

文章编号: 2095-4980(2018)04-0653-05

一种高精度偏置反射面天线模具设计

江文剑, 史明, 杨亚宁

(中国空间技术研究院 西安分院, 陕西 西安 710000)

摘要: 卫星使用频段的逐渐提高对星载天线反射器的型面精确度提出了越来越高的要求。模具设计和制造是制造高精度反射器的关键技术之一, 温度对模具的影响主要表现在型面精确度和热膨胀变形。建立了一个偏置抛物反射面天线成型模具的设计补偿公式, 并对该补偿公式进行了理论推导、仿真分析和试验验证。结果表明, 基于该补偿方法, 模具在反射器固化温度下型面精确度达到了 0.05 mm 均方根(RMS), 能够有效降低模具热变形对反射面天线型面精确度的影响。

关键词: 反射面; 天线; 模具; 高精度度

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0653

A high-precision mould design method of offset-reflector antennas

JIANG Wenjian, SHI Ming, YANG Yaning

(China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: With the gradual increasing of utilized satellite bands, the requirement on the surface accuracy of reflectors is growing higher rapidly. The mould design and manufacture is one of the key factors of manufacturing higher accuracy reflectors. The mould properties would be influenced by temperature in the surface deviation of the Root Mean Square(RMS) and the thermal expansion deformation. A mould surface compensation formula of an offset parabolic mould is established. The compensation formula is theoretically derived, simulated and verified. Results show that the mold surface accuracy achieves 0.05 mm RMS at the curing temperature of the reflector by this compensation method; the influence of the mould's thermal deformation on the antenna surface accuracy can be effectively weakened.

Keywords: reflector; antenna; mould; high-precision

随着卫星使用频段的逐渐提高, 如从厘米波段(3~30 GHz)提高到毫米波段(30~300 GHz)及亚毫米波段(300~3 000 GHz), 人们对卫星天线反射器型面精确度提出了更高要求^[1]; 高精度反射面天线在遥感卫星、气象卫星、通信卫星和深空探测等卫星领域也开始得到广泛的研究和应用^[2-5]。高频段的开发与使用使得国内外都在高精度固面天线反射器方面投入了很多关注, 尤其是这类反射器的设计与制造等方面。而对于反射器制造技术, 模具的设计和制造又尤为关键^[6-10]。当前, 天线反射器模具仍多采用铸铁模具。铸铁模具具有加工性好、热导率高、成本低等特点, 其典型结构为薄壳加筋结构, 但铸铁模具热膨胀系数大, 加工得到的 1.5 m 以上大口径反射器型面精确度差, 为 0.2~0.7 mm RMS^[11]。

针对模具受温度影响热胀变形而引起反射器型面精确度变差的问题, 可对模具型面进行补偿和修正, 使模具型面在反射器固化温度下热膨胀后的形状与常温下理论型面吻合, 从而使模具热变形受温度影响降低。李成贝^[12]对旋转抛物面天线模具补偿公式在平面坐标系中进行了简化推导, 但未对偏置反射面天线模具的补偿方法进行推导, 且未进行仿真计算和实验验证; 夏文干等^[13]则根据积累的反射器型面数据对模具型面进行了修正, 将 0.64 m × 0.68 m 口径的碳纤维蜂窝夹层结构偏置反射器型面精确度控制在 0.031~0.057 mm RMS, 但该方法在单件生产的星载天线反射器加工中不易实现。

本文基于有限元分析技术和试验比较方法, 首先对偏置抛物面天线模具补偿公式进行了推导; 然后, 通过建立模型对补偿公式进行了仿真分析; 最后, 将试验结果与仿真分析结果进行比较, 对补偿公式推导和有限元仿真分析结果进行验证。

1 热膨胀变形基本理论

一个均质的物体上任意两点间膨胀变形，在计算时 $\Delta L=L \times CTE \times \Delta T$ 。其中 ΔL 为热变形量； CTE 为热膨胀系数； ΔT 为温差； L 为两点间直线距离，与从一点到另一点的路径无关。可以证明，图 1 中 A, B 间变形是一样的，计算模具两点间热变形只考虑两点间直线距离^[12]。

