doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.015

铲式玉米精密播种机振动特性模型建立与试验*

张晓冬[1]　李成华[2]　李建桥[1]　邹　猛[1]

(1.吉林大学工程仿生教育部重点实验室,长春 130025;2.沈阳理工大学机械工程学院,沈阳 110168)

摘要:为了研究铲式玉米精密播种机播种性能与农田不平度激励产生振动之间的关系,推导了稳态响应与理论粒距关系数学模型。由建立的数学模型得出铲式玉米精密播种机的播种性能主要由播种机的结构特征、播种机工作速度、倾斜圆盘勺式玉米精密排种器与耕作土壤表面间的距离、土壤不平度和土壤粘性决定。理论粒距与实际粒距的对比结果表明,两者分布趋势基本相同,建立的稳态响应与理论粒距关系数学模型可用于对工作状态下播种机的播种性能进行预测和分析。

关键词:铲式播种机　振动　数学模型　试验

中图分类号:S223.2.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2014)02-0088-06

引言

玉米秸秆覆盖条件下免耕播种具有增产增收、蓄水保墒、减少水土流失、减少作业工序和提高土壤肥力等优点[1-6]。玉米播种机组在工作过程中受玉米秸秆或玉米根茬以及耕作土壤不平度的影响,使播种机在工作过程中产生随机振动,进而影响播种机的可靠性和播种质量。目前,主要从两个方面研究振动对播种机的影响:第一,建立播种机在田间工作时的轮壤输入谱或系统能量方程以及对播种机的振动载荷进行仿真[7-8];第二,通过振动试验台研究地面激振对播种机播种性能的影响[9]。而基于动力学基本定律或定理,建立播种机的振动数学模型来研究播种性能,可为播种机组田间作业仿真分析、优化播种机整体结构提供理论依据。本文以铲式玉米精密播种机为研究对象,建立播种机在简谐激励下的振动数学模型并以此推导播种机稳态响应与理论粒距的关系。

1　播种机振动数学模型

1.1　播种机结构

铲式玉米精密播种机的主要结构如图 1 所示。

田间工作时,将播种机样机与拖拉机连接,铲式成穴器与排种器同轴相连,在拖拉机牵引力作用下沿着播种方向滚动前进,利用铲式成穴器的特殊结构穿过玉米秸秆覆盖的土壤表面,在土壤上形成穴

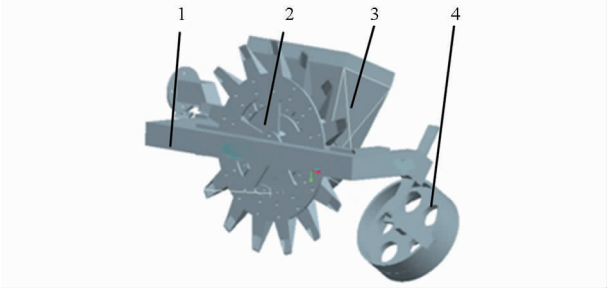

图 1　铲式玉米精密播种机结构示意图

Fig. 1　Configuration of structure of precision spade punch planter of maize

1. 支架　2. 倾斜圆盘勺式玉米精密排种器　3. 种箱　4. 支撑轮

孔,与成穴器同步配合工作的倾斜圆盘勺式玉米精密排种器在穴孔中投入一粒种子,从而完成在地表覆盖和免耕条件下的精密播种要求[10-11]。播种机尾部的支撑轮可支撑播种机,调节铲式成穴器入土深度(图 2)。因此,耕作土壤表面不平度、玉米秸秆以及玉米根茬等因素都可引起播种机振动。

