新疆110 m射电望远镜(QTT)天线高精度面板结构研制挑战

许谦^{1,2*}, 温浩兴^{1,3}, 王娜^{1,2}, 李琳^{4,1}

1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院射电天文重点实验室, 乌鲁木齐 830011;
3. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049;
4. 新疆大学物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046

*联系人, E-mail: xuqian@xao.ac.cn

收稿日期: 2016-11-30; 接受日期: 2016-12-20; 网络出版日期: 2017-04-06

国家重点基础研究发展计划(编号: 2015CB857100)、国家自然科学基金(编号: 11303083, 11463005)、中国科学院青年创新促进会(编号: 2016058)和新疆维吾尔自治区重点实验室专项(编号: 2014KL012)资助

摘要 研制满足单面板精度为0.07 mm (RMS)的高精度面板, 是制造高精度新疆110 m射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)天线的关键技术之一. QTT基于主动保形技术, 为满足天线结构与性能优化需求, 在保证面板精度同时面板数量需要控制. 天线面板越大面型精度提升越困难, 制造高精度大面板将面临严峻挑战. 基于蜂窝夹层结构、蒙皮筋条结构, 采用改进负压成型工艺, 进行了高精度面板成型试验研究, 试验结果表明面积小于1.5 m²面板精度能满足需求. 就目前国内工艺水平来看已无法研制更大面积单面板(如5 m²). 为了满足QTT需求, 对组合面板结构进行了初探. 仿真了采用传统以及过渡子桁架, 基于刚性和等柔性支撑两种方式以及采用传统拼接组合面板形式. 结果表明采用过渡子桁架方式面板精度、数量能够满足需求, 但复杂子桁架结构研制成本高, 且造成组合面板重量增加, 会导致天线结构设计复杂影响天线性能; 传统拼接组合面板结构虽然满足精度需求但其面板数量没有控制在理想范围内. 展望了未来提高面板精度需要进一步开展的工作.

关键词 新疆110 m射电望远镜, QTT, 负压成型, 碳纤维增强复合材料, 组合面板

PACS: 47.11.Fg, 95.55.-n, 95.85.-e

1 引言

对大口径、高频段的射电望远镜天线而言其面板精度要求较高, 但是随着面板面积增大, 制造高精度面板变得十分困难. 如果为了满足精度要求而减小

面板大小, 成型工艺上相对容易实现, 但是面板数量十分庞大, 这将导致天线背架结构复杂、促动器数量增加、天线重量增加, 对天线设计、制造、调试维护带来较大麻烦; 如果为了两者兼顾, 采用高昂代价的加工方法将使得天线建设成本远远超过预估. 因此,

引用格式: 许谦, 温浩兴, 王娜, 等. 新疆110 m射电望远镜(QTT)天线高精度面板结构研制挑战. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47: 059502
Xu Q, Wen H X, Wang N, et al. Development challenges for the Xinjiang 110 m radio telescope (QTT) high accuracy panel structures (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47: 059502, doi: [10.1360/SSPMA2016-00501](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00501)

研制满足工程实践的高精度大面板挑战巨大.

在我国新疆奇台拟建的大口径、全方位可转动射电望远镜(QiTai Radio Telescope, QTT)^[1], 其口径为110 m, 为满足观测频段为150 MHz–115 GHz需求, 其主反射面单面板精度均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE) (RMS) 需要达到0.07 mm. 为了满足该指标, 以目前国内面板成型工艺水平来看, 面板大小控制在1.5 m²以内总数量将超过7600块, 这将极大增加整个天线结构复杂度, 因此, 研制满足面型精度要求, 同时控制面板分块数量在合理范围的面板结构及其成型工艺将成为QTT天线关键技术之一.

本文将基于国内实际情况对天线面板分块、常见高精度面板结构及其制造技术进行概述. 并从试验上验证与积累了基于铝蒙皮铝蜂窝夹层结构、碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层结构以及蒙皮筋条结构与负压成型的高精度面板成型技术. 为了进一步满足QTT对面板精度及其分块数量的需求, 对组合面板结构进行了初探, 参考国外已有天线组合面板经验并结合国内现状进行了仿真研究, 并对未来进一步试验验证的方向进行了展望.

2 天线面板分块

影响主反射面分块形式的因素很多, 主要包括面板表面精度指标、加工工艺性和经济性、生产和安装周期、运输成本等.

