

气力有序抛秧气流场的有限元仿真分析与试验

向卫兵, 罗锡文, 王玉兴, 陈俊涛, 杨丹彤

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘 要: 水稻气力有序抛秧机具有不伤苗等优点, 而喷射气流及其控制是这种机型的关键技术, 该文应用有限元仿真对抛秧喷射气流场进行了分析。对三种气管结构在三种初始压强作用下的喷射气流区域速度进行了比较, 在初始压强为 0.8 MPa 时, 非直线结构气管射流区末端最大气流速度等值线区域比在 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时小, 并且其射流区的气流速度最大点位置在始端偏下方, 而在 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时, 气流速度最大点位置仍在射流区域中心线附近。对喷射气流场速度进行了测试, 并对初始压强等进行了正交试验, 结果表明初始压强为 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时的抛秧效果比 0.8 MPa 时要好。试验证明气流场的分布仿真和优化是可行的。

关键词: 抛秧; 射流; 计算流体力学; 有限元分析

中图分类号: S223.2⁺6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0044-04

0 引言

对于农业机械作业中的许多问题, 往往采用试验的方法来研究, 但常受试验周期、条件和经费等因素的制约。随着科技的发展, 人们通过计算机仿真可以模拟农业机械的作业过程, 从而能低成本获得在试验中难以得到或要化大量经费才能得到的数据。

水稻抛秧是一项浅栽移植技术, 近年来在我国得到了较快发展。2ZQ-P-1 型水稻气力有序抛秧机利用空压机产生的喷射气流作用于水稻塑盘钵苗底部, 将钵苗吹入导苗管并经其导向后实现成行有序栽植^[1,2]。该技术采用空气与钵体苗的软作用取代目前一些抛秧机常用的机械式夹取、顶出等方法, 具有不易伤秧、简化工作机构等优点, 具有广阔的应用前景。“气力”是该项技术的关键所在, 本文采用 ANSYS/FO TRAN 有限元软件对喷射气流场进行了仿真分析, 并对喷射气流场进行了试验研究, 对于揭示气力有序抛秧的机理、优化相关的影响参数、减少喷射气流初始压强并节约气源能耗等具有重要意义。

1 气力有序抛秧气流运动的基本方程

在气力有序抛秧过程中, 气流运动服从质量、动量和能量守恒定律^[3-5], 主要数学模型如下:

1) 连续方程(质量守恒方程)

在直角坐标系 (x, y, z) 下, 方程形式如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

式中 v_x, v_y, v_z ——分别为流体速度 v 在 x, y, z 坐标上的分量; ρ ——气流密度; t ——时间; x, y, z ——坐标分量。

2) 运动方程(动量守恒方程)

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial z} = & \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + R_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + T_x \end{aligned} \quad (2)$$

式中 g_x ——分别为重力加速度 g 在 x 坐标上的分量; p ——气压; μ_e ——有效粘性; R_x ——分布式阻力; T_x ——粘性损失项; 上式为 x 方向的运动方程, 对于 y, z 方向的运动方程, 只需将式中 x, y, z 互换即可。值得注意的是: 对于不可压流和性质不变的流体, 粘性损失项 T_x 通常被忽略掉。根据本文所研究的喷射气流场的特点, 考虑粘性损失项, 其表达式如下:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \quad (3)$$

式中 μ ——动力粘性。如同运动方程一样, 对于 T_y 和 T_z 只需将式中 x, y, z 互换即可得到。

3) 能量方程(能量守恒方程)

喷射气体流场应遵守可压缩流体能量守恒方程, 方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T_0)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x C_p T_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y C_p T_0)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z C_p T_0)}{\partial z} = & \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T_0}{\partial z} \right) + W^v + E^k + Q_v & \\ + \Phi + \frac{\partial p}{\partial t} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 C_p ——比热; T_0 ——总温; K ——热传导率; W^v ——粘性作用项; Q_v ——体积热源; Φ ——粘性热生成项; E^k ——动能。

4) 湍流方程

射流是一种比较特殊的流动, 当雷诺数 Re 大于 30 时, 射流就变成湍流, 故实际射流几乎都是湍流射流^[5]。本文研究的喷射气体流场, 遵守湍流控制方程, 湍流模型选用标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型, 该模型的湍动能、湍动能耗散率、粘性系数和速度等控制方程, 可参考文献^[3], 限于篇幅, 在此不再叙述。

