

大口径轻质反射镜光轴水平卸载支撑方法

周于鸣, 赵 野, 王海超, 闻广泉

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘 要: 大口径轻质反射镜的重力环境下高精度检测是目前的一个难点, 由于其轻量化程度高, 绝对刚度低, 在重力环境下, 支撑形式的不同对光学检测结果影响巨大。提出了一种以提供提拉牵引力的方法实现光轴水平支撑测试的解决方案, 通过一系列的滑轮组的自适应调整, 获得预定义的力学支撑, 实现轻质反射镜光轴水平状态重力环境下的高精度面形测试。有限元力学分析结果表明, 依据本方法开展的光轴水平状态检测, 能够有效减少重力引起的光轴竖直和光轴水平两种状态下的面形变化 RMS 值差异, 其差异值小于 0.003λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)。文中所提出的方法具有良好的可实施性, 它可推广应用到其他大口径轻质反射镜的检测支撑的设计中, 为此类大口径相机的研制提供技术基础。

关键词: 大口径轻质反射镜; 光轴水平; 重力卸载; 有限元仿真

中图分类号: V445.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)05-1285-06

Method of off-loading supporting for large aperture light weighted reflect mirror at optical axis horizontal situation

Zhou Yuming, Zhao Ye, Wang Haichao, Wen Guangquan

(Beijing Space Electrical & Machine of Institute, Beijing 100076, China)

Abstract: The precise testing of large aperture light weighted reflecting mirror in gravity environment is a difficult problem at present. In view of the high rate of light weighting and the absolute low stiffness, in this situation, different forms of support have huge impacts on optical test results in gravity environment. In this paper, a solution was suggested that pre-defining of supporting force was achieved through a series of pulley blocks self-adapting to solve large aperture mirror testing in gravity environment. The result of mechanics model analysis shows that the testing of optical axis horizontal can reduce the Rams variation of surface shape effectively, which is caused by gravity in vertical and horizontal state, and the variation less than 0.003λ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$). The method can be extended and applied to the design of testing supporting for other large aperture light weighted reflect mirror, and provid; technology foundation for large aperture mirror.

Key words: large aperture mirror; horizontal; off-loading; finite element analysis

收稿日期: 2012-09-19; 修订日期: 2012-10-23

作者简介: 周于鸣(1978-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究大口径光学零件以及系统的检测与装调。Email: Zhou2000s@163.com

0 引言

某型号相机主镜的轻量化率为 75%，如此高的轻量化率导致绝对刚度降低，在重力影响下，光轴水平以及光轴竖直两种状态，存在较大的变形差异。在光轴竖直状态下，由于存在较大可支撑面积，可选择多种重力卸载的支撑方式。在该相机主镜的检测过程中，已成功研制了 36 点卸载支撑装置，实现了主镜在光轴竖直状态下的理想卸载^[1-2]。

在光轴水平状态卸载方面，目前常用吊带这一种卸载方式，其他如推拉支撑、水银带支撑、V 形支撑以及点支撑等都存在工程实施不同程度的困难^[3]。该主镜在结构设计时，水平吊带支撑的变形 RMS 约为 0.006λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)；而采用圆柱周边支撑光轴水平状态下的变形 RMS 约为 0.004λ 。圆柱周边固支的支撑状态较为理想^[4]。

因此，文中提出一种以模拟圆柱周边固支实现光轴水平支撑测试的工程方法，通过一系列的滑轮组的自适应调整，获得预定义的力学支撑，实现主镜光轴水平条件下的高精度面形测试。依据此方法开展的光轴水平状态检测，能够有效减少重力引起的光轴竖直和光轴水平两种状态下的面形变化 RMS 值差异，其差异值小于 0.003λ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)。

