**文章编号:**1004-2474(2019)01-0146-04

## 基于 MFC 前馈补偿的抛物面天线型面控制方法

孙国钟,孙士勇,裴英博

(大连理工大学 机械工程学院,辽宁 大连 116024)

摘 要:提出了一种采用压电纤维执行器(MFC)控制抛物面天线的方法。首先采用数值仿真进行 MFC 的控制特性评估,其次在抛物面天线表面搭载 MFC,通过 MFC 的逆压电效应产生形变,带动抛物面天线变形,采用激光位移传感器实时监测抛物面天线位移,进而采用前馈控制补偿方式对 MFC 控制中的迟滞性进行调整,最后将仿真与试验结果进行比较,得到抛物面天线表面精度控制的要求。

**关键词:**抛物面天线;压电纤维执行器;数值模拟;迟滞性补偿;热弹性比拟 **中图分类号:**TN384;TM22 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.01.033

### Paraboloid Antenna Surface Control Method Based on MFC Feedforward Compensation

#### SUN Guozhong, SUN Shiyong, PEI Yingbo

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract**: A method for controlling the parabolic antenna using the macro fiber composite (MFC) is proposed in this paper. Firstly, the numerical simulation is used to evaluate the control characteristics of MFC. Secondly, the MFCs are glued on the surface of the paraboloid antenna specimen. The inverse piezoelectric effect of the MFC generates the deformation to drive the deformation of the parabolic antenna. The laser displacement sensor is used to monitor the displacement of the parabolic antenna in real time. Then, the feedforward compensation method is used to adjust the hysteresis in the MFC control. Finally, the simulation results are compared with the test results, and the requirements of the surface control accuracy of the parabolic antenna are obtained.

Key words: parabolic antenna; piezoelectric fiber actuator; numerical simulation; hysteresis compensation; thermal-elastic analogy

0 引言

抛物面天线利用电磁波来传递信息和能量,通 过利用抛物面的反射特性,可以将接受的信号集中 到主焦馈源上,从而使抛物面天线具有集中信号、增 强信号等优势,在远程通信、军用民用航天航空、定 位导航、精密机械等领域具有广泛应用<sup>[1-3]</sup>。

大型抛物面天线对自身结构精度有严格要求, 系统要求大尺寸抛物面天线只有毫米级变形。然 而,在抛物面天线加工以及服役过程中都会因为外 界因素而产生变形,这些表面形变都会使抛物面天 线的信号强度降低,影响使用<sup>[4]</sup>。

传统抛物面天线设计思路是通过提高结构刚度 减少变形,但随着天线尺寸增加精度提高,采用智 能材料对抛物面天线面型精度进行控制已成为国内 外研究热点。Wastington<sup>[5]</sup>研究出一种抛物面"单 弯曲"天线,采用压电陶瓷致动器,这种天线通过固 粘于天线反射表面的压电材料施加电压来改变天线 的形状。Yoon等<sup>[6]</sup>研制了"双弯曲"压电陶瓷带状 驱动孔径天线。上述研究工作均采用有限元法进行 数值分析,能够对智能材料驱动效能进行预测,但未 完全解决提高抛物面天线控制精度的问题。

针对抛物面天线在服役过程中会因为自身制造 误差及环境因素而影响型面精度的问题,本文采用 有限元法设计制造了含压电纤维执行器(MFC)的 抛物面天线,通过控制测量平台获得 MFC 致动下 的抛物面天线变形响应,基于前馈补偿算法,提高了

收稿日期:2018-04-04

基金项目:中央高校基本科研基金资助项目(DUT18JC27)

作者简介:孙国钟(1990-),男,辽宁大连市人,硕士生,主要从事抛物面天线型面精度控制精度的研究。通信作者:孙士勇(1981-),男,辽 宁沈阳市人,副教授,主要从事复合材料及结构设计分析,损伤断裂力学,智能材料仿真分析的研究。

MFC 控制精度。

1 MFC 致动下的抛物面天线仿真分析

#### 1.1 有限元模型的建立

MFC 致动力有限,因此在控制试验前,采用有 限元法对抛物面天线基本构型和变形特征进行评 估,为天线制造提供基础。

基于热弹性比拟法,在 ANSYS 中建立含有 MFC 的复合材料抛物面天线有限元模型,将 MFC 区域单独划分出来,根据热弹性比拟法分别赋予复 合材料和 MFC 材料性质<sup>[7]</sup>。MFC 和复合材料天 线满足位移连续条件,不考虑粘接层的厚度影响。 因为本文主要研究 MFC 控制抛物面天线变形及控 制过程中的精度问题,因此,未探讨 MFC 贴片的位 置的最优化问题。有限元模型如图1所示。

# ANEAN TIPE MIN (a) 整体几何图 (b) 有限元网格图 图 1

有限元模型

#### 1.2 仿真结果分析

仿真过程中,分别在4个象限相同位置布置4 片 P1 类型 MFC 对抛物面天线进行控制,对 4 片 MFC 施加不同正、负电压和相同电压的情况下获得 仿真分析结果如图 2 所示。



