doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.016

防霜风机圆弧板叶型降噪结构设计与试验

胡永光[1]　封成岗[1]　汤江文[2]　谢忠洲[1]　张　志[1]

(1.江苏大学农业工程学院,镇江 212013;2.中国测试技术研究院,成都 610021)

摘要:夜间作业时茶果园防霜风机产生的噪声严重影响周边居民,为降低圆弧板叶型防霜风机的气动噪声,进行了锯齿降噪结构设计。以锯齿长度、宽度、个数和位置为试验因素,以叶轮轴线正前方 1 m 处声压级和出口面平均风速为评价指标,采用数值模拟和响应面法结合的方式优化锯齿结构参数。优化结果表明:锯齿参数对声压级影响由大到小为锯齿宽度、个数、长度、位置;对风速影响由大到小为锯齿位置、宽度、个数、长度。最优参数组合为锯齿长度 26.0 mm、宽度 11.6 mm、个数 16、位置 480.0 mm。对锯齿叶型进行了性能测试,试验结果表明,锯齿叶型正前方、正后方和径向右侧各监测点的声压级比对照叶型平均降低 7.71%,距离锯齿叶型风机 30 m 处的声压级低于国标限值 45.0 dB。两款叶型风速分布趋势相近,在 12 m 处测得,对照叶型和锯齿叶型的最大风速分别为 3.19、3.17 m/s。两款叶型均能够产生较好的温升效果,锯齿叶型在 10、15 m 处平均温升分别为 2.8、3.2℃;对照叶型在 10、15 m 处平均温升分别为 3.0、3.1℃,两者无显著差异。结果表明,在保证防霜性能的前提下,锯齿叶型可有效降低风机噪声。

关键词:防霜风机;叶型;锯齿结构;降噪;数值模拟

中图分类号:S224.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)03-0158-11　　**OSID**:

Structure Design and Test on Noise Reduction for Frost Protection Wind Machine of Arc-plate Blade

HU Yongguang[1]　FENG Chenggang[1]　TANG Jiangwen[2]　XIE Zhongzhou[1]　ZHANG Zhi[1]

(1. *School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang* 212013, *China*
2. *National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu* 610021, *China*)

Abstract: The noise generated by the frost protection wind machine in the tea orchard at night had a serious impact on the surrounding residents, to reduce the aerodynamic noise of the frost protection wind machine of arc-plate blade, a sawtooth noise reduction structure was designed. Taking the length, width, number and position of the sawtooth as the test factors, and the sound pressure level (SPL) at 1 m directly in front of the impeller axis and the average wind speed at the outlet surface as the evaluation index, the combination of numerical simulation and response surface method was used to optimize the structural parameters of the sawtooth. The optimization results showed that the significant order of the influence of sawtooth parameters on the SPL was the width, number, length and position of the sawtooth; the significant order was the sawtooth position, width, number and length on wind speed. The optimal parameter combination was the sawtooth length of 26.0 mm, width of 11.6 mm, number of 16, and position of 480.0 mm. The performance test of the sawtooth blade was carried out. The test results showed that the SPL at a distance of 30 m from the sawtooth-blade fan was lower than the national standard limit of 45.0 dB, and the SPL at the front, rear and radial right points of the sawtooth blade were reduced by an average of 7.71% compared with the control blade. The wind speed distribution trends of the two blade types were similar and both could produce a good temperature rise effect. The maximum wind speeds of control blade type and sawtooth blade type were 3.19 m/s and 3.17 m/s, respectively, which were both measured at 12 m. The average temperature rises of leaf type at 10 m and 15 m were 2.8℃ and 3.2℃, respectively; the average temperature rise of control leaf type at 10 m and 15 m were 3.0℃ and 3.1℃, respectively, and there was no significant difference between the two. The sawtooth blade type could effectively reduce the noise of the fan on the premise of ensuring the frost protection performance.

Key words: frost protection wind machine; blade; sawtooth structure; noise reduction; numerical simulation

收稿日期:2022-05-25　修回日期:2022-06-14

基金项目:江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD-2018-87)

作者简介:胡永光(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事茶果园生产技术与装备研究,E-mail:deerhu@163.com

0　引言

近年来为应对日益严重的茶、果园霜冻害损失，基于近地逆温层气流扰动的防霜风机在国内已得到初步推广应用[1]，而国内农业发展多为个体农民经济，茶、果园临近村庄，因此防霜风机的布置与村庄也较为接近，且防霜风机为夜间工作，其噪声会影响周围居民。《中华人民共和国环境噪声污染防治法》规定：乡村住宅区夜间噪声不得超过 45.0 dB[2]。在镇江一茶场实地考察时发现，距风机机群 30 ~ 400 m范围内均有村庄分布。机群夜间作业时，距离机群较近的村庄噪声已超过 50.0 dB。另外，当前我国针对圆弧板叶型防霜风机的研究重点多集中在扩大防霜面积，提高送风能力方面，针对其噪声的研究并不多。

圆弧板叶型防霜风机属于轴流风机的一种，轴流风机噪声包括机械噪声、电磁噪声以及气动噪声等，其中气动噪声占比最大[3]。提高加工精度和电机调控可降低机械和电磁噪声，气动噪声较难控制。降低风机气动噪声的方法可分为主动降噪和被动降噪，主动降噪方法大致可分为两类[4]：①叶型结构参数优化设计，包括轮毂比、安装角、掠角、弦长等参数。②将仿生技术应用于风机降噪中，如基于低噪声飞行动物的翼羽特征衍生的叶片前缘和尾缘锯齿结构、表面沟槽结构、导流叶片等。文献[5 - 7]研究了叶片安装角、弯角和掠角等叶型参数对风机流场、声场的影响，并进行了参数优化。GAMBINO 等[8]研究了翼型防霜风机的声场特性。PEARSE 等[9]提出了一种噪声预测模型，并验证了模型准确性。文献[10 - 12]研究了锯齿尾缘对轴流风机噪声和气动性能的影响，但锯齿设计为直接选型。张金凤等[13]研究了管道泵的流动噪声特性并设计了仿生锯齿降噪结构，取得了较好的降噪效果。文献[14 - 15]探究了风机宽频噪声特性和产生机理。文献[16 - 18]给出了仿生前缘降噪的流动机理，并对波浪形前缘的降噪机理进行了深入研究，得到了最佳降噪效果的前缘设计原则。基于仿生降噪技术的锯齿结构能够有效降低风机气动噪声，但至今为止锯齿设计与选型仍然较为主观[19]。

本文针对圆弧板叶型防霜风机产生的气动噪声，设计锯齿降噪结构，以锯齿长度、宽度、个数和位置为试验因素，以声压级和风速作为评价指标，利用数值模拟和响应面结合的方法优化锯齿参数，寻求较优的参数组合，以期在不改变电机功率、保证防霜性能的条件下，降低风机噪声。

