

文章编号 1004-924X(2014)04-0996-08

基于谱分析的 30 m 望远镜三镜支撑结构地震分析

苏燕芹^{1,2*}, 张景旭¹, 王富国¹, 杨 飞¹, 赵宏超^{1,2}

(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:为了满足 30 m 望远镜 (TMT) 三镜系统 (M3S) 对抗震性能的要求, 对在返回周期为 200 年和 1000 年的地震载荷条件下的三镜支撑结构的性能进行了分析。首先, 根据三镜支撑结构的特点, 对 TMT 整体的地震响应谱进行了修正, 得到了适用于三镜支撑结构的地震响应谱。然后, 分析了三镜支撑结构在不同等级地震激励下的位移、应力和加速度响应。分析结果显示, 当返回周期为 1000 年的地震从水平面内两个正交方向及竖直方向同时传递到三镜支撑结构中时, 系统响应最大; 此时, 三镜支撑结构中各部件的最大加速度为 2.844 g, 最大位移为 1.544 mm, 最大应力为 552.316 MPa, 三镜上最大应力为 1.401 MPa。根据材料力学性能可知, 侧支撑杆会发生破坏, 需要采取地震防护措施对三镜进行保护。本文在进行谱分析时较完整地考虑了各项因素, 结果数据精确可靠, 可为三镜系统的详细设计提供指导。

关键词: 30 m 望远镜; 三镜支撑结构; 地震分析; 光谱响应

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142204.0996

Seismic analysis of TMT M3 cell assembly based on spectral response

SU Yan-qin^{1,2*}, ZHANG Jing-xu¹, WANG Fu-guo¹, YANG Fei¹, ZHAO Hong-chao^{1,2}

(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: suyanqin0909@163.com

Abstract: In order to satisfy the anti-seismic requirement of Tertiary Mirror System (M3S) in a Thirty Meter Telescope (TMT), the structural responses of Tertiary Mirror Cell Assembly (M3CA) under the earthquakes with 200-year and 1000-year return periods were analyzed. Firstly, a seismic response spectrum of M3S was established by modifying the seismic response spectra of TMT according to M3S mechanical character. Then, the structure responses of displacement, stress and acceleration under different level earthquakes were analyzed. The analysis results show that the peak response appears when the earthquake with 1000-year return periods transmits to M3S in three directions (two horizontal orthogonal and a vertical). The peak acceleration of M3CA, maximum displacement and the peak stress are 2.844 g, 1.544 mm, and 552.316 MPa, respectively, moreover, the peak stress on Tertiary Mirror (M3) is 1.401 MPa. The investigation of material property indicates that the lateral support rods will be broken at this moment and the protective support for M3 is recommended. As a result of sufficient consideration of different influencing factors in spectrum analysis, the data can provide reliable

收稿日期: 2013-03-14; 修订日期: 2013-04-12.

基金项目: 中科院三期创新工程重大创新专项资助项目

ble references for detail designs of M3Ss.

Key words: Three Meter Telescope(TMT); Tertiary Mirror System(M3S); seismic analysis; spectrum response

1 引言

30 m 望远镜(Thirty Meter Telescope, TMT)是由美国发起的30 m口径的光学-红外望远镜,该望远镜将安装在美国夏威夷群岛的莫纳克亚山上。该地区具有优越的观测条件,但同时也是地震多发区。根据该地区的地震记录,6级以上的地震时有发生,最大的地震发生在1927年,震级为里氏6.8级,危害程度较大^[1-2],故望远镜本身必须具备一定的抗震性能,以确保其在当地可能发生的最大地震条件下不发生大的破坏。因此,有必要对地震引起的载荷条件和望远镜结构在该载荷条件下的响应做充分研究^[3-4]。