1 解决方案初步设想

该方案是要以圆柱周边固支这一较好的支撑状态为基础实现光轴水平卸载。具体实现方法如图 1 所示，通过一系列的滑轮组，将下半部的吊带支撑与上

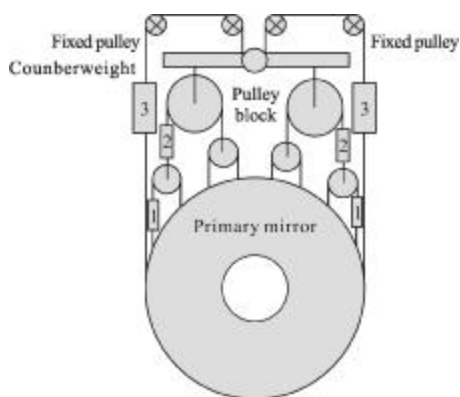


图 1 水平卸载工装示意图

Fig.1 Diagram of horizontal off-loading

半部的吊点支撑相结合，并将重量通过滑轮自适应的分解到各个支撑部分。滑轮组的优点就是轮两边吊绳受力相等，具备自适应位移的能力，能够较好的适应因尺寸和形位公差等原因造成的受力不一致性。

理论上如果配重 1 和配重 2 全部选择为 0 的话，其受力状况如图 2(a)所示，上半部各点受力大小相同，这与理论理想的受力状况不太一致。但是如果配重失衡，也有可能出现如图 2(c)的受力状况，因此，需要根据各点受力的计算结果，合理选择配重 1 和配重 2 的重量，以实现图 2(b)所示的受力分布。最后计算整个滑轮组的重量，以此设定配重 3，以保证上半部与下半部受力大小一致。

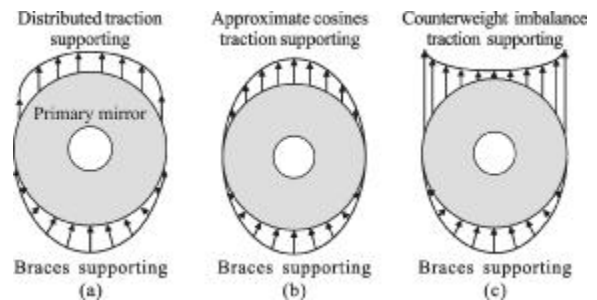


图 2 主镜受力分布示意图

Fig.2 Force distribution diagram of primary mirror

2 力学分析复算

前文已经对轻质镜进行了初步的力学仿真分析。但是，在圆柱周边支撑的分析模型中，其支撑的边界条件是将反射镜整个圆柱周边都定义成了固定支撑状态，这种状态在工程实施中，较难实现，因此，仅仅是一种理想的理论状态。

在实际工作中，上半部支撑可以通过多个小面积支撑点实现，但是要实现各支撑点受力均匀，在工程实施上是很难实现的。之前的分析仅仅是说明上半部提供支撑能够很好的减少轻质镜在光轴水平状态的重力变形情况，但是为了进一步说明此方案的可实施性，还需就支撑力的变化情况做进一步力学分析。

在工程实施过程中，必然存在各种误差，使得最终实现的各点牵引力大小与理想状态存在差异，根据前文滑轮组的设计思路，最终的上半部各点牵引力大小的分布会是介于均布力与近似余弦分布^[5-6]

之间的一种状态, 因此需要进行有限元力学分析复核。同时, 由于不同的算法以及软件也对计算结果造成一定的偏差^[7]。结合实际情况, 对力学分析的边界条件进行了界定, 并对三种状态都使用统一的摩擦边界条件以及同一软件进行了复核计算。并最终对分析结果进行比较, 以便更好的指导卸载装置的结构设计。

2.1 力学分析边界条件设定说明

文中的反射镜采用 ULE 材料, 蜂窝结构, 轻量化率达到 75%, 组件工作状态时, 圆柱侧壁均布 24 个圆斑。但是在裸镜检测支撑时, 下半部使用吊带支撑(既半圆周柱面支撑), 上半部模拟组件工作时的支撑状态, 在 12 个呈半圆周均布的圆斑位置(圆形圆斑), 各提供一个竖直向上的牵引力(根据初步设想方案, 滑轮两侧的吊绳呈竖直下垂), 并根据不同的配重情况, 变化牵引力的大小。吊带选用橡胶皮带, 摩擦系数采用 0.5, 吊带包角 178°。根据图 2(a)~(c) 中所示, 使用滑轮组提供支撑可能存在 3 种状态, 同时为了保证数据的可比性, 对吊带支撑状态也需进行复算。由于 Zernike 多项式的相互正交性以及线性无关性^[8-9], 更重要得是现有的商业化干涉仪数据分析软件均采用 Zernike 多项式进行数据处理, 为了能够更好的将分析结果与检测结果结合, 文中的图形数据拟合均采用 Zernike 拟合进行数据处理。

