

FAST 主反射面节点运动控制算法

孙 纯^{1 2} 朱丽春² 于东俊²

(贵州大学理学院¹, 贵阳 550025; 中国科学院国家天文台², 北京 100012)

摘 要 500 m 口径球面射电望远镜 FAST 的创新技术之一是主动反射面。2 300 个控制反射面运动的控制器在收到上位机发送的观测指令后,通过规划算法计算节点的目标长度,驱动电机运动。电机带动促动器丝杠伸缩,使得在照明口径内反射面由球面变成抛物面,实现反射面整网控制。对节点运动速率算法进行了优化,优化目标为在满足控制精度的前提下,选取适当的控制周期,使得电机的启停次数最少,减小电机磨损。为 FAST 主反射面控制选择何种电机提供参考。

关键词 FAST 控制器 控制算法 电机速率 电机启停次数

中图法分类号 P111.44; **文献标志码** A

500 m 口径球反射面射电望远镜——Five-hundred-meter aperture spherical telescope(FAST)将是世界上最大的单口径射电望远镜。其结构与美国的 Arecibo 望远镜相似。FAST 有别于 Arecibo 的创新点之一是其反射面是可动的^[1]。FAST 主反射面整体索网支撑,由 4 400 块三角形反射面单元铺设在整体索网上,整体索网有 2 300 个索网节点连接^[2]。天文观测时,根据不同的观测源,在上位机的控制界面中输入不同的参数并发出命令给控制器,控制器通过自带的算法计算每一时刻节点的目标长度。目标长度与当前长度有变化时,控制器给出指令,电机运动带动索网节点下方的下拉索伸缩,使得反射面在照明区内由球面变成抛物面。为验证整体方案的可行性,在密云建造了 30 m 缩尺模型^[3]。此模型中使用的控制算法是恒速控制,通过简单控制电机起停和运动方向完成控制。恒速控制优势是电机价格低,控制算法简单;代价是电机启停次数多、磨损大。在 FAST 原型反射面变形时,将有两千多台电机驱动节点运动,电机寿命成为影响望远镜可靠性的关键因素。由于球面各向同性,分析其中一个节点的运动特性可代表所有节点运动状态。本文目标是规划控制算法,优化下拉索出索速率。在满足控制精度的前提下电机的启停次数最小、减

小磨损,为 FAST 反射面控制选择何种电机提供理论依据。

1 FAST 主反射面节点控制要求及基础参数确定

按天文观测目的不同,天文观测分换源和跟踪观测两种工况^[4]。

运动范围: 节点沿径向运动最大行程 1 200 mm,实现抛物面变形时最大行程 960 mm。

速度要求: 为达到 10 min 换源的目标,抛物面与球面的径向最大偏移为 960 mm,最大换源速度为 $960/600 = 1.6 \text{ mm/s}$ 。因此电机出索最大速率不小于 1.6 mm/s ,换源过程不要求节点高精度运行;观测时,地球自转每小时 15° ,节点运动速率比换源时低,最大速率约 0.7 mm/s 。

精度要求: 变形抛物面的表面精度要求达到 RMS 5 mm,分配给节点动态测量与控制误差 RMS 2 mm,促动器运动精度 0.25 mm,节点测量频率 0.02 Hz,由于节点测量频率低,基本处于半开环状态,节点运行精度主要靠控制和执行保证,控制算法的优劣直接影响望远镜总体性能,按分配指标节点测控达到 RMS 2 mm,考虑到其他因素及三分之一原则节点控制理论误差限定为 0.7 mm。

控制周期: 任一节点从进入有效照明口径到离开经历的最长时间为 $60^\circ/15^\circ = 4 \text{ h}$,双边对称,分析时长选为 2 h 即 7 200 s。理论上控制周期越小带来

2011 年 11 月 3 日收到,11 月 16 日修改
国家自然科学基金 (10878017) 资助

第一作者简介:孙 纯,女,硕士,研究方向:射电天文技术,E-mail: sun-chun09@126.com。

的量化误差越小,但需付出其它代价,因此需优化控制周期。观测时节点运动最大速率 0.7 mm/s,如果控制周期设定为 2 s,一个周期运动带来的量化误差极限值为 1.4 mm/s,控制周期为 1 s 时,极限误差为 0.7 mm/s,因此将控制周期暂定为 1 s。

