doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.013

喷雾降温风机风筒优化设计与试验

杜　哲　胡永光　仇树成　陈永鑫
(江苏大学农业装备工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为缓解高温热害对茶果树的影响,基于圆弧板型叶片模型设计了一种喷雾降温风机,并对风筒结构进行建模和动力学仿真。以出风口直径、进风段长度和出风段长度为试验因素,以风机出口总压和风速为试验指标,采用 Design-Expert 8.0.6 软件优化风筒结构参数。优化结果表明,各因素对出口总压和风速的影响由大到小依次为出风口直径、出风段长度、进风段长度。最优参数组合为出风口直径 1 070 mm、进风段长度 350 mm 和出风段长度 270 mm。选取 WJ-7010、WJ-8010 型喷嘴,利用优化后的风筒结构进行了风速试验和喷雾降温性能试验。风速试验表明,当风筒出风口直径和总长度分别为 1 070、840 mm 时,出风口风量为 701.30 m^3/min,最大风速为 16.00 m/s,有效送风距离约为 55.00 m。喷雾降温性能试验结果表明,当使用 WJ-8010 型喷嘴时,与对照组相比,平均温度降低 0.68~11.11℃,最大温差范围为 1.80~13.90℃。在 38℃高温环境下,喷雾降温风机在 20 m 范围内的降温幅度接近 5℃,降温效果良好。

关键词: 喷雾; 降温; 风机; 风筒
中图分类号: S491　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)08-0118-08　　**OSID**:

Optimization Design and Experiment of Air Duct on Spray Cooling Fan

DU Zhe　HU Yongguang　QIU Shucheng　CHEN Yongxin
(*School of Agricultural Equipment Engineering*, *Jiangsu University*, *Zhenjiang* 212013, *China*)

Abstract: In order to remit the effect of high temperature damage on tea and fruit trees, a spray cooling fan with low-power consumption was designed. According to the structure size of arc plate fan blade, the structure of air duct on the spray cooling fan was modeled by Pro/E software. And the dynamic simulation was applied with Fluent software. The diameter of air outlet, length of air inlet and length of air outlet were selected as experimental factors. The total outlet pressure and wind speed were taken as indicators, which were obtained by dynamic simulation. Design-Expert 8.0.6 software was used to optimize the structure of air duct. Then, two types of nozzles with WJ-7010 and WJ-8010 were determined with flow test. With two nozzles, the optimized air duct was carried out to conduct wind speed test and spray cooling performance test. The optimized results showed that the order of significance was outlet diameter, outlet length and inlet length. The optimized combination was outlet diameter of 1 070 mm, inlet length of 350 mm and outlet length of 270 mm. Combined with the length of fan section of 220 mm, total length of the duct was 840 mm. Based on the outlet diameter of 1 070 mm and total length of 840 mm, the outlet air volume, maximum wind speed and effective air supply distance were 701.30 m^3/min, 16.00 m/s and 55 m, respectively. The cooling performance test result showed that the average temperature was decreased by 0.68~11.11℃ and the maximum temperature difference range was 1.80~13.90℃ when WJ-8010 nozzle was used. At a high temperature of 38℃, the cooling range of spray cooling fan within a range of 0~20 m was close to 5℃. This machine could relieve the high temperature stress problem of tea and fruit trees.

Key words: spray; cooling; fan; air duct

收稿日期: 2019-11-07　修回日期: 2019-12-10
基金项目: 镇江市科技项目(NY2018007)、江苏省六大人才高峰项目(2015-ZBZZ-021)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD-2018-87)
作者简介: 杜哲(1989—),男,博士生,主要从事茶果园生产装备与技术研究,E-mail: duzhe03@sina.com
通信作者: 胡永光(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事茶果园生产装备与技术研究,E-mail: deerhu@163.com

0　引言

高温热害，又称高温害、热害，是指高温对植物生长发育和产量造成损害的一种重要农业气象灾害。主要包括茶果树和林木日灼伤、高温逼熟及农作物热害等[1-4]。目前，遮荫、灌溉、通风、喷雾等均是缓解高温热害的主要措施。遮荫和灌溉处理降低近地面小环境温度，基于热空气上升原理减小高温热害，但所需前期工作量较大[5]；通风处理通过扰动空气加速气流运动，降低局域小环境温度，并改善蒸腾作用；喷雾处理通过水分蒸发吸收空气热量，快速调节局域小环境温度，实现蒸发降温[6]。针对茶果园和农田大环境，喷雾和通风耦合作用可以通过扰动空气，加速水分蒸发吸热，快速降低局部小环境温度，缓解高温热害。

近年来，国内外学者对通风和喷雾处理开展了大量研究[7-11]。SURESHKUMAR 等[12-13]通过试验和仿真研究了喷雾过程中的传热传质过程，分析了蒸发降温现象。COLLIN 等[14]基于全场彩虹测量法（Global rainbow thermometry）和欧拉拉格朗日方法（Eulerian Lagrangian approach）对喷雾过程的动力学、传热学及辐射进行了详细研究。刘乃玲等[15-16]运用 Fluent 软件模拟细水雾在狭长空间的降温效果，研究表明，喷雾方式和压力是影响空间温度分布的主要因素，水温对降温效果影响甚微。王军锋等[17-18]运用 CFD 软件对不同液滴粒径的降温效果进行数值计算，并模拟了夏季室外大空间环境中的细水雾弥散运输过程和传热传质特性，获得了细水雾气液两相流动的流场、温度场和湿度的分布情况。ENDALEW 等[19]建立了送风式喷雾机的仿真模型，对喷雾气流速度分布进行研究。可见，强制对流通风和喷雾蒸发降温是缓解夏季高温热害的主要方法。