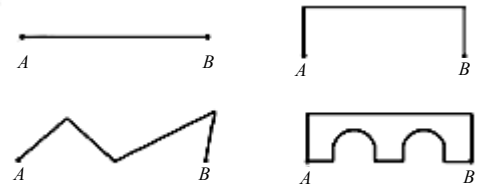


Fig.1 Different shape objects with the same distance
图 1 具有相同点距的不同形状物体

2 偏置反射面天线模具型面补偿计算方法

模具型面为标准抛物面，其设计坐标系为 $O-XYZ$ ， O 为坐标系原点，方程见公式(1)：

$$X^2 + Y^2 = 4FZ \tag{1}$$

式中 F 为抛物面焦距。 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 为模具热变形前加工坐标系， O_0 为坐标系原点，如图 2 所示。 A 为模具型面上任意一点。则在温差 ΔT 下， A 沿 OA 方向热膨胀至 A' 。设 O_0, A, A' 在设计坐标系 $OXYZ$ 下坐标值分别为 $(a_0, b_0, c_0), (X_A, Y_A, Z_A), (X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'})$ ，则：

$$\Delta L = AA' = OA \cdot CTE \cdot \Delta T = \sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2} \cdot CTE \cdot \Delta T \tag{2}$$

$$X_{A'} = X_A + \Delta X = X_A + \Delta L \cos \alpha = X_A + \Delta L \frac{X_A}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}} = X_A(1 + CTE \cdot \Delta T) \tag{3}$$

$$Y_{A'} = Y_A + \Delta Y = Y_A + \Delta L \cos \beta = Y_A + \Delta L \frac{Y_A}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}} = Y_A(1 + CTE \cdot \Delta T) \tag{4}$$

$$Z_{A'} = Z_A + \Delta Z = Z_A + \Delta L \cos \gamma = Z_A + \Delta L \frac{Z_A}{\sqrt{X_A^2 + Y_A^2 + Z_A^2}} = Z_A(1 + CTE \cdot \Delta T) \tag{5}$$

式中 α, β, γ 为 OA 向量的方向余弦角。

由于点 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 为抛物面 $X^2 + Y^2 = 4FZ$ 上的任意点，则由式(3),(4),(5)可求解出 $X_{A'}, Y_{A'}, Z_{A'}$ ，并代入式(1)可得到热变形模具后型面为：

$$X^2 + Y^2 = 4(1 + CTE \cdot \Delta T)FZ \tag{6}$$

可知，抛物面热膨胀变形后仍为抛物面，但模具焦距和投影口径增加为原焦距 F 和口径 D 的 $(1 + CTE \cdot \Delta T)$ 倍，即热变形后焦距 F_1 和口径 D_1 满足式(7)和式(8)；模具加工坐标系 $O_0-X_0Y_0Z_0$ 则平移至坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ ，加工坐标系原点则由 (a_0, b_0, c_0) 变为 (a_1, b_1, c_1) 。

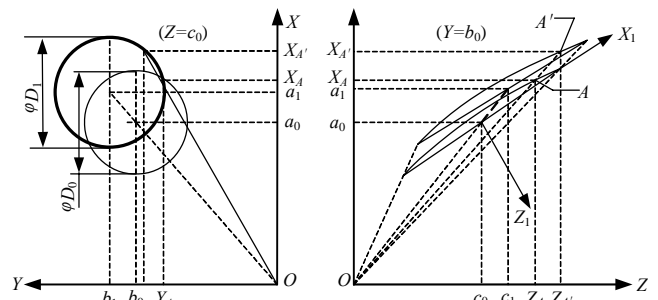
$$F_1 = (1 + CTE \cdot \Delta T)F \tag{7}$$

$$D_1 = (1 + CTE \cdot \Delta T)D_0 \tag{8}$$

$$a_1 = (1 + CTE \cdot \Delta T)a_0 \tag{9}$$

$$b_1 = (1 + CTE \cdot \Delta T)b_0 \tag{10}$$

$$c_1 = (1 + CTE \cdot \Delta T)c_0 \tag{11}$$



(Note: Thin solid line indicates mould surface before thermal deformation, and rough solid line indicates after the mould thermal deformation)