2 FAST 主反射面节点径向位置变化规律

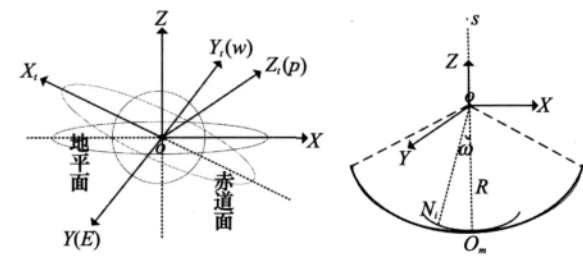


图 1 控制坐标系

时角坐标系 $\{x_t, y_t, z_t\}$,其中 z_t 指向北天极, y_t 指向西点, x_t 和 y_t 满足左旋规则。地平直角坐标系 $\{x, y, z\}$,其中 z 指向天顶, x 指向北点, y 指向东点, O 为地球球心也为地平直角坐标系的原点。

射电源的时角坐标表达式:

$$\begin{cases} x_t = r_{\text{sky}} \cos \delta \cos H \\ y_t = r_{\text{sky}} \cos \delta \sin H \\ z_t = r_{\text{sky}} \sin \delta \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 r_{sky} 是 天 球 半 径 δ 是 赤 纬 H 是 时 角。

$$H = S_0 + (t - 8)(1 + \mu) + \lambda - \alpha \quad (2)$$

式(2)中 S_0 为当地时间为 0(h) 时所对应的恒星时,

t 是北京时 $\mu = \frac{1}{365.2422}$ λ 为观测站的地理经度, α 为天体的赤经。

由图 1 及地平坐标系与时角坐标系的关系有:

$$\begin{cases} x = r_{\text{sky}}(-\sin \varphi \cos \delta \cos H + \cos \varphi \sin \delta) \\ y = -r_{\text{sky}} \cos \delta \sin H \\ z = r_{\text{sky}}(\cos \varphi \cos \delta \cos H + \sin \varphi \sin \delta) \end{cases} \quad (3)$$

设某时刻抛物面顶点 O_m 的球面坐标为 $(r_{om}, \theta_{om}, \beta_{om})$,由于抛物面顶点始终在球面上,所以 $r_{om} = -R$ 。由式(3)及地平坐标与球坐标的关系得到抛物面顶点 O_m 的球面坐标为:

$$\begin{bmatrix} r_{om} \\ \theta_{om} \\ \beta_{om} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \\ \cos^{-1}\left(\frac{z}{r}\right) \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R \\ \cos^{-1}(\cos \varphi \cos H \cos \delta + \sin \varphi \sin \delta) \\ \text{tg}^{-1}\left(\frac{-\cos \delta \sin H}{-\sin \varphi \cos H \cos \delta + \cos \varphi \sin \delta}\right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

在地平直角坐标系 $\{x, y, z\}$ 中,抛物面顶点在球冠中心时,用球坐标表示的抛物面方程为:

$$r^2 \sin^2 \theta + 4F r \cos \theta - 4FR = 0 \quad (5)$$

式(5)中 F 为焦距等于 $0.467R$, R 是曲率半径为 300 m [4]。

由式(5)可得以球冠中心为顶点的抛物面上任一点的球面坐标为:

$$r = \frac{-2F \cos \theta + 2 \sqrt{F^2 \cos^2 \theta + FR \sin^2 \theta}}{\sin^2 \theta} \quad (0 \leq \beta \leq 2\pi) \quad (6)$$

图 1 中抛物面上任意节点 N_i 与抛物面顶点 O_m 夹角为 ω , ω 为极角 [5]。当抛物面顶点在偏离球冠中心的时,理想抛物面上任意节点 N_i 对应的径向半径为:

$$r = \frac{-2F \cos \omega + 2 \sqrt{F^2 \cos^2 \omega + FR \sin^2 \omega}}{\sin^2 \omega} \quad (7)$$

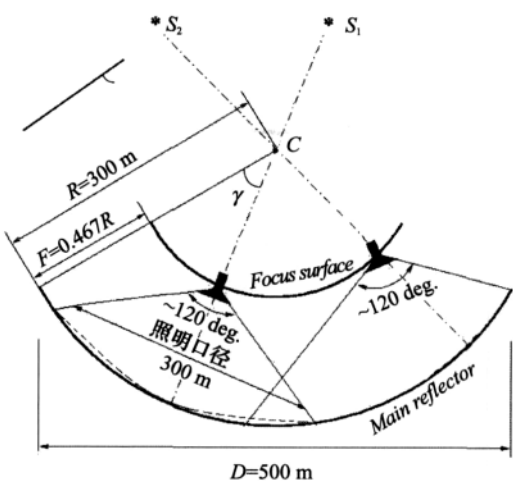


图 2 FAST 微波光学图 [5]

