DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2022.02.003

70 m大型射电望远镜天线座的安装与调整*

阎宏涛^{1,2},贺新刚^{1,2},张洁钰^{1,2},唐亮亮^{1,2}
(1. 中国电子科技集团公司第三十九研究所,陕西 西安 710065;
2. 陕西省天线与控制技术重点实验室,陕西 西安 710065)

摘 要:天线座是70 m大型射电望远镜天线现场安装的重点和难点。考虑现场安装的周期以及所使用的吊车, 先对天线座架进行拼装,然后并行拼装俯仰框架十字与俯仰扇齿组合,最后将俯仰框架整体吊装至天线座架。拼 装过程中使用高精度激光跟踪仪、电子水准仪、全站仪等仪器对安装指标进行实时检测和调整,最终,天线座所有 指标符合设计要求。经实际使用,天线接收信号正常,为超大型射电望远镜天线座的安装提供了宝贵经验。 关键词:70 m大型射电望远镜;天线座架;俯仰框架;激光跟踪仪;电子水准仪;全站仪 中图分类号:P111.44; TN820.8 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2022)02-0011-04

Installation and Adjustment of Antenna Pedestal for 70 m Large Radio Telescope

YAN Hongtao^{1,2}, HE Xingang^{1,2}, ZHANG Jieyu^{1,2}, TANG Liangliang^{1,2}

(1. The 39th Research Institute of CETC, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Antenna and Control Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: The antenna pedestal is the key and difficult point of field installation of 70 m antenna of large radio telescope. Considering the period of field installation and the crane used, the antenna pedestal frame is assembled first, then the cross-shaped elevation truss and the elevation gear combination are assembled in parallel, and finally the overall elevation truss structure is hoisted on the antenna pedestal frame. In the assembly process, the high-precision laser tracker, electronic level, total station and other instruments are used to measure and adjust the installation indicators in real time, and finally all antenna pedestal indicators meet the design requirements. After practical use, the antenna received signal is normal, which provides valuable experience for the installation of super large antenna pedestal.

Key words: 70 m large radio telescope; antenna pedestal frame; elevation truss; laser tracker; electronic level; total station

引 言

"天问一号"与地球相距4亿公里之遥,为保障探测信号的接收^[1],中国科学院国家天文台建设了70m 天线(亚洲最大的单口径全可动天线)高性能接收系统,它是完成火星探测器科学数据接收任务的关键设备^[2]。

70 m射电望远镜天线为轮轨式天线,总高72 m。 天线座是整个天线反射体的承载机构,主要由天线 座架与俯仰框架组成^[3]。天线座架负责天线方位的 转动,俯仰框架负责天线俯仰的转动。整个天线座尺 寸为36 m(长) × 30 m(宽) × 38 m(高),总质量达 1500 t。国外的Effelsberg、SRT等射电望远镜的天线 座架的安装均为搭积木式的逐步拼装,效率低;国内的

天线座结构复杂,施工难度大,只有提前策划才能 保证各轴系的精度,如方位轴与俯仰轴的正交、两俯仰 轴的同轴度、天线反射体轴线与方位轴的同轴与俯仰 轴的正交。只有满足了这些技术指标才能保证天线的 指向跟踪精度,完成信号的传输^[4]。

⁶⁶ m射电望远镜俯仰框架则为地面倒立拼装为整体、 吊装后空中翻转,危险性较大;70 m射电望远镜天线 座架则采用地面拼装为单元后进行吊装,俯仰框架的 拼装分俯仰框架十字、俯仰扇齿组合地面并行拼装,再 拼装为整体进行吊装,可提高现场的施工效率,缩短安 装周期,节约安装成本,保证施工安全。

