

文章编号: 1002-1582(2025)05-0596-08

地基大型光学望远镜消旋机构综述

陈宝刚^{1*}, 瞿竞越^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 13033)

(2. 中国科学院大学, 北京 10049)

摘 要: 消像旋机构是地基大型光学望远镜保证成像清晰的关键执行机构, 在运用中必须满足高精度、结构紧凑、形变小等要求。随着对望远镜的性能和功能要求不断提高, 望远镜的光学系统也更加丰富, 消旋机构的结构设计也迎来新的挑战。为了寻找消旋机构的可行方案, 给消旋机构的研究人员提供系统的参考, 文本聚焦于地平式望远镜的发展需求, 介绍了像旋特点和不同光学系统对应的消旋机构, 进行整理、汇总、分类和对比, 最后综合各消旋机构的特点, 对消旋机构未来的发展趋势做出展望。

关 键 词: 地基大型光学望远镜; 消旋像机构; K镜; 物理消旋

中图分类号: P111.21; TH703

文献标识码: A

Review of field derotators for ground-based large optical telescopes

CHEN Baogang^{1*}, QU Jingyue^{1,2}

(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)

Abstract: The image de-rotation mechanism serves as a critical actuation component in ground-based large optical telescopes, essential for ensuring imaging clarity through stringent requirements including high precision, compact structure, and minimal deformation. With the continuous advancement in the performance and functionality requirements of telescopes, optical systems have become increasingly sophisticated, thereby presenting new challenges for the structural design of de-rotation mechanisms. To explore viable solutions for these mechanisms and provide systematic references for researchers, this study addresses the developmental demands of alt-azimuth-mounted telescopes. It systematically examines the characteristics of image rotation and corresponding de-rotation mechanisms across diverse optical systems, followed by comprehensive organization, summarization, classification, and comparative analysis. A forward-looking perspective on future trends in de-rotation mechanism development is presented in the conclusion of the paper, building upon the distinctive features of various de-rotation mechanisms. A theoretical foundation and technical framework for advancing next-generation high-performance de-rotation systems are established by this work.

Keywords: ground-based large optical telescopes; de-rotation mechanism; k-mirror; mechanical derotation

0 引 言

地基大型光学望远镜作为现代天文学研究和

国家安全的核心设施, 在探索宇宙起源、星系演化、时域巡天及地外空间的人造卫星普查编目与成像识别等领域发挥着不可替代的作用, 这些需

收稿日期: 2025-03-18; 收到修改稿日期: 2025-05-29

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (12303084);

作者简介: 陈宝刚 (1982—), 男, 正高级研究员, 硕士, 从事大型望远镜光机结构及总体技术研究。

瞿竞越 (1999—), 男, 硕士研究生, 从事大型光学望远镜光机结构研究。18512318710@163.com

* 通讯作者: cbj0813@163.com

求使得地基大型光学望远镜需要具备良好的光学像质和较高的极限角分辨率^[1,2]。为提升望远镜的观测性能,光学望远镜的发展趋向于更大的口径,光学系统也越来越丰富与复杂。自上世纪70年代以来,光学、计算机、自适应光学和主动光学等领域诸多新技术的出现,使得望远镜的口径得以突破限制,由最初的几厘米发展到当今的几十米。为满足不同的观测需求和提升观测能力,望远镜光学系统由原来的折射式光学系统演化为反射式光学系统,典型的反射式光学系统如主焦点^[3]、R-C^[4]、格里高利^[5]、三镜反射^[6]等光学形式。

地平式望远镜观测期间,会进行长时间的曝光,由于地平式望远镜运动轴与地球自转轴不平行,除中心以外的其他区域会形成拖影^[7]。消旋机构的主要作用是消除曝光过程中的视场旋转,使成像清晰。消旋方式共有三种:电子消旋^[8]、光学消旋^[9]和物理消旋^[10]。电子消旋是利用算法将探测器上偏转的像素点旋转回原位置,以此抵消像旋。该方法无需借助其他光学元件或机械硬件,然而该方法由于计算精度、消旋过程需要运算时间不可避免的降低图像精度,故大型望远镜不采用该方法。国内外根据不同望远镜的光学系统,已经发展出了光学消旋和物理消旋。光学式消旋机构安装于相机之前的光路,采用三个反射镜,三个反射镜组成字母K,故亦称K镜,在曝光过程中,要始终保证K镜的转角是K镜装配体之前像旋转角的一半^[11];物理消旋机构和相机固定连接,直接驱动相机旋转使相机与像旋转角同步旋转,从而消旋^[12]。消旋机构会有低速跟踪和高速切换天区两种运动状态,这就要求消旋机构高速运动时具备足够的精度和切换速度,合理选择传动方式可以提高性价比。消旋机构也会面临环境温度变化及自身长时间运行引起温升从而导致的应力应变,材料的正确选择和结构设计的合理性也是保证消旋机构性能的关键因素。同时,由于不同望远镜的光学系统不同,消旋机构的结构也会相应发生变化,消旋机构的结构灵活性也是设计时需要面对的一大难题。光学式消旋装调时的简便性也是设计时需要考虑的因素。

