

喷杆喷雾机风助风筒相关向量机多目标优化设计*

刘雪美 张晓辉 刘丰乐 马伟伟

(山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

【摘要】 针对气流辅助式喷杆喷雾机的风助风筒原始设计的缺陷,提出了一种集成相关向量机、多目标遗传算法和模糊推理技术的多目标优化设计方法。为增加辅助气流的减飘和穿透能力,构造了风助风筒的设计优化目标函数。利用均匀设计安排试验方案,并通过流体动力学仿真完成训练样本采集。选定相关向量机作为优化设计的评估函数。结合多目标遗传算法,求解出问题的 Pareto 最优解集,建立模糊推理系统获取问题的最终解。应用 CFD 验证经圆整后的最终解,其流速分布均匀性指标得到显著提高。改进的物理样机试验证明了优化方法的可行性和高效性。

关键词: 喷杆喷雾机 风助风筒 多目标优化 相关向量机 多目标遗传算法 模糊系统

中图分类号: TP391.72; S493+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)06-0075-06

Multi-objective Dynamic Design Optimization for Air Duct of Air-assisted Boom Sprayer Based on RVM

Liu Xuemei Zhang Xiaohui Liu Fengle Ma Weiwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China)

Abstract

To improve the original design flaws of air duct of air-assisted boom sprayer, a multi-objective optimization approach integrated relevance vector machines (RVM), multi-objective genetic algorithms (MOGA) and fuzzy system were presented. First of all, the multi-objectives of the air duct were constructed to improve the capability of reduced spray drift and increased penetration. The computational fluid dynamics (CFD) analysis of air-flow generating duct were utilized for sampling scheme given by uniform design to collect the train dataset. Sequentially, RVM based on meta-model as fitness function was combined with MOGA to obtain the Pareto optimal set. Finally, a fuzzy inference system was established as decision-making support to obtain the optimum preference solution. Therefore, the optimized air duct structure with the round solution analyzed by CFD showed the promising improvement on flow speed variation. The modified physical prototype proofed feasibility and efficiency of this approach.

Key words Boom sprayer, Air duct of air-assisted, Multi-objective dynamic design optimization, Relevance vector machine, Multi-objective genetic algorithm, Fuzzy system

引言

风帘辅助喷雾是一种利用专用设备产生高速定向气流辅助雾滴分布,提高雾滴在目标上的沉积率,减少雾滴飘移的技术^[1]。风助风筒所产生的气流

主要是为了克服自然风对雾滴飞行方向的影响,同时对植物叶冠有穿透作用,有利于雾滴在植物不同层面上的沉积,因此风筒出口风速,特别是气流到达作物顶端时的风速分布对喷雾分布均匀性、雾滴沉积均匀度有很大影响。若风筒出口风速太小,气流

收稿日期:2009-06-29 修回日期:2009-08-30

* 山东省科技攻关计划资助项目(2007GG10009001)和农业部农药化学与应用重点开放实验室资助项目(MOAPCA201001)

作者简介:刘雪美,副教授,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:lxmywj@126.com

通讯作者:张晓辉,教授,博士生导师,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail:zhangxh@sdau.edu.cn

难以翻动枝叶,将无法穿透植株;相反若风速太大,气流会穿透植株,撞击到地面并出现反弹,从而带走雾滴,造成药液浪费和环境污染。与国外风助喷雾机相比,我国现有风助喷雾的出口平均风速较低^[2-4],雾滴减飘效果受自然风速影响较大^[5]。因此,必须使优化设计的风助风筒保持适当的出口气流速度并在风筒长度方向具有良好的风速一致性。

本文以气流辅助式喷杆喷雾机的风助风筒为研究对象,集成相关向量机(relevance vector machine, 简称 RVM)、遗传算法和模糊推理技术,对多目标优化问题进行协同处理,以提高气流辅助式喷杆喷雾机性能。

