FAST 望远镜主动反射面促动机构运动学研究

陆 震 杨 光

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083) (北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

王启明 南仁东

(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘 要: 针对现有的 FAST(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)主动反射面调整运动机构和促动器试验方案的不足,提出一种新型机构,能够有效地解决反射面边缘单元侧滑问题,并提高整个系统机械效率、可靠性,降低制造成本和运行维护费用. 改进的核心是利用 Sarrus 机构产生理想的直线运动而没有任何侧滑. 通过运动学分析证实了模型样机的可行性,静力分析表明这个系统具有足够的强度和刚度. 模型的运行试验和仿真证明,即使在基座倾斜 45°的条件下这种新型促动器机构能够可靠地防止反射面单元侧滑. 这种改进为实际系统的设计和研制提供了至关重要的理论依据和试验数据.

关 键 词: 射电天文学; 射电望远镜; 机构(FAST)

中图分类号: P 161; TH 112

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)02-0233-06

Research on mechanism of actuated active reflectors for FAST

Lu Zhen

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Yang Guang

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Wang Qiming Nan Rendong

(National Astronomical Observatory, Beijing, 100012, China)

Abstract: A new type of actuate mechanism for the active reflector of FAST(five-hundred-meter aperture spherical telescope) radio telescope was proposed so that one can overcome the deficiency of original actuate mechanism. The mechanism was utilized to prevent from the sideslip in the margin cell of the active reflector, and to promote the mechanical efficiency and reliability, and to reduce the cost of manufacture and operate. The core of the improvement is so-called Sarrus linkage that can produce perfect translational motion without any sideslip. The kinematical analysis was made to demonstrate the feasible of the prototype, and the force analysis indicates that the system has sufficient strength and stiffness. The prototype operation and simulation prove that one can prevent any sideslip of the reflector's units based on the new type actuate mechanism, even in the base slope of 45°. The issuers of being improved point out, which are essential for the design and manufacture of the real system.

Key words: radio astronomy; radio telescope; mechanism(FAST)

收稿日期: 2004-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375007); 中科院知识创新工程资助项目(FAST-方-A-01)

作者简介: 陆 震(1942-), 男, 江苏无锡人, 教授, zhenluh@buaa.edu.cn.

1 500 m 大口径射电天文望远镜

天文望远镜是现代天文学的重要手段, 随着天文望远镜性能的提高, 天文学也经历巨大飞跃, 迅速深化人类对宇宙的认识[1]. 电磁波谱按波长由短到长依次为: γ 射线、X 射线、紫外线、可见光、红外线及无线电波, 天体的辐射几乎覆盖了电磁波谱的全部波段, 然而由于地球大气中各种粒子的吸收和散射, 对在地面上的天文观测来说, 整个电磁波频段只有两个透明的窗口, 即可见光波段的光学窗口和无线电波段的射电窗口, 相应的是光学天文望远镜和射电天文望远镜, 其它类型的天文望远镜需要在地球大气层以外进行观测. 宇宙中有些天体在可见光波段的辐射并不明显, 但在无线电波段却有很强的辐射, 这就只有依靠射电望远镜才能进行接收观测. 此外, 由于宇宙中存在着许多尘埃粒子, 它们能挡住在可见光波段的视线, 但对无线电波的阻挡却很少. 因此, 射电望远镜能观测到一些光学望远镜无法看到的天体. 射电望远镜靠接收天体发射出来的无线电波进行观测, 它实际上就是一套类似雷达的电子装置, 由天线、接收机、校准源以及记录设备等几大部分组成. 天线系统的形状与雷达接收装置非常相象, 其作用类似于光学望远镜中的物镜, 用以收集来自天体的无线电波. 射电望远镜接收和记录到各种天体射电辐射在不同波段上的各种信息后, 再根据天体物理理论推算各类天体的相关物理情况, 这些是光学望远镜难以测定的. 在射电频谱范围内, 从波长大约为 200 m 到 15 m, 一直到波长为 0.3 mm 左右的区域, 地球大气层是透明的或是部分透明的, 这个频段所对应的大气窗口就称为大气的射电窗口. 在射电频谱的长波区域, 电磁波的传播会受到大气电离层的反射, 因此大气窗口存在一个低频的截止频率, 这一频率也称为电离层的临界频率. 电离层的临界频率与电离层的最大密度的平方根成正比. 当电磁波的频率高于 10 GHz 时大气和降雨对电磁波的吸收和散射比较明显, 但一般来说电离层的临界频率很少高于 15 MHz, 一般不高于 9 MHz. 当电磁波的频率大于电磁波的临界频率时, 来自外空的电磁辐射就可以穿越电离层到达地球表面. 当电磁波频率接近于临界频率时, 电磁波在电离层区域将会发生较大的偏折. 在射电波中从米波到厘米波的广大频段, 地球大气对电磁辐射的传播影响不大, 大气和降雨对电磁波的吸收并不明显. 射电望远镜最显著的优点是不受天气条件的限制, 不管刮风下雨, 还是白天黑夜, 都能进行观测, 其探测能力比普通的光学望远镜要强得多. 本世纪 60 年代天文学上的四大发现——脉冲星、类星体、星际有机分子、微波背景辐射, 都是从射电望远镜中观测到的.

