

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.05

两类大型射电望远镜热分析研究进展

付 丽

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 射电望远镜的精度问题一直是国际天文界关注的热点。对于毫米波射电望远镜, 温度变化引起的天线结构变形不容忽视, 但是由于温度载荷的瞬时性和不确定性, 很难对热变形进行准确分析和有效控制, 因此, 开展射电望远镜的热分析研究对提高望远镜的面形精度和指向精度具有重要意义。主要以代表性的全方位可动正馈和偏馈两类大型射电望远镜为研究对象, 从理论、实验和模拟三个方面综述了射电望远镜热分析研究的现状, 重点介绍了热分析的理论研究概况, 并讨论了其中存在的问题, 根据热分析研究的最新进展对其未来的发展趋势进行了展望。

关 键 词: 射电望远镜; 指向精度; 面形精度; 热分析

中图分类号: P111.44; TN82 **文献标识码:** A

1 引 言

随着我国航天事业和天文学研究的快速发展, 对射电望远镜的灵敏度和分辨率要求越来越高, 望远镜朝大型化、高精度化发展已成为必需。国外已有的大型高精度射电望远镜包括美国的 100 m 射电望远镜^[1]、德国的 100 m 射电望远镜^[2]和意大利的 64 m 射电望远镜^[3]等。目前, 我国上海 65 m 射电望远镜^[4]于 2012 年 10 月底初步建成, 贵州 FAST500 m 射电望远镜^[5]正在建设, 新疆 110 m 射电望远镜^[6]也正在筹划。

影响望远镜面形精度和指向精度的主要因素包括: 重力、温度变化和风载等。重力引起的误差为可重复性误差, 可以预先根据统计规律进行有效控制; 而温度和风引起的是不可重复性误差, 如晴天、阴天、雨天、风速和风向等不确定因素均会对射电望远镜的精度产生影响, 这些影响因素具有瞬时性和不确定性等特点, 很难掌握其变化规律。但是对于毫米波射电望远镜, 不可重复误差的影响不容忽视, 因此调研国内外射电望远镜热分析的研究进展具有重要的科学意义和工程实际应用价值。

本文将瞄准本领域国际研究前沿, 以代表性的 GBT (Green Bank Telescope) 100 m 和

收稿日期: 2012-09-03; 修回日期: 2012-10-30

资助项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (08DZ1160100); 中国科学院知识创新工程重大项目 (KJCX-YW-18); 国家自然科学基金项目 (Y347201001)

IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique) 30 m 射电望远镜为对象, 从理论、实验和模拟三个方面介绍温度变化对射电望远镜精度的影响, 内容包括望远镜热致误差的计算方法、望远镜温度传感器的布设方案和依据, 以及望远镜温度场分布和热变形的数值模拟方法等。

2 望远镜热致误差计算方法

温度载荷工况包括均匀温度变化、温度梯度和随机温度变化, 不同的载荷工况分别会导致焦距误差、指向误差和面形误差等。本文重点介绍热致焦距误差和指向误差的计算方法。天线结构的背架、副面及撑腿的均匀温度变化会引起焦距误差, 座架、俯仰、背架、副面及撑腿在温度梯度作用下会导致指向误差。下面将分别介绍均匀温度变化和温度梯度作用下焦距误差和指向误差的计算方法, 其中温度梯度作用下的结构误差将按照天线结构各组成部分(背架和座架)分别介绍。另外, 从 VLBI (very long baseline interferometry) 角度介绍温度对时延的影响。

2.1 均匀温度变化下焦距误差修正方法

Richard 等人^[7]以美国的 GBT 为研究对象, 分析了均匀温度变化引起的天线焦距误差。由于重力为天线结构的恒荷载, 在分析温度对天线结构的影响时重力是始终存在的, 除了特殊的观测目标外, 很难精确地将两种载荷的影响分离开来。因此, 在建立焦距误差计算模型时, 同时考虑了重力的影响, 并做了如下约定和假设: 重力和温度对焦距误差的影响可以线性叠加; 不考虑热-固耦合; 结构受到均匀的温度变化作用, 不存在温度梯度。基于上述约定和假设建立了同时考虑重力和均匀温度作用下焦距误差计算模型, 具体表述为:

$$\Delta \tilde{F}(\varphi, T_i^{(f)}) = M^{(f)} \times \begin{bmatrix} T_1^{(f)} \\ \vdots \\ T_6^{(f)} \\ 1 \\ \sin(\varphi) \\ \cos(\varphi) \end{bmatrix} = M^{(f)} \times T^{(f)} . \quad (1)$$

焦距误差为俯仰角 φ 和特征温度的函数, 矩阵中前 6 行为温度引起的焦距误差, 后 3 行为重力导致的焦点变化。 M 为系数矩阵, 由大量观测数据推导而得。 $T_1^{(f)}$ 考虑主反射面背架结构与副反射面材料热膨胀系数不同的影响, 具体表达式如式 (2) 所示, 为天线结构上节点温度线性结合, 其中 $T_{B1}-T_{B5}$ 为主反射面背架结构上节点的温度, T_{SR} 代表副反射面的温度。 $T_2^{(f)}-T_6^{(f)}$ 具有相似的表达形式, 分别考虑主反射面背架结构与馈源臂的协调性、馈源臂的热胀冷缩或弯曲、主反射面背架结构的位移和旋转等因素。

$$T_1^{(f)} = T_{SR} - \frac{T_{B1} + T_{B2} + T_{B3} + T_{B4} + T_{B5}}{5} . \quad (2)$$

上述为天线的背架、副面和撑腿在均匀温度变化下焦距误差的修正方法, GBT 的研究人员利用此方法对天线结构进行焦距误差修正, 在一次观测实验中将焦距变化由约 30 mm 减小到小于 3 mm(中午时间除外)。

