

热环境下天线面板形貌主动调整系统布局与控制

刘志勇^{1,2}

(1.咸阳职业技术学院, 陕西 咸阳 712046;

2.西安电子科技大学电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘要: 考虑空间可展开天线面板主动调整系统结构复杂, 输入变量多且耦合性强等特点, 本文从天线主动调整系统机构位置布局和多变量耦合系统控制两个方面进行了研究。首先研究了空间天线反射面主动调整机构布局优化问题, 本文提出自适应模糊粒子群优化算法 (Adaptive Fuzzy Particle Swarm Optimization, AFPSO), 该算法从模糊理论出发, 对粒子移动权值和速度进行模糊处理, 使粒子能够实时调整各自移动速度和方向, 减弱了粒子在移动过程中的相互制约与影响, 使粒子能够快速准确地逼近最优位置。其次, 针对主动调整系统机构中众多主动动作器间存在强耦合问题, 本文提出自适应模糊解耦控制方法 (Adaptive Fuzzy Decoupling Controller, AFDC), 通过设计模糊解耦干扰项观测器对各子系统间未知干扰进行估计, 作为补偿信号加入到控制器输入端, 以此来消除其他子系统带来的不确定性影响, 同时给出了模糊系统规则后件参数的自适应律, 使得模糊系统参数具有在线调节能力, 从而实现对每个子系统的高精度控制。并利用Lyapunov方法证明了该控制方法的稳定性。最后, 通过仿真验证了AFPSO优化算法与AFDC控制方法的可行性。

关键词: 热环境; 天线面板形貌; 主动调整系统; 自适应模糊粒子群算法; 自适应模糊解耦控制

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 94047-(2018)02-019-08

0 引言

为对地球长时间连续气象观测, 拟在地球同步轨道上布置高精度的5米可展开天线, 为适应观测要求, 天线的工作频率最高达到400GHz, 这就要求天线的形面变形精度要求。为抑制空间恶劣环境 (如热) 对面型影响, 拟采用如图1(b)所示的主动调整系统。天线主反射面被分割为五个小单元 (图1(a)所示), 在每个小单元内, 其主动调整机构是由多个动作器构成。在反射面主动调整过程中, 虽然主反射面是经过分割的, 但是对于分割的小块单元内, 调整机构主动动作器之间是相互耦合, 相互影响的。因此, 主动动作器布局及控制方法对整个调整系统调整效果具有很重要的影响^[1]。

近年来, 有学者在主动调整系统机构布局和多变量系统控制方法研究方面取得了许多成果。文献^[2]以齐次坐标变换和最小二乘法为理论依据, 找到了满足系统要求的主动调整系统机构布局位置。文献^[3]利

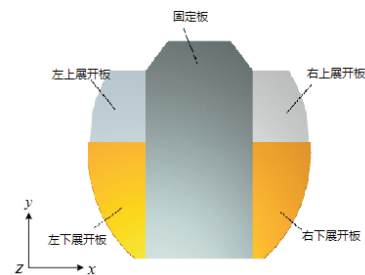


图1(a) 天线主反射面

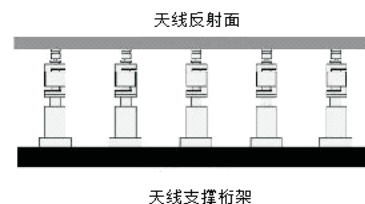


图1(b) 主动调整系统

用有限元法对背部支撑点的相关参数进行优化分析, 得到了满足镜面误差要求的最佳布局位置。文献^[2, 3]虽然在镜面支撑点位置优化上取得了一定效果, 但是这些优化方法都是将反射面进行精细分割, 并通过独立调整每一块分割面板或子镜的方

收稿日期: 2018-05-11

作者简介: 刘志勇 (1978—), 男, 陕西淳化人, 咸阳职业技术学院讲师, 西安电子科技大学在读博士。主要研究方向: 控制。

位, 来保证镜面精度要求。文献^[4]设计了一种确定主镜最佳支撑位置的优化方法, 以主反射镜光轴垂直时自重作用下镜面最大变形量为目标, 对背部支撑位置相关参数进行了优化分析, 找到最佳支撑位置。但是该方法在参数优化时, 支撑点是均匀分布在镜体的支撑圈上, 而且优化参数数目与支撑圈数成正比关系。而空间大型可展开天线面板主动调整机构支撑点是分布在如图3所示的支撑桁架上, 支撑点数量与所在桁架不存在数学关系。

