

Whiffletree 支撑结构平衡性调节及测试方法

魏祥通^{1,2} 张景旭¹ 王富国^{1*} 刘祥意¹

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所¹, 长春 130033;

中国科学院大学² 北京 100039)

摘要 基于运动学原理的 Whiffletree 结构被广泛应用在大口径望远镜底支撑中。为了达到理想的支撑效果,保证主镜镜面面形精度,对 Whiffletree 结构的平衡性能提出了很高的要求。针对这一装调测试需求,结合 Whiffletree 结构的特点,提出了运用 Load cell、千分表等仪器对 Whiffletree 结构的平衡性测试方案,并通过增减配重和调节配重高度的方法对 Whiffletree 结构的平衡性进行调节。首先对该装调测试方案进行了原理分析,然后使用该方案对某望远镜主镜底支撑所采用的 Whiffletree 结构的平衡性进行了调节和测试。测试结果表明,经调节后的结构各支撑点支撑力误差在 $\pm 0.25\text{ N}$ 范围内,满足 $\pm 0.5\text{ N}$ 的设计要求。该方法切实可行,对今后 Whiffletree 结构更好地应用在大口径望远镜的支撑中具有一定指导意义。

关键词 Whiffletree 平衡测试 平衡调节 Load cell 底支撑

中图分类号 TH751;

文献标志码 B

Whiffletree 结构也被称作无定向三角板支撑系统,最早是 1945 年 Hindle 在一篇关于反射镜悬浮系统的文章中提出的^[1]。在现代大口径望远镜设计中,主镜轴向支撑大都采用这种结构^[2,3]。Whiffletree 结构源于运动学 3 点定位原理,通过使用三角摇板或者等臂杠杆将支撑点的数目按照 2 或 3 的倍数增加^[4],从而通过增加支撑点的数目来保证镜面面形精度。

镜体支撑引起的镜面变形误差是镜面面形误差的重要来源之一^[5]。支撑结构能够正确起作用的一个非常重要的原则就是,各支撑点的支撑力必须按照设计值精确分配。然而由于支撑结构加工误差和装配误差的存在,支撑结构的实际平衡点的位置和理论位置会存在一定的偏差,将导致各个支撑点的支撑力与设计值不一致,从而影响镜面面形精度。为了保证支撑结构的支撑效果,本文提出了一种简单可行的 Whiffletree 结构的平衡性测试及调整方法,并通过实验验证了该方法的有效性。

1 支撑系统简介

实验用 Whiffletree 结构为 18 点 Whiffletree 支

撑结构。Whiffletree 结构第一级为等臂杠杆机构,第二级为三角摇板机构。3 个实际硬点逐级扩展为 18 点等力支撑点对主镜进行轴向支撑,约束主镜的 UZ 、 RX 和 RY 三个自由度^[6];并放开 UX 、 UY 和 RZ 三个自由度。图 1 是该望远镜支撑系统示意图。

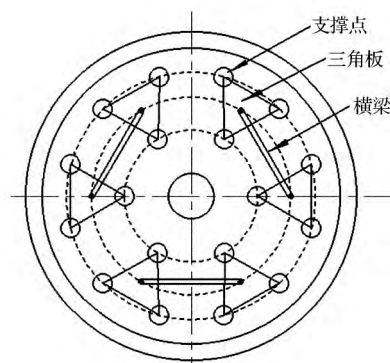


图 1 Whiffletree 支撑系统示意图

Fig. 1 Whiffletree support system plot

该支撑系统由三组 Whiffletree 结构组成,每组 Whiffletree 结构模型如图 2 所示。

横梁和三角板的回转中心全都采用柔性铰链机构来分别释放一个方向和两个方向的回转自由度。柔性铰链是利用材料的微弹性变形产生位移的一种特殊运动副。相较于其他回转机构,柔性铰链具有无机械摩擦、无间隙、体积小、运动灵敏度高和免于润滑等诸多优点^[7-10]。这种结构在一定程度上可以释放应力,在温度变化时反射镜可以自由膨胀或收缩,从而保持反射面上各点的球面性或平面性,从而减小对镜面面形的影响^[11,12]。

