

基于嵌套粒子群算法的多涡环微下击暴流模型参数选择方法

吴 扬,姜守达

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院,黑龙江哈尔滨 150080)

摘 要: 提出一种使用嵌套粒子群算法,根据微下击暴流水平垂直风速最大峰值比选择多涡环微下击暴流模型参数的方法.设计了包括目标群和中间群的嵌套式粒子群结构,使用中间群寻找水平垂直最大风速,并使用目标群最终选择模型参数.用该方法计算了水平垂直风速峰值比在 0.3~0.7 之间的多组多涡环微下击暴流模型参数,最终生成的微下击暴流场的水平垂直风速峰值比与预设值误差的数量级在 10^{-4} 以内.

关键词: 微下击暴流模型;多涡环模型;粒子群优化算法;风切变;飞行仿真

中图分类号: TP202.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2012)01-0204-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.01.034

Parameters Selection Method of Multiple Vortex-Ring Microburst Model Based on Nested Particle Swarm Optimization

WU Yang, JIANG Shou-da

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: A parameter selecting method of Multiple Vortex Ring Microburst Model(MVRMM) based on NPSO (Nested Particle Swarm Optimization) is proposed, which can select the parameters of MVRMM by any proportion between maximal horizontal velocity and maximal vertical velocity. The nested particle swarm structure is designed which contained parent swarm and subswarms. Find the maximal horizontal and vertical velocity with subswarms, and find the optimal parameters with parent swarm. Calculate several parameters of MVRMM by this method, which the proportion between maximal horizontal velocity and maximal vertical velocity is between 0.3 to 0.7. And the error between the factual proportion and the setting proportion is within 10^{-4} .

Key words: microburst model; multiple vortex ring model; particle swarm optimization; wind shear; flight simulation

1 引言

微下击暴流是风切变的一种形式,对飞行器的飞行能够产生严重危害.在飞行仿真中,利用微下击暴流模型生成微下击暴流场,可以检验飞行器对微下击暴流的响应,减少危害.

基于涡环原理的微下击暴流模型是一种常用的工程化微下击暴流模型^[1,2],具有灵活、简便、实时性好等特点.为了使生成的微下击暴流场的速度分布与实际情况更加接近,通常使用多个涡环建立微下击暴流场,即多涡环微下击暴流模型.多涡环微下击暴流模型有多组涡环参数需要配置,配置参数的准则,要根据具体情况决定.例如文献[3]中使用多涡环微下击暴流模型模拟重现 DFW 微下击暴流场,是以生成数据与实测数据方差最小作为参数选择准则的;在这一准则下可以使用 Newton-Raphson 算法计算涡环的参数.但在飞行仿真中,需要根据不同的试验要求生成不同的微下击暴流场,并

没有如此多的实测数据作用于计算模型参数.在这种情况下,一般以微下击暴流场的某种特征作为选择模型参数的准则.微下击暴流场的水平与垂直风速最大峰值比是评价其对飞行器危害程度的一个特征.当微下击暴流的垂直强度一定时,水平与垂直风速峰值比越大,飞行器穿越微下击暴流场时所受到的升力变化越大,对飞行器的危害越大.文献[4]以水平、垂直风速最大峰值比等于 0.3 为准则,提出了一种根据经验公式选择多涡环微下击暴流模型参数的方法.但是当水平、垂直风速最大峰值比不等于 0.3 时,文献[4]并没有给出相应的模型参数选择方法.本文将群体智能的思想引入到多涡环微下击暴流模型的参数选择中来,使用粒子群优化算法解决多涡环微下击暴流模型参数的选择问题.将待选择的参数看作“粒子”,以微下击暴流场的水平、垂直风速最大峰值比满足预设的比值为评判条件,通过多组“粒子”不断的向最优位置移动,最终选择出模型参数.