通过分析总结国内外不同消旋机构的结构特点,结合相应望远镜的光学系统,比较不同消旋方案间的差异,进行分类、汇总和比较,针对望远镜光学系统的发展需求,对消旋机构的发展趋势做出总结,为未来消旋机构的设计提供系统性参考。

1 地基大型光学望远镜消旋机构发展现状

1.1 像旋特性分析

地平式望远镜光学系统在其焦点上存在物方视场旋转和像方视场旋转,两种像旋机理不同,互不影响,对两种像旋的特性进行分析,望远镜总的像旋量为两者叠加^[13]。

1.1.1 物方视场旋转

由于地平式望远镜的俯仰轴和地球自转轴不平行,观测时无法补偿观测目标周日视运动造成的物方视场旋转^[14]。像旋速度与望远镜纬度、地球自转速度、跟踪目标方位角和俯仰角相关,像旋旋转速度的表示为

$$\frac{dq}{dt} = -w_e \cos(Lat) \frac{\cos(Az)}{\cos(Alt)} [rad/s] \quad (1)$$

式中, w_e 为地球转速; Lat 为望远镜纬度; Az 为跟踪目标方位角; Alt 为跟踪目标俯仰角。

1.1.2 像方视场旋转

地平式望远镜光学系统由反射镜组成,在望远镜观测时,反射镜会随着望远镜的俯仰运动而产生相对运动,光路通过各反射镜后发生旋转,最终导致系统相机端产生像方视场旋转^[15],像旋位置表达式为

$$A' = A - 2(A \cdot N)N \quad (2)$$

式中, A 为空间的任一物向量, A' 为与物向量对应的像向量; N 为平面镜单位法向量

1.2 国外地基大型光学望远镜消旋机构

1.2.1 LSST 望远镜

LSST (The Large Synoptic Survey Telescope) 是一台大口径大视场巡天望远镜,坐落于智利北部^[16]。光学系统为三镜反射式,搭配像前校正透镜组,光学视场可达 3.5° 。该光学系统可实现较大的视场,但是像面位于光学系统内部,次镜对主镜、像面对三镜均存在较大的孔径遮拦^[17]。为了节省空间且便于定位和跟踪,消旋机构采用物理消旋,布置于相机和六自由度并联机构之间,连接相机和六自由度并联机构,如图1所示^[18]。消旋机构下层环形板与相机连接,上层环形板则与六自由度并联机构连接。采用分段式旋转轴承应对环境温度变化导致的环形板径向热胀冷缩。同时,选用了两套同心安装的曲线导轨,半径分别为620mm和770mm。两个环形导轨各由六个 60° 的圆弧导轨组成,当热效应产生应变时,相邻导轨间缝隙能有效降低应力的累积。载荷通过沿轴承环每 120° 间隔布置的导向块传递,这些导向块与六自

由度并联机构的载荷路径保持对齐，从而在消旋机构的两个环形板之间形成了最优的负载传递通道，如图2所示。

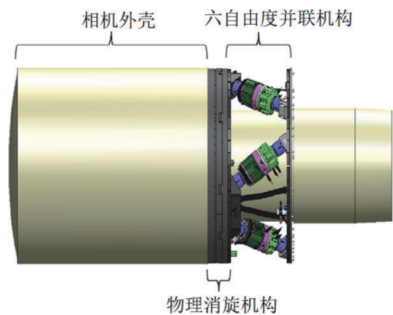


图1 LSST相机装配体

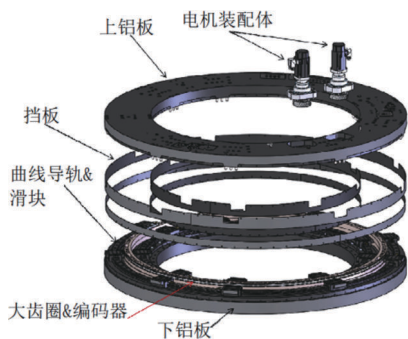


图2 LSST消旋机构爆炸图

消旋机构由两台直流无刷伺服电机驱动，采用偏置电流方案对双电机进行协同控制，消除传动间隙。电机内置高分辨率旋转编码器，结合安装于环形齿轮上的光学编码器，实现了闭环控制。电机配备断电自锁制动器以防止反向驱动，并集成温度传感器以实时检测热状态。动力由电机产生，首先经过减速比为110:1的谐波减速器，再经减速比为14.583:1的斜齿轮副，系统总减速比达到1604:1。齿轮副选用C86300 锰青铜合金，使其与铝制接口板热膨胀系数匹配。

1.2.2 Subaru 望远镜

Subaru 望远镜是日本 8.2m 光学和红外望远镜，自 1999 年开始于夏威夷运行^[19]。HSC（Hyper Suprime-Cam）相机的研制工作于 2008 年 11 月开展，该主焦点系统包含 7 块校正透镜和 CCD 拼接探测器，视场达 1.5°^[20]。消旋机构安装于透镜组顶部，如图 3 所示^[21]，采用直驱电机以满足轻量化和空间紧凑的要求。焦平面直径 527mm，单个像素尺寸 15μm，设定边缘运动精度为 1/5 像素（对应 2.35″）。该直驱电机单元运动分辨率可达 1″。轴承采用可同时承受等量级径向力和轴向力的 THK 高精度交叉滚子轴承，轴向偏差控制在 5μm 以内、径向偏差控制在 10μm 以内该消旋机构的旋转范围为 ±270°。

