

大型望远镜轴系支撑结构的发展现状与分析

王 槐, 代 霜

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 针对作为地基大口径光学望远镜核心技术之一的轴系支撑结构, 从俯仰轴系和方位轴系两个方面, 阐述了其发展现状, 比较了常用轴承的形式, 重点分析了典型轴系支撑结构。最后, 总结了国内大型望远镜轴系支撑结构的研究现状和发展趋势。

关键词: 地平式望远镜; 跟踪架; 轴系支撑; 轴承

中图分类号: TH751

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI 20112803.0017

Development Actuality and Analysis of Large Alt-azimuth Telescope Shafting Supporting Structure

WANG Huai, DAI Shuang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the shafting supporting structure, which is one of the key technologies of the ground based large electro optical telescope, its development actuality on the altitude shafting and the azimuth shafting was represented. The common bearings performances were compared and the typical shafting schemes were emphatically analyzed. The home research progress and development direction of the large mount shafting supporting structure were summarized.

Keywords: alt-azimuth telescope; mount; shafting supporting; bearing

1 引言

大型光电望远镜作为光电探测的典型设备,在世界各国的军事、天文等研究领域发挥着极其重要的作用。随着1992年和1998年美国两台KECK望远镜的先后成功运行,世界大型光电望远镜的发展已进入了10 m时代,目前正在服役的5~10 m口径光电望远镜有十余台。但同时,针对4 m级以下口径光电望远镜的研究仍然十分活跃,这是由于:(1)4 m级口径的望远镜可以满足大多数针对时变现象的长周期气象和天文研究,并已经开始采用自适应光学、主动光学等先进技术,还能为与之相配套的各种探测仪器提供快速而廉价的实验平台;(2)2 m级口径的望远镜可以满足一般观测,在价格和建造时间上也占有很大优势,并具有轻便及可移动等特点,可用于辅助大型望远镜的工作,典型的例子是在智利Cerro Paranal观测站4台8.2 m VLT望远镜旁的4台1.8 m辅助望远镜,如图1(a)所示;(3)在建造4 m级口径的大型望远镜前,研究人员通常先建造一个口径在1~2 m的缩比模型望远镜,能够快速地对一些即将应用在大型望远镜上的光学和电子设备、轴系结构、驱动和支撑方案以及测量方法等进行初步验证。例如,3.7 m AEOS望远镜的制造商L3 Communications Brushear公司就通过在先期制造的1 m、1.5 m口径望远镜上对直流力矩电机、感应同步式编码器、柔性控制系统、低轨卫星成像系统等进行了大量实验,如图1(b)、(c)、(d)所示。

通过对相关资料分析可以看出,国外特别是美国,由于开始研究较早,资金投入大,技术实力雄厚,拥有L3 Communications Brushear, Vertex RSI, General Dynamics SATCOM Technologies等多家世界著名的大型望远镜研制厂商,具备设计、加工、装调、检测和运输等一系列技术和相关经验,已成功建造的和正在建造的4 m级望远镜占总数的一半以上,能够在天文、军事等多领域实现对空间目标的追踪、观测、激光通讯等各种探测目的,拥有极强



图1 (a) 8.2 m VLT 望远镜旁的 1.8 m 辅助望远镜; L3 Communications Brushear 公司的 1 m (b)、1.5 m (c) 和 3.7 m (d) 望远镜。

的战略、科研优势。其中3.5 m SOR星火靶场望远镜和3.7 m AEOS先进光电系统望远镜是美国重要的军用光电探测设备,如图2所示,它们也代表了世界上最先进的军用光电望远镜设计制造水平,其余望远镜属于天文观测设备。

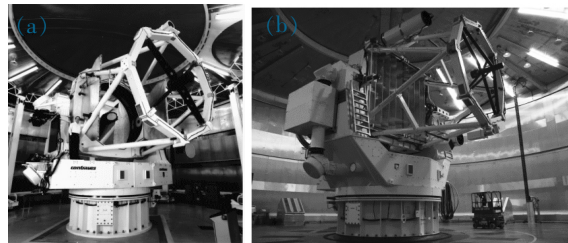


图2 (a)美国3.5 m SOR星火靶场望远镜; (b)3.7 m AEOS 先进光电系统望远镜。

跟踪架是承载望远镜系统光电测量设备的机电一体化平台。从90年代开始设计的4 m级光电望远镜跟踪架都已经放弃了传统的极轴式结构,而改用地平式结构,它包含绕水平线旋转的俯仰运动和绕垂直线旋转的方位运动,即俯仰-方位轴系(Altitude-azimuth shafting),又称为水平-垂直轴系,如图3所示(图中为美国3.7 m AEOS军用望远镜)。这种结

