

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.12.025

大口径望远镜风载分析综述*

安其昌,张景旭,杨 飞,赵宏超

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘要:随着大口径望远镜研究的深入,风载对于望远镜的影响也越来越受到重视。为了更加全面、系统地研究风载对于大口径望远镜的影响,分别对于 3 种主流的风载研究分析方法进行了阐述。这 3 种方法分别为:功率谱研究方法,流体软件分析方法(CFD);以及数学建模外加实验修正的方法。对于功率谱方法,分析了风压谱都与统计学模型的差别,需要具体的建模与分析;对于流体软件的分析方法分析了其建模的精度问题。研究结果表明,通过谱方法以及流体软件模拟分析可以作为大口径望远镜的建设过程中的初期判据,在实际的建造过程中,需对于实际系统的风载响应进行测试。

关键词:大口径望远镜;风载;有限元;功率谱;响应函数

中图分类号:TH751

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)12-1649-04

Overview of wind load analysis of large telescope

AN Qi-Chang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, ZHAO Hong-Chao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at understanding the performance of the large telescope, those three basic methods to specify the wind load are shown while the response of the large telescope under wind was more and more interested by the engineers. The shortage and advantage of the three approach, namely, power spectral density method, computational fluid dynamics and modal model method were presented in the paper. Concretely, power spectral density method is the first method. According to this method, the wind spectrum cannot always satisfy the ideal model achieved from the statistics method. The computational fluid dynamics (CFD) is the second one for this method, major concerned thing is the modeling accuracy. The results indicate that for the next generation ground based telescope, the previous testing on the dummy mirror is necessary to processed to achieve the response to the wind load, after the PSD and CFD is applied.

Key words: large telescope; wind load; finite element analysis(FEA); power spectral density; response function

0 引 言

随着大口径望远镜的发展,风载的影响也得到了越来越多的关注。在上个世纪八十年代之前,对于风载的认识仅限于如何使之与望远镜不发生直接作用,即圆顶的开口大小与数量都控制得尽量低。但是随后的研究表明,一定程度的空气流动对于改善视宁度,所以圆顶的类型也由过去的封闭型逐渐演化为敞开与半敞开型^[1-5]。

近年来对于风载的影响主要集中在 3 个方面:①望远镜周围地形对于望远镜所受风载的影响;②望远镜圆顶内部的布局与结构对于作用到望远镜上的载荷的

影响;③不同的风载对于望远镜的机械结构与光学性能产生的不同影响。值得一提的是,第一方面的研究,主要是在望远镜选址的时候进行参考,但是由于其采样时间与传感器排布的限制,造成对站址的评价带有一定的局限性,往往对于最后的选择参考的意义有限,同时站址的选择是一个集合交通、地质,经济、文化的复杂过程,不能仅考虑风载这一项。对于第二方面,不同的圆顶结构对于外界风载的主要作用在于改变风载中不同频率分量所携带的能量,一般来说,当气流通过阻挡物时,其低频分量会明显削弱,相应地,其中高频分量会提高。对于第三方面的研究,是近年来研究的

收稿日期:2015-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11403022)

作者简介:安其昌(1988-),男,山西太原人,博士研究生,主要从事大口径光机系统检测装调方面的研究。E-mail:13943083982@163.com

热点,也是本研究论述的重点^[6-9]。

研究风载对于望远镜结构与成像能力的影响,主要的目的方面是对于之前已由的理论的验证与发展,另一方面是对于下一代大口径望远镜的建设进行指导。目前对于大口径望远镜风载分析的主要方法有功率谱法、流体有限元软件分析法以及实测标定的方法。功率谱法已经在大量的论述中进行了论述,但是实际上,由于所给出的结果只能具有统计学上的意义,针对特殊的工况并未给予足够的说明,在本研究的第 1 节中,对于功率谱实际的应用与局限做出了一定的说明。另一方面,对于流体软件的分析方法,其主要的问题在于建模的精度问题,该问题的具体论述会在第 2 节展开;最后,对于实际的望远镜建设来说,现场的测量的意义毋庸置疑^[10-17]。双子星望远镜(GEMINI)是加拿大、智利、巴西、阿根廷和澳大利亚共同出资建造的 8 m 级大口径望远镜,在美国与南美各有一台,其中 GEMINI South 在组装的过程中,Dr. cho 及其团队对于安装了模拟镜的望远镜进行了动力学响应测试。系统的激励源为外界风载,风载的测量使用的是位于模拟主镜的风压计;同时,系统的响应被若干位于望远镜上的加速度计拾取。在测量过程中,Dr. cho 对于实际测量的结果与传统的分析结果进行了对比,得出了很多有价值的结论^[18-19],该部分会在第 3 节进行论述。

