

地基望远镜塔台圆顶结构形式及设计原则

张景旭

(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:综述了地基望远镜塔台圆顶的作用及功能,给出了台址选择的基本原则。介绍了国外典型塔台圆顶的结构型式、工作特点和适用环境,以3.67 m口径先进光电系统望远镜塔台圆顶为例,分析了圆顶内热控措施的特点,从而提出了现代望远镜塔台圆顶的热设计指导原则及设计时应考虑的相关因素。最后,对望远镜基墩的设计及分析方法进行了探讨。

关键词:地基望远镜;塔台;圆顶;基墩;热设计

中图分类号:TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20120502.0126

Structure types and design principles of ground-based telescope enclosures

ZHANG Jing-xu

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

* Corresponding author, E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn

Abstract: This paper reviews the functions of telescope enclosures in brief and summarizes the universal principle of observatory site selection. Then, it introduces the structure types, working characteristics and environmental conditions of typical telescope enclosures at abroad. By taking an enclosure with an aperture of 3.67 m in the advanced electro-optical system as an example, the thermal control scheme for the enclosure is analyzed, and the golden rule and methods of thermal design of modern telescope enclosures are proposed in detail. Furthermore, several kinds of key factors to be taken into account in design are pointed out. Finally, the design and analysis method for telescope piers are also discussed.

Key words: ground-based telescope; tower; enclosure; foundation pier; thermal design

1 引言

地基光学望远镜需要有圆顶保护以使其免遭光照、雨雪、强风、灰尘的侵害。圆顶设计应满足以下几个条件:(1)在结构上允许望远镜在各个方向上自由转动接近天空,减少热对望远镜的影响;(2)圆顶要提供设备控制实验室及辅助设施的容纳空间;(3)圆顶及镜面处视宁度要尽可能小。圆顶及望远镜的很多特征均是基于这种思想设计的,一般情况下塔台圆顶及相关建筑的价值要占整个观测站的20%~30%。

使用环境要求苛刻是大口径望远镜的一个显著特点。作为大型高档设备,要使设备发挥出应有的效能,必须有优良的环境条件作保证。从上世纪50年代起,为了充分发挥望远镜的最大效率,各国天文学家就十分重视天文台址的选择。衡量台址的好坏主要有以下几个指标:(1)天气情况,要保证一年至少有200多天可观测的好天气。(2)好的大气视宁度条件。由于温度及风的影响,大气折射率时刻都在变化,这使得到达望远镜口径的光强度及方向也不断变化,这种现象被定义为视宁度。大气视宁度是衡量台址优劣的最重要指标,理想台址的大气视宁度应在1"以内。由于海拔高度低的台址光经过的大气层厚,大气视宁度差,因此,建设台址多数选在高山之巅。(3)尽可能避开人类活动密集的地区,减少天光背景及大气污染的影响。(4)避开地震带,保证地基坚固稳定。(5)台址区的供电、供水、交通及相关设施要满足基本生活需求。世界上主要的光学台址在美国夏威夷、智利及西班牙的加利纳(Canary)岛。近期我国也在西部开展了塔台选址的研究工作^[1-2]。为了能对我国今后研制塔台圆顶提供技术支持,本文基于对国外有代表性的塔台圆顶的研究和分析,提出了一系列相应的塔台圆顶设计原则及设计时应考虑的相关因素。

