文章编号:1002-1582(2009)03-0342-05

# 大型光学天文望远镜风载作用分析

杨德华,徐灵哲,徐欣圻

(中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所,南京 210042)

摘 要:风载对光学天文望远镜结构和镜面的作用将直接影响望远镜的面形精度和跟踪指向控制,从而降低望远 镜的像质。特别是未来大型望远镜越来越多地采用主动光学技术,风载的作用将是影响主动光学子镜的主动控制及望 远镜整体性能的重要因素。回顾了大型望远镜风载作用的分析方法和随机风载的性质,详细介绍了采用风速功率谱密 度方法进行随机风载分析的过程和采用有限元方法分析建模的方法;建立了一个拼接镜面主动光学望远镜的完整计算 模型,研究了子镜及望远镜整体在风载作用下的静态和动态响应,并分析了风载对镜面面形和望远镜的跟踪指向精度的 影响。

**关 键 词**:天文望远镜;风载;功率谱密度;拼接镜面主动光学;有限元法 中图分类号:TH751 **文献标识码**:A

#### Wind disturbance study on large astronomical telescopes

YANG De-hua, XU Lin-zhe, XU Xin-qi

(National Astronomical Observatories/ Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology,

Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract : Wind loading on mirrors and structures of large optical astronomical telescopes is inevitably to degrade figure accuracy of mirrors and to cause trancking and pointing error of the telescope. It is even more problematic for future giant telescopes that are potentially to implement segmented mirror active optics because wind loading will be the critical influencial issue for the control of the segment mirrors and will finally degrade the overall performance of the telescope. First reviewed are the nature of random wind and usually-used analysis methods of wind loading on large astronomical telescopes. Afterwards, discussed in detail is the analysis method based on Power Spectrum Density (PSD) of wind velocity from the Finite Element Method (FEM) point of view. To demonstrate the discussion, a telescope using segmented active optics is modeled to investigate its responses to both static and dynamic wind loading. Wind response of a segmented mirror is calculated before that performed on the overall telescope. The wind induced degradation of mirror figures is estimated, and further, the tracking and pointing accuracy are given.

Key words: astronomical telescopes; wind loading; power spectum density; segmented mirror active optics; finite element method

## 0 引 言

由于天文望远镜台址一般都在高海拔山区,风 载作用是影响天文望远镜正常工作的主要的环境干 扰因素之一。传统的中小型光学天文望远镜一般设 有随动圆顶或风挡,观测中风载对望远镜正常工作 的影响不大,因而望远镜的设计和控制一般不考虑 风载作用。从 20 世纪 80 年代以来,众多 8 —10m 口径级的大型天文望远镜,相继提出并建成,由于考 虑克服圆顶视宁度和镜面视宁度的影响,观测中多 采用对圆顶内环境和望远镜系统进行适当的通风, 甚至采用展开圆顶的开放式观测<sup>[1-4]</sup>。望远镜圆 顶或围档可以用来有效地衰减风载直接对镜面的作 用,但同时也使破坏了风的流场,产生较小尺度的涡 流,破坏圆顶内视宁度<sup>[1,2]</sup>。本世纪以来,20m 以上 口径的未来极大望远镜项目也已相继提出,在技术 上可能更多地采用开放式观测模式,望远镜的镜面 则采用主动光学技术,将直接承受风载的作用<sup>[5]</sup>。 而风载能量主要分布在低频区,接近望远镜结构的 共振频率和主动光学系统控制频率,这对于采用开

放式观测和主动光学技术的大型天文望远镜的正常 跟踪和像质保证是极其有害的。

本文首先回顾了大型天文望远镜风载作用的分 析方法,详细介绍了随机风载的性质和采用风速功 率谱密度方法进行随机风载分析的过程,并介绍了 采用有限元方法分析建模的方法;文中还以我国在 建的大天区多目标光纤光谱望远镜LAMOST的反 射施密特改正镜为例,建立了一个拼接镜面主动光 学望远镜的完整计算模型,研究了其拼接子镜及望 远镜整体在风载作用下的静态和动态响应,分析了 风载对镜面面形和望远镜的跟踪指向精度的影响。