ANSYS/FLOTRAN 在求解上述偏微分方程时, 运用有限元法的原理, 采用分离求解技术, 按顺序对每

收稿日期: 2003-06-06 修订日期: 2003-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(30170542); 广东省自然科学基金项目(000597)资助

作者简介: 向卫兵, 讲师, 博士研究生, 广州市天河区五山 华南农业大学工程学院, 510642

个基本流动变量将各个独立方程联立求解, 在这种顺序求解算法中, ANSYS/FLOTTRAN 程序提供了快速、精确和直接等求解器, 每种求解器又各有一些求解方法。本文分析气力有序抛秧的流场, 求解速度和湍流方程采用三对角矩阵法, 即可满足要求, 压强方程的求解一般要求更严格, 则采用共轭方向法。

2 喷射气流场的仿真分析与试验

2.1 喷射气流场结构构造

2ZQP-1 型水稻气力有序抛秧机与喷射气流场相关的参数有: 从喷嘴开关(减压阀)至喷嘴出口前的气管内直径(即射流区域始端直径)为 2.5 mm, 长度为 300 mm, 射流区域长度即喷嘴出口至育秧塑盘底部(即射流区域末端)距离为 10 mm, 如图 1 所示。减压阀初始值分别为 0.8 MPa、0.65 MPa 和 0.5 MPa, 用丝线法测得喷射气流夹角分别为 8.08°、6.2°和 4.8°。在保证整个气流场基本吻合的情况下, 作如下考虑:

- 1) 从气管内部流场至喷射气流场, 这些三维结构均可看作是由一些二维平面绕其中心线旋转而成, 求解简化为二维平面问题;
- 2) 对于喷嘴开关(减压阀)至喷嘴出口前的气管内部流场, 气管弯曲状态比较随机, 选取 3 种形状如图 1 所示: A- 直线型、B- 1/4 弯曲型、C- 1/2 弯曲型。

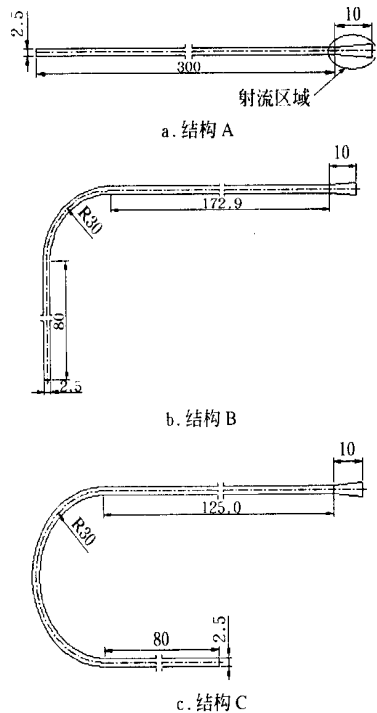


图 1 三种气管结构

Fig. 1 Three kinds of air pipeline structure

2.2 气流场有限元网格划分

在划分有限元网格时, 作如下考虑: 采用 FLU-D141 单元类型; 全部采用对应网格划分, 元素形状为四边形; 对于气管内部气流场, 径向靠近两端的网格细化, 初始段靠近弯曲端的网格细化, 末段靠近弯曲端和喷射气流区域端的网格细化; 喷射气流区域是研究重点, 网格细化。喷射气流区域的有限元模型如图 2 所示,

气管内部流场的有限元模型限于篇幅, 没有列出。

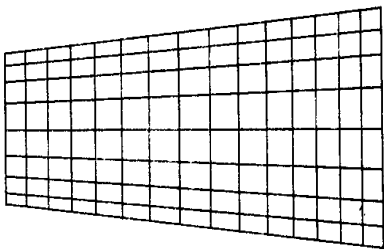


图 2 射流区域有限元模型

Fig. 2 Finite element model of air jet area

2.3 施加载荷、确定气流特性及求解控制

对流场入口施加强度载荷, 对与气管壁接触的气流施加无滑移边界条件 ($v_x = v_y = 0$), 对喷射气流区域上下两侧施加强度和速度载荷。在确定气流特性时, 对气流密度、粘性、比热、传热系数等均采用空气标准参数, 容许气流密度的变化, 打开湍流和可压缩流选项。

