



摘要

论文的工程背景是新一代射电天文望远镜—澳大利亚平方公里阵探路者(ASKAP),课题来源于该项目中12米天线结构的有限元分析和精度测量。该天线结构独特、工作环境复杂、技术指标要求高,其中天线反射面精度是重点关注的技术指标之一。在设计过程中需用有限元方法对其进行仿真分析,找到结构设计的薄弱环节,加以改进,直到满足技术指标要求;需要对实际天线进行精度测量,验证是否达到设计要求以及有限元分析的正确性,进而估算出在最恶劣条件下反射面精度。

首先,在分析该天线特性的基础上,根据天线结构的实际工作环境,主要承受的重力载荷、风力载荷和温度载荷(环境温度和太阳辐射),利用MSC.Patran建立天线结构的有限元模型。针对天线工作最苛刻条件进行了天线初始结构的变形和应力分析,发现天线结构薄弱环节并加以改进。针对各种载荷和天线各种典型姿态,建立了19种典型分析工况,分别得到了天线反射体在各个工况下的变形、应力云图等数据。同时根据设计需要,对天线结构进行了模态分析。

然后,引入了重力影响的天线仰天安装误差,利用“反射面天线精度分析软件”获取了最佳拟合抛物面的反射面法向误差等数据,分析计算了天线结构技术要求的指标值。通过对天线反射体各工况下的变形和应力变化的深入分析,得到了一些反射体变形和应力在不同姿态、工况下的一般性规律。

最后,选取与有限元分析工况相对应且具备测量条件的6种工况,利用V-STARS摄影测量系统测量了天线反射面的精度,借助测量软件MeroIn,把实际测量的数据转换为反射面在各工况下的法向均方根误差,将其与相对应的有限元分析结果进行了对比分析,分析结果表明实际天线的反射面误差与有限元分析的计算值相吻合,验证了天线结构的有限元模型的正确性和分析的可信性。从而可以利用有限元分析结果估算不具备测量条件工况下天线反射面精度。

论文通过以上工作,进一步完善了天线的结构设计,确保该天线满足了各项技术指标要求。

关键词: 天线 结构 有限元分析 数字近景摄影测量

Abstract

This paper focuses on the structural analysis and precision measurement of a 12-meter antenna, which is an important part of a new generation radio telescope system - the Australia Square Kilometer Array Pathfinder (ASKAP) radio telescope project. Its working condition is complex, and its technical requirements, especially the reflector surface accuracy, are strict. To improve the structure of the antenna, a finite element analysis (FEA) should be utilized during the design process. In addition, the accuracy of the antenna should be measured to satisfy the design requirements and verify the results of FEA. Moreover, the reflector surface accuracy in the worst condition is estimated.

Firstly, the finite element model of the antenna is established by using MSC. Patran. Considering the antenna's working environment, such as its gravity load, wind load and solar radiation, 19 load cases are considered to meet the design requirements. The deformation and stress contour of the antenna's main reflector panel in each load case is analyzed. Besides, the normal modes of the antenna are analyzed.

Subsequently, considering the effect of the antenna's gravity on the assembly errors, data as the root-mean square (RMS) errors along the normal direction of the best fit reflector surface etc are obtained. Then a technical requirement index is given. In addition, some regularity of the deformation and stress of the antenna are found out in different postures and load cases.

Finally, 6 operating conditions of the measurement program are selected, which are close to the corresponding conditions of FEA. The accuracy of the antenna's reflector panel is measured using V-STARS system. Based on these data, the RMS errors along the normal direction are obtained by the measurement software MeroIn. These result shows that the FEA of the antenna's structure is reliable. Further, the reflector surface accuracy in unachievable conditions can be also estimated by using the FEA results.

With the work in this paper, the antenna's structure is improved, and its technical requirements are satisfied.

Keywords: antenna structure FEA digital close range photogrammetry

目录

第一章 绪论	1
1.1 项目来源及意义	1
1.2 天线结构力学分析研究与现状	2
1.3 天线反射面精度测量的技术手段和现状	3
1.4 12米射电望远镜天线的技术要求	4
1.4.1 一般技术要求	4
1.4.2 工作环境条件	5
1.5 本文主要工作	5
第二章 天线结构有限元分析的基本理论	7
2.1 概述	7
2.2 有限元分析一般步骤	7
2.3 建立分析模型的几个问题	8
2.3.1 建立模型问题	8
2.3.2 网格划分问题	10
2.3.3 天线载荷问题	11
2.4 小结	14
第三章 12米天线结构有限元分析	17
3.1 12米天线结构简介	17
3.2 12米天线结构有限元模型	18
3.2.1 有限元模型建立	18
3.2.2 有限元模型节点与单元划分	22
3.2.3 材料特性	23
3.2.4 载荷	23
3.2.5 约束	24
3.3 分析工况	25
3.4 计算方法	26
3.5 结构改进	28
3.6 分析结果	33
3.6.1 天线反射面变形分析	33

3.6.2 天线强度分析.....	43
3.6.3 天线结构模态分析.....	45
3.7 小结.....	46
第四章 天线反射面摄影测量.....	49
4.1 引言.....	49
4.2 数字近景摄影测量的基本理论.....	49
4.2.1 数字近景摄影测量系统构成及测量流程.....	49
4.2.2 数字近景摄影测量注意事项.....	50
4.3 12 米天线摄影测量的方法和结果.....	51
4.3.1 数字近景摄影测试系统.....	51
4.3.2 摄影测量条件.....	51
4.3.3 测试过程.....	52
4.3.4 测量结果.....	53
4.4 天线反射面 FEA 的验证分析.....	53
4.5 天线反射面精度的估算.....	55
4.6 小结.....	55
第五章 总结与展望.....	57
5.1 总结.....	57
5.2 展望.....	58
致谢.....	59
参考文献.....	61
研究成果.....	65

第一章 绪论

1.1 项目来源及意义

本文工作来源于澳大利亚平方公里阵探路者(ASKAP)射电望远镜天线项目。ASKAP 是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)开发的新一代射电天文望远镜。它由 36 台 12 米天线组成,构成一个天线阵,安装在澳大利亚的戈壁荒原上。

根据 ASKAP 项目澳大利亚方面提出 12 米天线技术要求,结构与以往的通信测控天线有显著不同:天线座部分比较高(通常是 3m,该天线座体部分高度为 7.5m);天线座是三轴,在 A、E 轴的上方加了极化旋转轴,天线头部分要整体转动(通常是 A、E 轴或 A、E 加倾斜轴);技术指标要求高,要求在实际工作环境条件下,天线任意转动到正常工作角度范围时,反射面最佳拟合抛物面的实际表面法向均方根误差 $\leq 1\text{mm}$,馈源位移不应超过 3mm,馈源平面的法线与天线光轴的角位移不得超过 0.2 度;要依据实际的环境条件仿真分析,需要在不同天线姿态、风载荷、环境温度、日照等条件下进行有限元结构分析。

根据项目的具体情况,天线结构有限元模型要将天线头、馈源、天线座等作为一个整体系统进行考虑;重点关注的部位网格需要加密,其他部分网格可以稀疏;要分析多种姿态的工况,并且要把风载、温度、日照等载荷条件加入。根据分析数据,找出结构薄弱环节,进行结构设计修改,直至满足设计要求。

项目要求对实际天线进行精度测量,以满足制造安装的需要,验证是否达到设计要求和有限元分析结果的的正确性,进而可利用有限元分析数据估算出最恶劣条件下反射面的精度。同时,利用天线精度测量数据,比较天线有限元分析中的仿真形变与实际工作状态下变形的差异程度,可对有限元分析模型进行有针对性的改进。

本项目用的天线精度测量方法是摄影测量法。它是一种量程大、精度高、测量速度快、自动化程度高、劳动强度小、易于数字处理以及对天线的姿态无特殊要求的测量方法。实际测量既满足制造安装的需要,也对天线设计是否达到精度要求进行验证。

1.2 天线结构力学分析研究与现状

射电望远镜天线结构是大型的精密电子机械设备,在设计上有某些特殊的要求,例如它的结构设计必须满足天线电性能要求。天线结构设计涉及到多个学科,天线结构的力学分析是其中主要的一个方面。由于天线结构是一种大型的复杂组合结构,需对整体结构进行计算分析,来作为设计的依据。有限元分析方法是结构分析的重要手段,已广泛应用于天线结构力学分析当中。

上世纪五十年代有限单元法诞生以来,即受到广泛认可和重视,在工程中得到了大量应用,有限元分析技术也日臻完善。有限元计算结果已成为产品设计和性能分析的可靠依据。随着电子计算机技术的发展和应用,自20世纪80年代开始,相继出现了许多商品化有限元分析软件,有限元分析软件的前、后处理功能也日益加强。对于结构分析,现在人们常用的有限元分析软件有 MSC.Patran^[1]、Ansys、Abaqus、Adina 等。

目前,国外大型天线制造已发展成熟,早在上世纪70年代美国就建造了迄今为止世界上最大口径天线——Arecibo 球面射电望远镜,其直径为305米,90年代末又建立了最大的可动式天线——GreenBank 碟面天线^[2],口径为110米,另外如德国、澳大利亚、日本也已经制造出口径数十米至上百米的的天线。人们通过在天线力学分析、优化、测量等多方面的技术研究,提高整体的设计水平,出现了具有稳定的、受温度影响小的背架结构,精密的反射面面板和主动面板^[3-4]等新型天线,提高了指向稳定性和跟踪性能^[5-7]。这些天线,在结构设计中都无一例外的采用了有限元分析技术^[8-11],使有些大口径、毫米波天线的波束宽度达到几角秒,指向误差1角秒,反射面均方根误差0.1毫米甚至更高。

国内研制的已经使用和正在制造的大型天线有北京50米、昆明40米、上海65米等射电望远镜天线。国内发表的天线结构分析专著有《天线结构设计》^[12]、《天线结构分析、优化与测量》^[13]等。通过工程实践和理论研究^[14-17],使我国大型天线的结构设计迈入了国际先进行列。

虽然天线结构分析技术经过前人的不断摸索和经验积累,已经建立起了一套完整的解决方法,但是由于天线结构的复杂多变,结构分析中仍然存在大量问题有待解决或需要改进。例如基础数据和细节方面还有待于提高,特别是风载和太阳照射的基础研究还不够深入。在国外风载的确定通常有两种解决办法^[18-21]:一是采用风洞试验的方法(对于大型天线需要建立缩小比例的实物模型);二是使用流体力学软件如 Ansys Fluent 来分析,确定风载的具体分布和大小。太阳照射导致天线结构变形的研究在国内外已经有一些成果^[22-24]。

1.3 天线反射面精度测量的技术手段和现状

天线反射面的表面精度要求与工作频率有关系,工作频率越高,对表面精度的要求就越严。一般要求表面精度是天线工作波长的 $1/16\sim 1/32$,而测量精度要达到表面精度的 $1/3\sim 1/5$ 。对于大中型天线反射面的测量,现在常用的方法^[25]主要有光学经纬仪带尺法、双电子经纬仪测量法、全站仪测量法、激光跟踪仪测量法、数字近景摄影测量法^[26-29]和射电全息测量法等^[30]。

1. 光学经纬仪带尺法

光学经纬仪带尺法是经典的传统测量方法,其量程较小、精度较低、测量速度慢,需要人工操作且劳动强度较大。

2. 双电子经纬仪测量法

双电子经纬仪测量法是由两台或两台以上的高精度电子经纬仪构成,进行天线反射面的空间角度前方交会测量,是天线工作状态天线测量应用最早和最多的一种系统。双电子经纬仪测量法的优点是测量范围较大,是光学、非接触式测量方式,测量精度比较高,在二十米范围内的坐标精度可达到 $\pm 10\mu\text{m}/\text{m}$;其不足是一般采用手动照准目标,逐点测量,测量速度慢、自动化程度不高。但目前已出现了带马达驱动的经纬仪,在重复测量时可不需人眼瞄准目标、实现自动化测量。

3. 全站仪测量法

全站仪测量法是空间极(球)坐标测量的方法。全站仪坐标测量系统只需单台仪器即可测量,因此仪器设站非常方便和灵活,且测量范围可达到 200 米,测量精度为 $\pm 0.2\sim 0.5\text{mm}$ 。

4. 激光跟踪仪测量法

激光跟踪测量法原理与全站仪相同,系统是由单台激光跟踪仪构成的球坐标测量系统,测距的方式采用单频激光干涉测距,精度较高。由于干涉法距离测量的精度高,测量速度快,因此激光跟踪仪的整体测量性能和精度要优于全站仪。在测量范围内(一般 $<80\text{m}$),ADM 绝对测距仪精度达到 $\pm 10\mu\text{m}+1.5\mu\text{m}/\text{m}$,角度测量精度 $\pm 15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ 。

5. 数字近景摄影测量法

数字近景摄影测量是通过在不同的位置和方向获取同一物体的 2 幅以上的数字图像,经计算机图像匹配等处理及相关数学计算后得到待测点精确的三维坐标。其测量原理和经纬仪测量系统一样,均是三角形交会法。数字近景摄影测量系统由于具有精度高(一般可达 $1/10$ 万 $\sim 1/12$ 万)、非接触测量、便携、测量现场工作量小、快速、高效和不易受温度变化、振动等外界因素的干扰的特点。在国外,数字近景摄影测量技术和研究已趋于成熟,已经广泛应用到天线反射面的精度测

量, 而国内应用还相对较少, 例如 50 米天线反射面的测量等^[31]。不过, 随着此方法在天线反射面测量的广泛应用, 必将成为一种发展趋势。国外的生产厂家和产品很多, 如美国 GSI 公司的 V-STARS 系统^[32]、挪威 Metronor 公司的 Metronor 系统和德国的 Gom 公司的 TRITOP 系统、德国 AICON 3D 公司的 DPA-Pro 系统等。

6. 射电全息测量法

射电全息测量方法是利用天线的远场复方向图与天线口面上的场分布间的傅里叶变换关系, 由远场方向图的测量来反推天线口面的场分布(振幅和相位分布), 并由天线口面上场的相位分布, 根据光学原理得到天线表面相对于理想表面的偏差。射电全息测量法分为两类: 一类是测量远场方向图的幅度并直接测量远场方向图的相位, 这需要在被测天线附近设置另一具天线来提供参考相位, 并须要具有相位稳定的双通道接收机。另一类是无相位的测量方法, 即采用某种相位恢复算法, 由天线的聚焦和偏焦方向图的幅度来获得天线口面上场的振幅和相位分布。无相位的测量方法相对前一种方法设备简单, 对一架工作中的望远镜几乎无需增添额外的设备, 但此方法对测量天线方向图的信号源要求有较高的信噪比。射电全息测量法是在天线工作状态下进行测量, 其特点是量程无限制、精度高、实时测量、自动化程度高。

由于摄影测量法量程大、精度高、测量速度快、自动化程度高、劳动强度小、易于数字处理以及对天线的姿态无特殊要求, 本研究项目拟使用摄影测量法。

1.4 12 米射电望远镜天线的技术要求

1.4.1 一般技术要求

- a) 天线型式: 前馈式标准抛物面天线
- b) 天线直径: 12m
- c) 焦径比 f/D : 0.5
- d) 座架型式: 方位-俯仰-极化三轴全转台式
- e) 天线转动范围:
 - i. 方位: $\pm 270^\circ$
 - ii. 俯仰: $15^\circ \sim 90^\circ$
 - iii. 极化: $\pm 180^\circ$ (由旋转反射面和馈源支撑形成, 极化角零点在两条相对馈源支撑腿形成的平面上)

- f) 反射面精度：
表面误差 $\leq 1\text{mm}$ (rms) (正常工作的情况下，最佳拟合抛物面的实际表面精度)
- g) 馈源位移(即馈源相对于焦平面直线位移量)不应超过 3mm。
- h) 馈源平面的法线与天线光轴的角位移不得超过 0.2 度。
- i) 天线结构最小谐振频率： $\geq 2\text{Hz}$

1.4.2 工作环境条件

- a) 最大工作风速： 12.5m/s。
- b) 安全收藏状态(朝天锁定)最大风速： 44.4m/s。
- c) 环境温度： -10~+55°C

1.5 本文主要工作

本论文以 ASKAP 射电望远镜项目中的 12 米天线为研究对象，建立了该天线结构的有限元模型，针对初始设计结构不满足设计指标要求的问题，对结构进行了改进；对改进后的结构强度、刚度、反射面精度及馈源位移误差等问题进行了讨论分析；利用数字近景摄影测量软件得到了反射面在各工况下的法向均方根误差，其值与 FEA 值相吻合，验证了天线结构有限元建模及分析的正确性。

本文具体工作内容如下：

(1) 建立了包含天线头、馈源、天线座在内的天线结构有限元模型，根据分析部位的不同重要程度，划分了疏密不同的网格。

(2) 对天线最恶劣工作条件进行了静力分析，找出了薄弱环节，并加以改进，直至满足结构设计要求。针对天线各种典型姿态和实际载荷(重力载荷、风载荷、环境温度载荷)组成的 19 种工况，对天线结构进行了静力学及模态分析，然后，引入了重力影响的天线仰天安装误差，利用“反射面天线精度分析软件”获取了最佳拟合抛物面的反射面法向误差等数据，分析计算了天线结构技术要求的指标值，确认了天线结构设计方案满足了设计指标要求。通过对天线反射体各工况下的变形和应力变化的深入分析，得到了一些反射体变形和应力在不同姿态、工况下的一般性规律。