2.2 温度梯度作用下结构误差修正方法

2.2.1 背架热变形导致的误差

在温度梯度作用下背架热变形将导致焦距和指向误差。以背架俯视图为参考, 水平方向温度梯度引起方位指向误差, 垂直方向温度梯度导致俯仰指向误差, 前后方向温度梯度导致焦距误差。针对复杂的背架结构, 温度梯度作用引起的误差的具体修正方法为: 首先在天线背架结构上下、左右及前后共布设至少 16 个温度传感器; 其次根据测量的温度插值获得背架上剩余节点的温度; 然后将温度载荷施加到有限元模型上, 模拟获得节点位移; 最后根据节点位移拟合最佳吻合抛物面, 获得焦距和指向误差。

Greve 等人^[8]针对 IRAM 30 m 的射电望远镜背架结构热变形导致的焦距和指向误差问题, 展开了有限元分析和实验研究。图 1 显示的为有限元分析结果与测量结果的对比情况, 其中连续线表示为利用有限元软件分析获得的焦距误差, 符号表示的是测量的结果, 由图示结果可知两者的一致性很好, 差别量级在 0.1 mm, 利用此方法能够实现焦距误差的实时修正。另外, 图 1 (a)(39 GHz) 中 $t \leq 43$ h 和图 1 (b)(86 GHz) 中 $t \leq 20$ h 表示背架没有采取主动热控时的测量结果, 此时相对于有主动热控的情况有微小的焦距变化。图 2 显示的是在 86 GHz 情况下指向误差的对比结果, 其中点划线右侧为背架没有主动热控时的对比结果。在方位指向误差中, 6~7 h 时对比差较大, 分析原因为建立的有限元模型中不包括馈源舱等, 导致有限元分析与实验对比结果有些差别。

2.2.2 座架热变形导致的指向误差

(1) A 型座架

在温度梯度作用下座架变形会引起指向误差, 座架的俯仰指向误差 ΔE 和方位指向误差 ΔL 与沿俯仰轴方向的倾斜量 $\Delta \varepsilon_1$ 、垂直于俯仰轴方向的倾斜量 $\Delta \varepsilon_2$ 及旋转 $\Delta \varepsilon_{rot}$ 等相关, 根据图 3 所示的几何关系及热变形计算公式, 得到由于 A_1 和 A_2 的温差导致座架沿俯仰轴方向的倾斜量计算公式为^[9]:

$$\Delta \varepsilon_1 \approx \Delta L/B \approx \alpha L \Delta T/B \approx \alpha L (\langle T_{A1} \rangle - \langle T_{A2} \rangle)/B , \quad (3)$$

式中, $\Delta \varepsilon_1$ 为沿俯仰轴方向的倾斜量, α 为钢材的热膨胀系数, $\langle T_{A1} \rangle$ 和 $\langle T_{A2} \rangle$ 分别为图 3 中 A_1 和 A_2 的平均温度, E_1 和 E_2 为俯仰轴, ΔL 、 L 和 B 见图 3 所示。

如图 4 所示, 座架前后方向的温差导致垂直于俯仰轴方向发生倾斜 $\Delta \varepsilon_2$ 和旋转 $\Delta \varepsilon_{rot}$, 由此得到垂直于座架俯仰轴方向总的倾斜量为

$$\Delta \varepsilon_{\Sigma} = \Delta \varepsilon_2 + \Delta \varepsilon_{rot} . \quad (4)$$

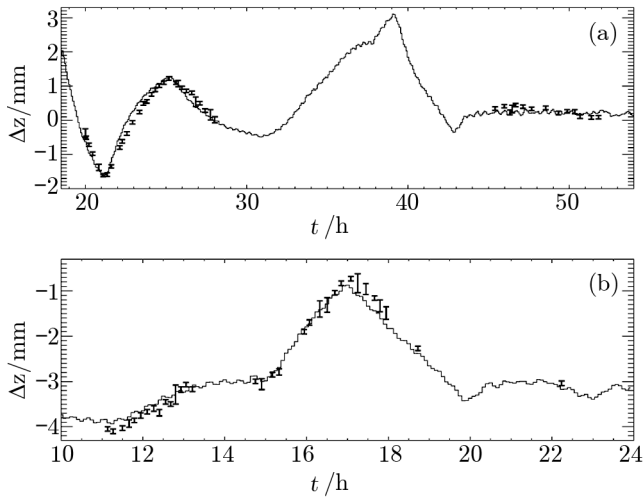


图1 测量与模拟计算焦距误差对比结果^[8]

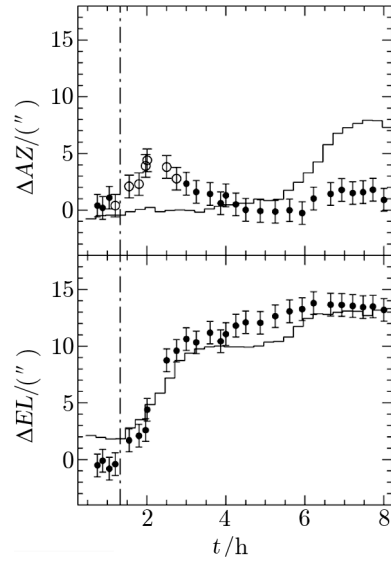


图2 测量与模拟计算指向误差对比结果^[8]

