

文章编号 1004-924X(2014)11-2990-08

2 m 望远镜塔台的构建

杨 飞^{1*}, 苏燕芹^{1,2}, 张景旭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 100039)

摘要: 分析了国内外地基大口径望远镜的站址选择和塔台建设, 对 2 m 口径望远镜的塔台建设进行了研究。首先, 讨论了望远镜的视宁度和塔台高度之间的关系, 通过对该望远镜所在地的大气视宁度等因素的衡量, 确定塔台高度为 13 m。然后, 根据 $\Phi 2$ m 级口径望远镜塔台建设的需求, 建立了计算机仿真模型, 采用有限元软件 Ansys 进行仿真分析, 提出了一种载荷为 30 t 的情况下, 谐振频率达到 30 Hz, 并且能够承受 5 级地震灾害和一定风载的塔台和地基建设方案。分别采用谱分析和随机振动的方法研究了设计的塔台在地震、风载等自然条件下的响应, 结果证明该方案能满足 $\Phi 2$ m 级口径望远镜的站址建设要求并对下一步开展的 $\Phi 4$ m 级口径地基大口径望远镜的塔台和地基建设具有参考作用。

关键词: 望远镜; 塔台; 视宁度; 地震; 风载

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20142211. 2990

Pier construction of 2 m aperture telescope

YANG Fei^{1*}, SU Yan-qin^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: yangflying@163.com

Abstract: The site choice and pier foundation of existing ground based large aperture telescopes were analyzed and how to construct a pier for a 2 m aperture telescope was explored. Firstly, the relationship between the astronomical seeing and the pier height of a telescope was discussed and the pier height was determined to be 13 m by measuring the astronomical seeing of the seat of the telescope. Then, according to the requirements of pier construction of the 2 m aperture telescope, a simulation model was established, and the simulation analysis was performed by Ansys. A pier and ground base design scheme with a resonant frequency more than 30 Hz under the load condition of 30 t was proposed to resist a 5 level earthquake and certain wind load. Finally, the spectral analysis and random vibration method were used to research the responses of the pier designed to the earthquake and certain wind loads. The results show that the scheme proposed meets the demands of 2 m aperture telescope for pier foundation and it would provide a reference for construction of a $\Phi 4$ m aperture telescope.

Key words: telescope; pier; seeing; earthquake; wind load

收稿日期: 2013-12-18; 修订日期: 2014-02-05.

基金项目: 中国科学院三期创新工程资助项目

1 引 言

塔台的高度及稳定性是影响望远镜观测效率的关键因素之一。在望远镜观测站址选定的条件下,合理确定塔台的高度和结构形式,保证良好的视宁度条件,满足振动要求和抗地质灾害的能力,是现代大型望远镜设计的必要流程^[1-2]。许多大型望远镜,例如 ATST、EST、GEMINI 等在进行塔台建设时,都反复对观测站址在不同高度下的视宁度条件等做了多年的统计研究,并且对塔台的各种结构形式进行了深入分析^[3-4]。我国云南天文台在进行站址选择时也对不同地区、不同高度的温度脉动、成像清晰度和稳定度做了大量的统计分析,结果表明在不同高度段这些参数差别很大^[5]。本文以 2 m 口径望远镜塔台建设为研究对象,对望远镜的视宁度和塔台高度之间的关系做了深入研究,并对塔台地基的结构形式进行了反复设计和优化,以保证其在满足静承载能力外,自身的谐振频率达 30 Hz 以上,在 5 级地震和当地风载条件下不会发生振动破坏。

2 视宁度与塔台高度

大量的实验和研究表明,地表由于受到太阳照射引起近地面大气温度分布不均匀,是影响大气视宁度稳定性的主要因素之一。望远镜如果位于该观测高度范围内,容易造成像面抖动、成像模糊等问题,选择合理的高度避开地表湍流可极大改善视宁度条件。一般用来衡量视宁度的标准有大气相干长度 r_0 ,大气视宁度(Seeing Disk, SD),格林伍德频率(Greenwood Frequency, GF)和等晕角(Isoplanatic Angle, IA),其定量描述一般采用 Fried 提出的大气相干长度 r_0 的公式进行描述^[6]:

$$r_0 = \left[1.67 \lambda^{-2} (\cos \gamma)^{-1} \int C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