(3) 制定了数字近景摄影测量方案，选取与有限元分析的工况相对应且具备测量条件的 6 种工况，利用 V-STARs 摄影测量系统测量了 12 米天线反射面，借

助测量软件 MeroIn，把实际测量的数据转换得到了反射面在各工况下的法向均方根误差，与相对应的有限元分析结果对比分析，实际天线的反射面误差与有限元分析的计算值相吻合，验证了天线结构的有限元模型的正确性和分析的可信性。进而，利用在极端环境温度、风载荷和不同姿态条件下有限元分析计算出天线反射面的表面均方根误差，对不具备测量条件的工况下天线反射面精度进行了的估算，预测出最恶劣工况下天线反射面精度指标。

第二章 天线结构有限元分析的基本理论

2.1 概述

自从上世纪中期开始,有限元在工程上得到广泛应用,经历了三十多年的发展历史,理论和算法都已经日趋完善。有限元的核心思想是结构的离散化,就是将实际结构假想地离散为有限数目的单元组合体,实际结构的物理性能可以通过对离散体进行数值计算,得出满足工程精度的近似结果。这样就可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。

2.2 有限元分析一般步骤

有限元分析,可以分析产品零件、部件或整件,需要与结构设计相结合。有限元分析要建立几何模型和有限元模型,其中有限元模型是与几何相关联的,经过分析,结构反应(变形、应力、温度等)被计算出并以图形式表示出来。如果计算的应力大于容许值则需要修改结构设计,并进行再次分析,直到分析的结果满足设计技术指标要求为止。

采用有限元进行工程分析,一般步骤如下:

a) 建立几何模型

建立几何模型有两种方式,一种是在有限元分析软件中直接创建和修改,一种是从 CAD 软件中读取,然后在有限元软件中修改。常用的 CAD 软件有 Pro/engineer、Unigraphics NX、CATIA、SolidWorks 等。

b) 选择分析程序

不同的分析程序有不同的特点,如材料本构、单元类型、分析过程等方面各有特点,也有共性的内容,如几何和有限元网格的划分和检查等。如果直接建立几何模型,首先需要确定分析程序。目前流行的 CAE 分析软件主要有 NASTRAN、ADINA、ANSYS、ABAQUS、MARC、COSMOS 等。

c) 建立分析模型

建立分析模型一般需要五个步骤:

- 网格划分
- 定义材料
- 定义单元特性

- 施加载荷
- 施加约束条件

d) 递交分析

设置与分析程序有关的求解程序和参数,如设置求解的分析类型,设置工况、设置输出结果,然后直接提交运算或产生计算文件。

e) 评价分析结果。

通过后处理工具,提供云纹图、XY 曲线图,等值线、实时动画等功能。

2.3 建立分析模型的几个问题

2.3.1 建立模型问题

在利用有限元分析过程中,计算模型的建立是分析计算的关键,用有限元单元对连续体结构进行离散化处理,得到连续体结构的离散收敛模型,利用此模型进行必要的分析计算,直到计算结果收敛。

实际结构往往是复杂的,要完全按照实物建立分析模型,不仅工作量巨大,而且,有时是无法完成的,或是没有必要的。工程实践中,建立结构分析模型通常是采用适当简化的结构。一个有限元模型建立是否正确,最终只能通过实物或模型的工程实验来证明,也可以说这是唯一的检验标准。本节将介绍一些有限元建模中的共性问题。

2.3.1.1 模型简化

1) 删除细节

删除细节的基本思想是“着眼于整体特征而不及其余”^[13],因为这些细节对问题的求解的影响很小,因而可以忽略。从几何上讲,细节的某些尺寸与分析对象的总体尺寸相比是很小的,而且对问题求解的影响可以忽略。在建立力学模型时常常将结构件上一些细节加以忽略而删去,例如结构件上的小孔、浅槽、微小的凸台、轴端面上的倒角、轴的退刀槽、键槽、过渡圆弧等。但尺寸细小是一个必要条件而不是充分条件,例如一个横向贯穿轴的小孔,对整根轴的刚度或许没有太大影响,但是对于疲劳强度和应力集中却不能忽略。所以,细节可以删除,要多方面考虑,诸如分析的目标、载荷与约束情况、细节在结构中的位置等等。

2) 减维

任何结构件都是三维的,减维就是把三维减为二维或一维。例如当某一个或两个方向的尺寸远小于其他方向的尺寸时,简化为杆或板单元。

A. 一维杆、梁单元

在工程结构中，如果结构件的一个方向远大于其余两个方向的尺寸，则可简化为一维杆件，如天线中的支撑杆、反射体中的环梁等杆件。

根据受力状态不同，一维杆件又可分为梁单元和杆单元。如果一维杆件上既作用有轴向力又作用有垂直于轴线的剪力和弯矩，则这种杆件为梁单元；如果只受轴向力，则为杆单元。在工程结构中，刚架一般用梁单元模拟；桁架一般用杆单元模拟。

究竟一个方向尺寸 a 与其他两个方向最大尺寸 b 之比达到多少才可按一维杆件来考虑，一种作法是： a/b 大于 5 时，可以认为是梁。

构件简化与结构分析的要求和目的有关。例如，对于机械传动系统中的传动轴，如果是分析整个传动系统，则可用梁单元模拟；如果是分析传动轴本身的应力集中，则要作为三维问题处理。

B. 二维板件

如果构件在两个方向上的几何尺寸为同一数量级，而另一方向几何尺寸要小一个数量级，则往往简化为二维板件。通常，这种构件的厚度至少应小于长、宽最小尺寸的 $1/5 \sim 1/8$ ，根据受力特点，分别用膜单元、剪切板单元、板单元或壳单元来模拟。

如果板件受到面内拉伸作用的载荷，可用膜单元来模拟。如果板件受到面内剪切作用的载荷，可用剪切板单元来模拟。如果板件受到垂直于板面的载荷作用，则应按板单元来模拟。如果既有面内作用的载荷，又有垂直于板面作用的载荷，则用壳单元来模拟。工程中各种箱形梁、箱体、支承件、工作台等的壁板均可简化为二维板件。

工程实践表明，如果结构整体受力处于平面应力状态，这时用平面应力膜单元来模拟。如果还要考虑抗拉、压应力状态，则必须用壳单元来模拟。对于无法估计受力状态的二维板件，最好用壳单元来模拟。

C. 轴对称单元

轴对称问题是二维问题。例如三维结构件的几何形状、约束和受载情况均对称于某一轴线，则这种三维问题可用轴对称单元分析。

2.3.1.2 建立计算模型的几个策略与方法

根据工程实践，在建立结构的计算力学模型时，通常采用以下几个策略。

1) 按照分析目标来建立分析模型

分析模型的建立取决于目标分析的需要。同一个工程结构，由于分析目标不同（强度分析、刚性分析、动力分析……），计算模型可以不一样。例如，对于动力分析，在求整体结构的固有频率时可以忽略一些细节，同时网格也可以划分得粗一些。而对于强度分析、刚性分析，这些细节很可能不能省略，而且在某些部

分划分网格更需要密集一些。

此外，在设计的不同阶段，可以采用不同的计算模型。在方案阶段，可以采用比较粗糙的模型，只要能近似的描述实际结构就行了，这样比较简单，计算起来也较为方便。在设计开始阶段，计算模型需细致的考虑，使其更符合实际。

2) 先整体后局部、先粗后细的分析方法

对于非常复杂的结构，常常采用先整体后局部、先粗后细的方法。这种方法常常用来研究应力集中部位的应力。如果结构件有许多相同的部分，可用子结构法来分析。

3) 主从处理

实际结构中常常有某部件或其中一部分的刚度比其周围相邻结构件的刚度大很多，或者某一结构件在某些自由度方向的刚性相对于其他方向大很多。对于这类问题具体做法是：在简化计算模型时，将认为刚度很大的结构件作为刚体，或者视结构件在刚度大的方向是刚性的。刚性化后，有些节点的位移将成为相关的，或者结构件在某些自由度方向的位移可认为是相关的，这时，可认为其中只有一个节点的位移是独立的，选择此节点作为主节点，其他各节点都是服从于此主节点的从节点，各从节点的位移以刚体位移规律服从于主节点。从节点的位移是相关位移，不进入独立未知数向量，这就减少了求解的方程数，另外也避免了求解时很可能引起联立方程病态而丧失计算精度，甚至在极端情况下会使机器溢出，计算失效。

4) 等效结构

在实际结构中常常会遇到一些复杂的细节或结构复杂的构件，但分析的目标又不是这些细节或构件的应力与变形，而是整个结构的特性，这时可利用等效结构来等效它，这种等效结构可以是比较简单的构件或其组合。例如转台天线中大型方位轴承，在分析结构整体静力学特性时，可将轴承等效为环形体。

2.3.2 网格划分问题

建立了分析模型之后，下一步工作就是划分网格。划分的网格形式将影响到计算精度和计算规模，这是建立有限元模型的一个非常重要的环节。它要求考虑的载荷施加位置、约束位置等问题，需要的工作量较大。这里介绍划分网格时应考虑的一些基本原则。

2.3.2.1 网格数量

网格的数量将影响计算结果的精度和计算规模的大小。一般来讲，网格数量增加，计算精度会有所提高，但同时计算规模和计算时间也会增加，所以要根据

实际情况考虑网格数量的多少。

2.3.2.2 单元阶次

许多单元都具有线性、二次和三次等形式，其中二次和三次形式的单元称为高阶单元。在网格数量相同的情况下，高阶单元的节点数较多，计算规模越大。因而，在满足计算精度的条件下，尽可能采用低阶形式的单元。通常当结构形状不规则、应力分布或变形很复杂时，选用高阶单元。

2.3.2.3 网格质量

网格质量好坏将影响计算精度。质量太差的网格甚至会中止计算。直观上看，网格各边或各个内角相差不大、网格面不过分扭曲、边节点位于边界等份点附近的网格质量较好。例如，三角形网格单元内角都介于 $30^\circ \sim 120^\circ$ 单元质量良好；四边形单元内角都介于 $45^\circ \sim 135^\circ$ 单元质量良好，介于 $30^\circ \sim 45^\circ$ 和 $135^\circ \sim 150^\circ$ 的单元质量一般，其他情况单元质量较差。网格质量一般要控制网格单元的形态，避免面积很小的尖角元（对二维）或体积很小的薄元（对三维），一般可用细长比、锥度比、内角、翘曲量、拉伸值、边节点位置偏差等指标度量。

2.3.2.4 网格分界面和分界点

结构中的一些特殊界面和特殊点应分为网格边界或节点以便定义材料特性、物理特性、载荷和位移约束条件。常见的特殊界面和特殊点有在几何形状、载荷分布、材料特性等方面一些不连续处，几何尺寸突变面、分布载荷分界线（点）、集中载荷作用点、位移约束作用点、非均质材料的不同材料分界线等。

2.3.2.5 网格布局

当结构形状对称时，其网格也应划分对称网格，以使模型表现出相应的对称特性。

在结构不同部位要采用大小不同的网格，也就是网格疏密程度不同。在计算结果的精度要求较高或计算数据变化梯度较大的部位（如应力集中处）或结构的关键部位，需要采用比较密集的网格。而在计算结果的精度要求较低或计算数据变化梯度较小的部位或次要部位，则采用相对稀疏的网格。

分析类型不同的数据，要考虑网格疏密程度。应力分析（包括静应力和动应力）主要采用疏密不同的网格，而计算固有特性时则趋于采用较均匀的网格形式。在响应计算中，计算应力响应所取的网格应比计算位移响应密集。

2.3.3 天线载荷问题

天线载荷主要有以下几种类型：重力、风力、冰雪载荷、温度载荷、地震载荷等。

2.3.3.1 重力载荷

重力载荷是天线结构分析中一种基本载荷。

当天线改变俯仰角时，结构重力的数值不变，但是重力相对于结构的作用方向随俯仰角而变化。对于小型轻便天线，重力载荷影响较小，但是对于高精度的大中型天线重力载荷影响较大。在工程中，天线反射面的调整主要是在朝天状态下或工作状态某一角度确定的，但当工作俯仰角改变时，反射面会发生形变。因而，必须要考虑重力载荷的影响。

2.3.3.2 风力载荷

通常把风分为平均风和脉动风来分析。平均风的长周期远大于一般结构的自振周期，其对结构的作用力的速度、方向看成为不随时间改变的静力。脉动风是由于风的不规则性引起的，它的强度随时间按随机规律变化，它的周期较短，其作用性质是动力，并引起结构的振动，因而要用随机振动理论来处理。

由于影响天线风力载荷的因素很多，难以获得准确数据，最好是用模型的风洞试验。影响天线风力的因素如下：

- 其中最大因素是天线轴线与风力的夹角。
- 抛物面的凹度：即抛物面的深度与直径之比，它决定于抛物面的焦距与直径之比。抛物面凹的深些，正面风力要大些，但背吹时风力反而小些。
- 抛物面口面的形状：有圆、椭圆、矩形等。从平板的试验数据^[12]来看，圆板的阻力系数为 0.112，正方形为 1.15，矩形板(a/b<10)为 1.15—1.25。所以除非长宽比很大，外形对风阻系数影响不大。
- 反射面的型式：有实体、金属丝编织网、冲孔板、栅条等。对风力影响很大。
- 反射体骨架的结构形式：常见是桁架结构，具体材料常见角钢、T 型钢、圆钢管、矩形钢管。
- 副面撑腿或馈源支架及平衡重的型式。它对侧向风影响较大。
- 抛物面天线的姿态：随方位角和俯仰角的不同而变化。

结构件所受的风力一般很难用理论来计算，通常采用实验来解决。现在也可以采用流体力学软件来模拟计算。

实际工程中，常采用如下风载荷公式计算^[12]：

$$F=C_F q A \quad (2.1)$$

式中：

C_F ——风力系数，它与物体形状和雷诺数 Re 有关，由风洞实验测得；

q ——动压，根据实际调查，我国沿海地区 $q=V^2/17$ ，一般内陆地区 $q=V^2/16$ ，高原和高山地区 $q=V^2/18 \sim q=V^2/19$ 。工程中，一般均取 $q=V^2/16$ ；

V ——风速；

A ——圆抛物面口径面积；

D——圆抛物面口径。

对于网状天线反射面，积冰时所受的风力，要按照实体来计算。

计算风载荷作用下的天线结构的应力和变形时，需要知道风压在抛物面上的分布。风压分布随天线姿态而不同。在文献^[12]中，有实体圆抛物面天线的风压系数分布图，部分图如图 2.1 所示。

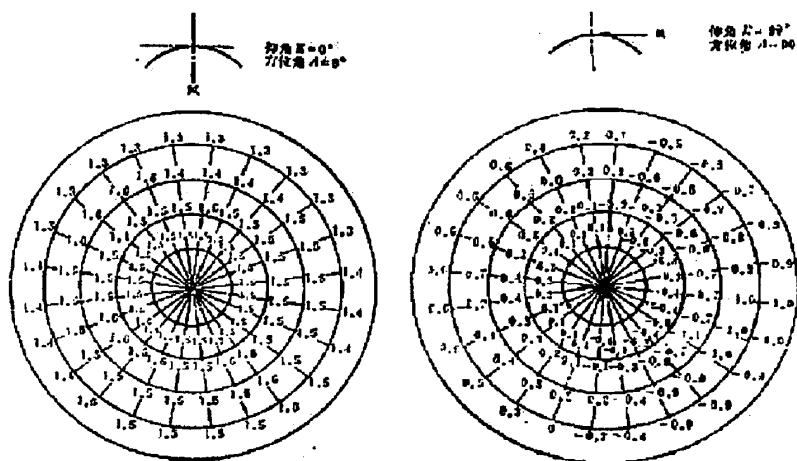


图 2.1 实体圆抛物面天线的风压系数部分分布

2.3.3.3 温度载荷

温度载荷的施加温度变化会在天线结构中引起温度应力和温度变形。但是在一般情况下，温度变化对天线结构的影响主要是温度变形，而温度应力很少考虑。温度变形对于高精度天线电性能影响较大，而对于工作频率较低的天线，电性能影响较小。

温度变形要分两种情况来考虑：（1）温度均匀变化的变形。天线制造时的温度与工作环境温度之差而引起的变形，变形后的反射面仍为抛物面，只是焦距不同，整个天线作相似的放大或缩小，形状不变；（2）由于温度不均匀而引起的变形，即温差变形，与材料传热性质有关，金属板反射面要比蜂窝夹芯玻璃钢的温差小。经常转动的天线（如监视雷达），日照不均匀的影响就很小；而对于卫星通信地面站天线和射电望远镜天线等基本不动或转动很慢的天线，日照不均匀的影响就较大。

