

基于小波矩的改进遗传算法风切变识别

蒋立辉^{1,2}, 陈红^{1*}, 庄子波², 熊兴隆¹, 于岚¹

(1. 中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300; 2. 中国民航大学 民航气象研究所, 天津 300300)

(*通信作者电子邮箱 chhcl989@163.com)

摘要:针对采用三次B样条小波矩提取的低空风切变图像的 shape 特征,提出了一种改进的遗传算法(GA)用于微下击暴流、低空急流、侧风以及顺逆风4种风切变的类型识别中。该算法中自适应交叉概率仅考虑了进化代数的影响,而变异概率强调个体与群体适应度的作用,使得在均匀把握群体演变方向时,极大地丰富种群的多样性。由此改进算法选取的最优特征子集,采用三阶近邻分类器进行分类识别。实验结果表明,该自适应遗传算法操作方向性强,能快速收敛到全局最优解,稳定地提取出最优特征子集,最终使低空风切变的平均识别率达到97%以上,获取了较好的识别效果。

关键词:小波矩;风切变;形状特征;遗传算法;类型识别

中图分类号: TP391.413 **文献标志码:** A

Wind shear recognition based on improved genetic algorithm and wavelet moment

JIANG Lihui^{1,2}, CHEN Hong^{1*}, ZHUANG Zibo², XIONG Xinglong¹, YU Lan¹

(1. Tianjin Key Laboratory for Intelligent Signal and Image Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. Civil Aviation Meteorological Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: According to the shape features of wind shear images extracted by wavelet invariant moment based on cubic B-spline wavelet basis, an improved Genetic Algorithm (GA) was proposed to apply to the type recognition of microburst, low-level jet stream, side wind shear and tailwind-or-headwind shear. In the improved algorithm, the adaptive crossover probability only considered the number of generation and mutation probability just emphasized the fitness value of individuals and group, so that it could control the evolution direction uniformly, and greatly maintain the population diversity simultaneously. Lastly, the best feature subset chosen by the improved genetic algorithm was fed into 3-nearest neighbor classifier to classify. The experimental results show that it has a good direction and be able to rapidly converge to the global optimal solution, and then steadily chooses the critical feature subset in order to obtain a better performance of wind shear recognition that the mean recognition rate can reach more than 97% at last.

Key words: wavelet moment; wind shear; shape feature; Genetic Algorithm (GA); type recognition

0 引言

低空风切变是一种严重影响飞机飞行的大气现象,由其引发的飞机事故约占飞机起降事故的30%。而不同类型的风切变对飞机的影响又有较大差异,正确识别各种风切变类型能为飞行安全带来极大帮助。从形状上分析,微下击暴流、低空急流、侧风以及顺逆风4种风切变^[1]的图像差别较大,并且同种风切变图像样本间存在一定的空间关系特性,即某些图像样本可看成由其他样本旋转、平移而来。因此,采用对形状特性变化不敏感的形状特征描述算子对目标进行描述,使其能较好地刻画四类风切变的特征,基于图像的方式自动识别各种风切变类型。近年来,以不变矩为基础的形状特征提取算法,已成为图像识别的重要研究方法。1999年,Shen等^[2]提出小波矩概念,其思想是利用小波变换来构造目标旋

转不变矩特征,可同时获得图像的全局和局部特征,克服了Hu矩和Zernike矩只能刻画图像的全局特征以及对背景和噪声敏感的特点,在识别相似物体时有更高的识别率。

在提取的风切变形状特征基础上,主要研究了基于小波矩的自适应遗传算法(Adaptive Genetic Algorithm, AGA)特征选择问题。自适应遗传算法不仅具有传统遗传算法的全局并行优化、鲁棒性强和适于并行分布处理的特点,还能改善传统遗传算法中全局搜索性能和收敛速度间的矛盾。在特征选择问题中,Srinivas等^[3]和任子武等^[4]提出的自适应遗传算法,交叉概率和变异概率只与每代个体的适应度有关,相邻进化代之间参数的计算缺乏连续性,即缺乏整体把握能力,且稳定性不好。黄友锐^[5]提出的自适应交叉概率和变异概率只随进化代数变化,忽视了个体的演变特征,易快速收敛到局部最优值。欧阳森等^[6]和潘伟等^[7]提出的自适应遗传算法中,变