2016 年 6 月 15 日收到 国家自然科学基金项目(11403023)资助
第一作者简介:魏祥通(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向:大口径望远镜支撑技术。E-mail: Weixiangtong1992@163.com。

* 通信作者简介:王富国(1979—),男,山东单县人,博士,副研究员。研究方向:大型望远镜光机结构设计和有限元仿真。E-mail: wfg109@163.com。

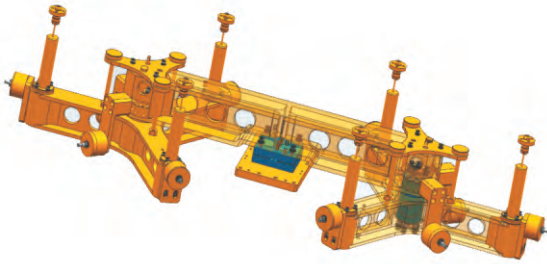


图2 Whiffletree 结构模型

Fig. 2 Whiffletree structure model

理想状态下,每个三角摇板机构的重心位于其回转中心,每组 Whiffletree 结构(包括两个三角摇板和一个横梁)的重心位于横梁的回转中心,这样结构的重力就不会给支撑带来附加力矩,各个支撑点就会对主镜实现等力支撑。如果结构重心偏离回转中心,那么结构重力引入的附加力矩将会使各个支撑点的力重新分配,从而偏离设计值。因而对支撑结构进行平衡测试,通过适当调整,确保结构重心偏差导致的各点支撑力偏差在允许的范围内是非常有必要的。根据前期镜面面对支撑力敏感度分析的结果,为保证支撑效果,该结构各支撑点支撑力误差允许范围为 $\pm 0.5 \text{ N}$ 。

2 装调测试系统原理

2.1 横梁重心调节

结构平衡测试的装置包括测试平台、数字水平仪、转台、千分表、Load cells(称重传感器)。整个测试过程中分别把每组 Whiffletree 支撑结构安装在测试平台上进行。按照先三角板,后横梁的顺序逐级进行装调和测试。图3所示为装调测试系统原理示意图。

横梁在水平工作状态时受力情况如图4所示。其中 F_{N1} 和 F_{N2} 为横梁两端支撑力; G 为横梁自身重力; F_z 为横梁回转中心单自由度柔性铰链对横梁的反作用力; M_y 为柔性铰链对横梁的支反力矩, A 点为柔铰回转中心, C 点为横梁重心。

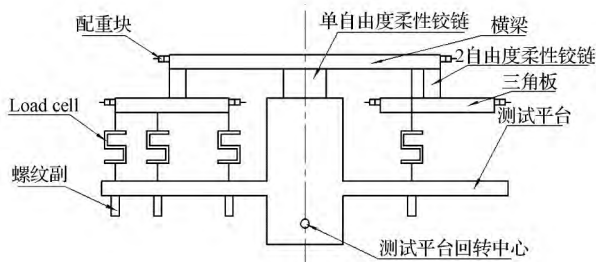


图3 测试原理示意图

Fig. 3 Sketch of testing principle

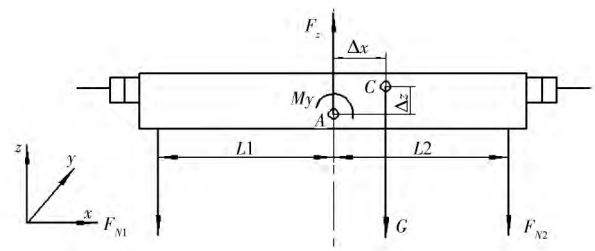


图4 工作状态横梁受力图

Fig. 4 Free-body diagram of beam in working condition

由受力平衡可得:

$$F_z = G + F_{N1} + F_{N2} \quad (1)$$

$$F_{N1}L1 - F_{N2}L2 - G\Delta x + M_y = 0 \quad (2)$$

在工作状态下,由于柔性铰链的 z 向刚度远大于绕 y 轴转动的刚度,所以结构重力偏差造成的附加力矩主要由 $F1$ 和 $F2$ 进行抵消,所以 $M_y \approx 0$ 。

