文章编号：1008-1542（2024）00-0000-00

# SKA阵列望远镜天线伺服控制系统设计

张 强，张一凡，耿旭光

（中国电子科技集团公司第五十四研究所，河北石家庄 050081）

**摘 要**：为了建设世界最大的综合孔径射电望远镜，使系统具有最高的灵敏度和图像分辨率，对 15 米偏置 SKA 天线设计出一套新型的控制系统。建立了系统的数学模型，对控制环路算法进行了优化和修正，以实现方位、俯仰以及换馈系统的高精度驱动与控制；通过嵌入式软件对工作模式进行切换完成天文目标的自动跟踪，以提高系统的指向和跟踪精度；系统进行了软硬件功能测试。结果表明，伺服性能及电磁兼容性能均满足 SKA 观测要求。目前该系统已在 SKA 射电望远镜应用，可为天文学前沿研究提供技术支撑。

**关键词**：射电天文学；平方公里阵；伺服控制；天线；跟踪

**中图分类号**：TN927$^{+}$.3 **文献标识码**：A

# Servo control system design for square kilometre array radio telescope

ZHANG Qiang，ZHANG Yifan, GENG Xuguang

(The 54th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Shijiazhuang, Hebei 050081, China)

**Abstract**：To construct the world's largest aperture radio telescope and equip the system with the highest sensitivity and image resolution, a new control system was developed for the 15-meter offset SKA antenna. A mathematical model was established, and the control loop algorithm was optimized and corrected to achieve high-precision drive and control of the azimuth, elevation, and feed indexing systems. Embedded software was used to switch operating modes for automatic tracking of astronomical targets, to improve the system pointing and tracking accuracy. The hardware and software tests of the system were completed. The result shows that its servo performance and electromagnetic compatibility meets the SKA observation requirements. Currently, this system is used at the SKA radio telescope, which will provide some support for astronomical research

**Keywords**：radio astronomy; square kilometer array; servo control; antenna; tracking

平方公里阵（square kilometre array，SKA）项目是世界天文界计划建造的最大综合孔径射电望远镜[1]。项目的科学目标在于解答人类认识宇宙的一些基本问题，例如天体形成、星系演化、地外生命、宇宙磁场等。望远镜阵计划由 2 500 多个碟形射电天线组成（见图 1），单个天线的口径为 15 m；SKA 阵列的中心区域望远镜密集分布，以多个旋臂向四周延伸分布，频率覆盖 350 MHz~20 GHz[2]。项目将在澳大利亚和南非同时建设，全部接收面积总计将达 1 km$^2$，拥有史上最高的图像分辨率和灵敏度。中国是 SKA 项目研究的重要成员国[3]。

目前尚无针对 SKA 阵列望远镜控制系统的研究报道，本文结合参加 SKA 国际项目合作研发与建设的进展，对 SKA 射电望远镜的核心部分，即观测天线伺服控制系统进行了研究和设计。首先根据 SKA 的科学观测目标完成了望远镜的结构、光学和系统设计；为满足望远镜观测需要，进行了伺服系统的硬件和软件系统设计和分析，通过有限元分析建立了天线的数学模型；对系统工作模式和伺服系统跟踪、指向等重点目标进

收稿日期：2025-04-17；修回日期：2025-09-20；责任编辑：冯民
基金项目：国家重点研发计划（2023YFA1608203）；国家科技部 SKA 专项（2021SKA0110101）
第一作者简介：张强（1977—），男，河北石家庄人，高级工程师，博士，主要从事射电天文天线、卫星通信、天线设计与控制方面的研究。
E-mail: zhang_qiang54@126.com

行了分析设计和计算，最后完成了实际系统的集成和测试。

## 1　SKA 天线系统组成

SKA 望远镜天线为 15 m 口径偏置格里高利型反射面天线。其整体如图 1 所示，天线包括座架、俯仰箱、天线反射体、副反射面、伺服控制系统和换馈机构等部件[4]。天线的光学设计采用双偏置形式，保障了无口面遮挡并对进行了赋型设计。座架采用方位俯仰型座架，俯仰箱位于方位座架上面，反射体安装在俯仰机构的定位装置上，观测过程中控制系统驱动反射体精确指向并跟踪观测的天文目标。方位机构采用轴承驱动方式，俯仰机构采用高精度的低间隙丝杠结构。天线反射体由主反射体、副反射体和换馈机构组成，副反射体和换馈机构位于主反射体的下部，是下偏置馈电结构。不同频段的馈源集成在换馈机构上，换馈机构可将每个观测馈源精确切换到副反射面的焦点。