#### 1 风载作用研究内容和方法

由于风载对于望远镜结构和镜面的作用将直接 影响望远镜的控制和像质,风载的作用及望远镜的 风载响应的研究得到了越来越多的重视,现代天文 望远镜在设计阶段均进行风载影响的研究。主要研 究方法有:

 i首先在望远镜候选安装台址上监测和统计 风速,作为台址选择的重要评价因素<sup>[3]</sup>。如美国两 台 Gemini 望远镜对位于南北半球的两个台址均进 行了系统的风速监测;我国 LAMOST 望远镜的设 计也参考了其所在的兴隆台址的风速资料。

2) 在有的望远镜设计中采用缩小模型进行水 洞或风洞试验,研究风载对望远镜及圆顶/风挡的作 用<sup>[7]</sup>。水洞和风洞试验需要专门机构实施,比较昂 贵,而且,由于模型尺度和传感器分布的局限和雷诺 数的差异,试验并不能给出准确预测风载作用,特别 是不能给出望远镜和风之间的动态相互作用<sup>[3]</sup>。

3) 在现有类似台址和望远镜上进行风速和风 压实测,根据获得的统计数据作为新望远镜的设计 依据。如在欧洲 NTT 望远镜上获得的风载统计数 据为 Gemini 望远镜的设计提供了重要参考;在日本 Nobeyama 45m 口径射电望远镜上获得的风载作用 数据为研究风载对望远镜的指向和跟踪性能的影响 提供了重要的研究数据<sup>[3,6]</sup>。

4)随着计算机和计算机软件技术的发展,特别 是计算流体力学(CFD)分析技术的发展,在越来越 多的望远镜设计中,普遍采用计算机软件将望远镜 及其圆顶和环境空气集成建模,进行望远镜风载响 应的数值模拟<sup>[8]</sup>。采用 CFD 分析技术,使得分析计 算具有良好的柔性,可尝试改变风速、风向等边界条 件,便于望远镜设计的修改和优化。但由于计算的 规模和复杂性和计算模型的细节程度严重相关,所 以 CFD 分析一般也是用来了解风载和望远镜相互 作用的平均效应,而不能给出的风载的细节作用和 望远镜的细节响应<sup>[3]</sup>。

5) 根据望远镜设计工作风速采用静风载计算 方法分析风载作用,借助有限元软件可给出望远镜 镜面和结构的静态响应。这种方法计算简单,但不 能给出风载的动态作用。根据风的随机统计特性, 采用由风速功率谱密度(PSD)描述的风载,借助有 限元分析,可给出风载作用下望远镜结构的动响 应<sup>[1,3]</sup>。相对于 CFD 而言,这种计算方法计算规模 较小,允许望远镜的有限元模型具有相当的细节。 下文着重介绍静风载分析法和 PSD 分析方法。

### 2 风载物理描述

风是由空气流动造成的一种随机现象,风载就 是风对结构造成的随机作用。风速可看作风的平均 速度和随机变化的速度两个部分的和。从而,风载 可分为两种形式,即静风载和动风载。前者由平均 风速作用到结构表面引起的,后者由物体造成的风 的湍动和随机风速本身引起的<sup>[1]</sup>。静风载的描述 和计算比较简单,而对随机风速及其动风载的描述 和处理一般有两种方法:一是纳入静风载的处理方 法,求出等效风速,用等效风速来求出风对物体的作 用;一是利用风速的功率谱描述方法来求出随机风 速对物体的作用。

### 2.1 静风载

静风载作用力由下式表达<sup>[1,2]</sup>。

$$F = \frac{1}{2} C_D A V^2 = PA \tag{1}$$

式中  $C_D$  为风阻系数,其值与结构的几何形状和气 流状态有关,对于圆形平版  $C_D$  1; 为当地空气密 度(海拔 1000m 处约为  $_k = 1.17 \text{ kg/m}^3); V$  为风 速; A 为特征面积,即结构迎风截面积; P 为风压。在 计算天文望远镜结构和镜面的风载时,取结构和镜 面附近的风速代入上式,可得到风载作用下的镜面 和结构变形,只是 A 一般是随望远镜俯仰角变化 的。

2.2 等效风速法<sup>[1,9]</sup>

假设随机风速服从高斯分布,则随机风速概率 密度可表示为

$$f(v) = \frac{1}{v \sqrt{2}} \exp \left[ - \frac{(v - V_m)^2}{2 v} \right]$$
(2)