由图 2 可得,抛物面上的节点与抛物顶点最大夹角 $\gamma = \sin^{-1}(D/2/R) = 30^\circ$,其中照明口径 $D = 300 \text{ m}$ 。 $\cos(\omega) \leq \cos(\gamma)$,由公式(7)分母不为零,有 $\omega = (0, 30^\circ]$ 。

则节点 N_i 从球面沿径向移动到当前理想抛物

面的距离为:

$$\Delta r_i = R - r_i \tag{8}$$

节点径向长度随时间的控制量为:

$$\delta_i = r_t - r_{t-T} \tag{9}$$

式(9)中 T 为控制周期 t 为当前时刻。

由于地球自转每小时 15° ,在理想状态下,极角 ω 与时间 t 的关系为:

$$\omega = 15(^{\circ}/h)t \tag{10}$$

时间范围(0,7 200 s)

把式(10)代入式(7),可得抛物面上所有节点的径向长度随时间的变化关系,图3所示。

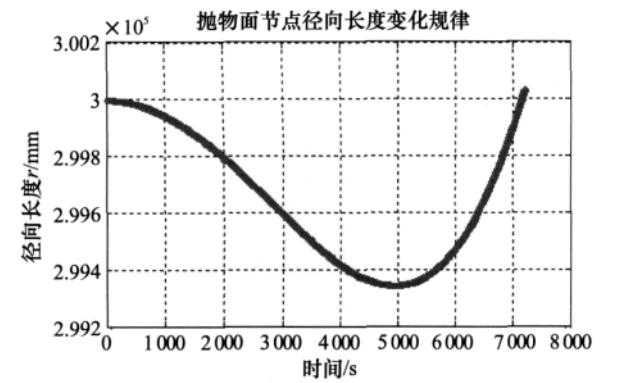


图3 抛物面上节点长度随时间的变化关系

3 FAST主反射面节点运动速率算法

反射面的节点速度由换源速度和跟踪速度组成。换源速度比跟踪速度大,当完成一次换源后,节点的运动速度由换源速度转为跟踪速度^[4]。

由 $v = dr/dt$ (mm/s)对式(7)求导,得到抛物面上所有节点的跟踪速度随时间 t 的变化关系,图4所示。图4中可得抛物面节点最大跟踪速度为0.699 2 mm/s。

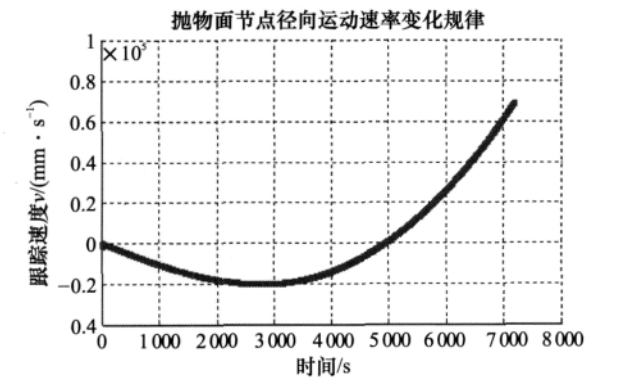


图4 抛物面上节点的跟踪速度随时间的变化关系

4 节点控制速率及算法优化

4.1 分析方法及处理流程

分析约定:设节点理论运行速率为 V ,节点调整时需要的运行速率为 v_temp ,控制周期为 T ,误差界 $Limit_dr$,设定电机速率为 set_v ,电机起停次数 $break_n$,控制误差 RMS_R ,电机停止周期数量 k_0 ,电机满周期运行数量 k_1 ,单周期内停止周期数 k_n 。

分析方法:设定运行时长 $t = 7\ 200$ s、控制周期 $T = 1$ s和误差界 $Limit_dr = 0.7$ mm,计算出每个时刻 i ,节点的径向长度 $r(i)$ 。优化电机输出速率,优化目标为满足误差要求的基础上电机起停次数最少。流程如图5。