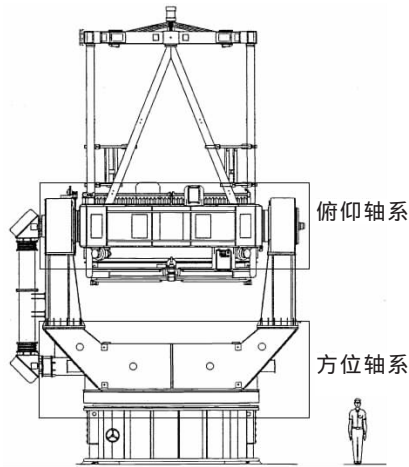


图3 地平式跟踪架的俯仰（水平）和方位（垂直）两大轴系

构具有结构简洁、体积小、造价低、圆顶小而轻、随动系统简单、位置稳定性好、可为多个光学测量设备提供接口和承载平台等诸多优点^[1-5]。

2 大型地平式望远镜轴系支撑方案的发展现状

通过广泛搜集整理资料，总结了国外 2~4 m 口径地平式望远镜的典型轴系支撑方案^[6-28]，如表 1 所示。

虽然具体结构存在着各种差异，但这些轴系主要分为由滚动轴承构成的滚动轴系和由液体静压轴承构成的液压轴系两大类。我国轴承相关标准^[29]中指出，当轴承的公称直径超过 200 mm 时称为大型轴

表1 国外2~4 m口径地平式望远镜典型方位轴系方案

望远镜	俯仰轴系支撑方案	方位轴系支撑方案
1.8 m VLT/AT	成对安装的角接触球轴承	3列滚子轴承
2.0 m Liverpool	液体静压轴承	液体静压轴承
2.5 m SDSS	调心滚子轴承	上端为惰轮滚子，下端为推力调心滚子轴承
3.5 m APO	调心滚子轴承	上端为惰轮滚子，下端为推力调心滚子轴承
3.5 m NTT	成对安装的角接触球轴承	轴向为液体静压轴承，径向为角接触球轴承
3.5 m SOR	密封圈滚子轴承	双列滴油润滑球轴承
3.5 m TNG	成对安装的角接触球轴承	液体静压轴承
3.5 m WIYN	调心滚子轴承	上端为惰轮滚子，下端为推力调心滚子轴承
4.1 m VISTA	不详	液体静压轴承
4.1 m SOAR	成对安装的圆锥滚子轴承	带有径向密珠轴承的大接触角推力球轴承一体化设计
4.2 m DCT	成对安装的圆锥滚子轴承	带有径向密珠轴承的大接触角推力球轴承一体化设计
4.2 m WHT	液体静压轴承	液体静压轴承

承，超过 440 mm 时称为特大型轴承；而且由于轴承行业与通用机械在设计、加工和检测等多方面存在差异，因此，国外大型望远镜的制造方大都向专业的轴承制造公司，针对光学仪器的特点定制特大型轴承，如美国 Rotek 轴承制造公司就先后承担了 4.1 m SOAR 望远镜和 4.2 m DCT 望远镜方位轴承的研制工作。而俯仰轴系的轴承由于尺寸和承载相对较小，因此，许多望远镜选择了高精度成对安装的角接触球轴承、圆锥滚子轴承、调心滚子轴承等构成轴系，利于降低成本，缩短研制周期。

3 轴系常用轴承形式

3.1 俯仰轴系常用轴承

俯仰轴系位于跟踪架的上部，用于支撑主镜室并与转台相连，同时为跟踪架提供俯仰回转轴线，实现俯仰角度测量、跟踪驱动以及角速度、角加速度的测量和反馈等功能。在承载数吨乃至数十吨主镜室部件重量的同时，还要求其具有极高的回转精度和稳定性，从而保证主镜室光学部件回转运动的平稳、精确、高重复性以及超低速运行等工作特性。

3.1.1 角接触球轴承

角接触球轴承的结构如图4所示,由于钢球和轴承内外环接触点的连线与轴承的径向平面成一定角度(即接触角 α),其延长线与轴承的回转轴交于一点(即载荷作用点),因此它能承受径向和单一方向的轴向载荷。主要承担径向载荷的角接触球轴承其接触角在 $15^\circ\sim 40^\circ$ 范围内。随着接触角的进一步增大,其轴向承载能力逐渐增强,主要承担轴向载荷的角接触球轴承其接触角在 $50^\circ\sim 60^\circ$ 范围内。一般成对使用,通过施加预紧力提高回转精度和回转刚度。

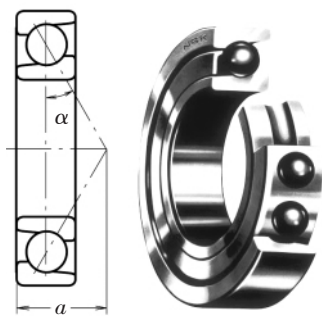


图4 角接触球轴承结构示意图和实物

3.1.2 圆锥滚子轴承

圆锥滚子轴承的结构如图5所示,其接触原理与角接触球轴承相似,不同之处在于由于滚动体为带有锥度的滚子,接触方式由点接触变为线接触,承载能力大大增强,同时摩擦阻力也随之增加,也能承受径向和单一方向的轴向载荷。一般成对使用,通过施加预紧力提高回转精度和回转刚度。

