

TMT 望远镜三镜系统的研究进展

王富国^{1*}, 杨飞¹, 赵宏超^{1,2}, 苏燕芹^{1,2}, 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:介绍 30 m 望远镜 (TMT) 的相关背景以及我国在 TMT 项目中承担的任务。从 TMT 三镜系统的总体要求出发, 论述了三镜系统的两个主要部分 (M3CA 和 M3PA) 的具体要求、技术难点以及初步方案。针对 M3CA, 介绍了底支撑方案和侧支撑方案, 采用 Kinematic 的底支撑方案时其面形精度 RMS 可以达到 109.7 nm, SlopeRMS 为 0.95 μ rad, 采用 Kinematic 的侧支撑方案时其面形精度 RMS < 15 nm, 一阶谐振频率等于 17.7 Hz, 均达到了设计要求。针对 M3PA, 介绍了 Tilt 轴系和 Rotator 轴系的方案。最后, 简要介绍了三镜控制系统 (M3CS) 的要求和目标。

关键词: 30 m 望远镜; 底支撑; 侧支撑; Tilt 轴系; Rotator 轴系

中图分类号: TH743 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20130605.0643

Progress in TMT M3 system

WANG Fu-guo^{1*}, YANG Fei¹, ZHAO Hong-chao^{1,2}, SU Yan-qin^{1,2}, 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 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wfg109@163.com*

Abstract: The background of Thirty Meter Telescope (TMT) and its mission that we should take in hand are introduced. The detailed specifications and the preliminary scheme for the M3CA and M3PA in the 3 mirror (M3) system are presented according to the general specification. Then, the two parts, axial support and lateral support of M3CA, are designed in detail. Due to the kinematic concept design used in both of axial support and lateral support, the mirror surface error can be reduced in an acceptable level. When the kinematic axial support scheme is taken, its surface accuracy RMS is 109.7 nm and Slope RMS is 0.95 μ rad, while the kinematic lateral support scheme is taken, its surface accuracy RMS is 15 nm, and the first natural frequency can reach to 17.7 Hz. The design proposal for M3PA is discussed and the control system for M3 system (M3CS) is introduced briefly.

Key words: Thirty Meter Telescope (TMT); axial support; lateral support; Tilt axis; Rotator axis

1 引言

30 m 望远镜 (TMT) 计划是由美国加州理工学院 (Caltech)、加州大学系统 (UC) 和加拿大大学天文研究联盟 (ACURA) 联合发起的国际合作项目^[1]。加州理工学院和加州大学有着丰富的大型望远镜建造经验,曾成功地在预定时间和资金预算内建造了 10 m 凯克 (Keck) 望远镜。TMT 的探测深度将是当代望远镜的 10 ~ 100 倍,空间分辨率则是哈勃空间望远镜的 12 倍,其强大的宇宙洞察能力必将引发天文学研究的飞跃发展。TMT 的设计者期望在其建成后将在以下七大前沿科学领域取得重大突破性进展:(1) 系外行星探测和性质的研究,(2) 基础宇宙学,(3) 黑洞的形成和演化,(4) 恒星形成,(5) 星系的形成和演化,(6) 银河系研究,(7) 原初光源及宇宙再电离等。

中国天体物理发展战略专家委员会经过仔细论证后,提出将加入 TMT 项目作为中国天文未来发展的最优选择,通过和 TMT 董事会的谈判,中国以约 10% 规模的实物贡献 (约合 10 亿元人民币) 和一定比例的运行费用,成为 TMT 的建设伙伴,共有中科院长春光机所,光电所,理化所,天光所等单位承担了相应的研制任务,其中长春光机所负责三镜系统的研制与开发。TMT 望远镜代表了当今天文望远镜研制的最高技术水平,中国加入 TMT 将把中国推进到极大望远镜时代的天文领域前沿,并将成为中国与国际天文学家合作与竞争的平台^[2]。通过以“实物贡献”方式承担其高技术任务加入 TMT,可以学到先进的光学、机械、电子以及自动控制等多个领域中的关键技术。在国际合作的实践中学习、总结与发展巨型望远镜及尖端设备相关的国际先进技术,有利于我国光机电领域技术人员掌握核心技术,增强自主创新能力,为今后的大项目、大工程储备人才。