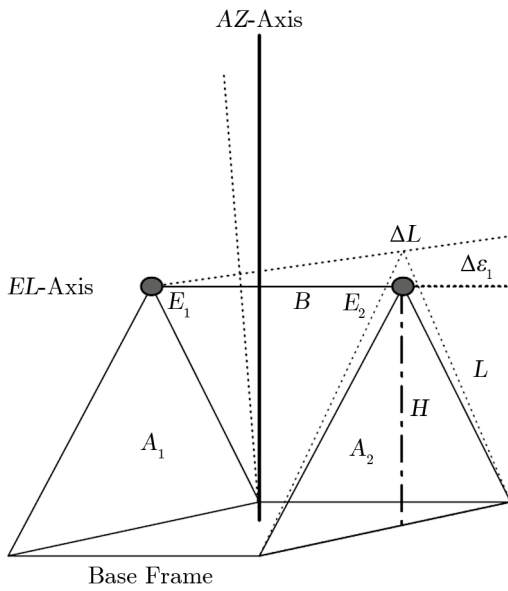


图3 座架俯仰轴方向倾斜示意图^[9]

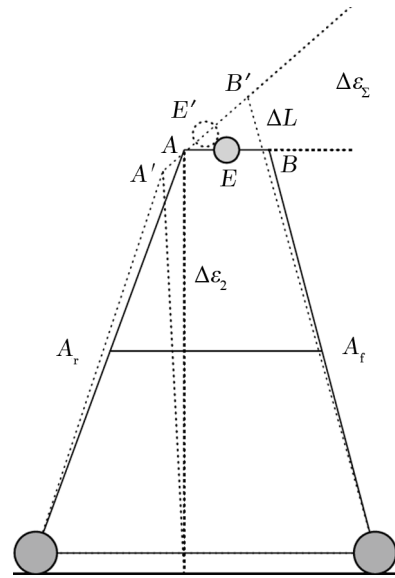


图4 座架垂直于俯仰轴方向倾斜示意图^[9]

Ambrosini 等人^[10]针对意大利 Medicina 32 m 的射电望远镜, 分别采用有限元分析方法、倾斜仪测量方法及温度计算模型分析了座架热变形对天线指向精度的影响。其中温度计算模型的基本思想即为上述介绍的内容。经分析对比得到不同方法下座架的倾斜情况如图 5 所示, 此次实验的结果显示三种分析方法具有较好的一致性。

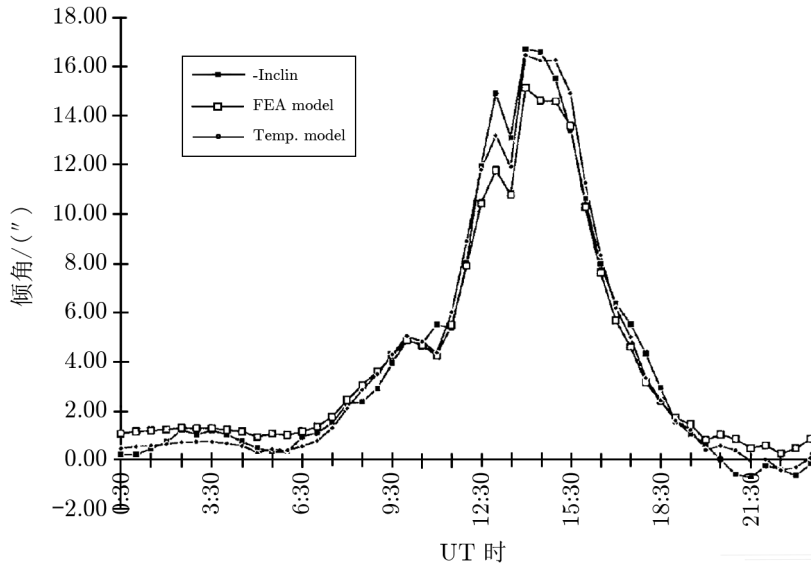


图 5 座架热变形对天线指向的影响^[10]

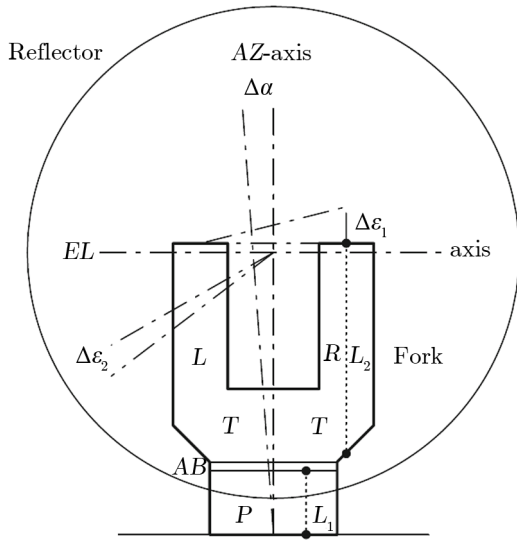
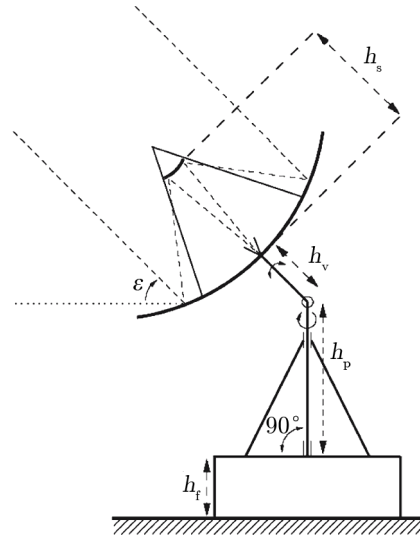
(2) 轭式结构 (Yoke)