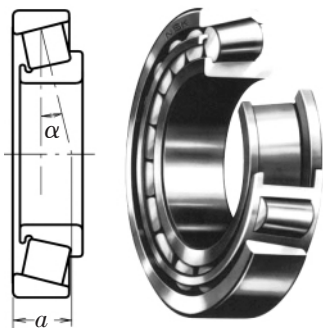


图5 圆锥滚子轴承结构示意图和实物

3.1.3 调心滚子轴承

调心滚子轴承的结构如图6所示,它有两列球面滚子作为滚动体,轴承外圈有一共用的球面滚道,其曲率中心与轴承中心一致,内圈有两个滚道,与轴承的径向平面构成一定角度,因此它能够承担较大的径向载荷和一定的双向轴向载荷。其最大的优点是能够允许回转轴与机架之间的同轴度误差,如图6中的 θ 角,在轴或机架出现挠曲变形时,可以自动调整,不增加轴承负担。

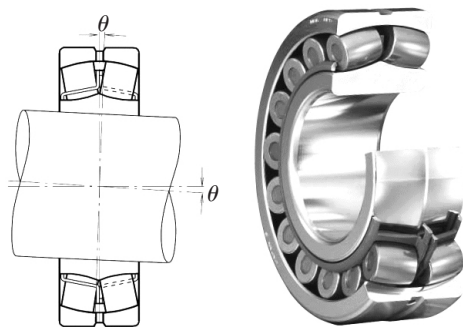


图6 调心滚子轴承结构示意图和实物

3.1.4 径向液体静压轴承

径向液体静压轴承的结构形式如图7所示。它由外部油泵产生的具有一定压力的油膜将轴承的配合表面分开,两者间的磨损几乎为零,滑动摩擦很低,因此很适合低速的工作条件。但包括对油泵、油路以及循环过滤等装置在内的初始研究费用和维护费用较高,而且液压油性能受温度影响很大,必须严格控制工作环境和轴承本身的温度变化,因此适用于转速较低的大型天文望远镜俯仰轴系。

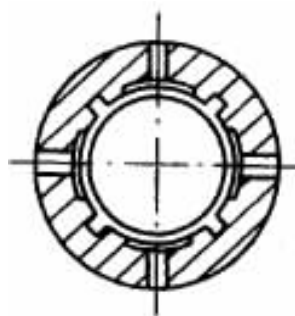


图7 多垫式(带排油槽)径向液压轴承

3.2 方位轴系常用轴承

方位轴系位于跟踪架的下部,用于支撑整个系统并与基座相连接,同时为跟踪架提供方位回转轴线,实现方位角度测量、跟踪驱动以及角速度、角加速度的测量和反馈等功能。在承载数十吨乃至近百吨回转部件重量的同时,还要求其具有极高的回转精度和稳定性,从而满足跟踪架平稳、精确、高重复性以及超低速运行等工作特性,为整个望远镜的高性能工作提供有力保证。

3.2.1 三列滚子轴承、双列球轴承、四点接触球轴承(均属于转台轴承)

如图8(a)、(b)、(c)所示,这类轴承可同时承担径向、轴向和力矩载荷,价格较低,摩擦较大,为增加刚度需要施加预紧力,但这将导致滚动体的滑动,进一步增大摩擦。轴承的内外环不安装在轴外或轴承座内,而是以螺栓对应直接安装到设备的转动和固定部分,驱动方式包括通过齿轮间接驱动内圈或外圈,或者通过力矩电机直接驱动等,这类轴承多应用在雷达天线座制造领域。

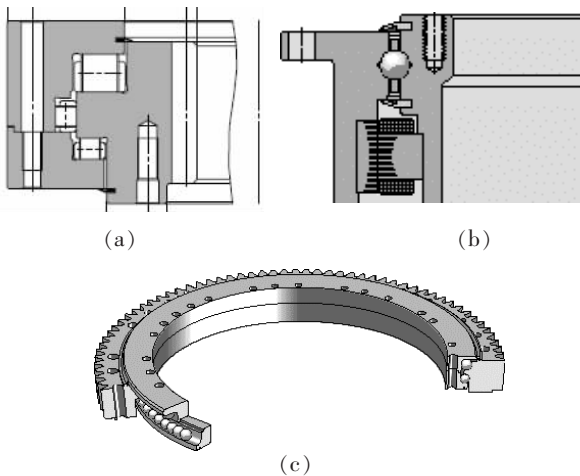


图8 常见转台轴承:(a)三列滚子轴承;(b)四点接触球轴承;(c)双列球轴承。

3.2.2 径向密珠轴承和大接触角推力球轴承一体化设计

美国4.1 m的SOAR、4.2 m DCT望远镜的方位轴承采用了这种形式,径向密珠轴承起定心作用和抵抗小范围内的径向扰动,大接触角推力球轴承主要承担轴向载荷。这种一体化轴承结构简单,并具

有大轴向承载、高回转精度以及低摩擦等诸多优点,但同时由于两种轴承之间的形位误差存在相互影响,因此对设计、加工和检测的水平要求很高。

3.2.3 径向密珠(或滚柱)轴承结合平面止推密珠轴承

国内1 m级口径的光电经纬仪上采用这类轴承,如图9所示。除了具备球轴承低摩擦、高回转精度的优点外,与其所配合的承载端面都是平面或圆柱面,相应的设计、加工和检测技术已很成熟。