收稿日期: 2013-09-27; **修回日期:** 2013-11-16。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41075013); 国家973计划项目(2010CB731800); 中央高校基金资助项目(ZXH2010D020, 3122013P009)。

作者简介: 蒋立辉(1964-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,主要研究方向:激光雷达探测、图像处理、光电子; 陈红(1989-),女,江西赣州人,硕士研究生,主要研究方向:模式识别、图像处理; 庄子波(1980-),男,山东潍坊人,讲师,硕士,主要研究方向:数值预报、数据处理; 熊兴隆(1962-),男,陕西户县人,教授,主要研究方向:激光雷达气象探测; 于岚(1988-),女,辽宁锦州人,硕士研究生,主要研究方向:激光雷达气象探测、图像处理。

异概率由个体的适应度和遗传代数共同决定,个体特征表现不明显,造成进化过程演变缓慢,一定程度上增加了计算量。鉴于此,本文提出一种改进的自适应遗传算法(Improved Adaptive Genetic Algorithm, IAGA),能够快速、稳定收敛于全局最优值,选出最优特征子集用于三阶近邻分类器中分类识别4种风切变,提高风切变的整体识别效果。

1 低空风切变图像分析

多普勒测风激光雷达已经发展成为目前探测风切变的最为有效的工具之一。Xia等^[8]已从理论分析和实验两方面证

明了激光雷达探测低空对流层风场的能力和准确性。然而低空风切变的发生与地形、地理位置、当地的气候条件有关,利用激光雷达探测低空风切变获取实际数据变得困难。基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamic, CFD)的FLUENT流体仿真软件构建三维低空风切变风场,获取风切变数据^[9]。并根据多普勒激光雷达的波束扫描方式^[10],使用Matlab工具扫描风场数据,获得一定扫描半径内的风场径向速度图像,最后将切变区的径向速度资料信息分割出来,显示其俯视方向上的二维平面图像,构造识别样本库,如图1所示。

