

紧缩场测试反射面拼装结构与精密定位设计

任大伟 葛鲁宁

(上海莱天通信技术有限公司 上海 201204)

摘要: 本文集中讨论了大型紧缩场 (Compact Antenna Test Range, CATR) 测试反射面的结构——拼装结构。相对于一体反射面结构, 拼装反射面结构产生了更多的自由度误差和更多的误差积累, 因此需要更合理的反射面型面分割结构设计以及更合理的拼装调整机构。综合过往项目经历, 本文提出了相关设计要点和注意事项, 为后续更大的 CATR 反射面分割结构设计提供技术支撑和经验借鉴。

关键词: CATR; 反射面; 拼装结构; 精密定位

0 引言

近些年来, 随着无线通信技术的迅速发展, 微波天线的测量测试系统, 无论是测试精度要求、测试频率要求, 还是测试范围要求, 都在不断提高。

在众多微波天线测量测试系统中, CATR (紧缩场测试法) 是用紧缩场反射面馈源系统来模拟一个无限远场区, 将馈源发射的球面波, 反射成为一个伪平面相位波, 来完成天线的方向图测量。CATR 因其测试场景丰富, 应用也越来越广泛, 如图 1 所示^[1]。CATR 反射面主要有两种结构形式: 锯齿边反射面和卷边反射面。

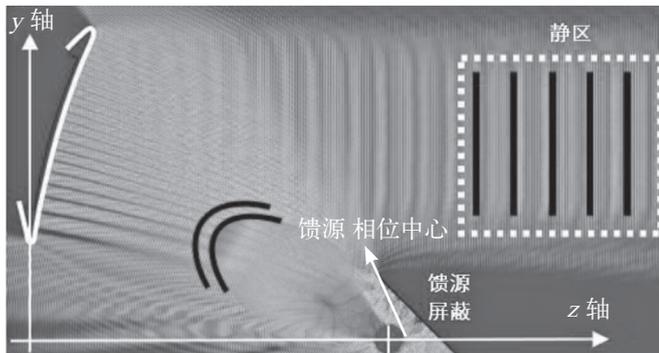


图 1 CATR 工作原理

CATR 反射面的设计与 RF (射频测试) 要求联系密切, 一般的约束条件可以表述如下:

(1) 高频率测试阶段, 要求很高的精度, 包括反射面型面本体的型面精度和表面粗糙度。

(2) 低频率测试阶段, 要求较大的反射面物理尺寸和适当的反射面边缘 (分卷边和锯齿边两种)。

在 CATR 反射面型面设计完毕后, 基于加工制造

和精度检测条件的实际情况, 一般需要将大型反射面分割为几个部分独立加工后再进行拼接组装, 如图 2 所示, 该项目将 CATR 反射面分割为 5 个局部型面。

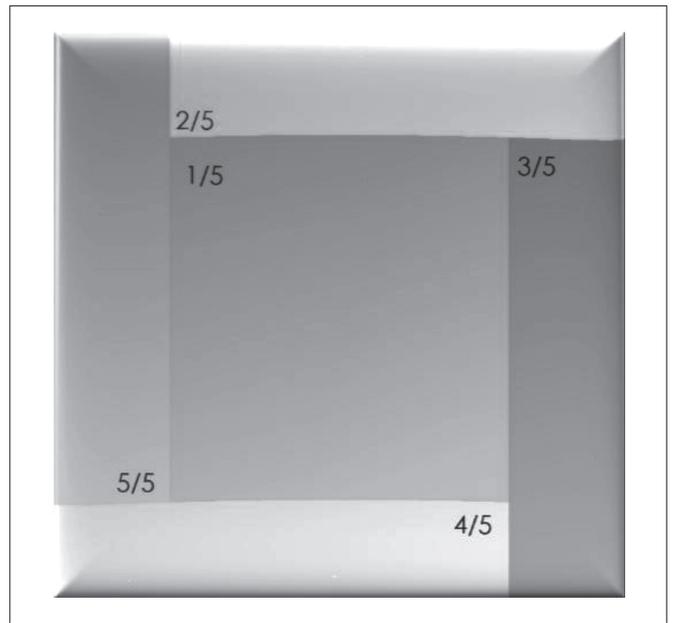


图 2 CATR 反射面拼装结构

图 2 中, 卷边反射面型面尺寸 $W \times H = 4000\text{mm} \times 3945\text{mm}$, 静区范围 $= \phi 2000\text{mm} \times L2000\text{mm}$, 静区标高 $H' = 3600\text{mm}$, 馈源照射角度 $= 32.02^\circ$ 。该项目将反射面分割为 5 部分, 其中为了保证静区性能指标, 采用中央整块 ($W' \times H' = 2350\text{mm} \times 2560.5\text{mm}$)、四周交叉搭接的结构。

