

气力板式蔬菜排种器吸排种动力学模型研究

夏红梅, 李志伟, 汪刘一

(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:为合理设计气力板式蔬菜排种器参数,建立种子在吸排种阶段的动力学模型,研究了影响吸排种效果的主要因素.结果表明,增加吸种孔口气流量、减小排种器的转速、提高种子与排种器的滑动摩擦系数、降低排种器连接臂长,有助于提高种子的被吸附效果.为使种子能被稳定吸附在吸种孔上,并随排种器转动到排种位置,应适当增加真空度和吸种孔直径,增加种子与排种器表面间的静摩擦系数,减小排种器转速,降低排种器连接臂长,并适当控制排种的种子量.排种阶段应尽量减小排种高度,控制正压流场强度不宜太大,以免种子反弹影响排种效果.

关键词:播种机; 排种器; 蔬菜; 气力板式; 动力学模型

中图分类号:S223.24

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2011)01-0112-05

Dynamic Model Building of Metering Process for Pneumatic Plate-Type Vegetable Seed Metering Device

XIA Hong-mei, LI Zhi-wei, WANG Liu-yi

(College of Engineering, South China Agriculture University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: For designing high performance pneumatic plate-type vegetable metering device, dynamic models of seeds during metering process were established. Combined with experiments study, main factors of seeding effects were discussed. The absorption effect can be enhanced by increasing inlet air flow volume of the suction hole, reducing rotation speed of the metering device, increasing sliding friction coefficient between seeds and the seed metering device, and decreasing arm length of the seed metering device. For insuring the seeds can be absorbed stably to their metering position, vacuum degree and diameter of the suction hole should be increased properly for avoiding difficulty of ejection. Increasing static friction characteristics between seeds and seed metering device, reducing rotation speed of the metering device, decreasing arm length of the seed metering device, and properly controlling seed quantity are helpful for stable suction of seeds. When ejecting seeds, the ejection height should be as small as possible, and intensity of the jet flow field should not be too large for preventing rebounding of seeds.

Key words: seeder; metering device; vegetable; pneumatic plate-type; dynamic model

气力板式蔬菜穴盘精密播种机能实现整盘同时播种,主要有半自动和全自动2种类型.国外全自动板式播种机已得到广泛应用,如美国 Vandana 公司的 Tubless 系列.国内研制成功的板式播种机均为半自动工作方式,如南京农机化研究所研制的 2QB-330 型气吸振动式秧盘精量播种机,吉林农业大学研制的 2XP-1 型吸盘式排种器,及中国农业大学研制的真空吸附式穴盘精密播种器等^[1-3].全自动板式播种机播种速度很高,生产效率高,可达 1 000 盘/h,但生产

成本高,用于大型育苗工厂的高效精密播种.半自动板式播种机价格低,操作熟练后播种速度可达 120 ~ 150 盘/h,但播种动作复杂,工人劳动强度大,排种质量不稳定,需要手工补漏种^[4-5].随着人们对日常饮食结构搭配重视程度的提高,蔬菜市场需求日益向多样性方向发展.本文以华南农业大学工程学院设计的新型全自动气力板式蔬菜排种器为对象,分析建立其吸排种动力学模型,结合试验结果研究了影响吸排种效果的主要因素,为研制适于我国农村中

收稿日期:2009-11-04

作者简介:夏红梅(1975—),女,副教授,博士,E-mail:xhm_scau@scau.edu.cn

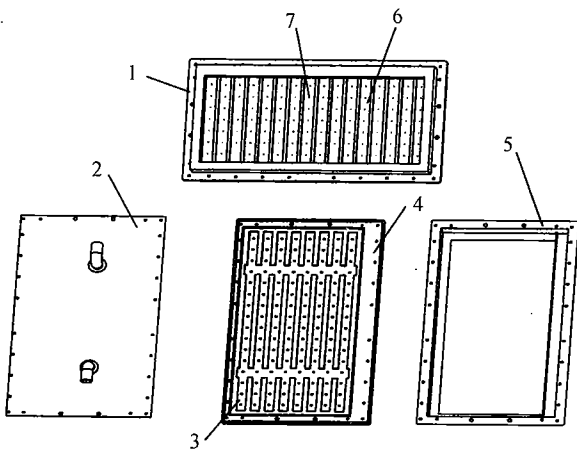
基金项目:广东省农业厅项目“蔬菜播种技术及设备的研制”

