

一种大型反射面天线面板测试与调整方法及其应用

王 伟, 段宝岩, 马伯渊

(西安电子科技大学机电工程学院, 陕西西安 710071)

摘 要: 针对大型抛物面天线反射面分块面板的特点, 基于最佳吻合的概念, 从机电耦合学科交叉的角度, 研究了反射面分块面板的调整问题, 推导出了靶标点与调整量之间的影响关系矩阵, 给出了数值方法, 研制了准实用软件. 将程序软件应用于某实际天线中, 收到了满意的结果.

关键词: 反射面天线; 面板调整; 最佳吻合抛物面; 机电耦合

中图分类号: TN823+.27; TP306+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)06-1114-05

A Method for Panel Adjustment of Large Reflector Antenna Surface and Its Application

WANG Wei, DUAN Bao-yan, MA Bo-yuan

(School of Electromechanical Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: The errors associated with a segmented primary reflector limit the electrical performance obtainable with those antennas which employ them. It is necessary to derive the effect of panel positional error on electrical performance in order to determine panel adjustments for such reflector antennas. The transformation matrix that relates panel adjustments to surface errors in terms of best fit paraboloid (BFP) is derived. Based on the transformation matrix, a novel mathematical model and a useful program are developed. After being used in practice the results have shown that the method for panel adjustment is of efficiency.

Key words: reflector antenna; panel adjustment; best fit paraboloid; electromechanical coupling

1 引言

大型反射面天线广泛应用于通信、雷达、射电天文等领域. 随着天线口径的增大, 工作频率的提高, 对天线反射面精度要求也越来越高. 由于大型反射面天线所固有的作为仰角函数的重力变形、温度变形和风荷引起的误差等各种因素的影响, 导致天线表面形状偏离原来的设计曲面, 从而使天线的电性能如天线增益、交叉极化等主要指标下降^[1-4]. 因此天线反射面精度调整对天线系统的工作性能是至关重要的.

实际反射面是由若干块单元面板组装而成的. 每块面板上有4至6个安装点用于支撑机构与反射体的刚性背架连接^[5]. 支撑机构同时又是调整机构, 可以使单块面板的位置改变. 当单块面板具有很好的刚度和面精度时, 就可通过调整全部单元面板安装点的位置来提高整个反射面的精度.

怎样调整安装点的位置才能得到最好的反射面精度呢? 文献[6]提出所谓最佳调节方案, 即利用调整机

构调节各个单块使其处在最佳位置, 使得各个检测点与理论反射面所产生的偏差为最小. 这种调整方法, 以单块面板的最小均方根误差为目标, 单独考虑各块面板, 没有考虑整体. 实际上在调整过程中, 虽然面板之间可以认为物理上没有干涉^[7], 但所有面板的位置精度对口面场相位误差是有影响的, 即它们在电性能上是耦合的. 另外, 以相对于理论面的偏差为目标不能得到最佳的反射面精度^[8-11]. 针对以上问题, 本文对天线反射面上所有面板作了整体考虑, 根据调整过程中调整点和测量靶标点之间的位置关系, 导出了所有面板的调整量与整个反射面误差的转换矩阵, 并以所有表面点相对于最佳吻合面的均方根误差最小为目标, 通过优化计算得出最佳调整量.

2 最佳调整量的计算

如图1在坐标系 $OXYZ$ 下, 原点 O 为抛物面顶点, OZ 为焦轴, f 为焦距, x, y, z 为理论靶标点 P_0 的坐标, 则抛物面方程为: $x^2 + y^2 = 4fz$. 设实际靶标点 P_a 偏离