区别于一体加工反射面, 拼装反射面的机械精度技术要求还包括:

- (1) 单体局部型面轮廓尺寸精度；
- (2) 单体局部型面轮廓型面精度；
- (3) 单体局部型面表面粗糙度；
- (4) 多单体型面拼装缝隙精度要求；
- (5) 多单体型面拼装台阶差精度要求；
- (6) 多单体型面拼装后一体化型面精度要求；
- (7) 多单体型面拼装后一体化空间精密定位精度要求。

1 CATR 反射面拼装结构可调设计

多个反射面单体型面的拼装精密定位结构设计，主要有3种类型。

1.1 主体型面精密定位结构设计

主体型面的定位结构，主要与其后面的刚性背架结构相连接，见图3^[2]。中间多自由度定位机构分上下两层结构，上层是球铰结构，允许主体型面绕轴转动；下层是笛卡尔坐标系推拉结构，允许主体型面沿轴线运动。

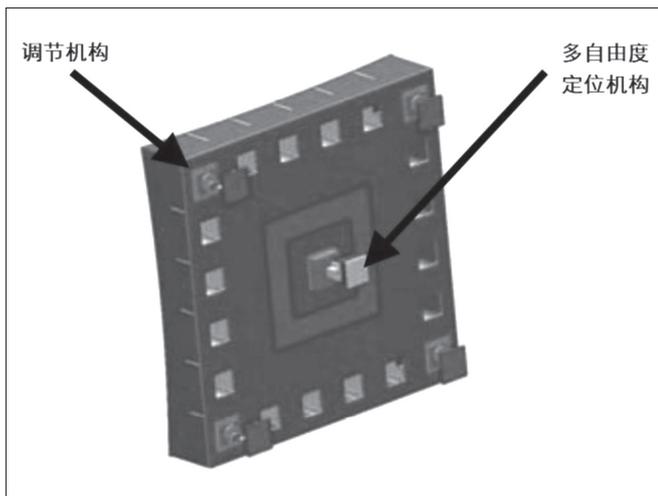


图3 主体型面定位结构

分布于四周的调节机构，通过推拉平移，实现中心主体型面2重6个平移自由度的调整。

1.2 周边4个型面精密定位结构设计

通过机械结构，将周边4个局部型面安装到中心主型面上；通过不同布局位置，利用或规避重力影响因素。以主体型面为参考基准，设计空间自由度可调节，其中，第一个被安装的型面需要具备 ≥ 5 自由度可调机构；第二个被安装的型面需要具备 ≥ 4 自由度可调机构；第三个被安装的型面需要具备 ≥ 3 自由度可调机构；第四个被安装的型面需要具备 ≥ 2 自由度可调机构。每个型面的调整机构，需要沿其拼

