

大型紧缩场装调过程环境因素影响分析和控制

赵金泽 李晓星 胡 浩 栾京东 周国锋

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)



摘要: 根据大型紧缩场在装调过程中可能遇到的环境影响因素, 提出了通过修正装调基准来解决这一问题。为简化坐标变换, 使用一种空间向量进行旋转矩阵的参数化表示, 并据此提出了用公共点转化方法和型面匹配方法进行装调基准的修正。通过工程实践表明, 采用型面最优匹配的方法计算坐标系的修正量精度更高, 使用这种方法修正装调基准保证了装调工作的顺利进行, 优化了装调工艺过程。

关键词: 紧缩场; 环境因素影响; 装调基准; 坐标系转化; 型面精度

Influence of Environmental Factors in Alignment of Large-scale Compact Range and the Solution

Zhao Jinze Li Xiaoxing Hu Hao Luan Jingdong Zhou Guofeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Based on the environmental factors that would affect the alignment work, a method of revising the assemblage and adjustment benchmark was presented. In the coordinates conversion, the rotation matrix was made up of a space vector to simplify calculation, and according to this, coordinates transformation with common points and surface best-fit was presented to revise the assemblage and adjustment benchmark. Engineering practice showed that the way of surface best-fit, which optimize the alignment processing, had higher precision, and this method made sure that the work went on smoothly.

Key words: CATR; environmental factors; assemblage and adjustment benchmark; coordinates conversion; surface accuracy

1 引言

紧缩场可以在暗室内将从球面波内近距离下转换成平面波, 从而允许在室内进行雷达散射截面等需要远场测试条件的电气测量。紧缩场产生的平面波聚焦在平面波束内, 静区的背景电平低, 提高了最小可测 RCS 能力和测试精度等级, 其工作频率可以从几百 MHz 到几百 GHz, 能满足毫米波和亚毫米波的测试要求^[1]。目前国内紧缩场正在向高频率、大静区的方向发展。为了保证反射面的高精度, 大型紧缩场反射面是由多块面板拼接而成, 面板成形基于“点阵钉模、真空负压、蜂窝夹层”精密成形工艺制造^[2]。相

比外场天线而言, 紧缩场型面精度要求更高, 也就对测量系统精度提出了更高的要求。由于反射面尺寸巨大, 分块数量较多, 反射面的装调工作往往需要比较长的时间。目前采用激光跟踪仪配合电子经纬仪使用来建立紧缩场的装调基准, 并且希望在整个安装过程中基准保持统一^[3]。装调工作期间由于天气、温度和其他因素的影响, 会导致暗室的装调基准发生变化, 导致后续装调的面板与之前的面板产生台阶, 影响反射面的电气性能, 并且导致装调工作出现反复。

通过对大型紧缩场的装调工艺、装调现场环境进行分析研究, 分析了公共点回归方法的可行性, 提出了在反射面偏移不大的情况下采用型面最优匹配的

作者简介: 赵金泽 (1992-), 硕士, 航空宇航制造工程专业; 研究方向: 大型紧缩场应用激光跟踪测量技术不确定度及装调技术。

收稿日期: 2013-12-06

方法计算坐标系的修正量,消除由于环境因素变化导致的装调基准偏移,保证反射面安装工作的顺利进行。

2 环境因素影响和影响方式

大型紧缩场的装调采用激光跟踪仪进行基准的建立和坐标测量工作。在实际工程中,一般将激光跟踪仪放置于暗室的中线上距离反射面 7m 左右的地方,从而环境因素对装调基准的影响可以分为两个部分:环境变化对测量仪器和反射面相对位置的影响和对反射面背架造成的变形。主要可以分为以下四个方面的因素。

a. 温度、气压和湿度等气象条件会影响光在空气中的折射,从而影响激光跟踪仪的测量精度。但由于紧缩场是在室内使用和工作的天线设备,气象因素的变化通常不大,而且新一代的激光跟踪仪产品已经可以通过对环境气象因素的实时测量对测距进行补偿,因此这一影响因素很小可以近似忽略。

b. 紧缩场反射面的装调现场环境往往比较复杂,难以避免的有外界因素引进的地基震动。在工厂环境下,计算得到地基振幅最大可以达到 $10\mu\text{m}$ 以上,有可能会对激光跟踪仪的使用产生影响,因此选择比较安静远离加工车间的地方进行测量和装调。