式中: λ 为波长, γ 为天顶距, z 为高度, C_n 为折射率的结构常数,其值由折射率结构函数确定。较为常用的另一种衡量视宁度的参数全宽半高(Full Width at Half Maximum, FWHM)也可通过大气相干长度 r_0 计算得到:

$$FWHM = 0.98 \frac{\lambda}{r_0}. \quad (2)$$

优良站址的大气相干长度一般在 10 ~ 30 cm,对应的视宁度为 1~0.35^{''}^[6]。

除了上述方法,最简便的方法是采用小望远镜观察单星的星象,采用 Pickering 视宁度等级对视宁度进行分类判断。实际使用时,只需对恒星进行观测,并将观测到的星象与 Pickering 视宁度等级对照,就可得到相应的大气视宁度等级,一般要求视宁度条件为 6~7 级,此时对应的高度可确定为塔台高度^[7]。

通过对现有的大口径望远镜塔台资料的研究,按照不同观测站址对塔台的高度进行了统计,如见表 1 所示。

表 1 望远镜塔台高度

Tab. 1 Heights of telescope piers

望远镜	口径/m	位置	国家	塔台高度/m
DOT	1.4	La Palma	西班牙	15
ATST	4.0	La Palma	西班牙	28(地面到俯仰轴)
SST	1.0	La Palma	西班牙	17
Keck	10.0	Mauna Kea	美国	约 20~25 之间
Gemini	8.0	Mauna Kea	美国	20(地面到俯仰轴)
NGCFHT	10.0	Mauna Kea	美国	24
Subaru	8.0	Mauna Kea	美国	23.2
SOAR	4.1	Chile	智利	15
VLT	8.0	Chile	智利	约 12~15 之间
LSST	8.4	Chile	智利	15.65
ARIES	3.6	India	印度	13
EST	4.0	Canary Islands	西班牙	40(到俯仰轴)
GREGOR	1.5	Tenerife	西班牙	20
DCT	4.2	Arizona	美国	15
Antarctic telescope	2.4	Antarctica	南极	30

注:塔台高度中未标注的高度为地面到塔台平面的高度,不包括塔台平面到望远镜俯仰轴的高度。

从表 1 可以看出,位于 La Palma 的望远镜从

地面到俯仰轴的高度一般为 20 m 左右,位于 Mauna Kea 的望远镜一般为 20~25 m,位于 Chile 的望远镜一般为 15~20 m,这些高度的选择需要根据该站址的视宁度条件来决定。以位于 La Palma 的 ATST 望远镜为例。通过对该站址的大气环境测量数据分析可知,大气相干长度 r_0 是高度的函数, $r_0 = 6$ cm 是该望远镜采用的自适应光学系统最低视宁度条件,故以此为基础,在不

同高度位置进行了视宁度的检测。实验表明,在 8,18,28 和 38 m 高度,视宁度条件分别改善了 13%,26%,36% 和 42%。同样,观测条件优良 ($r_0 > 15$ cm) 的天数也随着高度的增大,分别增长了 1%,2%,3% 和 5%。图 1 所示为在 3 个不同观测位置,随着高度的增长, r_0 达到一定值的天数在总观测天数中的比例^[3]。