2 问题的描述

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 是 Kennedy 和 Eberhart 提出的一种仿生优化算法^[5,6], 其寻优的过程可以用图 1 来表示。

以水平、垂直最大峰值比作为准则选择多涡环微下击暴流模型参数的过程可用图 2 描述。对比图 1 图 2 可看出, 在每次更新参数群后, 图 2 比图 1 多了一个寻找水平、垂直最大风速的过程。标准粒子群算法不能解决这类嵌套寻优的问题, 需要对标准粒子群算法进行改进。在本文中, 使用嵌套粒子群算法解决这个问题。

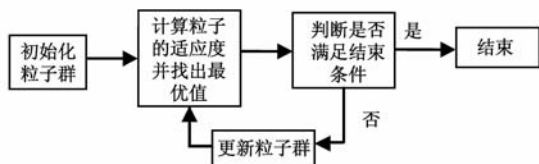


图1 粒子群优化算法寻优过程示意图

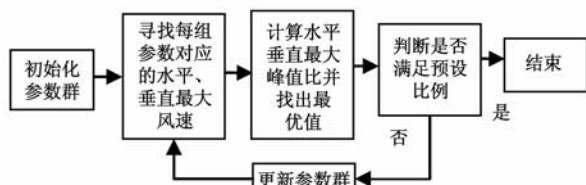


图2 多涡环微下击气流模型参数选择过程

3 嵌套粒子群优化算法

3.1 嵌套粒子群结构

在一次多涡环微下击暴流的参数选择过程中, 存在两种寻优过程。寻找满足评判条件的模型参数, 是最终的目的, 这个过程可以称之为目标寻优过程; 每次更新模型参数时, 寻找与之对应的水平、垂直最大风速, 是一个中间过程, 称之为中间寻优过程。

为了能够同时完成中间寻优过程和目标寻优过程, 嵌套粒子群优化算法中包括两种粒子群, 与目标寻优过程对应的是目标粒子群; 与中间寻优过程对应的是中间粒子群。在寻找模型最优参数的过程中, 目标群的粒子为一组可能满足评判准则的模型参数; 在寻找水平、垂直最大风速的过程中, 模型参数是确定的, 中间群的粒子为一组可能使水平或垂直风速取最大值的坐标。每一个目标群的粒子都有与其对应的自己的中间粒子群。

从一般意义上讲, 假设在一个目标寻优过程中有 n 个中间寻优过程, f 为目标寻优过程的评判条件, $g_1, \dots, g_n$ 为中间寻优过程的评判条件, 则目标粒子群与中间粒子群的对应关系可以用图 3 表示。

3.2 嵌套粒子群算法流程

嵌套粒子群优化算法的流程如下:

- (1) 在 f 的解空间内初始化目标粒子群;
- (2) 分别在 $g_1, \dots, g_n$ 的解空间内, 为每个目标群粒子初始化一个中间群;
- (3) 使用标准粒子群算法找到每个目标群粒子所对应的中间群的最优位置;
- (4) 计算每个目标群粒子的适应值;
- (5) 比较目标群粒子适应值和自身最优值 $pbest$ 。如果当前值比 $pbest$ 更优, 则置 $pbest$ 为当前值, 并设 $pbest$ 的位置为当前位置;
- (6) 比较目标群粒子适应值与种群最优值 $gbest$ 。如果当前值比 $gbest$ 更优, 则置 $gbest$ 为当前值;
- (7) 更新目标群粒子;
- (8) 更新每个目标群粒子对应的中间粒子群;
- (9) 检查结束条件, 如果满足则退出, 不满足则返回步骤(3)。

