

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.011

航空专用离心喷头雾化性能试验与影响因子研究

杨风波 薛新宇 蔡晨 周晴晴 孙竹

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对航空施药模式下喷头喷雾参数与雾化参数关系不明确的问题, 本文结合喷雾性能测试与建立代理数学模型, 讨论了 CN1215 型航空专用离心喷头主要工作参数对雾滴体积中径 ($Dv50$)、喷幅的影响规律。标定了离心喷头喷雾参数对应的供液系统工作参数, 在室内无风环境下测试了不同喷头流量 (100 ~ 350 mL/min)、喷头转速 (8 000 ~ 10 000 r/min) 下的雾滴中径及喷幅。以喷头喷雾参数 (喷头流量、喷头转速) 作为试验因素, 以航空离心喷头雾化后雾滴体积中径 $Dv50$ 、对应喷幅为响应因数, 分别采用四阶响应面法 (Response surface method, RSM)、克里金法 (Kriging)、椭球基神经网络 (Ellipsoidal basis function neural network, EBFNN) 3 种数学方法逼近试验因素与响应因数之间的关系, 建立了喷头雾化参数 ($Dv50$ 、对应喷幅) 与喷头喷雾参数 (喷头流量、喷头转速) 之间的代理数学模型, 3 种代理模型对 $Dv50$ 的决定系数 R^2 分别为: 0.705、0.718、0.925, 3 种代理模型关于 $Dv50$ 对应喷幅的决定系数 R^2 分别为: 0.819、0.890、0.930。基于 EBFNN 隐式代理数学模型建立了两个雾化参数的响应面, 实现了喷雾参数影响下的雾滴 $Dv50$ 、喷幅的快速预测。

关键词: 航空施药; 离心喷头; 雾化性能; 椭球基神经网络

中图分类号: S494 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0096-09

Atomization Performance Test and Influence Factors of Aviation Special Centrifugal Nozzle

YANG Fengbo XUE Xinyu CAI Chen ZHOU Qingqing SUN Zhu

(Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Aiming at the unclear relationship between spray parameters of nozzle and atomization parameters in the aviation spray mode, and considering the urgent need of precision aerosol spray, spray performance test and agent mathematical model modeling method were combined to discuss the influence of main working parameters on atomized particle size and spray width for the CN1215 special aviation centrifugal nozzle. The operating parameters of the liquid supply system corresponding to the spray parameters of the centrifugal nozzle were calibrated, and then the variation laws of droplet size and spray width under the influence of the working parameters (flow rate range was 100 ~ 350 mL/min, nozzle rotating speed was 8 000 ~ 10 000 r/min) were also analyzed in an indoor windless environment. Secondly, taking the spray parameters of the nozzle (nozzle flow, nozzle speed) as the test factor, and taking the droplet diameter ($Dv50$) and the spray width corresponding to droplet diameter ($Dv50$) as response factor, three kinds of mathematical methods, including fourth-order response surface method (RSM), Kriging method and ellipsoidal basis function neural network (EBFNN), were used to approximate the relationship between experimental factors and response factors respectively. The agent mathematical models between the nozzle atomization parameters ($Dv50$, and corresponding spray width) and nozzle operating parameters (nozzle flow, nozzle speed) were established. The decisive coefficients R^2 of the three agent models for the particle size $Dv50$ were 0.705, 0.718 and 0.925, and the decisive coefficients R^2 of the three agent models for the $Dv50$ corresponding spray width were 0.819, 0.890 and 0.930, respectively. Based on the EBFNN implicit proxy mathematical model, the response surface of two atomization parameters was established, the rapid prediction of droplet $Dv50$ and spray width under

收稿日期: 2019-04-12 修回日期: 2019-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705264)和国家重点研发计划项目(2017YFD0701000)

作者简介: 杨风波(1987—),男,副研究员,博士,主要从事精准施药技术研究,E-mail: yangfengbo_cool@163.com

通信作者: 薛新宇(1968—),女,研究员,博士生导师,主要从事植保机械装备研究,E-mail: 735178312@qq.com

the influence of working parameters was achieved. Based on the EBFNN implicit proxy mathematical model, the response surfaces of two atomization parameters were established, which realized the rapid prediction of droplet $Dv50$ and spray amplitude under the influence of spray parameters. It was of great significance for accelerating the development of aviation precision pesticide application.

Key words: aviation spray; centrifugal nozzle; atomization performance; ellipsoidal basis function neural network

0 引言

多旋翼植保无人机喷雾作业过程中,药液雾滴是在旋翼下洗气流、飞行迎风气流及自然风等耦合风场胁迫下输运到作物冠层,多旋翼植保无人机依靠旋翼的强大下洗气流将雾滴吹送到作物冠层,助力雾滴穿透稠密的作物冠层也促使叶片翻动,提高叶片附着率^[1-3];航空植保作业过程中飞行迎风气流和自然风迫使雾滴运动轨迹变化,产生药液雾滴飘移,并导致沉积均匀性降低,且出现了使得航线偏离的航空施药领域典型性问题^[4-6]。目前,精准施药正在快速发展^[7],科研工作者应明确喷头喷雾参数和雾化性能参数之间的耦合关系,为制定合理作业方案、规划合理作业线路、减小雾滴飘移,提出精准作业方案提供有力支撑。

FORD等^[8]研究了单个雾滴的杀伤范围,证明了单个雾滴都有其药效控制领域范围,这个范围称为杀伤面积或者杀伤半径,这个研究成果彻底否定了大容量的喷雾方式。WASHINGTON^[9]在研究百菌清和代森锰锌对香蕉夜斑菌的防治效果时,发现雾滴体积中径(VMD)为250 μm 时,百菌清雾滴杀伤半径为1.02 mm,通过控制雾滴中径,进而实现喷雾覆盖密度的联动变化,可以获得病、虫、草害的最佳防治粒径^[10]。研究表明雾滴粒径和防治效果、防治范围直接相关,也说明了量化喷雾参数和粒径之间关系的重要性。而离心雾化喷头雾滴谱较窄,雾滴粒径易控制且不易堵塞喷孔,在航空植保低空低量施药模式下应用前景广阔^[11-13]。鉴于此,本文针对航空专用离心喷头,研究喷雾参数与关键雾化参数的关系。