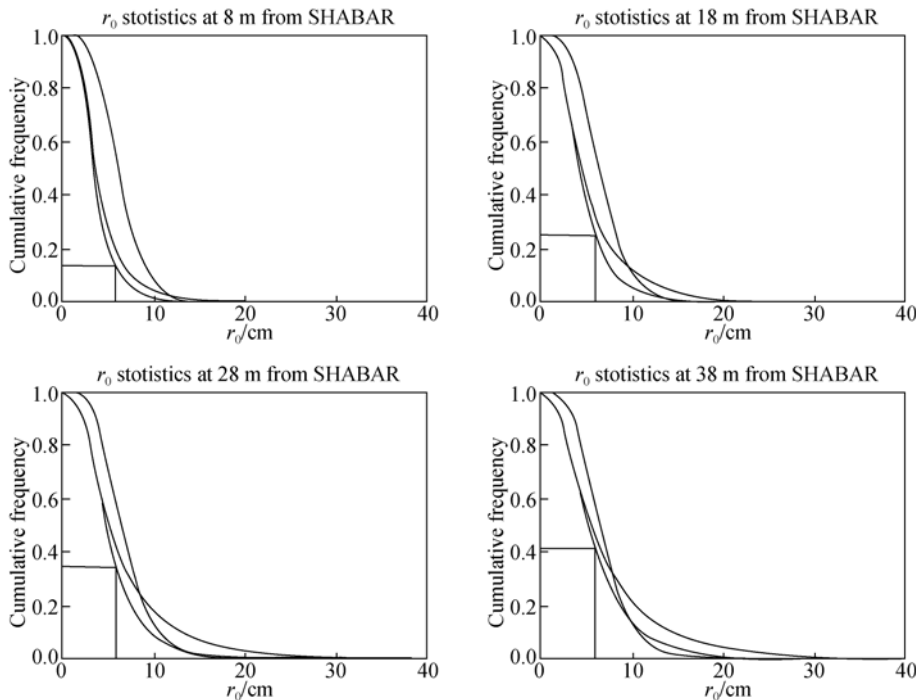


图 1 选择 ATST 站址时,3 个不同地区在高度为 8,18,28 和 38 m 时 r_0 达到一定值的天数在总观测天数中的比例

Fig.1 Cumulative frequencies of r_0 with a certain value for heights of 8, 18, 28 and 38 m as measured during the ATST site test campaign at three different locations

由图 1 可知,以 La Palma 地区为例,选择 r_0 为 6 cm,观测高度分别为 8,18,28 和 38 m 时,达到此观测条件的天数分别占总观测天数的 14%,26%,35% 和 42%,可见视宁度条件随着高度的增加有明显改善。但某个地区不同高度下的视宁度条件一般需要通过 5~20 年的观测记录才能获得较准确的值。而且塔台的成本也随着高度的增加迅速增加,因此需要在成本与视宁度条件之间选择一个平衡^[4-5]。

2 m 口径望远镜拟建台址所在地区的平均海拔高度为 650 m,经多次测试得到,在高度为 10~15 m 时,该地区的大气平均视宁度在 1.2'' 左右,

最终确定塔台高度为 13 m。

表 2 优良台址的大气相干长度 r_0

Tab.2 Atmospheric coherent lengths of fine positions

台址	海拔/m	大气相干长度 r_0 /cm	平均视宁度/(")
Mauna Kea	4 200	22.4	0.45
Cerro Tololo Chile	2 200	14.8	0.68
Arizona	2 600	14.4	0.7
Tenerife	2 400	14.2	0.71
La Palma	2 400	13.8	0.73

3 塔台结构形式

塔台除了支撑望远镜,并保持一定的稳定性外,还需要考虑到内部光路的传输。因此在结构上可分为两个部分:地上部分用来实现光路的传输,地下部分支撑整个结构。典型的塔台可分为两种:一种是将基桩打入土壤母岩中,这种结构可认为是一个刚度和质量无限大的质量块,通常用于土壤母岩较容易得到的地区;另一种是将混凝土灌注到土壤中,改善承载地基的材料性能^[8-9],正在夏威夷岛 Mauna Kea 山顶建造的 Subaru 望远镜基墩,地表有 2.5 m 厚的碳渣层,科学家通过在站址上混入水泥进而加强火山岩的强度,提高了系统的最小谐振频率^[10]。

从结构形式上,塔台可分方形、空心圆柱、空心圆锥等,也有将桁架和混凝土结构混合使用的,例如 EST 望远镜的塔台。通过对各种结构形式的设计和仿真发现,圆锥形塔台的稳定性和刚度要远远好于圆柱形^[3]。故最终采用圆锥形的塔台结构形式。

根据 2 m 口径望远镜的光学设计要求和机械结构尺寸,最初的塔台方案如图 2 所示,采用的是从底部到顶部均匀壁厚的结构。通过仿真发现,塔台静承载能力足够,但刚度很低,一阶频率仅为 14.213 Hz,极易与控制系统的带宽重叠发生共振,因此需要进一步优化,改进后的塔台截面如图 3 所示。