在进行望远镜的地震分析时,首先要确定适用于该结构的地震响应谱,考察天文台附近的地震带及对天文台影响的大小,然后参考望远镜所在地的地震记录,评估该地区地震发生的概率和强度,通常以地震返回周期(或地震发生概率)结合地面峰值加速度来评估。关于某地区的地震危险,一般采用两种等级的地震进行描述,分别是频遇地震(OLE)和罕遇地震(MLE)。位于智利北部的VLT(Very Large Telescope)在地震分析中分别将OLE和MLE的年平均发生概率定义为50%和10%,并采用1%阻尼、地面峰值加速度分别为0.24g和0.34g的地震谱进行了分析。对Giant Magellan Telescope(GMT)也进行了多次分析,制定了返回周期分别为200年和500年,阻尼分别为0.5%、2%和5%的地震谱来进行计算,从而最大限度地保证了结构的可靠性。另外,还对Gemini、Large Synoptic Survey Telescope(LSST)分别制定了适合于自身结构的多种地震谱。通过统计和计算,URS公司给出了5%阻尼时,返回周期分别为200年和1000年的适用于TMT整体结构的地震响应谱。

根据三镜支撑结构的特点,本文对TMT的地震谱进行修正,得到了适用于三镜支撑结构的响应谱,然后运用谱分析方法对三镜支撑结构进行了地震分析。根据分析结果,找出了该系统的

易损环节。地震时须采取相关措施保证该系统处于可控状态,以避免发生意外损坏。

2 地震分析方法及原理

2.1 分析方法

目前,通用的地震分析方法主要有3种:(1)等效静力分析。这种方法将地震产生的惯性力作为静力施加到结构中。这种方法计算简单,但其没有考虑结构的动力特性,仅适用于在结构预设计阶段进行抗震能力估算;(2)谱分析。该方法考虑了结构的动力学特性,可得到结构的最大响应,大大提高了结果的精度,并且计算速度快,但仅适用于线性系统;(3)时间历程分析。该方法将实际地震的加速度时程记录作为动载荷输入,用于分析结构的地震响应,这种方法考虑了非线性的影响,可以得到每一时刻下的结构响应。但时程分析方法要用实际的地震波记录,而望远镜所在地实际地震波记录一般较少,很难得到符合要求的地震记录,并且这种方法的计算量非常大,所需时间长^[3-5]。

综上所述,鉴于谱分析方法便于运用,简单有效,并且不像时程分析方法那样需要符合要求的地震记录,本文采用谱分析的方法进行TMT三镜支撑结构地震分析。此方法已经在Gemini、VLT、GMT、LSST等多个望远镜中得到应用^[2-3]。实践证明,在经过多次6~8级地震的冲击后,这些望远镜仍然保持了良好的性能。

2.2 反应谱法原理

地震分析的目的是得到在一个特定运动激励下,系统的最大变形、应力、加速度等的响应值。显然,这些响应的大小与结构的质量、刚度、阻尼水平和该运动激励的特征等紧密相关。

响应谱是有着不同自然频率单自由度质量的弹簧系统,对同一时间历程地基运动峰值的响应。该方法也可用于描述多自由度系统的运动,但只在结构阻尼较低时结果比较精确。结构的峰值响应可以用加速度、速度和位移3种形式来表达。

谱分析是基于结构的动力学原理提出的,其

运动方程如式(1)所示:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g, \quad (1)$$

式中: $-\ddot{x}_g$ 为地面运动加速度的变化规律, 由地震时地面加速度记录得到。

式(1)是一个常系数的二阶非齐次微分方程。它的解包含两部分: 一是对应于齐次微分方程的通解, 另一个是特解。前者表示自由振动, 后者表示强迫振动。

将 $-\ddot{x}_g$ 看作随时间变化的扰动输入, 并认为其是由无穷多个连续作用的微分脉冲组成的。得到某一时刻脉冲作用下的位移响应后, 将所有微分脉冲作用产生的自由振动叠加, 可以得到总位移响应, 如式(2)所示:

$$x(t) = \int_0^t dx(\tau) = -\frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau. \quad (2)$$

式(2)即为杜哈默积分, 它与通解之和就是微分方程的全解。由杜哈默积分可得零初始条件下质点相对于地面的位移, 如式(3)所示:

$$x(t) = -\frac{1}{\omega} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau. \quad (3)$$