c. 外界天气变化会对紧缩场的装调地基等产生比较大的影响,这一影响规律比较复杂并且难以解决,经过在现场试验,在晴天和阴天环境下,通过激光跟踪仪对地面固定点的测量发现了两者有一定的相对位移移动。

d. 反射面背架变形主要是温度变化时由于反射面背架和反射面热膨胀系数不同引起的相对变形^[4]。在紧缩场整体设计中,出于背架刚度和反射面减重的考虑,背架未采用钢材而采用铝材制造。由于材料不同,这两者不协调的热变形会导致反射面面形畸变。这一问题在背架设计中采用钢铝混合材料结构的各向异性背架和可游动的调整支座消除反射面产生畸变。有限元分析和刚度试验表明这种结构的背架在室温 $15\sim 25^\circ\text{C}$ 变化时,背架顶端的点在暗室迎波方向的变化低于 $10\mu\text{m}$ 。

在理想状态下进行紧缩场装调过程中,由于环境因素引起的反射面变化,主要表现在测量目标的整体移动,即反射面背架和面板的整体移动,在具体装调

过程中表现为测量目标和仪器的相对移动,可以通过修正装调基准来解决这一问题。

3 应用公共点转化进行坐标回归

由于在环境因素变化时反射面的变形情况主要是整体移动,相当于测量仪器和反射面的相对位置发生了变化,可以通过面板制造时在面板上的标志点作为公共点进行坐标系回归,使得装调基准回复到前一次装调工作结束时的状态。

应用公共点转化坐标系和进行曲面拟合时必须进行坐标转换,现假设对 k 个测量点的坐标为 $P(X, Y, Z)$, 其对应的理论点坐标为 $p(x, y, z)$, 将测量点转化到理论坐标系下可以通过式 (1) 得到。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \bullet \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + T \quad (1)$$

其中, R 为旋转矩阵, T 为坐标的平移量, 并且有:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

在测量坐标向理论坐标变换中,旋转矩阵 R 需要是一个正交矩阵。因此为得到坐标变换参数一共要计算 6 个相互独立的量, 并且有:

$$r_{1i}r_{1j} + r_{2i}r_{2j} + r_{3i}r_{3j} = \begin{cases} 1, i=j \\ 0, i \neq j \end{cases} \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (3)$$

为了方便地利用计算机求解坐标变换的参数,采用由旋动理论的旋转变换关系 Rodrigues 等式得到的一个旋转向量 (v_x, v_y, v_z) 来对旋转矩阵 R 参数化建模表示^[5], 这种方法得到的旋转矩阵避免了过多的三角函数运算,提高了计算速度。

旋转构造矩阵:

$$V = \begin{bmatrix} 0 & -v_z & -v_y \\ v_z & 0 & -v_x \\ v_y & v_x & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据矩阵 V 和 R 的关系, 则有旋转矩阵:

$$R = \frac{1}{1+v_x^2+v_y^2+v_z^2} \begin{pmatrix} 1+v_x^2-v_y^2-v_z^2 & -2(v_z+v_xv_y) & -2(v_y-v_xv_z) \\ 2(v_z-v_xv_y) & 1-v_x^2+v_y^2-v_z^2 & 2(v_x+v_yv_z) \\ 2(v_y+v_xv_z) & 2(v_x-v_yv_z) & 1-v_x^2-v_y^2+v_z^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

由此可知, 要完成一次坐标变化, 需要计算 $(v_x, v_y, v_z, t_x, t_y, t_z)$ 6 个独立的变量。

在实际装调过程中, 每块面板上都有用于辅助调整的标志点, 可以通过对这些标志点的测量对坐标系进行回归和转化。假设测量中采用 n 个标志点作为公共点, 则可以得到以残差平方和作为目标函数:

$$e(v_x, v_y, v_z, t_x, t_y, t_z) = \sum_{i=1}^n \|P_i - R(P_i)\|^2 \quad (6)$$

由此可以得到坐标转化需要的 6 个参数, 就可以将坐标系回归到上一个需要的状态。这种方法简单可行, 不过有两个比较显著的缺点, 一是公共点的测量会因为靶标座的制造误差引入一定的测量误差, 二是采用这种回归的方法的标志点的理论坐标也是一组测量值, 这样在进行坐标转换时就会引入双倍的测量误差。

4 型面最佳匹配

4.1 反射面精度模型

根据 Ruze 等人的研究^[6], 天线增益与天线型面精度息息相关, 反射面的型面精度直接决定了紧缩场可以达到的最高工作频率, 而且天线表面点的半光程差的均方根是衡量反射面天线精度的最佳指标。文献[7]和文献[8]比较了以轴向偏差和半光程差作为最小量拟合抛物面, 提出选取半光程差作为最小量拟合的算法具有更高的数值计算精度及稳定性。