常见天线主面分块主要有辐射加环向井字形、纵横井字形、蜂窝形等几种形式, 对大口径天线来讲, 分块种类越少, 加工成本越小(如模具), 因而常采用辐射加环向井字形划分, 可用最小的分块种类划分出整个反射面. 同时, 对大型天线而言结构变形大, 特别是自重变形, 分块种类越少, 越易于简化背架支撑, 提高主面精度稳定性. 以QTT天线为例, 天线采用主动面技术, 即利用连接在反射面板角落上的昂贵促动器, 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. 其面板分块要综合考虑面形转换所要求面板最大面积、促动器数量、背架结构的复杂度等.

3 常见高精度反射面结构及其制造技术

天线反射面除了要满足电性能需求外, 还应当满足机械性能要求, 如刚度好、重量轻、对风的阻力小等. 反射面主要包括实体反射面(如金属面板、蒙皮筋条面板、铝蜂窝夹芯面板等^[2])、网状反射面以及开孔金属板. 实体面板适合观测频率较高的场合, 其成型工艺相对复杂, 面板精度较开孔面板高. 网状反射面的优点是风阻小、重量轻, 缺点是表面精度低、刚性差、运输及架设时易变形, 适合于低频段观测. 开孔金属板弥补了网状面板刚性差问题, 表面精度相对提高, 但仍然适合低频观测场合.

天线面板制造方法很多, 其制造技术与其结构相对应, 视面板精度要求、结构形式、材料构成、使用环境等情况而定^[3]. 目前国内外重点望远镜的面板结构包括: 碳纤维蜂窝、铝蒙皮蜂窝、电铸镍蜂窝、铝合金板、开槽筋胶粘、铝蒙皮型材铆接等^[4–8]. 根据天线口径与工作频率选择相应结构, 如: ALMA12 m^[9], LMT50 m^[10,11]天线工作频率分别达到950, 300 GHz, 其面板精度分别为8, 20 μm , 采用成型工艺复杂的电铸镍蜂窝结构能够满足需求. 对GBT100 m^[12–16]天线而言其工作频率为117 GHz, 面板精度要求为68 μm , 如采用电铸镍蜂窝结构将会使得天线成本完全失控, 因此其采用了开槽筋胶粘结构.

虽然目前高精度大面板制造技术仅掌握在欧美等少数几家公司. 但是随着我国近十几年来射电望远镜朝着大口径、高精度方向发展, 国内相关企业(如中国电子科技集团公司第39研究所、第54研究所(中电科39, 54所)等^[7,8,17,18])开展了高精度大面板研制工作. 在参考国际先进面板结构并结合国内自身望远镜技术要求基础上, 摸索并试验成功了相应高精度面板成型技术, 已经能够满足部分厘米波望远镜需要. QTT天线口径大且工作频段达到毫米波段因此其面板要求更高, 成型工艺需进一步完善, 力争突破技术瓶颈满足需求. 目前国内成熟的高精度面板结构形式及其制造技术主要有以下几种.

3.1 一体式薄壳结构

一体式薄壳结构, 整个面板的反射面与加强筋是同一零件, 采用铸件或厚板在高精度机床上直接加工

成具有加强筋的薄壳结构, 这种方法可以加工出型面精度很高的面板, 面精度均方根值可达微米级.

面板加工前需要对整个工艺系统进行精度分析, 确定机床、夹具、刀具、测量仪器等工艺系统各环节是否能达到精度要求. 为保证加工精度, 可以先加工一块铝质试验件, 以此来验证机床、刀具和三坐标测量机的精度要求. 采用这种形式制造的面板精度虽高, 但缺点也很明显. 一是生产周期长, 需挤占大量数控加工设备; 二是受制于加工工艺限制, 成品自重很大, 进而造成整个反射体重量很大, 拖累天伺馈系统运动指向指标; 三是加工中切削余量大, 材料浪费大, 加工成本高; 四是需要额外的工艺措施进行辅助, 除了进行常规退火处理外, 在最后阶段的精加工前, 还需要进行多次热处理以消除加工应力来保证面板的型面精度. 总之制造成本过高, 一般用于小型高精度天线, 不适用于大型天线工程应用.

3.2 蜂窝夹层结构

根据常用夹芯层材料又可分为玻璃钢蜂窝夹芯层结构和铝蜂窝夹芯层结构.