TMT 作为国际合作项目,其管理和要求是非常有效和科学的。项目对三镜系统提出了明确而具体的要求,从三镜支撑系统 (M3CA) 的力学性能,热学性能,动力学性能,三镜定位组件

(M3PA) 的定位和跟踪精度,运动速度,动力学特性等方面都有详细的要求。TMT 的研制过程共分为概念设计阶段,初步设计阶段和最终设计阶段,本文的研究内容即为概念设计阶段的任务,主要按照 TMT 的要求,提出合理可行的方案,并对所提出的方案进行原理性的分析和论证,以便开展下一步的工作。

2 总体要求

TMT 望远镜为 RC 式光学系统,三镜系统将来自次镜的光线反射至置于耐氏平台上的科学仪器中,三镜系统包含一个椭圆形的平面镜,并由从主镜中心孔伸出的支撑塔固定^[3]。三镜系统在望远镜中的位置如图 1 所示。

耐氏平台作为望远镜方位结构的组成部分,

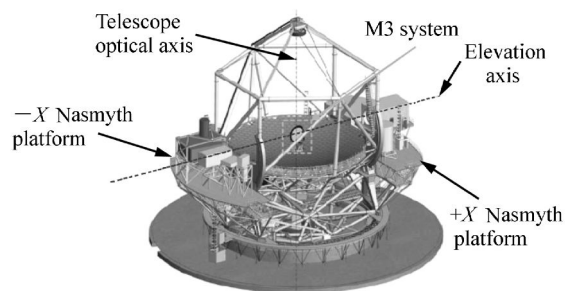


图 1 三镜在望远镜中的位置

Fig. 1 M3 assembly shown in its location in telescope

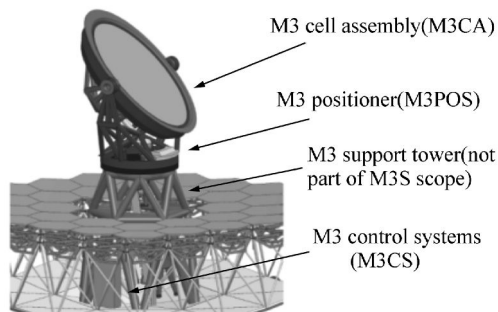


图 2 三镜系统的概念图

Fig. 2 Concept design of M3 system

上面安装有很多科学仪器。一些仪器并没有安装在俯仰轴上,因此需要通过旋转三镜将光线指向这些仪器。由于这一特点,当望远镜对穿过天空的天文目标进行跟踪而作俯仰运动时,三镜系统必须也能做相应的“旋转”“倾斜”运动,“旋转”“倾斜”的运动量则根据所使用设备的位置及望远镜的天顶角决定。

三镜系统包含两个部分:M3CA、M3PA 以及控制系统。图2为三镜系统在望远镜中的概念性结构。当望远镜跟踪天空中的天文目标时,通过控制三镜定位组件,使三镜室组件中的三镜将光束准直进入科学仪器中,三镜系统的运动将被校准以克服其内部误差。除此之外,三镜系统装入望远镜之后,其运动将随同望远镜整体系统进行校正,以适应重力和热变形的影响。三镜系统的功能如下^[4]:

(1)在所有可能遇到的条件下,安装在 TMT 中或者没有安装在 TMT 结构中,三镜系统都能保证对三镜支撑的安全性和精度。

(2)在望远镜变更工作设备、指向新的科学目标以及望远镜出现偏移、摆动、振动等情况时,三镜系统能定位三镜,并可将光反射到相应科学仪器中。

(3)根据望远镜控制系统的指令,在 TMT 望远镜进行俯仰轴跟踪转动时,三镜系统能主动保持三镜的瞄准指向和跟踪精度。

(4)三镜系统能向望远镜控制系统发送测量数据:包括温度、工程数据(如编码器读数、电流等)、内部状况测试结果以及响应观测站的安全警示。

(5)保证在望远镜上的拆装、维修及清洁的方便性和安全性。

3 M3CA

三镜为椭圆形平面镜,厚度 100 mm,根据光学设计的要求,三镜的有效通光口径长轴是 3 500 mm,短轴是 2 450 mm,机械尺寸大小为 3 594 mm × 2 536 mm。三镜的材料为低膨胀的微晶玻璃,总质量为 1.8 t。