笔者在文献[14-15]中针对SLK-5六旋翼植保无人机建立了施药飘移预测模型,研究了前飞气流速度、下洗气流、雾滴粒径等因素对雾滴运动规律的影响,受当时研究条件限制,统一了喷头的工作参数,但并未展开详细研究。在田间实际作业过程中喷头的喷雾参数和雾滴粒径、初速度等直接相关,鉴于此,本文探索喷雾参数影响下航空专用离心喷头的粒径参数 $Dv50$ 及喷幅,为后期四旋翼植保无人机施药飘移、沉积预测研究提供各喷雾参数下对应的雾滴初始属性。

1 航空专用离心喷头喷雾试验

1.1 离心喷头喷雾系统参数标定

CN1215型航空专用离心喷头如图1所示,包括离心驱动电机、喷盘及喷管。离心驱动电机的驱动轴固定在喷盘上以驱动喷盘转动,离心驱动电机的驱动轴为中空管轴,中空管轴的一端与喷盘的流道相通,中空管轴的另一端与喷管相连通;喷盘上具有多条流道,每条流道以喷盘的中心点为转动中心相对于径向方向偏移预定角度,并且每条流道呈弧形曲线;喷盘上的每个流道出口处均设置三角形尖齿,以克服雾滴粘性力,雾滴能被顺利甩出。先打开供液系统供液,待液流入喷头后,开启喷头供电系统,经过雾化后,雾滴群经过弧形曲线流道被甩出,如图1所示。

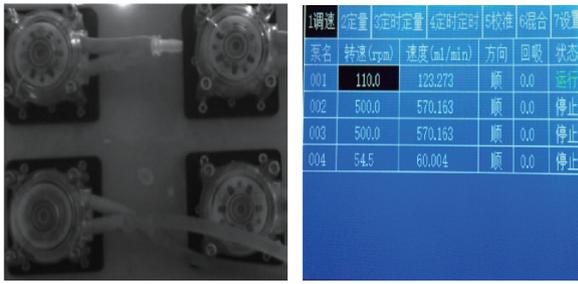


图1 CN1215型航空专用离心喷头

Fig. 1 CN1215 aviation special centrifugal nozzle

喷雾试验台由供液系统、支撑台架、升降杆(高度0.6~1.5 m范围内可调)和横杆(伸出长度0.5~1.6 m可调)组成。其中,供液系统由4路小型离心泵(额定电压12 V,最大流量400 mL/min,测试时只开启1路供液,如图2所示)、直流稳压电源(型号为QJ-3005S III,电压可调范围0~30 V,电流测量范围0~3 A,如图3所示)、压力计(量程0~1 MPa)、水池和软管组成。

雾滴粒径测试系统由激光粒度分析仪(型号:DP-02,测量范围0.1~1 500 μm ,珠海欧美克仪器有限公司)、植保专用风洞及激光粒度分析系统组成。植保专用风洞内部提供封闭的无风扰动环境,激光粒度仪根据光的散射原理对雾滴进行测试,最



(a) 4路离心泵 (b) 离心泵控制界面
图2 供液系统离心泵

Fig. 2 Liquid supply system centrifugal pump



(a) QJ-3005S III型电源 (b) 电源显示界面
图3 直流稳压电源

Fig. 3 DC regulated power supply

后,激光粒度分析系统进行统计分析推算雾滴颗粒的大小。输出以下测试结果:遮光比、粒度特征参数(Sauter 平均直径 SMD、Dv50、边界粒径 Dv10、Dv90)、粒度微分分布图和累积分布图。本文只取 Dv50,为后期四旋翼植保无人机施药飘移、沉积数值计算提供喷雾初始边界。

工作过程中,喷雾系统的工作参数直接影响喷雾参数(供液流量及喷头转速)。针对离心泵供液流量、喷头转速这两个试验参数,展开喷雾系统工作参数标定,确定试验参数下对应的离心泵转速、喷头供电电压,为后续测试打下基础。根据试验设计方案,标定了 18 组工况下的系统工作参数,系统工作参数标定结果如表 1 所示。考虑实际情况,离心泵转速单位精确到 1 r/min,喷头供电电压精确到 0.1 V。

1.2 离心喷头喷雾参数测试

CN1215 型离心喷头的 Dv50 测试方案如图 4 所示,制作了铝合金升降支撑平台,该平台上下、前后、左右 6 个自由度可调,将 DP-02 型激光粒度分析仪安装在铝合金升降支撑平台安装面上,方便后期的调姿对中。在 NJS-1 型植保直流闭口式风洞相对的两扇玻璃窗口上钻一对平行的孔,调节激光粒度仪的位姿,使得激光粒度仪的发送、接收端口均与植保专用风洞玻璃窗开孔处平齐并相互对中。将激光粒度仪打开并预热 15 min,打开雾滴粒径测试软件,将系统自动对中调节,使背景光在 0 环的光柱最高,第 1 环高度小于 0 环的 1/4,到 12 环光柱高度依

