

非稳态风载对 1.2 m 地基望远镜成像质量的影响

兰 斌^{1,2} 杨洪波³ 吴小霞¹ 安其昌¹ 赵宏超¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

摘要 介绍了非稳定风载的功率谱,采用最小二乘法建立了光学元件的刚体位移与其镜面节点关系的线性表达式,并基于小位移假设线性化处理的方法推导出表征光学系统各光学元件刚体位移所引起像点偏移量的光学敏感度矩阵。进一步将这些线性关系式作为前处理导入望远镜结构有限元模型中,进行了频率响应分析。以不同风速和俯仰角组合共 16 种工况下非稳态风载的功率谱密度作为输入,得到了像点相对成像面横向偏移量的随机响应曲线。考虑主轴伺服控制系统和成像器件积分时间对像点偏移量的影响,对像点横向位移的随机响应曲线进行了修正,得出了像点随机偏移量引起的线扩散函数(LSF)和调制传递函数(MTF)衰减曲线,并计算得到 16 种工况下长曝光与短曝光成像时系统的斯特列尔比。结果表明,5 等级风速下任意俯仰角和 6、7 等级风速下接近 0°俯仰角的情况下光学系统的斯特列尔比大于 0.8,望远镜系统可以正常工作;8 等级风速任意俯仰角情况下系统的斯特列尔比都小于 0.8,望远镜成像质量受到严重的影响,系统无法正常工作。

关键词 成像系统; 地基望远镜; 非稳态风载; 刚体位移拟合; 光学敏感度矩阵; 曝光时间; 斯特列尔比

中图分类号 TH751 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.111103

Influence of Unsteady Wind Loads on Imaging Quality of the 1.2 m Ground Telescope

Lan Bin^{1,2} Yang Hongbo³ Wu Xiaoxia¹ An Qichang¹ Zhao Hongchao¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract Power spectrum of the unsteady wind loads is describes in detail. The linear relationship between rigid displacement of the optical elements and specular node is built by the least squares method. And the optical sensitivity matrix characterizing the optical image point offset caused by a rigid displacement of the optical elements in the optical system is built based on the assumption of small displacement linearization method. Then, these linear relationships are imported into the finite element analysis model of the telescope system and the frequency response analysis of unsteady wind loads is proceeded. The random response curves of image point offset relative to the imaging surface are obtained from input of the power spectral density functions of unsteady wind loads under sixteen cases of different wind speeds and elevation angles. Finally, the random response curve of image point lateral displacement is corrected considering the impact of main axes servo control system and the integration time of imaging elements on image offset. And line spread function (LSF) and modulation transfer function (MTF) attenuation curves caused by the random offset are deduced. The Strehl Ratio of imaging system is calculated in

收稿日期: 2016-06-15; **收到修改稿日期:** 2016-06-27; **网络出版日期:** 2016-10-21

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所重大创新项目专项基金资助项目(Y3C122E130)

作者简介: 兰 斌(1989—),男,博士研究生,主要从事地基望远镜集成分析方面的研究。

E-mail: lanbin169320@126.com

导师简介: 杨洪波(1963—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光机电集成计算机辅助工程技术方面的研究。

E-mail: yanghb@sibet.ac.cn

sixteen cases in the short and long exposure time. The results show that the Strehl ratio of the optical system is greater than 0.8, when the telescope is located in fifth level wind under any elevation angle and in sixth and seventh levels wind under near 0° elevation angle. Under the above circumstance, the telescope system can work properly. While the Strehl ratio is less than 0.8, when the telescope is located in eight level wind under any elevation angle. In this case, the image quality of the telescope is seriously affected, so the system cannot work properly.

Key words imaging systems; ground telescope; unsteady wind loads; rigid displacement fitting; optical sensitivity matrix; exposure time; Strehl ratio

OCIS codes 110.6770; 110.0110; 150.5758

1 引言

由于光学系统衍射极限的限制,要获得更高的空间角分辨率就必需不断增大望远镜的通光孔径。在增大望远镜通光孔径的同时系统的整体刚度也随之下降;而且望远镜台址通常选在高海拔山区,为了提高望远镜的视宁度,近年来越来越多的望远镜采用开放式圆顶。这些因素都会使风载扰动引起的地基光电望远镜系统成像质量下降的问题越来越严重^[1]。从风对结构作用的角度来讲,将风载分为稳态风载和非稳态风载两个组成部分。稳态风载对于望远镜的影响可以通过望远镜主轴跟踪控制系统和调整像面得到补偿,但是由于主轴跟踪控制系统控制带宽的限制和非稳态风载的随机性,非稳态风载的中高频部分无法得到有效的矫正。因此非稳态风载引起的像质模糊,成为了影响望远镜成像质量的主要因素之一。