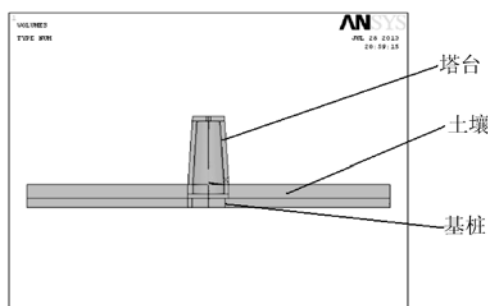


图 2 初期塔台模型

Fig. 2 Pier model original

由图 3 可见,最终的方案中除了对塔台的锥度和壁厚做了改进之外,还在中间增加了一些环

形的加强筋,用来提高塔台抗风载的能力。

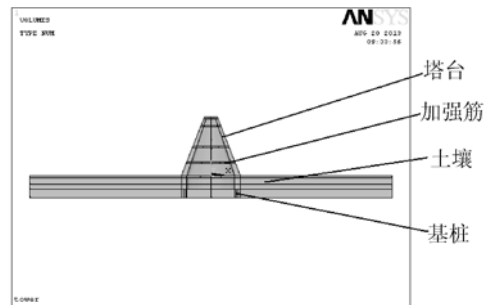


图 3 改进后塔台模型

Fig. 3 Pier model improved

4 静态性能及模态特性

对塔台进行性能分析时,应充分考虑周围的土壤地质条件对塔台结构的影响,LSST 和 TMT 圆顶在分析时均采用了该办法。考虑到望远镜周围的地质和地形条件,其塔台的有限元模型分别如图 4、5 所示。其中 LSST 在安装到基墩上后的整体谐振频率为 8 Hz。参考以上模型,本文采用有限元分析软件 ANSYS,建立了如图 3 所示的塔台有限元模型,望远镜用集中质量点来代替,重量为 30 t,采用很大的质量块模拟土壤^[10],塔台和土壤采用三维实体单元划分网格,有限元模型如图 6 所示。

对系统施加重力载荷,可得系统整体下沉量为 0.947 mm,最大应力分布在塔台上部的圆锥与下部圆柱部分的衔接处,为 0.276 MPa,远低于材料的应力极限。

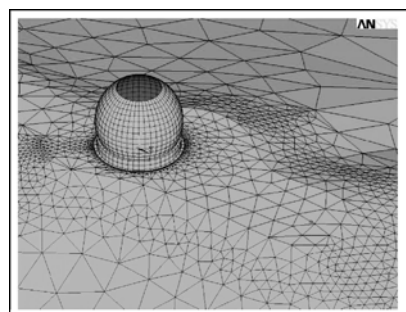


图 4 TMT 圆顶位于山顶的有限元模型

Fig. 4 Finite element model of TMT enclosure

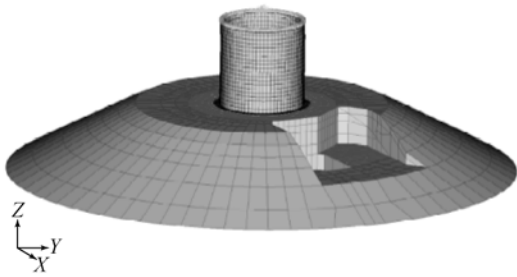
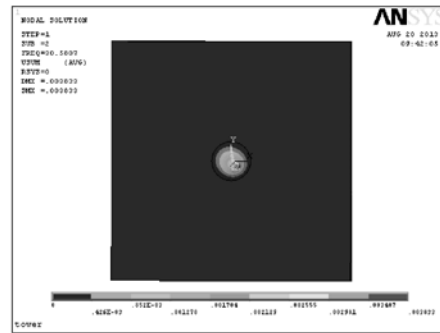


图 5 LSST 基墩位于山顶的有限元模型

Fig. 5 FEA model of LSST pier on mountain



(b) 二阶振型 ($f=30.692$ Hz)

(b) The second order vibration model ($f=30.692$ Hz)

