

结构设计**大型地面雷达天线罩内力及稳定性分析**佟丽莉^{1,2} 孟松鹤¹ 陈 辉²

(1. 哈尔滨工业大学复合材料研究所, 150001; 2. 哈尔滨玻璃钢研究所, 150036)

摘要 本文对地面雷达罩进行了不同形式的板块划分, 划分的宗旨是板块种类少且随机性强, 在运输条件允许的情况下板块尽可能大。同时, 用薄膜理论加边界效应的分析方法, 对风载作用下的3/4截球雷达罩进行了应力分析, 确定了拉、压应力范围; 用经典的经验公式及有限元方法分别对雷达罩的整体稳定性进行了计算, 同时对泡沫夹层结构雷达罩的局部稳定性进行了分析。结果表明: 进行应力分析时, 解析法及有限元方法计算结果相近; 进行整体稳定分析时, 由于边界的影响, 有限元方法计算结果接近于经典解的2倍, 与实际更加接近; 芯材的剪切强度、剪切模量是导致雷达罩局部失稳破坏的重要因素。

关键词 地面雷达天线罩, 解析法, 有限元法, 风载

TN82 A

Analysis on Stresses and Buckling of Full - Scale Ground RadomeTong Lili^{1,2} Meng Songhe¹ Chen Hui²

(1. Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, 150001)

(2. Harbin FRP Institute, 150036)

ABSTRACT In this paper, ground radome is divided into small plates with different methods and different shapes. The ideal shape of plate is random for electric property and few variety for simple process. The stresses of 3/4 truncated spherical shape radome is analyzed with membrane theory which considers boundary effects and tensile and compress stresses is found. Buckling analysis is done with theoretic formula and finite element methods. For sandwich structure, local buckling analysis is done. It shows that the result of two methods is same for stresses analysis and difference for buckling analysis; Shear strength and shear module of core is important factor causing final local buckling failure.

KEYWORDS ground radome, analytics, finite element method, wind load

随着雷达电性能要求的不断提高, 地面雷达罩已由过去的空间骨架式结构更换为泡沫或蜂窝夹层结构。这种结构能否在要求的风载作用下安全使用, 是结构设计的关键。本文分别用解析法及有限元方法对雷达罩进行了计算, 将两种方法得到的结果进行了对比。

1 板块几何形状

雷达罩多为3/4截球形式, 由于运输上的考虑(高度小于3.5米), 均将球壳划分为若干块, 板块一般是在十二面体、二十面体基础上划分的, 图1给出了几种板块划分形式, 空间骨架式雷达罩一般采用经纬分割或三角板块划分形式, 随着电性能要求的不断提高, 要求板块搭接缝少, 尽量随机化, 减少平行边, 而工艺要求板块的种类要尽量少, 以降低模具成本, 因此泡沫或蜂窝夹层结构一般采用五边形、六

边形交错形式划分。

对于空间骨架式雷达罩, 整体刚度由加强筋的疏密、几何尺寸决定, 因此板块尺寸不能太大, 对于泡沫或蜂窝夹层结构, 整体刚度主要由芯材的厚度决定, 结构及电性能均要求较大的板块, 考虑到运输的限制, 可将板块划分为狭长形, 使雷达工作区搭接缝很小。雷达的性能要求不同, 板块的划分也应相应调整。

2 内力分析

由于3/4截球雷达罩在边界处有较强约束, 因此在进行内力分析时必须考虑边界处弯矩的影响, 一般采用薄膜理论加边界效应的分析方法^[1]。

薄膜理论中, 球壳应满足平衡方程:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (N_{\theta\varphi} \sin \varphi) + \frac{\partial N_{\theta}}{\partial \theta} + N_{\theta\varphi} \cos \varphi = 0$$

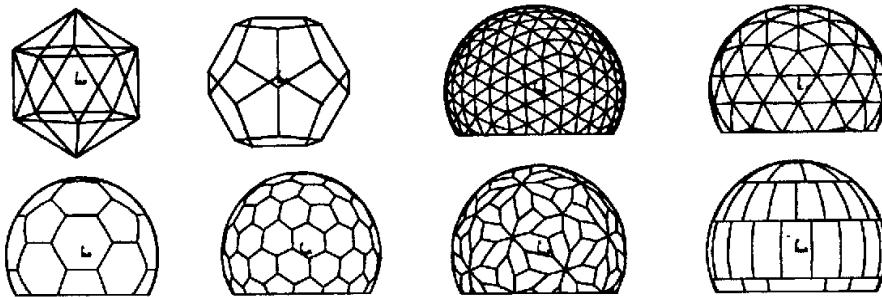


图1 几种板块划分形式

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (N_\varphi \sin \varphi) + \frac{\partial N_{\vartheta \varphi}}{\partial \theta} + N_\theta \cos \varphi = 0$$

