

# 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机运动控制研究

姜惠<sup>1</sup> 唐小虎<sup>1</sup> 张旭烽<sup>1</sup> 徐国艳<sup>2</sup> 高峰<sup>2</sup>

(1. 东北电力大学机械工程学院, 吉林 132012; 2. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 以丘陵山地姿态调整轮式拖拉机为研究对象,提出了一种基于改进遗传算法的运动控制方法,可根据地形条件实现对拖拉机的实时调平控制,提高其车身稳定性。首先,根据拖拉机机构间的运动关系,建立表征其轮心位置与车身姿态参数关系的运动学模型,并进行算例求解,验证了运动学模型的正确与准确性。然后,以提高拖拉机车身稳定性为控制目标,在运动学建模的基础上设计了一种基于改进遗传算法的运动控制方法。最后,对算法进行仿真验证,结果表明,使用算法进行运动控制可有效降低其车身姿态角,横向坡地最大侧倾角降低 $13.3^\circ$ ,纵向坡地最大俯仰角降低 $4.3^\circ$ ;在两种坡度兼有的路面上进行综合调整,其最大侧倾角和最大俯仰角分别降低 $13.8^\circ$ 和 $4^\circ$ ,极大提高了车身稳定性。同时将改进遗传算法与传统遗传算法进行对比,结果表明,改进遗传算法在响应时间和控制精度方面均优于传统遗传算法,其算法响应时间较传统遗传算法缩短 $63.93\%$ ,大幅提高了算法效率。

**关键词:** 丘陵山地; 轮式拖拉机; 姿态调整; 运动控制; 遗传算法

中图分类号: S219.85

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0392-12

OSID:



## Motion Control of Attitude Adjustment Wheeled Tractor in Hilly and Mountain Areas

JIANG Hui<sup>1</sup> TANG Xiaohu<sup>1</sup> ZHANG Xufeng<sup>1</sup> XU Guoyan<sup>2</sup> GAO Feng<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China

2. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the stability of the tractors in hilly and mountainous areas, a motion control method was designed based on improved genetic algorithm, which can achieve real-time leveling control according to terrain conditions. Firstly, according to the kinematic relationship of the tractor attitude adjustment mechanism, a kinematic model representing the relationship between the wheel center position and the body attitude parameters was established, and a numerical example was given to solve the problem to verify the correctness and accuracy of the kinematic model. Then, with the aim of improving the stability of tractor body, a tractor motion control method based on improved genetic algorithm was designed while considering the kinematics model. Finally, the simulation results showed that the motion control algorithm can effectively reduce the body attitude angle, the maximum lateral slope angle was reduced by  $13.3^\circ$ , and the maximum pitch angle of the longitudinal slope was reduced by  $4.3^\circ$ . The comprehensive adjustment on the road with both slopes can reduce the maximum side angle and the maximum pitch angle by  $13.8^\circ$  and  $4^\circ$ , respectively, which greatly improved the stability of the body. At the same time, the improved genetic algorithm was compared with the traditional genetic algorithm. The results showed that the improved genetic algorithm was superior to the traditional genetic algorithm both in response time and control accuracy. The response time of the improved genetic algorithm was reduced by  $63.93\%$  compared with that of the traditional genetic algorithm, and the efficiency of the algorithm was greatly improved.

**Key words:** hilly and mountain area; wheeled tractor; attitude adjustment; kinematic control; genetic algorithm

收稿日期: 2024-01-28 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2001303-2、2016YFD0700503-1)

作者简介: 姜惠(1990—),女,讲师,博士,主要从事非常规行走机构及丘陵山地拖拉机研究,E-mail: Jianghui@buaa.edu.cn

## 0 引言

我国国土面积广阔,地貌复杂多样,其中丘陵山地约占国土总面积的43%,传统拖拉机作业时易出现横向或纵向滑移、倾翻等,车身稳定性较差。与传统拖拉机相比,丘陵山地拖拉机具有姿态调整能力,更能适应复杂环境<sup>[1-5]</sup>。而在实际作业时,地形是随机变化的,缺乏相应的运动控制方法将导致拖拉机在运动过程中无法根据地形变化调整自身姿态,车身稳定性较差。因此亟需设计一种运动控制方法,解决其跟随地形变化调整车身姿态的问题,充分发挥其姿态调整优势,提高其在非结构化地形下的车身稳定性,推动拖拉机实际应用的进程<sup>[6-7]</sup>。