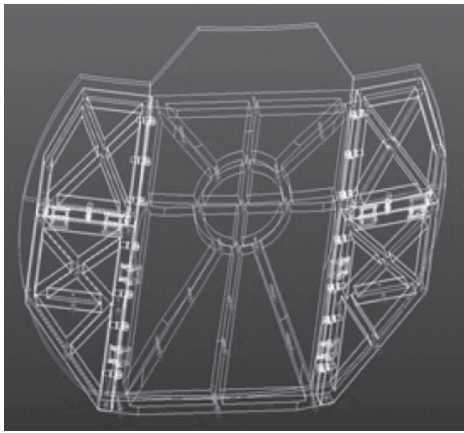


图3天线面板支撑桁架结构

Jang在文献^[5]中研究了一种基于梯度优化方法, 但是该方法在设计优化变量中, 结构支撑是由具有极限刚度值的弹簧来表示, 而弹簧刚度是随着设计变量的变化而变化的, 而主动作动器的弹性模量是其本身属性, 是固定不变的。因此对于以作动器为支撑的反射面是不适合的。Bojczuk and Mr ó z在文献^[6-8]中以最小化结构成本为目标, 将支撑成本假设为支撑点位置的函数, 推导了按平均承载力选择最优支撑位置的条件。

然而对于图1所示的空间反射面天线的主动调整系统, 因其是将多个主动作动器作用于同一反射镜面, 最优支撑位置的选择条件是以小块面板形面变形精度为要求的。虽然以上优化方法在主动调整系统机构位置选择上均取得了一定效果, 但是对于本文所研究的可展开天线是不适合的。

加之本文所研究的空间反射面天线主动调整系统的结构复杂, 难以得到精确的数学模型, 并且控制变量数目众多, 且控制变量之间存在复杂的关联关系。因此, 要想实现对空间反射面天线的高精度主动控制, 除了优化主动调整系统机构位置布局外, 还必须研究包含不确定性因素的多变

量耦合系统控制。文献^[9]利用非线性动态逆和分散方法设计了解耦控制器, 但是却不能保证系统在未知条件下的鲁棒性。文献^[10]提出利用神经网络自动调整PID参数的解耦控制方法, 但是该方法中的控制器结构复杂程度由输入输出的个数来决定, 对于维数较高的输入输出系统是无法满足的。文献^[11-12]将模糊控制与自适应控制相结合, 提出针对输出量为直接状态量的多输入多输出系统的控制方法, 但是该方法在模糊系统设计时没有考虑由较多输入引起的“维数灾难”问题。针对5米空间反射面天线特点, 本文提出AFPSO算法和AFDC控制方法, 分别解决了主动调整系统机构位置布局优化问题和多变量耦合系统的不确定性因素干扰问题。AFPSO算法是通过粒子移动权值和速度进行模糊处理, 减弱了粒子在移动过程中的相互制约与影响, 从而使粒子能够快速准确的逼近最优位置。AFDC控制方法通过设计模糊观测器对各子系统间未知干扰进行估计, 并作为补偿信号加入到控制器输入端, 以此来消除其他子系统带来的不确定性影响。

1 主动调整系统布局优化

1.1 主动调整系统优化模型建立

由于主动调整机构位置分布对最终调整效果有重要影响, 因此, 在众多的支撑点中选择出合理的作动器位置对调整效果有着极为重要的作用。

由于天线反射面在不同工况下其变形时不一样的, 根据天线工作环境特点, 分别选取极端热浸透三个典型工况 (-180°C , $+150^{\circ}\text{C}$ 及 $-95^{\circ}\text{C} \sim 113^{\circ}\text{C}$) 下的反射面型面变形最小为目标, 以桁架的许用应力和反射面的许用应力为约束条件建立如下优化数学模型:

$$\begin{aligned} & \text{find} \quad \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\} \\ & \min \quad \sum_{i=1}^3 \text{RMS}_i \\ & S \bullet T \quad (x_j, y_j) \in \Omega \\ & \quad \sigma_{Le} \leq [\sigma_{Le}] \\ & \quad \sigma_{Te} \leq [\sigma_{Te}] \end{aligned} \quad (1)$$

其中, n 为组成主动调整系统作的作动器数, Ω 为桁架上所有支撑点集合, $[\sigma_{Le}]$, $[\sigma_{Te}]$ 分别为桁架

的许用应力和反射面的许用应力。

$RMS = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2 + z_3^2 + \dots + z_n^2}{n}}$ 为反射镜面变形的均方根误差, z_i 为第 i 个作动器位移调整量。

1.2 主动调整系统布局优化算法设计

本次优化的主要目的是在图3所示的支撑桁架众多有限元节点内找到合适点, 作为主动作动器位置, 属于典型粒子位置优化问题。

(1) 传统粒子群算法

粒子群算法^[13-14]是一种全局搜索算法, 算法利用如下公式(2)完成速度和位置的迭代优化:

$$\begin{aligned} v(t+1) &= \alpha * v(t) + c_1 * rand() * (pb(t) - x(t)) \\ &\quad + c_2 * rand() * (gb(t) - x(t)) \\ x(t+1) &= x(t) + v(t+1) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $v(t)$, $v(t+1)$ 分别表示第 t 次和 $t+1$ 次迭代后粒子速度, $pb(t)$ 表示个体最优位置, $gb(t)$ 表示粒子群全局最优位置, α 表示惯性权重, c_1 表示自我学习因子, c_2 表示社会学习因子, $rand()$ 是介于(0,1)之间的随机数。 $x(t)$ 和 $x(t+1)$ 分别表示第 t 次、 $t+1$ 次迭代后粒子位置。

