

基于相关向量机的双变量施肥控制序列优化*

苑进 刘成良 古玉雪 苗中华

(上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

【摘要】 提高变量施肥精度和均匀性的关键在于减小变量机构的响应时间,选择最佳控制参数。提出了一种基于相关向量机的开度转速双变量施肥控制序列决策方法。首先考虑了施肥处方中前、中、后相邻3次施肥量的相互影响,综合了开度和转速的响应时间和工作死区等特性,利用非线性规划方法实现最佳控制参数的决策,避免了小施肥量下的大开度、小转速现象,减小了对外槽轮脉动性的影响。为了协调车载计算机运算能力与控制响应的矛盾,利用相关向量机实现了施肥控制序列的近优实时计算。室内试验结果表明,平均施肥误差比原方法减小了4%,同时该方法有效地避免了极端情况下电动机无法驱动排肥转轴的情况。田间作业试验证明,使用该方法的施肥机指令响应及时,施肥均匀、准确,证明了方法的实用性。

关键词: 变量施肥 序列优化 控制参数 相关向量机

中图分类号: S224.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)S0-0184-06

Bivariate Fertilization Control Sequence Optimization
Based on Relevance Vector Machine

Yuan Jin Liu Chengliang Gu Yuxue Miao Zhonghua

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

The key technology to improve accuracy and uniformity of variable fertilization lies in reducing the response time and choosing the best control parameters. A bivariate control fertilization sequence decision-making method based on relevance vector machine was presented. The method took into account the interaction among the before-current-after, three adjacent fertilizing rates, the response time and working dead features of active roller length and speed control. An optimal control parameters decision-making was carried out using non-linear programming method. Finally, the problem of small fertilizing rate under big active roller length with small rotational speed was avoided. The impact of the fluted metering roller's pulsation was reduced. In order to coordinate the limited computation power of the vehicle mounted computer and respond time of bivariate control, relevant vector machine was utilized to achieve a near-optimal real-time computing for fertilization control sequences. Laboratory test results showed that the average error was 4%, which was smaller than the original method, while this method was effective to avoid the extreme case that the motor could not drive the roller shaft with improper parameters. The field test showed this kind of applicator could response to the instruction in time, and it had good accuracy and consistency, which proved its practicality.

Key words Variable fertilization, Sequence optimization, Control parameter, Relevance vector machine

引言

国内外研制的固体颗粒施肥机大都通过单一改

变施肥轴转速以实现施肥量的调节,即单变量调节。日本京都大学研制的变量施肥机,每个独立的排肥机构通过各自相联的电动机驱动,排肥量通过驱动

收稿日期: 2011-07-15 修回日期: 2011-08-23
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2010AA101403)和国家自然科学基金资助项目(61175038,31101461)
作者简介: 苑进,助理研究员,主要从事智能农业机械装备设计及理论研究,E-mail: jinyuan@sjtu.edu.cn

电动机的转速加以调节;王秀等^[1]设计了一种可与国产拖拉机配套的变量施肥机,该机采用普通外槽轮作为变量施肥机的肥料计量装置,通过调整外槽轮的转动速度达到调整施肥量的目的;张书慧等^[2]设计了一种将 GPS 和 GIS 相结合进行施肥作业决策的施肥机,也是通过控制施肥机的排肥轴转速,实现精确自动变量施肥作业。

单变量调节简单方便,但也使得施肥量调节的精度和范围较小。在施肥量较小时,过低排肥轴转速会导致外槽轮排肥脉动性显著,降低施肥均匀性;相反,过高转速又会降低施肥精度以及增加种子破损率。针对这些问题,刘成良^[3]、苑进^[4]等开发了一种集旋耕、施肥、播种为一体的开度转速双变量施肥播种机,研发了基于 ARM/DSP 的双变量施肥控制系统并带有 GPS/GPRS 模块。与仅调节转速的施肥机相比,通过转速和开度组合协调控制,可以较大幅度提高施肥量的范围和精度。由于施肥序列中的每一个施肥量都对应无穷组转速和开度的组合,非优的转速和开度的组合序列会降低施肥播