在上述过程中, 对目标群和中间群的粒子都使用下式更新^[7~9]:

$$v_{id}^{[t+1]} = wv_{id}^{[t]} + c_1 rand_1(p_{id}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) + c_2 rand_2(p_{gd}^{(t)} - x_{id}^{(t)}) \quad (1)$$

$$x_{id}^{(t+1)} = x_{id}^{(t)} + v_{id}^{(t+1)} \quad (2)$$

式中, $v_{id}^{[t]}$ 为第 i 个粒子中的第 d 个元素在第 t 次更新时的速度; $x_{id}^{(t)}$ 为第 i 个粒子中的第 d 个元素在第 t 次更新时的值; $i = 1, 2, 3, \dots, m$, m 为种群中粒子数目; $d = 1, 2, 3, \dots, D$, D 为粒子中的元素个数; c_1, c_2 为加速常数, $rand_1, rand_2$ 为分布于 $[0, 1]$ 之间的随机数, w 为惯性权重。

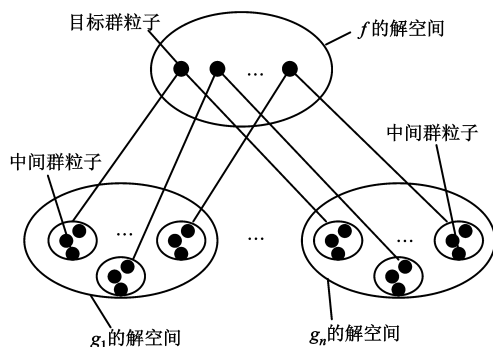


图3 目标群粒子与中间群粒子的结构关系

4 多涡环微下击暴流模型的参数选择

4.1 涡环原理模型速度场计算方法

多个涡环的总速度场为所有涡环速度场的叠加。单个涡环流线方程的一般表达式为^[3]

$$\psi = \frac{\Gamma}{2\pi} (r_1 + r_2) [F(\lambda) - E(\lambda)] \quad (3)$$

其中, Γ 为涡环强度; r_1, r_2 为空间任意一点到涡环的最大、最小距离

$$r_1 = \sqrt{(z - H)^2 + (r - R)^2} \quad (4)$$

$$r_2 = \sqrt{(z-H)^2 + (r+R)^2} \quad (5)$$

当选择涡环的中心轴为坐标系 y 轴时, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; x, y, z 为空间任意一点坐标, H, R 为涡环的高度和半径。

$F(\lambda), E(\lambda)$ 为椭圆积分. 计算椭圆积分时可以采用下式逼近

$$F(\lambda) - E(\lambda) \approx \frac{0.788\lambda^2}{0.25 + 0.75\sqrt{1-\lambda^2}} \quad (6)$$

式中 $\lambda = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1}$.

通常情况下, 为了满足边界条件, 一般在距离水平地面 $\pm H$ 高度上对称的布置强度为 $\pm \Gamma$ 的涡环(如图 4 所示)。

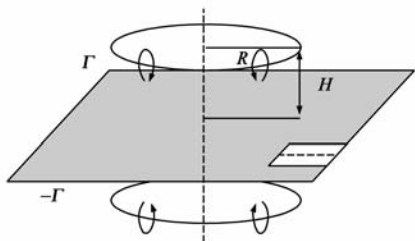


图4 单个涡环对的放置方法

设主涡环与镜像涡环的流线方程表示为 ψ_p 和 ψ_l , 则总的流线方程为二者的叠加

$$\psi_\Sigma = \psi_p + \psi_l \quad (7)$$

对 ψ_p 和 ψ_l 分别用式(3)~(6)计算, 并将结果带入到式(7)中, 得到

$$\psi_\Sigma \approx \frac{1.576\Gamma}{\pi} \left[\frac{(r_1 + r_2)\lambda_a^2}{1 + 3\sqrt{1-\lambda_a^2}} - \frac{(r'_1 + r'_2)\lambda_s^2}{1 + 3\sqrt{1-\lambda_s^2}} \right] \quad (8)$$

式中, r_1, r_2, λ_a 为主涡环参数, r'_1, r'_2, λ_s 为镜像涡环参数。

单涡环微下击暴流模型的速度场可以根据 ψ_Σ 由以下公式诱导出来

$$v_x = \left(\frac{x}{r^2} \right) \frac{\partial \psi_\Sigma}{\partial z} \quad (9)$$

$$v_y = \left(\frac{y}{r^2} \right) \frac{\partial \psi_\Sigma}{\partial z} \quad (10)$$

$$v_z = \left(-\frac{1}{r} \right) \frac{\partial \psi_\Sigma}{\partial r} \quad (11)$$