此外，通风和喷雾处理还可用于茶果园喷药。首先，风送式喷药机将药液雾化，然后依靠气流使雾滴进一步雾化，并输送到靶标上，均匀分布在茶果树表面上[20]。与喷雾降温风机相比，喷药机的液滴更大，可沉积在茶果树表面上。因此，为保证蒸发降温效果，且无液滴沉积，喷雾降温风机的雾滴直径应小于喷药机的雾滴直径。

为提高降温效果及扩大降温范围，针对夏季高温热害，本文采用强制对流通风和喷雾蒸发复合降温技术，设计一种喷雾降温风机。以风机出口总压和风速为指标，以出风口直径、进风段长度和出风段长度为试验因素，利用 Design-Expert 8.0.6 软件对风筒结构进行优化设计；然后，通过试验对喷雾降温风机的喷雾降温效果进行分析。以期缓解高温胁迫问题，提高茶果园应对极端逆境天气的能力。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

如图 1 所示，喷雾降温风机主要包括风筒、摆头机构、发电机、水箱、可移动机架、高压水泵、过滤器、控制器、喷雾环、叶片等。其中，摆头机构由支撑杆、连杆、曲柄、驱动电机、套筒等组成。喷雾降温风机的主要结构参数如表 1 所示。

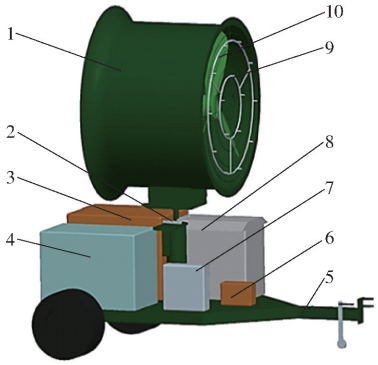

图 1　喷雾降温风机总体结构图

Fig. 1　Overall structure diagram of air duct on spray cooling fan

1. 风筒　2. 摆头机构　3. 发电机　4. 水箱　5. 可移动机架　6. 高压水泵　7. 过滤器　8. 控制器　9. 喷雾环　10. 叶片

表 1　喷雾降温风机主要结构参数

Tab. 1　Main structural parameters of air duct on spray cooling fan

参数	数值
发电机功率/kW	7
叶片驱动电机功率/kW	3/4
柱塞泵电机功率/kW	1.1
摆头驱动电机功率/W	60
发电机转速/(r·min^{-1})	940
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 110×1 550×2 070
风筒中心高度/mm	1 480
摆头角度/(°)	70～140

1.2　工作原理

喷嘴性能和送风距离对于实际蒸发降温效果和范围有较大影响。为了提高蒸发降温效果，喷嘴方式采用平孔压力式，可细化雾滴直径。为了增加雾滴漂移距离，在保证送风距离大于 40 m 的前提下，叶片驱动电机功率取 3 kW。工作时，根据地形调节喷雾降温风机的俯仰角及摆头方向，电机开启，高压柱塞泵从水箱中抽出液体，经由三通接头传递至喷雾环，通过喷嘴将液体破裂为极细小雾滴并喷射到空气中，同时叶片转动，风机开始工作。小粒径雾滴在空气射流的起始段和过渡段蒸发，大粒径雾滴在

射流的核心区和回流区蒸发。适当增大雾滴直径，可延长蒸发时间，扩大降温面积；但雾滴直径不宜过大，否则易造成地面蓄水。此外，回水管将多余液体流回水箱循环使用。

2 关键部件选型与设计

2.1 喷雾系统构成

喷雾系统置于喷雾降温风机可移动机架上，其结构方案如图 2 所示。喷雾系统主要由高压出水管、高压柱塞泵、高压泵进水管、喷雾环、过滤器、水箱、回水管、三通接头等组成。其中，电机与 WJ1816C/B 型高压陶瓷柱塞泵为一体式设计。柱塞泵最大调节压力为 8.0 MPa，最大流量为 8.0 L/min；电机功率为 1.1 kW，电压为 380 V，频率为 50 Hz。根据风筒结构尺寸及喷雾量要求，选择内外圈布置喷嘴安装孔的同心圆结构雾环，其结构如图 3 所示。外圈均布 10 个喷嘴，内圈均布 5 个喷嘴，且内外圈喷嘴交叉布置，喷射后多股喷雾会形成交叉，达到均匀降温效果。

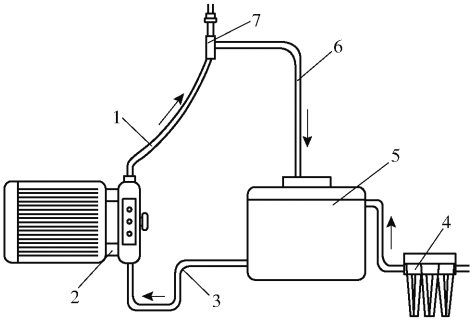

图 2 喷雾系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spray system

1. 高压出水管 2. 高压柱塞泵 3. 高压泵进水管 4. 过滤器 5. 水箱 6. 回水管 7. 三通接头

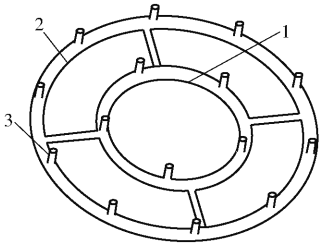

图 3 喷雾环结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of fog ring structure

