

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.z1.11

QTT 天线结构挑战与进展

许 谦, 王 娜

(中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 新疆拟建 110 m 全向可转动望远镜, 亦称奇台射电望远镜 (QiTai radio Telescope, QTT), 其高灵敏度、高指向精度要求使其在结构上面临诸多挑战。如结构形式、重量与刚度、最佳电性能与天线精度、天线轨道、反射面分块等, 如何在建设之前解决关键技术问题至关重要。列举了 QTT 天线结构关键技术挑战, 包括结构形式、反射面分块、焊接轨道, 并对目前已有进展进行了总结。

关 键 词: 射电望远镜; 天线结构; 反射面分块; 整体轨道

中图分类号: P111.44

文献标识码: A

1 引 言

中国科学院新疆天文台拟在新疆奇台县石河子村建造性能指标优越、工作状态稳定、观测效率高的 110 m 口径的全方位可转动射电望远镜 (QTT)^[1]。项目建成投入使用后, 将超越现有美国 100 × 110 m 的 GBT (Green Bank Telescope)^[2] 和德国 Effelsberg 100 m 射电望远镜^[3], 成为世界最大的地面可动射电望远镜。通过本项目的建设, 将使我国大型射电望远镜研制达到国际领先水平; 将使我国天文和天体物理学研究水平跨入国际最前沿, 使我国做出领先国际的丰硕科研成果; 将促进我国与国际射电天文及射电天体物理的发展, 提升我国射电天文在国际上的地位和影响力; 通过项目的建设, 将满足我国在深空探测领域的需求, 为更好地满足国家的战略需求做好储备。

QTT 天线^[4]为格里高利形天线, 将采用主动面技术。利用连接在反射面板角落上的促动器修正天线因重力等因素造成的变形, 同时还将使天线反射面在标准抛物面和赋形抛物面之间切换, 以实现赋形面下单波束观测的高效率, 标准面下多波束大视场需求。天线观测频段为 150 MHz~115 GHz, 指向精度为 2.5 arcs, 主反射面均方根误差 (r.m.s) 在非主动调整时为 0.6 mm, 主动面调整下为 0.3 mm, 长期运行调整达到 0.2 mm, 主反射面单面板精度 0.07 mm, 副反射面精度为 0.07 mm。天线将布置 9 台接收机系统, 其中波长 (单位 cm) 为

资助项目: 973 项目 (2015CB857102); 国家自然科学基金 (11303083, 11463005)

通讯作者: 许谦, xuqian@xao.ac.cn

100 (Kildal)、20、15 (PAF) 的馈源设置于主焦，6、1.3、13/3.6、3.6/0.9、0.7、0.3 的馈源设置于格里高利焦点。天线经过长期调整其在 3 mm 波长效率将超过和达到 30%。

对 QTT 而言，其高指向精度要求使得天线必须有较大刚度，势必会增加天线重量。天线重量增加导致结构复杂，同时天线轨道须承受较大载荷，引起轨道疲劳进而产生破坏，影响天线精度同时危害天线结构安全。因此，如何合理选择天线结构形式，使得天线满足电性能最优，同时保证结构刚度最佳分布就成为一大难题。为了使天线自如地在赋形面与抛物面之间切换，反射面分块尤为重要。反射面分块不仅要考虑到目前国内面板成型最高工艺水平，同时要考虑赋形与标准面转换以及促动器数量。高精度 QTT 天线对轨道不平度要求较高，其峰值为 0.2 mm，因此需要采用焊接工艺成型，对轨道焊接工艺提出巨大挑战。

2 天线结构形式

反射面精度作为衡量大型天线的重要指标，取决于天线结构形式，结构形式研究重点是反射体背架与座架连接方式。反射体与座架结构连接原则是使反射面变形协调，从而实现保型设计。所谓保型，就是使变形后的反射面保持为一个同族抛物面。Von Hoerner^[5] 在 1967 年提出了等柔度支撑形式，他认为，反射面的变形主要受天线背架变形，以及天线与座架的连接位移差距点的影响，天线的支撑应该采用光滑分层的结构形式，能够有力地提高天线的精度。

结合国际上已有大口径望远镜结构形式^[6, 7]，制定了四种结构方案并进行了分析比较，分别为：伞形支撑结构、桁架支撑结构、双齿轮支撑结构、改进伞形支撑结构。

2.1 伞形支撑结构方案

伞形支撑结构天线方案依据德国 Effelsberg 100 m 天线的伞形支撑技术，采用俯仰通轴设计。其主要思想是通过伞形支撑结构与天线背架结构连接，用以均匀分担天线反射体重量，从而实现天线反射体变形均匀。天线在重力作用下朝天及指平变形，如图 1 所示。