对式(3)求微分可得到速度和加速度响应, 它们的最大反应可作为地震反应谱。最大相对位移、速度、加速度如式(4)~(6)所示:

$$S_d = |x(t)|_{\max} = \frac{1}{\omega} \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max}, \quad (4)$$

$$S_v = |\dot{x}(t)|_{\max} = \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max}, \quad (5)$$

$$S_a = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g|_{\max} = \omega \left| \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) e^{-\zeta\omega(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) d\tau \right|_{\max}. \quad (6)$$

由式(4)~式(6)可见, 在阻尼比、地面运动确定后, 最大反应是结构周期的函数。

3 地震响应谱

在制定地震响应谱的过程中, 需要考虑多种因素。包括当地的地质条件, 如结构阻尼、土壤性能(土壤剪切波速)、地震强度等。结构阻尼是重要的影响因素。相同频率下, 不同的阻尼值可能会导致响应谱值发生很大的变化。为了保持良好

的定位和转向能力, 望远镜需要具有结构黏滞性小, 阻尼低的特点。其 VLT 和 LAMOST 的阻尼都为 1%, SOAR 的阻尼为 2%。根据相关评估报告, TMT 阻尼预测为 1%^[2]。

TMT 所处的莫纳克亚山是一座火山, 地质条件属于岩土结构。根据最新的夏威夷建筑设计规范可知, 莫纳克亚山属于三类地质。根据该地区的地震记录, 最大的浅层地震发生在 1927 年, 震级为里氏 6.8 级; 最大的深层地震发生在 1973 年, 震级为里氏 6.2 级。根据 TMT 的设计要求文件可知, OLE 和 MLE 的返回周期分别为 200 年和 1000 年^[1-2]。这 2 种地震条件对结构的影响要求和各方向的地面加速度值如表 1 所示^[1-2, 4]。

表 1 不同返回周期的地震对结构的要求

Tab. 1 Requirements of earthquakes with different return periods for structure

地震平均 返回周期	200 年	1 000 年
地震发生概率	每年 0.5%	每年 0.1%
破坏程度	结构部件保持弹性, 通过简单的调整即可恢复望远镜性能。	关键部分不破坏, 底支撑等脆弱部件可失效, 短期内进行小的修复和调整即可投入使用。
修复时间/h	3	120
地面加速度/(g)	水平 0.245	0.409
	竖直 0.164	0.274

常用的地震响应谱有位移谱、速度谱、加速度谱 3 种, 在 TMT 的设计中采用加速度谱。参考夏威夷的建筑设计规范可得到三类地质条件下响应谱曲线的表达式和相关参数, 将地面加速度值代入表达式中, 即可求得阻尼为 5% 时的 TMT 总体响应谱。由于 URS 公司已经对 TMT 的地震响应谱进行了深入的论证报告, 并给出了阻尼为 5% 条件下水平和竖直 2 个方向的地震谱, 本文通过修正该报告中的地震谱, 制定出了三镜支撑结构的地震谱。三镜支撑结构的地震响应谱预估为 TMT 地震响应谱值的 1.3 倍, 见图 1。

由于 TMT 的结构阻尼预测为 1%, 故需要对上述地震谱进行修正, 修正公式如式(7)所示^[2],

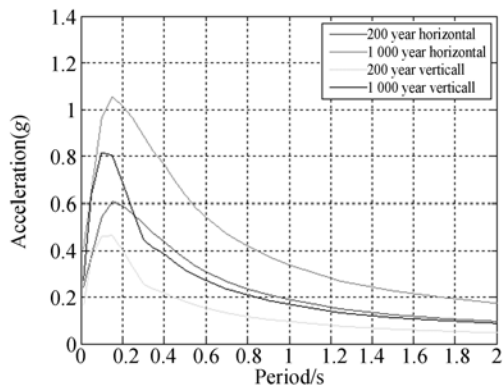


图1 三镜支撑结构在阻尼为5%时的地震谱

Fig. 1 Seismic response spectra of M3CA with 5% damping

修正后的响应谱如图2所示。

$S_a(T, d\%) = [S_a(T, 5\%)] \times$
 $[\{ 2.31 - 0.41 \ln(d\%) \} / 1.65], (7)$
 式中: $d\%$ 为结构阻尼, 一般有 $0.5 < d < 2$; $S_a(T, d\%)$ 为响应谱值。