表 1 喷雾系统参数标定

Tab. 1 Spray system parameter calibration

编号	离心泵供液流量/ (mL·min ⁻¹)	喷头转速/ (r·min ⁻¹)	离心泵转速/ (r·min ⁻¹)	喷头供电 电压/V
1	100	8 000	110	10.1
2	100	9 000	110	11.9
3	100	10 000	110	13.0
4	150	8 000	170	10.5
5	150	9 000	170	12.0
6	150	10 000	170	13.2
7	200	8 000	235	11.0
8	200	9 000	235	12.4
9	200	10 000	235	13.7
10	250	8 000	295	11.3
11	250	9 000	295	12.6
12	250	10 000	295	14.2
13	300	8 000	360	11.7
14	300	9 000	360	13.2
15	300	10 000	360	15.0
16	350	8 000	410	12.0
17	350	9 000	410	13.4
18	350	10 000	410	16.0

次降低;滤除背景光,按照表 1 的 18 个测试方案进行供液流量及喷头转速调试后,开始喷雾,等雾形稳定之后进行测量,系统测量、统计完成之后停止喷雾,测量获得雾滴平均微分分布,最后根据本文的研究目的,只取 Dv50。



图4 雾滴粒径测试方案

Fig. 4 Droplet size measurement scheme

离心喷头喷幅测试方案如图 5 所示。喷头离地高度 0.8 m,在喷头下方 8 个方向上(东、东南、南、西南、西、西北、北、东北)分别布置雾滴收集盒,离心喷头在无风条件下沉降区的中心部位无雾滴,所以中心区没有布置雾滴收集盒,鉴于雾滴收集称量任务较多,采用 9.3 cm × 9.3 cm 的方形塑料盒;另外,该型离心喷头在沉降区雾滴分布并不是完全均匀的,所以喷幅(Dv50 对应值)最终称量后取 8 个方向的平均值为准。按照表 1 的 18 个测试方案编号进行供液流量及喷头转速调试,在实验室内无风条

件下进行喷雾,喷雾 10 min 后,停止。用干毛巾、布料擦拭雾滴收集盒,然后称取每个雾滴收集盒内雾滴质量,根据每个方向的雾滴量分布情况,以喷头的铅垂点为圆心,计算 Dv50 对应的喷幅距离(即沉积量累计为该方向的 50%),最后每组工况取 8 个方向喷幅的均值。18 个工况 Dv50 对应的喷幅如表 2 所示。



图 5 对应喷幅测试方案

Fig. 5 Corresponding spray amplitude test scheme

表 2 离心喷头喷雾参数测试结果

Tab. 2 Test results of spray parameters for centrifugal sprinklers

编号	离心泵 供液流量/ (mL·min ⁻¹)	喷头转速/ (r·min ⁻¹)	体积中径 DV50/μm	对应喷幅/ cm
1	100	8 000	117	39.618
2	100	9 000	109	41.850
3	100	10 000	105	40.920
4	150	8 000	133	39.525
5	150	9 000	121	41.106
6	150	10 000	113	39.990
7	200	8 000	130	43.803
8	200	9 000	118	44.733
9	200	10 000	111	43.245
10	250	8 000	128	44.268
11	250	9 000	122	44.640
12	250	10 000	117	42.966
13	300	8 000	129	46.314
14	300	9 000	120	48.546
15	300	10 000	112	48.174
16	350	8 000	123	49.755
17	350	9 000	118	50.127
18	350	10 000	115	48.825

2 代理数学模型建模方法

代理模型是通过数学模型逼近输入变量与响应变量的方法^[16]。而根据逼近输入、输出变量函数形式的不同,数学模型建立方法主要有响应面法、Kriging 函数法、神经网络法等,综合建模效率及应用范围,神经网络均具有优势,该方法既有较高的建模拟合效率,也具有更广的应用领域,更适合实际工程问题的建模^[17-18]。

2.1 响应面模型

响应面(RSM)模型是最常用的近似模型,目前,应用较多的 RSM 模型有二阶^[19]、三阶^[20]、四阶模型^[21];一般来讲,二阶、三阶、四阶模型中四阶的精度最高^[21]。

采用四阶 RSM 构造近似数学模型,不考虑三次及以上交叉项^[22],其函数构造形式为

$$F(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1, j>i}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n a_{iii} x_i^3 + \sum_{i=1}^n a_{iiii} x_i^4 \quad (1)$$

式中 n ——设计变量个数

$a_0, a_i, a_{ii}, a_{iii}, a_{iiii}, a_{ij}$ 分别为常数项、一次项、二次项、三次项、四次项、二次交叉项系数。

在式(1)中,各项系数通过最小二乘回归分析求解,使得样本值与预测值误差平方和最小,则四阶响应面系数向量可表述为

$$\mathbf{a} = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{-1} \mathbf{x}^T \mathbf{F} \quad (2)$$

式中, \mathbf{x} 是 c 维样本空间设计变量向量, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_c)^T$, 且有 $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^c$ 。

2.2 Kriging 模型

本文以普通克里金(Kriging)模型插值方法为例来说明 Kriging 插值的过程^[23-24]。

样本点的估计表达式为

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w^{(i)} y^{(i)} \quad (3)$$

只要得到了加权系数 $\mathbf{W} = (w^{(1)}, w^{(2)}, \dots, w^{(n)})$ 的表达式,就可以得到参数空间中的任意样本设计点 y 的估计值 \hat{y} 。Kriging 模型的重要假设是将未知函数视为一个随机过程,该随机过程可以表示为

$$y(\mathbf{x}) = f(\boldsymbol{\beta}, \mathbf{x}) + H(\mathbf{x}) \quad (4)$$

式中 f ——全局趋势模型 $\boldsymbol{\beta}$ ——回归系数

H ——随机分布的误差

将随机过程的方差记为 σ^2 ,可用协方差描述不同位置点随机变量的相关性,其协方差可描述为

$$\text{Cov}(H(x_c), H(x_d)) = \sigma^2 Z(x_c, x_d) \quad (5)$$

式中, x_c, x_d 为设计变量空间任意两个输入, Z 为相关函数(只与空间距离相关),有线性函数、指数函数、三次样条函数、高斯函数等多种形式。基于上述假设, Kriging 模型寻找最优加权系数 \mathbf{W} ,使得均方差最小,并且满足无偏差条件。鉴于本文影响因数与目标函数非线性关系较强,采用指数函数及高斯函数作为相关函数。