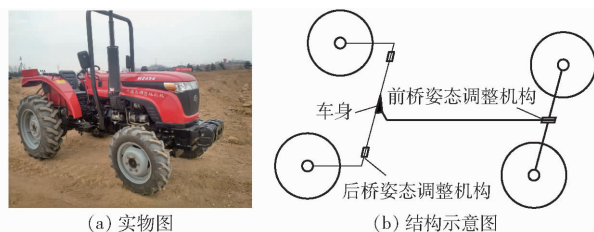
目前国内外针对丘陵山地姿态调整机构及其控制方法进行了大量研究,并取得了一定进展。YU等<sup>[8]</sup>提出了一种拖拉机控制算法,提高了传统拖拉机调平控制系统的精度和调节速度。LIM等<sup>[9]</sup>提出了一种使用人工神经网络自动调平方法,提高拖拉机的调平质量和操作人员的舒适度。彭贺等<sup>[10-11]</sup>设计了一种通过液压装置调整后桥高度的拖拉机车身调平系统,并采用模糊PID控制算法进行实时动态自调平控制,实现了较高精度的调平控制。齐文超等<sup>[12-13]</sup>设计了一种基于双闭环PID算法的拖拉机姿态主动调整系统及对应的控制方法,在实现精确调平的同时减少了调平时间。JIANG等<sup>[14]</sup>提出了一种丘陵山地拖拉机的设计概念,并分析了姿态和拖拉机侧向稳定性的关系。上述研究为丘陵山地拖拉机调平控制研究提供了基础。一般情况下地形条件与拖拉机车身姿态间的关系是非线性的,根据地形情况进行运动控制的研究较为缺乏,导致拖拉机动态姿态调整效果不佳,无法充分发挥其调整优势,因此设计一种基于二者运动学关系的运动控制方法十分必要。

为实现根据地形条件调整车身姿态的目的,本文首先建立表征丘陵山地拖拉机车身姿态与地形条件关系的运动学模型;其次以提高车身稳定性为控制目标,设计一种基于改进遗传算法的运动控制方法,该算法同时具备传统遗传算法与模拟退火算法的优点<sup>[15-16]</sup>;最后通过仿真验证运动控制方法的调平效果,同时与传统遗传算法对比以验证改进遗传算法性能。

## 1 拖拉机姿态调整原理

与传统拖拉机相比,丘陵山地拖拉机拥有姿态调整能力。图1为一种丘陵山地姿态调整轮式拖拉机,该拖拉机以传统拖拉机为基础,对其前、后驱动

桥进行改进,改进后其传动、转向系统与调平系统互不干涉。改进后拖拉机具备姿态调整能力,提高了车身稳定性与地形适应能力<sup>[17]</sup>。



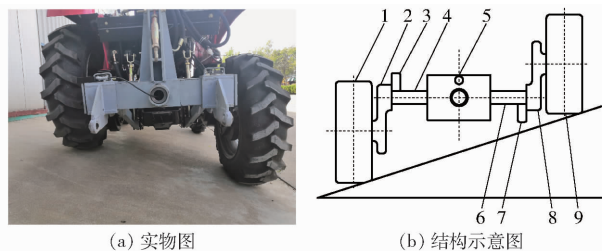
(a) 实物图

(b) 结构示意图

图1 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机

Fig. 1 Wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas

拖拉机姿态调整系统主要由姿态调整后驱动桥、前驱动桥及电液控制系统组成<sup>[14]</sup>。姿态调整后驱动桥的调整方式为主动调整,如图2所示,在拖拉机后桥输出半轴与轮驱动轴之间设有末端传动机构与蜗轮蜗杆装置,在保证动力传输的同时,通过电液控制系统驱动蜗轮蜗杆运动,控制包括驱动轮在内的末端传动机构绕输出半轴摆动,改变驱动轮轮心到半轴中心的垂直距离,从而改变离地间隙,调整车身姿态。为保证拖拉机的正常行驶,需保持左右两端摆动机构摆动角度相等,摆动方向相同或相反。实际研究中发现,摆动方向相同使拖拉机后桥整体高度发生变化从而影响车身俯仰角,摆动方向相反使车身单侧高度发生改变从而影响车身侧倾角,利用此特性,控制左右机构不同的摆动方向,可分别调整拖拉机在横向和纵向坡地上的倾斜角度。



(a) 实物图

(b) 结构示意图

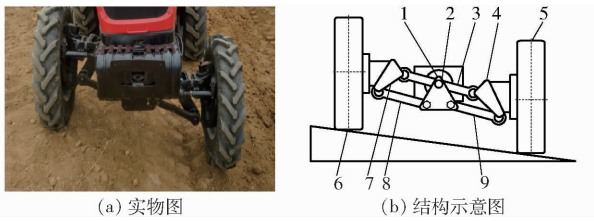
图2 姿态调整后驱动桥

Fig. 2 Rear bridge with attitude adjustment

1. 左后驱动轮
2. 左末端传动机构
3. 左半边摆动机构
4. 左半轴壳体
5. 后桥箱
6. 右半轴壳体
7. 右半边摆动机构
8. 右末端传动机构
9. 右后驱动轮

前桥的姿态调整方式为随动调整,如图3所示,中央减速桥体与托架、拉杆及三通壳体总成组成左右双平行四杆机构,可在一定角度内根据路面情况与后桥姿态绕前桥托架左右摆动,保证前驱动轮始终与地面垂直,提高其地面附着力。这种调平方式的优点在于,使前驱动桥具备较好地面仿形能力,保证其行驶稳定性的同时,简化了前桥控制系统,其采用纯机械结构的姿态调整机构,与电液控制方式相