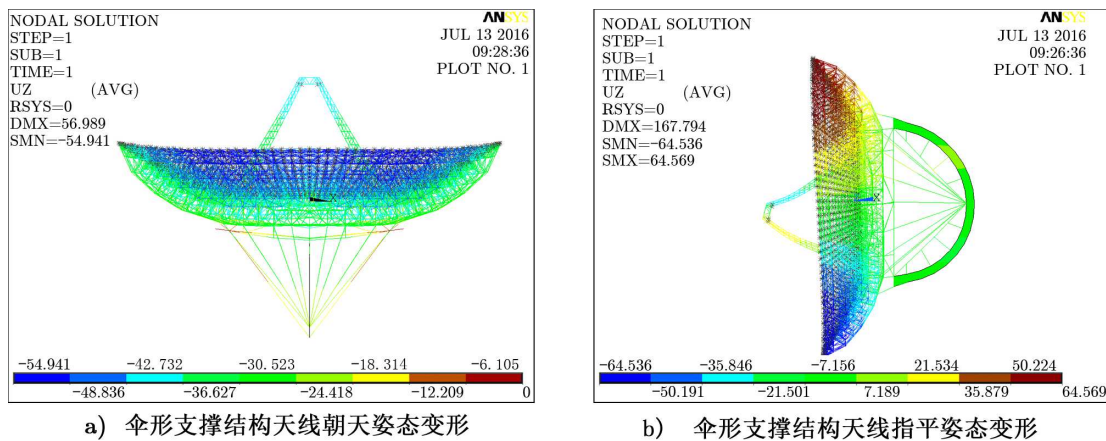


图 1 伞形支撑结构受力分析

2.2 桁架支撑结构天线方案

桁架支撑结构方案仿照美国 GBT 100 m 座架对天线支撑方式而设计。其主要方式是通过空间桁架来进行天线反射体均匀变形支撑结构设计。天线在重力作用下朝天及指平变形, 如图 2 所示。

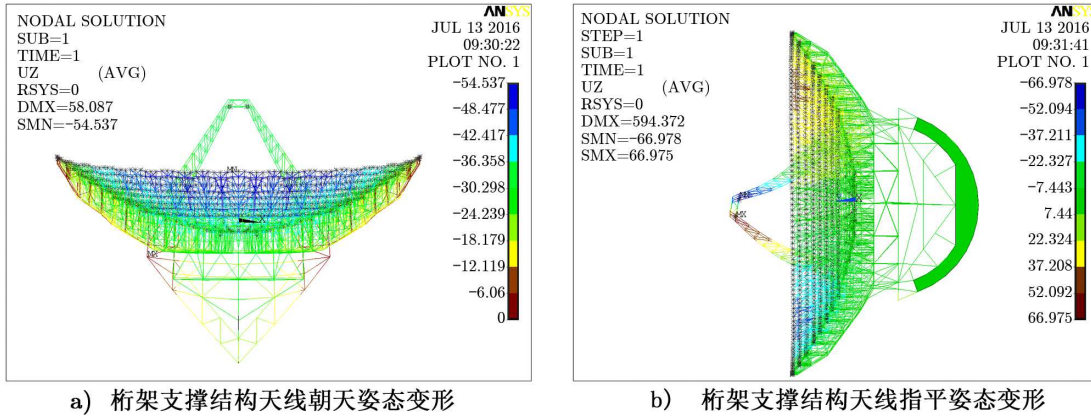


图 2 空间桁架支撑结构受力分析

2.3 双齿轮支撑结构天线方案

双齿轮支撑方案仿照美国深空网地面站 70 m 天线的结构方案。该结构将大齿轮及配重重量有效地向俯仰轴头分解, 有利于反射面的变形。天线在重力作用下朝天及指平变形, 如图 3 所示。