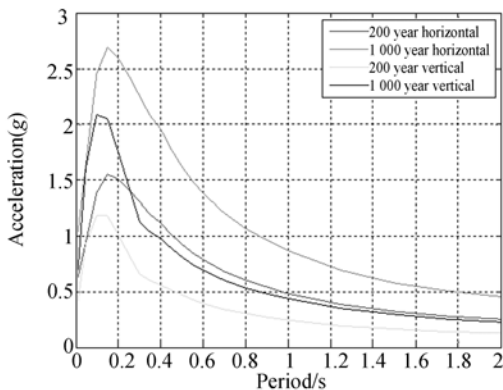


图2 三镜支撑结构在阻尼为1%时的地震谱

Fig. 2 Seismic response spectra of M3CA with 1% damping

由图1和图2可见,图2的最大响应谱值增大了1.6g左右,可见结构阻尼对响应谱有重要影响。由图2修正后的地震谱可见,最大响应集中在0.1~0.2s之间,即5~10Hz的频率段;周期在0.1~1s之间的响应谱值远大于在1s之后的谱值,即能量主要分布在该区段内。因此,可知自然频率在1~10Hz之间的结构极易受到破坏。一般大型望远镜的基础频率都较低(小于10Hz),正位于该区间内,故地震分析对保证望远镜的安全性具有重要意义。

4 谱分析

得到响应谱之后就可以进行地震分析。谱分析有多种方法,常用的是振型叠加法,它以模态分析为基础,考虑在地震作用下各模态对激励的贡献。再用模态计算结果乘以结构放大系数后的振型叠加计算出结构的动力响应。振型叠加法要提取出足够的模态数,并且参与计算的结构模态质量应当占结构总质量的70%以上,否则可能导致计算结果不准确。一般来说低阶模态比高阶模态对结构响应的贡献要大得多。

4.1 模态分析

在三镜及其支撑结构中,三镜为椭圆形平面镜,长轴为3594mm,短轴为2536mm;三镜的材料采用热膨胀率较小的微晶玻璃,其重量为1.8t;侧支撑柔性杆材料为铝合金,其他部分为钢。三镜系统在TMT中的位置如图3左侧部分所示。M3CA在三镜系统中的位置见图3右侧部分,三镜支撑结构三维结构图如图4所示,建立其有限元模型,镜体部分采用实体单元,其他部分采用梁单元,建立其有限元模型,如图5所示。对其

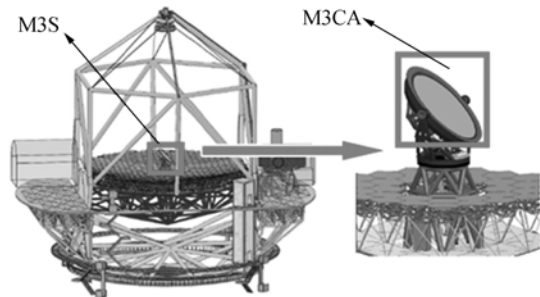


图3 三镜系统及M3CA的位置

Fig. 3 Positions of M3S and M3CA

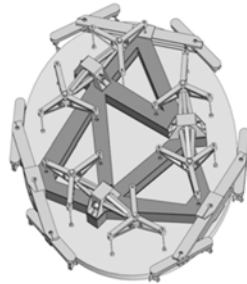


图4 三镜室结构模型

Fig. 4 Structure of M3CA

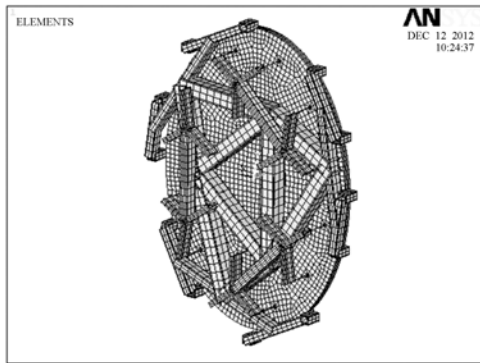


图 5 三镜支撑结构有限元模型

Fig. 5 Finite element model of M3CA structure

进行模态分析并提取前 10 阶模态,表 2 列出了前 6 阶模态值,高阶模态均为支撑结构的振动。

表 2 三镜支撑结构模态分析结果

Tab. 2 Modal analysis results of M3CA

模态	频率/Hz	模态形状
1	21.83	沿椭圆长轴的扭转
2	21.97	沿椭圆短轴的平移
3	22.95	沿椭圆短轴的扭转
4	23.24	沿椭圆长轴的平移
5	29.82	沿镜面法向的平移
6	35.39	绕镜面法向的转动