比,该机构具有更高的可靠性。



(a) 实物图 (b) 结构示意图

图3 姿态调整前驱动桥

Fig. 3 Front bridge with attitude adjustment

1. 托架 2. 摇摆轴 3. 中央减速桥体 4. 右三通壳体总成
5. 右前驱动轮 6. 左前驱动轮 7. 左三通壳体总成 8. 左下拉杆
9. 右下拉杆

拖拉机液压控制系统主要由 ECU 控制器、倾角传感器及陀螺仪、电液比例阀组和液压马达组成,控制原理如图 4 所示,车身倾斜时,通过倾角传感器及陀螺仪实时检测车身倾角,再将数据传输至 ECU 控制器,通过算法得到调整角度后,ECU 控制器将控制信号传输至电液比例阀组控制后桥左、右液压马达工作,完成后桥姿态调整。采用无锡小微传感科技有限公司生产的 BW-VG525 型动态倾角传感器,以获得车身倾角信息。

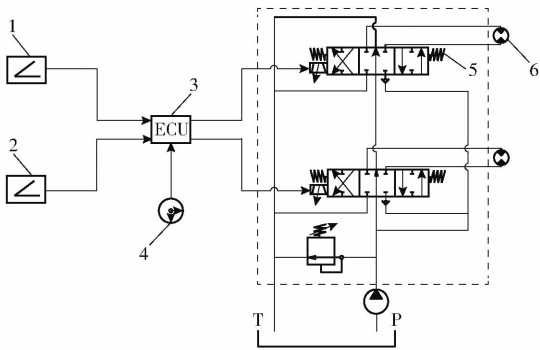


图4 电液控制系统示意图

Fig. 4 Diagram of electro-hydraulic control system

1. 左后轮倾角传感器 2. 右后轮倾角传感器 3. ECU 控制器
4. 陀螺仪 5. 电液比例阀组 6. 液压马达

综上所述,丘陵山地拖拉机在传统拖拉机的基础上,通过对前、后桥进行改进,采用主动调整与随动调整相结合的方式,在保证拖拉机具有良好地面附着能力的同时,可以通过后桥姿态调整机构摆动角度和方向,实现拖拉机姿态调整。

## 2 丘陵山地拖拉机运动学建模与分析

在丘陵山区行驶作业时,路面情况一般是随机变化的,拖拉机的运动控制需在考虑路面条件影响的情况下进行。并且,运动学模型建立是对拖拉机进行运动控制的基础。采用运动学位姿变换方法,结合拖拉机的姿态调整机构原理,建立表征轮心高度和车身姿态关系的运动学模型。

### 2.1 坐标系建立与空间姿态参数定义

建立拖拉机调平机构的坐标系,并在该框架下定义相关的姿态参数,是建立丘陵山地拖拉机运动学模型的前提<sup>[18]</sup>。拖拉机在不同地形条件下其车身姿态会发生改变。如图 5 所示,定义了与运动学相关的坐标系。拖拉机置于水平地面,4 个轮心等高,且后桥调整机构处于未姿态调整的初始状态。 $OX_0Y_0Z_0$  为空间绝对坐标系,其坐标原点位于空间任一位置,姿态为  $Z_0$  轴始终垂直于水平地面, $X_0OY_0$  面与水平地面始终平行。 $DX_DY_DZ_D$  为主车体坐标系,固结于后桥箱上,坐标系原点位于左、右输出轴中点上, $Y_D$  沿半轴轴线方向, $X_D$  与半轴垂直并水平指向拖拉机前进方向; $AX_AY_AZ_A$  为后桥右轮边摆动机构坐标系,固结于右轮边摆动机构总成上,绕关节  $J_A$  转动; $BX_BY_BZ_B$  为后桥左轮边摆动机构坐标系,固结于左轮边摆动机构总成上,绕关节  $J_B$  转动; $CX_CY_CZ_C$  为前桥姿态调整机构坐标系,绕关节  $J_C$  转动;定义拖拉机四轮轮心在空间绝对坐标系  $OX_0Y_0Z_0$  的坐标为

$$w_i = (x_i, y_i, z_i, 1)^T \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

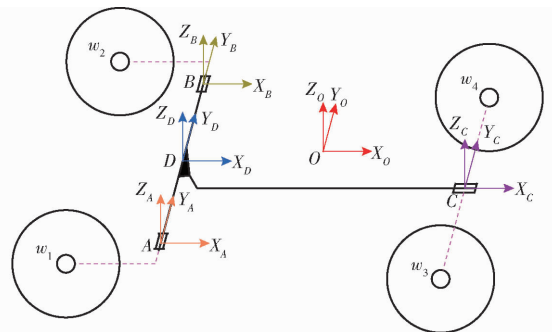


图5 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机空间坐标系

Fig. 5 Space coordinate system of wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas

随着拖拉机不断运动,车身姿态相对初始状态也会发生改变,主车体坐标系  $DX_DY_DZ_D$  到空间绝对坐标系  $OX_0Y_0Z_0$  的变换过程如图 6 所示,首先平移坐标系  $DX_DY_DZ_D$  原点与空间绝对坐标系原点重合,此时主车体坐标系与空间绝对坐标系分别在  $X$  轴与  $Y$  轴方向上呈一定角度。拖拉机主车体运动姿态由绕  $X$ 、 $Y$  轴的旋转序列来规定。如图 6 所示,先绕  $X_0$  轴旋转  $\theta_x$ ,再绕新的  $Y_D$  轴旋转  $\theta_y$ ,来描述基于丘陵山地拖拉机的车体位姿。旋转变换过程中定义侧倾角  $\theta_x$  和俯仰角  $\theta_y$  表征拖拉机车身姿态。后桥调整机构为主动调整,定义主动调整后桥右轮边摆动机构摆动时的变换过程为坐标系  $AX_AY_AZ_A$  绕关节  $J_A$  转动,摆动角为  $\alpha$ ,根据前文中提到的要求左右轮边摆动机构摆动角度相同,方向相反或相同,所以定义左轮边摆动机构摆动时的变换过程为坐标系

$BX_B Y_B Z_B$  绕关节  $J_B$  转动, 摆动角为  $-\alpha$  或  $\alpha$ 。前桥调整方式为随动调整, 根据后桥姿态和地形条件, 相对主车体被动摆动, 定义该变换过程为坐标系  $CX_C Y_C Z_C$  绕关节  $J_C$  转动, 摆动角为  $\beta$ 。综上所述, 定义空间姿态参数为  $\theta_x, \theta_y, \alpha, \beta$ 。

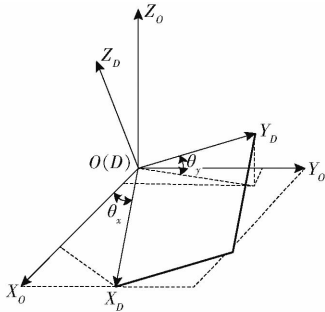


图 6 主车体坐标系与空间绝对坐标系的相对位置关系  
Fig. 6 Relative position relationship between main body coordinate system and space absolute coordinate system

### 2.2 运动关系与运动学建模

在不同的地形条件下, 拖拉机四轮轮心位置随地面环境变化, 用轮心位置表示地形条件, 拖拉机姿态参数表示车身姿态, 建立表征地形条件与车身姿态关系的运动学模型, 实质是建立轮心位置  $w_i$  与空间姿态参数  $(\theta_x, \theta_y, \alpha, \beta)$  之间的联系<sup>[19]</sup>。

根据所描述主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  到空间绝对坐标系  $OX_0 Y_0 Z_0$  的变换过程, 首先平移坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  坐标系原点与空间绝对坐标系原点重合, 得到平移变换矩阵

$$T_{OD} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{OD} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{OD} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{OD} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $(X_{OD}, Y_{OD}, Z_{OD})$  ——  $DX_D Y_D Z_D$  与  $OX_0 Y_0 Z_0$  在绝对坐标系下的坐标差

其次旋转主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  与空间绝对坐标系重合, 先绕空间绝对坐标系  $X$  轴转动, 再绕  $Y$  轴转动, 得到旋转变换矩阵

$$R_{OD} = R(y, \theta_y) R(x, \theta_x) = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & \sin\theta_y \sin\theta_x & \sin\theta_y \cos\theta_x & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ -\sin\theta_y & \cos\theta_y \sin\theta_x & \cos\theta_y \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中  $R(x, \theta_x)$  ——  $DX_D Y_D Z_D$  绕  $X_0$  轴旋转角  $\theta_x$  的旋转变换矩阵

$R(y, \theta_y)$  ——  $DX_D Y_D Z_D$  绕旋转后的新  $Y_D$  轴旋转角  $\theta_y$  的旋转变换矩阵

然后根据所述主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  与后驱

动桥右轮边减速机构坐标系  $AX_A Y_A Z_A$  间的位置关系,  $AX_A Y_A Z_A$  相对主车体坐标系绕  $Y_D$  轴转动, 摆动角为  $\alpha$ , 则坐标系  $AX_A Y_A Z_A$  相对于主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  的平移变换矩阵和旋转变换矩阵为

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{DA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{DA} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{DA} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{DA} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{DA} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中  $(X_{DA}, Y_{DA}, Z_{DA})$  ——  $AX_A Y_A Z_A$  与  $DX_D Y_D Z_D$  在主车体坐标系下坐标差

同理, 后驱动桥左轮边减速机构坐标系相对主车体坐标系绕  $Y_D$  轴转动, 与右轮边减速机构坐标系旋转方向相反时, 摆动角为  $-\alpha$ , 坐标系  $BX_B Y_B Z_B$  相对于主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  的平移变换矩阵和旋转变换矩阵为

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{DB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{DB} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{DB} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{DB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{DB} = \begin{bmatrix} \cos(-\alpha) & 0 & -\sin(-\alpha) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin(-\alpha) & 0 & \cos(-\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中  $(X_{DB}, Y_{DB}, Z_{DB})$  ——  $BX_B Y_B Z_B$  与  $DX_D Y_D Z_D$  在主车体坐标系下坐标差

