评述

高精度微位移促动器及其在极地天文望远镜中的应用

白清顺^{①*}, 王群^①, 张庆春^①, 姜铮^②, 梁迎春^①^① 哈尔滨工业大学机电工程学院, 哈尔滨 150001;^② 中国科学院南京紫金山天文台, 南京 210008

* E-mail: Qshbai@hit.edu.cn

收稿日期: 2015-12-28; 接受日期: 2016-04-18; 网络出版日期: 2016-06-22

国家自然科学基金(批准号: 51575138, 51535003)资助项目

摘要 采用高精度拼接技术获得大口径天文望远镜是当前制造大型望远镜的一种有效途径. 本文以微位移促动器在大口径天文望远镜中的应用为背景, 阐述了拼接镜面的工作原理以及微位移促动器的特点. 结合已建成的地基大口径拼接望远镜, 评述了典型的微位移促动器的机械结构和工作原理. 重点分析了极地低温环境下微位移促动器相关技术的研究现状, 包括低温机械结构设计、防冰和除冰技术、低温促动器的材料、低温润滑技术以及促动器控制技术. 最后总结了微位移促动器应用于南极天文望远镜需解决的关键技术, 并对未来应用于南极地区微位移促动器的发展趋势提出展望.

关键词 微位移促动器, 天文望远镜, 极地, 拼接镜面

1 引言

天文望远镜是天文观测的主要设备, 增大望远镜的口径可以提高望远镜的集光和分辨能力. 但是大口径的单一镜面难以直接制造, 并且随着主镜的口径加大, 重力引起的镜面整体变形增大, 严重地影响着望远镜的性能^[1]. 拼接镜面技术是主动光学技术的一种, 其采用多块口径较小的子镜拼接成大口径的主镜, 每块子镜都由微位移促动器支撑调节, 如图 1 所示. 波前传感器将采集到的数据送入计算机, 由计算机计算波前误差和位移促动器应输出的位移,

并根据此驱动位移促动器调整子镜姿态, 使口径较小、具有足够刚度的多个子镜拼接成满足光学成像要求的主镜. 每一块子镜的重量、制造成本、加工难度都下降, 因此拼接镜面技术在近些年得到了广泛应用, 为制造大口径天文光学望远镜奠定了技术基础^[2]. 美国的 10 m 口径的 Keck 望远镜、30 m 口径的 TMT 望远镜、欧洲南方天文台的 39.3 m 口径 E-ELT 极大望远镜以及 6.5 m 口径的詹姆斯-韦伯太空望远镜等都采用了拼接镜面技术.

微位移促动器是一种精密的位移输出装置, 在拼接镜面主动光学技术中完成对子镜进行定位支撑

引用格式: 白清顺, 王群, 张庆春, 等. 高精度微位移促动器及其在极地天文望远镜中的应用. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 697–705
Bai Q S, Wang Q, Zhang Q C, et al. High-precision micro-displacement actuator and its application in polar astronomical telescope (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 697–705, doi: 10.1360/N092015-00183

和调节的作用, 其必须具有高分辨率、高稳定性、高刚度、高重复精度、大负载性能以及毫米级行程等特点, 同时还要克服或减少诸如爬行、摩擦、迟滞、空回和生热等有害缺陷, 成为拼接镜面望远镜的关键部件. 图 2 为加那列大型望远镜(Gran Telescopio Canarias, GTC)的子镜支撑单元和主镜背部的微位移促动器阵列.

目前, 国内尚无专业的生产天文用微位移促动器的厂家, 且国外相关的产品也存在有效位移小, 输出负载能力小, 存在微米级有害回程间隙和运行速度较慢、价格昂贵等缺点^[3].

2 面向拼接镜面望远镜的微位移促动器技术

2.1 基于拼接镜面主动光学技术的大型望远镜

Keck 望远镜和 GTC 望远镜的口径分别为 10 和 10.4 m, 其主镜结构非常相似, 都采用 36 块正六边形子镜组成, 并且每块子镜由 3 个微位移促动器进行姿态调节, 每两块子镜的拼接处都设有两个位移传感器. 图 3 为 Keck 望远镜和 GTC 望远镜的主镜.

相比之下, 麦克唐纳天文台的 9.2 m 口径霍比-埃伯利望远镜(HET, Hobby-Eberly Telescope)的主镜

图 1 拼接镜面原理以及微位移促动器布局图

图 2 (网络版彩图)加那列大型望远镜的微位移促动器

(a) GTC 子镜支撑单元; (b) GTC 主镜微位移促动器阵列

图 3 (网络版彩图)Keck 望远镜(a)和 GTC 望远镜(b)

由 91 块六边形子镜拼接而成, 由于子镜数量较 Keck 和 GTC 多, 尺寸较小, 使得其子镜厚度降低到 5 cm. 图 4 为 HET 及其主镜^[4].

