高精度反射面板的形面调节新技术

周贤宾 郝长岭 李东升 李晓星

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 提出了一种基于形面多点调节的紧缩场反射器面板精密柔性成形新技术, 对面板形面调节机理进行了分析, 提出了确定调节点位置、数量、调节量的形面调节核心技术, 借助数值模拟方法确定了矩形面板调节点位置、数量, 在实验基础上建立了调节量计算方法. 设计、开发了面板形面调节实验平台; 针对具有不同初始形面误差的面板进行了形面调节可行性数值模拟分析及实验验证. 结果表明, 利用所提出的调节技术和开发的形面调节实验平台能够实现双夹层金属蜂窝面板形面的有效调节, 获得很高的形面精度. 该项技术可以在现行成形技术的基础上进一步提高形面精度, 可明显提高面板制造成品率, 解决大尺寸高精度面板和较大曲率面板的制造难题, 并能改善面板的使用及维护性能, 延长紧缩场的使用寿命.

关 键 词: 紧缩场; 反射器面板; 成形; 形面调节; 数值模拟

中图分类号: TP 391.9; TG 386

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2009)02-0127-05

New technique of contour adjustment for high precision reflector panels

Zhou Xianbin Hao Changling Li Dongsheng Li Xiaoxing

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract The high precision of antenna reflector panels is the key to develop the technique of high performance compact antenna test range. A new technique of contour adjustment for high precision sandwich reflector panels was developed. The principle of the contour adjustment of panels was analyzed. The core technology problems such as the decision of adjustment points' position and number, the adjustment value on each points were proposed. By use of numerical simulation, how many and where the adjustment points should be were determined. The algorithm for adjustment value calculation was verified by experiments. A contour adjustment device was designed and developed. Numerical simulation and experiments of contour adjustment were conducted against all possible shape error distribution. The results show that, by use of the adjustment device and the proposed core technique, the contour of panels can be adjusted effectively and the contour precision can be improved greatly. Additionally, contour adjustment technology makes it possible to use for the panels with bigger size and higher contour precision, to increase the qualified rate of finished product obviously and to improve the maintenance performance of reflector panels.

Key words compact antenna test range; reflector panel; forming; contour adjustment; numerical simulation

大型高精度反射器是建造大型紧缩场(compact antenna test range)和发展毫米波天线的关键部件之一. 反射面板具有面积大、表面精度要求极高、结构比刚度比强度要求高的特点, 因此高精度反射面板的制造难度极高, 常规的金属成形方法无法胜任[1-2]. 目前, 用于高精度反射面板制造的方法主要有: 精密机械加工[3-4], 蒙皮骨架法[5-6], 电淀积法[7], 电镀夹芯结构法[8], 以及蜂窝夹层结构柔性成形技术. 除蜂窝夹层结构柔性成形技术以外, 其它方法的共同缺点是在成形大

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10477001, 50575010)

作者简介: 周贤宾(1938-), 男, 江苏南通人, 教授, zhouxb@buaa.edu.cn

尺寸反射面板时存在严重困难, 面板成形时模具不具有柔性或通用性. 近年来人们对于面板的柔性成形技术投入了越来越多的关注. 北京航空航天大学周贤宾等人经过长期理论与实践研究形成了独具特色的, 适合我国国情的高精度反射面板精密成形技术理论[9-10], 他们制造单块面积 2 m^2 的高精度反射面板形面误差 RMS达到 25 μm 以下. 但是随着对工作频率及静区尺寸要求的不断提高, 现有的高精度反射面板制造技术急需在以下方面改进: 如何进一步提高制造精度以适应更高的频率要求; 如何改善面板形面的可控性以提高制造成品率和单块面板成形尺寸; 如何改善面板的使用和维护性能. 为解决上述问题, 本文在理论和实验研究基础上提出一种基于形面调节的蜂窝夹层结构高精度反射面板柔性成形新技术.

1 夹层结构反射面板精密成形原理

夹层结构高精度反射面板由 3层铝合金板 2层蜂窝芯构成, 蜂窝芯层和铝板经过特殊应力释放工艺处理以保证贴模和控制回弹. 其成形的基本原理如图 1, 首先调节钉头包络面到一定形面, 然后将接触面涂胶的各层板依次叠放于高精度钉模上. 抽真空, 在负压力作用下维持一定时间, 胶接固化后得到夹层结构高精度反射面板.