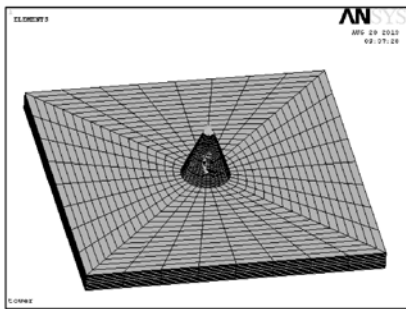
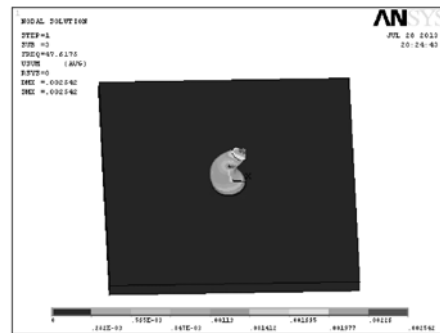


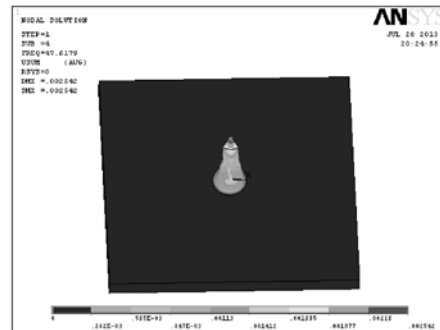
图 6 系统有限元模型

Fig. 6 Finite element model of system



(c) 三阶振型 ($f=47.450$ Hz)

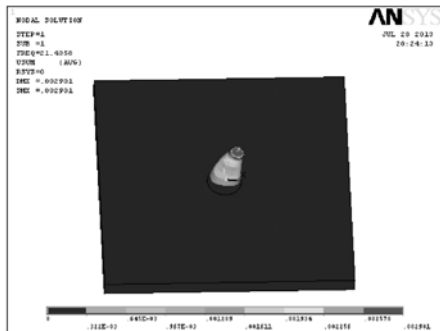
(c) The third order vibration model ($f=47.450$ Hz)



(d) 四阶振型 ($f=47.472$ Hz)

(d) The fourth order vibration model ($f=47.472$ Hz)

塔台为典型的细高型结构,高度远大于直径,因此很难保证系统具有很好的刚度。通过对塔台结构不断优化后发现,采用不等厚度的壁厚,底部较厚,顶部较薄,并加大底部和顶部圆锥的面积比,可以提高系统一阶模态,减小其振动的幅度,从而极大提高系统的稳定性。系统的前 4 阶振型如图 7 所示。



(a) 一阶振型 ($f=21.436$ Hz)

(a) The first order vibration model ($f=21.436$ Hz)

图 7 前四阶振型图
Fig. 7 The first four vibration models

由图 5 可知,系统的前两阶振型为塔台的晃动,一阶频率为 30.677 Hz,比图 1 所示的结构提高了很多,大大降低了谐振的风险。

5 抗地震和风载能力分析

5.1 抗震能力分析

除了满足静力学要求和保持一定的一阶频

率,望远镜的工作寿命一般较长,在工作期限内能够抵抗一定强度的地震、强风等地质灾害。按照设计要求,2 m 口径望远镜塔台应能够抵抗 5 级地震。地震波分为横波和纵波,一般选择纵波的幅值为横波的 65%。根据《抗震建筑设计规范》,结构阻尼为 0.05,场地类别为第三组 III 类场地,5 级地震的强度一般为 6°左右,按 6°多遇地震进行分析,其水平影响系数最大值为 0.04,地震响应谱如图 8 所示。

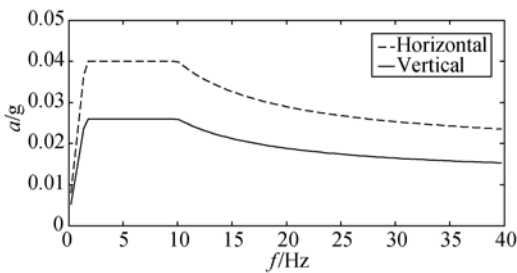


图 8 地震波响应谱

Fig. 8 Seismic response spectrum

分别将地震加速度的方向定义为整体坐标系下的 X,Y,Z,计算地震沿 3 个方向单独作用下的结构响应,最后将 3 个方向的响应叠加,得到系统的最大响应值。经过计算发现,系统在承受 3 个方向地震同时作用时结构响应最大,最大位移为 1.15 mm,最大应力为 0.32 MPa,位移与应力分布分别如图 9、10 所示。

