MQ－600 型气流辅助式喷杆弥雾机风机设计与试验*

刘雪美[1]　张晓辉[1]　马伟伟[2]　刘丰乐[3]

（1. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室，泰安 271018；2. 济南裕兴化工有限责任公司，济南 250000；
3. 山东锐驰机械有限公司，泰安 271000）

【摘要】 设计了用于 MQ－600 型气流辅助式喷杆弥雾机的轴流风机。根据气流辅助式喷杆弥雾机喷施作物冠层的末速度原则，确定风机的风量、风压和出流速度等参数；以此作为风机设计的依据，设计计算了轴流风机的比转数、轮毂比、外径、叶片各截面气流全压分布等关键参数，进行了风机叶片选型、叶片各截面处弦长和叶片数量计算。并对风机驱动系统进行了设计。根据设计结果加工了物理样机，并对其性能进行了试验研究，试验结果表明，风机转速 1 473 r/min 时，风助风筒出口风速 32.1 m/s，出口风下方 0.5 m 处风速 8.6 m/s，风机性能满足使用要求。

关键词：喷杆弥雾机　气流辅助风筒　轴流风机　计算流体力学　设计

中图分类号：S493⁺.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2011)S0-0190-04

Design and Test on Axial Fan of MQ－600 Type Air-assisted Boom Sprayer

Liu Xuemei[1]　Zhang Xiaohui[1]　Ma Weiwei[2]　Liu Fengle[3]

(1. *Shandong Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Jinan Yuxing Chemical Industry Company*, *Ji'nan* 250000, *China*
3. *Shandong Ruichi Mechanism Company*, *Taian* 271000, *China*)

Abstract

In order to match the requirements of MQ－600 type air-assisted boom sprayer, the axial fan for air-assisted duct was designed. According to final velocity principle of air-assisted duct on crop canopy, the fan's air flow, air pressure and the flow velocity and other parameters were determined. The key parameters, such as ratio of axial fan speed, wheel hub ratio, diameter, blade pressure distribution of the whole flow cross-section were calculated. Then, the selection of fan blades, blade chord length of each section was calculated. According to the designed parameters, the physical prototype was built and its performance was studied. The results showed that when the fan speed was under 1 473 r/min, the outlet wind velocity of the duct was 32.1 m/s, and the wind velocity was 8.6 m/s at the 0.5 m blow the duct, which means the fans met performance requirements.

Key words　Boom sprayer, Air-assisted duct, Axial fan, Computational fluid dynamics, Design

引言

风帘辅助喷雾技术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]。风助风筒所产生的高速定向气流可克服自然风对雾滴飞行方向的影响，使雾滴更容易穿透植物叶冠，从而有利于雾滴在植物不同层次上的沉积。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[2]。正确的风机设计将对风筒出口风速起到关键作用，与离心式风机相比，轴流风机具有风量大、效率高、风速柔和均匀、喷

收稿日期：2011－08－15　修回日期：2011－09－14

＊国家自然科学基金资助项目(31101461)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2011CQ021)和山东省高等学校科技计划资助项目(J11LC27)

作者简介：刘雪美，副教授，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

洒范围大及射程较远等优点。

本文以 MQ－600 型气流辅助式喷杆弥雾机的风机设计为研究对象，确定其关键设计参数，加工物理样机并进行试验研究。

1　基本结构及工作原理

MQ－600 型气流辅助式喷杆弥雾机（图 1）由机架、药液箱、药液泵、液压驱动的轴流风机及风助风筒、喷杆及药液喷雾系统、液压系统等部件组成。其工作原理是：拖拉机供油泵向液压马达提供的压力油驱动轴流风机旋转，风机向风助风筒提供具有一定速度和压力的气流，在风助风筒底部的一系列出风口处形成一道高速均匀的风幕，位置在雾流的后方。当喷雾系统喷雾时，气流辅助系统工作，一方面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；另一方面，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。同时，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的风险。