对应点 P_0 的位移矢量 $\mathbf{u}_a = [u_a, v_a, w_a]$, 则 P_a 相对于理论面的半光程差^[3 7]可表示为:

$$\delta_a = n_z (\mathbf{u}_a \cdot \mathbf{n}) \quad (1)$$

此处 $\mathbf{n} = [n_x, n_y, n_z]$ 指理论靶标点 P_0 处的单位法向量。

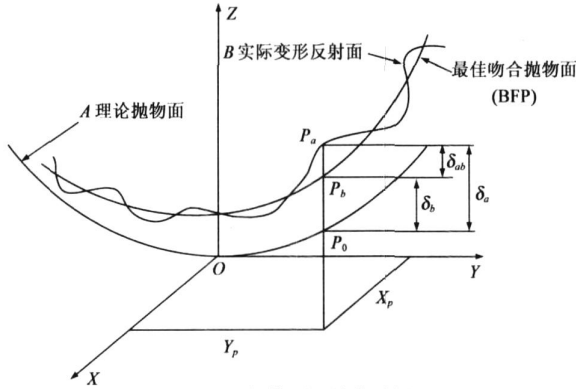


图 1 抛物面天线变形图

对于旋转抛物面天线, A 为理论设计面, B 为变形后的反射曲面。对于 B , 总能找到一个最佳吻合抛物面 BFP 。在 $OXYZ$ 中, 设 BFP 对 A 的顶点位移为 u_A, v_A, w_A , 按右手螺旋定向的轴线转角为 φ_x, φ_y , 焦距 f 的增量为 h 。吻合参数 $\mathbf{H} = [u_A, v_A, w_A, \varphi_x, \varphi_y, h]$ 可利用最小二乘法求得^[12 13]。设最佳吻合抛物面上的靶标点 P_b 偏离对应点 P_0 的位移矢量为 $\mathbf{u}_b = (u_b, v_b, w_b)$, 因为反射面变形位移及其吻合参数均为微小量, 忽略二阶微量, 所以

$$\text{有} \begin{cases} u_b = u_A + z \varphi_y \\ v_b = v_A - z \varphi_x \\ w_b = w_A - x \varphi_y + y \varphi_x - hz/f \end{cases} \quad (2)$$

同式(1), P_b 相对于理论反射面的半光程差为 $\delta_b = n_z (\mathbf{u}_b \cdot \mathbf{n})$ 。所以靶标点相对于最佳吻合抛物面的半光程差为: $\delta_{ab} = \delta_a - \delta_b = n_z [(\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}]$ (3)

2.1 转换矩阵的构造

大型天线反射面一般由许多块面板组装而成。每块面板通过其周边的调整机构沿面板法向单独进行微量调整。以下取出一块面板进行分析。图 2 为一块面板的几何位置示意图。设 A, B, C, D 四点为调整点, 选择 A, B, C 三点作主要调整点, 第四点 D 作调整后加固之用。沿 A 点法向调整时, 相当于整块面板绕直线 BD 转动, 且转动量非常微小。设 A 点调整量为 a_A , 则面板上节点 $P_i(x, y, z)$ 同样有一个法向偏移量, 记为 e_{Ai}^n , 其量值正比于该点到旋转轴 BD 的距离, 即:

$$e_{Ai}^n = \text{sign}_{Ai} \frac{d_{Ai}}{d_A} a_A \quad (4)$$

其中 sign_{Ai} 为符号函数; d_{Ai} 为点 $P_i(x, y, z)$ 到直线 BD 的距离; d_A 为调整点 A 到 BD 的距离。符号函数 sign_{Ai} 取决于 P_i 和 A 点的相对位置:

$$\text{sign}_{Ai} = \begin{cases} +1, & P_i \text{ 与 } A \text{ 在旋转轴同侧} \\ -1, & P_i \text{ 与 } A \text{ 在旋转轴异侧} \end{cases}$$

