

大型射电望远镜结构风荷载特性研究

刘 岩¹, 钱宏亮², 范 峰²

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;
2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 全可动射电望远镜结构工作时需要在两个方位进行变位旋转, 其迎风姿态多样、反射面风压分布复杂。为掌握反射面结构风荷载分布特性及获取相应的荷载取值, 选取了待建的新疆 110 m ($F/D=0.3$) 望远镜反射面结构为切入点, 首先采用计算流体力学软件 FLUENT, 对其表面平均风压分布进行数值模拟, 并展开相应的风洞试验研究, 来验证 CFD 模拟反射面平均风压分布的有效性。通过对比数值模拟与试验结果, 揭示出旋转抛物反射面的风荷载特性。随后以数值模拟为研究手段, 对其他若干反射面结构进行基于望远镜变位过程的全方位分析, 给出不同口径、不同焦距比的反射面风荷载特性分析结果, 为日后旋转抛物反射面抗风设计提供较为充分的资料。

关键词: 迎风姿态; 刚性模型; 风洞试验; 风荷载特性

中图分类号: TU393.304 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0148-09

Wind load characteristics of large radio telescope

Liu Yan¹, Qian Hongliang², Fan Feng²

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Fully-steerable radio telescope rotates in two directions during its operation which results in different kinds of upwind postures and complex wind load distributions on its reflector. In order to get the wind load distribution and obtain the corresponding wind load of the reflector structure, the 110 m ($F/D=0.3$) telescope was chose to be built in Xinjiang. First, the computational fluid dynamics software FLUENT was used for its average surface pressure distribution simulation and the corresponding wind tunnel tests were conducted to verify the validity of CFD simulations on the average surface pressure distribution of the reflector. By comparing the numerical simulation and experimental results, the surface wind load characteristics of the rotating parabolic reflector were revealed. Subsequently, the wind load characteristics were analyzed numerically for the change of its directions for several typical radio telescope structures and the results were given for different apertures, different focal ratios. The results provide valuable reference for similar structure in its wind resistant design.

Key words: upwind postures; rigid model; wind tunnel test; wind load characteristics

收稿日期: 2014-05-13; 修订日期: 2014-06-09

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金

作者简介: 刘岩(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事大跨空间结构方面的研究。Email: actor_liu@126.com

0 引言

望远镜结构作为一种多功能、自动化、高集成的复杂电子机械设备,在变位旋转过程中受到随机风荷载的作用,致使实际变形后的反射面与理论设计时的标准抛物面存在误差,这种误差会严重影响其分辨率和灵敏度,致使工作性能降低^[1-3]。

对风荷载作用的计算,需要准确细致地给出反射面各点风压分布。而关于反射面风压分布规律,影响因素复杂多样,不但受到风场当中来流风湍流影响,同时还受到望远镜结构风向角、俯仰角、反射面几何特性等诸多因素的影响。从目前国内应用情况来看,已经建成的北京密云 50 m、上海 65 m 及未来新疆待建的 110 m 无一例外均为焦径比(F/D)等于 0.3、口面为圆形、反射面为旋转抛物面的巨型全可动射电望远镜,这一需求反映出该类几何特征的反射面非常普遍。而从目前望远镜抗风设计研究来看:国外曾对焦径比为 0.5 和 0.25 的反射面进行过 4 种迎风姿态下的风洞试验,给出了平均风压系数的分布情况,但其考虑的迎风姿态情况较少;国内对焦径比为 0.3 的反射面进行过 12 种迎风姿态下的风洞试验研究,给出了结构的整体阻力系数,但未给出反射面平均风压分布情况。根据我国《建筑结构荷载规范》,在已有的成果中,球壳在几何外形上与抛物面最接近,但二者仍然有较大的差异;同时,球壳的成果源于封闭式结构,而望远镜反射面在风场中属于开敞式结构,其绕流特性差异也较大。

由此看出,国内外对此类结构进行的研究成果均不全面,对该类结构的风压分布特性了解较为匮乏,亟待对此类反射面结构进行大量的数值模拟及风洞试验研究,为其任意迎风姿态下的结构抗风设计提供参考。

1 CFD 数值模拟

文中研究对象为射电望远镜,数值计算方面,网格划分策略是最需要解决的技术难题^[4-6],将对计算精度产生较大影响。具体表现在:反射面结构具有旋转抛物面外形且非封闭形式,划分网格较为困难,不易形成质量高的网格。因此拟采用分块法对计算域进行混合网格划分,同时还需提高反射体上、下表面

径向网格的数目,调整网格渐变比率以及近壁面层网格 y^+ 值,来进一步改善网格质量,提高计算精度。

1.1 湍流模型及边界条件

根据相关文献可知,完整的雷诺应力模型(RSM)对求解高雷诺数钝体绕流情况的精度相对较高,且其使用范围也较广。因此文中选用 Fluent 中的 RSM 湍流模型来求解望远镜反射面结构定常绕流的压力场。

1.2 网格划分

网格的划分直接影响着数值模拟结果,主要表现在网格尺度和网格类型两方面。基于对反射面结构周围流场网格多次划分,最终决定采用的各部分网格划分类型如图 1 所示^[7-8]。

