

文章编号 1004-924X(2013)05-1199-06

预紧式八翼梁次镜支撑结构的动力学分析

赵宏超^{1,2}, 张景旭^{1*}, 杨 飞¹, 赵勇志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 100039)

摘要: 为了增加大口径望远镜次镜支撑结构的抗扭转刚度, 降低次镜支撑结构对主镜的遮拦, 提出了采用预紧力八翼梁结构来取代原有的四翼梁结构。根据 Euler-Bernoulli 梁理论将次镜支撑结构简化为一个由质量点和简支梁组成的简化模型, 并进一步将该模型简化为两个更为简单的动力学模型的组合。通过选取恰当的振型函数, 使用 Rayleigh 和 Dunkerley 方法推导了简化模型的第一阶模态频率数值解, 得到的计算结果与有限元仿真结果吻合得很好。针对预紧力的作用, 理论推导了预紧力对这种结构第一阶模态值的影响, 并使用有限元法对这种结构进行了模拟, 两者得到的结果趋势相同, 大小一致, 从而证明该简化方法可以用于类似结构的动力学特性计算。仿真结果显示, 当预紧力施加到 20 kN 时, 结构的第一阶模态值由 11.6 Hz 上升到 23 Hz, 大大提高了结构的抗扭转刚度, 并有效减轻了次镜支撑结构的重量和遮拦比。该结论对于大口径望远镜次镜支撑的设计具有参考价值。

关键词: 望远镜; 次镜; 支撑结构; 预紧力; 八翼梁结构; 有限元法; 数值分析

中图分类号: TH751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132105.1199

Preloading eight-vane spider for supporting structure of secondary mirror

ZHAO Hong-chao^{1,2}, ZHANG Jing-xu^{1*}, YANG Fei¹, ZHAO Yong-zhi¹, CHEN Bao-gang¹

(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: zhangjx@ciomp.ac.cn*

Abstract: To increase the anti-torsion stiffness of secondary mirror support structure of a telescope and to reduce the obscuration from the support structure, an imposed preload of 8-vane spider was designed to replace the original 4-vane spider. According to the Euler-Bernoulli beam theory, the mirror support structure was simplified as a simple model consisting of a beam and a mass point, and then the simplified model was divided into two more simple kinetic models. By selecting the appropriate mode function, the numerical solution of the first order modal for the simplified model was deduced with Rayleigh and Dunkerley approaches. Obtained calculated results are in good agreement with that from Finite Element Analysis (FEA). Moreover, in order to solve the impact of the preload on this structure, a coefficient was deduced in theory. Then, the model was simulated by FEM and the result obtained in FEM is the same as that calculated one in theory. The analysis results prove that the

收稿日期: 2012-11-28; 修订日期: 2013-02-05.

基金项目: 中科院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程专项基金资助项目

method is available for the calculation of the similar structural dynamics characteristics. The simulations show that the first order modal of the structure can change from 11.6 Hz to 23 Hz when the preload increases up to 20 kN, which proves that the preload can effectively impact on the anti-torsion stiffness and reduce the secondary mirror support weight and obscuration ratio. The results can give a reference for designing secondary mirror support structures.

Key words: telescope; secondary mirror; supporting structure; preload; eight-vane structure; Finite Element Analysis(FEA); numerical simulation

1 引言

随着对成像分辨率要求的提高,现代望远镜主镜的口径不断增加,次镜的口径和主次镜之间的距离也越来越大。在保证望远镜主镜支撑刚度的前提下,对不同指向时主次镜之间相对位置关系和对次镜支撑结构提出了更高的要求^[1-4]。在现代地平式望远镜中,常用的次镜支撑结构是三翼对称支撑、四翼梁式的十字形中心支撑以及四翼梁偏置结构,这些支撑结构简单、制造方便^[5]。但是三翼对称支撑结构和四翼梁式的十字中心支撑结构的抗扭转刚度较低,限制了其在大口径光学系统次镜支撑上的应用;同样,改进的四翼梁偏置结构,虽然通过使用偏置叶片大大提高了抗扭转刚度,但这种结构使得梁片的长度增加,降低了圆周平面内两平动方向的刚度,对成像不利^[5]。