国内关于风载对地基望远镜成像质量影响的研究大部分都集中在风载对单个光学元件面形和指向误差影响的分析,没有深入分析风载对整个望远镜系统最终成像质量的影响。中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所的杨德华等^[2]采用 Ansys 软件对大天区面积多目标光纤光谱天文望远镜(LAMOST)进行随机响应分析,得到了风载对拼接镜面面形精度和指向精度的影响结果;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的周超等^[3]采用 Natran 软件对某 1.2 m 地基光电望远镜进行随机响应分析,得到了在静态风载和动态风载下主次镜的面形精度和指向精度。中国科学院光电技术研究所的潘年等^[4]采用计算流体动力学(CFD)分析模拟望远镜不同俯仰角下风载静压力的瞬态分布和主镜镜面的面形精度,分析得到的主镜面静压力功率谱密度(PSD)与 Gemini 望远镜的实测结果比较接近。

国外 30 m 望远镜(TMT)项目组的 MacMynowski 等^[5]采用参数化功率谱模型和 CFD 两种方法对 TMT 风载扰动进行模拟仿真,Cho 等^[6]在 Gemini 主镜上布置了 32 个压力传感器获得了多种工况下镜面压强的实测数据。最终将这些风载数据作为输入导入到包含了光学模型、机械模型和控制模型的望远镜集成模型中进行系统级集成仿真分析,得到了风载对望远镜系统最终成像质量的影响结果。

本文以某 1.2 m 地基望远镜为例,忽略大气湍流和圆顶视宁度对望远镜成像质量的影响,只研究非稳态风载引起的视轴抖动对望远镜成像质量的影响。将光学元件的刚体位移量和光学敏感度矩阵以多点约束(MPC)的方式加入到结构有限元分析模型中,避免了建立复杂的系统集成模型,采用 MSC.Nastran 软件对系统进行随机响应分析,研究了非稳态风载对望远镜系统成像质量的影响。

2 风载场的功率谱描述

大气扰动主要由两种原因造成,一种是空气和地面温度不一致引起的对流,另一种是由于地面摩擦形成的近地边界层湍流效应。从风对大气视宁度的影响角度来讲对流产生扰动对望远镜成像起主导作用,从风对结构的作用角度来讲边界层扰动对望远镜成像起主导作用。静态风载采用平均速度来描述,动态风载即非稳态风载采用随机风速谱来描述。稳态风载速度符合对数律^[7],即

$$\bar{v}(z) = \bar{v}(z_{\text{ref}}) \ln(z/z_0) / \ln(z_{\text{ref}}/z_0), \quad (1)$$

式中 z_0 为地表粗糙度,查表可知^[7]; $\bar{v}(z_{\text{ref}})$ 为参考高度 z_{ref} 处的平均速度。中国气象局发布的蒲氏风等级表,按照平地 10 m 处的风速将风力从 0 到 12 共分为 13 个等级,其中 5, 6, 7, 8 等级对应的风速分别为 8.0~10.7, 10.8~13.8, 13.9~17.1, 17.2~20.7 m/s。

由(1)式可知,稳态风载速度由近地高度、某参考高度(一般选 10 m)处的平均风速和地表粗糙度共同决定。近地边界层的大气湍流形成的非稳态风速可以由 Kolmogorov 湍流“ $-5/3$ ”统计理论近似表达为

$$S(f) = 0.26v_*^2 \left[\frac{z}{\bar{v}(z)} \right]^{-2/3} f^{-5/3}, \quad (2)$$

式中 $\bar{v}(z)$ 为平均风速, 地面剪切风速 $v_* = \frac{\bar{v}(z)}{2.5 \ln(z/z_0)}$ 。

Kolmogorov 湍流模型假设对于局部各向同性的大气湍流存在一个惯性区域^[8], 该区域的上限尺度为外尺度 L , 下限尺度为内尺度 l , 在惯性区域内大尺度湍流从外界获取能量失稳后产生次级小湍流, 次级小湍流失稳产生更小的湍流, 直至产生的湍流尺度与内尺度相当时, 最终由于摩擦效应将能量耗尽。湍流的空间外尺度 L 和内尺度 l 对应着不同的时间频率, 分别为 $f_L = \bar{v}/L_f$ 和 $f_l = \bar{v}/l_f$, 因此 Kolmogorov 湍流“ $-5/3$ ”统计理论只适用于 $f_L \sim f_l$ 区间。为了更好地描述低频区和离地高度对功率谱的影响, Kaimal 和 Simiu 提出了改进的功率谱模型为

$$S_v[f, \bar{v}(z)] = \frac{200 \cdot m}{(1 + 50 \cdot m)^{5/3}} \cdot \frac{v_*^2}{f}, \quad (3)$$