(1) 玻璃钢蜂窝夹层结构

玻璃钢蜂窝夹芯层结构是由前后两层玻璃布作为蜂窝夹芯层的表面蒙皮, 再与玻璃钢蜂窝夹芯层胶合成反射面, 在要作为反射面的一侧表面采用化学沉铜、火焰喷铝或覆铜丝网的方法使其表面对电磁波具有良好的反射特性. 这种结构具有强度、刚度高和重量轻的优点, 但其生产周期长、成本高且玻璃钢耐高温性能差, 易老化, 易燃烧.

(2) 铝蜂窝夹芯层结构

铝蜂窝结构是由金属薄箔(一般为铝箔)制成的蜂窝状夹层和两层蒙皮组成, 即两层蒙皮中加粘铝蜂窝夹层. 这种结构相对于蒙皮筋条结构强度高、刚性好、重量轻, 缺点是传热系数低、温度变形大, 另外由于蒙皮和蜂窝之间只能通过胶粘, 无法铆接. 因此, 其面板的保持性长期来看不高.

3.3 蒙皮筋条结构

蒙皮筋条结构一般是由蒙皮、纵筋、环筋及节点板组成的壳体结构, 从其截面看可分为蒙皮层、胶层、筋条层、节点板层共4层, 蒙皮为整体零件, 筋条

层为用弯角件将铝型材连接起来的框架结构, 节点板为单件且对筋条位置相对定型. 蒙皮是面板的最终使用面, 但不具有满足精度要求的强度与刚性, 其最终定型是由外部结构件来保证, 即筋条、弯角件连接起的框架结构. 蒙皮背面纵筋、环筋由铝型材拉伸成与蒙皮背面相同的曲面, 以使各环筋、纵筋与蒙皮相贴间隙达到最小, 从而使蒙皮曲面与理论曲面达到最佳重合效果. 虽然单个筋条具有一定的强度和刚度, 然而各自独立的筋条并不能保证整个面板强度、刚度要求, 因此用弯角件将筋条连接起, 使四周筋条连接为一整体, 可以大大加强面板的强度及刚性, 然而筋条与蒙皮、弯角件并未形成具有完全刚度的壳体, 筋条仍可沿曲面法向扭曲, 如果在筋条两面均有蒙皮将会形成一个封闭壳体, 筋条自由度完全限制, 蒙皮相对筋条的位置将会精确控制. 为达此目的, 在筋条各接缝处加铆节点板, 使筋条、蒙皮、弯角件、节点板浑然一体, 从而保证了单块面板的结构性能.

4 试验与分析

针对高精度面板铝蜂窝夹层结构, 基于铝合金与碳纤维蒙皮开展了试验研究, 同时也对改进工艺的蒙皮筋条结构面板成型技术进行了验证. 所有试验面板面积均小于 1.5 m^2 . 另外对试验中面板精度检测方法进行了说明. 最后针对试验结果进行了分析总结.

4.1 铝蒙皮铝蜂窝夹层结构

这种结构的天线面板由工作面、铝蜂窝夹层、铝筋条式胶铆结构组成, 如图1所示. 铝蒙皮蜂窝面板成型方法为: 工作板(蒙皮铝板)、蜂窝芯和铝筋条式结构等分离组件被分层压贴在负压面板模具上并由粘结剂胶接固化为整体, 释放负压后得到天线反射面板. 图2为正在负压成型中的面板蒙皮.

蜂窝结构面板的蜂窝芯层通过胶粘连接上下两层(工作层和铝筋条结构层), 厚度 $10\sim 15 \text{ mm}$, 它在蜂窝夹层结构中起连接和支撑定型作用. 铝筋条结构层是由蒙皮、纵筋、环筋及节点板组成的一种具有一定刚度的完整壳体结构. 通过负压粘铆成型的铝蜂窝面板重量轻、强度高、刚性好, 型面精度可以达到 0.07 mm (RMS) , 能够满足高精度面板的指标要求.

图1 铝蜂窝夹层面板结构示意图
Figure 1 Aluminum honey-comb sandwich panel.

图2 (网络版彩图)负压成型面板蒙皮
Figure 2 (Color online) Negative pressure forming aluminum skin panel.

4.2 碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层结构

碳纤维(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)蒙皮铝蜂窝夹层结构, 为两层碳纤维蒙皮中加粘铝蜂窝夹层板, 见图3所示。通过纤维预浸料在负压模上铺覆封装, 热压罐固化碳纤维; 蒙皮与铝蜂窝夹层合成后通过热压罐成型, 其工艺蒙皮单独成型后在负压模上整体成型为内层碳纤维蒙皮、铝蜂窝夹层、外层碳纤维蒙皮形式的面板, 图4为碳纤维面板成型示意图。

在研制碳纤维复合材料蜂窝天线反射面板过程中, 应保证有高精度面板成型模具, 因为反射面板的精度主要取决于模具材料的性能、模具性能及其加工精度。

图3 碳纤维面板剖面结构示意图. 1外蒙皮; 2内蒙皮; 3铝蜂窝夹层板
Figure 3 CFRP panel section view. 1 Outer skin; 2 inner skin; 3 honey-comb sandwich panel.