根据光学设计的要求,要求三镜系统在光轴

方向的占空比不得大于 $\phi 3\ 500\text{ mm}$ 的圆锥,具体如图3所示。TMT 的设计文档要求三镜系统垂直于旋转轴的抗弯刚度必须大于 $90 \times 106\text{ Nm/radian RMS}$,将三镜固定在一个绝对刚体上,三镜系统的第一阶谐振频率应当高于 15 Hz,并且三镜面形的 SlopeRMS $< 1\ \mu\text{rad}$ ^[6]。在如此狭小的空间内,达到这样的要求,对结构设计来说是一个很大的挑战。

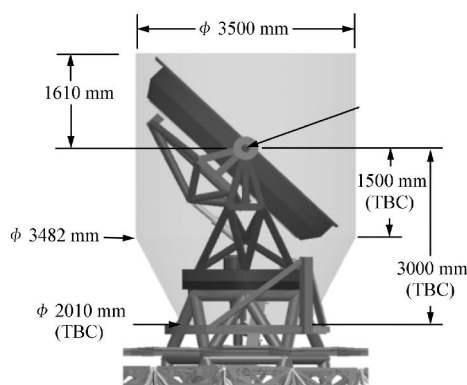


图3 三镜系统的设计空间示意图

Fig. 3 Volume allocation of M3 system

3.1 底支撑

三镜的支撑系统可以采用的方案包括主动支撑和被动支撑,最初的设计采用由 Myung K. Cho 提出的 60 点主动支撑方案,每个支撑点由可以 3 个可调节的力促动器组成,3 个力促动器成一定夹角,其交点位于镜面的中性面内,可以同时实现侧支撑的功能,这种支撑方式可以达到的面形精度为 $PV = 58\text{ nm}$, $RMS = 11\text{ nm}$, 详见参考文献^[5],这种支撑方式主动支撑点数多,结构复杂,需要复杂的控制系统,可靠性低。因为 TMT 的拼接主镜和变形镜可以对三镜的面形误差做出校正,因此降低了对三镜面形的要求,镜面的 SlopeRMS 达到 $1\ \mu\text{rad}$ 即可以满足要求,约合镜面的 $RMS = 1/5 \sim 1/6$ 波长^[6]。经过进一步论证,决定采用符合 Kinematic 原理的 18 点 whiffletree 的被动支撑方式。这种支撑方式结构简单,不需要电控系统,对视宁度的影响小,装调简单,体积小重量轻,可靠性高^[7]。图4为支撑点的分布形式,对支撑点的位置采用 Ansys 优化,目标函数为镜面面形的 RMS,约束为支撑点处的 z 向位移^[8],优化

后的面形结果 $PV = 581.51 \text{ nm}$, $RMS = 108.23 \text{ nm}$, $SlopeRMS = 1.032 \mu\text{rad}$, 图 5 为优化分析后的变形图。