(1) 外部计算区域采用结构化六面体网格,可以较为精细地控制网格尺寸、减少网格数量并有效地控制网格质量;而内部计算区域采用非结构化四面体网格,可实现对模型周围流场空间的有效划分。

(2) 由于旋转抛物反射面存在渐变的曲率及模型厚度较薄(100 mm 厚),近壁区域拟采用棱柱体边界层网格,以实现网格的精细化控制,满足壁面距离的要求,该距离可以用无量纲化的 y^+ 来表征:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (1)$$

式中: u_τ 为摩擦速度; y 为第一排网格节点距壁面的法向距离; ρ 和 μ 分别为空气密度以及运动粘性系数。

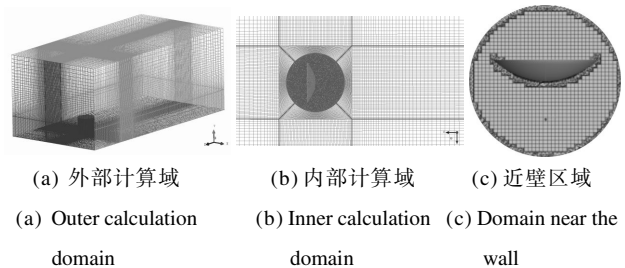


图 1 计算域网格

Fig. 1 Mesh of calculation domain

1.3 分析工况

风向角定义如图 2 所示(参考坐标系以反射面为 90° 俯仰角时,来流方向与反射面中心轴平行时记作 0° 风向角)。根据模型对称性,选取风向角变化范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,每隔 30° 进行测压,共 7 个角度作为试验风向角。俯仰方向选取 5° 、 30° 、 60° 、 90° 共 4 个角度作为试验俯仰角。两项交叉共计 22 种工况(90° 俯仰角为仰天状态,任意风向角关于中心轴极

对称,因此只需任选一种风向角即可)。

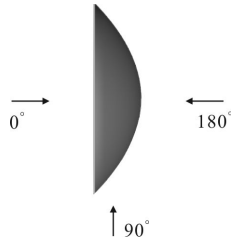


图 2 风向角示意(俯视图)

Fig.2 Wind direction(top view)

1.4 数值模拟结果分析

利用流体计算软件 *Fluent* 对望远镜进行数值计算,采用 *Tecplot* 绘图软件,对所有数值工况下的反射面平均风压分布进行等值线描绘,如图 3~6 所示。从图中可以看出,在 5°俯仰角下,当风向角小于 90°时,反射面完全受正压作用,且随着风向角的增大,迎风边缘区域的局部风压系数逐步增大,风向角为 90°时,开始出现负压,表现为风吸力,且沿着顺风向反射面风压分布基本呈对称分布。转过 90°以后,反射面负压区域开始逐步扩大,直到 180°风向角,反射面完全受负压作用。而在俯仰角为 30°、60°时,各风向角下风压分布表现出与上述 5°俯仰角相似的分佈规律。同时,在相同来流风向角下,随着俯仰角增大,局部正压系数会增大,且分布区域也有所扩大,尤其在 60°俯仰角、60°风向角下,最大正风压系数达到了 1.9。而当俯仰角为 90°,风向角为 0°时,反射面风压分布不但呈现出较好的对称性,且在迎风前缘表现为最大负压,沿着来流方向,负压系数绝对值逐步减小并过渡为正压,并在下游方向开始增大,总体表现为正压区面积大于负压区面积。