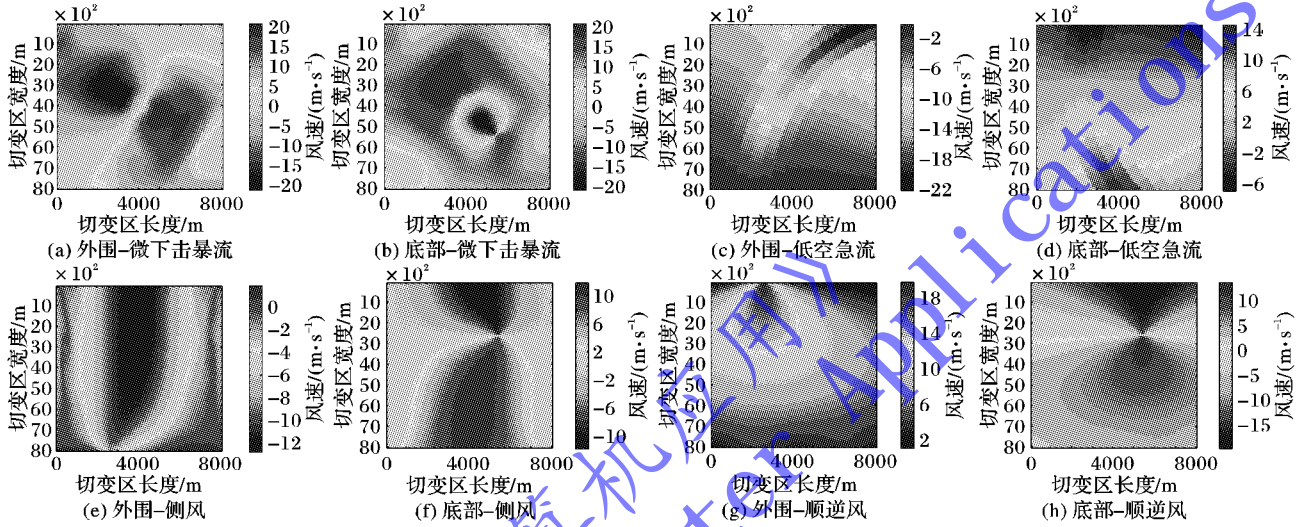


图1 4种风切变切变区的径向速度

图1为部分样本图像,雷达仰角固定1°。其中:图1(a)、(c)、(e)、(g)为雷达在切变区外围扫描时获取的样本;图1(b)、(d)、(f)、(h)为雷达在切变区底部扫描获取的样本,剩下的样本图像可近似看作这两类样本平移、旋转所得,在此不具体列出。图1中每种风切变的径向速度较为全面,形状差异较大,通过提取训练样本中关键的几个全局形状特征即可识别测试样本。然而,当雷达位置离切变区较远时,由于扫描半径和仰角的影响,扫描出的风切变径向速度存在一定的缺失信息,风切变图像的形状特性不全面,此时那些未缺失的局部形状特征对识别样本图像具有关键性的作用。为此,采用能同时提取全局特征和局部特征的小波矩算子提取风切变图像的形状特征。

2 风切变图像的小波矩特征提取

定义 $y(r, \theta)$ 为风切变图像在极坐标 (r, θ) 下的二维数字图像,其矩特征表达式^[11]为:

$$F_{pq} = \iint y(r, \theta) g_p(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \quad (1)$$

其中: F_{pq} 是 pq 阶矩; p, q 为整数; $g_p(r)$ 代表径向分量函数; $e^{jq\theta}$ 为角度分量函数。将二维图像问题转换为一维求解问题得:

$$F_{pq} = \int S_q(r) g_p(r) r dr \quad (2)$$

其中 $S_q(r) = \int f(r, \theta) e^{jq\theta} d\theta$,若 $g_p(r)$ 定义在变量 r 的整个定义域内, F_{pq} 为全局矩特征;否则, F_{pq} 提取的是局部特征; $S_q(r)$ 表示图像 $y(r, \theta)$ 在相位空间 $\{0 \leq \theta \leq 2\pi\}$ 中的第 q 个

频率特征。

若式(2)中的 $g_p(r)$ 用径向小波基函数 $\psi_{m,n}(r)$ 代替,即得到小波不变矩为:

$$\|F_{m,n,q}^w\| = \left\| \int S_q(r) \psi_{m,n}(r) r dr \right\| \quad (3)$$

其中:尺度因子 $m = 0, 1, 2, \dots$;平移因子 $n = 0, 1, \dots, 2^{m+1}$ 。通过选取不同的尺度因子和平移因子, $\psi_{m,n}(r)$ 可以覆盖全部径向区域 $\{0 \leq r \leq 1\}$,从而风切变图像 $y(r, \theta)$ 能够获取不同尺度下的小波矩特征 $\|F_{m,n,q}^w\|$ 。当图像旋转时, $\|F_{m,n,q}^w\|$ 保持不变,即小波矩本身具有旋转不变性,要使小波矩特征具有平移和比例不变性,需将图像归一化。