天文学对射电望远镜的要求包括高灵敏度、高分辨率和高动态范围, 此外天文观测还要求射电望远镜具有较宽的工作频率范围. 高灵敏度是所有射电望远镜的共同特点, 因为在射电频段地球上所能收集的天体辐射十分微弱, 如果以垂直于辐射方向上的单位面积所接收的功率, 即能流量密度来表示, 即使是天体中最强的射电源, 其在地球表面所能得到的流量密度也很小, 仅仅在 10^{-20} W/m^2·Hz 以下[2]. 决定灵敏度的主要因素是接受面积. 目前国际上最大的全可动单口径望远镜有两台, 一台是德国 Bonn 的 100 m 全可动单天线望远镜, 另一台是美国新投入运行的 GBT 望远镜. 最大的固定式单天线望远镜是美国的 305 m 口径的 Arecibo(图 1), 它具有固定的球反射面, 为了修正固定球面的球差, 采用了复杂的线馈源. 其有效口径只有 200 m, 由于是固定反射面, 它只有 20° 天顶角的观察极限. 本世纪中国将建造一台口径达 500 m 的主动反射面的固定式单球面射电望远镜, 它被称为 FAST, 是"500 m 孔径球面望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)"的英文首字母缩写, 也蕴涵"尽快(fast)"建成以夺天时之利的意思. 该计划被称为 FAST 计划, 预算耗资为 6 亿元人民币.

FAST 是国际合作提出的大射电望远镜计划 LT 或平方公里球面射电望远镜阵计划 SKA 的先导单元, 它不仅可以作为 SKA 的中试平台, 进行一系列创新或改进的技术方案的论证和试验, 本身又可以作为世纪之交世界上孔径最大、灵敏度最高的射电望远镜, 在国际射电天体物理的前沿课题的观测和研究上、在空间探测、通讯、遥测、遥控、电离层和磁层研究、国防等应用领域, 发挥十



图 1 阿瑞西博(Arecibo) 望远镜

分重要的、不可替代的作用.