1.2　播种机-地面系统模型

为了忽略影响铲式玉米精密播种机播种性能的次要因素,在建立播种机-地面系统模型前作如下假设:①播种机支架、倾斜圆盘勺式排种器、铲式成穴器和支撑轮都为刚体。②铲式成穴器刚度、倾斜圆盘勺式排种器刚度、支撑轮刚度为位移的线性函数;铲式成穴器与土壤相互作用所产生的阻尼为速度的线性函数;铲式成穴器和支撑轮与地面保持接触,无弹跳。③研究播种机的垂直振动,忽略横向振动。

收稿日期:2013-01-22　修回日期:2013-04-17

*国家自然科学基金资助项目(50875107、50575148)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA101401)

作者简介:张晓冬,博士生,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail:xiaodong5337@126.com

通讯作者:李建桥,教授,博士生导师,主要从事地面机械仿生技术研究,E-mail:jqli@jlu.edu.cn

图 2 为播种机-地面系统的两自由度模型，二自由度分别是：铲式玉米精密播种机质心 C 垂直位移 z_C，播种机支架绕 O 点转动的角位移 θ。图中其他字母的意义为：A、B 分别为铲式成穴器和支撑轮与地面的接触点；D 为倾斜圆盘勺式排种器与支架的连接点；E 为支撑轮与支架的连接点。

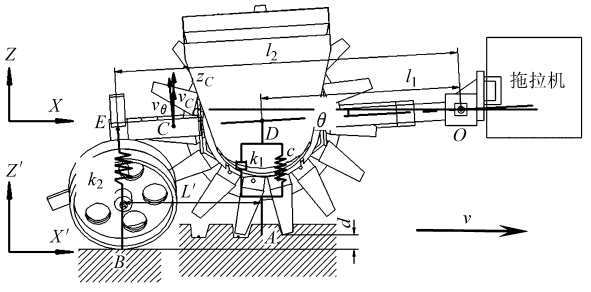

图 2　二自由度播种机振动模型

Fig. 2　2-DOF vibrational model of planter

1.3　播种机振动微分方程

铲式玉米精密播种机工作时所采集振动信号的自相关函数具有一定的周期性，并且呈正、余弦函数分布[12-13]。因此，将播种机工作地面的纵断面简化成图 3 所示的正弦曲线，通常将地面相对于基准平面的高度 H 和沿播种走向长度 L 的变化作为地面纵断曲线或路面不平度函数。

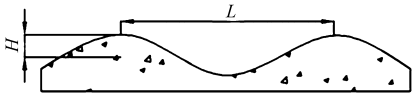

图 3　地面纵断剖面

Fig. 3　Lengthways section of till soil

播种机支撑轮与地面接触点 B 处受到 $\omega = 2\pi\dfrac{v}{L}$ 的简谐激励为

$$z'_B = H\sin\left(2\pi\frac{vt}{L}\right) \tag{1}$$

式中　v——播种机前进速度

t——播种机工作时间

铲式成穴器与地面接触点 A 所受到的简谐激励为

$$z'_A = \left[H\sin\left(2\pi\left(\frac{vt}{L}+\frac{L'}{L}\right)\right) - d\right] l_1/l_2 \tag{2}$$

式中　L'——支撑轮与铲式成穴器之间距离

l_1——O 点与 D 点之间距离

l_2——O 点与 E 点之间距离

d——成穴器顶端与支撑轮顶端之间距离

取播种机质心 C 的垂直坐标 z_C 和支架绕 O 点的转角 θ 为广义坐标。设在某瞬时 t，质心相对于静平衡位置向上位移 z_C，播种机支架有转角 θ，则 D、E 点处弹簧分别伸长 $z_C + l_1\theta$ 和 $z_C + l_2\theta$，在垂直方向上运用牛顿第二定律，可得到播种机的振动微分方程

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_C \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{z}_C \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & cl_1 \\ cl_1 & cl_1^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{z}_C \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(k_1+k_2) & -(k_1l_1+k_2l_2) \\ -(k_1l_1+k_2l_2) & -(k_1l_1^2+k_2l_2^2) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z_C \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\dot{z}'_A - k_1z'_A - k_2z'_B \\ cl_1\dot{z}'_A - k_1l_1z'_A - k_2l_2z'_B \end{bmatrix} \tag{3}$$