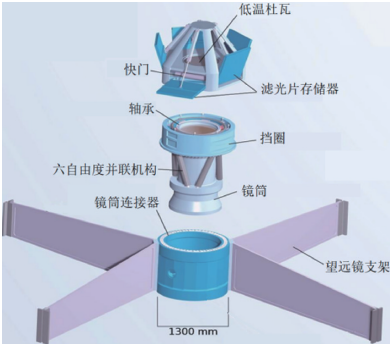


图3 HSC 相机

1.2.3 E-ELT 望远镜

E-ELT 望远镜（European Extremely Large Tele-scope）^[22]是欧洲南方天文台主持建造的 40m 级近红外/红外波段观测望远镜，具有两个预焦点，可搭载三台科学仪器，光学系统采用同轴三反反射镜+两个自适应反射镜，焦点的受力条件不随镜筒运动而变化，特别适宜安装大型精密仪器。结合 MICADO 仪器可实现 53″的大视场^[23]。

在曝光期间为保证成像质量，消旋机构初始设计参数为载荷 3000kg、轴向跳动小于 0.05mm、径向跳动小于 0.1mm、运动精度小于 10″、工作温度为 -10℃至 20℃。由于观测天区和望远镜特定的赤纬值，视场旋转方向会发生逆转，旋转速度会正负变化，因此传动方式采用双驱动单元实现消除，对置式布局（驱动单元相隔 180°），同时使用多读数头测量定位，采用六点支撑保证 MICADO 刚度。

双电机驱动以 180°对称布置。每个驱动单元包含了调整齿轮中心距的支架一套谐波减速器及一个输出小齿轮，如图 4 所示^[24]。轴系采用直径 2.5m 高精度带外齿轮四点接触球轴承，轴向/径向跳动小于 0.03mm。

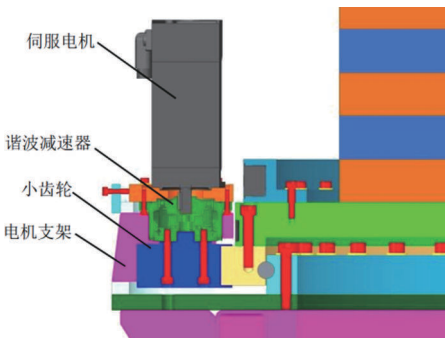


图4 ELT消旋机构传动系统简图

1.2.4 麦哲伦望远镜

麦哲伦望远镜（Magellan Telescope, MT）是由美国多所大学和机构联合建造的地基光学望远镜^[25]，包括两台口径均为 6.5m 的望远镜，包含两个耐式焦点，支持大视场成像和高分辨率光谱观测^[26]。消旋机构采用 K 镜，长度 60mm，K2 直径

12.7mm, K1和K3直径19mm, 紧凑的结构可以避免旋转时与其他光学元件相撞, 是目前地基大型光学望远镜中最小的K镜, 如图5所示^[27]。K镜由镜筒承载, K1和K3粘接于镜筒内的楔子, K2粘接于镜筒外的悬臂。楔子由殷瓦合金加工而成, 使得玻璃材料和楔块之间的热膨胀系数匹配, 每个楔形面的三个等边胶水通道便于反射镜安装。K2高度可通过添加垫片调整, 可通过添加小垫片和调整螺栓松紧K2角度调整, 如图6所示。经过实验测得指向精度在1'以内。



图5 麦哲伦望远镜K镜

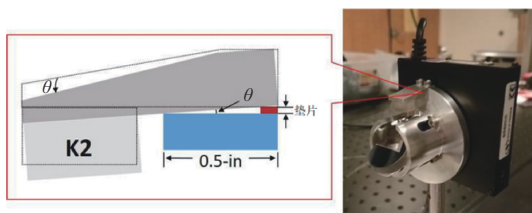


图6 K2调节示意图

1.2.5 DAG望远镜

DAG望远镜是一台位于土耳其东部的4m级光学/近红外望远镜, 光学设计为R-C系统, 视场可达30', 是土耳其境内最大的望远镜^[28,29]。采用K镜消旋系统, 通光口径580mm, 整体长度800mm, 光轴与K1/K3之间的夹角为24°, 如图7所示^[30]。消旋机构安装于俯仰轴叉臂的孔洞内, 该位置紧邻耐式焦点平台。用于封装K镜的外壳, 采用碳纤维保证刚度, 避免形变, 外壳在垂直方向上的最大变形量为13μm, 在水平方向上的最大变形量为2μm。K1、K2和K3采用微晶玻璃, 最大变形量依次为18、15、11nm。K1、K2和K3的支撑结构均采用铝、以减轻重量。驱动系统为直驱, 采用Newport公司提供的RV350HAHHLT型号旋转平台, 旋转范围±170°, 最小角分辨0.72", 定位精度为18"。