2　FAST 反射面的促动机构和改进

FAST 射电天文望远镜反射面口径达 500 m. 更关键的是 Arecibo 为固定不动的被动式球冠反射面, 而 FAST 的 500 m 球冠反射面是主动的, 它由 1 788 个球面单元拼合而成, 每个单元由三个促动器支撑和驱动, 在计算机的控制下, 能在观测方向形成瞬时 300m 口径的旋转抛物面, 在地面上改正了球差, 实现望远镜的全偏振及宽频带观测. 这就大大简化了馈源舱的支撑跟踪和球差修正系统. 为了实现每个球面单元的法向位移和球面法线指向的调整, 每个单元与三个促动器组成了一个3 支链的 3 自由度并联机构. 问题的复杂性在于每个促动器同时连接与支撑三个单元, 这样各单元的运动不是独立的, 整个系统的自由度不是简单的 3× 1788, 相邻单元之间有运动制约, 形成了过驱动系统. 另外, 500m 球冠靠近边缘处的单元倾斜度很大, 单元法线与铅垂线夹角达到 33. 6°. 一般的 3 支链并联机构难以防止尺度约 15 m的六边形球面单元下滑, 即侧滑现象. 目前面临的问题是验证现有设计的合理性, 进一步寻找更好的设计方案.

一个理想的设计方案应满足如下要求:

1) 反射面形状误差最小, 至少在允许范围内;

2) 促动器具有足够的运动刚度;

3) 反射面在调整形状时, 工作表面光顺性, 或者说, 各单元结合处的连续性和高阶连续性;

4) 具有抵抗横向载荷的能力, 即横向刚度;

5) 在同一个分割方案下, 尽量减少促动器的数目, 以降低制造成本和运行维护费用;

6) 在最高工作频率为 5 GHz 时允许的漏损, 系统温升和偏振特性以及其它各种扰动源的不敏感性;

7) 其他, 抗风荷能力、抗振性、结构材料和表面材料的抗蚀性等.

此外, 促动器应具有反行程自锁性, 这样在单元到达期望位姿时, 促动器不再施加驱动力, 单元仍能保持该位姿.

目前采用的分割方案已经过反复讨论和论证, 所采用的六边形单元形状和单元数目能够保证上述 1) 和 6) 的要求. 所以本文不再涉及这个问题. 本文要研究的是针对现有配置方案和各单元连接方式, 提出促动器改进方案、各单元连接方式和措施.

原方案每个单元用三个促动器, 同时相邻的三个单元共用一个促动器, 考虑边沿单元共用促动器数目的减少, 总的促动器的数目要略大于单元数, 等于 1 788+ N 个, N 为反射面边缘的单元个数[3,4].

原方案[5] 每个单元用三个移动运动副调整单元的法向位移, 同时与单元面的指向(或叫做姿态) 有运动学耦合, 位移计算需按三腿并联机器人运动学方程, 计算复杂. 接近反射面边缘处的单元的促动器和支撑受到很大的侧向力, 这是单元重力在反射面切向分力, 它为 $F = P\sin\Phi$, 这里 P 是单元的重量, Φ 是单元反射面主法线与重力线的夹角, 反射面边缘单元的 $\Phi = 33.6°$, $\sin\Phi = 0.5534$. 这样大的切向力, 促动器和支架是无法承受的, 它们只能承受轴向力. 而且这样大的切向力还会造成移动副的正行程的自锁, 即使单元不侧移, 整个单元也会卡死. 原方案用电动机驱动, 这是可行的, 但是在转动到移动的运动变换方式是采用丝杠螺母运动副, 这种传动方式的优点是精度高、输入输出线性度好, 反行程自锁; 缺点主要是传动效率不高, 传动质量对加工精度敏感, 对日常维护要求高, 适合于室内工作, 低速运动时有爬行现象. 为克服爬行现象, 可以采用滚珠丝杠, 但成本高, 对于 FAST 单元的驱动是不现实的.

新方案的改动主要有以下几点.

电机转动到移动的运动变换采用特殊的过约束机构——Sarrus 机构(图 2), 按照机构一般的自由度公式, 其自由度为- 3, 但是由于其特殊的几何关系, 其运动自由度仍为 1[6,7]. 并且, 它有一个特殊的优点, 即中间第 3 个运动杆(输出平台), 作单向直线运动, 这就提供了另一种将转动变换为直线运动的方式. 这种机构的特点是没有移动运动副和螺旋副, 因此传动效率高, 易于维护. 它有两组各自平行的转动副, 正是这个特别的配置, 能够将输入杆(驱动电机) 的转动变成输出平台沿垂直方向的平动, 不需要另外的导向筒或导向架. 其缺点是输入输出关系是非线性的, 反行程不具备自锁性, 这两个问题可以找到解决办法.