1. 内圈 2. 外圈 3. 喷嘴安装孔

2.2 喷嘴选型

喷嘴流量是其性能重要指标之一。影响喷嘴流量的主要因素包括喷嘴内部结构、喷嘴孔径、喷雾压力等。因此，本试验选取 WJ－3010、WJ－5010、WJ－7010、WJ－8010 型喷嘴测量流量，其孔径分别为 0.3、0.5、0.7、0.8 mm。常见的流量测量方法包括速度法、容积法、直接式质量流量计等[21－22]。由于本试验中喷嘴流量较小，雾化程度高，故采用称量法测量喷嘴流量。

由图 4 可知，喷嘴流量与压力呈线性正相关。在相同压力条件下，随孔径增大，喷嘴流量增大，即喷嘴流量与孔径呈正相关。压力为 2 MPa 时，WJ－7010、WJ－8010 型喷嘴流量为 0，其原因是由于喷嘴孔径越大，需要雾化压力也越大。在 2～8 MPa 压力下，WJ－3010、WJ－5010 两种型号喷嘴的雾滴飘移严重。这是由于喷嘴孔径越小，喷出液滴粒径越小，雾滴飘移潜力增大。且随压力增大，雾滴粒径逐步减小，雾滴飘移越严重。因此，本试验选取 WJ－7010、WJ－8010 型喷嘴进行喷雾降温试验，对比喷雾降温效果。

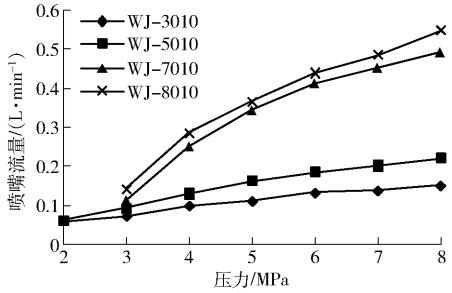

图 4 喷嘴流量与压力关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between nozzle flow rate and pressure

2.3 叶片优化

以 NK－1028YD 型叶片为基础，通过三维测量技术获取其点云数据。以提高叶片光顺性、曲面精度为目标，采用 Imageware 软件对点云数据进行逆向处理。然后，利用 Pro/E 软件进行逆向重构，结合风筒尺寸结构，建立圆弧板型叶片模型[23]。其基本参数为安装角 18°，掠角 86°，轮毂比 0.25，叶片数 3 和直径 1 040 mm，如图 5 所示。

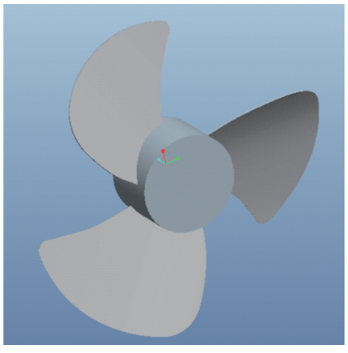

图 5 叶片模型

Fig. 5 Blade model

2.4 风筒结构设计

喷雾降温风机的风筒近似柱形结构，叶片和电机安装在其内部中心轴线上，且进、出风口直径相

同。根据叶片结构参数，设定风筒内径为 1 085 mm，风筒总长度为 840 mm，其中风筒内部风机段长度为 220 mm。基于 Pro/E 软件建立风筒结构的三维模型，以 STEP 格式导入 ICEM CFD 软件中进行网格划分，最后在 Fluent 软件中进行仿真分析。

2.4.1　网格划分

对于空间尺寸大且结构复杂的模型，网格划分质量与仿真模拟精度和计算速度密切相关。CFD 软件中网格结构包括结构化和非结构化网格。其中，结构化网格计算速度快，网格适应性差，而非结构化网格计算速度慢，网格适应性强[24]。

根据风筒气流扰动特点[25]，将风筒主体分成进风段（Ⅰ段）、风机段（Ⅱ段）及出风段（Ⅲ段）（图 6）。Ⅰ段、Ⅲ段结构简单，采用结构化网格划分。而风机安装在Ⅱ段，结构复杂，采用非结构化网格并采取网格加密处理。最终，风筒模型共划分网格数约为 5 700 000。

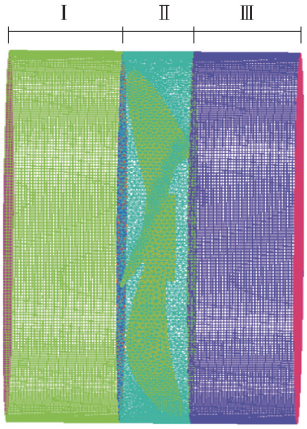

图 6　风筒结构的网格划分

Fig. 6　Structural meshing of air duct

2.4.2　边界条件

设置模型进口边界条件为压力进口边界条件，相对压力为 0。模型出口边界条件为压力出口边界条件，壁面采用无滑移壁面边界条件。模型内部流体交换面设置为 Interior，风扇旋转区域为 Fluid 区域。设置气流为不可压缩气流。求解时，采用标准 $\kappa-\varepsilon$ 湍流模型，使用 Simple 求解算法。收敛准则为 Fluent 中默认设置。

2.4.3　响应面分析方案与结果

试验因素包括出风口直径 z_1、进风段长度 z_2 和出风段长度 z_3。根据叶片结构参数确定试验因素取值范围，因素编码如表 2 所示。

试验指标为出口总压 p_{out} 和出口风速 v，由 Fluent 软件仿真计算得到。在仿真试验中，风机转速选取为 1 430 r/min。使用 Design-Expert 8.0.6 软件进行三因素三水平的响应面分析[26-28]，分析方案及结果如表 3 所示，Z_1、Z_2、Z_3 为因素编码值。表 4 为出口风速方差分析结果。