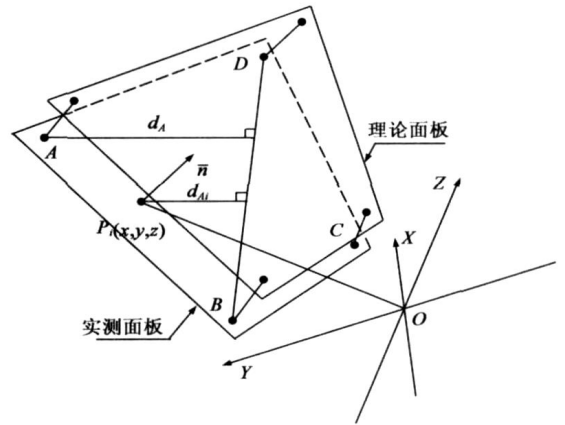


图 2 天线面板几何位置示意图

由空间立体几何知识可求出空间点 M 到空间直线 AB 的距离。设 $M(x_0, y_0, z_0), A(x_1, y_1, z_1), B(x_2, y_2, z_2)$, 空间点 M 到空间直线 AB 的距离公式为:

$$d = \frac{|\overline{MA} \times \overline{AB}|}{|\overline{AB}|} = \frac{\begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \end{vmatrix}}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}} \quad (5)$$

所以, 只要知道三个点的三维空间坐标, 其中一点到另外两点所在直线的距离就可很容易地求出。故式(4)中的 d_{Ai} 和 d_A 可由式(5)求得。

应用相同的调整策略, B, C 两调整点分别沿法向调整 a_B, a_C 时, 同理可得 $P_i(x, y, z)$ 因牵连所产生的法向偏移量分别为 e_{Bi}^n 和 e_{Ci}^n 。

综上所述, 对面板进行了一次调整, 即依次对 A, B, C 三个调整点沿法向分别调整 a_A, a_B 和 a_C 。然而对每个调整点进行调整时, 点 $P_i(x, y, z)$ 偏移的矢量方向不尽相同, 所以总的偏移量不能简单的叠加, 而是取决于该点的法向方向矢量。设调整三个调整点 $P_i(x, y, z)$ 时点处的单位方向矢量分别为 $\bar{n}_A, \bar{n}_B, \bar{n}_C \in R^{3 \times 1}$ 。调整之后表面节点 $P_i(x, y, z)$ 的新坐标为 $P_i'(x, y, z)$, 则:

$$\overline{OP_i'} = \overline{OP_i} + e_{Ai}^n \bar{n}_A + e_{Bi}^n \bar{n}_B + e_{Ci}^n \bar{n}_C \quad (6)$$

其中, $\overline{OP_i'}, \overline{OP_i} \in R^{3 \times 1}$ 分别为从设计坐标系原点 $O(0, 0, 0)$ 到面点 $P_i'(x, y, z), P_i(x, y, z)$ 的位置矢量。将 $e_{Ai}^n, e_{Bi}^n, e_{Ci}^n$ 式分别带入式(6), 则化简整理写成矩阵形式为:

$$\overline{OP_i'} = \overline{OP_i} + S_i^k \mathbf{a}^k \quad (7)$$

其中, $S_i^k = \left[\text{sign}_{Ai} \frac{d_{Ai}}{d_A} \bar{n}_A, \text{sign}_{Bi} \frac{d_{Bi}}{d_B} \bar{n}_B, \text{sign}_{Ci} \frac{d_{Ci}}{d_C} \bar{n}_C \right]$ 调整量对 $P_i(x, y, z)$ 的作用系数; $\mathbf{a}^k = [a_A, a_B, a_C]^T$ 为第 k 块面

板的调整向量.