1 风助喷杆喷雾机及风筒设计要求

气流辅助式喷杆喷雾机由喷杆、药箱、风机、喷雾喷嘴、升降液压缸及机架等部件组成,如图 1 所示。作业时,从风机吹出的高速气流将喷头雾化的雾滴进一步撞击、雾化成细小均匀的雾滴,适应了作物表面的生物特性,不易发生“弹跳”现象或从作物表面滚落,雾滴附着效果好;同时,高速气流裹挟着雾滴吹向靶标物,由于气流的作用,靶标的枝叶不停地翻动,使得作物的叶背、叶面、内膛、外部都可均匀地覆盖上雾滴。由于雾滴被风机吹出的气流强制性地吹向靶标,所以可有效地抵御自然风的干扰,减少雾滴飘移,降低农药对环境污染。

为保证喷杆喷雾机的风助风筒能够很好地完成上述功能,减小拖拉机的功率消耗,风助风筒应在最小轴流风机风量的前提下具有最大出口风速,并在出口下方 0.5 m 处平均风速达 4 m/s 以上,在风筒长度方向上具有最小的风速变异系数。

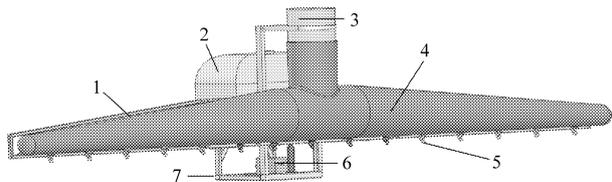


图 1 气流辅助式喷杆喷雾机的结构简图

Fig. 1 Structure of air-assisted boom sprayer

1. 喷杆 2. 药箱 3. 风机 4. 风筒 5. 喷雾喷嘴 6. 升降液压缸 7. 机架

2 风助风筒动态设计多目标优化

风筒原始结构参考了同类设计,但难以满足上述目标,因此本文采用基于元模型的多目标优化设计对风助风筒进行结构优化。相关向量机^[6-7]是一个在通用贝叶斯学习框架下利用推广线性模型的回归算法。RVM 模型具有很好的非线性逼近精度和

推广性能,许多 RVM 的应用^[8-9]都有很好的预测结果,并且能够获得高度稀疏的相关向量集。这意味着更短的预测计算时间,在缩短遗传算法的适应度值计算时间上大有裨益。因此,训练好的 RVM 模型可以作为遗传算法的适应度评估函数引导遗传算法的进化方向,可以找到更优解^[10]。

2.1 相关向量机

给定训练样本集合为 $\{X_i, y_i\}_{i=1}^n$, 这里 X_i 为定义在 R^d 上的输入向量, y_i 为对应的标量输出, n 为训练样本数。从工程角度看,输出 y_i 可假定为符合独立同分布的观测。其中包含的噪声 ε 可以被假定为加性的、独立于输出 y_i 而且服从零均值方差为 σ_n^2 的高斯分布,即 $p(\varepsilon_n | \sigma^2) = N(0, \sigma^2)$ 。输出 y 可以表示为

$$y = f(\mathbf{X}; \mathbf{W}) + \varepsilon \quad (1)$$

其中, $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$ 是权向量, 经过贝叶斯学习过程后,少数权重是非零的,称为稀疏特性(也即 $M = N$)。该模型在输入 X 处回归估计为

$$\hat{y} = f(\mathbf{X}; \mathbf{W}) = \sum_{i=0}^N \omega_i K(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) = \Phi \mathbf{W} \quad (2)$$

式中 Φ —— $N \times M$ 的设计矩阵, $\Phi_{nm} = K(\mathbf{X}_m, \mathbf{X}_n)$

本文使用高斯核函数 $\Phi_i(\mathbf{X}, \mathbf{X}_i) = \exp\{-\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_i\|^2 / \gamma^2\}$ 用于构造 RVM 的风助风筒非线性动态特性回归。针对小样本数据集的学习,需要使用交叉验证来寻找最优值 γ 。

为了控制模型复杂度从而避免过学习现象^[7], RVM 对每个权重 ω_i 定义了一个独立的零均值高斯先验的概率分布以实现光滑模型。为了控制模型稀疏性, RVM 又对 α 和对高斯噪声方差 σ^2 在上一层先验上定义无信息先验。使用贝叶斯后验推断定理计算 \mathbf{W} 的后验服从高斯分布 $p(\mathbf{W} | y, \alpha, \sigma^2) \sim N(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ 。其中后验的均值 $\boldsymbol{\mu}$ 和协方差 $\boldsymbol{\Sigma}$ 计算式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu} = \sigma^{-2} \boldsymbol{\Sigma} \Phi^T y \\ \boldsymbol{\Sigma} = (\sigma^{-2} \Phi^T \Phi + A)^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