在涡环轴心处, 由于 $r = 0$, 不能直接用式(9)~(11)计算. 由文献[4]可知, 可以定义涡环轴心处的微下击暴流速度

$$v_x = v_y = 0 \quad (12)$$

$$v_z = \frac{\Gamma R^2}{2} \{ [R^2 + (Z+z)^2]^{-3/2} - [R^2 + (Z-z)^2]^{-3/2} \} \quad (13)$$

由上述公式计算的速度场, 在涡丝处的速度为无

穷大, 这与实际的微下击暴流场不相符. 为了更好的模拟微下击暴流场, 将式(9)~(13)求解出的风速乘以一个阻尼因子 ζ ^[3], 使得涡丝附近风速衰减到正常范围内. 阻尼因子表达式如下:

$$\zeta = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{r_1}{d} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

其中, d 为涡核直径。

4.2 基于嵌套粒子群算法的模型参数选择方法

由涡环原理生成的微下击暴流场是关于涡环中心轴对称的. 因此其水平和垂直最大风速必然会出现在每个穿过中心轴的截面内. 为了计算方便, 选择 xoz 面作为求解水平垂直风速峰值的解空间, 此时 $v_y = 0$, 水平风速即为 x 方向上的风速. 多个涡环诱导出的速度场为各个涡环产生速度场的叠加. 以 2 个涡环为例

$$v_{x\Sigma} = v_{x1} + v_{x2} \quad (15)$$

$$v_{z\Sigma} = v_{z1} + v_{z2} \quad (16)$$

其中, v_{x1}, v_{z1} 为第一个涡环诱导的速度场, v_{x2}, v_{z2} 为第二个涡环诱导的速度场, 他们均可由式(9)~(14)得到。

此时, 这两个涡环构成的微下击暴流模型的评判条件可以表示为

$$f(R_1, H_1, \Gamma_1, R_2, H_2, \Gamma_2) = \left| \frac{V_{x\Sigma}}{V_{z\Sigma}} \right| = K \quad (17)$$

$V_{x\Sigma}, V_{z\Sigma}$ 为 $v_{x\Sigma}, v_{z\Sigma}$ 的峰值, K 为预先设定的微下击暴流场的水平与垂直风速最大峰值比。

目标粒子群的粒子为模型参数 $\{R_1, H_1, \Gamma_1, R_2, H_2, \Gamma_2\}$, 两个中间粒子群的粒子分别为水平、垂直风速达到峰值时的坐标. 对式(15)~(17)使用第 3 节中介绍的嵌套粒子群算法即可选择出水平与垂直风速最大峰值比为 K 的微下击暴流场模型参数。

5 计算结果分析

使用本文的嵌套粒子群算法分别计算 $K = 0.3, K = 0.5, K = 0.7$ 时的微下击暴流模型参数; 计算时, 为了保证粒子群的收敛, 粒子群参数按照收缩因子粒子群的参数选取^[10,11], $w = 0.7289, c_1 = c_2 = 1.4962$, 计算结果见表 1. 其中 ΔK 为所生成微下击暴流场的水平垂直风速最大峰值比与预先设定值的偏差. 从中可以看出, 使用本文方法选取涡环参数建立的微下击暴流场, 其水平与垂直风速最大峰值比可以很好的满足预先设定的要求。

图 5 是按照 $K = 0.7$ 选取参数建立的微下击暴流场的风速矢量图. 从图中可以看出, 其风速变化轮廓符合一般微下击暴流场变化规律。

图 6、图 7 是不同高度上垂直风速和水平风速变化情况. 由图中可以看出, 不同高度上的垂直风速峰值随高度增加增大, 垂直风速最大峰值出现在其下沉气流

的上部;不同高度上的水平风速峰值随高度增加减小,水平风速最大峰值出现在其涡环下方接近地面处.这与文献[12,13]中根据观测数据得到的微下击暴流场特征相符合.