由表 2 可见,低阶模态均为镜子的刚性移动,这说明支撑结构的刚度良好。通过查看各阶模态的模态参与系数和影响因子可知,高阶振型对谱分析的结果贡献很小,前 10 阶模态参与质量占结构总质量的 75%,这说明提取的模态数足够。如果模态质量占结构总质量的比例过小,则应提取更多的模态数以保证结果的精确性。

4.2 谱分析

得到结构的模态响应后,使用 Ansys 12.0 软件进行谱分析。通过定义频率-加速度谱,分析了三镜的 3 个典型位置的地震响应结果。即 α 分别为 -45° , 0° 和 45° 时的状态。这 3 个位置是三镜沿三镜表面椭圆短轴依次旋转获取的。 α 角为三镜镜面法线与竖直方向之间的夹角,如图 6 所示。 $\alpha=45^\circ$ 是望远镜使用中的典型位置, $\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=-45^\circ$ 分别是望远镜维护、更换和不观测时的停放角度,白天时段望远镜将长时间处于 $\alpha=-45^\circ$ 的位置。

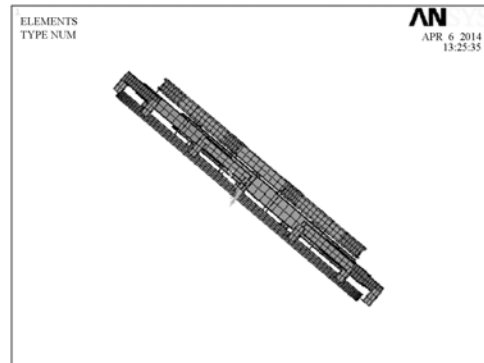
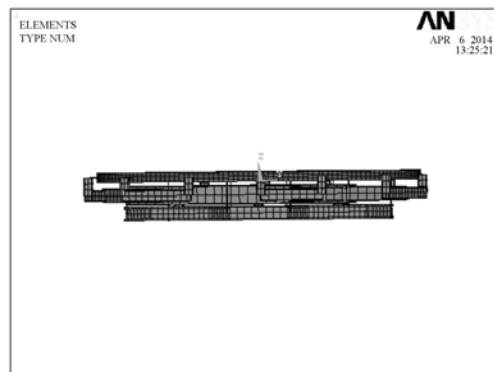
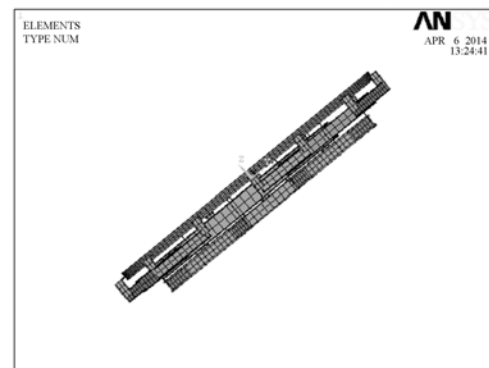
(a) $\alpha = -45^\circ$ (b) $\alpha = 0^\circ$ (c) $\alpha = 45^\circ$

图 6 三镜的 3 个典型位置

Fig. 6 Three typical positions of M3

地震的传播包括 3 个独立随机过程,方向可沿水平面内 2 个任意选择的正交方向和一个垂直于该水平面的方向。一般应当对这 3 个方向地震分别作用下的结构响应进行计算,并考虑三向地震同时作用下的受力状态^[6-8]。本文进行谱分析时,施加地震加速度的坐标系 (M3CRS) 定义如