2.3 神经网络模型

2.3.1 模型结构

和径向基神经网络(Radial basis function neural

network, RBFNN)^[25-27]一样, 椭圆基神经网络(Ellipsoidal basis function neural network, EBFNN)是一种可靠的前馈式神经网络方法^[28], 也是高斯径向基神经网络的推广^[29]。椭圆基神经网络采用全协方差矩阵代替径向基神经网络中的对角型协方差矩阵, 显著提升了网络的分类处理能力。神经网络是由输入层、隐层和输出层组建的3层前馈网络, 其中输入层主要负责接收自变量, 隐层负责对输入变量进行变换, 输出层负责输出应变量, 神经网络的最终输出是将几个隐节点的输出进行线性加权得到的^[30-31]。

c 维样本空间设计变量向量 \mathbf{x} 直接被输入到隐层各个节点中, 则隐层第 k 个 EBFNN 节点的激活函数(基函数)为

$$\phi_k(\mathbf{x}) = \exp\left(-\frac{1}{2\gamma_k}(\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)^T \boldsymbol{\Sigma}_k (\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)\right) \quad (6)$$

式中, $\mathbf{c}_k = (c_{k1}, c_{k2}, \dots, c_{kc})^T \in \mathbf{R}^d$ 和 $\boldsymbol{\Sigma}_k = (\sigma_{st})^c (s, t = 1, 2, \dots, c)$ 分别是第 k 个隐层基函数节点的均值向量和全协方差矩阵, γ_k 是用来控制第 k 个隐层基函数离散度的平滑参数。

而隐层基函数参数 \mathbf{c}_k 、 $\boldsymbol{\Sigma}_k$ 平均算法和样本协方差由估计得出, 即

$$\mathbf{c}_k \approx \frac{1}{n_k} \sum_{\mathbf{x} \in \Omega_k} \mathbf{x} \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_k \approx \frac{1}{n_k} \sum_{\mathbf{x} \in \Omega_k} (\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)(\mathbf{x} - \mathbf{c}_k)^T \quad (8)$$

式中 Ω_k ——第 k 类训练样本矢量集

n_k —— Ω 中的矢量数目, $k = 1, 2, \dots, K$

输出层 $Y_j(\mathbf{x})$ 的第 j 个节点关于输入向量 \mathbf{x} 的函数形式为

$$Y_j(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K S_{jk} \phi_k(\mathbf{x}) + S_{j0} \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (9)$$

式中 S_{j0} ——偏差项

S_{jk} ——连接第 k 个隐层基函数节点和第 j 个输出节点的权重, 权重值由奇异值分解(SVD)方法求解

具体为: 设训练样本数量为 N , 式(7)可以用矩阵形式表示为 $\mathbf{Y} = \boldsymbol{\Phi}\mathbf{S}$, 其中 \mathbf{Y} 是一个 $N \times M$ 阶的矩阵, $\boldsymbol{\Phi}$ 是一个 $N \times (K+1)$ 阶的矩阵, \mathbf{S} 是一个 $M \times (K+1)$ 的矩阵。则权值矩阵 \mathbf{S} 是矩阵方程 $\boldsymbol{\Phi}\mathbf{S} = \mathbf{D}$ 的最小二乘解, 这里 \mathbf{D} 是包含期望输出矢量 $N \times M$ 阶的目标矩阵。

2.3.2 损失函数与参数迭代

采用误差平方和函数作为损失函数来评判 EBFNN 的拟合精度, 则拟合目标矩阵 \mathbf{D} 与 EBFNN

对应输出的损失函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (D_{ij} - Y_{ij})^2 \quad (10)$$

为充分利用训练样本中输入输出关系对 EBFNN 中关键参数的影响, 采用梯度下降训练算法获取损失函数与均值向量 \mathbf{c}_k 、全协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_k$ 、偏差项 S_{j0} 、权重 S_{jk} 的迭代关系。

2.3.3 参数选择与模型结构

结合第1节中的离心喷头喷雾试验, EBFNN 模型参数选择如下: 输入层的样本数量为 18, 样本维数为 2; 隐层的神经元数量为 18; 输出层导出 18 组结果, 样本维数为 1; 训练数据集的数量为 18, 模型构建最大迭代次数为 50。输入节点到隐层节点通过两个控制单元连接, 分别是隐层基函数节点的均值向量 \mathbf{c}_k 和全协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_k$; 隐层节点到输出节点通过各隐层基函数的对应权重 w_{jk} 控制。

3 离心喷头喷雾参数代理数学模型建立与分析

3.1 喷雾参数代理数学模型对比分析

将表 1、2 作为样本输入, 分别基于四阶 RSM 模型、Kriging 模型以及 EBFNN 模型构建粒径 $Dv50$ 及其对应喷幅的代理数学模型。另外, 评估代理数学模型误差精度的方法有: 均值误差、最大误差、均方根误差、决定系数 R^2 , 4 种方法的误差分别见表 3、4。

表 3 3 种代理模型对粒径的拟合精度对比

Tab.3 Accuracy comparison of three agent models for particle size

建模方法	均值误差	最大误差	均方根误差	决定系数
四阶 RSM 法	0.118 16	0.244 26	0.144 47	0.705
Kriging 法	0.117 39	0.317 48	0.141 41	0.718
EBFNN 法	0.062 06	0.125 3	0.072 76	0.925

表 4 3 种代理模型对喷幅的拟合精度对比

Tab.4 Accuracy comparison of three agent models for spray width

建模方法	均值误差	最大误差	均方根误差	决定系数
四阶 RSM 法	0.123 36	0.287 47	0.138 86	0.819
Kriging 法	0.091 24	0.198 02	0.108 21	0.890
EBFNN 法	0.073 20	0.146 52	0.086 13	0.930