但是, 由于传统粒子群算法在寻优的过程中存在局部寻优能力较差, 容易产生早熟收敛。这些问题都是由于群中粒子在各自移动过程中相互干扰与制约因素的影响, 不能及时的调整各自的移动方向和速度, 很难逼近各自的最优位置。因此本文提出了AFPSO算法。

(2) AFPSO算法

基于传统粒子全算法存在问题, 本论文根据惯性权值 α 与单个粒子的寻优能力 δ_i 的关系^[18], 从自适应模糊理论出发, 对粒子惯性权值和更新位置进行模糊化处理, 使粒子利用更多的信息来调整移动方向和移动速度, 提高了粒子的寻优能力, 快速准确的逼近粒子最优位置, 并减弱了粒子在优化过程中相互干扰与相互制约。

首先定义模糊集 A, B , 分别包含三个模糊子集: 低 (low), 中 ($medium$) 和高 ($high$), 用于涵盖输入量 α 和 δ_i 。对于定义的三个模糊子集均采用如下的隶属度函数表达式如下:

$$\mu_{low}(x) = \begin{cases} 1 & x < a \\ \frac{b-x}{x-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{medium}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ 2\frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\frac{b-x}{b-a} & \frac{a+b}{2} < x \leq b \\ 0 & x > b \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{high}(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{b-x}{x-a} & a \leq x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (5)$$

根据式(3)-(5), 对于规则前件的模糊集合, 每个隶属度函数有两个参数。由于涵盖 α_i 和 δ_i 均有3个模糊子集, 则模糊规则共有 $3 \times 3 = 9$ 条模糊规则。模糊论域为 $[a, b]$, 即。

假设第 i 条模糊规则如下:

$$\text{if } \alpha_i(t) \text{ is } A^i \text{ and } \delta_i(t) \text{ is } B^i \text{ then } d_i(t) = f_i(\delta_i(t), \alpha_i(t)) \quad (6)$$

其中, 第 i 个粒子寻优能力 $\delta_i \in [0, 1]$, 且

$\sum_{i=1}^n \delta_i = 1$ 。则在第 i 时刻粒子全局最优位置可以表示为:

$$gb(t) = \sum_{i=1}^j \delta_i * pb_i(t) \quad (7)$$

于是公式(2)可以改写为:

$$\begin{aligned} v(t+1) &= \alpha * v(t) + c_1 * rand() * (pb(t) - x(t)) \\ &\quad + c_2 * rand() * \left(\sum_{i=1}^j \delta_i * gb_i(t) - x(t) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1)$$

根据模糊规则式(6), 如果采用乘法推理机制, 则模糊后件参数只需要一个参数就可以确定, 该模糊后件参数矩阵可以定义为:

$$\theta(k) = [d_1^1(t), d_1^2(t), \dots, d_1^9(t)]^T \quad (9)$$

根据模糊理论, 模糊系统理想输出可以定义为:

$$f_i(\delta_i(t), \alpha_i(t)) = \frac{\sum_{i=1}^9 d_i(t) \prod_{j=1}^n A^i(\alpha_i(t)) B^i(\delta_i(t))}{\sum_{i=1}^9 \prod_{j=1}^n A^i(\alpha_i(t)) B^i(\delta_i(t))} \quad (10)$$

假设第 i 条模糊规则的基函数为 $\xi_i(k)$, 则有

$$\xi_i(k) = \frac{\prod_{j=1}^n A_j^i(\alpha_i(t)) B_j^i(\delta_i(t))}{\sum_{i=1}^9 \prod_{j=1}^n A_j^i(\alpha_i(t)) B_j^i(\delta_i(t))} \quad (11)$$

于是模糊规则的基函数向量可以表示为:

$$\xi(k) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \xi_3(t), \dots, \xi_9(t)]^T \quad (12)$$

由式 (9) 和 (12), 则模糊系统的输出可以重新表示为: $f_i(\delta_i(t), \alpha_i(t)) = \theta^T(t)\xi(t)$ (13)

于是逼近理想惯性权值模糊输出为:

$$\alpha_i(t) = \theta^T(t)\xi(t) \quad (14)$$

根据式 (14) 和式 (8), 粒子优化速度公式为:

$$v(t+1) = \theta^T(t)\xi(t)*v(t) + c_1 * rand() * (pb(t) - x(t)) + c_2 * rand() * \left(\sum_{i=1}^j \delta_i * pb_i(t) - x(t) \right) \quad (15)$$

$$x(t+1) = x(t) + v(t+1)$$

至此, 利用自适应模糊理论对粒子惯性权值进行了模糊处理, 进而用自适应模糊方法调整了粒子移动速度与位置。

1.3 自适应模糊粒子群算法流程

自适应模糊粒子群算法流程如下:

步骤1设置进化参数, 初始化所有粒子的速度和位置。

设定优化参数如下:

粒子数 (作动器数), $num = 94$,

粒子位置 (作动器位置), (x_i, y_i) 其中

$$(x_i, y_i) \in \Omega, \quad i = 1 \dots 94。$$

所有粒子的初始速度 $V_0 \in [1, 3]$ 最小误差要求 $RMS \div 34 \mu m$ 。设定加权初值^[15] $\alpha \in [1, 3]$, $c_1 = 2$, $c_2 = 2$ 。