其中 $A = \text{diag}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_N)$

对于给定的测试数据 X^* , 相应输出 y^* 的预测分布为 $p(y^* | y) \sim N(\boldsymbol{\mu}_*, \boldsymbol{\delta}_*^2)$ 。其中

$$\begin{cases} \boldsymbol{\mu}_* = \boldsymbol{\mu}^T \Phi(X^*) \\ \boldsymbol{\delta}_*^2 = \sigma_{mp}^2 + \Phi(X^*)^T \boldsymbol{\Sigma} \Phi(X^*) \end{cases} \quad (4)$$

均值 $\boldsymbol{\mu}_*$ 是 RVM 模型在测试数据 X^* 处的预测输出并且权重后验的均值是 $\boldsymbol{\mu}$ 。 σ_*^2 是预测方差。

2.2 风助风筒多目标优化设计

在动态优化设计时,首先确定作为结构动力性能判据的动态优化准则。再根据准则确定优化设计的设计变量、目标函数和约束条件。选取对风助风

筒形状结构布局影响较大的 5 个尺寸因素(图 2)作为设计变量 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_5]$, 进行 CFD 动态优化设计研究。这 5 个设计变量及取值范围 D 如表 1 所示, 并将 $\mathbf{X} \in D$ 作为多目标优化的约束条件。

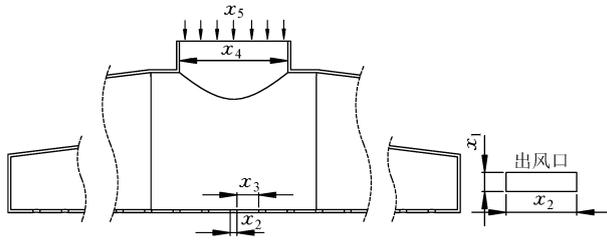


图 2 设计变量示意图

Fig. 2 Illustration of design parameters

表 1 设计变量及取值范围

Tab. 1 Range of design parameters

设计变量	取值范围
出口宽 x_1/cm	$0.9 \leq x_1 \leq 2.4$
出口长 x_2/cm	$5 \leq x_2 \leq 20$
出口间距 x_3/cm	$5 \leq x_3 \leq 20$
进口直径 x_4/cm	$40 \leq x_4 \leq 65$
风机风速 $x_5/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$6 \leq x_5 \leq 10$

为了提高喷杆喷雾机风助技术的雾化效果和减小输送雾滴受自然风影响而造成的雾滴飘移, 风筒结构应满足如下要求: ①最小的轴流风机风量。②出口处平均风速大于 20 m/s。③垂直距离出口 0.5 m 处风筒长度方向的出口风速变异系数小于 15%。④垂直距离出口 0.5 m 处风速大于 4 m/s。

风助风筒设计的多目标优化表达为

$$\begin{cases} \min F(\mathbf{X}) = \min[f(\mathbf{X}), -\bar{v}(\mathbf{X}), C_{v_{0.5}(\mathbf{X})}, -\bar{v}_{0.5}(\mathbf{X})]^T \\ \text{s. t. } \bar{v}(\mathbf{X}) > 20 \\ C_{v_{0.5}(\mathbf{X})} < 0.15 \\ \bar{v}_{0.5}(\mathbf{X}) > 4 \\ (\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_5] \in D) \end{cases} \quad (5)$$

表 2 风助风筒均匀设计试验样本集样表

Tab. 2 Uniform design sampling scheme of air duct

试验号	输入(设计变量)					输出(目标函数)			
	x_1/cm	x_2/cm	x_3/cm	x_4/cm	$x_5/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$f(\mathbf{X})/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	$\bar{v}(\mathbf{X})/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\bar{v}_{0.5}(\mathbf{X})/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$C_{v_{0.5}(\mathbf{X})}/\%$
1	1.2	17	5	50	7	1.37	18.7	3.82	0.14
2	0.9	20	11	45	9	1.43	30.5	4.51	0.38
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	1.8	11	11	50	8	1.57	22.0	8.53	0.42
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48	1.8	8	5	40	9	1.13	12.9	4.21	0.17