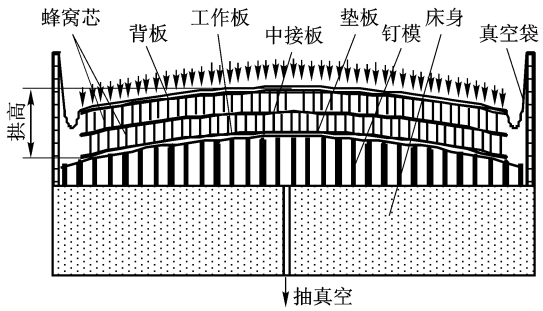


图 1 蜂窝夹层反射面板真空负压成形原理

2 形面调节原理

为了进一步提高面板形面精度, 提高成品率及形面的可控性, 首先通过图 1柔性成形方法得到具有一定精度的形面, 再通过对该形面的主动调节使其精度进一步提高; 或使精度要求“不合格”面板通过超差区域形面的局部调整成为合格产品. 已有的研究表明, 利用大量调节点来改善形面精度是一个迭代过程. 由于调节点之间是高度相关的, 当在一个调节点上施加调节力时, 其它部位的受力以及形面调节点对面板的作用力都会随之发生变化. 因此, 调节过程必然是所有调节点协同控制过程. 而调节点的位置、数量以及调节量的确定方法和调节方式将直接影响调节的最终精度和效率. 调节点太少, 无法将被调节形面有效约束在理想形面附近; 调节点太多将增加调节过程的复杂性并且降低调节效率. 本文将围绕调节点位置、数量以及调节量确定方法等高精度面板形面调节核心技术展开研究.

3 形面调节核心技术研究

3.1 调节点位置数量的确定

在形面调节原理分析研究基础上, 提出确定调节点数量、位置的算法, 如图 2所示.

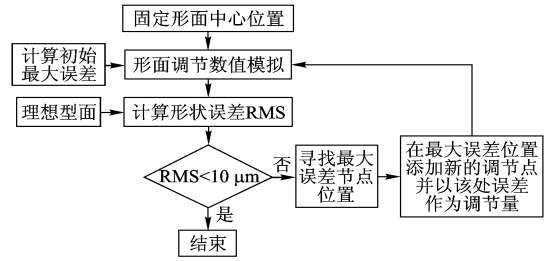


图 2 确定调节点位置数量的算法流程图

通过上述算法过程的数值模拟辅助分析, 确定了紧缩场常用的矩形分块面板调节点位置及数量, 具体过程如下:

1) 高精度形面重构. 若以图 1中坐标系为制造坐标系, 则由于钉模回弹补偿不足造成实际形面数据正超差, 利用 Catia逆向工程技术将实际测得的形面数据进行曲面重构后误差分布如图 3.

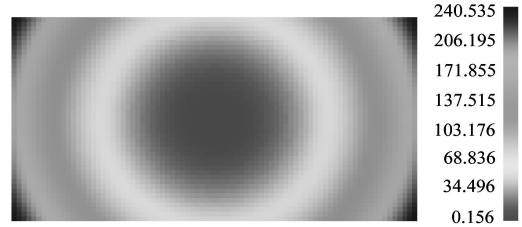


图 3 曲面重构后误差分布情况 (μm)

2) 形面调节过程的有限元模拟. 利用重构曲面建立有限元模型, 并按图 2流程对形面调节过程进行模拟, 满足结束控制条件 (如形面 RMS< 10μm)时模拟过程结束. 图 4为初始误差分布如图 3的形面在调节结束时的误差分布模拟结果. 图 5是随调节点增加形面 RMS变化情况的模拟结果. 由图 5可以看出随着调节点的增加, 形面 RMS值迅速减小, 尤其是最初几个调节点效果非常明显, 随后 RMS减小趋势趋于平缓. 图 5说明本研究所建立的形面调节算法具有较高效率.

3) 模拟结果分析, 确定调节点位置及数量.

对各种不同初始误差分布形面进行上述调节过程模拟. 图 6是不同初始误差分布形面经调节后调节点数量及位置情况模拟结果. 图 7是对图 6进行归纳后得到的针对矩形反射面板的形面调节关键点示意图, 该图给出了调节点的位置及数量.