最后, 用决定系数 R^2 评估代理数学模型预测值与试验值之间的符合程度

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - O'_i)^2}{O_i - \bar{O}_i} \quad (11)$$

式中 O_i ——输出试验值

O'_i ——隐式代理模型输出预测值

\bar{O}_i ——输出试验值平均值

R^2 越接近 1, 表明隐式代理模型精度越高。选取 18 个样本点进行样本点分析。

结合表 3 及表 4 可以看出, 3 种代理数学模型中, $Dv50$ 及对应喷幅这两个响应的均值误差、最大误差、均方根差、决定系数差异较为明显, 四阶 RSM、Kriging 法的 3 个误差参数较为接近, 但 EBFNN 法的误差明显更小。总体来看, 四阶 RSM 法的拟合精度最差, Kriging 法稍好, EBFNN 法的拟合精度明显最好。结果表明 $Dv50$ 及对应喷幅两个

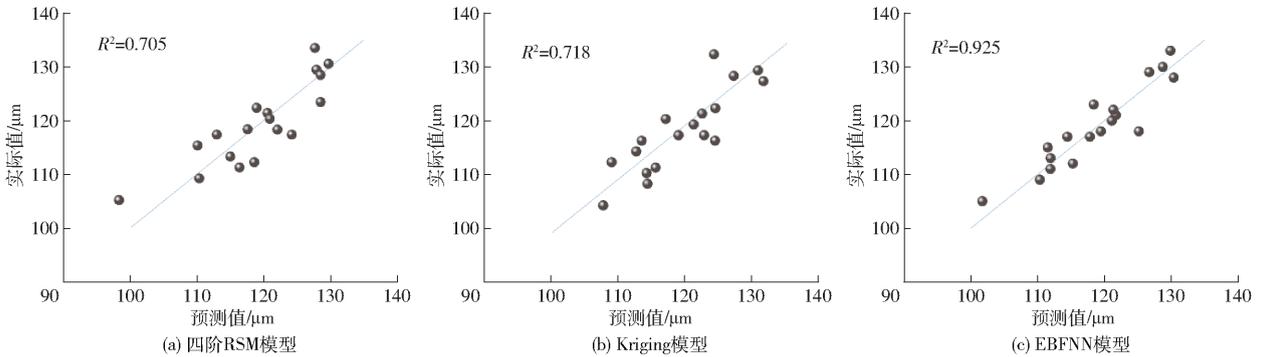


图 6 雾滴体积中径 ($Dv50$) 的代理数学模型

Fig. 6 Agent mathematical model of droplet volume diameter ($Dv50$)

基于构建的 CN1215 型离心雾化喷头雾化粒径 $Dv50$ 的 EBFNN 隐式代理数学模型, 绘制出 $Dv50$ 对试验因素离心泵流量、喷头转速的响应曲面, 如图 7 所示。从纵向的视角来看, 在泵的流量一定 (全流量范围) 的工况下, 随着转速的逐渐增大, 离心喷头的 $Dv50$ 一直减小; 从图 7a 也可以看出, 泵的供给流量越小, 在转速增大的过程中, 离心喷头 $Dv50$ 减小的速率更大; 另外, 在区间 1 (140 ~ 225 mL/min, 8 000 ~ 8 400 r/min)、区间 2 (250 ~ 300 mL/min, 8 000 ~ 8 200 r/min) 内部, 离心喷头 $Dv50$ 处于高值域, 明显大于其它区间。此外, 从横向的视角来看, 在喷头转速一定的情况下, 随着泵的供给流量逐步增大, 离心喷头粒径 $Dv50$ 均呈现出先增大、

响应目标 92% 以上的响应值均可以由 EBFNN 模型进行预测解释。

3.2 基于代理数学模型的喷雾参数分析

3 种数学模型对 $Dv50$ 的拟合误差精度如图 6 所示, 从图中可以看出, 四阶 RSM、Kriging 模型拟合精度较差, 拟合点在中斜线两侧散布, 而 EBFNN 模型对样本的拟合点较为集中地分布在中斜线两侧, 综上结果可得出, EBFNN 最适用于 CN1215 型离心雾化喷头 $Dv50$ 的响应建模, 可以进行粒径 $Dv50$ 的分析、预测及智能决策。

后减小、再增大、再减小的趋势, 在试验测量的范围内变化过程中, 粒径 $Dv50$ 会出现两个波峰; 另外, 从图 7a 可以看出, 三维视图的响应面呈一定的螺旋状, 对应图 7b 可以看出, 在喷头转速较小的区域, 粒径 $Dv50$ 值的第 1 个波峰明显高于第 2 个波峰, 且随着喷头转速的逐步提高, 粒径 $Dv50$ 值的第 2 个波峰逐步逼近第 1 个波峰、并逐步高于第 1 个波峰。

3 种数学模型对雾滴体积中径 $Dv50$ 对应喷幅的拟合误差精度如图 8 所示, 从图中可以看出, 从模型预测值和实际测量值的聚集度和决定系数 R^2 来看, 精度从高到低分别为 EBFNN、Kriging、四阶 RSM, EBFNN 最适用于 CN1215 型离心喷头喷幅的