3 基于改进遗传算法的特征选择

采用非正交矩三次B样条^[12]小波作为小波基提取小波矩特征,获取的特征时频局部性较好,但通常构造的小波不变矩特征总数远大于所需的特征数,存在较多的冗余矩特征,通过基于自适应遗传算法的特征优化方法选择最优特征子集,可极大提高风切变的识别性能。遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种速度较快,能够实现并行化处理,性能较好的全局优化方法,近些年来在特征选择中得到了广泛的应用。然而,Rudolph^[13]证明了标准遗传算法收敛不到全局最优解,恽为民等^[14]指出自适应遗传算法是全局收敛的。文中针对特征选择问题,提出了一种改进的自适应遗传算法应用于小波矩的选择中,步骤如下。

3.1 种群初始化与编码

对搜索空间进行二进制编码,即把每一个特征定义为一个基因,染色体 $B_i (i = 1, 2, \dots, N, N$ 为染色体个数)就是一个长度为特征数 M 的二进制串:

$$B_i = \{b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{iM}\} \quad (4)$$

其中: $b_{ij} \in \{0, 1\}, j = 1, 2, \dots, M, b_{ij} = 1$ 表示选择第 i 个染色体的第 j 个特征;反之表示不选择。随机生成 N 个这样的染色体构成一组初始种群 $P_{op} = \{B_1; B_2; \dots; B_N\}$ 。

3.2 适应度函数与个体选择方案

适应度函数的选取至关重要,直接影响到遗传算法的收敛速度以及能否找到最优解。为了尽可能使用少量的特征达到较好的分类效果,适应度函数由正确识别率和所选特征个数决定^[15],其表达式为:

$$f = \beta \cdot Acc + (1 - \beta) \cdot M_0 / M; \quad \beta \in [0, 1] \quad (5)$$

其中: Acc 为训练样本正确识别率, M_0 是未选取的特征个数, β 用于调节特征个数与识别率间的平衡。

采用基于概率 $P_i = f_i / \sum_{i=1}^N f_i$ (f_i 为个体适应度值)的轮盘赌方法选择父代。运用自适应遗传算法选取特征,在交叉概率和变异概率变得很大时,可能会破坏较好的特征集个体。因此,采取最优保存策略将当代最优特征集个体直接加入到新一代种群中,也可防止轮盘赌随机误差带来的“退化”现象,保证优良特征集被选入下一代种群。

3.3 自适应交叉概率和变异概率

遗传算法的收敛性主要取决于其核心操作的交叉算子和变异算子。交叉操作决定产生新个体的速度,对实现算法的全局搜索性能具有关键性的作用。而变异的本质是挖掘群体中个体的多样性,提高算法的局部随机搜索能力。因此,变异算子与交叉算子的结合共同完成了对搜索空间的全局搜索和局部搜索,使遗传算法能够从良好的搜索性能完成最优化问题的寻优过程。

3.3.1 自适应交叉概率

为防止进化初期种群陷入局部解,交叉概率在迭代初期应具有较大值,同时也能加快种群新个体的产生;而进化后期个体适应度逐渐增大,为了不破坏种群中的优良模式,并且达到一个稳定的状态,交叉概率应较小。因此,从种群全体进化过程来看,交叉概率应该是一个稳定而逐渐变小的过程。而从产生新个体的角度看,同代的所有个体在交叉操作上应有相同概率,使遗传算法在搜索空间中具有各个方向的均匀性。为此,制定了与进化代数相关而与个体适应度无关的交叉概率计算公式,兼顾全局搜索性能和计算效率,为保证特征选择演变的稳定性,交叉概率随进化过程线性渐变,其表达式为:

$$P_c = \begin{cases} P_{c_{\max}} - k_c \cdot t / T, & f' > \bar{f} \\ P_{c_{\min}}, & f' \leq \bar{f} \end{cases} \quad (6)$$

其中: P_c 表示交叉概率, $k_c = P_{c_{\max}} - P_{c_{\min}}, P_{c_{\max}}, P_{c_{\min}}$ 为设定的最大、最小交叉概率, T 为最大遗传代数, t 为当前遗传代数, \bar{f} 表示种群平均适应度值, f' 表示交叉的两个个体中较大适应度者。