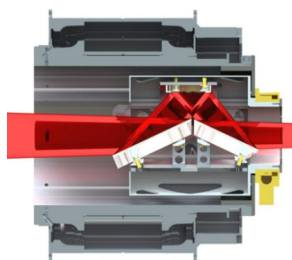


图7 消旋机构剖视图

1.2.6 LBT望远镜

LBT望远镜 (Large Binocular Telescope) 位于美国亚利桑那州格拉汉姆山国际天文台^[31], 由两台口径均为8.4m的望远镜并列安装在同一个机架上, 等效口径11.8m。采用R-C光路设计, 焦比F/1.14, 光线经主镜、凹面次镜、第三校镜后进入科学仪器^[32]。消旋机构采用K镜, 总重量达120kg, 以减少旋转和Linc-NIRVANA倾斜时产生的形变, 如图8所示^[33]。三镜(K1、K2、K3)支撑机构实现了1~2"的μm级倾斜调整, 同时配备抗形变基座, 以减少热力和机械应力对镜面反射质量的影响。M1、M2、M3镜座均配备调整螺钉, 每组螺钉结构相似, 三组螺钉呈120°对称分布, 通过拧紧调节/锁紧螺钉组合实现镜面姿态调整。上板与K镜框架采用螺栓连接、下板与基座固定连接, 两板通过螺栓连接。上板能调节倾斜角度, 通过调整两板之间的距离改变光路。每块镜子粘接在三个呈120°对称安装的垫片上, 垫片呈圆形, 与镜面三点接触, 垫片材料选用因瓦合金减小机械应力和重力对成像的影响。垫片通过两个螺栓杆与上板, 材料选择因瓦合金, 以补偿热变形。沿单一方向的调节在一定范围内具有良好的单向重复性, 但往返运动时, 促动器的迟滞效应和基座弹性可能导致位移为0。调校后整体精度在15"以内。

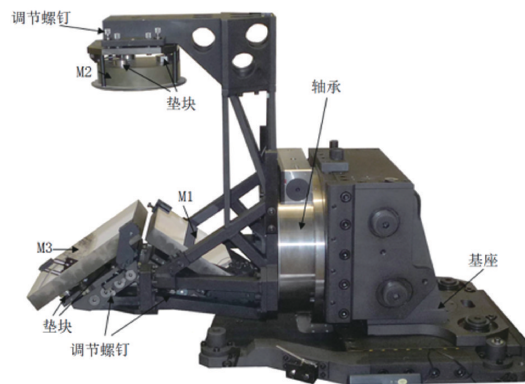


图8 LBT望远镜消旋机构

1.2.7 TMT望远镜

TMT望远镜 (Thirty Meter Telescope) 镜面直径30m, 观测波段在0.31~28μm, 由加州理工学院和美国加州大学带头研制。配有八个终端仪器, 均被安装于两个耐焦平台上^[34]。

经典的三镜式消旋机构称为K镜, 其主要缺陷在于存在显著仪器偏振效应, 导致偏振测量误差增大。TMT基于偏振光中镜面的穆勒矩阵变化理论, 提出了一种具有最小仪器偏振的五镜消旋机构, 如图9所示^[35]。其详细设计总结如下: 镜面

M1和M5具有相同的入射角 θ_1 和入射平面 Ψ_1 。镜面M2、M3和M4具有相同的入射角 30° 和相同的入射平面 Ψ_{234} 。此外，入射平面 Ψ_1 与 Ψ_{234} 相互垂直。这一设计使得仅需优化 θ_1 即可最小化五镜式消旋机构的仪器偏振。 θ_1 的优化结果表明，当 $\theta_1=36.3^\circ$ 时，五镜式消旋机构的仪器偏振小于 0.01% ，且该优化结果与波长无关。并且在偏振测量中，五镜消旋机构对于小视场望远镜具有更大优势。

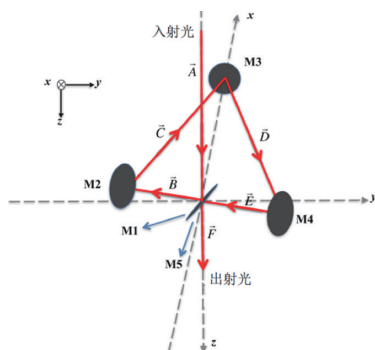


图9 TMT望远镜五镜消旋原理图

1.3 国内地基大型光学望远镜消旋机构

1.3.1 墨子巡天望远镜

墨子巡天望远镜（Wide Field Survey Telescope, WFST）是中国科学技术大学和紫金山天文台联合建造的一台大口径大视场巡天望远镜，该望远镜采用主焦点成像系统，主镜直径2.5m，视场角 3° ^[36]。消旋机构如图10所示^[37]，驱动系统采用单步进电机+谐波减速器+直齿传动。一级减速比为60，二级减速比9.5，步进电机步距角 0.9° ，16细分后消旋机构分辨率理论上可达到 $0.13''$ 。采用精密转台滚子轴承，内圈直径655mm，外圈直径790mm，径向跳动 $6\mu\text{m}$ ，轴向跳动 $7\mu\text{m}$ ，内外圈预压紧后游隙为 $-5\sim 0\mu\text{m}$ ，轴承内/外圈都采用过盈配合并通过螺栓固定连接，轴系晃动误差值 $1.9''$ 。测角系统采用Renishaw的RESA500，锥面安装，双读数头对称安装以消除读数头安装造成的偏心误差，综合测量精度 $0.95''$ 。经过实验验证，定位精度 $1.1''$ 。承载能力 $>250\text{kg}$ ，转速 $>20'/\text{s}$ 。

