

基于时程分析的 TMT 三镜支撑系统地震分析

苏燕芹^{1,2} 王富国¹ 张景旭¹ 陈宝刚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)

摘要 为了完成 30 m 光学-红外望远镜(TMT)三镜支撑系统(M3CA)抗震性能分析,编制了地震波拟合软件,拟合出符合设计要求的地震时间历程,并基于时程分析方法进行了结构的地震有限元仿真。基于具有随机相位的三角级数理论编制了拟合地震波的软件,针对拟合精度低的问题引入幅值校正方法,使拟合的地震波谱与设计响应谱的平均偏差在 4% 以内;基于该系统的设计响应谱,拟合了返回周期为 200 年的地震时间历程;利用时程分析方法对结构进行了有限元仿真。仿真结果表明,三镜相对于三镜室最大位移为 1.881 mm;三镜上的最大应力为 0.27 MPa,发生在镜子的侧支撑位置处;支撑结构的最大应力为 310.54 MPa,发生在侧支撑杆上。根据材料性能,三镜及侧支撑杆的最大应力均在材料的极限应力之内,故在返回周期为 200 年的地震发生时可保证系统的安全性。编制的程序拟合精度高,充分考虑了各种因素,结合有限元时程分析,为大型光电设备的地震分析积累了经验。

关键词 光学器件;望远镜;地震;时程分析;拟合;有限元法

中图分类号 TH751 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1112002

TMT M3 System Seismic Analysis Based on Time History Method

Su Yanqin^{1,2} Wang Fuguo¹ Zhang Jingxu¹ Chen Baogang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to complete the seismic analysis of thirty meter telescope (TMT) tertiary mirror cell assembly (M3CA), seismic wave fitting software has been developed, seismic time histories are obtained through the software, and then seismic analysis has been done based on time history analysis. The software fit for the seismic wave is developed based on the theory of trigonometric series with random phase, amplitude correction is introduced to increase the fitting precision, the average difference between fitting seismic wave spectrum and design response spectrum is less than 4%; then, according to the design response spectrum with average return period of 200 years, seismic time histories are fitted; finite element method (FEM) analysis is carried out based on time history analysis method. The simulation results illustrate that the displacement of tertiary mirror relative to the cell is 1.881 mm; the maximum stress on the mirror is 0.27 MPa which occurs on lateral supporting position; the maximum stress of the support system is 310.54 MPa and appears on the lateral support rod. Compared with material characteristics, the maximum stresses are all within material stress limitation, which indicates that the security will be assured when 200-year return period earthquake happens. The program obtains a high fitting precision and various factors are considered. Combined with the finite element analysis, it will provide experience for seismic analysis of large photoelectric equipment.

Key words optical devices; telescope; seism; time history analysis; fitting; finite element method

OCIS codes 120.4880; 110.6770; 120.7280; 220.4880

收稿日期: 2013-03-20; 收到修改稿日期: 2013-04-24

基金项目: 中国科学院三期创新基金

作者简介: 苏燕芹(1987—),女,博士研究生,主要从事大口径望远镜结构设计及仿真等方面的研究。

E-mail: suyinqin0909@163.com

导师简介: 张景旭(1965—),男,研究员,博士生导师,主要从事大型光电望远镜结构设计方面的研究。

E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

世界上现有观测条件优越的天文观测站多位于地震多发区,例如北美洲的夏威夷和南美洲的智利,许多大型天文望远镜都在此选址。由美国发起的 30 m 光学-红外望远镜(TMT),将坐落在美国夏威夷群岛的莫纳克亚山。这是一座火山,历史上曾经发生过 6.8 级地震,故在 TMT 设计中要充分考虑系统的抗震性能,对结构的地震响应做深入分析。TMT 从结构上划分为很多个子系统,每个子系统在设计时都需要进行地震分析,以保证每部分的安全性^[1-2],本文针对 TMT 三镜支撑结构子系统进行了地震分析。

随着抗震理论的发展和相关技术以及软件的进步,基于加速度时程的地震分析方法越来越受到重视。这种分析方法与等效静力分析和谱分析相比,具有以下突出的优势:1)可以充分考虑到结构的非线性特性,结构中可能会有一些部件不完全呈现线弹性行为,例如液压轴承、阻尼器和减震器等;2)得到每一时刻结构的响应,结构的不同部件在地震作用下呈现最大响应的时刻不一定相同,通过时程分析可得到不同部件的时程响应(加速度、位移、应力等)^[3-6]。基于这些优点,加速度时程分析方法在地震分析中的应用越来越受到重视。