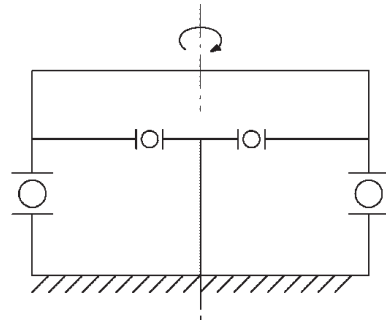


图9 径向密珠轴承结合平面止推密珠轴承

但依据Hertz理论,单一钢球在同样的轴向载荷作用下,由于钢球面与平面滚道的接触面积远小于钢球面与弧面滚道的接触面积,因此平面滚道上钢球的接触应力远大于弧面滚道上的对应值。随着望远镜口径和载荷的增大,为保证有足够的静承载能力,平面止推密珠轴承的钢球数量要远多于以大接触角推力球轴承为代表的弧面滚道轴承(一般为6~10倍,具体与后者的沟道曲率半径系数有关),同时保持架和轴承环的加工和检测难度也大大增加。

3.2.4 轴向液体静压轴承

轴向液体静压轴承的结构形式如图10所示。其

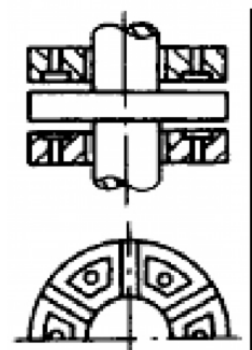


图10 双向多垫式(带排油槽)轴向液压轴承

工作原理与径向液体静压轴承相似, 同样也适用于转速较低的大型天文望远镜的方位轴系。在1979年建造的美国6.5 m MMT望远镜(首次在方位轴系采用滚动轴承)之前, 所有大型望远镜的方位轴系均采用液体静压轴承。

通过以上对比可以看出, 2~4 m口径光电望远镜俯仰和方位轴系所采用的轴承类型主要分为滚动轴承和液压轴承两种, 和液压轴承相比, 滚动轴承没有精密而复杂的供油系统, 运行和维护费用较低, 而且具有较宽的温度适应范围, 能够满足2~4 m口径光电望远镜方位轴系大承载、高精度、低摩擦等要求。因此, 随着机械设计、加工能力和检测水平的提高, 较新研制的大型光电望远镜, 特别是具有大跟踪速度和宽温度适用范围的军用望远镜轴系均采用了滚动轴系方案。

4 典型轴系支撑结构方案

由于国外对大型光电望远镜的研制工作开展较早, 现有可查阅文献中对方位轴系的介绍主要是针对4 m级光电望远镜轴系支撑方案, 因此, 以下内容主要针对4 m级。

4.1 俯仰轴系支撑结构方案

4.1.1 成对安装的角接触球轴承方案

应用在1.8 m VLTIAI、3.5 m NTT、3.5 m TNG望远镜上, 如图11所示。这种由4个角接触球轴承分两组成对安装的结构能够同时承受轴向和径向载荷, 通过轴上的防松双螺母结构施加轴向预紧力, 在减小径向间隙的同时提高回转刚度。

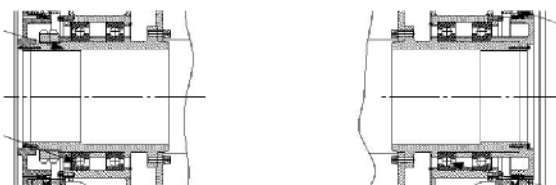


图11 成对安装的角接触球轴承方案

4.1.2 调心滚子轴承方案

应用在2.5 m SDSS、3.5 m APO和3.5 m WYIN望远镜上, 如图12所示。不同于以往经纬仪常见的

俯仰轴系由四通伸出悬臂轴头结构, 它是由立柱伸出悬臂轴头, 轴承内环安装在其上, 而轴承外环安装在四通的內孔中, 此时镜筒的回转轴线仅由两端的调心滚子轴承决定。考虑到由于镜筒自重将引起回转轴倾斜, 进而产生轻微的黏滑, 最终导致摩擦阻力增大和轴承噪声产生。因此通过预估倾斜量, 将轴设计为略向上倾斜形式, 当加载后由于镜筒自重产生的变形刚好抵消, 保证实际回转轴线的正确位置。

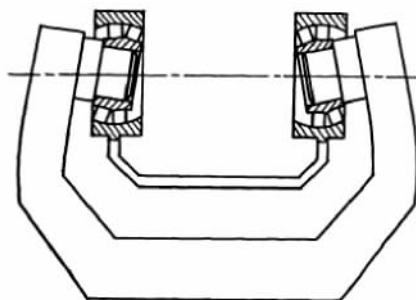


图12 调心滚子轴承方案

4.1.3 成对安装的圆锥滚子轴承方案

应用在4.2 m DCT望远镜上, 如图13所示。它采用4个圆锥滚子轴承分两组成对安装, 能同时承担径向和轴向载荷以及力矩载荷, 通过轴上施加轴向预紧力, 在减少径向间隙的同时提高回转刚度。