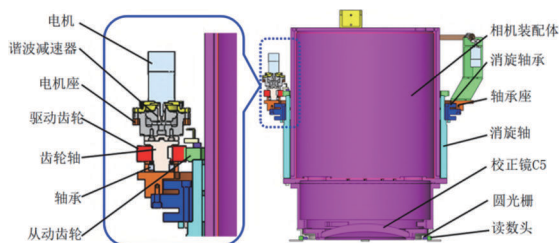


图10 WFST望远镜消旋机构组成

1.3.2 丽江2.4m望远镜

丽江2.4m光学天文望远镜是中国的通用型光学望远镜^[38]，位于云南省，光学结构为R-C系统，

主镜焦比 $F/2.5$ ，系统焦比 $F/8$ ，有效视场卡焦 $40'$ （改正后），耐焦 $10'^{[39]}$ 。消旋机构支架为圆环状，CCD相机位于圆环中心，传动大齿轮位于圆环外沿，驱动系统采用单步进电机+蜗轮蜗杆减速+齿轮传动，如图11所示^[40]。测角系统为金属圆光栅、分辨率 $0.09'$ 、位于圆环齿轮外圈，在运动行程的两端安置了限位开关进行限位保护。消旋机构的理论旋转范围设定为 $\pm 90^\circ$ ，该设备分辨率为 $14''$ ，轴向跳动 $20\mu\text{m}$ ，径向跳动 $12\mu\text{m}$ ，最大稳定运行速度为 $7^\circ/\text{s}$ 。



图11 丽江2.4m望远镜消旋调焦机构

1.3.3 南京天光所某4m级望远镜

南京天光所新其其格等针对某4m级地平式望远镜设计了一套K镜消旋机构。该K镜通光口径75mm，如图12所示^[41]。K2为一块厚20mm圆形反射镜，K1、K3选用三棱柱棱镜。反射镜材料选用微晶玻璃保证刚性，反射面镀有宽波段高效率金属介质膜保证反射效果。K2背部采用三点式柔性支撑，选取403不锈钢作为柔性构件，并以钢制材料为垫块连接到K2背部。柔性支撑与K2基底框架相连接，该柔性设计可对K2的姿态进行微调。组成K1和K3的三棱镜，采用钢制垫块连接到基板，优化垫块的厚度与倾斜角度实现光学元件的位姿校正。为实现消旋机构的旋转功能，基板和基底框架均固定到内镜筒，内外镜筒使用两端角接触球轴承连接，并由直驱电机控制内筒的旋转运动。外筒末端与望远镜支撑臂刚性连接，形成悬臂式支承构型。根据K镜消旋系统工作原理和光机结构找出不可调节误差，采用类粒子群优化算法优化误差源，得到了公差分配可收敛的结果。光机结构耦合分析表明指向精度为 $6.95''$ ，实验验证指向精度为 $14.24''$ 。

2 总结与分析

2.1 消旋机构参数分析对比

综合考虑国内外地基大型光学望远镜的基本情况，对其采用的消旋机构主要参数进行对比分析，即望远镜口径、光学焦点、消旋机构定位精度、轴向跳动、径向跳动，如表1所示。

消旋机构精度和轴承精度、测角精度和传动精

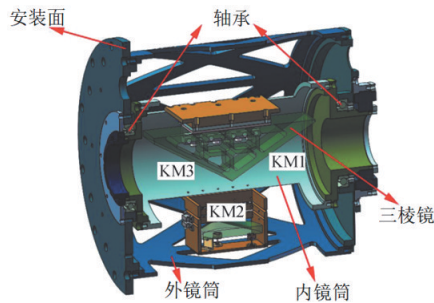


图 12 K 镜光机结构设计方案

表 1 消旋机构主要参数

望远镜	口径/m	光学焦点	定位精度/角秒	轴向跳动/ μm	径向跳动/ μm
LSST	8.4	主焦点	4.5	—	—
Subaru	8.2	主焦点	2.35	10	5
E-ELT	39.3	耐焦	5	30	30
DAG	4	耐焦	18	—	—
LBT	8.4	耐焦	15	7	8
MT	6.5	耐焦	6	—	—
丽江 2.4m 望远镜	2.4	卡焦	—	4	5
WFST	2.5	主焦点	1.1	6	7
南京天光所某 4m 望远镜	4	—	4	10	8

度相关。轴承不仅需要能够应对轴向力、径向力，还需要应对倾覆力矩，同时对轴承的轴向跳动、径向跳动有严格要求。LSST 的消旋机构还额外考虑了热变形对相机的影响，采用分段轴承，补偿热变形。测角系统常采用圆光栅，锥面安装减少偏心误差，安装时使用力矩扳手控制预紧力避免局部变形，同时也可采用多读数头提高测角精度。

K 镜传动方式常采用电机直驱，其后方能够搭载不同光学仪器，入射光轴、机械回转轴与出射光轴需三轴重合以保证良好的消旋状态，就要求 K 镜刚度能抵抗重力变形，如 DAG 望远镜的 K 镜外壳采用碳纤维减重并保证刚度。LBT 望远镜的 K 镜重 120kg，为保证旋转精度和 K 镜能抵抗应力变形的能力，反射镜采用微晶玻璃，且每块反射镜有一定的可调节范围以调节光轴方向。