$$N_\varphi + N_\theta = -P(\theta, \varphi)R$$

其中 $P(\theta, \varphi)$ 为风载作用下风压分布函数

$$P(\theta, \varphi) = q(-1.3 + 0.1801 \sin \varphi \cos \theta + 0.78 \sin^2 \varphi + \frac{3}{4} \times 0.5599 \sin^3 \varphi \cos \theta)$$

将薄膜内力作为特解,代入有矩理论中,即得球壳内力:

$$Q_\varphi = A_1 \eta_1 + A_2 \eta_2$$

$$N_\varphi = -ctg \varphi (A_1 \eta_1 + A_2 \eta_2) + N_\varphi^*$$

$$N_\theta = -\frac{R}{c} (A_2 \eta_4 - A_1 \eta_3) + N_\theta^*$$

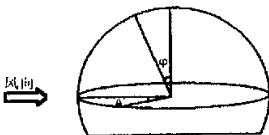
$$H = Q_\varphi \sin \varphi - N_\varphi \cos \varphi$$

$$M_\varphi = -\frac{c}{2} (A_1 \eta_4 + A_2 \eta_3) + \frac{c^2 D_{12} ctg \varphi}{2 R D_{11}} (A_2 \eta_1 - A_1 \eta_2)$$

$$M_\theta = -\frac{c}{2} \frac{D_{12}}{D_{11}} (A_1 \eta_4 + A_2 \eta_3)$$

$$-\frac{c^2 D_{22} ctg \varphi}{2 R D_{11}} (A_1 \eta_2 - A_2 \eta_1)$$

其中 A_1, A_2 为积分常数,由边界条件确定。



用有限元方法进行内力分析,关键步骤是力系的合理离散化。由于风载是 φ, θ 的函数,在不同位置载荷不同,因此不同位置单元上的均布载荷是不同的,必须逐一单元分别加载。

风速为 40 米/秒时,离散到罩体的载荷见表 1。

3 稳定分析

雷达罩的稳定分析一般采用受均匀外压作用的薄壁球壳临界压力公式^[2],即

$$P_{cr} = KE(t/R)^2 \quad (1)$$

其中 E 为壳体弹性模量, t, R 分别为球壳的厚度和

半径, K 为常数,不同研究者所用的方法不同,得到的 K 值也不同,一般取 $K=0.2$ 。

表1 离散到罩体的载荷分布表

$\frac{\varphi}{\theta}$	7.5	22.5	37.5	52.5	67.5	82.5	97.5	112.5
7.5	2.616	2.045	1.047	-0.17	-1.26	-1.92	-1.92	-1.26
22.5	2.627	2.128	1.268	0.229	-0.71	-1.26	-1.26	-0.71
37.5	2.646	2.273	1.646	0.898	0.229	-0.17	-0.17	0.229
52.5	2.671	2.442	2.074	1.646	1.268	1.047	1.047	1.268
67.5	2.695	2.593	2.442	2.273	2.218	2.045	2.045	2.218
82.5	2.714	2.695	2.671	2.646	2.627	2.616	2.616	2.627
97.5	2.727	2.733	2.732	2.727	2.722	2.718	2.718	2.722
112.5	2.733	2.711	2.647	2.568	2.499	2.459	2.459	2.499
127.5	2.732	2.647	2.473	2.274	2.109	2.017	2.017	2.109
142.5	2.727	2.568	2.274	1.957	1.705	1.568	1.568	1.705
157.5	2.722	2.499	2.109	1.705	1.393	1.228	1.228	1.393
172.5	2.718	2.459	2.017	1.568	1.228	1.050	1.050	1.228

式(1)没有考虑截球高度对临界屈曲压力的影响,因此用有限元方法对受均匀外压作用的 3/4 截球雷达罩进行稳定分析可以对式(1)作进一步的修正,与实际情况更接近。

风载作用下的雷达罩,大部分区域受拉,局部区域(迎风面)受压,因此雷达罩的失稳主要体现为局部失稳^[3],对于泡沫或蜂窝夹层结构,总体失稳破坏形式如图 2(3)所示,局部失稳形式有二种:表板起皱(1)和剪切皱褶(2),风载作用下,在载荷方向交变处,容易出现剪切皱褶,它主要是由于夹芯横向剪切模量低造成的。