支撑天线的轭式结构的热变形如图 6 所示, 由图示可知评价热致变形的参数主要包括 $\Delta\varepsilon_1$ 、 $\Delta\varepsilon_2$ 和 $\Delta\alpha$ 。 $\Delta\varepsilon_1$ 的计算原理及公式与 A 型座架相同, 只是公式 (3) 中的 B 近似取为 L_2 , 对于钢结构而言, $\Delta\varepsilon_1 \approx 2.5\Delta T$ arcsec。 $\Delta\varepsilon_2$ 正比于前后方向的温差 ΔT_{fr} , $\Delta\varepsilon_2$ 的大小不仅与 ΔT_{fr} 相关, 还与转角 $\Delta\alpha$ 相关。轭式结构不如 A 型座架几何关系明确, 还须结合有限元分析才能获得参数 $\Delta\varepsilon_2$ 。

目前报道的关于利用有限元分析结合温度测量数据获得 $\Delta\varepsilon_2$ 的文献中没有理想的结果。Ukita 等人^[11]研究 ASTE 10 m 射电望远镜轭式结构热变形对指向的影响。通过倾斜仪和温度传感器测量的数据, 建立了结构倾斜与温度梯度的关系, 具体为: $\Delta\varepsilon_1/\Delta T_{LR} = \Phi_y = (0.4 \pm 0.10)$ arcsec/ $^{\circ}\text{C}$, $\Delta\varepsilon_2/\Delta T_{fr} = \Phi_x = (1.54 \pm 0.03)$ arcsec/ $^{\circ}\text{C}$ 。上述关系为望远镜的控制提供了一定的依据。

2.3 热致 VLBI 延迟计算方法

VLBI 是 20 世纪 60 年代后期发展起来的射电干涉技术。VLBI 通过设在数百乃至上万千米长度的基线两端的射电望远镜同时接收同一射电源信号, 经相关处理机预处理和后续处理后, 能获得亚毫角秒级的超高空间分辨率。甚长基线干涉测量的精度主要取决于延迟时间的测量精度, 目前时间延迟的研究主要集中在大气延迟和仪器延迟等项的改正, 考虑热变形

图 6 轭式结构支撑变形示意图^[9]图 7 方位-俯仰射电望远镜^[12]

对延迟影响的研究较少。实际上，热致变形能达到几毫米，尤其是在天线参考指向的竖直方向上影响较大。

天线结构热变形会随着季节、时间的变化而变化，直接修正热变形难度较大，且准确性不高，Haas 等人^[12]根据 VLBI 的特点，提出温度变化导致 VLBI 延迟的修正计算模型，模型与环境温度、天线结构的尺寸、材料及俯仰角等相关，具体表达形式如公式 (5) 所示。此公式是针对方位-俯仰式天线的计算公式，Haas 等人还提出了极轴式天线的延迟计算公式，其推导思路与公式形式与公式 (5) 相似，在此不再赘述。对于 47 条基线，应用此计算模型进行误差修正，将基线的稳定性提高了 3.5%。

$$\Delta\tau = \frac{1}{c} \cdot [\gamma_f \cdot (T(t - \Delta t_f) - T_0) \cdot (h_f \cdot \sin \varepsilon) + \gamma_a \cdot (T(t - \Delta t_a) - T_0) \cdot (h_p \cdot \sin \varepsilon + h_v - 1.8 \cdot h_s)] \quad (5)$$

式中， c 为光速， γ_f 、 γ_a 为基础和天线的膨胀系数， h_f 、 h_p 、 h_v 、 h_s 和 h_d 为图 7 中示意的天线结构的尺寸， T 为天线结构的温度， T_0 为参考温度， Δt_f 和 Δt_a 分别为基础和天线由于环境温度变化导致天线结构热胀冷缩引起的时间延迟， ε 为天线的俯仰角。

由 2 个射电望远镜 A 和 B 组成的基线，信号由射电源到达 A 站和 B 站，热变形导致的测量延迟对基线总的影响为：

$$\Delta\tau_{\text{baseline}} = \Delta\tau_A - \Delta\tau_B \quad (6)$$

Haas 等人提出的时间延迟计算模型中，温度为 VLBI 测站记录的环境温度，实际上测量环境温度的位置与天线结构存在一定距离，不能精确代表结构温度。Wresnik 等人^[13]以 Onsala 20 m 射电望远镜为研究对象，基于数字过滤技术，建立结构温度与环境温度的关系

表达式, 具体为:

$$T_{m,i} = f_{\text{short}} \cdot \frac{\sum_{j=i-z_{\text{short}}}^i T_{A_j} \cdot q_{\text{short}}^{(z_{\text{short}}-(i-j) \cdot d)}}{\sum_{j=i-z_{\text{short}}}^i q_{\text{short}}^{(z_{\text{short}}-(i-j) \cdot d)}} + f_{\text{long}} \cdot \frac{\sum_{j=i-z_{\text{long}}}^i T_{A_j} \cdot q_{\text{long}}^{(z_{\text{long}}-(i-j) \cdot d)}}{\sum_{j=i-z_{\text{long}}}^i q_{\text{long}}^{(z_{\text{long}}-(i-j) \cdot d)}} + \text{offset} \quad , \quad (7)$$

式中, $T_{m,i}$ 为 i 时刻天线结构的温度, T_{A_j} 为 j 时刻测量的环境温度, d 为采样率, q_{short} 和 q_{long} 分别为短期和长期环境温度的变化, f_{short} 和 f_{long} 分别为短期项和长期项的权重因子, z_{short} 和 z_{long} 分别表达了 12 h 和 3 d 的记忆效应。

基于最小二乘法, 将 Onsala 天线长期的环境温度和结构温度数据进行分析, 获得天线结构的温度, 由公式 (7) 计算的结构温度与实际测量的结构温度的均方根值 (RMS) 为 0.65°C 。