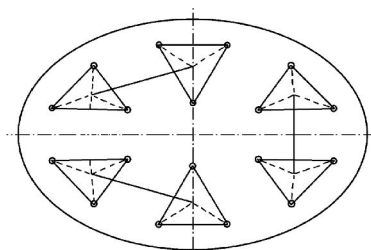


图 4 底支撑点的分布形式

Fig. 4 Axial support point configuration

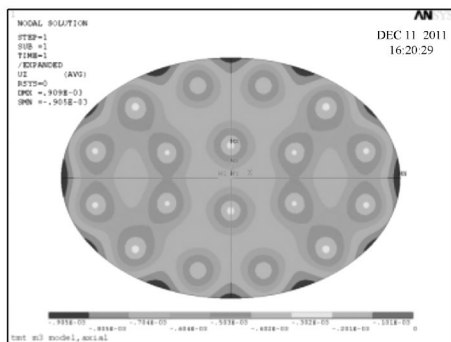


图 5 底支撑点的优化结果

Fig. 5 Mirror figure of optimization results

根据优化分析的结果,建立了三镜在支撑结构作用下的模型,以评价基于 Kinematic 原理的支撑效果。当重力方向垂直于镜面时,镜面在支撑结构作用下的面形为 $PV = 2541.3 \text{ nm}$, $RMS = 533.8 \text{ nm}$, $SlopeRMS = 1.44 \mu\text{rad}$ 。变形中有较大的倾斜,而这种倾斜量作为系统误差可以去除,去除 Tilt 后的云图仍然没有达到很好的支撑效果,造成这种现象的原因,一是因为由于支撑结构自身的质量造成的实际平衡点的位置与理论位置有一定的误差,二是因为每个支撑点的支撑力不相等,对支撑结构造成的变形也不相等,因此需要对各个支撑力进行校正。校正后的镜面变形的 $PV = 545.6 \text{ nm}$, $RMS = 109.7 \text{ nm}$, $SlopeRMS = 0.95 \mu\text{rad}$ 。

图 6 为三镜校正后的变形图,从校正后的结果看,支撑效果较好,达到了设计要求,说明这种基于 Kinematic 原理的支撑方式是可行的。

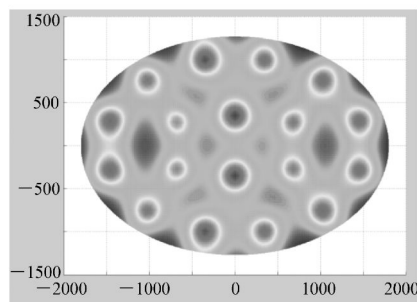


图 6 三镜在支撑结构作用下的面形

Fig. 6 Surface figure under support structure

3.2 侧支撑

侧支撑方式同样没有采用 Myung K. Cho 提出的侧支撑位于三镜的背后的主动支撑方式,而是提出了基于 Kinematic 原理的被动侧支撑方式,12 个支撑点位于三镜的侧面,每 4 个支撑点分成一组,三组支撑点互成 120° ,图 7 为侧支撑的原理图,每组内的 4 个支撑点通过杠杆结构连接到三镜室,因此每组的 4 个侧支撑力相等,这种支撑方式可以理解成由最基本的 3 点 Kinematic 侧支撑发展而来。由于三镜为平面镜,因此只会在支撑点附近引起局部的泊松效应,这对镜面面形是非常有利的。

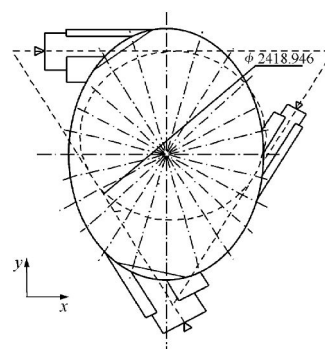


图 7 基于 Kinematic 的侧支撑原理图

Fig. 7 Lateral support system drawing according to Kinematic concept

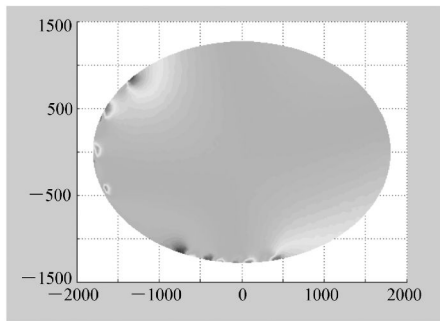


图 8 三镜在 y 向重力作用下的变形图
Fig.8 Mirror surface deformation in y -gravity

当施加 Y 方向重力时,镜面 z 向变形云图如图 8 所示,此时 $PV = 145.6 \text{ nm}$, $RMS = 15.0 \text{ nm}$, $SlopeRMS = 0.1096 \mu\text{rad}$ 。当施加 X 方向重力时, $PV = 133.6 \text{ nm}$, $RMS = 13.7 \text{ nm}$, $SlopeRMS = 0.098 \mu\text{rad}$,频率分析结果如表 1。