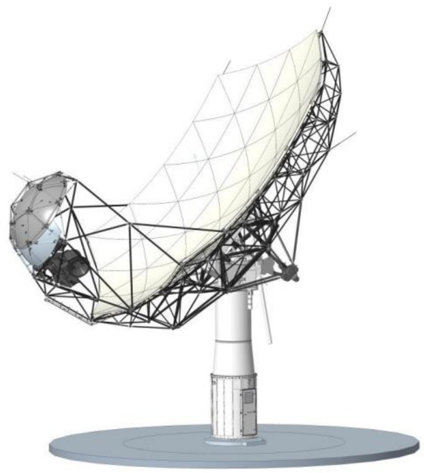


图 1 SKA 望远镜天线

Fig.1 Square kilometer array telescope antenna

天线的结构传动与伺服控制部分共同实现望远镜的各种观测模式及高精度指向跟踪。由于 SKA 阵列望远镜灵敏度极高，需对控制系统进行了电磁兼容分析，完成伺服系统的高电磁屏蔽设计。

## 2　望远镜天线伺服控制系统设计

为实现望远镜系统的观测，伺服控制系统主要目标和功能是接收观测控制命令，对天线运行进行管理控制[5][6]；通过接收上位机监控系统 LMC(local monitor control)输出的观测目标轨迹数据，引导天线指向目标；对天线的控制环路进行控制器设计和校正；对伺服控制系统的部分参数和故障进行监控诊断；建立指向模型，对系统固有误差进行修正，保证系统的指向精度。为实现以上应用目标和功能，伺服系统设计主要包括硬件系统设计、软件设计、数学模型建立及控制算法设计与实现。

### 2.1 系统硬件设计与组成

为实现观测对伺服控制系统的要求，天线方位轴设计采用双机驱动，以消除齿轮的齿隙误差[7]。俯仰轴采用滚珠丝杠驱动系统。方位轴和俯仰轴电机根据控制指令驱动行星齿轮箱，进而带动方位轴齿轮或俯仰轴滚珠丝杠运行，驱动天线转动。驱动单元主要包括：方位、俯仰与换馈机构的电机和驱动器，方位锁定装置的电机和驱动器；码盘单元将方位、俯仰和换馈机构的角位置反馈至控制器。测量装置包括倾斜仪、功率监视器等。各轴的驱动器和控制设计基于 Rexroth 平台，通过 SERCOS 总线与控制器通信，系统原理如图 2 所示。

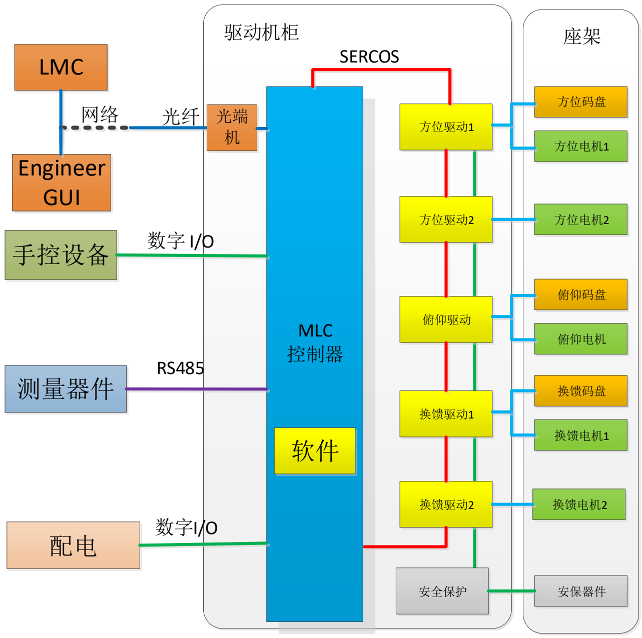



图 2 控制系统结构框图

Fig.2 Structure diagram of control system

控制软件嵌入在运动控制器 MLC（motion logic control）中，是天线自动监测、运动控制和数据处理的核心，MLC 负责协调和控制天线的整体运行，完成相应的指向与跟踪指令。天线配置了运动限位和急停装置、限位装置。LMC 计算机将远程控制命令发送至 MLC。控制器通过 SERCOS 总线连接各个驱动器，利用指令数据和位置输入完成位置闭环，向各个驱动器发送控制指令，同时接收各驱动器与电机的状态信息。驱动器接收到控制指令后，将控制指令转换为驱动信号，驱动电机带动天线指向目标。