取 $\Delta F_N = F_{N1} - F_{N2}$, 且由于 $L1 = L2$, 则式(2)可改写为

$$\Delta F_N L1 - G\Delta x = 0 \quad (3)$$

由式(3)可知, Δx 越大, ΔF_N 也就越大,所以采用增减配重块的方式来调节结构重心位置。通过减小 Δx 来达到减小 ΔF 的目的。也可以设计为通过沿 x 方向移动配重块的位置来达到调节重心的目的。本文实验用结构由于镜室空间受限,故而采用增减配重块方式调节。由于配重块方式调节重心,存在调节量离散的缺点,所以需要根据支撑力误差要求,解算求得最小配重块质量。该结构测试所备最小配重块质量为 20 g 。

2.1.1 x 方向重心调节

首先对结构重心 x 方向偏差进行调节。利用电子水平仪将测试平台调整到水平位置,再通过调节 Load cell 下方的螺纹副,利用与横梁直接相连的两个 Load cell 对横梁施加一定预载。然后将连接有千分表的转台固定在测试平台之上,以测试平台为基准,用千分表测量横梁上表面两端高度差 Δh 。通过 Load cell 下方螺纹副,将 Δh 调整为零。此时横梁上表面与测试平台上表面平行且水平,这就保证了横梁回转中心的单自由度柔性铰链对横梁的支反力矩为零,且重力方向垂直于横梁上表面。此时横梁受力情况如图5所示。其中 $F1$ 和 $F2$ 为 Load cell 对横梁的支撑力; G 为结构自身重力(包含横梁和两个三角板); F_z 为横梁回转中心柔性铰链对横梁的反作用力; M_y 为柔性铰链对横梁的支反力矩。

由受力平衡可得:

$$F_z + F1 + F2 = G \quad (4)$$

$$F2S2 - F1S1 - G\Delta x + M_y = 0 \quad (5)$$

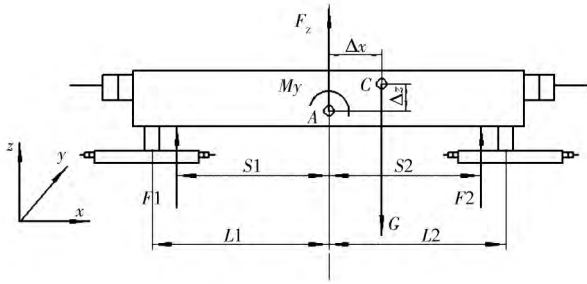


图5 测试状态横梁受力图(0°)

Fig. 5 Free-body diagram of beam in testing condition(0°)

取 $\Delta F = F_2 - F_1$,且由于 $S_1 = S_2$, $M_y \approx 0$,则式(5)可改写为:

$$\Delta F S_1 - G \Delta x = 0 \quad (6)$$

由式(6)可知,此时我们可以通过增减横梁两端配重来将 F_1 和 F_2 调到相等,与此同时 Δx 也就变为零,也就表明结构重心位置沿 x 轴向回转中心的位置移动完成。

2.1.2 z 方向重心调节

对结构重心 z 方向偏差进行调节。将测试平台绕其回转中心旋转一个角度 θ (不妨取 $\theta = 45^\circ$) ,此时横梁的受力情况如图6所示。

其中 F_1 和 F_2 为 Load cell 对横梁的支撑力; G 为结构自身重力(包含横梁和两个三角板); F_z 为横梁回转中心柔性铰链对横梁的反作用力的 z 方向分量; F_x 为横梁回转中心柔性铰链对横梁的反作用力的 x 方向分量; M_y 为柔性铰链对横梁的支反力矩。

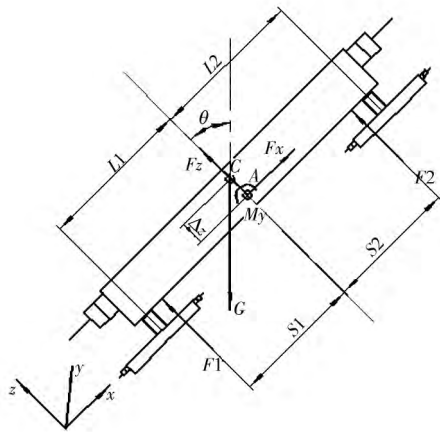


图6 测试状态横梁受力图(45°)