本研究分别对 3 种主流的风载研究进行阐述,对于大口径望远镜进行风载分析。

1 基于功率谱的风载分析

由经典的谱分析理论认为,风载作用主要分为静风载与动态风载,静风载又称为静风压。两者的表达式如下所示:

$$P = \frac{1}{2} \rho c v^2 \quad (1)$$

式中: P —镜面上的静风压, ρ —空气密度, c —基于镜面尺寸以及空气雷诺数的系数, v —风速。

由上式可知,在该理论中,是假设风载一直处于单向作用的情况下,故通过平均作用可以得到该表达式,但是根据实际的测量的结果,由于望远镜结构的影响,风载的方向会发生变化,在较长时间的采用情况下,平均的风压趋近于零。这与没有考虑到风载反向的原始假设相距甚远。

实际中分析动风载的统计学模型有许多种,比如 Kolmogorov 谱与改进 Kaimal 谱。改进 Kaimal 谱如下所示^[20-22]:

$$\frac{nS(n)}{u_f^2} = \frac{100f}{(0.44 + 33f)^{5/3}} \quad (2)$$

地面摩擦剪切风速:

$$u_f^2 = \frac{KU(z)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3)$$

式中: z_0 —地面粗糙度。

归一化无量纲频率:

$$f = \frac{nz}{U(z)} \quad (4)$$

式中: n —频率, $U(z)$ —离地高度 z 处的平均风速。

当风作用到大型结构上,比如大型天文望远镜,众多的结构与建筑,风速的变化比之前假设的要复杂的多。

同样,由于没有考虑风载的方向变化,在大口径系统中,主镜的正面与背部的差异越来越大,如使用谱进行分析的时候,在风载施加与镜面背部的情况下,实际的响应谱会出现额外的尖峰,额外的尖峰如图 1 所示。

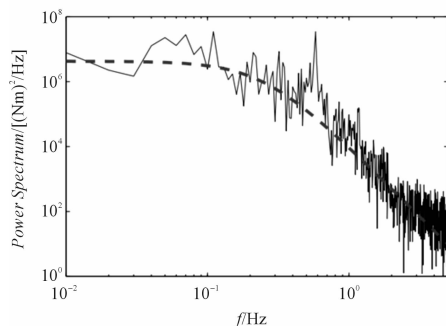


图 1 理论谱线与实际谱线

即使在不考虑风向复杂变化的情况下,风压谱也不一定可以完美地符合统计学模型,实践表明,只有当风速较快并且圆顶完全打开的情况下,主镜镜面上的谱才可以比较好地符合卡尔莫罗夫谱。其他的情况或多或少会产生一定量的偏移。卡尔莫罗夫谱谱线与谱线拟合如图 2 所示。

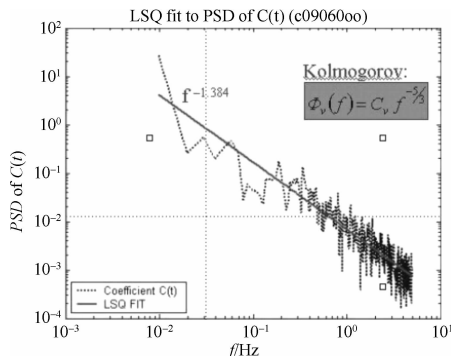


图 2 谱线与谱线拟合

2 CFD 软件分析

现在普遍的思路为建立粗略的模型,之后使用 CFD 软件来计算望远镜各个重要边界上的载荷,之后再建立详细的有限元模型,并将之前的所得到的边界

条件施加在详细的有限元模型之上,之后得到结构的响应。流体模型计算如图 3 所示。问题的重点在于施加外部载荷点的选取以及初始简化模型的简化程度。这里涉及到了模型简化的问题,如果模型过于简化,在流体软件里的计算相对简单,但是对于详细有限元模型,其计算精度就很难保证;相对应地,如果在流体软件中的模型十分详细,将对应的关键节点导入有限元模型的时候,会得到较好的分级结果,冗余的自由度会大为减少,但是,流体软件的计算能力就会成为制约一切的瓶颈。

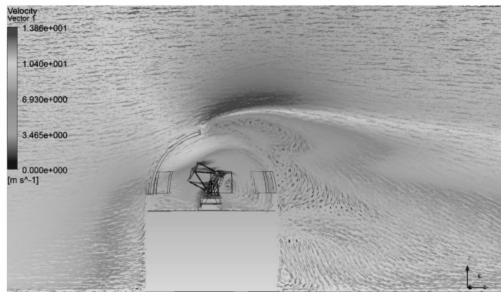


图 3 流体模型计算

值得一提的是,使用风洞技术来获得施加在望远镜模型上的载荷,之后再进行分析,可以在一定程度上解决这个问题,但是气流雷诺数的差别还是会影响到最后模型的准确度,故对于实际站址及望远镜的测量是最准确、最直观的。考虑到实际测量也需要在特征点上布置传感器,这一过程与望远镜动力学模型减缩的过程极其相似,故对于实际望远镜的测量,又可以反过来推动仿真技术的发展。