其中

$$c\dot{z}'_A - k_1z'_A - k_2z'_B = \frac{1}{\sqrt{a_1^2+b_1^2}}\sin\left(\frac{2\pi vt}{L}+\phi_1\right) + k_1\frac{dl_1}{l_2} \tag{4}$$

$$cl_1\dot{z}'_A - k_1l_1z'_A - k_2l_2z'_B = \frac{1}{\sqrt{a_2^2+b_2^2}}\sin\left(\frac{2\pi vt}{L}+\phi_2\right) + k_1\frac{dl_1^2}{l_2} \tag{5}$$

$$a_1 = -cA\frac{l_1}{l_2}\frac{2\pi v}{L}\sin\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_1\frac{l_1}{l_2}H\cos\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_2H \tag{6}$$

$$b_1 = cA\frac{l_1}{l_2}\frac{2\pi v}{L}\cos\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_1\frac{l_1}{l_2}H\sin\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) \tag{7}$$

$$a_2 = -cA\frac{l_1^2}{l_2}\frac{2\pi v}{L}\sin\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_1\frac{l_1^2}{l_2}H\cos\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_2l_2^2H \tag{8}$$

$$b_2 = cA\frac{l_1^2}{l_2}\frac{2\pi v}{L}\cos\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) - k_1\frac{l_1^2}{l_2}A\sin\left(2\pi\frac{L'}{L}\right) \tag{9}$$

式中　m——播种机质量　　k_2——支撑轮刚度

I_C——播种机的转动惯量

k_1——铲式成穴器的刚度

c——铲式成穴器与土壤相互作用的线性阻尼系数

ϕ_1——a_1 和 b_1 决定的相位角

ϕ_2——a_2 和 b_2 决定的相位角

式(4)和式(5)用复量表示法可以表示为

$$\begin{cases} F_1(t) = F_1\sin\omega t = F_1e^{i\omega t} \\ F_2(t) = F_2\sin\omega t = F_2e^{i\omega t} \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$\omega = 2\pi\frac{v}{L}$$

式中　ω——激励频率

令 $c_{11} = c$　$c_{12} = c_{21} = cl_1$　$c_{22} = cl_1$　$k_{11} = -(k_1+k_2)$　$k_{12} = k_{21} = -(k_1l_1+k_2l_2)$　$k_{22} = -(k_1l_1^2+k_2l_2^2)$

则式(3)可以简化为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_C \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{z}_C \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{z}_C \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} z_C \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix} \tag{11}$$

1.4 播种机简谐激励稳态响应

设铲式玉米精密播种机质心 C 处的稳态响应为

$$\begin{cases} z_C(t) = Z_C\sin(\omega t-\phi) = Z_C e^{\mathrm{i}(\omega t-\phi)} \\ \theta(t) = \Theta\sin(\omega t-\phi) = \Theta e^{\mathrm{i}(\omega t-\phi)} \end{cases} \tag{12}$$

式中 ϕ——稳态响应滞后于激励的相位差

Z_C——$z_C(t)$的振幅

Θ——支架绕 O 点的角位移

将式(12)代入式(11)可得到

$$\begin{bmatrix} z_{11}(\omega) & z_{12}(\omega) \\ z_{21}(\omega) & z_{22}(\omega) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} Z_C \\ \Theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中

$$\begin{cases} z_{11}(\omega) = -\omega^2 m + \mathrm{i}\omega c_{11} + k_{11} \\ z_{12}(\omega) = \mathrm{i}\omega c_{12} + k_{12} \\ z_{21}(\omega) = \mathrm{i}\omega c_{21} + k_{21} \\ z_{22}(\omega) = -\omega^2 I_C + \mathrm{i}\omega c_{22} + k_{22} \end{cases} \tag{14}$$