采用施加有预紧力的八翼梁十字对称支撑可以在较小梁片厚度的情况下,获得较高的第一阶谐振频率,从而有效降低次镜支撑结构的重量和对主镜的中心遮拦。但这种结构安装复杂度较高,预紧力也会通过连接部分传递到副镜圈。并且,预紧力不可以过大,否则会由于材料蠕变使得预紧力随时间发生变化。虽然预紧式八翼梁十字对称支撑有以上的不足,但相比三翼梁、四翼梁等传统结构,这种结构仍具有更好的优越性和实用性,更加适用于大口径望远镜的建设。这一结构在国外的几个大口径望远镜次镜支撑中已经得到成功应用,如 MMT、KECK 望远镜^[6]等,但相应的理论研究比较少。本文对预紧式八翼梁支撑结构进行了动力学分析,建立了八翼梁次镜支撑的动力学模型,推导了预紧力对八翼梁支撑结构的影响,给出了理论计算与有限元仿真得到的结果,并进行了比较。

2 动力学模型

2.1 问题描述

典型的预紧力八翼梁支撑结构如图 1 所示。支撑梁的一端与环梁连接,另一端支撑着次镜组件,通过旋紧位于八翼梁末端的预紧螺母来施加预紧力。为简化,一方面假定次镜及其组件的质量沿着圆周方向和轴线方向均匀分布,相当于 8 根支撑梁在支撑次镜端受到均布载荷的作用发生

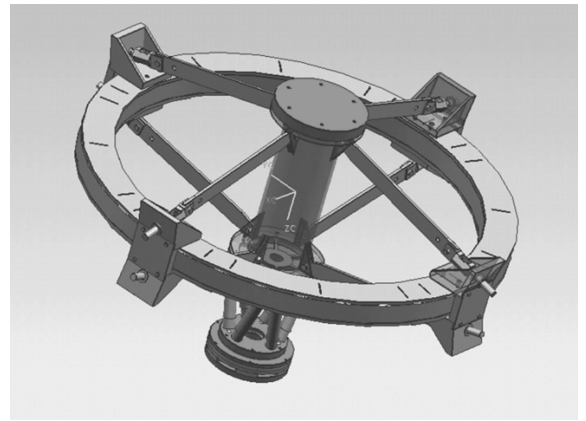


图 1 次镜室支撑结构

Fig. 1 Secondary mirror supporting structure

振动,将这个均布载荷等效为在支撑端处的集中质量进行分析;另一方面支撑梁的长细比为 480,根据 Euler-Bernoulli 梁理论将支撑梁等效为梁单元处理。梁的厚度较薄,抗弯曲能力较差,因而该结构的第一阶振型主要是梁的弯曲振动。考虑结构的对称性,振型曲线的延长线必与次镜室轴线相交,如图 2 所示。任选一根梁作为研究对象,并将梁延长到次镜室的轴线处建立次镜支撑结构的动力学模型。取支撑梁与环梁连接处为坐标原点 O ,振型方向沿 Y 轴,梁的取向为 X 轴建立坐标系。梁与环梁的相交处 O 点的连接方式为铰接,将 O 点简化为铰支;根据对称原理,梁支撑次

镜的一端也可以简化为铰支结构。

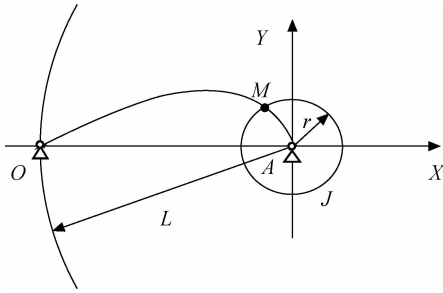
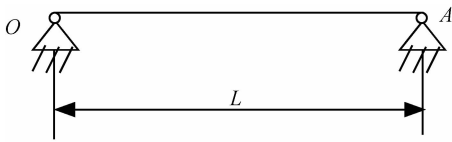