式中无量纲频率 $m = fz/\bar{v}(z)$, 图 1 为非稳态风载的 Kolmogorov 谱和 Kaimal 谱对比图。

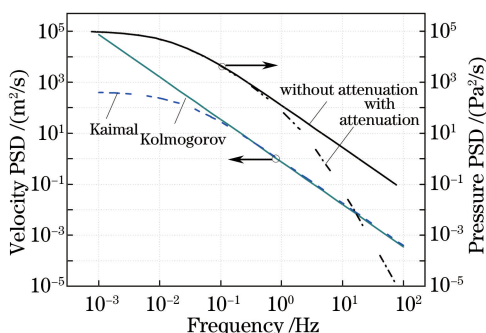


图 1 随机风速与风压功率谱密度图

Fig. 1 Random wind speed and wind pressure power spectral density

瞬时风速 $v = \bar{v} + v'$, 其中 \bar{v} 为平均风速, v' 为非稳态风速。由伯努利方程可知瞬时风速引起的压强为 $p = \rho v^2/2$, 去掉高次项线性化处理得到非稳态扰动引起的压强为 $p' = \frac{dp}{dv} \cdot v' = \rho \bar{v} v'$, 其中 v' 符合 $S_v[f, \bar{v}(z)]$ 功率谱则, 非稳态压强的功率谱为

$$S_p(f, \bar{v}) = (\rho \bar{v})^2 S_v(f, \bar{v}). \quad (4)$$

对于一个给定的 \bar{v} , 尺度小的湍流引起结构的高频风压, 尺度大的湍流引起结构的低频风压。风与望远镜结构相互作用时, 那些比望远镜的结构尺度小的小尺度湍流相互抵消发生能量耗散。随着频率的增高, 作用在结构上的扰动力以 $f^{-7/3}$ 急剧下降^[9], 在(4)式基础上引入动力衰减因子 $\chi = 1/[1 + (f/f_c)^{4/3}]$, 其中望远镜的结构尺度 $A_c = 3 \cdot m$ 对应的时间频率为 $f_c = \bar{v}/(2\sqrt{A_c})$, 可得修正后的压强功率谱为

$$S_p(f, \bar{v}) = (\rho \bar{v})^2 S_v(f, \bar{v}) \chi^2(f). \quad (5)$$

图 1 右侧为引入衰减因子前后的压强功率谱密度曲线对比图。

3 光学系统线性化处理

1.2 m 地基望远镜主镜采用 18 点 whiffletree 支撑形式, 相对于非稳态风载作用力来讲, 光学元件的刚度足够大, 因此可忽略镜面自身的变形, 只考虑各光学元件的刚体位移量。风载所引起的光学元件刚体位移量在纳米级, 因此可对光学系统进行一阶位移线性化处理。

3.1 刚体位移拟合计算

光学元件受到外载荷的作用时产生的刚体位移可以通过对镜面上节点位移量进行最小二乘法拟合得到。假设镜面顶点 P 的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , 镜面上坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) 的任意节点 i 由于刚体位移 $\alpha = \{x_0, y_0, z_0, \Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z\}^T$ 所产生的随动位移量 $\{x_i, y_i, z_i\}$ 为

$$\begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & Z_i - Z_0 & Y_0 - Y_i \\ Z_0 - Z_i & 0 & X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 & X_0 - X_i & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{Bmatrix}. \quad (6)$$

通过镜面上所有节点在镜体发生刚体位移时的随动位移量来拟合节点的变形量,得到不相容的线性方程组为

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ \vdots \\ x_i \\ y_i \\ z_i \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \\ z_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & Z_1 - Z_0 & Y_0 - Y_1 \\ 0 & 1 & 0 & Z_0 - Z_1 & 0 & X_1 - X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Y_1 - Y_0 & X_0 - X_1 & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & Z_i - Z_0 & Y_0 - Y_i \\ 0 & 1 & 0 & Z_0 - Z_i & 0 & X_i - X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Y_i - Y_0 & X_0 - X_i & 0 \\ \vdots & & & \vdots & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & Z_n - Z_0 & Y_0 - Y_n \\ 0 & 1 & 0 & Z_0 - Z_n & 0 & X_n - X_0 \\ 0 & 0 & 1 & Y_n - Y_0 & X_0 - X_n & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ \Delta\theta_x \\ \Delta\theta_y \\ \Delta\theta_z \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

写成矩阵形式为 $\{U\} = \mathbf{A}\boldsymbol{\alpha}$, 利用最小二乘法求得

$$\boldsymbol{\alpha} = \mathbf{H}\{u\}, \quad (8)$$

其中 $\mathbf{H} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$ 。方程可写成 $\sum_j A_j u_j = 0$ 的形式,以 MPC 的方式导入到 MSC.Nastran 中,每个镜面的刚体位移由 1 个新建节点的 6 个自由度来代替。

3.2 光学敏感度矩阵的计算

1.2 m 地基光电望远镜光学系统采用卡塞格林式结构,其中主镜为抛物面,次镜为双曲面,三镜为倾斜 45° 的平面折叠镜。与光轴平行的光线经过主次镜后由三镜折转到 Nasmyth 焦点成像,光学系统设计参数为主镜焦距 $f_{pm} = 1800$ mm,次镜焦距 $f_{sm} = 538$ mm,系统总焦距 $f = 10.808$ m,主次镜间的距离 $d_{ps} = 1351.6$ mm,次镜与三镜间的距离 $d_{st} = 1131.6$ mm,三镜与焦面间的距离 $d_{ti} = 1560.8$ mm。图 2 为光学系统主镜、次镜、三镜和焦面的刚体位移自由度定义图,其中 Δx 、 Δy 和 Δz 为光学元件的平动自由度, $\Delta\theta_x$ 、 $\Delta\theta_y$ 和 $\Delta\theta_z$ 为光学元件的转动自由度。