至此, 我们导出了第 k 块面板的三个调整点分别调整 a_A, a_B, a_C 后面板上靶标 $P_i(x, y, z)$ 所对应的新坐标 $P'_i(x, y, z)$. 如 $P_i(x, y, z)$ 为天线面板上的任意靶标点, 则式(7)反映了调整点调整量与靶标点位置之间的关系. 设调整前靶标点 $P_i(x, y, z)$ 相对于理论面的偏移向量 $u_{ip} = [u_{ip}, v_{ip}, w_{ip}]$, 则调整之后其偏离理论面的位移向量为

$$u'_{ip} = [u'_{ip}, v'_{ip}, w'_{ip}] = [u_{ip}, v_{ip}, w_{ip}] - S_i^k \cdot a^k \quad (8)$$

由式(3)可知, 半光程差等于法向偏差的轴向分量. 由式(3)知 $\bar{u}_{ip} = [u_{ip}, v_{ip}, w_{ip}]$. 因此调整之后反射面靶标点相对于最佳吻合面的半光程差为

$$\delta_p = n_z [(u'_{ip} - u_{ip}) \cdot \bar{n}] \quad (9)$$

将式(8)代入式(9)得:

$$\delta_p = n_z [(u_{ip} - u_{ip}) \cdot \bar{n}] + n_z S_i^k \cdot a^k \cdot \bar{n} \quad (10)$$

其中, 第一项为调整之前表面节点相对于最佳吻合面的半光程差, 记为 δ_0 ; 第二项表示面板的调整对节点半光程差的影响量. 设 $S_i^k = n_z S_i^k \cdot \bar{n}$, 则式(10)可简写为:

$$\delta_i^k = \delta_{0i} + \tilde{S}_i^k a^k$$

其中, δ_i^k 为调整第 k 块面板后, 面板上第 i 个靶标点的半光程差; \tilde{S}_i^k 为第 k 块面板的调整量与该板上第 i 个靶标误差的转换矩阵.

设天线反射面共有 N_p 块面板组成, 第 K 块面板上有 N_k 个靶标点. 则对于单块面板 N_k 个靶标有 $\delta^k = [\delta_1^k, \delta_2^k, \dots, \delta_{N_k}^k]^T$, $\tilde{S}^k = [\tilde{S}_1^k, \tilde{S}_2^k, \dots, \tilde{S}_{N_k}^k]^T$, 则 $\delta^k = \delta_{0i}^k + \tilde{S}^k \cdot a^k$.

对于整个天线反射面的所有面板而言, $\delta = [\delta^1, \delta^2, \dots, \delta^{N_p}]^T$ 为反射面上所有靶标点相对于最佳吻合面的半光程差向量; $a = [a^1, a^2, \dots, a^{N_p}]^T$ 为所有反射面板的调整量; Q 为联系调整量与表面误差的转换矩阵, 则

$$\delta = \delta_0 + Qa \quad (11)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \tilde{S}^1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \tilde{S}^1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \tilde{S}^{N_p} \end{bmatrix}$$

每块反射面板具有独立的一组调整机构, 可单独进行调整, 各面板之间物理上无耦合, 所以 Q 为分块对角阵. 对于多块面板共用某个调整机构的情况, 面板之间存在物理上的耦合, 此时 Q 则不再是对角矩阵.

2.2 调整量的确定

主焦天线需要调整的部分主要是馈源和主反射面, 其中馈源的调整就是把它调整到最佳吻合抛物面的焦点处, 而主反射面调整的目的是找到调整向量 a 使得函数 F 取最小 (F 正比于光程差的均方根的平方和), 数学描述如下:

$$F = \delta^T A_f \delta \quad (12)$$

这里 A_f 指加权系数对角矩阵. 把式(11)代入式(12)中得:

$$F = \delta_0^T A_f \delta_0 + 2 \delta_0^T A_f Qa + a^T Q^T A_f Qa \quad (13)$$

为求 F 的极小值, 就可设计如式(14)所示的二次规划, 故而确定 a .

$$\begin{cases} \text{Find } a \\ \text{Min } F = \delta_0^T A_f \delta_0 + 2 \delta_0^T A_f Qa + a^T Q^T A_f Qa \\ \text{s. t. } -L \leq a_j \leq L \end{cases} \quad (14)$$

这就转化为一个优化问题. 选择共轭梯度法求解该优化问题, 即可得出所有面板调整点的调整量.