Fig.2 Diagram before and after the mould thermal deformation

图 2 模具热变形前后示意图

3 偏置反射面天线模具型面补偿仿真分析

对口径 $\varnothing 1.75$ m、偏置距离为偏 X 轴 1.5 m 的反射器，模具型面方程为：

$$Z = (X^2 + Y^2) / 4 / 3000 \tag{12}$$

按式(6)补偿后，焦距由 3 000 mm 修正为 2 998.381 mm，模具型面方程则变为：

$$Z = (X^2 + Y^2) / 4 / 2998.381 \tag{13}$$

按式(8)~(11)，投影口径补偿后变为 1 699.082 mm，偏置距离由 $(1\ 500, 0, 251.302)$ 变为 $(1\ 499.190, 0, 251.166)$ 。

模具分析模型及其在设计坐标系 $O-XYZ$ 下经 Patran & Nastran 分析后变形云图如图 3 和图 4 所示，其中 $\Delta T = 60\text{ }^\circ\text{C}$ 。

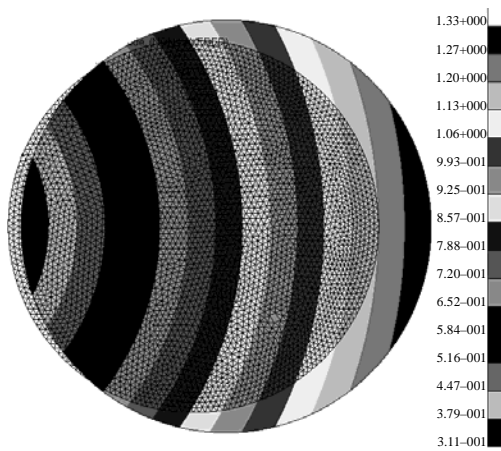


Fig.3 Total deformation diagram of the mould
图 3 模具型面分析模型与总变形云图

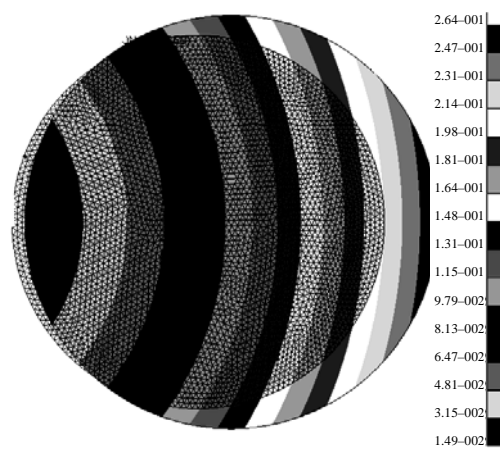


Fig.4 Z-axial deformation diagram of the mould
图 4 模具型面 Z 轴向变形云图

模具型面热变形前后型面精确度计算结果如表 1 所示。由表中计算结果可知，按式(13)补偿后的模具型面在给定温度载荷下膨胀为所需理论曲面式(12)，与理论推导公式相符。

表 1 偏置反射器模具型面补偿结果

Table1 Results of mould surface compensation

	results
mould accuracy by comparing the mould surface after thermal deformation with formula (12)/mm	0.141 24
mould accuracy by comparing the mould surface after thermal deformation with formula (13)/mm	0.000 02
mould theoretical focal length/focal length after thermal deformation	2 998.380/3 000
mould theoretical diameter/diameter after thermal deformation	1 699.082/1 700

4 仿真结果与试验结果比较

4.1 仿真结果与试验结果比较

将 $\varnothing 1.75\text{ m}$ 天线反射器铸铁模具(如图 5 所示)从室温升温至 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 时，经摄影测量法测得模具型面数据与式(13)中曲面方程比较变形云图如图 6 所示，与式(12)曲面方程比较变形云图如图 7 所示。型面精确度计算结果见表 2。

由图 6 与图 4 比较可知，模具热胀变形后实测变形与仿真变形趋势一致，模具型面变形均关于设计坐标系 XOZ 面对称，且相对于设计坐标系原点 O 呈辐射状分布。由表 2 可知，模具型面仿真结果与实测结果基本一致，且热变形后型面与式(12)比较所得的型面精确度明显优于热变形后型面与式(13)比较所得的型面精确度，即模具型面补偿效果良好。

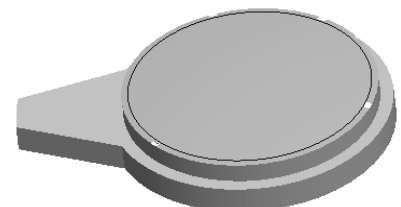


Fig.5 $\varnothing 1.75\text{ m}$ cast iron mould
图 5 $\varnothing 1.75\text{ m}$ 铸铁模具