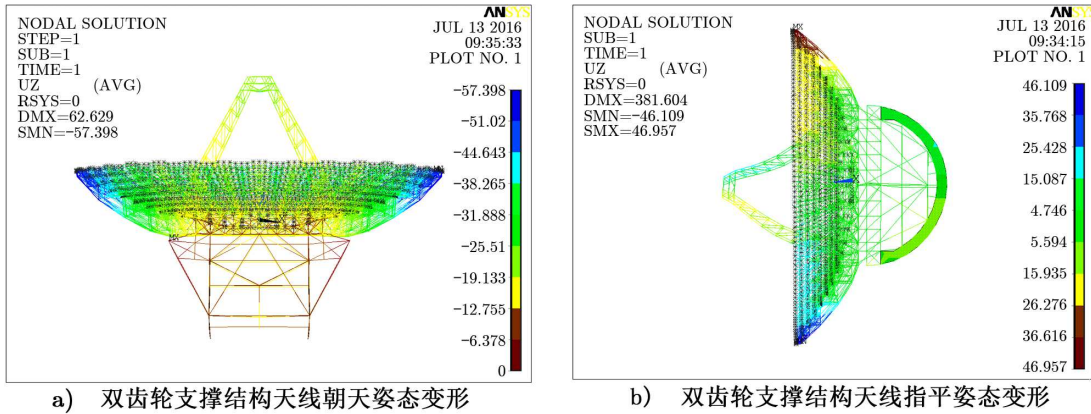


图 3 双齿轮支撑结构受力分析

2.4 改进伞形支撑结构天线

由图 1 可知, 典型的伞形支撑结构反射体变形还不够均匀, 需进一步优化, 因此, 仍然以伞形支撑作为方案, 但是对背架辐射梁的截面进行尺寸优化设计。天线在重力作用下朝天

及指平变形如图 4 所示。

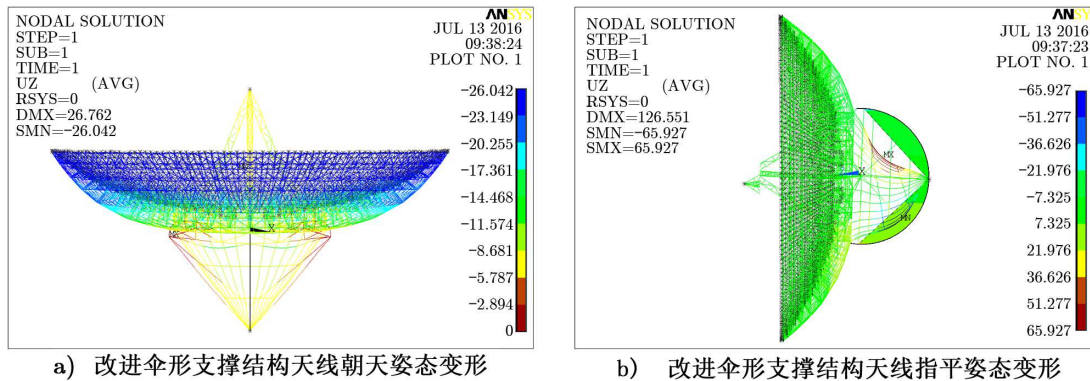


图 4 改进伞形支撑结构受力分析

2.5 四种方案总结

根据以上四种方案进行吻合计算，得到计算结果见表 1。

表 1 四种方案计算结果比较

项目	原始精度/mm		(预调 + 吻合精度)/mm	模型重量/t
	7°(俯仰)	89°(俯仰)		
伞形支撑	33.07	7.54	5.29	2 136
桁架支撑	16.65	11.98	7.95	2 280
双齿轮支撑	14.57	10.72	4.76	2 277
改进伞形方案	4.81	5.36	2.58	2 499

由表 1 可知，采用改进伞形支撑结构天线精度优于其他三种方案，后续将会进一步优化并加入促动器调整，以满足反射面精度需求。

3 反射面分块

反射面分块过多，会导致促动器数量变多，天线背架结构复杂，重量增加；分块过少，单面板制造精度达不到要求，反射面精度无法保证。合适的分块策略需兼顾面板成型工艺、赋形与标准面切换和天线背架结构复杂度。因此，合理反射面分块是 QTT 天线结构中重要一环。

考虑国内天线生产厂商面板成型工艺水平，假定单面板最大面积控制在 2 m^2 以内，将反射面分块为 27 圈。单面板数量共计 7 616 块。按此分块促动器将超过 7 600 个，会极大增加背架结构的复杂度进而增加天线重量。为了减小面板数量，同时满足单面板精度要求，可考虑组合面板方案，即将几块小面板拼接组合为一块大面板作为单面板，这样分块时面板数

量就可以减小。假定组合面板由 4 小块拼接, 拼接后大面板面积控制在 4 m^2 , 则分块后面板数量为 2 832 块。促动器大约 3 000 个。考虑到拼接面板需要通过组合框架连接, 图 5 给出了一种组合框架模型及其在重力作用下变形云图。

