

大型桁架面天线的机电耦合优化设计

李 鹏 杨东武 王 伟 郑 飞
(西安电子科技大学机电科技研究所 西安 710071)

摘 要: 该文针对桁架面天线结构优化设计中的机电分离问题, 将天线表面的微小变形表示为口径场的相位变化, 得到包含结构因素的天线远场耦合计算公式, 通过实验验证了该耦合公式的有效性和正确性。利用该公式将电性能指标引入传统的天线结构优化中, 建立了以天线重量或电性能为优化目标, 以结构强度和多种电性能变化量为约束的机电耦合优化模型, 可以在天线结构设计过程中直接考察天线的主要电性能(包括增益、副瓣、波瓣宽度、指向精度等), 同时避免了单一使用天线面精度的预估电性能的不足。通过某 8 m 天线的仿真结果表明了该耦合优化模型的优点。

关键词: 面天线; 机电耦合; 优化模型; 桁架结构

中图分类号: TN957.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)01-0022-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01780

Electromechanical Coupling Optimization Design of Large Reflector Antennas with Truss Support Structures

Li Peng Yang Dong-wu Wang Wei Zheng Fei
(Research Institute on Mechatronics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: for the problem of electromechanical in the optimization design of reflector antennas with truss support structures, microscopic distortion of reflector surface is introduced in the formula of antenna's far field patterns by phase difference, and the coupling formula of reflector antennas' far field patterns is given. Results of verification experiment show that the coupling formula is accurate and efficient. By the coupling formula, electrical parameter could be included in the antenna structure optimization design. A mechatronic optimization design model of reflector antennas with truss support structures is developed, which adopts antenna weight or gain as the optimization objective, and the structure strength and various electrical parameters as constraint conditions. So the main electrical parameters(include gain, side lobe, beam width and pointing accuracy) could be considered during structure optimization design, and the limitation of estimate gain only by surface precision is conquered. Finally the proposed optimization model is applied to an 8 meters antenna with good results.

Key words: Reflector antennas; Electromechanical coupling; Optimization model; Truss structure

1 引言

随着深空探测工程的开展, 用于超远距离测控的大型反射面天线以及各种大口径星载可展开反射面天线发展迅速。面天线是典型的机电一体化的设备, 结构部分是天线电性能实现的载体, 其设计和制造的性能直接制约着天线的电性能。要设计出高性能的天线, 就必须从机电耦合、学科交叉的角度, 提出有效的分析和设计方法。

随机误差和系统变形对面天线电性能的影响方面已经有了大量的工作^[1,2]。星载可展开面天线的分析优化设计也是目前研究的热点^[3,4]。考虑多种工况

和环境因素的天线分析优化与设计也有研究^[5,6]。文献[7]研究了随机时变载荷对天线电性能的影响, 文献[8]从机电集成的角度对星载桁架天线进行优化设计。

以上研究多是基于各自单独学科的。后两者虽然涉及到不同的学科, 但都是根据结构精度简单估算天线增益损失, 还没有从机械结构位移场与电磁场耦合的角度进行研究, 由于没有给出具体的场耦合计算公式, 因而也不能考虑副瓣、波瓣宽度等其他电性能指标。由于天线表面电磁场的幅度、相位分布是非均匀的, 所以不同部分的误差对电性能的影响也不同。而面精度这一结构指标不能全面反映天线表面的误差分布情况, 当误差是人为造成的非随机误差时, 不同的误差分布可能有相同的面精度值(如本文设计的实验), 其电性能也是有差异的。

2008-12-24 收到, 2009-06-19 改回

国家 973 计划项目和国家自然科学基金(50475171)资助课题

通信作者: 李鹏 yinhong0523@163.com

本文就是针对以上研究的不足，从机械电磁两场耦合的角度研究，通过具体的耦合计算公式，针对大型桁架面天线，研究包含天线主要电性能参数的机电耦合优化设计方法。

2 面天线的机电耦合计算公式

反射面作为天线电磁场的边界条件，在各种外部载荷的作用下发生微小变形(如震动冲击、重力、风荷、冰雪载荷、太空温度载荷等)，从而导致天线增益下降、副瓣升高、指向精度变差等电性能变化。