图4 碳纤维面板成型示意图. 1 外蒙皮; 2 铝蜂窝夹层板; 3 内蒙皮; 4 负压模; 5 真空泵
Figure 4 CFRP panel forming craft. 1 Outer skin; 2 honey-comb sandwich panel; 3 inner skin; 4 negative mould; 5 vacuum pump.

为了保证金属层质量, 采用了转移法金属化技术, 该技术克服了直接金属喷涂法, 金属层与复合材料结合力小、表面粗糙、精度靠手工打磨来保证、随机性大等缺点, 是目前理想的复合材料天线形面金属化技术。

试验结果表明面板精度满足0.07 mm。另外在某12 m天线工程中, 基于碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层结构成型技术共制造了112块面板, 精度均达到0.07 mm (RMS), 且精度在0.03–0.06 mm (RMS)的占71.4%。

4.3 蒙皮筋条结构

从结构设计上看能满足要求, 但成型工艺方法不同, 将产生不同结果。因此, 工艺方面的控制是达到设计要求的关键。

单块面板成型方法有桁架铆接、胶粘铆接等多种成型方法。按照以上的制造方法, 单块面板的型面精度很难达到0.07 mm (RMS), 不能满足高精度面板的指标要求。通过总结以往面板成型中的有效经验, 在

大量试验的基础上,采用真空负压粘铆成型技术进行天线单块面板的研制.

蒙皮筋条结构面板成型方法如下:工作板(蒙皮铝板)和铝筋条式结构等分离组件被分层压贴在负压面板模具上并由粘结剂胶接固化,固化后再铆接为整体,释放负压后得到天线反射面板,通过负压粘铆成型的面板,精度高稳定性好.进一步试验表明:如果将环境温度严格控制在 $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 范围时,批量生产的面板精度可控制在 0.07 mm (RMS)以内.此方法成型简单,生产周期短,生产成本相对较低.

4.4 面板精度检测

天线工作频率越高对反射面表面精度^[19]要求越严苛,通常情况下表面精度为工作波长的 $1/16\sim 1/32$,其测量精度应达到表面精度的 $1/3\sim 1/5$,因此高频天线对表面精度测量要求严苛.

根据测量精度需求来看,目前常用的反射面检测方法^[20,21]如:经纬仪法、全站仪法、激光跟踪仪法、激光雷达法、摄影测量法以及激光三坐标测量法.经纬仪测量范围在 50 m 以内,测量精度为 $\pm(0.05\sim 0.2)\text{ mm}$;全站仪测量范围在 200 m 以内,测量精度为 $\pm(0.2\sim 1)\text{ mm}$;激光跟踪仪测量范围在 70 m 以内,测量精度为 $\pm(5\sim 10)\times 10^{-6}\text{ D}$;激光雷达测量范围在 100 m 以内,测量精度为 $\pm 10\times 10^{-6}\text{ D}$;数字摄影测量系统测量范围在 100 m 以内,测量精度为 $\pm 10\times 10^{-6}\text{ D}$;三坐标测量机测量范围在 20 m 以内,测量精度优于 $(0.01\sim 0.2)\text{ mm}$.

试验中考虑到单面板精度优于 0.07 mm (RMS),综合分析各种检测方法及其测量精度,确定面板检测在三坐标测量机上进行.采用意大利DELTA4509测量系统,其侧头重复定位精度为 0.005 mm .

4.5 分析总结

通过前述面板成型工艺以及试验结果来看,影响面板精度主要因素归纳如下.

(1) 负压模精度对面板精度影响

目前负压模具精度可以稳定在 0.03 mm (RMS),但已达到加工极限,现有负压能力提升空间也不大,只能从面板结构形式上想办法,尽量减小卸压后面板回弹对精度的影响.

(2) 蒙皮分块对面板精度的影响

蒙皮划分成小块对面板精度有一定提高,但影响

不大,考虑是因为面板太过平缓,整体拱高已经足够小了,蒙皮再划分成小块实际意义并不大.