1　风机防霜技术与降噪结构参数

1.1　风机防霜原理

防霜风机工作的基本原理是利用霜冻夜产生的气温“上高下低”的逆温现象，采用机械装备扰动空气，提升冠层温度，这种方法也称为逆温胁迫法[1]，如图 1 所示。

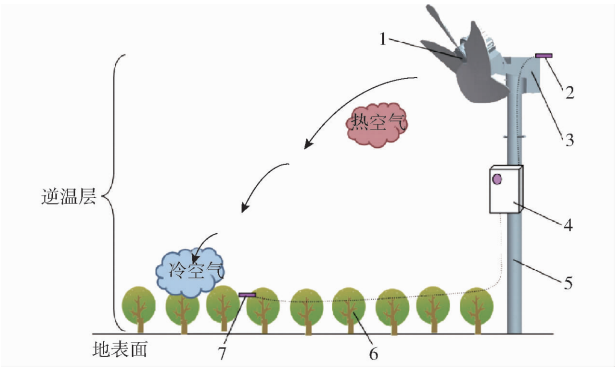

图 1　风机防霜原理

Fig. 1　Frost protection principle of wind machine

1. 防霜风扇　2、7. 温度传感器　3. 转动云台　4. 控制箱　5. 立柱　6. 茶树

1.2　降噪结构参数

圆弧板叶型防霜风机安装高度为 7.0 m，安装俯角 35°，电机额定功率 3.0 kW，叶片回转直径为 1 040 mm，转速为 960 r/min。简化轮毂、螺纹孔等，在叶轮尾缘布置锯齿结构，建立圆弧板叶片模型。锯齿结构参数有：锯齿位置、个数、形状、长度、宽度等。本文将锯齿形状设定为常见的 V 形锯齿，锯齿之间连续排列，即每个锯齿单元齿根处首尾相连；锯齿位置定义为：正视风机时，最外侧锯齿齿尖与叶轮轴心之间的距离，每一个锯齿单元长度、宽度均相同，如图 2 所示。添加锯齿结构可采用附加式和切割式[19]，为保证风机运转时叶片强度，采用切割式

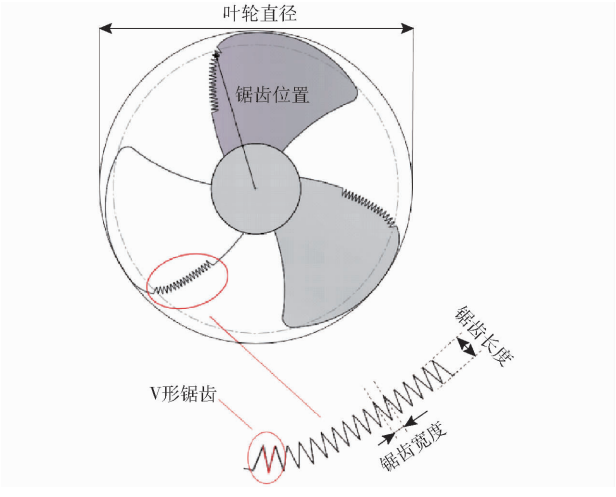

图 2　风机叶轮模型

Fig. 2　Model of fan impeller

方法添加锯齿结构。

2 数值模拟与验证

2.1 计算模型与网格划分

防霜风机工作时既公转也自转,且受到自然风速、农作物、地形等因素的影响,环境复杂多样,因此对仿真计算模型做简化处理:

(1)防霜风机云台转动时,每个角度风速分布情况在空间上近似,因此将模型简化为云台静止情况下,叶轮扰动正前方的气流,默认自然风速为 0 m/s。

(2)忽略立柱、云台、电机等,仅保留叶轮,并结合以往的相关研究,将计算域简化为长 60 m,宽 40 m,高 10 m 的长方体,风机旋转区域添加一风罩,为风机旋转域,其余部分为静止的外流域。

(3)本模型忽略农作物高矮的影响,默认农作物植株冠层高度为 1.0 m。

仿真模型如图 3 所示,防霜风机置于长方体区域的一侧上方,叶轮中心距长方体底面为 7.0 m,距左侧壁面为 5.0 m,并对旋转域与外流域的重合部分进行布尔运算。

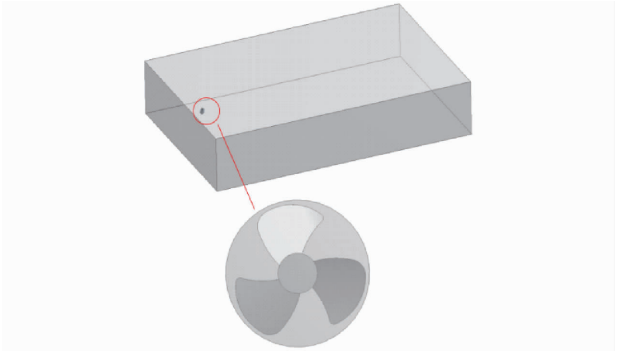

图 3 气流扰动模型

Fig. 3 Airflow disturbance model

对仿真模型进行网格划分,风机叶轮区域和相邻计算域之间的连接面进行网格加密处理并做网格无关性分析,分别对不同数量级的网格划分结果进行模拟计算。本文主要研究其风速和声压级,因此,取风机出口面上的平均风速与叶轮轴线正前方 1.0 m 处的声压级来进行网格无关性验证,如图 4 所示。最终仿真模型网格数量约 6×10^6,网格划分结果如图 5 所示。

2.2 边界条件与计算方法

对流场和声场进行数值模拟,根据风机实际运转情况设置边界条件:空气入口与外界边界相通,设置为压力进口,出口设置为压力出口;所有边界条件设置为 wall 的壁面均采用无滑移边界条件,旋转域即叶轮区域,转速设定为 960 r/min,各个计算域之间采用 interface 交界面进行连接。气动噪声的模拟

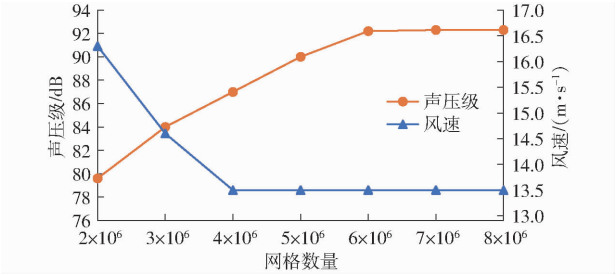

图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

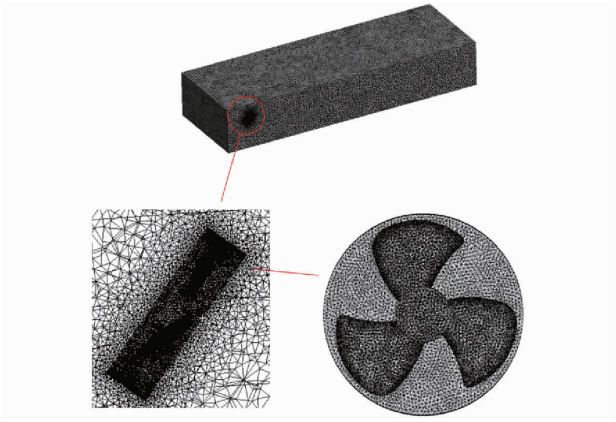

图 5 网格划分结果

Fig. 5 Grid generation results

为瞬态问题,其声压幅值往往比流场宏观流动的压力小若干个数量级,因此需要捕捉瞬态流场的精确特征才能获得较为准确的声源信息,同时为减少计算量,首先选择 $k-\varepsilon$ 模型分析稳态流场,在稳态流场的基础上,计算模式切换为瞬态模式,湍流模型选择 LES 大涡模拟,获得瞬态流场声源表面的压力脉动等参数,再通过 FW-H 声类比理论[20-21]获得声源区域远场噪声的声压级及声压脉动等声场信息。

2.3 仿真验证

2.3.1 试验仪器与方法

试验仪器包括 TAWA5680 型多功能声级计(测量范围 0~130 dB)、泰仕 AVM-07 型手持式风速计(测量范围 0~45 m/s,精度 ±0.3 m/s)、卷尺等。