表 2　因素编码

Tab. 2　Factors code

编码	因素		
	z_1/mm	z_2/mm	z_3/mm
−1	1 070	250	270
0	1 085	300	320
1	1 100	350	370

表 3　响应面分析方案及试验结果

Tab. 3　Experimental plan and result of response surface analysis

编号	因素			指标	
	Z_1	Z_2	Z_3	p_{out}/Pa	v/(m·s^{-1})
1	−1	−1	0	437.29	24.33
2	1	−1	0	392.84	22.69
3	0	0	0	397.45	23.05
4	0	1	1	389.41	22.82
5	0	0	0	397.45	23.05
6	1	0	1	385.46	22.51
7	0	1	−1	408.35	23.35
8	0	0	0	397.45	23.05
9	−1	0	−1	445.76	24.56
10	0	−1	−1	406.43	23.29
11	1	1	0	393.94	22.74
12	−1	0	1	428.79	24.10
13	0	0	0	397.45	23.05
14	−1	1	0	438.73	24.36
15	1	0	−1	404.33	22.98
16	0	−1	1	387.92	22.79
17	0	0	0	397.45	23.05

表 4　出口风速方差分析

Tab. 4　Analysis of variance of exit wind speed

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	6.62	9	0.74	2 263.66	<0.000 1
Z_1	5.17	1	5.17	15 901.88	<0.000 1
Z_2	0.179 9	1	0.179 9	11.12	0.012 5
Z_3	0.48	1	0.48	1 477.54	<0.000 1
Z_1Z_2	0.018 3	1	0.018 3	0.31	0.596 4
Z_1Z_3	0.016 8	1	0.016 8	0.077	0.789 5
Z_2Z_3	0.041 2	1	0.041 2	0.69	0.432 8
Z_1^2	0.96	1	0.96	2 953.93	<0.000 1
Z_2^2	0.017 7	1	0.017 7	0.081	0.784 2
Z_3^2	0.077 1	1	0.077 1	1.30	0.292 5
残差	0.113 3	7	0.059 5		
失拟	0.113 3	3	0.138 9		
误差	0.000	4	0		
R^2	0.999 7				
预测 R^2	0.994 5				
调整 R^2	0.999 2				

（1）数学模型建立

由表 4 可知，模型 $P<0.000\ 1$，模型极显著；决

定系数 $R^2=0.9997$,拟合程度高;失拟不显著,试验因素和指标间存在显著关系。风机出口总压 p_{out} 与各因素编码值的回归方程为

$$p_{out}=397.45-21.75Z_1+0.74Z_2-9.16Z_3-0.085Z_1Z_2-0.48Z_1Z_3-0.11Z_2Z_3+18.15Z_1^2+0.096Z_2^2+0.48Z_3^2 \quad (1)$$

风机出口风速 v 与各因素编码值的回归方程为

$$v=23.05-0.80Z_1+0.021Z_2-0.24Z_3+0.005Z_1Z_2-0.0025Z_1Z_3-0.0075Z_2Z_3+0.48Z_1^2+0.0025Z_2^2+0.01Z_3^2 \quad (2)$$

(2)因素重要性分析

由式(1)、(2)可知,各因素对风机出口总压 p_{out} 影响由大到小依次为 Z_1、Z_3、Z_2,各因素对风机出口风速 v 影响由大到小依次为 Z_1、Z_3、Z_2。因此,出风口直径对出口总压和风速的影响最显著,出风段长度次之,进风段长度最小。

(3)单因素效应分析

由图 7 可知,风机出口总压随出风口直径增大呈先急剧减小后缓慢增大的趋势,随进风段长度增大而缓慢增大,随出风段长度增大而减小。因此,为增大出口总压,可适当减小风筒的出风口直径和出风段长度。

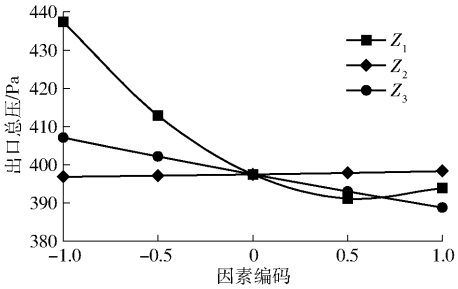

图 7 单因素编码值与出口总压关系曲线

Fig. 7 Relations of single factor and outlet total pressure

由图 8 可知,风机出口风速随出风口直径增大呈先急剧下降后缓慢下降的趋势,随进风段长度增大而缓慢增加,随出风段长度增大而缓慢下降。因此,为增大出口风速,可适当增大风筒出风口直径和出风段长度。

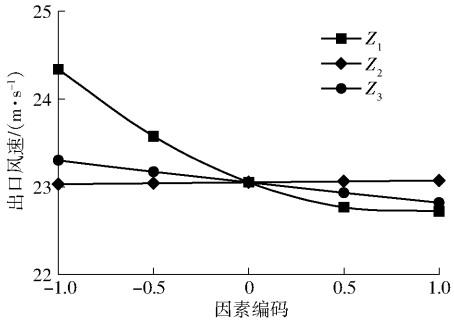

图 8 单因素编码值与出口风速关系曲线

Fig. 8 Relations of single factor and export wind speed

(4)双因素效应分析

在式(1)中,固定其中 1 个因素在零水平,研究其余 2 个因素的相互作用对出口总压的影响。随出风口直径增加,出口总压呈先快速减小后趋于平缓的变化趋势,进风段长度对出口总压影响较小(图 9a)。由图 9b 可知,当出风段长度固定时,出口总压随出风口直径增加先减后增。当出风口直径固定时,出口总压随出风段长度增加而减小。由图 9c 可知,当出风段长度固定时,出口总压与进风段长度呈正相关。当进风段长度固定时,出口总压与出风段长度呈负相关。