装轮廓线布局设计。

1.3 5个单体型面拼装完成后定位结构设计

所有单体型面拼装到位后，就需要架设激光跟踪仪，参考暗室坐标系和反射面坐标系，逐步调整压缩定位误差。

2 CATR 反射面拼装结构精密定位安装

CATR 反射面一般坐标建立原则如下：

(1) 坐标原点 $(0, 0, 0)$ 设立在焦线轴和抛物面中截面的交点，一般称为 Vertex ；

(2) 面对反射面，右手方向定义为 X_+ ，竖直向上方向定义为 Y_+ ；

(3) 根据右手定则，定义 Z_+ 方向为指向静区方向，如图4所示。

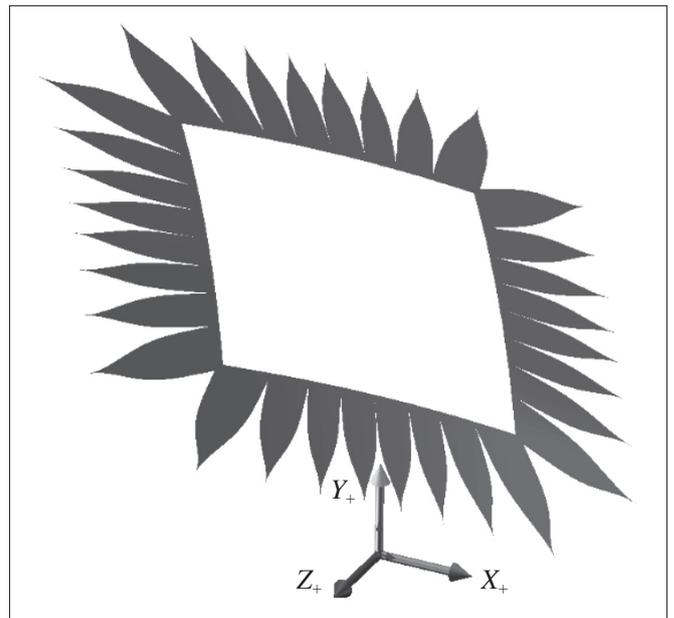


图4 CATR 反射面坐标系

2.1 精密安装定位过程

CATR 反射面安装在XYZ坐标系内，具备6个自由度，可沿轴线移动和绕轴线转动。根据反射面结构特点，将整个精密安装定位过程划分为两部分：粗装定位和精调定位，分别关注和管控不同的自由度误差。

(1) 反射面粗装定位阶段，主要完成以下自由度的定位调整：沿X轴移动、沿Y轴移动以及绕Z轴旋转。该过程一般称为反射面的找正，主要是找正反射面垂直中心面与暗室中心面的位置关系。

(2) 在完成粗调后，紧跟着进行精调定位，主要

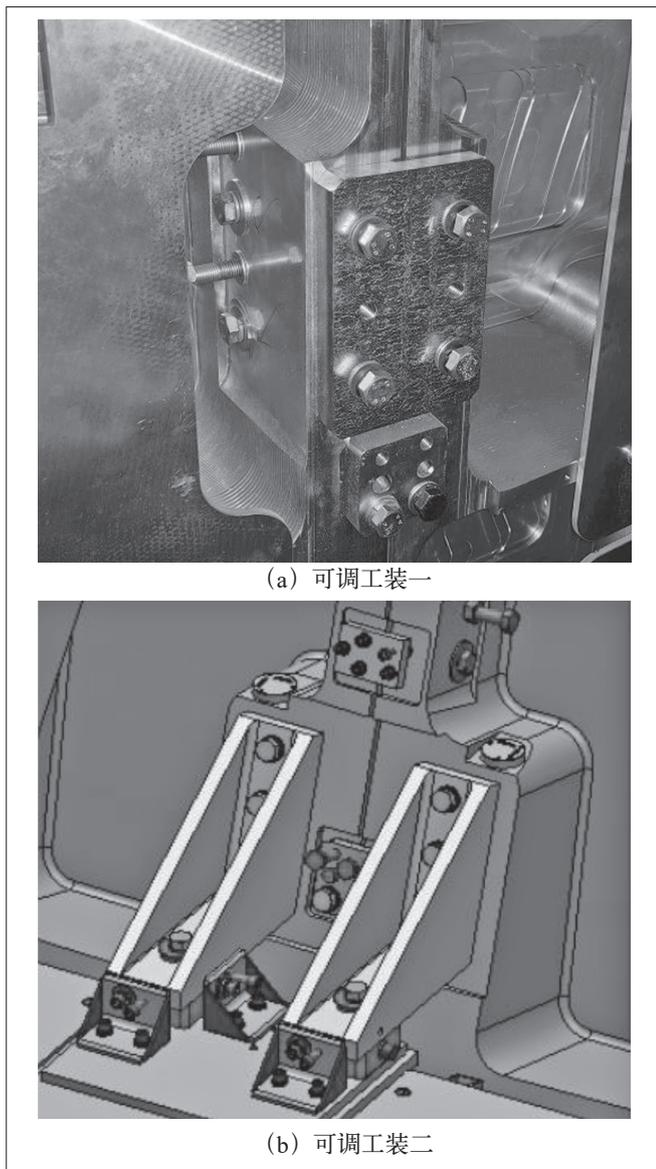
完成以下自由度的定位调整：绕 X 轴旋转、绕 Y 轴旋转以及沿 Z 轴移动。

2.2 反射面背架设计

根据空间几何关系可知，在有限长度内，任何角度误差 ($\Delta \alpha$) 都可以转换为位移误差 (ε) 来描述，即 $\varepsilon = \Delta \times \tan \Delta \alpha$ 。在同一平面内，两个位移误差可以代表一个角度误差。