2.2 吊带支撑

吊带支撑因其极佳的工程可实施性, 是目前最常用的反射镜光轴水平支撑方式, 选用柔性吊带就能够很好的实现对反射镜半圆柱段柔性包覆。在重力环境下, 吊带对反射镜提供余弦分布的支撑力。其分析结果如图 3~4 所示, 面形拟合结果 $RMS=4.30\text{ nm}$ ($RMS=0.007\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)

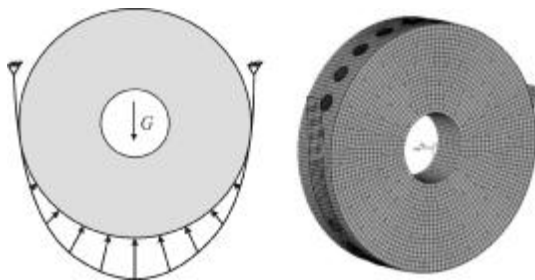


图 3 吊带支撑受力状态示意图以及模型与网格划分
Fig.3 Force state diagram of horizontal braces and model and mesh

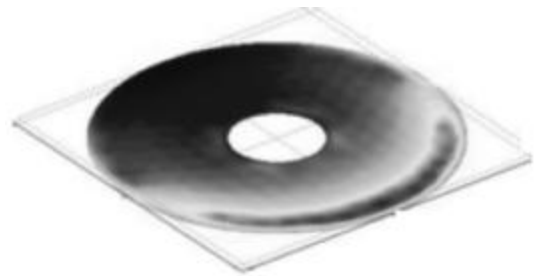


图 4 面形拟合结果 $RMS=4.30\text{ nm}$ ($RMS=0.007\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)

Fig.4 Result of surface figure fitting $RMS=4.30\text{ nm}$ ($RMS=0.007\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)

2.3 吊带+均布牵引支撑

在上半环带提供向上的牵引力, 就是为了避免将所有的载荷都累积在吊带上, 致使反射镜的位移变形主要集中在吊带中间部位。因此, 受力状态 2 就是简单的将反射镜一半的重量^[10]均布在 12 的圆斑上, 即上半部 12 个圆斑上各施加竖直向上的牵引力 34.2 N(主镜总重 82 kg, 24 等分), 同时在下半部仍然使用吊带支撑。最后分析结果如图 5~6 所示, 面形拟合 $RMS=2.87\text{ nm}$ (约为 $0.005\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)。

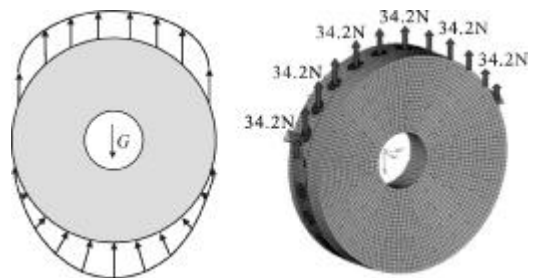


图 5 吊带加均布牵引支撑示意图以及力学模型

Fig.5 Diagram and mechanical model of horizontal braces and distributed traction support



图 6 面形拟合结果 $RMS=2.87\text{ nm}$ ($RMS=0.005\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)

Fig.6 Result of surface figure fitting $RMS=2.87\text{ nm}$ ($RMS=0.005\lambda, \lambda=632.8\text{ nm}$)