天文观测过程中，控制系统的主要功能就是根据目标轨迹数据，控制天线方位轴和俯仰轴的转动，使其对特定天文目标的指向与跟踪。换馈机构依据天文目标的信号频率，选择合适的馈源切换到反射面焦点位置，完成观测信号接收。

## 2.2 软件系统设计

天线控制软件运行在 MLC 上，采用结构文本和梯形图作为编程语言。控制软件是天线运行时的自动监控、控制和数据处理中心，结构如图 3 所示。SKA 天线控制系统的控制软件主要有 4 个模块：基本功能、运动控制、PTP/NTP 授时和远程控制功能。

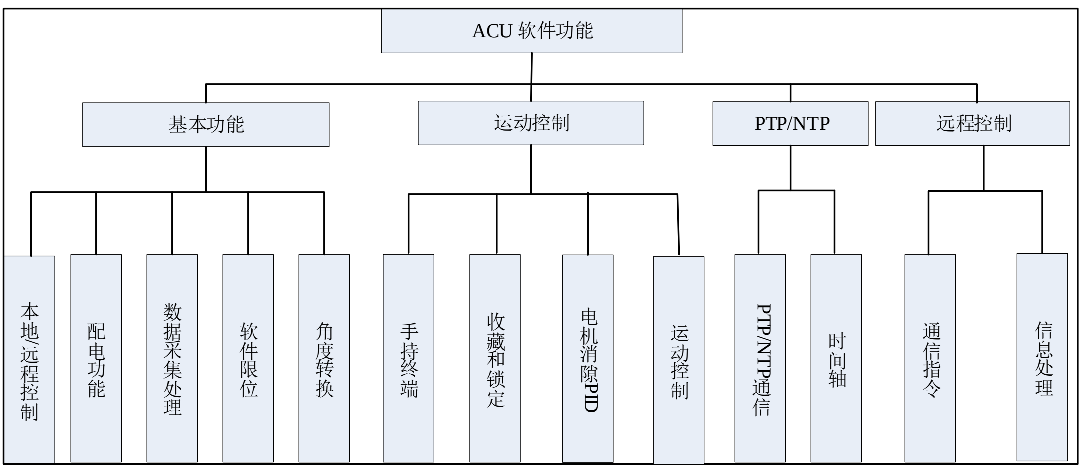



图 3 SKA 控制软件的功能结构图

Fig.3 Functional diagram of SKA control system

软件实现本地/远程控制模式的选择，实现天线方位轴、俯仰轴和换馈机构的顺/逆时针转速控制；实时采集天线方位轴、俯仰轴和换馈机构电机的运行数据，包括电流、转矩、电机温度和跟踪误差等；完成天线的位置伺服闭环，进行实时数字校正与补偿，减小速度和加速度引起的动态滞后误差；接收传感器数据并修正天线的指向模型；完成天线方位轴和换馈机构的双机消隙；控制和驱动天线的收藏锁定机构，完成天线的收藏锁定操作；与 PTP/NTP 服务器连接，实现时间同步和目标轨道的精密跟踪。