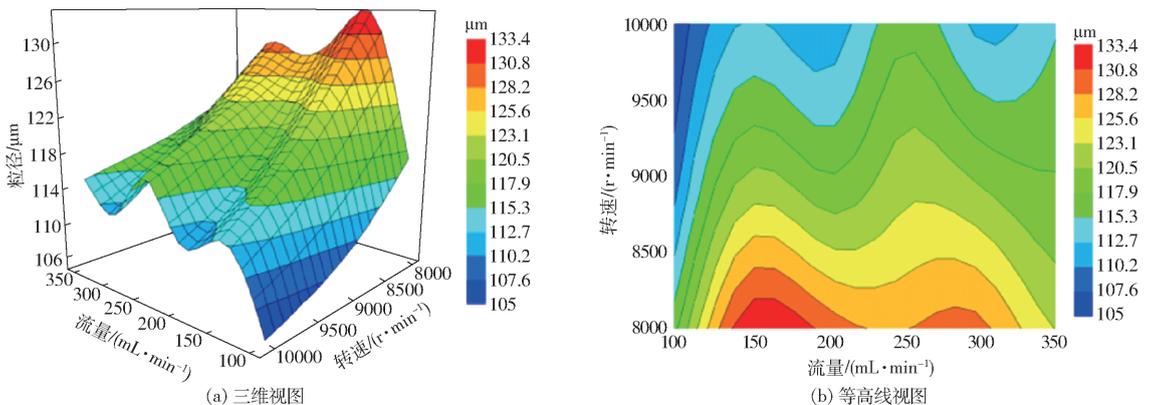


图 7 喷头流量及转速对雾滴雾化粒径的影响规律

Fig. 7 Effect of nozzle flow rate and rotation speed on particle size of droplet

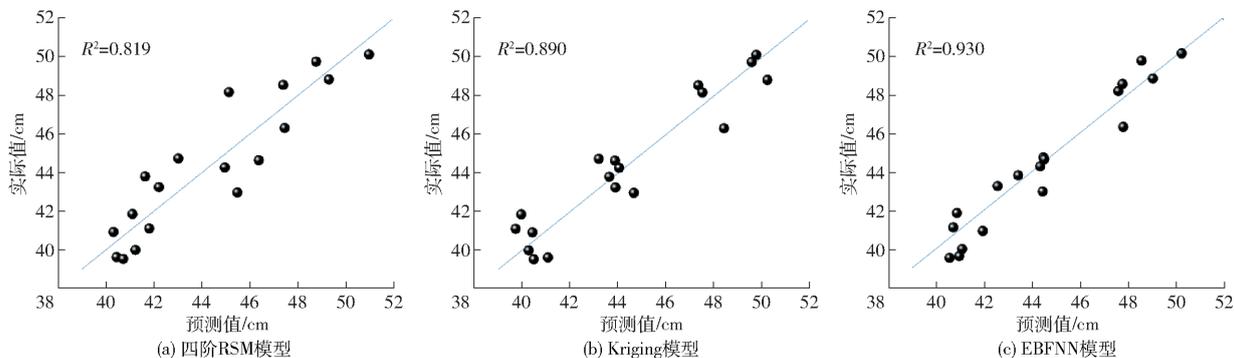


图8 对应喷幅(Dv50)的代理数学模型

Fig. 8 Agent mathematical model for corresponding spray amplitude (Dv50)

响应建模,可以进行喷幅的分析、预测及决策。

基于构建的CN1215型离心喷头雾化粒径Dv50对应喷幅的EBFNN隐式代理数学模型,绘制出喷幅对试验因素离心泵流量、喷头转速的响应曲面,如图9所示。从横向来看,在喷头转速一定的情况下,随着泵的供给流量逐步增大,离心喷头喷幅均呈现出先减小、后增大、再减小、再增大且波峰呈阶梯状的上升趋势,对于测试范围内所有喷头转速,当泵的

供液量为350 mL/min时喷头喷幅达到最大(除去喷头转速为9 900~10 000 r/min的区间,此区间喷幅达到最大值后又开始下降)。另外,从纵向的视角来看,在泵的流量一定(全流量范围)的工况下,随着喷头转速的逐步增加,离心喷头喷幅呈现出较弱的先增大后减小的趋势,当泵的供液量处在330~350 mL/min范围内,离心喷头喷幅增大到最大值后趋于稳定。

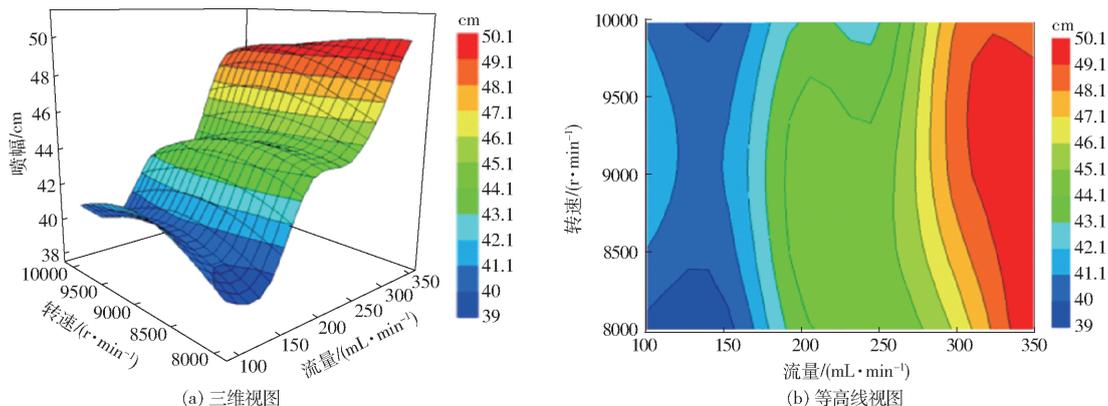


图9 喷头流量及转速对喷幅(Dv50对应值)的影响规律

Fig. 9 Effect of nozzle flow rate and rotation speed on spray amplitude (Dv50)

3.3 航空离心雾化喷头雾化性能参数预测

定义输入变量泵供液量为 a (100~350 mL/min)、定义喷头的转速为 b (8 000~10 000 r/min),定义输出变量粒径Dv50为 c_1 (μm)、定义对应喷幅为 c_2 (cm);基于粒径Dv50及喷幅的EBFNN模型,编写粒径Dv50及对应喷幅的预测界面,如图10所示。