2.4 仿真结果分析

喷射气流速度是影响塑盘穴孔内的钵体苗能否顺利吹出的最重要因素, 直接决定作用在钵体苗底部的冲击力大小, 因此, 本文主要对喷射气流速度进行分析。

当减压阀初始压强为 0.5 MPa、0.65 MPa 和 0.8 MPa 时, 三种气管弯曲状态的喷射气流速度分布如图 3 至图 5 所示, 可以看出:

在初始压强 0.8 MPa 时, 气管为弯曲状态结构的 B 和 C 的射流区末端最大气流速度等值线 I 的区域比 0.65 MPa 和 0.5 MPa 的小, 并且其射流区气流速度最大点在靠近始端的偏下方, 而其它情况下速度最大点都靠近射流区始端的中心。由于抛秧机实际作业时, 喷嘴前的气管基本上是非直线结构, 因此, 从喷射速度分布、射流区速度最大点位置、育秧塑盘内的钵体苗是否易于吹出以及气源能耗大小等方面分析, 可以推测初始压强为 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时的抛秧效果更优于 0.8 MPa。

为了获得喷射气流速度, 用三种结构的始端速度平均值和末端速度平均值分别作为喷射气流区域始端和末端的气流速度, 首先从有限元模型中挑选出组成喷射气流区域始端和末端的节点, 然后从计算结果中找出这些节点的气流速度, 最后进行平均计算, 结果如表 1 所示。

表 1 喷射气流区域速度仿真分析结果

Table 1 Simulation results of air jet velocity

初始压强/MPa	0.8	0.65	0.5
始端平均流速/ $m \cdot s^{-1}$	666.06	598.12	513.56
末端平均流速/ $m \cdot s^{-1}$	479.84	459.66	415.74

2.5 喷射气流场试验

在气力有序抛秧试验台上, 先用探针测试喷射气流区域始端和末端的静压和总压, 然后根据伯努利方程计算出气流速度^[6]。试验装置如图 6 所示, 测试结果及与仿真分析结果的比较列于表 2 和表 3。

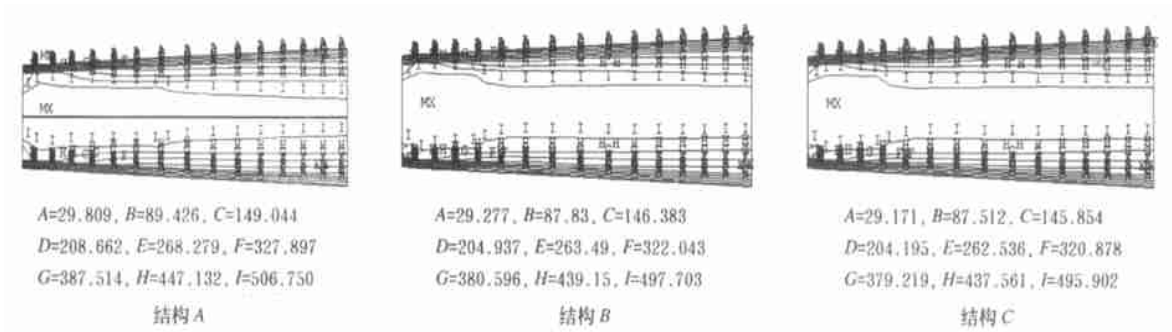


图 3 减压阀初始压强为 0.5 MPa 时三种结构的喷射气流场速度等值线分布图 (m/s)

Fig. 3 Air jet velocity of three structures at initial pressure of 0.5 MPa

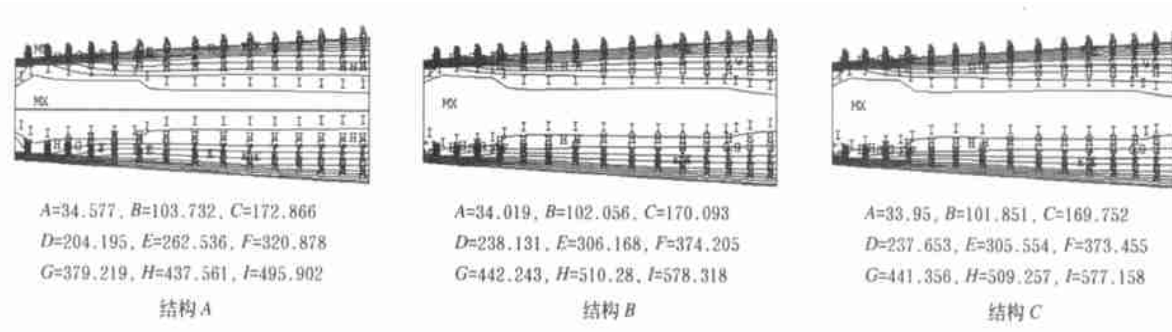


图 4 减压阀初始压强为 0.65 MPa 时三种结构的喷射气流场速度等值线分布图 (m/s)