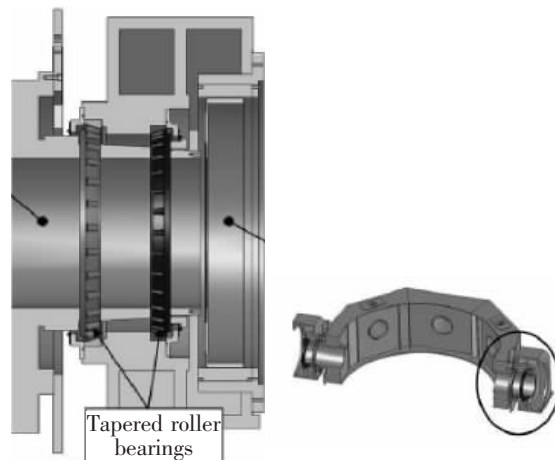


图13 成对安装的圆锥滚子轴承方案

4.2 方位轴系支撑结构方案

4.2.1 惰轮滚子结合推力调心滚子轴承方案

应用在2.5 m SDSS、3.5 m APO和3.5 m TNG

望远镜上,分别如图14(a)、(b)、(c)图所示。以3.5 m APO望远镜为例,由于钢结构的望远镜和混凝土基墩的膨胀系数不同,如果直接通过滚动轴承相连则会由于实际工作的温差产生较大的瞄准误差,因此在倒圆锥形的方位轴上端设计有一个与望远镜膨胀系数十分接近的环状钢架结构,如图15(a)所示,它通过4个周向固定而径向可自由调整的托架结构与混凝土基墩相连,这种结构可以减小由于基墩的

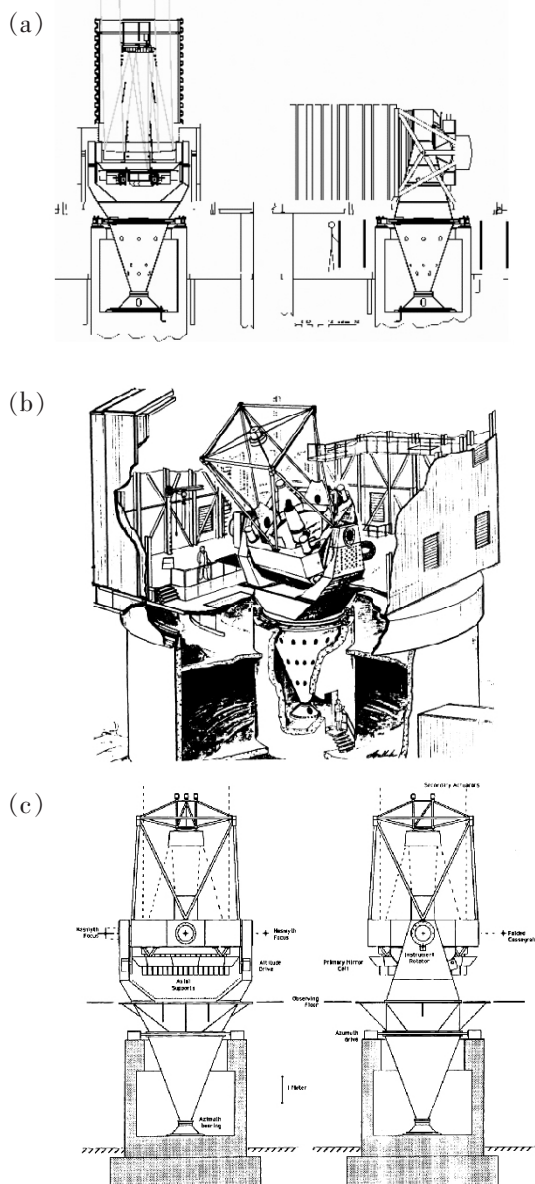


图14 采用惰轮滚子结合推力调心滚子轴承方案:(a)2.5 m SDSS望远镜;(b)3.5m APO望远镜;(c)3.5 m WIYN望远镜。

膨胀或收缩对方位轴上端水平位置的影响。

在环状钢架内部分别对称分布的摩擦轮驱动单元A和C,以及辅助平衡的惰轮B和D构成了方位轴上端的支撑结构,承担方位轴的径向载荷并保证其回转精度。而在方位轴下端采用了推力调心滚子轴承,如图15(b)所示,其轴承内环与方位锥体装配在一起,承担方位轴的轴向载荷,同时这种轴承还具备调心作用,能在一定程度上减少由于轴承内环和转轴装调产生的径向误差^[9]。

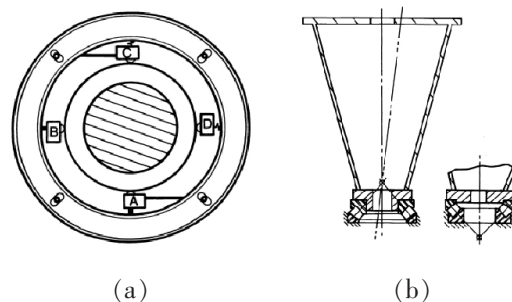


图15 3.5 m APO望远镜方位轴系支撑结构图:(a)上端为惰轮滚子与驱动单元;(b)下端为推力调心滚子轴承。

这种支撑结构的优点在于:位于方位轴下部的推力调心滚子轴承仅承担轴向载荷,同时其调心作用提供的摆动轴线可以将整个望远镜所受风载等径向扰动产生的力矩转化为径向力,由位于方位轴系上部的惰轮滚子承担,这样利于减小摩擦力矩。这种轴系的不足在于:倒圆锥形的方位轴占用空间较大,而且方位轴上端的摩擦驱动轮和惰轮滚子属于过定位安装,在摩擦驱动轮的控制等方面难度较大。