(3) 筋条形式对面板精度的影响

筋条是面板保形保精度的关键环节,所以一般要用拉伸模进行成型处理,使毛坯弯曲成理论形状,再用于面板装配时就不会使蒙皮屈服于筋条形状引起型面精度变差;另一种措施是在筋条适当间距上开槽,再通过人工校型的办法,借用负压模等模具手工校型.筋条开槽的作用基本上是为了便于人工校型,需要的开槽数量大,分布较密集.

理论上对筋条开槽可有效释放成型过程中产生的应力,提高面板精度的稳定性,但通过试制发现,开槽与否对面板精度影响很小,开槽反而会降低面板强度.

(4) 材料热处理对面板精度的影响

蒙皮及筋条经过淬火处理后,可大幅提高强度和刚性,对保持面板精度稳定影响较大,但从试制结果来看,淬火过的蒙皮与未淬火的筋条制作的面板经踩踏试验后精度变化更大,分析可能是因为蒙皮淬过火而筋条没有,踩踏后较软的筋条受较硬蒙皮影响,无法更好地回弹复形,降低了对整个面板定型作用.因此正式生产中所有蒙皮均不应淬火,即蒙皮和筋条保持同样的金相特征,更能保证主面结构整架后的整体精度.

5 组合面板技术

大口径高精度反射面天线由于其重量大的特点,反射体自重会严重影响主面精度.如果采用优化的单面板结构,受成型工艺所限其面积不能太大,会导致主面总面板数量增加、背架结构变得复杂、促动器数量增加,反射体重量急剧增加进而导致天线总重量增加.为了调和面板工艺、数量以及天线背架结构的矛盾,国际上的一些高频段望远镜采用了组合面板的结构形式.组合面板即用几块小面积高精度面板,采取一定的结构形式拼接为一块满足精度需求的大面板.根据面板精度需求,有不同组合面板结构形式.以LMT50 m,GBT100 m为例,前者面板精度 $20\text{ }\mu\text{m}$,因此采用了基于等柔性支撑过渡子桁架的组合形式,加之面板采用电铸镍技术成型因此代价高昂,但由于天线口径为 50 m ,因此其相对制造价格还可以接受;后者面板精度 $68\text{ }\mu\text{m}$,同时考虑到 100 m 口径,因此选择基于开槽筋条结构的拼接技术.采用组合面板技术,亦

可有效减少现场安装周期. 在参考国际相关望远镜组合面板结构形式基础上结合QTT天线实际需求仿真了几种形式的组合面板.

由图5可知面板越大其精度越低, 为了提高单面板制造精度需减小面板面积. 因此在仿真中单面板最大面积按小于 2 m^2 约定. 仿真了传统子桁架结构、过渡子桁架结构、传统拼接结构三种形式. 仿真中蒙皮以及背筋选用铝合金, 密度为 $2.8\times 10^3\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 70 GPa , 泊松比为 0.3 ; 调节杆以及桁架部分选用钢, 密度为 $7.8\times 10^3\text{ kg/m}^3$, 弹性模量为 210 GPa , 泊松比为 0.3 .

(1) 传统子桁架结构

基于传统子桁架连接的结构见图6所示, 固定在刚性支撑子桁架上的调节杆与组合面板连接形成组合结构. 仿真了在重力及 7°C 温差下的变形, 如图7所示.

对传统子桁架而言其导致的组合面板变形等效于图8所示仿真结果. 结果表明由于子桁架为刚性支撑, 同时组合面板相当于没有过渡环节直接与子桁架连接, 而子桁架会受到背架结构影响, 因此会导致组合面变形不均匀, 面板精度差. 仿真结果可知表面精度

图5 (网络版彩图)精度与面板长度关系曲线
Figure 5 (Color online) Relation curve between precision and panel length.

图6 (网络版彩图)传统子桁架结构
Figure 6 (Color online) Traditional sub-frame structure.

为 0.05 mm (RMS).

(2) 过渡子桁架结构

过渡子桁架组合面板结构如图9所示, 其子桁架较之传统型结构发生了变化, 通过杆件拓扑结构设计使得其成为等柔性支撑单元. 通过过渡子桁架, 使得组合面板不直接与子桁架单元发生联系, 从而使组合面板不受天线及其背架变形影响而保证面精度. 同样仿真了在重力及 7°C 温差下的变形, 如图10所示.