## 2.3 天线控制模式

天线的方位和俯仰控制与运行软件具有多种工作模式，模式之间的关系和切换如图 4 所示。

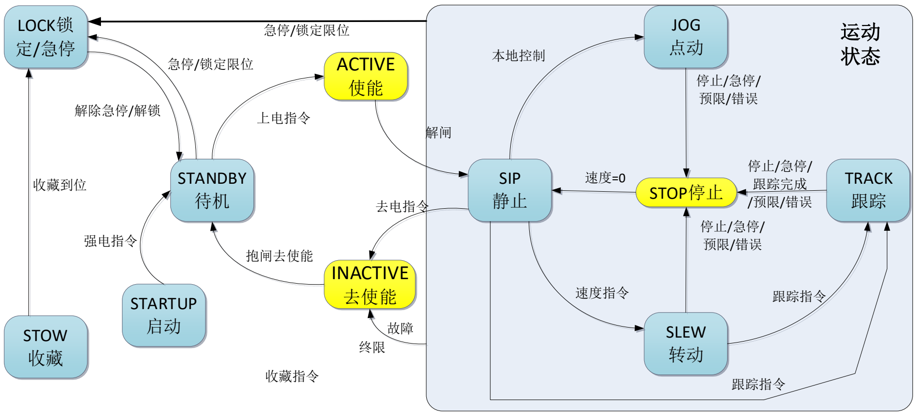



图 4 控制系统的状态和工作模式

Fig.4 Working mode and states of control system

启动模式为系统开机后的默认运行方式。当天线处于启动模式下时，直流母线为非工作状态，接收到控制发送的直流母线上电指令后，控制系统转为待机模式。待机模式为天线控制系统开机或故障模式返回的默认运行方式。静止模式启动时，方位轴和俯仰轴的驱动器使能，制动器解闸，天线停止在当前位置。跟踪模式是一种位置闭环控制模式，控制系统可以根据给定的轨道数据，控制天线以最高的位置精度跟踪指定目标。收藏模式下 MLC 自动控制天线转动至预设的锁定位置。锁定/急停模式下控制系统将禁用驱动器并制动抱闸。当锁定状态解除后，需要复位清除锁定状态互锁，系统转入待机状态。收藏和锁定模式是收藏和锁定的联合状态。使能（活动）、去使能（非活动）和停止是三个过渡状态。使能状态是指天线从待机到停止的过渡状态，当控制系统处于使能状态时，天线的驱动器被使能且制动器解闸。

## 2.4 天线数学模型建立

根据刚体的运动方程和柔性结构动力学的数学模型，结合 SKA 望远镜天线结构特点，采用模态坐标系下的状态空间方程来建立天线结构系统的数学模型[8-9]。

天线系统的状态空间方程 $G$ 可以分解为刚体模态 $G_r$ 和柔性模态 $G_f$ 的叠加，方程表示为

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{G}_r + \boldsymbol{G}_f \tag{1}$$

定义刚体运动的状态变量和柔性体运动的状态变量为

$$\boldsymbol{x}_f = \begin{Bmatrix} q_{mf} \\ \dot{q}_{mf} \end{Bmatrix}、\ \boldsymbol{x}_r = \begin{Bmatrix} q_{mr} \\ \dot{q}_{mr} \end{Bmatrix}$$

根据相关计算可得刚体模态的结构的状态空间方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mf} \\ \ddot{q}_{mr} \\ \ddot{q}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{\Omega}^2 & \boldsymbol{0} & -2\boldsymbol{Z\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{mr} \\ q_{mf} \\ \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\Phi}_r^T \\ \boldsymbol{\Phi}_f^T \end{bmatrix} f \tag{2}$$

$$\begin{bmatrix} q \\ \dot{q} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_r & \boldsymbol{\Phi}_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\Phi}_r & \boldsymbol{\Phi}_f \\ 0 & -\boldsymbol{\Phi}_f \boldsymbol{\Omega}^2 & 0 & -2\boldsymbol{\Phi}_f \boldsymbol{Z\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{mr} \\ q_{mf} \\ \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mf} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\Phi}_r \boldsymbol{\Phi}_r^{\boldsymbol{T}} + \boldsymbol{\Phi}_f \boldsymbol{\Phi}_f^{\boldsymbol{T}} \end{bmatrix} f \tag{3}$$

式（3）进一步可以构造为以下形式

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mf} \\ \ddot{q}_{mr} \\ \ddot{q}_{mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{I} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & -\boldsymbol{\Omega}^2 & \boldsymbol{0} & -2\boldsymbol{Z\Omega} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{mr} \\ q_{mf} \\ \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{\Phi}_r^{\boldsymbol{T}} \\ \boldsymbol{\Phi}_f^{\boldsymbol{T}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \cdots & k_i & \cdots & \boldsymbol{0} \end{bmatrix}^T f \tag{4}$$

$$y = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} & \cdots & 1 & \cdots & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Phi}_r & \boldsymbol{\Phi}_f & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{mr} \\ q_{mf} \\ \dot{q}_{mr} \\ \dot{q}_{mf} \end{bmatrix} \tag{5}$$