加速度时程分析中,要求按照地震记录,把地震加速度按一定的时间序列施加到结构中,该地震记录的谱应当符合设计响应谱。但在实际中,一般地区的详细地震记录往往较少或者难以获得,并且实际的地震记录很难符合设计响应谱,故一般采用人工合成的方法得到。人工合成地震波的方法大体可分为两类:1)基于不同频率具有随机相位角的三角级数的叠加;2)基于具有一定幅值的随机脉冲的叠加。目前,仍然以 20 世纪 70 年代提出的三角级数和模型合成时程法应用较广泛^[7-11]。虽然现有的一些软件可完成地震波的合成,例如 Seismosignal, Midas 等,但是如果需要对拟合的地震波做幅值、相位等方面的进一步调整,则无法完成。本文采用基于三角级数的地震波合成方法,编制了地震波拟合软件,可按照要求对幅值、相位等对生成的地震波进行调整,使其更加符合设计响应谱,并利用合成的地震波对 TMT 三镜支撑系统进行了地震分析,为大型设备的抗震性能分析积累了经验。

2 加速度时间历程的拟合

2.1 拟合方法

随着科学家对地震研究的深入,人们发现峰值加速度、频域特性和持续时间是地震加速度记录的重要特征。常用的模型是用随时间变化的强度函数与平稳随机过程的乘积表示地震动加速度时间历程^[10-11],模型的数学表达式为^[8,12]

$$a(t) = f(t) \cdot \sum_{k=1}^N A(\omega_k) \cos(\omega_k t - \varphi_k), \quad (1)$$

式中 $f(t)$ 为时间包络函数; $A(\omega_k)$ 为地震动的幅值谱; φ_k 为 $(0, 2\pi)$ 内随机分布的相位角; ω_k 为第 k 个频率分量; $a(t)$ 则是特定时刻的加速度值。

基于以上模型,本程序采用由反应谱得到功率谱,再由功率谱得到幅值谱,通过幅值谱与包络函数的乘积得到加速度历程的方法拟合地震波。反应谱是具有不同自然频率单自由度质量/弹簧系统对输入的同时时间历程地基运动的峰值响应(位移、速度、加速度);功率谱是地震动在频域内的描述,表达了能量在各个频段内分布的相互关系;幅值谱是傅里叶谱的一种,描述了能量在频域内的分布。反应谱与功率谱之间的关系为

$$S(\omega_k) = \frac{\epsilon}{\pi\omega_k} [S(\omega_k, \epsilon)^T]^2 \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-P) \right]}, \quad (2)$$

式中 $S(\omega_k, \epsilon)^T$ 为给定的目标反应谱值; ϵ 为阻尼率; T 为地震历程的总时长; P 为反应谱超越概率,一般为 0.85。功率谱与幅值谱的关系为^[9,13]

$$A_k = [4 \cdot S(\omega_k) \cdot \Delta\omega]^{1/2}, \quad (3)$$

$$\Delta\omega = 2\pi/T, \quad (4)$$

$$\omega_k = 2\pi k/T, \quad (5)$$

通过(2)~(5)式计算得到幅值谱后代入(1)式,即可得到人工合成的地震时间历程,时间包络函数表达式为^[8-9,12-13]

$$\varphi(t) = \begin{cases} (t/T_1)^2, & t < T_1 \\ 1, & T_1 \leq t < T_2 \\ \exp[-c(t-T_2)], & T_2 \leq t \end{cases} \quad (6)$$

按照地震持续时间选择相应的上升时间、持续时间和下降时间,即可完成人工地震时间历程的合成。经验表明,初次合成的加速度历程往往与设计反应谱存在一定的偏离,需要对其进行修正,本文引入幅值修正的方法,对生成的加速度时间历程进行

幅值校正,一般通过 3~5 次修正即可达到很好的拟合效果^[9],校正公式为

$$a(\omega_k)^{i+1} = a(\omega_k) \cdot \frac{S(\omega_k, \epsilon)^T}{S(\omega_k, \epsilon)}. \quad (7)$$