3 望远镜热分析实验研究

3.1 温度传感器布设方案

望远镜的热控方法包括主动控制和被动控制两种方法。被动控制方法主要是采用热控涂层, 该方法具有技术简单、工作可靠和使用寿命长等优点, 但是无法对温度进行主动控制。主动控制方法利用热传导和热对流等换热方式, 对结构采取空调通风和液循环等方法控制温度。无论是哪种控制方法, 为达到对结构温度的有效控制, 首先必须明确结构上各节点的温度, 但是在每个节点上布设温度传感器是不现实的, 既增加了费用和重量, 又增加了布线难度。本节将介绍如何合理布设温度传感器。

Greve 等人^[8]对 IRAM 30 m 射电望远镜进行了大量热分析研究。该天线为正馈卡塞格伦天线, 工作频率为 100~300 GHz, 天线结构主要采用材料为钢材和铝材。针对频率如此高的射电望远镜, 必须考虑温度对天线结构面形精度和指向精度的影响, 并进行有效控制。

如图 8 所示, IRAM 30 m 射电望远镜共安装了 156 个温度传感器。主反射面背架结构采取均匀分布的方式布设温度传感器; 轭式装置温度传感器的安装位置是通过有限元分析确定的, 首先在结构上施加 1°C 温度载荷, 然后计算各节点的热变形, 最后通过计算结果选取关键节点布设温度传感器。基于温度传感器测量的节点温度, 利用插值法计算剩余节点的温度, 用于主动温控及有限元分析等。

2003 年, GBT 研究人员开始考虑温度对天线精度的影响^[4], 研究目的是修正焦距误差, 基于公式 (1) 的理论和偏馈天线结构的特点, 共布设了 23 个结构温度传感器 (如图 9 所示), 分别放置在副反射面、馈源臂的水平和竖直方向、主反射面背架及方位座架上, 测量各点的温度。其中, 在馈源臂上共布设了约 7 个温度传感器。另外还布设了 5 个空气温度传感器, 分析对流换热的影响。测量的俯仰结构以上的各节点的温度将代入到公式 (1) 中计算焦距误差。

IRAM 30 m 射电望远镜和 GBT 100 m 射电望远镜均为大型射电望远镜, 两个望远镜采

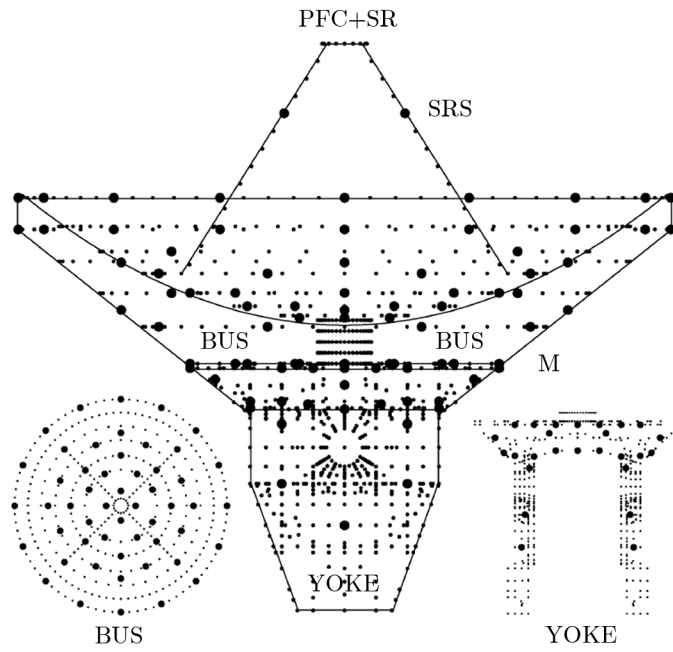


图 8 IRAM 30 m 射电望远镜温度传感器位置示意图^[8]

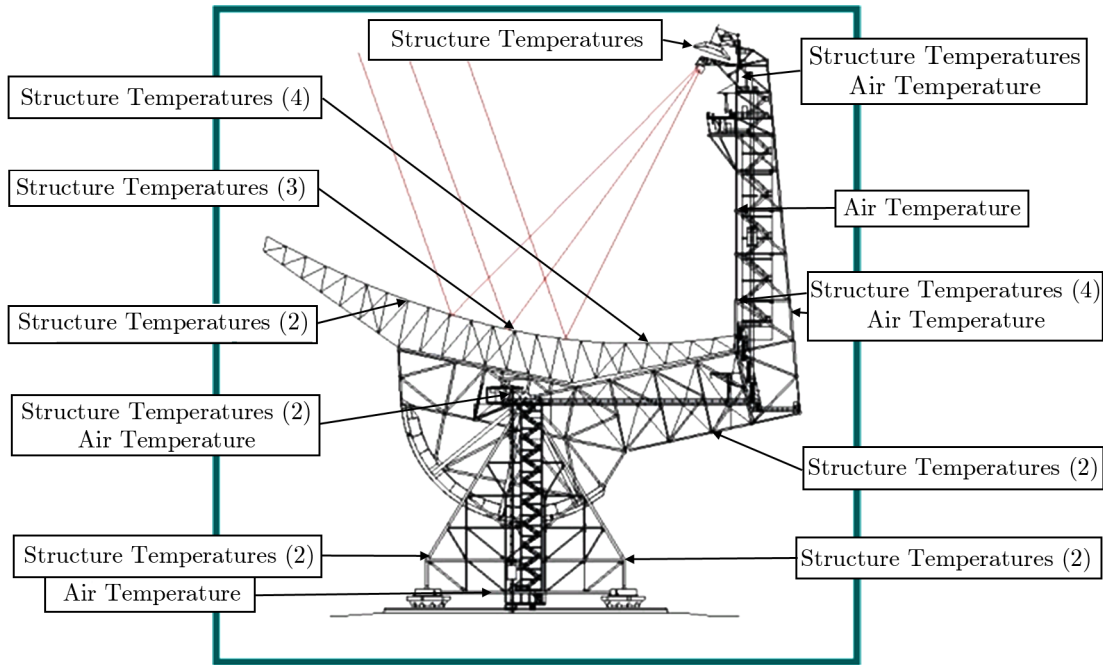


图 9 GBT 温度传感器位置示意图^[14]