对过渡子桁架而言其导致的组合面板变形等效于图11所示仿真结果. 结果表明等柔性支撑子桁架结构, 可以有效克服组合面板变形不均匀性, 提高组合面精度, 仿真结果可知表面精度为 0.015 mm (RMS).

图12给出了基于刚性与等柔性支撑的子桁架结构变形对比图. 总结而言基于等柔性支撑过渡子桁架组合面板结构, 面板受重力影响小、精度高, 易于实现背架设计, 同时便于运输和现场安装. 但是不难发现组合面板因为引入了子桁架以及过渡子桁架, 将导致整个组合结构复杂, 通过仿真可知组合框架的重量大约为面板重量的 1.5 倍, 如果组合更多的小面板虽然可以简化背架结构, 但是对促动器要求变高, 如增加载荷、行程, 重复定位精度保证困难等, 对具有标准面与赋形面相互转换需求的QTT天线来说, 面板面积

图7 (网络版彩图)传统子桁架结构变形仿真. (a) 重力变形; (b) 7°C 温差变形
Figure 7 (Color online) Structure deformation simulation of traditional sub-frame. (a) Gravity deformation; (b) 7°C temperature difference deformation.

图 8 (网络版彩图)传统子桁架组合面变形仿真

Figure 8 (Color online) Combination panel deformation simulation of traditional sub-frame.

图 9 (网络版彩图)过渡子桁架结构

Figure 9 (Color online) Transitional sub-frame structure.

图 10 (网络版彩图)过渡子桁架结构变形仿真. (a) 重力变形; (b) 7°C温差变形

Figure 10 (Color online) Structure deformation simulation of transitional sub-frame. (a) Gravity deformation; (b) 7°C temperature difference deformation.

图 11 (网络版彩图)过渡子桁架组合面变形仿真

Figure 11 (Color online) Combination panel deformation simulation of transitional sub-frame.

过大还会影响赋形效果. 因此自桁架结构组合面板方式选择需要慎重.

(3) 传统拼接组合结构

由于子桁架结构组合面板结构复杂, 易造成天线赋形、主动面调整等方面的问题, 需要简化面板支撑结构策略. 因此, 仿真中将四块小面板拼接为一块面

板, 采取筋条粘贴方式成型工艺. 将面板按环向和径向不同尺寸、面积从4–6 m²分为4种见图13, 通过力学分析计算, 确定单块面板最终尺寸.

对MB-1到MB-4建立有限元模型进行分析计算, 各单块面板四角约束. 仿真中蒙皮以及背筋选用铝合金, 密度为 $2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量为70 GPa, 泊松比为0.3. 计算结果见图14.

由以上计算可以得出在重力作用下各面板变形误差, 其结果见表1.

单块面板采用负压成型生产工艺, 1.2 m²以内单块面板制造精度可以达到0.06 mm (RMS), 将四块相邻面板连接成一体, 使其面积控制在4 m²左右, 则面板精度为0.0069 mm. 根据面积可将主面分为24圈共计2832块面板, 这样促动其数量为3024个. 由于单面板成型工艺瓶颈, 目前还无法制造面积大于5 m²的组合面板. 因此传统组合面板结构能够满足面板精度要求, 但是其面板数量还没有控制在理想范围. 选择此面板结构需要评估天线整体结构以及造价.

图 12 (网络版彩图)两种结构比较. (a) 重力变形; (b) 7°C温差变形

Figure 12 (Color online) Two structures comparasion. (a) Gravity deformation; (b) 7°C temperature difference deformation.

图 13 单块面板外形尺寸

Figure 13 Single panel dimension.

图 14 (网络版彩图)面板重力变形. (a) MB-1重力变形; (b) MB-2重力变形; (c) MB-3重力变形; (d) MB-4重力变形

Figure 14 (Color online) Panel gravity deformation. (a) MB-1 gravity deformation; (b) MB-2 gravity deformation; (c) MB-3 gravity deformation; (d) MB-4 gravity deformation.