小规模蔬菜工厂化育苗生产需要的高性能的全自动气力板式播种机奠定基础。

1 研究方法

1.1 气力板式蔬菜排种器工作原理

气力板式蔬菜排种器由排种板、密封板和边框构成(图1)。排种器上对应穴盘穴孔中心的位置开有吸种孔;排种板正面与边框相连,开有引导种子流动的导向槽;背面为槽腔型结构,与密封板间形成连通的气室空腔。

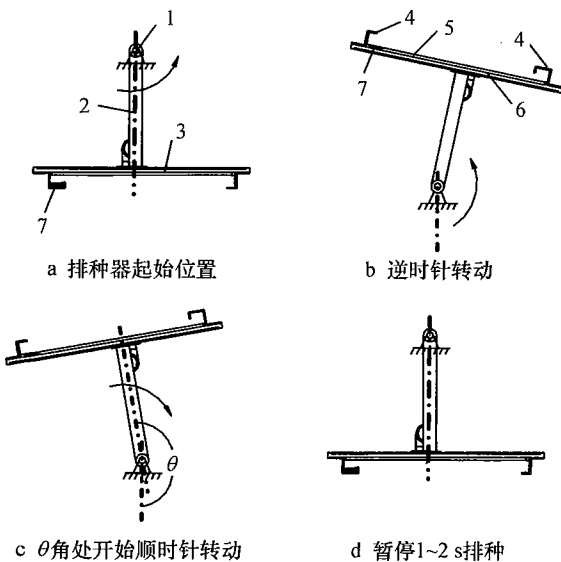


1:排种器;2:密封板;3:排种板背面槽腔;4:排种板;5:边框;6:排种板正面导向槽;7:吸种孔。

图1 排种器结构简图

Fig.1 Structure scheme of the seed metering device

排种器由电机通过连接臂驱动,一次吸排种过程如图2所示。初始置于对准穴盘的位置处(图2a),种子群容纳在左侧护种边框内,气室通负压气体。排种器首先逆时针转动,转到角 θ 略大于 180° 的位置



1:驱动电机;2:连接臂;3:排种器;4:边框;5:吸排种表面;6:气室;7:种子群。

图2 气力板式排种器工作原理

Fig.2 Working principle of the pneumatic plate-type seed metering device

(图2c)时,再反向顺时针转动,直到与起始位置(图2a)重合的排种位置(图2d)。整个过程中气室始终通负压气体,种子在排种板正面导向槽内流动,经过吸种孔口附近时,受吸种孔口负压气流场吸力作用,被吸附到吸种孔上。在排种位置处(图2d)电机暂停1~2 s,气室内通正压,种子在自重及气流场正压的作用下,与排种器分离,落入穴盘的穴孔中。

1.2 吸排种过程力学模型的简化

气力板式蔬菜排种器的作业对象为中小颗粒、近似球形的蔬菜种子。排种器上吸种孔尺寸和种子的尺寸相近,每次能与吸种孔接触的种子最多2~3粒。即使同时有2或3粒种子与吸孔接触,但其位置和受力不完全对称,在种子群流动的冲击、重力和气流场作用下,最后一般只有1粒种子被吸附。因此只对单粒体种子做受力分析,将吸排种的力学模型简化为单刚体系统。

为便于力学分析,对吸排种过程力学模型进行如下简化:1)假设种子为尺寸均匀一致的圆球形刚体,受到气流场作用力和吸种孔口的约束力均作用于质心,吸种孔每次只吸附1粒种子,忽略吸种孔的结构形式对种子受力的影响;2)假设种子在相对排种器表面运动时只做相对滑动,忽略影响较小的滚动摩擦;3)忽略被吸附过程种子间的相互作用力。但在种子被吸住后,需考虑未被吸附的种子对已吸附种子的撞击作用;4)种子在排种阶段运动速度不大,空气阻力相对种子自身重力很小,忽略空气阻力对排种的影响。

1.3 吸排种过程动力学模型分析

1.3.1 被吸附阶段的动力学模型 种子在被吸附过程中,受重力(G)、排种器的法向约束反力(F_N)、滑动摩擦力(F_f)以及气流场吸力(F_Q)的共同作用,在导向槽内做减速直线运动,在被吸附住的吸种孔口处,相对运动速度为0。添加牵连惯性力(F_{gc})和科氏惯性力(F_{gc}),种子受力如图3所示。