根据天线结构的三维设计模型，通过 ANSYS 软件建立对应的有限元模型计，模型输入为电机转矩，模型输出为电机轴速度。初步获得模型为高阶模型，根据 Gram 向量分析，进行了模型降阶，获得了天线的数学模型。

## 2.5 控制策略与算法

驱动器基于三环进行运动控制[10]，如图 5 所示。为提高控制精度，控制器还采用了附加位置指令和转速指令的复合控制算法。控制器通过 PTP 服务器进行时间同步，并根据虚拟时间轴保持精确的时间同步。根据优先级和实时性要求，控制器中任务周期的循环时间为 1~20 ms。

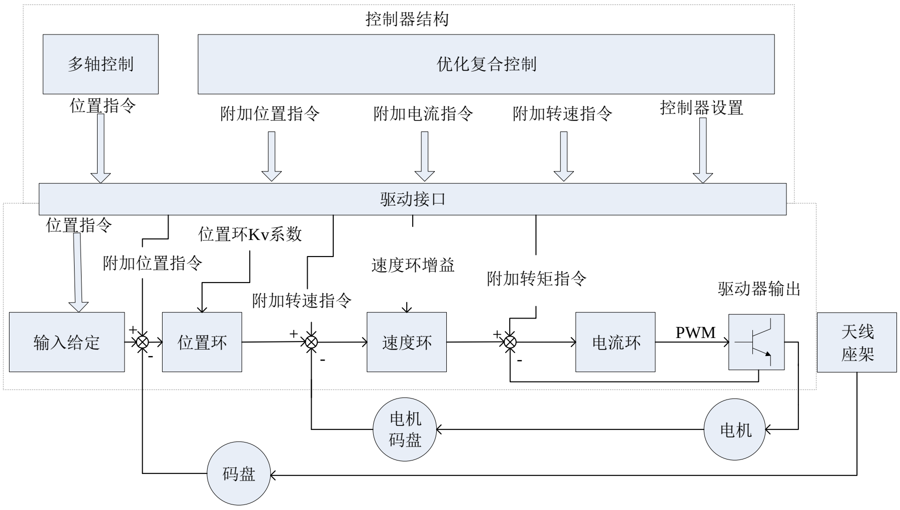



图 5 系统控制回路结构图

Fig.5 Structural diagram of system control loop

天线的环路控制使用了 Rexroth 驱动器的位置、速度、电流串联控制环路，控制器接收到运动控制指令后，将命令信息转化位置角度后下发给驱动器，驱动器根据角度输入信息，在驱动器内部分解为速度环指令，再经过电流环控制电机转动，实现了三个环路在驱动器的闭环控制。由于 SKA 的主要工作方式为轨迹跟踪，即 MLC 接收网络下发的观测轨迹，为了提高控制精度以及速度加速度的跟踪误差，需对引导轨迹的曲线进行任务规划。规划方式通过观测轨迹的五点对轨迹曲线进行拟合，具体可以描述为

$$
\begin{aligned}
S_0 &= c_0 + c_1 t_0 + c_2 t_0^2 + c_3 t_0^3 + c_4 t_0^4 \\
S_1 &= c_0 + c_1 t_1 + c_2 t_1^2 + c_3 t_1^3 + c_4 t_1^4 \\
S_2 &= c_0 + c_1 t_2 + c_2 t_2^2 + c_3 t_2^3 + c_4 t_2^4 \\
S_3 &= c_0 + c_1 t_3 + c_2 t_3^2 + c_3 t_3^3 + c_4 t_3^4 \\
S_4 &= c_0 + c_1 t_4 + c_2 t_4^2 + c_3 t_4^3 + c_4 t_4^4
\end{aligned} \tag{6}
$$

式中：$t_0$—$t_4$ 为 5 个引导序列点对应的时间；$S_0$—$S_4$ 为 5 个引导序列点的位置角度。通过求解以上多项式方程可以拟合规划轨迹曲线

$$S = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4 \tag{7}$$

将轨迹计算结果输入到控制器运动 1 ms 任务周期，就可以在跟踪过程中将整个轨迹离散成为速度和加速度均连续的轨迹序列，提高轨迹的平滑性和精度，减少由于轨迹点不连续引起的速度和加速度的突变。