下:原点位于三镜表面中心;X 轴与反射面椭圆短轴重合;Z 轴沿竖直方向,远离地面;Y 轴的方向由右手定则确定。3 个方向相互正交,图 6 中各图左下角显示了 M3CRS 的方向。从 X、Y、Z 3 个正交方向分别施加地震加速度,并计算三向地震加速度同时作用的工况。

从有限元分析结果可知,返回周期为 200 年的地震作用下的 M3CA 的响应值始终小于返回周期为 1000 年的地震作用下的结构响应,并且在返回周期为 200 年的地震作用下,结构不会发生

破坏。故这里只列出在返回周期为 1000 年的地震作用下结构的响应。分析结果如表 3 所示,表中的值为未考虑重力影响的分析结果。

由表 3 可知,三镜支撑结构的最大变形量为 1.111 mm,最大应力为 381.205 MPa;三镜的最大应力为 0.868 MPa。通过查看变形云图可知,最大位移均发生在三镜上,其中,侧支撑杆和底支撑杆为该三镜支撑系统最大应力的分布区域,三镜的最大应力多发生在侧支撑的作用位置。

表 3 三镜支撑结构的响应
Tab.3 Structure response of M3CA (mm)

$\alpha/(^{\circ})$	位移				三镜系统应力				三镜最大应力			
	X 向	Y 向	Z 向	三向	X 向	Y 向	Z 向	三向	X 向	Y 向	Z 向	三向
0	0.780	0.654	0.371	1.08	317.77	271.17	181.81	378.91	0.612	0.583	0.713	0.747
45	0.775	0.547	0.580	1.112	318.78	195.15	210.73	380.72	0.710	0.605	0.604	0.870
-45	0.775	0.552	0.575	1.111	318.50	196.59	208.40	381.21	0.708	0.604	0.605	0.868

注:“X 向”、“Y 向”、“Z 向”指地震加速度沿 M3ECSR 的 X、Y、Z 3 个方向分别传递到结构中,“三向”指地震加速度从 M3ECSR 的 X、Y、Z 3 个方向同时传递到结构中。

通过分析以上结果可知,当 $\alpha=0^{\circ}$ 时本系统的受力状态较好,最大变形量和应力均小于其他 2 个位置。其中,地震分别沿 M3CRS 的 X、Y 向作用时,三镜支撑结构的变形和应力值相差不大,沿 Z 向作用下的值较小。这说明,系统在 X、Y 向地震作用下的结构刚度相当,在 Z 向地震作用下的结构刚度较大。这进一步证明了设计的合理性,同时也证明了地震时纵波的影响小于横波。当三镜位于 45° 和 -45° 位置时,并且地震沿 M3CRS 的 X、Y、Z 3 个方向同时作用时,本结构的最大位移和应力值均急剧增大,并且沿 Z 向的变形量和应力显著增加,受力状态极为恶劣。

除了要获得变形和应力的结果外,望远镜在地震激励下的加速度响应也是设计者关心的问题。在望远镜整体抗震性能分析时,需要考虑相机等关键部件上产生的最大加速度是否会对相机性能造成破坏,如果产生的最大加速度过大,则需要采取加大局部阻尼等方式减小该部件上的最

大加速度。本文列出了三镜支撑结构在平均返回周期为 1000 年的地震激励下的加速度响应结果,如表 4 所示。

表 4 三镜支撑结构最大加速度响应
Tab.4 The maximum acceleration responses of M3CA(g)

$\alpha/(^{\circ})$	X 向	Y 向	Z 向	三向
0	1.550	1.369	1.271	2.690
45	1.550	1.359	1.413	2.844
-45	1.549	1.366	1.405	2.752

由表 4 可知,当返回周期为 1 000 年的地震发生时,结构的最大加速度不超过 3g,最大加速度发生在三镜上,并且该部分并无相机等关键件,故无需加入提高局部阻尼的装置。

当三镜位于 $\alpha=0^{\circ}$ 的位置、地震平均返回周期为 1000 年时,结构在三向地震作用下的变形云图及应力分布云图如表 5 所示(彩图见期刊电子版)。