2 典型望远镜塔台圆顶的结构形式

按几何形状,塔台圆顶可分为:半球形、球柱

形、圆柱形及多面体柱形等几种形式。从使用方式上看,圆顶又分为:转动圆顶、随动圆顶及可分离式圆顶。近年来,欧洲南方天文台又设计出篷式折叠圆顶并投入使用。

通常,球形圆顶允许望远镜在其内自由转动,其体积小于柱形圆顶。球形形状允许在顶上开百叶窗口,遇有强风时可最大限度减小开启尺寸。遇有雪天,球形结构较平面结构可少存积雪。另外,由于圆形结构的轴对称性,其迎风、抗强风的能力较其它结构要强。柱形圆顶在通风能力上占有优势。尽管其结构形式的效率较低,表面积及体积较大,但由于可使用直梁构件进行建造,其造价会大大降低。球形圆顶在望远镜上方存在风流提升效应,会影响视宁度,而柱形圆顶就没有此类问题,总之两种形状各有优缺点。一般传统圆顶都是球形旋转圆顶,早期的圆顶为两个半球形部分绕同一个回转轴各自独立旋转,两个部分的组合运动可使望远镜光轴指向半球面内的任何方向。这种结构可手动也可自动控制,但圆顶体积较大,可以减小进入内部的风速。旋转圆顶可允许圆顶和望远镜独立旋转,这样用于内部起吊的起重机及升降机等设备就可以安装在圆顶上,使望远镜周围有很大的可用空间。随动圆顶意味着圆顶要随着望远镜转动而同步转动,多镜面望远镜(MMT)及新技术望远镜(NTT)圆顶就是随动结构。这种结构特点是由一层绝热性好、热容低的墙将望远镜部分和办公区、实验室及存储区部分隔开。圆顶及建筑的总体尺寸大为减小,造价也低,三明治式的墙体结构可使气流平缓。其缺点是气窗结构提高了风速,导致结构产生震动,且由于随动旋转,转动质量被大幅度提高,从而导致控制复杂化。可分离式圆顶即观测时圆顶要与塔台分离,放置在塔台侧面或下面。这种结构虽然降低了塔台热容,使望远镜温度可快速与环境温度一致,但操作不方便,不适合大口径望远镜,尤其对于主动光学薄镜面结构,遇有强风迎风工作会产生风挡玻璃效果,使镜面控制变得困难。

随着技术进步及应用的扩展,现代塔台圆顶的设计更注重热控效果,为追求塔台视宁度及望远镜结构视宁度指标,结构也更加复杂紧凑,特别

是4 m级以上的大口径望远镜塔台设计考究、造价昂贵。图1为夏威夷毛伊观测站塔台群,图2为8.2 m极大口径望远镜(VLT)用高档圆顶^[3,4]。



图1 夏威夷毛伊观测站塔台群

Fig. 1 Actual picture of Maui space surveillance sites in Hawaii



图2 8.2 m VLT用高档圆顶

Fig. 2 Enclosure of VLT with aperture of 8.2 m

新型折叠式圆顶在打开时,会使望远镜处于完全开放的环境中,不会因为其本身的结构影响气流运动并影响气流温度变化,视宁度条件好,在打开后几分钟内就可使圆顶内外的空气温度达到平衡。由于其自身为布和钢架的混合结构,所以吸热量小,温控简单,有利于观测,且造价低,质量轻,便于制造和安装,驱动系统相对简单。正是由于以上的突出优点,折叠式圆顶正在受到人们越来越广泛的关注^[11-12]。

在Canary岛有两个已经建成的折叠式望远镜圆顶—DOT和GREGOR,直径分别为7 m和9 m, DOT圆顶如图3所示,这是两个大型全自动折叠圆顶的成功范例。DOT圆顶已经工作了14

年,GREGOR圆顶也已经工作了6年。这些圆顶经历了多次强风和雨雪天气的袭击,结构完好无损,也没有因为频繁的打开和关闭而松弛,尤其是GREGOR,经受住了2005年11月28日Delta飓风的侵袭,现在仍然可以在风速为20~25 m/s的环境中安全地打开和关闭^[5-6]。



图3 DOT望远镜折叠圆顶

Fig. 3 Actual picture of DOT retractable enclosure

塔台圆顶设计主要包括:塔台布局设计、环境适应性条件设计、圆顶结构设计、热设计、转向架及驱动设计等。塔台布局主要由互相连通但隔热的几个部分组成,包括控制室、设备室、望远镜基墩及旋转圆顶几个部分,要根据选定站址的地理条件及相关使用能力要求进行合理布局。