在单向压缩载荷作用下,表板起皱临界应力为

$$\sigma_{cr1} = Q \left(\frac{E' f G_{Cij}}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}}$$

剪切皱褶临界应力为

$$\sigma_{cr1} = \frac{(t_c + \frac{t_1 + t_2}{2})^2}{(t_1 + \frac{E'_1}{E'_2} t_2) t_c} G_{Cij} \text{ (表板 1)}$$

$$\sigma_{cr2} = \frac{(t_c + \frac{t_1 + t_2}{2})^2}{(t_2 + \frac{E'_1}{E'_2} t_1) t_c} G_{Cij} \text{ (表板 2)}$$



图2 夹层结构屈曲破坏形式

当表板承受纯剪时,临界剪应力为

$$\tau_{cr} = \frac{\left(t_c + \frac{t_1 + t_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{E_1}{E_2}, t_2\right) t_c} G_{cij} \text{(表板 1)}$$

$$\tau_{cr} = \frac{\left(t_c + \frac{t_1 + t_2}{2}\right)^2}{\left(\frac{E_1}{E_2}, t_1\right) t_c} G_{cij} \text{(表板 2)}$$

4 数值结果与算例

对40m/s风速作用下直径为十七米雷达罩进行了内力、稳定计算,雷达罩内外FRP蒙皮厚度为 $t_1 =$

$t_2 = 1\text{mm}$,聚氨脂泡沫芯材厚度为 $t_c = 73\text{mm}$,蒙皮材料弹性模量为 $E_1 = E_2 = 10\text{GPa}$,许用应力为 130MPa ,泡沫材料压缩模量 $E_{CZ} = 20\text{MPa}$,剪切模量为 $G_{cij} = 4\text{MPa}$,剪切强度为 2MPa ,计算结果见表2、图3~7。

由表2可看出,解析法与有限元方法应力计算结果比较接近,稳定计算结果相差较大,这是因为在进行稳定计算时,解析解没有考虑截球的影响,因此有限元方法计算结果与实际更加接近。从结果可看出,雷达罩的稳定问题较强度问题更突出,最容易发生局部剪切皱褶稳定破坏,因此夹层结构应严格控制芯材的剪切模量、剪切强度。

表2 应力、稳定系数计算结果

计算方法	φ 方向(MPa)		θ 方向(MPa)		均匀外压作用 稳定系数	剪切皱褶 临界拉应力	剪切皱褶 临界剪应力
	最大拉应力	最大压应力	最大拉应力	最大压应力			
解析法	28.2	-22.25	47.47	18.65	1.2	75.01	75.01
有限元方法	24.01	-23.93	42.00	14.30	2.6	75.01	75.01



图3 X方向位移分布图



图4 θ方向应力分布图



图5 φ方向应力分布图



图6 均匀外压作用下变形图



图7 均匀外压作用下失稳波形

5 结 论

(1)用解析法和有限元方法对风载作用下的雷达罩进行内力分析均能较准确地计算应力结果,最大应力发生在截球边界处, φ 在 $50^\circ \sim 100^\circ$ 、 θ 在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 之间罩体应力为负值,为受压区。

(2)进行稳定分析时,若将雷达罩简化为受均匀外压作用的薄壁球壳,建议使用有限元方法,因为截球处的约束可以将雷达罩整体稳定系数提高一倍以上。

(3)夹层结构雷达罩最可能发生的破坏是局部失稳破坏,芯材剪切模量和剪切强度是非常重要的参数,应严格控制。

参 考 文 献

- 倪庆清,岩本正治.对称层合复合材料的屈曲变形解析[J].复合材料学报,1999,16(3):140~146
- 王荣国,谢怀勤,佟丽莉.大型截球形FRP地面雷达罩的内力计算[J].哈尔滨建筑大学学报,1995,28(6):88~94
- 许君珞.受风载薄壁球壳内力系数和稳定系数介绍[M].上海:NCCM-10,1998
- 李顺林.复合材料工作手册[M].北京:航空工业出版社,1988:351~357
- 沃丁柱.复合材料大全[M].北京:化学工业出版社,1998:782~792
- Tirano Y. Optimum design of laminated plates under[J]. J Composite Materials, 1979, 13: 329~334
- Kogantic MR. Buckling analysis of anisotropic sandwich plates faced with fiber-reinforced plastics[J]. AIAA J, 1985, 23(8)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>