表 2 仿真结果与试验结果比较

Table2 Comparison between simulation results and test results

analysis condition of mould surface	mould accuracy by comparing the mould surface after thermal deformation with		mould focal length after thermal deformation/mm
	deformation with formula (12)/mm	deformation with formula (13)/mm	
simulation value	0.000 02	0.141 24	3 000.000
test value	0.051 00	0.129 78	3 000.119

4.2 仿真结果与试验结果偏差分析

模具型面热变形仿真结果与试验实测结果偏差主要表现在：a) 模具型面最大变形量不一致；b) 模具热变形后型面与式(12)比较所得的实测型面精确度比仿真计算型面精确度较差。上述偏差产生的主要原因如下：

1) 仿真分析时模具温度场均匀；而模具在烘箱内实测时温度场难于达到理想均匀温度场状态，由模具温度场不均匀而产生的热应力将使模具产生不利变形。

2) 为减少模具加工误差对模具型面测试型面精确度的影响，公式(13)中的理论曲面由模具机加完成后状态下的实测数据(约 1 120 个测量点)经 UG 逆向拟合得到，故存在曲面逆向拟合偏差。

3) 模具在 80 °C 下经摄影测量法实测所得数据是通过模具型面上 8 个基准孔将测量坐标系下的测量值经公共点转换得到, 因而存在公共点转换偏差。

4) 铸铁在 20~200 °C 范围内热膨胀系数 $CTE=(8.5\sim 11.16)\times 10^{-6}$ °C, 并未对实测铸铁模具 CTE 进行测量; 而实际仿真分析取 $CTE=9\times 10^{-6}$ °C, 即分析时 CTE 所取值偏小, 从而使得热变形量数值偏小。

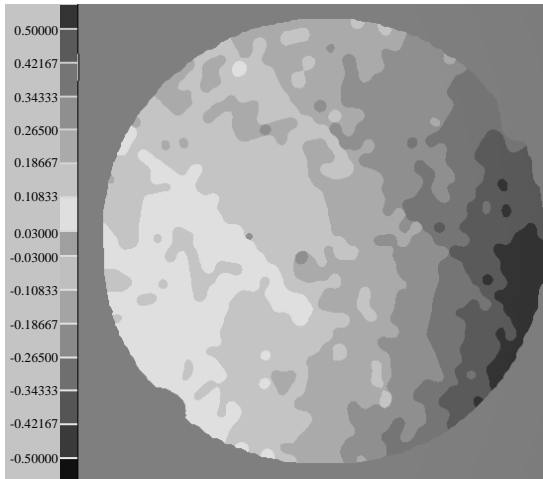


Fig.6 Deformation diagram by comparing the real mould surface at 80 °C with equation(13)

图 6 80 °C 时实测模具型面与式(13)比较变形云图

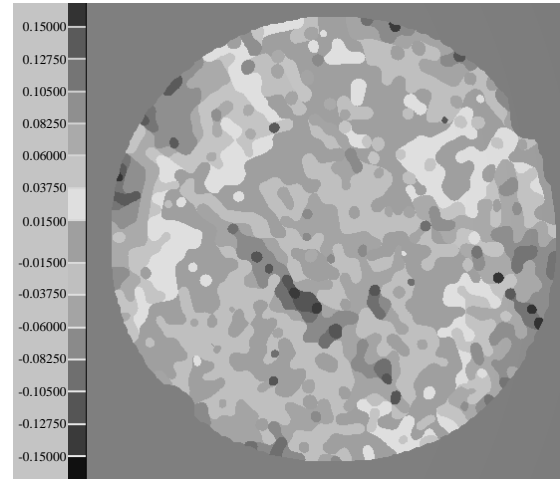


Fig.7 Deformation diagram by comparing the real mould surface at 80 °C with equation(12)

图 7 80 °C 时实测模具型面与式(12)比较变形云图

5 结论

本文建立了一个偏置抛物反射面天线成型模具的设计补偿公式, 并对该公式进行了仿真分析和试验验证, 仿真结果与试验结果一致。利用该公式修正模具型面理论方程, 在升温至复合材料反射器成型温度时, 模具型面恰好变形到理论方程型面, 从而减少模具热变形对反射器型面精确度的影响, 提高反射器型面精确度。

参考文献:

- [1] 俞俊生,刘小明,姚远,等. 太赫兹赋形面天线技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):26-31. (YU Junsheng, LIU Xiaoming,YAO Yuan,et al. Terahertz shaped reflector antenna technology[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):26-31.)
- [2] 万继响,弓金刚,叶文熙,等. 我国星载通信天线的发展与趋势[C]// 全国天线年会. 陕西,西安:[s.n.], 2017:1410-1414. (WAN Jixiang,GONG Jingang,YE Wenxi,et al. Development and trend of satellite communication antenna in China[C]// 2017 National Conference on Antenna. Xi'an,Shaanxi,China:[s.n.], 2017:1410-1414.)
- [3] FANG Houfei,HUANG Puming,ZHOU Yang,et al. Analytical investigation of a high precision reflector[C]// Spacecraft Structures Conference. Maryland,USA:AIAA, 2014:1-12.
- [4] 方芳,桂涛. 高精度碳纤维反射器制造技术[J]. 电子机械工程, 2012,28(5):53-56. (FANG Fang,GUI Tao. Manufacturing technology of high precision CFRP reflector[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012,28(5):53-56.)
- [5] 周卫来,凌闽河,朱培芸. 深空探测天线技术发展现状及趋势[J]. 空间电子技术, 2011,8(2):17-21. (ZHOU Weilai, LING Minhe,ZHU Peiyun. Progress and prospect of antenna technology in deep space exploration[J]. Space Electronic Technology, 2011,8(2):17-21.)
- [6] LEI Yan,YI Chen. Finite element simulation in fabrication of high precision reflector panels[C]// Modern Technologies in Space and Ground-based Telescopes and Instrumentation II. [S.l.]:SPIE, 2012:8450-1-8450-10.
- [7] OHMINE H,KOBAYASHI Y. High performance reflectors for telecom space antennas in MELCO[C]// Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Rome,Italy:IEEE, 2011:3331-3335.
- [8] 叶云裳. 星载毫米波反射面天线结构[J]. 空间科学学报, 2003,23(5):379-387. (YE Yunshang. The structure of millimeter-wave reflector antenna on spacecrafts[J]. Chinese Journal of Space Science, 2003,23(5):379-387.)
- [9] VALSECCHI G,FRANCHINI C,PRIETO R C,et al. Nickel sandwich technology for high precision reflector antennas[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Orlando,FL,USA:IEEE, 2002:2170-2173.

- [10] VALSECCHI G, EDEN J, GRISONI G, et al. High precision electroformed nickel panel technology for sub-millimeter radio telescope antennas[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Columbus, OH, USA: IEEE, 2003:124-127.
- [11] 夏文干, 杨洁. 先进复合材料天线反射器精度的国内外情况[J]. 电子机械工程, 2001, 91(3):53-55. (XIA Wengan, YANG Jie. The situation at home and abroad of the advanced composite material antenna reflector accuracy[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2001, 91(3):53-55.)
- [12] 李成贝. 高精度旋转抛物面反射面模具的设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2005(2):26-28. (LI Chengbei. Mould design for rotation parabolic reflector of high precision[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2005(2):26-28.)
- [13] 夏文干, 杨洁. 高精度碳纤维复合材料天线的研制[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(1):28-34. (XIA Wengan, YANG Jie. The application of high accuracy carbon fiber composite antenna[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2002, 27(1):28-34.)

作者简介:



江文剑(1986-), 男, 江西省九江市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为星载高精度天线和可重构天线结构设计与分析等。email:hellojian88@126.com.

史明(1962-), 男, 西安市人, 工程师, 主要研究方向为星载高精度天线结构与机构设计等。

杨亚宁(1979-), 女, 陕西省咸阳市人, 工程师, 主要研究方向为星载高精度天线产品保证等。

(上接第 652 页)

- [10] 闫庆华, 程兆刚, 段云龙. AR 模型功率谱估计及 Matlab 实现[J]. 计算机与数字工程, 2010, 38(4):154-156. (YAN Qinghua, CHENG Zhaogang, DUAN Yunlong. Power spectrum density estimation for AR and the simulation in Matlab[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(4):154-156.)

作者简介:



朱燕(1982-), 女, 山东省聊城市人, 讲师, 主要研究方向为宽带无线接入技术。email: 940556726@qq.com.

刘逸通(1995-), 男, 陕西省宝鸡市人, 学士, 主要研究方向为数字通信。