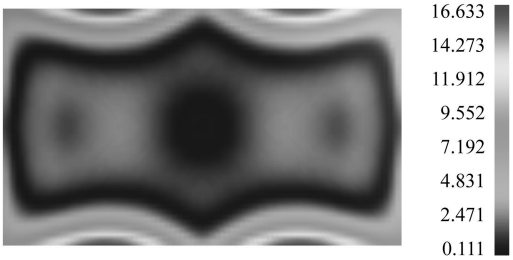


图 4　形面调节最终误差分布模拟结果 (μm)

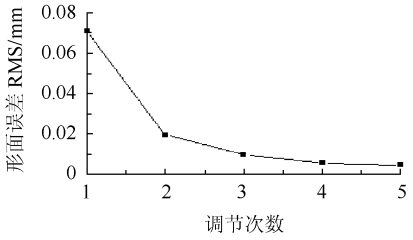
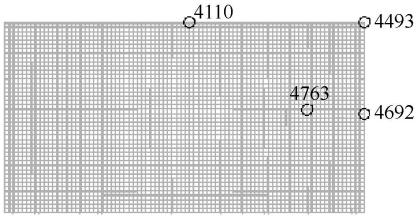
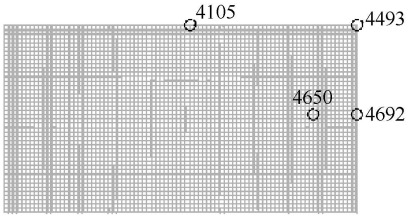


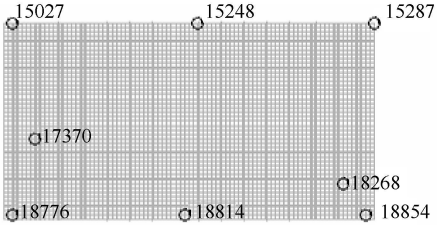
图 5　调节过程中形面 RMS变化趋势模拟结果



a　整体回弹偏大



b　整体回弹不足



c　整体回弹扭曲

图 6　不同初始误差调节点数量位置模拟结果

3. 2　调节量的确定

形面调节以形面测量得到的误差作为调节量的确定基础. 如果直接以调节关键点 (见图 7)的测量误差作为调节量, 则调节后形面难以逼近理想形面. 因此实际施加的调节量必须是考虑了其它调节关键点影响后获得的调节量. 如果记图 7中的 25个调节关键点与理想面比较得到的误差为

$$\delta = [\delta_1, \delta_2, \cdots, \delta_{24}, \delta_{25}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

记考虑了调节关键点彼此影响在内的实际应施加的调节量为

$$\delta' = [\delta'_1, \delta'_2, \cdots, \delta'_{24}, \delta'_{25}]^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

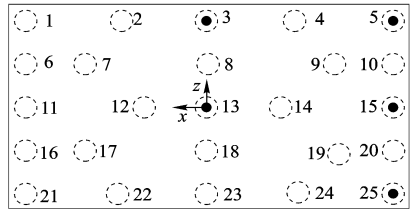


图 7　模拟确定的形面调节关键点

则 δ和 δ′之间应有如下关系

$$\delta' = \boldsymbol{C}\delta \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{C}$ 为变形影响系数矩阵. 该矩阵与面板及调节背架的刚度、调节点的相对位置关系、面板及背架的应力刚化水平等因素有关, 其表达式如下:

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & \cdots & c_{24,1} & c_{25,1} \\ c_{1,2} & c_{2,2} & \cdots & c_{24,2} & c_{25,2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ c_{1,24} & c_{2,24} & \cdots & c_{24,24} & c_{25,24} \\ c_{1,25} & c_{2,25} & \cdots & c_{24,25} & c_{25,25} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $c_{i,j}$为在第 i个调节关键点施加单位调节量时在第 j调节关键点上产生的位移, 由下式确定:

$$c_{i,j} = \delta'_j / \delta_i \tag{5}$$

系数矩阵中的各元素可以通过实验或数值模拟的方法获得. 利用表 1和式 (4)可求得系数矩阵 $\boldsymbol{C}$ 中的以下元素: $c_{15,3}$, $c_{15,13}$, $c_{15,5}$, $c_{15,15}$, $c_{15,25}$. 利用同样方法可求得系数矩阵中的所有元素.