3 软件的研制

以上述天线面板调整量计算模型为基础, 开发了抛物面天线面板测调安装指导软件. 可与电子经纬仪等高精度测量仪器相结合, 应用于大型天线面板的实际安装调整工作中. 软件系统的主要工作流程如图3所示. 可以看出天线面板的调整是一个循环过程. 应用测量设备对反射面靶标点进行测量, 靶标测量数据输入软件系统中计算面板调整量, 指导面板调整, 调整后再进行测量与调整, 如此反复进行, 直到反射面精度满足要求为止.

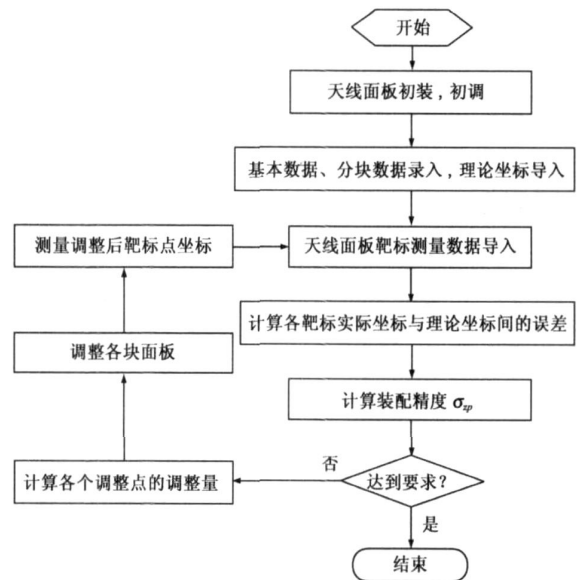


图3 软件系统的工作流程图

4 实验结果与分析

案例为 6m 口径 2.4m 焦距的旋转抛物面天线. 天线面板分 3 圈, 每圈块数由内向外分别为 6、8、12, 相应的内外圈直径是 0~ 2m, 2~ 4m, 4~ 6m. 每块面板上共有 6 个靶标. 各块面板之间相互独立.

4.1 计算结果及分析

在调整计算过程中, 原始数据是反射面上靶标点的

坐标, 结果数据是每一个调整点处的调整量. 原始数据通过编制的模拟实测值计算软件产生. 调整量的计算结果数据用于指导面板的调整, 只有调整人员付诸实施, 否则调整量本身反映不出实际的调整效果. 但是对于一个调整算例来说, 反射面误差的减小更能说明问题. 所以我们跟踪记录了调整量计算中反射面误差的收敛过程.

优化程序给出了向理论面和向吻合面调整计算过程, 在两种情况下, 分别记录了靶标点的均方根误差的收敛情况. 如图 4 所示为调整量优化计算的迭代过程. 在整个过程中, 靶标点的均方根误差在调整前后有了大幅度的减小, 调整计算前后的均方根误差分别由向理论面调整的 1.225719 下降至 0.472897, 以及向吻合面调整的 1.171123 下降至 0.466475.

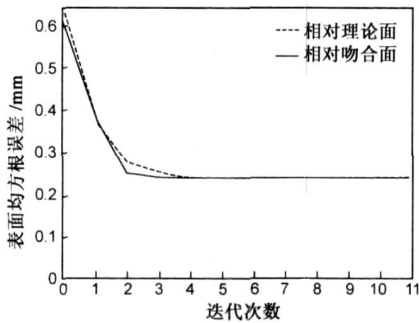


图 4 调整量计算优化迭代曲线

在优化过程中, 两种情况下均方根误差在调整计算初期都发生了快速下降. 4 步之后下降趋势趋于平缓, 在 10 步左右满足迭代收敛判据, 终止迭代. 说明选取的优化算法非常有效, 满足调整计算快速性的要求.