$$\begin{aligned} \text{其中 } f(\mathbf{X}) &= \pi x_5 (x_4/200)^2 \\ \bar{v}(\mathbf{X}) &= \frac{1}{a} \sum v \\ \bar{v}_{0.5}(\mathbf{X}) &= \frac{1}{b} \sum v_{0.5} \\ C_{v_{0.5}(\mathbf{X})} &= \frac{S_{v_{0.5}}}{v_{0.5}(\mathbf{X})} \times 100\% \\ S_{v_{0.5}} &= \sqrt{\frac{\sum v_{0.5}^2 - (\sum v_{0.5})^2/b}{b-1}} \end{aligned}$$

式中 $f(\mathbf{X})$ ——轴流风机风量, m^3/s
 $\bar{v}(\mathbf{X})$ ——出口平均风速, m/s
 $\bar{v}_{0.5}(\mathbf{X})$ ——距离出口 0.5 m 处平均风速, m/s
 $C_{v_{0.5}(\mathbf{X})}$ ——距离出口 0.5 m 处风速变异系数, %
 $S_{v_{0.5}}$ ——距离出口 0.5 m 处风速的标准差

a 和 b 分别是风筒出口数和 0.5 m 处的风速采样点个数。本文 b 取为模型在 0.5 m 处幅宽内的网格点数。

2.3 均匀设计采样和 CFD 仿真

在参数优化中应用计算流体力学 (computational fluid dynamics, 简称 CFD) 仿真技术^[11-12]是现代设计方法中的重要内容。为了建立不同风助风筒结构的流体动力学响应元模型, 必须确定其训练数据的方案。在非线形系统建模时, 使用均匀设计表来设计系统采样方案可以以更少的试验点均匀分布于设计空间^[13]。因此采用均匀设计表 $U_{48}(6^5)$ 作为 CFD 分析方案获取基于 RVM 元模型的训练样本集。

由于上述优化目标函数都是设计变量 \mathbf{X} 的隐函数, 运用 Fluent 流体仿真软件可以对不同结构变量的风助风筒的气体流动过程进行完整的动力学仿真, 从而获取并计算出多目标优化设计目标值 $\bar{v}(\mathbf{X}), C_{v_{0.5}(\mathbf{X})}, \bar{v}_{0.5}(\mathbf{X})$ 。获取的风助风筒均匀试验样本集作为 RVM 回归的数据集, 如表 2 所示。

为了使仿真试验条件与实际试验条件相符,建立了8 m幅宽的三维风筒仿真模型,出风口离地面高度1 m,为仿真气流在大气中的运动,模型还建立了一个9 m×1 m×1 m的三维自由流动区域。为减少计算负荷且不妨碍计算精度,模型可根据横向、纵向两个对称面简化为1/4的三维模型,如图3所示。图4为21号试验方案的风助风筒的气流速度场云图。

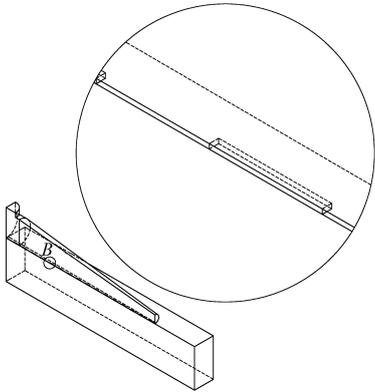


图3 风助风筒及部分空气区域三维流场仿真区域示意图

Fig. 3 Structure and size of simulation zone

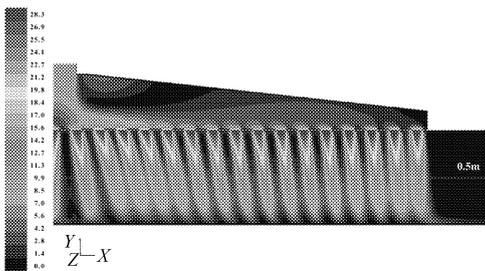


图4 风助风筒中间对称面的气流速度场(算例21)

Fig. 4 Flow velocity field in middle symmetric plane of air duct

2.4 风助风筒动态优化设计的多目标遗传算法

文献[10]对多目标优化算法的综述中指出,与其他常用的多目标优化算法相比,NSGA-II^[14](non-dominated sorting genetic algorithm-II)在多个目标测试函数集上的表现较优,且能适应目标数目多的情况。本文选用NSGA-II作为多目标优化方法。染色