风机噪声性能测试参照文献[22-23]。因噪声试验处于田间,被测对象的噪声无法准确获得,只能测得机器运转时的声压级和机器停止运转时背景噪声的声压级之和,故需引入背景噪声修正因子 ΔL 对噪声进行修正。修正公式为

$$L_P = L_T - \Delta L \tag{1}$$

其中

$$\Delta L = -10\lg(1-10^{0.1(L_B-L_T)}) \tag{2}$$

式中 L_P——机器真实声压级,dB

L_B——背景噪声,dB

L_T——背景噪声和机器噪声总声压级,dB

根据上述标准,当 $L_B-L_T\geqslant15.0$ dB 时,ΔL 为零;当 $L_B-L_T<15.0$ dB 时,按照式(1)、(2)进行噪

声修正[23]。

测试风机噪声时，首先测试环境背景噪声，背景噪声小于 35.0 dB。另外噪声测试时间点前后自然风速小于 0.5 m/s，以降低自然风对噪声测试结果的影响。风机噪声测点参照文献[22－23]以及日本小型防霜风机噪声测试标准布置，分别在风机正前方、径向右侧、以及正后方 3 个方向的 30.0 m 范围内布置噪声监测点，每个方向布置 11 个监测点；其中叶轮轴线正前方 1.0 m 处设置一个监测点（点 *A*），距地面 1.5 m 水平线每隔 2.0 m 布置一个监测点（点 *B* ~ *G*），10.0 m 后，每隔 5.0 m 布置一个监测点（点 *H* ~ *K*），如图 6 所示。另外两个方向的监测点布置方法与正前方相同，测试噪声时，风机云台保持静止，每个监测点测试 3 次，取平均值。

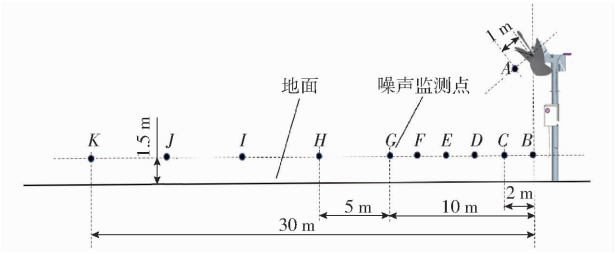

图 6　风机正前方噪声测点

Fig. 6　Noise measurement points directly in front of fan

2.3.2　试验结果

图 7 为风机 3 个方向的声压级对比，当所测声压级与背景噪声声压级差值小于 15.0 dB 时，根据所述相关标准进行了修正，本文均为修正后声压级，未列出修正前声压级。随着与风机距离的增加，各监测点的声压级逐渐降低。原因为声源在辐射噪声时，声波会向四面八方传播，声能逐渐分散衰减，故导致声压级不断降低；此外，还有空气、地面和作物对声波的吸收，都导致了声压级随距离增大而逐渐降低，且衰减更快。声压级最大值在叶轮轴线正前方 1.0 m 处取得，其值为 97.0 dB，最小值在风机径向右侧 30.0 m 处取得，其值为 50.9 dB。其中，该风机正前方各监测点的声压级高于径向右侧和正后方的声压级，比径向右侧的各监测点声压级最大值高 6.39%，各点平均值高 3.49%；比正后方的各监测点声压级最大值高 4.55%，各点平均值高 3.27%。径向右侧与正后方的声压级分布趋势和数值均相近，正前方为风机送风区域，当有风时，声速应该叠加上风速，传播稍快，故导致前方风速覆盖区域声压级偏大。

风机在正前方、径向右侧和正后方的噪声分布规律大致相同，正前方各点的声压级最高，正前方的声压级模拟值和实测值对比如表 1 所示。不同监测点处声压级实测值与模拟值最大误差为3.20%，最小误差为 0.75%。

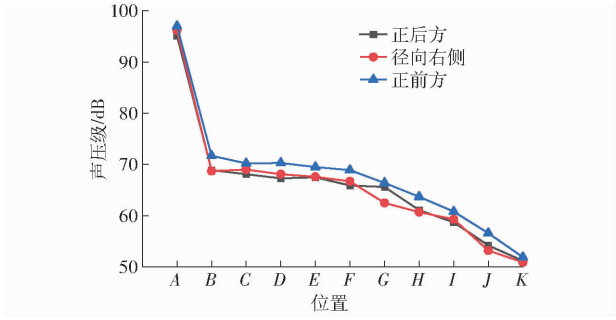

图 7　风机不同方向声压级对比

Fig. 7　Comparison of fan SPL in different directions

表 1　风机正前方的声压级实测值与模拟值

Tab. 1　Measured and simulated value of SPL directly in front of fan

监测点	声压级实测值/dB	声压级模拟值/dB	误差/%
A	97.0	93.97	3.12
B	71.7	70.94	1.06
C	70.2	69.61	0.84
D	70.3	68.05	3.20
E	69.5	68.13	1.97
F	68.9	67.59	1.90
G	66.4	65.90	0.75
H	63.7	62.59	1.74
I	60.8	60.34	0.76
J	56.6	55.40	2.12
K	51.9	51.32	1.12

3　锯齿结构优化设计

锯齿结构是基于低噪声飞行动物的翼羽特点衍生出的降噪技术[19]，锯齿结构各参数与噪声和气动性能的关系并不明确。本文选择锯齿位置、宽度、长度、个数为优化参数，首先对以上 4 个参数进行单因素仿真试验，观察其各参数对声压级和风速的影响趋势，确定声压级较低且风速较大时对应的锯齿参数的区间范围，进而在该区间内利用响应面法[24－25]优化锯齿结构参数。将风机出口面平均风速 V（m/s）（简称风速）作为气动性能的评价指标；距离叶轮轴线正前方 1.0 m 处的声压级 L_P（dB）（简称声压级）作为噪声性能的评价指标。

3.1　单因素仿真试验

改变锯齿位置、宽度、长度、个数，建立不同锯齿模型附于叶片尾缘进行仿真计算，其中锯齿参数如表 2 所示。

表 2　锯齿参数

Tab. 2　Value range of sawtooth parameters

参数	锯齿位置/mm	锯齿长度/mm	锯齿宽度/mm	锯齿个数/个
数值	280 ~ 500	5 ~ 35	5 ~ 25	6 ~ 26

锯齿位置最大值设定为尾缘接近叶轮最顶部 500 mm 处,叶轮根部对应锯齿位置最小值为 280 mm;锯齿位置范围确定后,整段锯齿长度由宽度和个数共同决定;同时锯齿长度不可过大,否则会严重影响风机气动性能。

风机单因素仿真试验结果如图 8 所示。由图 8 可知,随着锯齿位置逐渐靠近叶轮轴心,风速逐渐增大,声压级先增大后呈波动上升趋势,声压级降低主要是由于尾缘锯齿干扰涡的产生和破碎,当锯齿位置靠近轴心时,对尾缘涡破碎的效果变差,因此噪声增大。随着锯齿长度的减小,声压级先降低,然后逐渐增大,风速则呈相反的变化趋势。随着锯齿宽度的增大,声压级先降低然后增大,但风速呈先下降后上升而后再次下降的趋势;锯齿长度和宽度过大时,会导致风速下降,声压级增大。当锯齿尺寸变小时,锯齿结构相对于叶轮尺寸而言已经过小,降噪效果逐渐降低。当锯齿个数增加时,声压级先降低后出现突变,然后缓慢增大,风速则呈下降趋势,猜测当锯齿尺寸过大或锯齿个数过多时,叶轮有效面积减小,会影响到风机气动性能,降低送风能力,无法降噪,同时极大地影响风机风量、风速和风压。