在式(2)中,固定其中 1 个因素在零水平,研究其余 2 个因素的相互作用对出口风速的影响。由图 10a 可知,当进风段长度固定时,出口风速随出风口直径增加而减小。由图 10b 可知,当出风段长度固定时,出口风速随出风口直径的增加先快速减小后缓慢减小。出风口直径固定时,出口风速与出风段长度呈负相关。由图 10c 可知,当出风段长度固定时,出口风速随进风段长度呈正相关。当进风段长度固定时,出口风速随出风段长度增加而减小。

(5)优化结果

通过响应面分析,以出口总压和风速最大为目标,基于式(1)、(2),利用 Design-Expert 8.0.6 软件得到风筒结构最优参数组合:出风口直径 1 070 mm,进风段长度 350 mm,出风段长度 270 mm。结合风筒Ⅱ段长度 220 mm,风筒出风口直径和总长度分别

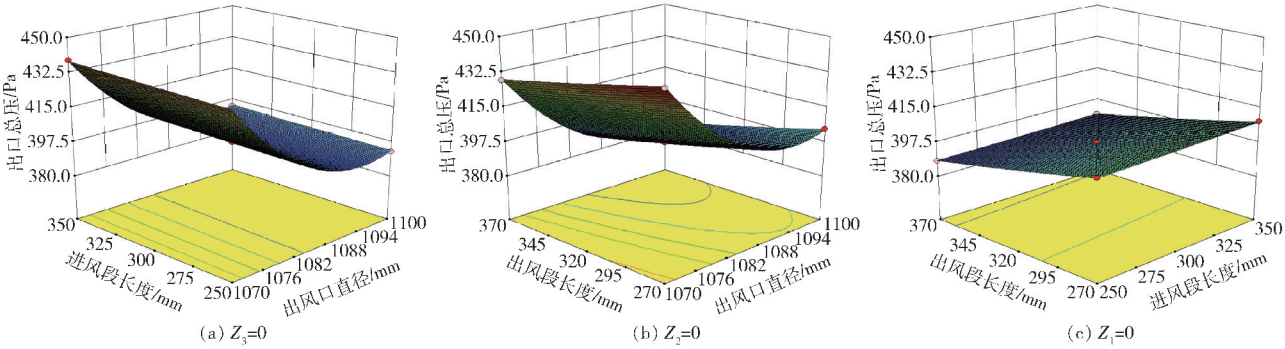

图 9 因素交互作用对出口总压的影响

Fig. 9 Effect of interactive factors on total export pressure

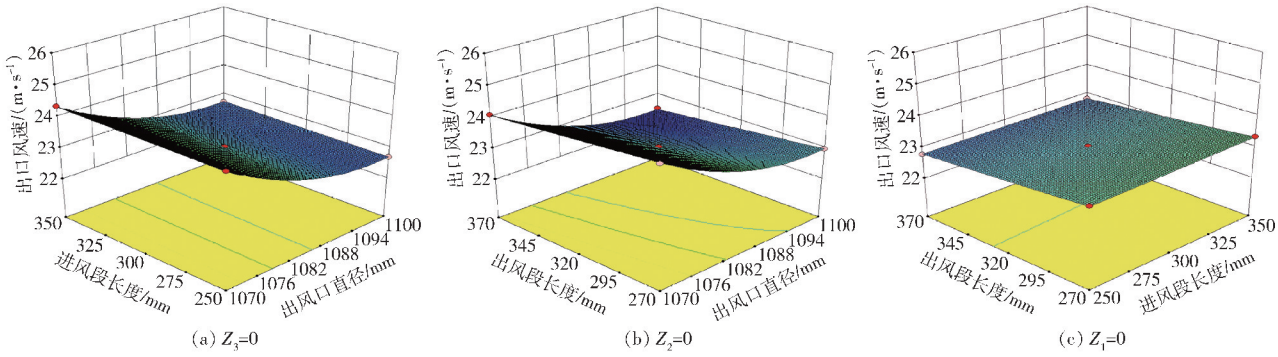

图 10　因素交互作用对出口风速的影响

Fig. 10　Effect of interactive factors on export wind speed

为 1 070、840 mm。此时，出口总压为 447.55 Pa，出口风速为 24.61 m/s。

3　性能试验

3.1　风速试验

为测试响应面试验优化结果，在风筒出风口直径 1 070 mm 和总长度 840 mm 的条件下进行风速试验。由于尚无喷雾降温风机的设计标准，本试验利用风速、送风距离和风量评价其效果。

试验于 2018 年 7 月 20 日在江苏大学农机大院内进行，自然风速为 0.33 m/s。试验仪器包括泰仕 AVM－07 型风速计（风量测量范围 0～999 900 m^3/min；风速测量范围 0～45.0 m/s，精度 ±0.3 m/s）、卷尺等。试验时，以风机中轴线为中心线，每隔 2.0 m 设一个水平测点。同时在每个水平测点垂直方向上每隔 0.5 m 布置一个测点，共计 7 个测点。

本试验基于 5 次测量求平均值的方法，得到出风口风量为 701.30 m^3/min，最大风速为 16.00 m/s。在 0～8 m 范围内，风速急剧变小，风速最低降为 7.00 m/s；在 30～42 m 范围内，风速稳定在 2.00～3.00 m/s；50 m 处风速为 0.72 m/s。以风速 0.70 m/s 为扰动空气的临界值，风机有效送风距离约为 55 m，效果良好。风速分布呈鸭梨状，中轴线两端近似对称，分布特征如图 11 所示。实测最大风速（16.00 m/s）与理论风速（24.61 m/s）有一定差异，其主要是由风罩阻碍作用、电机功率利用率不足及仿真模型与实际情况的差异所导致。