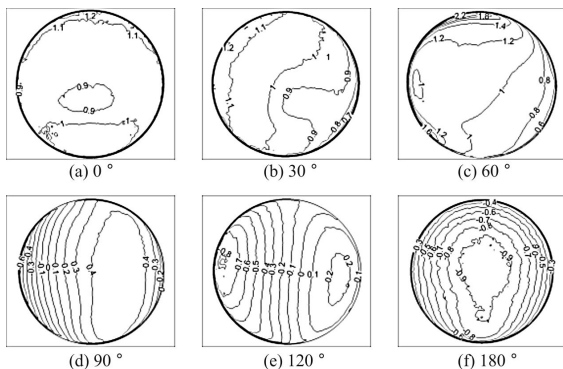


图 3 5°俯仰角不同风向角下反射面平均风压分布

Fig.3 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 5° pitch angle

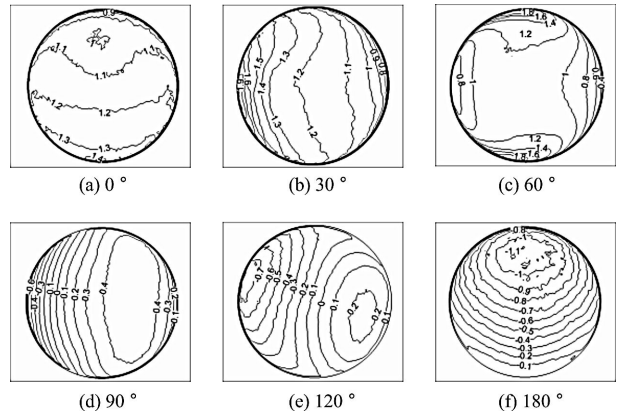


图 4 30°俯仰角不同风向角下反射面平均风压分布

Fig.4 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 30° pitch angle

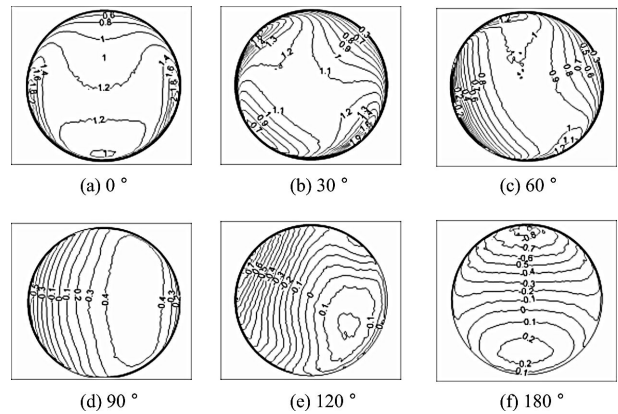


图 5 60°俯仰角不同风向角下反射面平均风压分布

Fig.5 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 60° pitch angle

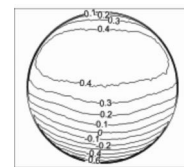


图 6 90°俯仰角下反射面平均风压分布

Fig.6 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 90° pitch angle

2 风洞试验

为验证 CFD 数值模拟的有效性,这里对 110 m ($F/D=0.3$)反射面结构进行了风洞缩尺试验,具体试验工况与前述数值计算工况一致,试验类型为刚性模型测压试验。通过将试验结果与数值模拟结果进行对比,进一步描述旋转抛物反射面的风荷载特性,

并揭示其内在机理。

2.1 风洞设备与测量系统

风洞测压试验是在哈尔滨工业大学国家重点建设的边界层风洞与浪槽联合实验室中进行。实验室属于单回流闭口双试验段的大气边界层风洞,是一个集近地风场模拟、深海海浪模拟以及降雨系统环境模拟于一体的综合性实验平台。文中试验在小试验段展开,该试验段情况如下:小试验段尺寸宽 4 m,高 3 m,长 25 m,试验风速范围为 3~50 m/s。测压系统采用美国 Scanivalve 扫描阀公司出品的电子式压力扫描阀系统,对 2 个模块进行扫描和测量。最后通过 PC 机以及自编的信号采集及数据处理软件对数据进行记录和处理,如图 7 所示。

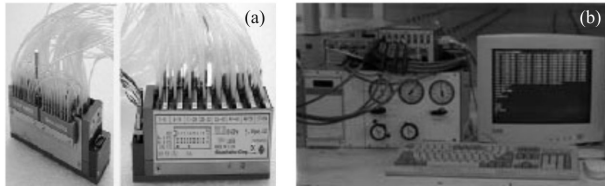


图 7 电子式压力扫描阀系统
Fig.7 Electronic pressure scanner system

2.2 大气边界层风场的模拟

在边界层,风洞要准确再现大气边界层流动特性,是试验结果可信的必要保证。即风洞试验中的流场需要与外界自然风下的大气边界层内流场尽可能一致,其风速、湍流度随高度变化,对脉动风的功率谱也有一定要求。

2.2.1 平均风速剖面

在梯度风高度以下,由于近地面摩擦的作用,使得近地风速随其离地高度的减小而降低。描述平均风速随高度变化的曲线称为风速剖面。通常用对数函数和指数函数来描述这一曲线规律。文中采用指数律,即:

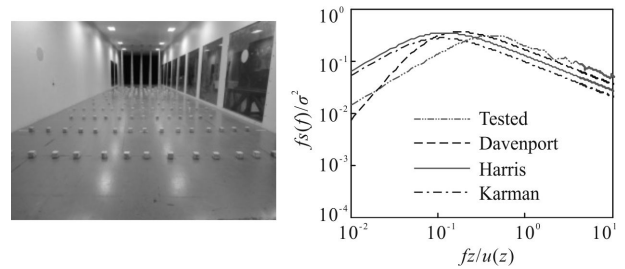
$$\frac{U_{(z)}}{U_r} = \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中: $U_{(z)}$, Z 为任一高度处的平均风速和高度; U_r , Z_r 为标准参考高度处的平均风速和参考高度; α 为地面粗糙度指数,文中结构处于 B 类地貌,取值为 0.15。

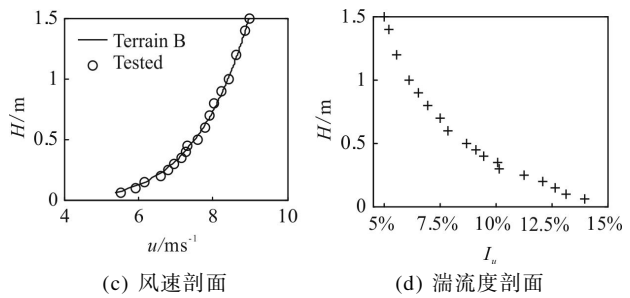
2.2.2 风场模拟

文中利用被动模拟技术对大气边界层进行风洞

模拟,采用尖劈、挡板和沿着风洞地板布置的粗糙元模拟 B 类地貌,如图 8(a) 所示。而风速谱实测值与理论谱曲线对比如图 8(b) 所示,其风速剖面 and 湍流度剖面见图 8 中的(c)和(d)。通过比较,可见该风洞试验中的风速谱实测值与 Davenport 谱最为接近。