表 1　调节点相互影响关系　　mm

第 15点调节量	其它点变形量				
	3	13	5	15	25
0	0. 101	0 058	0 053	0. 010	0. 048
0. 125	0. 077	0 040	0 158	0. 106	0. 072
0	0. 089	0 040	0 057	0. 015	0. 041
0. 125	0. 075	0 038	0 153	0. 136	0. 071
0	0. 091	0 043	0 064	0. 019	0. 047
0. 125	0. 072	0 041	0 169	0. 130	0. 073
0	0. 092	0 042	0 070	0. 019	0. 049
0. 25	0. 039	0 041	0 273	0. 199	0. 102
0	0. 091	0 045	0 064	0. 020	0. 045
0. 25	0. 035	0 041	0 278	0. 207	0. 099
0	0. 090	0 044	0 024	0. 016	0. 050
0. 25	0. 041	0 041	0 233	0. 194	0. 103
0	0. 093	0 051	0 030	0. 022	0. 047

4 形面调节实验及实验结果分析

为了验证本研究提出的调节点数量位置确定方法以及调节量反算方法的有效性,设计了高精度面板形面调节实验,其流程如图 8所示.

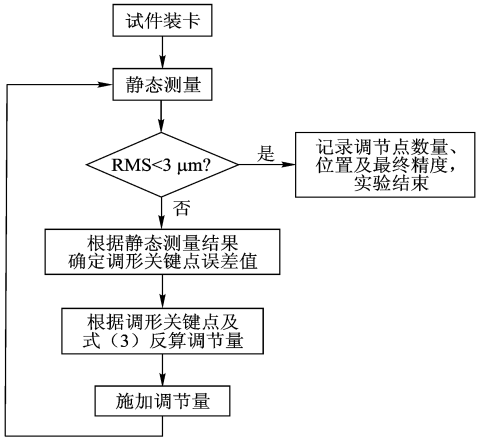


图 8 形面调节实验流程

整个实验在专门开发的面板形面调节实验平台上完成,如图 9为装卡了面板的实验平台.

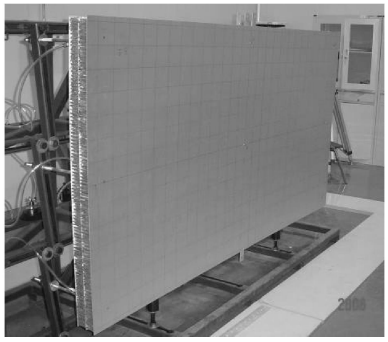
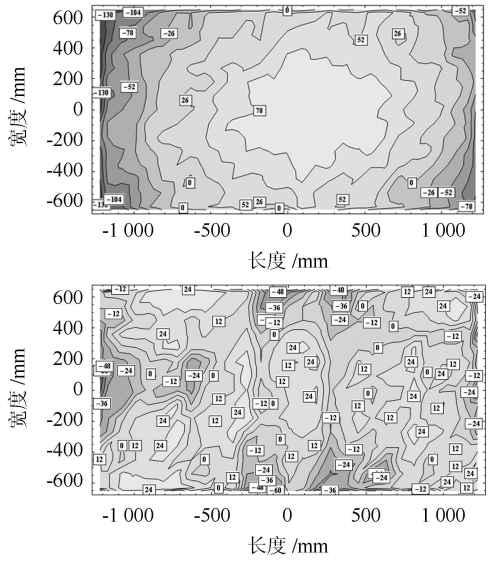


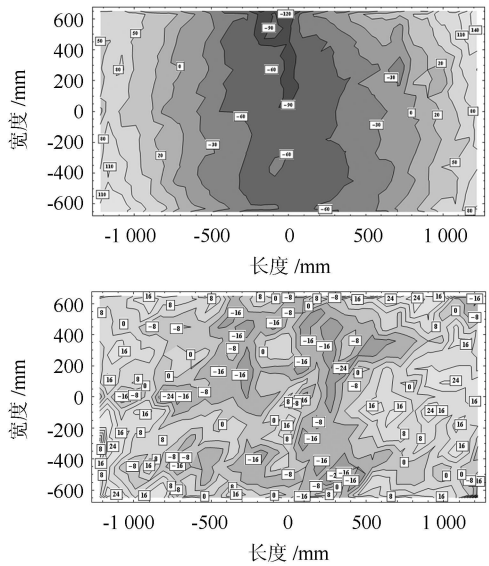
图 9 装有高精度面板的形面调节实验平台

图 10为不同初始误差面板形面调节前后误差分布对比情况.从情况的误差变化总体趋势来看,随着调节过程的进行,误差由原来的大范围甚至整体性超差向小范围局部轻微超差转化,形面精度也随之越来越高.