表 1 单块面板重力变形
Table 1 Single panel gravity deformation

名称	面积 (m ²)	精度RMS (mm)
MB-1	6	0.097
MB-2	5	0.071
MB-3	5	0.091
MB-4	4	0.035

6 总结与展望

QTT天线具有高分辨率、高灵敏度特点, 因此能够接收更多微弱宇宙信号. 为了提高观测频率对天线面形精度提出了较高要求, 进而对单面板的制造工艺带来挑战. 根据前期研究可知, QTT主面板精度要求为 0.07 mm (RMS), 为满足天线结构与性能优化需求, 在保证面板精度同时面板数量需要控制, 因此研制高精度大面板成为QTT关键技术之一. 本文综述了国内天线面板分块、高精度面板结构及其工艺, 同时也对国际面板制造技术进行了概述. 基于国内实际情况, 对铝蒙皮铝蜂窝夹层结构、碳纤维蒙皮铝蜂窝夹层结构以及蒙皮筋条结构与负压成型的高精度面板成型技术开展了试验验证工作, 试验表明面积小于 1.5 m²

面板精度能满足需求. 为了进一步满足精度同时增大面板面积对组合面板进行了初探, 仿真了基于子桁架的两种组合面板结构以及基于传统拼接组合面板结构. 子桁架结构能满足大面积、高精度要求, 但结构复杂造价较贵, 对天线赋形有影响; 传统拼接结构简化了子桁架, 能够满足面精度, 但其无法达到理想的面板面积, 作为一种折中方案, 需要评估天线结构以及造价预算后可供选择.

为了满足面板精度与面积要求, 未来可在以下方面进一步开展仿真与试验研究:

(1) 进一步挖掘面板成型工艺, 如负压模具精度提升、抽真空能力提升与方法优化、蒙皮贴模性方法优化、面板成型中温度控制、开槽筋结构优化、粘铆负压成型工艺等, 力争突破 5 m² 单面板满足 QTT 精度要求;

(2) 考虑到 QTT 天线具备标准面与赋形面切换功能, 需结合微波光学仿真给出面板允许最大面积的建议, 进一步细化该面积下优化后组合面板结构方案的可行性;

(3) 进一步优化传统拼接组合面结构, 如增加支撑结构的高度、优化背筋与面板连接的拓扑结构.

参考文献

- Wang N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 783–794 [王娜. 新疆奇台110米射电望远镜. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 783–794]
- Cheng J Q. *Astronomy Telescope Principle and Design* (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2003 [程景全. 天文望远镜原理和设计. 北京: 中国科学技术出版社, 2003]
- Zhu Z G, Ye S H. *Antenna Structure Design* (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 1980 [朱钟淦, 叶尚辉. 天线结构设计. 北京: 国防工业出版社, 1980]
- Valsecchi G, Franchini C, Prieto R C, et al. Nickel sandwich technology for high precision reflector antennas. In: *Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium*. IEEE, 1999. 3: 2170–2173
- Li D S, Zhou X B, Chang H S, et al. Several key technologies of precise forming for reflector panels (in Chinese). *China Mech Eng*, 2003, 14: 1133–1135 [李东升, 周贤宾, 常和生, 等. 高精度反射器面板精密成形若干关键技术研究. 中国机械工程, 2003, 14: 1133–1135]
- Li D S, Ren S M, Zhou X B, et al. Shaped convexity forming method for high accuracy honeycomb sandwich reflector panel (in Chinese). PRC Patent, CN102544748A, 2012-07-04 [李东升, 任士明, 周贤宾, 等. 赋形凸面的高精度蜂窝夹层结构反射面板的成形方法. 中国专利, CN102544748A, 2012-07-04]
- Jin C, Li J L, Wang H D, et al. A fabrication method for antenna aluminum skin honeycomb sandwich reflector panel (in Chinese). PRC Patent, CN101673880A, 2010-03-17 [金超, 李金良, 王海东, 等. 一种铝蒙皮蜂窝夹层结构天线反射面的制造方法. 中国专利, CN101673880A, 2010-03-17]
- Wu L Y, Zhang W T, Zhao H B, et al. A fabrication method for high accuracy carbon fiber aluminum honeycomb sandwich reflector panel (in Chinese). PRC Patent, CN103560328A, 2014-02-05 [吴利英, 张文涛, 赵泓滨, 等. 高精度碳纤维铝蜂窝夹层结构反射面制造方法. 中国专利, CN103560328A, 2014-02-05]
- Greve A, Mangum J. Mechanical measurements of the ALMA prototype antennas. *IEEE Antennas Propag Mag*, 2008, 50: 66–80