单反射面紧缩场的反射面在其设计坐标系下为一个轴向沿 z 轴, 顶点在原点的抛物线绕 z 轴一圈的旋转抛物面。其设计的方程为:

$$x^2 + y^2 = 4fz \quad (7)$$

型面的误差对于紧缩场电性能的影响, 是由于型面误差引起紧缩场口面上电磁场的相位差造成的。如图 1 所示, 由抛物线的几何特性可知, 从焦点 F 发出的球面波经过抛物面反射, 在抛物面的口面处为一个等相面, 如果实际反射面与理论型面有一定的偏差, 则会造成从天线口面进入的等相位电磁波会聚到接收器的相位误差, 结果使天线的增益降低, 旁瓣电平

增高。假设紧缩场反射面在 A 点处的型面有一定偏差, 则从 F 点射向 A 点的电磁波就会相比正常路径有一个偏差, 即光程差, 记为 2δ 。半光程差 δ 就是光程差的一半, 对图 1 中的情况有:

$$\delta = (AA' + A'A')/2 \quad (8)$$

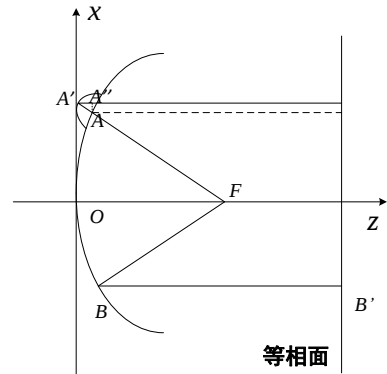


图 1 反射面表面半光程差示意图

则根据抛物面的几何特性: 抛物面上的点到焦点的距离与到准线的距离相等, 可以得到该点基于半光程差的误差方程:

$$\delta = \left((z_A + f) - \sqrt{z_A^2 + y_A^2} - (z_A - f) \right) / 2 \quad (9)$$

由于无法确切地得到反射面实际的方程, 采用均匀采集的 n 个离散点的方式来表示实际的曲面, 因此反射面基于半光程差的精度可以表示为:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2 / (n-1)} \quad (10)$$

4.2 型面最佳匹配算法

由测量点拟合曲面是一个最小二乘问题, 以半光程差的平方和作为目标函数可以表示为:

$$e(X) = \delta^T \delta \quad (11)$$

其中, $X = (v_x, v_y, v_z, t_x, t_y, t_z)$, 为空间转换参数。

该问题是一个非线性多参数优化问题, 解决该优化问题采用 Nelder-Mead 单纯形法, 单纯形是由 $n+1$ 个顶点所包络的一个 n 维几何图形, 将其中一组顶点定义成 $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n+1})$, Nelder-Mead 单纯法即通

过映射（reflection）、扩展（expansion）、收缩（contraction）和收敛（shrink）4 个运算过程迭代产生一系列的单纯形，最终来寻找目标函数的最小值。对于反射面型面精度匹配优化问题，将单纯形 X 表示为反射面从测量坐标系到设计坐标系之间的空间变换参数，Nelder-Mead 单纯形法就可用于反射面型面精度计算。为保证迭代的收敛，采用公共点转换的方法得到的空间转换参数作为迭代的初值 X_0 ，具体计算流程如图 2 所示。

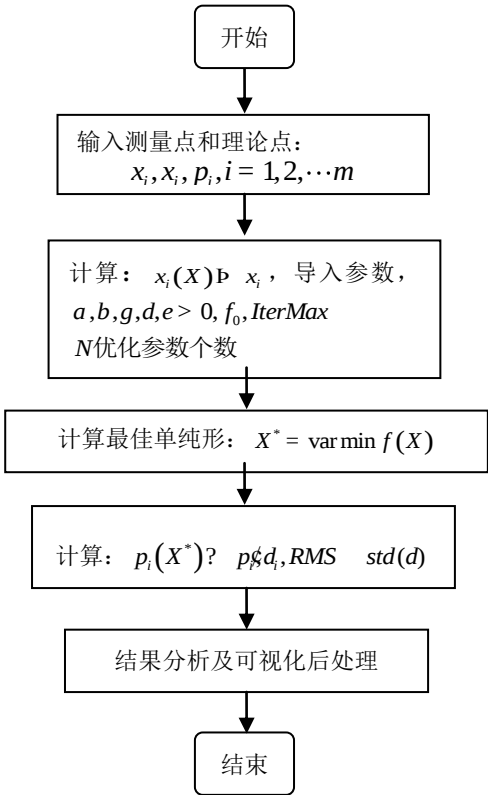


图 2 反射面型面匹配计算过程

经过优化过程就可以得到空间转换参数 X ，将现有的装调坐标系按此计算得到的参数进行修正就可以得到目标理想的装调坐标系，并可以此为基准按照式 (10) 得到此时的反射面精度。