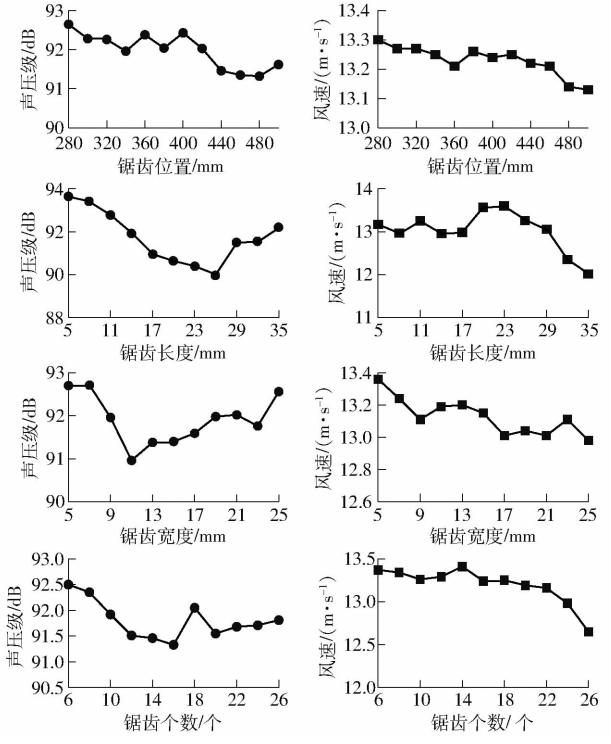

图 8 锯齿各参数对声压级和风速的影响

Fig. 8 Influence of sawtooth parameters on SPL and wind speed

3.2 响应因素分析与结果

3.2.1 试验因素及水平

根据前述锯齿参数与声压级的单因素仿真试验结果,兼顾风速的同时选取声压级较低时对应的各锯齿参数的区间范围,选取锯齿长度为 20 ~ 26 mm,个数为 12 ~ 16 个,宽度为 11 ~ 15 mm,位置为 440 ~ 480 mm。同样以声压级和风速作为评价指标,因素编码如表 3 所示。

表 3 因素编码

Tab. 3 Factors coding

编码	因素			
	锯齿长度/mm	锯齿个数/个	锯齿宽度/mm	锯齿位置/mm
-1	20	12	11	440
0	23	14	13	460
1	26	16	15	480

3.2.2 试验方案与结果分析

不同参数组合风机叶轮试验方案及结果如表 4 所示。a、b、c、d 为编码值,表 5、6 分别为声压级和风速的方差分析结果。

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Experiments scheme and results

序号	因素				指标	
	a	b	c	d	声压级/dB	风速/(m·s⁻¹)
1	0	1	0	-1	87.27	13.86
2	0	0	1	1	88.30	13.49
3	0	-1	-1	0	89.14	12.91
4	0	-1	0	1	90.72	13.32
5	0	1	0	1	87.13	14.14
6	1	0	-1	0	86.31	12.89
7	1	1	0	0	86.72	13.30
8	0	-1	1	0	91.41	13.05
9	1	0	1	0	88.63	13.25
10	-1	0	1	0	90.22	12.91
11	-1	0	0	-1	89.70	13.03
12	-1	0	-1	0	87.90	12.93
13	-1	0	0	1	89.51	13.83
14	0	0	0	0	88.41	12.71
15	1	-1	0	0	90.30	12.49
16	-1	1	0	0	88.35	12.87
17	0	0	0	0	88.30	12.80
18	0	1	-1	0	85.50	13.70
19	1	0	0	-1	88.01	13.21
20	0	0	0	0	88.26	12.88
21	-1	-1	0	0	91.90	12.53
22	0	1	1	0	87.82	13.58
23	0	0	-1	1	86.20	13.80
24	0	0	-1	-1	87.40	12.05
25	0	-1	0	-1	90.91	12.40
26	1	0	0	1	87.92	13.59
27	0	0	1	-1	89.41	12.78

由表 5、6 可知,声压级和风速的模型 $P < 0.01$,模型极显著;两者失拟度 $P > 0.05$,失拟不显著,试验因素与响应值之间存在显著关系。风机声压级 L_P 与各因素编码值回归方程为

表 5　声压级方差分析

Tab. 5　Sound pressure level variance analysis

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	68.180 0	14	4.870 0	78.240 0	<0.000 1
a	7.820 0	1	7.820 0	125.710 0	<0.000 1
b	38.840 0	1	38.840 0	624.060 0	<0.000 1
c	14.830 0	1	14.830 0	238.250 0	<0.000 1
d	0.710 5	1	0.710 5	11.420 0	0.005 5
ab	0.000 2	1	0.000 2	0.003 6	0.953 0
ac	0.000 0	1	0.000 0	0.000 0	1.000 0
ad	0.002 5	1	0.002 5	0.040 2	0.844 5
bc	0.000 6	1	0.000 6	0.010 0	0.921 8
bd	0.000 6	1	0.000 6	0.010 0	0.921 8
cd	0.002 0	1	0.002 0	0.032 5	0.859 9
a^2	0.898 4	1	0.898 4	14.430 0	0.002 5
b^2	2.070 0	1	2.070 0	33.250 0	<0.000 1
c^2	1.300 0	1	1.300 0	20.850 0	0.000 6
d^2	0.007 2	1	0.007 2	0.115 2	0.740 2
残差	0.746 9	12	0.062 2		
失拟度	0.734 9	10	0.073 5	12.180 0	0.078 2
纯误差	0.012 1	2	0.006 0		
总和	68.930 0	26			
R^2	0.989 2				
调整 R^2	0.976 5				
预测 R^2	0.938 2				

表 6　风速方差分析

Tab. 6　Wind speed variance analysis

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	3.920 0	4	0.979 0	7.840 0	0.000 4
a	0.033 1	1	0.033 1	0.265 0	0.611 9
b	1.880 0	1	1.880 0	15.060 0	0.000 8
c	0.050 7	1	0.050 7	0.406 2	0.530 5
d	1.950 0	1	1.950 0	15.640 0	0.000 7
残差	2.750 0	22	0.124 8		
失拟度	2.730 0	20	0.136 6	18.880 0	0.051 4
纯误差	0.014 5	2	0.007 2		
总和	6.660 0	26			
R^2	0.587 8				
调整 R^2	0.512 9				
预测 R^2	0.374 8				

$$L_P = 88.32 - 0.8075a - 1.8b + 1.11c - 0.243\,3d - 0.007\,5ab + 0.025ad + 0.012\,5bc + 0.012\,5bd + 0.022\,5cd + 0.410\,4a^2 + 0.622\,9b^2 - 0.493\,3c^2 + 0.036\,7d^2 \quad (3)$$

风机出口面平均风速 V 与各因素编码值回归方程为

$$V = 13.12 + 0.052\,5a + 0.395\,8b + 0.065c + 0.403\,3d \quad (4)$$

在回归方程中，各因素系数绝对值表示因素对响应值的影响程度，绝对值越大则影响越显著，故由式(3)、(4)可知，各因素对声压级影响由大到小为 b、c、a、d；对风速影响由大到小为 d、b、c、a。

由方差分析可知，锯齿各参数交互作用对风速的影响较小，故只对声压级进行双因素交互作用分析，不再分析风速的双因素交互作用。

如图 9a 所示，将锯齿宽度和个数固定在 0 水平，锯齿叶型的声压级随长度增大而缓慢降低，随位置的减小而缓慢增大；如图 9b 所示，将锯齿宽度和位置固定在 0 水平，锯齿叶型的声压级同样随长度增大而缓慢降低，但随个数的减少而增大。