2.2 加速度时间历程合成

按照 2.1 节中所述的方法,基于 Matlab 编制相应的程序,并制作软件界面如图 1 所示。

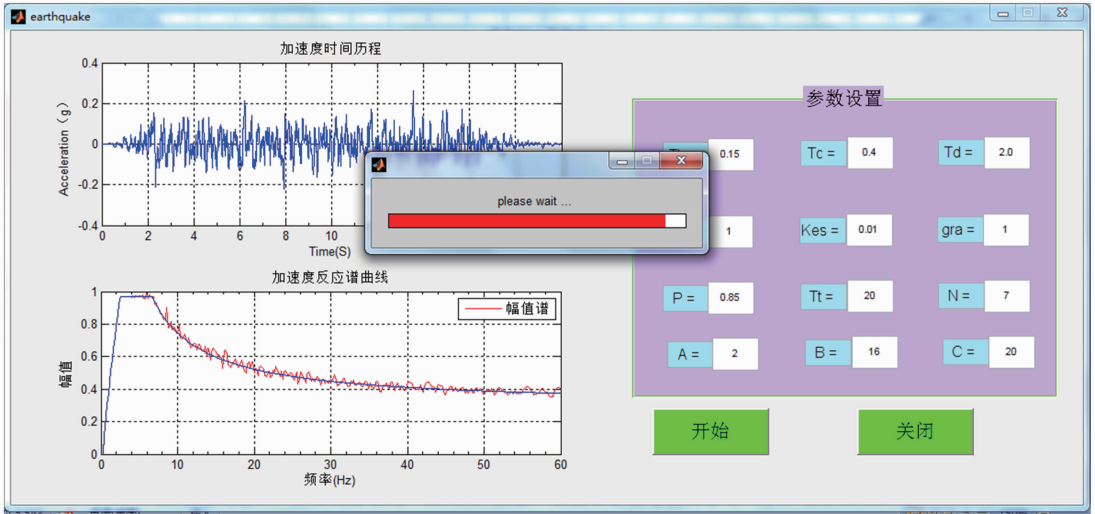


图 1 地震波拟合软件界面

Fig. 1 Seismic fitting software surface

利用上述软件,可拟合得到 TMT 三镜支撑系统所需的地震记录。根据相关文献,得到 TMT 的地震谱^[1-2],估计三镜支撑系统的地震谱值为 TMT 整体地震谱的 1.3 倍,对该地震谱进行修正,得到该系统阻尼为 1% 时的设计地震谱,如图 2 所示。图 2 中同时给出了平均返回周期为 200 年和 1000 年的水平和垂直两个方向的地震谱。

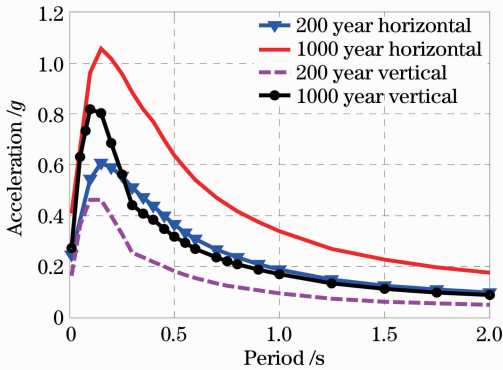


图 2 TMT 三镜支撑系统地震设计响应谱

Fig. 2 Seismic design response spectra of M3CA

以返回周期为 200 年的地震水平方向设计谱为例,利用上述软件,拟合得到一个地震时长为 20 s 的地震记录,时间步长为 0.02 s,拟合初值、第 1 次校正及第 5 次校正的效果如图 3~5 所示。