图 2 动力学分析简图

Fig. 2 Sketch of dynamic analysis model

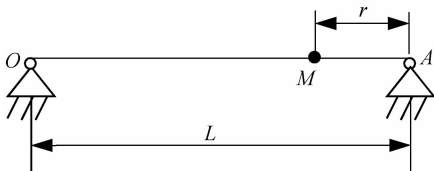
2.2 模型简化与分解

根据以上简化, A 点和 O 点都为铰支结构。并将次镜室的影响近似为一个位于次镜支撑半径上的质量点 M。为了方便计算这一简化模型的力学特性, 将这一个模型等效为两个更为简单模型的叠加, 第一个简单模型是不计质量点质量的简支梁模型, 如图 3(a) 所示; 另一个简单模型是只计质量点质量的简支梁模型, 如图 3(b) 所示。



(a) 不考虑质量点质量的简化模型

(a) Simplified model without considering mass point



(b) 仅考虑质量点质量的简化模型

(b) Simplified model with considering mass point

图 3 系统简化模型

Fig. 3 Model of system

3 无预紧力影响下动力学特性计算及模拟

3.1 不计质量点质量的梁模型基频计算

简支梁的特征方程为^[7]:

$$\sin\beta L = 0, \quad (1)$$

其中: $\beta^4 = \frac{\omega^2 m}{EI}$, m 为梁的线密度。

可得其固有频率为:

$$\Omega_1 = (\beta_1 L)^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^4}}. \quad (2)$$

3.2 只计质量点重量的梁模型基频计算

首先按 Rayleigh 能量法, 取这一模型的试函数为:

$$y(x) = y_0(x^4 - 2Lx^3 + L^3x), \quad (3)$$

式中: y_0 为常数, 其瑞利商的表达式为:

$$\Omega_1^2 = \frac{\int_0^L EI \left[\frac{d^2 y}{dx^2} \right]^2 dx}{d^2(L)M}. \quad (4)$$

将式(3)带入式(4)得到基频表达式为:

$$\Omega_1^2 = \frac{192EIL^5}{5J(L-r)^2(L^2 + Lr - r^2)^2}. \quad (5)$$

3.3 简化梁基频的计算

根据 Dunkerley 法, 简化梁的基频为:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\Omega_1^2} + \frac{1}{\Omega_1^2}}}. \quad (6)$$

3.4 次镜支撑结构的第一阶固有频率

以 1.23 m 望远镜为例, 八翼梁支撑半径 L 为 0.874 m, 次镜室支撑半径 r 为 0.11 m, 八翼梁截面厚度为 0.007 m, 高度为 0.06 m, 次镜室绕光轴的转动惯量为 2.1 Kg · m², 八翼梁的材料为 07Cr17Ni7Al, 固溶和时效处理后其屈服极限大于 960 MPa。根据式(6)可以求出结构的第一阶谐振频率为 11.7 Hz。

使用 Ansys 对八翼梁支撑结构进行模态分析。如图 4 所示, 次镜室采用实体单元划分网格, 八翼梁使用梁单元建模, 在无预紧力作用下计算得第一阶固有频率为 11.6 Hz, 其一阶振型如图 5