计算温度变形时，困难在于温度分布的确定，这方面缺乏实测的资料。国内某研究项目中对一个 30m 天线进行了温度测量，测量结果是：天线主力骨架在夏天晴日无风的中午，最大温差在垂直方向为 7~8℃，水平方向为 6℃。而晴日有 3~4 级风时，最大温差仅为 3℃。温差主要是由于阳光照射不均匀而引起的。认为温度分布基本上线性的。国外资料对温度分布的假说不一：一种是英国马克尼公司 45ft 天线计算中采取的温度分布；一种是西德“太阳神”30m 天线计算中使用的温度分布；还有一种是美国 25m 射电望远镜天线的计算中使用的温度沿铅垂方

向线形分布。

温度分布目前还缺乏系统的实测数据。国外现有资料有西德直径 30m 的天线使用的温度分布^[12] (参见图 2.2)、英国马可尼公司 45ft 天线温度分布^[12] (参见图 2.3)。

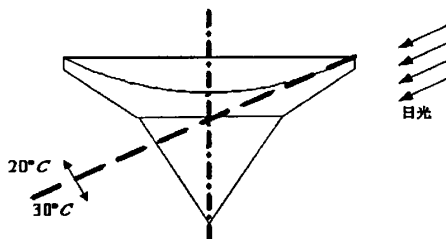


图 2.2 西德 30m 天线的温度分布

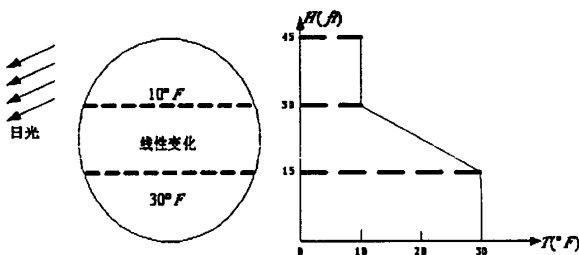


图 2.3 英国马可尼公司 45ft 天线的温度分布

2.3.3.4 冰雪载荷

在空气湿度较大的地区，在初冬或冬末，当气温急剧下降、有雾或下毛毛雨时，天线结构的表面有积冰现象。结构表面冰厚度一般是不均匀的，迎风面较厚。但在计算重量时，一般简化为厚度均匀。积冰的厚度，取决于当地气象条件主要是空气湿度和气温。同一地区，积冰的厚度随海拔高度增加而加大，寒冷多湿地区的高山上非常容易积冰。

对于雪载荷，对于经常转动天线，可以不用考虑。否则，需要计算雪载荷即重力的影响。

2.3.3.5 地震载荷

对于大型天线要考虑地震载荷的影响。地震时，天线基础发生运动，结构发生强迫振动。地震时既有水平方向又有垂直方向的运动，但是垂直振动对结构的影响较小，通常只考虑水平方向的运动。地震引起的天线结构振动是一种随机振动，可以根据当地地震历史数据进行分析计算。

2.4 小结

本章介绍了天线结构有限元分析的基本理论，包括有限元分析一般步骤，建立分析模型的几个问题、天线载荷问题。在建立分析模型中讨论了模型简化和网格划分的问题。天线载荷问题介绍了重力载荷、风力载荷、温度载荷、冰雪载荷和地震载荷。风力载荷重点介绍了风力载荷的分类、影响风力载荷的因素、风力载荷的计算方法以及风压系数的取值方法。温度载荷重点分析了太阳光照对天线的影

研究，对天线结构模型的建立方法，以及载荷的选取有了深入的了解，为后面章节的应用做好了准备。

第三章 12 米天线结构有限元分析

目前，大型商业有限元分析软件 MSC.Patran/Nastran 在国内外已经广泛应用于航空、航天、船舶、汽车、桥梁等行业的工程设计及分析中。本章节在 12 米天线结构及环境特性的基础上，借助于该分析软件，通过对天线在自重、风荷、环境温度等载荷作用下的结构强度、反射面表面精度、馈源位置精度和结构固有频率等的分析，以保证结构技术精度的实现，为结构设计提供重要指导。

3.1 12 米天线结构简介

整个天线的结构主要分为两部分，即天线反射体和天线座架。12 米天线结构示意图如图 3.1 所示。

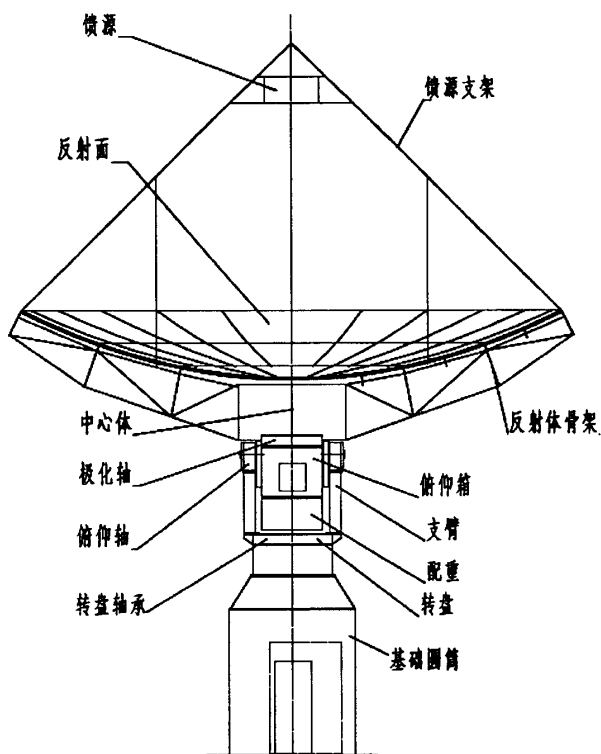


图 3.1 12 米天线结构示意图

反射体主要包括反射面、馈源、馈源支架、中心体及反射体骨架。馈源由馈源支架来固定，而馈源支架又安装于反射面上部。反射面需要反射体骨架以增加

整个反射体结构的刚度和强度，保证天线正常运转。中心体位于反射骨架中心部位，与反射骨架连接，并且底面连接天线座的极化部分。结构设计上，反射面采用分片制造、拼装成形的工艺，这是由于抛物面式的反射面较大，采用单一金属面难以加工；馈源支架用于支撑馈源，它采用钢管焊接成型，整个支架共设四根支撑杆；反射体骨架采用辐射梁形式设计，钢管焊接成型；而中心体则采用钢板材料焊接成型。

本项目天线座采用了方位-俯仰-极化三轴全转台式结构型式。天线座架主要包括方位机构部分、俯仰机构部分及极化轴部分等。其中方位机构部分用于实现反射体的方位运动，主要由基础圆筒、转盘轴承、转盘及方位驱动装置等组成。基础圆筒、转盘等采用箱形加筋结构，采用钢板焊接而成。俯仰机构部分用于实现反射体的俯仰运动，俯仰部分由左右支臂、左右俯仰轴承座、俯仰箱体、配重、俯仰轴及俯仰大齿轮等组成。俯仰支臂采用钢板焊接而成，受力较大的部分设置加强筋。俯仰箱体作用是连接俯仰轴并安装俯仰驱动装置以驱动天线做俯仰运动，同时又作为极化轴支撑，要求它的刚度和强度要好，采用箱体结构，由钢板焊接而成。极化轴用于改变电场方向，接收相应极化的电波信息，它安装在俯仰箱上端，由转盘轴承、连接板、驱动装置等组成。

3.2 12 米天线结构有限元模型

12 米天线结构有限元模型采用 MSC.Patran 进行建立和分析。

3.2.1 有限元模型建立

由于此天线结构复杂，在建立模型时针对各部分的特点，采用不同的单元类型和网格疏密，这样既可以保证计算精度又可以控制计算规模。方位驱动装置在座体内，俯仰和极化驱动装置在俯仰箱体内，对天线反射面精度影响不大，因而模型中不考虑方位、俯仰和极化驱动装置。另外对其他结构如同步装置、限位装置等结构质量体积均较小，对天线精度影响很小，模型中也忽略不计。模型中所有焊接以及螺栓连接部分均处理为刚性连接。

3.2.1.1 天线反射体

天线反射体主要由天线反射面、中心体、反射体骨架、馈源与馈源支架等部分组成。其有限元模型如图 3.2 所示。

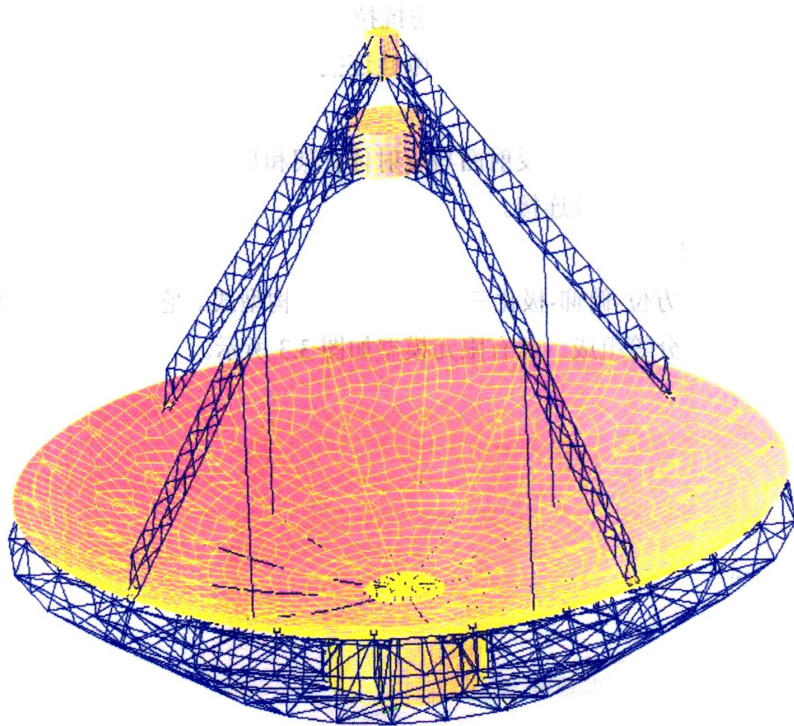


图 3.2 天线反射体

1) 反射面

反射面在径向分为 2 圈，内圈周向分为 12 片，外圈周向分为 24 片，共计 36 片。单片反射面结构采用铝蒙皮蜂窝夹层结构，反射面厚度远远小于长、宽最小尺寸的 $1/5 \sim 1/8$ ，因而简化为二维板件。反射面要考虑抗拉、压应力状态，因而用 shell 单元模拟。反射面与辐射梁的连接调整件长度远大于直径的尺寸，则可简化为一维杆件；由于调整件既作用有轴向力又作用有垂直于轴线的剪力和弯矩，因此用 beam 单元模拟。

2) 中心体

中心体是由钢板材料经焊接、机加工而成的双层圆柱形部件，要考虑抗拉、压应力状态，因而用 shell 单元模拟。

3) 反射体骨架

反射体骨架包括辐射梁、环向杆为圆钢管桁架结构。杆件长度远大于直径的尺寸，则可简化为一维杆件；但是杆件上既作用有轴向力又作用有垂直于轴线的剪力和弯矩，因此杆件用 beam 单元模拟。辐射梁、环向杆螺栓连接，处理成刚性连接。

4) 馈源与馈源支架

馈源支架采用四杆支撑的方式，为圆钢管桁架结构，既作用有轴向力又作用有垂直于轴线的剪力和弯矩，因此杆件用 beam 单元模拟。馈源支架顶端设计一

个方形柱钢筒，馈源为圆柱铝筒，要考虑抗拉、压应力状态，因而用 shell 单元模拟。馈源与馈源支架螺栓连接，处理成刚性连接。

5) 部件间连接形式

馈源支架与反射体骨架、反射面与反射体骨架和反射体骨架与中心体的连接采用螺栓连接，处理成刚性连接。

3.2.1.2 天线座架

天线座架采用方位-俯仰-极化三轴全转台式结构型式。它主要由方位部分、俯仰部分、极化部分等组成。其有限元模型如图 3.3 所示。

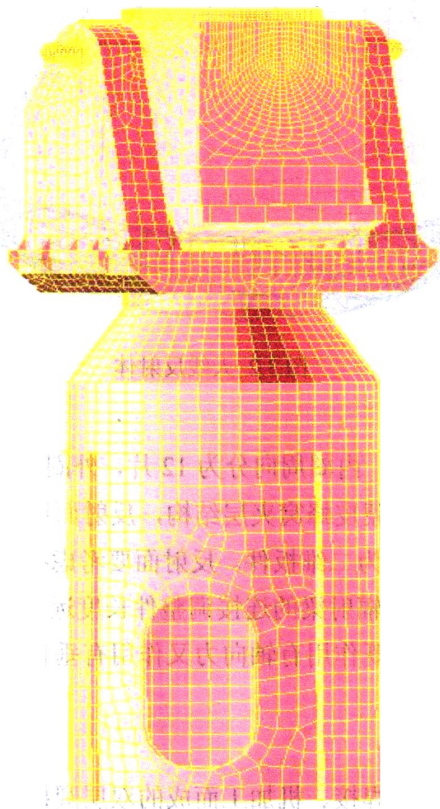


图 3.3 天线座架

1) 方位部分

主要由基础圆筒、转盘轴承、转盘等组成。基础圆筒、转盘由钢板焊接而成，考虑要有抗拉、压应力状态，用 shell 单元模拟；转盘轴承结构复杂，但分析的目标不是轴承细节和轴承的应力与变形，而是整个天线结构的特性，因而将转盘轴承等效为环形体，用 solid 单元模拟。基础圆筒、转盘轴承、转盘三部分螺栓连接，处理成刚性连接。

2) 俯仰部分

由左右支臂、俯仰箱、俯仰轴、配重等组成。左右支臂和俯仰箱由钢板焊接

而成，俯仰轴是中空轴结构，考虑要有抗拉、压应力状态，因而用 shell 单元模拟；主配重是实体结构，配重调节块为钢板结构且质量较小，可忽略配重调节块的影响，因而配重用主配重代替，用 solid 单元模拟。俯仰箱、俯仰轴、配重三部分螺栓连接，处理成刚性连接。

从天线座架图 3.3 中可以看出，俯仰箱上部及与俯仰轴连接部分处网格较密集，俯仰箱下部及配重部分网格较稀疏。天线反射体的受力依次传递给俯仰箱上部及俯仰轴连接部分，是主要受力部位，因而网格较密集。俯仰箱下部连接配重，主要承受配重的重力影响，配重主要是增加天线反射体的平衡质量，因而网格较稀疏。网格大小首先根据零部件的大小确定，然后对应力集中部位的网格适当增加网格密度。

从左支臂图 3.4 中可以看出，模型中网格的疏密程度不同。上端俯仰轴及俯仰轴与左支臂连接部位，属于重点关键部位且应力较集中，因而网格较密，下端计算精度要求不高，因而网格较稀疏。

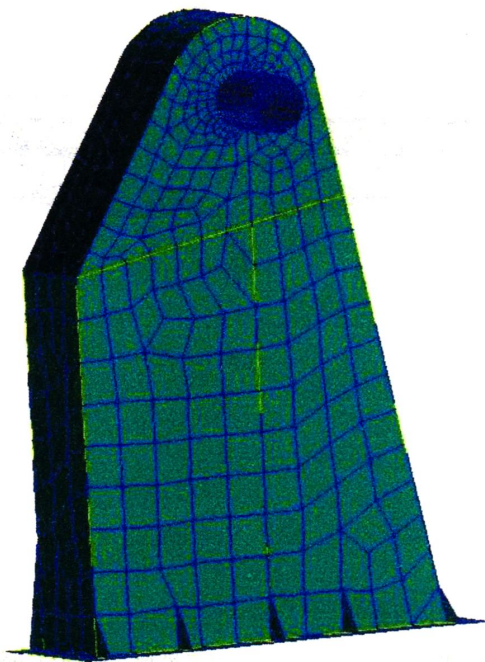


图 3.4 左支臂

3) 极化轴部分

主要由极化轴承等部分组成，去掉整个天线结构的特性影响不大的零件（如连接板、护板等），简化成极化轴承。将极化轴承等效为环形体，用 solid 单元模拟。

4) 部件间连接形式

方位部份的转盘与俯仰部分的左右支臂、俯仰部分的俯仰箱体与极化轴部分

的极化轴承的连接采用螺栓连接，处理成刚性连接。

3.2.1.3 天线头与天线座架连接

天线头的中心体底面与天线座架的极化轴承采用螺栓连接，处理成刚性连接。

3.2.2 有限元模型节点与单元划分

12m 天线结构的有限元模型见图 3.5。

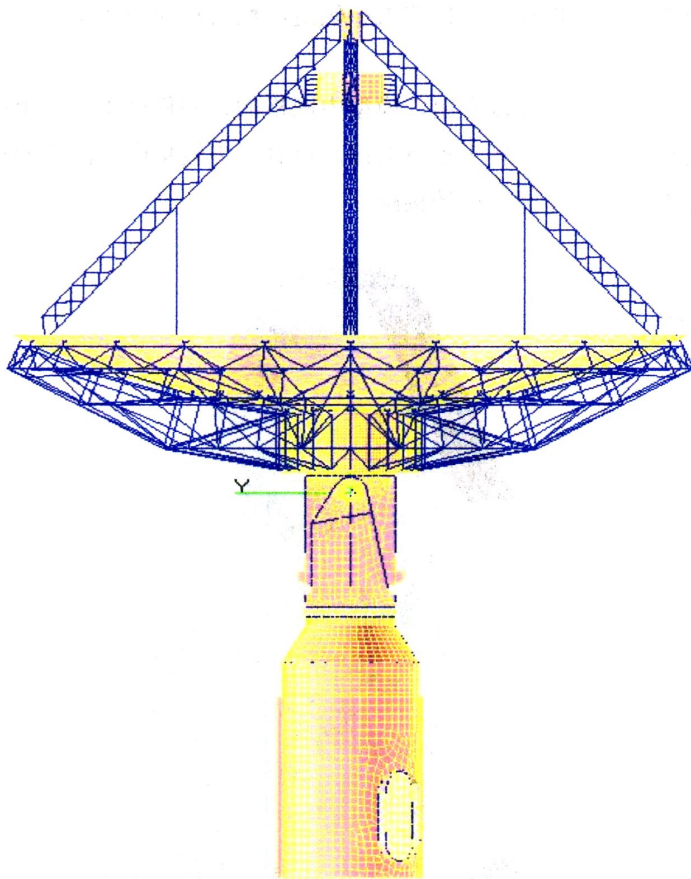


图 3.5 12 米天线结构有限元模型（俯仰角 90° ）

表格 3.1 列出了所建模型的所有单元类型，并给出了各类单元数量及节点数量。

表 3.1 单元类型、数量和节点表

名称	壳单元	梁单元	体单元	节点
数量	30234	10932	3472	44632

3.2.3 材料特性

此天线结构涉及三种材料，分别为：铝蜂窝复合材料、Q345 和 2A12。三种材料的力学特性见表 3.2 所示。

表 3.2 材料特性表^[33]