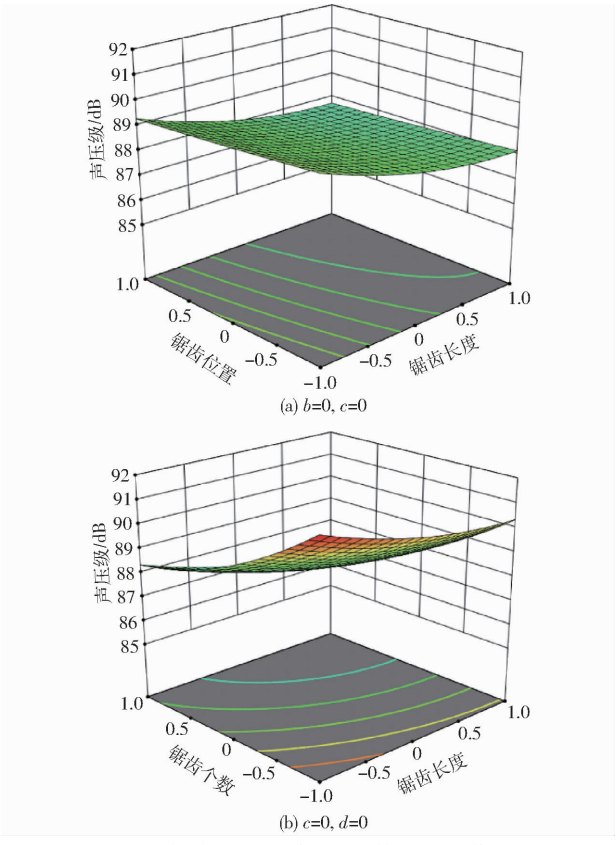

图 9　锯齿长度和位置、个数的交互作用

Fig. 9　Interaction of sawtooth length with position and number

如图 10a 所示，将锯齿个数和位置固定在 0 水平，当锯齿宽度不变时，锯齿叶型的声压级随长度的增大而缓慢降低，当锯齿长度不变时，锯齿叶型的声压级随宽度的增大而缓慢增大，呈正相关关系。如图 10b 所示，将锯齿长度和锯齿位置固定在 0 水平，锯齿宽度和个数的交互作用对声压级的影响与宽度和长度的交互作用对声压级的影响类似，但锯齿宽度和个数的响应曲面更为陡峭，当锯齿宽度不变时，锯齿叶型的声压级随锯齿个数的增加而呈现快速下降趋势，当锯齿个数不变时，锯齿叶型的声压级随锯齿宽度的减小而快速降低。

如图 11a 所示，将锯齿长度和锯齿宽度固定在 0 水平，锯齿叶型的声压级受锯齿位置的影响较小，受个数影响较大，位置改变，声压级的改变较为平缓，近似线性变化，当位置与个数均达到高水平时，声压级

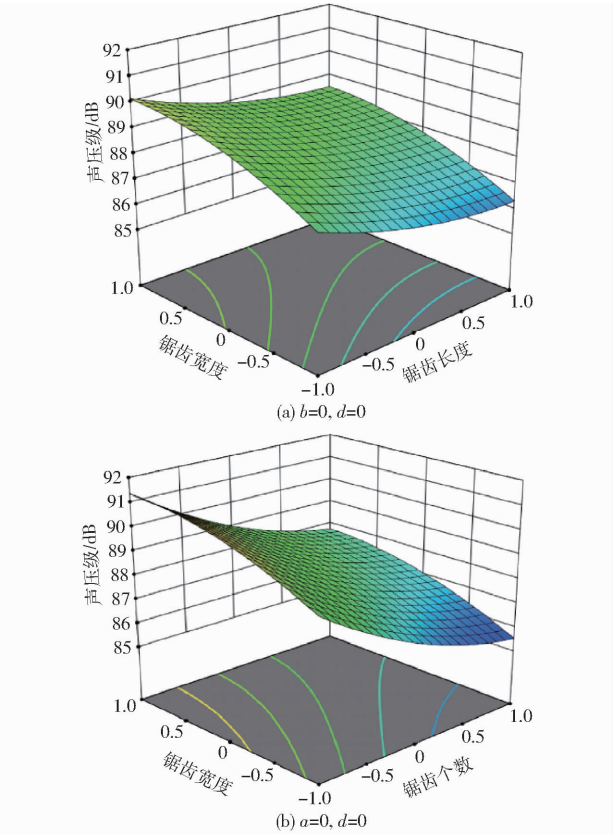

图 10 锯齿宽度和长度、个数的交互作用

Fig. 10 Interaction of sawtooth width and length and number

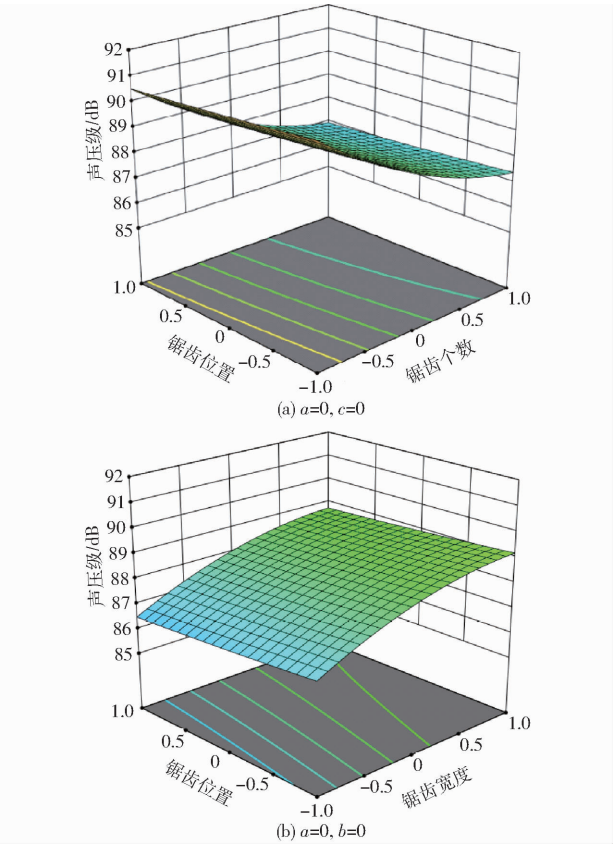

图 11 锯齿位置和个数、宽度的交互作用

Fig. 11 Interaction of sawtooth position and number and width

最低;如图 11b 所示,将锯齿长度和锯齿个数固定在 0 水平,响应曲面整体非常平缓,锯齿叶型的声压级随宽度的增大缓慢增大,随位置的增大缓慢降低。

以声压级最低、风速最大为优化目标,利用响应面法对回归模型进行优化求解,得到锯齿结构的较优参数组合:锯齿长度 26 mm、锯齿宽度 11.6 mm、锯齿位置 480 mm、锯齿个数 16,此时声压级为 87.30 dB,风速为 13.20 m/s。

图 12、13 为锯齿叶型和对照叶型的涡量分布图和湍动能分布图,其涡量分布和湍动能分布规律均类似。由叶轮中心向外,涡量越来越大,对照叶型涡量分布较为混乱,降噪叶型叶片表面涡量相对均匀且较小,叶片表面附近的湍流强度下降,进而气动噪声有所降低;湍动能同样在叶片顶部和叶片尾缘附近达到最大值,但锯齿叶型湍动能明显减小。

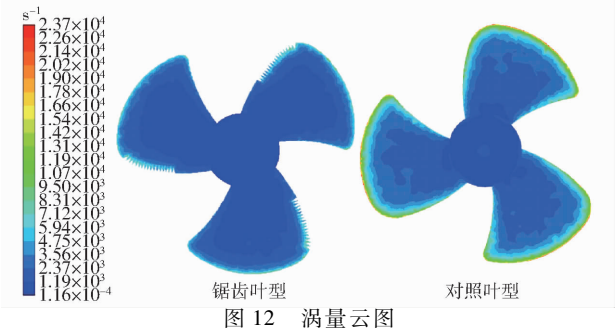

图 12 涡量云图

Fig. 12 Vorticity contours

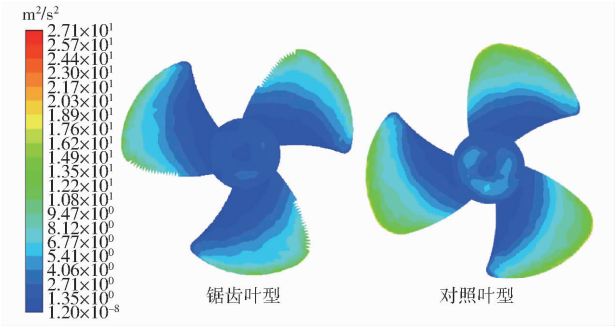

图 13 湍动能云图

Fig. 13 Turbulent kinetic energy contours

图 14 为锯齿叶型和对照叶型在叶轮轴面上扰动气流的风速分布,风机前方存在一个约 5.0 m 的防霜盲区,整体风速分布规律相差不大,风速均在距风机 35.0 m 的位置衰减到 2.0 m/s。