由于望远镜的转动惯量大，在跟踪过程中尤其是加减速时的存在较大动态滞后的情况，为提高系统的动态控制精度，因此对传统 PID 控制算法[11]进行了优化，改进方式是在速度环路的输入上叠加部分复合前馈，以达到减小动态滞后的效果[12]，叠加的复合输入表达式可以写描述为

$$V = V_{out} + KV_t \qquad (|V| \le V_{Max}) \tag{8}$$

式中：$V_t = c_1 + 2c_2 t + 3c_3 t^2 + 4c_4 t^3$；$V_{out}$ 为位置环路根据引导角和当前天线角度差根据 PI 得到的位置环路的输出；$K$ 为复合前馈系数；$V$ 为速度环路的输入，即在原有速度指令的基础上叠加复合控制速度，此速度不超过最大的要求速度 $V_{Max}$。$K$ 参数的选择对控制回路影响起着关键作用，实验研究过程中根据观测轨迹的特点参考了多种整定方式[13]，优化出了一套完整的参数选择方法。

## 3 系统测试与验证

系统分析和设计结束后，对系统硬件进行了组装和调试，在电磁兼容实验室进行完整的电磁辐射性能测试。完成后的天线及控制设备照片如图 6 所示；设备的软硬件在测试场及南非 SKA 站址完成了实际运行与测

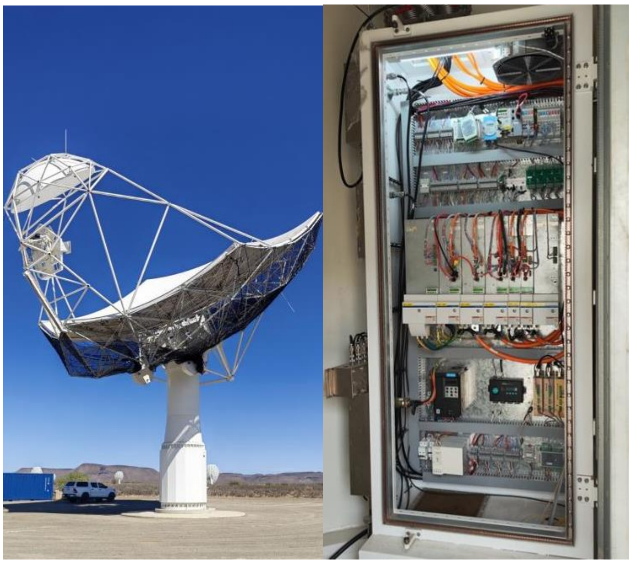


图 6 天线系统及控制机柜实物图

Fig.6 Photo of Antenna and control system cabinet

试[14]，同上位机软件进行了互联和轨迹下发及模拟观测实验。

系统观测实验过程中，对软硬件系统功能进行了综合测试，主要功能均已将满足 SKA 天文观测需求。性能测试方面主要对控制跟踪性能进行了测试，将轨迹规划及前馈控制加入到实际的天线控制当中，对 SKA 天线观测要求的 0.5 度和 10 度阶跃的稳定时间进行验证，观测要求系统阶跃响应稳定时间要小于 5 s 和 12 s。将优化的复合控制系统性能与传统控制方法进行了比较，主要测试指标结果如表 1 所示：

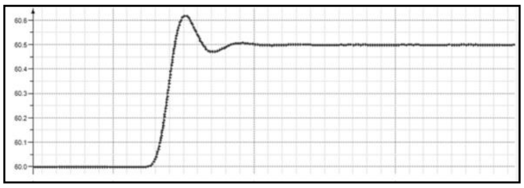
表 1 测试结果

Table 1 Control system test result

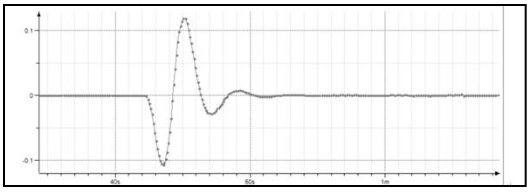
| 测试项目 | 控制算法 | 超调量 | 误差 RMS | 稳定时间/s | 是否满足技术要求 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.5 度阶跃 | PID 算法 | 0.140 | 0.057 | 6.70 | 否 |
| | 轨迹规划复合控制 | 0.002 | 0.002 | 4.08 | 是 |
| 10 度阶跃 | PID 算法 | 0.750 | 1.690 | 14.60 | 否 |
| | 轨迹规划复合控制 | 0.150 | 0.132 | 11.25 | 是 |