中国科学院国家天文台兴隆观测站的郭守敬望远镜 LAMOST(The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope)是一架新类型的大视场兼备大口径望远镜, 其反射施密特改正板 MA 和球面主镜 MB 分别由 24 块和 37 块子镜组成. LAMOST 成功应用了薄镜面主动光学技术和拼接镜面主动光学技术, 可以观测到暗达 20.5 等的天体, 使其成为大口径兼大视场光学望远镜的世界之最^[5,6]. 图 5 所示为 LAMOST 主体、MA 改正板及 MA 背部的促动器阵列.

目前, 世界上的拼接镜面天文望远镜大多数采

图 4 (网络版彩图)HET 及其主镜^[4]

图 5 (网络版彩图)LAMOST(a)、MA 改正板(b)和 MA 背部的促动器阵列(c)

用了六边形子镜, 并且每个子镜由 3 个位移促动器支撑调节. 随着望远镜口径的增大, 子镜数量必然增大, 对微位移促动器的精度和数量都产生巨大的需求.

2.2 典型的拼接镜面望远镜微位移促动器

随着世界各国兴建大型拼接镜面望远镜, 各国科研人员对拼接镜面望远镜中的关键部件微位移促动器的研究也不断深入.

Keck 望远镜采用的是液压缩放式微位移促动器, 利用直流伺服电机驱动精密滚珠丝杠, 进而驱动液压减速机构. 为了避免液压油的泄露和活塞与缸体之间的摩擦, 液压减速机构采用了特殊的全封闭柔性缸体, 但是这种柔性刚体在弹性变形时会产生缩放比非线性的问题. 如图 6 所示为 Keck 望远镜的微位移促动器结构, 其有效行程 1 mm, 定位精度 4.2 nm, 重复定位精度约为 $3.8 \mu\text{m}(\text{RMS})$, 负载能力大于 150 kg^[7].

美国 Diamond Motion 公司和德国 PI 公司都生产采用电机驱动的微位移驱动器, 分别用于 HET 望远镜和 SALT 望远镜. 我国 LAMOST 使用的促动器也是德国 PI 公司生产的微位移促动器. 用于拼接镜面望远镜时需要引入杠杆机构提高位移分辨率和承载能力. 图 7 所示为 HET 使用的 Diamond Motion 公司的 2200-2100 系列直线位移促动器, 其最小有效分辨率 50 nm, 有效行程 6 mm, 最大负载能力达到 445 N^[8].

CESA(Compañía Española Sistema Aeronáuticos) 为欧洲极大望远镜 E-ELT(European Extremely Large Telescope)研制的微位移促动器 PACT 采用宏/微驱动式, 具有大行程和高精度的特点, 如图 8 所示. 宏动部分采用无刷直流电机连接行星齿轮减速器驱动滑动丝杠, 无刷直流电机带有旋转编码器. 这种组合的宏动部分具有自锁功能, 并能在大行程内实现微米级位移输出. 微动部分采用音圈马达, 实现小行程内的高精度纳米级位移输出. 微动部分还附加有板簧卸荷

图 6 Keck 望远镜的微位移促动器结构^[7]

图 7 (网络版彩图) HET 望远镜使用的 Diamond Motion 公司生产的微位移促动器^[8]

图 8 (网络版彩图) CESA 为 E-ELT 研制的微位移促动器^[9]

机构, 避免了音圈马达负载能力小的缺点, 使得 PACT 的名义载荷达到了 900 N. PACT 的输出轴带有纳米级的位移传感器, 促动器的闭环输出精度高达 $1 \text{ nm}^{[9]}$.

美国加州大学和加州理工学院负责研制的 30 m 望远镜 TMT(Thirty Meter Telescope)的微位移促动器采用了完全无摩擦/黏滑设计, 其内部零件的相对运动均采用柔性元件保证. 如图 9 所示, 促动器采用了音圈马达作为驱动器, 同时还安装了减荷机构, 音圈马达的输出杆通过商用的 C-Flex 柔性铰链安装在上下两个 7:1 省力杠杆上, 两个杠杆同样采用 C-Flex 柔性铰链安装在框架上. 步进电机经过齿轮减速器减速后驱动线轴缠绕钢丝绳, 钢丝绳拉伸两根卸荷弹簧对杠杆加载, 使杠杆承受大部分载荷. 该设计克服了音圈马达驱动力小的缺点. 此驱动器还带有高精度的位移传感器, 预计能达到 1.2 nm 的输出精度, 稳定性 $5 \text{ nm}(\text{RMS})$, 有效行程 $4.3 \text{ mm}^{[10]}$.