5 工程应用实例

图 3 为国内某紧缩场的现场装调示意图，紧缩场反射面的焦距为 12000mm，静区为直径 5m、长度 5m 的圆柱。反射面部分共由实体部分的 24 块面板和 52 块齿形反射面组成。实体部分每块面板上为了测量和装调有预留的 4 个标志点。反射面分块数量较大，需

要比较长的装调时间。

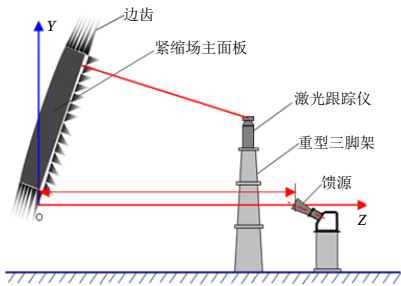


图 3 紧缩场现场装调示意图

在装调过程中通过用激光跟踪仪对反射面上一点的监控，并对结果进行分析比较，图 4 展示了该监控点在迎波方向坐标值的变化情况，可以看出峰峰值有接近 40μm 的变化量，而且随时间漂移有比较明显的变化趋势，会对装调进度产生影响。表 1 给出了隔 1h 该监控点的三坐标变化情况。

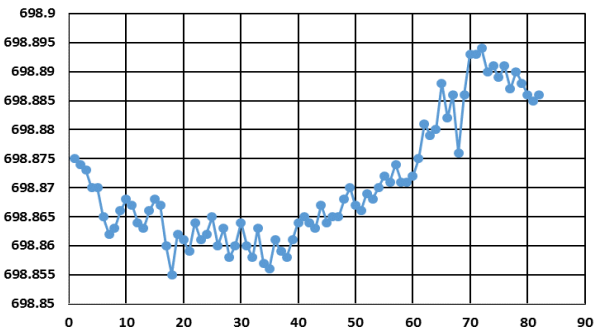


图 4 监控点迎波方向坐标的变化情况

表 1 每隔 1h 监控点的三坐标变化情况

	X	Y	Z
S1	-429.733	5736.482	698.875
S2	-429.707	5736.480	698.861
S3	-429.744	5736.480	698.864
S4	-429.779	5736.476	698.866
S5	-429.698	5736.457	698.853
S6	-429.753	5736.472	698.858
S7	-429.793	5736.477	698.860
S8	-429.791	5736.481	698.860
S9	-429.777	5736.482	698.863
S10	-429.775	5736.492	698.866
S11	-429.769	5736.480	698.865
S12	-429.777	5736.492	698.868
S13	-429.777	5736.493	698.873
S14	-429.766	5736.499	698.880
S15	-429.760	5736.494	698.884
S16	-429.795	5736.493	698.889
S17	-429.807	5736.510	698.891

从图 4 中可以看到由于环境因素引起的单点的坐标变化比较明显，由于紧缩场的性能对反射面的精度有非常严格的要求，因此这对于装调工作影响十分巨大。在某一次装调中，已经完成了反射面中间 4 块的装调工作并达到了该紧缩场要求的机械精度，在后来的工作中，由于天气的剧烈变化，该 4 块面板的精度和位置有了比较显著的变化，型面精度 (RMS) 由 30μm 变化至 109μm。前后均对 4 块面板的 16 个标志点进行了测量，其测量值见表 2。