而当左轮边减速机构坐标系与右轮边减速机构坐标系旋转方向相同时, 摆动角为  $\alpha$ , 平移变换矩阵和旋转变换矩阵为

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{DB} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{DB} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{DB} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{DB} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{DB} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (6)$$

然后由前驱动桥调平系统坐标系与主车体坐标系间的相对位置关系,  $CX_C Y_C Z_C$  绕  $X_D$  轴转动, 摆动角为  $\beta$ , 得到坐标系  $CX_C Y_C Z_C$  相对于主车体坐标系  $DX_D Y_D Z_D$  的平移变换矩阵和旋转变换矩阵为

$$\left\{ \begin{aligned} T_{DC} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & X_{DC} \\ 0 & 1 & 0 & Y_{DC} \\ 0 & 0 & 1 & Z_{DC} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R_{DC} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中  $(X_{DC}, Y_{DC}, Z_{DC})$ —— $CX_C Y_C Z_C$  与  $DX_D Y_D Z_D$  在主车体坐标系下坐标差

根据四轮所在坐标系, 车轮 1 轮心位置  $w_1$  在坐标系  $AX_A Y_A Z_A$  中, 车轮 2 轮心位置  $w_2$  在坐标系  $BX_B Y_B Z_B$  中, 车轮 3、4 轮心位置  $w_3, w_4$  在坐标系  $CX_C Y_C Z_C$  中, 定义各坐标系下轮心位置坐标, 定义当前坐标系下各驱动轮相对轮心坐标  $w_{Ai}$  为

$$w_{Ai} = (x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, 1)^T \quad (i=1, 2, 3, 4) \quad (8)$$

最后根据机器人运动学空间姿态方程得到关于轮心位置坐标与空间姿态参数之间关系的运动学矩阵方程为

$$\left\{ \begin{aligned} w_1 &= (T_{OD} R_{OD}) (T_{DA} R_{DA}) w_{A1} \\ w_2 &= (T_{OD} R_{OD}) (T_{DB} R_{DB}) w_{A2} \\ w_3 &= (T_{OD} R_{OD}) (T_{DC} R_{DC}) w_{A3} \\ w_4 &= (T_{OD} R_{OD}) (T_{DC} R_{DC}) w_{A4} \end{aligned} \right. \quad (9)$$

图 7 为丘陵山地拖拉机车身结构尺寸示意图, 表 1 为一组各坐标系关联参数。在主车体坐标系到空间绝对坐标系的位姿变换过程中, 空间绝对坐标系原点的初始位置不影响运动学建模的结果, 且原点平移过程中产生的平移变化量不是影响本研究的主要因素, 故本文假设空间绝对坐标系原点固结于

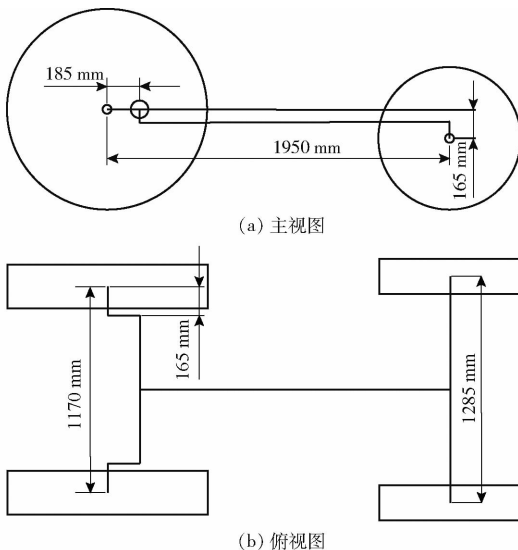


图 7 丘陵山地姿态调整轮式拖拉机结构参数示意图  
Fig.7 Structural dimensions of wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas

表 1 拖拉机各坐标系关联参数

Tab.1 Associated parameters between respective coordinates of tractor mm

参数	数值
$(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1})$	$(-185, -165, 0)$
$(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2})$	$(-185, 165, 0)$
$(x_{A3}, y_{A3}, z_{A3})$	$(0, -642.5, -95)$
$(x_{A4}, y_{A4}, z_{A4})$	$(0, 642.5, -95)$
$(X_{OD}, Y_{OD}, Z_{OD})$	$(0, 0, 0)$
$(X_{DA}, Y_{DA}, Z_{DA})$	$(0, -420, 0)$
$(X_{DB}, Y_{DB}, Z_{DB})$	$(0, 420, 0)$
$(X_{DC}, Y_{DC}, Z_{DC})$	$(1765, 0, -70)$

后桥中心位置, 与主车体坐标系原点重合, 坐标系平移变换过程中的  $(X_{OD}, Y_{OD}, Z_{OD})$  变化量为  $(0, 0, 0)$ , 该假设简化了主车体坐标系到空间绝对坐标系的变换过程。将参数代入式(9), 得到关于车身姿态参数与轮心位置坐标的具体方程, 提取出其中表示轮心高度  $z_i$  的方程组。