种的均匀性和精度。提出一种基于相关向量机系统的控制算法。将该算法嵌入基于 ARM/DSP 的双变量施肥控制系统,搭载该施肥机进行室内和田间试验。

1 开度转速双变量施肥部件

1.1 控制原理

图 1 所示为开度、转速双变量施肥部件原理图,其中外槽轮、排肥盒、阻塞套和排肥舌共同构成了外槽轮排肥盒,经卡箍固定在排肥转轴上。双变量是指排肥转轴的转速和其轴向移动的距离。施肥的工作过程为:施肥部件控制器从 GPS 模块获得经、纬度信息,根据作业处方推荐的该网格的施肥量,通过计算确定双变量控制参数值,然后通过直流电动机驱动器和电动推杆驱动器控制直流电动机的转速和电动推杆的开度。排肥转轴的转速通过霍尔传感器测量,而排肥的开度由电子尺测量获得,进而施肥部件控制器通过 PID 调节施肥部件的开度和转速,实现变量施肥。

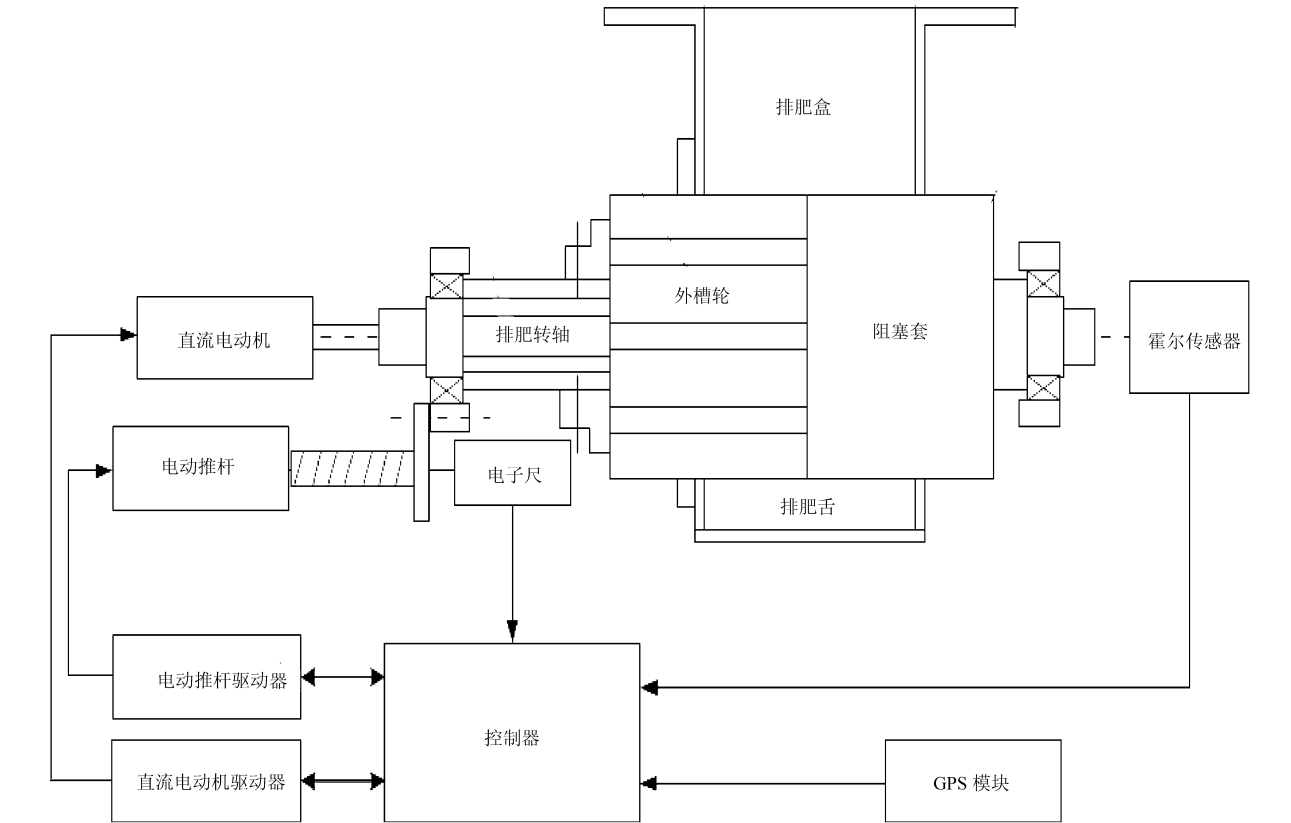


图 1 开度转速双变量施肥部件原理图

Fig.1 Schematic diagram of the bivariate control parameters variable rate fertilizing planter

