

穴播穴灌坐水播种机水路系统的结构优化

王利强^{1,2} 吴崇友² 高连兴¹ 金诚谦² 涂安富²

(1. 沈阳农业大学 工程学院, 沈阳 110161; 2. 农业部 南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要 针对当前坐水播种机具存在的结构复杂、种液播施难同位等问题,提出了“开沟-种、液同时播施-覆土-镇压”的机械作业新工艺,在此基础上设计了新型穴播穴灌坐水播种机水路系统。以该水路系统关键部件水阀为例,建立了其设计参数的数学模型,利用惩罚函数法和 Matlab 提供的优化函数对模型参数进行求解。优化结果为:水阀出口内径为 2.5 cm,阀芯头部厚度为 0.7 cm,阀芯上下运动行程为 1.9 cm,阀芯头部上下端面直径分别为 3.0 和 6.1 cm;室内样机试验测得的水阀局部水头损失系数为 2.08。该方法适用于水路系统其他部件参数的优化设计。

关键词 坐水播种机; Matlab; 数学模型; 结构优化

中图分类号 S 223.26

文章编号 1007-4333(2005)06-0042-05

文献标识码 A

Structural optimization of waterway system of irrigating-sowing machine

Wang Liqiang^{1,2}, Wu Chongyou², Gao Lianxing¹, Jin Chengqian², Tu Anfu²

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract A new seeding technique of irrigating-sowing machine was studied which could ensure seeds and water to flow into seedbed furrow together at the same level. Based on general analysis, a waterway system of the machine was designed. Take the water valve of the waterway system for example, its parameter models were set up. By applying optimum technique and major function of Matlab, its optimum design parameters were obtained: diameter of water pipe of exit was 2.5 cm, thickness of head of valve core 0.7 cm, strokes of the core 1.9 cm, diameter of big side surface of the core 6.1 cm, and small side surface 3.0 cm. And coefficient of local loss-of-head of the water valve is 2.08. This optimum method is suitable for optimization parameter design of other parts in waterway system.

Key words irrigating-sowing machine; Matlab; mathematical models; structural optimization

我国北方干旱半干旱地区春播季节土壤墒情差,不能及时播种,严重影响农业生产。坐水播种机的出现及应用,在很大程度上减轻了春旱对当地农作物适时播种的威胁。1996 年以来在国家科研资金的引导下坐水播种机发展相对迅速,市场上出现了条播条灌、穴播条灌、穴播穴灌等多种形式的坐水播种机具,其中穴播穴灌坐水播种机能够实现间歇施水,在节约宝贵水资源的同时,减少了机组运水和补水的次数及拖拉机对土壤的压实,有效地提高了作业效率与作业质量;但目前穴播穴灌机仍存在机

体结构复杂、种液难同位、施水量难控制等亟待解决的问题。笔者提出了“开沟-种、液同时播施-覆土-镇压”的机械作业新工艺,同时对机具水路系统参数进行优化,以期设计出的新型坐水播种机能够有效的保证坐水过程中种、液播施同位,且播种机机械动作难度较低、机体结构简单。

1 水路系统组成及工作原理

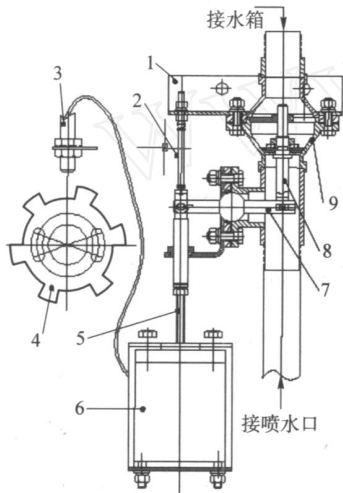
水路系统由水箱、水管、水阀、电磁开关及喷水口等组成(图 1)。作业时水由水箱经水管流入水阀

收稿日期: 2005-03-02

基金项目: 国家“863”节水重大科技专项课题(2002AA2Z4111)

作者简介: 王利强,博士研究生;吴崇友,研究员,主要从事农机设计开发及推广方面的研究, E-mail:wucy@nriam.com

内腔,电磁开关在时间分度轮 4 和接近开关 3 控制的输入信号下动作,电磁铁拉杆 5 向下运动通过杠杆 7 传递使水阀阀芯 8 向上运动,同时拉伸复位弹簧 2,阀门随之打开,水流水阀到喷水口后与排种器早已分离出的精量种子一起流入旱田种沟内,完成 1 次穴播施。随后水阀阀门在电磁开关输入信号作用下通过复位弹簧 2 复位闭合。整个过程要求水阀反应快、动作敏捷,设计中采用电磁铁与接近开关配合控制水阀的开合,经试验测试系统满足工作要求。



1. 固定座;2. 复位弹簧;3. 接近开关;4. 时间分度轮;5. 电磁铁拉杆;6. 电磁铁;7. 杠杆;8. 水阀阀芯;9. 水阀阀体

图 1 坐水播种机水路系统的组成

Fig. 1 Structure of waterway system

水阀的工作性能直接影响水路系统的整体性能,其结构参数的确定是确定水路系统其他元件结构参数的前提。本研究以水阀结构参数的确定为例,介绍应用于本研究的优化设计程序。

2 水阀结构参数的确定

2.1 一般分析及建模

在水路水流场中任意划定一个微小正六面体区域,并建立空间坐标系(图 2)。设 u_x 、 u_y 、 u_z 分别为该正方体 x 、 y 、 z 3 个方向上的水流速度。根据液体三元流动原理,水在流动过程中的欧拉三元连续方程式^[1]为

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

因为水为不可压缩液体,故式(1)的积分形式为

$$\iiint \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) dx dy dz = 0$$

在横截面积为 S 的封闭管(阀)内,上积分形式可表达为 $\iint_{\Omega} ds = 0$,当水在管(阀)内为恒定流时,管(阀)侧壁面法向 $u_n = 0$ 。若设管(阀)入、出口断面面积分别为 S_1 和 S_2 ,则有 $-\iint_{S_1} u_1 dS_1 + \iint_{S_2} u_2 dS_2 = 0$,即水流过截面 S_1 的流量等于流过截面 S_2 的流量(因 u_1 方向与 S_1 的外法线方向相反故方程第 1 项为负)。这说明水在管(阀)内作恒定流时,流过水路各过水端面的体积流量相等;水阀在开闭过程中过水面积的变化不影响水阀出口的总流量,因此在保证最低穴灌量的前提下,阀门处过水面积越小水的流速越快,从而使水流流经该水阀时局部水头损失增大,同时不易达到每穴灌强度的要求。实际作业中要求局部水头损失尽可能小,即水阀阀门处过水面积尽可能大,但这样势必增大水阀结构尺寸,导致整机结构笨重不协调。

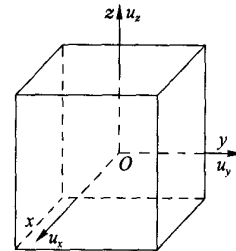


图 2 水流流场中任取的一微小正六面体

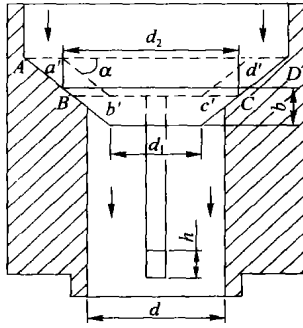
Fig. 2 Tiny random hexahedron in the flow field of water current

施水作业中种穴土壤的湿水区域是长轴为机组前进方向上的一个椭圆区域。穴播穴灌坐水播种要求施水区域集中,以使该椭圆长轴直径(以下称穴湿径)控制在 8~10 cm 范围内,灌水量 100~500 mL/穴,同时要求水路出水口的水流流速不宜过大,以免灌溉水飞溅。水路系统的理想状况是在要求的穴湿径尺寸及水路出水口水流流速允许范围内,尽可能加大灌水强度,减小水阀尺寸。为协调各方面配置,采用优化设计方法确定水阀的最优结构尺寸。

2.1.1 水阀出水管内径的确定

水阀结构见图 3。设水阀出口处水流速为 v ,机器前进速度为 v_0 ,穴湿径为 l ,出水管内径为 d ,

则每穴灌水量 $Q = \frac{d^2 v l}{4 v_0}$ 。



—阀芯头部倾角; b —阀芯头部厚度; d —水阀出水管内径; d_2 —阀芯头部上端面直径; d_1 —阀芯头部下端面直径; h —阀芯上下运动行程

图3 水阀结构示意图

Fig.3 Structural sketch of water valve

1) 设计变量 $X = [v, d, l]^T$ 。

2) 目标函数

$$\min(-Q) = \min\left[-\frac{d^2 v l}{4 v_0}\right] \quad (2)$$

表示机组在前进速度为 v_0 , 规定穴径及水路出水口水流流速允许范围内, 穴灌量尽可能大。

3) 约束条件为

$$g_1(x) : p_1 \leq v \leq q_1; g_2(x) : p_2 \leq d \leq q_2; g_3(x) : p_3 \leq l \leq q_3$$

其中 q, p 分别为设计变量取值的上、下限。整个模型内体积单位均为 mL, 长度单位为 cm。

2.1.2 水阀其他参数的确定

由图3可见, 圆台 $ABCD$ 的体积

$$V_1 = \frac{1}{12} \left[\left(d_2 + \frac{2h}{\tan \alpha} \right)^2 \frac{d_2}{2} \tan \alpha - \left(d_1 + \frac{2h}{\tan \alpha} \right)^2 \left(\frac{d_2}{2} \tan \alpha - b \right) \right]$$

其中: d_1 为阀芯头部下端面直径; d_2 为阀芯头部上端面直径; b 为阀芯头部厚度; α 为阀芯头部倾角, $\tan \alpha = 2b / (d_2 - d_1)$; h 为阀芯上下运动行程。圆台 $abcd$ 的体积

$$V_2 = \frac{1}{12} \left[\frac{d_1^3}{2} \tan \alpha - d_1^2 \left(\frac{d_2}{2} \tan \alpha - b \right) \right]$$

其体积差 $V_c = V_1 - V_2$; 水阀出水管内高度为 h 的

水的体积为 $V_3 = \frac{1}{4} d^2 h$ 。

水阀阀门处水流速度太快会影响水路出口水流的稳定性, 而电磁阀的响应时间很短, 阀门处的过水时间几乎全部集中在阀芯开启的最大行程处, 因而阀芯与水阀阀门啮合面间的最大体积差 V_c 不能过小。为了减少水路出口水流的紊动, 室内试验确定阀芯运动的行程为 h 时, 体积差 V_c 应不小于 V_3 , 即设计中体积差 V_c 尽量取大, 参数 d_1, d_2, b 和 h 在约束范围内尽量取小。

1) 设计变量 $X = [d_1, d_2, b, h]^T$ 。

2) 目标函数

$$\min(-V_c) = \min(V_2 - V_1) = \min\left\{ \frac{1}{12} \left[\frac{d_2^3}{2} \tan \alpha - d_1^2 \left(\frac{d_2}{2} \tan \alpha - b \right) \right] - \frac{1}{12} \left[\left(d_2 + \frac{2h}{\tan \alpha} \right)^2 \frac{d_2}{2} \tan \alpha - \left(d_1 + \frac{2h}{\tan \alpha} \right)^2 \left(\frac{d_2}{2} \tan \alpha - b \right) \right] \right\} \quad (3)$$

$$\min f_k(X) = \min(d_1, d_2, b, h) \quad k=2, 3, 4, 5 \quad (4)$$

3) 约束条件

$g_1(x) : V_3 \leq V_c; g_2(x) : p_2 \leq d_1 \leq q_2; g_3(x) : p_3 \leq d_2 \leq q_3; g_4(x) : p_4 \leq b \leq q_4; g_5(x) : p_5 \leq h \leq q_5$ 约束条件中的 q 和 p 分别为变量参数取值的上、下限。整个模型内体积单位均为 mL, 长度单位为 cm。

该模型有 2 个目标函数式(3)和(4), 为处理方便, 求解前利用加权组合法, 引入加权因子 λ_j 将该模型的多目标函数化为一个单目标函数 $\min f(X) =$

$$\sum_{j=1}^5 \lambda_j f_j(X)。$$

2.2 数学模型优化求解

建立的数学模型均为不等式约束非线性最优化问题, 应用惩罚函数内点法将原函数在惩罚函数可行域内构建为一新的无约束目标函数, 在可行域内部求构建函数的极值点^[2]。惩罚函数一般式为

$$f(X, r^{(k)}) = f(x) - r^{(k)} \sum_{u=1}^m \frac{1}{g_u(X)}$$

数学模型的求解过程借助 Matlab 软件提供的优化工具箱实现, 本研究应用逐步二次规划法^[3](SQP法)。求解时首先编写目标函数的描述文件(M文件), 文件名为 fun.m, 形式为 $[f, g] = \text{fun}(x)$ 。Matlab 程序实现由 constr() 函数完成, 命令格式(以

水阀其他参数确定为例)如下:

Function/[f,g]=fun(x):f=V₂-V₁(表达式)

g₁(x):g₂(x):g₃(x):g₄(x):g₅(x)(表达式)

Function/[df,dg]=grad(x)(f和g的梯度)

X=constr('fun',X₀,opt,[l],[l],'grad')(X₀,

X分别为设计变量的初始值及优化值)

函数的调用格式:[X,opt]=fminu('fun',X₀)

程序运行后,求解 X 得到各自数学模型设计变量中水阀参数 d、d₁、d₂、b 和 h 的最优值分别为 2.5、6.1、3.0、0.7 和 1.9 cm。

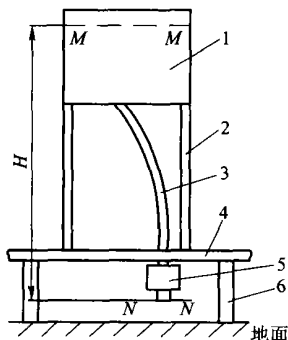
3 水阀局部损失系数的测定

根据优化得到的水阀参数设计制造水阀样机,并进行性能测试。试验中保持水箱内水位不变,分别检测水路不装水阀、装水阀 2 种情况下某一段时间内出口水流流量和流速,利用其差值,求取水阀相关参数。试验数据取 5 次测量的平均值,结果见表 1。图 4 为试验结构简图。

表 1 水路装水阀和不装水阀 2 种情况下相应参数的测试值

Table 1 Testing parameters and data of waterway system with valve and without valve

条 件	测量时 间/s	测量时间内的 施水总量/mL	水路出口处水 流速度 v ₂ /(m/s)
不装水阀	3.640	3652.5	2.044
装水阀	0.543	477.5	1.165



1. 水箱;2. 支架;3. 输水管;
4. 机架;5. 水阀;6. 垫块

图 4 水阀局部损失系数测试试验简图

Fig. 4 Structural sketch of experiment for testing local loss-of-head of water valve

选取水箱内液面 M - M 为第 1 研究面,出水

口液面 N - N 为第 2 研究面,并以 N - N 面为基准面。两研究面间的高度差为 H,水密度 = 1 000 kg/m³。

液体总流的伯努里方程式^[4-5]

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_s$$

其中: h_s 为水路系统总水头损失, Pa/m; g = 9.8 m/s²; Z₁ 为研究面 M - M 相对于基准面 N - N 的水头高度,试验时取 Z₁ = H; Z₂ 为基准面 N - N 相对于自身的水头高度, Z₂ = 0; P₁ 和 P₂ 分别为研究面 M - M 和 N - N 上的大气压强, P₁ = P₂ = 1 标准大气压 (101.325 kPa); v₁ 为水箱内水流速度(可忽略), m/s; v₂ 为水路出口处水流速度, m/s; α₁ 和 α₂ 为 v₁ 和 v₂ 的平均动能修正系数, α₁ = α₂ = 1。则伯努里方程变为

$$h_s = H - \frac{v_2^2}{2g} \quad (5)$$

取高度差 H = 1.3 m, 将水路不装水阀和装水阀时 v₂ 的试验值代入式 (5), 分别算出 2 种状况下水路的总水头损失 h_{s1} = 1.078, h_{s2} = 1.231, 则试验中水流在水阀处的局部水头损失 h_局 = h_{s2} - h_{s1} =

$$0.144。由局部水头损失计算公式^[5] h_{局} = \frac{v_2^2}{2g} \eta_{局} 得$$

$$\eta_{局} = \frac{2gh_{局}}{v_2^2} \quad (6)$$

式中: η_局 为局部损失系数。将试验数据及计算值代入式 (6), 求得被测水阀的局部损失系数 η_局 = 2.08。

4 结束语

针对笔者提出的“开沟-种、液同时播施-覆土-镇压”的机械作业工艺设计了新型穴播穴灌坐水播种机水路系统,建立了该系统关键部件水阀的参数设计模型。样机试验证明水路系统的设计及模型构建是合理的。

水阀结构参数的优化结果为: 阀出口内径 d = 2.5 cm, 阀芯头部厚度 b = 0.7 cm, 阀芯上下运动行程 h = 1.9 cm, 阀芯头部上下端面直径 d₂ 和 d₁ 分别为 3.0 和 6.1 cm。试验测得水阀的局部水头损失系数为 2.08。

该方法适用于水路系统其他部件参数的优化设计,如水箱尺寸、输水管道内径、输水管长、喷水口距

地的高度及各元件最佳安装位置等。设计过程中没有考虑实际作业环境及机具配套动力的振动等影响因素。要获得更精确的设计参数还需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 华东水利学院. 水力学[M]. 第2版. 北京:科学出版社,1983. 496
- [2] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京:清华大学出版社,1994. 448
- [3] 王学辉,张明辉. MATLAB 6.1 最新应用详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001. 361~377
- [4] 孙成彦. 管渠水力计算概论[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1978. 217
- [5] 中国水利工程学会. 中国工程师手册. 水利类(上册)[M]. 北京:中国水利工程学会,1981. 420
- [6] 孙骊,吕新民. 旱地节水型播种机械研制初探[J]. 干旱地区农业研究,1996,14(4):61~66
- [7] 徐航,张兴武. 吉林省半干旱地区坐水播种的调查及研究[J]. 吉林农业科学,1991(3):27~29
- [8] 张淑敏,尹丽娟,鄂卓茂. 施水沟播机的试验研究与结构设计[J]. 中国农业大学学报,2001,6(6):48~52
- [9] 孙骊,吕新民. 旱地节水型播种机施水问题研究[J]. 干旱地区农业研究,1997,5(2):94~98
- [10] 陈礼德,鄂卓茂,王继成,等. 2BSL-1型垄作施水播种机的开发研究[J]. 中国农业大学学报,2000,5(6):43~46
- [11] Zhang Wenhuan, Zheng Decong. Computer simulation on hitch parallel-link mechanisms of combine drill with walking tractor[J]. 农业工程学报,2001,17(1):78~80