将反射面微小变形转化成电磁波传播距离的变化，并进一步转化为相位变化^[2]：

$$\delta = 4\pi\Delta z(\rho', \phi') \cos^2(\xi/2)/\lambda \quad (1)$$

$\Delta z(\rho', \phi')$ 是反射面表面的轴向位移。反射面天线的远区电场与口径分布的傅里叶变换成比例，远区电场可以表示为

$$E(\theta, \phi') = \iint_S f(\rho', \phi') e^{j\delta} e^{j\phi(\rho', \phi')} \rho' d\rho' d\phi' \quad (2)$$

其中 $f(\theta, \phi')$, $\phi(\theta, \phi')$ 分别表示天线口径场的幅度和相位分布函数，相关变量如图 1 所示。

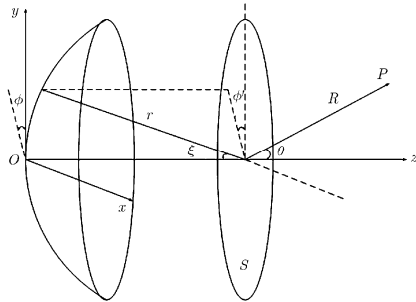


图 1 反射面天线变量示意图

常将反射面积分区域划分成 N 个网格，使用数值积分求解^[9]，如式(3)所示：

$$E(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N f(\rho'_i, \phi'_i) e^{j\phi(\rho'_i, \phi'_i)} e^{j\delta_i} \rho'_i \Delta\rho'_i \Delta\phi'_i \quad (3)$$

为了满足计算精度，电磁分析软件中，网格划分的密度一般要求是 $(1/3 - 1/5)\lambda$ ，网格数量巨大，故考虑在较粗的结构网格上，使用 Gauss 积分，用积分点代替细化网格。这样不但可以免去网格细化的过程，而且由于 Gauss 积分的精度远高于其它数值积分方法，在相同精度要求下，积分点的数量远少于细化网格数。

将式(3)中的极坐标转化成面积坐标，再使用三角形单元上面积坐标的二重 Gauss 积分公式，得

$$E(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N 2S_i \omega_k f(L_{1k}, L_{2k}) e^{j\phi(L_{1k}, L_{2k})} e^{j\delta_i} \quad (4)$$

其中， $[\omega_k]_{n \times m} = \left[\frac{1 - \alpha_i}{8} A_i \right]'_n [A_j]_m$ ， $[L_{1k}]_{n \times m} =$

$\left[\frac{1 + \alpha_i}{2} \right]'_n [1, \dots, 1]_m$ ， $[L_{2k}]_{n \times m} = \left[\frac{1 - \alpha_i}{2} \right]'_n \left[\frac{1 + \beta_j}{2} \right]'_m$ 。
 (L_1, L_2) 是三角形单元的面积坐标， S 是单元面积， α, β 方向的高斯点数目分别为 n, m 。 α_i, β_j 和 A_i, A_j 分别为标准 Gauss 积分公式中的高斯点和权值， $i = 1, \dots, n$ ， $j = 1, \dots, m$ ， $k = 1, \dots, n \times m$ 。

3 试验验证

为了验证本文的机电耦合计算公式，利用某 Ku 波段 3.7 m 卡氏天线，做了验证实验。

试验天线如图 2 所示。天线参数：主反射面口径 3.7 m，副面 0.44 m，焦距比 0.35，副面照射角 20° ，实验时天线工作频率为 12.5 GHz，馈源为介质加载喇叭。主面由 12 块相同的分面板组成，背架包括 12 根纵向筋(辐射梁)，一根环向筋和中心体。面板与纵向筋通过 13 个螺栓连接。

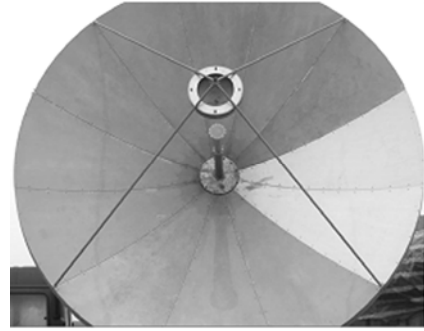


图 2 某 Ku 波段 3.7 m 卡氏天线

实验步骤：

(1)完成天线的安装和调试，测量天线远场方向图和表面精度。天线的远场测试使用 FSP 公司的频谱仪，表面精度测试使用 API 公司的激光跟踪仪。对于该 3.7 m 卡氏天线，工程中主要关心主瓣和第 1 副瓣，故实验中只对比主瓣和第 1 副瓣；