望远镜塔台圆顶并非常规的建筑物结构,站址往往选在遥远的高山上,其受地震及强风的影响风险高。因此,从气象学及地球物理学角度考虑要建立相应的设计准则,要能满足工作条件、边界

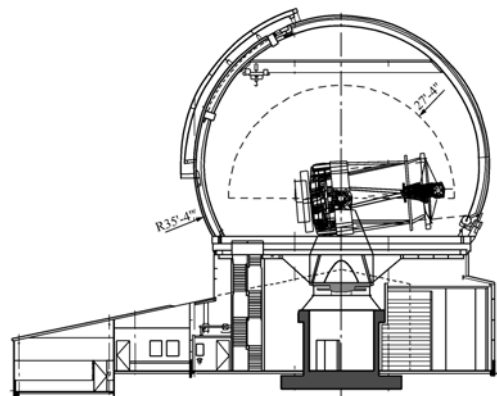


图4 DCT望远镜塔台圆顶截面图

Fig. 4 Diagram of DCT enclosure section

环境可操作条件及极端情况下生存条件的要求。图4为4.2 m口径DCT望远镜塔台圆顶设计实例截面图^[7]。

DCT站址位于2 377.5 m的高山上,其环境适应性条件设计见表1。

表1 DCT站环境适应性条件
Tab.1 Environment conditions of DCT

	Normal working conditions	Feasible operation conditions	Extreme conditions
Temperature range	-10 ~ 20 °C	-20 ~ 30 °C	-30 ~ 50 °C
Temperature change	<1.5 °C/h	<2.5 °C/h	
Steady wind speed	<10 m/s	<15 m/s	
Gust wind speed	<13 m/s	<21 m/s	>56 m/s
Minimal wind speed	<2 m/s	<0 m/s	
Relative humidity	0 ~ 95%		
Snow			subsurface:95 kg/m ² roof:75 kg/m ²
Earthquake			surface acceleration 0.2 g
Others			ice rain, lightning stroke, thunder storm, hail

圆顶结构设计主要有:望远镜室设计、风挡及天窗设计等。通常,从视宁度角度考虑,望远镜室基面要高于地面10~20 m,这一高度也可减小灰尘的影响。通风有助于减小圆顶视宁度,因此在圆顶上部要安装可开启闭合的天窗,在侧部要设置风挡窗口。

3 塔台圆顶的热设计原则及环境适应性考虑

以3.67 m口径的先进光电系统(AEOS)望远镜塔台圆顶为例来分析圆顶内的热控措施,如图1所示。天文圆顶是恶劣局部视宁度的主要来源,因为白天圆顶被加热而晚上热空气被截留在圆顶内部,这些热空气只有通过狭长的天窗才能扩散出去,而望远镜就是通过这个天窗实施观测的。AEOS圆顶的设计考虑了如何解决这一问题,圆顶由两个顶部开孔的同心圆筒组成,望远镜工作时天窗打开,圆顶的围墙降低至望远镜从孔里显现出来,使望远镜完全暴露在周围夜间大气中。这种形式的圆顶使得圆顶内的热空气能迅速地扩散到周围的空气中,从而消除标准圆顶设计