^{*} 收稿日期:2021-11-06

1 天线座架的安装与调整

70m射电望远镜主要由基础、轨道与滚轮、天线 座、天线反射体、馈源等结构组成,如图1所示。



图 1 70 m射电望远镜天线

天线座架总质量为642 t,下端与滚轮组合相连, 上端连接着俯仰框架。作为天线方位转动承载的主要 构件,装配过程中一层框架的4个节点要保证与滚轮 组合连接的准确性,三层框架要保证顶端俯仰框架安 装面的等高性、跨距和对称度,进而保证俯仰框架的准 确安装。一层框架安装之前,轨道与滚轮安装阶段已 经定好天线的安装基准为方位轴(方位轴轴线)与水平 面(轨道面),后期的安装需统一基准。天线座架为分 块安装,因此各单元均属常规吊装。主吊车选用150 t 级履带吊,围绕轨道进行吊装。

1.1 一层框架

一层框架在安装过程中的重点是保证四角节点滚 轮组合安装圆盘的连线穿过方位轴且自身高差不超过 1 mm,相互高差不大于2 mm,4条连线分布角度对称, 这样才能保证与滚轮组合的准确安装。整个一层框架 的外形误差不得大于5 mm,否则会给二层框架的安装 造成困难,见图2。



一层框架的安装方案如下:

1)将中心节点吊装到位。将激光跟踪仪架设于 轨道与方位轴之间,且高度大于中心节点。建立坐标 系后均匀采集轨道面上8个点,定出高度基准,再监测 调整中心节点至指定高度,误差不大于±0.5 mm,此时的中心节点需进一步利用合像水平仪调整至水平 10"。现场利用工装转动中心节点,每25°进行一次测量,调整方位轴预埋螺栓的连接螺母,反复调整至设计 要求^[5-7]。

2)按照滚轮组合安装位置确定座架的装配方向。 利用桥板将全站仪架设于中心节点,以中心节点为基 准安装内部4根斜梁的分布角度至30″以内,并调整至 等高。

3) 安裝四角节点,利用全站仪检测将其调整至等高,同时兼顾整个外形框架的尺寸。利用跟踪仪采集中心节点的圆, 拟合出方位轴线。利用斜梁确定方向, 调整内侧圆盘轴线与方位轴的距离, 使圆盘轴线与梁中心线重合, 继续调整第2个圆盘的位置, 保证两圆盘的中心距为(1200±0.5) mm且中心连线通过方位轴。 为了保证滚轮组合的连接孔位, 还需调整圆盘自身的姿态, 保证连接孔在一条线上。

4)主要的接口梁与节点安装完成后,外框梁的安装只需调整其等高性与直线度顺势装入到位即可。

1.2 二层框架

二层框架的梁与节点数目众多,且具有互换性。 安装过程中主要的技术指标是保证两侧梁单元大面的 垂直度、二层梁面的水平度和关于方位轴的对称度,调 整到5 mm以内即可,见图3。



1)为避免过大的空中工作量,可在地面将二层梁 结构分割为小单元进行拼装,最后再整体吊装。以两 侧面梁单元为例,在地面进行放样,再逐个将梁装入, 拼装时利用电子水准仪进行调平,利用工装固定好与 一层节点连接的各梁口之间的跨距。整个侧面质量为 60 t,需要用两台150 t级以上的吊车进行抬吊。为保 证两侧面梁单元与一层框架的垂直度,利用重锤加全 站仪进行调整,调整到位后用钢丝绳进行固定。

2)内侧斜梁长且重,对于悬臂的长梁,如果没有支 撑变形将会很大,必须提前装入。因此,将内侧斜梁与 节点、小横梁组装为小单元,这样可以保证斜梁生根, 保证了安装位置。 3)二层其他梁的安装与焊接需要脚手架的配合。 在斜梁组合吊装完后可以进行脚手架的搭建,为二层 其他梁的安装提供作业平台。利用电子水准仪进行检 测,依次装入各梁即可。