产生采样点数据时, 设定不同量值的扰动量, 从而得到具有不同误差范围的靶标采样点数据. 这样可以从不同误差角度来验证天线面板测调软件的有效性. 表 1 给出了三组采样数据调整前后的天线表面精度及增益损失. 从表 1 可以看出对于不同误差范围, 调整算法都是适用的. 向吻合面调整比向理论面调整稍好一些.

一般情况下, 靶标点个数要多于调整点个数. 把全部和部分调整点的计算调整量与相应靶标点的实际偏移量作比较, 如图 5 和表 2 所示, 可见计算调整量和实际偏移量符号相反, 量值相当. 这说明优化计算使得调整朝着误差减小的趋势进行, 而且调整量较精确.

表 1 三组采样数据调整计算前后的表面均方根误差(mm)及天线工作频率为 15GHz 的增益损失(dB)

误差范围		0.9~ 1.3		0.7~ 0.9		0.3~ 0.6	
		调整前	调整后	调整前	调整后	调整前	调整后
优化调整	相对理论面	1.225719	0.472897	0.629464	0.246984	0.429433	0.165826
	相对吻合面	1.171123	0.466475	0.592182	0.241134	0.407861	0.162234
增益损失	相对理论面	- 2.5759	- 0.3834	- 0.6793	- 0.1046	- 0.3162	- 0.0471
	相对吻合面	- 2.3515	- 0.3731	- 0.6012	- 0.0997	- 0.2852	- 0.0451

表 2 部分面板调整点计算调整量和实际偏移量(mm)

工程名称	测量次数	圈号	块号	靶标编号	调整点	计算调整量	实际偏移量
antenna	1	2	4	1	Yes	- 1.10542	1.07
antenna	1	2	4	3	Yes	0.29637	- 0.30
antenna	1	2	4	4	Yes	- 0.50374	0.50
antenna	1	2	4	6	Yes	0.94718	- 0.90
antenna	1	3	8	1	Yes	- 0.45716	0.46
antenna	1	3	8	3	Yes	- 0.71973	0.70
antenna	1	3	8	4	Yes	0.77958	- 0.80
antenna	1	3	8	6	Yes	- 0.39163	0.40

4.2 调整效果及分析

因为反射面精度是由靶标点误差计算出来的, 可以根据两种情况下调整计算前后靶标点误差的分布情况来观察调整的效果. 图 6 为调整前后靶标点误差分布情况. 其中横坐标表示靶标点的个数(剔除 2 个奇异点, 共 154 个), 纵坐标表示各靶标点的误差. ‘*’代表调整前靶标点相对于设计目标面的半光程差, ‘•’代表调整计算后靶标点的半光程差. 从调整计算前后靶标点误差的分布情况, 可以看出调整后面板上靶标点的误差减小比较明显.

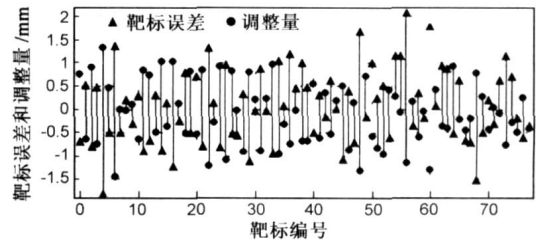


图 5 全部靶标点误差与调整量比较

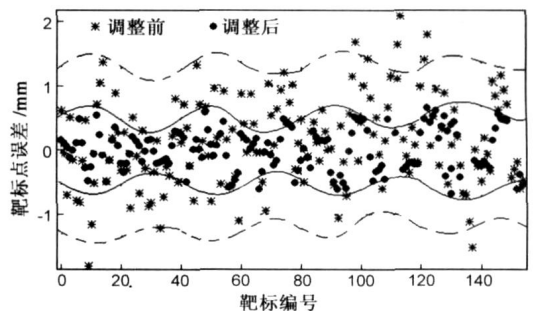


图 6 调整前后靶标点误差比较

5 结论

本文分析了大型反射面天线面板安装调整的特点, 选择最佳吻合面作为调整目标面, 给出了联系调整量和表面误差的转换矩阵, 得出了一种有效的面板调整方式以及相应的最佳调整量的计算方法. 基于最佳调整量

确定的数学模型, 研制了天线面板安装测调软件. 经仿真测试和实际应用, 结果显示此模型与计算方法是有效的.