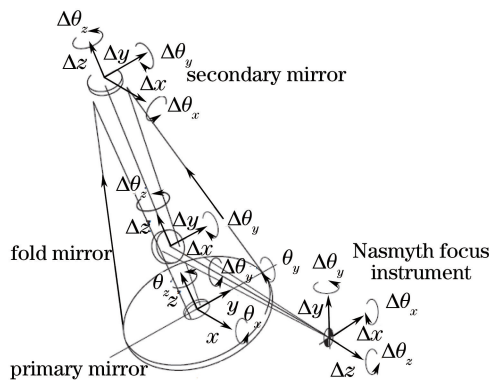


图 2 耐氏光学系统元件刚体位移定义图

Fig. 2 Definition of the various rigid displacement of Nasmyth optical system components

在实际工作过程中望远镜系统中的每个光学元件相对于装调位置的偏移都会使焦面上的像点相对于理想位置发生一定量的偏离。为了研究风载扰动对成像质量的影响,建立描述光学元件的刚体位移量与像点在像面处的偏移量线性关系的灵敏度矩阵至关重要。首先研究单个反射元件的偏移造成的反射光线偏离^[7],图 3(a)为凹面反射镜沿着垂直于光轴的方向旋转 α ,折返光线偏移 $\Delta\theta_\alpha$,图 3(b)为焦距为 f 的凹面反射镜沿着垂直于光轴的方向平移 s ,折返光线偏移 $\Delta\theta_s$,由图可知:

$$\begin{cases} \Delta\theta_s \approx s/f \\ \Delta\theta_\alpha \approx 2\alpha \end{cases} \quad (9)$$

图 3(c) 为 45° 平面镜沿着入射光线的方向移动 s , 再此基础上以入射点为中心沿着直于光轴的方向顺时针旋转角度 α' , 则整体偏转角 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta \approx (s + 2\alpha'f) / f. \quad (10)$$

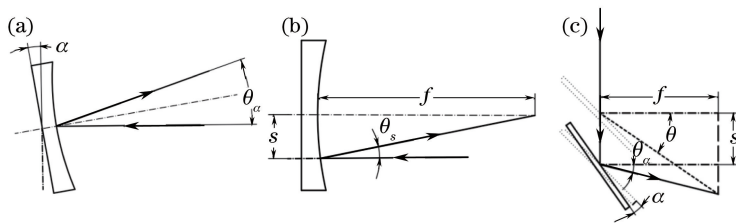


图 3 (a) 凹面镜旋转引起光线偏转; (b) 凹面镜平移引起光线偏转; (c) 平面反射镜平移旋转引起光线偏转

Fig. 3 (a) Light shift caused by rotation of concave mirror; (b) light shift caused by translation of concave mirror;

(c) light shift caused by rotation and translation of plant mirror

由于主次镜沿光轴的平动自由度 (Δz_{pm} 和 Δz_{sm})、绕光轴的旋转自由度 ($\Delta\theta_z^{pm}$ 和 $\Delta\theta_z^{sm}$) 与三镜沿 y 轴的平移自由度 ($\Delta\theta_y^{im}$) 都不会影响光学系统焦点处成像点的横向位置, 因此这 5 个自由度对像点横向位移量的影响因子为 0。

采用(9)式和(10)式对光学系统中发生刚体位移的光学元件进行出射光线偏移量的计算, 得出像面处像点的横向偏移量与各光学元件自由度的线性关系式:

$$\begin{cases} \Delta x = \left(\frac{\Delta y^{pm}}{f_{pm}} - 2\Delta\theta_x^{pm} \right) f - \left(\frac{\Delta y^{sm}}{f_{sm}} - 2\Delta\theta_x^{sm} \right) (d_{st} + d_{ti}) + \Delta\theta_z^{tm} d_{ti} - \Delta x^{im} \\ \Delta y = \left(\frac{\Delta x^{pm}}{f_{pm}} - 2\Delta\theta_y^{pm} \right) f - \left(\frac{\Delta x^{sm}}{f_{sm}} - 2\Delta\theta_y^{sm} \right) (d_{st} + d_{ti}) - 2\Delta\theta_y^{tm} d_{ti} + \Delta x^{tm} + \Delta z^{tm} - \Delta y^{im} \end{cases}, \quad (11)$$

代入光学系统的设计参数得出

$$\begin{cases} \Delta x = 6 \cdot \Delta y^{pm} - 21616 \cdot \Delta\theta_x^{pm} - 5 \cdot \Delta y^{sm} + 5384.8 \cdot \Delta\theta_x^{sm} + 1560.8 \cdot \Delta\theta_z^{tm} - \Delta x^{im} \\ \Delta y = 6 \cdot \Delta x^{pm} - 21616 \cdot \Delta\theta_y^{pm} - 5 \cdot \Delta x^{sm} + 5384.8 \cdot \Delta\theta_y^{sm} - 3121.6 \cdot \Delta\theta_x^{tm} + \Delta y^{tm} + \Delta z^{tm} - \Delta y^{im} \end{cases}, \quad (12)$$