(2)在面板与纵向筋(辐射梁)连接的螺栓处，垫入一定厚度垫片，造成主反射面变形。垫片垫在 13 个螺栓的中间 5 个处。使用了 3 种厚度垫片，分别为 $T_1 = 1.5 \text{ mm}$ ， $T_2 = 2 \text{ mm}$ ， $T_3 = 3 \text{ mm}$ 。保持副面和馈源不变，测试变形后天线远场方向图和表面精度。

(3)利用结构分析软件 ANSYS 建立天线的有限元模型。在相应的螺栓位置加入位移载荷，分析得出整个主面的变形。由于测试时天线近似指平，还需要加入重力载荷；

(4)利用变形数据计算出口径面的相位差，代入式(4)，计算出远场方向图，并与实际测试的方向图

对比。图 3 是天线垫入 3 mm 垫片时的计算和测试方向图对比, 可见在主瓣和第 1 副瓣范围内与测试值十分接近。主要电参数的对比如表 1 所示。

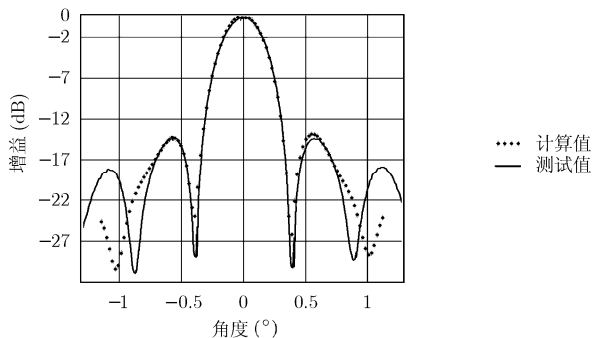


图 3 天线变形后的远场方向图比较(T_3)

由表 1 可见, 天线未变形和 3 种变形时的主要电参数, 计算结果与测试结果都是比较接近的。由于实际的天线存在随机的加工误差和安装误差, 如未垫片时测试天线表面精度的误差为 0.513 mm。而计算时很难将这种随机误差考虑进去, 同时还有测试误差, 故表 1 中最大 6.63% 的计算结果还是可以接受的。

该 Ku 波段 3.7 m 卡氏天线的验证试验表明, 前文所提的机电耦合计算公式是正确和有效的, 可以应用于面天线的分析设计中。与此同时, 实验中还发现虽然面精度十分接近, 但垫入垫片的位置不同, 其电性能差异巨大, 如表 2 所示。这是由于天线口径面上电磁场的幅度、相位分布不是均匀的, 例如幅度分布通常是中间高边缘低的锥削分布, 此

时中心部分误差的影响要大于边缘部分。工程实际中, 加工大型面天线时, 中心面板的加工精度要求高于边缘面板, 甚至两者的材料结构都会有所不同, 例如中心用实面板, 边缘用网面板, 就是考虑到中心面板的影响更大一些的缘故。当误差是人为造成的非随机误差时, 不同的误差分布可能有相同的面精度值。可见面精度这一结构指标不能全面反映天线表面的误差分布情况, 所以同样的面精度会有不同的电性能。

4 机电耦合优化模型

对于桁架类面天线, 传统结构优化是以结构重量为目标, 以桁架形状尺寸、拓扑结构以及材料类型为设计变量, 考虑结构约束为背架材料、尺寸、类型以及应力的允许范围, 面精度为电性能约束。也有以面精度为目标, 重量为约束的优化模型。传统结构优化, 很少从机械结构位移场与电磁场耦合的角度进行研究。本文在机电两场耦合计算公式的基础上, 将电性能参数引入结构优化模型中, 可以实现以电参数为约束或者目标的机电耦合综合优化。具体优化模型如下:

$$\text{PI: Find } (A_i, R_j, Z_k) \quad (5)$$

$$\text{Min } W \quad (6)$$

$$\text{s.t. } \Delta G(A, R, Z) \leq \Delta G_{\max} \quad (7)$$

$$\sigma_i \leq \bar{\sigma} \quad (8)$$

$$A_{i\min} \leq A_i \leq A_{i\max} \quad (9)$$

$$R_{j\min} \leq R_j \leq R_{j\max} \quad (10)$$

$$Z_{k\min} \leq Z_k \leq Z_{k\max} \quad (11)$$

表 1 天线变形后的主要电参数

电参数	增益(dB)	误差(%)	3dB 波宽(°)	误差(%)	左一副瓣(dB)	误差(%)	右一副瓣(dB)	误差(%)
未垫片计算	52.84		0.390		-14.33		-14.33	
未垫片测试	52.23	1.17	0.380	2.63	-14.54	1.44	-14.18	1.06
T_1 计算值	52.71		0.399		-14.50		-14.67	
T_1 测试值	52.12	1.13	0.396	0.76	-15.24	4.86	-15.41	4.80
T_2 计算值	52.49		0.403		-14.02		-15.07	
T_2 测试值	52.80	0.59	0.408	1.22	-14.86	5.65	-16.14	6.63
T_3 计算值	51.90		0.403		-14.56		-14.07	
T_3 测试值	51.79	0.21	0.408	1.22	-14.81	1.69	-14.69	4.22

表 2 同样面精度时的电参数对比

垫片位置	垫片厚度(mm)	面精度(mm)	增益(dB)	左一副瓣(dB)	右一副瓣(dB)	3dB 波宽(°)	10dB 波宽(°)
内层 4 圈	2	0.8086	50.67	-14.5	-13.3	0.425	0.696
中间 2 圈	1.5	0.8097	52.05	-15.92	-14.6	0.396	0.660

上述优化模型中，设计变量 A 表示天线桁架梁单元的截面积， R 表示桁架结构的下弦结点的半径， Z 表示下弦结点的 Z 坐标，相应设计变量个数分别为 i, j, k 个； W 为优化目标，表示天线重量；约束条件包括： $\Delta G(A, R, Z)$ 为增益损失， ΔG_{\max} 为最大增益损失值， σ_i 为第梁单元的实际应力值， $\bar{\sigma}$ 为许用应力值， $A_{i\min}, A_{i\max}, R_{j\min}, R_{j\max}, Z_{k\min}, Z_{k\max}$ 分别为相应设计变量的下、上限值。

不同用途反射面天线，具体的优化模型也略有不同。对于高增益天线，电性能约束条件是增益损失；对于低副瓣天线，电约束是副瓣升高；对于高精度天线，电约束是指向精度变化量。当然也可以将电性能变化作为优化目标，将重量作为约束。从而在结构设计中避免盲目追求结构精度，而直接考虑天线电性能指标，实现最优设计。

本文使用遗传算法求解上述优化模型。遗传算法中通常用罚函数法处理约束，再与目标函数一起构造适应度函数 F 。本文的罚函数 P 如下：

$$P = 1 + \alpha_1 (\Delta G - \Delta G_{\max}) / \Delta G_{\max} + \alpha_2 (\sigma - \bar{\sigma}) / \bar{\sigma} + n / N \quad (12)$$

式中 α_1, α_2 为惩罚因子，根据实际情况选取，保证罚函数能对将超出要求的情况给予足够的惩罚， n 为遗传算法当前计算的代数， N 为总代数。式(9)，式(10)，式(11)三式为设计变量的取值范围，无需用罚函数处理，在选取初值和遗传算子操作中按范围选取即可。则机电耦合优化模型 PI 转化为

$$\text{PII: Find } (A_i, R_j, Z_k) \quad (13)$$

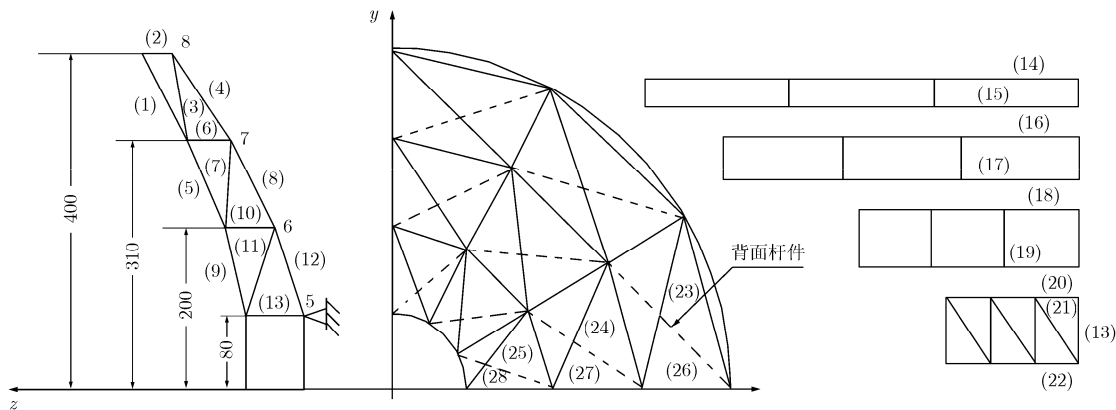


图 4 某 8 m 反射面天线背架结构示意图(长度单位: cm)