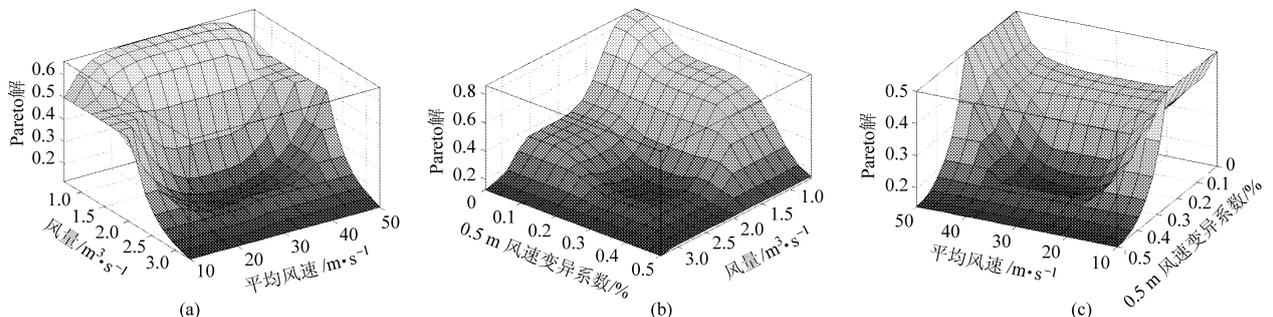


图6 Pareto 前沿与解的优劣评价间的映射关系

Fig. 6 Mapping relationship between Pareto front and evaluation function

体使用由实数组成的相应控制参数 $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_5]$ 编码。其优化架构参照文献[8]。

2.5 Pareto 最优解集的模糊推理系统

Pareto 最优解集是无法直接应用的,本文使用一个模糊推理系统帮助给出令决策者最满意的一个非劣解作为该问题的最终解。该模糊推理系统的12条规则(图5)是建立在领域专家的经验 and 知识基础之上的。该语言变量均采用高斯形隶属函数。

运用 Matlab 模糊逻辑工具箱定义模糊推理系统后,获得输入、输出的映射关系如图6所示。由以上关系图解分析可知,轴流风机风量 $f(\mathbf{X})$ 小,出口平均风速 $\bar{v}(\mathbf{X})$ 高,垂直距离出口0.5 m处平均风速 $\bar{v}_{0.5}(\mathbf{X})$ 高,垂直距离出口0.5 m处风速变异系数 $C_{v_{0.5}(\mathbf{X})}$ 小,Pareto 最优解优劣评价函数值较大,即为决策者较“偏好”。

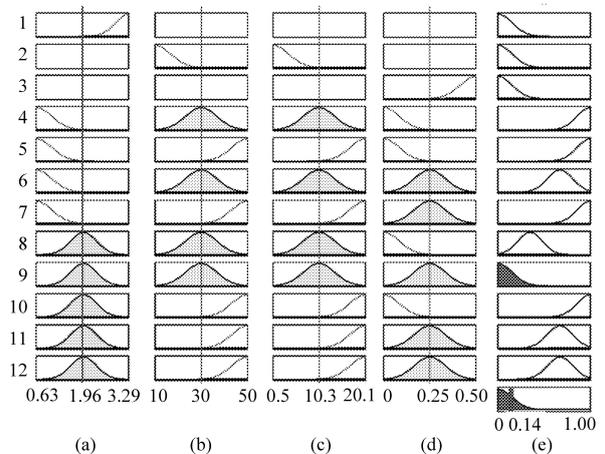


图5 Pareto 最优决策模糊推理系统推理规则

Fig. 5 Fuzzy inference rules of Pareto optimum solution decision-making

(a) 风量/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (b) 平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (c) 0.5 m处平均风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (d) 0.5 m处风速变异系数/% (e) Pareto 最优解