原方案每个单元用三个线性促动器驱动, 同时每个促动器又为相邻的三个单元共享, 应该说这是一个很好的构思. 所以在最初的研究中, 摒弃了一个单元用一个促动器的方案. 现在的新方案仍将促动器放置在单元的中央, 但这与原来一个促动器驱动一个单元的方案是有差别的. 在新方

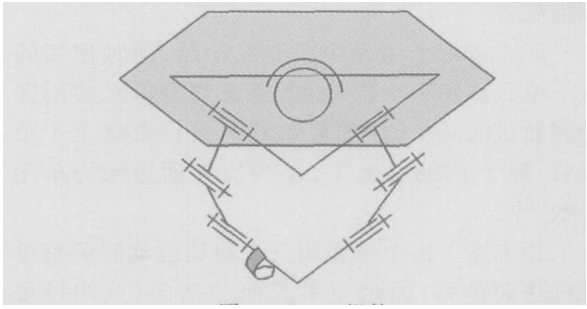


图 2 Sarrus 机构

案中按照单元的位置将所有的单元分为两类: 主动单元(或者称为有源单元)、被动单元(或者称为无源单元). 前者由 Sarrus 机构促动器驱动, 后者由相邻的三个主动单元牵动, 实现单元间联接的光顺性. 主动单元之间的运动副是约束为 1 的Ⅰ级副 ——平面球面副, 它允许 5 个相对运动, 只限制了两个相联单元沿联接处法向的相对运动. 这样促动器只决定单元中心的位置, 单元的姿态或者说指向则由整个反射面的光顺性自动调整而定. 这就避免了原方案单元的位置和姿态的耦合, 以及单元连接的不连续性. 根据计算可知, 主动单元的数目为单元总数的 2/3. 相应地, 促动器的数目为单元总数的 2/3, 即 1 192 个, 比原方案减少了 1/3 强. 无论从制造成本、维护的复杂性以及整个系统运行的可靠性都是有利的.

结构设计要解决的问题是:

1) 促动器机构尺寸的确定或综合;

2) 各单元间Ⅰ级副的具体结构;

3) 新方案主动反射面缩比试验模型结构设计;

4) 新方案主动反射面运动学仿真;

5) 新方案主动反射面和促动器机构的静力学计算和动力学计算;

6) 新方案主动反射面缩比试验模型的制造、调整和运行实验.

前面遗留的两个问题是输入输出关系的非线性和反行程不具备自锁性. 输入输出非线性问题可以通过计算机控制算法解决, 一般来说, 由于整个系统运行速度很慢, 常规的计算机控制是不成问题的. 如果进一步在 Sarrus 机构的尺度综合时, 采用特殊尺寸, 可以得到很简单的输入输出关系. 虽然 Sarrus 机构不能提供反行程自锁, 但是由于电机与机构输入杆之间的大速比减速器具有反行程自锁能力, 若采用行星齿轮减速器、行星摆线针轮减速器或蜗轮蜗杆减速器, 它们也都具有反行程自锁性.

对上述机构和方案进行了定性的动画仿真, 证明是基本可行的. 结构设计要解决的问题很多. 比如 Sarrus 机构中各构件的尺度关系, 还需要反复优化(运动学优化、动力学优化), 平面球面副的具体结构, 显然直接用图 2 的结构是不行的, 接触应力太大, 具体结构将采用复合铰链的形式, 避免点接触. 缩比模型实验分两步, 首先研制一个大缩比的模型, 如 1: 10 ~ 30, 这个模型包括尽可能多的单元, 主要验证反射面单元运动学关系、几何精度、单元间的不干涉性. 第二个模型采用小缩比, 如 1: 3~ 5, 主要验证结构设计的合理性、受力状态及强度刚度、可驱动性以及振动特性和抗振能力等.