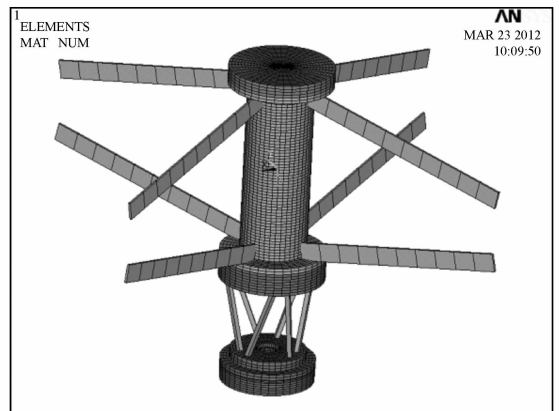


图 4 有限元模型

Fig. 4 Finite element analysis model

所示。从计算结果上可以得出,理论计算和有限元方法计算得到的结果非常接近,从而验证了这种简化的合理性和可行性。

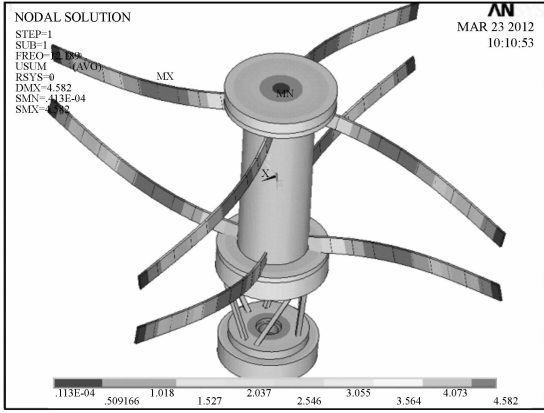


图 5 第一阶模态振型
Fig. 5 Model 1

4 预紧力的作用及有限元模拟

根据两个简化模型分别讨论预紧力对次镜支撑结构的影响。

4.1 预紧力对不计质量点梁模型的影响

根据 Kirchhoff 动力学模型,可以得出这种情况下的动力学表达式^[8]:

$$EI \int_0^L y'' \delta y'' dx + P \int_0^L y' \delta y' dx = m \int_0^L y \delta y dx, \quad (7)$$

其中: P 为预紧力。从上式可以推导出以下的频率:

$$\Omega_n^2 = \frac{1}{m} \left[\frac{n^4 \pi^4}{L^4} EI + \frac{n^2 \pi^2}{L^2} P \right]. \quad (8)$$

针对第一阶模态,化简后可表示为:

$$\Omega_1 |_{P \neq 0} = \Omega_1 |_{P=0} \sqrt{1 + \frac{P}{P_{\sigma 1}}}, \quad (9)$$

其中: $P_{\sigma 1} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$,这个公式称为两端铰支边界条件下细长压杆临界压力的欧拉公式^[9-10]。

4.2 预紧力对只计质量点梁简化模型的影响

在 2.2.2 节中,使用 Rayleigh 能量法时,仅考虑梁本身的弯曲势能,而当给梁施加轴向的预紧力时,伴随着梁的弯曲变形,梁的势能还需要包括梁克服预紧力所作的功,所以:

$$\Omega_1^2 = \frac{\int_0^L EI \left[\frac{d^2 y}{dx^2} \right]^2 dx + \int_0^L P \left[\frac{dy}{dx} \right]^2 dx - \int_0^L P \left[\frac{dy}{dx} \right]^2 dx}{y^2 (LM)}. \quad (10)$$

带入整理有:

$$\Omega'_1 |_{P \neq 0} = \Omega'_1 |_{P=0} \sqrt{1 + \frac{P}{|P_{\sigma 2}|}}. \quad (11)$$

其中:

$$P_{\sigma 2} = \frac{168EIL^5}{(17L^4 + 32L^3r - 12L^2r^2 - 40Lr^3 + 20r^4)(L - 2r)^3}. \quad (12)$$

$P_{\sigma 2}$ 是关于 L 和 r 的函数,其大小与次镜支撑的设计参数有关,在 $P_{\sigma 2}$ 中的分母项中,存在 $L - 2r$ 项,这表示,当质量点位于简支梁中央时,这种结构不受预紧力的影响,而这一结果也得到了有限元模拟的验证。