欧洲空间局(ESA)和美国宇航局(NASA)共同研发的詹姆斯·韦伯太空望远镜使用的微位移促动器是 BATC(Ball Aerospace & Technologies Corp.)专门研制的超低温微位移促动器, 能在恶劣的外太空环境中工作, 图 10 所示为第三代超低温微位移促动器,

图9 TMT 的微位移促动器^[10]

其具有体积小、质量轻、耐低温和真空等优点。促动器结构采用宏/微动叠加式, 并且宏动部分和微动部分可以由同一个步进电机驱动。为了提高促动器的承载能力, 宏动部分采用步进电机经过齿轮减速驱动一对平行的精密丝杠, 精密丝杠的螺旋传动部分采用弹簧预紧消除。微动部分采用 4 个结构相同的柔性铰链进行位移缩放, 不仅输出精度高, 而且负载能力大。经测试, 此微位移促动器能在 12 K 低温真空环境下稳定输出 10 nm 步进精度, 有效行程 25.4 mm^[12]。

我国对拼接镜面主动光学用微位移促动器的研究较少, 南京天文光学技术研究所基于 LAMOST 望远镜微位移调节机构的实现原理, 设计了高精度、大行程的微位移促动器, 如图 11 所示。促动器采用步进电机经过谐波减速器驱动精密丝杠, 并通过计算机校正丝杠的传动误差。该微位移促动器在行程范围内灵敏度达到了 201 ± 48 nm, 步长为 10 μ m, 单向精度达到了标准偏差 237 nm^[13]。

3 极地条件下微位移促动器相关技术

3.1 极端天文台址环境下的微位移促动器

南极地区是地球上的一种极端地理环境, 其高海拔地区在天文观测方面具有极夜时间长, 可进行长时间的连续观测; 大气稀薄、干净、干燥、透明度高; 风速低、视宁度极好等优点。因此, 南极高海拔地区被公认为是地球上最优秀的天文学观测地点, 而且非常适合亚毫米波和太赫兹天文学的观测。

近些年世界各国提出了多个南极望远镜计划, 如 CSTAR, IRAIT, PILOT, LAPCAT 和 KEOPS 等^[14]。但是截至到目前为止, 国际上还没有安置于南极的大型拼接镜面望远镜, 因此高精度微位移促动器目前

图10 (网络版彩图)詹姆斯·韦伯太空望远镜使用的微位移促动器^[11] 图11 精密微位移促动器^[13]

还没有在南极实际应用。根据结构形式不同, 常用的微位移促动器结构形式主要包括尺蠖式、位移缩放式、宏/微驱动式等^[15]。微位移促动器应用于南极地区时, 会遭受到低温、霜冻、冰冻、寒风等负荷, 促动器必须具有优良的低温性能。在研制应用于南极地区的微位移促动器时, 必须考虑低温环境对驱动元件、位移缩放机构以及机械结构的影响, 避免选用对温度敏感的驱动元件, 材料的低温转脆、热膨胀系数以及低温强度等因素也都需要仔细考虑。微位移促动器应用于南极地区时还要耐低温, 结构紧凑, 外形规则, 能够有效避免积雪, 同时需要具有一定的密封性, 防风雪侵蚀等。考虑到南极地区运输难度大、费用高等限制, 促动器还要质量轻、体积小, 便于运输等特点。

作为极端台址环境, 南极环境与其他天文观测地存在着显著的不同, 如极低的气温, 南极 Dome A 地域可能是地球上最冷的地域, 全年气温在 $-10 \sim -80$ $^{\circ}\text{C}$ 之间变化, 平均气温 -52 $^{\circ}\text{C}$ ^[16]。天气骤变时, 仪器设备容易结霜和积冰, 并且常年遭受携带冰粒的风侵蚀。因此, 为了克服南极的极端环境, 使天文望远镜成像质量达到要求, 需要重点考虑天文望远镜的微位移促动器的机械结构、防冰和除冰技术、材料选择、低温润滑和驱动控制等几个方面。

3.2 低温机械结构设计与分析

研制用于南极低温环境下的微位移促动器时, 一般在机械结构设计方面主要考虑以下几点: ① 具有较高的运动精度; ② 具有防冰雪的功能和极地环

境适应性; ③ 具有一定的保温性; ④ 质量轻、结构紧凑, 便于运输和安装到南极地区.