	铝蜂窝 (30mm 厚)	钢 (Q345)	硬铝 (2A12)
弹性模量 11(GPa)	4.4375	210	70
弹性模量 22(GPa)	4.4375		
弹性模量 33(GPa)	1.1663		
泊松比	0.3	0.3	0.33
剪切应力 12(GPa)	0.84375		
剪切应力 23(GPa)	0.083136		
剪切应力 31(GPa)	0.1247		
热膨胀系数	23×10^{-6}	11×10^{-6}	23×10^{-6}
屈服应力(MPa)		345	245
抗拉强度(MPa)		490	390
密度(KG/m ³)	207	7800	2700

注：铝蜂窝材料特性数据来自专项试验。

3.2.4 载荷

添加天线所承受的载荷时，主要考虑以下几种载荷对天线结构的影响：天线自重、风载荷和温度载荷。

- 自重载荷

自重载荷在给出重力加速度后由软件自动生成。

- 风载荷的计算和施加

风载荷直接作用到天线反射面上。

风力载荷公式计算：

$$F=C_F q A \quad (3.1)$$

式中：

C_F ——为风力系数，它与物体形状和雷诺数 Re 有关，由风洞实验测得；

q ——动压，取 $q=V^2/16$ ；

V——风速；

A——圆抛物面口径面积；

D——圆抛物面口径。

按技术指标要求，本文按以下两种设计风速进行风载荷计算：

V=12.5m/s 正常工作风速

V=44.4m/s 生存风速，朝天收藏。

根据文献^[12]，可得到焦径比为 0.5 的圆形抛物面天线在不同风向角时反射面的压差系数分布。该压差系数分布是由风洞试验所得。根据此压差系数分布，确定天线反射面风载荷施加相应的部位。本文采用按压差系数分布图的比例的方法，在天线反射面的相应区域确定风载荷施加的部位。根据风速计算出来的风载荷乘上相应部位的压差系数，得到对天线反射面影响的实际风载荷。用此实际风载荷施加在天线反射面相应部位上。

● 温度载荷

温度载荷分为环境温度和日照所引起的温差。对于本项目，环境温度要求 -10~+55℃，温差较大，并且当地日照充分，天线转动很慢，因而对天线结构不仅要计算环境温度的影响，还要考虑日照的影响。

环境温度的施加方式：对于天线系统来说，环境温度所引起的温差变化是均匀的。以 25℃ 为参照温度，按照 -10~+55℃ 的环境温度，对整个天线系统分别施加 -35℃ 和 +30℃ 的温差载荷；

日照辐射的施加方式：整个天线在日照的作用下，向阳面与背阴面的温差是不同的，对于某些大型金属结构天线的实际测量结果表明，最大温差可达 8℃，平均 5℃。本次计算采用西德“太阳神”30m 天线计算中使用的温度分布^[12]，如图 2.2 所示，向阳面与背阴面的温差为 10℃。因而，向阳面的天线结构施加了 +10℃ 的温度载荷，背阴面的结构没有增减温度载荷。

3.2.5 约束

天线与天线基础采用地脚螺栓与天线座架的基础圆筒法兰螺栓孔连接。由于天线地基为混凝土结构。一般认为其是刚性的。同样，地脚螺栓连接强度和刚度足够大，所以也假定地脚螺栓连接是刚性连接。因而，在有限元建模中，将天线座架的基础圆筒法兰下平面关联节点的所有自由度进行了固定约束，如图 3.6 所示。

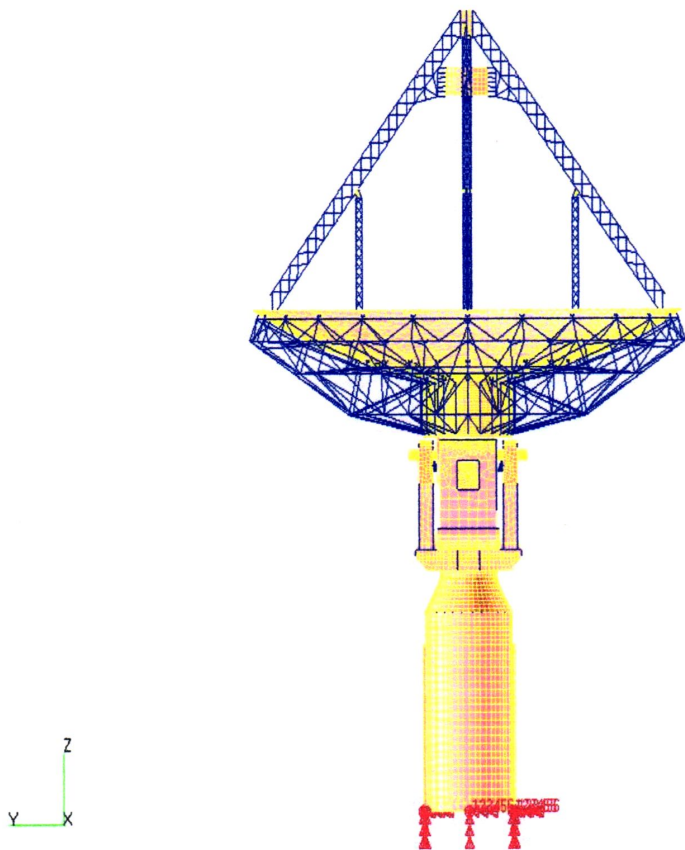


图 3.6 天线约束

3.3 分析工况

12 米天线与分析工况有关的技术要求中，主要包括天线转动范围和工作环境。在天线转动范围方面选取了俯仰角 15° 、 45° 、 60° 、 90° ，极化角 0° 、 22.5° 、 45° ，环境温度 -10°C 、 25°C 、 55°C ，风力载荷 0m/s 、 12.5m/s 、 44.4m/s ，风力方向正吹和侧吹，并结合有无日照及照射方向，共组成 19 种典型工况，分别进行了分析。

工况 1~18 为工作条件（其中典型工况为工况 1~14），工况 19 为收藏条件。如表 3.3 所示。

表 3.3 天线有限元分析工况表

工况 序号	俯仰角 (°)	极化角 (°)	重力	环境温度 (°C)	风力载荷	日照情况
1	90	0	有	25	无	无
2	45	0	有	25	无	无
3	45	22.5	有	25	无	无
4	45	45	有	25	无	无
5	15	0	有	25	无	无
6	15	22.5	有	25	无	无
7	15	45	有	25	无	无
8	90	0	有	-10	无	无
9	90	0	有	+55	无	无
10	90	0	有	25	无	正面照射
11	90	0	有	25	无	侧面照射
12	15	0	有	25	12.5m/s、正吹	无
13	15	0	有	25	12.5m/s、侧吹	无
14	15	0	有	25	12.5m/s、背吹	无
15	15	0	有	55	12.5m/s、正吹	无
16	15	45	有	55	12.5m/s、正吹	无
17	60	0	有	55	12.5m/s、正吹	无
18	60	45	有	55	12.5m/s、正吹	无
19	90	0	有	25	44.4m/s、正吹	无

3.4 计算方法

假定工况 1 为参考点，天线结构分析结果处理方法如下：

- (1) 最大节点应力和天线谐振频率可由 Nastran 计算直接得出；
- (2) 最大节点位移由 Nastran 计算得出的节点位移减去参照点相应的节点位移得出。
- (3) 反射面均方根 (rms) 和最佳拟合抛物面的转角 (Δ -X, Δ -Y) (即绕 X、Y 轴) 的计算步骤如下：
 - a) 由 Nastran 计算得出参照点反射面节点位移；
 - b) 由 Nastran 计算得出其余各个工况下反射面节点位移；

- c) 由前一步中各个工况下反射面节点位移减去参照点反射面节点位移。目的是为了消除天线面朝天安装状态下的反射面变形的影响；计算思路是，把参考点反射面节点位移进行坐标变化到各工况下的坐标系中，然后进行位移的相减。
- d) 将结果数据输入西安电子科技大学开发的“反射面天线精度分析软件”，可以直接得出相对于最佳拟合抛物面的反射面均方根、最佳拟合抛物面相对于初始抛物面的顶点位移（X、Y、Z 三个方向）、焦轴的转角（ $\Delta-X$ 、 $\Delta-Y$ ）、焦距的变化量。

(4) 馈源变形可根据“反射面天线精度分析软件”所得出的最佳拟合抛物面顶点位移、焦轴转角和焦距变化的结果，计算出最佳拟合抛物面的焦点坐标，该坐标值与变形前坐标值相减可以得到馈源变形。馈源变形误差计算示意图如图 3.7 所示。

计算过程中假定：

- a) 俯仰角为 α
- b) 焦距误差 Δf
- c) 俯仰角变化量 θ_y
- d) 方位角变化量 θ_z
- e) 抛物面顶点位移 (ΔX_v , ΔY_v , ΔZ_v)

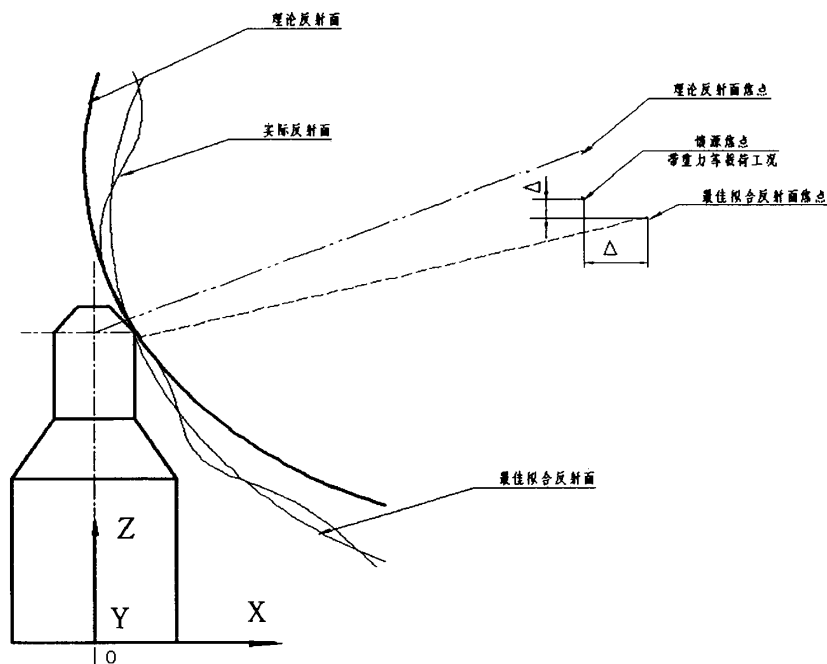


图 3.7 馈源变形误差计算示意图

由焦距误差引起的反射面焦点误差($\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta Z_1$):

$$\begin{cases} \Delta X_1 = \Delta f \times \cos \alpha \\ \Delta Y_1 = 0 \\ \Delta Z_1 = \Delta f \times \sin \alpha \end{cases} \quad (3.2)$$

由俯仰角变化量引起的反射面焦点误差($\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2$):

$$\begin{cases} \Delta X_2 = 2 \times (6000 + \Delta f) \times \sin\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \times \sin\left(\alpha - \frac{\theta_y}{2}\right) \\ \Delta Y_2 = 0 \\ \Delta Z_2 = 2 \times (6000 + \Delta f) \times \sin\left(\frac{\theta_y}{2}\right) \times \cos\left(\alpha - \frac{\theta_y}{2}\right) \end{cases} \quad (3.3)$$

由方位角变化量引起的反射面焦点误差 ($\Delta X_3, \Delta Y_3, \Delta Z_3$)

$$\begin{cases} \Delta X_3 = -(6000 + \Delta f) \times \cos(\alpha - \theta_y) \times \sin \theta_z \times \tan \frac{\theta_z}{2} \\ \Delta Y_3 = (6000 + \Delta f) \times \cos(\alpha - \theta_y) \times \sin \theta_z \\ \Delta Z_3 = 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

由抛物面顶点位移引起的反射面焦点误差 ($\Delta X_4, \Delta Y_4, Z_4$)

$$\begin{cases} \Delta X_4 = \Delta X_v \\ \Delta Y_4 = \Delta Y_v \\ \Delta Z_4 = \Delta Z_v \end{cases} \quad (3.5)$$

根据公式 (3.2)(3.3)(3.4)(3.5), 得到最佳抛物面焦点和理论抛物面的焦点误差公式:

$$\begin{cases} \Delta X_5 = \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + \Delta X_4 \\ \Delta Y_5 = \Delta Y_1 + \Delta Y_2 + \Delta Y_3 + \Delta Y_4 \\ \Delta Z_5 = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 + \Delta Z_3 + \Delta Z_4 \end{cases} \quad (3.6)$$

按照公式 (3.6)和理论反射面焦点的坐标值, 得到最佳拟合抛物面焦点的坐标值(X_{BF}, Y_{BF}, Z_{BF})。

馈源位移误差值 ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)等于带重力等负载的工况下馈源焦点坐标值减去最佳拟合抛物面焦点的坐标值(X_{BF}, Y_{BF}, Z_{BF})。

3.5 结构改进

3.5.1 天线初始结构有限元分析

根据实际工程经验和技术要求, 选择最恶劣的工况 15 (俯仰角 15° 、极化角

0°、有重力、环境温度+55℃、风速 12.5m/s 正吹) 对天线初始结构进行了有限元分析, 得到反射面表面均方根误差为 0.3292mm, 满足小于 1mm 的结构设计要求。从得到了天线结构形变和应变图中发现存在以下问题:

1. 馈源位移为 3.7mm, 不满足技术指标要求的 3.0mm。整个馈源及支架变形如图 3.8 所示。从图中, 可以发现馈源相对主反射面的位置变化主要是由馈源支架过度变形引起。由此导致馈源平面法线与天线光轴的夹角较大, 造成天线电性能降低。

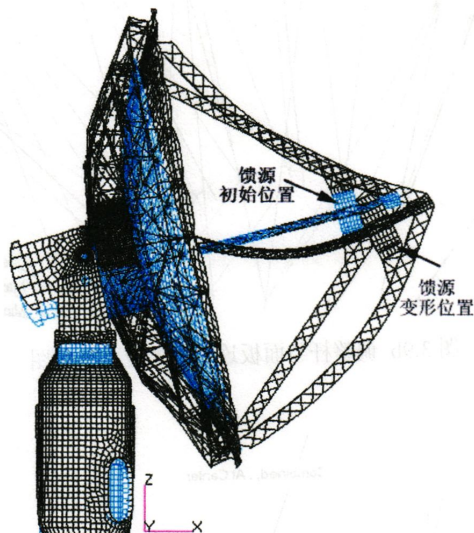


图 3.8 初始结构中馈源及馈源支架变形图

2. 天线应力分析如图 3.9a 所示, 从图中发现调整杆与反射面板连接处(位置如图 3.9b、图 3.9c 所示)的应力值为 520MPa, 远超出钢材材料的屈服强度 345MPa, 不满足结构设计的强度要求。