式中  $V_m$  是平均风速; v 是瞬时风速; v 是风速的标 准误差。

由(1)式,风对物体的作用力与风速平方成正 比,即(1)式可写为  $F = Kv^2$ ,其平均值和标准误差 可分别由下式表示

$$F_{m} = Kv^{2}f(v) dv = K(V_{m}^{2} + \frac{2}{v})$$
(3)  
$$\frac{2}{F} = (Kv^{2} - F_{m})^{2}f(v) dv$$

$$= 2 K^{2} \frac{2}{v} (2 V_{m}^{2} + \frac{2}{v})$$
(4)

(3) 式表达了风载作用力的平均值,(4) 式表达 了风载作用力的随机部分,即是其标准误差,则风载 对物体的总作用力可用其均方根值来表示,即

$$F_{\text{RMS}} = K(V_m^4 + 6V_m^2 \frac{2}{v} + 3\frac{4}{v})^{1/2}$$
(5)  

$$M \& \Re(1) \exists , M \land M \& \Re \& B \land M \\ V_{\text{equ}} = (V_m^4 + 6V_m^2 \frac{2}{v} + 3\frac{4}{v})^{1/4}$$
(6)

 $V_{equ} = (V_m^4 + 6V_m^2 V_v^2 + 3V_v)^{1/4}$  (6) 利用这一等效风速即可进行望远镜风载作用响

#### 2.3 风载功率谱分析法

随机风速可以采用其功率谱密度函数来描述。 在天文望远镜工程中常用 Von Karman 谱和 Davenport 谱来描述近地面风的运动的模型<sup>[5,11]</sup>。Kaimal 和 Simiu 等人提出了改进的功率谱模型,对低频区 和离地高度对功率谱的影响提出了更好的描述,称 为 Kaimal 谱<sup>[1,6]</sup>

$$S(n, V_z) = \frac{200 f(n, V_z)}{[1 + 50 f(n, V_z)]^{5/3}} \frac{u_f(V_z)^2}{n} (7)$$

式中n为频率; $V_z$ 为离地高度z处的平均风速;

无量纲频率  $f(n, V_z) = \frac{n \cdot z}{V_z}$ 地面摩擦剪切风速  $u_f(V_z) = \frac{V_z}{2.5\ln(z/z_0)}$ 

式中  $z_0$ 为地面粗糙度,对于天文望远镜台址一般为  $0.08^{[6]}$ 。

当风作用到大型结构上,比如大型天文望远镜 上,结构对风的衰减作用将是明显的,而对于大型结 构,由于对风的明显的衰减作用,随机风载被有效地 抑制。这种作用由空气动力衰减因子表征<sup>[1,5]</sup>

$${}^{2}_{a}(n) = \frac{1}{1 + (2 n \sqrt{A} / V_{z})^{4/3}}$$
(8)

又,由风速为平均风速与随机风速之和, V(t)=  $V_z + v(t)$ ,将  $V^2(t) = [V_z + v(t)]^2$ 按泰勒级 数展开,则  $V^2(t) = [V_z + v(t)]^2 = V_z^2[1 + 344]$   $2v(t)/V_z + v^2(t)/V_2^z + ...],$  截去高次项,并考虑 (1)式,于是有风压

$$P(t) = P + 2 P/V_z v(t)$$
 (9)

式中 P为平均风速 V<sub>z</sub> 按(1)式计算的静风载(风 压);第二项即为随机风载引起的随机风载,从而,由 式(7)并考虑空气动力衰减因子的作用,随机风载的 风压谱为

$$S(n, P) = 4(P/V_z)^2 S(n, V_z) - \frac{2}{a}(n) \quad (10)$$

这样,利用有限元软件分别分析静风载和随机 风载的对望远镜的作用,然后进行叠加,即获得风载 的总作用。运用同样的推导方法,可以给出随机风 载的力谱,这对于具有规则结构形状和尺寸的物体 的风载响应的分析较为方便。用这种方法来计算随 机风载对望远镜结构的作用优越性在于可以了解结 构响应和频率的关系,有助于优化设计望远镜的控 制系统。