表 3 某 8 m 反射面天线背架单元分类(长度单位: cm)

类别	面积(cm ²)	杆位置	类别	面积(cm ²)	杆位置	类别	面积(cm ²)	杆位置
1	30	(9),(12)	5	20	(18),(19)	9	15	(6),(7)
2	20	(5),(8)	6	15	(16),(17)	10	15	(10),(11)
3	15	(1),(4)	7	10	(14),(15)	11	30	(13),(21)
4	30	(22),(20)	8	10	(2),(3)	12	10	(23),(24),(25),(26),(27),(28)

$$\text{Min } F = W \times P \quad (14)$$

则 PII 可以使用成熟的遗传算法直接处理了。

5 典型对象的仿真与应用

针对某 8 m 反射面天线，进行优化设计。天线焦距 $f=300$ cm，工作频率 12.5 GHz。图 4 为反射面天线背架结构的四分之一，97 根杆件被划分为 12 类，具体划分见表 3。背架为纲结构，材料的弹性模量为 2.1×10^7 MPa，密度为 7.85×10^{-3} kg/cm³。分别使用传统结构优化方法和本文的机电耦合优化方法设计。

传统结构优化设计变量包括 12 类杆件横截面积 A 和 8 个节点坐标，即节点 5, 6, 7, 8 的半径 R 和 Z 向坐标 $Z(4)$ ，约束为天线面精度小于 0.5 mm，目标为结构重量最轻，载荷为重力。使用遗传算法求解。此时天线增益损失使用传统的公式估算^[10]：

$$\Delta G = 685.81 \left(\frac{2f}{R} \sqrt{\ln \left(1 + \frac{1}{(2f/R)^2} \right)} \cdot \xi / \lambda \right)^2 = 0.2463 \text{ (dB)} \quad (15)$$

式中 f, R, λ, ξ 分别为天线焦距、半径、波长和表面均方根误差。

耦合优化的设计变量、目标和载荷与传统结构优化相同，但约束为天线增益损失小于结构优化面精度为 0.5 mm 时的 0.2463 dB。同样使用遗传算法求解。期望优化的重量更轻。

表 4 是两种优化方法结果对比，可见传统结构

表 4 耦合优化和传统优化结果对比(长度单位: cm)

优化变量	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	$A_{\Delta 10}$	A_{11}	A_{12}
传统优化	51.0	121.0	11.0	11.0	6.0	71.0	121.0	41.0	41.0	4 Δ 1.0	61.0	6.0
耦合优化	51.0	121.0	11.0	11.0	6.0	71.0	121.0	41.0	41.0	4 Δ 1.0	61.0	6.0
优化变量	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	R_1	R_2	R_3	R_4	rms	$\Delta G(\text{dB})$	$W(\text{kg})$	
传统优化	47.0	97.0	123.0	176.0	150.0	200.0	251.0	323.0	0.0499		3612.825	
耦合优化	65.0	113.0	125.0	183.0	132.0	200.0	251.0	321.0		0.2452	3506.752	

优化以电性能要求的面精度为约束, 结构优化重量是 3612.825 kg, 此时损失增益 0.2463 dB。本文的机电耦合优化可以直接以 0.2463 的增益损失为约束, 而无需考虑具体的面精度, 优化的结构重量是 3506.752 kg, 好于传统结构优化的结果。

图 5 是单片纵向筋(辐射梁)优化前后结构对比, 可见优化后纵向筋腹部杆件的布局由初始的梯形变成锯齿形, 与中心体连接的节点坐标向外向上移动, 使中央圆环截面由矩形变为梯形, 这将改善中心体的受力情况, 边缘部分的节点向内向上移动, 有利于减轻自重。图 5 的这一结果是合理的, 也与文献资料相符^[1], 表明本文的算例是正确的。