图 7 为不同控制算法的阶跃响应和误差曲线，从曲线上可知，采用传统 PID 控制算法，不做轨迹规划和复合控制的情况下，阶跃的超调量较大（超过 20%）且要多个震荡周期才能稳定在目标位置，从跟踪误差曲线可知，在阶跃的加速段到停止段，有较大的位置滞后，0.5 度和 10 度阶跃的稳定时间均无法满足技术要求。采用复合控制增加速度前馈并对参数进行整定后，可以明显的提高天线的动态精度，减小误差；超调量、稳定时间等指标均满足观测要求。

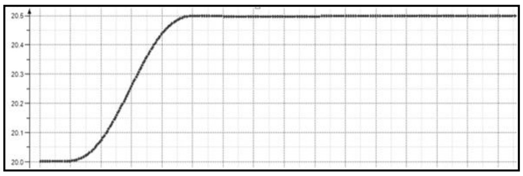
采用了射电源法对天线的指向精度进行了测试[15]，对仙后座等射电源进行扫描，记录功率最大值和对应的方位和俯仰角，将其与精密星历计算得到的命令方位/俯仰角分别进行比较，得到单点误差值，重复以上测试，将得到的试数据进行统计计算[16]，得到望远镜系统的指向误差为 32.53 角秒，满足观测的预期目标。



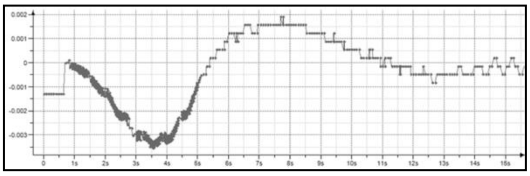
a)0.5 度阶跃曲线（PID）



b)0.5 度阶跃误差（PID）



c)0.5 度阶跃曲线（复合控制）



d) 0.5 度阶跃误差（复合控制）

图 7 系统阶跃测试和误差曲线

Fig.7 System step response and error curve

## 4 结 语

伺服控制系统是 SKA 射电望的关键部分，根据 SKA 工程的建设和观测需要，本文为该系统设计了一套完

整的控制系统，根据观测要求和望远镜结构形式，确定了方位、俯仰、换馈等关键分系统驱动与控制模式。设计了嵌入式软件实现了望远镜综合管理和工作模式的切换。通过结构分析建立了控制系统的数学模型和指向模型；对控制环路算法进行了优化和修正，提高了系统的指向和跟踪精度；完成了软硬件测试，伺服性能、电磁兼容性均能满足 SKA 观测要求。目前该系统已在南非与望远镜其他分系统进行综合集成,将投入到天文观测中。本文设计方案和分析方法对其他望远镜系统的及深空探测系统的设计有一定参考价值。

目前本系统仅实现了单套设备观测运行，尚未对多套望远镜系统的协同观测进行完全测试。未来拟在南非 SKA 站址安装多套系统进行同步测试，不断解决多套系统共同运行遇到的新问题，以满足后期 2 500 套系统观测运行的需求；此外，还将长期测试伺服系统的电磁兼容可靠性，使控制系统长期可靠运行，保障天文观测数据不受其他因素影响和干扰。

参考文献/References:


[1] 刘爽,沈志强,安涛.国际天文大装置科学区域中心的建设与运行[J].天文学进展,2024,42(4):561-576.

LIU Shuang,SHEN Zhiqiang,AN Tao.Establishment and operation of the international scientific regional center for astronomical mega-facilities[J].Progress in Astronomy,2024,42(4):561-576.

[2] NIEHAUS H.SKAO Dish Structure Requirements Specification[R].[S.l.]:SKA observatory,2022.

[3] 刘佳,万继响,吴春邦,等.月基平方公里阵射电望远镜天线方案设想[J].中国空间科学技术(中英文),2025,45(2):88-93.

LIU Jia,WAN Jixiang,WU Chunbang,et al.Design of lunar based square kilometer array radio telescope antenna[J].Chinese Space Science and Technology,2025,45(2):88-93.