3 最终解验证

RVM 预测结果与 CFD 计算的分析结果仅相差4.02%,精度满足工程要求,但利用RVM模型预测时间与有限元法分析时间相差两个数量级。用传统

方法通过数学变换将多目标优化转换为单目标优化问题得到的单一解,且该解受先验知识的影响。本文方法得到了更多解可供决策。

将最终解 \mathbf{X} 圆整后修改风助风筒各结构参数,再对新结构进行 CFD 分析,对结构响应相应评估(表 3)。优化后风机风量较原始设计减小了 5.6%,出口平均风速较改进设计增加了 15.4%,0.5 m 处平均风速较原始设计提高 25.6%。图 7 给出了新结构的仿真速度分布云图,0.5 m 处的风速变异系数降低为 0.11。

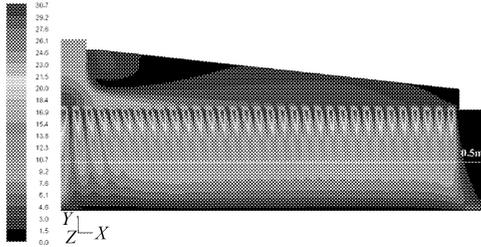


图 7 优化后风筒气流的中间对称面速度分布云图

Fig. 7 Flow velocity field in middle symmetric plane of optimized air duct

将优化结果应用风助风筒物理样机后,采用 ZRQF-F30J 型热球风速仪测量风筒出风口风速,其平均风速为 28.5 m/s。在距出风孔口风速流出方向 0.5 m 处每隔 5 cm 测量风速,得到此处平均风速为 8.97 m/s。与原始结构的风速分布比较如图 8 所示,风速变异系数显著降低,在 0.5 m 处的变异系数仅为 0.10。测试结果表明新风助风筒满足风筒设计所要求的出口风速和均匀性范围,提高了风助技术进一步雾化和雾滴输送能力,从而保证了抵御自然风的干扰,减少了雾滴飘移,降低农药对环境污染。

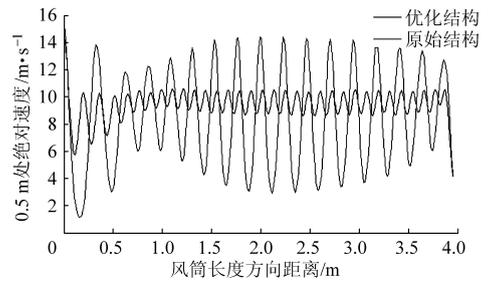


图 8 风助风筒结构优化前后在 0.5 m 处的风速变异比较

Fig. 8 Flow speed variation comparison between optimized and original air duct design in 0.5 m

表 3 优化前后结果比较

Tab. 3 Comparisons between optimized and original design

项目	$f(\mathbf{X})$ $/\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v}(\mathbf{X})$ $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\bar{v}(\mathbf{X})$ $/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$C_{v0.5}(\mathbf{X})$ /%
优化前	1.62	25.4	7.53	0.37
优化后	1.53	29.3	9.46	0.11

4 结束语

本文提出基于 RVM、GA 和模糊推理系统的混合智能方法用于风助风筒多目标动态优化设计。针对原始设计的缺陷,给出了基于 CFD 分析的 4 个目标和 3 个性能约束。首先,采用均匀设计方案,获取反映风筒结构动态响应特性的样本数据集,由稀疏 RVM 学习过程辨识。其次,通过 NSGA-II 算法从染色体表示的设计变量空间寻优出 Pareto 最优解集,其适应度值的计算是由 RVM 的输出计算得出的。最后,通过一个由 12 个模糊规则定义的模糊推理系统,决策出最有利的设计参数。仿真分析和样机试验表明,优化的设计参数有效提高风助风筒的出口速度和速度均匀性,可改善其雾滴输送能力。