步骤2 根据初始参数计算每个粒子的适应度, 求出每个粒子在该时刻的个体最优值 $pb_i(t)$, 利用公式 (8) 求出全局最优值 $gb(t)$ 。

步骤3采用公式 (15) 对惯性权值及粒子的位置进行模糊处理并更新粒子的速度和位置。更新每个粒子在该时刻的个体最优值 $pb_i(t)$, 利用公式 (8) 求出全局最优值 $gb(t)$ 。

步骤4按照公式 (1) 的约束条件进行求解, 判断其是否满足精度及 $[\sigma_{Le}]$, $[\sigma_{Te}]$ 要求。如果满足, 则迭代结束, 并输出个体最优作为问题的解。否则, 进入步骤5。

步骤5判断算法迭代是否达到设置的进化代数, 如果达到, 则输出个体最优解作为问题的解。否则, 重复步骤3-4。

经过迭代优化, 粒子适应度曲线和支撑位置布局如图4-5所示:

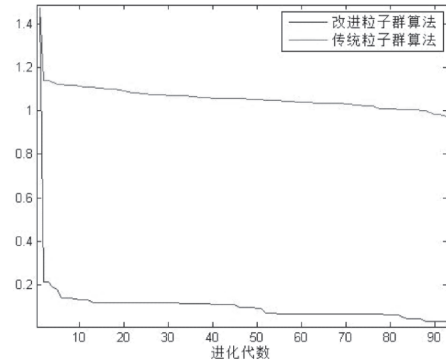


图4算法适应度曲线对比图

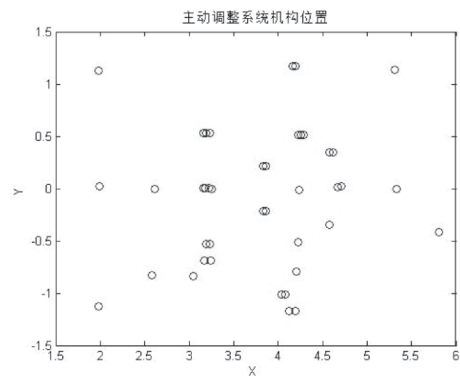


图5 主动调整系统机构布局图

根据图4可以看到, 由于粒子寻优能力差, 粒子之间的相互影响与干扰, 传统粒子群算法在优化过程中适应度曲线始终在波动, 无法收敛, 说明粒子在优化的过程中无法找到最优解。

但是, 在对传统算法中粒子惯性权值进行模糊处理后, 能够在线实时调整粒子移动速度和移动方向, 使得粒子适应度曲线逐渐收敛, 优化粒子最终到达了最优位置。主动调整机构位置已基本确定 (如图5所示)。由于受到天线自身重量要求限制, 在实际工程中, 对图5中所示多个支撑点聚集的作动器位置进行归并, 最终确定了天线主动调整系统机构位置分布, 如图6所示。

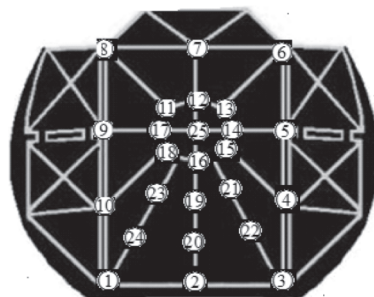


图6 天线面板主动调整系统模型

由图6可知, 面板主动调整机构由25个作动器

来调整天线反射面板变形。在调整过程中各子系统之间存在着强耦合作用,加之天线数学模型与实物模型之间的差异带来的不确定性,这些都成为影响天线调整精度的主要因素。

因此为进一步保证反射面的形面精度,接下来部分设计控制方法来应对其他通道耦合和控制模型不确定性带来的影响,以提高天线调整精度。

2 AFDC控制器设计

2.1 问题提出

针对图6所示的反射面主动调整系统,直接选取反射面上25个作动器作用点相对零基准面的位置作为系统状态,根据文献^[15]建立的天线反射面调整系统数学模型如式(16):

$$\begin{cases} Z(k+1) = Z(k) + B * U(k) \\ Y(k) = Z(k) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $Z(k+1)$ 为第 k 次调整后的位移, $Z(k)$ 为第 k 次调整前的位移, $Z(k) = [z_1(k), z_2(k), \dots, z_{25}(k)]^T$, $B_{25 \times 25}$ 为输入外力与实际位移的传递矩阵, $U(k)$ 第 k 次调整输入的外力。

为了分析不确定性因素对天线反射面精度影响,选择在控制矩阵 B 基础上随机生成不确定性矩阵 ΔB ,将式(16)可以改写为包含不确定性数学模型如下:

$$\begin{cases} Z(k+1) = Z(k) + (B + \Delta B) * U(k) \\ Y(k) = Z(k) \end{cases} \quad (17)$$

如式(17)所示的控制系统包含了25个具有强耦合作用的子系统。

针对式(17)控制数学模型,利用现有控制方法进行系统调整时,会产生以下问题:

(1) 主动调整系统内部各个子系统输入输出间映射关系不明确,存在强耦合作用。

(2) 耦合项与未知干扰项难以确定。

(3) 由于维数过高,在运用模糊控制方法时,产生“维数灾难”问题。

针对以上控制中出现的问题,本文提出了AFDC控制方法。

2.2 AFDC控制器设计

首先,为了消除耦合影响,要对控制系统(17)进行近似解耦。引入系统状态的非奇异变换,如式(18):

$$X(k) = B^{-1}Z(k) \quad (18)$$

$$\text{则: } Z(k) = BX(k) \quad (19)$$

将式(19)带入式(17)得:

$$BX(k+1) = BX(k) + (B + \Delta B) * U(k) \quad (20)$$

式(20)左乘 B^{-1} 得:

$$X(k+1) = X(k) + U(k) + B^{-1}\Delta B U(k) \quad (21)$$

其中, $B^{-1}\Delta B$ 为系统的未建模动态矩阵,将其视为未知向量 $G = [G_1^T, G_2^T, \dots, G_{25}^T]^T$,

$X(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_{25}(k)]^T$ 作为解耦系统的状态向量,从而式(21)可以重写为:

$$X(k+1) = X(k) + U(k) + GU(k) \quad (22)$$

由式(22)可以看到,通过引入系统状态非奇异变换将强耦合多变量系统方程分解为25个相互独立的单变量状态方程。

针对于上述解耦系统(22),以第 i 个子系统为例,来对AFDC控制器的设计进行介绍。

根据式(22)则可以得出第 i 号解耦子系统的状态方程为:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) + G_i(k)U(k) \quad (23)$$

假设 $d_i(k) = G_i U(k)$,则式(23)可以变为如下所示:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) + d_i(k) \\ d_i(k) = \sum_{j=1}^{25} G_{j,i} u_j(k) \end{cases} \quad (24)$$

因为本文所研究的调整系统干扰项 $d_i(k)$ 是未知的,所以拟采用模糊系统去构造干扰观测器得到系统干扰项的估计值,通过自适应控制方法给出模糊系统规则后件的自适应律。但是由式(24)可以看出,未知干扰项 $d_i(k)$ 是受其余24个子系统的干扰合计,如果直接利用模糊系统,会因为输入维数过高,而引起“维数灾难”现象,这样也会引起“规则爆炸”问题。由于调整系统间的干扰与系统支撑距离成反比关系,本文以每个作动器各自为圆心,作一个半径为 r 的圆,并以圆内 m ($m \ll 25$)个作动器为输入变量去设计模糊系统,这样不仅降低了模糊系统的输入维数,而且也减少了模糊规则数。

假设第 i 条模糊规则的基函数为 $\xi_i(k)$ 。而对于非线性函数 $d_i(k)$,在任意精度 ε 下,必然存在一个最优模糊后件参数矩阵 $\theta_i^*(k)$ 使得:

$$d_i(k) = \theta_i^{*T} \xi_i(k) + \varepsilon \quad (25)$$

其中 ε 为逼近误差。

现在利用模糊系统去构造干扰项 $d_1(k)$ 观测器得到干扰项的估计值 $\hat{d}_1(k)$ 。

假设第 i 条模糊规则设计如下：

if $x_1(k)$ is A_1^i and $x_2(k)$ is A_2^i and \dots and $x_m(k)$ is A_m^i

then $\hat{d}_1(k) = a_1^i(k)$

于是，模糊系统的输出可以表示为：

$$\hat{d}_1(k) = \frac{\sum_{j=1}^r a_j^i(k) \prod_{i=1}^m \mu_{A_j^i}(x_j(k))}{\sum_{j=1}^r \prod_{i=1}^m \mu_{A_j^i}(x_j(k))} \quad (26)$$

其中， r 表示模糊规则数， $\mu_{A_j^i}$ 表示输入变量的隶属度函数。

设第 i 条模糊规则的基函数为 $\xi_i(k)$ ，则

$$\xi_i(k) = \frac{\prod_{i=1}^m \mu_{A_j^i}(x_j(k))}{\sum_{j=1}^r \prod_{i=1}^m \mu_{A_j^i}(x_j(k))} \quad (27)$$

于是得到 r 条模糊规则对应的基函数向量为：

$$\xi(k) = [\xi_1(k), \xi_2(k), \dots, \xi_r(k)]^T \quad (28)$$

设模糊后件参数矩阵可以定义为：

$$\theta_i(k) = [a_i^1(k), a_i^2(k), \dots, a_i^r(k)]^T \quad (29)$$

由式 (28)，(29)，进而模糊系统的输出可以重新表示为： $\hat{d}_i(k) = \theta_i^T(k) \xi(k)$ (30)

设计调整系统第1号解耦子系统的模糊干扰观测器为：

$$\begin{cases} \sigma_i(k+1) = \sigma_i(k) + u_i(k) - \gamma_i \sigma_i(k) + \gamma_i x_i(k) + \hat{d}_i(k) x_i^d \\ \hat{d}_i(k) = \theta_i^T(k) \xi(k) \end{cases} \quad (31)$$