(a) 风洞中模拟被动模拟装置 (b) 风速谱实测值与理论值比较
(a) Passive simulation device (b) Comparison of measurement and theoretical value for wind speed spectrum



(c) 风速剖面 (d) 湍流度剖面
(c) Wind profile (d) Turbulence intensity profile

图 8 风洞模拟 B 类地貌大气边界层

Fig.8 Wind tunnel simulation for terrain B of the atmospheric boundary layer

2.3 试验模型

试验模型如图 9 所示,下部支架俯仰转轴高度距基台高为 250 mm,在侧臂钢管和竖向钢管上根据转角几何关系开有螺栓孔,通过侧臂的摆动实现反射体俯仰方向的旋转。每次旋转完毕,将侧臂钢管与竖向钢管对应的连接孔进行螺栓连接,使其能在试验俯仰角姿态维持平衡,支架尺寸如图 10~11 所示。为了使模型既有足够的刚度和强度,又考虑在加工工艺方面便于打孔,反射面采用亚克力有机玻璃板制成。考虑到风洞阻塞率要求,模型几何缩尺比定为 1/200。模型跨度为 550 mm,矢跨比为 1/4.8,两层亚克力有机玻璃板各厚 5 mm,金属测压管长 8 mm,考虑到管线的布置,最小夹层厚度需要 10 mm 的空间,其尺寸如图 12 所示。在模型凸面和

凹面均布置测压点,每一面布置 91 个测压点,测点布置如图 13 所示。



(a) 主视图 (a) Front view
(b) 轴侧图 (b) Perspective view

图 9 风洞试验模型

Fig.9 Experimental model in the wind tunnel

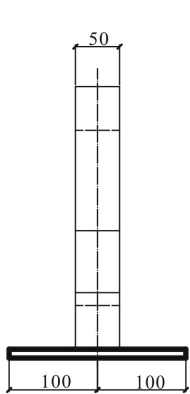


图 10 下部支架主视图

Fig.10 Front view of the

lower bracket

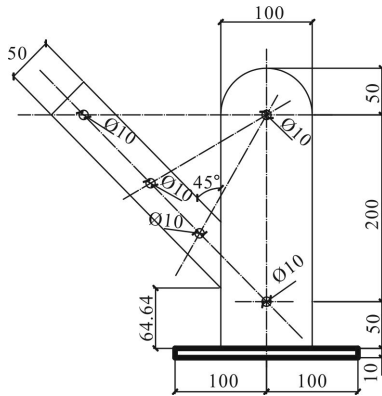


图 11 下部支架侧视图

Fig.11 Side view of the lower

bracket

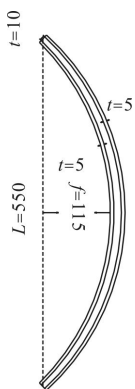


图 12 反射面剖面图

Fig.12 Reflector section of the test model

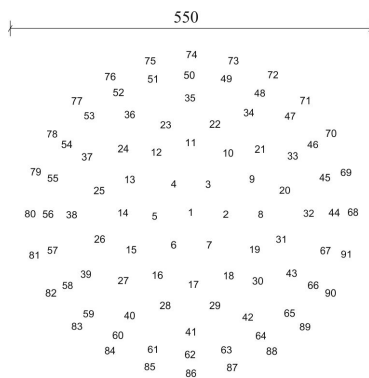


图 13 测点布置

Fig.13 Pressure tap arrangement

每个测压点采集单个样本数据为 12 500 个,共 5 个样本。由风洞相似理论,有:

$$n_m L_m / U_m = n_p L_p / U_p \quad (3)$$

式中: n 为频率; L 为几何尺寸; U 为风速; 下标 m 代表模型; p 代表原型。由上式可以获得 $n_m=150$ Hz。基于奈奎特采样准则,实验最小采样频率为 $150 \text{ Hz} \times 2=300 \text{ Hz}$ 。可见试验中的采样频率 625 Hz 满足要求。其余相关变量相似比如表 1 所示。为获得稳定可靠的试验数据,最终采用的风压时程为多次采样后的平均值^[9-11]。

表 1 风洞试验相似比计算

Tab.1 Scaling laws for wind tunnel tests

Definition	Model dimension	Prototype dimension	Similarity ratio
Diameter	550 mm	110 m	1:200
Velocity	14 m/s	56 m/s	1:4
Time	20 s	16.6 min	1:50

模型上各测压点的风压值采用无量纲压力系数表示:

$$C_{pi}(t) = \frac{P_i(t) - P_\infty}{P_0 - P_\infty} \quad (4)$$

式中: $C_{pi}(t)$ 为模型当中第 i 测压孔的风压系数; $P_i(t)$ 为该处位置测得的结构表面风压值; P_0 和 P_∞ 分别为参考点处平均压和平均静压。风压系数参考点取在俯仰变化范围内反射面最高点位置,即 5° 俯仰角下的反射面最高点处。对 $C_{pi}(t)$ 进行统计处理,便可进一步获得平均风压系数 \bar{C}_{pi} 。约定风压符号为:沿法线方向指向反射面内为正,反之为负。同时为便于日后望远镜结构抗风设计以及与相应的规范进行对照,将模型风洞试验测得的风压系数转换为体型系数 μ_{si} ,第 i 点的体型系数与平均风压系数 \bar{C}_{pi} 关系为:

$$\mu_{si} = \bar{C}_{pi} \left(\frac{Z_i}{Z_r} \right)^{2\alpha} \quad (5)$$

式中: α 为地面粗糙度指数,试验模拟 B 类地貌取 0.15; Z_i 为测点高度; Z_r 为标准参考点高度。

2.5 风洞试验结果

基于 MATLAB 编制相应平均风压数据计算程

2.4 相似比设计及数据处理方法

风洞试验来流风速为 14 m/s,试验风速比为 1:4;测压阀块信号采样频率为 625Hz,采样时长为 20s;