表 1 不同 K 值时选取的涡环参数

K	0.3	0.5	0.7
$R_1(\text{m})$	526	779	956
$H_1(\text{m})$	873	899	729
$\Gamma_1(\text{m}^2/\text{s})$	10777	7660	5718
$R_2(\text{m})$	1250	1304	1142
$H_2(\text{m})$	916	960	750
$\Gamma_2(\text{m}^2/\text{s})$	3031	2625	3931
ΔK	2.5×10^{-4}	3.0×10^{-5}	1.9×10^{-5}

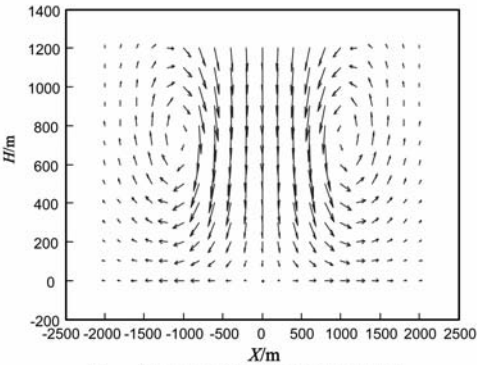


图5 微下中气流模型风速矢量图

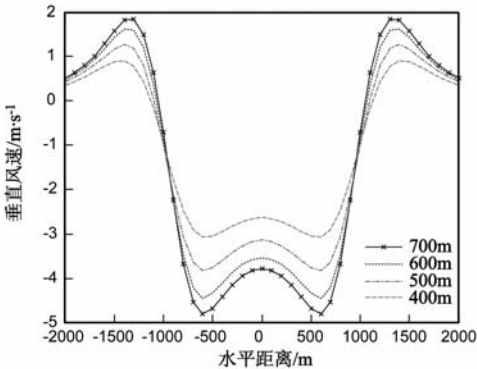


图6 不同高度上的垂直风速变化

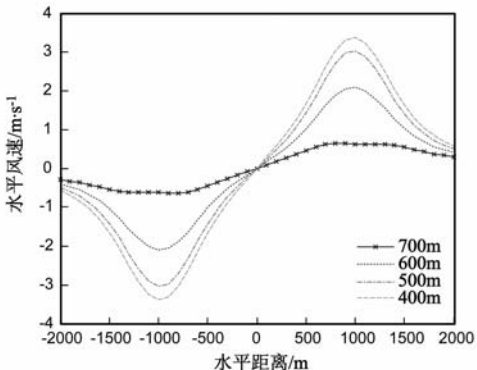


图7 不同高度上的水平风速变化

当 $K = 0.3$ 时,将本的方法与传统按经验公式选择

参数的方法进行比较,如表 2.

表 2 $K = 0.3$ 时本文方法与传统方法的比较

参数选择方法	嵌套粒子群	传统方法
$R_1(\text{m})$	526	500
$H_1(\text{m})$	873	900
$\Gamma_1(\text{m}^2/\text{s})$	10777	16630
$R_2(\text{m})$	1250	1000
$H_2(\text{m})$	916	900
$\Gamma_2(\text{m}^2/\text{s})$	3031	12728
ΔK	2.5×10^{-4}	1.3×10^{-3}

从表中可以看出,使用嵌套粒子群算法选择参数的微下击气流模型,其水平、垂直最大峰值比与预设值更为接近.