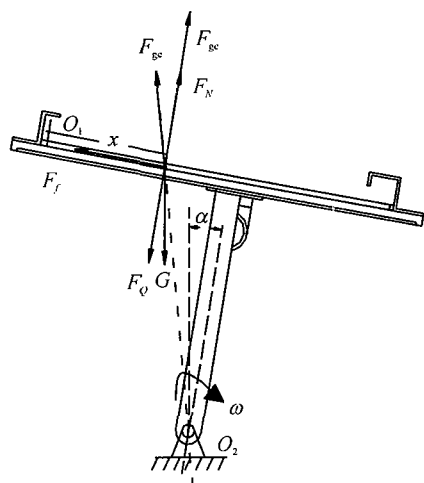


图3 施加惯性力后种子的受力

Fig.3 Forcé diagram after being applied inertial force

则有

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin \alpha - F_f - F_{ge} \frac{(L/2 - x)}{\sqrt{(x - L/2)^2 + H^2}}, \quad (1)$$

$$F_N + F_{ge} + F_{ge} \frac{H}{\sqrt{(x - L/2)^2 + H^2}} = F_Q + mg \cos \alpha, \quad (2)$$

$$\text{且 } F_f = F_N \tan \varphi_f, \alpha = \omega t - \alpha_0. \quad (3)$$

式中, x —种子在 x 方向的位移, m ; H —排种器连接臂长度, m ; L —排种器正面导向槽长度, m ; φ_f —种子与排种器间的滑动摩擦角, rad ; α_0 —开始排种运动瞬时排种器表面法线与竖直方向的夹角, rad . 则有

$$F_Q = \frac{mg \sin(\omega t - \alpha_0 - \varphi_f)}{\sin \varphi_f} + 2m\omega \frac{dx}{dt} + m\omega^2 \left(H - \frac{L - 2x}{2 \tan \varphi_f} \right) - \frac{m}{\tan \varphi_f} \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (4)$$

由于被吸附过程中 $\frac{d^2x}{dt^2} < 0$, 且 $\frac{dx}{dt}$ 逐渐减小, 种子在被吸附到吸种孔口的瞬间有 $\frac{dx}{dt} = 0$, 种子被吸附条件为:

$$F_Q \geq \left(\frac{g \sin(\omega t - \alpha_0 - \varphi_f)}{\sin \varphi_f} + \omega^2 H + \omega^2 \frac{2x - L}{2 \tan \varphi_f} \right) \frac{\pi \rho_z d_z^3}{32}. \quad (5)$$

式中, d_z —种子的直径, m ; ρ_z —种子的密度, kg/m^3 .

根据流体力学原理, 被吸附过程中, 气流场对种子的吸力为种子受到的绕流阻力^[6]:

$$F_Q = C_d S \frac{\rho V_i^2}{2}. \quad (6)$$

式中, C_d —无因次系数, 与物体形状、表面状态和雷诺数有关; S —种子在垂直于运动方向平面上的投影面积, m^2 ; V_i —气流速度, m/s ; ρ —空气密度, kg/m^3 .

吸种孔附近气体流场分布呈放射状的圆锥, 设锥角为 2γ , 放射状圆锥体的半径为 R , 则此处锥面面积为 $(A): A = 2\pi R^2 (1 - \cos \gamma)$ ^[7-9]. 假设孔口气流量为 Q , 气体不被压缩, 根据质量守恒定律有:

$$V_i = \frac{Q}{2\pi R^2 (1 - \cos \gamma)}. \quad (7)$$

可以得到吸种条件为:

$$\frac{C_d \rho Q^2}{\pi^2 \rho_z d_z R^4 (1 - \cos \gamma)^2} \geq \frac{g \sin(\omega t - \alpha_0 - \varphi_f)}{\sin \varphi_f} + \omega^2 H + \omega^2 \frac{2x - L}{2 \tan \varphi_f}. \quad (8)$$

国内外相关研究结果表明^[8-10], 当锥角 $2\gamma = 90^\circ$

时, 能获得最大的吸种保持力. 种子质量越大, 所需吸附力越大, 吸孔直径 d_k 也应增大, 通常 d_k 为 $(0.6 \sim 0.7)d_z$, 其中 d_k 为吸种孔的直径^[11]. 忽略吸种孔口倒角高度, 种子被吸附到吸种孔口的瞬间有 $r \approx 1.1d_k$. 则:

$$\frac{2.9 C_d \rho Q^2}{\pi^2 \rho_z d_z^5 (1 - \cos \gamma)^2} \geq \frac{g \sin(\omega t - \alpha_0 - \varphi_f)}{\sin \varphi_f} + \omega^2 H + \omega^2 \frac{2x - L}{2 \tan \varphi_f}, \quad (9)$$