根据上述原理，反射面背架需要具备以下位移误差的调整功能：沿 X 轴方向的推拉（或推顶结构）、沿 Y 轴方向的推拉（或推顶结构）以及沿 Z 轴方向的推拉（或推顶结构）。

能够实现预定设计调整要求的两种工装结构，见图 5。



(a) 可调工装一

(b) 可调工装二

图 5 可调工装结构

2.3 测量数据分析及指标

反射面的精调定位过程，既是一个需要靠时间积累的精细作业过程，也是一个考验工程师对测量方式方法、测量数据、机械调整点位和调整量综合分析的过程，更是一个渐进压缩安装误差的过程。

面对大量的中间实时测量数据，比较有参考意义的做法是：记录关键锚点的测量数据，对前后数据进行针对性的梳理和对比分析，通过不同点位和不同调节量，获得反射面表面测量数据的变化趋势。然后根据摸索出来的调整经验值进行验证和精调。到精调后期，工程师应该有能力对调整后的测量数据进行比较准确的估计。

根据激光跟踪仪测量的数据，最终评定空间定位安装精度的指标有两个：PtP 波峰波谷极限差值和 RMS 均方根值。

2.4 反射面拼装结构设计难点

反射面拼装结构设计的难点如下：

(1) 拼接截面设计。根据 SCD-29 项目，CATR 反射面厚度为 155mm，在进行拼接截面贴合安装时，需要考虑整个接触平面的结构和机加工精度。如截面结构设计不合理，会导致两型面贴合安装时，无法紧密贴合；如机加工精度不达标，会导致两型面贴合安装时，拼接缝隙不均匀且难以闭合。

(2) 型面拼接翘曲问题。一般情况下，假设反射面零件都是刚体；但是在精密定位调整阶段，以微米量级进行测量和评价时，前面假设就不再成立。所以在精密定位调整阶段，反射面组成型面是非刚体，在不同维度进行定位调整时，反射面会发生翘曲。这里的翘曲，既包括零件本身刚度不足而产生的弹性变形，又包括整体相对位置关系的翘曲，见图 6。

造成反射面翘曲的原因有很多种，很难予以确定。综合诸多项目实践和工程经验，如果出现各型面无法贴合的情况，多半是因为各单体型面发生了相对位置关系翘曲。此时释放型面贴合夹紧工装是一种可以进一步探查具体原因的方法。