从图10可以看出,在测试范围内,输入任意组合的泵供液量 a 、离心喷头转速 b ,就能获得离心喷头雾化参数粒径Dv50及对应的喷幅。基于雾化参数的EBFNN模型,可以根据工作参数迅速预测雾化参数,这对变量施药系统的研发、施药飘移模型的建立提供了输入、响应参数的关系及建模初始边界(雾滴初始切向速度(由雾滴喷幅转化得到)、雾滴初始粒径Dv50),为精准施药实施策略的制定提供了可靠支撑,如图11所示。

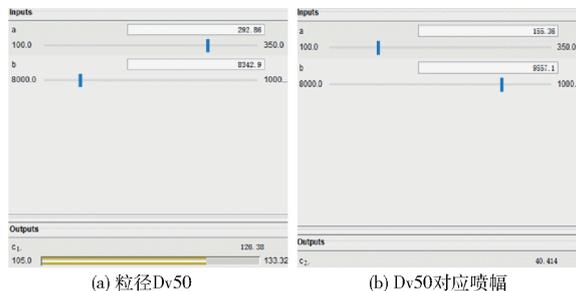


图10 离心喷头雾化参数预测界面

Fig. 10 Centrifugal nozzle atomization parameter prediction interface

4 结论

(1) 针对CN1215型离心喷头喷雾参数(包括喷雾流量、喷头转速),标定了供液系统的工作参数(包括离心泵的转速、喷头供电电压),为不同工况

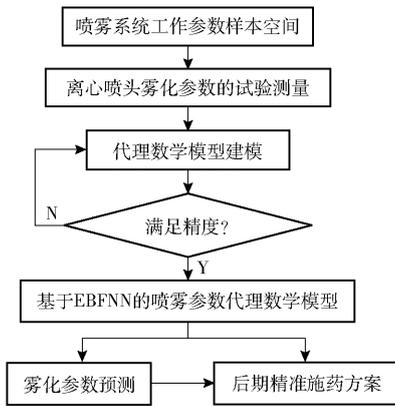


图 11 离心喷头雾化参数预测策略

Fig. 11 Atomization parameters prediction strategy for centrifugal nozzle

下雾化参数的快速试验测试提供了支撑。

(2)搭建了离心喷头雾化粒径 $Dv50$ 及对应喷幅的测试平台并按照试验方案展开了具体测试;分别采用四阶 RSM、Kriging 及 EBFNN 法建立了离心

喷头 $Dv50$ 及对应喷幅两个雾化参数表征因子与供液系统喷雾参数的响应关系的代理数学模型;对代理模型均值误差、最大误差、均方根误差、决定系数进行比较分析,结果表明,EBFNN 拟合精度明显最优,适合 CN1215 型离心喷头雾化参数的数学建模。

(3)3 种代理模型对 $Dv50$ 的决定系数 R^2 分别为:0.705、0.718、0.925,3 种代理模型对 $Dv50$ 对应喷幅的决定系数 R^2 分别为:0.819、0.890、0.930。基于 EBFNN 模型,建立了响应曲面,分析了喷雾参数对雾化参数 $Dv50$ 及对应喷幅的影响规律。当喷头转速一定时,随着供给流量逐步增大, $Dv50$ 均呈现出先增大、后减小、再增大、再减小的趋势;喷幅均呈现出先减小、后增大、再减小、再增大的阶梯状上升趋势。当泵的流量一定时,随着喷头转速的逐步增加, $Dv50$ 一直减小,而喷幅呈现出较弱的先增大后减小的趋势。

参 考 文 献

- [1] 薛新宇, 兰玉彬. 美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 194 - 201. XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation application in USA[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 194 - 201. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130534&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.034. (in Chinese)
- [2] QIN Weicai, XUE Xinyu, ZHANG Shaoming, et al. Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 27 - 32.
- [3] 陈盛德, 兰玉彬, BRADLEY K F, 等. 多旋翼无人机旋翼下方风场对航空喷施雾滴沉积的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 105 - 113. CHEN Shengde, LAN Yubin, BRADLEY K F, et al. Effect of wind field below rotor on distribution of aerial spraying droplet deposition by using multi-rotor UAV[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 105 - 113. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170811&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.011. (in Chinese)
- [4] TESKEM E, BENTSONK P, SANDQUISTR E, et al. Comparison of FSCBG model predictions with heather seed orchard deposition data[J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 30(9): 1366 - 1375.
- [5] BRADLEY K F. Role of atmospheric stability in drift and deposition of aerially applied sprays-preliminary results[J]. Transactions of the ASAE, 2004, 58(9): 742 - 755.
- [6] KANG Tae-Gyoung, LEE Chai-Sik, CHOI Duck-Kyu, et al. Development of aerial application system attachable to unmanned helicopter-basic spraying characteristics for application system[J]. Journal of Biosystems Engineering, 2010, 35(4): 215 - 223.
- [7] 假晶旭. 浅述精准施药的必要性和关键性技术[J]. 湖北植保, 2018(2): 63 - 64.
- [8] FORD M G, SALT D W. Behavior of insecticide deposits and their transfer from plant to insect surface[J]. Pesticides on Plant Surfaces, 1987, 12(6): 5 - 8.
- [9] WASHINGTON J R. Relationship between the spray droplet density of two protectant fungicides and the germination of *mycosphaerella fijiensis* ascospores on banana leaf surfaces [J]. Pesticide Science, 1997, 50(3): 233 - 239.
- [10] SOLANG U K. Tracing insecticide spray droplets by sizes on natural surfaces. the state of the art and its value[J]. Pesticide Science, 2006, 8(5): 501 - 509.
- [11] 薛新宇, 秦维彩, 孙竹, 等. N-3 型无人直升机施药方式对稻飞虱和稻纵卷叶螟防治效果的影响[J]. 植物保护学报, 2013, 40(3): 273 - 278. XUE Xinyu, QIN Weicai, SUN Zhu, et al. Effects of N-3 UAV spraying methods on the efficiency of insecticides against planthoppers and *Cnaphalocrocis medinalis*[J]. Journal of Plant Protection, 2013, 40(3): 273 - 278. (in Chinese)
- [12] 周立新, 薛新宇, 孙竹, 等. 航空喷雾用电动离心喷头试验研究[J]. 中国农机化, 2011, 32(1): 107 - 111. ZHOU Lixin, XUE Xinyu, SUN Zhu, et al. Experimental study on electrical-driven centrifugal nozzle of aerial spary[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2011, 32(1): 107 - 111. (in Chinese)
- [13] 周晴晴, 薛新宇, 杨风波, 等. 离心喷嘴雾滴运动轨迹与沉积分布特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 18 - 23. ZHOU Qingqing, XUE Xinyu, YANG Fengbo, et al. Trajectory and deposition distribution features of centrifugal atomization nozzle droplet[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2017, 38(1): 18 - 23. (in Chinese)