Fig. 6 Free-body diagram of beam in testing condition(45°)

由受力平衡可得:

$$F_z + F_1 + F_2 = G \cos \theta \quad (7)$$

$$F_x = G \sin \theta \quad (8)$$

$$F_2 S_2 - F_1 S_1 - G \sin \theta \Delta z + M_y = 0 \quad (9)$$

取 $\Delta F = F_2 - F_1$,且由于 $S_1 = S_2$, $M_y \approx 0$,则式(5)可改写为:

$$\Delta F S_1 - G \sin \theta \Delta z = 0 \quad (10)$$

由式(10)可知,此时 ΔF 的值可以表征重心偏差的大小。配重块为高度可调 Δz 设计,通过调节两端配重块的高度可以调整整体结构重心的 z 值。通过调节,当 ΔF 为零,也就是 F_1 和 F_2 相等时, Δz 也就为零。那么此时的重心位置也就实现了和横梁回转中心的重合。

2.1.3 平衡性检测

横梁结构重心调节完成之后,需要对调节后的结构平衡性能进行测试。将测试平台连同整个 Whiffletree 结构在整个可转动范围内转动几个角度(不妨取其和水平面成 $-45^\circ, -30^\circ, -15^\circ, 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$) ,分别记录不同状态下 F_1 和 F_2 的值。那么在工作状态下,对于横梁左右两端支撑力偏差 ΔF_{N1} 和 ΔF_{N2} 有:

$$\Delta F_{N1} = F_{N1} - \frac{F_{N1} + F_{N2}}{2} = \frac{F_{N1} - F_{N2}}{2} \quad (11)$$

$$\Delta F_{N2} = F_{N2} - \frac{F_{N1} + F_{N2}}{2} = \frac{F_{N2} - F_{N1}}{2} \quad (12)$$

由于测试状态下的 Load cell 的作用力 F_1 和 F_2 在工作状态下被实际支撑力 F_{N1} 和 F_{N2} 所取代,根据力矩平衡,由式(2)和式(5)可得:

$$F_{N1} L_1 - F_{N2} L_2 = F_2 S_2 - F_1 S_1 \quad (13)$$

将式(13)代入式(11)和式(12)可得:

$$\Delta F_{N1} = \frac{F_2 - F_1}{2} \frac{S_1}{L_1} \quad (14)$$

$$\Delta F_{N2} = \frac{F_1 - F_2}{2} \frac{S_1}{L_1} \quad (15)$$

2.2 三角板重心调节

三角板的重心调节方法和横梁类似,不同之处在于连接三角板和横梁的柔铰放开了绕 x 轴和绕 y 轴的两个旋转自由度。所以在第一步调节三角板重心在平行于三角板平面内的位置时,需要在三角板三个角点增减配重来完成。图7是三角板示意图。

图7中,点 O 为柔性铰链的回转中心;点 A, B, C 为工作状态下三个支撑杆的位置;点 D, E, F 为测试状态下三个 Load cell 对三角板支撑力的作用点的位置,且其位置选取根据:

$$\frac{S_3}{L_3} = \frac{S_4}{L_4} = \frac{S_5}{L_5} \quad (16)$$

在调节三角板重心时,可以将横梁回转中心的单自由度柔铰拆除,将横梁和测试平台刚性连接,用数字水平仪将横梁上表面调为水平。然后将横梁上

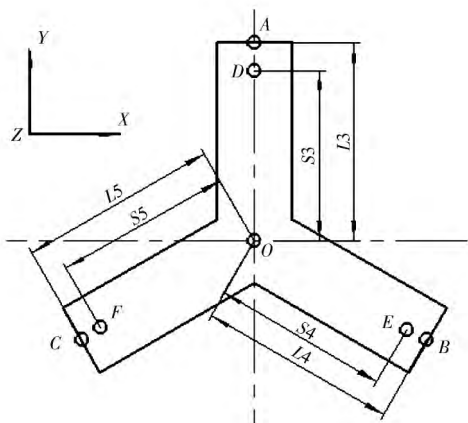


图7 三角板示意图

Fig. 7 Sketch of triangle plate

表面作为基准面,调节三角板下方 Load cell 对应的螺纹副,使三角板和横梁上表面平行,从而保证连接横梁和三角板的柔性铰链不存在支反力矩作用。水平方向调节完毕,同样将测试平台转动一个角度,调节配重的上下高度来实现三角板重心 z 方向的调整。