3 CATR 反射面拼装结构工程实践

前文已经对反射面机械安装精度有所提及，在综合众多项目实践经验的基础上，给出一般技术要求，如下：

(1) 反射面金属材料选用 7075 锻造铝合金或殷钢；

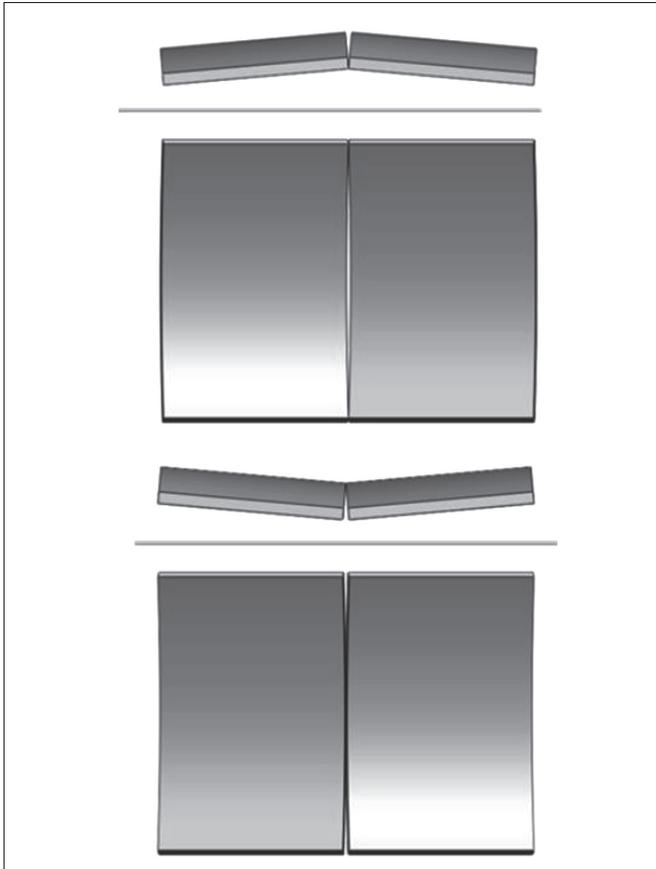


图6 拼接反射面翘曲

- (2) 反射面机加工型面精度为 $\pm (20 \sim 30) \mu\text{m}$;
- (3) 反射面静区对应位置区域表面粗糙度 $Ra0.8\mu\text{m}$, 其他关键区域表面粗糙度 $Ra1.6\mu\text{m}$;
- (4) 反射面空间精密定位安装精度为 $PtP \leq (120 \sim 150) \mu\text{m}$, $RMS \leq 80\mu\text{m}$.

工程实践项目最终精密定位安装精度测量结果, 见图7。

4 结语

本文结合笔者多年工程项目经验, 对 CATR 拼装反射面结构设计和定位安装进行了概括和总结, 项目中典型静区区域指标为: $\phi 2000\text{mm}-L2000\text{mm}$, 对今后更大 CATR 拼装反射面结构设计(比如 10m 静区)提供了借鉴和参考。

参考文献:

[1]CORBETT ROWELL, BENOIT DERAT, ADRIAN CARDALDA-GARCIA. Multiple CATR Reflector System for Multiple Angles of

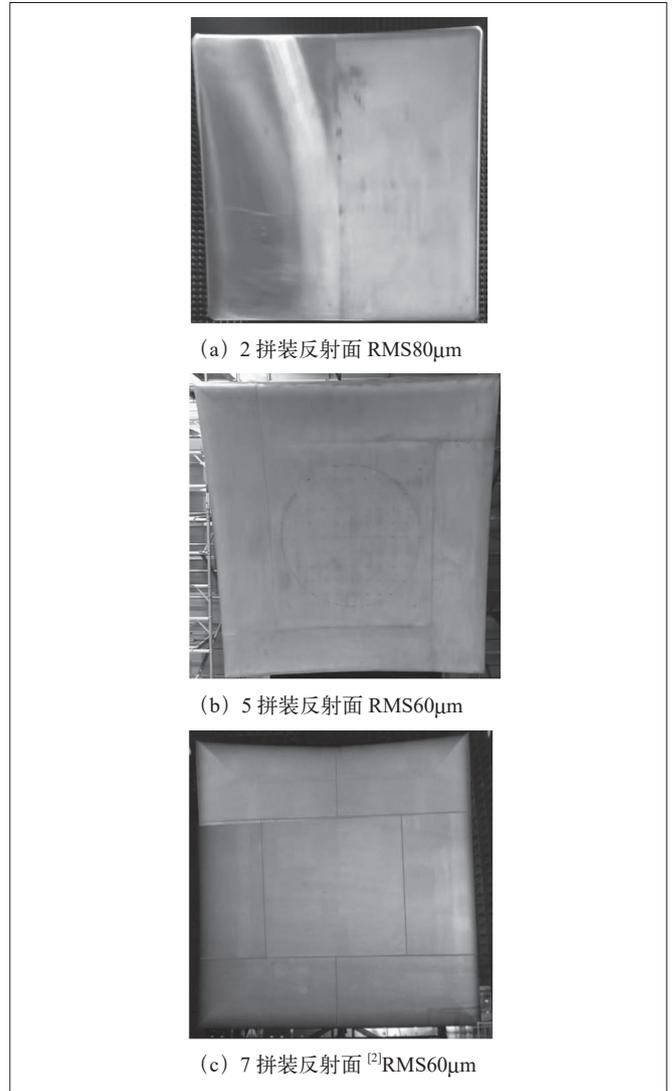


图7 拼装反射面工程实践

Arrival Measurements of 5G Millimeter Wave Devices[J]. IEEE Access, 2020, 8(11):211324-211334.

[2]John R. Proctor, David R. Smith. Compact Range Rolled Edge Reflector Design[J]. MI Technologies, 2006.

[3]王玖珍, 薛正辉. 天线测量实用手册 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.

[4]A Davison. Handbook of precision engineering[M]. MACMILLAN EDUCATION, 1972.

[5]裘祖荣. 精密机械设计基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

作者简介: 任大伟 (1981.10-), 男, 汉族, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 微波天线测量系统机械精度设计与机械精密安装调试工艺。