1.2 双变量施肥控制特点

对单变量调节施肥机来说,施肥量 $q(\text{g}/\text{min})$ 和转速 $n(\text{r}/\text{min})$ 之间为一元关系 $q=f(n)$,函数关系式通过多次试验标定获得。在实际施肥过程中,根据施肥量计算出转速值来控制施肥即可。图 2 为施

肥量较小且双变量调节转速为单变量调节的两倍时的排肥量脉动性示意图,其中幅值代表排肥量的大小。通过图 2 可知,外槽轮排肥盒具有脉动现象。排料的脉动性会降低施肥的均匀性,并且施肥的均匀性随着施肥量的减小(也就是速度的减小)逐渐

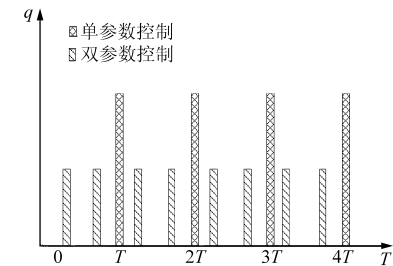


图2 同一施肥量下单变量与双变量控制的排肥脉动性比较示意图

Fig.2 Pulsation diagram of univariate and bivariate control under the same fertilization rate

变差^[5-7]。同时,在施肥量较小时,转速较小,转速的微小控制误差都会对施肥精度和均匀性造成较大

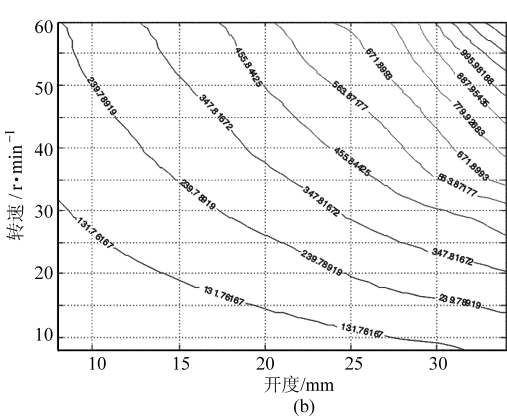
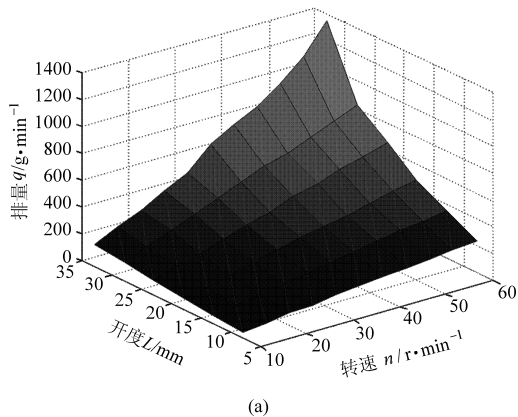


图3 施肥量、转速和开度的拟合响应关系

Fig.3 Relationship diagram based on fitting equation

(a) 施肥量和转速、开度曲面 (b) 施肥量等高线

1.3 施肥部件的电动机特性与控制量变化区间的选取

对开度、转速双变量施肥部件来说,理论上只要施肥量在施肥部件可达范围内,总可以根据施肥量、转速和开度之间的映射关系计算出无穷多组转速和开度的组合。但在实际应用中,并不是所有的转速和开度的组合都能适用,要综合考虑各种约束条件。本施肥部件选用24 V直流无刷电动机并搭配鼎拓达DBLS-01型驱动器用于调速。由于电动机的调速特性本身存在死区,当调速电压在死区范围内变化时,电磁转矩不足以克服负载转矩使电动机启动,转速输出始终为零。只有当调速电压超出死区范围时,电动机才能起转并最终达到稳态。同时,本电动机控制系统采用霍尔传感器反馈,在低转速运行时,其反馈信号的分辨率不会太高,霍尔信号响应周期长,因而低速时速度跟踪会受到限制。经试验测量,本施肥部件电动机经行星齿轮减速后的调速范围为[5,120]。在室内试验中还发现,当转速指令从一个较大值骤降到10 r/min左右时,亦会出现电动机无法驱动排肥轴的现象。因此,在施肥量