2.2 消旋方式选择

消旋方式的选择主要由望远镜的光学系统决

表 3 消旋驱动系统

望远镜	驱动方式	成本	传动精度	控制难度
Subaru、DAG、LBT、MT、南京天光所 4m 望远镜	电机直驱	较高	较高	简单
SEIMEI、丽江 2.4m 望远镜、WFST	单电机+减速机构+齿轮传动	一般	一般	简单
LSST、E-ELT、	双电机+谐波减速器+齿轮传动	较高	较高	较难

消旋机构的绝对定位精度受驱动分辨率、传动系统精度、角位置测量精度和旋转轴系精度的

定，大口径大视场巡天望远镜光学系统常采用三镜反射和主焦点，以上光学系统能具有较大视场但相机置于光路中，不可避免的存在视场遮拦且后截距有限，采用光学消旋会遮挡视场，故采用结构紧凑的物理消旋。光学系统为 R-C 的通用型望远镜，能通过反射镜引导出光路，故布置空间充足，常采用光学消旋，且同一套光学消旋机构能够满足不同探测终端^[42]。

表 2 消旋方式选择

消旋方式	望远镜	光学系统
物理消旋	LSST	三镜反射
	Subaru、WFST	主焦点
	E-ELT	五镜反射
光学消旋	DAG、LBT、MT、TMT、丽江 2.4m 望远镜	R-C

2.3 消旋驱动系统

消旋系统需具有高精度低速跟踪和高速切换性能。驱动链需在消旋系统待机时完全静止，否则会因轴系晃动和径向窜动影响成像质量。目前，消旋机构上采用的驱动系统主要有电机直驱、单电机+减速机构+齿轮传动和双电机+谐波减速器+齿轮传动 3 种方式。其中，电机直驱模式采用交流/直流电机直接驱动消旋机构，配合高精度编码器进行角度反馈，省略了中间传动机构，没有间隙，调试方便，但是需保证电机散热平衡，且成本相对较高。单电机+减速机构+齿轮传动系统采用步进电机驱动齿轮机构带动消旋机构进行控制，该方式的优点具有成本便宜、技术成熟，缺点是低速跟踪及反向运动时齿轮间隙会降低精度，另外步进电机长时间工作发热会比较严重，如日本 3.8m SEIMEI 望远镜的物理消旋装置^[43]，利用圆弧导轨安装在耐焦上，采用了普通的单电机加齿轮传动，利用电机端编码器作为位置反馈，这套系统造价低廉，达到了终端仪器所需的指标要求。双电机+减速箱+齿轮消隙机构能解决齿轮间隙的问题，提高低速和反向运动时精度，同时双电机驱动可以提高运行速度、降低发热比，但控制策略较为复杂，且双电机和双谐波减速器和双电机尾端高精度编码器都相比于单电机驱动方式增加了成本。

综合影响。在角位置测量位于电机端时，传动间隙对消旋转轴定位精度有较大影响；在角位置测

量位于消旋转轴端时,传动间隙可以被补偿,对消旋转轴定位精度影响较小。驱动系统的选择和布置应充分考虑实际情况。

2.4 消旋机构设计原则

光学消旋和物理消旋除了需要满足望远镜的轴系晃动和定位精度外,根据各自的结构特点,其余相应的设计原则列举如下。

2.4.1 光学消旋机构设计原则

(1) 保证入射光轴、旋转轴、出射光轴三轴同心。(2) K 镜镜面反射率和平整度得足够高。(3) 反射镜镜子和垫块采用合适的材料降低热膨胀率且热膨胀系数得匹配,避免应力产生。(4) 结构设计要便于后续调校,避免引入额外的自由度。(5) 具备较大的刚度能抵抗旋转时的变形。

2.4.2 物理消旋机构设计原则

(1) 结构必须紧凑,内径、外径和高度都受到严苛的尺寸约束。(2) 由于连接相机和其他系统,需具备一定的承载能力。(3) 电机产生的热量会传导至相机端,需设计合理的结构避免应力传导。

3 结论及展望

设计消旋机构,首先需要根据光学系统选择合适的消旋方式。主焦点式巡天望远镜存在孔径遮拦,常采用物理消旋;R-C 式通用型望远镜空间尺寸足够,常采用光学式消旋。其次根据终端仪器的尺寸,保证精度达到视场边缘像素尺寸的 1/10,主要由驱动分辨率、传动方式、轴系精度及角位置传感器精度决定。随着地基望远镜的口径不断增大,终端设备的尺寸也越来越大。目前 4m 级以上望远镜几乎不采用单电机+减速机构+齿轮传动的方式,4m 级望远镜以上更多采用电机直驱或双电机+谐波减速器+齿轮传动,4m 及以下的望远镜在精度允许的条件下,选择单电机+减速机构+齿轮传动更具性价比。轴承常采用四点接触轴承、圆柱滚子轴承,以提供足够的精度与刚性。圆光栅大部分情况下采用雷尼绍公司的绝对式圆光栅。最后材料的合理选择能较好的应对热变形。光学消旋在设计之初就因考虑后续装调的方便性,装调方式常采用垫片或者螺母丝杠。