序以及等值线绘制程序,对采集到的风压时程数据按照公式(4)进行处理,随后对所有试验工况得到的反射面平均风压数据进行等值线描绘,如图 14~17 所示。从图中可以看出,当俯仰角为 5°,风向角在 90°以内时,反射面完全受正压作用,且在 60°风向角时,风压系数的最大值为 1.2;而风向角为 90°时,反射面开始出现负压区,表现为风吸力作用;当风向角大于 90°时,反射面负压区域开始逐步扩大,在 120°风向角时,正、负压的分界线基本处于反射面中央位置,直到 180°风向角反射面完全受到负压作用。此外,30°、60°俯仰角工况下的风压分布等值线较 0°风向角更为密集,具体表现为在反射面边缘区域,风压分布梯度变化较为剧烈,而中部区域风压分布梯度较为平缓。对于俯仰角为 90°、风向角为 0°工况,反射面风压分布呈现较好的对称性,且最大风吸力出现在迎风前缘,沿着来流方向,负压系数绝对值逐步减小直至过渡为正压,并逐渐增大,反射面在风荷载作用下,整体表现为正压作用大于负压作用,而负压作用主要集中在反射面来流前缘的局部区域。

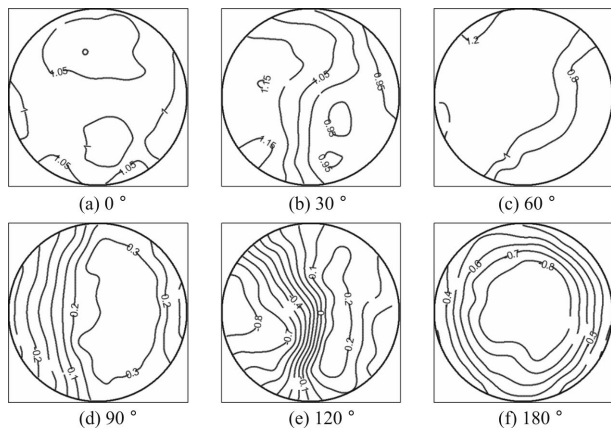


图 14 5°俯仰角不同风向角反射面平均风压分布

Fig.14 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 5° pitch angle

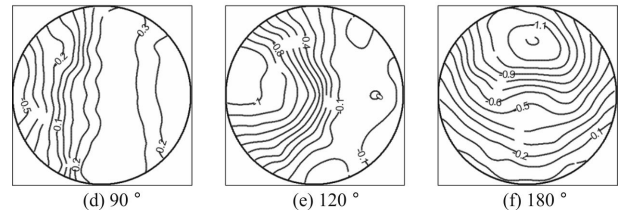
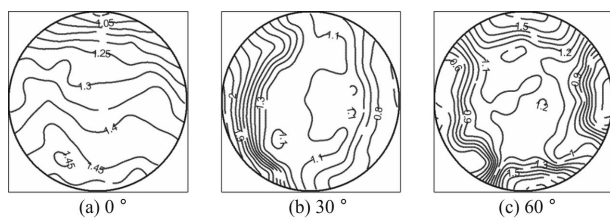


图 15 30°俯仰角不同风向角反射面平均风压分布

Fig.15 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 30° pitch angle

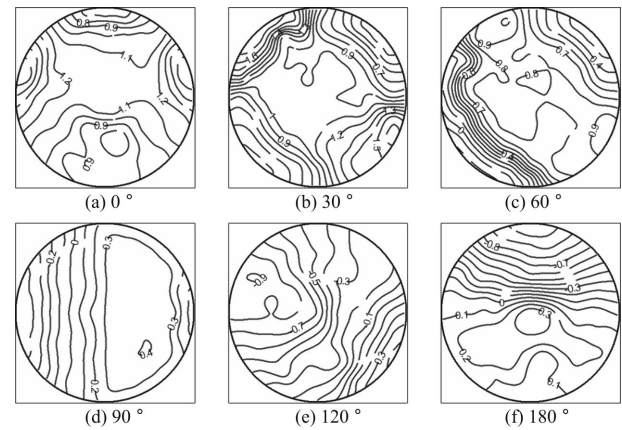


图 16 60°俯仰角不同风向角反射面平均风压分布

Fig.16 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 60° pitch angle

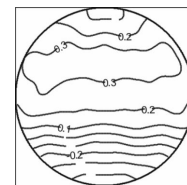


图 17 90°俯仰角不同风向角反射面平均风压分布

Fig.17 Mean wind pressure coefficients of the reflector in different wind directions for 90° pitch angle