其中， γ_i 为模糊干扰项的参数， $\sigma_i(k)$ 为模糊干扰项观测器的状态。

于是，根据模糊干扰项观测器的状态 $\sigma_i(k)$ 与第1个解耦子系统的状态向量 $x_1(k)$ ，可以得到观测误差 $e_i(k)$ 如下式所示：

$$e_i(k) = x_i(k) - \sigma_i(k) \quad (32)$$

定义最优模糊后件参数矩阵为 $\theta_i^*(k)$ ，则模糊规则后件参数矩阵 $\theta_i(k)$ 与最优模糊后件参数矩阵之间的误差如下式表示：

$$\tilde{\theta}_i(k) = \theta_i^*(k) - \theta_i(k) \quad (33)$$

进一步可以得到基于模糊干扰观测器的控制律为：

$$u_i(k) = -hx_i(k) - \hat{d}_i(k) \quad (34)$$

将式 (34) 带入式 (24) 可以得到：

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) - hx_i(k) - \hat{d}_i(k) + d_i(k) \\ &= (1-h)x_i(k) - \hat{d}_i(k) + d_i(k) \\ &= (1-h)x_i(k) - \theta_i^T(k) \xi(k) + \theta_i^{*T}(k) \xi(k) \\ &= (1-h)x_i(k) + \tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k) \end{aligned}$$

根据第 i 号解耦子系统的离散控制模型式 (24) 和解耦子系统的模糊干扰观测器 (31) 可以得到未知干扰的观测误差动态方程为：

$$e_i(k+1) = e_i(k) - \gamma_i e_i(k) + \tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k) \quad (35)$$

进而，对于5m空间可展开天线主动调整系统的 i 号解耦子系统数学模型 (23)，采用式 (34) 所示的控制律，式 (31) 所示的模糊干扰观测器设计模糊后件参数矩阵的自适应律为：

$$\theta_i(k+1) - \theta_i(k) = \rho_i x_i(k) p_i \xi(k) + \rho_i(k) e_i(k) \xi(k)$$

其中， p_i 为正常数， ρ_i 为自适应参数，且 $\rho_i > 0$ 闭环系统第 i 号解耦子系统的构如图7所示。可见模糊系统利用系统输入输出信息逼近得到系统扰动项的估计值，作为补偿信号加入AFDC控制器，可以消除各通道耦合和不确定性对系统带来的影响。

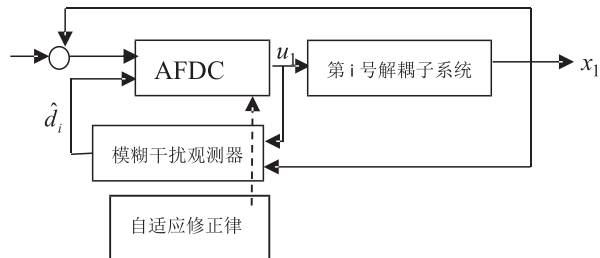


图7第i个解耦子系统闭环结构图

根据相同的设计思路，其他解耦子系统的模糊干扰项估计器及控制律也可以得到。

3 稳定性分析

为了证明AFDC控制方法的稳定性，我们利用李雅普诺夫对其进行证明。

首先选取李雅普诺夫函数如式36：

$$V(k) = \frac{1}{2} p_i [x_i(k)]^2 + \frac{1}{2} [e_i(k)]^2 + \frac{1}{2 \rho_i} \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \quad (36)$$

其中 $p_i > 0, \rho_i > 0$ ，显然 $V(k) > 0$ 为正定。

于是 $\Delta V(k) = V(k+1) - V(k)$ (37)

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \frac{1}{2} p_i [x_i(k+1)]^2 + \frac{1}{2} [e_i(k+1)]^2 + \frac{1}{2 \rho_i} \tilde{\theta}_i^T(k+1) \tilde{\theta}_i(k+1) \\ &\quad - \frac{1}{2} p_i [x_i(k)]^2 - \frac{1}{2} [e_i(k)]^2 - \frac{1}{2 \rho_i} \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{aligned}$$

$$\text{其中: } \frac{1}{2} p_i [x_i(k+1)]^2 - \frac{1}{2} p_i [x_i(k)]^2 \quad (38)$$

$$\begin{aligned} &= p_i x_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) + \frac{1}{2} p_i \{ (h^2 - 2h) [x_i(k)]^2 \\ &- 2hx_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k) + [\tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k)]^2 \} \\ &= p_i x_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) + \frac{1}{2} p_i \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^2 - 2h & -h \\ -h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \\ &\frac{1}{2} [e_i(k+1)]^2 - \frac{1}{2} [e_i(k)]^2 \quad (39) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= e_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) + \frac{1}{2} \{ (\gamma^2 - 2\gamma) [x_i(k)]^2 - 2\gamma x_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k) \\ &+ [\tilde{\theta}_i^T(k) \xi(k)]^2 \} \\ &= e_i(k) \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma^2 - \gamma & -\gamma \\ -\gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \\ &\frac{1}{2\rho_i} \tilde{\theta}_i^T(k+1) \tilde{\theta}_i(k+1) - \frac{1}{2\rho_i} \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \quad (40) \\ &= \frac{1}{2\rho_i} \{ [2\tilde{\theta}_i(k) - \rho_i \lambda] [-\rho_i \lambda] \\ &= -\tilde{\theta}_i^T(k) + \frac{\rho_i}{2} \lambda^T \lambda \end{aligned}$$