3.3.2 自适应变异概率

种群的多样性主要凭借变异算子来维持,目的是能够在

交叉操作指引的方向中找到最优值,产生新个体和抑制“早熟”。因此,同一代种群中每个个体的变异概率应该随个体的优劣而变化:对于劣质个体,加大变异概率;对于优秀个体,减小变异概率。而变异概率总趋势应该是逐渐减小使群体迅速集中。为了加强个体特征对进化过程的影响,设计了仅与适应度相关的自适应变异概率,其表达式为:

$$P_m = \begin{cases} P_{m_{\max}} \cdot \exp\left(-\left|1 - \frac{f}{f_{\max}}\right|\right) \cdot \frac{1}{1 + \bar{f}/f_{\max}}, & f > \bar{f} \\ P_{m_{\min}}, & f \leq \bar{f} \end{cases} \quad (7)$$

其中: P_m 为变异概率, $P_{m_{\max}}$ 表示最大变异概率, $P_{m_{\min}}$ 表示最小变异概率, f 表示待变异的个体适应度值, f_{\max} 表示当前种群中的最大适应度值。

式(7)的变异概率由个体的适应能力以及种群的整体适应能力组成,能较好地在极大丰富种群多样性的情况下,尽快向最优状态转移。若变异后个体适应度增强,则保留变异后的个体;否则保留原个体。通过判断产生的新个体是否优秀,能够保证全局的收敛性,同时明确了进化方向,将优秀群体迅速集中起来,加快遗传算法的优化速度。

3.4 迭代终止条件

设置达到最大遗传代数 T 时,则停止特征选择进化过程,选取最后一代的最优个体作为最优特征集。

4 实验仿真及结果分析

4.1 样本库的建立

样本库中包含了激光雷达在风场周围和底部36个不同位置扫描的4种风切变图像,即每种风切变有36幅图像,一共为144幅样本,每幅图像的分辨率为 80×80 。其中存在少量信息缺失样本,缺失度低于30%。实验时随机选取一组样本,即每类的18幅训练样本从36幅图像中随机选取,剩余的18幅为测试样本,样本图像转换为灰度图像进行特征提取。

4.2 实验结果和分析

实验全部是在CPU主频3.40 GHz、内存为2.00 GB的计算机上使用Matlab R2009a完成的。

小波矩特征提取中,参数 $m = 0, 1, 2; n = 0, 1, \dots, 2^{m+1}; q = 0, 1, 2$,共取得81阶小波矩,选其中不为0的54阶小波矩进行遗传算法的特征选择,即 $M = 54$ 。改进的自适应遗传算法中,设置参数 $N = 60, \beta = 0.7, T = 50, P_{c_{\max}} = 0.9, P_{c_{\min}} = 0.3, P_{m_{\max}} = 0.3, P_{m_{\min}} = 0.05$,并选取两点交叉、两点变异的自适应遗传算法。对获取的最优特征子集,采用三阶近邻分类器进行分类识别。

实验中发现,在获取了一些小特征集时,训练样本识别率也能收敛到全局最优,但测试样本却没有较好的识别率。经过多次实验,发现选取7~9个特征时,能保证在训练样本收敛到最优解时,测试样本的识别率最好。由于遗传算法存在收敛能力的问题,每次实验的结果可能不同,因此对该组样本进行了20次实验,取其值作为检验指标。