2.6 数值模拟与风洞试验结果对比

考虑试验工况较多,选取风向角变化范围内的 0°、90°及 180°风向角为典型代表。为了充分反映反射面平均风压系数梯度变化,均以来流方向为对称轴,在 0°和 180°风向角工况下,选取反射面竖向对称轴线上的平均风压系数进行对比;在 90°风向角工况下,选取反射面水平向对称轴线上的平均风压系数进行对比。图 18~20 给出了工况下的数值模拟与风洞试验结果对比。发现 CFD 数值模拟与风洞试验结果分布规律整体趋于一致,数值较

为接近,二者吻合较好,试验很好地验证了数值模拟结果。说明对旋转抛物反射面进行风荷载特性分析,CFD 是一种切实有效的技术手段。

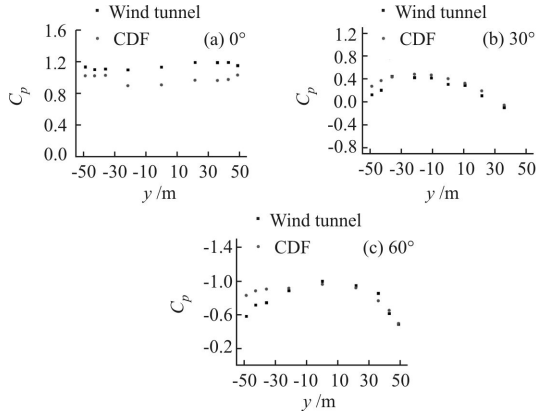


图 18 5°俯仰角不同风向角反射面风压系数比较

Fig.18 Comparison between numerical simulation and test results on reflector at 5° pitch angle

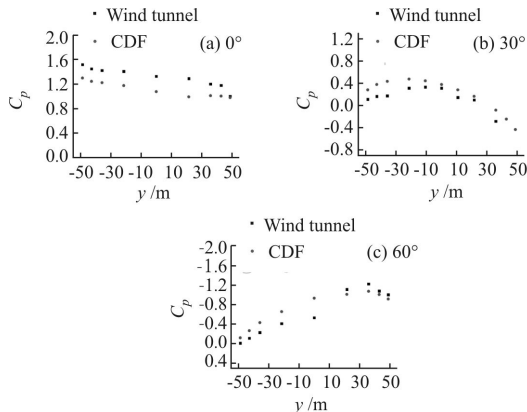


图 19 30° 俯仰角不同风向角反射面风压系数比较

Fig.19 Comparison between numerical simulation and test results on reflector at 30° pitch angle

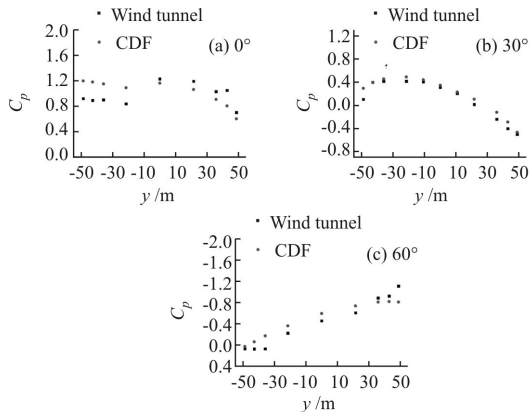


图 20 60° 俯仰角不同风向角反射面风压系数比较

Fig.20 Comparison between numerical simulation and test results on reflector at 60° pitch angle

3 反射面风荷载体型系数

为提供便于望远镜抗风设计的风荷载取值,拟对反射面进行区域划分。分区时,考虑到反射面本身是极对称结构,所以依据其本身成型规律,沿着环向和径向进行划分。同时,根据前述平均风压分布等值线结果,考虑到边缘区域属于风压梯度变化较大的地方,而靠近中心区域属于风压变化较为平缓地带,因此外环区域划分较密,内环区域较为稀疏,具体分区示意如图 21 所示。

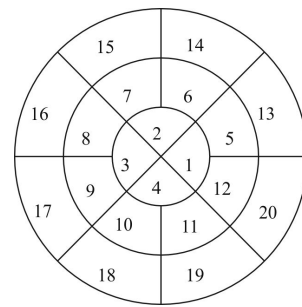


图 21 反射面表面区域划分

Fig.21 Divided region of the telescope surface

通常,全可动射电望远镜结构可按照口径的大小进行分类,认为 50 m 以内为中尺度口径望远镜,100 m 以上是则超大跨度望远镜。50 m 以内的望远镜在世界范围内分布很多,且各研究成果也较为丰富;50~100 m 的全可动望远镜在世界范围内分布较少,目前只有 10 余座;100 m 以上的仅有两座,分别在美国和德国。因此,依照目前全可动望远镜存在现状,从中尺度到超大跨度这个区间选取两种口径(65 m 和 90 m),超大跨度以上选取一种口径(110 m),且每种口径下又针对反射面通常使用最多的两种类型,即焦距比为 0.3 和 0.5 两类(如图 22 所示)。继续采用 CFD 数值模拟针对其各迎风姿态的流场特性展开大规模计算分析,获得不同口径、不同焦距比的反射面平均风压分布后,再计算出反射面每一点的风荷载体型系数,采用图 21 的方法对其进行反射面分区,计算相应的分区风荷载体型系数。最后,将反射面结构在各迎风姿态下的分区风荷载体型系数进行统一归并,如图 23~28 所示,依据此图,便可根据具体口径和焦距比,直接查找各典型俯仰角下,任意风向角反射面分区的风荷载体型系数。