Fig. 4 Air jet velocity of three structures at initial pressure of 0.65 MPa

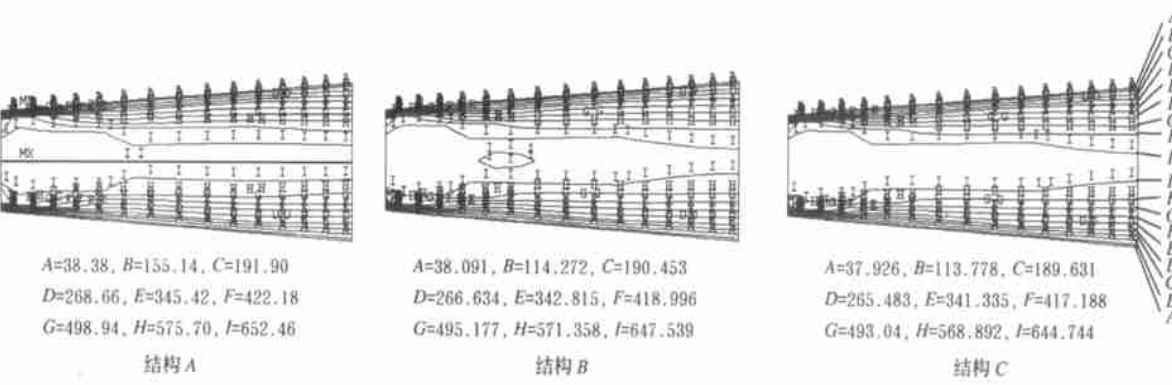


图 5 减压阀初始压强为 0.8 MPa 时三种结构的喷射气流场速度等值线分布图 (m/s)

Fig. 5 Air jet velocity of three structures at initial pressure of 0.8 MPa

注: 图 3~ 图 5 等值线 A~ I 的分布是依次从射流区域上、下侧边至中心线方向, 如图 5 结构 C 所示)。

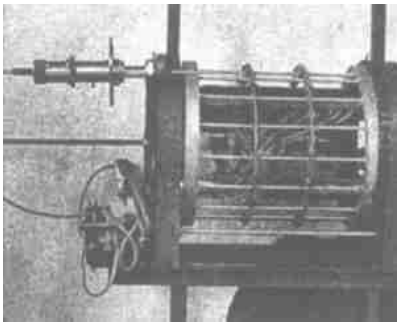


图 6 喷射气流场测试装置

Fig. 6 Test-bed of air jet

表 2 喷射气流区域气流速度试验测试结果

Table 2 Test results of air jet velocity			
初始压强/MPa	0.8	0.65	0.5
始端平均流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	808.6	732	558.5
末端平均流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	527.9	486.32	405.44

表 3 喷射气流速度仿真分析与试验测试结果的误差

Table 3 Error between simulation and test result of air jet velocity			
初始压强/MPa	0.8	0.65	0.5
始端流速误差/%	-17.6	-18.3	-8.0
末端流速误差/%	-9.1	-5.5	2.5

从表 1 至表 3 可以看出: 射流区域始端和末端的气流速度将达到超音速(喷射气流边界除外), 仿真分析结果和试验测试结果基本符合, 误差在 $\pm 20\%$ 以内, 误差产生的原因主要与湍流模型及其参数设定、测量误差等因素有关。

对土壤类型 A、喷嘴直径 B 和初始压强 C 进行 3 因素水平正交试验(见表 4), 以钵体苗吹出率和碎土率为评价指标, 抛栽机前进速度为 0.5 m/s 时的试验结果如表 5 所示, 可以得出初始压强为 0.65 MPa 时的抛秧效果较好。还分别对抛栽机前进速度为 0.21 m/s 和 1 m/s 进行了试验, 得出初始压强为 0.5 MPa 和 0.65