6 结论

飞行仿真中,根据微下击暴流场的水平与垂直风速最大峰值比的需求确定微下击暴流模型参数,难点在于首先要找到模型中水平与垂直风速峰值的位置,而该位置又与要优化的参数有关.本文提出的嵌套粒子群算法,通过互相关联的过程粒子群和目标粒子群,同时寻找风速的峰值位置和模型的最优参数,可以很好的解决这一问题.计算结果显示,使用该方法选择的参数建立微下击暴流场,其水平风速与垂直风速峰值的比例可以满足预先设定的要求.同时,其速度场分布特征也与真实情况较为接近.

参考文献

[1] Zhao Yiyuan, A E Bryson. A simplified ring-vortex downburst model [A]. Proceedings of 28th Aerospace Science Meeting [C].Nebada: NV, 1990. 1 – 8.

[2] 高振兴,顾宏斌.用于飞行实时仿真的微下击暴流建模研究[J].系统仿真学报,2008,20(33):6524 – 6534.

Gao Zhenxing. Research on modeling of microburst for real time flight simulation[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(33): 6254 – 6534. (in Chinese)

[3] Thomas A Schultz. Multiple vortex ring model of the DFW microburst[J]. J Aircraft, 1990, 27(2): 163 – 168.

[4] 朱上翔.微下击暴流的流体动力学模型[J].飞行力学, 1984, (02): 59 – 72.

Zhu Shangxiang. The hydrokinetics model of microburst [J]. Flight Dynamics, 1984, (02). 59 – 72. (in Chinese)

[5] Wang Zhengchu, Li Jun, Peng Chen. Research in capacitated vehicle routing problem based on modified hybrid particle swarm optimization [A]. Intelligent Computing and Intelligent Systems [C]. Shanghai, 2009. 289 – 293.

[6] 许相莉,张利彪,刘向东,于哲舟,周春光.基于粒子群的图像检索相关反馈算法[J].电子学报,2010,38(8): 1935 – 1940.

- Xu Xiangli, Zhang Libiao, Liu Xiangdong, Yu Zhezhou, Zhou Chunguang. Image retrieval relevance feedback algorithm based on particle swarm optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(8): 1935 – 1940. (in Chinese)
- [7] Lu Lin, Luo Qi, Liu Jun-yong, Long Chuan. An improved particle swarm optimization algorithm [A]. Granular Computing [C]. Hangzhou, 2008. 486 – 490.
- [8] Gary G Yen, Wen Fung Leong. Dynamic multiple swarms in multiobjective particle swarm optimization[J]. Systems, Man and Cybernetics, 2009, 39(4): 890 – 911.
- [9] Liu L, Yang S, Wang D. Particle swarm optimization with composite particles in dynamic environments[J]. Systems, Man, and Cybernetics, 2010, (99): 1 – 15.
- [10] 张丽平. 粒子群优化算法的理论及实现[D]. 杭州: 浙江大学材料与化学工程学院, 2005. 25 – 43.
Zhang Liping. The Theorem and Practice Upon the Particle Swarm Optimization Algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. 25 – 43. (in Chinese)
- [11] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58 – 73.
- [12] 刘洪恩. 微下击暴流的特征及其数值模拟[J]. 气象学报, 2001, 59(2): 183 – 196.
Liu Hongen. Characteristics and numerical simulation of microburst[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2001, 59(2): 183 – 196. (in Chinese)
- [13] 邹波. 下击暴流的特征及研究[J]. 中国民航学院学报, 2002, 20(3): 28 – 31.
Zou Bo. Characteristics of microburst[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2002, 20(3): 28 – 31. (in Chinese)

作者简介

吴 扬 男, 1981 年 8 月出生于黑龙江哈尔滨. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系博士研究生. 2006 年毕业于哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 获得硕士学位. 主要研究方向为虚拟试验技术, 风场模型研究.

E-mail: hababebababe@163.com

姜守达 男, 1964 年 9 月出生于黑龙江伊春. 哈尔滨工业大学自动化测试与控制系教授, 博士生导师. 主要研究方向为虚拟试验及验证技术, 数字化设计技术, 自动化测试技术等.

E-mail: jsd@hit.edu.cn