图2为某次实验中种群的迭代情况。图2(a)中适应度值能快速收敛到全局最优解,该次实验训练样本达到最大识别率100%;此时图2(b)中选出的9个特征用于识别测试样

本,所得识别率为98.61%。此组样本20次的仿真情况如表1,20次实验选取的特征个数都为7~9。

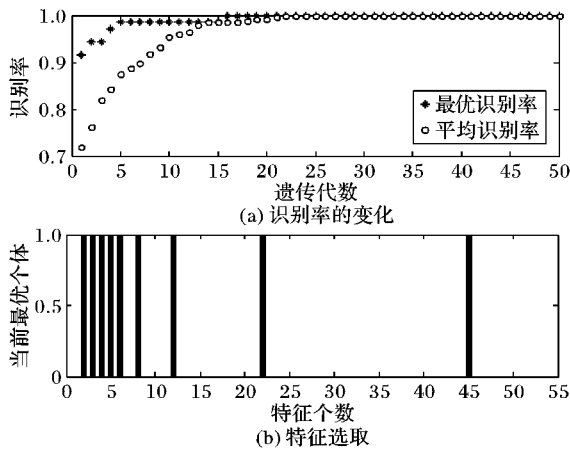


图2 最优特征选择

表1 20次实验识别率和标准差统计 %

样本	最小识别率	最大识别率	平均识别率	标准差
训练	98.61	100	99.72	0.57
测试	97.22	100	98.61	0.78

在仿真条件相同的情况下,将本文的算法(IAGA)与 IAGA1^[6]和 IAGA2^[5]采取的自适应交叉算法和变异算法进行对比。对比结果如表2和图3所示。

表2 3种算法实验结果对比

算法	收敛到最优解次数	平均收敛代数	平均识别率/%	
			训练样本	测试样本
IAGA	16	25	99.72	98.61
IAGA1 ^[6]	17	42	99.58	98.54
IAGA2 ^[5]	7	15	97.92	94.93

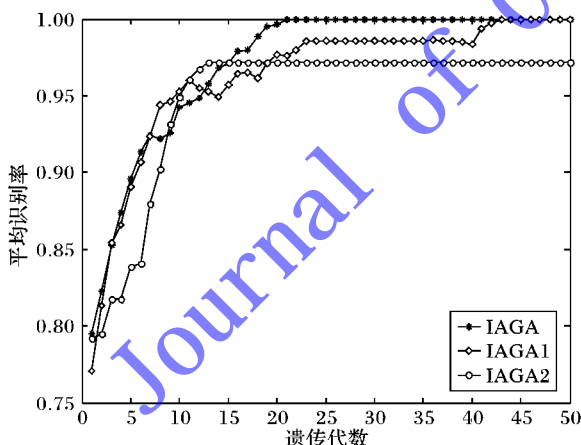


图3 3种算法的平均识别率对比

从表1~2中可以看出,本文算法在该组实验有16次实验的训练样本识别率为100%,从表1测试样本的均值和标准差中推断出,20次实验中测试样本识别率频率出现最多的为98.61%,将该识别率作为此组测试样本的最终识别率。IAGA1^[6]尽管收敛到最优解的次数略多于IAGA,但平均识别率却略小于IAGA的平均识别率,原因是其最小识别率要低于IAGA的最小识别率,收敛的识别率跨度较大,可知IAGA1^[6]收敛效果没有IAGA稳定。且由于IAGA1^[6]变异概

率同时考虑了遗传代数和个体适应度的作用,需要更多的迭代次数才能收敛到全局最优值。而IAGA2^[5]的交叉概率和变异概率只考虑了当前遗传代数的影响,每个个体的变异率相同,没有针对性,忽略了个体适应度的作用,识别性能不佳。图3为3种算法最具代表性的一次实验对比,形象地描述了表2中的数据意义。

按照上述的实验算法,再随机选取几组样本,本文算法都能得到较好的识别效果,测试样本的平均识别率达到97%以上,并且整体来说优于其他两种算法。

5 结语

主要研究了基于小波矩的形状特征选择问题,提出了一种改进的自适应遗传算法,较好地实现了低空风切变图像的分类识别,使风切变整体的平均识别率达到97%以上。该算法结构简单,其交叉概率主要涉及了种群的均匀进化方向以及稳定性;变异概率将当代个体适应度的变化趋势与群体适应度的总体变化趋势相结合,极大程度地丰富了种群的多样性,使样本识别率能稳定快速地收敛于全局最优解,获取最优特征子集。同时对于信息缺失的图像样本也得到了有效识别,改善了风切变的总体识别率。目前,对于低空风切变图像识别这方面的课题研究还不是很成熟,需继续深入研究,下一步可考虑在风切变的基本风场模型中加入地形因素。