从图 3~5 可以看出,经过 5 次校正后,拟合的时间历程反应谱较好地符合了设计谱,尤其低频范围拟合效果非常好。经比较可得,拟合地震波的谱

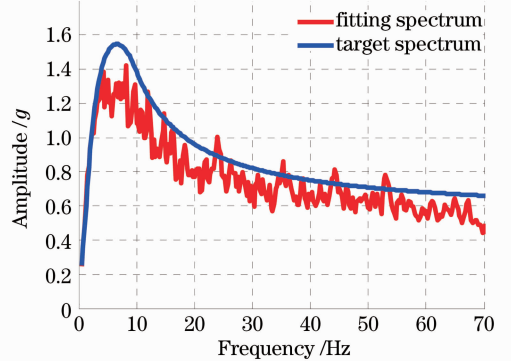


图 3 初始拟合地震时间历程反应谱

Fig. 3 Seismic response spectra fitting originally

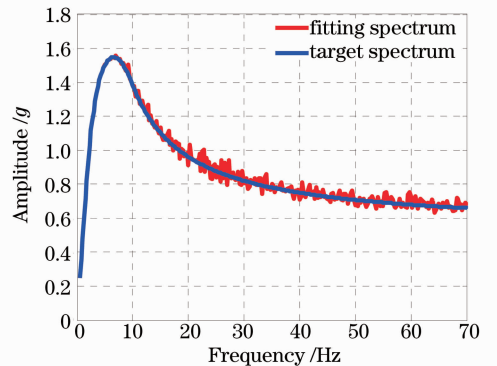


图 4 第一次校正后的谱

Fig. 4 Spectra after first correction

与目标谱的最大偏差出现在频率为 27 Hz 的位置,偏差为 7%,整体的平均偏差不超过 4%。拟合的地

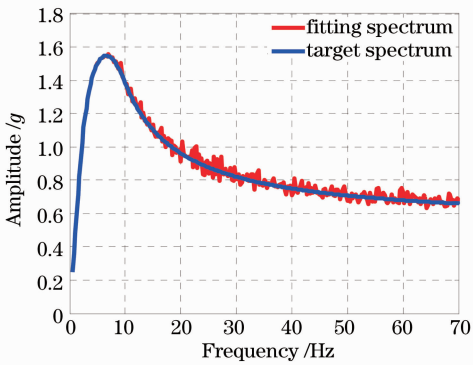


图 5 第 5 次校正后的谱

Fig. 5 Spectra after fifth correction

震动时间历程见图 6 左上方连续折线所示。

图 6 所示的加速度时间历程以 0.02 s 为时间步长,最大加速度约为 0.2g,这些加速度将以载荷步的

形式施加到结构中。采用同样的方法,对返回周期为 200 年的垂直方向地震设计响应谱也进行了拟合。

3 地震分析

3.1 有限元模型建立

利用得到的加速度时间历程可对 TMT 三镜支撑系统进行地震分析。三镜系统在 TMT 中的位置如图 7 所示,三镜支撑系统如图 7 右上方红色框出的部分所示。在三镜及其支撑结构中,三镜是一个尺寸为 3594 mm×2568 mm 的椭圆形平面镜,三镜的材料采用热膨胀率较小的微晶玻璃,重量为 1.8 t,侧支撑柔性杆采用铝合金,其他部分材料为钢,该系统的三维结构如图 8 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模拟,有限元模型如图 9 所示。