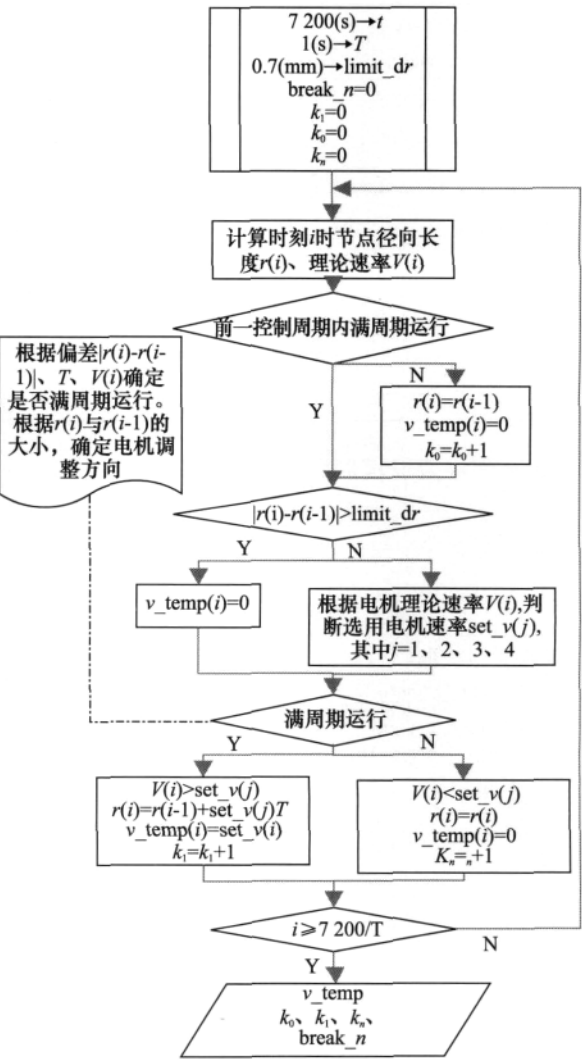


图5 算法流程图

4.2 恒速控制速率优化

如前文所述,分析时长为 7 200 s,Limit_dr = 0.7 mm,本节对 $T=0.5\text{ s}$ 、 1 s 、 1.5 s 及 2 s 进行初步考虑。前文分析得到最大换源运动速率为 1.6 mm/s ,观测时最大跟踪速率为 0.7 mm/s ,如恒定调整速率大于 1.6 mm/s 超出电机运行能力,小于 0.7 mm/s 达不到运动精度,理论上恒速越接近瞬时速率起停次数会越少,因此观测运行时非零调整速率 set_v,本文只分析 0.7 mm/s 和 1.6 mm/s 两种速率。经分析对比可确定如果采用恒速控制 $T=1\text{ s}$,set_v = 0.7 mm/s 最优,相同条件下采用 0.7 mm/s 速率较 1.6 mm/s 速率电机起停次数降低 29%。

表 1 电机起停次数与控制周期和运动速度的关系

T/s	Limit_dr/mm	set_v/(mm·s ⁻¹)	break_n	RMS_R/mm	k_0	k_1	k_n
0.5	0.7	1.6	1 631	0.384 5	12 437	329	1 631
1	0.7	1.6	1 563	0.381 7	5 634	0	1 563
1.5	0.7	1.6	1 545	0.359 5	3 252	0	1 545
2	0.7	1.6	1 545	0.359 5	2 112	0	1 485
0.5	0.7	0.70	1 124	0.371 1	10 122	3 151	1 124
1	0.7	0.70	1 110	0.347 8	4 658	1 429	1 110
1.5	0.7	0.70	1 507	0.356 3	3 215	75	1 507
2	0.7	0.70	1 458	0.336 6	2 112	0	1 458

4.33 观测中变速控制分级优化

当分析时长为 7 200 s, $T=1\text{ s}$ 时,对节点理论调整速率进行统计结果如表 2 所示。

表 2 理论速率分布统计

运动速率区间/(mm·s ⁻¹)	0—0.1	0.1—0.2	0.2—0.3	0.3—0.4	0.5—0.6	0.6—0.7
分布	1 987	3 170	962	303	278	241

从结果看,大部分电机速率小于 0.3 mm/s ,在进行变速控制时无需无级变速,通过归一化处理进行有级变速控制。经细分统计速率小于 0.25 的点数为 5 956 约 6 000 点, $0.25\text{—}0.7$ 之间约 1 200 点。初步规划电机速率分级为: 0 、 0.25 、 0.7 、 1.6 (用于换源),观测时非零电机运行速率为两级 0.25 、 0.7 ,分析结果显示采用四级速率运动的启停次数相对于以 0.7 mm/s 恒速控制时,起停次数降低了 38%。