Whiffletree 形式的底支撑结构经一定的力矩校正后,可以达到三镜支撑点位置优化时的面形,满足了设计要求。对于平面镜来说,侧支撑点作用在侧面时,支撑点的位置对面形影响不大,但是对谐振频率有一定的影响,合理地优化 Whiffletree 的侧支撑拓扑形状,提高了结构的一阶频率^[9-10]。总之,Kinematic 原理的底支撑和侧支撑

表 1 三镜系统的谐振频率

Tab.1 Mode analysis of M3 system for resonant frequencies

Frequency/Hz	First order frequency	Second order frequency	Third order frequency	Fourth order frequency	Fifth order frequency
	17.7	18.5	21.8	22.9	28.2

方案使三镜既不过约束也不欠约束,使各项指标均达到了设计要求。图 9 为三镜系统的概念设计图。

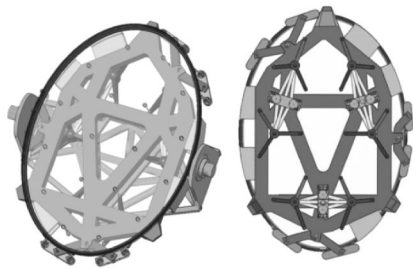


图 9 M3CA 的概念设计图
Fig.9 M3CA conceptual design view

3.3 地震分析与防护

TMT DRD 文件要求三镜系统能在下表中所列的频繁和不频繁的地震中存活,在极不频繁的地震中,M3 镜没有损坏,仅有机件和电组件的损坏,并且该损坏能在一星期内完成。三镜应在任何地震过程中受到保护,即使地震造成了断电。地震后应能在 2 h 内完成对装在望远镜上的三镜

系统的检验,以确定是否损坏,并确保三镜系统能进行天文观测或者常规计划的维修。

目前地震分析广泛采用有 3 种方法:等效静态分析,谱分析和时间历程分析。根据 TMT DRD 文件的要求,在 conceptual design 阶段,只做等效静态分析,谱分析和时间历程分析在 preliminary design 阶段进行。其缺点是局限性大,把结构的动力反应特性忽略了,只有当结构可以近似地视为刚体时弹性静力法才能成立。

等效静态分析的原理:结构因地震作用引起的惯性力——地震力等于地面运动加速度与结构总质量的乘积,再把地震力视为静力作用在结构上,进行结构线弹性静力分析计算。分析结果如表 2。

三镜最大应力和系统最大应力发生在底支撑位置,当三镜天顶角为 45° 和 -45° 时,最大应力发生在侧支撑位置。在 1000 年地震条件下侧支撑杆会发生破坏,需要增加地震防护系统,图 10 为地震防护系统的概念图。

表2 三镜系统的峰值应力响应
Tab.2 Peak stress response of M3 system

(MPa)

α	200-year return period				1000-year return period			
	Excitation direction				Excitation direction			
	X	Y	Z	Three directions	X	Y	Z	Three directions
0°	1.429	1.593	1.316	2.632	2.473	2.737	1.795	4.537
45°	1.46	1.513	1.168	3.045	2.389	2.383	1.593	4.986
-45°	1.45	1.588	1.163	2.862	2.389	3.444	1.586	4.51

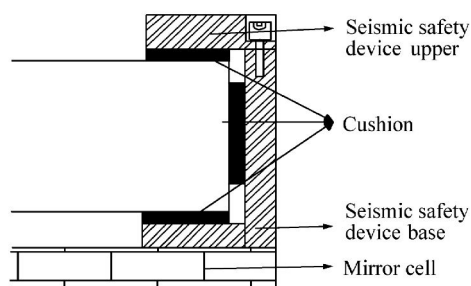


图10 三镜地震防护系统的概念图

Fig.10 Sketch map of seismic safety devices

4 M3PA

TMT的7个科学仪器并不是全部位于望远镜的耐氏焦点上,故需要三镜系统可以旋转和倾斜以把来自次镜的光线反射至两侧耐氏平台上的科学仪器中。三镜系统旋转精度在望远镜标校后应小于 $9''$ RMS。倾斜精度在望远镜标校后应小于 $8''$ RMS。望远镜系统标校后,当三镜系统旋转和倾斜到规定的任何一个角度时,三镜表面在M3CRS Z轴方向(三镜镜面的法向)的残余位置误差应当小于 $22\ \mu\text{m}$ RMS。