本文下一步的工作是研究面板在物理上和电性能上同时耦合时表面精度的调整方法. 此外, 应将本文方法应用于实际天线工程中, 并将结果与数值结果进行比较, 以证明方法的有效性. 这也是下面应进行的工作.

参考文献:

- [1] Mehdi S. Zarghamee. On antenna tolerance theory [J]. IEEE Trans, 1967, AP 15(6): 777- 781.
- [2] Greve R Neri, A Sievers. The gain elevation correction of the FRAM 30m telescope[J]. Astronomy & Astrophysics Supplements Series, 1998, 132: 413- 416.
- [3] Yahya Rahmat Samii. An efficient computational method for characterizing the effects of random surface errors on the average power pattern of reflectors[J]. IEEE Trans, 1983, AP 31(1): 92- 98.
- [4] Peter G Mezger. An experimental check of antenna tolerance theory using the NRAO 85 foot and 300 foot telescopes[A]. Antennas and Propagation Society International Symposium [C]. Green Bank, West Virginia: National Radio Astronomy Observatory, 1964. 181- 185.
- [5] 郑元鹏. 50m 口径射电望远镜反射面精度分析[J]. 无线电通信技术, 2002, (5): 17- 18.
- [6] 梁健康, 等. 旋转抛物面天线反射面微机检测和调整系统[J]. 电子机械工程, 1990, (1): 54- 60.
- [7] S von Hoerner. Internal twist and least squares adjustment of four cornered surface plates for reflector antennas[J]. IEEE Trans, 1981, AP 29(6): 953- 958.
- [8] S von Hoerner, Woor Ying Wong. Gravitational deformation and astigmatism of tilttable radio telescopes[J]. IEEE Trans, 1975, AP 23(5): 689- 695.
- [9] Mehdi SZarghamee, Joseph Antebi, Frank W Kan. Optimal surface adjustment of HAYSTACK antenna[J]. IEEE Trans 1995, AP 43(1): 80- 86.
- [10] David Woody, Eugene Serabyn, Anthony Schinckel. Measurement, modeling and adjustment of the 10. 4m diameter Leighton telescopes[A]. Advanced Technology MMW, Radio, and Terahertz Telescopes[C]. Washington: SPIE, 1998. 474- 485.
- [11] W A Imbriale, M J Britcliffe, M Brenner. Gravitational Deformation Measurements of NASA' s Deep Space Network 70m Reflector Antennas[R]. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 2001.
- [12] 王从思, 等. 天线表面误差的精确计算方法及其电性能分析[J]. 电波科学学报, 2006, (6): 403- 409.
- [13] 杨青. 大型天线装配测调系统的研制[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.

作者简介:

王伟 男, 1980 年 3 月出生于安徽省砀山县, 现为西安电子科技大学电子机械学科博士研究生. 主要研究方向为大型天线反射面精度调整与机电耦合等. E-mail: vicent209@ gmail. com

段宝岩 男, 1955 年出生于河北省, 现为西安电子科技大学电子机械学科教授、博士生导师. 主要研究方向为电子装备机电耦合理论及应用、天线结构与伺服系统、工程结构优化设计等.

E-mail: byduan@ xidian. edu. cn

马伯渊 男, 1960 年出生于江苏省. 现为西安电子科技大学电子机械学科教授、硕士生导师. 主要研究方向为运动控制系统与工业控制网络. E-mail: byma@ mail. xidian. edu. cn