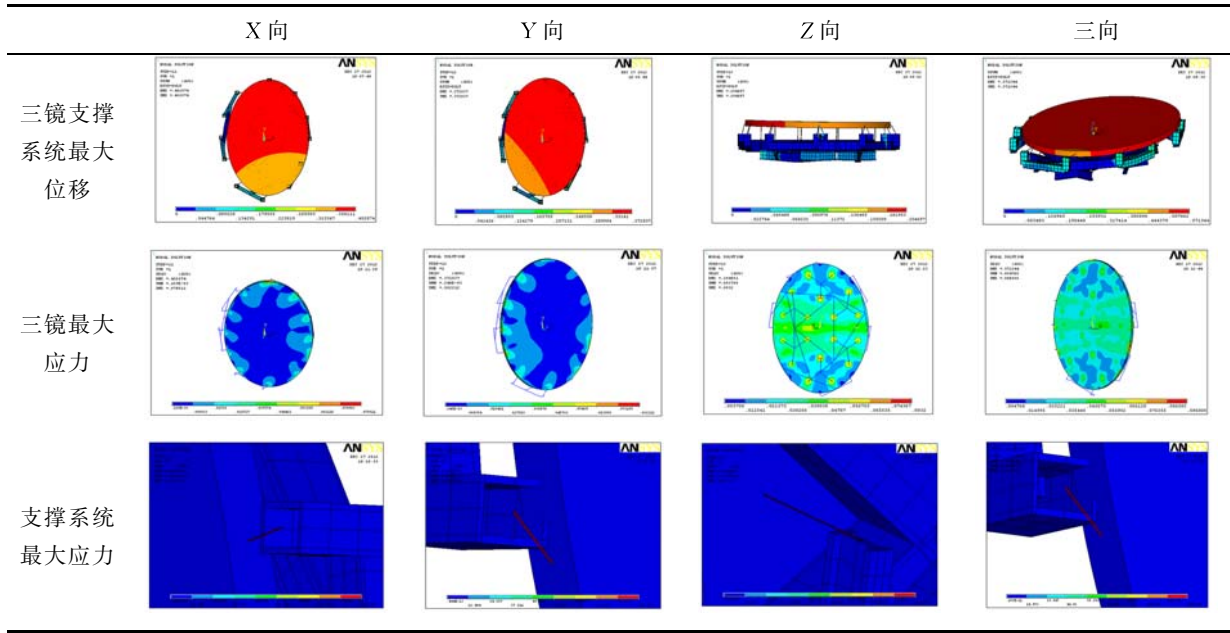
由表 5 可知,三镜的最大应力发生在镜子沿长轴方向的左右边缘上,整体最大应力发生在侧

支撑的柔性杆上。同理,在阻尼为 1%,平均地震返回周期为 200 年的条件下,三镜系统的最大应力分布同上所述。因此,可确定侧支撑杆是本结构的薄弱环节。

由于三镜支撑结构在地震中同时受地震载荷和重力载荷作用,故分析该结构在完整受力状态下的响应时,需要将重力的分析结果和谱分析结果进行叠加。

表 5 三镜支撑结构的位移、应力分布图

Tab. 5 Displacement and stress distributions of M3CA



4.3 考虑重力的分析结果

在进行重力分析和谱分析结果叠加的过程中,常用的计算方法是将静力分析和谱分析的峰值结果直接相加。但因为静力分析和谱分析的结果中最大应力和位移产生的位置不一定相同,另外,这种方法忽略了矢量的方向性,因此,这种评价方法过于安全。本文在计算中采用工况组合的方法较好地解决了上述问题。在返回周期为 1 000 年的地震作用下,三镜支撑结构静力分析和谱分析工况组合结果如表 6 所示。

表 6 谱分析与静力分析组合结果

Tab. 6 Combination results of spectrum and static analysis

$\alpha/(^{\circ})$	位移/mm	系统应力/MPa	三镜应力/MPa
0	1.423	552.316	1.345
45	1.55	549.006	1.401
-45	1.544	548.027	1.397