表 2 4 块面板标志点坐标值的两次测量值

点号	第一次测量坐标 XYZ			第二次测量坐标 XYZ		
170-P1	-1500.755	5156.992	610.206	-1500.69	5157.009	610.316
170-P2	-1501.029	5736.701	741.891	-1500.93	5736.703	741.984
170-P3	-429.980	5736.571	698.739	-429.946	5736.538	698.811
170-P4	-430.309	5156.729	567.112	-430.284	5156.726	567.187
180-P1	429.403	5156.572	566.999	429.417	5156.591	567.068
180-P2	429.674	5736.489	698.606	429.705	5736.464	698.691
180-P3	1500.338	5736.211	741.626	1500.242	5736.206	741.689
180-P4	1500.215	5156.646	610.091	1500.211	5156.646	610.140
190-P1	-1500.444	6206.459	858.740	-1500.35	6206.483	858.826
190-P2	-1500.268	6796.057	1018.487	-1500.17	6796.058	1018.585
190-P3	-429.852	6796.237	975.505	-429.776	6796.210	975.619
190-P4	-429.669	6206.429	815.679	-429.608	6206.428	815.765
200-P1	429.924	6206.087	815.688	429.950	6206.062	815.765
200-P2	429.978	6795.729	975.415	429.981	6795.681	975.514
200-P3	1500.699	6795.476	1018.422	1500.668	6795.436	1018.518
200-P4	1500.901	6205.879	858.674	1500.863	6205.846	858.744

通过公共点回归方法，得到的旋转矩阵和平移矩阵有：

$$\begin{pmatrix} 1 & -0.000009 & -0.000009 \\ 0.000009 & 1 & 0.000018 \\ 0.000009 & -0.000018 & 1 \end{pmatrix}, T = \begin{bmatrix} 0.034 \\ -0.003 \\ 0.026 \end{bmatrix} \quad (12)$$

并在此坐标系中计算得到该 4 块面板的精度值为 60μm，从误差分布情况可以看出仍然有比较大的偏移，分布不均匀，没有得到理想的结果。

由于上述结果不理想，对该 4 块面板进行型面测量，使用激光跟踪仪的空间扫描方法采集测量点，将得到的测量数据与理论模型进行匹配，通过型面最佳匹配优化算法，计算得到空间转换的旋转矩阵和平移矩阵有：

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -0.000005 & -0.000011 \\ 0.000005 & 1 & 0.000015 \\ 0.000011 & -0.000015 & 1 \end{pmatrix}, T = \begin{bmatrix} -0.009 \\ -0.011 \\ 0.062 \end{bmatrix} \quad (13)$$

按照上述参数进行修正后，在此坐标系下得到这 4 块面板的型面精度为 31μm，而且误差分布均匀，接近了面板的制造精度，可以在此基础上以此坐标系为基准进行后续的装调工作。以此技术为指导，拼装完成后该紧缩场反射面的表面精度达到 31μm，误差分布情况如图 5 所示。

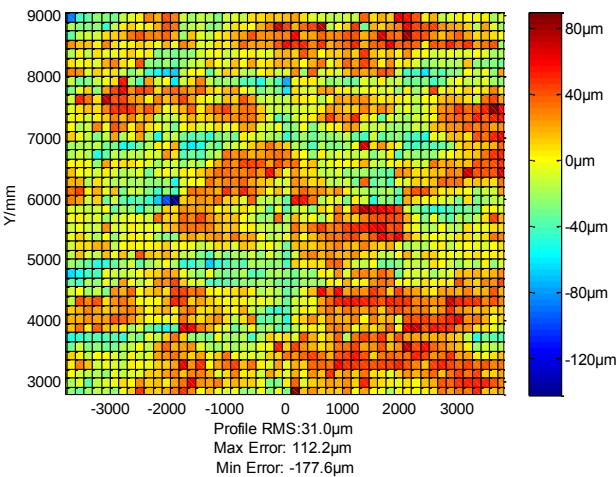


图 5 紧缩场反射面表面误差分布情况

6 结束语

通过对装调过程中可能影响反射面装调的环境因素进行了研究，分析了环境因素变化对反射面装调工作影响的方式，得到环境变化对装调工作的影响主要表现在测量目标和测量仪器相对位置的移动，因此可以采用修正装调基准的方法来解决这一问题。为简化坐标变换的旋转矩阵，采用由旋动理论的旋转变换关系 Rodrigues 等式得到的一个旋转向量对旋转矩阵参数化建模表示，并在此基础上提出了采用公共点回归方法修正装调基准和根据型面最佳匹配的方法修正坐标系。工程应用表明：采用公共点回归的方法实现方便，但对于本项任务而言精度不足，难以满足需求；而采用型面最优匹配的方法计算坐标系的修正量取得了良好的效果，比较精确地得到了在反射面偏移不大的情况下坐标系的修正量，优化了紧缩场反射面的装调工艺，保证了装调工作的顺利进行。