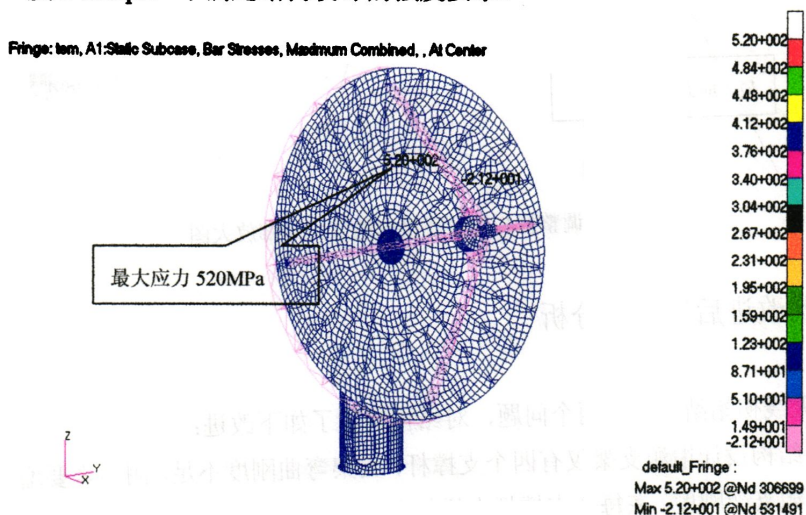


图 3.9a 调整杆与面板连接处的应力示图

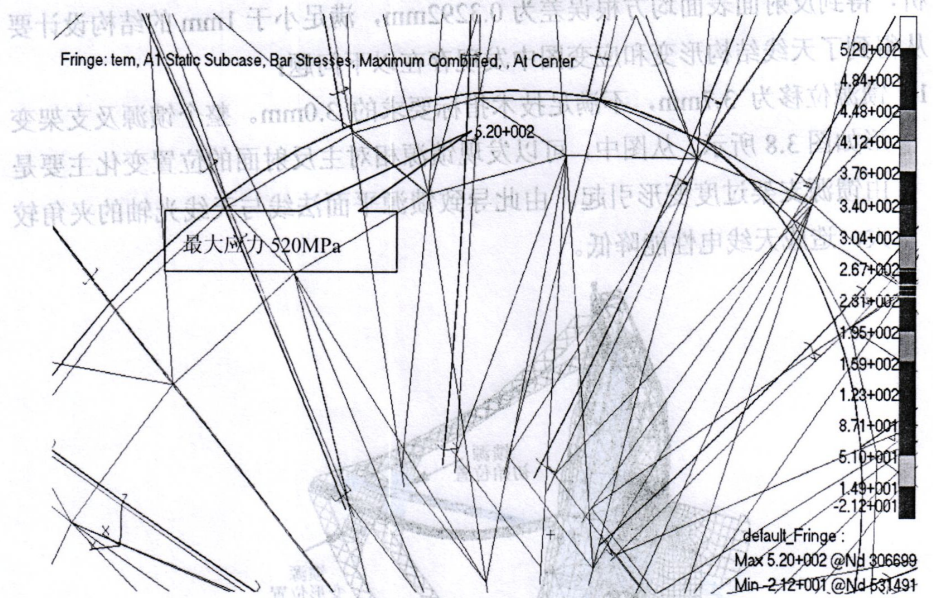


图 3.9b 调整杆与面板连接处的应力局部图

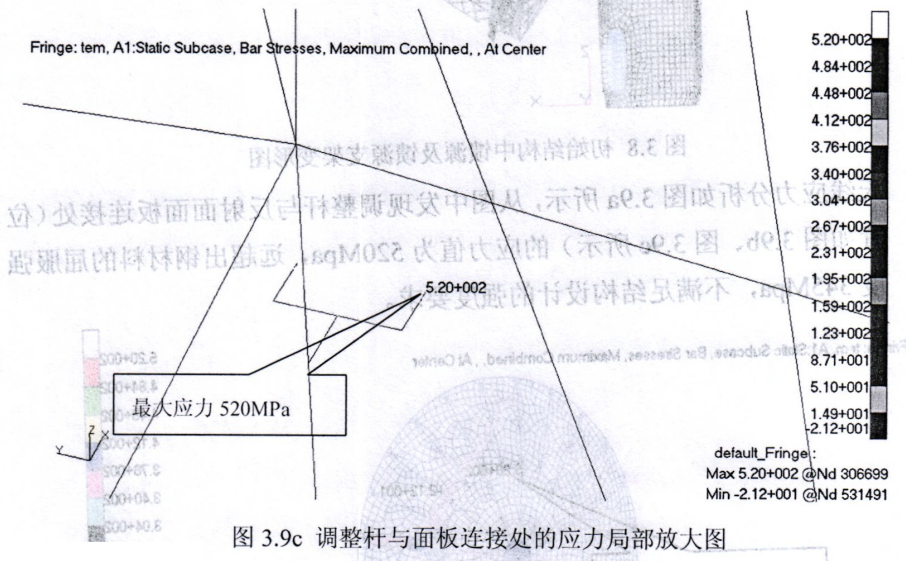


图 3.9c 调整杆与面板连接处的应力局部放大图

3.5.2 结构改进后有限元分析

根据天线初始结构存在两个问题，对结构进行了如下改进：

1. 原结构设计馈源支架仅有四个支撑杆，支架弯曲刚度不足。因而需要增加馈源支架刚度。在每个支撑杆上增加四个副支杆，副支杆一端连接与主支

撑杆，一端连接于辐射梁上，如图 3.10 所示。经有限元分析计算，馈源支架变形得到了极大的改善，相应的馈源位移及馈源平面法线与天线光轴的角度位移也得到了修正，使馈源能够满足设计技术指标。

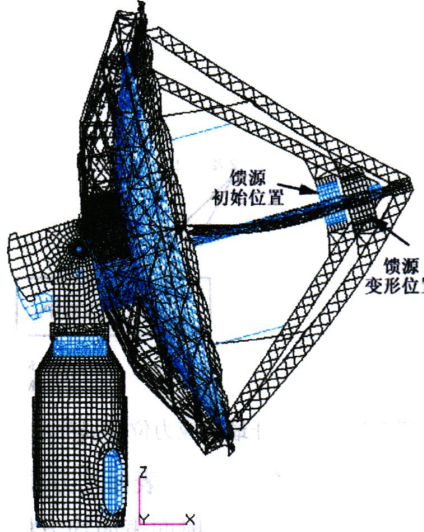


图 3.10 新馈源支架变形图

- 原天线面板调整杆直径为 12mm，由于调整杆弯曲变形较大，致使调整杆与面板连接处最大应力值超出了其抗拉强度。因而，需要加强调整杆的弯曲刚度。根据工程实际，采用增加调整杆直径的办法解决。由于此天线反射体工作时需要 360° 整体旋转，是一种循环对称结构，因此需要增大结构中同圆范围内的调整杆的直径。改进调整杆直径后，重新对结构进行了分析计算，计算结果如图 3.11a、图 3.11b 所示。从图中可以看出，调整杆与面板连接处最大应力值减小至 272MPa，满足结构设计要求。

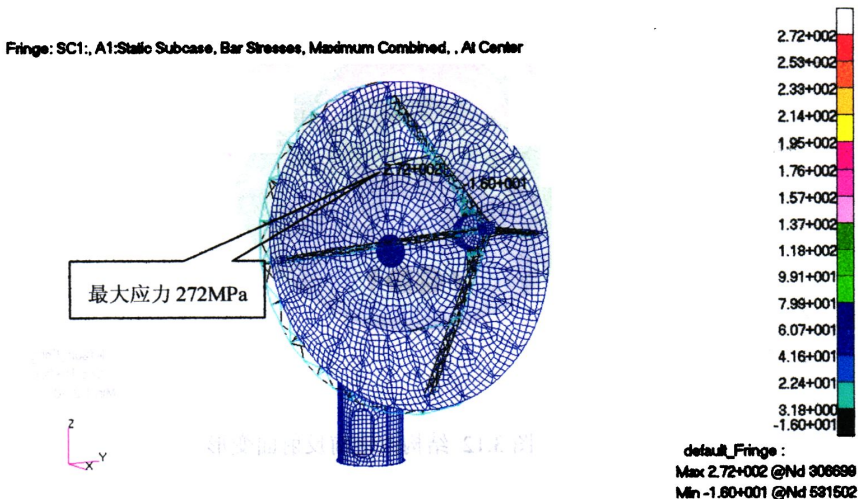


图 3.11a 调整杆最大应力示图

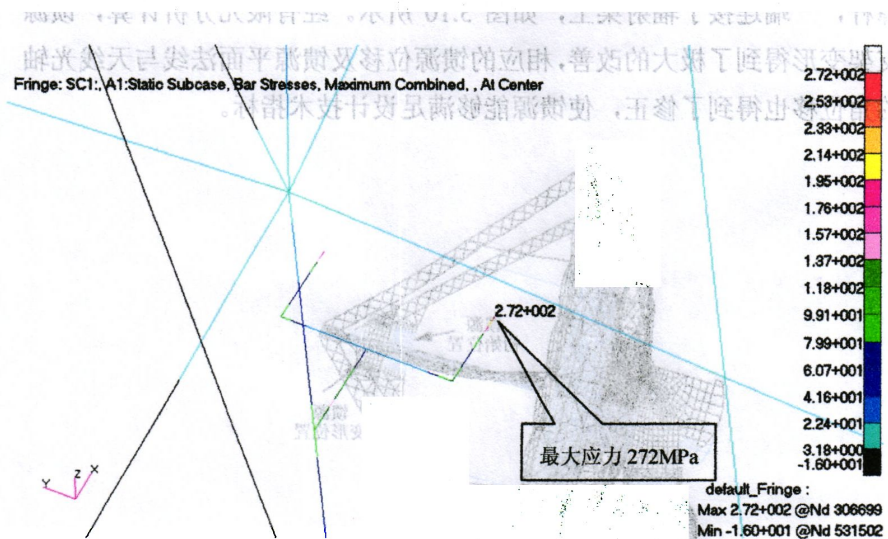


图 3.11b 调整杆最大应力位置局部示图

天线结构经过改进后，FEA 计算后反射面表面均方根误差为 0.3484mm，小于 1mm 的结构设计要求，但是比改进前反射面表面均方根误差 0.3292 变大了一些，而且反射面最大变形量也略有增大。结构改进前反射面变形如图 3.12 所示，改进后反射面变形如图 3.13 所示。

从图 3.12 和图 3.13 中可以看出，改进前后反射面变形有些细微变化，从变形数值上看到：最大值由 6.1 变成 6.28，最小值从 0.121 变成 0.177。说明增加四个副支杆后，天线反射面变形更大。

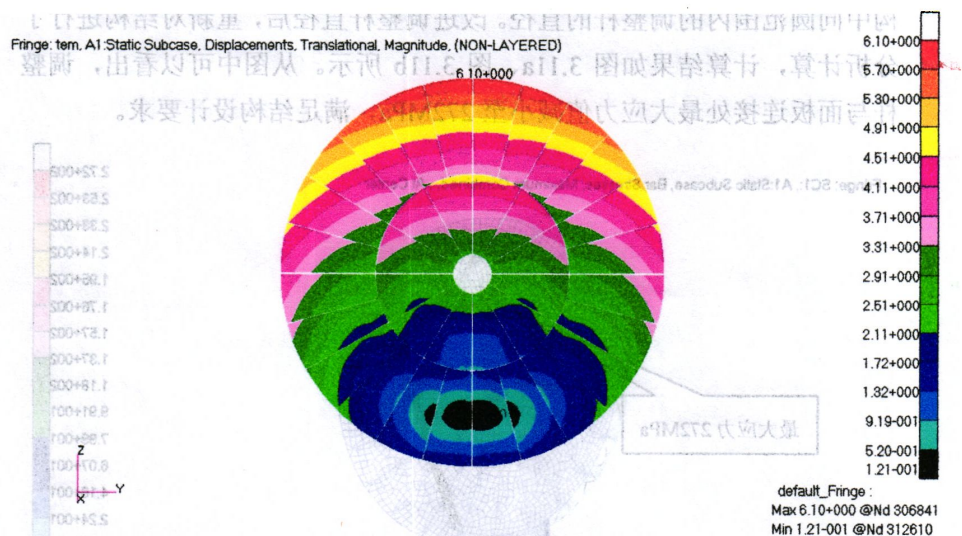


图 3.12 结构改进前反射面变形

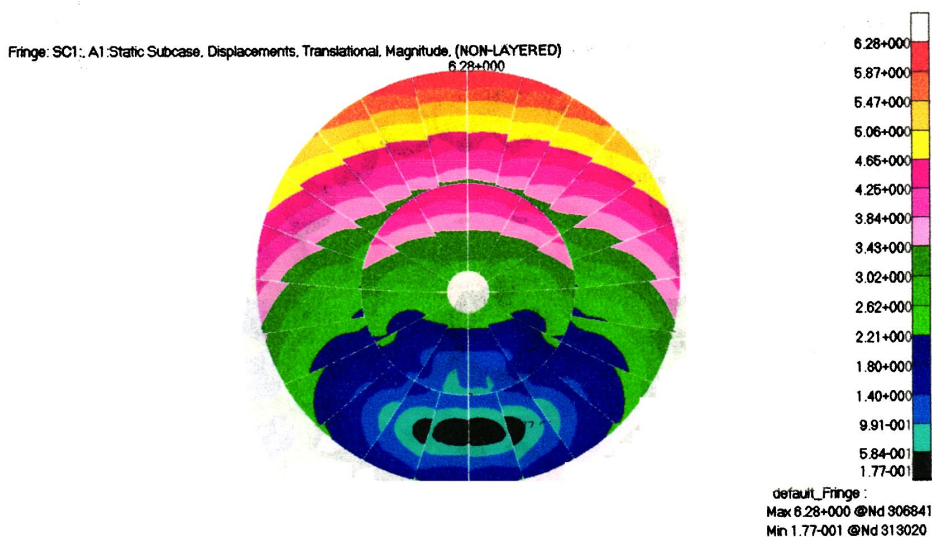


图 3.13 结构改进后反射面变形

3.6 分析结果

下文中各工况图名使用符号说明:

- E — 俯仰角
- A — 方位角
- P — 极化角
- G — 重力载荷
- W — 风载荷
- T — 环境温度, 未注环境温度为 25℃

3.6.1 天线反射面变形分析

各工况的结果是以数学模型为参照点所得的结果, 数学模型的意义是不施加任何载荷, 即: 无重力, 无温差, 无日照, 无风载。

3.6.1.1 图形分析

研究天线反射面的变形规律, 选取了工况 1~工况 14 等 14 种典型工况为研究对象, 进行了分析研究。反射面在施加载荷后的应变如图 3.14~图 3.27 所示。

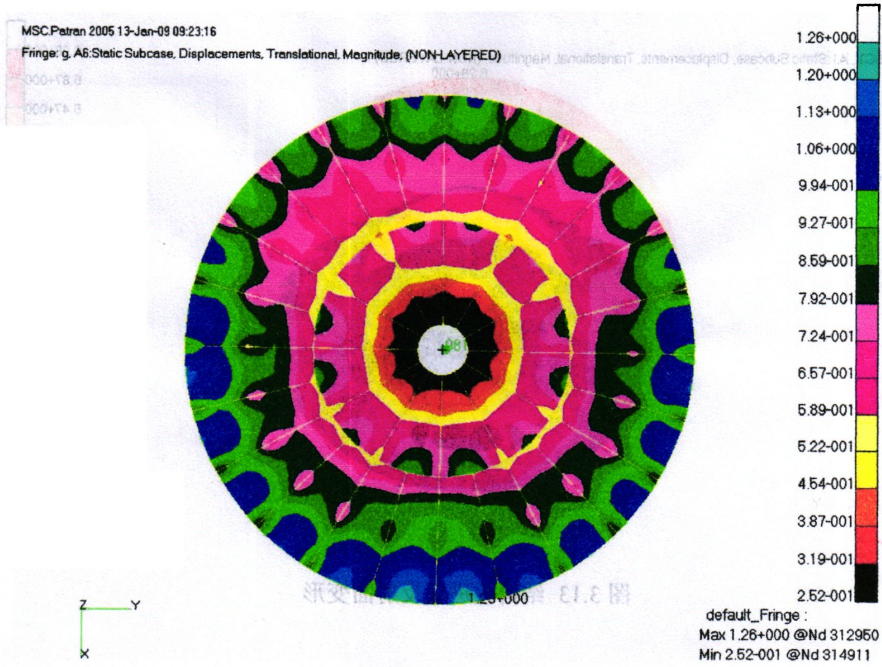


图 3.14 反射面变形(F90°, P0°, G)



图 3.15 反射面变形(F45°, P0°, G)



图 3.16 反射面变形(F45°, P22.5°, G)



图 3.17 反射面变形(F45°, P45°, G)

MSC.Patran 2005 13-Jan-09 09:35:08

Fringe: g. A1:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)



图 3.18 反射面变形(F15°, P0°, G)

MSC.Patran 2005 13-Jan-09 09:44:09

Fringe: g. A2:Static Subcase, Displacements, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)



图 3.19 反射面变形(F15°, P22.5°, G)



图 3.20 反射面变形(F15° ,P45° ,G)