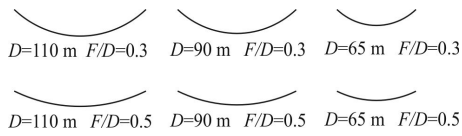


图 22 不同类型的反射面

Fig.22 Different reflector surfaces

通过对不同类型的反射面结构风荷载体型系数进行对比,可以看出:同一口径的反射面结构,焦距比为 0.3 和 0.5 时风荷载体型系数较为接近;而具有同样焦距比的反射面,当口径按照 110 m、90 m、65 m 依次减小时,同一迎风姿态下的风荷载体型系数相对有所增大;而同一口径、同一焦距比的反射面结构,同样的俯仰角在 90° 风向角以内,风荷载体型系数普遍较大,90° 时风荷载体型系数绝对值最小,当风向角超过 90° 后,风荷载体型系数绝对值开始有所增大,具体表现为负值,但总体来看,还是表现出凹面迎风的体型系数要大于相应的凸面迎风值。

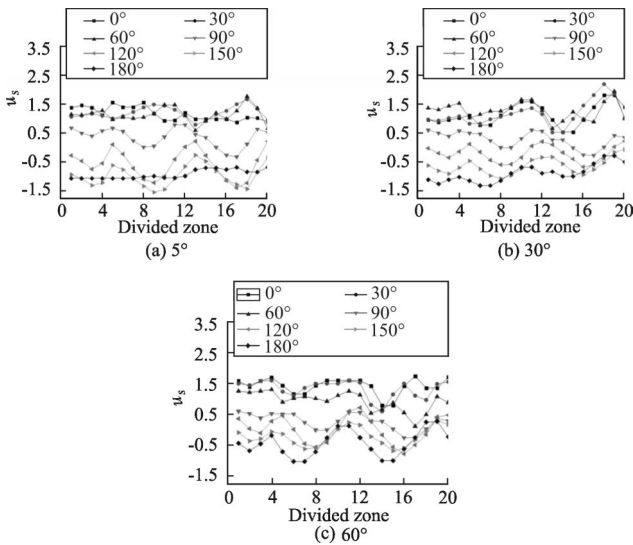


图 23 110 m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数(F/D=0.3)

Fig.23 Shape coefficient for 110 m aperture reflector at different pitch angle(F/D=0.3)

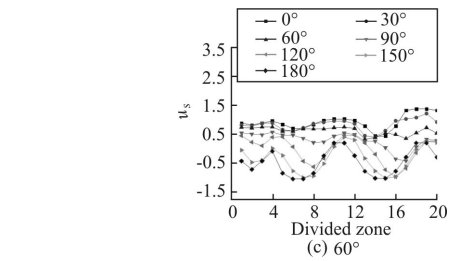
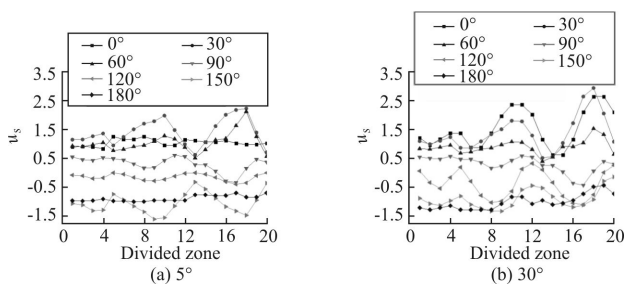


图 24 110 m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数(F/D=0.5)

Fig.24 Shape coefficient for 110 m aperture reflector at different pitch angle(F/D=0.5)

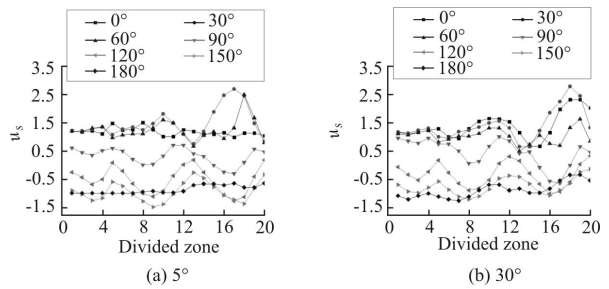


图 25 90 m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数(F/D=0.3)

Fig.25 Shape coefficient for 90 m aperture reflector at different pitch angle(F/D=0.3)

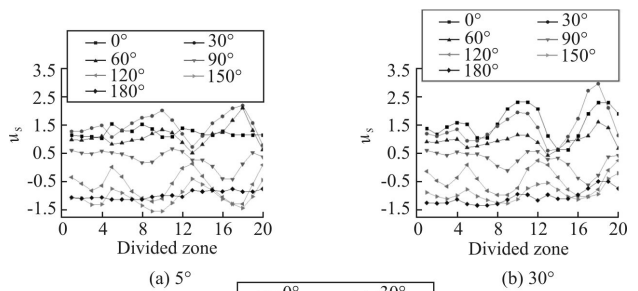


图 26 90 m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数(F/D=0.5)

Fig.26 Shape coefficient for 90 m aperture reflector at different pitch angle(F/D=0.5)