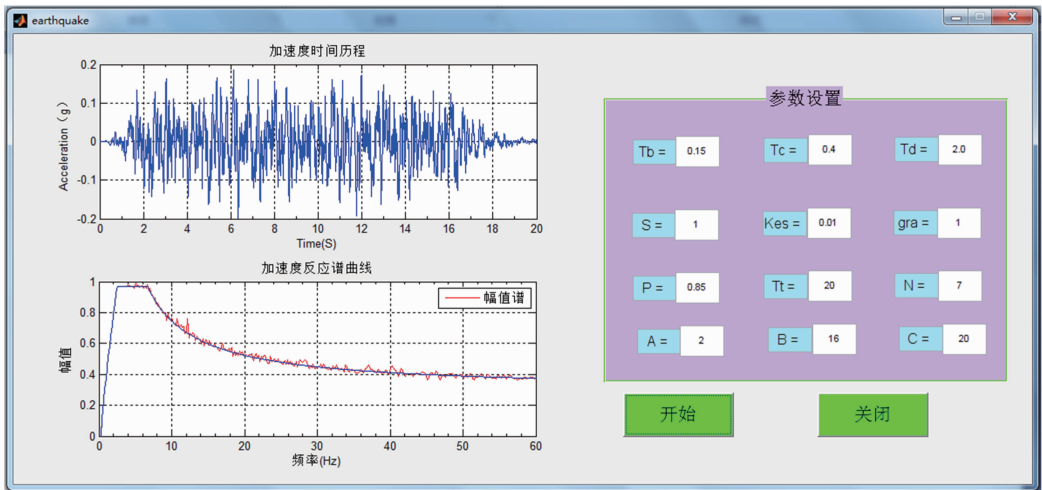


图 6 地震加速度时间历程

Fig. 6 Seismic acceleration time history

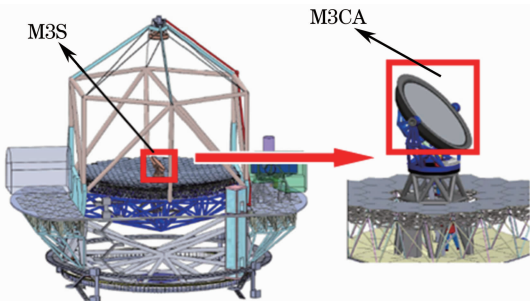


图 7 三镜系统及 M3CA 的位置

Fig. 7 Position of M3S and M3CA

3.2 结构阻尼

阻尼是影响分析结果的重要因素,它与结构本身的粘性、周围环境的影响(风振动等)和结构内部摩擦损耗等有关。望远镜为了保持良好的跟踪能力和重复性定位精度,要求阻尼值较小,但由于缺乏实

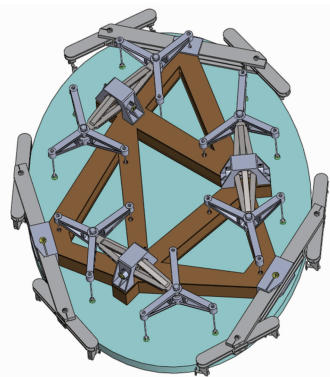


图 8 三镜室结构模型

Fig. 8 Structure of M3 support structure

验,很难获得真实值。一般在时程分析中,多采用瑞利阻尼模型^[4-6,14],表达式为^[15]

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (8)$$

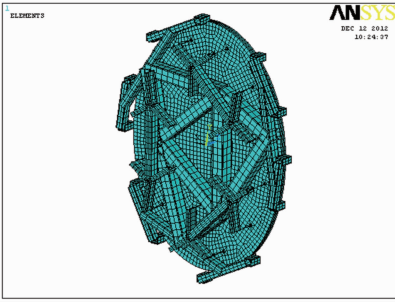


图 9 三镜支撑结构有限元模型

Fig. 9 Finite element model of M3 support structure

式中 α 为 Alpha 阻尼,也称为质量阻尼; β 为 Beta 阻尼,也称为刚度阻尼。这两个阻尼系数可通过振型阻尼比计算得到,如下所示^[15]

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\epsilon_i\omega_j - \epsilon_j\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}, \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2(\epsilon_j\omega_j - \epsilon_i\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2}, \quad (10)$$

式中 ω_i 和 ω_j 分别为系统的第 i 阶和第 j 阶固有频率, ϵ_i 和 ϵ_j 为第 i 阶和第 j 阶振型对应的阻尼比。一般取 $i = 1, j = 2$, 相应的阻尼比一般在 2%~20% 范围内变化。

3.3 时程分析结果

选择三镜镜面法线指向天顶的位置进行分析,对结构施加地震加速度所用的坐标系定义如下:坐标系原点位于三镜反射面的中心, X 轴沿三镜椭圆短轴, Z 轴的正方向指向天顶(反重力方向), Y 轴由右手定则确定。施加沿 X, Y, Z 三个方向的地震加速度到三镜支撑系统中, X 向和 Y 向施加相同的水平方向加速度历程, Z 向则施加按照竖直方向设计响应谱拟合的加速度历程,通过时程分析,可得到系统在时间连续变化下的位移、加速度、应力等的响应。观察有限元分析结果云图可知,系统的最大位移始终发生在三镜上,提取在 X 向地震激励下系统沿 X 轴、 Y 轴、 Z 轴的最大位移,如图 10 所示。