根据我国未来在南极建设的 5 m 太赫兹望远镜的需求, 哈尔滨工业大学设计了低温微位移促动器, 如图 12 所示. 该促动器采用了低温步进电机作为驱动元件, 设计了特殊的位移缩放机构. 促动器机械零件的材料采用了同质耐低温材料, 可以有效地减少由于温度梯度产生的形变和应力. 促动器采用了专用螺纹预紧设计, 避免了促动器在环境温度变化时丝杠卡死. 同时, 促动器整体采用密封式结构, 达到了结构紧凑、有效地防止风雪侵蚀的目的. 经初步测试, 所设计的低温微位移促动器有效行程超过 2 mm, 能够并且能够承受 60 N 的轴向负载, 在室温条件下的步进精度为 $1 \pm 0.082 \mu\text{m}$; 在 -40°C 低温条件下的步进精度可达 $2 \pm 0.404 \mu\text{m}$ ^[17].

安置于南极地区的仪器设备, 由于受到极地温差的影响, 将会产生较大的温度形变, 同时由于各零部件之间存在约束, 仪器内部便会产生应力. 若形变较大, 可能会使仪器失效, 特别是拼接镜面望远镜中的促动器, 即使产生微小变形, 也会影响仪器的精度. 因此, 在低温环境下需要采取一些不同于常温环境的结构设计方法, 来减少热变形和热应力. 例如对轴系零件采取一端固定, 一段自由安装的方式, 使其能够在轴向上自由收缩或膨胀, 不至于卡死. 对于零件几何尺寸稳定性要求高的促动器, 应采用热膨胀系数低的材料, 保证零件的几何尺寸精度. ICE-T 的镜面支撑结构采用了碳纤维-铝复合材料制成, 并采用杠杆结构, 利用耐寒胶与镜面联结, 大大降低了镜面的机械应力^[18].

所以, 在设计安置于南极地区的仪器设备时, 必须要考虑温度载荷对装置的影响. 同时采用先进的数值模拟方法对机械结构设计提供重要辅助.

图 12 (网络版彩图)哈尔滨工业大学研制的低温微位移促动器

3.3 低温条件下的防冰和除冰技术

目前, 常用的清除基体表面积冰的方法主要有利用外力对已在基体表面形成的冰进行清除, 使其脱落; 或者是干扰结冰过程, 进而减小结冰速率^[19]. 第一类方法是对已结冰表面的清理技术, 包括加热融冰、机械振动敲击、微波除冰、激光除冰等技术. 但是这几种技术增加了系统的能源需求, 同时还会使仪器设备复杂. 第二类方法是对结冰的预防和抑制技术, 如加热保温、涂覆防冻液、超疏水表面防结冰等技术. 例如, 南极 ICE-T 望远镜的热传导镜面保温装置以及南极 ASTEP 400 望远镜的热控制箱^[20,21]. 促动器在设计时, 也需要考虑其表面的防冰和除冰能力.

在防结冰技术中, 超疏水表面防结冰是一种新颖的技术, 日渐成为了研究热点. 超疏水表面具有低表面能和微结构, 能够减少水滴与表面的接触面积, 延缓水滴在表面的结冰时间, 同时还可以减弱水滴与表面的黏附作用使得水滴不易在表面积累, 或者在未结冰之前就被重力、风力等外力除去, 从而减少了冰在表面形成的几率^[22].

国内外已有相关研究证实了超疏水表面在防结冰方面具有良好的应用前景. 例如, 在铝板和商用卫星碟形天线部分表面喷涂颗粒直径 50 nm 的聚合物复合材料形成超疏水表面, 能够有效抵抗结冰, 如图 13 所示^[23]. 不仅如此, 相关学者的小型冰风洞实验还证实了低温飞行环境下在机翼表面涂覆超疏水涂层材料, 可以在一定程度上防止机翼结冰^[24].

在基体表面加工相应的微结构也可以形成超疏水表面, 这种超疏水表面同样具有一定的防结冰性能, 如图 14 所示. 在这种条件下, 基体表面的微结构与水滴的接触面积很小, 能够有效防止基体表面结冰, 即使形成冰后其粘附也极不牢固, 很容易去除. 覆盖有这种微结构的基体表面甚至能够在 $-25 \sim -30^\circ\text{C}$ 的低温下保持干洁状态而不发生结冰现象^[25].

对超疏水防结冰涂层的设计, Xiao 和 Chaudhuri^[26]建立了的多尺度模型框架, 该模型可以描绘微液滴在多尺度层次表面运动和凝结成核的特征, 这样便有可能系统地匹配原子尺度的涂层组分和层次表面的拓扑结构, 以改进涂层的防结冰性能.