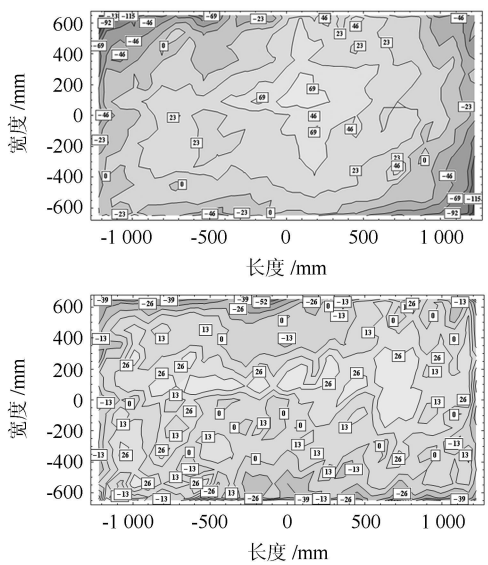
初始误差为正值且关于矩形板中心近似对称分布的面板,初始形面误差 RMS 70.8 μm,调节最终误差 RMS 21.9 μm;上述形面调节实验结果和数值模拟结果 (图 5)基本一致.初始误差为负值且关于矩形板中心近似对称分布的面板,初始形面误差 RMS 62.7 μm,调节最终误差 RMS 12.7 μm;初始误差关于矩形板中心近似反对称分布的面板,初始形面误差 RMS 31.4 μm,调节最终误差 RMS 16 μm.另外形面调节最终精度和面板初始误差分布及初始误差大小无明显相关性.



a 初始正误差对称分布调节前后实验值对比 (μm)



b 初始负误差对称分布调节前后实验值对比 (μm)



c 初始误差反对称分布调节前后实验值对比 (μm)

图 10 形面调节实验前后误差分布对比

5 结　论

1) 提出的针对于高精度反射面板的形面调节理论、技术能大幅度提高反射面形面精度;

2) 高精度反射面板形面调节核心技术包括调节点数量位置的确定, 调节量的确定方法, 调节量的施加方式, 本文提出的确定调节关键点数量及位置的方法、调节量反算方法是形面调节的快速有效方法;

3) 形面调节方法几乎能够使产品制造合格率达 100%;

4) 高精度反射面板形面调节中试件的初始装卡非常重要. 在对试件进行装卡时应尽量减小装卡造成的应力和变形, 减小形面调节的不确定性.

参考文献 (**References**)

[1] 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[J]. 中国机械工程, 2003, 13(14): 1133-1135
Li Dongsheng, Zhou Xianbin, Chang Hesheng, et al. Several key technologies of precise forming for reflector panels[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 13(14): 1133-1135(in Chinese)

[2] 王兆峻, 陈五一. 紧缩场反射面板热变形的适应性调整[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(1): 86-88
Wang Zhaojun, Chen Wuyi. Adaptive regulation on the thermal deformation of the panel of compact antenna test range[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(1): 86-88(in Chinese)

[3] Chang H, Tsung T T, Chen L C, et al. The manufacture of microwave plate reflector antennas by employing the improved superplasticity hydraulic forming method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(2): 107-111

[4] Steve Barker, Christophe Granet R F. The development of an inexpensive high-precision mm-wave compact antenna test range[C]//Proceedings of AMTA. New York: Curran Associates, 2005: 326-329

[5] Szwabowski D. A new approach to fabricating cost-effective millimeterwave antennas[C]// Proc of SPIE. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2004, 5489: 1094-1114

[6] Gary A, Iremblay E A D. Design and manufacture of an ultralightweight, solid deployable reflector[J]. Analysis of Optical Structures, 1991, 1532: 114-123

[7] Valsecchi G, Eder J, Grisoni G, et al. High precision electroformed nickel panel technology for submillimeter radio telescope antennas[C]//Antennas and Propagation Society International Symposium. Los Angeles: IEEE, 2003, 1: 124-127

[8] Valsecchi G, Franchini C, Prieto R G, et al. Nickel sandwich technology for high precision reflector antennas[J]. IEEE Antennas Propag Soc AP S Int Symp, 1999, 3: 2170-2173

[9] 周贤宾, 陈连峰, 李东升. 反射器夹层面板精密成形原理[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(4): 296-300
Zhou Xianbin, Chen Lianfeng, Li Dongsheng. Principle of precision forming for sandwich panel of large antenna reflector[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(4): 296-300(in Chinese)

[10] 陈连峰, 李东升, 周贤宾, 等. 高精度反射器面板精密复合成形数值模拟[J]. 中国机械工程, 2004, 15(3): 248-251
Chen Lianfeng, Li Dongsheng, Zhou Xianbin, et al. Numerical simulation for flexible compound forming of high precision sandwich panels[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(3): 248-251(in Chinese)