1.3 三层框架

三层框架顶部节点连接着俯仰轴承座(图4),为 天线俯仰传动的关键接口。为了使俯仰框架能够准确 装入,需在三层框架安装阶段调整顶部两节点,直至满 足如下要求:1)跨距 $L = \pm 2.5$ mm;2)关于方位轴左 右对称度小于2.5 mm;3)关于方位轴前后对称度小于 2.5 mm;4)自身大面的水平度小于2 mm;5)两侧面与 二层框架的垂直度小于5 mm。



图 4 三层框架

如此多的空间尺寸指标需要精确的检测仪器(激 光跟踪仪)与大型调整工具(100 t液压千斤顶)配合着 调整工装才能完成。此时的方位轴是在一层框架,需 要利用激光跟踪仪的转站功能移至二层。调整内侧斜 梁可以调整跨距、对称度与二层梁的垂直度,调整两侧 两斜梁可以调整前后对称度与自身的水平度,调整至 满足要求后用螺栓连接进行固定。

两俯仰轴承座的连接面需要满足等高性小于 0.3 mm和自身水平度小于0.1 mm的要求,对于如此 大的空间焊接结构,这是不可能完成的。因此,需要实 测两连接面的实际高度和自身高差,增加过渡件,根据 实测尺寸加工过渡件的连接面才能保证。而两俯仰轴 承座的跨距需要进一步根据实测的两俯仰框架的跨距 进行调整,两者偏差小于±0.25 mm时俯仰框架才能 顺利装入。

2 俯仰框架的安装与调整

俯仰框架负责天线的俯仰传动,由俯仰框架十字、 俯仰扇齿组合等结构组成,现场拼装工作量大。为了 节约现场安装周期,俯仰框架十字与俯仰扇齿组合分 别拼装,待拼装完成、焊接结束后,再将俯仰框架十字 吊装至俯仰扇齿组合组成俯仰框架。然后将俯仰框架 整体吊装至天线座架,最后再安装配重、伞形支撑等其 他部件[8]。

在地面进行分别拼装时,各结构件重量小、吊装 半径小,因此选用常规的80 t/120 t汽车吊进行吊装。 俯仰框架十字的质量为220 t,整个俯仰框架的质量为 485 t,根据核算采用2000 t级履带吊进行整体吊装。 吊装时需选用专业吊具并设计特制吊耳,根据吊装过 程及变形分析确定吊点位置及吊点数。结构设计阶段 对吊点位置进行加强,以防整体吊装时结构变形过大 导致不可逆的变形从而影响安装。

2.1 俯仰框架十字

俯仰框架十字如图5所示,其左右两端的俯仰 轴组合是整个结构拼装的重点,需保证同轴度为 Φ0.50 mm,十字方向垂直度小于50",各梁上表面 平面度不大于±2.5 mm。



图 5 俯仰框架十字

俯仰框架十字的拼装方案为:利用中间节点架设 仪器建立安装基准。先进行内框梁的拼装,固定好相 对位置,为外框梁的拼装建立基准,再拼装十字方向梁 和外框梁,最后进行整体焊接。整个过程中采用跟踪 仪监测调整同轴度和垂直度,采用电子水准仪调整大 面的水平度。

俯仰轴方向长度 $L_{\rm heta}$ 由5段梁组成,各梁的制作均存在误差,拼装时接缝有大有小,整个结构的拘束度也不尽相同,因此在同轴度调整到位后需准确分析和预估焊接变形,制定合理的焊接工艺并增加焊接工装,且在焊接过程中利用激光跟踪仪定期检测,发现同轴度有超过0.2 mm的变形后,根据变形方向及时调整焊接工艺,控制变形。最终得以完成俯仰框架十字的拼装,拼装结果的同轴度为 Φ 0.46 mm,垂直度为90°0′25″,满足设计要求。