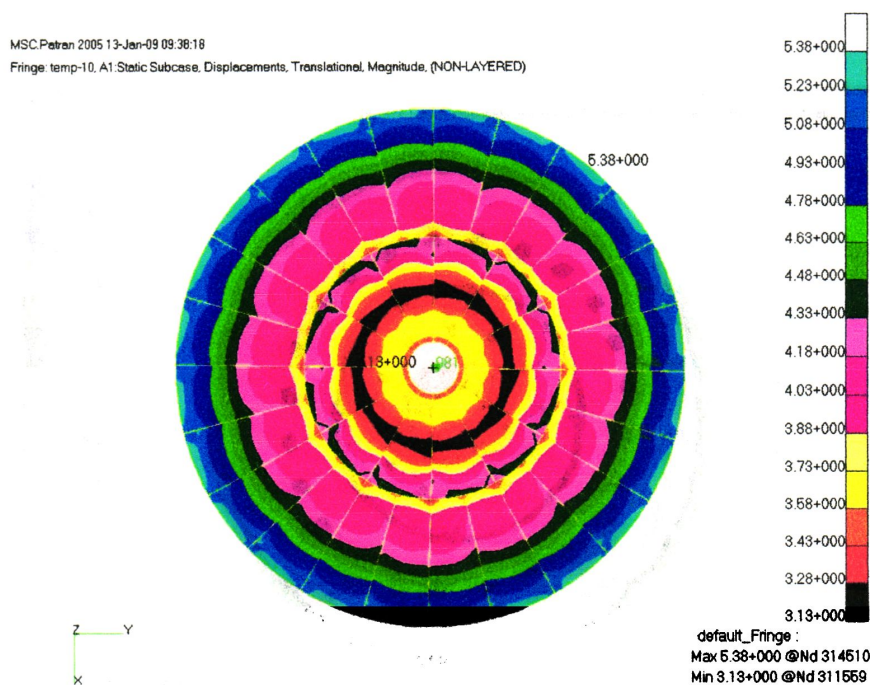


图 3.21 反射面变形(F90° ,P0° ,G+T-10 °C)

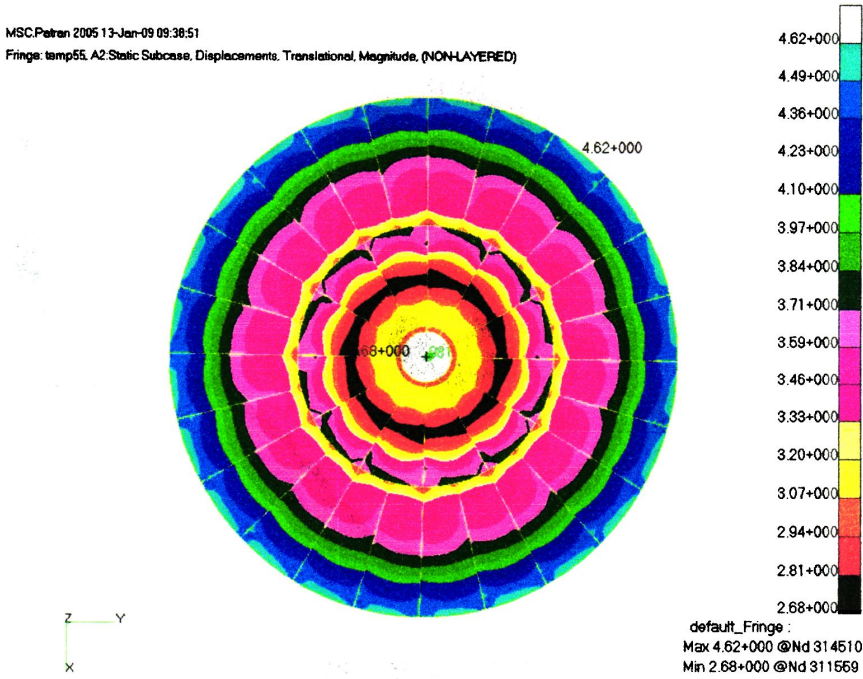


图 3.22 反射面变形(F90° , P0° , G+T+55 °C)

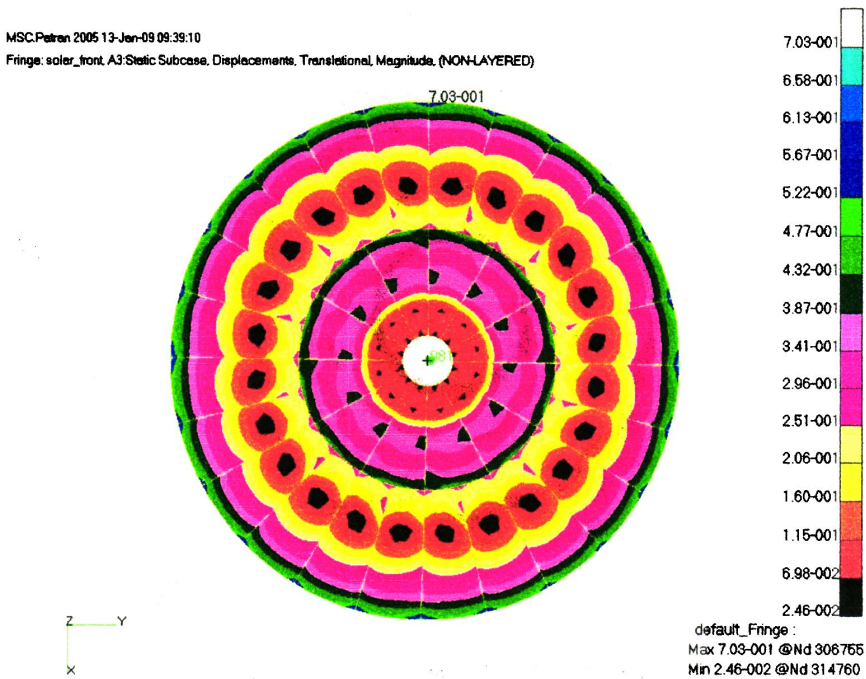


图 3.23 反射面变形(F90° , P0° , G+太阳直射反射面正面)

从图 3.23 中可以看出反射面变形有一定规律，即变形从外圈到内圈存在大~小~大~小的规律。

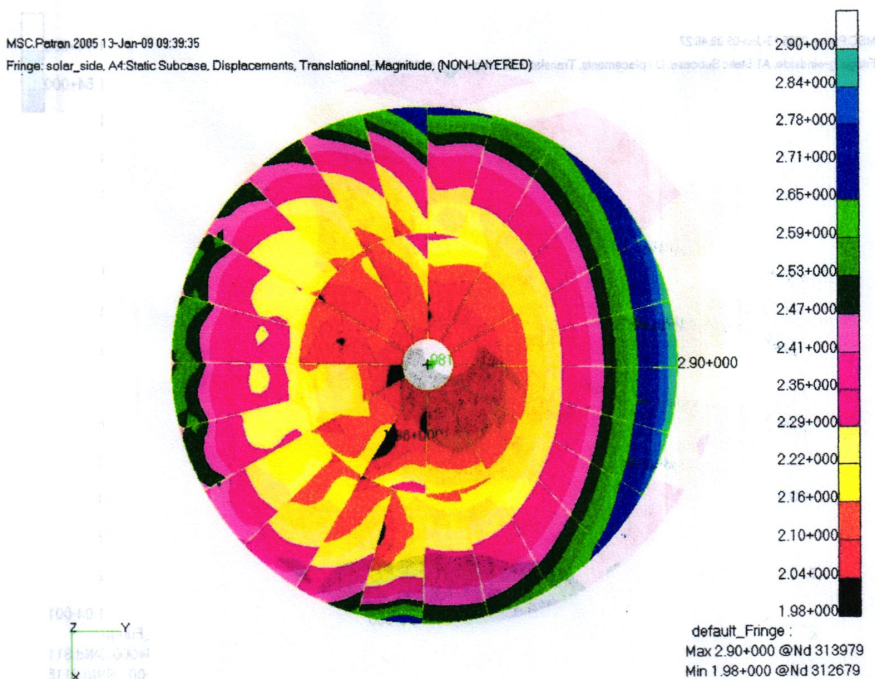


图 3.24 反射面变形(F90°, P0°, G+太阳直射反射面侧面)

从图 3.24 中可以看出反射面变形有一定规律，即距离光源越近的地方反射面变形越大。



图 3.25 反射面变形(F15°, P0°, G+W12.5m/s 正吹)



图 3.26 反射面变形(F15° , P0° , G+W12.5m/s 侧吹)



图 3.27 反射面变形(F15° , P0° , G+W12.5m/s 背吹)

从反射面变形图 3.14 到图 3.27 中可以看出:

- A. 除俯仰角 90° 外, 辐射梁与馈源支架连接处的反射面变形大, 而且其最外边处变形最大。这时因为重力载荷的原因造成的。

B. 如果仅考虑重力、风力载荷和环境温度，反射面变形是有规律的，变形从外圈到内圈越来越小。

3.6.1.2 数值分析

假定工况 1 下各结果为未变形数据值，其他工况的结果数据均是基于参考点工况 1 所得。

1. 典型工况 1~14 条件下的拟合最佳抛物面后反射面法向均方根值、馈源位移、最佳拟合抛物面的转角和焦距比如表 3.4 所示。

表 3.4 反射面法向均方根值、馈源位移、最佳拟合抛物面的转角

工况 序号	反射面法向 均方根值 (mm)	相对最佳拟合抛物面焦点的馈源 位置误差 (mm)			最佳拟合抛物面的转角 (°)		焦距比 F/D
		X	Y	Z	△-X	△-Y	
		0	0	0	0	0	
2	0.12198	0.7148	-0.01306	-2.13596	0.003996	0.0005087	0.50002
3	0.1188	0.7992	-0.03083	-1.9788	0.002182	0.00126	0.500006
4	0.1251	0.824	-0.03095	-1.8241	0.003052	0.002316	0.499995
5	0.1611	0.3412	-0.01586	-2.678	0.0052598	0.001352	0.500012
6	0.1655	0.0656	-0.02701	-2.7849	0.001255	0.002353	0.500009
7	0.17018	0.3263	-0.02541	-2.7387	0.002542	0.00147	0.500014
8	0.2193	-0.0454	-0.0218	0.6473	0.000073	0.000071	0.499783
9	0.188	0.053	0.0187	-0.5527	0.000062	0.000061	0.500186
10	0.122	0.0182	0.00226	0.3646	0	0	0.500032
11	0.0819	-0.2919	0.5345	-0.6	0.00247	0.00025	0.500067
12	0.16125	0.18636	-0.02062	-2.708	0.004209	0.001402	0.500022
13	0.1737	0.6071	-0.0631	-2.446	0.001988	0.00555	0.499982
14	0.1624	0.4359	-0.01179	-2.6626	0.006159	0.001319	0.500004

2. 俯仰角 15° 风吹方向对反射面最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 的影响如表 3.5 所示。

表 3.5 风吹方向对反射面最大变形量和法向误差 RMS 的影响

工况序号	风向	最大变形量 (mm)	法向误差 RMS (mm)
12	前吹	1.94	0.161
13	侧吹	1.64	0.174
14	背吹	1.95	0.162

从表 3.5 中可以看出，风力载荷前吹和背吹比侧吹对反射面的最大变形影响

大，这是由于风力载荷的作用面积比较大的原因。但是风力载荷前吹和背吹比例吹对反射面的最佳拟合抛物面法向误差影响小，是因为风力载荷作用比较均匀的原因。

3. 环境温度载荷对反射面最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 的影响如表 3.6 所示。

表 3.6 环境温度载荷对反射面最大变形量和法向误差 RMS 的影响

工况序号	环境温度 $^{\circ}\text{C}$	最大变形量 (mm)	法向误差 RMS (mm)
1	25	1.26	0
8	-5	5.38	0.210
9	55	4.62	0.188

从表 3.6 中可以看出，环境温度对反射面的最大变形和最佳拟合抛物面法向误差影响很大。环境温度相差越大，最大变形量值越大，最佳拟合抛物面法向误差越大。

4. 在天线不同极化角和俯仰角下，反射面最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 的比较如表 3.7 所示。

表 3.7 反射面最大变形量和法向误差

工况序号	极化角 ($^{\circ}$)	俯仰角 ($^{\circ}$)	最大变形量 (mm)	法向误差 RMS (mm)
1	所有	90	1.26	0
2	0	45	2.02	0.122
5		15	1.94	0.161
3	22.5	45	1.73	0.119
6		15	1.69	0.166
4	45	45	1.56	0.125
7		15	1.37	0.170

注：工况 1 下极化角 0° 的图和极化角 22.5° 、 45° 的图得出的数据一样。

从表 3.7 中可以看出：一、极化角相同，俯仰角从 90° ~ 45° ~ 15° 变化，反射面的最大变形量为小-大-小，最佳拟合抛物面的法向误差 RMS 值为越来越大的趋势。二、如果俯仰角相同，极化角从 0° ~ 22.5° ~ 45° 变化，反射面的最大变形量越来越小，最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值却基本不变。也就是说，极化角对天线反射面的表面误差影响很小。三、从上面的分析中可以看出，俯仰角和极化角引起的最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值没有绝对的对对应关系。

3.6.1.3 天线反射体变形的技术指标的计算结果

根据用户意见取恶劣工况 15 ~ 18 对面板均方根值、馈源位移和馈源平面法

线与天线光轴的角度进行了分析计算，如表 3.8 所示。

表 3.8 恶劣工况下反射面的均方根、馈源位移和馈源平面法线与天线光轴的角度

工况 序号	反射面均方根值 (mm)	馈源位移 (mm)	馈源平面法线与天线 光轴的角度移 (°)
15	0.3484	2.683	0.11018
16	0.3390	2.686	0.0996
17	0.2973	2.79	0.05784
18	0.2929	2.847	0.05392

在用户给定的最恶劣工作条件（最大风力 12.5m/s，环境温度 55℃）下，分析计算出下列技术指标：

(1) 天线反射面表面 RMS 最大值 σ_1 为 0.3484mm。根据实际制造生产技术，单块面板表面精度 $\sigma_2 \leq 0.15\text{mm}$ ，所有状态下天线反射面装配精度 $\sigma_3 \leq 0.8\text{mm}$ ，天线测量误差 $\sigma_4 \leq 0.1\text{mm}$ 。所以天线反射面精度 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2} = 0.89 < 1\text{mm}$ ，满足技术要求。

(2) 馈源位移最大为 2.8469mm < 3mm，满足技术要求。

(3) 馈源平面法线与天线光轴的角度最大为 $0.11^\circ < 0.2^\circ$ ，满足技术要求。

3.6.2 天线强度分析

3.6.2.1 收藏状态下强度分析

天线结构保证能在极限风速下 44.4m/s（即收藏状态）下不遭破坏。如图 3.28 所示为表 3.2 工况 19 下天线结构应力图，如图 3.29a、图 3.29b 所示为工况 19 下的局部放大应力图：

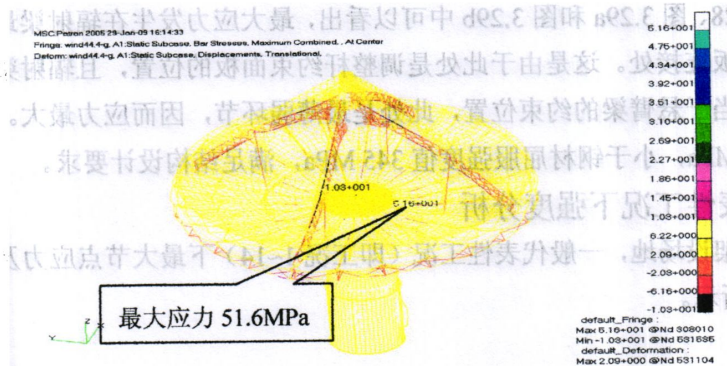


图 3.28 天线结构应力图 (E 90°, P0, G+W44.4m/s 前吹)

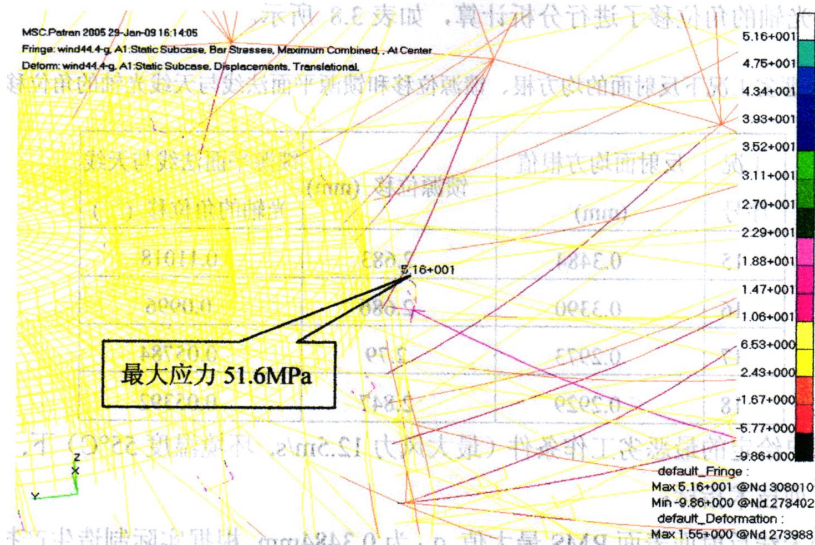


图 3.29a 天线结构局部应力图(E 90° , P0, G+W44.4m/s 正吹)