式中 $\lambda = x_i(k) p_i \xi(k) + e_i(k) \xi(k)$

则可以求得:

$$\begin{aligned} \Delta y(k) &= \frac{1}{2} p_i \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h^2 - 2h & -h \\ -h & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \\ &+ \frac{1}{2} \begin{bmatrix} e_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma^2 - \gamma & -\gamma \\ -\gamma & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_i(k) \\ \tilde{\theta}_i^T(k) \tilde{\theta}_i(k) \end{bmatrix} \quad (41) \\ &= \frac{\rho_i}{2} [x_i(k) p_i \xi(k) + e_i(k) \xi(k)]^T [x_i(k) p_i \xi(k) + e_i(k) \xi(k)] \end{aligned}$$

根据 $-2hp_i < 0$ 和 $\gamma_i > 0$ 及 $\rho_i > 0$ 可以得到:

$$\frac{1}{2} p_i \begin{bmatrix} h^2 - 2h & -h \\ -h & 1 \end{bmatrix} = -hp_i < 0 \quad (42)$$

$$\frac{1}{2} p_i \begin{bmatrix} \gamma^2 - \gamma & -\gamma \\ -\gamma & 1 \end{bmatrix} = -\gamma_i < 0 \quad (43)$$

同时又有 $\rho_i > 0$, 则可以证明

$$\Delta y(k) < 0 \quad (44)$$

根据李雅普诺夫稳定性定理可知, 解耦子系统的状态变量模糊干扰观测器误差以及模糊规则后件参数矩阵与最优后件参数矩阵的误差是随着离散时间会一致收敛。

通过相同的方法, 其他解耦子系统稳定性分析均可以得到相同的结论。

4 仿真计算

为了进一步验证上述控制方法, 分析不确定性因素对天线反射面精度影响。选择在控制矩阵

$$B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{见附表1})$$

2-范数基础上%50范围内随机生成 25×25 维不确定性矩阵 ΔB ,

$$\Delta B_{25 \times 25} = \text{random}[-50\% \| B \|, 50\% \| B \|]$$

在某温度工况下, 反射面上25个作动器作用点的具体变形量为:

$$Z(k) = \begin{bmatrix} -1.141 & 12.668 & 12.656 & -3.987 & 4.032 \\ 8.982 & 0.676 & -3.183 & -12.143 & -11.927 \\ 0.297 & 0.045 & 0.465 & -9.303 & -14.889 \\ 2.119 & 2.003 & 0.194 & 11.079 & 0.631 \\ 1.194 & 1.094 & -9.187 & -13.839 & -2.257 \end{bmatrix}^T$$

单位为um。

其中, LQR控制性能指标函数的参数为:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1 & 0_{25 \times 25} \\ 0_{25 \times 25} & Q_1 \end{bmatrix}, \quad R = I_{25 \times 25}$$

子矩阵 Q_1 见附件2

AFDC 控制参数为: 模糊干扰观测器

$$\begin{aligned} \gamma &= [\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6, \gamma_7, \gamma_8, \gamma_9, \gamma_{10}, \gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{25}] \\ &= [0.4 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.6 \ 1.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.6 \ 1.2 \ 0.4 \ 0.6 \\ &\quad 0.3 \ 0.6 \ 1.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.6 \ 1.2 \ 0.4 \ 0.6 \ 0.3 \ 0.6 \ 1.2]^T \end{aligned}$$

模糊观测器系统后件的自适应算法参数值为:

$$\begin{aligned} \rho &= [\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6, \rho_7, \rho_8, \rho_9, \rho_{10}, \rho_{11}, \rho_{12}, \dots, \rho_{25}] \\ &= [0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \\ &\quad 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \ 0.01 \\ &\quad 0.01 \ 0.01 \ 0.01]^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p &= [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{11}, p_{12}, \dots, p_{25}] \\ &= [1 \ 1]^T \end{aligned}$$

反馈控制律的参数为:

$$\begin{aligned} h &= [h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6, h_7, h_8, h_9, h_{10}, h_{11}, h_{12}, \dots, h_{25}] \\ &= [0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 1.0 \ 0.6 \ 0.8 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 1.0 \ 0.6 \ 0.8 \\ &\quad 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 1.0 \ 0.6 \ 0.8 \ 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 1.0 \ 0.6 \ 0.8 \\ &\quad 0.8 \ 0.7 \ 0.7 \ 1.0 \ 0.6 \ 0.8]^T \end{aligned}$$