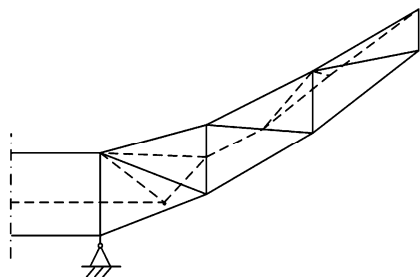


图 5 单片纵向筋优化前后结构对比

6 结束语

本文提出了在机电耦合计算公式的基础上, 将具体的电性能指标作为约束(也可以是目标)引入到传统结构优化中, 避免了简单使用面精度约束的不足, 使得结构设计人员可以根据天线使用的具体要求(高增益、低副瓣或者高指向精度等), 设计出更为合适的结构。同时, 该机电耦合模型可以很容易地加入传统结构优化的先进成果, 例如考虑随机因素、多工况环境以及时变载荷等。而且, 该方法可以应用于包括目前新发展的空间可展开反射面天线, 带主动调整机构的大型面天线在内的桁架类面天线, 具有广泛的工程应用背景。最后, 将本文方法应用于某 8 m 典型反射面天线的机电耦合优化设计, 取得了满意的结果, 验证了文中理论、模型与方法的可行性与有效性。

参考文献

- [1] Smith W T and Bastian R J. An approximation of the radiation integral for distorted reflector antennas using surface-error decomposition [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1997, 45(1): 5-10.
- [2] Seeling S and Yahya R S. Radom surface error effects on offset cylindrical reflector antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2003, 51(6): 1331-1337.
- [3] Miura A and Yahya R S. Spaceborne mesh reflector antennas with complex weaves: extended PO/periodic-MoM analysis [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2007, 55(4): 1022-1029.
- [4] 狄杰建, 段宝岩, 杨东武, 等. 索网式星载展开天线结构纵向调整索数及其初始张力的优化[J]. *机械工程学报*, 2005, 14(11): 153-157.
Di Jie-jian, Duan Bao-yan, and Yang Dong-wu, et al. Optimization on initial cable tensions and number of cables for a cablenet deployable spaceborne antenna [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 14(11): 153-157.
- [5] 李孝全, 王莉. 反射面型天线结构多工况离散变量优化设计[J]. *宇航学报*, 2001, 22(2): 56-60.
Li Xiao-quan and Wang Li. Reflective antenna structure's discrete variables optimum design under multiple loading conditions[J]. *Journal of Astronautics*, 2001, 22(2): 56-60.
- [6] 张巨勇, 施浒立, 陈志平. 大口径天线电性能风振响应的时域分析[J]. *应用力学学报*, 2008, 25(1): 84-88.
Zhang Ju-yong, Shi Hu-li, and Chen Zhi-ping. Time domain wind buffeting response of large-diameter antenna electric performances[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2008, 25(1): 84-88.
- [7] 朱敏波, 刘明治, 徐海强. 基于在轨热环境的可展开天线反射面精度调整技术[J]. *宇航学报*, 2007, 28(3): 727-730.
Zhu Min-bo, Liu Min-zhi, and Xu Hai-qiang. The precision of adjustment technique for deployable truss antenna reflector based on orbit thermal environment[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(3): 727-730.
- [8] Wang C S, Duan B Y, and Qiu Y Y. On distorted surface analysis and multidisciplinary structural optimization of large reflector antennas[J]. *Int. J. Structural and*

- Multidisciplinary Optimization*, 2007, 33(6): 519-528.
- [9] Franceschetti G and Mohsen A. Recent developments in the analysis of reflector antennas: A review[J]. *IEE Proceedings H Microwaves, Antennas and Propagation*, 1986, 133(1): 65-76.
- [10] 王从思, 段宝岩, 郑飞, 等. 大型空间桁架面天线的结构电磁耦合优化设计[J]. *电子学报*, 2008, 36(9): 1776-1781.
Wang Cong-si, Duan Bao-yan, and Zheng Fei, *et al.*. Mechatronic optimization design and analysis of large space parabolic antennas with active truss support structures[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(6): 1114-1118.
- [11] 段宝岩. 天线结构分析、优化与测量[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1998: 122-124.
Duan Bao-yan. Analysis Optimization and Measure of Antenna Structure[M]. Xi'an: Publishing company of Xidian University, 1998: 122-124.
- 李 鹏: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为机电热多场耦合问题的建模与数值求解.
- 杨东武: 男, 1978 年生, 博士生, 讲师, 研究方向为空间大型可展开索网天线结构的优化设计与分析.
- 王 伟: 男, 1980 年生, 博士生, 讲师, 研究方向为大型天线反射面天线精度调整与机电耦合等.
- 郑 飞: 男, 1967 年生, 教授, 研究方向为电子装备结构的建模与仿真、太空展开结构设计与分析、电子装备多学科综合集成分析.