4 性能试验

4.1 试验仪器与方法

试验仪器包括 TAWA5680 型多功能声级计、泰仕 AVM-07 型手持式风速计、ZDR-3WIS 型温度自动记录仪(温度测量范围 -40 ~ 100℃,精度 ±0.5℃)、卷尺、FLUKE 钳形电流表等。对锯齿叶型进行田间性能测试,包括噪声、风速分布、防霜性

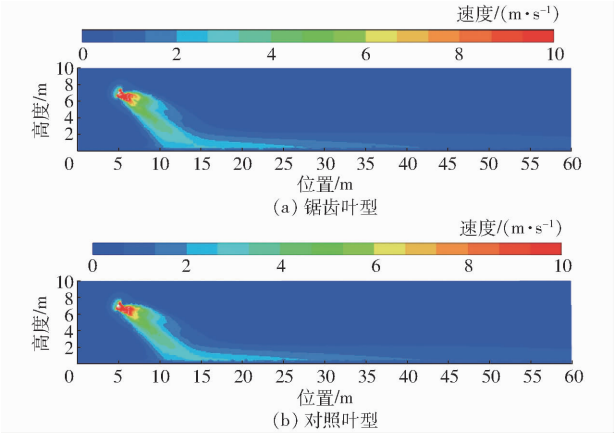

图 14　两款叶型在叶轮轴面上的风速分布

Fig. 14　Wind speed distribution of two blade profiles on impeller shaft surface

能和叶轮功率，图 15 为试验样机。噪声测试依照 2.3 节所述方法进行。风速测试方法为：防霜风机云台静止，以风机叶轮轴线在地面上的投影为中心线，在该中心线上每隔 2.0 m 布置一个风速监测点，监测点高度布置在茶树冠层位置；每个监测点测试 5 次，取平均值作为该测试点风速，风速测试时自然风速小于 0.5 m/s。防霜性能测试方法为：风机云台转动，摆动范围 120°，在防霜风机风速覆盖区域的中心线上每隔 5.0 m 布置一个温度监测点，共 5 个监测点，监测点高度布置在茶树冠层位置，监测点布置如图 16 所示。在霜夜条件下，当晚 20:00 启动系统并连续运行，夜间每隔 0.5 h 记录一次温度，并与外界无风机作用区域的气温对比，比较两款风机的防霜温升效果。同时使用钳形电流表测试风机运转时电流，计算其实际消耗功率。

4.2　试验结果分析

4.2.1　噪声对比

图 17 为对照叶型与锯齿叶型声压级对比。由图 17 可知，锯齿叶型的声压级整体低于对照叶型，且衰减速度更快。与对照叶型相比，锯齿叶型正后方各监测点平均降噪幅度为 9.65%，正前方各监测点平均降噪幅度为 8.83%，径向右侧各监测点平均降噪幅度为 4.66%，3 个方向的平均降噪幅度为 7.71%。距离锯齿叶型风机 30.0 m 处的声压级已低于国标限值 45.0 dB。锯齿结构干预了叶片附近的气流，产生的气动噪声降低。随着距离增加，声能分散，辐射出的气动噪声也随之降低。



图 15　锯齿叶型试验样机

Fig. 15　Sawtooth blade test prototype

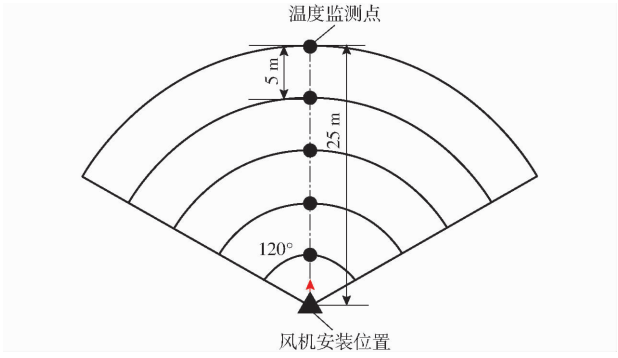

图 16　风机防霜时温度测点布置

Fig. 16　Layout of temperature measuring points during frost protection

4.2.2　风速对比

图 18 为锯齿叶型风速模拟值与实测值对比，试验所得风速变化趋势与仿真结果相近，最大风速均在 12 m 处取得；而试验测得的送风最远距离约为 30 m，但在仿真中，30 m 以后仍然存在 1.0 m/s 以上的风速，这是由于在仿真模型中给风机叶轮增加了一个旋转风罩，导致送风距离大大增加，而在茶园环境中，叶轮并没有集流风罩，气流发展的过程中也会

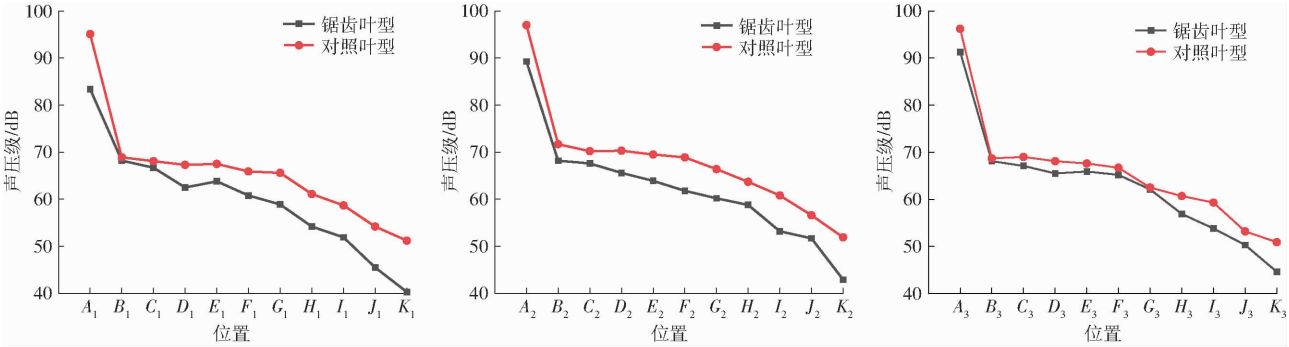

图 17　不同方向的声压级对比

Fig. 17　Comparison of SPL in different directions

受到茶树的阻碍与遮挡,导致送风距离较短。图 19 为锯齿叶型与对照叶型实测风速对比,相同安装参数下,均存在一个约 5.0 m 的防霜盲区,这也与仿真结果相对应。对照叶型的最大风速为 3.19 m/s,锯齿叶型的最大风速 3.17 m/s,均在 12.0 m 处测得,在距风机 5 ~ 20 m 的范围内,风速可维持在 2.0 m/s 以上。锯齿结构并未改变空间上的气流和风速分布,叶轮送风能力无明显差异。