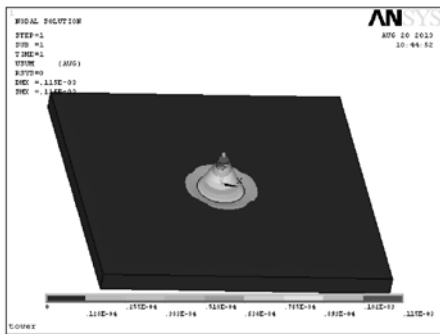


图 9 最大位移响应

Fig. 9 Maximum displacement response

可以看出,最大位移发生在望远镜上,主要变形仍然为塔台的晃动,但晃动幅值较小;最大应力分布在塔台上部圆锥和下部圆柱的结合面,但远

小于材料许用应力,可以保证望远镜系统的安全性要求。

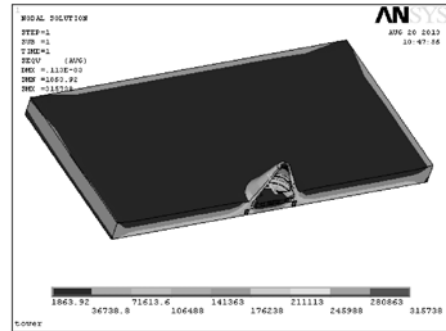


图 10 最大应力响应

Fig. 10 Maximum stress response

5.2 抗风载能力分析

风载是干扰望远镜工作的主要影响因素之一,风载的能量多分布在低频区,较接近塔台和望远镜的一阶频率并与控制带宽相近,故需要考虑望远镜所在地区的基本风压和风速,避免发生共振。著名的 ATST、GST、LSST 都对风载的影响进行了深入分析。在进行风载分析时,通常将风载看成静态风载和动态风载共同作用,静态风载压力为:

$$p=0.5 \cdot \rho \cdot V_m^2. \tag{3}$$

动态风载一般通过功率谱的方式施加到结构上,然后叠加得到风载的总作用效果。用于描述天文望远镜随机风载分析的最常用的功率谱是 Simiu 能量谱,表达式为:^[12-14]

$$S(f) = \frac{\left(\frac{v_w^2}{f}\right) 200n}{(1+50n)\frac{5}{3}}. \tag{4}$$

经过推导可得随机风速的压力谱为:

$$S_p(f) = 4 \left(\frac{p}{v_z}\right)^2 S(f) \chi_a^2(f). \tag{5}$$

通常,静态风载只考虑对镜面面型的精度影响,对塔台的影响可忽略,故只考虑动态风载对系统的影响。2 m 口径望远镜所在地新疆喀什,观测站高度为 1 300 m 左右,周期为 50 年的平均风压的标准值 $p=0.55$ MPa,通过计算可得,基本风速为 30.23 m/s,得到该随机风载的压力谱如图 11 所示。

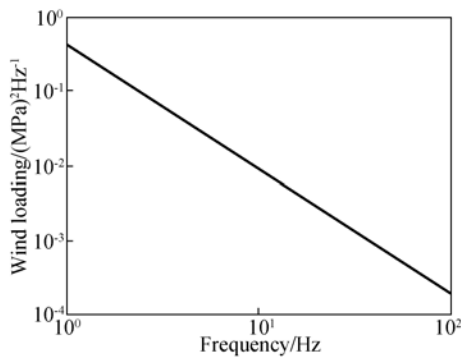


图 11 随机风载功率谱

Fig. 11 Random wind load spectrum

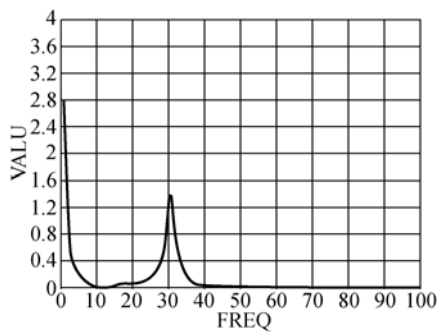


图 12 望远镜质点的位移 PSD 曲线

Fig. 12 PSD curve of the telescope mass point

利用 Ansys 软件进行随机响应分析,将风载方向定义为沿总体坐标系的 X 方向,在塔台的迎风面节点上施加风载压力谱,代表望远镜的集中质量点随频率变化的位移 PSD 曲线如图 12 所示。可以看出,望远镜在第一阶模态 ($f = 30.692 \text{ Hz}$) 附近发生最大响应,最大位移值为 $0.138 \mu\text{m}$,可见风载对整个系统的影响很小,可忽略。