2.2 俯仰扇齿组合

俯仰扇齿组合中环形梁的圆度*R*_{环形梁}以及环形 梁与三角斜梁的垂直度是天线准确俯仰运动的基础,

开放式的梁口跨距*L*_{梁口1}、*L*_{梁口2}和*L*_{梁口3}需根据俯仰 框架十字的跨距进行匹配调整,只有这些指标都符合 要求才能准确安装,见图6。



图 6 俯仰扇齿组合

俯仰扇齿组合的拼装方案为:先将环形梁拼装成 半圆,将激光跟踪仪置于外侧,检测、调整环形梁半径 *R*_{环形梁}和张口跨距*L*,将其调整至5 mm以内。再将内 侧梁组合拼装成整体后与环形梁相连。然后将俯仰扇 齿组合分两半立于支撑工装上。最后在工装上安装三 角斜梁,根据俯仰框架十字底部与三角斜梁相连梁口 的跨距调整^[9]三角斜梁与齿弧的垂直度,再安装其他 梁。

俯仰框架地面支撑工装如图7所示,除了十字两 头用到的支撑立柱,还有底部的支撑工装。每个工装 都有调节功能,保证结构各点都能调整到位。地面需 做专业设计。



2.3 俯仰框架

理论设计中总跨距 $L_{hag} = L_{hagg}$,且 L_{hag} 和 L_{hagge} 关于方位轴对称,俯仰框架可以直接装到俯仰 轴承座上。由于生产装配和焊接的不可控,吊装之前 需实测总跨距 L_{hag} 和相对于方位轴的 $\frac{1}{2}L_{hag}$,再根据 实测值调整两俯仰轴承座关于方位轴的距离 $\frac{1}{2}L_{hagge}$ 与总跨距 L_{hagge} ,要求总跨距不大于±0.25 mm,这样 才能保证俯仰框架准确装入,从而保证方位轴与俯仰 轴的相交以及方位轴与俯仰框架十字中心轴的重合, 见图8。俯仰轴承座形式采用哈弗式,吊装时打开上 盖,将俯仰框架吊装入内,盖上上盖完成吊装。然后安 装配重、伞形支撑等剩余结构件。最后固定俯仰框架, 为反射体的安装做好准备,此处安装较为简单,不再 赘述。



2.4 结束语

70 m射电望远镜天线座结构尺寸大、重量大,在 发往现场之前都是零散的梁与节点,整个安装过程复 杂。现场安装时,提前策划安装方案,将天线座架拆分 为小单元先在地面进行拼装,再进行单元吊装,减少了 空中的施工量;将俯仰框架拆分为俯仰框架十字与俯 仰扇齿组合在地面并行拼装,使现场的拼装效率翻倍; 待2000 t履带吊进场后在较短的时间内完成整个俯仰 框架的吊装,节省了成本。

天线座安装过程中,通过多种检测仪器的配合,使 天线座架与滚轮组合准确安装,保证了天线座的方位 转动。两俯仰轴承座跨距为36 m,经激光跟踪仪在同 等环境下的测量,最终将L_{轴承}与L_{轴承座}的偏差调整到 0.35 mm,使俯仰框架准确装入天线座架,实现俯仰转 动,为天线反射体的安装打下基础。

70 m射电望远镜天线座改变以往的安装方法,根据安装周期与现有的吊装资源,将天线座的安装化繁为简,提高了安装效率,保证了安装精度,为今后大型 天线座的安装提供了安装经验。

参考文献

- [1] 胡喆,张建松,周旋.中国首次自主火星探测任务"观赏指南"[J].人生与伴侣(下半月版),2020(9):44-45.
- [2] 我国火星探测70米天线整体吊装成功[J].发明与创新, 2020(5):57.
- [3] 郭可敬, 王博通, 贺新刚. 70 m天线反射体的安装与测量 (下转第18页)

表 2 计算的组件流量 L·I					$1 \cdot \min^{-1}$
序号	流量	序号	流量	序号	流量
1#	1.51	11#	1.51	21#	1.50
2#	1.52	12#	1.51	22#	1.50
3#	1.52	13#	1.49	23#	1.51
4#	1.52	14#	1.53	24#	1.52
5#	1.52	15#	1.52	25#	1.51
6#	1.52	16#	1.52	26#	1.50
7#	1.52	17#	1.52	27#	1.51
8#	1.51	18#	1.51	28#	1.49
9#	1.51	19#	1.53	29#	1.48
10#	1.51	20#	1.51	30#	1.49