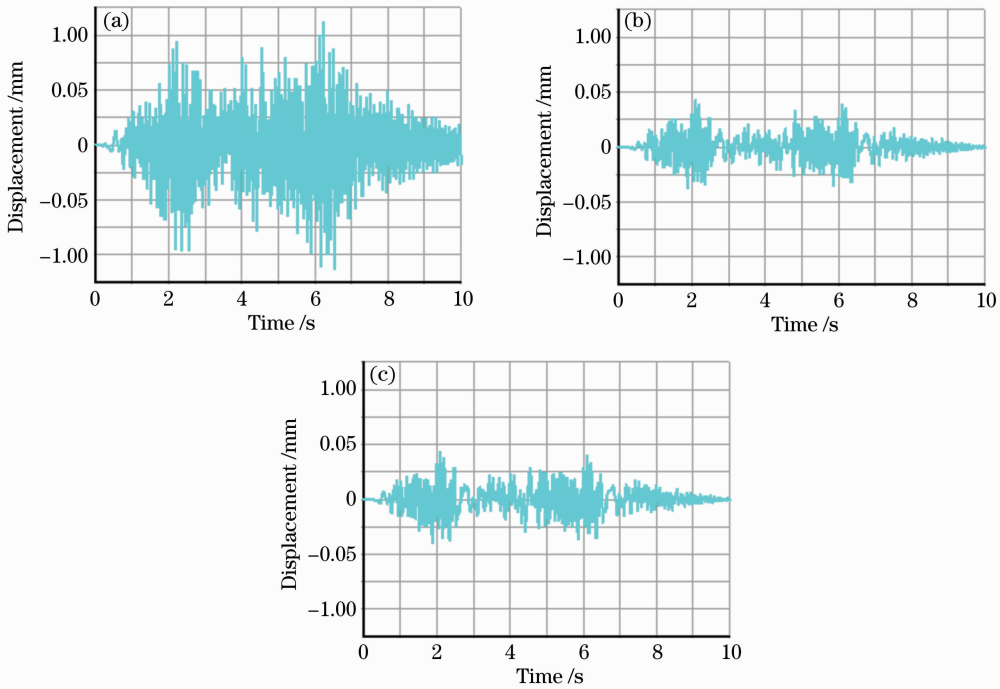


图 10 三向最大位移时程曲线。(a) X 向; (b) Y 向; (c) Z 向

Fig. 10 Maximum displacement time history curves of three directions. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

由图 10 可见,在 X 方向地震作用下,系统沿 X 向的最大位移远大于 Y 向和 Z 向, Z 向位移最小,查看变形云图可知,最大位移发生在三镜上。同时由图 10 可知,三向位移均随着地震的增强而增大,随着地震的衰弱而减小。

对于望远镜中的重要部件,例如相机,还应当提取该部件上的最大加速度,以判断其最大加速度是

否会影响这些部件的性能,当相机上的加速度过大时,应当采取加阻尼器等措施,以减小传递到相机上的加速度。对于三镜支撑系统,加速度最大值始终产生在三镜上,提取三镜上的最大加速度,如图 11 所示。