M3PA的设计应能够在M3CA移除后仍能够转动和倾斜,以便于维护。不论是掉电还是供电条件下,在任意望远镜指向下,如果不是指令驱动Rotation或Tilt,M3PA不能转动。当三镜系统安装在望远镜上以后,M3PA的设计应满足每周维护和更换任何一个部件的时间不超过2 h。在观测条件下,M3PA能每晚持续工作10 h,预期寿命50 a。M3POS设计允许工作人员通过在三镜支撑塔中心的梯子对其维护(望远镜打天顶);或者当通过一个空中作业平台进行维护(望远镜打水平

时)。当望远镜打天顶时,M3POS要给工作人员提供条件从三镜支撑塔中间的梯子安全进入M3PA组件中。这包括工作空间,平台和保护栅栏,这些都要与M3PA的设计一体考虑。

M3PA共分为Tilt轴系和Rotator轴系,可以实现三镜的旋转和俯仰。

4.1 M3PA Tilt轴系

TMT三镜Tilt轴的回转轴位于三镜的反射面内,但是因为设计空间的限制,其驱动部分并不位于三镜的两侧,而是位于三镜的背部。Tilt轴本身可以认为是一个两轴正交运动的结果,这使得Tilt轴的轴线与重力的夹角不断变化,为适应这种变化,将其设计成曲柄滑块的形式,结构简单,易于实现。图11为Tilt轴系的概念图。

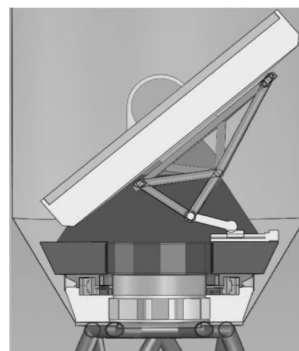


图11 Tilt轴系概念图

Fig.11 Conceptual design of Tilt shafting

4.2 M3PA Rotator轴系

Rotator轴系可以实现三镜的旋转,因为三镜系统的转速非常低,采用力矩电机直接驱动启动力矩大,容易造成“抖动”和“爬行”,因此,采用步进电机和齿轮驱动;为了消除大小齿轮之间的间隙,采用了双电机和双齿轮消隙结构。

Rotator轴系的轴承有多种形式可供选择,国

内外比较常用的有液压轴承,滚子轴承以及球轴承等形式^[11-13],综合分析比较各种轴承的性能后,决定采用三排滚子轴承,承载大,变形小,相同承载能力下截面面积小。图 12 为 Rotator 轴系概念图,采用有限元软件 ANSYS 分析轴承的受力情况,表 3 为 0~65°内轴承最大变形量。

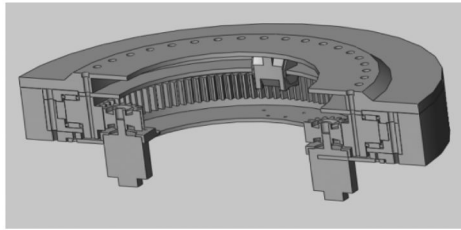


图 12 Rotator 轴系概念图

Fig. 12 Conceptual design of Rotator shafting

表 3 0~65°内轴承最大变形量

Tab. 3 Maximum deformation in range of 0 and 65 degree

	Axial direction	Radial direction	Angle
Deflection	1.27×10^{-3} mm	3.12×10^{-3} mm	3.32"

5 三镜控制系统(M3CS)

三镜控制系统 M3CS 提供了 M3POS 的内部伺服控制,主要的外部 M3CS 控制接口是和望远镜控制系统在一起的。M3CS 的软件接口(指令和控制,故障,遥感检测,数据)是通过望远镜控制系统(TCS)实现的。M3CS 以 40 Hz 的频率接收来自 TCS 的旋转和倾斜控制指令流。对于 M3CS,望远镜的天顶角和温度信息是通过 TCS 以 0.1 Hz 的恒定频率提供的。