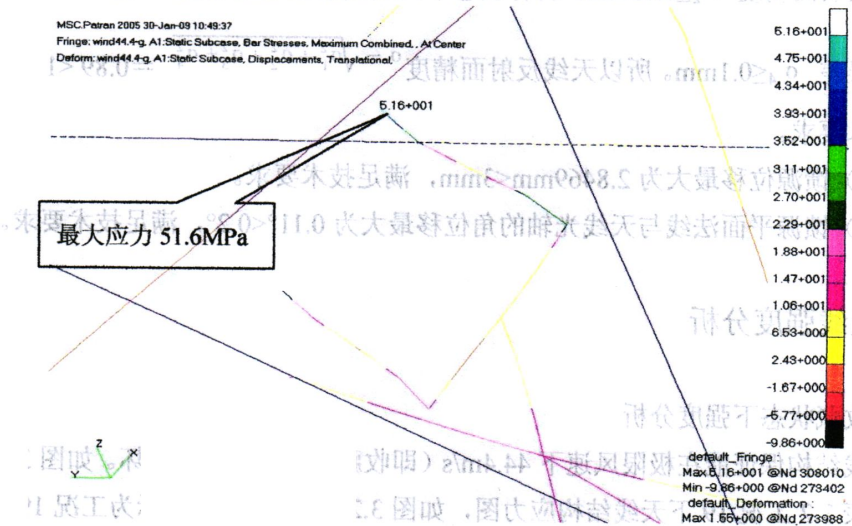


图 3.29b 天线结构局部放大应力图 (E 90° , P0, G+W44.4m/s 正吹)

从图 3.28、图 3.29a 和图 3.29b 中可以看出,最大应力发生在辐射梁最内端的调整杆与面板连接处。这是由于此处是调整杆约束面板的位置,且辐射梁最内端对中心体相当于悬臂梁的约束位置,此处是最薄弱环节,因而应力最大。最大应力值为 51.6MPa,小于钢材屈服强度值 345 MPa,满足结构设计要求。

3.6.2.2 代表性工况下强度分析

在天线架设场地,一般代表性工况(即工况 1~14)下最大节点应力及节点位置如表 3.9 所示。

表 3.9 最大节点应力及节点位置

工况序号	最大节点应力(MPa)	节点位置
1	42.6	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
2	61	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
3	58.5	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
4	53.4	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
5	94	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
6	66.5	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
7	52.2	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
8	227	辐射梁中下部的调整杆与面板连接处
9	194	辐射梁中下部的调整杆与面板连接处
10	114	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
11	103	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
12	93.4	最辐射梁内端的调整杆与面板连接处
13	95.8	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处
14	94.5	辐射梁最内端的调整杆与面板连接处

从表 3.9 中可以看出, 工况 1~14 下最大应力发生在辐射梁中下部的调整杆与面板连接处, 最大应力值小于钢材屈服强度值 345 MPa, 满足结构设计要求。

3.6.3 天线结构模态分析

在天线工作过程中, 由于本身转动和外界干扰如风载荷影响, 天线很可能发生振动。如果天线结构设计不合理, 天线发生共振现象, 很可能使天线结构应力过大而遭到破坏。通过模态分析, 可以得到结构的动态特性。计算结构的固有频率和振型可以估计结构件与支撑结构间的相互影响, 可以发现结构的薄弱环节和不足之处, 为结构设计提供修改依据。由于低阶频率较易与外界条件发生耦合, 因而在工程上通常只需要分析结构的低阶频率。

本工程考虑了天线俯仰角 15°、45 和 90°工况下的情形, 前三阶模态响应频率见表 3.10 所示。图 3.30 所示为天线俯仰角 15° 时一阶模态响应图。

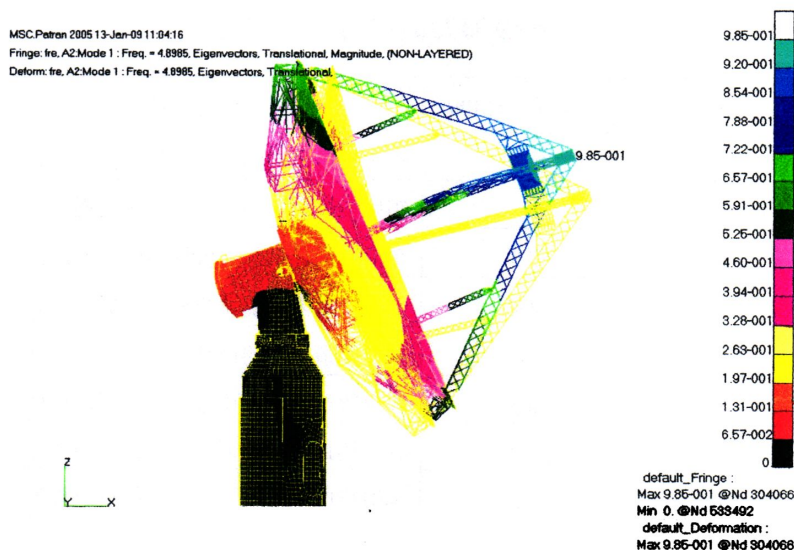


图 3.30 俯仰角 15° 时天线一阶模态响应

表 3.10 天线结构前三阶模态响应频率

俯仰角 (°)	一阶模态响应频率(Hz)	二阶模态响应频率(Hz)	三阶模态响应频率(Hz)
俯仰角 15	4.8985	4.9892	5.875
俯仰角 45	4.8686	5.0403	5.8497
俯仰角 90	4.9534	5.207	5.9738

从图 3.28 中可以看出，一阶模态响应主要是以天线俯仰驱动为中心绕 Y 轴的天线反射体整体振动。从表 3.10 可以看出有限元模态分析得到的天线结构最小谐振频率是 4.8686 Hz，满足大于 2Hz 的技术要求。

3.7 小结

本章首先建立了 12 米天线的有限元分析模型，然后针对天线工作最恶劣条件进行了结构变形和应力分析，找出结构薄弱环节，并加以改进。其次确定了 19 种分析典型工况，介绍了技术指标的计算方法，然后得到各种工况下天线变形图、应力图和变形数据，引入了重力影响的天线朝天安装误差，计算了技术要求的各个指标值，对各工况下的天线面进行了变形和应力进行了深入分析。最后，对天线俯仰角 15°、45 和 90° 工况下前三阶模态进行了分析，得到了结构固有频率。从分析结果中可以看出，天线结构最大应力发生在辐射梁中下部的调整杆与面板连接处，其最大应力值 272MPa 小于钢材料屈服强度值 345MPa；天线反射面精度 (RMS) 最大值为 0.89mm，小于 1mm 的技术要求；馈源位移最大为 2.8469mm，

小于 3mm 的技术要求；馈源平面法线与天线光轴的角位移最大为 0.11018° 小于 0.2° 的技术要求。天线结构最小谐振频率是 4.8686 Hz，大于 2Hz 的技术要求。此天线结构有限元分析结果满足技术要求，设计是可行的。

通过深入分析天线反射面的变形和应力情况，得到了一些普遍性规律的结论，对工程实践具有一定的指导意义。这些规律如下：

- 1) 除俯仰角 90° 外，与馈源支架连接处的反射面变形大，而且其最外边处变形最大。
- 2) 如果仅考虑重力、风力载荷和环境温度，反射面变形是有规律的，变形从外圈到内圈越来越小。
- 3) 环境温度对反射面的最大变形和法向误差影响很大。环境温度相差越大，最大变形量值越大，法向误差越大。
- 4) 极化角相同，俯仰角从 $90^\circ \sim 45^\circ \sim 15^\circ$ 变化，反射面的最大变形量为小-大-小，最佳拟合抛物面的法向误差 RMS 值为越来越大的趋势。
- 5) 俯仰角相同，极化角从 $0^\circ \sim 22.5^\circ \sim 45^\circ$ 变化（即馈源支架四个撑腿从 $0^\circ \sim 22.5^\circ \sim 45^\circ$ 的旋转），反射面的最大变形量越来越小，最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值却基本不变。也就是说，极化角对天线反射面的表面误差影响很小。
- 6) 俯仰角和极化角引起的反射面最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值没有绝对的对对应关系。
- 7) 风力载荷前吹和背吹比侧吹对反射面的最大变形影响大，但是对反射面的最佳拟合抛物面法向误差影响小。
- 8) 最大应力发生在辐射梁中下部的调整杆与面板连接处。

第四章 天线反射面摄影测量

4.1 引言

天线反射面的精度是天线结构精度的重要指标之一。本项目需要在俯仰角 $15^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内测量 12 米天线反射面的表面误差,并与有限元分析得出的反射面表面精度进行比较,验证有限元建模的和分析结果的准确性,进而可以算估出最恶劣工况下天线反射面的表面精度。

光学经纬仪带尺法适合俯仰角为 90° 的反射面测量。射电全息测量法是天线工作状态天线测量的方法。双电子经纬仪测量法、全站仪测量法、激光跟踪仪测量法和数字近景摄影测量方法可以完成不同俯仰角下测量工作。但是双电子经纬仪测量法、全站仪测量法、激光跟踪仪测量法都需要提供各种高度下在测量周期内的稳固测量基础,才能完成各种俯仰角的测量,测量基础通常是测量塔。而数字近景摄影测量方法具有硬件设备简单、测量方式灵活方便、成本低、测量范围广等优点,测量过程只需要提供各种高度下的瞬态稳定测量基础,测量基础通常是吊车加吊筐。因而,此次测量方法采用了数字近景摄影测量方法。

4.2 数字近景摄影测量的基本理论

摄影测量^[34]是一种光学非接触测量方法,它处理的对象是由照相机自由拍摄得到的二维图像信息,通过二维信息重建得到物体在三维空间的位置、大小、形状乃至物体的运动。数字近景摄影测量是摄影测量的一个分支。

数字近景摄影测量原理是用专业测量数码照相机从两个(或多个)位置拍摄同一工件或目标,以获取在不同视角下的图像,利用三角测量原理获取被测点的三维坐标。

4.2.1 数字近景摄影测量系统构成及测量流程

数字近景摄影测量系统通常由专业数字照相机、人工标志(测量标志、编码标志、定向棒、基准尺)、计算机、摄影测量系统软件构成。

近景摄影测量流程如图 4.1 所示:

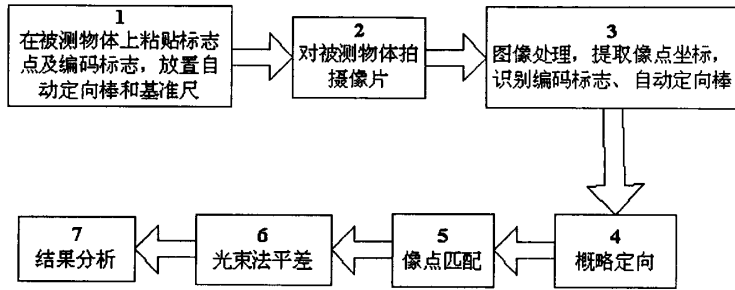


图 4.1 近景摄影测量流程

4.2.2 数字近景摄影测量注意事项

数字近景摄影测量的实施过程中，如果随意进行，有可能得到的测量结果不准确，甚至得不到测量结果。因而，需要注意以下问题^[35]：

(1) 标志与距离间的关系

摄影距离与标志大小的关系如表 4.1^[35]所示。

表 4.1 摄影距离与标志大小的关系

标志直径	6mm	12mm	25mm
摄影距离	≤3m	≤6m	≤12m

对同一标志而言，在摄影距离、闪光强度、相机设置均相同的条件下，标志的反光强度随入射角的增大而减小。理想的入射角为 $0^\circ \sim 45^\circ$ ，最大不应超过 60° 。

(2) 理想视场角范围

工业数字摄影测量用相机视场角不宜过小，否则，拍摄的范围太小，会导致单张像片数上的像点观测值较少，从而影响测量精度；同时视场角度也不宜过大，否则，镜头畸变值将非常大，也会影响精度。

理想的视场角范围为 $70^\circ < x < 80^\circ$ ， $50^\circ < y < 60^\circ$ ，其中 x 为水平视角， y 为竖视角。

(3) 测量网形设计

- 尽可能使每个标志点被四个以上不同位置的摄站所拍摄；
- 尽可能使每个标志点的交会角在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 之间；
- 尽可能对每个标志点的摄影入射角小于 45° ，最大不超过 60° ；
- 尽可能使每个摄站能拍摄所有标志，尽可能使相邻像片间具有较多的重叠和公共点；
- 使用相机拍摄时，应保证至少有 1 张像片旋转 90° 拍摄。

(4) 像片概略定向要求和像点自动匹配要求

- 要获取较高的定向精度，需至少在每张像片上较好地布置 12 个点；
- 每张像片必须含有定向棒或至少 4 个编码标志。
- 每个测量点至少在 3 张不同的位置的像片上成像。

(5) 自检校光束法平差的要求

- 至少相机旋转 90° 拍摄一次；
- 至少拍摄 4~6 张像片（平面目标 6 张，非平面目标 4 张）；
- 至少在 3 个不同位置拍摄像片；
- 至少有 20 个分布均匀的测量点。

(6) 尺度要求

- 至少有 1 个基准；
- 基准尺要尽可能长。

4.3 12 米天线摄影测量的方法和结果

4.3.1 数字近景摄影测试系统

采用 GSI V-STARS 系统，包括 INCA3 数字测量照相机和 12mm 圆形测量标志、编码标志、定向棒、基准尺、笔记本计算机、数字近距离摄影测量软件 V-STARS。INCA3 数字测量摄影机精度为 12 万分之一。

4.3.2 摄影测量条件

摄影测量条件如表 4.2 所示，尽可能地反映了 FEA 分析的负载工况。

“理想天气”条件是：夜间、平静风（风速小于 2.8m/s）、温度 25°C 。

表 4.2 摄影测量条件

测试工况	俯仰角 ($^\circ$)	极化角 ($^\circ$)	理想天气	测试期间实际条件		
				日光	风速	T ($^\circ\text{C}$)
1	90	0	理想	夜间	平静	20
2	45	0	理想	夜间	平静	20
3	45	45	理想	夜间	平静	20
4	15	0	理想	夜间	平静	20
5	15	22.5	理想	夜间	平静	20
6	15	45	理想	夜间	平静	20

4.3.3 测试过程

A. 目标布局

每个天线面板提供 9 个圆形定向反射目标，均匀分布在每个反射面板上（目标直接安装在每个反射面板四角的调整螺栓上方）。

参考目标：要求 8 个特殊精度目标来定义中心体上的参考圆。在中心体上法兰面有 8 个基准孔。这个平面由机械加工保证高精度，这些孔均匀地分布在与极化轴承同轴的圆上。摄影测量目标装在这些孔里，并且实际的极化轴由摄影测量获得。

自动标摄影测量方向装置（十字目标）装在主放射面中心。

实际目标布局参见图 4.2 所示。

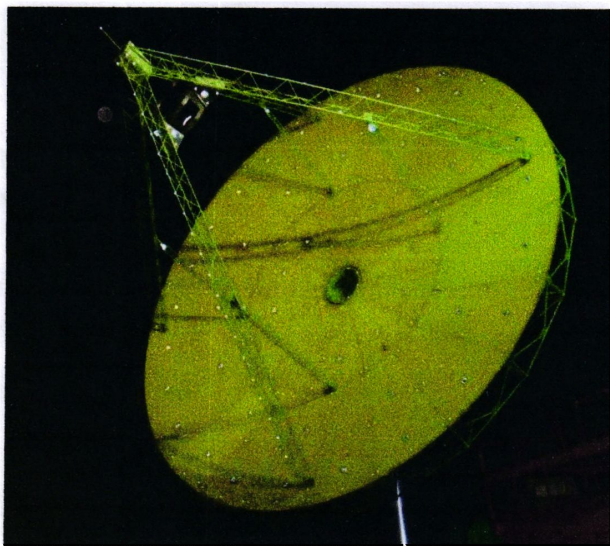


图 4.2 实际目标布局

B. 摄影过程

按在 FEA 分析中所考虑的俯仰和极化角(参照表 4.2 中描述的具体测试条件)获取一系列的摄影测量图像。

摄影测量图像由一操作者在距反射体 8 米远的高台上拍摄。要在多个摄影地点从多个位置提供反射体的一系列充足图像。每个地点要拍摄多个图像以便捕获完整的反射体。在每个摄影地点照相机都要旋转 90 度，每一步拍两张照片。每个测试条件拍了大约 100 照片，实际拍摄了 599 张照片。

C. 数据处理

1. 采用摄影测量系统 V-STARS 软件处理数据。以中心参考目标为参照，得出每个目标的坐标 (x,y,z) 。

2. 采用工业三坐标测量系统 MetroIn 软件计算相对于最佳抛物面天线的表面法向均方根误差 RMS。

4.3.4 测量结果

各种工况下测量结果见表 4.3。反射面测量 RMS 表示基于中心体上参考圆的最佳抛物反射面的法向均方根偏差。

表 4.3 测量结果

测试工况	俯仰角 (°)	极化角 (°)	反射面 RMS (mm)
1	90	0	0.314
2	45	0	0.338
3	45	45	0.346
4	15	0	0.394
5	15	22.5	0.383
6	15	45	0.369

从表 4.3 可以看出：测试工况下，反射面的最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值小于 1mm 的设计技术指标；工况 1、工况 2 和工况 4 极化角相同，俯仰角从 90° ~45° ~15° 变化，反射面的最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值为越来越大的趋势。此结论也可从工况 1 工况 3、工况 6 得到验证，并且与前面有限元分析结果的结论一致；工况 1 下最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值较小，原因是天线反射体结构对称，受重力载荷引起的结构变形圆周对称，因而反射面变形基本圆周对称且变形偏离最佳拟合抛物面数值较小。而工况 4 下最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值最大，原因是天线反射体结构对称，但是受重力载荷引起的结构变形不均匀，并且此三种工况下反射面变形偏离最佳拟合抛物面数值中最大。