3 实际望远镜的标定

GEMINI 的有限元模型以及传感器布置:在主镜上有 13 个风压传感器,在获得了风压数据之后,利用前八阶 Zernike 多项式来拟合,进而分析风载输入和输出的关系。

对于系统的响应,本研究采用了多个加速度计来拾取系统的三维运动。具体来说,在次镜的底部沿光轴方向安放三向加速度计,这是因为对于系统来说,地基是一个极大质量的刚体,故当有外部激励时,靠近底部的响应最小,相应的,经过整个系统之后,次镜末端的传感器获得的响应中包含了望远镜所有的特征频率。在环梁上有 4 个传感器,可以测得除刚体位移之外的模式。支撑环梁的桁架上也有若干加速度计来获得其运动规律。

响应测试试验示意图如图 4 所示。

一般来说,地平式望远镜叉臂的摇摆模式是最容易产生的几阶模式之一,但是 GEMINI 望远镜测量时,

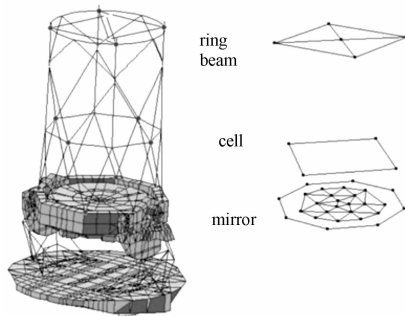


图 4 响应测试试验

并没有在叉臂上布置传感器,主要考虑的是,四通刚度非常好,故两侧的叉臂被四通连接成为一体。

在测试开始阶段,本研究首先检测了所有通道是否通畅,以及是否与结构完全连接。具体检测的方法是检查增益,如果物理位置上相差不多的两个传感器其增益应该相差不多。

最后测量的结果使用累积功率谱的方法来表达,即利用功率谱密度另外一个定义方法:

$$RMS_f^2 = \int_f^{\infty} PSD \cdot df \quad (5)$$

由图可知在超过 15 Hz 之后,系统的响应下降的尤其的快,故只需要考虑 15 Hz 以内的模式。

根据实测,第一阶模式为方位轴的摇摆为 1.83 Hz。

在测量的过程中,还得到一些对于 8 m 级口径系统的经验性结论。首先,对于相同的方位角,当俯仰角变化时,对于结果的影响并不大;其次,在微风情况下,主镜边缘的运动大约为 1 μm RMS,次镜的运动大约为几十微米。

通过实际测量来获得风载数据还有另外一项重要的作用就是确定当地风载的相关尺度。结构函数是一种之前已经存在的数学工具,自从上个世纪九十年代之后,越来越广泛的用于了大口径望远镜的各项评价之中,如在加工大口径光学元件的过程中,利用结构函数就可以分辨出在何种尺度还存在着起伏。将此数学工具用于风载的评价,可以看出,GEMINI 在该站址的特征尺度大约为 2 m 左右。

风压结构函数如图 5 所示。

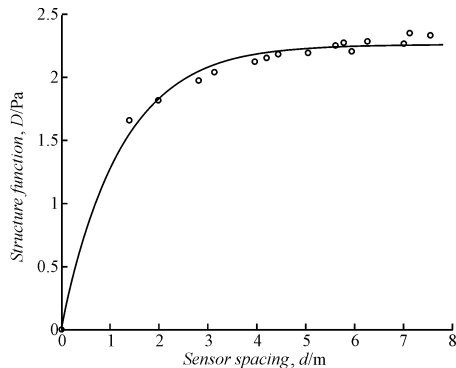


图 5 风压结构函数

4 结束语

对于大口径的风载分析,主要来源于土木工程中的风致结构振动,望远镜主要受到的载荷主要可以分为平均风与脉动风。与土木工程不同的是,对于可以调节方位、俯仰的大口径望远镜,脉动风对于系统观测的影响更大,同时,由于望远镜主镜的特殊性,风载会引起主镜变形,这也是大口径望远镜风载需要特别研究的原因。

本研究介绍了大口径望远镜风载分析的几种方法,其中以实测法为重点,阐述了 GEMINI 望远镜在装配过程中进行的风载响应测试,并介绍了累计功率谱以及结构函数这两种结果分析的数学工具。本研究的综述,对于大口径望远镜的建设工作具有一定的指导意义。

参考文献 (References):