M3CS 包含一个或者更多的 LUTS(M3 准直 LUTS),这些 LUTS 存储用来将测量到的旋转和倾斜角转换为校正并且满足要求的旋转和倾斜角的准直项,这些必须的校正包括可重复的水平轴耦合误差,天顶角随机误差和编码器周期误差消除等。TCS 按要求使能准直从而读写 M3 的准直 LUTS。

图 13 说明了 M3CS 可以接收来自 TCS 的高级指令并且向 TCS 提供差错信息。除此之外,M3CS 向 TCS 提供包含各种 M3CS 参数(比如电流,传感器数值等)的自动测量数据流。

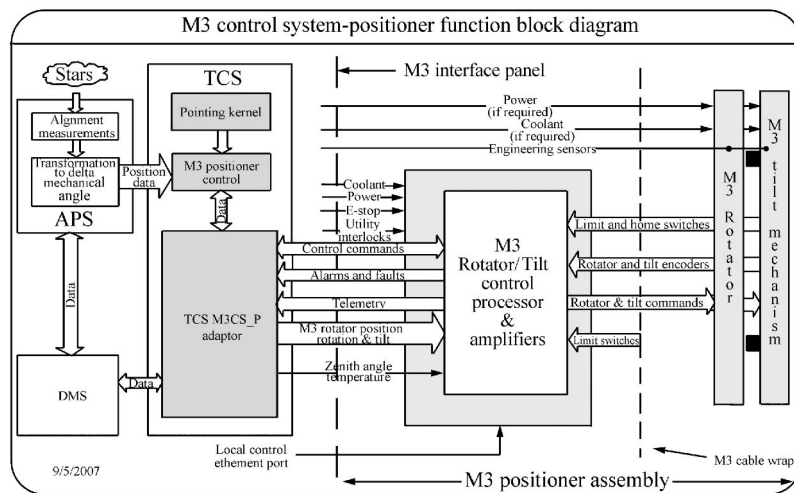


图 13 M3 定位器控制系统功能框图

Fig. 13 Block diagram of control system

所有的控制、电源、应用、应用联动装置,工程传感器和局部控制接口都通过 M3 接口面板。所有的在 TCS 和 M3CS 之间的控制和数据信息传输

通过一根以太网连接。

M3CS 必须能够监视 M3PA 所有能够导致致命故障的情况。当识别出致命故障时 M3CS 能够

快速采取措施使 M3PA 处于安全的情况。M3CS 应能够立即识别致命故障并告知 TCS。M3CS 应能够具有监视 M3PA 导致一般故障情况的能力。M3CS 在执行来自 TCS 的指令时,确保 M3PA 不会受到损坏。M3CS 应当确保在电源和冷却剂超出要求的情况下(包括电源和冷却剂的移除)M3PA 不会被损坏。当接到来自观测站系统的紧急停止指令时,M3CS 应当能够迅速停止 M3PA 的运动,切断电源。当检测到互锁信号时,M3CS 应该能够监视由 M3 接口面板提供的互锁信号,并采取适当行动。当在望远镜上进行装配操作时,M3CA 的安装/拆除位置是望远镜定位在天顶角 90° 、M3 系统在 Rotation 角 90° 、Tilt 角 45° 时,M3CS 启动安全保护机构系统来锁定 M3PA,目的是当执行 M3CA 安装/移除操作时,其不能改变 Rotation 和 Tilt 的设定角度。

M3CS 应当包括一个对 M3PA 的自检模式并将检测结果以报告形式发送给 TCS。M3CS 的自检结果将提供一个高可能性指示,以确定 M3PA 运行良好,满足要求。在接收到来自 TCS 的自检指令后,M3CS 应该在 5 min 内完成对 M3PA 的自检。M3CS 应该包括一个诊断和自校准模式,以

支持对 Rotation 和 Tilt 的分级控制和传感器的数据读取。这种诊断和自校准模式应该能够测量、更新并将比例因子和各项参数报告给 TCS 以备重新校准用。M3CS 应该包含一个便携式的以太网输出端口,使能在诊断和自校准模式下的内部控制。