重心调节完成后,同样需要对三角板的平衡性能进行测试。将测试平台按照 -45° , -30° , -15° , 0° , 15° , 30° , 45° 转动几个角度,分别记录点 D、E、F 处 Load cell 的示数 F_3 、 F_4 、 F_5 。

同理可以得到 A、B、C 三点支撑力误差为

$$\Delta F_{N3} = \frac{F_4 + F_5 - 2F_3}{3} \frac{S_3}{L_3} \quad (17)$$

$$\Delta F_{N4} = \frac{F_3 + F_5 - 2F_4}{3} \frac{S_3}{L_3} \quad (18)$$

$$\Delta F_{N5} = \frac{F_3 + F_4 - 2F_5}{3} \frac{S_3}{L_3} \quad (19)$$

Whiffletree 结构在实际工作状态下,两级结构之间存在误差传递过程。由于:

$$F_{N1} = F_{N3} + F_{N4} + F_{N5} \quad (20)$$

$$F_{N3} = F_{N4} = F_{N5} \quad (21)$$

式中: F_{N3} 、 F_{N4} 、 F_{N5} 为 A、B、C 三点支撑力。

则工作状态下对于连接在横梁左端的三角板, A、B、C 三点整体合成支撑力误差为

$$\Delta F_A = \Delta F_{N3} + \frac{1}{3} \Delta F_{N1} \quad (22)$$

$$\Delta F_B = \Delta F_{N4} + \frac{1}{3} \Delta F_{N1} \quad (23)$$

$$\Delta F_C = \Delta F_{N5} + \frac{1}{3} \Delta F_{N1} \quad (24)$$

3 装调测试实验

测试对象是某望远镜主镜底支撑所采用的

Whiffletree 结构。测试现场如图 8 所示。



图8 测试现场

Fig. 8 Test site

测试流程如图 9 所示

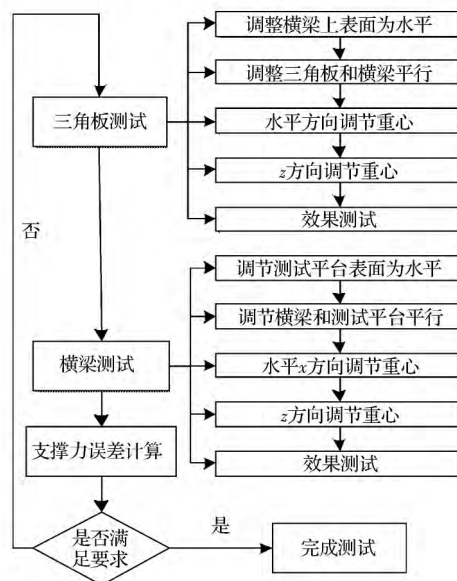


图9 测试流程图

Fig. 9 Test flow chart

对左右两个三角板和一个横梁的重心调节完成后,分级对 Whiffletree 结构进行效果测试。测试结果如图 10 所示。其中, ΔF_{N6} 、 ΔF_{N7} 、 ΔF_{N8} 为右端三角板三个支撑点单级支撑力误差, ΔF_D 、 ΔF_E 、 ΔF_F 为其合成支撑力误差。

按照式(22)~式(24)计算得到各支撑点合成误差,结果显示 6 个支撑点在 7 种状态下的支撑力合成误差均在 ± 0.5 N 的范围内,满足设计要求。

4 结论

本文针对在大口径望远镜主镜底支撑中广泛采用的 Whiffletree 结构,提出了一种简单可行的平衡性调节及测试方法。并将此方法应用在某望远镜主镜 Whiffletree 底支撑中,实验表明此方法切实可行,