参考文献

- 1 何国瑜, 卢才成, 洪家才, 等. 电磁散射的计算和测量[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社等, 2006
- 2 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
- 3 方程, 李晓星, 周国锋, 等. 大型紧缩场的装调基准建立[J]. 航天制造技术, 2010(6): 44~46
- 4 王兆峻, 陈五一. 大型紧缩场反射面板的变形分析与控制[J]. 航空学报, 2004, 25(4): 416~419

- 5 Dayandeh S, Goldenberg A A. Formulation of the kinematic model of general (6 DOF) robot manipulator using as crew operator. IEEE J. Rob. Sys. 1987, 4(6)
- 6 Ruze J. Antenna tolerance theory: a review [J]. Proceedings of the IEEE, 1966, 54(4): 633~642
- 7 陈继华, 李广云. 离散点抛物面拟合的算法研究[J]. 无线电工程, 2005, 35(4): 32~34, 43
- 8 周国锋, 李晓星. 基于半光程差的天线反射面型面精度检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(6): 723~727

(上接第 46 页)

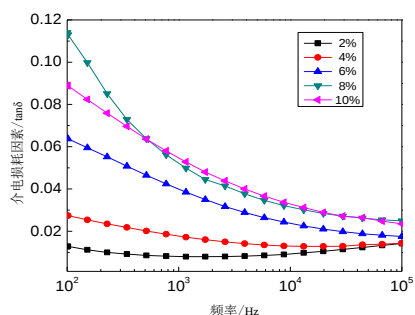


图 5 介电损耗与 nano- Al_2O_3 含量的关系

图 4 与图 5 分别为 PI/纳米 Al_2O_3 复合薄膜介电常数 ϵ 和介电损耗在不同频率下随纳米组分含量的变化曲线。

从图 4 可观察到, 在一定纳米含量 ($0\sim 10\text{wt}\%$), 复合薄膜随频率的增大, 介电常数变化趋势缓慢变小, 影响不大; 在一定频率 ($10^2\sim 10^5\text{Hz}$), 随着纳米 Al_2O_3 含量的增大, 其介电常数明显提高; 其原因是由于 PI 介电常数为 3.4, 而 Al_2O_3 介电常数为 9, 对于两相材料符合复相非均质材料的均和性能, 即 $\epsilon_{\min} < \epsilon < \epsilon_{\max}^{[5]}$; 另外由于纳米物特殊的表面效应, 在复合材料界面处很容易发生更为复杂的极化形式, 使得材料极化的强度增大, 从而导致介电常数的增大。

从图 5 可观察到, PI/纳米 Al_2O_3 复合薄膜的纳米 Al_2O_3 含量不断增加, 其介电损耗随之增大。其介电损耗增大主要是因为复合薄膜中纳米 Al_2O_3 粒子经过水解和缩聚反应过程中与 PI 分子链形成较强的相互作用力, 使得 PI/纳米 Al_2O_3 复合薄膜的偶极子在交变电场中取向时发生松弛损耗, 造成更多电能的损

耗。

4 结束语

a. 超声波具有很好的击碎和分散的作用, 避免了复合薄膜中纳米 Al_2O_3 颗粒的二次团聚;

b. 在一定纳米含量 ($0\sim 10\text{wt}\%$), PI 复合薄膜随频率的增大, 介电常数变化趋势缓慢变小, 影响不大; 在一定频率 ($10^2\sim 10^5\text{Hz}$), 随着纳米 Al_2O_3 含量的增大, 其介电常数明显提高;

c. 在一定纳米含量 ($0\sim 10\text{wt}\%$), PI 复合薄膜随频率的增大, 介电损耗不断变小; 在一定频率 ($10^2\sim 10^5\text{Hz}$), 随着纳米 Al_2O_3 含量的增大, 介电损耗明显提高。

参考文献

- 1 徐庆玉. 聚酞亚胺纳米杂化材料的制备、结构和性能[J]. 功能高分子学报, 2002, 15(2): 7~13
- 2 Ph Colomban. Structure of oxide gels and glasses by infrared and raman scattering. M.Mater. Sci., 1989, 24(8): 3002~3010
- 3 张营堂. 超声法制备聚酞亚胺杂化材料工艺研究[J]. 陕西理工学院学报, 2006, 22(4): 4~5
- 4 吴纯德, 等. 超声波降解水体中有机物的研究及发展[J]. 给水排水, 1997, 23(10): 61~63
- 5 NAN C W. Physics of inhomogeneous inorganic materials [J]. Mater. Sci., 1993, 37(1): 10~11