用了不同的热分析方法, 对应不同的温度传感器布设方案。前者共安装了 156 个传感器, 能够完整地分析焦距误差、指向误差和面形误差; 该方案须安装大量的温度传感器才能准确反映整体结构温度场的分布状况。后者只安装了 23 个传感器, 目前已对均匀温度变化下焦距误差进行了修正, 并得到理想结果, 但是没有关于温度梯度下指向误差的修正结果; 而且虽然传感器安装数量少, 但是安装位置的确定须反复模拟和实验。

3.2 温度采集系统

文献 [9] 中列举了国外大型射电望远镜温度传感器的数量和安装位置等信息, 本文只列出其中主反射面口径大于等于 30 m 的射电望远镜温度实验研究状况 (由于 BIMA 6 m 的射电望远镜和 ALMA 12 m 的射电望远镜可查阅到传感器的型号, 因此也将其信息列入其中), 这些望远镜针对不同的研究目的分别在结构的不同位置布设了温度传感器, 具体情况如表 1 所示。

由表 1 可知, 可查阅到的射电望远镜温度测量所使用的传感器均为热电阻型温度传感器, 即铂电阻 (PT100) 或负温度系数热敏电阻 (YSI 系列) 传感器, 无论是采用哪种温度传感器, 其精度均优于 0.2°C 。图 10 显示的是 GBT 温度传感器与变送器集成模块以及安装布线的示意图。与此对应, 另外一种方案是将传感器安装在测量点位置, 变送器置于下面馈源舱等位置, 此时要求引线为三线或四线, 从而抵消引线电阻的影响, 保证测量精度。

表 1 部分射电望远镜温度传感器情况

望远镜	主反射面 口径/m	监测构件	传感器名称	传感器数量 /个
BIMA ^[15]	6	背架结构	YSI44016	32
VertexRSI-ALMA ^[16]	12	支座、背架结构、撑腿	PT100 TM	89
IRAM ^[6]	30	俯仰机构、背架结构、撑腿	*	44+104+8
NRO ^[17]	45	背架结构	*	140
Parkes ^[8]	64	背架结构、撑腿、中心筒	*	24+14
RT-70 ^[18]	70	背架结构	*	200
Effelsberg ^[9]	100	座架、背架结构、撑腿	*	19
GBT ^[7]	100	座架、背架结构、撑腿	YSI083	25

注: * 表示暂时未查到具体名称。

4 望远镜热分析模拟研究

在介绍射电望远镜热分析的模拟研究之前, 需要先引入传热学分析的基本理论, 因为望远镜在太阳辐射、空气对流换热及地面红外辐射的作用下产生的外热流及温度场的模拟计算都以此为基础。天线结构在温度载荷的作用下, 各结构组成部件的温度变化可表述为^[20]

$$\Delta T_i(t) = \Delta Q_i(t)/c_i M_i, \quad (8)$$



图 10 GBT 温度传感器和变压器及安装布线示意图^[19]

式中, i 代表天线结构的组成部件, c_i 为比热容, M_i 为组成部件的质量, $\Delta Q_i(t)$ 为焓的变化。天线结构的传热方式包括热传导、热对流和热辐射, 对应的焓变化分别为:

$$\Delta Q_{CD}(1, 2) = kF_{1,2}\Delta T/d_{1,2} \quad , \quad (9)$$

$$\Delta Q_{CV}(1, 2) = \Delta T/[h(a_1v^\alpha + a_2|\Delta T|^\beta)] \quad , \quad (10)$$

$$\Delta Q(1, 2) = e_1a_2\sigma F_1(T_1^4 - T_2^4)\varphi(1, 2) \quad . \quad (11)$$

$\Delta Q_{CD}(1, 2)$ 代表两个接触物体 1 和 2 之间的热传导, 与两个物体距离 $d_{1,2}$ 、温差 ΔT 、接触面积 $F_{1,2}$ 和材料的热传导系数 k 相关。 $\Delta Q_{CV}(1, 2)$ 为以流体 (通常为空气) 为媒介进行的两个物体 1 和 2 间的热量交换, 即热对流。公式 (10) 中 v 为流体的流动速度; a_1 和 a_2 为常数, $a_1 \approx a_2 \approx 1$; $\alpha \approx 0.66$, $\beta \approx 0.33$; h 为与两个物体的几何形状相关的系数^[21]。 $\Delta Q(1, 2)$ 为两个物体 1 和 2 之间的热辐射, 如图 11 所示, 热辐射与两个物体的距离 s 、表面积 F_1 和 F_2 、温度 T_1 和 T_2 、方向角 β_1 和 β_2 及发射率 e_1 和吸收率 a_2 相关。公式 (11) 中 σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-4}$, $\varphi(1, 2) = (1/\pi F_1) \int_{F_1} \int_{F_2} [\cos \beta_1 \cos \beta_2 / s^2] df_1 df_2$ 。