3 Sarrus 机构的运动学分析

根据在各构件上的坐标系设置(图 3), 可得到如下的坐标变换矩阵:

$$\boldsymbol{A}_{01}=\begin{bmatrix}\cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & h_1\cos\theta_1\\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & h_1\sin\theta_1\\ 0 & 0 & 1 & S_1\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{12}=\begin{bmatrix}\cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & h_2\cos\theta_2\\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & h_2\sin\theta_2\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{23}=\begin{bmatrix}\cos\theta_3 & 0 & \sin\theta_3 & 0\\ \sin\theta_3 & 0 & -\cos\theta_3 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -S_3\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{34}=\begin{bmatrix}\cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0\\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & S_4\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{45}=\begin{bmatrix}\cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & h_5\cos\theta_5\\ \sin\theta_5 & \cos\theta_5 & 0 & h_5\sin\theta_5\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_{50}=\begin{bmatrix}\cos\theta_0 & 0 & \sin\theta_0 & 0\\ \sin\theta_0 & 0 & -\cos\theta_0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & -S_5\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$$

这里设 Z_2 轴与 Z_3 轴的夹角为 90°, Z_5 轴与 Z_0 轴的夹角为 90°. 其它结构参数和铰链运动变量的意

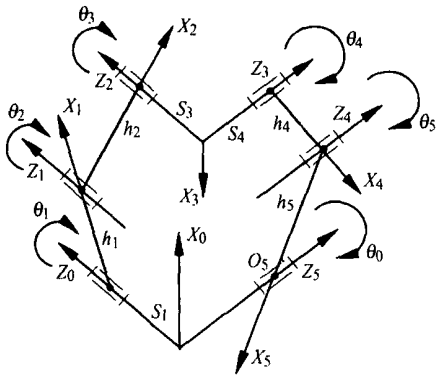


图 3　Sarrus 机构

义从图 3 可以看出. 如果 θ_1 是输入变量, 其它铰链的运动变量都可以唯一地确定, 同时可以得出运动平台地线位移沿 X_3 轴的反方向. 在运动学分析的基础上可以进行机构的受力分析, 通过受力分析可知, 动平台上的载荷, 无论沿 X_3 轴方向或其它方向, 都可以由两个运动链以及输入构件的传动机构承受.

在确定尺寸之前, 首先要确定 Sarrus 机构的升降运动范围. FAST 工作时要求球面反射面在局部拟合成旋转抛物面(图 4). 把球面要变化成旋转抛物面的局部取出来, 建立坐标系, θ 为单元法线与旋转抛物面旋转轴夹角, 其变化范围是 0°~30°. 用极坐标表示, 圆的方程是: $\rho = 300$; 抛物线的方程为 $559.8(300-\rho\cos\theta) = \rho^2\sin^2\theta$; 则当 $\theta = 0°$ 时, $\Delta\rho = 0$; 当 $\theta = 30°$ 时, $\Delta\rho \approx 0$; 当 $\theta = 15°$ 时, 由 $559.8(300-\rho\cos 15°) = \rho^2\sin 15°$, 可解出 $\rho = 299.455$, 所以 $\Delta\rho = 0.545$ m. 乘以缩比率 1/15, 可知最大位移为 0.545/15 = 36.33 mm. 依此类推, 可得到一个 θ 与 Δρ 对应关系如表 1 所示.