给视宁度带来的负面影响。圆顶装有4个空气调节器以产生冷空气,通过在操作开始前对圆顶进行制冷,使得望远镜和外部空气的温差最小化。一旦操作开始,这些空气调节器就要关闭,否则系统内空气的流动会引起望远镜周围空气的紊乱。内部设置了主镜防结露空气干燥系统,当望远镜处于贮存位置,干燥空气被抽到主镜和镜盖之间的空隙以阻止湿气在主镜上凝结,保护光学镀膜免受损害。圆顶内的空气被抽到干燥单元并加热到32.2 °C,然后这些空气通过一个隔离的空气调节器重新冷却。此外,内部还设置了望远镜通风系统,通风孔位于轭臂、背部和镜体组件上的不同点,当望远镜空调系统工作时,空气被吹入通风孔,然后经过望远镜结构。吹动空气的风扇位于望远镜的地板下面,而望远镜则位于一个隔离的厚厚的水泥地板上,这样能使系统传递给望远镜的振动最小化。顺着风向,空气在离望远镜几百英尺外被排空。风扇吹动周围的空气通过望远镜,使望远镜结构内和周围空气不再存在温差^[8]。

环境温度适应性即为热控问题。热控系统的设计宗旨是使关键系统的温度控制在设计范围并使观测站址的科学性能最大化。具体原则如下:保持光学及支撑结构的温度在其设计范围;保

持靠近光路系统尤其主镜系统的温度接近环境温度,使地基望远镜的视宁度最小化;保持科学设备及探测器在适当的工作温度;对红外系统要求设备背景辐射的影响最小化。

热控方法主要有被动热控和主动热控两种。被动热控方法主要有:涂镀、隔热、散热(控制外部热量输入或废热积存)。主动热控方法主要有:热管加热、强制通风及冷却剂制冷。设计时要关注使用材料的热导率、线胀系数、日光吸收率及发射率等参数。主镜的材料选择要考虑低膨胀(ULE)玻璃及微晶玻璃等低膨胀材料,在尺寸及面形精度控制上要考虑薄镜面(降低热惯量)及主动光学技术。塔台的热稳定性问题是导致成像质量下降的根源,也就是局部视宁度或塔台视宁度问题。实践证明,温度的起伏变化在接近热交换表面处最大,由温度起伏带给视宁度的影响也会随着远离热交换表面而快速减小。因此,对塔台及望远镜内部自由对流的控制成为设计的指导思想。

热设计是望远镜结构及塔台圆顶设计重点考虑的问题,是一体化设计问题。20世纪70年代,随着大口径望远镜的设计应用,塔台圆顶热设计逐渐受到重视。主要采取的方法是:(1)用小的狭缝及风挡窗口将圆顶内外隔离;(2)控制望远镜及圆顶的温度,使其夜间工作时圆顶内、外部空气的温差最小。采用冷却地板的方法来实现望远镜及镜室的温控,但这种方法虽然取得了一定的效果,不过由于对大型望远镜的成像质量要求很高,塔台及望远镜都存在较大的热惯量,忽视了内部视宁度的控制,仍然没达到理想的热控效果。20世纪90年代,以MMT为代表的大型望远镜系统首先革新了传统的热控方法,提出了现代望远镜及塔台圆顶热设计的新思路。主要采取的方法是:首先,望远镜结构及光学元件采用较低热惯量设计方法,采用轻质薄镜面结构,整体结构系统为开放式风格;其次,圆顶在夜间工作时大范围敞开,使望远镜最大限度接触周围空气,允许其达到热平衡。在具体结构设计时要体现下列设计原则:(1)望远镜安置在足够高的距地高度处,通过空气动力学设计圆顶,阻止地表气流进入圆顶内或在望远镜上方流动。(2)圆顶外部表面采用高

反射及隔热设计,使白天的热输入最小化;采用望远镜室空调控温及主镜单元控温来降低高的热惯量。(3)望远镜室内设备产生的热控制在最小范围,地板下设置隔热层。(4)办公室实验室的产热控制在最小范围。(5)当圆顶敞开时,允许风平稳流动,减小风进入圆顶的阻力^[10,13]。