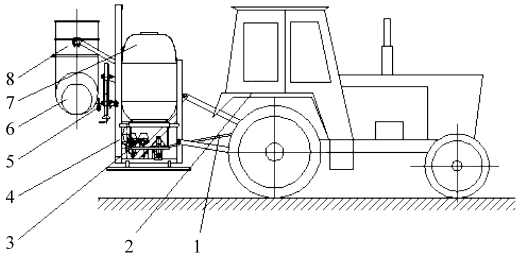

图 1　气流辅助式喷杆弥雾机结构示意图

Fig. 1　Composition of air-assisted boom sprayer

1. 动力输出轴　2. 拖拉机　3. 药液系统　4. 机架　5. 喷雾系统　6. 风助风筒　7. 药液箱　8. 轴流风机

2　风机设计

根据 MQ－600 型喷杆弥雾机使用要求，首先需确定风机风量、风压、驱动风机所需功率及扭矩等。

2.1　辅助气流的末速度

为保证 MQ－600 型喷杆弥雾机的风助风筒具备足够的风量达到气流辅助喷雾的设计要求，并减小拖拉机不必要的功率消耗，要遵循所谓“末速度原则”，即辅助气流到达植被冠层时，其速度不能低于某一数值。若末速度过小，气流难以翻动枝叶，无法穿透植株；若末速度过大，气流将穿透植株，撞击到地面并出现反弹，从而带走雾滴，造成药液的浪费和环境的污染。本文根据试验分析，设定辅助气流到达植株冠层的最小风速需达到 4 m/s 以上，以完成均匀喷洒。

2.2　基于 CFD 分析的风机风量

计算流体动力学（computational fluid dynamics，简称 CFD）是通过计算机数值计算和可视化技术，对包含有流体流动和热传导等相关物理现象的系统所作的分析[3]，已经成为现代设计方法中的重要内容。应用 CFD 计算来解决流动问题已经成为植保研究领域的重要课题[4]，它的应用能够避免试验中存在的多种模型尺寸样机、流场扰动、测量精度等的困难。本文利用 CFD 仿真分析，依据辅助气流的末速度反过来确定风机风量。

在建立 8 m 幅宽的三维风筒仿真模型的基础上，将风助风筒出风口外离地面高度 1 m 内 9 m × 1 m × 0.5 m 的自由流动区加入计算区域。在满足计算精度的前提下，为减少计算负荷，将仿真区域几何模型根据横向、纵向两对称面简化为物理模型的 1/4。仿真三维模型见图 2。

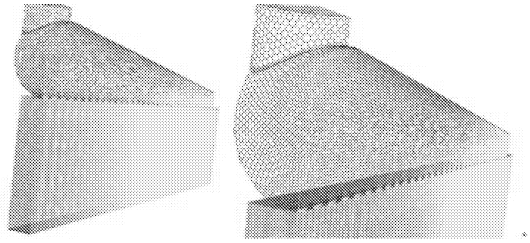

图 2　风助风筒及部分空气区域三维流场仿真区域示意图

Fig. 2　Structure and size of simulation zone

根据所建立的 CFD 分析结果（图 3）和已确定的风筒结构尺寸，并考虑泄漏及储备风量，储备系数选为 1.2，要求所选风机风量为 7 600 m^3/h。

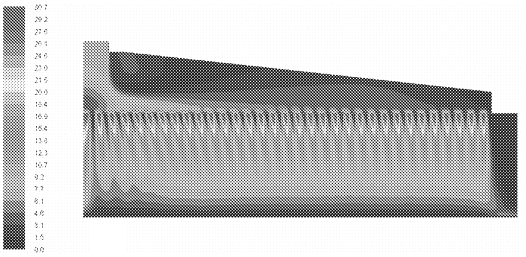

图 3　风助风筒中间对称面的气流速度场

Fig. 3　Flow velocity field in middle symmetric plane of air duct

2.3　风压

风机压力主要包括动压及静压损失，静压损失表现为在管道内流动的损失，动压指出口出风获得的流动能力。

动压计算公式为

$$p_d = \frac{1}{2}\rho v^2$$

式中 ρ——空气密度,取 1.22 kg/m^3

v——气流速度, m/s

静压损失主要包括摩擦压力损失和局部压力损失,下面分别计算两种情况下的压力损失情况。

(1)摩擦压力损失

气体在管道内流动时,沿程与管路内壁发生摩擦而产生的损失称为摩擦压力损失。它与气流速度、管壁的粗糙度以及管路的长度有关,在长度为 L 的管道上的摩擦压力损失计算公式为