参考文献:

- [1] LIU W, YUAN X, LI P, *et al.* Handbook of low level wind shear [M]. Beijing: Air Traffic Management Bureau, 2007. (刘伟, 袁娴, 李萍, 等. 低空风切变手册[M]. 北京: 民航航空局, 2007.)
- [2] SHEN D G, IP H H S. Discriminative wavelet shape descriptors for recognition of 2-D patterns [J]. Pattern Recognition, 1999, 32(2): 151-165.
- [3] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [4] REN Z, SAN Y. Improved adaptive genetic algorithm and its application research in parameter identification [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 41-43. (任子武, 伞冶. 自适应遗传算法的改进及在系统辨识中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 41-43.)
- [5] HUANG Y. Intelligent optimization algorithm and its applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. (黄友锐. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.)
- [6] OUYANG S, WANG J, SONG Z, *et al.* A new improved genetic algorithm and its application [J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(8): 1066-1068. (欧阳森, 王建华, 宋政湘, 等. 一种新的改进遗传算法及其应用[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1066-1068.)
- [7] PAN W, DIAO H, JING Y. An improved real-value adaptive genetic algorithm [J]. Control and Decision, 2006, 21(7): 792-795. (潘伟, 刁华宗, 井元伟. 一种改进的实数自适应遗传算法[J]. 控制与决策, 2006, 21(7): 792-795.)

表3 每片羽毛球片对应质心点调节高度

羽毛球片 序号	羽毛球片质心点 调节高度/cm	羽毛球片 序号	羽毛球片质心点 调节高度/cm
1	+0.002	9	-0.015
2	-0.011	10	-0.002
3	-0.015	11	-0.005
4	-0.009	12	+0.001
5	+0.005	13	-0.001
6	+0.002	14	+0.001
7	-0.008	15	-0.012
8	-0.003	16	+0.001

注：“+”表示对应羽毛球片在原来位置上提升的距离；
“-”表示对应羽毛球片在原来位置上下降的距离。

5 结语

本文通过对羽毛球质量模型分析,提出了与羽毛球片质量、弯拱度和攻角有关的羽毛球片质点影响系数调节法以及调节步骤,解决了羽毛球动态稳定平衡调节问题。实验结果表明,羽毛球片质点影响系数法与传统人工经验的调节方法相比,除了耗时少、效率高等特点之外,而且还具有良好的羽毛球动态稳定平衡调节效果。由于本文忽略羽毛球风洞装置中气流阻力对其动态稳定的干扰,只考虑羽毛球片质量不平衡的影响,因而在分析和实验结果中会存在一定的误差。

参考文献:

- [1] ALAM F, CHOWDHURY H, THEPPADUNGORN C, *et al.* Measurements of aerodynamic properties of badminton shuttlecocks [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(2): 2487-2492.
- [2] KITTA S, HASEGAWA H. Aerodynamic properties of a shuttlecock with spin at high Reynolds number [C]// *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 271-277.
- [3] Le PERSONNIC J, ALAM F, Le GENDRE L, *et al.* Flight trajectory simulation of badminton shuttlecocks [C]// *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Congress on Sports Technology*. Amsterdam: Elsevier, 2011: 344-349.
- [4] LIN C. The analysis of badminton aerodynamics [J]. *China Sport Science and Technology*, 1980(13): 27-33. (林传潮. 羽毛球空气力学分析[J]. 中国体育科技, 1980(13): 27-33.)
- [5] AI X, WANG R, LI X. The application of roundness error measurement in the detection of badminton appearance [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2011, 12(4): 51-54. (艾星芳, 汪仁煌, 李雪晨. 圆度误差测量在羽毛球外观检测中的应用[J]. 广东工业大学学报, 2011, 12(4): 51-54.)
- [6] NAKAGAWA K, HASEGAWA H, MURAKAMI M, *et al.* Aerodynamic properties and flow behavior for a badminton shuttlecock with spin at high Reynolds numbers [C]// *Engineering of Sport Conference 2012*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 104-109.
- [7] GU J, CHEN Y. The design and application of badminton wind tunnel [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1980, 9(3): 227-231. (谷嘉锦, 陈玉清. 羽毛球风洞的设计与应用[J]. 实验力学, 1980, 9(3): 227-231.)
- [8] CHEN B Q, WANG Z Q. A statistical method for analysis of technical data of a badminton match based on 2-D seriate images [J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2007, 12(5): 594-601.
- [9] CHEN L M, PAN Y H, CHEN Y J. A study of shuttlecock's trajectory in badminton [J]. *Journal of Sports Science and Medicine*, 2009, 77(8): 657-662.
- [10] CHAN C M, ROSSMANN J S. Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory [J]. *Sports Engineering*, 2012, 15(2): 61-71.
- [11] TENG S L, PARAMESRAN R. Detection of service activity in a badminton game [C]// *TENCON 2011: 2011 IEEE Region 10 Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 312-315.
- [12] YOSHIKAWA F, KOBAYASHI T, WATANABE K, *et al.* Automated service scene detection for badminton game analysis using CHLAC and MRA [J]. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2010, 38(62): 942-945.
- [13] POST S L, McLACHLAN J, LONAS T, *et al.* Aerodynamic of a badminton shuttlecock [C]// *IMECE 2009: Proceedings of the ASME 2009 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. New York: ASME, 2009: 145-150.
- [14] JIANG Y, XI P. The investigation of dynamic stability of badminton's testing instrument [J]. *Measurement and Control Technology*, 1990(4): 37-38. (江玉龙, 奚普周. 羽毛球动态稳定性测试仪研制[J]. 测控技术, 1990(4): 37-38.)
- [8] XIA H Y, SUN D S, YANG Y H, *et al.* Fabry-Perot interferometer based Mie Doppler lidar for low tropospheric wind observation [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(29): 7120-7131.
- [9] JIANG L, TIAN B, XIONG X, *et al.* Numerical simulations of low attitude wind shear based on Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1761-1766. (蒋立辉, 田百全, 熊兴隆, 等. 基于多普勒激光雷达低空风切变的数值仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1761-1766.)
- [10] WANG B, SHEN F, SUN D, *et al.* Beam scanning and wind field measurement of direct-detection Doppler lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 69-72. (王邦新, 沈法华, 孙东松, 等. 直接探测多普勒激光雷达的光束扫描和风场测量[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(1): 69-72.)
- [11] HU X Z, KONG B, ZHENG F, *et al.* Image recognition based on wavelet invariant moments and wavelet neural networks [C]// *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 275-279.
- [12] ZHAO T Z, LU J J, ZHANG Y F, *et al.* Feature selection based on genetic algorithm for CBIR [C]// *Proceedings of the 2008 Congress on Image and Signal Processing*. Washington, DC: IEEE Computer society, 2008: 495-499.
- [13] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithms [J]. *IEEE Transactions on Neural Network*, 1994, 5(1): 96-101.
- [14] YUN W, XI Y. The analysis of global convergence and computational efficiency for genetic algorithm [J]. *Control Theory and Applications*, 1996, 13(4): 455-460. (恽为民, 席裕庚. 遗传算法的全局收敛性和计算效率分析[J]. 控制理论与应用, 1996, 13(4): 455-460.)
- [15] XUE B, ZHANG M J, BROWNE W N. New fitness functions in binary particle swarm optimization for feature selection [C]// *Proceedings of the 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-8.

(上接第901页)