4.4 天线反射面 FEA 的验证分析

根据本次天线反射面 RMS 测量工作状态，选取相近状态的天线反射面 FEA 值进行了分析比较。实测值与 FEA 值存在部分偏差是不可避免的，造成实测值与 FEA 值存在偏差的原因主要包括以下几种因素：

- FEA 工况条件与此次测量条件差异
- 在 FEA 中没有考虑单块面板表面误差

FEA 假定单块面板表面是理想表面，而在测量时引入了单块面板表面误差。单块面板在制造中与理论曲面存在误差，主要包括蒙皮成型胎具型面误差、蒙皮成型精度误差、面板粘接模具型面误差、面板粘接成型误差等。

● 在 FEA 中没有考虑天线反射面板装配精度

FEA 假定天线反射面是理想表面，而在测量时引入了反射面板装配误差。天线反射面装配是由很多单块面板组成天线反射面，每块面板的空间位置在装配时存在偏差，造成偏离和扭转。

● 系统误差不同

FEA 存在误差，其主要表现在建立的天线有限元模型与实际符合程度。而天线测量系统也存在系统误差，主要包括摄影测量误差、标志误差和计算误差等。

对于 FEA 工况条件与此次测量条件不同情况，由于条件差异不大，认为其对天线反射面精度的影响影响较小，可忽略不计。对于单块面板表面精度、天线反射面板装配精度和天线测量误差这三个影响因素，由于 FEA 中没有考虑且影响较大，因而比较天线反射面 FEA 的 RMS 计算值和测量值需要修正 FEA 值。

FEA 计算修正值方法：天线反射面 RMS 的 FEA 计算值表示为 σ_1 ；单块面板表面精度表示为 σ_2 ，单块铝蜂窝面板表面精度通常小于 0.15mm，取值为 0.15mm；在朝天状态下，天线反射面板装配精度表示为 σ_3 ，通常取值为 0.25~0.4mm，而本次朝天状态反射面测量值为 0.314mm，故本次取值为 0.3mm；测量误差表示为 σ_4 ，通常小于 0.1mm，取值为 0.1mm。天线反射面精度 FEA 计算修正值 σ 取均

方根值 $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2}$ 。

天线反射面 RMS 的 FEA 修正值与测量值的比较表格如 4.4 所示。

表 4.4 天线反射面 RMS 的 FEA 修正值与测量值

工况序号	FEA (mm)	FEA 修正值 (mm)	测量值 (mm)	差值%
1	0	0.34	0.31	9.7
2	0.12	0.37	0.34	9.5
3	0.12	0.37	0.35	6.9
4	0.16	0.38	0.39	-2.5
5	0.17	0.39	0.38	1.6
6	0.17	0.39	0.37	5.4

从表 4.4 可以看出，天线反射面 RMS 的 FEA 计算值远远小于测量值。这是由于此 FEA 计算值中假设单块面板的表面、天线反射面板的安装及测量无误差，而测量值包含此三个影响因素，因而其计算值小于测量值。在 FEA 计算值中考虑

三个影响因素后, 天线反射面 RMS 的 FEA 修正值和测量值差值的绝对值最大为 9.7%。从差值数据可以得出, 天线反射面 RMS 的 FEA 计算值是可信的。

总之, 从以上数据分析中可以看出 12 米天线有限元模型和计算结果均符合实际情况。

4.5 天线反射面精度的估算

最恶劣天线工作条件下, 通常天线反射面精度测量不宜实施。其主要表现在两方面: 一是在工程进行中上不易找到能同时达到设计极限要求的条件, 二是在设计极限条件下不易进行天线反射面精度测量。因而, 需要在工程上根据一定方法预测出最恶劣工况下天线反射面精度。

本文经过对比分析 6 种工况下测量值与相对应的有限元分析结果, 发现实际天线的反射面误差与有限元分析的计算结果相吻合, 可以验证天线结构的有限元模型的正确性和分析的可信性。因而, 可以利用在相对应的不具备测量条件的工况下 FEA 得到的天线反射面误差, 通过引入单块面板表面精度、天线反射面板装配精度两个影响因素, 修正 FEA 反射面误差值, 从而预测出最恶劣工况下天线反射面精度指标。

根据 FEA 的结果, 可以看出最恶劣典型工况 (俯仰角 15° 、极化角 0° 、有重力载荷、环境温度 55°C 、风载荷 12.5m/s 正吹、无日照) 下的反射面最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值为 0.3484mm , 按照节 4.4 的方法, 仅引入单块面板表面精度、天线反射面板装配精度两个影响因素, 经修正后, 得到最恶劣工况下天线反射面表面均方根误差为 0.484 , 其值小于反射面最佳拟合抛物面法向误差 RMS 设计值 1mm , 说明在正常工作情况下天线反射面精度满足设计要求。

4.6 小结

本章首先介绍了数字近景摄影测量法的原理、测量流程、系统构成和测量注意事项, 然后详细给出了 12 米天线反射体的数字近景摄影测量的方法和过程, 在与有限元分析工况相近的 6 种工况下对天线进行了摄影测量, 获得了反射面法向均方根偏差。通过引入单块面板表面误差、天线反射面板装配精度和天线测量误差的影响, 修正了有限元分析的反射面法向均方根误差值, 从而对摄影测量值和有限元分析值进行了比较和分析, 从中可知用有限元法得出的数值与测量值比较吻合, 验证了有限元模型及分析的正确性。最后这样根据有限元分析得到的天线反射面在极端环境温度、风载荷和不同姿态条件下的误差, 对不具备测量条件的

工况天线反射面精度有了正确的估算,预测出最恶劣工况下天线反射面精度指标。

第五章 总结与展望

5.1 总结

随着大中型天线技术的发展,尤其是国内外大型射电望远镜天线需求的增加,人们对于天线的结构指标要求越来越高。天线结构有限元分析分析有助于保证结构技术精度的实现,通过对天线在自重、风荷、环境温度等载荷作用下的结构强度、反射面表面精度、馈源位置精度和结构固有频率等分析,为结构设计提供了重要的指导。天线精度测量能检验制造安装的精度和验证是否达到设计要求,能观测天线变形形态,找出问题,验证有限元分析结果。本文主要做的工作及成果如下:

一、首先在分析该 12 米天线结构特性的基础上,根据天线的实际工作环境,主要承受的重力载荷、风力载荷和温度载荷(环境温度和太阳辐射)等条件,利用 MSC. Patran 建立天线结构的有限元模型。然后针对天线工作最苛刻条件进行了天线初始结构的变形和应力分析,发现了结构薄弱环节,并加以改进,直至满足设计要求。其后针对各种载荷和天线各种典型姿态,建立了 19 种典型分析工况,分别得到了天线反射体在各个工况下的变形、应力云图等数据,并且对天线进行了模态分析,给出了俯仰角 15° 、 45° 和 90° 工况下天线结构的前三阶模态。最后,引入了重力影响的天线仰天安装误差,利用“反射面天线精度分析软件”获取了最佳拟合抛物面的反射面法向误差等数据,分析计算了天线结构技术要求的指标值。

二、基于对天线结构的有限元分析,得到了一些有参考价值的结论:

1. 除俯仰角 90° 外,辐射梁与馈源支架连接处的反射面变形大,而且其最外边处变形最大。
2. 如果仅考虑重力、风力载荷和环境温度,反射面变形是有规律的,变形从外圈到内圈越来越小。
3. 环境温度对反射面的最大变形和法向误差影响很大。环境温度相差越大,最大变形量值越大,法向误差越大。
4. 极化角相同,俯仰角从 $90^\circ \sim 45^\circ \sim 15^\circ$ 变化,反射面的最大变形量为小-大-小,最佳拟合抛物面的法向误差 RMS 值为越来越大的趋势。
5. 俯仰角相同,极化角从 $0^\circ \sim 22.5^\circ \sim 45^\circ$ 变化(即馈源支架四个撑腿从 $0^\circ \sim 22.5^\circ \sim 45^\circ$ 的旋转),反射面的最大变形量越来越小,最佳拟合抛

物面法向误差 RMS 值却基本不变。也就是说,极化角对天线反射面的表面误差影响很小。

6. 俯仰角和极化角引起的反射面最大变形量和最佳拟合抛物面法向误差 RMS 值没有绝对的对对应关系。
7. 风力载荷前吹和背吹比侧吹对反射面的最大变形影响大,但是对反射面的最佳拟合抛物面法向误差影响小。
8. 最大应力发生在辐射梁中下部的调整杆与面板连接处。

三、制定了数字摄影测量方案,确定了与有限元分析工况相对应且具备测量条件的 6 种测量工况,利用 V-STARS 摄影测量系统对 12 米天线反射面表面进行了测量。基于工业三坐标测量软件 MeroIn 把实际测量的数据转换得到了反射面在各工况下的法向均方根误差。通过引入单块面板表面误差、天线反射面板装配精度和天线测量误差,修正了有限元分析的反射面法向均方根误差值,从而将测量值和有限元分析结果进行了比较,比较数据相吻合,验证了天线结构的有限元模型的正确性和分析的可信性。这样根据有限元分析得到的天线反射面在极端环境温度、风载荷和不同姿态条件下的误差,对不具备测量条件的工况天线反射面精度有了正确的估算,预测出最恶劣工况下天线反射面精度指标。

5.2 展望

本文应用结构有限元分析软件对 12 米天线进行了分析和反射面精度测量,获得了一系列的有效数据,但是由于受工作条件和个人能力的限制,还存在一些不足之处,今后还需要在以下方面进行完善和提高:

(1) 由于受测量环境的限制,即环境温度和风力不能达到理想要求,这样必然会引入一定的测量偏差。今后,在条件允许的情况下可以另行选择测量环境(如封闭可调控温度的室内)进行测量,消除环境温度和风力对测量精度的影响。

(2) 在太阳照射对天线的的影响中,本文采用了西德直径 30m 的天线使用温度分布的研究成果。今后,可以研究 12 米天线的太阳照射温度分布,更精确计算温度引起的天线结构应力和形变。

致谢

本论文是在导师仇原鹰教授、杨可忠研究员和霍治生研究员的悉心指导和不断鼓动下完成的。三位导师渊博的知识、为人师表的学者风范、严谨的工作作风和对学生无私的关怀，使我受益匪浅。四年多来，三位导师始终给予了我无私的关怀和爱护，从如何做人，如何做事，如何做学问等方方面面给了我太多的教诲。在此，仅对他们表示最衷心的感谢。

感谢参与课题的同事武织才、郭海鹰、刘国玺、王大为、郑元鹏、卢智辉、赵均红、张一凡、张强，感谢同事金超、尉飞、张方才、兰菲、赵晓阳，感谢他们对作者论文的完成给予的帮助。

感谢我的领导和同事在多年来工作中所给予的帮助和指导，是你们分担了本该由我完成的工作和责任，给我创造了宽松的学习环境，我的学业的完成离不开你们的帮助和支持。

最后感谢培养我长大含辛茹苦的父母、永远在背后默默支持我的爱人，在我学习期间一贯地理解、鼓励与支持，给我信心和克服困难的勇气。

感谢所有给我帮助和支持的朋友们！

参考文献

- [1] 马爱军, 周传月, 王旭. Patran 和 Nastran 有限元分析专业教程. 北京:清华大学出版社, 2005
- [2] R.J.Lacse.Green Bank Telescope Memo 184.<http://info.gb.nrao.edu/GBT/GBT.html> Accessed August 2001
- [3] Orfei,A., Morsiani, M., Zacchiroli, G, Maccaferri, G, Roda, J., Fiocchi, F. Active surface system for the new Sardinia Radio Tele-scope.Astronomical Structures and Mechanisms Technology.Proc. SPIE 5495, 2004
- [4] (美) William A.Imbriable 著, 李海涛译.深空网大天线技术.北京:清华大学出版社, 2006.118-119
- [5] W.A.imbriale,M,Moore,D.J.Rochblatt,and W.Veruttipong. Compensation of Gravity-Induced Structural Deformations on Beam-Waveguide Antenna Using a Deformable Mirror.IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 1995.Newport Beach,California,pp.1680-1683,June 1995.
- [6] R.Bruno,w.Imbriale,M,Moore,and S.Stewart.Implementation of gravity compensating mirror on a large aperture antenna.AIAA Multidisciplinary Analysis and Optimization.Bellevue,Washingtong,September 1996.
- [7] S.R.Rengarajan,W.A.Imbriale,and P.W.Cramer,Jr..Design of a Deformed Flat Plate to Large Reflector Antennas.International Symposium on Electromagnetic Theory.Thessaloniki,Greece,May 1998,pp.124-126
- [8] Kärcher, Hans J.Experience with Wind Excited Mirror Vibrations.in 2nd Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes, T. Ander-sen; ed., Proc. SPIE tbd, 2003
- [9] Kärcher, Hans J. Experience with the Design and Construction of Huge Telescope Pedestals. in 2nd Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes, SPIE's 9-11 September 2003
- [10] Kärcher, H.J..Experience with the Design and Construction of Huge Telescope Pedestals. in 2nd Bäckaskog Workshop on Ex-tremely Large Telescopes, Proc. SPIE 5382, 2003.
- [11] Hans Jürgen Kärcher.Telescopes as Mechatronic Systems.American Control Conference.Portland, Oregon, June 8 – 10, 2005

- [12] 叶尚辉, 李在贵. 天线结构设计. 西安:西北电讯工程学院出版社出版. 1986
- [13] 段宝岩, 天线结构分析、优化与测量. 西安:西安电子科技大学出版社. 1998. 3. 1-90
- [14] 张亚林. 50 米口径射电望远镜天线结构静动力分析. 电子机械工程. 2004, 20 (6) :37-40
- [15] 郑元鹏. 面天线结构动态误差对指向精度的影响. 无线电通信技术. 2002, 28 (6) :37-39
- [16] 张巨勇, 施浒立. 40m 射电望远镜天线副面和馈源偏移误差分析. 天文研究与技术. 2007, 4 (1) :42-47
- [17] 王从思, 段宝岩, 仇原鹰. 天线表面误差的精确计算方法及电性能分析. 电波科学学报. 2006, 21 (3) :403-409
- [18] Kärcher, H.J., Baars, J.W..The Design of the Large Millimeter Telescope / Gran Telescopio Milimetrico (LMT/GTM). in Radio Telescopes, SPIE 4015, 2000, S. 155 -168
- [19] Kärcher, H.J..Experience with Wind Excited Mirror Vibrations. in 2nd Bäckaskog Workshop on Extremely Large Telescopes, Proc. SPIE 5382, 2003
- [20] Gawronski, W..Three Models of Wind-Gust Disturbance for the Analysis of Antenna Pointing Accuracy.IPN Progress Report 42-149, 2002
- [21] Smith, D.R., Avitabile, P., Gwaltney, G., Myung Cho, Sheehan, M.. Wind-induced structural response of a large telescope. in Astro-nomical Structures and Mechanisms Technology, Proc. SPIE 5495, 2004
- [22] Kärcher, H.J..Thermal effects on the pointing of the 32-m MERLIN radio telescope at Cambridge.Astron. Astrophys. 283, 1051-1057 (1994)
- [23] Baars, J.W.M., Hooghoudt, B.G., Greve, A., Penalver, J..Thermal Control of the IRAM 30-m Millimeter Radio Telescope. Astron-omy and Astrophysics, 195, No. 1-2, pp 364-371
- [24] Kärcher. H.J..Thermal Subsystem. LMT Project Technical Documentation. WP-22500-02, 2000
- [25] 李宗春, 李广云, 吴晓平. 天线反射面精度测量技术述评. 测绘通报, 2003, (6) :16-19
- [26] 张永生. 数字摄影测量. 北京: 解放军出版社, 1997
- [27] 张祖勋. 张剑清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1997
- [28] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用. 天津大学工学博士学位论文, 2005/05
- [29] 邓文怡, 吕乃光, 董明利 等. 数字摄影测量技术在三维测量中的应用. 光电

- 子.激光, 2001, 12 (7) :697-700
- [30] 韩溥,等. 紫金山天文台 13.7 米射电望远镜天线表面精度的首次射电全息测量[J].天文学报, 1994, 35 (2) :209-214
- [31] 王保丰,李广云,李宗春等. 高精度数字摄影测量技术在 50m 大型天线中的应用 [J].测绘工程. 2007, 16 (1) :42-46
- [32] Basic of photogrammetry. 美国 GSI 公司技术资料.2005
- [33] 机械设计手册编委会. 机械设计手册. 北京:机械工业出版社出版. 2004. 8
- [34] 王之卓.摄影测量原理. 北京:测绘出版社, 1979.
- [35] 冯文灏. 数码相机实施摄像测量的几个问题. 测绘信息与工程, 2002, 27 (3) :3-5.

研究成果

在硕士研究生期间取得的研究成果如下：

一、参加科研情况

- | | |
|----------------|--------------|
| 1. 天线结构的力学分析 | XXX 9 米天线项目 |
| 2. 天线地基平台的力学分析 | 所内基建项目 |
| 3. 反射面数字近景摄影测量 | XXX 13 米天线项目 |