在已知车身结构参数的情况下, 可以得到丘陵山地拖拉机正运动学模型和逆运动学模型, 通过正运动学模型, 已知姿态参数  $(\theta_x, \theta_y, \alpha, \beta)$ , 可以得到对应的轮心位置坐标  $w_i$ ; 通过逆运动学模型, 则可由任意轮心位置坐标得到对应的车身姿态参数。丘陵山地拖拉机正运动学模型可表示为

$$w_i = f_i(\theta_x, \theta_y, \alpha, \beta) \quad (10)$$

丘陵山地拖拉机逆运动学模型可表示为

$$(\theta_x, \theta_y, \beta) = f^{-1}(w_1, w_2, w_3, w_4, \alpha) \quad (11)$$

通过建立运动学模型, 能够准确表征车身姿态与轮心位置之间的关系, 为拖拉机的改进设计和性能分析提供了理论基础。逆运动学模型为拖拉机的运动控制提供了一种方案, 即通过初始状态下的轮心位置与后桥调整角度, 得到对应的车身姿态角, 再利用算法根据当前角度优选出最适合的后桥调整角度对拖拉机进行姿态调整, 根据地形变化, 以调整后的状态为初始状态循环以上步骤, 完成拖拉机的运动控制。

### 2.3 运动学求解算例

在不进行主动调整时, 即  $\alpha$  为  $0^\circ$  的前提下, 将表 1 中丘陵山地拖拉机车身结构参数代入式(9), 此时方程组中只含有轮心高度和车身姿态参数, 在给出一组车身姿态参数后可以得到对应的轮心高度; 相应地, 在给出轮心高度后, 可以得到姿态参数值, 上述求解结果可相互对照, 验证运动学模型的正确性。所求解例如表 2 所示。

在求解过程中将正运动学求解结果作为逆运动学求解的条件, 结果表明, 运动学建模正确且具有较高的精度。

表 2 运动学正解与逆解算例

Tab. 2 Forward and inverse solution examples of kinematic model

条件 $(\theta_x, \theta_y, \beta)/(^{\circ})$	结果 $(z_1 - z_2, z_3 - z_2, z_4 - z_2)/\text{mm}$
(0, 0, 0)	(0, -165, -165)
(5, 0, 0)	(-101.972 2, -271.355 8, -159.360 7)
正解 (0, 5, 0)	(0, -334.325 8, -334.325 8)
(5, 5, 0)	(-101.584 2, -440.276 9, -328.708 0)
(5, 5, -10)	(-101.584 2, -328.708 0, -440.276 9)
条件 $(z_1 - z_2, z_3 - z_2, z_4 - z_2)/\text{mm}$	结果 $(\theta_x, \theta_y, \beta)/(^{\circ})$
(0, -165, -165)	(0, 0, 0)
(-101.972 2, -271.355 8, -159.360 7)	(5, 0, 0)
逆解 (0, -334.325 8, -334.325 8)	(0, 5, 0)
(-101.584 2, -440.276 9, -328.708 0)	(5, 5, 0)
(-101.584 2, -328.708 0, -440.276 9)	(5, 5, -10)

### 3 运动控制方法

以第 2 节建立的运动学模型为基础,得到表征车身姿态与轮心高度关系的数学模型,对拖拉机进行运动控制。首先确定控制目标和控制变量,制定运动控制方法的整体控制过程;其次设计运动控制中使用的算法,根据需求完成算法中的具体环节。

#### 3.1 运动控制过程

车辆稳定性是表征车辆在坡道地形安全行驶和作业的重要指标,即车辆在行驶过程中不致发生滑移和倾翻的性能,可分为车辆的横向稳定性和纵向稳定性<sup>[20]</sup>,其中侧倾角和俯仰角是表征车辆稳定性的重要指标。丘陵山地拖拉机在通过非结构化地形时,车身稳定性变差,需主动调整车身姿态以提高拖拉机的稳定性。在此过程中,使用车身侧倾角和俯仰角评估车身稳定性。因此,拖拉机运动控制实际上是通过控制姿态调整机构降低车身侧倾角和俯仰角的过程。

图 8 为拖拉机运动控制框图,传感器获得车身倾角信息,通过运动学模型计算得到轮心位置,最后由控制算法得到控制变量,控制执行机构完成姿态调整。其中,运动学模型在第 2 节中已经建立,并进行了正逆运动学模型建立。在控制过程中需综合考虑侧倾角、俯仰角、摆动角变化量等多种影响车身稳定性的因素,其为一个多目标优化的问题。而使用遗传算法,根据多种影响因素设计对应的适应度函