MPa 时的抛秧效果较好。试验结果验证了有限元仿真分析的正确性。

3 结 论

在气力有序抛秧过程中, 随着初始压强的增加, 喷射气流区域的速度明显提高。气管非直线状态下, 初始压强达为 0.8 MPa 时, 非直线结构气管射流区末端最大气流速度的区域比 0.65 MPa 和 0.5 MPa 的小, 并且其射流区的气流速度最大点位置在始端偏下方, 而在 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时, 气流速度最大点位置仍在射流区域中心线附近, 结合试验研究的结果, 得出初始压强为 0.65 MPa 和 0.5 MPa 时的抛秧效果比 0.8 MPa 要好, 为节约气源能耗提供了依据。喷射气流速度的有限元仿真分析和试验结果基本吻合并表明: 在射流区域始端和末端的气流速度将达到超音速, 这对于水稻钵体苗的顺利吹出是有利的, 也说明了气力有序抛秧的可行性。

在计算流体力学理论的基础上, 将有限元仿真技术用于气力有序抛秧气流场的研究是可行的, 对于揭示气力有序抛秧机理、优化相关参数和减少试验工作量等具有重要意义。

Table 4 Factors and levels of the orthogonal experiment			
因素	A (土壤类型)	B (喷嘴直径)	C (气压)
水平	1(土槽土)	1(1.5 mm)	1(0.5 MPa)
	2(水稻田土)	2(2.5 mm)	2(0.65 MPa)
	3(菜园土)	3(3.5 mm)	3(0.8 MPa)

Table 2 Results of the orthogonal experiment					
验号	试 验 因 素			漏秧率 /%	碎土率 /%
	A	B	C		
1	1	1	1	25.8	5.1
2	1	2	2	0	8.1
3	1	3	3	2.2	3.9
4	2	1	2	5.4	5.1
5	2	2	3	7.5	12
6	2	3	1	21.5	9.1
7	3	1	3	60.2	8.5
8	3	2	1	0	9.3
9	3	3	2	5.4	11.1
k_1	15%	38.7%	23.6%		
k_2	20.2%	12.3%	11.7%		
k_3	31.5%	17.7%	31.4%		
R	16.5%	26.4%	19.7%		
较优水平	A ₁	B ₂	C ₂		

[参 考 文 献]

[1] 王玉兴, 罗锡文. 气力有序抛栽机[P]. 中国专利, ZL 00228370.0

[2] Wang Yuxing, Luo Xiw en, Xiang Weibing. Research on paddy seedling ordered pneumatic throw ing transplanta-tion[R]. W ritten for presentation at the 2002 A S A E A n-nual International Meeting/C I C R XV th World Congress, U S A. Ju l 2002, Paper No: 021060

[3] 美国 ANSYS 公司. ANSYS 计算流体动力学分析指南[Z]. 2002

[4] 刘 军, 苏清祖. 排气催化器气流分布的数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 95- 98

[5] 平 浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 74- 75

[6] 王铁城. 空气动力学实验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 1995, 104- 126

Finite element simulation analyses and experiments on rice seedling ordered pneumatic throwing plantation

Xiang Weibing, Luo Xiw en, Wang Yuxing, Chen Juntao, Yang Dantong
(Polytechnic College, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A ir jet finite element analysis simulation of rice seedling ordered pneumatic throw ing plantation was carried out with calcula-t ing fluid dynam ics theory and ANSYS/FLOTRAN softw are. The comparison experiments of air jet velocity among three kinds of air pipeline structure and three kinds of initial air pressure were conducted. The results showed that the speed of the air jet reaching the bottom hole of the plastic pan was ultrasonic, the field of the maximal air jet end velocity of non-linear air pipeline structure at 0.8 MPa initial pressure was less than that at 0.65 MPa and 0.5 MPa , the maximal air jet velocity point of the whole air jet was below the jet inlet center line at 0.8 MPa , and the point was near the air jet center line at 0.65 MPa and 0.5 MPa . The speed of the air jet field was tested, and an orthogonal experiment on the initial pressure was carried out. The finite element analysis and experiment results were in good agreement.

Key words: rice seedling throw ing plantation; air jet; calculating fluid dynam ics; finite element analysis