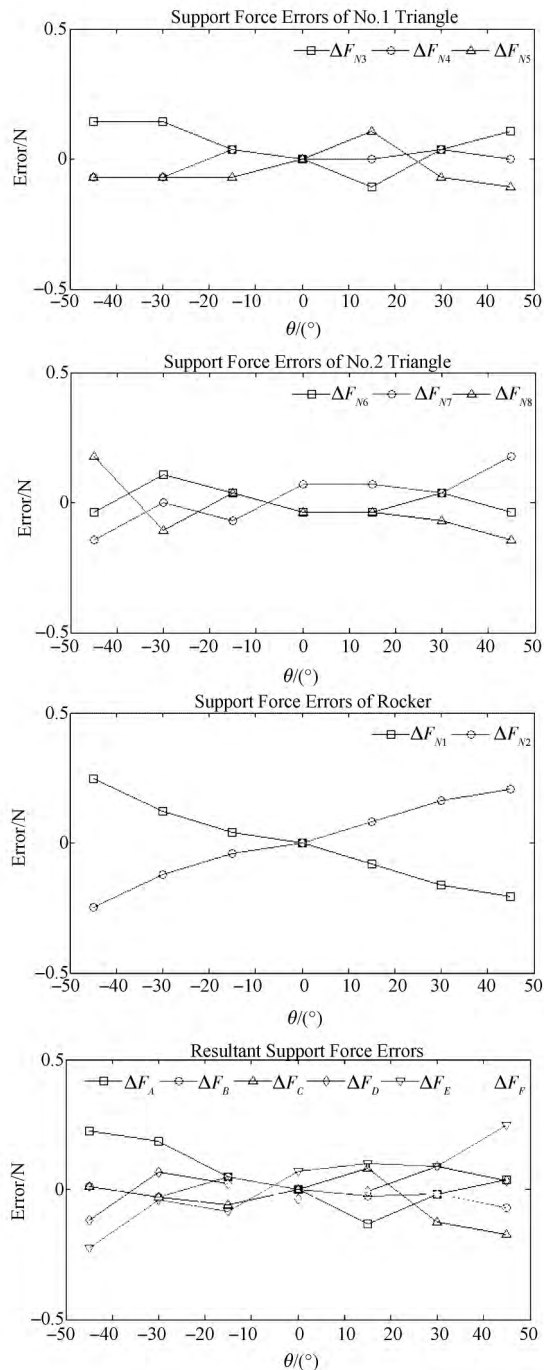


图 10 测试结果

Fig. 10 Test result

取得了良好的实际效果。经调节后的结构,各点支撑力合成误差在 $\pm 0.25 \text{ N}$ 范围内,满足 $\pm 0.5 \text{ N}$ 的设计要求。

参 考 文 献

1 Yoder P R, J R. Opto-mechanical systems design. New York: Marcel Dekker, Inc, 1993: 12—26

2 Malvick A J. Theoretical elastic deformations of the Steward Observatory 230 cm and the optical sciences center 154 cm mirrors. *Applied Optics*, 1972; 11(3): 575—585

3 范李立. 极轴式望远镜主镜支撑设计研究. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010

Fan L L. Study on the primary mirror support of equatorial telescope. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science 2010

4 范 磊. 2 m 级地基望远镜 SiC 主镜轻量化设计及支撑技术研究. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013

Fan L. Research on the lightweight design and support of the 2 m-SiC primary mirror for ground-based telescope. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science 2013

5 吴小霞, 李剑锋, 宋淑梅, 等. 4 m SiC 轻量化主镜的主动支撑系统. *光学精密工程* 2014; 22(9): 2451—2457

Wu X X, Li J F, Song S M, et al. Active support system for 4 m SiC lightweight primary mirror. *Optics and Precision Engineering* 2014; 22(9): 2451—2457

6 邵 亮, 吴小霞, 陈宝刚, 等. SiC 轻量化主镜的被动支撑系统. *光学精密工程* 2015; 23(5): 1380—1386

Shao L, Wu X X, Chen B G, et al. Passive support system of lightweighted SiC Primary mirror. *Optics and Precision Engineering*, 2015; 23(5): 1380—1386

7 李庆祥, 王东升, 李玉和. 现代精密仪器设计(第二版). 北京: 清华大学出版社, 2004

Li Q X, Wang D S, Li Y H. Design of modern precision instruments. Beijing: Tsinghua University Press, 2004