- 10 Kärcher H J, Baars J W M. Design of the Large Millimeter Telescope/Gran Telescopio Milimetrico (LMT/GTM) on Cerro La Negra, Mexico. In: Proceedings of International Symposium on Astronomical Telescopes and Instrumentation. Munich, 2000. 4015: 1–13
- 11 Aretxaga I, Carrasco E, Irvine W M. The Large Millimeter Telescope (LMT). Technical Report, Radio Astronomy, Instituto Nacinal de Astrofisica, Opticay Electronica, University of Massachusetts and Goddard Center for Astrobiology. 2005
- 12 Srikanth S, Norrod R, King L, et al. An overview of the Green Bank Telescope. In: Proceedings of Antennas and Propagation Society International Symposium. IEEE, 1999. 16: 1548–1551
- 13 Prestage R, Constantikes K T, Hunter T R, et al. The green bank telescope. [Proc IEEE](#), 2009, 97: 1382–1390
- 14 Lockman F J. The Green Bank Telescope: An Overview. Technical Report, Radio Astronomy Technique, National Radio Astronomy Observatory. 1992
- 15 Nelson J. Panel Surfaces for the Green Bank Telescope. Technical Report, Radio Astronomy Technique, Lawrence Berkeley Laboratory. 1990
- 16 Radiation Systems, Inc. Technical Products Division. Nrao Green Bank Telescope Reflector Panels Design and Analysis. Technical Report, Radio Astronomy Technique, Radiation System, Inc. 1992
- 17 Feng Z G, Zheng Y P. A method to manufacture reflector panel with high surface precision (in Chinese). *Radio Commun Tech*, 2009, 35: 39–41 [冯贞国, 郑元鹏. 一种高精度天线发射面制造方法. *无线电通信技术*, 2009, 35: 39–41]
- 18 Jin C, Wei F, Jin J L, et al. Principle and application of precision forming for panel of 65 m radio telescope (in Chinese). *Chin J Radio Sci*, 2015, 30: 1–8 [金超, 尉飞, 李金良, 等. 65 m射电望远镜面板精密成形原理与应用. *电波科学学报*, 2015, 30: 1–8]
- 19 Li Z C, Li G Y, Wu X P. Review of accuracy measuring technology of antenna's surface (in Chinese). *Bull Survey Mapp*, 2003, 6: 16–19 [李宗春, 李广云, 吴晓平. 天线反射面精度测量技术评述. *测绘通报*, 2003, 6: 16–19]
- 20 Li G Y. Progress of Industrial Measurement System (in Chinese). Beijing: The People'S Liberation army Press, 2000 [李广云. 工业测量系统进展. 北京: 解放军出版社, 2000]
- 21 Li Z C, Li G Y. Measuring Theory, Technique and Application of Antenna (in Chinese). Beijing: Surveying and Mapping Press, 2009 [李宗春, 李广云. 天线几何量测量理论及其应用. 北京: 测绘出版社, 2009]

Development challenges for the Xinjiang 110 m radio telescope (QTT) high accuracy panel structures

XU Qian^{1,2*}, WEN HaoXing^{1,3}, WANG Na^{1,2} & LI Lin^{4,1}

¹ *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

² *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;*

³ *School of Physics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

⁴ *School of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China*

It is one of the key technologies to manufacture the Xinjiang 110 m radio telescope (QTT) antenna with high-precision and has the single panel accuracy of 0.07 mm (RMS). QTT is a homology structure based on active surface meaning that the number of panels should be kept to minimum, while ensuring the panel accuracy, in order to meet the requirements for antenna structure and performance optimization. The difficulty for improving the surface precision increases as the panel size increases, creating numerous challenges in fabrication of large panel with high precision. Based on the honeycomb sandwich structure and the aluminum skin structure, the improved negative pressure forming technology is used to carry out high precision panel forming test. The test results show that a panel with area less than 1.5 m² meets the requirement. However, the current craft for panel fabrication in local China is unable to develop a single panel with area larger than 5 m². In order to meet the demands of QTT, the structure of combination panel is studied. Based on both rigid and equal flexible supports structure, the traditional and transitional sub-frame combination panel forms and traditional joint combination panel are simulated. The results show that the transitional sub-frame method could meet the required precision and quantity, but the complicated sub-frame structure attracts high development cost and increases the overall weight of the panel, which will also lead to increased complexity in antenna design and influence electrical performance. In contrast, although the traditional joint-combination-panel structure meets the precision requirement, the number of panels is not controlled within the ideal ranges. Future plan for improvement of the panel accuracy needs to be developed.

Xinjiang 110 m radio telescope, QiTai radio telescope (QTT), negative pressure forming, carbon fiber reinforced polymer (CFRP), combination panel

PACS: 47.11.Fg, 95.55.-n, 95.85.-e

doi: [10.1360/SSPMA2016-00501](https://doi.org/10.1360/SSPMA2016-00501)