式(13)为非齐次线性方程组,式中方阵的行列式不为零,可以使用 Cramer 法则求解[14]。

引入下列符号:$\omega_1 = \sqrt{\dfrac{k_1}{m}}$、$\omega_2 = \sqrt{\dfrac{k_2}{m}}$、$\delta = \dfrac{\omega_2}{\omega_1}$、$\lambda = \dfrac{\omega}{\omega_1}$、$I_C = m\rho^2$ 和 $\zeta = \dfrac{c}{m\omega_1}$,其中 ρ 为质心 C 至 O 点的距离。

将求解后的结果简化为

$$\begin{cases} Z_C = |Z_C e^{-\mathrm{i}\phi}| = \dfrac{1}{m\omega_1^2}\sqrt{\dfrac{[F_1(\lambda^2\rho^2 + l_1^2 + \delta^2 l_2^2) + F_2(l_1+\delta^2 l_2)]^2 + (\lambda\zeta)^2 l_1^2 (F_2 - l_1 F_1)^2}{[(1+\delta^2+\lambda^2)(l_1^2+\delta^2 l_2^2+\lambda^2\rho^2) + (l_1+\delta^2 l_2)^2]^2 + (\lambda\zeta)^2[\delta^2(l_1-l_2)^2 + \lambda(l_1^2-\rho^2)]^2}} \\ \Theta = |\Theta e^{-\mathrm{i}\phi}| = \dfrac{1}{m\omega_1^2}\sqrt{\dfrac{[F_2(\lambda^2+1+\delta^2) - F_1(l_1+\delta^2 l_2)]^2 + (\lambda\zeta)^2 (F_2 - l_1 F_1)^2}{[(1+\delta^2+\lambda^2)(l_1^2+\delta^2 l_2^2+\lambda^2\rho^2) + (l_1+\delta^2 l_2)^2]^2 + (\lambda\zeta)^2[\delta^2(l_1-l_2)^2 + \lambda(l_1^2-\rho^2)]^2}} \end{cases} \tag{15}$$

式(15)为铲式玉米精密播种机简谐激励下的稳态响应,其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} z(t) \\ \theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_C \\ \Theta \end{bmatrix}\sin(\omega t-\phi) \tag{16}$$

由稳态响应可以得出,播种机工作时的振动主要由播种机本身特性、播种机工作速度、土壤表面情况和土壤粘附力决定。

2 振动与播种性能关系模型

2.1 投种性能分析

铲式玉米精密播种机播种性能受到种子的形状尺寸、投种时间、投种初速度和排种器投种角等因素的影响[10,13,15],由这些因素产生的投种时刻偏差和种子投出至种子着地的粒距偏差(图 4)决定了相邻种子间距离。相邻种子粒距为[10]

$$S_i = S_{ti} + \Delta S_i \tag{17}$$

式中 S_{ti}——投种时刻产生的种子粒距

ΔS_i——种子由投种口投出至种子着地这一过程中产生的种子粒距

投种时刻偏差产生的种子粒距为

$$S_{ti} = v\Delta t_i = \frac{v}{\omega_P}\left(\frac{4\pi}{n} + \eta_{i+1} - \eta_i\right) \tag{18}$$