$$p_m = \frac{\lambda}{4R}\frac{\rho v^2 L}{2}$$

式中 λ——气流与气囊内壁摩擦因数,取 0.1

R——输送管道的半径,m

$$p_m = p_{m1} + p_{m2} = \frac{\lambda}{4R_1}\frac{1.2v_1^2}{2}l_1 + \frac{\lambda}{4R_2}\frac{1.2v_2^2}{2}l_2$$

式中 v_1、v_2——不同直径处气流速度,m/s

l_1、l_2——各流段长度,m

R_1、R_2——各流段处半径,m

(2)局部压力损失

计算公式为

$$p_j = \xi\frac{1}{2}\rho v^2$$

式中 ξ——局部压力系数

则总压力 $p = p_d + p_m + p_j$,本机根据计算结果所选风机压力为 665 Pa。

3 风机选型与设计

3.1 比转数 n_s

计算公式为

$$n_s = n\frac{Q^{1/2}}{p_{20}^{3/4}}$$

式中 p_{20}——$t = 20$℃ 状态下换算成标准大气压 p_0 的风机全压,mmHg

Q——风量,m^3/s

n——风机转速,r/min

3.2 轮毂比 ν 和叶轮外径 D_2

轮毂比 ν 可根据计算得到的比转数和《农业机械设计手册》[5]中查得,在此取 0.6。

叶轮外径 D_2 计算公式为

$$D_2 = \frac{77.3K_u\sqrt{p}}{\pi n}$$

式中 K_u——系数,与 n_s 有关,可从文献[5]查得

3.3 气流轴向速度 C_z

计算公式为

$$C_z = \frac{4Q_s}{\pi(D_2^2 - D_1^2)}$$

其中 $$D_1 = D_2\nu$$

式中 D_1——轮毂直径,m

Q_s—— 设计风量,m^3/s

3.4 叶片各截面气流全压分布

(1)叶轮平均有效直径计算公式为

$$D_m = \left(\frac{D_2^2 + D_1^2}{2}\right)^{1/2}$$

(2)平均有效直径处的圆周速度计算公式为

$$u_m = \frac{\pi D_m n}{60}$$

(3)平均有效直径 D_m 处的进出口气流绝对速度圆周分量差值

$$\Delta C_{um} = \frac{p}{\rho u_m}$$

(4)把叶片等分为 5 个截面,截面位置分别为 0.32、0.37、0.42、0.47 和 0.52 mm(截面序号为 1 ~ 5)。根据气流全压分布规律求出各截面处的 p_i 和各截面进出口气流绝对速度圆周分量差值 ΔC_{ui},计算公式为

$$\Delta C_{ui} = \frac{p_i}{\rho u_i}$$

式中 u_i——各截面处圆周速度,m/s

计算结果见表 1。

表 1 各截面处出口气流绝对速度分量

Tab.1 Speed component of way out on each cross section

参数	截面序号				
	1	2	3	4	5
速度圆周分量差值 ΔC_{ui}/m·s^{-1}	18.4	15.9	14.0	12.5	11.1
各截面处圆周速度 u_i/m·s^{-1}	30.1	34.9	39.6	44.3	50.0