式(9)表明, 增加孔口气流量(Q), 可提高种子的被吸附效果. 增加排种器转速(ω)不利于种子被吸附. 种子直径(d_z)和密度(ρ_z)越大, 所需的吸附力越大. 所需吸附力的大小还与吸种孔在排种器上的位置有关(x), 位于导向槽末端的吸种孔所需的吸附力最大. 减小排种器的转臂(H), 增加种子与排种器的滑动摩擦系数(φ_f), 也有利于种子被吸附.

1.3.2 种子被吸住阶段的动力学模型 种子被吸附在排种器表面的吸种孔后, 随排种器一起转动; 当转角 $\alpha \leq 90^\circ$ 时, 在距离 O_1 为 x 处的种子受自重(G)、气流场吸力(F_Q)、法向约束反力(F_N)、切向静摩擦力(F_s)和未被吸附的种子对被吸附住种子瞬间撞击力(F_{NZ})的影响. 对种子施加惯性力(F_g), 受力分析如图4所示.

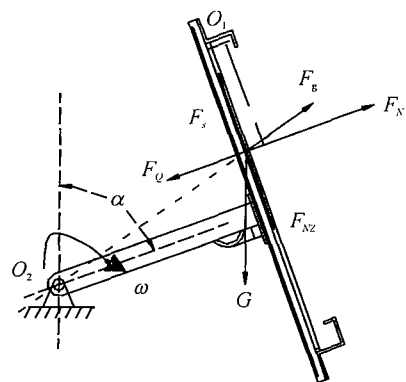


图4 种子被吸住后转角 $\alpha \leq 90^\circ$ 时的受力

Fig.4 Force diagram after seeds being hold and $\alpha \leq 90^\circ$

种子被吸住的条件为:

$$F_Q \geq \frac{F_{NZ} + mg \sin(\omega t - \alpha_0) - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan \varphi_s} - mg \cos(\omega t - \alpha_0) + m\omega^2 H. \quad (10)$$

式中, φ_s —种子与排种器间的静摩擦角, rad .

F_{NZ} 与种子质量、种子在撞击瞬间相对排种器的速度及撞击种子的数量相关. 在 $\alpha = 90^\circ$, 距离 O_1 最远端的吸种孔处有:

$$F_{Q_{\min}} = \frac{F_{NZ} + mg - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan \varphi_s} + m\omega^2 H. \quad (11)$$

在 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 范围内,种子群都已聚集到边框右侧,被吸附的种子不再受种子间的撞击力作用,其受力分析如图5所示。

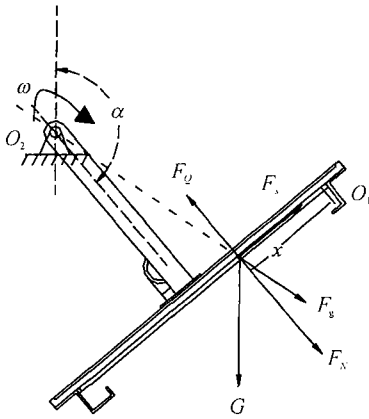


图5 种子被吸住后转角 $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$ 时的受力

Fig. 5 Force diagram after seeds being hold and $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$

$$\text{有 } F_Q \geq \frac{mg \sin(180 - \omega t + \alpha_0) - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan\varphi_s} + m\omega^2 H + mg \cos(180 - \omega t - \alpha_0). \quad (12)$$

当 $\alpha = 90 + \varphi_s$, 且距离 O_1 最远端的吸种孔处, 有:

$$F_{Q\min} = \frac{mg/\cos\varphi_s - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan\varphi_s} + m\omega^2 H. \quad (13)$$

综合式(11)和式(12)有:

$$F_{Q\min} = \max \left\{ \frac{F_{NZ} + mg - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan\varphi_s} + m\omega^2 H, \frac{mg/\cos\varphi_s - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan\varphi_s} + m\omega^2 H \right\}. \quad (14)$$

种子被吸附住后,所受气流场吸力 F_Q 由吸种孔口处真空度 ΔP 形成^[6-8]:

$$F_Q = \Delta P \cdot S_K = \Delta P \pi d_K^2 / 4. \quad (15)$$

式中, S_K —吸种孔的截面积, m^2 ; ΔP —吸种孔口处真空度, kPa .