简化成矩阵的形式为 $\{\Delta T\} = \mathbf{S}\{\Delta U\}$, 其中 \mathbf{S} 为光学敏感度矩阵。(12)式可写成 $\sum_j A_j u_j = 0$ 的形式, 以多点约束的方式导入到 MSC.Nastran 中, 像点在焦面的偏移量可以由代表主次三镜刚体位移的节点位移量通过光学敏感度矩阵系数加权线性表示。

4 结构动力学随机响应分析

1.2 m 地基望远镜安装在稀疏市郊 10 m 高的楼顶, 方位轴以下的基座处于圆柱形凹槽中。如图 4 所示, 在 Hpermesh 中建立系统的有限元模型, 三镜组件与焦面组件以集中质量点代替, 约束望远镜底部环形平板的 6 个自由度, 利用(7)式分别建立主次镜刚体位移与镜面节点位移线性关系的 MPC 单元, 利用(12)式建立主次镜刚体位移、三镜集中质量点位移和焦面集中质量点位移与像点横向位移线性关系的 MPC 单元。

通过 MSC.Nastran 对望远镜结构模型进行模态法频率响应分析^[8], 得到系统的频率响应函数 $H(f)$, 动力学模型在以功率谱密度 $P_{in}(f)$ 描述的随机载荷作用下, 响应谱 $P_{resp}(f)$ 为

$$P_{resp}(f) = H^2(f) \cdot P_{in}(f). \quad (13)$$

由像点沿 x 轴的位移 u_x 与沿着 y 轴方向的位移 u_y 可以合成像点横向位移 u_r , 即

$$u_r^2 = u_x^2 + u_y^2, \quad (14)$$

对应合成的像点横向位移功率谱响应 $P_{resp,r}(f)$ 为

$$P_{resp,r}(f) = P_{resp,x}(f) + P_{resp,y}(f), \quad (15)$$

按照(5)式计算出俯仰角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$, 风速等级分别为 5, 6, 7, 8 等级, 一共 16 种不同工况下的随

机风压强功率谱密度,作为输入载荷代入(13)~(15)式得出这16种工况下像点横向位移的功率谱密度曲线,如图5所示,其中 x_{rms} 为像点横向移动量的均方根值。

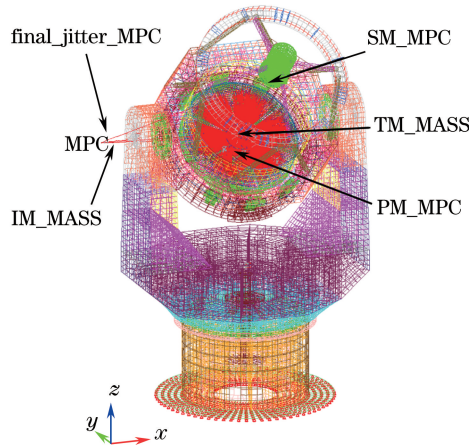


图4 1.2 m望远镜结构有限元模型

Fig. 4 1.2 m telescope structural finite element model

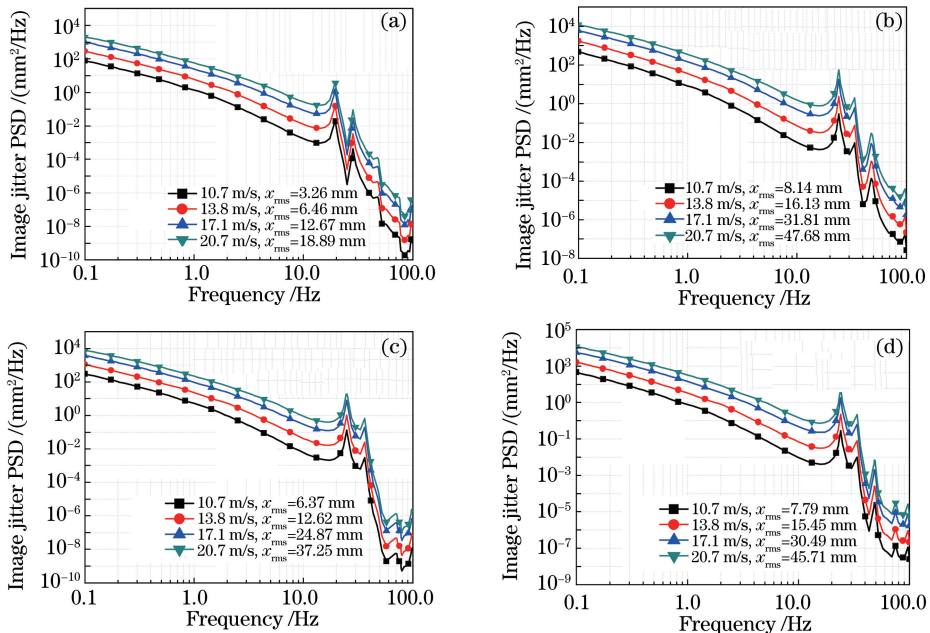


图5 不同俯仰角不同风速等级下的像点横向位移量的功率谱密度曲线,

(a) 0°俯仰角; (b) 45°俯仰角; (c) 90°俯仰角; (d) 135°俯仰角

Fig. 5 Power spectral density curves of the image point lateral displacement with different elevation angles and different wind speeds. (a) Elevation angle of 0°; (b) elevation angle of 45°; (c) elevation angle of 90°; (d) elevation angle of 135°