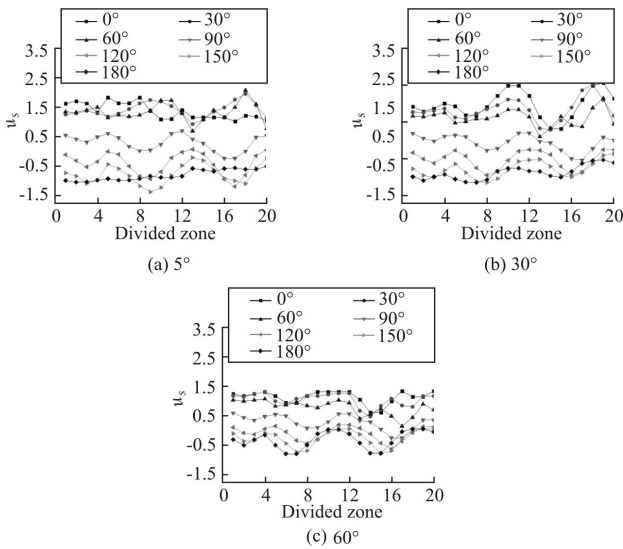


图 27 65m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数($F/D=0.3$)

Fig.27 Shape coefficient for 65 m aperture reflector at different pitch angle($F/D=0.3$)

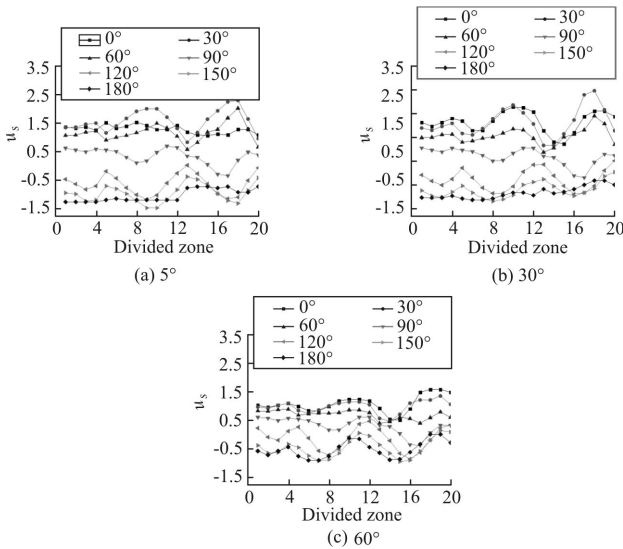


图 28 65 m 反射体各俯仰角分区风荷载体型系数($F/D=0.5$)

Fig.28 Shape coefficient for 65 m aperture reflector at different pitch angle($F/D=0.5$)

4 结论

(1) 选取应用较为广泛的旋转抛物反射面结构($F/D=0.3$)为切入点,针对 22 种迎风姿态进行了 CFD 数值模拟;随后,对以上工况在大气边界层风洞进行了刚性模型测压试验,通过二者结果的对比,较好地验证了数值模拟技术对旋转抛物反射面风荷载特性分析的有效性。

(2) 通过对反射面平均风压系数分布规律探究,发现对于大多数俯仰角及不同风向角工况,来流通常在反射面边缘处产生明显的分离,故反射面负压最大值一般出现在边缘区域。而针对望远镜同一俯仰角姿态,在不同风向角下,由于壁面气流的分离点位置和尾流作用有所差异,因此反射面平均风压(风压力或吸力)极值出现位置也不同。

(3) 鉴于前述风洞试验已很好地验证了数值模拟的有效性,随后采用 CFD 对不同类型的反射面进行了大规模计算分析,获取了不同口径、同焦距比反射面,在不同迎风姿态下的风荷载体型系数,为旋转抛物反射面在平均风荷载方面提供了充分的抗风设计资料。

参考文献:

- [1] Gao Yanlong. Study on wind characteristics simulation method of antennae[D]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology of China, 2009. (in Chinese)
- [2] De Young, Vogiatzis K. Numerical simulations of airflow in verylarge telescope enclosures [C]//SPIE, Second Backaskog Workshop on Extremely Large Telescopes, 2004, 5382: 379-387.
- [3] Y Chen, G A Kopp, D Surry. Prediction of pressure coefficients on roofs of low buildings using artificial neural networks[J]. *Wind Eng Ind Aerodyn*, 2003, 91: 423-441.
- [4] GB50009-2001. Load code for the design of building structures [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006. (in Chinese)
- [5] Zhang Xiangting. Handbook of Computational Wind Engineering Design[M]. Beijing: Chinese Architectural Press, 1998.(in Chinese)
- [6] GB50011-2010. Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [7] Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng. Surface precision analysis on main reflector of 65 m antenna structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 3027-3033. (in Chinese)
- [8] Bremer M, Penalver J. FE model based interpretation of telescope temperature variations[C]//SPIE, 2002, 4757: 186.
- [9] Bremer M, Greve A, van't Klooster K, et al. Front and rear Perspective heated prototype panels for the IRAM 15 - m telescopes[C]//28th ESA Antenna Workshop on Space Antenna Systems and Technologies, ESTEC, 2005: 943.
- [10] Chamberlin R A. Temperature meaurments on the Leighton telescope[J]. *Surface Memo*, 2003, 5: 124-130.
- [11] Cheng J. Principles of Astronomical Telescope Design [M]. New York: Springer, Heidelberg, 2009.