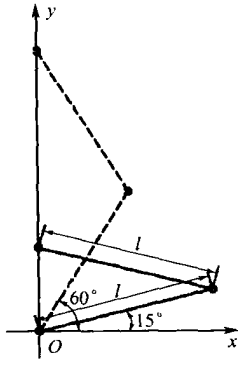


图 4　位移差

表 1　θ 与 Δρ 对应关系

θ/(°)	15	18	20	21	22	23	25
Δρ/mm	36.33	43.6	44.64	45.83	44.67	42.03	36.15

通过表 1 可以看出, 当 θ 取值在 21°左右时, Δρ 出现最大值 $\Delta\rho_{max} = 46$ mm. 据此可知 Sarrus 机构的运动范围是 0~46 mm.

4　Sarrus 机构整体尺寸设计

根据上面计算得出的运动范围, 加上一定的机构运动裕度, Sarrus 机构的设计运动范围为 0~60 mm. 如图 4 所示, 以 Sarrus 机构一组杆件的固定点为原点, 单元法线为 y 轴建立直角坐标系. 为了提高杆件结构的稳定程度, 将两个杆件之间的夹角范围取为 30°~120°. 根据几何原理计算得: 当杆件的夹角为 30°时, $y_1 = 2l\sin 15° \approx 0.52l$, 当杆件的夹角为 120°时, $y_2 = 2l\sin 60° \approx 1.732l$, 得位移差 $\Delta y = y_2 - y_1 = 1.2l$, 位移差应不小于运动范围, 则有 $\Delta y = 60$ mm, 即 $l = 49.5$ mm. Sarrus 机构杆件尺寸的确定还需考虑到机构运动时杆件折叠不能对相邻单元的机构造成干涉, 这就涉及到 Sarrus 机构布局的问题. 满足要求的布局是, 当杆件完全折叠起来时, Sarrus 机构所有的零部件都不能超出单元反射面在法线垂直方向上的投影范围, 并且要使机构受力状况最佳.

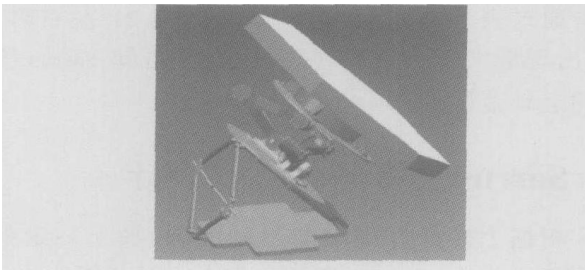
为了保证结构的稳定性, 布局时令 Sarrus 机构的两组杆件支脚间相距 300 mm. 经分析, Sarrus 机构两组夹角对机构的影响不大, 为了简化计算取 90°. 综合考虑上述条件, 杆长 l 的范围应在 49.5~370.6 mm. 折中取杆长 $l = 250$ mm. 杆长增大, 杆件的运动范围将变小. 设杆件运动起始角度仍为 15°, 终止角度为 θ, 就有 $\Delta y = 2\times 250(\sin\theta - \sin 15°) = 60$ mm, 计算得出 $\theta = 22.3°$, 角度变化范围减小, Sarrus 机构的运动控制精度受到影响. 解决的办法是加大 Sarrus 机构输入杆前方所接减速器的减速比, 另一方面角度变化范围减小也是一个优点, 运动稳定性增强, 输入运动与输出运动的线性度也提高了, 使控制变得更简单.

5　运动学仿真和实验研究

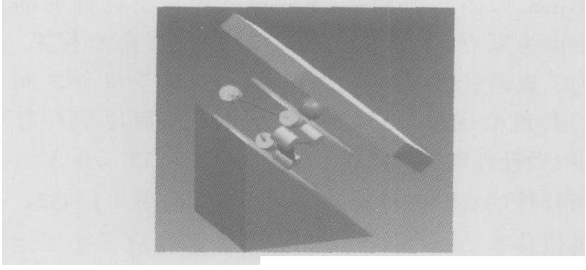
图 5 是 UG 建模以后的效果图. 建模以后, 就要对整个机构进行运动仿真. 由于整个机构造型复杂, 软件处理起来速度很慢, 影响仿真的效果, 所以对整个机构稍作简化如图 5b, 用简单的几何造型来代替它们, 在简化过程中不改变外形尺寸, 以保证仿真的可信度.