2.4 吊带+近似余弦牵引支撑

根据吊带受力成余弦分布的规律, 最理想的平衡状态是上半圆柱端提供的竖直牵引力的总和等于纯

吊带支撑时余弦分布力的重力分量的一半。由于吊带支撑的余弦分布力是连续的面支撑,而牵引力只能通过局部胶斑形成的点支撑,两种方式并不完全一致。为了更加准确地设定各点牵引力的大小,先分析了轻质镜固支 24 个圆斑在重力环境下地的模型,根据分析结果,直接提取上半部 12 个圆斑面的支反力,并换算出竖直方向的牵引力,其牵引力的大小分布如图 7 所示,成近似余弦分布状态,然后一一对应的施加在力学模型中。最后分析结果如图 8 所示,面形拟合 $RMS=2.68\text{ nm}$ (约为 0.004λ , $\lambda=632.8\text{ nm}$)。

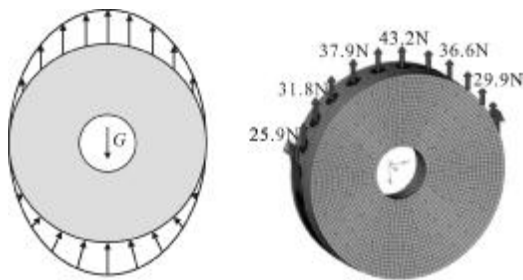


图 7 吊带加近似余弦牵引支撑示意图以及力学模型
Fig.7 Diagram and mechanical model of horizontal braces and approximate cosines traction support



图 8 面形拟合结果 $RMS=2.68\text{ nm}$ ($RMS=0.004\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$)
Fig.8 Result of surface figure fitting $RMS=2.68\text{ nm}$
($RMS=0.004\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$)

2.5 吊带+配重失衡牵引支撑

根据文中的解决方案,如果配重计算误差过大,则有可能出现图 9 中的牵引力分布,牵引力大小由

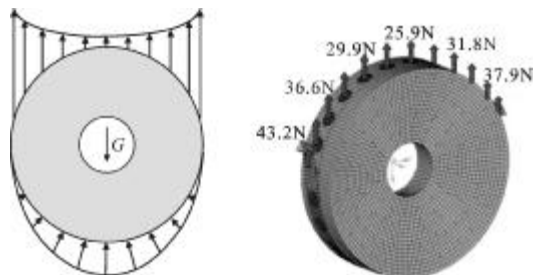


图 9 吊带加配重失衡牵引支撑示意图以及力学模型
Fig.9 Diagram and mechanical model of horizontal braces and counterweight imbalance traction support

外而内分布,最大牵引力在最外圆斑处,并向内逐渐变小。最后分析结果如图 10 所示,面形拟合 $RMS=3.05\text{ nm}$ (约为 0.005λ , $\lambda=632.8\text{ nm}$)。

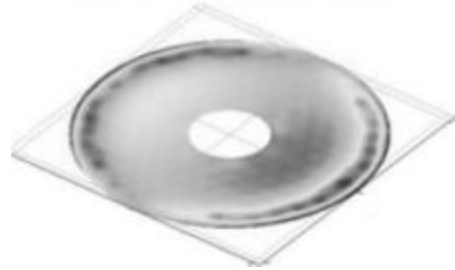


图 10 面形拟合结果 $RMS=3.05\text{ nm}$ ($RMS=0.005\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$)
Fig.10 Result of surface figure fitting $RMS=3.05\text{ nm}$
($RMS=0.005\lambda$, $\lambda=632.8\text{ nm}$)

2.6 仿真结果分析与小结

文中的目的是要减小重力对大口径轻质镜光轴水平状态检测结果的影响。由于光轴竖直状态的重力卸载技术已经得到良好应用,而且其检测结果也间接证明了其力学仿真分析结果的合理性。因此,该分析结果将作为文中力学仿真结果正确与否的判读基础。

文中共对 4 个状态进行力学仿真分析,为了保证分析结果的可对比性,4 个力学分析模型的区别仅仅是体现在牵引力的变化上,其他边界条件以及网格模型都没有任何改变。其分析结果如表 1 所示。

根据表中的分析结果可以得出以下结论:

(1) 对比表中第 3 项可知,不同的有限元算法以及网格划分方式和网格划分的精细程度还是会造成分析结果的差异。虽然差异较小,但是要对比分析结果,最好还是保证分析模型使用相同的算法和网格划分。尽量避免不同算法之间的分析结果对比;

(2) 对比表中 3~6 项可知,吊带支撑的镜面变形拟合结果较差,在镜体上半部 12 个圆斑的竖直方向上施加牵引支撑力,反射镜面形变化都有着不同程度的改善;

(3) 在近似余弦牵引支撑的状态下,镜面 RMS 可以达到 2.68 nm ,是文中最优的支撑状态,对比表中 2、5 项,考虑到的算法误差,可以认为与圆柱周边支撑受力状态的变形一致;

(4) 对比表中 1、2 项,光轴水平圆柱周边固支状态与光轴竖直状态重力影响的 RMS 值差异为 0.001λ 。文中的设计状态计算结果基本与圆柱周边固支状态

的计算结果一致,并且具备工程可实施性;

(5) 对比表中 4、5、6 项结果可知,在仅仅承受轻质镜自重的情况下,牵引力分布对轻质镜的重力变形影响差异较小,其变形差值仅为 0.001λ ,以目前的测试手段无法进行检测。因此,文中的设计思路具有较高的容差性,能够有效减少工程实施的难度。

表 1 力学仿真结果($\lambda=632.8 \text{ nm}$)

Tab.1 Result of mechanics simulation

No.	Design import		Result of mechanics simulation	
	State	Surface figure fitting RMS	State	Surface figure fitting RMS
1	Thirty six points supporting	1.7 nm (nearly 0.003λ)	-	-
2	The fixture of cylindrical perimeter	2.5 nm (nearly 0.004λ)	-	-
3	Horizontal braces supporting	4.1 nm (nearly 0.006λ)	Horizontal braces supporting	4.30 nm (nearly 0.007λ)
4	-	-	Horizontal braces and distributed traction supporting	2.87 nm (nearly 0.005λ)
5	-	-	Horizontal braces and approximate cosines traction supporting	2.68 nm (nearly 0.004λ)
6	-	-	Horizontal braces and counterweight imbalance traction supporting	3.05 nm (nearly 0.005λ)

根据上述结论可知,文中的解决方案实现了减小重力对两种状态测试结果影响的目的,并且具有较高的容差性,有效减小工程实施的难度。该方案能够适应 $\Phi 1 \text{ m} \sim \Phi 1.6 \text{ m}$ 口径左右具有完整外圆柱形状轻质镜的光轴水平状态检测需求。

3 卸载装置详细设计

根据仿真分析结果以及最初的设想,反射镜在上半部支撑需要依靠直粘连接块,同时各连接块之间使用滑轮通过吊绳连接,保证各吊点之间的牵引

力能够实现自适应平衡,在主镜位置设计了挡块以保证主镜的安全,下半部两个球头支撑能够起到辅助支撑的作用,同时也能够防止镜子掉落。卸载装置示意图如图 13 所示。

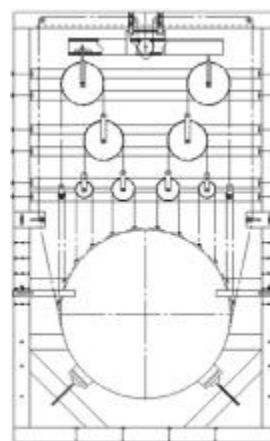


图 13 卸载装置示意图

Fig.13 Diagram of off-loading devices

4 结论

文中提出利用滑轮自适应位移的特点来解决圆柱周边固支的工程方法,实现了光轴水平条件下的高精度面形测试。有限元力学分析结果表明,各支撑部位在只承受反射镜自身重力载荷的情况下,两种受力状态对反射镜面形变化影响较小(由表 1 中 1、2 项可知,RMS 值仅相差 0.001λ),在仪器测试误差范围之内,不会影响测试结果的准确性。文中所提出的方法目前正应用于某型号相机 $\Phi 1 \text{ m}$ 左右空间相机轻质主镜的光轴水平状态检测,由于具有良好的可实施性,它可推广应用到其他为大口径轻质反射镜的检测支撑的设计中,为此类大口径相机的研制提供技术基础。

参考文献:

- [1] Zhao Ye, Zhou Yuming, Li Chenxi. A support method of large aperture light weighted primary mirror manufacturing and testing[C]//SPIE, 2010, 7654: 76541.
- [2] Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, et al. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(6): 877-880. (in Chinese)
王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 877-880.