种子能被吸附住的条件为:

$$\Delta P \frac{\pi d_K^2}{4} \geq \max \left\{ \frac{F_{NZ} + mg - m\omega^2(L/2 - x)}{\tan\varphi_s} + m\omega^2 H, \frac{mg - m\omega^2(L/2 - x) \cos\varphi_s}{\sin\varphi_s} + m\omega^2 H \right\}. \quad (16)$$

式(16)表明,增大孔口真空度(ΔP)和吸种孔直径(d_K),种子所受吸附力越大,有利于保证种子被吸附住后,能跟随排种器一起转动到排种位置.此外,增大种子与排种器的静摩擦角(φ_s),减小排种器臂长(H)也有利于提高种子被吸附住的效果.而种子量越大,对被吸附种子的撞击力(F_{NZ})越大,应适当控制排种的种子量。

1.3.3 种子在排种阶段的动力学模型 排种阶段吸孔处内外大气压差应高于大气压的正压 ΔP_1 ,以使种子顺利排出,并防止杂质堵塞孔口.种子受力分析如图6所示.种子离开孔口后,在正压作用下孔口外形成紊流射流.种子在射流场受力 F_Q 与气流场参数($Q, \Delta P_1$)、种子在射流场中的位置(x, y)有关,即:

$$F_Q = f(x, y, Q, \Delta P_1). \quad (17)$$

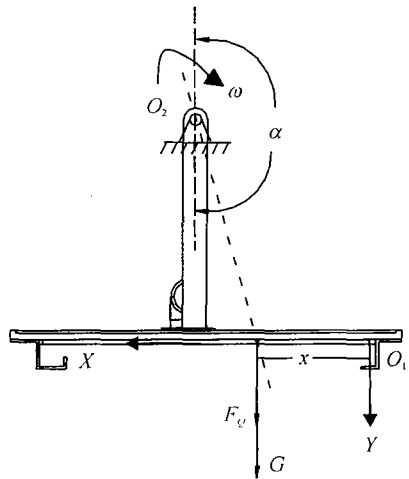


图6 排种阶段种子的受力分析

Fig. 6 Force diagram during the ejection process

则有
$$\begin{cases} G + F_Q = ma_y \\ 0 = ma_y \end{cases}. \quad (18)$$

运动初始条件为

$$\begin{cases} V_{x0} = 0 \\ V_{y0} = 0 \end{cases}. \quad (19)$$

种子在排出过程中的运动方程为

$$\begin{cases} V_x = \int_0 \rightarrow T a_x dt = 0 \\ V_y = \int_0 \rightarrow T a_y dt \end{cases}, \begin{cases} H_x = \iint_0 \rightarrow T a_x d^2 t = 0 \\ H_y = \iint_0 \rightarrow T a_y d^2 t \end{cases}. \quad (20)$$

受排种器结构限制,难以保证每个吸种孔口流场强度一致,下落相同排种高度时,各吸种孔处种子下落时间(T)不同,种子在 X 轴方向的速度和位移始终为0,在 Y 轴方向速度不同.若落入穴盘瞬时 Y 轴方向速度过高,会使种子在穴盘中反弹,影响排种均匀性,因此应尽量减小排种高度,控制排种孔口流量 Q 和正压(ΔP_1)不宜太大。

2 吸排种试验结果

按128孔穴盘设计导向槽长度 L 为290 mm,排种器连接臂长 H 为200 mm.由于提供负压风机的流量和真空度间呈线性关系^[12],可选取其中任何一个作为试验因素.根据式(9)和(16),取影响吸排种效

果的主要因素吸种孔直径、排种器转速和吸种孔口真空度作为试验因素,进行单因素试验,试验因素水平如表1所示.选用青江小白菜种子,纯度 $\geq 9\%$,净度 $\geq 98\%$,发芽率 $\geq 95\%$,含水量(w) $\leq 7\%$,平均千粒质量2.5~4.0 g.调节排种正压为0.20 kPa.

