔滨: 哈玻所, 2003: 3-4
- [3] 夏彬, 冯军. 地面卫星站天线罩技术[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2006, 5(5): 56-61
- [4] D L Puritan Broadband composite structure fabricated from inorganic polymer matrix reinforced with glass or ceramic woven cloth[J]. Andrew Noah van Norstrand, 2000(5): 23-26
- [5] A.D.Monk, Twills, J.Sangiolo. & A.Cohen, Radomes for large millimeter and sub-millimeter wave antenna systems [J]. IEEE Trans., 1971(7): 67-71
- [6] <http://www.Radome.net> Antennas For Communication Dietetic Radomes
- [7] 刘华林. 影响雷达天线罩性能的主要因素分析[J]. 战术导弹技术, 2004(1): 23-28
- [8] 舒卫国, 杨博. 大尺寸高性能雷达天线罩的研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(1): 51-52
- [9] M.I Kneel, 《雷达手册》[M]. 谢卓译, 北京: 国防工业出版社, 1974: 123-145
- [10] 哈玻院. 玻璃钢地面雷达天线罩[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003: 23-121
- [11] 金勇. 天线罩在地面天线系统中的应用[J]. 元器件与应用, 2005(8): 35-39
- [12] 敖辽辉. 天线罩技术的发展[J]. 电讯技术, 2000, 2(3): 75-79
- [13] 韦生文. A型夹芯复合材料在地面雷达天线罩中的应用[J]. 电子机械工程, 2006, 22(4): 35-39
- [14] 唐守柱, 何炳发, 王仁德. 金属空间桁架天线罩的分析与研究[J]. 现代雷达, 2006(19): 56-59
- [15] 雷达技术编译组. 金属空间骨架天线罩的设计[J]. 雷达技术资料, 1976(3): 106-150
- [16] 姚海南, 翁雷. 玻璃钢地面雷达天线罩连接形式与探讨[J]. 玻璃钢, 2002(2): 25-31
- [17] 鞠金山, 陈学军, 施陆益. 雷达天线罩制造工艺研究[J]. 复合材料, 2003(18): 12-16
- [18] 张志斌. 某型号天线罩的电气结构设计[D]. 西安: 西安电子科技大学学位论文, 2008

- [19]李渠塘. 双波段测控天线罩性能分析[J]. 无线电工程, 2003, 2(25): 15-21
- [20]阎宏涛. 大型天线罩的结构工程研究[D]. 西安: 西安电子科技大学学位论文, 2007
- [21]周槿. 雷达天线罩装配工艺设计概述[J]. 电子机械工程, 2005, 12(1): 35-41
- [22]闫法强. 夹层结构天线罩材料的设计、制备及其宽频透波性能. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2007
- [23]崔益, 陈梦怡, 张华. 大型精密测量雷达天线罩的研制[J]. 玻璃钢/复合材料, 2003(21): 56-60
- [24]Peter Sachs. Wind Forces in Engineering [M]. New York: Pergamon Press, 1978: 134-157
- [25]C J Richards Mechanical Engineering in Radar and Communication [J]. Van Norstrand, 1969(16): 78-82
- [26]陈建军. 天线结构风荷响应的随机振动分析. 天线结构分析、设计与实验研究论文集[C]. 西安: 西北电讯工程学院资料, 1986: 26-35
- [27]张相庭. 结构风压与风振计算[M]. 上海: 同济大学出版社, 1985: 78-112
- [28]Alan Gamst Davenport. Buffetting Of Suspensions Bridge By Storm Winds [J]. Journal Of The Structural Division. Proceedings Of The American Society Of Civil Engineering, 1962(6): 233-268
- [29]王之宏. 风荷载的模拟研究[J]. 建筑结构学报, 1994, 15(1): 44-52
- [30]毛用才, 胡奇英. 随机过程[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999: 45-106
- [31]舒新玲, 周岱. 风速时程 AR 模型及其快速实现[J]. 空间结构, 2003, 9(4): 27-32
- [32]赵臣, 张小刚, 吕伟平. 具有空间相关性风场的计算机模拟[J]. 空间结构, 1996, 2(2): 21-25
- [33]A Bhatt, Al-Rewashed HS, Murtaza G. Finite element modeling of an optical antenna using piezoelectric polymer coated D-fibre. Antennas and Propagation Society [J]. International Symposium on Nonlinear Dynamics, 2007, 12(6): 74-77
- [34]Mario Di Paola. Digital Simulation of Wind Field Velocity. Journal of Wind [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 33(8): 74-76
- [35]H Moriches, Y Kim Fujimoto K. Design concept of antennas for small mobile terminals and the future perspective [J]. Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(5): 30-43
- [36]Shinozuka Muja C M. Digital simulation of random processes and its application [J]. Journal of Sound and Vibration, 1972, 25(1): 111-128
- [37]王肇民. 高耸结构振动控制[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 74-101.

- [38] 贾建援. 工程有限单元法[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2000: 12-89
- [39] 龚曙光, 谢桂兰, 黄青云. ANSYS 参数化变成与命令手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 21-231
- [40] 王富耻, 张朝晖. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 54-98
- [41] 赵海峰, 蒋迪. ANSYS8.0 工程结构实例分析[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004: 125-168
- [42] 刘雄亚, 晏石林. 复合材料制品设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 32-56
- [43] 博弈创作室. ANSYS7.0 基础教程与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 15-127
- [44] Triantafillou MS, L Grinfogel. Natural frequencies and modes of inclined cable [J]. Structural Engineering, 1986, 112(1): 139-148
- [45] K Takahashi, Dynamic stability of cables subjected to an axial periodic load [J]. Sound. Vibe, 1991, 144(2): 323-330
- [46] K Takahashi, Y Knish. Non-linear vibrations of cables in three dimensions. Nonlinear free vibrations [J]. Sound Vibe, 1987, 118(1): 69-84
- [47] GV Rae, RN Avenger. Internal resonance and non-linear response of a cable under periodic excitation [J]. Sound Vibe, 1991, 149(1): 25-41
- [48] 祝效华, 余志祥. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 73-128
- [49] 佟丽莉, 孟松鹤, 陈辉. 大型地面雷达天线罩内力及稳定性分析[J]. 纤维复合材料, 2002(4): 3-5
- [50] 周长城, 胡仁喜, 熊文波. ANSYS11.0 基础与典型范例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 36-134
- [51] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1994: 46-125
- [52] 覃海艺, 邓京兰, 王继辉. 截球形地面雷达罩在风载荷作用下的力学分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(12): 23-28



## 在研期间参加的科研项目

在硕士研究生期间参加的科研项目如下：

- 1、波导阵列天线的设计及结构分析，某研究所。2010.04~2010.09
- 2、机载信息处理机的结构仿真分析，某研究所。2011.03~2011.06
- 3、天线罩的结构仿真分析，某研究所。2011.06~至今