表 3 启停次数与速率级数和出索速率关系

T/s	Limit_dr/mm	set_v/(mm·s ⁻¹)	break_n	RMS_R/mm	k_0	k_1	k_n
1	0.7	1.6	1 563	0.381 7	5 634	0	1 563
1	0.7	0.70	1 110	0.347 8	4 658	1 429	1 110
1	0.7	0.25 0.70	692	0.351 7	3 118	3 387	692

4.4 观测中变速控制分级优化基础上采用超调控策略

由于主反射面控制中测量提供的反馈信息频率是 0.02 Hz ,基本处于开环控制状态,节点运行精度与运行状态与算法密切相关,为减少电机起停次数,调整过程中根据节点运行轨迹,可采用预测超调策略。控制周期为 1 s ,节点观测运动最大速率为 0.7 mm/s ,控制中可提前执行下一周期半周期的执行量,可能带来的极限误差为 0.35 mm ,由于大部分运行速率小于 0.25 mm/s ,因此超调带来的误差有限。分析结果表明,采用超调策略没有引入误差,对降低电机起停次数有一定的效果,起停次数降低了 17%。

表 4 常规与超调情况下启停次数与速率级数和出索速率关系

策略	T/s	Limit_dr/mm	set_v/(mm·s ⁻¹)	break_n	RMS_R/mm	k_0	k_1	k_n
常规	1	0.7	1.6	1 563	0.381 7	5 634	0	1 563
	1	0.7	0.70	1 110	0.347 8	4 658	1 429	1 110
	1	0.7	0.25 0.70	692	0.351 7	3 118	3 387	692
超调	1	0.7	0.25 0.70	598	0.334 4	3 146	3 453	598
	1	0.7	0.25 0.67	574	0.334 7	3 115	3 508	574

5 总结与结论

- (1) 在运行能力达到要求的基础上,节点运行精度仅与误差限相关,对控制周期及速率不敏感;
- (2) 电机运行速率是电机起停频率的敏感参数,优化结果显示当采用恒速控制时,控制周期为 1 s ,电机运行速率为 0.7 mm/s 时起停次数最少,相对 1.6 mm/s 时电机起停次数降低了 29%;
- (3) 当观测时采用两级非零运行速率(0.25 mm/s 、 0.7 mm/s)时,可降低电机起停次数,相对于以 0.7 mm/s 恒速控制时,起停次数降

低了 38% ;

(4) 在两级控制基础上采用超调算法进行控制 ,可继续降低起停频次 ,当运行速率为(0. 25 mm/s 0. 67 mm/s) 时 ,电机起停频次相对常规两级调整降低 17% ;

通过优化控制算法 ,规划电机出索速率 ,可达到简化驱动和大大降低电机起停频次目的 ,优化后电机起停次数相对于开始 1. 6 mm/s 恒速运行工况 ,起停频次降低了 63% ,为将来 FAST 反射面控制策略和电机选型提供了重要的参考意见。

参 考 文 献

1 Qiu Y H. A novel design for a giant Arecibo-type spherical radio telescope with an active main reflector. MNRAS ,1998; 301: 827—830

2 Nan R D , Li D , Jin C J , *et al.* The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project. International Journal of Modern Physics D 2011; 20(6) : 989—1024

3 张志伟. 基于 CAN 总线技术的天文望远镜索网促动控制系统的研制. 硕士学位论文. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院 2006; 14—15

4 FAST 系统. FAST 初步设计报告. 北京: 中国科学院国家天文台 , 2006: 6—21

5 南仁东. 500 米球反射面射电望远镜 FAST. 中国科学 ,G 辑 物理学 力学 天文学 2005; 35(5) : 449—466

Control Algorithm with Node Movement of the
Active Reflector for the FAST

SUN Chun^{1 2} ZHU Li-chun² ,YU Dong-jun²

(College of Science ,Guizhou University¹ ,Guiyang 550025 ,P. R. China;

National Astronomical Observatories ,Chinese Academy of Sciences² ,Beijing 100012 ,P. R. China)

[Abstract] The active reflector is one of innovation on five hundred meter aperture spherical telescope-FAST. 2300 controllers control movement of the reflector. When controllers receive observed commands from PC ,target length of node is calculated through the planning algorithm. Controller actuates the motor ,it makes lead screw elongation or contraction so that the reflector from sphere into paraboloid within the illumination area , achieves whole network control. Node motor velocity and control algorithm are optimized. The optimized target is under the control accuracy ,select the appropriate control period ,reduce start number of motor ,and thereby reduce motor wear. A available method on selecting motor type for the FAST will be provided.

[Key words] FAST control of the active reflector control algorithm motor velocity start number of motor