由图 11 可见,系统沿 X 向的加速度远大于 Y 向和 Z 向,最大加速度值接近 $0.5g$,而 Y 向和 Z 向

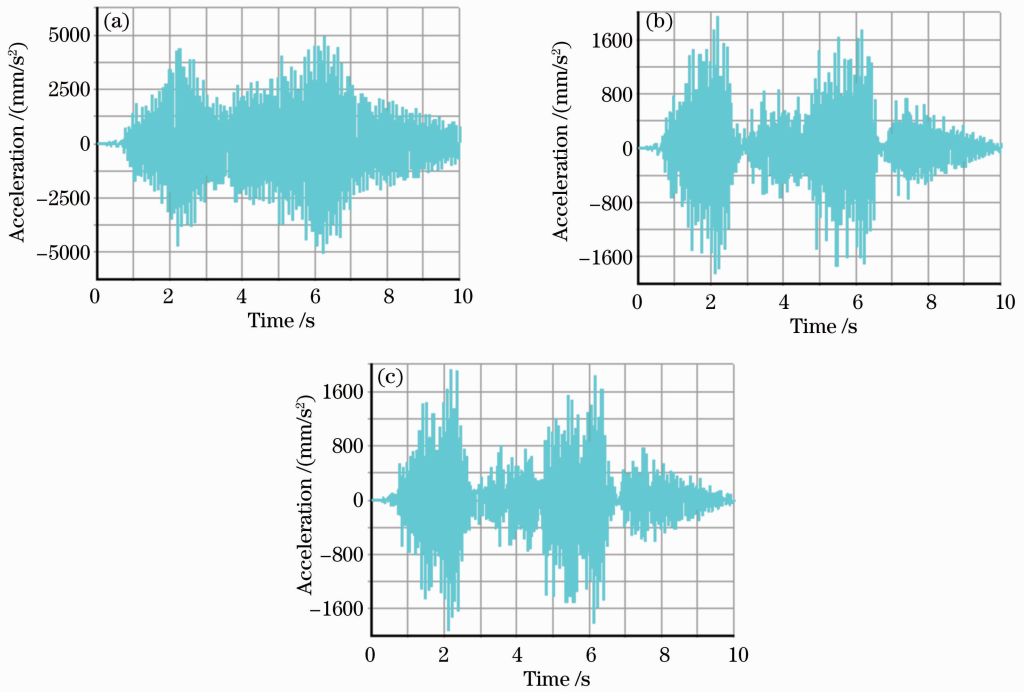


图 11 三向最大位移加速度曲线。(a) X 向；(b) Y 向；(c) Z 向

Fig. 11 Maximum acceleration time history curves of three directions. (a) X direction; (b) Y direction; (c) Z direction

最大加速度约为 $0.2g$ 。说明此时三镜沿 X 轴方向的冲击较大,需要采取一些措施预防三镜受损。

通过查看时程分析的结果,三镜支撑系统相对于该系统接口的最大变形为 1.881 mm,三镜最大应力为 0.27 MPa,三镜支撑系统整体最大应力为 310.54 MPa 且发生在第 6.6 s,如图 12 和图 13 所示。

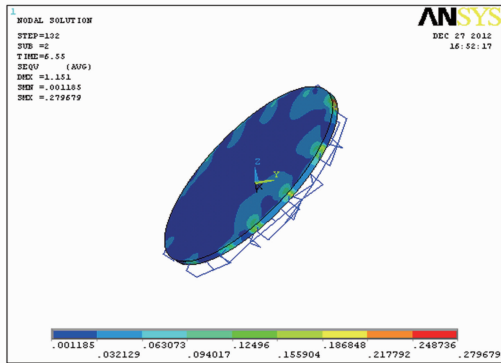


图 12 三镜最大应力分布

Fig. 12 Maximum stress distribution of tertiary mirror

由图 12~13 可见,最大应力分布在镜子的侧支撑位置,最大位移发生在三镜上。三镜材料的极限应力为 57 MPa,侧支撑杆材料的极限应力为 3400 MPa,将系统最大应力值与材料的极限应力相比较可知,最大应力小于材料的极限应力,系统不会发生破坏。

分析三镜支撑系统的特性,可知最大变形和应力分别发生在三镜上和侧支撑杆上的原因。在设计

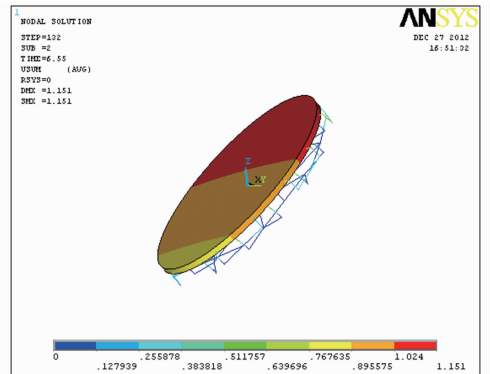


图 13 三镜系统最大位移分布

Fig. 13 Maximum displacement distribution of M3CA

大口径镜面支撑结构时,应当尽量减小底支撑杆和侧支撑杆的刚度耦合,理想情况下,重力沿镜面法向时只有底支撑杆起作用,重力与镜面方向平行时只有侧支撑杆起作用。为了达到上述设计目的,应当尽量减小各杆的截面尺寸,使其在与杆的轴线垂直方向的刚度很弱,因此,支撑杆成为系统刚度的薄弱环节,最容易发生变形和破坏。支撑杆的变形量直接传递到三镜上,使得最大位移始终发生在三镜上。侧支撑杆的数量少于底支撑杆,使得侧支撑杆比底支撑杆更加容易发生变形和破坏,因此,三镜的最大应力也更容易发生在侧支撑作用的位置。