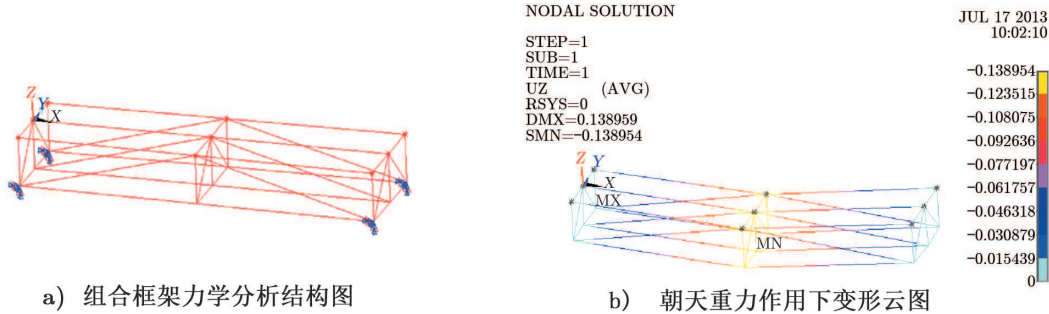


图 5 组合框架受力分析

根据仿真模型分析可知, 如果组合面板重 100 kg , 那么组合框架重量大约为组合面板重量的 1.5 倍。

未来将从两方面着手优化反射面分块, 一方面突破面板成型工艺, 力争研制单面板 5 m^2 , 精度满足 QTT 天线 0.07 mm 需求; 另一方面, 进一步优化组合面板连接框架, 减轻重量, 同时保证支撑变形最小。

4 整体焊接轨道

大口径、高精度天线目前普遍采用焊接整体轨道技术。如德国 Effelsberg 100 m 天线^[8]、美国 GBT 100 m 天线^[9]、意大利 SRT 64 m 天线^[8]、墨西哥 LMT 50 m 天线^[10]、上海 65 m 天线^[11]等。采用焊接轨道技术可以提高轨道使用寿命和天线指向精度。

大口径天线轨道直径一般为几十米, 不可能采用整体制造, 通常采用分段加工、整体焊接技术。轨道材料通常采用合金钢, 表面热处理增加硬度, 以满足大型轮轨式天线整体重量大、轨道强度高的要求。合金钢表面热处理后, 焊接难度大, 容易产生焊接裂纹, 要合理设置焊接工艺, 控制轨道的焊接变形, 满足轨道的指标要求。

为了获取焊接 QTT 规模天线轨道经验, 进行了焊接试验。材料选用 42CrMo , 表面硬度在 HRC44 以上。使用窄槽坡口焊接法, 首先打底过过渡层焊接, 其次采用较软材料进行焊缝填充焊接, 最后对焊缝表面硬度层进行焊接, 如图 6 所示。

重点就焊接过程控制、焊接变形控制、焊接应力消除、焊缝表面处理等进行了试验。结合相应工艺, 制作了焊接试验件。在焊接试验过程中, 充分模拟了野外施工环境, 轨道焊缝处无表面裂纹产生, 通过预变形等手段保证轨道平面度满足设计要求。现场焊接及测试如图 7 所示。