(5)各截面进、出口平均相对速度计算公式为

$$W_{mi} = \sqrt{C_z^2 + \left(u_i - \frac{\Delta C_{ui}}{2}\right)^2}C_z$$

经计算,截面 1 ~ 5 进出口平均相对速度 W_{mi} 分别为 25.8、30.8、35.9、41.0、47.0 m/s。

(6)选择叶型,选定升力系数 C_y,在此选用机翼型叶片,升力系数为 1.0。

(7)选定叶片数 Z,求出弦长 b,计算公式为

$$Z = \frac{6\nu}{1-\nu} = 9 \quad b = \frac{4\pi p}{\eta\rho Z W_m \omega C_y}$$

式中 η——风机全压效率,取 0.65 ~ 0.85

W_m——出口平均相对速度,m/s

ω——风机角速度,rad/s

经过计算,得到各截面处弦长如表 2 所示。

表 2　各截面处弦长

Tab. 2　Chord length of each cross section

参数	截面序号				
	1	2	3	4	5
进出口平均相对速度 W_{mi}/m·s^{-1}	25.8	30.8	35.9	41.0	47.0
弦长 b/m	0.36	0.30	0.26	0.22	0.20

(8)径向间隙和轴向间隙

叶片顶部与机壳之间的间隙称为径向间隙 S_r，对风机性能有影响的是相对径向间隙 S_r/L，L 为叶片高度。一般取 $S_r/L \leqslant 1\%$，在此根据要求选取即可。

叶片和导叶之间的间隙为轴向间隙 S_z。一般平均半径 R_m 处的 $S_z = (0.25 \sim 0.40)b$。

3.5　风机二维装配图

装配图如图 4 所示。

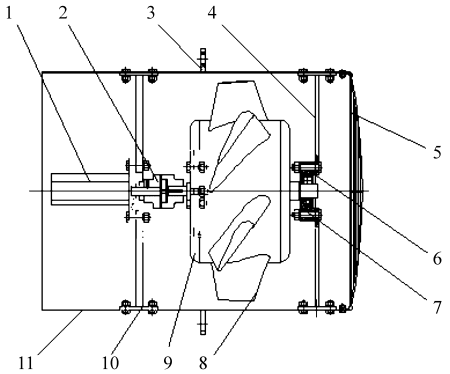

图 4　风机二维结构图

Fig. 4　2-D entity sketch of fan

1. 齿轮马达　2. 挠性联轴器　3. 连接板　4. 支撑板 1　5. 防护罩　6. 轴承座　7. 轴承　8. 叶片　9. 轮毂　10. 支撑板 2　11. 机壳

4　风机控制系统设计

4.1　液压马达选型与参数的确定

用于驱动轴流风机所需功率计算公式为

$$P = Qp/(3\,600\eta_i\eta_m)$$

式中　η_i——风机内效率　η_m——机械效率

所需扭矩

$$T = 9\,549P/n$$

马达实际输出扭矩与理论输出扭矩之间的关系

$$T_M = T_{MO}/\eta_{mM}$$

式中　T_{MO}——马达理论输出扭矩，N·m

η_{mM}——马达机械效率

马达扭矩应具备一定储备，系数 k 取 1.3，则

$$T_M = kT_f$$

式中　T_f——输入扭矩，N·m

4.2　马达流量计算

系统执行元件液压马达根据拖拉机发动机具体要求，选定工作压力 10 MPa。

从满足负荷的要求出发，每转的排量计算公式

$$q = \frac{2\pi T_M}{\eta_{mM}p_M} = \frac{2\pi T_{MO}}{0.85p_M} = 9.8\ \text{mL/r}$$

式中　p_M——液压马达的负荷压力，MPa

4.3　液压马达的选择

根据计算，选择马达型号为 CM－C10C，具体参数为排量 10.9 mL/r，额定压力 10 MPa，最高压力 14 MPa，额定转速 1 800 r/min，最高转速 2 400 r/min，额定压力下的转矩 17.4 N·m。

5　风机性能试验

为了测定风机性能，进行了样机试验，由 SYT－2000HF 型皮托管风速风量仪的探头测定风筒每个出风口的风速，并在出风口下方 0.5 m 处沿风筒轴线方向均匀取 20 个点采集样本点的风速，测定结果见表 3。