3.2　喷雾降温试验

3.2.1　试验仪器与方法

试验地点为江苏大学室外空旷地面，于 2018 年 8 月 1 日 38℃高温下进行试验，自然风速 0.37 m/s。试验仪器包括 ZDR－3WIS 型温度自动记录仪（温度测量范围 －40～100℃，精度 ±0.5℃；湿度测量范围 0～100%，精度 ±3%；最小采集间隔 2 s）、铁架、卷尺、辐射罩及绳子等。试验前对仪器进行校正及标定。

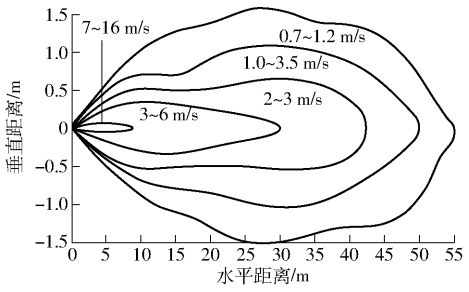

图 11　风速分布特征

Fig. 11　Distribution characteristics of wind speed

试验时，以风机出风口为起点，在风机的轴线方向上每隔 10 m 布置一个测点，同时监测近地面处（地表面）的温、湿度变化，每 10 s 采集一次数据。共 4 个监测点，与风机的距离分别为 10、20、30、40 m（图 12）。每组试验采用送风（T1）、送风 + 喷雾（T2）、再送风（T3）等 3 个处理来进行。同时设置一组对照组（CK），用于检测环境温、湿度。喷嘴组合方式如下：A1 组为 15 个 WJ－7010 型喷嘴，A2 组为 15 个 WJ－8010 型喷嘴，A3 组为 5 个 WJ－7010 型喷嘴和 10 个 WJ－8010 型喷嘴。



图 12　试验样机

Fig. 12　Test prototype

3.2.2　试验结果

表 5 为不同喷嘴组合对近地面平均温度的影响。由于地表受太阳辐射影响较大，温度较高。T1 阶段，各监测点的平均温度和对照组相比变化不明显，即仅用风机工作时，室外环境降温效果不显著。T2 阶段，在送风和喷雾共同作用下，各监测点平均温度均有所下降。与对照组相比，A1 和 A2 组分别

降低了 0.03 ~ 9.06℃、0.68 ~ 11.11℃,A3 组 30 m 范围内降低了 0.36 ~ 6.54℃,且 30 ~ 40 m 范围内有升温现象。因此,相对于 A1 组和 A3 组,A2 组的降温效果较好。喷雾停止后,在 T3 阶段,各监测点平均气温随距离增加而升高。且在 40 m 处的温度均高于对照组温度,可能是由太阳辐射突然变化所引起。由表 5 可知,在 20 m 范围内,A2 组的降温幅度接近 5℃,降温效果良好。

表 5 不同喷嘴组合对近地面平均温度的影响

Tab. 5 Effects of different sprays on mean temperature of ground surface ℃

处理	A1					A2					A3				
	CK	10 m	20 m	30 m	40 m	CK	10 m	20 m	30 m	40 m	CK	10 m	20 m	30 m	40 m
T1	42.27	41.65	39.95	43.67	44.41	42.71	39.84	40.65	41.95	41.53	40.98	38.07	38.04	41.45	42.48
T2	42.35	33.29	37.78	42.32	42.16	42.20	31.09	38.29	41.52	41.15	39.14	32.83	33.28	38.78	41.49
T3	42.91	33.16	36.87	42.44	43.70	43.92	30.97	38.70	44.34	44.16	37.44	30.90	35.44	40.40	41.31

在 T2 阶段,不同喷嘴组合对近地面最大温差的影响如图 13 所示。A1、A2 和 A3 组的近地面最大温差范围分别为 -0.40 ~ 11.10℃、1.80 ~ 13.90℃和 -0.50 ~ 10.20℃。A2 组中,30 m 和 40 m 处的温差变化不明显,说明 30 m 外喷雾降温效果不显著。由图 13 可知,A2 组的降温效果较好,在 10 m 和 40 m 处温差大于其余两组。此外,停止喷雾后,由于雾滴沉积,在近地面上蒸发降温。

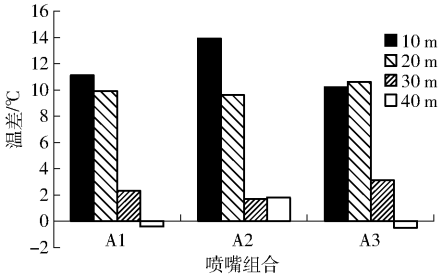

图 13 不同喷雾处理对近地面最大温差影响(T2 阶段)

Fig. 13 Effect of different spray treatments on maximum temperature difference of ground surface (T2)

表 6 为不同喷嘴组合对近地面空气平均相对湿度的影响。结果表明,通风可降低近地面空气的相对湿度。T1 阶段,各监测点的平均相对湿度低于对照组,分别降低 14.59 ~ 24.02 个百分点、8.77 ~ 19.79 个百分点和 13.92 ~ 16.04 个百分点。T2 阶段,20 m 范围内,各组的平均相对湿度显著增大,分别增加 17.22 ~ 33.15 个百分点、23.24 ~ 35.25 个百分点和 22.98 ~ 44.17 个百分点,A3 组的增湿效果较好。距离越近,湿度增加越显著。T3 阶段,各组在 10 m 处的湿度均为 100%,这是由于雾滴沉积,同时也是雾滴蒸发降温的原因。而随距离增加,雾滴沉积量减少,相对湿度降低,降温效果也急剧减弱。因此,为防止近地面湿度过高,在喷雾停止后需要进行通风处理,可快速调节近地面小环境,防止湿度过高引发病害。