[4] RAHMAT-SAMII Y,HAUPT R.Reflector antenna developments:A perspective on the past,present and future[J].IEEE Antennas and Propagation Magazine,2015,57(2):85-95.

[5] GAWRONSKI W K.Advanced structural dynamics and active control of structures[J].IEEE Transactions on Automatic Control,2005.DOI:10.1109/TAC.2005.843842.

[6] GAWRONSKI W,SOUCCAR K.Control systems of the large millimeter telescope[J].IEEE Antennas and Propagation Magazine,2005,47(4):41-49.

[7] GAWRONSKI W.Antenna Linear-Quadratic-Gaussian(LQG) Controllers:Properties,Limits of Performance,and Tuning Procedure[R].California:Jet Propulsion Laboratory,California Institute of Technology,2004.

[8] 严粤飞,王从思,李帅,等.大型射电望远镜天线发展动态及机电耦合应用[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2022.DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0121.

YAN Yuefei,WANG Congsi,LI Shuai,et al.Development of large-aperture radio telescopes and applications of coupled structural-electromagnetic theory[J].Scientia Sinica Physica,Mechanica & Astronomica,2022. DOI: 10.1360/SSPMA-2022-0121.

[9] 张坤.大型反射面天线指向性能的精确建模与控制补偿[D].西安:西安电子科技大学,2023.

ZHANG Kun.Accurate Modelling and Control Compensation of the Pointing Performance of Large Reflector Antenna[D].Xi’an:Xidian University,2023.

[10]童紫琛,许谦,薛飞.射电望远镜伺服系统驱动电机的同步控制[J].天文学进展,2025,43(2):309-319.

TONG Zichen,XU Qian,XUE Fei.Synchronous control of drive motor of radio telescope servo system[J].Progress in Astronomy,2025,43(2):309-319.

[11]郭绪猛.大惯量天线伺服跟踪复合控制技术[J].电机与控制应用,2020,47(8):52-56.

GUO Xumeng.Servo tracking technology based on compound control of large inertia antenna[J].Electric Machines & Control Application,2020,47(8):52-56.

[12]王彬兰,赵汝双,岳友岭.射电望远镜阵列远程控制系统的设计与实现[J].计算机应用与软件,2025,42(8):20-27.

WANG Binlan,ZHAO Rushuang,YUE Youling.Design and implementation of remote control system for radio telescope array[J].Computer Applications and Software,2025,42(8):20-27.

[13]陈兴,赵鞭,刘亚兵,等.深空探测天线自抗扰控制技术研究[J].无线电工程,2021,51(2):149-155.

CHEN Xing,ZHAO Bian,LIU Yabing,et al.Research on active disturbance rejection control technology of deep

space exploration antenna[J].Radio Engineering,2021,51(2):149-155.
[14]班友,刘源杰,王娜,等.射电望远镜天线主反射面面形测量方法综述[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2024.DOI: 10.1360/SSPMA-2023-0246.

BAN You,LIU Yuanjie,WANG Na,et al.Review of measurement methods for the main reflection surface of radio telescope antennas[J].Scientia Sinica Physica,Mechanica & Astronomica,2024. DOI: 10.1360/SSPMA-2023-0246.

[15]陈宝刚,夏豪杰,张进,等.大型望远镜指向精度的影响因素及综合修正模型研究[J].光学精密工程,2024,32(20):3017-3025.

CHEN Baogang,XIA Haojie,ZHANG Jin,et al.Research on factors influencing the pointing accuracy of large telescopes and the correction model[J].Optics and Precision Engineering,2024,32(20):3017-3025.

[16]杜永刚,王禺林,张文台.高精度跟踪指向技术研究现状及其展望[J].机械设计,2023,40(12):1-8.

DU Yonggang,WANG Yulin,ZHANG Wentai.Current research and prospect of high-precision tracking and pointing technology[J].Journal of Machine Design,2023,40(12):1-8.

**邮寄收件人信息：**

快递到付：石家庄市中山西路 589 号 中国电科五十四所天伺部 张强 邮编：050081，电话 13833124005

平邮：石家庄市中山西路 589 号 中国电科五十四所天伺部 张强 邮编：050081，电话 13833124005