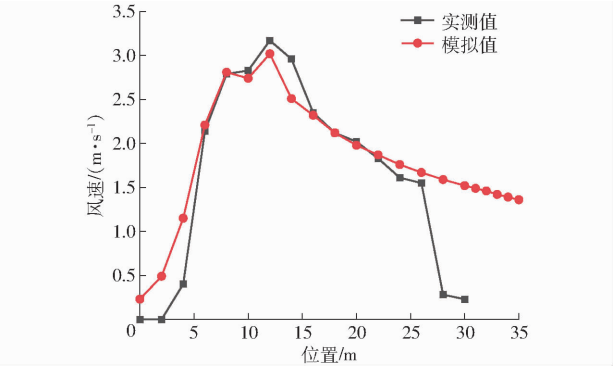

图 18 锯齿叶型风速模拟值与实测值对比

Fig. 18 Comparison between simulated and measured wind speed of sawtooth blade

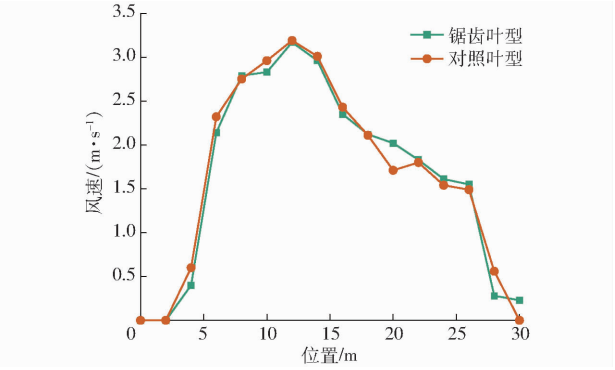

图 19 锯齿叶型与对照叶型风速实测值对比

Fig. 19 Comparison of measured wind speed between sawtooth blade and control blade

4.2.3 防霜性能对比

在防霜风机摆头的情况下,对锯齿叶型与对照叶型风速覆盖区域正前方中心轴各段温度的持续监测,表 7、8 为霜夜当日 19:30 至次日凌晨 02:00 的温度变化情况,由表 7、8 可知,5 m 处的监测点为防霜盲区,此区域内无气流扰动作用。10 ~ 20 m 之间较盲区位置温度较高,20 m 之后,温度开始降低,但仍高于盲区温度。温升效果与风速分布相对应,风速大的位置,上方暖空气与冠层处冷空气混合充分,温升较高,随着距离增加,风速减小,温升效果也降低。因此对距离风机 10、15 m 两个监测点的温度变化做进一步分析。

锯齿叶型和对照叶型在位置 10、15 m 处温度变化曲线如图 20 所示,与无风机作用区域相比,两款

表 7 锯齿叶型各测点温度

Tab. 7 Temperature changes of each temperature measuring point of sawtooth blade ℃

时刻	位置/m				
	5	10	15	20	25
19:30	1.4	0.5	0.8	0.1	-0.2
20:00	1.6	0.2	1.3	0.5	-0.2
20:30	-0.1	0.5	0.3	0.1	0.6
21:00	0.8	0.7	1.3	1.5	0.6
21:30	0.8	2.7	2.9	1.9	0.7
22:00	-1.2	2.7	2.9	2.0	0.6
22:30	-0.5	2.9	3.1	1.0	1.4
23:00	-0.3	1.7	2.3	1.3	1.3
23:30	-0.4	2.4	3.2	1.3	0.6
00:00	-0.7	1.5	2.2	2.1	0.4
00:30	-1.3	2.4	2.7	1.1	0.9
01:00	-1.8	0.4	1.4	1.7	0.4
01:30	-2.2	2.1	2.5	1.5	0.3
02:00	-1.2	2.1	2.3	1.7	-0.5

表 8 对照叶型各测点温度

Tab. 8 Temperature changes of each temperature measuring point of control blade ℃

时刻	位置/m				
	5	10	15	20	25
19:30	1.9	0.8	1.0	0.8	-0.3
20:00	1.8	0.7	1.3	0.7	0.9
20:30	0.4	0.7	0.5	0.3	0.4
21:00	0.1	0.9	1.2	0.4	0.2
21:30	0.9	0.7	2.8	0.1	-0.3
22:00	-1.6	3.0	1.6	1.1	0.8
22:30	-0.8	3.3	2.8	1.2	1.0
23:00	-0.3	3.1	2.4	1.8	1.2
23:30	-0.4	1.9	2.2	1.5	1.2
00:00	-0.6	2.4	2.2	1.2	1.9
00:30	-1.4	2.7	3.0	1.9	2.2
01:00	-1.6	2.5	2.8	1.7	1.6
01:30	-1.7	2.7	2.4	1.0	0.4
02:00	-1.8	2.0	2.4	-0.2	0

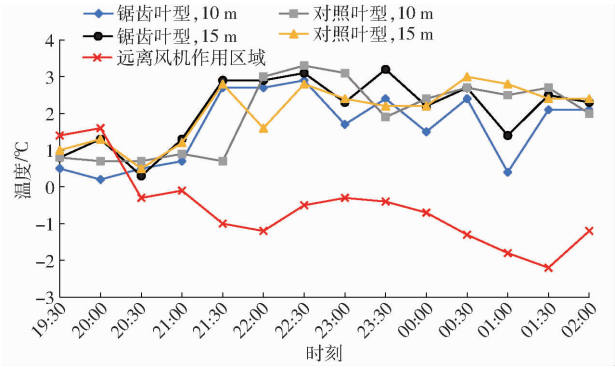

图 20 两款叶型在位置 10 m 和 15 m 处测点的温度变化曲线

Fig. 20 Temperature variation trends of two blade profiles at 10 m and 15 m

叶型均能够产生较好的升温效果，且温度变化趋势相近；锯齿叶型在位置 10 m 处最大温升为 4.3℃，平均温升为 2.8℃，在位置 15 m 处最大温升为 4.7℃，平均温升为 3.2℃；对照叶型在位置 10 m 处最大温升为 4.7℃，平均温升为 3.0℃，在位置 15 m 处最大温升为 4.6℃，平均温升为 3.1℃；两者无显著差异。

对照叶型实际消耗功率为 2.62 kW，锯齿叶型实际消耗功率为 2.36 kW，锯齿叶型与对照叶型相比降低 9.92%，因此无需重新进行电机选型，即不改变电机功率。

5　结论

（1）优化设计了一种锯齿降噪结构，通过锯齿结构干预叶片周围气流，降低风机气动噪声。

（2）利用仿真试验和响应面法，以叶轮轴线正前方 1.0 m 处声压级和出口面平均风速为指标，对锯齿长度、宽度、个数、位置进行分析优化。结果表明：与声压级实测值相比，仿真值最大误差为 3.20%。锯齿各参数对声压级影响的显著性次序为锯齿宽度、个数、长度、位置；对风速影响的显著性次序为锯齿位置、宽度、个数、长度。最优参数组合为长度 26 mm、宽度 11.6 mm、个数 16、位置 480 mm。

（3）通过田间试验分析降噪效果和防霜性能。结果表明：与对照叶型相比，锯齿叶型正前方各点平均降噪幅度为 8.83%，正后方各点平均降噪幅度为 9.65%，径向右侧各点平均降噪幅度为 4.66%。两款叶型风速分布趋势相近，最大风速均在位置 12 m 处测得。两款叶型均能够产生较好的温升效果，锯齿叶型在位置 10 m 处平均温升为 2.8℃，在位置 15 m 处平均温升为 3.2℃；对照叶型在位置 10 m 处平均温升为 3.0℃，在位置 15 m 处平均温升为 3.1℃，两者无显著差异。锯齿叶型可以在保证防霜性能的前提下，有效降低风机噪声。

参　考　文　献

[1] 胡永光，李萍萍，戴青玲，等. 茶园高架风扇防霜系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2007，38(12)：97－99.
HU Yongguang，LI Pingping，DAI Qingling，et al. System design and experiment on elevated wind machine for tea frost protection[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2007，38(12)：97－99.(in Chinese)

[2] 中华人民共和国环境噪声污染防治法. 中华人民共和国环境噪声污染防治法(1996 年 10 月 29 日第八届全国人民代表大会常务委员会第二十二次会议通过)[J]. 环境保护，1996(2)：2－7.