表 6 不同喷雾组合对近地面空气平均相对湿度的影响

Tab. 6 Effects of different spray treatments on air relative humidity of ground surface %

处理	A1					A2					A3				
	CK	10 m	20 m	30 m	40 m	CK	10 m	20 m	30 m	40 m	CK	10 m	20 m	30 m	40 m
T1	57.84	33.82	37.48	37.48	43.25	53.93	34.14	40.71	37.58	45.16	54.37	38.33	38.75	38.74	40.45
T2	58.29	91.44	75.51	44.98	38.92	54.27	89.52	77.51	46.09	39.13	54.90	95.07	77.88	42.58	39.74
T3	59.75	100	79.56	44.06	40.52	57.36	100	78.18	41.17	38.92	57.08	100	89.36	45.94	40.56

4 结论

(1)设计了一种喷雾降温风机,对喷雾系统、喷嘴、圆弧板型叶片、风筒等关键部件进行了选型、结构设计与合理配置,通过喷雾和通风复合作用实现降温。

(2)进行了风筒建模和动力学仿真,运用 Design-Expert 8.0.6 软件优化风筒结构。以风筒出口总压和风速为评价指标,对风筒出风口直径、进风段长度和出风段长度进行分析优化。结果表明,各因素对指标影响的显著性主次顺序为出风口直径、出风段长度和进风段长度。最优参数组合为出风口直径 1 070 mm、进风段长度 350 mm 和出风段长度 270 mm。

(3)风速试验表明,当风筒出风口直径和总长度分别为 1 070、840 mm 时,出风口风量为 701.30 m^3/min,最大风速为 16.00 m/s,有效送风距离约为 55.00 m。

(4)通过喷雾降温试验分析了喷雾降温风机在近地面处的降温效果。结果表明,在 T2 阶段,A2 组平均温度降低 0.68 ~ 11.11℃,最大温差范围为 1.80 ~ 13.90℃,A3 组平均相对湿度增加 22.98 ~ 44.17 个百分点。使用 WJ-8010 型喷嘴,在 38℃环境下,喷雾降温风机在 20 m 范围内的降温幅度接近 5℃,降温效果良好。

参 考 文 献

[1] 柏秦凤,霍治国,王景红,等. 中国主要果树气象灾害指标研究进展[J]. 果树学报,2019,36(9):1229 - 1243.
BAI Qinfeng, HUO Zhiguo, WANG Jinghong, et al. Progress in research on meteorological disaster indicators of major fruit trees in China[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(9): 1229 - 1243. (in Chinese)

[2] 姜燕敏,李松平,马军辉,等. 浙南茶树高温热害日数的气候变化特征[J]. 中国农学通报,2019,35(19):102 - 106.
JIANG Yanmin, LI Songping, MA Junhui, et al. Heat injury days of tea in Southern Zhejiang: climate change characteristics [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(19): 102 - 106. (in Chinese)

[3] 任义方,高苹,王春乙. 江苏高温热害对水稻的影响及成因分析[J]. 自然灾害学报,2010,19(5):101 - 107.
REN Yifang, GAO Ping, WANG Chunyi. High temperature damage to paddy rice in Jiangsu Province and its cause analysis [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(5): 101 - 107. (in Chinese)

[4] 万素琴,陈晨,刘志雄,等. 气候变化背景下湖北省水稻高温热害时空分布[J]. 中国农业气象,2009,30(增刊2):316 - 319.
WAN Suqin, CHEN Chen, LIU Zhixiong, et al. Space-time distribution of heat injury on rice in Hubei Province under climate change[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(Supp.2): 316 - 319. (in Chinese)

[5] MAHMOOD A, HU Y G, TANNY J, et al. Effects of shading and insect-proof screens on crop microclimate and production: a review of recent advances[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 241: 241 - 251.

[6] 郭立永,刘继军,王美芝,等. 喷雾冷风机降温对肉牛舍热环境指标及肉牛增重的影响[J]. 中国畜牧杂志,2009,45(23):64 - 67.

[7] KOLLAR L E, FARZANEH M. Modeling the evolution of droplet size distribution in two-phase flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(11): 1255 - 1270.

[8] BURGER M, KLOSE G, ROTTENKOLBER G, et al. A combined eulerian and lagrangian method for prediction of evaporating sprays[J]. Journal of Engineering Gas Turbines Power, 2002, 142: 481 - 488.

[9] TISSOT J, BOULTET P, TRINQUET F, et al. Air cooling by evaporating droplets in the upstream flow of a condenser[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(11): 2122 - 2131.

[10] TISSOT J, BOULETA P, LABERGUE A. Experimental study on air cooling by spray in the upstream flow of a heat exchanger [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 60: 23 - 31.

[11] 刘乃玲,张旭. 压力式螺旋型喷嘴雾化特性实验研究[J]. 热能动力工程,2006,21(5):505 - 507, 547.
LIU Nailing, ZHANG Xu. An experimental study of pressure-type spiral nozzle atomization characteristics[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(5): 505 - 507, 547. (in Chinese)

[12] SURESHKUMAR R, KALE S R, DHAR P L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air— Ⅰ. Experimental data[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5 - 6): 349 - 360.

[13] SURESHKUMAR R, KALE S R, DHAR P L. Heat and mass transfer processes between a water spray and ambient air— Ⅱ. Simulations[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5 - 6): 361 - 371.

[14] COLLIN A, BOULET P, PARENT G, et al. Dynamics and thermal behaviour of water sprays[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2008, 47(4): 399 - 407.