对简化模型进行运动仿真, 操作步骤如下:

1) 在 UG 中建立一个运动分析的场景;



a 机构图



b 简化图

图 5 机构效果图

2) 进行运动模型的构建, 包括设置每个零件的连杆特性, 设置两个连杆间的运动副和添加机构载荷;

3) 进行运动参数的设置, 提交运动仿真模型数据, 同时进行运动仿真动画的输出和运动过程的控制;

4) 运动分析结果的数据输出和表格、变化曲线输出, 人工进行机构运动特性的分析.

经过运动仿真, 验证了机构运动没有干涉, 是可行的.

缩比模型的实物照片如图 6 所示.



图 6 缩比模型实物照片

6 结 论

运动仿真验证了机构运动没有干涉, 是可行的. 缩比模型的实物经过静力加载检测, 各单元加载后重复定位偏差均小于 0.1 mm. 加载后, 每个单元每个位置进行了5次测量, 最大偏差为 0.08 mm, 在允许范围之内. 绝大多数偏差为负偏差, 说明加载后, 整个系统沿重力方向有轻微位移. 这是由于构件微小变形和间隙在负载力作用下产生. 各单元平均偏差从 – 0.007 mm 到 – 0.066 mm, 远小于允许误差. 在支撑面为 45° 条件下, 无侧移和倾覆现象. 用丝杠螺母副驱动的单元是无法在如此大的支撑角下保持定位精度的.

参考文献 (**References**)

[1] 上海网上天文台[DB/OL], http://www.astron.sh.cn, 2003/2004

Shanghai Astronomical Observatory Online[DB/OL], http://www.astron.sh.cn, 2003/2004(in Chinese)

[2] 程景全. 天文望远镜原理和设计: 射电、红外、光学、X 射线和 γ 射线望远镜[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2004

Cheng Jingquan. The theory and design of astronomical telescope: radio, infrared, optical, X ray and gamma ray telescope [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 2004(in Chinese)

[3] 邱育海. 具有主动反射面的巨型球面射电望远镜[J]. 天体物理学报, 1998, 18(2):222~227

Qiu Y H. The novel design for giant spherical radio telescope with active main reflector[J]. ACTA Astrophysica Sinica, 1998, 18(2): 222~227(in Chinese)

[4] Qiu Y. A novel design for a giant Arecibo-type spherical radio telescope with an active main reflector[J]. MNRAS, 1998, 3(1)

[5] 李国强, 沈黎元, 罗永峰, 等. 大射电望远镜反射面板非线性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 161~166

Li Guoqiang, Shen Liyuan, Luo Yongfeng, *et al*. Nonlinear analysis of large radio telescope reflector panel[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004, 32(2): 161~166(in Chinese)

[6] 陆 震. 高等机械原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001

Lu Zhen. Advanced theory on mechanism [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2001(in Chinese)

[7] 张启先. 空间机构的分析与综合. 上册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984

Zhang Qixian. The analysis and synthesis of spatial mechanisms. (First Volume) [M]. Beijing: China Machine Press, 1984(in Chinese)

[8] 吴盛殷, 南仁东. 射电天文中焦面阵或多波束馈源的应用[J]. 天文学进展, 2001, 19(4): 421~435

Wu Shengyin, Nan Rendong. Applications of the focus plane array or the multi-beam feed system in radio astronomy [J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(4): 421~435(in Chinese)

[9] Nan R, Peng B. A chinese concept for the 1 km2 radio telescope [J]. Acta Astronautica, 2000, 46(12)

[10] 万同山. 空间 VLBI 研究的现状和未来[J]. 天文学进展, 1999, 17(2): 136~147

Wan Tongshan. The present and future of space VLBI[J]. Progress in Astronomy, 1999, 17(2): 136~147(in Chinese)