[3] 周帮伦. 轴流风机不稳定流动及其诱导噪声机理研究[D]. 镇江：江苏大学，2017.
ZHOU Banglun. Investigation on the instability and the mechanism of its induced noise in an axial-flow fan[D]. Zhenjiang：Jiangsu University，2017.(in Chinese)

[4] 李娜，朱茂桃，李凯强，等. 表面楔形结构对发动机冷却风扇性能影响研究[J]. 机械科学与技术，2018，37(4)：519－524.
LI Na，ZHU Maotao，LI Kaiqiang，et al. Research on influence of wedge structure on performance of engine cooling fans[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering，2018，37(4)：519－524.(in Chinese)

[5] 杨冰冰. 对旋轴流风机噪声分布及降噪措施研究[D]. 太原：太原理工大学，2019.
YANG Bingbing. Research on noise distribution and reduction measures of counter-rotating axial fan[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2019.(in Chinese)

[6] 汤黎明. 工程机械冷却风扇流场特性与气动噪声研究[D]. 长春：吉林大学，2014.
TANG Liming. Research on aerodynamic characteristics and aeroacoustics for cooling fan of construction machinery[D]. Changchun：Jilin University，2014.(in Chinese)

[7] 裴越. 基于 CFD 的超高速轴流风机气动噪声降噪优化设计[D]. 成都：电子科技大学，2021.
PEI Yue. Optimization design of aerodynamic noise reduction for ultra-high-speed axial fans based on CFD[D]. Chengdu：University of Electronic Science and Technology of China，2021.(in Chinese)

[8] GAMBINO V，GAMBINO T，FRASER H W. Characterization of sound emitted by wind machines used for frost control[C]// Alberta EUB Noise Conference，2006.

[9] PEARSE J，DONOHUE B. Wind machine rotor acoustic prediction method[J]. Applied Acoustics，2021，182：108169.

[10] RYI J，CHOI J S. Noise reduction effect of airfoil and small-scale rotor using serration trailing edge in a wind tunnel test[J]. Science China Technological Sciences，2017，60(2)：325－332.

[11] 唐俊，王军，隽智辉，等. 正弦锯齿尾缘对轴流风机尾迹及气动性能的影响[J]. 工程热物理学报，2017，38(10)：2145－2150.
TANG Jun，WANG Jun，JUN Zhihui，et al. The influence of sinusoidal serrated trailing edge on the wake and aerodynamic performance of axial fan[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2017，38(10)：2145－2150.(in Chinese)

[12] 叶学民，张锐星，张超，等. 锯齿尾缘叶片对轴流风机气动噪声及性能的影响[J]. 动力工程学报，2020，40(3)：231－238.
YE Xuemin，ZHANG Ruixing，ZHANG Chao，et al. Aeroacoustics and performance of an axial-floe fan with serrated trailing edge baldes[J]. Chinese Journal of Power Engineering，2020，40(3)：231－238.(in Chinese)

[13] 张金凤，贾静，胡日新，等. 立式管道泵流动噪声特性与仿生降噪研究[J]. 农业机械学报，2018，49(9)：138－145.

ZHANG Jinfeng, JIA Jing, HU Rixin, et al. Flow noise of pipeline pump and bionic sound optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 138 – 145. (in Chinese)

[14] ZANON A, DE GENNARO M, KUEHNELT H, et al. Assessment of the broadband noise from an unducted axial fan including the effect of the inflow turbulence[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 429: 18 – 33.

[15] SANJOSE M, MOREAU S. Direct noise prediction and control of an installed large low-speed radial fan[J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2017, 61: 235 – 243.

[16] TURNER J, KIM J W. Towards understanding aerofoils with wavy leading edges interacting with vortical disturbances[C]// 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016: 2952.

[17] CHAITANYA P, JOSEPH P, NARAYANAN S, et al. Performance and mechanism of sinusoidal leading edge serrations for the reduction of turbulence-aerofoil interaction noise[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2017, 818: 435 – 464.

[18] 高艺, 徐成宇, 曹国华. 小型风力机翼羽仿生耦合桨叶结构研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 212 – 215.
GAO Yi, XU Chengyu, CAO Guohua. Investigation of bionic coupling blades structure for small wind turbine wing feathers [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 212 – 215. (in Chinese)

[19] 乔渭阳, 仝帆, 陈伟杰, 等. 仿生学气动噪声控制研究的历史, 现状和进展[J]. 空气动力学学报, 2018, 36(1): 98 – 121.
QIAO Weiyang, TONG Fan, CHEN Weijie, et al. Review on aerodynamic noise reduction with bionic configuration[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2018, 36(1): 98 – 121. (in Chinese)

[20] 白长安,周泽,康强. 风机类旋转机械噪声分析方案[J]. 智能制造, 2020(9): 56 – 61.

[21] 周翔. 基于 CFD/CAA 的轴流风扇噪声分析与降噪设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
ZHOU Xiang. Aerodynamic noise analysis and noise reduction design of axial flow fan based on CFD/CAA[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)

[22] GB/T 2888—2008 风机和罗茨风机噪声测量方法[S]. 2008.

[23] GB/T 6882—2016 声学 声压法测定噪声源声功率级和声能量级 消声室和半消声室精密法[S]. 2016.

[24] 杜哲, 胡永光, 仇树成, 等. 喷雾降温风机风筒优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 118 – 125, 151.
DU Zhe, HU Yongguang, QIU Shucheng, et al. Optimization design and experiment of air duct on spray cooling fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 118 – 125, 151. (in Chinese)

[25] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 22 – 29. (in Chinese)

(上接第 125 页)

[22] 杜小强,李松涛,贺磊盈,等. 三维激振果品采收机构优化设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(16):48 – 55.
DU Xiaoqiang, LI Songtao, HE Leiying,et al. Optimal design and experiment of three-dimensional excitation fruit harvesting mechanism[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(16):48 – 55. (in Chinese)

[23] 章兰芬,张社奇,李丙智,等. “V”字形苹果幼树二维图像的分形特征[J]. 西北农业学报,2012,21(11):128 – 134,179.
ZHANG Lanfen, ZHANG Sheqi, LI Bingzhi, et al. Fractal characteristics of two-dimensional images of “V”-shaped apple saplings[J]. Northwest Journal of Agricultural Sciences,2012,21(11):128 – 134,179. (in Chinese)

[24] 李明喜,毛罕平,张艳诚. 基于提升小波和分形的苹果树多源图像融合算法[J]. 农业机械学报,2007,38(10):91 – 93,121.
LI Mingxi, MAO Hanping, ZHANG Yancheng. Multi-source image fusion algorithm for apple tree based on enhanced wavelets and fractals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(10):91 – 93,121. (in Chinese)

[25] 乔园园,牛长河,孟详金,等. 牵引式林果振动采收机的设计与田间试验[J]. 新疆农业科学,2015,52(3):528 – 534.
QIAO Yuanyuan, NIU Changhe, MENG Xiangjin, et al. Design and field test of traction forest fruit vibratory harvester[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2015,52(3):528 – 534. (in Chinese)

[26] 郑少华,姜奉华. 试验设计与数据处理[M]. 北京:中国建材工业出版社,2004.

[27] 何映平. 试验设计与分析[M]. 北京:化学工业出版社,2013.

[28] 陈超鹏,全伟,吴明亮,等. 基于离散元法的油菜移栽垂直入土式成孔部件参数优化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(4):433 – 439.
CHEN Chaopeng, QUAN Wei, WU Mingliang, et al. Parameter optimization of verticalLy inputable pored components of rapeseed transplanting based on discrete element method[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition),2019,45(4):433 – 439. (in Chinese)