6 结 论

本文以 2 m 口径望远镜的地基塔台建设为研究对象,探讨了塔台高度和视宁度的关系,总结了视宁度衡量方法。通过对该望远镜所在地的大气视宁度等因素的衡量,最终确定塔台高度为 13 m。考虑到结构的固有频率,本文通过对塔台结构形式的优化,实现了一阶频率达到 30 Hz 以上,为控制系统的设计留出了余量。另外,分别采用谱分析和随机振动的方法研究了塔台在地震、风载等自然条件下的响应,保证了望远镜的安全性。

参考文献:

- [1] 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.
CHENG J Q. *Principle and Design of Large Telescope*[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 327-336.
ZHANG J X. Overview of structure technologies of large aperture ground-based telescope [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 327-336.
- [3] BETTONVIL F C M, CODINA R, *et al.*. The pier and building of the European Solar Telescope (EST) [J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773334-1-12.
- [4] MATT M, FRED G, RICHARD K. The Gemini 8-M Telescopes Project[J]. *SPIE*, 1997, 2817: 15-23.
- [5] 吴铭蟾, 蒋治中, 李治凯. 太阳精细结构望远镜塔台高度的确定[J]. 云南天文台台刊, 1979, 3: 21-30.
WU M ZH, JIANG ZH ZH, LI ZH K. Determination for tower height of a solar fine structure telescope [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 1979, 3: 21-30. (in Chinese)
- [6] PIERRE Y, BELY. *The design and construction of large optical telescope* [M]. New York: Springer, 2003.
- [7] 马琳, 刘忠, 伦宝利, 等. 对 Pickering 视宁度等级判定法的补充[J]. 天文研究与技术, 2007, 4(4): 395-399.
MA L, LIU ZH, LUN B L, *et al.*. Supplement to Pickering seeing grade discriminant [J]. *Astronomical research & Technology*, 2007, 4(4): 395-399. (in Chinese)
- [8] 张景旭. 地基望远镜塔台圆顶结构形式及设计原则[J]. 中国光学, 2012, 5(2): 126-132.
ZHANG J X. Structure types and design principles of ground-based telescope enclosures [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 126-132. (in Chinese)

- [9] DOUGLAS R, NEILL, VICTOR L, KRABBEN-DAM. LSST telescope mount & pier design overview [J]. *SPIE*, 2010, 7733:77330F-1-77330F-1.
- [10] FUMIO T, YUKIHIRO K, HIROSHI K, *et al.*. Stiffness of the ground improved to support the pier of JNLT atop Mauna Kea [J]. *SPIE*, 1994, 2199: 404-413.
- [11] GENADY S, DOUG G, MACMYNOWSKI, *et al.*. Finite element analysis of TMT vibrations transmitted through telescope-enclosure-soil interaction [J]. *SPIE*, 2008, 7017: 70171Y-1-12.
- [12] 周超,杨洪波,吴晓霞,等. 1.2 望远镜风载作用分析[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 889-893.
ZHOU CH, YANG H B, WU X X, *et al.*. Influence of the wind loading on 1.2 m telescope [J]. *Infrared and laser engineer*, 2011, 40(5): 889-893. (in Chinese)
- [13] 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.
YANG D H, XU L ZH, XU X Q. Wind disturbance study on large astronomical telescope [J]. *Optical Technology*, 2009, 35(3): 342-346. (in Chinese)
- [14] 周超,杨洪波,吴晓霞,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.
ZHOU CH, YANG H B, WU X X, *et al.*. Structure analysis of ground-based large telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 138-145. (in Chinese)

作者简介:



杨 飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,副研究员,主要从事大口径光电望远镜光机系统方面的研究。E-mail: yangflying@163.com



苏燕芹(1987—),女,陕西宝鸡人,博士研究生,2009年于陕西农林科技大学获得学士学位,主要从事大口径望远镜结构设计。E-mail: suyanqin0909@163.com