M3CS 应该允许任何电子学组件的在线更换,包括印刷电路板和电源的更换,而不得超过 15 min。

6 结束语

本文从 TMT 建造的基本情况入手,简要介绍了我国加入 TMT 的重大意义以及在 TMT 的建造中承担的任务。详细介绍了 M3CA 的底支撑和侧支撑的具体要求,技术难点以及初步方案设计,介绍了 M3PA 的 Tilt 轴系和 Rotator 轴系的具体方案以及 M3CS 的具体要求和要达到的目标。

按照 TMT 的整体规划,2011~2013 为三镜系统的概念设计阶段,长春光机所目前已经完成了 M3CA 的概念设计工作,M3PA 的设计工作正在进行之中。

参考文献:

- [1] SIMARD L, CRAMPTON D, ELLERBROEK B, *et al.*. The TMT instrumentation program[J]. *SPIE*, 2010, 7735: 85187-85192.
- [2] STEPP L. Thirty Meter Telescope project update[J]. *SPIE*, 2012, 8444: 928006-928019.
- [3] NELSON J, SANDERS G H. The status of the Thirty Meter Telescope project[J]. *SPIE*, 2008, 7012: 788238-788245.
- [4] ELLERBROEK B L, ADKINS S M, ANDERSEN D R, *et al.*. TMT adaptive optics program status report[J]. *SPIE*, 2012, 8447: 927046-927054.
- [5] CHO M K. Performance prediction of the TMT tertiary mirror support system[J]. *SPIE*, 2008, 7018: 1-13.
- [6] SILVA D R., ANGELI G, BOYER C, *et al.*. Thirty Meter Telescope: observatory software requirements, architecture, and preliminary implementation strategies[J]. *SPIE*, 2008, 7019: 789974-789992.
- [7] KAERCHER H J, EISENTRAEGER P, Süß M. Mechanical principles of large mirror supports[J]. *SPIE*, 2010, 7733: 773320.
- [8] 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*, 2007, 36(6): 877-880.
WANG F G, YANG H B, YANG F, *et al.*. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors[J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)
- [9] 倪明阳, 巩岩. 光刻投影物镜光学元件运动学支撑结构的设计与分析[J]. *中国光学*, 2012, 5(5): 476-483
NI M Y, GONG Y. Design and analysis of kinematic lens positioning structure in lithographic projection objective[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 476-483 (in Chinese)
- [10] 邵亮, 杨飞, 王富国, 等. 1.2 m 轻量化 SiC 主镜支撑系统优化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 229-234S.
SHAO L, YANG F, WANG F G, *et al.*. Design and optimization of supporting system for 1.2 m lightweight SiC primary

- mirror[J]. *Chinese Optics*,2012 ,5(3):229-234. (in Chinese)
- [11] 范君柳,吴泉英,王福亮,等. Golay3 望远镜系统的设计[J]. *光学精密工程*,2011,19(12):2877-2883.
FAN J L, WU Q Y, WANG F L, *et al.*. Design of Golay 3telescope system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(12):2877-2883. (in Chinese)
- [12] 张景旭. 地基大口径望远镜系统结构技术综述[J]. *中国光学*,2012,5(4):327-336 .
ZHANG J X. Overview of structure of technologies of large aperture ground based telescope[J]. *Chinese Optics*,2012 ,5(4):327-336. (in Chinese)
- [13] 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 telescopes[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(1):138-145. (in Chinese).

作者简介:



王富国(1979—),男,山东单县人,博士,副研究员,2003年于山东科技大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事大型望远镜光机结构设计和有限元仿真等方面的研究。E-mail:wfg109@163.com



苏燕芹(1987—),女,陕西宝鸡人,博士研究生,2009年于西北农林科技大学获得学士学位,主要研究方向为大口径望远镜结构设计。E-mail:suyanqin0909@163.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,2008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,主要从事光学仪器结构设计。E-mail:yangflying@163.com



陈宝刚(1982—),男,河北景县人,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,主要从事光学仪器结构和光学装调检测工作。E-mail:cbg0813@163.com



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,主要从事望远镜结构设计与有限元仿真方面的研究。E-mail:zhaohcciomp@163.com