#### 3 风载作用有限元分析的实现

对于望远镜静风载响应的分析和采用等效风速 进行分析的问题,在采用有限元方法进行分析计算 时,只需根据(1)式给出风压或风力,并施加到望远 镜有限元模型的相关迎风面上进行分析即可。从计 算结果中可提取望远镜结构和镜面的位移应力等静 响应,用以分析望远镜的设计和性能。

对于随机风载,在望远镜结构传递函数矩阵 H(n)已知时,可通过风压谱S(n, P)直接求出望 远镜结构的响应谱 $S_R(n, P)$ 

$$S_R(n, P) = |H(n)|^2 S(n, P)$$
 (11)

对响应谱在特定频率范围(n<sub>1</sub>, n<sub>2</sub>)内进行积分,即获得随机风压对望远镜结构作用的均方根值

$${}^{2} = \int_{n}^{2} / H(n) / {}^{2} S(n, P) dn \qquad (12)$$

将这一随机风载的动态作用和平均风载对望远 镜结构的作用相加就得到风载对望远镜总作用。传 递函数矩阵 *H(n)* 可采用有限元方法进行谐响应 分析计算获得。

现代有限元软件一般都提供 PSD 分析模块,分 析中将(10)式给出的风压功率谱(或风力谱)按给定 风向施加到望远镜结构的迎风面上进行 PSD 分析。 通过 PSD 分析,获得望远镜结构的响应,从而通过 数据处理可获得风载对望远镜的像质及跟踪指向的 影响。

#### 4 望远镜风载有限元分析实例

大天区面积多目标光纤光谱望远镜 (LAM-OST)的反射式施密特改正镜采用开放式观测方式, 圆顶完全打开,技术要求工作风速为2 m/s。参见 图 1.该改正镜系统采用竖直轴和水平轴两轴驱动, 在反射镜面面形的主动校正的同时完成指向跟踪运

动。反射改正镜面由 24 块对角径为 1.1m 厚 25mm的六边形子镜系 统拼接而成,并支撑于 半球形的下层支撑桁架 上。参见图 2, 各子镜 系统又有一套二级支撑 机构.即子镜由 34 个主 动力促动器(用于镜面 变形)和3个定位点支 撑并联接于下 一级的3个主 动位移调节机 构(用于镜面



图 1 LAMOST 反射式

调姿)<sup>[4]</sup>。



鉴于系统

的复杂性,首

图 2 反射面子镜系统示意图

先分析单个子镜系统的工作风载响应,然后将子镜 系统进行必要简化后进行总体风载 PSD 分析,以了 解拼接反射面的响应。

#### 4.1 子镜风载分析

六边形子镜面近似看作圆形平版,取  $C_p = 1$ ;台 址海拔 1000 m,取空气密度 = 1.17kg/m<sup>3</sup>。按(1) 式,计算工作风速 V = 2m/s时的静风压

 $P = 1/2 \cdot \cdot C_D V^2 = 2.34 \text{ Pa}$ 图 3 为子 镜系统的有限 元模型,考虑 风垂直作用到 镜面的极限情



形,将风压 P 施加于镜面法

图 3 子镜系统有限元模型

向。图4为静风载作用下镜面变形等高图,对应镜 面面形变形为 RMS = 19.05 nm。

根据(10)式,作图 5 所示风速 2 m/s 时的随机 风压 Kaimal 功率谱曲线图。也按风载沿镜面法向

作用,运用有限元软件进行 PSD 分析。如图 6 所

示,随机风载引起子 镜面形的均方根值等 高图,位移 RMS = 1. 22 nm;引起子镜倾 斜(即指向误差) RMS = 0.012 ,  $\overline{PJ}$ 见,随机风载的风压 相对静风载是小量。 但可引起不均匀风 压,从而使镜面指向发生误差。



图 4 静风载作用 下镜面变形图

4.2 整体风载 PSD 分析





LAMOST 反射 式施密特改正镜工作 范围,以镜面法线仰 角计.为 32.3° 82.  $3^{(4)}$ ,  $\mathbb{R}$   $d = 45^{\circ}$ 进行风载分析。考虑 风水平作用于结构的 迎风构件上,以图 5 的风压功率谱进行 PSD 分析。图 7 所示 改正镜系统整体有限 元模型。