图 2 MFC 对抛物面天线的控制仿真分析

由图 2 可知,对 P1 类型 MFC 施加正电压将发 生伸长变形,负电压下 MFC 发生压缩变形,因此, 施加不同正、负电压会使结构呈现不同的变形特征, 即可根据天线实际误差,采用不同的正、负电压来获 得不同的面型精度控制。

2 MFC 致动下的抛物面天线试验

#### 2.1 抛物面天线模型的制造

基于仿真分析结果确定的天线几何特征,采用 玻璃纤维复合材料和接触成型工艺制造抛物面天 线,将玻璃纤维依次分块逐层铺放到模具上,之后放 入温度箱固化成型天线和背面加强筋。

抛物面天线制备完成后,根据仿真结果,按照设 计位置在天线背部粘接压电纤维执行器。最后将抛 物面天线进行脱模,中心部分采用金属接头固定在 试验台上,进行后期控制试验。

#### 2.2 试验设备与步骤流程

试验设备及软件:激光位移传感器、直流电源、 数据采集卡、压电纤维执行器、电压放大器、计算机、 LabVIEW。地面试验示意图如图 3 所示



#### 2.3 试验结果分析

控制采用正弦信号输入,MFC 有效输入电压为 -500~+1500 V,为了研究 MFC 控制变形的能力 与输入电压幅值的关系,采用多组幅值输入电压进 行试验。输入的正弦电压幅值从 40 V 开始以 40 V 的递增方式到 400 V 为止,共进行 10 组试验,其中 选取代表性的幅值为160 V和400 V的正弦电压数 据,图4为天线位移与输入电压关系图。



图 4 幅值为 160 V、400 V 时抛物面天线位移-电压图 由图 4 可知,在 MFC 致动下通过激光位移传 感器测得的天线位移与输入电压呈近似线性变化, 从而确定系统的可控制,但仍具有一定的迟滞性,影 响系统的控制精度。

3 前馈补偿控制算法设计

目前,采用 MFC 控制抛物面天线型面精度的 研究较少,且多采用闭环控制,相对于闭环控制需要 位移传感器进行数据采集反馈;采用开环控制系统, 只需对抛物面天线进行建模、前馈控制,更具有现实 意义。本文利用开环前馈补偿控制进行 MFC 控 制,采用现象模型中的改善补偿迟滞模型进行试验, 其建模参数与迟滞的物理实质之间无任何关系,只 考虑输出、输入之间的关系。

MPI模型是在 PI 模型基础上进行的改进。PI 模型使用有限具有不同阈值的 Play 算子的加权叠 加来表征迟滞特性<sup>[8]</sup>。Play 算子如图 5 所示。其 定义如下:

$$y(t) = H_{r_{h}}[x, y_{0}](t) = \max\{x(t) - r_{h}, \min\{x(t) + r_{h}, y(t_{i})\}\}$$
(1)

式中:x(t)为单调区间  $t_0 \sim t_n$ 上的单调分段输入信号; $r_h \in R^+$ 为 Play 算子的阈值; $y_0 \in R$ 为独立算子的初始值。





PI 模型表达式为

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{w}_{h}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{H}_{r_{h}} [x, \mathbf{y}_{0}](t) =$$
$$\mathbf{w}_{h}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{H}_{r_{h}} [x, \mathbf{y}_{0}](t)$$
(2)

式中: $w_h = [w_{h0}, \dots, w_{hn}]^T$  为权值向量; $r_h = [r_{h0}, \dots, r_{hn}]^T$  为阈值向量; $y_0 = [y_{01}, \dots, y_{0n}]^T$  为 Play 算 子初始值向量。

MPI 模型是在 PI 模型的基础上串联不同阈值 的单边死区算子的加权叠加,从而能够描述大多数 压电驱动器的非对称和非凸性的迟滞环。单边死区

$$S_{r_{s}}[y(t), r_{s}] = \begin{cases} \max\{y(t) - r_{s}, 0\} & r_{s} > 0 \\ y(t) & r_{s} = 0 \\ \min\{y(t) - r_{s}, 0\} & r_{s} < 0 \end{cases}$$
(3)

式中 r<sub>s</sub> ∈ **R** 为单边死区算子的阈值。



图 6 单边死区算子

具有不同阈值的单边死区算子的加权叠加可以 表示为

$$\mathbf{S}[\boldsymbol{y}](t) = \boldsymbol{w}_{s}^{T} \cdot \boldsymbol{S}_{r_{s}}[\boldsymbol{y}](t) \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{s}(t) = \boldsymbol{\Gamma}[\boldsymbol{x}] = \boldsymbol{w}_{s}^{T} \cdot \boldsymbol{S}_{r_{s}}\{\boldsymbol{w}_{h}^{T} \cdot \boldsymbol{H}_{r_{h}}[\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}_{0}]\}(t) \qquad (5)$$