该结果与系统在实际地震中的性能相比是偏于安全的,因为假设材料模型均为线弹性,不会发生塑

性变形,但实际上可能会发生塑性变形以吸收地震释放的能量,使最大应力和变形减小。

4 结 论

采用基于随机三角级数的方法进行了地震波拟合,编制了相应的程序和软件。针对拟合精度低的问题引入幅值迭代校正,能够良好地符合设计要求,解决了快速精确地拟合不同特征地震波的问题。根据 TMT 三镜系统支撑结构的设计响应谱,利用该软件拟合出返回周期为 200 年的水平和垂直两个方向的地震波,时长为 20 s,拟合的地震波的谱与目标谱的平均偏差在 4% 以内。将该地震波施加到结构中,采用瑞利阻尼模型,经过分析得到系统中最大位移和加速度时程曲线,并得到系统的最大应力。由结果可知,结构在该强度的地震下可保证安全性能,不会发生破坏。分析结果可用于指导结构的详细设计,实用性强,为大口径望远镜的地震分析提供了指导。

参 考 文 献

- 1 URS Corporation. Site-Specific Seismic Hazard Assessment of Proposed Thirty Meter Telescope Site, Mauna Kea, Hawaii [OL]. http://tmt.org/sites/default/files/documents/application/pdf/urs_report_2-4-10.pdf. [2013-09-06].
- 2 TMT Group. Design Requirements Document for Tertiary Mirror System (M3S) [Z]. TMT. OPT. DRD. 07.006.REL29. 2012.
- 3 F W Kan, J Antebi. Seismic hazard: analysis and design of large ground based telescopes [C]. SPIE, 2008, 7012: 70122E.
- 4 F KOCH. Analysis concepts for large telescope structures under earthquake load [C]. SPIE, 1997, 2871: 117-126.
- 5 D Tsang, G Austin, M Gedig, *et al.*. TMT telescope structure system-seismic analysis and design [C]. SPIE, 2008, 7012: 07124J.
- 6 D R Neill, M Warmer, J Sebag, *et al.*. Seismic design accelerations for the LSST telescope [C]. SPIE, 2012, 8444: 84440R.

- 7 Wang Huai, Dai Shuang, Zhang Jingxu. Azimuth shafting bearing structure in a large alt-azimuth telescope [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(7): 1509-1516.
- 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.
- 8 Li Jie, Li Guoqiang. Earthquake Engineer Introduction [M]. Beijing: Earthquake Press, 1984.
- 李 杰, 李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
- 9 Chen Yongqi, Liu Xiquan, Gong Sili. Artificial seismic wave fitting standard response spectrum [J]. Engineer Mechanics, 1994, 12(3): 31-42.
- 陈永祁, 刘锡芸, 龚思礼. 拟合标准反应谱的人工地震波[J]. 工程力学, 1994, 12(3): 31-42.
- 10 Yang Fei, Ming Ming, Chen Baogang, *et al.*. Influence of diversification of elevation to the opto-mechanical system of 1.23 m telescope [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 032201.
- 杨 飞, 明 名, 陈宝刚, 等. 仰角变化对 1.23 m 望远镜光机系统的影响[J]. 激光与光电子进展, 2012, 49(3): 032201.
- 11 Zhang Jun, Xian Hao, He Yuanxing, *et al.*. Theoretical calculation of telescope primary mirror's thermal field and seeing analysis of primary mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022001.
- 张 俊, 鲜 浩, 贺元兴, 等. 望远镜主镜温度场理论计算机主镜视宁度分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022001.
- 12 Hu Yuxian, He Xun. Artificial seismic response spectrum fitting with phase spectrum considered [J]. Earthquake Engineer and Engineer Vibration, 1986, 6(2): 37-51.
- 胡聿贤, 何 讯. 考虑相位谱的人造地震动反应谱拟合[J]. 地震工程与工程振动, 1986, 6(2): 37-51.
- 13 Chen Wei. Direction method research on seismic acceleration response spectrum fitting [J]. Engineer Mechanics, 2000, 17(1): 83-87.
- 程 伟. 地震加速度反应谱拟合的直接法研究[J]. 工程力学, 2000, 17(1): 83-87.
- 14 Zhou Chao, Yang Hongbo, Wu Xiaoxia, *et al.*. Structural 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.
- 15 Wang Xinmin. Ansys Engineer Structure Numerical Analysis [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- 王新敏. Ansys 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

栏目编辑: 何卓铭