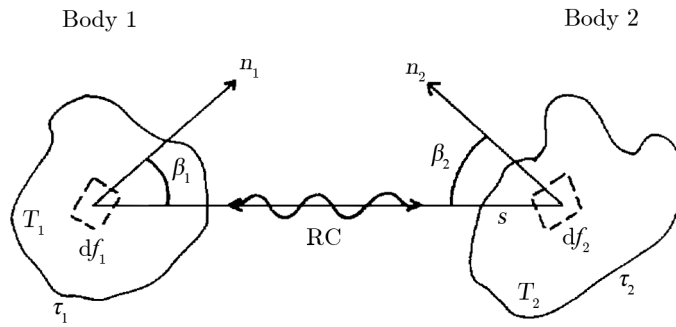
天线结构自身及其与周围环境的传热方式包括热传导、热对流和热辐射, 其中热辐射又包括太阳辐射、大气辐射和地面辐射等。太阳辐射是日照下结构最主要的温度载荷, 大气辐射和地面辐射等长波辐射是导致夜间结构温度下降的主要原因之一。由公式 (9)–(11) 可知, 天线周围环境的温度, 即环境温度 $T_A(t)$ 、大气辐射温度 $T_S(t)$ 、地面辐射温度 $T_G(t)$ 和太阳辐射强度 $S(t)$, 是分析天线结构温度的重要参数。

在计算模型中, 环境温度 T_A 既可以由测量记录直接获取, 也可以由公式 (12) 所示的 24 h 周期的近似计算公式获得。大气辐射主要指波长为 8~13 μm 的红外辐射^[22], 与环境温度相关。在晴天的情况下, 通常取 $T_S(t) = 0.0553T_A(t)^{1.5}$ ^[23]; 一般情况下, $T_S(t)$ 按照公式 (13) 计算, 反映实际的工况条件。在研究大气辐射对天线结构的影响时, $T_S(t)$ 实际上就是公式 (11) 中的 T_2 。地面辐射也是与环境温度相关的量, 表达形式与公式 (13) 相似。

$$T_A(t) = T_{A0} - \delta T_A \cos[\omega(t - t_a)] \quad , \quad (12)$$

$$T_S(t) = T_A(t) - \delta T_S \quad , \quad (13)$$

式中, $\omega = 2\pi/24$, $T_{A0} = \langle T_A(t) \rangle$ 为日平均温度, δT_A 为温度变化幅值, t_a 为环境温度最大

图 11 物体辐射几何关系示意图^[20]

值的时间相对于正午 12 时的时延, $\delta T_s \approx 10 \sim 20^\circ\text{C}$ 。

太阳辐射随着时间和天线方位俯仰位置的变化而变化,同时还受到是否存在云彩和不同照明的影响,所以太阳辐射的影响是天线结构热分析的难点问题。太阳辐射与太阳方位角和高度角有关,方位角决定了阳光入射方向,高度角与地面的太阳光强弱密切相关,这就是导致早晚与中午的光强有很大差异的原因。太阳高度角的计算模型如公式 (14) 所示,太阳的辐射强度计算模型如公式 (15) 所示。

$$\sin \beta(t) = \cos H(t) \cos \varphi \cos \delta(E) + \sin \varphi \sin \delta(E) \quad , \quad (14)$$

$$S(t) = S_0(1 + d)e^{-B/\sin \beta(t)} \quad , \quad (15)$$

式中, $H(t)$ 为太阳时角; φ 为地理纬度; $\delta(E)$ 为赤纬角,即太阳直射光线与赤道平面之间的夹角; S_0 为法向入射强度, $S_0 \approx 1300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; d 为扩散系数, $d \approx 0.1$; B 为透明系数, $B \approx 0.1$ 。

上述计算天线结构温度分布的方法涉及大量数学计算模型,天线结构包括多个热节点,节点温度随时间变化,模型复杂、计算量大,需要采用数值方法迭代求解。

基于天线结构传热学理论,将数值模拟研究主要分为三步:首先计算热辐射对结构产生的外热流;然后计算天线结构的温度场分布;最后分析温度场引起的天线结构的热变形,及其对天线性能的影响。针对上述的研究内容,模拟分析方法主要包括有限元法和节点网络法。

有限元法可以按照太阳入射方向在内表面或外表面施加一致的方向性热流,但不能考虑结构自身的遮挡,不能根据热流方向自动计算热流加载区域及大小。对于大型天线结构,外热流随着太阳位置及天线方位俯仰位置的变化而变化,同时考虑复杂结构阴影遮挡关系的影响。在利用有限元法对天线结构进行热分析时,需要首先编译程序,考虑结构阴影遮挡并计算外热流。

目前,节点网络法能够计算结构在太阳辐射、空气对流换热及环境长波辐射作用下的外热流,同时能够考虑构件间的遮挡,是计算外热流较理想的方法。但是节点网络法只能计算结构的温度场分布,热变形的计算是通过提取节点温度,并将其施加到有限元模型上计算

获得。

5 展 望

对于大型高精度射电望远镜，温度是影响精度的重要因素之一，温度的影响具有瞬时性和不可重复性等特点，目前，大型射电望远镜的热致变形分析仍是难点问题。随着天文学研究的迅速发展，对现有的天线结构热分析的理论、实验和模拟研究提出了更高的要求。

虽然近几年来有关大型射电望远镜的热分析研究日益得到重视，并取得了一定的进展，但是仍有许多工作需要完善和深入研究，作者认为以下的一些研究课题有望成为今后的研究重点和新的探索方向。

(1) 温度对大型射电望远镜的影响主要包括均匀温度变化、温度梯度及随机的温度变化等。均匀的温度变化会产生焦距误差，若面板和背架材料不同，还会产生反射面面形误差；温度梯度会引起指向误差和面形误差；主反射面背架结构和面板上的随机温度变化会导致天线产生面形误差。均匀温度变化对焦距的影响是相对容易解决的问题，目前已有方法可以获得焦距误差；温度梯度引起的指向误差是正在研究解决的问题，可以配合倾斜仪共同分析指向误差；随机温度载荷对面形误差的影响目前还没有得到有效的解决办法。