为了确定迟滞补偿函数模型,必须先确定计算 出迟滞性函数模型,然后根据迟滞性函数模型,来确 定补偿模型。迟滞性函数输出用 *q* 来表示,输入用 *r*<sub>H</sub> 来表示,即迟滞性函数为

$$\varphi(r_{\rm H}) = \sum_{j=0}^{i} w_{\rm Hj}(r_{\rm H} - r_{\rm Hj})$$
(6)

且满足

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r_{\mathrm{H}}}\varphi(r_{\mathrm{H}}) = \sum_{j=0}^{i} w_{\mathrm{H}j} \tag{7}$$

有了迟滞性函数,可以计算出迟滞补偿逆函数。 根据补偿函数和传递函数关系可知,它们互为 逆函数,也可以近似构造补偿函数:

$$\varphi'(r'_{\rm H}) = \sum_{j=0}^{i} w'_{\rm Hj}(r'_{\rm H} - r'_{\rm Hj})$$
(8)

而根据逆函数的定义,可知:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r'_{\mathrm{H}}}\varphi(r'_{\mathrm{H}i}) = 1/\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r_{\mathrm{H}}}\varphi(r_{\mathrm{H}i}) \tag{9}$$

利用式(9)可以将得到的传递函数求出传递补 偿逆函数。最终迟滞性函数图像与迟滞补偿逆函数 图像如图 7 所示。



图 7 迟滞性传递函数和补偿函数示意图

由于 MFC 存在迟滞特性,因此,若要在开环中 实现精确的变形控制,就必须考虑迟滞特性的影响。 综合分析系统特性,可将抛物面天线控制模型表示 为迟滞模型。在该系统模型中,输入一组正弦信号, 然后信号进入迟滞逆补偿模型,将控制信号先进行 补偿,然后将补偿后的信号输入迟滞模型,最后输出 线性信号,以输入电压 400 V 幅值为例,此时补偿后 的结果和仿真结果对比如图 8 所示,二者符合良好。 补偿结果表明,利用迟滞前馈补偿法可提高 MFC 对抛物面天线的控制精度。



图 8 考虑迟滞性模型 MFC 前馈补偿控制与仿真结果对比 4 结论

通过模拟仿真和控制补偿研究了抛物面天线的 控制精度问题,得到以下结论:

1) 基于热弹性比拟法可在有限元软件中模拟 MFC 的致动性能,并对抛物面天线的构型进行设 计,不同的输入电压幅值和正、负电压可获得不同的 天线控制效果,可为 MFC 的布置方案设计和控制 试验提供基础。

2) 搭建了 MFC 致动下的抛物面天线控制试验 平台,在 MFC 致动下天线位移呈现迟滞性,影响控 制精度。

建立 MPI 迟滞性模型,采用前馈补偿控制法,可将抛物面天线控制位移线性化,从而提高控制精度。

#### 参考文献:

- [1] 胡靖. 抛物面天线反射面形变与应力分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学,2007.
- [2] FANG Houfei, PATTOM M, WANG K W. Shape control of large membrane reflector with PVDF actuation [C]//S. l. ; AIAA, 2007.
- [3] 李伟,张明,朱大雷,等.复合材料薄壁加筋抛物面天线 仿真与优化[J]. 宇航材料工艺,2015,45(06):27-31.
  LI Wei, ZHANG Ming, ZHU Dalei, et al. Simulation and optimization of composite parabolic antenna with stiffening ribs[J]. Aerospace Materials Technology, 2015,45(6):27-31.
- [4] 王立娟.几种常用卫星天线的工作原理和性能比较
  [J].现代工业经济和信息化,2016,6(9):28-29.
  WANG Lijuan. Comparison of the working principle and performance of several commonly used satellite antenna[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2016,6(9):28-29.
- [5] 周凡. 抛物面天线几何误差精密测量方法研究及应用 [D]. 武汉:武汉工程大学,2012.
- [6] 肖薇薇,陈务军,付功义.空间充气可展抛物面天线反 射面设计与精度分析[J].哈尔滨工程大学学报,2010, 31(2):257-261.

XIAO Weiwei, CHEN Wujun, FU gongyi. Design and accuracy analysis of reflective surface of space inflatable parabolic antenna[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2010,31(2):257-261.

[7] 孙士勇,杨睿,张少辉,等.叉指形电极压电执行器的热 弹性比拟分析方法[J]. 压电与声光,2015,37(1): 32-34.

SUN Shiyong, YANG Rui, ZHANG Shaohui, et al. The thermo-elasticity analogy approach for the analysis of inter-digital electrodes of piezo-actuator[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(1): 32-34.

[8] 郝兵兵.具有迟滞非线性特性的压电陶瓷作动器的建模与控制[D].成都:西南交通大学,2017.