- [3] Wang Yang, Zhang Jingxu. Optimization and analysis for the support of the large aperture telescope primary mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(1): 107-113. (in Chinese)
王洋, 张景旭. 大口径望远镜主镜支撑优化分析 [J]. *光电工程*, 2009, 36(1): 107-113.
- [4] Wu Xiaoxia, Yang Hongbo, Zhang Jingxu, et al. Optimal design of support system for the large-aperture sphere mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(1): 129-132. (in Chinese)
吴小霞, 杨洪波, 张景旭, 等. 大口径球面镜支撑系统的优化设计[J]. *光子学报*, 2009, 38(1): 129-132.
- [5] Liu Guoqing, Ma Wenli. The finite element analysis for large-aperture lightweight mirror mount [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 28(5): 14-17. (in Chinese)
刘国庆, 马文礼. 大口径轻质镜支撑的有限元分析 [J]. *光电工程*, 2001, 28(5): 14-17.
- [6] Wang Yang, Zhang Jingxu, Yang Fei. Support structure of large-aperture telescope primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(Z2): 31-34. (in Chinese)
王洋, 张景旭, 杨飞. 大口径望远镜主镜支撑结构研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(Z2): 31-34.
- [7] Zhang Rui, Chen Zhiyuan, Chen Zhiping, et al. Application of finite element method to the structure design of the space solar telescope[J]. *Progress in Astronomy*, 2005, 35(4): 355-362. (in Chinese)
张锐, 陈志远, 陈志平, 等. 有限元分析技术在空间太阳望远镜结构设计中的应用 [J]. *天文学进展*, 2005, 35(4): 355-362.
- [8] Li Fu, Ruan Ping, Zhao Baochang. Study on the surface deformation of flat reflector under gravity load [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 272-275. (in Chinese)
李福, 阮萍, 赵葆常. 重力作用下平面反射镜变形研究[J]. *光子学报*, 2005, 34(2): 272-275.
- [9] Hou Xi, Wu Fan, Yang Li, et al. Wavefront fitting with Zernike annular polynomials for circular and annular pupils[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(5): 272-275. (in Chinese)
侯溪, 伍凡, 杨力, 等. 基于 Zernike 环多项式的环孔径波面拟合方法[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(5): 272-275.
- [10] Yoder Paul R, JR. *Opto-mechanical Systems Design* [M]. New York: Marcel Dekker, 1993: 491-492.

下期预览

星点亚像元定位中系统误差的改进补偿方法

唐圣金, 郭晓松, 周召发, 蒲鹏程

(第二炮兵工程大学 202 教研室, 陕西 西安 710025)

摘要:为提高星点图像的质心提取精度, 针对星点亚像元定位的系统误差和随机误差, 提出了一种改进补偿方法。采用三次样条插值函数表示质心位置与系统误差之间的关系, 利用该函数进行系统误差补偿, 极大的减小了误差采样点的数量和计算量。为进一步抑制随机误差的影响, 在系统误差补偿的基础上, 采用非线性加权算法计算星点质心位置, 并通过仿真实验确定了该算法的最优加权系数。在没有加入噪声的情况下, 改进算法可以将质心法的精度从 1/50 pixel 提高到 10-4 pixel; 加入服从 $N(0, 22)$ 分布的高斯白噪声后, 改进算法可以达到 0.005 4 pixel 的精度, 远小于质心法的 0.018 4 pixel。实验结果表明, 所提出的改进补偿算法计算简单, 精度高于质心法, 满足了高精度星敏感器质心提取的要求。