4.2.2 径向密珠轴承和大接触角推力球轴承一体化方案

应用在4.1 m SOAR、4.2 m DCT望远镜上。以美国4.1 m SOAR望远镜的方位轴系为例,它是由大接触角的推力球轴承和径向密珠轴承共同构成的一体化结构,如图16所示。其中有180个 $\Phi 50$ mm的钢球承受轴向载荷,还有在预载荷作用下沿径向分布的900个 $\Phi 18$ mm的钢球承受径向载荷,这种设计在12 in (3.66 m)的直径范围提供了足够的刚度,

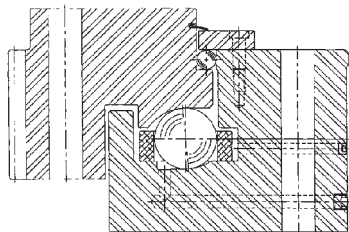


图16 美国4.1 m SOAR望远镜的方位轴承一体化设计

而且由于钢球良好的滚动特性减小了摩擦阻力，而且径向轴承弥补了推力轴承径向刚度较低的不足。这种设计还便于更换和调整径向轴承的钢球，因此轴承刚度可以在优化摩擦阻力和谐振频率之间实现最佳平衡。

“黏滞”（由停止状态到极低速启动瞬间）对伺服系统的低速性影响很大，控制它的一种方法是减小轴承整体摩擦阻力，并选择一种在低速运行和启停切换情况下摩擦力矩变化很小的轴承设计。SOAR的高角接触推力轴承的摩擦力矩变化仅为10%（设计变化值为 $\pm 200 \text{ N}\cdot\text{m}$ ），而滚子轴承的对应值为35%~45%^[19]。对摩擦阻力产生影响的因素还有预紧力、机加工质量、振摆、法兰的平面度和刚度以及表面光洁度等。同时，为满足低摩擦力矩的要求采用了循环油润滑方式。

经过跟踪架制造商 Vertex RSI 公司的工厂级系统测试，包含绕线作用在内的摩擦力矩为 $1\,100 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($800 \text{ ft}\cdot\text{lbs}$)，优于估算的 $2\,000 \text{ N}\cdot\text{m}$ ($1\,500 \text{ ft}\cdot\text{lbs}$)。而早期概念设计中所包含的两个彼此独立的轴承——一个承受轴向载荷，一个承受径向载荷，经过细节设计工作，改为了一体化轴承方案。

由于上部的径向轴承采用了过盈安装方式，因此在成品测试完成后，轴承通过专用夹具整体运输^[2]，并与跟踪架整体装配测试后，再次独立吊装进入塔台圆顶内完成最终装配，如图17(a)、(b)、(c)所示。

这种支撑结构的优点在于：通过将两套轴承设计为一体，简化了轴系结构，消除了中间环节相应零件的加工和装调误差。不足之处在于：两个轴承之间在径向存在一定程度的过定位，形位精度也会

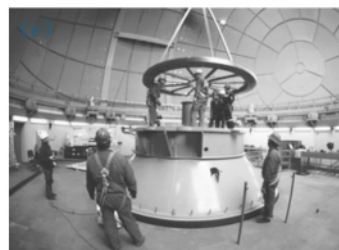
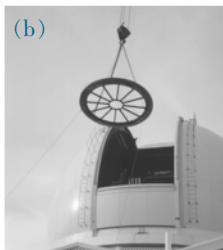


图17 美国4.1 m SOAR望远镜方位轴承的整体运输及吊装：(a)带有整体运输夹具的方位轴承；(b)整体吊装入圆顶；(c)向基座表面安装。

互相影响，对设计、加工和检测提出了很高的要求。

4.2.3 径向轴承和大接触角推力球轴承组合方案

美国1979年投入使用的6.5 m MMT望远镜，虽然口径已超过了4 m，但却是世界上第一台在方位轴系上采用滚动轴承的大型望远镜，其方位轴系支撑结构如图18所示。

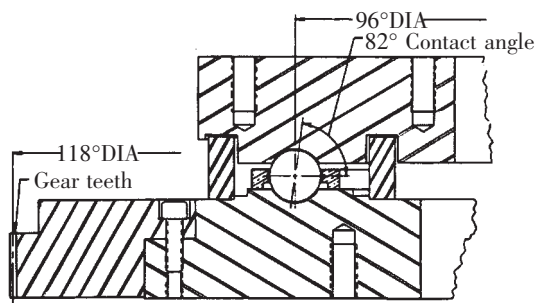


图18 MMT望远镜方位轴系支撑结构

相对于传统的液体静压轴承，滚动轴承的优势在于较低的初始研制费用，以及较低的后期维护费用，而且在此之前球轴承已经多次成功地应用在小型光电望远镜和大型雷达望远镜上。MMT望远镜的设计者通过论证，认为滚动轴承可以满足该望远镜在最大 $225^\circ/\text{h}$ ($3.75^\circ/\text{min}$) 的跟踪速度下达到 $\pm 0.2''$ 的瞄准误差要求。