参 考 文 献

- 祁力钧. 优化液体农药喷施技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,1999.
Qi Lijun. Study on optimizing liquid pesticide applicaiton technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 1999. (in Chinese)
- 何雄奎,曾爱军,刘亚佳,等. 水田风送低量喷杆喷雾机设计及其参数研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 76 ~ 79.
He Xiongkui, Zeng Aijun, Liu Yajia, et al. Design and parameter test of the low volume air assistant rice boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(9): 76 ~ 79. (in Chinese)
- 宋坚利,何雄奎,曾爱军,等. 罩盖喷杆喷雾机的设计与防飘试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 74 ~ 77.
Song Jianli, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. Design and anti-drift efficacy evaluation of a new shield boom sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 74 ~ 77. (in Chinese)
- 王俊,祁力钧. 喷雾机喷杆压力损失及对喷雾质量的影响[J]. 农业机械学报, 2006, 37(3): 42 ~ 45.
Wang Jun, Qi Lijun. Pressure drop on the boom sprayer and its effect on spraying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(3): 42 ~ 45. (in Chinese)
- 中国农业机械化科学研究院. 一种喷杆喷雾机:中国, ZL 200620157987.9[P]. 2008-03-05.
- Tipping M E. Sparse Bayesian learning and the relevance vector machine [J]. Journal of Machine Learning Research, 2001(1): 211 ~ 244.

- 7 Tipping M E. Bayesian inference; an introduction to principles and practice in machine learning[M]. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3176: Advanced Lectures on Machine Learning, Heidelberg: Springer Berlin, 2004: 41 ~ 62.
- 8 Yuan J, Wang K S, Yu T, et al. Integrating relevance vector machines and genetic algorithms for optimization of seed-separating process[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2007, 20(7): 970 ~ 979.
- 9 Chen S, Gunn S, Harris C. The relevance vector machine technique for channel equalization application[J]. IEEE Trans. Neural Networks, 2001, 12(6): 1 529 ~ 1 532.
- 10 Yao X, Xu Y. Recent advances in evolutionary computation[J]. Journal of Computer Science and Technology, 2006, 21(1): 1 ~ 18.
- 11 陶雷,何雄奎,曾爱军,等. 开口双圆弧罩盖减少雾滴飘失效果的 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 35 ~ 37.
Tao Lei, He Xiongkui, Zeng Aijun, et al. CFD simulation of open doubled-foil shield on reducing spray drift [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 35 ~ 37. (in Chinese)
- 12 Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a non-canopy condition using CFD simulation[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 47(6): 1 887 ~ 1 897.
- 13 Zhang L, Liang Y, Jiang J, et al. Uniform design applied to nonlinear multivariate calibration by ANN[J]. Analytica Chimica Acta, 1998, 370(1): 65 ~ 77.
- 14 Deb K, Agrawal S, Pratap A, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182 ~ 197.

(上接第 55 页)

极限强度为 430 MPa,大于切刀的最大应力,因此圆盘刀强度储备充足。

(2) 刀片大部分处于应力过渡区,应力较小,工

作安全可靠。

(3) 因为应力集中主要分布在圆盘刀中心孔周围,为了消除应力集中,设计夹紧法兰盘直径和厚度分别为 80 mm 和 6 mm,材料为灰口铸铁。

参 考 文 献

- 1 李洪文,陈君达,邓键. 旱地玉米机械化保护性耕作技术及机具研究[J]. 中国农业大学学报, 2000, 5(4): 68 ~ 72.
Li Hongwen, Chen Junda, Deng Jian. Study on technology and machines of mechanized conservation tillage for dryland maize [J]. Journal of China Agricultural University, 2000, 5(4): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 2 马洪亮,高焕文,李洪文,等. 驱动圆盘刀切断玉米秸秆和根茬的土槽试验[J]. 农业机械学报, 2007, 38(5): 47 ~ 50, 54.
Ma Hongliang, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Experimental study on corn stalk and rootstalk cutting by driven disc [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(5): 47 ~ 50, 54. (in Chinese)
- 3 王庆杰,何进,姚宗路,等. 驱动圆盘玉米垄作免耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 68 ~ 72.
Wang Qingjie, He Jin, Yao Zonglu, et al. Design and experiment on powered disc no-tillage planter for ridge-tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 68 ~ 72. (in Chinese)
- 4 杨黎明,黄凯,李恩至,等. 机械零件设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- 5 成大先,王德夫,姜勇,等. 机械设计手册:第一卷[M]. 北京:化工工业出版社,1993.
- 6 龚曙光. ANSYS 基础引用及范例解析[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- 7 吴建民. 河西走廊绿洲农业区保护性耕作技术及关键机具的研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
Wu Jianmin. Research on technology of conservation tillage and crucial implement in Hexi corridor arid oasis agricultural area [D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 8 北京农业工程大学. 农业机械学:下册[M]. 北京:中国农业出版社,1995.