表 2 为各阶段试验主要数据。经过试验研究轨道焊接不平度已能够控制在 0.3 mm , 且

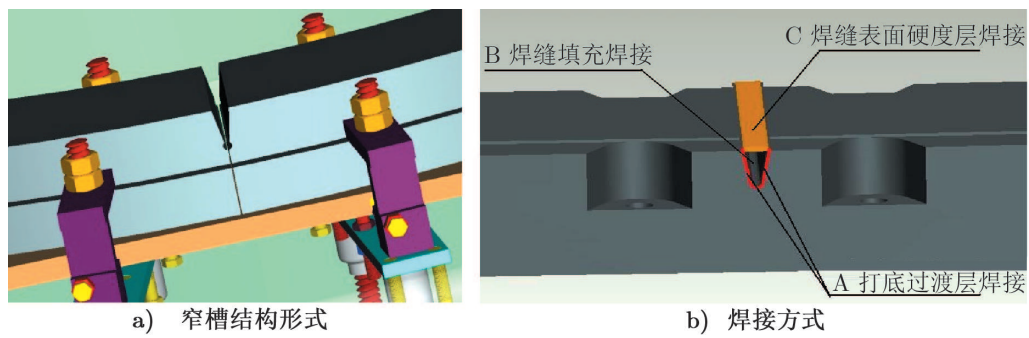


图 6 轨道结构及其焊接方式

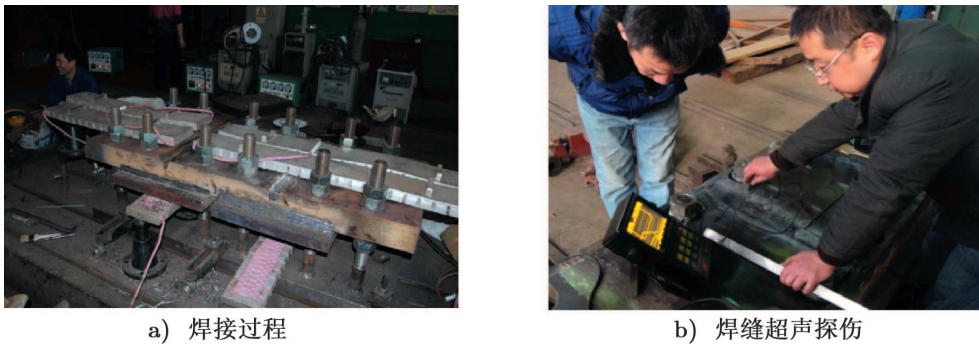


图 7 焊接及测试

表 2 大型高精度整体焊接轨道技术各阶段试验主要数据

项目	焊后平面度/mm	圆周方向收缩量/mm	硬度
正件试验 1	1.03	未测	满足要求
正件试验 2	0.21	0.6	满足要求
验证试验	1.8	3	满足要求
改进试验	0.26	3.5	满足要求
最终试验	0.28	1.5	满足要求

表面硬度达到 HRC44 以上，探伤未发现裂纹，焊缝质量合格。未来将进一步优化焊接工艺，将不平度控制在 0.2 mm 以内，同时可在台址所在地实地进行焊接试验，以获取进一步焊接经验，为 QTT 天线轨道顺利实施做准备。

5 总 结

110 m 口径 QTT 天线拥有高灵敏度、高指向精度，其建成必将为我国射电天文的发展作出重大贡献。根据国际上大口径天线的经验可知，一个好的结构型式，会对天线未来固有

性能的实现以及性能进一步提升提供重要保障。因此在建设前必须对关键技术问题进行深入研究。文章从反射体结构、反射面分块、整体轨道三个方面的关键技术进行了简述,并介绍了目前进展以及未来发展方向,这些研究将会对 QTT 工程顺利实施起到重要支撑作用。

致谢

感谢中国电子科技集团公司第 39 研究所王力生研究员对本工作的支持与帮助。

参考文献:

- [1] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 783
- [2] Prestage R M, Constantinescu K T, Hunter T R, et al. Proceedings of the IEEE, 2009, 97: 1382
- [3] Wielebinski R, Junkes N, Grahl B H. Journal of Astronomical History and Heritage, 2011, 14: 3
- [4] Wang N. QTT Project Proposal, Inner Memo, 2012
- [5] Hoerner S V. The Astronomical Journal, 1967, 72: 35
- [6] Hachenberg O, GRAHL B, Wielebinski R. Proceeding of the IEEE, 1973, 61: 1228
- [7] Srikanth S, Norrod R, King L, et al. Antennas and Propagation Society International Symposium, 1999, 16: 1548
- [8] Hans J K. Proceedings of SPIE, 2004, 5495: 67
- [9] Dennis E. Proceedings of SPIE, 2011, 8336: 83360M
- [10] Joseph A, Frank W K. Proceedings of SPIE, 2003, 4840: 612
- [11] 凌权宝, 刘维明, 付丽, 等. 上海天文台年刊, 2011, 32: 83

Challenges and Progress of QTT Structure

XU Qian, WANG Na

(Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011)

Abstract: A 110 m aperture fully steerable radio telescope named QTT (QiTai radio Telescope) will be built in Xinjiang. QTT's structure will meet many challenges for its high sensitivity and pointing accuracy, such as structure type, weight vs stiffness, best electrical performance with antenna accuracy, track, reflector surface dividing strategies etc. How to resolve these questions before construction is important for QTT project. In this paper, we summarize some key challenges about QTT structure including type of structure, reflector surface division, track welding. Finally we present the progress we have already done.

Key words: radio telescope; antenna structure; panel divide; continuous track index