4 望远镜基墩设计原则

基墩用于为望远镜提供稳定的承载安装平台,对其承载能力要求较高。如4.2 m口径的DCT望远镜基墩承载能力为175 t;8.2 m口径的VLT望远镜基墩承载能力为1 000 t。严格来说,塔台圆顶和基墩是两套完全独立的系统。为了减少圆顶旋转及风扰动引起的振动干扰,塔台基础和基墩基础要完全隔离开。由于低造价及优良的阻尼特性,基墩一般由钢筋混凝土建造而成。最理想的设计是基墩直接建造在地下基岩上,但这很难做到,成功与否取决于站址的地理条件及望远镜的吨位。典型的基墩结构有两种:一种是在地下灌注成型或打入的柱桩上建造基墩,基墩一般设计成空心圆柱、空心圆锥或方形,靠支撑桩的侧面摩擦力来提供支撑。若望远镜的吨位较大,则支撑桩必须打入地下基岩上。图5即为这种基墩结构。另一种结构为较大面积的混凝土浇筑基座(即大质量块),支撑力来自于基墩下土壤对混凝土块的均布压力。通常,露出面部分的强度计算和一般的结构分析完全相同,但地下部分的计

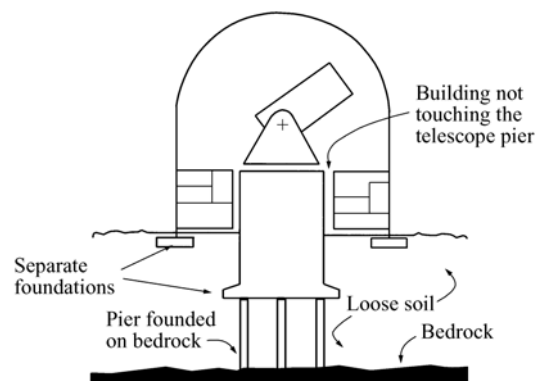


图5 分离式基墩结构

Fig. 5 Schematic diagram of separate foundation pier

算主要取决于土壤的剪切模量 G 和泊松比 γ 。对望远镜来说基础设计最重要的并不是它的承载能力,而是它的弹性系数,特别是引起结构振动的动态弹性系数。基墩设计除考虑承载能力外,更重要的是保证抗扭刚度及系统固有频率。基墩与望远镜底部的接口是通过地基环来实现的,地基环一般为铸铁结构,其与基墩之间的连接刚度取决于地基环布筋及植入基墩内的钢体锚杆的稳固连接。也有系统是在地基环和基墩之间的缝隙注入高强度胶,进一步提高基座的稳定性及连接刚度。

望远镜与基墩的设计要一体化考虑,特别要重点分析对地震载荷的适应能力,这关系到昂贵的望远镜系统的使用寿命。8.2 m 口径的 VLT 望远镜基墩设计就对抗地震载荷的能力进行了深入分析^[9]。

地震的随机运动一般以其加速度的频谱来表示,地震运动有 3 个方向的分量,包括 2 个水平方向和 1 个垂直方向。地震运动加速度的频谱是一种地震波的响应谱,所谓地震波的响应谱是地震波对于单一的弹簧质量系统所产生的最大影响。地震波的响应谱的平方是地震的能量谱,这个能量谱是频率的函数,也与系统的阻尼值相关,一般情况下采用的阻尼值为 1%。地震强度以地表水平加速度值来表示,一般基墩设计分析取值为 0.3 g 。地震的震级与最大地表加速度有着密切关系。表 2 为欧洲南方天文台 VLT 系统分析地震载荷能力采用的特征参数,站址位于智利北部的 Cerro Paranal。其中, OBE 为可操作的基本地

震参数, MLE 为最大可能的地震参数^[9]。

表 2 地震特征参数

Tab. 2 Earthquake characteristic parameters

Parameters	OBE	MLE
Peak horizontal acceleration/ g	0.24	0.34
Probability exceedance/%	50	10
Repetition period/a	25	100
Surface wave magnitude	7.75	8.5
Hypocentral distance/km	100	150
Duration/s	65	200
Characteristic frequency/($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	37.7	47.1
Frequency dispersion parameter	0.469	508