4.3 施加有预紧力的简化模型基频的计算

根据 Dunkerley 法,将 $\Omega_1 |_{P \neq 0}$ 和 $\Omega'_1 |_{P \neq 0}$ 带入式(6)即可求得预应力影响下的简化模型的基频。

4.4 有限元计算和理论计算结果对比

在 Ansys 中,通过赋梁的初始应变来施加预紧力,得到有限元仿真曲线。对照图 6 可知,当预紧力为 20 kN 时,结构的第一阶模态值达到 23 Hz,是未施加预紧力时的二倍。所以,使用施加预紧力的八翼梁支撑结构能够在较小截面积梁的前提下,获得较高的抗扭刚度,从而达到降低次镜支撑重量和减小遮拦比的设计目的。图 6 中,结构的第一阶模态随预紧力的增加而增大,并且理论曲线与有限元曲线趋势一致,大小相似,从而证明了这种方法的可行性。曲线末端两者稍有偏差,究其原因有两点,一是所使用的试函数不能完全准确表征振型曲线;二是在使用 Rayleigh 能量法时,未能全面包含梁的势能。

本例中根据有限元实验所得到的曲线图,可

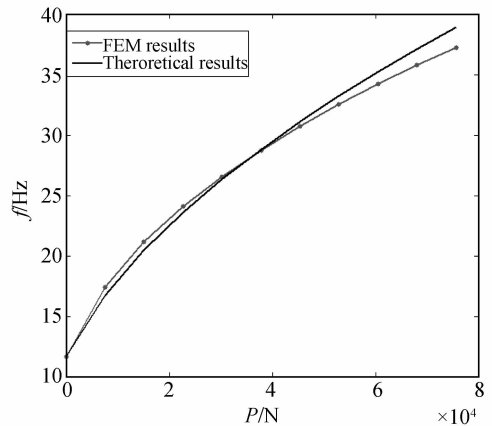


图 6 有限元计算结果与理论值对比
Fig. 6 FEA results vs theoretical results

以将其划分为两个区域,如图7所示。

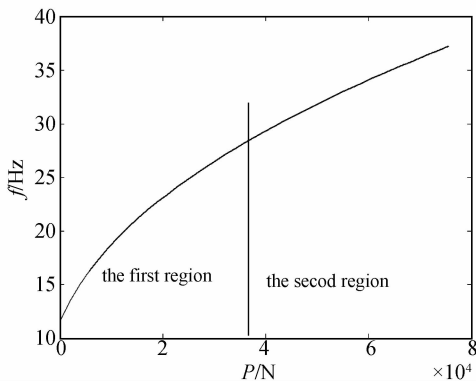


图7 有限元计算结果标度

Fig. 7 Scales with FEA simulation

在第一区域,模型的第一阶模态值与预紧力是正相关的,但在这一区域,由于 $\Omega_1|_{P \neq 0}$ 和 $\Omega'_1|_{P \neq 0}$ 相差不大,所以此时模型的模态值受两个简化模型的共同作用;在第二区域,预紧力很大,此时 $\Omega_1|_{P \neq 0} > 4\Omega'_1|_{P \neq 0}$,不计质量点的梁模型的第一阶模态值远大于第二种简单模型的第一阶模态值,所以在这个区间内,根据式(6),可忽略质量点梁模型的影响,简化模型的第一阶模态值变化等同于第二种简单模型受预紧力影响的变化而变化,如图7所示。此时,模型的第一阶模态的圆频率值与预紧力的关系为:

$$\omega_1|_{P \neq 0} = \Omega'_1|_{P=0} \sqrt{1 + \frac{P}{P_{\sigma 2}}}. \quad (13)$$

参考文献:

- [1] GENBERG V, MICHELS G. Making FEA results useful in optical analysis [J]. *SPIE*, 2002, 4769: 24-33.
- [2] 王富国,张景旭,杨飞,等.四翼梁式次镜支撑结构的研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(3):674-676.
WANG F G, ZHANG J X, YANG F, et al.. Crossed-plate type support structure of the second mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(3): 674-676. (in Chinese)
- [3] 张林波,任戈,陈洪斌,等.四翼十字形中心支撑结构的动力学分析[J]. *光学精密工程*, 2003, 11(5): 472-476
ZHANG L B, REN G, CHEN H B, et al.. Dy-

将式(5)和式(12)带入式(13)可得:

$$\omega_1|_{P \neq 0} = \sqrt{\frac{8(P + P_{\sigma 2})}{35J}} f(L, r), \quad (14)$$

其中: $f(L, r)$ 是关于 L 和 r 方程,易证:

$$\text{当 } r < \frac{1}{2}L \text{ 时, } \frac{\partial f(L, r)}{\partial r} > 0.$$

所以,预紧八翼梁次镜支撑结构的第一阶模态值随预紧力及次镜室支撑半径 r 的增大而增大,随次镜室转动惯量的增大而减小。故合理设计次镜室结构能够有效提高预紧式八翼梁次镜支撑结构的动力学性能。

5 结论

基于梁理论,建立了八翼梁次镜支撑的动力学模型,推导了预紧力对八翼梁支撑结构的影响,理论计算与有限元仿真结果吻合较好。本结果使得工程上能够快速评估预紧力对八翼梁次镜支撑的作用,估算出施加预紧力后次镜支撑结构的第一阶模态值。在次镜支撑中使用预紧式八翼梁支撑结构,能够有效降低支撑的重量和对主镜的中心遮拦,提高望远镜主镜的集光效率。仿真结果表明:当施加 20 kN 预紧力时,结构的第一阶模态值由 11.6 Hz 上升到 23 Hz,大大提高了支撑结构的抗扭刚度。该结论对于大口径望远镜次镜支撑的设计具有重要的参考价值。

- dynamic analysis for supporting structure of crossed-plate type [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 472-476. (in Chinese)
- [4] 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. *Principles of Astronomical Telescope Design* [M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [5] BELY P Y. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes* [M]. US: Springer-Verlag, 2003.
- [6] CUERDEN B. f/5 secondary support system Design [R]. *Mmto Tech Report*, 1998.
- [7] 师汉民. 机械振动系统—分析·测试·建模·对策 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2004:91-124.
SHI H M. *Vibration Systems—Analyzing · testing · modeling · controlling* [M]. Wuhan: Huazhong

University of Science and Technology Press, 2004: 91-124. (in Chinese)

- [8] IRVINE T. *Bending Frequencies of Beams, Rods, and Pipes, Revision H* [M]. Vibrationdata publications, 2002.
- [9] XIONG H X, ZHANG Y T. Theoretical analysis of natural frequency of externally prestressed concrete

beam based on correction [J]. *Academic of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 21(1): 31-35.

- [10] AMBROSINI D, LUCCIONI B, DANESI R. Theoretical-experimental damage determination in prestressed concrete beams [C]. *International Symposium on NDT Contribution to the Infrastructure Safety Systems, Brazil*, 1999.

作者简介:



赵宏超(1985—),男,山东泰安人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事望远镜轴系设计技术的研究。E-mail: zhaohcciomp@163.com



赵勇志(1979—),男,山东泰安人,博士,助理研究员,2001年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2012年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型光电经纬仪结构设计。E-mail: zyz0715@sohu.com



杨飞(1982—),男,湖北天门人,硕士,助理研究员,2003年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光学仪器机构设计方面研究。E-mail: yangflying@163.com



张景旭(1965—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1987年、1990年于北京邮电大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型光电经纬仪结构设计。E-mail: zhangjx@ciomp.ac.cn



陈宝刚(1982—),男,河北衡水人,硕士,助理研究员,2005年、2008年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事大型光学仪器结构设计方面的研究。E-mail: cbg0813@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)