虽然大量实验证实了超疏水表面具有防结冰性能, 但是还有某些因素限制其在防结冰方面的应用. 有的超疏水表面并不是一直具有较好的防结冰性能, 随着对其表面余冰的清理次数增多, 其防结冰性能

图 13 (网络版彩图)自然冻雨条件下的防结冰性能试验

图 14 (网络版彩图)水滴在不同微结构功能表面的结冰过程^[25]

明显下降. 还有研究表明, 虽然某些超疏水表面具有防结冰的性能, 但是一旦结冰却很难清除^[27]. 除此之外, 防冰和除冰技术还要考虑霜冻、冰冻等载荷的影响. 超疏水防结冰技术虽然能够在一定程度上防止表面结冰, 但是其面对极地特殊环境时, 还需要进一步提高其可靠性, 特别是在微位移促动器结构上应用时, 需要验证其可行性和有效性.

3.4 极地条件下的微位移促动器材料分析

目前, 用于低温环境下的材料主要有金属材料 and 复合材料两大类. 金属材料的低温性能, 如低温下

的塑性和韧性, 受到晶格结构的影响^[28]. 具有面心立方晶格金属材料在低温环境下不易发生脆性断裂, 适合低温环境; 而具有体心立方晶格的金属, 其韧性随温度的降低而降低, 易发生脆性断裂. 复合材料属于轻质高性能材料, 但是其价格昂贵, 可加工性差, 一般不用于微位移促动器中. 因此, γ -铁、铝、铜、铅以及奥氏体不锈钢等低温性能好的面心立方晶格金属材料将在极地条件下的微位移促动器中获得应用.

在南极望远镜计划中, 日本的 AIR-T-40 的螺杆采用合金结构钢, 螺杆支架采用铝合金, 并在螺杆和支架表面涂覆热膨胀率很低的聚四氟乙烯, 解决了不同材料收缩不同带来的问题. 同时, AIR-T-40 的绝大部分零件采用铝合金材料, 以使望远镜重量尽可能减轻, 便于组装地到安装地之间的运输, 如图 15 所示^[29].

另外, ASTEP 400 的中间主体框架、主镜支撑框架和副镜支承框架均采用铝合金材料制成, 连接三个框架的空心圆杆两端接头采用殷钢, 殷钢的热膨胀系数极低, 这样便保证了整体支承结构较低的热变形^[21]. AST3 同样大量使用殷钢材料, 制成经典赛路里桁架对主体结构进行支撑, 保证了主镜和聚焦装置之间具有稳定的几何结构^[30].

南极环境恶劣, 温度极低, 并且温度变化快. 因此选择合适的材料尤为重要. 结合安置于南极的望远镜进行分析可知, 对微位移促动器材料进行选择时, 一般应考虑以下几个条件: ① 满足低温环境下的强度要求, 刚度; ② 尽量选择热膨胀系数小的材料; ③ 促动器零件尽量选择同质的材料, 或者热

图 15 (网络版彩图)AIR-T-40 望远镜^[29]

膨胀系数接近的材料; ④ 易于加工和满足工艺要求; ⑤ 满足性能的前提下, 尽量选择经济性好的材料. 具有优异低温性能的不锈钢、殷钢和铝合金等有望成为极地低温促动器机械零件材料的首要选择.

3.5 低温润滑技术

南极地区环境温度低, 一般的润滑脂和润滑油无法适应低温环境, 在温度降到 -80°C 时便会凝固, 在丧失润滑性能的同时, 还会阻碍促动器中运动部件的正常工作. 目前, 在低温环境下的润滑剂主要有低温极压润滑脂、石墨、 MoS_2 、高分子润滑材料和软金属等.

不同的润滑材料具有不同的性能和应用特点. 低温极压润滑脂具有优良的低温性能、良好的润滑性、使用方便, 在极地仪器设备中应用较广. AST3-1 望远镜的跟踪结构中采用了特殊的低温极压润滑脂, 使得跟踪结构能承受 -80°C 低温^[31]. AIR-T-40 的电机、轴承以及蜗轮等零件使用苏威苏莱克斯公司生产的 FOMBLIN ZLHT 低温润滑脂进行润滑, 这种润滑脂能够在 -80°C 时保持较低黏度, 具有较好的润滑性能^[29].

石墨具有良好的导热性和散热性, 是固体润滑剂之一. 但是石墨的润滑性依赖于水和空气, 在缺少空气和水分的环境里, 其润滑性会大大下降^[32]. 近些年, 石墨经过改性和复合处理后形成的石墨润滑产品种类越来越多, 例如氟化石墨等, 使得石墨润滑产品在南极环境中将具有较好的应用前景.