5 主轴控制系统对非稳态风载下像点横向位移量的影响

地基望远镜在工作过程中受到风载作用时,跟踪系统的主轴相比预期值会发生偏移。在一定的控制带宽范围内,控制系统会及时地对偏移量进行校正。1.2 m 光电望远镜主轴跟踪系统采用位置和加速度双闭环控制结构^[9],通过编码器实时检测轴系的位置作为反馈构成控制结构的外环,用以提高控制精度;通过加速度计测得轴系的角加速度作为反馈构成系统的内环,用于抑制扰动。加速度环控制器为加入低通滤波器的比例控制器,整个控制系统的扰动抑制传递函数 R 的幅值如图6(a)所示。

考虑主轴控制系统对风载的补偿,风载力对像点偏移的传递函数为动力系统机械传递函数 H 乘以扰动抑制传递函数 R ,矫正后像点的位移功率谱密度函数 $P_{\text{respl}}(f)$ 为

$$P_{\text{resp1}}(f) = [H(f) \cdot R(f)]^2 \cdot P_{\text{in}}(f). \quad (16)$$

图 6(b) 为以 8 等级风速望远镜俯仰角为 45° 工况为例, 主轴控制系统校正前后像点横向位移量功率谱密度对比图。

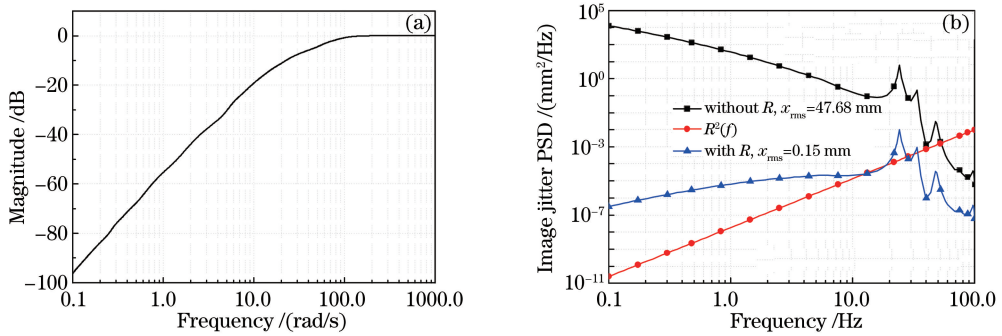


图 6 (a) 扰动抑制传递函数 R 的幅值图; (b) 主轴控制系统校正前后像点位移功率谱密度图

Fig. 6 (a) Amplitude spectrum of disturbance rejection transfer function; (b) image point displacement power spectral density before and after axial control correction

6 曝光时间对非稳态风载作用下像点横向位移量的影响

相对于成像器件的曝光时间, 像点做低频正弦运动时, 还未达到峰值, 曝光时间就已经结束, 扰动幅值被缩减。可见成像器件积分时间对像点偏移量的影响主要是在低频部分减小了偏移量的幅值。Lucke 等^[9]引入抖动权重因子 $W_d = 1 - 2(1 - \cos C) / C^2$, 其中 $C = 2\pi fT$, T 为成像器件曝光时间。考虑成像器件曝光时间对像点偏移量影响的像点位移功率谱密度函数 $P_{\text{resp2}}(f)$ 为

$$P_{\text{resp2}}(f) = W_d(f) \cdot P_{\text{resp1}}(f). \quad (17)$$

由(17)式可得出不同曝光下抖动权重因子 W_d 随频率 f 变化曲线如图 7(a) 所示。以 8 等级风速望远镜俯仰角 45° 工况为例, 长短曝光下像点径向位移偏移量的功率谱密度函数与未考虑曝光时间影响的功率谱密度函数对比图, 如图 7(b) 所示。