[15] 刘乃玲,杨勇,张旭,等. 细水雾在高温狭长空间降温效果的实验研究[J]. 山东建筑大学学报,2007,22(4):312 - 315.
LIU Nailing, YANG Yong, ZHANG Xu, et al. Experimental study on the cooling effect by fine mist in long and narrow space with high temperature[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2007, 22(4): 312 - 315. (in Chinese)

[16] 刘乃玲,张旭. 螺旋型喷嘴雾化及流量特性实验[J]. 农业机械学报,2006,37(9):79 - 82.
LIU Nailing, ZHANG Xu. Experimental research on spray and flow rate characteristics of spiral nozzle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9): 79 - 82. (in Chinese)

[17] 王军锋,屠欣丞,黄俏梅,等. 半室外环境两相流低压雾化降温数值分析[J]. 排灌机械,2009,27(4):255 - 260.
WANG Junfeng, TU Xincheng, HUANG Qiaomei, et al. Numerical analysis of cooling process in two-phase flow by low pressure atomization in semi-outdoor environment[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(4): 255 - 260. (in Chinese)

[18] 王军锋,屠欣丞,黄继伟,等. 细水雾大空间局域环境调节系统的设计及应用[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):265 - 270.
WANG Junfeng, TU Xincheng, HUANG Jiwei, et al. Design and application of local environment regulation system for water mist in large space[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(3): 265 - 270. (in Chinese)

[19] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part I. Model development and effect of wind speed and direction on sprayer airflow[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 128 - 136.

[20] 张宝民,姬利新,贾晶霞. 果园风送式喷药机国内外研究概况发展现状[J]. 河北农机,2011(2):51 - 52.

[21] MAILLY F, GANI A, BONNOT R, et al. Anemometer with hot platinum thin film[J]. Sensors and Actuators, 2001, 94(1): 32 - 38.

(下转第 151 页)

10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.031.（in Chinese）
[11] 李新成,李民赞,王锡九,等.谷物联合收割机远程测产系统开发及降噪试验[J].农业工程学报,2014,30(2):1－8.
LI Xincheng, LI Minzan, WANG Xijiu, et al. Development and denoising test of grain combine with remote yield monitoring system[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(2): 1－8.（in Chinese）
[12] 马志艳,余昌舜,杨磊,等.基于 LabVIEW 的联合收割机远程作业数据采集系统[J].中国农机化学报,2019,40(2):135－139.
MA Zhiyan, YU Changshun, YANG Lei, et al. Remote operation data acquisition system of combine harvester based on LabVIEW [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(2): 135－139.（in Chinese）
[13] 刘阳春,苑严伟,张俊宁,等.深松作业远程管理系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):43－48.
LIU Yangchun, YUAN Yanwei, ZHANG Junning, et al. Design and experiment of remote management system for subsoiler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 43－48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2016s007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.007.（in Chinese）
[14] GEOFFREY F. High-performance file I/O in Java: existing approaches and bulk I/O extensions[J]. Concurrency and Computation Practice and Experience, 2010, 13(8－9): 713－736.
[15] AWAN A A, AYUB M S, SHAFI A, et al. Towards efficient support for parallel I/O in Java HPC[C]// International Conference on Parallel and Distributed Computing. IEEE, 2012: 137－143.
[16] 顾振德,刘子辰,龙隆,等.基于 Netty 的 IoT 终端通信服务系统设计[J].计算机应用与软件,2019,36(4):135－139.
GU Zhende, LIU Zichen, LONG Long, et al. Design of IoT terminal communication service system based on Netty[J]. Computer Application and Software, 2019, 36(4): 135－139.（in Chinese）
[17] 李林峰.Netty 权威指南[M].北京:电子工业出版社,2014:11－45.
[18] 李培殿.基于 Netty 框架的性能测试系统的设计与实现[D].北京:北京邮电大学,2019.
LI Peidian. Design and implementation of performance test system based on Netty framework[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.（in Chinese）
[19] ZHANG S H, ZHU S N. Server structure based on netty framework for internet-based laboratory[C]// IEEE International Conference on Control and Automation. IEEE, Hangzhou, China, 2013: 538－541.
[20] 苏锦. 基于 Netty 的高性能 RPC 服务器的研究与实现[D].南京:南京邮电大学,2018.
SU Jin. Research and implementation of high performance RPC server based on Netty[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2018.（in Chinese）

(上接第 125 页)

[22] 彭俊杰. 间接式质量流量测量中的技术问题[J]. 航空计测技术,1994,14(1):20－22.
PENG Junjie. Technical problems about indirect mass flow measurement[J]. Aviation Metrology & Measurement Technology, 1994, 14(1): 20－22.（in Chinese）
[23] 茆康前. 茶园防霜风机叶型优化设计与性能试验篇[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
[24] 韩占忠. Fluent:流体工程仿真计算实例与分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2009.
[25] ENDALEW A M, DEBAER C, RUTTEN N, et al. A new integrated CFD modelling approach towards air-assisted orchard spraying. Part Ⅱ: Validation for different sprayer types[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 71(2): 137－147.
[26] 吴崇友,丁为民,石磊,等.油菜分段收获捡拾脱粒机捡拾损失响应面分析[J]. 农业机械学报,2011,42(8):89－93.
WU Chongyou, DING Weimin, SHI Lei, et al. Response surface analysis of pickup losses in two-stage harvesting for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 89－93.（in Chinese）
[27] 杜哲,胡永光,王升. 便携式采茶机切割器运动仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):221－226.
DU Zhe, HU Yongguang, WANG Sheng. Simulation and experiment of reciprocating cutter kinematic of portable tea picking machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 48(Supp.): 221－226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.029.（in Chinese）
[28] 程浈浈,祁力钧,吴亚垒,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.
CHENG 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? flag=1&file_no=2017s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.004.（in Chinese）