表1 试验因素水平取值
Tab.1 Level ranges of factors

序号	排种器转速/ ($^{\circ} \cdot s^{-1}$)	吸种孔直径/ mm	真空度/ kPa
1	20	0.6	3.0
2	25	0.7	3.5
3	30	0.8	4.0
4	35	0.9	4.5
5	40	1.0	5.0

吸排种试验结果如图7所示.图7a表明,随吸种孔直径增大,单粒率增加,空穴率降低,一孔吸附多粒种子的概率增加.但当吸种孔直径过大时,种子所受吸附力过大,使得种子难以在短时间内排出,单粒率下降,空穴率增大.随真空度增加,单粒率增加,空穴率降低,多粒率呈增加趋势.但当真空度过高时,吸附力过大,单粒率下降,空穴率增大(图7b).随排种器转速增大,播种指标的总体变化趋势为:单粒率降低,多粒率降低,空穴率增加(图7c).

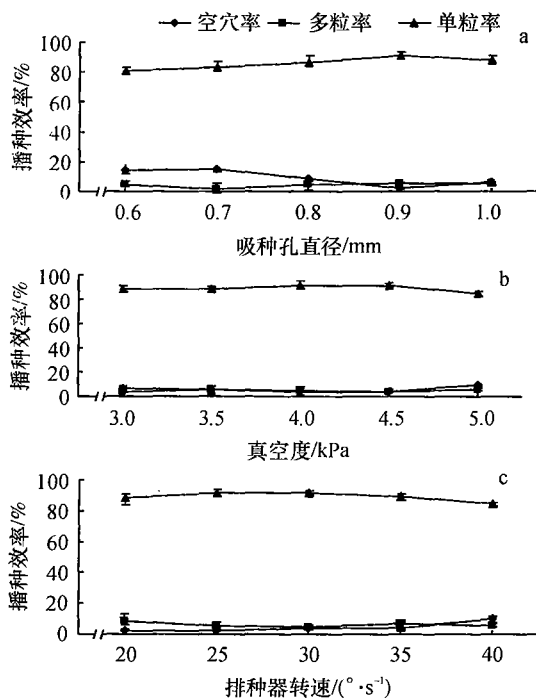


图7 吸排种试验结果

Fig.7 Sowing experiment results

3 结论

建立了种子被吸附、吸附住和排种3个阶段的动力学模型.理论分析和试验研究表明:(1)为同时保证播种效率和种子的被吸附效果,应合理确定排种器的转速,限制排种器转速不能太高.(2)合理选择排种器材料,提高种子与排种器的滑动和滚动摩擦系数;在保证结构不发生干涉的前提下,尽可能减小排种器连接臂长.(3)种子质量越大,所需吸附力越大,排种器的吸种孔直径也相应增大,一般吸种孔直径按(0.6~0.7)倍种子平均直径设计.(4)增大负压气流场的流量和真空度有利于种子的吸附,但过大会使排种困难.(5)排种时为防止种子反弹,应尽量减小排种高度,控制正压流场强度不宜太大.

参考文献:

- [1] 邱兵,张建军,陈忠慧.气吸振动式秧盘精播机振动部件的改进设计[J].农机化研究,2005(2):66-67.
- [2] 盛江源,田宏伟,高玉林,等.吸盘式排种器几个基本参数的试验研究[J].农业机械学报,1989,20(3):102-104.
- [3] 封俊.真空吸附式穴盘育苗精密播种器[J].农村实用工程技术:温室园艺,1998(2):6.
- [4] 张书谦,张学军.穴盘育苗播种机的选购和使用[J].农村实用工程技术:温室园艺,2004(10):22-24.
- [5] 刘志侠,张宏友,刘颖.工厂化育苗精量播种装置现状分析[J].农机化研究,2005(2):16-18.
- [6] 张鸿雁,张志政,王元.流体力学[M].北京:科学出版社,2004:155-158.
- [7] GUARELLA P, PELLERANO A, PASCUZZI S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable seeds[J]. J Agric Engng Res, 1996, 64:29-36.
- [8] SIAL F S, PERSSON S P E. Vacuum nozzle design for seed metering[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 688-696.
- [9] SHAFII S, HOLMES R G. Air-jet seed metering, a theoretical and experimental study[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(5): 1432-1438.
- [10] 李耀明,刘彩玲,陈进.水稻育苗播种装置气力吸种部件的研究[J].农业机械学报,1999,30(6):46-50.
- [11] 张波屏.播种机械设计原理[M].北京:机械工业出版社,1982:310-318.
- [12] 刘立,马立山.流体力学泵与风机[M].北京:中国电力出版社,2004:111-117.

【责任编辑 周志红】