MoS_2 是应用较为广泛的层状结构物润滑材料, 它在真空环境中的摩擦系数和磨损率很低, 并且有较宽的温度和速度适应范围, 即使在 -180°C 下依然保持良好的润滑性. 同时, MoS_2 的防真空冷焊能力和承载能力很强, 耐压和抗疲劳性能良好^[33].

聚四氟乙烯、酚醛树脂以及聚酰亚胺等是应用较为广泛的高分子润滑材料. 高分子润滑材料相比于其他润滑剂具有良好的低温性能和化学稳定性, 对环境要求低、韧性好、抗油、耐腐蚀. 但高分子润滑材料具有配合精度低、承载能力差等缺点.

软金属具有良好的低温润滑性能. 应用时通常利用物理化学镀覆的方法将软金属镀在基材表面, 形成一层极薄的固体润滑膜, 或者以金属微粉用粉末冶炼的方法制成复合材料使用^[34].

3.6 促动器的控制网络

拼接镜面望远镜的主镜由多块子镜拼接而成,

在望远镜运行过程中, 全部子镜需要自主共面, 使主镜面形达到光学成像要求. 一般地, 每个子镜由 3 个轴向支撑的微位移促动器进行控制实现子镜的俯仰、偏摆、平动运动. 目前, 国际上大型拼接镜面望远镜子镜的轴向支撑多采用摇板支撑结构, 摇板支撑结构安装于可移动的子桁架上, 每个子桁架由 3 个微位移促动器支撑, 控制子桁架进行运动, 调节子桁架的位姿, 即可完成子镜的自主共面. 如图 16 所示为 TMT 望远镜的子镜支撑结构^[35].

由于大量的子镜需要拼接, 因此针对大量微位移促动器的控制技术对全部子镜的拼接精度至关重要. 位移促动器控制网络设计的关键因素是其实效性、可靠性和安全性, 并且应首选标准化和开放性的产品, 便于整个系统的调试、安装与维修^[36].

我国 LAMOST 的反射施密特改正板 MA 和球面主镜 MB 上共安装有 183 个位移促动器, 由于 MA 和 MB 相距约 40 m, 并且促动器数量庞大, 因此很难采用传统的中央控制单元与促动器点对点连接进行控制. 鉴于此, LAMOST 的科研人员采用了分布式和集中式的控制方法^[37], 由智能控制器直接控制促动器, 每个智能控制器能控制 6 个位移促动器. LAMOST 采用的串行控制方式, 适合位移促动器数量和运行位移量不大的情况下, 否则其执行时间过长.

近几年, 有学者提出了以现场可编程门阵列 (FPGA) 为硬件载体的多电机控制驱动系统, 这种控制驱动系统很适合拼接镜面望远镜中以步进电机为驱动元件的促动器的驱动控制^[38]. FPGA 具有资源丰富、I/O 管脚多、功能性强等特点. 因此将 FPGA 应用到多电机的控制系统中, 可以大大提高系统的集成度. 南京天文光学技术研究所运用 FPGA 并发执行的特点, 采用并行实施控制方法, 构建了一套位移促动器控制

图 16 TMT 的子镜支撑结构^[35]

系统. 仿真分析表明, FPGA 芯片可以并行控制多个位移促动器, 缩短了控制过程时间, 提高了望远镜的主镜面形校正效率、观测效率和控制的实效性^[39].

拼接望远镜的控制系统庞大复杂, 并且要具有高效性和高效率的特点, 其重点在于促动器的网络控制. 除了控制效率、精度外, 微位移促动器在极地应用的控制网络也要综合考虑保温设计、极地环境抵抗能力、无人值守、网络传输可靠性等具体的技术要求.

4 结论与展望

本文分析了拼接镜面主动光学技术原理及微位移促动器的结构特点. 结合目前已经得到实际应用的微位移促动器, 本文介绍了几种典型的微位移促动器结构和原理. 面向南极极端天文台址环境下应

用的微位移促动器, 详细分析了微位移促动器在应用于南极环境时, 其低温结构设计、防结冰和除冰、低温材料选择、低温润滑和促动器控制网络等相关技术.

通过上述分析表明: 在应对南极复杂环境时, 需要综合考虑机械结构、冰雪凝结、材料特性、润滑密封、控制网络等因素. 应用在南极地区的微位移促动器需要采用热膨胀系数低、低温性能好的材料. 高性能不锈钢、殷钢和铝合金等有望成为南极低温促动器的选择材料. 在润滑方面, 微位移促动器要求低温润滑性能优良的润滑剂, 低温极压润滑脂和石墨润滑产品比较适合南极环境. 同时, 要研究超疏水防结冰表面, 使其在极地促动器上应用. 研究先进的并行实时多促动器的控制网络, 也将使极地拼接天文望远镜的面形校正更加可靠而高效.