影响。虽然单变量调节的方法简单易行且满足精准农业要求,但其施肥量调节的精度和范围都较小,并且低速时均匀性不好。

对于开度转速双变量施肥部件来说,施肥量 q 、转速 n 和开度 L 之间三维曲面关系如图3所示,函数关系式通过多次试验标定获得。通过图3可以看到,每一个施肥量都对应无穷组转速和开度的组合。通过图2可以发现,在施肥量一定时,通过降低开度来提高转速,可以降低施肥脉动性的影响,改善施肥的均匀性。开度转速双变量施肥部件通过转速和开度组合协调控制,依据施肥量的不同合理设置转速和开度参数,能够提高施肥量的范围和精度,同时改善了施肥量较小时施肥的均匀性。

由大到小变化时,要防止出现大开度小转速以及转速骤变的情况。

在双变量调节施肥系统中,除考虑电动机的调速范围外,还应考虑开度调节的响应时间,转速剧烈变化对施肥精度的影响,转速和开度对施肥均匀性的影响等问题。因此,要想获得理想的转速开度组合序列通常需要搜索次优解。

在实际应用中,转速和开度控制序列获取的原始方法是:在上一次施肥量所设定开度值的基础上,计算出当前施肥量所需排肥轴转速值;如果此转速值超出调速范围,则需根据施肥量改变开度大小,重新计算排肥轴转速直到满足条件为止。虽然这种方法在一定程度上解决了上述问题,但它没有考虑到下一次施肥过程对本次的影响,因此从施肥量序列上看,它给出的序列控制效果不理想。

针对上述问题,提出一种基于相关向量机回归的开度转速双变量施肥控制序列生成方法。该方法综合考虑上次施肥过程以及下次施肥过程对本次施肥的影响,运用相关向量机回归预测,快速合理地给出施肥所需的转速和开度控制序列。

2 双变量施肥控制序列生成方法

基于相关向量机的开度转速双变量施肥控制序列生成方法的关键是离线建立相关向量机模型,相关向量机模型生成后,通过在线调用相关向量机模型给出较优化的转速和开度组合控制量,控制电动机转动,完成一次施肥。相关向量机模型训练过程包括理想控制量计算和相关向量机学习。

2.1 理想控制量计算

理想控制量是建立相关向量机模型的依据,通过计算给出大量的不同情况下的理想控制量,并从中学习出相关向量机的回归模型。理想控制量计算所用到的变量有:上次开度 L_0 、上次转速 n_0 、本次开度 L_1 、本次转速 n_1 、下次开度 L_2 、下次转速 n_2 、开度最大值 $L_{\max}$ 、开度最小值 $L_{\min}$ 、转速最大值 $n_{\max}$ 、转速最小值 $n_{\min}$ 、上次施肥量 q_0 、本次施肥量 q_1 、下次施肥量 q_2 ,开度统一为 mm,转速统一为 r/min,施肥量统一为 g/min,优化计算所依照的规则有:

(1) 转速调节范围由电动机、控制器和机构决定,开度的调节范围由机构和电动推杆决定。经试验测量,电动机调速范围为 $[5, 120]$,开度调节范围为 $[0, 38]$ 。由于过低的排肥轴转速会导致外槽轮排肥的脉动性显著,过高的转速又会降低施肥的精度^[7]。基于对系统安全性、施肥均匀性的考虑,把系统在正常工作时的开度调节范围限定为 $[10, 34]$,转速调节范围限定为 $[10, 55]$ 。

(2) 开度调节由电动推杆实现,推杆最高速度为 5.4 mm/s,为保证系统响应时间以及施肥的精度,开度 L_1 限定在 $[L_0 - 8, L_0 + 8]$ 范围内变化,开度 L_2 限定在 $[L_1 - 8, L_1 + 8]$ 范围内变化。调速电动机可在很短时间(小于 0.2 s)由 0 达到 60 r/min,因此不用考虑电动机响应时间问题。

(3) 评价函数最优。评价函数的建立要综合考虑:开度调节时间对施肥的响应时间;转速剧烈变化对施肥的影响;要防止出现小开度大转速以及大开度小转速的情况,这两种情况的出现都会较大幅度降低施肥的精度和均匀性,应加以避免。