数,对多目标优化问题效果显著,为实现更好的效果,需对遗传算法的缺陷进行改进<sup>[21-22]</sup>。

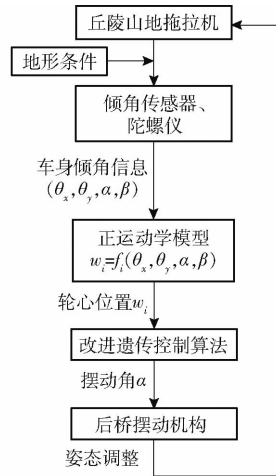


图 8 运动控制框图

Fig. 8 Block diagram of motion control

#### 3.2 改进遗传算法设计

在控制算法的选择上,遗传算法在多目标控制和全局搜索方面有较大优势,但传统遗传算法存在缺陷,局部搜索能力不足,易陷入局部最优解,因此需对其进行改进。具体的改进方法为采用一种具有较强局部搜索能力的优化算法,对传统遗传算法的结果进一步优化。模拟退火算法的局部搜索能力较强,因此结合传统遗传算法与模拟退火算法,提出一种针对丘陵山地拖拉机运动控制的改进遗传算法,兼顾两种算法的优点<sup>[23-25]</sup>。

改进遗传算法主要包括遗传算法和模拟退火算法两部分的设计,算法流程如图 9 所示,首先进行种群初始化,在限定范围内产生由一定数量主动控制摆角个体组成的初始种群,输入轮心位置信息,通过逆运动学模型式(11),可以得到与每一个个体唯一对应的侧倾角与俯仰角。将侧倾角、俯仰角代入适应度函数中计算出对应个体的适应度,基于不同个体的适应度进行选择、交叉、遗传等遗传算子操作得到新的种群,将新种群按照以上步骤进化若干次操作,最终选择其中适应度最大的个体作为模拟退火算法的初始解,对初始解进行扰动处理和边界处理,并重新计算适应度,基于该适应度判断是否接受当前解成为临时最优解,然后根据退火机制降温,重复上述步骤直至达到温度条件,最终通过模拟退火算法筛选出的个体即为最优解。

具体内容包括:

##### (1) 遗传算法种群初始化

设置合理的种群范围可以使算法具备更快的响应速度和调整精度,本研究以拖拉机的设计调整范围作为限制条件设置种群范围,其后桥姿态调整机

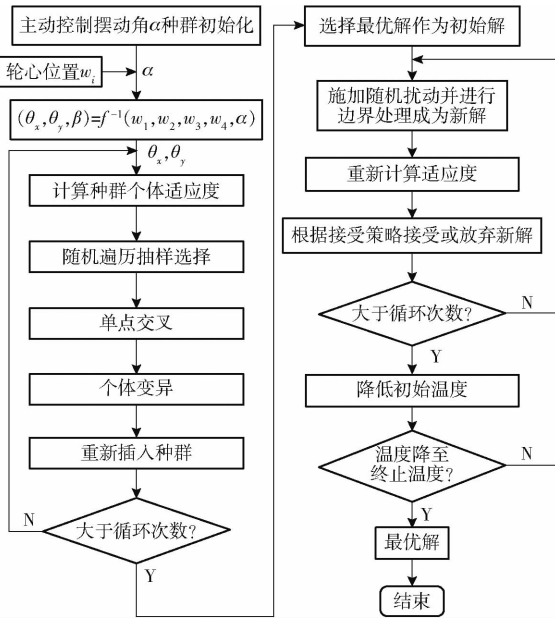


图9 改进遗传算法流程图

Fig.9 Flowchart of improved genetic algorithm

构摆动角范围为  $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ , 以该范围作为遗传算法的种群边界, 在限定区间内产生新个体组成初始种群。

### (2) 适应度函数设计

适应度函数是遗传算法进行选择的根本, 需根据实际的应用需求进行设计, 合适的适应度函数可以得到与预期目标更贴合的控制结果<sup>[26]</sup>。本研究以提高拖拉机稳定性为控制目标, 体现为对拖拉机侧倾角、俯仰角的控制, 角度越小车身越稳定。此外, 调整过程中的调节幅度也会对车身稳定性造成影响。因此, 在满足适应度函数连续、非负的前提下, 设计适应度函数为

$$F = \frac{1}{\theta_x^2 + \theta_y^2 + m\Delta^2\alpha} \quad (12)$$

式中  $\Delta\alpha$ ——摆动机构摆动变化量

$m$ ——摆动机构变化量影响因子

在该适应度函数中, 侧倾角、俯仰角越小, 调整幅度越小, 则对应个体适应度  $F$  越大, 越符合最终要求。

### (3) 遗传算法

依据个体适应度对初始种群进行处理, 优胜劣汰, 使最终结果符合控制目标。遗传算法中通过选择、交叉、变异、重新插入种群等步骤完成这一过程。

首先是选择操作, 该步骤的目的是根据个体的适应度, 按一定概率差额选取种群中的个体组成新种群, 常见的选择方法有轮盘赌法、随机遍历抽样法、锦标赛选择等, 其中轮盘赌法为最普遍的方法, 通过计算种群适应度之和, 则每个个体被选择的概率为