利用 LQR 控制方法和 AFDC 控制方法分别对有干扰时1号作用点进行调整, 调整曲线如图8所示。

图8中灰色曲线为LQR调整曲线, 红色曲线为AFDC调整曲线。由上图可以看到, 由于系统中不确定性因素及其他子系统的影响, 利用LQR控制方法在调整过程中, 调整曲线一直产生剧烈震荡, 系统稳定

性不高。因此,如果利用LQR控制方法是无法应对系统不确定性及其他子系统耦合作用带来的影响。

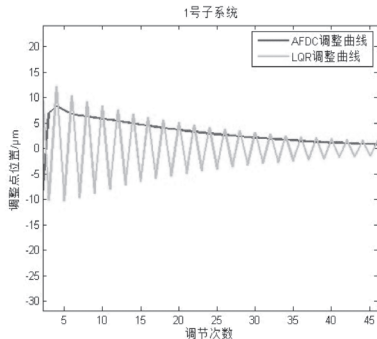


图8 有干扰时LQR与AFDC调整曲线

而利用控制方法,曲线没有产生大的波动,而且系统调整量很小。从第5步开始系统一直趋于稳定状态。是因为AFDC控制方法可以对每个子系统利用模糊系统实现干扰项观测器,对每个干扰项进行估计,从而实现了系统的高精度控制。

图9是天线主动调整系统RMS调整曲线。由图可以看出,在方法的控制调整下,RMS调整前为11mm,到第45次调整后所有调整点的位移量都在10–3mm以下,精度已经达到了微米量级,而且还呈现了继续缩小的趋势。

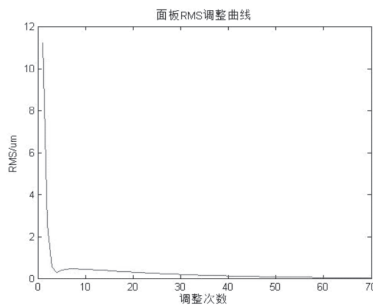


图9 25个作用点RMS调整曲线

5. 结论

1.对传统粒子群算法中的惯性权值进行了模糊处理,使粒子利用更多的信息来调整移动速度和方向,克服了传统算法中寻优能力差等特点,使粒子能够快速准确的逼近各自的最优位置。

2.通过设计模糊解耦干扰项观测器对系统未知干扰项进行估计,并作为补偿信号累加到AFDC控制器,消除了其他通道耦合作用和不确定性带来的影响,从而实现对每个子系统的高精度控制。

3.利用李雅普诺夫(Lyapunov)理论证明了该控制方法的稳定性。

参考文献

- [1]李福,阮萍,赵葆常.重力作用下下平面反射镜面变形研究[J].光子学报,2005.34(2):272–275.
- [2]陈永聪,胡永明背部支撑主反射镜的面形分析与支撑点优化[J].光子学报,2007.36(9):1730–1733.
- [3]杨亮,李朝辉.某空间反射镜支撑装调技术[J].红外与激光工程,2013.42(12):3277–3282.
- [4]耿麟先,杨洪波.大口径平背形主镜背部支撑位置优化计算方法[J].光学技术,2007.33(6):889–891.
- [5]Gang-Won Jang Optimization of Support Locations of Beam and Plate Structures Under Self-Weight by Using a Sprung Structure Model. Journal of Mechanical Design[J].2009.131
- [6]Z. Mróz, and GIN. Rozvany, 1975, Optimal Design of Structures With Variable Support Conditions Optim. Theory Appl., 15(1), p. 85–101.
- [7]K. Dems, and R. H. Plaut, 1990, Design of Beams, Plates and Their Elastic Foundations for Uniform Foundation Pressure, Structural Optimization., 2, p. 213–222.
- [8]Siwakosit w, Snell S A, Hess R A. Robust flight control design with handling qualities constraints using scheduled linear dynamic inversion and loop-shaping[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000,8(3): 483–494.
- [9]曾宪法,张磊,申功璋.基于动态逆和分散控制的导弹控制系统设计[J].北京航空航天大学学报,2007,33(11): 1303–1307.
- [10]张杰,邹继刚,李文秀.多输入多输出系统的神经网络PID解耦控制器[J].哈尔滨工程大学学报,2000,21(5): 6–9.
- [11]Hao W J, Liu G L, Wang S Y, et al. Observer-based fuzzy adaptive control for a class of MIMO nonlinear systems[C]// Proceedings of IMACS Conference on Computational Engineering in Systems Applications. Piscataway, NJ:IEEE Press, 2006: 239–244.
- [12]Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization[A]. Proc IEEE International Conference on Neural Networks[C]. USA: IEEE Press, 1995. 1942–1948.
- [13]Eberhart R C, Kennedy J A. A new optimizer using particle swarm theory. Proc Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE Press, 1995. 39–43.
- [14]Shi Y, Eberhart R C. Fuzzy adaptive particle swarm optimization, Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computational, Piscataway, 2001: 101–106.
- [15]Tian L L, Bao H, Modeling and Control of the Redundant Parallel Adjustment Mechanism on a Deployable Antenna Panel, sensors, 2016, 16(10).

[责任编辑:王军利]