式中 ω_P——排种轮转动的角速度

n——排种轮轮孔的数目

η_i——第 i 粒种子实际投种角

η_{i+1}——第 $i+1$ 粒种子实际投种角

Δt_i——2 粒相邻种子离开排种轮的时间间隔

种子由投种口投出至种子着地这一过程中产生

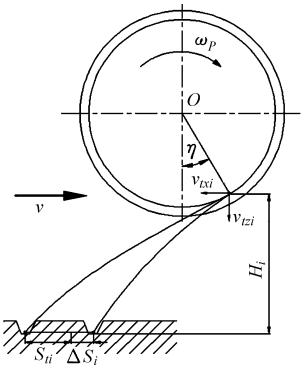

图 4 投种示意图

Fig. 4 Schematic diagram of sowing seed

的种子粒距为

$$\Delta S_i = v_{txi+1}T_{i+1} - v_{txi}T_i \tag{19}$$

其中

$$\begin{cases} T_i = \dfrac{-v_{tzi} + \sqrt{v_{tzi}^2 + 2g[H_l + r_i(1-\cos\eta_i)\cos\beta]}}{g} \\ T_{i+1} = \dfrac{-v_{tzi+1} + \sqrt{v_{tzi+1}^2 + 2g[H_l + r_{i+1}(1-\cos\eta_{i+1})\cos\beta]}}{g} \end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{cases} v_{tzi} = \dfrac{(r_P - d')v\sin\eta_i\cos\beta\cos\gamma}{R} + v_{fzi} \\ v_{tzi+1} = \dfrac{(r_P - d')v\sin\eta_{i+1}\cos\beta\cos\gamma}{R} + v_{fzi+1} \end{cases} \tag{21}$$

式中 v_{txi}——投种口处第 i 粒种子相对地面的水平速度

v_{txi+1}——投种口处第 $i+1$ 粒种子相对地面的水平速度

T_i——第 i 粒种子投出时刻

T_{i+1}——第 $i+1$ 粒种子投出时刻

H_l——地面距投种口的高度

r_i——排种轮中心 O 点与第 i 粒种子质心之间的距离

r_{i+1}——排种轮中心 O 点与第 $i+1$ 粒种子质心之间的距离

β——铲式成穴器垂直倾角

v_{tzi}——第 i 粒种子离开投种口时的垂直速度

v_{tzi+1}——第 $i+1$ 粒种子离开投种口时的垂直速度

r_P——排种轮半径

d'——种子的当量半径

γ——成穴器水平倾角

R——排种轮中心 O 点与铲式成穴器顶端之间的距离

v_{fzi}——第 i 粒种子离开投种口时加载在种子上的瞬时振动速度

v_{fzi+1}——第 $i+1$ 粒种子离开投种口时加载在种子上的瞬时振动速度

2.2　稳态响应与理论粒距的关系

排种器垂直振动速度 v_{fzi} 是垂直振动速度 v_C 和 C 点绕 O 点切向速度 v_θ 的标量和(图 2),即

$$v_{fzi} = v_C + l_1\omega_\theta\cos\theta \tag{22}$$

由于 θ 较小,式(22)可以简化为

$$v_{fzi} = v_C + l_1\omega_\theta \tag{23}$$

式中,v_C 和 ω_θ 是稳态响应 $Z(t)$ 和 $\theta(t)$ 对时间的一阶导数,则

$$v_{fzi} = v_C + l_1\omega_\theta = \dot{Z}(t) + l_1\dot{\theta}(t) = (Z_C + l_1\Theta)\omega\cos(\omega t - \varphi) \tag{24}$$

设

$$\begin{cases} A(\omega) = \sqrt{[F_1(\lambda^2\rho^2 + l_1^2 + \delta^2 l_2^2) + F_2(l_1 + \delta^2 l_2)]^2 + (\lambda\zeta)^2 l_1^2 (F_2 - l_1F_1)^2} \\ B(\omega) = l_1\sqrt{[F_2(\lambda^2 + 1 + \delta^2) - F_1(l_1 + \delta^2 l_2)]^2 + (\lambda\zeta)^2 (F_2 - l_1F_1)^2} \\ C(\omega) = [(1 + \delta^2 + \lambda^2)(l_1^2 + \delta^2 l_2^2 + \lambda^2\rho^2) + (l_1 + \delta^2 l_2)^2]^2 + \\ \quad (\lambda\zeta)^2[\delta^2(l_1 - l_2)^2 + \lambda(l_1^2 - \rho^2)] \end{cases} \tag{25}$$

可以得到

$$v_{fzi} = v_C + l_1\omega_\theta = \dot{y}(t) + l_1\dot{\theta}(t) = (Z_C + l_1\Theta)\omega\cos(\omega t - \phi) = (A(\omega) + B(\omega))\frac{\lambda\cos(\omega t - \phi)}{cC(\omega)} \tag{26}$$

同理

$$v_{fzi+1} = v_C + l_1\omega_\theta = \dot{y}(t + \Delta t_i) + l_1\dot{\theta}(t + \Delta t_i) = (Z_C + l_1\Theta)\omega\cos(\omega(t + \Delta t_i) - \phi) = (A(\omega) + B(\omega))\frac{\lambda\cos(\omega(t + \Delta t_i) - \phi)}{cC(\omega)} \tag{27}$$

由式(24)和(25)可以看出,播种机垂直振动速度主要取决于铲式玉米精密播种机本身的结构特性、播种机的工作速度和土壤粘性。

理论粒距 S_i 与铲式玉米播种机振动的关系数学模型可由式(17)~(21)和式(25)~(27)推导得出。由推导出的模型可以得到播种机的播种性能主要由播种机的结构特征、播种机工作速度、倾斜圆盘勺式玉米精密排种器与地面间的距离、土壤不平度和土壤粘性等因素决定。

3　理论粒距与实际粒距的比较

试验时播种机前进速度为 $v = 1.0$ m/s,打穴铲旋转角速度为 $\omega = 3.04$ rad/s。排种器最低点距地面的高度 $H_l = 172$ mm,投种角 $\alpha = 40°$,垂直倾角 $\beta = 23°$,水平倾角 $\gamma = 8°$,排种盘半径 $r_p = 150$ mm,种子的当量半径 $d' = 5$ mm,$R = 325$ mm,信号采集时间 $t_C = 15$ s。由式(17)可计算出相邻 2 粒种子理论粒距表达式为

$$S_i = v\Delta t_i + \Delta S_i = 0.137 + 0.067[v_{fzi} - v_{fzi+1} + \sqrt{(v_{fzi+1} + 0.25)^2 + 4} - \sqrt{(v_{fzi} + 0.25)^2 + 4}] \tag{28}$$

式中,v_{fzi} 和 v_{fzi+1} 可直接在虚拟样机软件 ADAMS/View 获得。

使用 Pro/E 建立铲式玉米精密播种机的三维模型,并使用专业接口 Mechanism/Pro 将模型导入到 ADAMS/View 中[16]。在 ADAMS/View 中调整播种机,使其工作角度与试验时一致。根据播种机的结构,为播种机添加旋转副和固定副(图 5)。

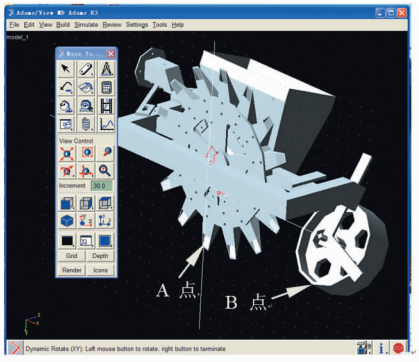

图 5　仿真模型和振动加速度信号加载

Fig. 5　Simulation model and loading points of vibrational acceleration signal

使用 File import 对话框可将采集到的振动加速度信号定制为 Spline 曲线。通过 CUBSPL(First independent variable, Second independent variable, Spline name, Derivative order)函数可将采集到的支撑轮和倾斜圆盘勺式玉米精密排种器处的振动加速度信号,以 Spline 曲线分别以一般点驱动(General

point motion)的方式加载到模型的 A 点和 B 点位置。在投种口处与壳体相连,定义 Marker 点,则 Marker 点处 y 轴方向的速度即为 v_{fzi} 和 v_{fzi+1}。运行 ADAMS/PostProcessor 程序,输出 Marker 点处速度图形(图 6)和仿真结果。

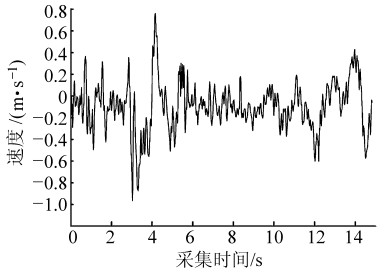

图 6 投种口处振动速度

Fig. 6 Vibrational velocity on seed throwing opening

试验用播种机样机的分种勺盘共有 15 个勺盘基体,因此在信号采集期间,共投出的种子数量为

$$n_1 = \frac{t_C\omega}{24\pi/180^\circ} = \frac{15\ \text{s} \times 3.04\ \text{rad/s}}{24\pi/180^\circ} \approx 109\ \text{颗} \quad (29)$$

将仿真结果代入式(28),即可得 109 颗玉米种子的理论粒距,播种机田间试验获得的粒距和试验方法可参照文献[17]中对精金刚 5 玉米种子的试验结果。理论粒距与实际粒距的对比结果如图 7 所示。

由对比结果可以看出,理论粒距和实际试验粒距的分布趋势基本相同,种子落到地面后由于翻滚、跳跃和回土等原因造成试验粒距与理论粒距有所不同,这些因素对粒距的影响不可避免。因此,建立的稳态响应与粒距关系数学模型可对工作条件下铲式玉米精密播种机的播种性能进行预测和分析。

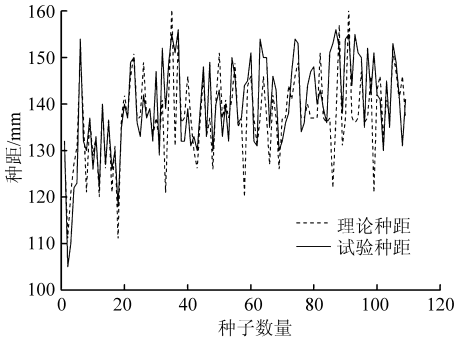

图 7 理论粒距和试验粒距

Fig. 7 Theoretical seed distance and experimental seed distance

4 结论

(1)建立了铲式玉米精密播种机简谐激励与稳态响应数学模型。推导的理论与铲式玉米精密播种机稳态响应关系数学模型可以得出:影响播种机播种性能的主要因素有播种机的结构特征、播种机工作速度、倾斜圆盘勺式玉米精密排种器与地面间的距离、土壤不平度和土壤粘性。

(2)由理论粒距与实际粒距的比较结果可以得出:两者的结果基本一致。

参 考 文 献

1 Zhang S X, Li Q, Zhang X P, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregation and aggregate binding agents in black soil of Northeast China [J]. Soil & Tillage Research, 2012, 124(1): 196 - 202.

2 高焕民,李洪文,李问盈. 保护性耕作的发展 [J]. 农业机械学报,2008,39(9):43 - 48.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying. Development of conservation tillage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43 - 48. (in Chinese)

3 赵永来,陈智,孙悦超,等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验 [J]. 农业机械学报,2011,42(6):38 - 42.
Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing on anti-wind effect of soil for crop stubble coverage farmlands [J]. Transactons of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):38 - 42. (in Chinese)

4 辜松,小松崎将一,森泉昭治,等. 覆盖作物与耕作法对土壤性质的影响[J]. 农业机械学报,2005,36(7):37 - 40.
Gu Song, Komatsuzaki M, Shoji M, et al. Influence of cover crops and tillage treatment on soil properties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (7): 37 - 40. (in Chinese)

5 解文艳,樊贵盛,周怀平,等. 秸秆还田方式对旱地玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报,2011,42(11):60 - 67.
Xie Wenyan, Fan Guisheng, Zhou Huaiping, et al. Effect of straw-incorporation on corn yield and water use efficiency in arid farming areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (11): 60 - 67. (in Chinese)

6 Anyanzwa H, Okalebo J R, Othieno O, et al. Effects of conservation tillage, crop residue and cropping systems on changes in soil organic matter and maize-legume production: a case study in Teso District [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2010, 88(1): 39 - 47.

7 杨自栋,耿端阳,彭丽芳,等. 基于农田不平度的拖拉机机组输入谱推导与振动仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(12):62 - 66.
Yang Zidong, Geng Duanyang, Peng Lifang, et al. Deduction of input spectrum of tractor-implement combination and vibration simulation base on farm surface roughness[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 62 - 66. (in Chinese)

8 任文涛,李宝筏,唐领占,等. 沟底不平度引起的插秧机振动[J]. 农业机械学报,1997,28(增刊):187 - 190.
Ren Wentao, Li Baofa, Tang Lingzhan, et al. The vibration of rice transplanter caused by the roughness of gully bottom [J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997, 28 (Supp.): 187 - 190. (in Chinese)
9 胡永文.气吸式排种器装置在振动条件下的排种性能研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2011.
Hu Yongwen. Study on air-suction seed metering device under vibration conditions [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
10 李成华,何波.铲式玉米精密播种机仿真及虚拟设计[M].北京:中国农业大学出版社,2007.
11 杨升明.铲式玉米精密播种机的数字化设计[D].沈阳:沈阳农业大学,2007.
Yang Shengming. Digital design of precision spade punch planter of maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2007. (in Chinese)
12 张晓冬,李成华,汤秋艳,等. 铲式玉米精密播种机振动特性试验[J].沈阳农业大学学报,2009,40(6):732 - 735.
Zhang Xiaodong, Li Chenghua, Tang Qiuyan, at el. Vibration properties of spade punch planter of maize [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(6):732 - 735. (in Chinese)
13 王颖,李成华,王慧慧. 铲式玉米精密播种机振动对播种质量影响试验研究[J].农机化研究, 2008(8):124 - 126.
Wang Ying, Li Chenghua, Wang Huihui. Experimental study on influence of vibration of precision spade punch planter of maize on sowing quality [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(8):124 - 126. (in Chinese)
14 戴天时,陈殿友.线性代数[M].北京:高等教育出版社,2004.
15 刘延柱,陈文良,陈立群.振动力学[M].北京:高等教育出版社,1998
16 杨敏,殷晨波,姜涛. Pro/E 与 ADAMS/View 之间图形数据传递方法[J]. 中国工程机械学报,2005,3(3):332 - 335.
Yang Min, Yin Chenbo, Jiang Tao. Study and application on graphical data exchange between Pro/E and ADAMS/View [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2005,3(3):332 - 335. (in Chinese)
17 张晓冬. 铲式玉米精密播种机播种过程动态仿真研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2010.
Zhang Xiaodong. Study on working dynamic procedure for precision spade punch planter of maize [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010. (in Chinese)

Mathematic Vibration Model of Spade Punch Planter of Maize

Zhang Xiaodong[1]　Li Chenghua[2]　Li Jianqiao[1]　Zou Meng[1]
(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
2. *School of Mechanical Engineering*, *Shenyang Technology University*, *Shenyang* 110168, *China*)

Abstract: In order to investigate the relation between the seeding performance of precision spade punch planter of maize and the vibration caused by the simple harmonic excitation of field roughness, a mathematic vibration model between steady state responses of precision spade punch planter of maize and real seed displacement was established. The mathematic model gave the conclusion that the uniformity of sowing seed of planter was mainly decided by next factors, such as structure properties of planter, work velocity of planter, distance between the seed metering device of planter and the surface of till soil, surface conditions, and the adhere of till soil. The comparasion results between theoretical seed distance and experimental seed distance indicated the distributed trend between both distances above. It was proved that the mathematic model could be used to predict and analyze the uniformity of sowing seed.

Key words: Spade punch planter　Vibration　Mathematic model　Experiment