5 结束语

地基望远镜塔台圆顶的设计制造是系统工程,关系到设备的使用效能和观测效果。目前,靶场用经纬仪的圆顶设计还很简单,更多考虑的还是容纳功能,对台址的选择受靶场仪器布站位置的制约,无法照顾视宁度指标。天文观测用望远镜对站址的选择考虑了视宁度因素,但多半离城市较近,天光背景不佳。国内各天文台站的塔台圆顶设计不够高档,热设计不够严谨。因此,本文通过对国外高档塔台圆顶的研究,提出一系列相应的塔台圆顶设计原则及设计时应考虑的因素,以期为我国今后研制高档塔台圆顶提供一些技术参考。

参考文献:

- [1] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. Berlin: Springer, 2002.
- [2] 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, 2002.
CHENG J Q. *Principle and Design of Astronomical Telescope* [M]. Beijing: China Science & Technology, 2003. (in Chinese).
- [3] NISHIMITO D L. Spectroscopic observations of space objects and phenomena using spica and kala at AMOS [J]. *SPIE*, 2001, 4490: 212-220.
- [4] SCHNEERMANN M. The VLT enclosures: design and construction [J]. *SPIE*, 1997, 2871: 650.
- [5] BETTONVIL F C M, HAMMERSHLAG R H, JÄGERS A P L, et al.. Large fully retractable telescope enclosures still closable in strong wind [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70181N.
- [6] JÄGERS A P L, SLIEPEN G. Fast foldable tent domes [J]. *SPIE*, 2008, 7018: 70181R.
- [7] JOSE T U, THOMAS S, NEFF D H, et al.. Design of the discovery channel telescope enclosure [J]. *SPIE*, 2004, 5489: 1004-1011.

- [8] LEWIS C, ROBERTS J R. Thermal conditioning of the AEOS telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4837:264-271.
- [9] FRANZ K. Analysis concepts for large telescope structures under earthquake load[J]. *SPIE*, 1997, 2871:117-126.
- [10] SLIEPEN G, ASWIN P, JÄHERS L, *et al.*. Contactless sub-millimeter displacement measurements[J]. *SPIE*, 2008, 7018:70181C.
- [11] RIVA M. A partially foldable light weighted dome for fast pointing 3 m-class telescope[J]. *SPIE*, 2010, 7733:77333W.
- [12] ROBERT H, HAMMERSCHL A G, JOHANNES N M K, *et al.*. Mechanical design of a completely open-foldable dome for EST[J]. *SPIE*, 2010, 7733:77330J.
- [13] SLIEPEN G, JÄHERS A P L, HAMMERSCHLAG R H, *et al.*. Foldable dome climate measurement and thermal properties[J]. *SPIE*, 2010, 7733:773332.

作者简介:张景旭(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事大型地基光电望远镜光机结构总体技术方面的研究。E-mail:zhangjx@ciomp.ac.cn

《光学 精密工程》(月刊)

- 中国光学开拓者之一王大珩院士亲自创办的新中国历史最悠久的光学期刊
- 现任主编为国家级有突出贡献的青年科学家曹健林博士
- Benjamin J Eggleton, John Love 等国际著名光学专家为本刊国际编委

《光学 精密工程》主要栏目有现代应用光学(空间光学、纤维光学、信息光学、薄膜光学、光电技术及器件、光学工艺及设备、光电跟踪与测量、激光技术及设备);微纳技术与精密机械(纳米光学、精密机械);信息科学(图像处理、计算机应用与软件工程)等。

- * 美国工程索引 EI 核心期刊
- * 中国精品科技期刊
- * 中文核心期刊
- * 百种中国杰出学术期刊

主管单位:中国科学院

主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国仪器仪表学会

地址:长春市东南湖大路 3888 号

邮编:130033

电话:0431-86176855

传真:0431-84613409

电邮:gxjmgc@sina.com

网址:http://www.eope.net

定价:50.00 元/册