负责方位轴承研制的 Kaydon 轴承公司,最初只采用了一个 82° 的大接触角推力深沟球轴承,在直径 96 in (2 438.4 mm) 范围内均匀分布了 130 个直径为 2 in (50.8 mm) 的钢球,滚道曲率半径与钢球直径的比值为 0.54。希望通过 82° 的大接触角为跟踪架提供一个径向预载荷,进而减小由于侧向力扰动导致望远镜跟踪架工作时绕方位轴承有效载荷中心的晃动,如图 19 所示。这种侧向力主要来自不平衡的驱动、结构的不稳定以及风载等^[29-30]。

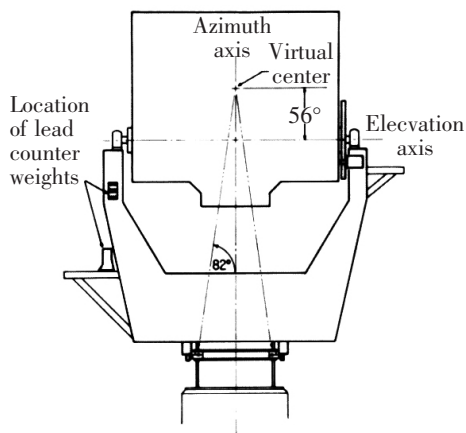


图 19 MMT 望远镜跟踪架及方位轴承载荷中心

在工作了 12 年之后,1992 年 8 月,MMT 望远镜进行了 2 个月的停机维护修整。其中最为重要的是为方位轴新增了一个直径 6 ft (1 828.8 mm) 的径向轴承,通过辅助原有的方位轴承承担径向力并提供定心作用,修正跟踪和瞄准的长周期稳定性^[31]。这样 MMT 的方位轴系支撑结构与 SOAR 望远镜基本相似,即采用一个大接触角推力球轴承承担主要的轴向载荷,另一个径向轴承承担径向载荷并起定心作用,这从另一个角度再次验证了 SOAR 望远镜方位轴系设计的合理性和可靠性。

方位轴承的另一个重要性能指标就是摩擦力矩的变化 $<30\%$ 。在测试这个参数时,对轴承施加了一个与估算工作载荷相等的轴向载荷,在以 $230^\circ/\text{s}$ ($3.83^\circ/\text{min}$) 的速度启动时,摩擦力矩的变化为 $380\sim 330 \text{ ft}\cdot\text{lbs}$ ($515.3\sim 447.5 \text{ N}\cdot\text{m}$),动摩擦系数的平均值约为 0.000 3,测得工作中摩擦力矩的变化为 $45 \text{ ft}\cdot\text{lbs}$

($61.02 \text{ N}\cdot\text{m}$)。

5 国内在大型望远镜轴系支撑结构的进展和趋势

我国的大型光电望远镜研制工作虽然起步相对晚些,但随着我国综合国力的提高和经济实力的增强,对大型光电望远镜的需求也越来越强烈,通过不断加大资金投入,加快相关基础理论和关键技术的研究,已取得了一些成绩。 $1\sim 2 \text{ m}$ 级口径光电望远镜轴系的支撑结构主要沿用传统经纬仪的径向密珠轴承结合平面止推密珠轴承方案。而正在研制的 2 m 以上口径光电望远镜的轴系支撑结构,则开始考虑采用液体静体静压轴承方案。

从前文分析可见,方位轴系的支撑结构相对更难,除了液压轴承方案外,能够同时承担径向、轴向和力矩载荷的大型转盘轴承也是可行的研究方向。该种轴承广泛应用于风电、矿山、冶金、港口吊装等领域,针对大口径光电望远镜方位轴系应用的主要难题是在保持大承载的同时,满足高精度、低摩擦等高性能要求,2009 年,中科院长春光机所研制成功了 $\Phi 1\ 500 \text{ mm}$ 精密双排异径球转盘轴承^[32],如图 20 所示。该轴承轴向跳动最大值 0.009 mm ($\Phi 1\ 500 \text{ mm}$ 直径范围内),径向跳动最大值 0.006 mm ,最大空载启动摩擦力矩值 $30 \text{ N}\cdot\text{m}$,承载能力优于 30 t ,完全能够满足 2 m 级望远镜的使用要求。



图 20 $\Phi 1\ 500 \text{ mm}$ 精密双排异径球转盘轴承

6 总 结

本文以大型地平式光电望远镜轴系支撑结构的发展现状为背景,分析阐述了国内外相关技术的研

究现状。详细比较了大型跟踪架俯仰轴系和方位轴系常用的轴承结构形式,包括角接触球轴承、圆锥滚子轴承、调心滚子轴承、转台轴承、液体静压轴承等。着重分析了典型轴系支撑结构方案,包括成对安装的角接触球轴承、成对安装的圆锥滚子轴

承、惰轮滚子结合推力调心滚子轴承、径向密珠轴承和大接触角推力球轴承一体化和组合等方案。最后,分析了国内大型望远镜轴系支撑结构的进展和趋势,为今后相关研究工作提供了创新思路和重要参考。