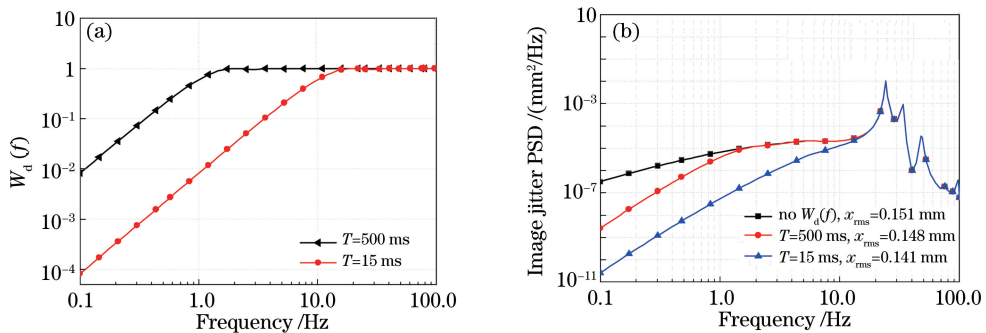


图 7 不同曝光时间下 (a) 抖动权重因子和 (b) 像点偏移量的功率谱密度曲线

Fig. 7 (a) Jitter weighting factors and (b) power spectral density curves under different exposure time

7 像点横向偏移量对光学系统成像质量的影响

地基光电望远镜受到风载扰动引起的物像与焦面探测器之间的随机振动会使像点模糊变成高斯图样^[10-11], 随机振动导致的线扩散函数为

$$F_{\text{LSF}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \quad (18)$$

式中 σ 为随机振动位移的均方根值, 对其进行傅里叶变换得到像点抖动引起的系统传递函数衰减因子为

$$F_{\text{MTF_Jitter}} = |F_{\text{OT}}| = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} - j2\pi fx\right) dx \right| = \exp(-2\pi^2\sigma^2 f^2), \quad (19)$$

则系统最终的光学传递函数为

$$F_{\text{MTF-Final}} = f_{\text{MTF_Jitter}} \cdot f_{\text{MTF_Normal}} \quad (20)$$

以 8 等级风速望远镜俯仰角 45° 经主轴控制系统矫正后短曝光成像为例,像点随机运动时成像系统的 MTF 曲线,如图 8 所示。

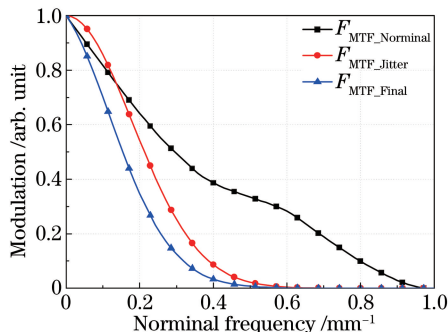


图 8 像点随机运动时成像系统的 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of random motorial imaging system

由于系统自身像差、装调误差和扰动等的存在,实际光学系统的点扩散函数中心亮斑的光强值比达到衍射极限的理想光学系统成像时有所下降,它们的比值称为斯特列尔比(Strehl ratio),表示为 R_{Strehl} 。MTF 曲线围成的面积为点扩散函数中点亮斑的光强值,因为 1.2 m 光学系统的设计基本接近衍射极限,所以仅考虑风载对成像质量的影响,系统的斯特列尔比近似为引入抖动因子后系统的 MTF 曲线围成面积与光学设计 MTF 曲线围成的面积之比即

$$R_{\text{Strehl}} = \int_0^{\infty} f_{\text{MTF_Net}} df / \int_0^{\infty} f_{\text{MTF_Nom}} df \quad (21)$$

对不同俯仰角和不同风速等级共 16 种工况下,1.2 m 望远镜成像系统进行非稳态风载随机响应分析,计算出考虑主轴控制系统和曝光时间影响下像点横向位移偏移量的功率谱密度函数和系统 MTF 曲线,由(21)式得到各工况长曝光和短曝光下的斯特列尔比,如图 9 所示。

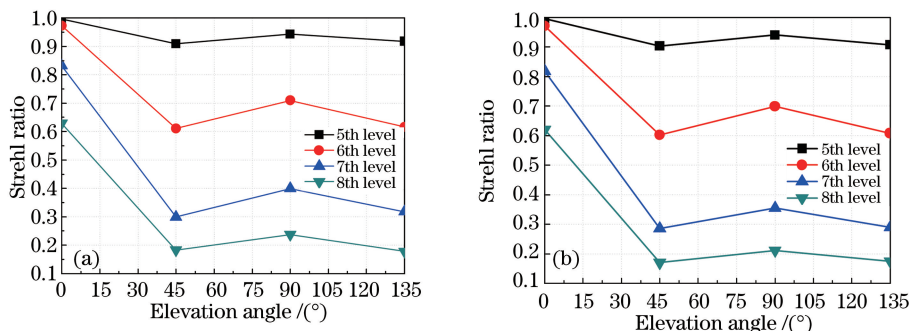


图 9 16 种工况下 (a) 短曝光和 (b) 长曝光成像光学系统的斯特列尔比

Fig. 9 Strehl ratio of the optical system under (a) short and (b) long exposure time in sixteen kinds of load cases

由图 9 可得以下结论。

1) 相同风速等级和俯仰角的情况下,短曝光比长曝光的斯特列尔比仅下降大约 3%,说明积分时间对于像质影响不明显,这是由于主轴跟踪控制系统能够很好地抑制低频风载的扰动。因此只有在成像器件曝光频率远大于主轴控制系统带宽时,曝光时间才会对风载引起的成像质量下降产生有效的抑制作用。