参考文献

- 1 丁洁. 解析大口径天文光学望远镜. 激光与光电子学进展, 2009, 10: 112–113
- 2 程景全. 天文望远镜原理和设计. 北京: 科学出版社, 2003
- 3 邵亮, 杨德华, 陈昆新, 等. 光学天文望远镜用微位移驱动器机构研究综述. 天文学进展, 2009, 27: 70–79
- 4 Palunasa P, Fowler J A, Booth J A, et al. Control of the Hobby-Eberly Telescope primary mirror array with the segment alignment maintenance system. In: Proceeding SPIE 5496, Advanced Software, Control, and Communication Systems for Astronomy, 659 (September 15, 2004). USA, 2004, 5496: 659–666
- 5 Cui X Q, Zhao Y H, Chu Y Q, et al. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope (LAMOST). Res Astron Astrophys, 2012 12: 1197–1241
- 6 Cui X Q, Su D Q, Li G P, et al. Experiment system of LAMOST active optics. In: Proceeding SPIE 5489, Ground-based Telescopes, 974 (September 28, 2004). USA, 2004, 5489: 974–985
- 7 Meng J D, Franck J, Gabor G, et al. Position actuators for the primary mirror of the W. M. Keck telescope. In: Proceeding SPIE 1236, Advanced Technology Optical Telescopes IV, 1018 (July 1, 1990). Tucson, AZ, 1990, 1236: 1018–1022
- 8 杨德华, 戚永军, 朱振东, 等. 光学拼接镜面微位移主动调节机构的设计和实测. 光学精密工程, 2005, 13: 191–197
- 9 Jiménez A, Morante E, Viera T, et al. Design of a prototype position actuator for the primary mirror segments of the European Extremely Large Telescope. In: Proceeding SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III. San Diego, California, USA, 2010, 773354-1-14
- 10 Lorell K R, Aubrun J-N, Clappier R R, et al. Design of a prototype primary mirror segment positioning actuator for the Thirty Meter Telescope. In: Proceeding SPIE 6267, Ground-based and Airborne Telescopes, 62672T (June 23, 2006). Orlando, Florida, 2006, 62672T-1-11.
- 11 Wells C, Whitman T, Hannon J, et al. Assembly integration and ambient testing of the James Webb Space Telescope primary mirror. In: Proceeding SPIE 5487, Optical, Infrared, and Millimeter Space Telescopes, 859 (October 12, 2004). 2004, 5487: 859–866
- 12 Streetman S, Kingsbury L. Cryogenic nano-positioner development and test for space applications. In: Proceedings of SPIE 4850, IR Space Telescopes and Instruments, 274 (March 4, 2003). Waikoloa, Hawai'i, USA, 2003, 4850: 274–285
- 13 李国平, 苗新利. 一种微位移促动器的设计和检测. 光学精密工程, 2005, 6, 13: 332–338
- 14 Yuan X Y, Cui X Q, Liu G R, et al. Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A. In: Proceeding SPIE 7012, Ground-based and Airborne Telescopes II, 70124G (August 27, 2008). Marseille, France, 2008, 70124G-1-8
- 15 Bai Q S, Liang Y C, Cheng K, et al. Design and analysis of a novel large aperture grating device and its experimental validation. P I Mech Eng B-J Eng, 2013, 227: 1349–1359
- 16 Yang J, Zuo Y X, Lou Z, et al. Conceptual design studies of the 5 m terahertz antenna for Dome A, Antarctica. Res Astron Astrophys, 2013, 13: 1493–1508
- 17 白清顺, 王群, 张庆春, 等. 低温微位移促动器的设计与实验. 天文研究与技术, 2015, 9: 1–5
- 18 Strassmeier K G, Di Varano I, Woche M, et al. The opto-mechanical design of the Antarctic Telescope ICE-T. In: Proceeding SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, 77334U (August 06, 2010). San Diego, California, USA, 2010, 77334U-1-12
- 19 曹敏, 陈廷坤, 丛茜, 等. 表面形态对结冰附着强度的影响. 吉林大学学报(工学版), 2013, 9, 43: 1314–1319
- 20 Strassmeier K G, Kaercher H J, Kühn J, et al. Thermal design and de-icing system for the Antarctic telescope ICE-T. In: Proceeding SPIE