参考文献

- [1] 马佳光. 捕获与跟踪系统的基本技术问题[J]. 光学工程, 1989(3): 1-42.
- [2] 马品仲. 4.3 m 光学红外望远镜设计方案[J]. 光学仪器, 1992, 14(4): 23-27.
- [3] 马品仲. 大型天文望远镜设计和研究[J]. 光机电世界, 1993, 10(7): 1-6.
- [4] 陈涛, 陈娟, 王旭超, 等. 光电经纬仪跟踪架结构模式浅析[J]. 吉林工学院学报, 2002, 23(3): 19-22.
- [5] 梁红艳, 郑振华, 郭劲. 大口径望远镜跟踪架的结构研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 1017-1019.
- [6] Vigil Michael L, Witte David J, LeVan Paul D, *et al.* Sensor suite for the advanced electro-optical system (AEOS) 3.6-meter telescope[J]. *SPIE*, 1996, 2819: 151-169.
- [7] Koehiera B, Flebus C. VLTI auxiliary telescopes[J]. *SPIE*, 2000, 4006: 13-24.
- [8] Steele I A, Smith R J, Rees P C. The liverpool telescope: performance and first results[J]. *SPIE*, 2004, 5489: 679-692.
- [9] Steven M G. Detail design problems and their solutions Apache Point Observatory 3.5 meter telescope[J]. *SPIE*, 1990, 854: 854-865.
- [10] Tarengi M. European southern observatory (ESO) 3.5 m new technology telescope[J]. *SPIE*, 1986, 628: 328-336.
- [11] Robert Q F, Brent L E, Eric S, *et al.* First observations with the Starfire Optical Range 3.5-meter telescope[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 481-493.
- [12] Robert Q F. The Starfire Optical Range 3.5-m adaptive optical telescope[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 934-943.
- [13] Barbieri C, Bhatia R, Bonoli C, *et al.* Status of the Galileo National Telescope[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 10-21.
- [14] Dario M. Galileo Italian National Telescope (TNG) drive system: components, methods, and performances[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 352-363.
- [15] Dario M, Enrico C, Pietro S. Galileo high-resolution encoder system[J]. *SPIE*, 1997, 3112: 328-334.
- [16] Matt J, Daniel R B. The WIYN 3.5 meter telescope project[J]. *SPIE*, 1994, 2199: 2-9.
- [17] Mali J, Caty P. The WIYN 3.5 meter telescope project[J]. *SPIE*, 1990, 1236: 2-12.
- [18] Kimbrell James E, David G. AEOS 3.7-m telescope primary mirror active control system[J]. *SPIE*, 1998, 3352: 400-411.
- [19] Kerstan G H, David F, Al G. High-performance mount for the SOAR telescope project [J]. *SPIE*, 2000, 4004: 127-134.
- [20] Thomas A S, Victor L K, Stephen R H. Southern astrophysical research (SOAR) telescope steps on the route to

- success[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 71-81.
- [21] Marvin F, Tim C, Eewars R. SOAR 4.2 meter telescope: evolution of drive and pointing performance from early predictions to final testing[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 308-316.
- [22] Porter D S, Kerstan G H, James J S. Final design, fabrication, factory integration, and test of a 4.2-meter telescope mount[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 295-307.
- [23] Warner C M, Victor K, German S, *et al.* SOAR telescope 4 meter high performance mount performance results [J]. *SPIE*, 2004, 5495: 77-86.
- [24] Alistair M M, Simon C, Will S. Project VISTA: a review of its progress and overview of the current program[J]. *SPIE*, 2003, 4837: 82-93.
- [25] Thomas A S, Edward D, Robert L M. The discovery channel telescope: wide-field telescope in northern arizona [J]. *SPIE*, 2004, 5489: 658-666.
- [26] David S P, Thomas A S, Byron S, *et al.* The concept design of the discovery channel telescope mount [J]. *SPIE*, 2004, 5489: 950-961.
- [27] Finley D T, Squiresa C, McCreighta B A, *et al.* Design of the discovery channel telescope mount[J]. *SPIE*, 2008, 7012: 70124I-1-8.
- [28] 机械工业部洛阳轴承研究所. GB/T271-1997 滚动轴承 分类[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [29] Davision W, Ulich B L. Performance of the multiple mirror telescope (MMT) . mechanical properties of the MMT[J]. *SPIE*, 1982, 332: 9-15.
- [30] David J B, Daniel R B, Anthony D P. Tracking a 150 ton altitude-azimuth telescope to sub-arcsecond accuracy[J]. *SPIE*, 1987, 748: 100-108.
- [31] Blanco D, Alegria M, Callahan S, *et al.* The new MMT[J]. *SPIE*, 2004, 5489: 300-311.
- [32] Wang Huai, Zhang Jingxu, Dai Shuang. Study on the azimuth bearing scheme of a large alt-azimuth telescope[J]. *SPIE*, 2009, 7654: 76540Q-1-6.

作者简介: 王槐 (1980-), 男, 汉族, 辽宁沈阳人, 博士, 助理研究员, 2009年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事大型跟踪架精密轴系的关键技术研究。E-mail: playsnail@sina.com