2) 随着风速等级的增大,系统的斯特列尔比下降;同等级风载条件下,俯仰角从 0° 到 90° 变化过程中,系

统的斯特列尔比先减小后增大,这是由于受风面积的变化引起的。

3) 135°与45°相比,系统的斯特列尔比仅下降大约2%,说明主镜组件支撑刚度足够大,相对主镜室没有发生刚体位移。相同的风速等级下,系统的斯特列尔比主要由于受风面积决定。

4) 5等级风速下任意俯仰角和6、7等级风速下接近0°俯仰角的情况下光学系统的斯特列尔比大于0.8,望远镜系统可以正常工作;8等级风速任意俯仰角情况下系统的斯特列尔比都小于0.8,望远镜成像质量受到严重的影响,系统无法正常工作。

8 结 论

针对非稳态风载对1.2 m地基望远镜成像质量的影响,提出了一种基于光学系统敏感度矩阵的光机系统动力学仿真集成分析的方法。采用最小二乘法推导出的光学元件刚体位移与其镜面节点关系的线性表达式,并对光学系统进行一阶线性化处理得到了望远镜系统光学敏感度矩阵,将此二者导入结构有限元模型中,进行了望远镜系统在非稳态风载作用下的频率响应分析。同时考虑主轴伺服控制和曝光时间对成像质量的影响,对横向位移量功率谱曲线进行了校正。以不同风速和俯仰角组合共16种工况下非稳态风载的功率谱密度作为输入,得到了像点相对成像面横向偏移量的随机响应曲线。这为光机系统的动力学集成仿真分析提供了一种新的解决方案。

参 考 文 献

- 1 Cheng Jingquan. Principle and design of astronomical telescope[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003.
程景全. 天文望远镜原理和设计[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
- 2 Yang Dehua, Xu Lingzhe, Xu Xinqi. Wind disturbance study on large astronomical telescopes[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 342-346.
杨德华, 徐灵哲, 徐欣圻. 大型光学天文望远镜风载作用分析[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 342-346.
- 3 Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, *et al.* Structure analysis of ground-based large telescopes [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(1): 138-145.
周 超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能分析[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(1): 138-145.
- 4 Pan Nian, Ma Wenli, Huang Jinlong. Numerical analysis of wind load on ground-based telescope[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 134-140.
潘 年, 马文礼, 黄金龙. 地基望远镜风载数值分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 134-140.
- 5 MacMynowski D G, Vogiatzis K, Angeli G Z, *et al.* Wind loads on ground-based telescopes[J]. Applied Optics, 2006, 45(30): 7912-7923.
- 6 Cho M K, Stepp L M, Kim S. Wind buffeting effects on the Gemini 8-m primary mirrors[C]. SPIE, 2001, 4444: 302-314.
- 7 Huang Bencai. The principle and application of wind resistant analysis of structures[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001: 14-17.
黄本才. 结构抗风分析原理及应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001: 14-17.
- 8 Rao Ruizhong, The propagation of light in turbulent atmosphere[M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 2005: 58-86.
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005: 58-86.
- 9 MacMynowski D G, Andersen T. Wind buffeting of large telescopes[J]. Applied Optics, 2010, 49(4): 625-636.
- 10 Yang Fei, Su Yanqin, Zhang Jingxu, Pier construction of 2 m aperture telescope[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 2990-2997.
杨 飞, 苏燕芹, 张景旭. 2 m 望远镜塔台的构建[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(11): 2990-2997.
- 11 Burge J H. An easy way to relate optical element motion to system pointing stability[C]. SPIE, 2006, 6288: 62880I.
- 12 Yang Xiaoxia, Yin Yumei, Meng Haoran, *et al.* Mount control for large photoelectric equipment by using acceleration feedback[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(4): 421-424.
杨晓霞, 阴玉梅, 孟浩然, 等. 利用加速度反馈的大型光电设备主轴控制技术[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(4):

421-424.

- 13 Lucke R L, Sirlin S W, San Martin A M. New definitions of pointing stability-ac and dc effects[J]. The Journal of Astronautical Sciences, 1992, 40(4): 557-576.
- 14 Tian Lisi. MSC. Nastran kinetic analysis guide[M]. Beijing: China Hydraulic and Hydropower Press, 2012: 101-140.
田利思. MSC. Nastran 动力学分析指南[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 101-140.
- 15 Wang Jun, Lu E, Wang Jiaqi. Coordinate transformation method on image motion of dynamic optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 1999, 7(6): 48-55.
王 俊, 卢 铿, 王家骐. 光学系统动态像点移动的坐标变换法[J]. 光学 精密工程, 1999, 7(6): 48-55.
- 16 Wang Zhile, Zhuang Xuxia, Zhang Lanqing. Numerical calculation and analysis of dynamic MTF[J]. Optical Technique, 2011, 37(5): 590-596.
王治乐, 庄绪霞, 张兰庆. 动态 MTF 的数值计算与分析[J]. 光学技术, 2011, 37(5): 590-596.