- 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, 77331W (August 04, 2010). San Diego, California, USA, 2010, 77331W-1-8
- 21 Daban J-B, Gouvret C, Guillot T, et al. ASTEP 400: A telescope designed for exoplanet transit detection from Dome C, Antarctica. In: Proceeding SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, 77334T (August 09, 2010). San Diego, California, USA, 2010, 77334T
 - 22 余春浩, 宫敬, 郝鹏飞, 等. 超疏水表面防结冰结霜性能的研究进展. 材料导报 A, 2014, 28: 65–68
 - 23 Cao L L, Jones A K, Sikka V K, et al. Anti-icing superhydrophobic coatings. Langmuir, 2009, 25: 12444–12448
 - 24 Mohammadi M, De Pauw D, Tembely M, et al. Droplet impact and solidification on hydrophilic and superhydrophobic substrates in icing conditions. In: The 43rd Fluid Dynamics Conference, 2013, 6: 1–5
 - 25 Mishchenko L, Hatton B, Bahadur V, et al. Design of ice-free nanostructured surfaces based on repulsion of impacting water droplets. ACS Nano, 2010, 4: 7699–7707
 - 26 Xiao J, Chaudhuri S. Design of anti-icing coatings using supercooled droplets as nano-to-micro scale probes. Langmuir, 2012, 28: 4344–4446
 - 27 冯杰, 卢津强, 秦兆倩. 超疏水表面抗结冰性能研究进展. 材料研究学报, 2012, 26: 337–343
 - 28 陈国邦. 低温工程材料. 杭州: 浙江大学出版社, 1998. 57–58
 - 29 Murata C, Ichikawa T, Lundock R G, et al. A 40 cm infra-red telescope in Antarctica. In: Proceeding SPIE 7012, Ground-based and Airborne Telescopes II, 701229 (August 27, 2008). Marseille, France, 2008, 701229-1-8
 - 30 Yuan X Y, Cui X Q, Gong X F, et al. Progress of Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A. In: Proceeding SPIE 7733, Ground-based and Airborne Telescopes III, 77331V (August 06, 2010). San Diego, California, USA, 2010, 77331V-1-7
 - 31 Li Z Y, Yuan X Y, Cui X Q, et al. Status of the first Antarctic survey telescopes for Dome A. In: Proceeding of SPIE 8444, Ground-based and Airborne Telescopes IV, 84441O (September 17, 2012). Amsterdam, Netherlands, 2012, 84441O-1-7
 - 32 陈锐, 李平, 陆玉峻. 固体润滑材料-石墨的应用. 炭素, 2000, 4: 23–25
 - 33 马国政, 徐滨士, 王海斗, 等. 空间固体润滑材料的研究现状. 材料导报, 2010, 24: 68–71
 - 34 严晓华, 陈国需. 固体润滑技术的研究现状及展望. 能源研究与信息, 2005, 21: 69–74
 - 35 Williams E C, Baffesb C, Mast T, et al. Advancement of the segment support system for the Thirty Meter Telescope primary mirror. In: Proceedings of SPIE 7018, Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation, 701810 (July 14, 2008). Marseille, France, 2008, 701810-1-16
 - 36 徐欣圻. LAMOST 望远镜控制系统. 天体物理学报, 2000, 20(Suppl): 43–52
 - 37 Du X X, Zhang Z C, Qi Y J, et al. Control system of position actuators for segmented mirror active optics in LAMOST. In: Proceedings of SPIE 6721, 3rd International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Large Mirrors and Telescopes, 672106 (November 21, 2007). Chengdu, China, 2007, 672106-1-7
 - 38 刘小威, 翟超, 颜芳. 基于 FPGA 的 LAMOST 多电机控制驱动系统. 机械与电子, 2008, 6: 17–19
 - 39 戚永军, 倪季君. 极大望远镜基于 FPGA 的大批量位移促动器实时高精度控制的研究. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28: 597–602

High-precision micro-displacement actuator and its application in polar astronomical telescope

BAI QingShun¹, WANG Qun¹, ZHANG QingChun¹, LOU Zheng² & LIANG YingChun¹

¹ School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

High-precision tiling technology is an effective way to fabricate large-aperture astronomical telescope. Based on the application of micro-displacement actuator in the area of large-aperture astronomical telescope, the principle of tiling mirrors and the characteristic of micro-displacement actuator were presented at first. Secondly, the mechanical structures and working principles of typical micro-displacement actuators were reviewed according to the ground-based large-aperture astronomical telescope constructed. The key technologies for micro-displacement actuator in polar low-temperature environment were analyzed emphatically, which include mechanical structure design in low-temperature, anti-ice and deicing technology, material for micro-displacement actuator, lubrication technology in low-temperature and control of actuator. Moreover, the key technologies that should be solved were summarized for the application of micro-displacement actuator in Antarctic astronomical telescope and the prospect for the micro-displacement actuator in Antarctic area was proposed in terms of the future development trend.

micro-displacement actuator, astronomical telescope, polar region, tiling mirror

doi: 10.1360/N092015-00183