随着望远镜运用目的不同,望远镜的光学系统会更丰富,消旋机构的结构将会更加丰富,装调方式要求方便可靠,精度和刚度等要求也越来越高。设计符合发展需求的消旋机构仍具有很大挑战,希望能为我国大口径望远镜消旋机构的设计提供一点参考。

参考文献:

- [1] 王富国,卢保伟,杨飞.大型光学望远镜次镜调整机构综述[J].光学技术,2023,49(02):129—137.
Wang Fuguo, Lu Baowei, Yang Fei. Review on the adjustment mechanism of the secondary mirror of large optical telescope[J]. Optical Technique, 2023, 49(02):129—137.
- [2] Kim D, Choi H, Brendel T, et al. Advances in optical engineering for future telescopes[J]. Opto-Electron, 2021, 4(6): 1—24.
- [3] Bely P Y. The design and construction of large optical telescopes [M]. New York, NY: Springer New York, 2003.
- [4] Ramsay S, Ciraolo M, Amico P, et al. Instrumentation for ESO's extremely large telescope[J]. The Messenger, 2021, 182:3—6.
- [5] Fanson J, McCarthy P J, Bernstein R, et al. Overview and status of the Giant Magellan Telescope project [C]//Ground-based and Air-borne Telescope. New York, USA: SPIE, 2018: 295—314.
- [6] 孟庆宇.三镜反射式光学系统综述(特邀)[J].红外与激光工程, 2022, 51(01):282—297.
Meng Qingyu. Overview of three-mirror reflective optical system (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(01): 282—297.
- [7] Cheng Jingquan. The principles of astronomical telescope design[M]. New York:Springer, 2009:141—151.
- [8] Warner M, McMullin J, Rimmer T, et al. The advanced technology solar telescope (ATST) project: a construction update[C]// Physics and Space Weather Instrumentation. Edinburgh, Scotland: SPIE. 2013, 8862:94—109
- [9] Liu Z, Xu J, Gu BZ, et al. New vacuum solar telescope and observations with high resolution[J]. Astronomy and Astrophysics, 2014, 14(6):705.
- [10] Tao Shengxiang, Ma Wei, Qian Lizhi. Rotation-canceling real time system of color video image[C]//High-Speed Photography and Photonics. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2007:1394—1399
- [11] 夏培培.基于系统辨识的望远镜消旋 K 镜转台自抗扰控制技术[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018:23—40.
Xia PeiPei. Research on telescope's derotation K mirror turntable active disturbance rejection control technology based on system identification[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2018: 23—40.
- [12] 张海波.基于地平式望远镜的图像消旋控制研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012:13—14.
Zhang Haibo. Study of eliminating image rotation control based on altitude-azimuth telescope[D]. Chang Chun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, 2012:13—14
- [13] 鞠青华,李语强,熊耀恒.1.2m 地平式望远镜视场旋转角的理论计算[J].天文研究与技术, 2009, 6(1):28—36.
Ju Qinghua, Li Yuqiang, Xiong Yaoheng. Theoretical calculation of the field-of-view rotation angles for the 1.2m altazimuth telescope in the yunnan observatory[J]. Astronomical Research & Technology, 2009, 6(1):28—35.
- [14] 李玉霞,王帅,王建立,等.地平主焦点式大市场望远镜的双电机消旋系统[J].光学精密工程, 2021, 29(04):749—762.
Li Yuxia, Wang Shuai, Wang Jianli, et al. Dual-motor de-rotator system of prime focus alt-azimuth telescope with large field of view