(2) 风载荷是影响对流换热的重要因素，在进行热分析时不能只考虑温度的变化，还应同时考虑风的影响。风和温度都具有瞬时性和不可重复性的特点，如何将二者结合分析大型射电望远镜的精度是今后新的探索方向。

(3) 主反射面反射太阳辐射热量并聚焦于副反射面，从而使得副面温度剧增，称为“太阳灶”问题。针对直接观测太阳或者观测目标接近太阳的任务，“太阳灶”问题是必须要认真考虑的，但目前几乎没有这方面的报道。该问题将会成为将来研究的热点之一。

(4) 大型射电望远镜热分析中每种研究方法都存在各自的缺陷，如理论研究中建立模型时的简化和假设，实验研究中受温度传感器安装数量的限制不能获得全部节点的温度，模拟研究中模型简化和输入参数的准确度等，如何利用理论、实验和模拟研究方法的优点并有效结合进行精确的热分析，应该是未来研究的重点。

(5) 温度载荷具有瞬时性的特点。虽然温度季节性变化及白天黑夜的变化有大体变化趋势，可以根据实验测量结果总结变化规律，从而进行预先初步调节，但是，实际上每天都具有不同温度载荷工况。因此，热致变形的实时修正应该是未来研究中必须要考虑的问题之一。

(6) 大型射电望远镜热分析的数值模拟研究中，在利用有限元软件进行热分析时，首先需要编译程序计算结构构件间阴影遮挡关系和外热流，如何编译具有通用性的模块应该是未来模拟工作的重点。

致谢

感谢中国科学院上海天文台钱志瀚研究员在作者研究大型射电望远镜热分析问题过程中给予的指导及对论文的修改，感谢中国科学院紫金山天文台左营喜研究员和哈尔滨工业大

学钱宏亮副教授提供文献和帮助。

参考文献:

- [1] Nikolic B, Prestage R M, Balsler D S, et al. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 465(2): 685
- [2] Hachenberg O, Grahl B H, Wielebinski R. *Proc. IEEE*, 1973,61(6): 1257
- [3] Gruett G, Alvito G, Ambrosini, et al. *Mem. S. A. It. Suppl*, 2004, 5: 351
- [4] Shen Z Q. *General Assembly and Scientific Symposium*, Istanbul: URSI, 2011: 1
- [5] Nan R D, Li D, Jin C J, et al. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20: 989
- [6] WANG N. *Xiangshan Science Conferences*, Urumqi: Xinjiang Astronomical Observatory, 2012: 1
- [7] Prestage R M, Constantikes K T, Balsler D S, et al. *Proc. SPIE*, 2004: 1029
- [8] Greve A, Bremer M, Penalver J, et al. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 2005, 53(2): 851
- [9] Greve A, Bremer M. *Thermal Design and Thermal Behavior of Radio Telescopes and Their Enclosures*. Springer, 2010: 20
- [10] Ambrosini R, Gruett G, Morsiani M, et al. *Astrophysics and Space Science*, 1996, 239: 247
- [11] Ukita N, Ezawa H, Ikenoue B, et al. *Publ. Natl. Astron. Obs.* 2007, 10: 25
- [12] Haas R, Nothnagel A, Schuh H, et al. *Deutsches Geod?isches Forschungsinstitut(DGFI) Report*, No. 71. M ü nchen: DGFI, 1999: 26
- [13] Wresnik J, Haas R, Boehm J, et al. *Journal of Geodesy*, 2007, 81: 423
- [14] Prestage R M, Constantikes K T, Balsler D S, et al. *Proc. SPIE*, 2004: 1
- [15] Lamb J W, Forster J R. *MMA Memo* 100, 1993: 1
- [16] Greve A, Mangum J G. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2008, 50(2): 1
- [17] Ukita N. *Publ. Natl. Astron. Obs.* 1999, 5: 139
- [18] Machuyev Y I, Gimmelman V G. *ISAPE '06. 7th International Symposium*, Guilin: IEEE, 2006: 1
- [19] Prestage R M. *Technical Seminar*. Shanghai: SHAO, 2012: 1
- [20] Greve A, Dan M, Penalver J. *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1992, 40(11): 1375
- [21] Chapman A J. *Heat Transfer*. New York: MacMillan, 1974: 166
- [22] Eriksson T S, Granqvist C G. *Appl. Opt.*, 1982, 21: 4381
- [23] Swinbank W C. Q. *J. R. Meteor*, 1963, 89: 339

Progress in Thermal Analysis of Two Types of Large Radio Telescope

FU Li

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 200030 Shanghai, China)

Abstract: The accuracy problem of radio telescope is always a hot topic in international astronomical field. The temperature-induced deformation is not negligible for observations at millimeter wavelengths. It is difficult to precisely analyze and effectively control because the effect of temperature on telescope is time variable. Consequently, developing thermal

analysis is significant to improve surface and pointing accuracy of radio telescope.

This paper reviews the progress of the thermal analysis of two types of radio telescope (primary focus and offset feed antenna). Theoretical, experimental and simulation researches are introduced. Moreover, we concentrate primarily on the general situation of the theoretical research. According to the different temperature loading cases, the theoretical research includes the error correction methods of focus and pointing. In addition, the time delay of very long baseline interference is introduced. The results show that every method correction achieved desirable effects. Aiming at the different correction methods of error, two schemes of location of temperature sensor are proposed. Additionally, the advantages and disadvantages of the finite element analysis and node network technique are also introduced.

Finally, the new research direction and priority research contents are previewed. The problems of wind coupled with temperature, real-time control and random temperature load will be focused to research in the future.

Key words: radio telescope; pointing accuracy; surface accuracy; thermal analysis