由于开度理想值的计算需要考虑上次和下次施肥过程对本次的影响,以及需要根据上次的开度和转速确定本次的开度和转速,因此程序的输入变量为 5 个(L_0, n_0, q_0, q_1, q_2),输出变量为 2 个(L_1, n_1)。由于施肥量是开度和转速的函数,最后确定输入量为 4 个(L_0, q_0, q_1, q_2),输出量为 1 个(L_1)。问题最后归结为一个多元非线性函数的优化问题

$$\begin{aligned} \text{Min } H = & a(L_1 - L_0)^2 + b(n_1 - n_0)^2 + \\ & c(L_2 - L_1)^2 + d(n_2 - n_1)^2 + eS_3 \end{aligned}$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} 10 \leq L_0 \leq 34 \\ 10 \leq L_1 \leq 34 \\ 10 \leq L_2 \leq 34 \\ 10 \leq n_0 \leq 55 \\ 10 \leq n_1 \leq 55 \\ 10 \leq n_2 \leq 55 \\ L_0 - 8 \leq L_1 \leq L_0 + 8 \\ L_1 - 8 \leq L_2 \leq L_1 + 8 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} L &= L_{\max} - L_{\min} \quad n = n_{\max} - n_{\min} \\ L_M &= \frac{L_{\max} + L_{\min}}{2} \quad n_M = \frac{n_{\max} + n_{\min}}{2} \\ S_1 &= \begin{cases} \left| f\left(\frac{L_1 - L_M}{L}\right)^2 - g\left(\frac{n_1 - n_M}{n}\right)^2 \right| & ((L_1 - L_M)(n_1 - n_M) \geq 0) \\ f\left(\frac{L_1 - L_M}{L}\right)^2 + g\left(\frac{n_1 - n_M}{n}\right)^2 & ((L_1 - L_M)(n_1 - n_M) < 0) \end{cases} \\ S_2 &= \begin{cases} \left| m\left(\frac{L_2 - L_M}{L}\right)^2 - k\left(\frac{n_2 - n_M}{n}\right)^2 \right| & ((L_2 - L_M)(n_2 - n_M) \geq 0) \\ m\left(\frac{L_2 - L_M}{L}\right)^2 + k\left(\frac{n_2 - n_M}{n}\right)^2 & ((L_2 - L_M)(n_2 - n_M) < 0) \end{cases} \\ S_3 &= S_1 + S_2 \end{aligned}$$

式中,权重系数 $a, b, c, d, e, f, g, m, k$ 的取值根据施肥部件的具体情况而定。

根据施肥部件参数的设定,多元非线性函数优化出理想开度 L_1 的值,部分数据见表 1。理想控制量的计算程序虽然能给出理想的控制量,但理想值的求解是一个多元非线性函数的优化问题,求解运算时间长。试验证明,由于车载计算机运算能力有限,该方法不适合在实际中使用,它过多消耗系统资源,导致系统不能及时根据 GPS 信息作出响应,并且对用户的操作响应不及时,为此必须引用一种新的办法。基于相关向量机建立的多维响应曲面回归模型能有效建立输入、输出间的映射关系。基于该方法的开度、转速双变量施肥控制序列生成方法有效协调了车载计算机运算能力不足与施肥精度等之间的矛盾,能快速给出与理想值序列十分接近的控制序列,实用可行。

2.2 相关向量机的控制序列生成方法

相关向量机是一种使用数据依赖核函数的稀疏贝叶斯模型的具体实现形式^[8]。其关键特性是推断出的预测模型非常稀疏,即包含相对较少的相关向量,因此模型计算时间相对较短,同时具有很好的

表 1 L_1 的部分理想数值
Tab.1 Parts of ideal value of L_1

上次开度 L_0/mm	上次施肥量 $q_0/\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	本次施肥量 $q_1/\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	下次施肥量 $q_2/\text{g}\cdot\text{min}^{-1}$	本次理想 开度 L_1/mm
11	150	150	150	15.1
11	150	150	320	16.2
11	150	150	480	16.4
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
24	320	150	150	16.5
24	320	150	320	19.3
24	320	150	480	23.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	320	150	150	24.3
32	320	150	320	25.4
32	320	150	480	26.1
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

推广性能。这里利用相关向量机建立 4 输入单输出映射关系。

采用上述离线优化获取的数据作为学习样本,首先对样本集进行归一化处理。选择适当的核函数和超参数,设定初始正规化参数和核参数的参数值。用样本数据对相关向量机进行训练,选择正则化参数和核参数的网格搜索方法进行相关向量机回归最优模型选择,以获取相关向量集和最优模型参数。建立以上次开度(L_0)和相邻 3 次施肥量(q_0, q_1, q_2)为输入量,当前要选择的施肥开度(L_1)为输出量的相关向量机回归模型。所述相关向量机回归由输入、核函数内积及输出函数组成,其非线性函数表达式为

$$\hat{y}=f(X;W)=\sum_{i=0}^N\omega_iK(X,X_i)=\Phi W\tag{2}$$

输出函数 $f(\cdot)$ 为要学习的输入输出映射关系。 $\Phi=[\varphi(X_1),\varphi(X_2),\cdots,\varphi(X_N)]^T$ 是 $N\times(N+1)$ 的设计矩阵, $\Phi(X_n)=[1,K(X_n,X_1),K(X_n,X_2),\cdots,K(X_n,X_N)]^T$ 。本文使用高斯核函数 $K(X,X_i)=\exp(-\|X-X_i\|^2/\gamma^2)$ 来构造非线性相关向量机回归。在相关向量机中,核参数 γ 是固定值。因此对于高精度建模需要使用交叉验证选择确定。

3 试验

3.1 试验条件与方法

试验材料和仪器有: NK 复合肥, 2BGKF12 型变量施肥机, 肥料收集桶, 电子秤和数码摄像机。试验方法为: 将相关向量机方法和原方法分别烧写到变量施肥控制器中, 借助基于 ARM/DSP 的变量施肥

系统控制双变量施肥部件进行室内试验。为尽可能接近实际施肥作业, 假定拖拉机行驶速度为 1 m/s, 田间施肥网格为 10 m × 10 m, 试验中每隔 10 s 向变量控制系统发送一次施肥量, 施肥量调节范围设定为 0 ~ 600 kg/hm²。

为综合验证和比较两种方法的实用性, 确定试验用施肥序列如下: $Q=[500, 220, 85, 100, 300, 290, 600]$ 。尽管在实际施肥处方中, 施肥量剧变情况发生概率很小, 该施肥序列仍包含了这种情况。试验过程中, 在每个排肥管下放置一个肥料收集桶, 其下各放置一个电子秤用于记录排肥量的变化。用数码摄像机拍摄下电子秤在施肥过程中的读数, 用于试验分析。

3.2 试验结果及分析

从拍摄视频中提取每秒的排肥量数据, 取 3 次重复试验的数值平均作为最终排肥量。将各种算法的试验结果汇总在表 2 中, 散点图见图 4, 通过表 2 和图 4 发现:

(1) 在没有施肥量剧变的情况下, 如连续的 Q_5, Q_6 过程, 两种方法的施肥过程都比较稳定, 能满足施肥机标准的要求, 但相关向量机方法施肥平均误差比原方法减小 4% 左右。

(2) 在有施肥量剧变的情况下, 对于采用原方法的控制系统: 当施肥量从 Q_6 骤降到 Q_1 时, 出现了大开度小转速以及短暂的电动机无法驱动排料转轴的情况, 使施肥误差高达 15%; 当施肥量从 Q_1 向 Q_2 转变时, 运用原方法的系统响应时间长, 导致施肥量偏大; 当施肥量从 Q_6 向 Q_7 转变时, 都出现了开度较小而转速较大的不良情况。而对于运用相关向量机方法的系统, 通过开度和转速的组合控制, 有效地避免了电动机无法驱动排肥转轴的情况, 并在一定程度上缓解了大开度小转速、小开度大转速的不良情况, 使系统的平均施肥误差小于 4%, 同时也有效地缩短了系统在极端情况下的响应时间。

因此, 虽然原方法考虑了上次施肥过程对本次的影响, 开度大小在上次开度的基础上进行调整, 但它并没有考虑下次施肥过程对本次的影响, 控制效果不理想, 施肥精度较低。相关向量机方法以上次、本次和下次的施肥量以及上次的开度为输入, 以本次的开度为输出, 综合考虑上次和下次施肥过程对本次施肥的影响, 控制效果良好。在施肥的全过程中, 单点最大施肥误差小于 12%, 平均施肥误差小于 4%, 平均误差比原方法减小了 4%。

2010 年 10 月在上海长江农场的冬小麦试验田进行了试验。试验田的网格为 10 m × 10 m, 控制系统安装在 2BGKF12 型变量施肥机上。通过真实的

表 2 两种方法试验结果对比

Tab. 2 Comparison results of different methods

施肥量 序列	理想开度	理想转速	相关向量机方法			原方法		
	序列	序列	开度序	转速序列	实际排肥量	开度序	转速序列	实际排肥量
	/mm	/r·min ⁻¹	列/mm	/r·min ⁻¹	/kg·hm ⁻²	列/mm	/r·min ⁻¹	/kg·hm ⁻²
$Q_0 = 580 \text{ kg/hm}^2$	28. 2	40. 2	28. 43	39. 43	560. 71	34	30. 76	613. 45
$Q_1 = 220 \text{ kg/hm}^2$	20. 2	24. 86	21. 60	22. 91	228. 88	34	11. 7	164. 59
$Q_2 = 85 \text{ kg/hm}^2$	12. 4	14. 57	16. 81	12. 88	80. 77	23	10. 04	99. 82
$Q_3 = 100 \text{ kg/hm}^2$	12. 9	17. 55	16. 34	15. 01	95. 38	23	11. 3	107. 67
$Q_4 = 300 \text{ kg/hm}^2$	19. 2	34. 52	18. 50	35. 49	288. 49	23	28	322. 43
$Q_5 = 290 \text{ kg/hm}^2$	22. 3	28. 58	21. 68	29. 05	299. 07	23	27. 17	315. 21
$Q_6 = 600 \text{ kg/hm}^2$	28. 1	41. 51	26. 95	43. 54	589. 65	23	52. 54	616. 56
$Q_7 = 305 \text{ kg/hm}^2$	25. 1	25. 72	25. 39	25. 23	316. 89	23	28. 41	328. 18
$Q_8 = 600 \text{ kg/hm}^2$	28. 1	41. 51	28. 51	40. 56	588. 95	23	52. 54	635. 29

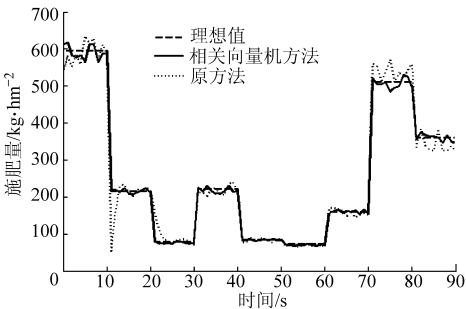


图 4 两种方法的试验结果比较

Fig. 4 Comparison of different algorithms

田间施肥作业,发现相关向量机方法有效地协调了车载计算机运算能力不足和施肥精度等之间的矛盾,能快速给出与理想值序列十分接近的控制序列。使用该方法的施肥指令响应及时,对用户操作的反应迅速,施肥均匀、准确。

4 结束语

开度转速双变量施肥部件通过转速和开度的组

合协调控制,较大幅度提高了施肥的范围和精度,但转速和开度控制量的组合序列选取较为复杂。施肥序列中的每一个施肥量都对应无穷多组转速和开度的组合,非优的组合序列会降低甚至破坏此种施肥部件的准确性和均匀性。为解决这一问题,提出了一种基于相关向量机的开度转速双变量施肥控制序列生成方法。该方法融合了原方法和理想值算法的优点,综合考虑上次和下次施肥过程对本次施肥过程的影响,能快速给出近优的转速和开度控制量组合序列。室内试验证明,本文算法能快速给出与理想值序列十分接近的控制序列,在施肥的全过程中,单点最大施肥误差小于 12%,平均施肥误差小于 4%,和原方法相比平均误差减小了 4%,避免了极端情况下的电动机无法驱动排料转轴的情况。在施肥过程中不会出现小开度大转速、大开度小转速的不良情况,证明了本文方法的实用性和有效性。鉴于播种和施肥控制过程类似,本文施肥控制序列优化也适用于开度转速双变量播种的组合协调控制。

参 考 文 献

1 王秀,赵春江,孟志军,等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2004,20(5): 114 ~ 117.
Wang Xiu,Zhao Chunjiang,Meng Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2004,20(5): 114 ~ 117. (in Chinese)

2 张书慧,马成林,吴才聪,等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003,19(1):129 ~ 131.
Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2003,19(1): 129 ~ 131. (in Chinese)

3 刘成良,苑进,刘建政,等. 基于 ARM 和 DSP 的双变量施肥控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010,41(增刊):233 ~ 238.
Liu Chengliang, Yuan Jin, Liu Jianzheng, et al. ARM and DSP-based bivariable fertilizing control system design and implementation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41 (Supp.): 233 ~ 238. (in Chinese)

(下转第 171 页)

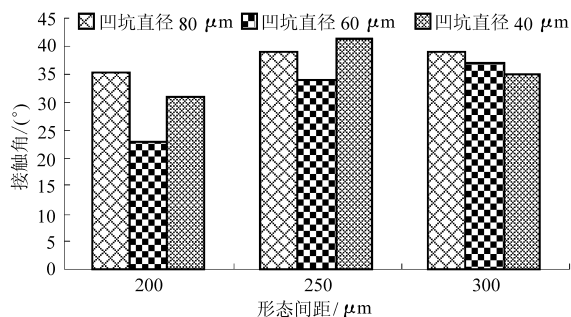


图 11 微形态尺寸对菜籽油接触角影响

Fig. 11 Infection of micro figure size on contact angle with rapeseed oil condition

可见,在同等形态间距条件下,仿生微造型的形态尺寸对筛面基体与二次蒸馏水和菜籽油之间接触

角的影响方式是不完全一样的。因此,后续研究中,对仿生微改形筛面的优化研究应针对具体的接触液体而展开。

3 结论

(1) 在仿生微凹坑的直径较小时,凹坑间距对接触角的影响较大,因此在设计仿生微改形筛面时,若仿生形态尺寸较小,则要充分考虑到形态间距对接触角的影响,进行适当的优化设计。

(2) 在同等形态间距条件下,仿生微造型的形态尺寸对筛面基体与二次蒸馏水和菜籽油之间接触角的影响不完全一样。

参 考 文 献

- 李耀明,马征,徐立章. 油菜联合收获机筛面粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报,2010,41(12):54~57,47.
Li Yaoming, Ma Zheng, Xu Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on rape cleaning sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12): 54~57, 47. (in Chinese)
- 徐立章,李耀明,马征. 油菜清选仿生减粘防堵试验研究[C]//2010 国际农业工程大会论文集,2010:179~182.
- Ma Zheng, Li Yaoming, Xu Lizhang. Bionic desorption & damp-tiny material screening technology and their use in rape cleaning[C]//2011 International Conference on New Technology of Agricultural Engineering, 2011: 189~193.
- 任露泉,王再宙,韩志武. 激光处理非光滑凹坑表面耐磨试验的均匀设计研究[J]. 材料科学与工程,2002,20(2): 214~216.
Ren Luquan, Wang Zaizhou, Han Zhiwu. Research on wear resistance of concave nonsmoothed surface with well distribution design[J]. Materials Science & Engineering, 2002,20(2):214~216. (in Chinese)
- 王再宙,韩志武,任露泉. 激光处理非光滑凸包表面的耐磨性试验[J]. 吉林大学学报:工学版,2002,32(2):45~48.
Wang Zaizhou, Han Zhiwu, Ren Luquan. Research on wear resistance of unsmoothed surface with regular burrs[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2002, 32(2): 45~48. (in Chinese)
- 韩志武,任露泉,刘祖斌. 激光织构仿生非光滑表面抗磨性能研究[J]. 摩擦学学报,2004,24(4):289~293.
Han Zhiwu, Ren Luquan, Liu Zubin. Investigation on anti-wear ability of bionic nonsmooth surfaces made by laser texturing[J]. Tribology, 2004, 24(4): 289~293. (in Chinese)
- 高东海,刘堃,袁根福. 微加工凹坑表面形貌摩擦特性的试验研究[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2008,31(10): 1581~1584.
Gao Donghai, Liu Kun, Yuan Genfu. Test research on tribological properties of the laser-textured surface with micropores[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 31(10): 1581~1584. (in Chinese)

(上接第 189 页)

- Yuan J. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2010,70(1):33~41.
- 廖宗建. 基于 GPS、GIS 的精确农业自动变量施肥控制系统的研究[D]. 长春:吉林大学,2005.
- 吕新民,孙马丽,张林鹤,等. 几种谷物条播排种器的比较研究[J]. 干旱地区农业研究,1999,17(3):109~114.
Lü Xinmin, Sun Mali, Zhang Linhe, et al. Comparison research on several seed drill feeds[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1999,17(3):109~114. (in Chinese)
- 丁为民. 农业机械与设施[M]. 南京:南京农业大学出版社,2008.
- Yuan Jin, Wang Kesheng, Yu Tao. Integrating relevance vector machines and genetic algorithms for optimization of seed-separating process[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2007, 20(7):970~979.