表 3　风速在风筒长度方向上的分布

Tab. 3　Wind speed distribution in length direction

风机转速 /r·min^{-1}	出口平均风速 /m·s^{-1}	0.5 m 处平均风速/m·s^{-1}	0.5 m 处风速变异系数/%
1 241	17.6	2.6	10.9
1 409	22.9	4.7	8.7
1 450	25.7	6.4	7.6
1 473	32.1	8.6	7.8

6　结束语

设计了组成 MQ－600 型喷杆弥雾机的气流辅助系统的重要部件风机及其控制系统，并对气流辅助系统的性能进行了试验研究，结果表明：风筒出口平均风速、出风口下方 0.5 m 处平均风速、出风口下方 0.5 m 处风速变异系数等参数均符合弥雾机使用要求，风机设计合理。

参　考　文　献

1　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 application technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 1999. (in Chinese)

2　王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

(下转第 176 页)

hyperspectral imaging system[C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper No: 063018, 2006.

14 Kleynen O, Leemans V, Destain M F. Selection of the most efficient wavelength bands for "Jonagold apple" sorting[J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 30(3):221 ~ 232.

15 张喜杰, 李民赞, 崔笛,等. 温室作物长势的光谱学诊断方法研究与仪器开发[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(5): 887 ~ 890.
Zhang Xijie, Li Minzan, Cui Di,et al. New method and instrument to diagnose crop growth status in greenhouse based on spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(5): 887 ~ 890. (in Chinese)

16 王福民, 黄敬峰, 徐俊锋,等. 基于光谱波段自相关的水稻信息提取波段选择[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(5): 1 098 ~ 1 101.
Wang Fumin, Huang Jingfeng, Xu Junfeng, et al. Wavebands selection for rice information extraction based on spectral bands inter-correlation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(5): 1 098 ~ 1 101. (in Chinese)

17 陈建, 陈晓, 李伟,等. 基于近红外光谱技术和人工神经网络的玉米品种鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1 806 ~ 1 809.
Chen Jian, Chen Xiao, Li Wei,et al. Study on discrimination of corn seed based on near-infrared spectra and artificial neural network model[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(8): 1 806 ~ 1 809. (in Chinese)

18 蒋璐璐, 谈黎虹, 裘正军, 等. 基于可见-近红外光谱的制动液品牌鉴别方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(6): 1 296 ~ 1 299.
Jiang Lulu, Tan Lihong, Qiu Zhengjun,et al. Discrimination of varieties of brake fluid using visual-near infrared spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(6): 1 296 ~ 1 299. (in Chinese)

19 邓祖新. 数据分析方法和 SAS 系统[M]. 上海:上海财经大学出版社, 2006: 291 ~ 293.

20 马正华, 薛国新. BP 神经网络训练算法的改进[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版,2000, 21(1):79 ~ 82.
Ma Zhenghua, Xue Guoxin. Improvement in the training algorithm of BP neural networks[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science, 2000, 21(1):79 ~ 82. (in Chinese)

(上接第 193 页)

3 刘新阳,罗金耀,高传昌. 滴灌用水力旋流器中颗粒分离的数值模拟[J]. 农业工程学报,2010,26(2):7 ~ 11.
Liu Xinyang, Luo Jinyao, Gao Chuanchang. Numerical simulation of particle separation in hydrocyclone for drip irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010,26(2):7 ~ 11. (in Chinese)

4 Zhang H R, Wang X D, Zhang C J, et al. Robust identification of non-linear dynamic systems using support vector machine [C]//IEEE Proceedings—Science, Measurement and Technology, 2006,153(3): 125 ~ 129.

5 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:农业科学技术出版社,2007:675.

6 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)

7 Joaquin Quiñonero-Candela. Learning with uncertainty-Gaussian processes and relevance vector machines[D]. Lyngby: Denmark Technical University of Denmark, 2004.

8 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.