8 卢 倩, 黄卫清, 王 寅, 等. 深切口椭圆柔性铰链优化设计. *光学精密工程* 2015; 23(1): 206—215

Lu Q, Huang W Q, Wang Y, et al. Optimization design of deep-notch elliptical flexure hinges. *Optics and Precision Engineering*, 2015; 23(1): 206—215

9 于靖军, 裴 旭, 毕树生, 等. 柔性铰链机构设计方法的研究进展. *机械工程学报* 2010; 46(13): 2—13

Yu J J, Pei X, Bi S S, et al. State-of-arts of design method for flexure mechanisms. *Journal of Mechanical Engineering* 2010; 46(13): 2—13

10 姚建涛, 李立建, 杨 维, 等. 直圆柔性球铰刚度矩阵的解析计算. *光学精密工程* 2014; 22(7): 1857—1863

Yao J T, Li L J, Yang W, et al. Analytical calculation of compliance matrix for right-circular flexure spherical hinge. *Optics and Precision Engineering* 2014; 22(7): 1857—1863

11 张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜制程中的应用. *光学精密工程* 2015; 23(2): 438—443

Zhang L M, Wang F G, An Q C, et al. Application of Bipod to supporting structure of minitype reflector. *Optics and Precision Engineering* 2015; 23(2): 438—443

12 周海宏, 程云芳. 光机系统设计(原书第三版). 北京: 机械工业出版社, 2008

Zhou H X, Cheng Y F. Opto-mechanical systems design(3rd edition of original book). Beijing: China Machine Press, 2008

Double Selective Sparse Channel Estimation Based on the Optimized Recovery Algorithm

MA Xiu-rong , CHEN Bing-xue , SHAN Yun-long

(Department of Computer and Communication Engineering , Tianjin University of Technology ,
Tianjin Key Laboratory of Film Electronic and Communication Devices , Tianjin 300384 , P. R. China)

[Abstract] The wireless communication channels within orthogonal frequency-division multiplexing systems could be modeled as time-frequency doubly selective channels introduced by high mobility. The application of compressed sensing is considered as the sparse channel estimation because of its sparsity on delay-doppler domain. The complexity of Regularized Orthogonal Matching Pursuit(ROMP) recovery algorithm increases with higher sparsity. To reduce the complexity of atom selection and solving least squares problem in ROMP , an optimized recovery algorithm with a rigorous computational bound is proposed , which identifies a fixed number of atoms to make the recovery submatrix be a nonsingular matrix. In addition , the recovery submatrix is renewed at the end of each iteration to improve the precision. Simulation results demonstrate that compared with ROMP algorithm , elapsed time in the optimized recovery algorithm is decreased evidently and the accuracy could be ensured with proper iteration times.

[Key words] OFDM CS channel estimation doubly selective channel recovery algorithm
ROMP

(上接第 231 页)

Adjustment and Test Method of Whiffletree Support Structure

WEI Xiang-tong^{1 2} , ZHANG Jing-xu¹ , WANG Fu-guo^{1*} , LIU Xiang-yi¹

(Changchun Institute of Optics , Fine Mechanics and Physics , Chinese Academy of Sciences¹ , Changchun 130033 , P. R. China;
University of Chinese Academy of Sciences² , Beijing 100039 , P. R. China)

[Abstract] Based on kinematic principle , Whiffletree structure is widely used in axial support system of large aperture telescopes. In order to reach expected support effect , and ensure the precision of the mirror surface figure , the balance of the Whiffletree structure is rigorously required. To meet this adjustment and test requirement , according to the structural features of Whiffletree structure , the Load cells , the dial indicator and other instruments are used to test the balance of the Whiffletree structure , and the balance of the Whiffletree structure is adjusted by adding or subtracting the balance weight and adjusting the height of the balance weight. Firstly , the principle of this adjustment and test method is presented , and then the experiment is processed on a Whiffletree structure which is used in the primary mirror's axial support system of a certain telescope. Test results show , after adjustment , the error of the support force in every support point is within limits of ± 0.25 N , and meets the design requirement of ± 0.5 N. This method is practicable , and has certain reference significance for Whiffletree structure to be better used for the large aperture telescope support in the future.

[Key words] Whiffletree balance test balance adjustment load cell axial support