注:最大位移发生在三镜上,三镜的最大应力发生在镜子边缘侧支撑处,系统的最大应力发生在侧支撑杆上。

由表 6 可知,当三镜位于 $\alpha=45^{\circ}$ 时,平均返回周期为 1 000 年的地震从 M3CRS 的 X、Y、Z3 个方向同时传递到结构中时的系统响应最大;三镜支撑结构的最大变形为 1.544 mm(该值为三镜与三镜支撑结构接口的相对位移);最大应力为 552.316 MPa,三镜最大应力为 1.401 MPa。

通过与材料的极限应力比较可知,三镜不会发生破坏,但侧支撑杆上的应力超过了其材料的极限应力。因此,需要对三镜采取保护措施,防止支撑杆失效时三镜从支撑结构中跌落。

5 结 论

本文从三镜系统的抗震性能要求出发,采用谱分析方法对三镜支撑结构在返回周期分别为 200 年和 1000 年的地震下的性能进行了仿真分析。在分析过程中充分考虑了结构的阻尼、质量等特性,并采用工况叠加代替通用的最大值相加的计算方法,使得结果更接近实际情况。分析结果表明,在 1000 年的地震载荷作用下,侧支撑杆

会发生破坏,这时必须对三镜采取保护措施,即可在三镜边缘设计地震防护装置来增强三镜支撑结构的正向和侧向刚度,从而使其运动状态可控,避免发生意外损坏。

参考文献:

- [1] TMT. STR. TEC. 10. 001. REL01. Site-specific seismic hazard assessment of proposed thirty meter telescope site, Mauna Kea, Hawaii [Z]. TMT Project, 2010.
- [2] TMT Group. Design Requirements Document for Tertiary Mirror System (M3S) [Z]. TMT. OPT. DRD. 07. 006. REL29. 2012.
- [3] KAN F W, ANTEBI J. Seismic hazard: analysis and design of large ground based telescopes [J]. SPIE, 2008, 7012: 1-11.
- [4] KOCH F. Analysis concepts for large telescope structures under earthquake load [J]. SPIE, 1997, 2871: 117-126.
- [5] DOMINIC T, GLENN A, MIKE G, *et al.*. TMT telescope structure system: seismic analysis and design [J]. SPIE, 2008, 7012: 1-15.
- [6] NEILL D R, WARNER M, SEBAG J. Seismic design accelerations of the LSST telescope [J]. SPIE, 2012, 8444: 30-45.
- [7] DOUGLAS R N. Seismic analysis of the LSST telescope [J]. SPIE, 2012, 8444: 1-15.
- [8] 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.
ZHOU CH, YANG H B, WU X X, *et al.*. Structural analysis of ground based large telescope [J]. Opt. Precision Eng., 2011, 19(1): 138-145. (in Chinese)
- [9] PERROTTA F, MARTELLI F, OTTOLINT M, *et al.*. The VST telescope primary mirror safety system: simulation model and mechanical implementation [J]. SPIE, 2010, 7738: 1-11.
- [10] PERROTTA F. Earthquake safety system design for a telescope primary mirror [J]. SPIE, 2008, 7017: 1-12.
- [11] 王槐, 代霜, 张景旭. 大型地平式望远镜的方位轴系支撑结构 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1509-1516.
WANG H, DAI SH, ZHANG J X. Azimuth shafting bearing structure in a large Alt-azimuth telescope [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(7): 1509-1516. (in Chinese)
- [12] 张媛. $\Phi 510\text{mm}$ SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(8): 1718-1724.
ZHANG Y. Design and finite element analysis of $\Phi 510\text{ mm}$ SiC Ultra-light weight mirror [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(8): 1718-1724. (in Chinese)
- [13] 吴小霞, 王明浩, 明名, 等. 大口径 SiC 轻量化主镜热变形的定标 [J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1243-1249.
WU X X, WANG M H, MING M, *et al.*. Calibration of thermal distortion for large aperture SiC lightweight mirror [J]. Opt. Precision Eng., 2012, 20(6): 1243-1249. (in Chinese)

作者简介:



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



张景旭(1964—),男,吉林松原人,博士,研究员,博士生导师,主要从事大型望远镜结构总体技术。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn