

# 无级变速拖拉机跃度最优化调速控制

吴才聪, 文 龙, 陈智博, 吴思贤, 赵 欣, 唐晓宇, 杨卫中

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部农机作业监测与大数据应用重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 针对无人驾驶拖拉机加减速导致的作业平稳性低和燃油经济性差等问题, 该研究基于 CVT (constantly variable transmission, 无级变速传动) 拖拉机, 设计了一种基于贝尔曼最优性原理的最小跃度多项式局部速度规划算法。基于贝尔曼最优性原理和最优控制思想设计全局规划目标、局部规划目标及约束, 提出基于最小跃度多项式的局部速度规划算法并开发速度跟随控制系统。田间试验表明, 相对于无最优化调速技术的对照组, U 型掉头的速度误差平均值和均方根分别降低 42.31% 和 50.75%, 加速度平均值与方差分别降低 8.26% 和 16.36%, 跃度平均值与方差分别降低 7.65% 和 14.23%, 发动机转速方差降低 63.36%, 发动机扭矩百分比方差降低 60.26%, 瞬时油耗方差降低 71.25%, 总油耗降低 2.37%。直线行驶调速效果呈现相同趋势, 与对照组相比, 速度误差平均值和均方根分别降低 9.45% 和 11.14%, 加速度平均值与方差分别降低 6.03% 和 13.68%。跃度平均值和均方根分别降低 1.55% 和 3.59%。发动机转速方差降低 31.78%, 发动机扭矩百分比方差降低 25.13%, 瞬时油耗方差降低 31.82%, 总油耗降低 2.48%。所提方法满足无级变速拖拉机无人驾驶速度平稳切换需要, 并提高了燃油经济性。

**关键词:** 拖拉机; 无级变速; 无人驾驶; 最小跃度速度规划; 燃油经济性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303133

中图分类号: S147.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-20-0028-08

吴才聪, 文龙, 陈智博, 等. 无级变速拖拉机跃度最优化调速控制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(20): 28-35. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303133 <http://www.tcsae.org>

WU Caicong, WEN Long, CHEN Zhibo, et al. Minimum-jerk velocity planning and control for CVT tractor velocity regulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(20): 28-35. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303133 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

无级变速传动 (constantly variable transmission, CVT) 可以根据工况和速度连续调节传动比, 使拖拉机在最佳的转速范围内运行, 有利于提高燃油经济性、换挡平顺性和驾驶舒适性, 同时降低结构复杂度<sup>[1-7]</sup>。与有级变速不同, CVT 可在较大范围内实现连续精确的速度调节, 这为无人驾驶系统提供了良好的动力执行机构。然而, CVT 会导致农机出现“橡皮筋效应”, 即当拖拉机加速或减速时, 发动机转速会先于拖拉机反应而升高或降低, 造成拖拉机与发动机之间出现速度变化不同步现象, 影响车辆行驶稳定性, 增加燃油消耗。因此, 不论农艺还是燃油消耗都要求农机速度调控平稳。

国内外专家围绕农机作业速度自主调控进行了大量研究, 如王卓等<sup>[8]</sup>基于雷沃 TA800 拖拉机建立拖拉机纵向动力学模型, 设计滑模变结构控制器, 实现了拖拉机纵向加速度跟踪控制, 与传统 PID 控制方法相比, 该方法在外界干扰作用下能够使拖拉机加速度跟踪误差降低 39%。韩科立等<sup>[9]</sup>设计了增量式 PID 控制算法对拖拉机进行定速巡航控制, 速度控制精度在 0.2 m/s 以内。KAYACAN 等<sup>[10]</sup>通过两个 PID 类型的控制器级联控制机电阀实现拖拉机的纵向速度控制。赵春江等<sup>[11]</sup>以静液

压传动拖拉机为平台, 设计油门调节机构和负载调节装置, 实现拖拉机定速巡航控制, 能够在保证速度控制精度前提下降低油耗, 平地作业速度控制绝对误差可达 0.012 m/s。ZHANG 等<sup>[12]</sup>提出了一种模糊 PID 控制策略, 实现对拖拉机速度变化的响应和精确控制, 速度跟踪精度达到 0.5 km/h。袁洪良等<sup>[13]</sup>以东风 DF1004-2 轮式拖拉机为平台建立农机横摆运动动力学模型, 设计了基于线性二次型调节器 (linear quadratic regulator, LQR) 算法的反馈控制器, 无速度切变时控制精度达到 0.03 m, 速度发生切变时达到 0.05 m。张硕等<sup>[14]</sup>以雷沃 TG1254 拖拉机为载体, 设计了基于横向位置偏差和航向角偏差的双目标联合滑模控制方法, 实现前进速度 0.5~3.0 m/s 的直线路径自动跟踪控制, 航向角偏差控制最大超调量稳定在 5°左右。当前无人农机速度调控较为简单直接, 不经过局部速度规划层对农机实时状态进行动态感知和决策, 而是直接执行存在阶跃的全局规划速度<sup>[14-15]</sup>, 或者通过调整农机动力使速度稳定在某一范围<sup>[16]</sup>, 根据阻力扰动情况被动改变行驶速度。综上, 当前农机作业速度调控研究以实现车速自主、高精度控制为主, 对调速平稳性和燃油经济性的关注度较低。发动机工况、行驶工况的差异会影响燃油消耗, 杨丽丽等<sup>[17]</sup>探索了与油耗紧密相关的指标, 其中发动机平均扭矩、发动机平均转速、平均速度、加速度指标等与油耗的相关性较高。

为此, 本研究针对无人农机巡航工况时目标车速跳变对农机系统性能的影响, 以 DF2204 CVT 拖拉机为对象, 构建执行层速度跟随系统, 增设局部规划层, 提出

收稿日期: 2023-03-20 修订日期: 2023-04-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFB3901302)

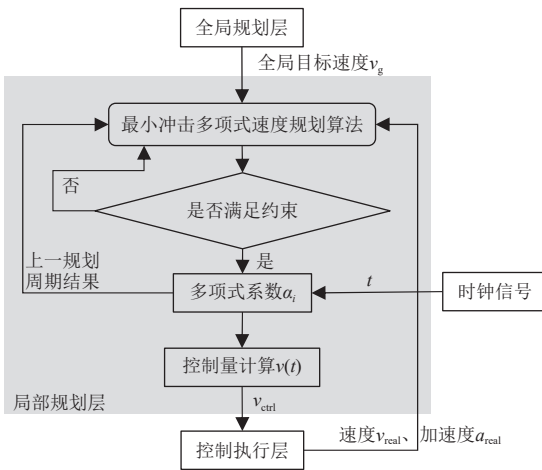
作者简介: 吴才聪, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农机自动驾驶与农机大数据。Email: wucc@cau.edu.cn

基于贝尔曼最优性原理的最小跃度多项式局部速度规划算法，以改善速度跳变和工况变化引起的系统控制性能不佳问题，提高无人农机的速度平稳性及燃油经济性。

## 1 材料与方法

### 1.1 控制构架与算法

图 1 为本研究无人驾驶拖拉机最优调速控制架构，主要包括全局规划层、局部规划层、控制执行层 3 个部分。全局规划层为无人拖拉机运动提供全局行为参考，实现不同速度工况的切换。局部规划层处理动态环境交互，为拖拉机生成最优速度参考曲线。执行控制层，实现目标车速的响应与跟随。



注： $t$  为当前系统时间， $s$ ； $v_{ctrl}$  为控制目标速度， $m \cdot s^{-1}$ 。  
Note:  $t$  is the current system time,  $s$ ;  $v_{ctrl}$  is the target speed controlled,  $m \cdot s^{-1}$ .

图 1 无人驾驶拖拉机最优调速控制流程  
Fig.1 Optimal speed regulation control process for unmanned tractor

#### 1.1.1 全局规划层

全局规划层综合农田地图、农机具约束和农艺需求，生成无人拖拉机目标路径的序列参考点  $P(l_o, l_a, d, v_g, r_1, \dots, r_a, c_1, \dots, c_b)$  [15]。其中  $l_o$ 、 $l_a$  和  $d$  分别表示参考点的经度、纬度和航向， $r_i$  表示其他指标，如播种速度、撒肥量等机具作业状态或参数， $a$  表示指标的个数， $c_i$  表示动力学约束，如速度、加速度和跃度限制， $b$  表示约束的个数。

目标车速  $v_g$  的不同主要在掉头区和作业区。农机农具推荐作业速度由生产商根据适用条件确定 [18-19]。为满足作业质量和效率，作业区应选择推荐作业速度，通常远小于极限行驶速度。若农机动力不足或出于安全考虑，可适当降低。掉头区的目标车速应综合考虑安全和效率，人为设定一个合理值，使农机能够快速而安全地调整位姿，避免发生侧滑、翻车等。

正常作业时适当加减速以满足速度调整和稳定行驶。评估农机作业质量的指标包括对操作质量影响较大的细微、瞬态操作行为，如非避险场景的突然加减速、速度跳变等 [20]。而急剧加减速会引起发动机负荷突变，不仅可能损坏农机和农具，还会增加燃料消耗 [21-22]。所以，在全局规划中应设置农机、机具的动力学约束  $c_i$ ，以协调农机局部、瞬时运动状态，提高作业质量、降低能耗，为农机运动规划提供参考。

#### 1.1.2 局部规划层

速度控制量直接影响下游纵向控制层的执行效果，极端的目标速度和目标加速度会超出机组运动的物理极限，进而影响农机、农具的安全和作业质量。物理限制等硬约束指标要求速度参考曲线光滑、连续，若速度曲线不光滑或存在断点，则可能造成加速度、跃度的突变，进而突破硬约束限制给执行层引入不稳定因素。

##### (1) 问题建模

将速度规划问题按照时序建模为多阶段决策问题，应用贝尔曼最优性原理，保证单步规划产生的参考速度曲线最优，并迭代利用上一步结果，使得生成的参考速度曲线最优。

最优控制理论在运动规划领域中应用较成熟，鉴于无人农机作业对纵向速度平稳性的需求，速度规划算法需要满足完成任务、变速、巡航并在整个过程中尽可能保持平稳。描述变速平稳性的指标为跃度  $j$ ，由加速度随时间的变化率定义，即  $j(t) = \dot{a}(t) = \ddot{s}(t)$ ，其中  $a$  表示加速度， $m/s^2$ ， $s$  表示路程， $m$ 。建立成本函数如下：

$$\min J(s(t)) = \int_{t_0}^{t_1} \ddot{s}^2(t) dt \quad (1)$$

并满足以下边界约束：

$$\text{s.t.} \begin{cases} s(t_0) = s_0 \\ \dot{s}(t_0) = v_0 \\ \dot{s}(t_1) = v_1 \\ \ddot{s}(t_0) = a_0 \\ \ddot{s}(t_1) = a_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $t_0$  为初始时刻， $s$ ， $t_1$  为末端时刻， $s$ ， $s_0$  为初始路程， $v_0$  为初始速度， $v_1$  为目标速度， $a_0$  为初始加速度， $a_1$  为目标加速度。

利用泛函分析可得式 (1) 解的形式为四次多项式，即：

$$s(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \alpha_3 t^3 + \alpha_4 t^4 \quad (3)$$

其系数  $\alpha_0 \sim \alpha_4$  为常量。此时，参考速度曲线为

$$v(t) = \dot{s}(t) = \alpha_1 + 2\alpha_2 t + 3\alpha_3 t^2 + 4\alpha_4 t^3 \quad (4)$$

记系数矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \end{bmatrix}, A \in \mathbb{R}^4 \quad (5)$$

##### (2) 约束设计

每个规划周期产生的参考速度曲线在满足物理限制等硬约束的前提下，还需以尽可能短的时间完成行驶任务，将该要求视作软约束进行处理，即找到最优的系数  $A^*$ ，使其满足非线性规划问题：

$$\begin{cases} \max J(A) = \int_{t_0}^{t_0+T_p} v(A) dt; \\ \text{s.t.} \begin{cases} v_{\min} \leq v(t) \leq v_{\max} \\ a_{\min} \leq \dot{v}(t) \leq a_{\max}, t \in [t_0, t_0 + T_p] \\ j_{\min} \leq \ddot{v}(t) \leq j_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中  $T_p$  为规划周期, 目标函数  $J$  以系数矩阵  $A$  为决策变量最大化单位时间内农机行驶里程, 实现软约束。  $v_{\max}$  为最大速度,  $v_{\min}$  为最小速度,  $a_{\max}$  为最大加速度,  $a_{\min}$  为最小加速度,  $j_{\max}$  为最大跃度,  $j_{\min}$  为最小跃度, 这些极值代表硬约束。

硬约束中最低速度取农机爬行速度, 因为爬行速度通常处于起步、停车或超低速作业阶段, 这时系统的未建模特性<sup>[23]</sup> 容易被激发, 速度控制效果较差。最高速度通常取农机及其挂载机具的物理设计和农艺设计中的较小值, 加速度和跃度可根据设计值确定。

### (3) 数值求解

式(6)的解析解求解过程复杂、耗时, 无法满足规划算法的实时性要求, 所以本研究考虑使用数值法进行求解。理想情况下, 可通过一步规划产生引导农机速度达到稳定状态的参考曲线, 即末端状态加速度值为0。在实际规划时, 同样期望产生的参考速度曲线可以引导农机到达速度稳定状态, 故令目标末端状态  $a_1$  为0。对末端状态的速度进行  $m$  次均匀采样, 对末端状态的时刻进行  $n$  次均匀采样, 即有:

$$\begin{cases} V_s = \frac{v_{\text{target}} - v_0}{m}, m \in N^+ \\ T_s = \frac{t_{\max}}{n}, n \in N^+ \\ v_1 \in \{v_0 + iV_s, i \in \{1, \dots, m\}\} \\ t_1 \in \{t_0 + iT_s, i \in \{1, \dots, n\}\} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $V_s$  为末端状态速度采样跨度步长,  $v_{\text{target}}$  为规划算法调速目标值,  $t_{\max}$  为末端状态最长采样时间,  $T_s$  为末端状态时间采样跨度步长。如图2中  $V_s = \Delta v$ ,  $T_s = \Delta t$ 。末端状态速度采样跨度步长  $T_s$ 、控制周期  $T_c$  与规划算法运行周期  $T_p$  有如下关系:

$$T_s > T_p = eT_c, e > 1, e \in N \quad (8)$$

速度规划与控制之间无强反馈耦合关系, 但两者形成结构与串级控制<sup>[24]</sup> 相似。速度规划层相当于控制执行层的外部回路, 在响应速度上慢于控制层, 其周期  $T_p$  是  $T_c$  的整数倍。单次规划产生的曲线至少满足农机在单次规划算法运行周期  $T_p$  时使用, 故  $T_s > T_p$ 。

对每一个目标采样点  $(t_1, v_1)$ , 都与起点  $(t_0, v_0)$  进行四次多项式拟合, 得到  $m \times n$  条曲线即为采样空间(图2)。

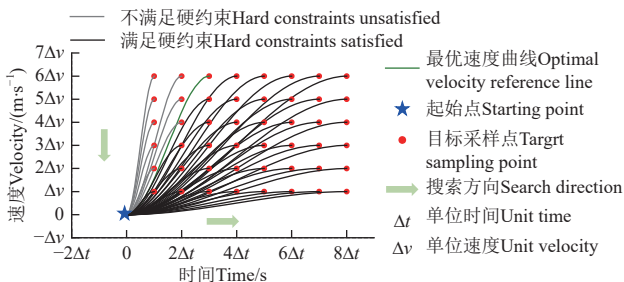


图2 单步规划数值求解

Fig.2 Numerical solution diagram of single step programming

为满足作业时最短这一约束条件, 尽量规划车速靠近最大速度  $v_{\max}$ 。在实际处理中, 为了进一步优化算

法运行速度, 在搜索方向上, 末端速度搜索顺序由最大值到最小值, 末端时间搜索顺序由最小值到最大值, 将第一个符合硬约束条件的解视作最优解, 并停止搜索。

当硬约束限制增大时, 其可行解空间会相应缩小, 生成的曲线会趋于平缓(图3)。

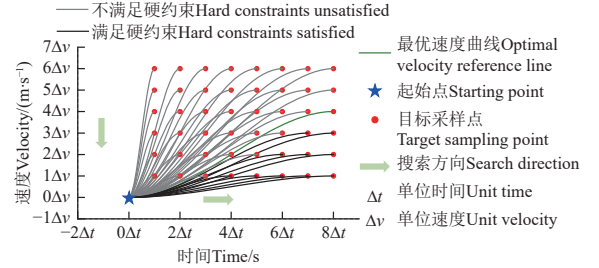


图3 强约束下解空间变化

Fig.3 Variation trend of solution space under stronger constraint

### (4) 动态规划

理想情况下, 无人农机的执行层控制器能够快速响应并准确跟踪规划输出的参考曲线。无人农机需在每个规划周期利用上一周期计算结果未执行部分, 以此来保证时间一致性, 即第  $k+1$  次规划的起始状态为第  $k$  次规划输出的周期末端状态。

当外界干扰导致运动状态偏离目标轨迹过大时, 规划算法抛弃之前的计算剩余结果。此时, 第  $k+1$  次规划的起始状态由第  $k$  次规划起点时刻农机实际状态  $\begin{bmatrix} v_{\text{real}} \\ a_{\text{real}} \end{bmatrix}$  利用牛顿第二定律进行外推获得, 即:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} v_0(k+1) \\ a_0(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1(k) \\ a_1(k) \end{bmatrix}, |v_e(k)| \leq v_{e\_limit}, |a_e(k)| \leq a_{e\_limit} \\ \begin{bmatrix} v_0(k+1) \\ a_0(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\text{real}}(k) + a_{\text{real}}(k)T_p \\ a_{\text{real}}(k) \end{bmatrix}, \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\begin{bmatrix} v_0 \\ a_0 \end{bmatrix}$  为单步规划的车辆起始状态,  $\begin{bmatrix} v_1 \\ a_1 \end{bmatrix}$  为单步规划产生的周期末端状态,  $v_{e\_limit}$  和  $a_{e\_limit}$  为农机实际状态与规划目标状态的最大误差。

由于  $T_p$  较小, 假设在  $T_p$  时间里加速度没有明显变化, 即:

$$a_0(k+1) = a_{\text{real}}(k) \quad (10)$$

则状态误差  $v_e$  和  $a_e$  为

$$\begin{bmatrix} v_e \\ a_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0(k) - v_{\text{real}}(k) \\ a_0(k) - a_{\text{real}}(k) \end{bmatrix} \quad (11)$$

### (5) 模拟测试

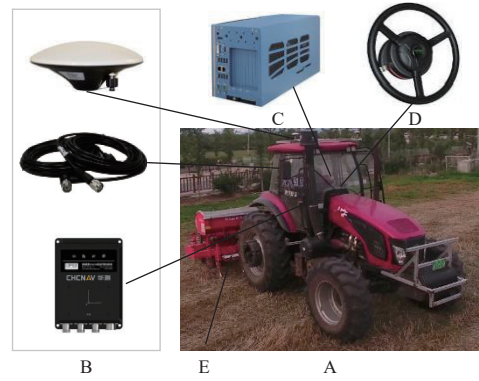
规划过程中系统不断生成最优速度参考曲线(图4), 并通过多项式拼接产生全局最优解。理想情况下, 每个阶段使用上次规划曲线的剩余部分作为规划起点, 产生连续平滑且满足约束的曲线。出现规划控制失配点时, 当前阶段的规划起点  $v_0$  由车辆状态外推获得。

1.1.3 控制执行层

控制层响应局部规划层指令，跟踪规划层输出。速度控制器从规划层获取目标速度，并根据当前系统时间  $t_{sys}$  通过式 (4) 计算出控制目标速度  $v_{ctrl}$ ，即：

$$v_{ctrl} = v(t_{sys}) \quad (12)$$

具体速度控制流程如图 5，车载计算单元获取目标控制速度  $v_{ctrl}$  和组合导航设备测定的实际车速  $v_{real}$ ，计算速度误差  $e_v$ ，由 PID 控制器计算目标发动机扭矩请求百分比，并将其作为控制量。整车控制器 (vehicle control unit, VCU) 根据发动机扭矩百分比误差  $e_{iq}$  控制发动机，调整发动机输出扭矩  $t_q$ 。变速箱控制单元 (transmission control unit, TCU) 根据工况调整发动机传动比  $R_{req}$  调节扭矩输出，动力经传动机构传递并改变车速，进而消除目标速度与实际速度误差。



A. 无级变速拖拉机 B. 组合导航系统 C. 计算单元 D. 线控转向电机 E. 精密播种机  
A. CVT(constantly variable transmission) tractor B. Integrated navigation system C. Computing unit D. Steering-by-wire motor E. Precision seeder

图 6 试验拖拉机机组与设备

Fig.6 Test tractor unit and equipments

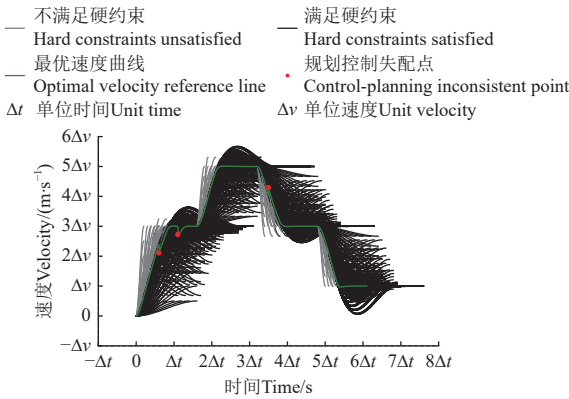
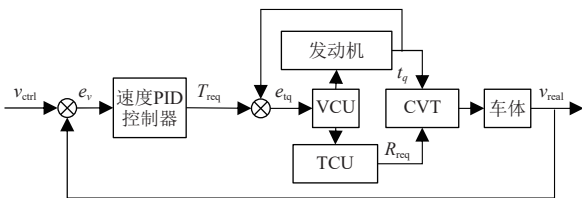


图 4 多规划周期解集分布和最优速度曲线

Fig.4 Multi-programming periodic solution set distribution and optimal velocity curve



注： $e_v$  为速度误差， $m \cdot s^{-1}$ ； $T_{req}$  为发动机扭矩请求百分比，%； $e_{iq}$  为扭矩误差，%； $t_q$  为扭矩， $N \cdot m$ ； $R_{req}$  为传动比； $v_{real}$  为实车速， $m \cdot s^{-1}$ 。  
Note:  $e_v$  is the velocity error,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $T_{req}$  is the engine torque request, %;  $e_{iq}$  is the torque error, %;  $t_q$  is the torque,  $N \cdot m$ ;  $R_{req}$  is the transmission ratio;  $v_{real}$  is the real vehicle speed,  $m \cdot s^{-1}$ .

图 5 执行层速度控制流程图

Fig.5 Flow chart of velocity control of execution layer

1.2 试验设计

为评估算法性能，2022 年 6 月以小麦夏收灭茬后的农田作为场地，在北京市密云区河南寨某农机合作社试验田开展试验。试验拖拉机作业机组如图 6，主要包括 DF2204 CVT 线控拖拉机、精密播种机和无人驾驶系统<sup>[25]</sup>。

掉头变速场景采用 U 型掉头模式。试验路径全长 158 m，全局作业指导速度为 8 km/h，掉头试验指导速度为 4 km/h (图 7)。采用直线作业方式，在作业线上设置 8 个调速点位，每隔 15 s 调整一次全局规划速度 (图 8)。根据 DF2204 无级变速拖拉机和机组物性性质、作业需要选取局部速度规划算法参数，如表 1。

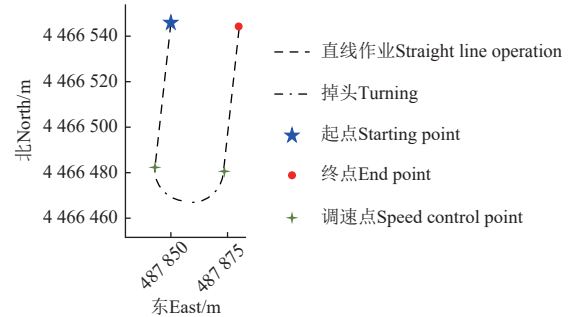


图 7 U 型掉头作业模式

Fig.7 U-turn operation mode

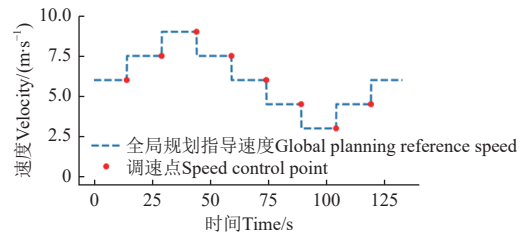


图 8 直线作业模式速度调控方案

Fig.8 Speed control scheme in straight line operation mode

表 1 局部速度规划算法参数

Table 1 Parameters related to local velocity planning algorithm	
参数 Parameters	数值 Values
最低速度 $v_{min} / (m \cdot s^{-1})$	0.56
最高速度 $v_{max} / (m \cdot s^{-1})$	11.11
最小加速度 $a_{min} / (m \cdot s^{-2})$	-1
最大加速度 $a_{max} / (m \cdot s^{-2})$	1
最小跃度 $j_{min} / (m \cdot s^{-3})$	-2.25
最大跃度 $j_{max} / (m \cdot s^{-3})$	2.25
算法运行周期 $T_p / s$	0.2
速度采样时间步长 $T_s / s$	1
末端状态最长采样时间 $t_{max} / s$	8
时间采样数 $n$	8
速度采样数 $m$	6
控制频率 $f_c / Hz$	50

2 结果与分析

根据农机播种作业实际需求，选取速度跟踪误差、加速度、跃度、横向跟踪误差指标评价农机调速平顺性

以及作业质量, 选取发动机转速、发动机扭矩百分比、瞬时油耗和累计油耗评估发动机工作情况和分析调速场景下的燃油经济性。

表 2 为 U 型掉头模式 10 次测试统计结果。试验设置数量相等的对照组, 对照组采用阶跃式调速, 试验组增设局部规划层。采集行驶里程及用时, 计算平均速度。单次作业行程 158 m。对照组平均用时 92.48 s, 平均速度 1.71 m/s; 试验组平均用时 93.61 s, 平均速度 1.69 m/s。

表 2 U 型掉头作业模式行驶速度

Table 2 Operating speed of U-turn operation mode

项目 Item	时间 Time/s	平均速度 Average velocity/(m·s <sup>-1</sup> )
对照组 Control group	92.48	1.71
试验组 Experimental group	93.61	1.69
相对误差 Relative error/%	1.22	-1.20

如图 9a 和图 9b, 农机行驶速度平稳, 其速度稳态误差在 0 附近且有界。

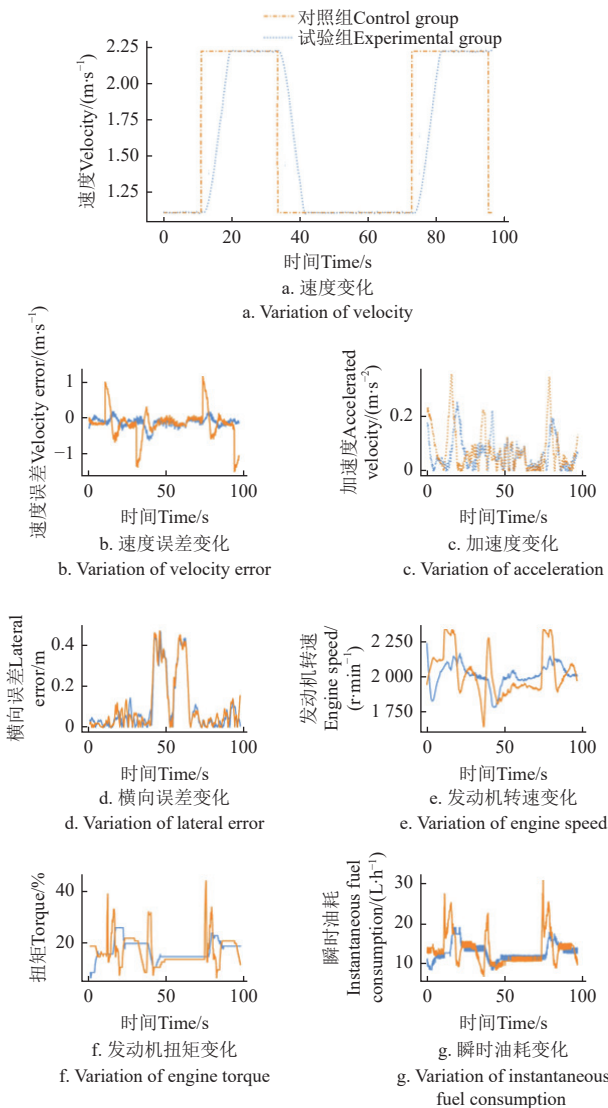


图 9 U 型掉头模式测试结果

Fig.9 Test result of U-turn operation mode

与对照组相比, 试验组速度误差平均值、均方根值、最大绝对值分别降低 42.31%、50.75% 和 56.99% (表 3), 表明所提算法对速度跟踪误差及波动有良好的抑制作用。

用。由于执行局部规划算法, 调速点处的加速度冲击得到抑制, 速度平稳性得到提高, 围绕在 0 附近 (图 9c)。与对照组相比, 试验组加速度平均值、方差分别降低 8.26%、16.36%, 跃度平均值、方差分别降低 7.65%、14.23% (表 4), 表明本文算法对加速度、加速度波动、加速度冲击有较好抑制作用。横向跟踪误差平稳, 在 0 附近且有界, 算法效果与对照组持平 (图 9d)。与对照组相比, 试验组横向跟踪绝对误差平均值为 10.42 cm、最大值为 46.31 cm, 分别降低 0.56%、2.14% (表 5), 这是因为 U 型掉头模式存在小角度转弯, 导致曲线路径跟踪误差较大。

表 3 速度误差统计结果

Table 3 Statistical result of velocity error

项目 Item	MAD/(m·s <sup>-1</sup> )	RMS/(m·s <sup>-1</sup> )	MAV/(m·s <sup>-1</sup> )
对照组 Control group	0.25	0.36	1.37
试验组 Experimental group	0.14	0.18	0.59

注: MAD 为绝对值平均; RMS 为均方根; MAV 为最大绝对值。下同。  
Note: MAD is the mean absolute difference; RMS is the root mean square; MAV is the maximum absolute value. The same below.

表 4 加速度和跃度对比

Table 4 Acceleration and jerk comparison

项目 Item	MAD	VAR	MAD	VAR
对照组 Control group	0.23	0.081	6.15	62.93
试验组 Experimental group	0.21	0.068	5.68	53.98

表 5 横向绝对误差对比

Table 5 Lateral absolute error comparison

项目 Item	平均值 Mean/cm	最大值 Max/cm
对照组 Control group	10.48	47.32
试验组 Experimental group	10.42	46.31

进一步分析图 9 可知, 转速根据实际运行速度不断调整, 对照组在调速点附近出现了“橡皮筋效应”, 即发动机转速急速上升或降低。与对照组相比, 试验组转速均值几乎持平, 但其方差降低了 63.36%; 试验组发动机扭矩百分比几乎持平 (图 9d, 表 6), 其方差降低 60.26%; 瞬时油耗均值下降 3.55%, 方差降低 71.25%, 总油耗降低 2.37% (表 7)。在使用局部参考速度后, 发动机转速、扭矩、瞬时油耗变化更加平稳, 消除了速度冲击引起的突变 (表 8), 本文算法对发动机转速的急剧变化有良好的抑制作用, 油耗变化与杨丽丽等<sup>[17]</sup> 研究结果一致。

表 6 发动机转速与扭矩百分比对比

Table 6 Comparison of engine speed and torque percentage

项目 Item	转速 Engine speed/(r·min <sup>-1</sup> )		扭矩百分比 Percentage of torque/%	
	平均值 Mean	方差 VAR	平均值 Mean	方差 VAR
对照组 Control group	2 032.85	23 639.21	17.75	32.14
试验组 Experimental group	2 024.52	8 661.91	18.03	12.77

表 7 燃油指标变化

Table 7 Variation of fuel consumption index

项目 Item	平均值 Mean	方差 VAR	总油耗 Total fuel consumption/L
对照组 Control group	13.75	14.16	0.35
试验组 Experimental group	13.27	4.07	0.34

表 8 直线作业行驶速度  
Table 8 Driving speed of straight line operation

项目 Item	时间 Time/s	平均速度 Average velocity/(m·s <sup>-1</sup> )
对照组 Control group	132.57	1.77
试验组 Experimental group	132.82	1.77
相对误差 Relative error/%	0.19	-0.19

为充分验证算法在调速场景下的性能，设计了直线调速试验。直线导航单次行驶里程为 235 m，对照组平均行驶用时为 132.57 s，平均速度为 1.77 m/s；试验组平均行驶用时为 132.82 s，平均速度为 1.77 m/s。如图 10 所示，各项指标变化趋势与 U 型掉头模式一致，具体指标变化趋势亦相似，见表 9 和表 10。

表 9 直线行驶作业质量对比

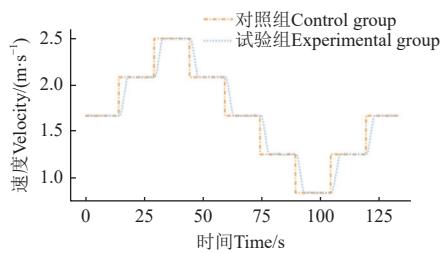
Table 9 Comparison of operation quality in straight-line operation

项目 Item	速度误差 Velocity error/ (m·s <sup>-1</sup> )			加速度 Acceleration/ (m·s <sup>-2</sup> )		跃度 Jerk/ (m·s <sup>-3</sup> )		横向绝对误差 Lateral absolute error/cm	
	绝对值 平均 MAD	均方 根值 RMS	最大 绝对值 MAV	绝对 值平均 MAD	方差 VAR	绝对值 平均 MAD	方差 VAR	平均值 Mean	最大值 MAX
	对照组 Control group	0.15	0.20	0.66	0.20	0.068	6.00	60.58	3.55
试验组 Experimental group	0.13	0.18	0.61	0.19	0.059	5.91	58.40	3.53	12.62

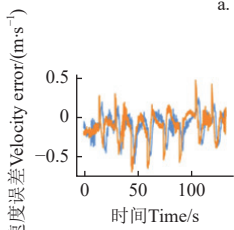
表 10 直线行驶燃油经济性指标对比

Table 10 Comparison of fuel economy indicators in straight line operation

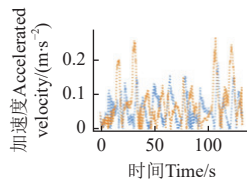
项目 Item	转速 Engine speed/ (r·min <sup>-1</sup> )		扭矩百分比 Percentage of torque/%		小时油耗 Hourly fuel consumption/ (L·h <sup>-1</sup> )		总油耗 Total fuel consumption/L
	平均值 Mean	方差 VAR	平均值 Mean	方差 VAR	平均值 Mean	方差 VAR	
对照组 Control group	1976.94	34081.48	18.67	36.74	13.63	14.39	0.50
试验组 Experimental group	1974.25	23248.73	18.27	27.50	13.27	9.81	0.49



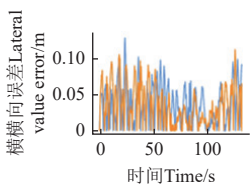
a. 速度变化  
a. Variation of velocity



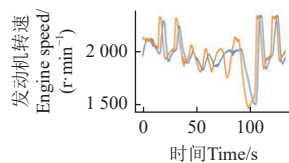
b. 速度误差变化  
b. Variation of velocity error



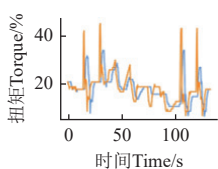
c. 加速度变化  
c. Variation of acceleration



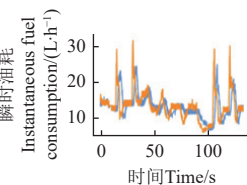
d. 横向绝对误差变化  
d. Variation of lateral error



e. 发动机转速变化  
e. Variation of engine speed



f. 发动机扭矩变化  
f. Variation of engine torque



g. 瞬时油耗变化  
g. Variation of instantaneous  
fuel consumption

图 10 直线作业试验结果

Fig.10 Test results of straight line operation

与对照组相比，速度平均绝对误差减小了 9.45%，均方根误差减小了 11.14%，加速度平均绝对值和方差分别减小了 6.03% 和 13.68%。平均绝对值和方差分别降低了 1.55% 和 3.59%。发动机转速方差减小了 31.78%，发动机扭矩百分比方差减小了 25.13%，瞬时油耗方差减小了 31.82%，总油耗降低 2.48%。

### 3 结论

1) 本研究从运动规划角度出发，针对无级变速拖拉机的无人驾驶调速平稳需求提出了一种最小冲击多项式速度规划算法，分析并设计了无人拖拉机作业全局规划目标、局部规划目标，设计了最小冲击四次多项式算法并优化计算，开发了执行层速度控制系统，集成了算法和硬件设备。

2) 开展了面向实际作业的田间试验，与作业质量和油耗紧密相关的指标均有不同程度的优化。如 U 型掉头模式下，作业速度误差平均值降低了 42.31%、均方根值降低了 50.75%、最大值降低了 56.99%，加速度平均值、方差指标分别降低 8.26%、16.36%，跃度平均值指标降低了 7.65%，发动机转速方差降低了 63.36%，发动机扭矩百分比方差降低了 60.26%，瞬时油耗方差降低了 71.25%，作业总油耗降低了 2.37%。

直线调速模式亦呈现相同变化趋势。所提算法可有效降低无级变速传动（CVT）的“橡皮筋效应”，提高燃油经济性。相比于优化具体控制执行层的思路，本研究具有更强的通用性。未来将在此基础上进一步研究农机田内速度扰动巡航控制等无人驾驶相关技术。

### [参考文献]

[1] 夏长高, 张演, 孙闫. 液压机械无级变速器的拖拉机速度控制研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(10): 22-26, 46.  
XIA Changgao, ZHANG Yan, SUN Yan. Research on tractor speed control of hydraulic mechanical continuously variable

- transmission[J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2022, 60(10): 22-26,46. (in Chinese with English abstract)
- [2] 杜晓晓, 王荣景, 刘建涛. 拖拉机无级变速传动技术及其应用[J]. *南方农机*, 2019, 50(2): 176.
- [3] 李建启. 国内拖拉机关键技术发展现状[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2018, 45(2): 1-4, 7.
- [4] ROSSETTI A, MACOR A. Multi-objective optimization of hydro-mechanical power split transmissions[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2013, 62: 112-128.
- [5] CAMMALLERI M, ROTELLA D. Functional design of power-split CVTs: An uncoupled hierarchical optimized model[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2017, 116: 294-309.
- [6] 高辉松, 朱思洪, 贺亮, 等. 拖拉机动力换挡变速箱和无级变速箱发展现状与趋势[J]. *机械传动*, 2012, 36(8): 119-123.
- GAO Huisong, ZHU Sihong, HE Liang, et al. Development and trend of power shift transmission and continuously variable transmission for tractor[J]. *Journal of Mechanical Transmission*, 2012, 36(8): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赵真, 王帅. 国内外拖拉机发展现状及趋势[J]. *农业科技与装备*, 2012(12): 81-82.
- ZHAO Zhen, WANG Shuai. Present and future development of tractor at home and abroad[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2012(12): 81-82. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王卓, 刘知祥, 白晓平, 等. 拖拉机定速巡航系统纵向加速度跟踪控制[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 21-28.
- WANG Zhuo, LIU Zhixiang, BAI Xiaoping, et al. Longitudinal acceleration tracking control of tractor cruise system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 21-28. (in Chinese with English abstract)
- [9] 韩科立, 朱忠祥, 毛恩荣, 等. 基于自动机械式变速的拖拉机定速巡航系统[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 21-26.
- HAN Keli, ZHU Zhongxiang, MAO Enrong, et al. Cruise control system of tractor based on automated mechanical transmission[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(4): 21-26. (in Chinese with English abstract)
- [10] KAYACAN E, KAYACAN E, RAMON H, et al. Towards agrobots: Trajectory control of an autonomous tractor using type-2 fuzzy logic controllers[J]. *Ieee-Asme Transactions on Mechatronics*, 2015, 20(1): 287-298.
- [11] 赵春江, 魏传省, 付卫强, 等. 静液压传动拖拉机定速巡航控制系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 359-365.
- ZHAO Chunjiang, WEI Chuansheng, FU Weiqiang, et al. Design and experiment of cruise control system for hydrostatic transmission[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 359-365. (in Chinese with English abstract)
- [12] ZHANG X R, ZHOU Z L. Speed control strategy for tractor assisted driving based on chassis dynamometer test[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2021, 14(6): 169-175.
- [13] 袁洪良, 郭锐, 薛梦琦, 等. 基于状态空间建模的智能农
- 机模型辨识与柔化控制[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(10): 405-411, 435.
- YUAN Hongliang, GUO Rui, XUE Mengqi, et al. State-space modeling and identification of intelligent agricultural machinery and flexible LQR control[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(10): 405-411, 435. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张硕, 刘进一, 杜岳峰, 等. 基于速度自适应的拖拉机自动驾驶控制方法[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(23): 48-55.
- ZHANG Shuo, LIU Jinyi, DU Yuefeng, et al. Method on automatic navigation control of tractor based on speed adaptation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(23): 48-55. (in Chinese with English abstract)
- [15] 翟卫欣, 王东旭, 陈智博, 等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(16): 1-7.
- ZHAI Weixin, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(16): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [16] 吴才聪, 王东旭, 陈智博, 等. SF2104 拖拉机自主行驶与作业控制方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 42-48.
- WU Caicong, WANG Dongxu, CHEN Zhibo, et al. Autonomous driving and operation control method for SF2104 tractors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(18): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨丽丽, 田伟泽, 徐媛媛, 等. 谷物联合收割机油耗随机森林预测模型[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(9): 275-281.
- YANG Lili, TIAN Weize, XU Yuanyuan, et al. Predicting fuel consumption of grain combine harvesters based on random forest[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(9): 275-281. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米高速精量排种器投种性能分析与结构优化[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 1-11.
- LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Performance analysis and structure optimization of the maize precision metering device with air suction at high-speed condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [19] 姚颖飞, 陈学庚, 纪超, 等. 基于模糊 PID 控制的玉米精量播种机单体驱动器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(6): 12-21.
- YAO Yingfei, CHEN Xuegeng, JI Chao, et al. Design and experiments of the single driver for maize precision seeders based on fuzzy PID control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(6): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- [20] HUANG J H, LIANG S, WU C C, et al. Evaluation system for agricultural machinery operation based on smartphone sensors[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2022, 38(2): 227-242.
- [21] 刘应吉, 姚羽, 赵侃, 等. 一种使用卫星定位数据实时辨

- 识车辆急加速或急减速的方法: CN104875731B[P]. 2017-05-17.
- [22] 许书权. 基于车辆运行监控系统的驾驶行为安全与节能评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- XU Shuquan. The Study of Assessment Methods on Vehicle Operation Monitoring System about the Influence of the Drivers' Behaviors to Driving Safety and Energy Saving[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [23] GAO F, LI K, WANG J, et al. Adaptive throttle controller design based on a nonlinear vehicle model[C]//Proceedings of the 2004 American Control Conference. IEEE, 2004, 1: 786-791.
- [24] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真 (第 4 版) [M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 116-117.
- [25] 陈智博, 文龙, 杨卫中, 等. 基于 DF2204 无级变速拖拉机的农机无人驾驶系统研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 1-9.
- CHEN Zhibo, WEN Long, YANG Weizhong, et al. Development of the unmanned driving system for agricultural machinery based on DF2204 continuously variable transmission tractor[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 1-9. (in Chinese with English abstract)

## Minimum-jerk velocity planning and control for CVT tractor velocity regulation

WU Caicong, WEN Long, CHEN Zhibo, WU Sixian, ZHAO Xin, TANG Xiaoyu, YANG Weizhong

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Machinery Monitoring and Big Data Applications, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The target velocity jump has caused the low-velocity stability and fuel economy in the whole process of autonomous agricultural machinery operation. In this study, optimal velocity planning was proposed for the field operation of agricultural machinery in the constantly variable transmission (CVT) tractor. The global and local planning objectives and constraints were collected from the autonomous agricultural machinery. The minimum-jerk polynomial velocity planning was then designed using the Bellman optimality principle and optimal control theory. The velocity-following control system was also developed to realize the stable velocity cruise of autonomous agricultural machinery in the field. The velocity planning was modelled as multi-stage decision-making, according to the time series. The optimal decision was achieved in the jerk optimal control at each stage to realize the state transition. Bellman optimality principle and optimal control theory were selected to design the minimum-jerk polynomial velocity planning. The minimum jerk cost function was subject to hard constraints, such as the maximum and minimum velocity, acceleration, and jerk. The soft constraints were utilized to realize the driving task in the shortest possible time. Numerical solutions were used to reduce the difficulty of the model. Polynomial piecework fitting was generated to fully meet the smooth and continuous optimal speed reference curve under the hard constraints. The performance of the control system was significantly improved to prevent the velocity jump and varying conditions. The velocity stability and fuel economy were realized in the CVT tractor. The feasible solution space was obtained in the numerical solution. The end states of tractor motion were taken to heuristically search for the optimal solution under hard and soft constraints. The numerical solution was obtained after sampling. The unexecuted portion of the previous cycle's solution in each planning cycle was utilized to achieve the time consistency of the unmanned tractor. The executive layer controller of the unmanned tractor usually tracked the reference curve generated by the planning algorithm with high accuracy and responsiveness. However, the replanning was performed to discard the remaining part of the previous solution, when the motion state deviated significantly from the target trajectory under external disturbances. The U-turn field experiment showed that the mean absolute error (MAE) and the root mean square error (RMSE) of speed decreased by 42.31%, and 50.75%, respectively, compared with the control group. The average absolute value and the variance of acceleration decreased by 8.26%, and 16.36%, respectively, while their jerk decreased by 7.65% and 14.23%, respectively. The variance of engine speed, torque percentage, instantaneous fuel consumption, and total fuel consumption decreased by 63.36%, 60.26%, 71.25%, and 2.37%, respectively. The straight-line navigation velocity adjustment experiment showed a similar optimization trend. The MAE and the RMSE of speed decreased by 9.45%, and 11.14%, while the average absolute value and variance of acceleration decreased by 6.03% and 13.68%, respectively. The average absolute value and variance of jerk decreased by 1.55% and 3.59%, respectively. The variance of engine speed decreased by 31.78%, the variance of engine torque percentage decreased by 25.13%, and the variance of instantaneous fuel consumption decreased by 31.82%. The total fuel consumption decreased by 2.48%. The stability of speed regulation was significantly improved to reduce fuel consumption during operation. The smooth control of velocity switching can fully meet the requirement for autonomous CVT tractors.

**Keywords:** tractors; continuously variable transmission; autonomous driving; minimum-jerk velocity planning; fuel economy