- [14] 杨风波, 薛新宇, 蔡晨, 等. 多旋翼植保无人机悬停下洗气流对雾滴运动规律的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 64-73.
YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Effect of down wash airflow in hover on droplet motion law formulti-rotor unmanned plant protection machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(2): 64-73. (in Chinese)
- [15] YANG Fengbo, XUE Xinyu, CAI Chen, et al. Numerical simulation and analysis on spray drift movement of multirotor plant protection unmanned aerial vehicle[J]. Energies, 2019, 11(9): 1-20.
- [16] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例详解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [17] 成棣, 王成国, 刘金朝, 等. 2种响应面方法在车轮踏面优化中的应用分析比较[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(3): 64-69.
CHENG Di, WANG Chengguo, LIU Jinzhao, et al. Application analysis comparison of two response surface methods for the optimization of the wheel tread[J]. China Railway Science, 2010, 31(3): 64-69. (in Chinese)
- [18] 窦毅芳, 刘飞, 张为华. 响应面建模方法的比较分析[J]. 工程设计学报, 2007, 14(5): 359-363.
DOU Yifang, LIU Fei, ZHANG Weihua. Research on comparative analysis of response surface methods[J]. Journal of Engineering Design, 2007, 14(5): 359-363. (in Chinese)
- [19] 程演演, 祁力钧, 吴亚奎, 等. 矮化密植果园摇摆变量喷雾机参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 22-29.
CHEN Zhenzhen, QI Lijun, WU Yalei, et al. Parameter optimization on swing variable sprayer of orchard based on RSM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2017s004&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004. (in Chinese)
- [20] 连宾宾. 一种五自由度并联机构的多目标优化设计方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
LIAN Binbin. A multi-objective optimum design method for 5-DOF parallel mechanisms[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese)
- [21] 谢翌, 严春城, 阮登芳, 等. 基于响应面模型的波瓣混合排气系统近似模型研究[J]. 推进技术, 2016, 37(6): 1037-1048.
XIE Yi, YAN Chun Cheng, RUAN Dengfang, et al. Research on approximation model of lobed mixing exhaust system based on response surface methodology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(6): 1037-1048. (in Chinese)
- [22] 杨风波, 马大为, 任杰, 等. 新型同心筒自力发射热环境优化设计[J]. 固体火箭技术, 2015, 38(2): 172-178.
YANG Fengbo, MA Dawei, REN Jie, et al. Optimization design for thermal environment of a new roadbed concentric canister launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2015, 38(2): 172-178. (in Chinese)
- [23] KRIGE D G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1951, 52(6): 119-139.
- [24] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. 航空学报, 2016, 37(11): 3197-3225.
HAN Zhonghua. Kriging surrogate model and its application to design optimization: a review of recent progress[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(11): 3197-3225. (in Chinese)
- [25] MAO K Z, HUANG G B. Neuron selection for RBF neural network classifier based on data structure preserving criterion[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2005, 16(6): 1531-1540.
- [26] 王文杰, 裴吉, 袁寿其, 等. 基于径向神经网络的叶轮轴面投影图优化[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(6): 78-83.
WANG Wenjie, PEI Ji, YUAN Shouqi, et al. Optimization of impeller meridional shape based on radial basis neural network[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(6): 78-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150612&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.06.012. (in Chinese)
- [27] 杨风波, 张玲, 薛新宇, 等. 果园风送喷雾机气助式喷头风力性能数值模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 38-47.
YANG Fengbo, ZHANG Ling, XUE Xinyu, et al. Numerical simulation and test wind performance of gas spray nozzle for orchard air-assisted sprayer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 38-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180605&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.005. (in Chinese)
- [28] 崔龙飞, 薛新宇, 秦维彩. 基于 EBF 神经网络模型的喷雾机吊喷分禾器参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 62-69.
CUI Longfei, XUE Xinyu, QIN Weicai. Parameter optimization on crop divider of cotton defoliation sprayer based on EBFNN[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 62-69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160509&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.009. (in Chinese)
- [29] MAK M W, KUNG S Y. Estimation of elliptical basis function parameters by the EM algorithm with application to speaker verification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000, 11(4): 961-969.
- [30] 陈允平, 王旭蕊, 韩宝亮. 人工神经网络原理及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [31] 邢红杰, 王泳, 胡包钢. 椭圆基函数神经网络的混合学习算法[J]. 模式识别与人工智能, 2008, 21(2): 148-154.
XING Hongjie, WANG Yong, HU Baogang. A hybrid learning algorithm for elliptical basis function neural networks[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 21(2): 148-154. (in Chinese)