为了解系统的动 力学特性,首先进行 模态分析。图 8 所示 为系统第四阶振型, 表现为拼接镜面绕高 度轴(拼接镜面短轴) 的转动,对应特征频





改正镜系统 图 7 整体有限元模型

率为 13.6 Hz;图 9 为第 10 阶振型,表现为拼接镜面 绕拼接镜面长轴的转动,对于特征频率为 20.9 Hz。 然后进行风压 PSD 分析,图 10 所示为系统位移响

#### 光学 技 术

应均方根值分布等 高图,最大值为 5µm;图 11 所示为 拼接镜面的位移响 应均方根值分布图, 最大值为 2.5µm。 以各子镜法线方向 表征子镜指向,图 12 所示为 24 块子 镜指向的均方根值 散布图,可见, 子镜指向趋向 较为一致,反 映了风载引起 的望远镜指向 跟踪误差。

改正镜的 指向跟踪误 图 9 差,可由拼接 镜面在风载作用下的 整体倾斜响应表征。 根据风压 PSD 分析 结果,统计可得,随机 风载将引起改正镜俯 仰角(即绕水平轴,拼 接镜面短轴)误差 RMS = 0.053 ,绕拼 接镜面长轴转角误差 RMS=0.001。可见 随机风载引起的改正镜 跟踪指向误差主要表现 为俯仰角的变化。参见 改正镜系统结构图 1, 绕水平轴的转动惯量和 刚度相对小得多;另外, 参见图 8 和图 9,绕水 平轴的振型表现为俯仰 角的变化,而绕拼接镜 面长轴的振型对应固有



图 11 改正镜拼接镜 面位移响应等高图

频率要高得多,从而该方向上的转角误差小得多。

5 结 论

346

利用有限元软件进行大型天文望远镜风载响应 的研究对于大型望远镜的设计是重要的手段。通常

可采用静风载等效计算算法进行风载分析,而越来 越普遍地采用基于风速功率谱密度 PSD 进行随机 风载分析和采用计算流体力学建立望远镜和环境空

来进行风载分 析。采用风速 PSD 来计算随 机风载对望远 镜结构的作 用,计算规模 相对较小,分 析方法相对简



单,有助于了解望远镜结构对风载的响应和频率的 关系,进而有助于优化设计望远镜的结构和控制系 统的设计。本文的工作对于我国未来大口径光学天 文望远镜和大型射电望远镜的研制有借鉴意义。

#### 参考文献:

- [1] 程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 中国科学技术出版社, 2003
- [2] Bely B Y. The design and construction of large optical telescopes [M]. Springer-Verlag, 2003. [3] Cho M K, Stepp L M, et al. Wind loading of large telescopes [C]. SPIE, 2003, 4837:352-367.
- [4] Yang D, Gu B, et al. Structural analysis of the reflecting surface system of a large astronomical telescope[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), 2004, 17(3):415-419.
- [5] Quattri M, Koch F, et al. OWL wind loading characterization: a preliminary study[J]. SPIE, 2002, 4840:459-470.
- [6] West S C, Martin H M. Approximate wind disturbance of the MMT 6.5-m primary mirror on its supports [R]. Multiple Mirror Telescope Technical Report #28, University of Arizona and the Smithsonian Institution, 1995.
- [7] Pottebaum T S, McMynowski D G. Wind tunnel testing of a generic telescope enclosure [J]. SPIE, 2004, 5495:270-281.
- [8] Vogiatzis K, Segurson A, et al. Estimating the effect of wind loading on extremely large telescope performance using computational fluid dynamics[J]. SPIE, 2004, 5497: 311-320.
- [9] Forbes F, Gaber G. Wind loading of large astronomical telescopes [J]. SPIE, 1982, 332: 198-205.
- [10] 西格蒙德 布兰特. 数据分析中的统计和计算方法[M], 北京: 国防工业出版社,1983.
- [11] Simiu E. Wind spectra and dynamic alongwind response[J]. J. of Structural div., ASCE, 1974, ST9:1897-1910.
- [12] Davenport A G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds[J]. Quarterly J. of the Royal Meteorological Society, 1961, 87:194-211.