3.4 温度一致性仿真

针对发射组件的温度一致性,选取一个区域15个 发射组件进行仿真计算,如图8所示。从仿真结果可 知,在整个阵面范围内,发射组件功放芯片表面的最高 温度低于45.46°C,最大温差小于7.96°C,器件壳体 温度及温度一致性均满足设计指标要求。接收组件采 用导冷散热,考虑到边界影响,采取了相邻两个区域共 30个组件进行仿真分析。在整个阵面范围内,接收组 件芯片表面的最高温度为39.2°C,芯片之间的最大温 差小于8.2°C,器件壳体温度及温度一致性均满足指 标要求。



图 8 发射子阵温度一致性仿真

(上接第14页)

[J]. 电子机械工程, 2021, 37(2): 41-44.

- [4] 唐学军, 唐志勇, 吴彩彬. 天气雷达天线座水平的测试和 调整方法 [J]. 现代农业科技, 2010(12): 26, 28.
- [5] 李云,张加波,韩建超,等. 大型天线装配测量与实时反馈调整技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(S1): 88-93.
- [6] 王新锋, 李明, 陈斌琦. 某天线座正交装配工艺与测量方 法研究[J]. 火控雷达技术, 2018, 47(2): 78-81.
- [7] 夏歆. 激光跟踪仪测量技术及其应用 [J]. 电机技术, 2019(4): 61-64.
- [8] 贺新刚,张鲜波.大型天线的场地设计与吊装[J].电子机 械工程,2020,36(2):9-13.

4 结束语

本文介绍了某车载机动式相控阵测控设备阵面结 构设计和热设计方案,并采用有限元方法对系统静力 学、动力学及热性能进行了仿真评估。方案的各项指 标均满足设计要求,目前该产品已完成交付,工作稳定 可靠,满足用户使用要求。文中提出的对结构桁架与 冷却进行多功能一体化设计的方法可为车载平台、机 载平台、太阳能智能蒙皮等产品的轻量化、集成化设计 提供借鉴。

后续还可利用有限元拓扑优化方法对该型号的一体化共形冷板进行减重设计,对共形冷板的流道布局和流阻匹配进行优化设计,以进一步提高其换热效率和天线均温性能。

参考文献

- [1] 刘炳辉. 功能结构一体化技术在雷达结构设计中的应用 [J]. 电子机械工程, 2013, 29(6): 40-44.
- [2] 江伟,王劲宣.数字阵列高机动雷达结构关键技术[J].雷达科学与技术,2018,16(3):347-350.
- [3] 宋敏, 胡劲松. 机载高精度相控阵雷达天线阵面结构设计 [J]. 电子机械工程, 2016, 32(3): 26-30.
- [4] 宋骏琛, 吴佳. 某天线骨架的减重优化设计及动力学数值 模拟[J]. 雷达与对抗, 2016, 36(4): 56-59.
- [5] 任恒. 某相控阵雷达天线阵面热设计及流量分配研究[J]. 火控雷达技术, 2017, 46(2): 80-84.

靳含飞 男,1978年生,高级工程师,主要从事结构总体设计和热设计工作。

[9] 王子辰, 张爱梅. 面向特大齿轮的激光跟踪测量精度提升 方法研究[J]. 红外与激光工程, 2021: 50(11): 1-8.

阎宏涛 男,1973年生,高级工程师,主要从事天 线结构工艺与管理工作。

贺新刚 男,1984年生,高级工程师,主要从事天 线结构设计及工艺工作。

张洁钰 女,1994年生,工程师,主要从事天线结构工艺工作。

唐亮亮 男,1993年生,工程师,主要从事天线结构工艺工作。