- [1] BECKERS J M, WILLIAMS J T. "Performance of the Multiple Mirror Telescope (MMT) III. Seeing experiments with the MMT," *Advanced Technology Optical Telescopes* [C]. SPIE 332 Tucson, AZ, 1982:16-23.
- [2] WOOLF N J, ULICH B L. "Gone with the wind, or sailing and seeing with a giant telescope," *Site Testing for Future Large Telescopes* [C]. ESO Proc. 18, La Silla, Chile, 1983:163-183.
- [3] GILLINGHAM P R. Seeing Measurements at the Anglo-Australian Telescope[C]//*Advanced Technology Optical Telescopes II*, SPIE 444. London, England: [s. n.], 1983:165-174.
- [4] CAO Xiao-tao, SUN Tian-yu, ZHAO Yun-long et al. Current status and development tendency of image stabilization system of large aperture space telescope[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5):739-748.
- [5] BENISTON M, HERTIG J A. Analysis and design of the wind-shield for the ESO Very Large Telescope [C]//*Advanced Technology Optical Telescopes III*, SPIE 628. Tucson, Arizona: [s. n.], 1986:360-368.
- [6] SCHNEERMANN M. VLT Enclosures Wind Tunnel Tests and Fluid Dynamic Analyses [C]//*Advanced Technology Optical Telescopes V*, SPIE 2199, Kona, Hawaii: [s. n.], 1994:465-476.
- [7] WANG Fu-guo, YANG Fei, ZHAO Hong-chao, et al. Progress in TMT M3 System [J]. *Chinese Optics*, 2013, 10(6):643-651.
- [8] ITOH N, MIKAMI I, NOGUCHI T, et al. "Mechanical structure of JNLT—Analysis of mirror deflection due to wind loading," [C]//*Advanced Technology Optical Telescopes IV*, SPIE 1236, Tucson, Arizona: [s. n.], 1990:866-877.
- [9] ZHAO Hong-chao, ZHANG Jin-xu, YANG Fei, et al. Pre-loading eight-van spider for supporting structure of secondary

mirror[J]. *Opt. Precision Engineering*, 2013, 21(5):1199-1204.

- [10] David Smith. "Implications of the Nobeyama Wind Testing Results for the GSMT," NIO-RPT-0005 [M]. AURA New Initiatives Office, 2002.
- [11] WU Xiao-xia, LI Jian-feng, SONG Shu-mei et al. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(9):2451-2457.
- [12] CHO M K, STEPP L, KIM S. Wind buffeting effects on the Gemini 8m primary mirrors[C]//*Opto mechanical Design and Engineering 2001*. Hathaway, SPIE 4444, San Diego, California: [s. n.], 2001:302-314.
- [13] DOUGLAS R N, SEBAG J, WARNER M, et al. Wind Induced Image Degradation (Jitter) of the LSST Telescope [J]. *SPIE Ground based and Airborne Telescopes II*, 2008, 7012(1):1-11.
- [14] SOBEK R D. Mitigating wind induced telescope jitter[J]. *SPIE Acquisition, Tracking and Pointing*, 2005, 5810(1):1-10.
- [15] IRARRAZAVAL B, BULERI C, JOHNS M. Wind responses of Giant Magellan telescope[J]. *SPIE Modeling System Engineering and Project Management for Astronomy VI*, 2014, 9150(22):1-18.
- [16] LIAO Hong-bo, FAN Shi-xun, Hei Mo, et al. Modeling and parameter identification for electro-optical stabilized platform servo systems [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2):477-484.
- [17] KAN F W, EGGERS D W. Wind Vibration Analyses of Giant Magellan Telescope [J]. *SPIE Modeling System Engineering and Project Management for Astronomy II*, 2006, 6271(1):1-13.
- [18] CHO M K, STEPP L, KIM S. "Wind buffeting effects on the Gemini 8m primary mirrors," *Proc. SPIE Optomechanical Engineering*, 2001.
- [19] CHO M K, STEPP L M, SMITH D R. Wind Loading of Large Telescopes [C]//*SPIE symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation*. Waikoloa, HI: [s. n.], August, 2002:352-367.
- [20] DOUGLAS E, ADAMS, MARK A. Rumsey "Theoretical analysis of acceleration measurements in a model of an operating wind turbine" [J]. *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems*, 2010(12):76431F.
- [21] FORBES F, GABOR G. "Wind Loading of Large Astronomical Telescopes" [C]//*Proc. SPIE Advanced Technology Telescopes*, 332, 1982:198-205.
- [22] M Mynowski, D G, VOGIATZIS, K ANGELI, G Z, et al. Wind Loads on Ground-Based Telescopes[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(30):7912-7923.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

安其昌,张景旭,杨 飞,等. 大口径望远镜风载分析综述[J]. *机电工程*, 2015, 32(12):1649-1652.

AN Qi-Chang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, et al. Overview of wind load analysis of large telescope[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(12):1649-1652.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>