- [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(04):749—762.
- [15] 连铜淑. 反射棱镜共轭理论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1988:88—90.
- Lian Tongshu. Theory of conjugation for reflecting prisms[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988:88—90.
- [16] Matthias R Kroedel, J Brian Langton. Lsst camera grid structure made of ceramic composite material HB-Cesic[C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, Network, USA: SPIE, 2016:1729—1736.
- [17] Douglas Neill, George Angeli, Chuck Claver. et al. Overview of the LSST active optics system[C]//Modeling, Syetems Engineering, and Project Management for Astronomy, Network, USA:SPIE, 2014:143—158.
- [18] Ryan Sneed, Douglas Neill, Scott Kidney. et al. Final design of the LSST hexapod sand rotator[C]//Ground-based and Airborne Telescope, Network, USA: SPIE, 2016:190—201.
- [19] Takashi Hattori, Yosuke Minowa, Hirofumi Okita, et al. Instrumentation at the Subaru Telescope[C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VIII. Network, USA: SPIE, 2020:23—32.
- [20] Yosuke Minowa, Naruhisa Takato, Ikuru Iwata, et al. An overview of current and future instrumentation at the subaru telescope[C]// Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2016:29—39.
- [21] Yoshiyuki Doi, Hidehiko Nakaya, Yukiko Kamata, et al. Hyper-suprime: mechanics[C]//Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy. Orlando, USA: SPIE, 2006:1112—1119.
- [22] Roberto Gilmozzi, Jason Spyromilio. The European Extrem Large Telescope (E-ELT)[J]. The Messenger, 2007, 127(11):3—10.
- [23] Cayrel, Garching. E-ELT optomechanics: overview[C]//Ground-Based and Airborne Telescopes IV. Amsteradm, Netherlands: SPIE, 2012, 8444:674—691.
- [24] Santiago Barboza, Jorg-Uwe Pott, Ralf Rainer Rohloff. The MICADO first light imager for ELT: derotator design status and prototype results[C]// Ground-Based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII. Austin, USA: SPIE, 2018, 10702: 2745—2760.
- [25] Laird M Close, Jared R Males, Olivier Durney, et al. Optical and mechanical design of the extreme AO coronagraphic instrument MagAO-X[C]//Adaptive Optics systems VI. Austin, USA. SPIE, 2018, 10703:1227—1236.
- [26] Kyle Van Gorkom, Jared R Males, Laird M Close, et al. Characterizing deformable mirrors for the MagAO-X instrument[J]. Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2021, 7(3): 039001—039001.
- [27] Alexander D Hedglen, Laird M Close, Jared R Males. Optical field/pupil rotator with a novel compact k-mirror for MagAO-X [C]//Adaptive Optics Systems VI. Austin, USA: SPIE, 2018, 10703:2018
- [28] Laurent Jollissaint, Onur Keskin, Lorenzo Zago. The design of an adaptive optics telescope: the case of DAG[C]//Ground-Based and Airborne Telescope VI. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2016, 9906: 1270—1282.
- [29] Jeremie Baudet, Laurent Jollissaint, Onur Keskin, et al. Design of a derotator for the 4m DAG telescope[C]//Ground-Based and Airborne Telescope VI. Edinburgh, Scotland: SPIE, 2016, 9908: 1648—1653.
- [30] Ali Cem, Sarajlic, Mirsad, et al. In flange derotator design for the 4m DAG telescope[C]//Ground-Based and Airborne Telescope VII. Austin, USA: SPIE, 2018, 10700:1243—1251.
- [31] Hill J M. The large binocular telescope[J]. Applied Optics, 2010, 49(16), 115—122.
- [32] Wagner RM. An overview of instrumentation for the large binocular telescope[C]//Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, Edinburgh, Scotland: SPIE, 2010, 7735:104—116.
- [33] Brunelli A, M Bergomi, M Dima, J. et al. Tips and tricks for aligning an image derotator. [C]//In Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy Orlando, FL: SPIE, 2018, 8446: 1538—1547.
- [34] Sugimoto, Masahiro, Yutaka Ezaki, et al. Design and status overview of TMT telescope structure[C]//Ground-based and Airborne Telescopes Austin USA: SPIE, 2024.13094:104—124.
- [35] Junfeng Hou, Ming Liang, Dongguang Wang, et al. Design and analysis of a five-mirror derotator with minimal instrumental polarization in astronomical telescopes[J] Optics Express, 2018, 15:19356—19370.
- [36] Lou Zheng, Liang Ming, Yao Dazhi. Optical design study of the wide Field Survey Telescope(WFST) [C]//Advanced Optical Design and Manufacturing Technologies. Beijing, China: SPIE, 2016, 10154:587—596.
- [37] 芮道满, 张程, 李文茹. 大型高精度消像旋转机构的设计与验证[J]. 光学精密工程, 2024, 32(12):1849—1856.
- Rui Daoman, Zhang Chengs, Li Wenru. Design and verification of large high precision derotator[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(12):1849—1856..
- [38] 何鑫, 姜翔, 顾伯忠, 等. 丽江2.4m望远镜耐焦卡焦切换系统的设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(05):374—382..
- He Xin, Jiang Xiang, Gu Bozhong, et al. Design and analysis of Lijiang 2.4-meter telescope Nasmyth focus and Cassgrain focus switching system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(05):374—382.
- [39] 王传军. 丽江2.4米望远镜观测控制系统关键技术研究[D]. 云南:中国科学院云南天文台, 2019:15—16
- Wang Chuanjun. Study on key technologies of observatory control system for lijiang 2.4-meter telescope[D]. Yun Nan: Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, 2019:15—16
- [40] 王岱, 李晓燕, 吴钦章, 等. 某光测设备上消像旋的设计[J]. 光电工程, 2012, 39(1):108—112.
- Wang Dai, Li Xiaoyan, Wu Qinzhong, et al. Design of elimination image rotation on opto-electronic imaging tracking and measuring device[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1):108—112.
- [41] 新其其格, 陈忆, 季杭馨, 等. K镜光机结构优化设计与智能误差分配[J]. 光子学报, 2022, 51(3):0322002-0322002.
- Xing Qiqige, Chen Yi, Ji Hangxin, et al. Opto-mechanical structure design and intelligent error allocation of K-mirror derotator[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(3):0322002—0322002.
- [42] 阮萍. 一种消像旋转机构的设计与精度分析[J]. 光子学报, 2000, 29(2):190—192.
- Ruan Ping. Design of image-rotation eliminated structure and accuracy analysis[J]. Acta Photonica Sinica, 2000, 29(2):190—192.
- [43] Kurita, Mikio, Masaru Kino, et al. The seimei telescope project and technical developments[J]. Astronomical Society of Japan, 2022, 7(3):48.