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i} \quad (13)$$

式中  $F_i$ ——第  $i$  个个体适应度

$N$ ——个体数量

由此可见个体的适应度越大, 被选择的概率越高。但是轮盘赌法也有缺陷, 该方法每次选出一个个体, 需重复多次才能选择出足够数量的个体, 且多次选择中适应度较大的个体被重复选择的概率增大, 不利于种群的多样性。故本文采用由轮盘赌法改进的随机遍历抽样法, 该方法在轮盘赌法的基础上一次选择出符合数量要求的个体, 避免了重复选择较大适应度个体的问题, 在满足筛选需求的同时丰富了种群多样性<sup>[27]</sup>。

完成选择操作的个体需要进行交叉操作, 使父代中具有优秀特征的个体遗传至子代, 以保留其优秀特征, 同时能够加速种群融合, 因此设定个体发生交叉概率较大。使用单点交叉的方法, 按设定交叉概率随机选择两个个体  $a_1$ 、 $a_2$  以及一处交叉点, 将两个个体交叉位置前后的部分进行交叉重组, 得到两个新的个体, 具体交叉规则为

$$\begin{cases} a_1 = a_1 r + a_2 (1 - r) \\ a_2 = a_1 (1 - r) + a_2 r \end{cases} \quad (14)$$

式中  $r$ —— $[0, 1]$  随机数

为了维持种群的多样性, 在经过选择、交叉操作后产生的新种群中, 选择一定数量的个体进行变异产生新的个体, 使种群品类更加丰富, 同时有概率产生更优秀的个体。变异可以产生新的个体, 但为了维持种群的整体稳定性, 变异发生的概率较小, 个体  $a_3$  变异规则为

$$a_3 = a_3 + (1 - g/G)^2 q \quad (15)$$

式中  $g$ ——当前迭代次数

$G$ ——最大迭代次数

$q$ ——随机数

可以看出个体变异幅度与迭代次数相关, 随着迭代次数增加, 优秀个体占比增加, 种群趋于稳定, 个体变异的幅度也在变小。

经过选择操作后, 种群规模小于初始种群规模, 而交叉、变异操作不改变种群个体数量, 因此需对种群进行补充, 确保下次迭代开始时种群规模与初始种群规模一致。故在变异后的种群中, 重新插入初始种群中按适应度较大的个体组成新种群, 重新插入个体的数量为选择操作前后种群规模的差值。

### (4) 模拟退火算法

为克服传统遗传算法的缺陷, 在遗传算法迭代一定次数后, 选择遗传算法得到的最终解作为模拟

退火算法的初始解进一步优化,具体操作为:设定初始、终止温度与降温效率等条件,对初始解添加随机扰动成为新解,并对新解进行边界处理,确保新解取值仍在种群边界范围内;然后重新计算新解的适应度,与初始解进行对比,当新解适应度大于初始解且满足接受概率时接受新解代替初始解,否则保留初始解,新解接受概率  $Q_i$  为

$$Q_i = \exp \frac{\Delta F}{T_c} \quad (16)$$

式中  $\Delta F$ ——初始解与新解适应度差值

$T_c$ ——当前温度

将得到的结果进行一定次数的迭代,当满足循环条件降低初始温度,并重复以上步骤直至温度降至终止温度,最终得到的解即为改进遗传算法的最优解<sup>[28-29]</sup>。

## 4 仿真与试验

### 4.1 仿真与试验验证

为了验证所设计的算法能否实现预期控制目标,进行运动控制仿真。在 ADAMS 中搭建拖拉机和障碍路面模型,并联合 Matlab 对算法控制结果进行仿真<sup>[30]</sup>。在多次仿真的基础上,运动控制仿真参数设置如下:遗传算法种群规模为 50,迭代次数为 30,该种群规模及迭代次数较为适中,最大限度平衡计算结果稳定性和响应速度之间的矛盾,此时应优先保证计算结果的稳定性;摆动机构变化量影响因子  $m$  为 0.01,该参数作用为限定机构摆动变化量对车身稳定性影响的范围;在遗传过程中,单次迭代应保证多数个体通过筛选,同时个体有较大概率进行交叉将优秀特征遗传至子代,以保证种群稳定性,同时个体有较小概率发生变异以产生优秀特征,最终确定选择概率为 0.9,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.05;模拟退火算法应充分考虑在通过遗传算法后,最终结果的稳定性与响应速度的平衡问题,此时初始解已较为稳定,可适当考虑响应速度的要求,最终确定初始温度为 100,终止温度为 1,降温速率为 0.8,迭代次数为 30。

根据姿态调整原理中所述后桥两侧姿态调整机构摆动方向对调整效果的影响,针对两种情况分别设置仅有纵向坡度和横向坡度的仿真环境,验证算法在调整单一姿态角时的效果。图 10a 为控制后桥两侧摆动机构反向摆动调整横向坡地车身侧倾角的过程,图 10b 为控制后桥两侧摆动机构同向摆动调整纵向坡地车身俯仰角的过程;图 11 为施加控制前后拖拉机侧倾角和俯仰角随时间的变化关系,横向坡地最大侧倾角降低 13.3°,纵向坡地最大俯仰角

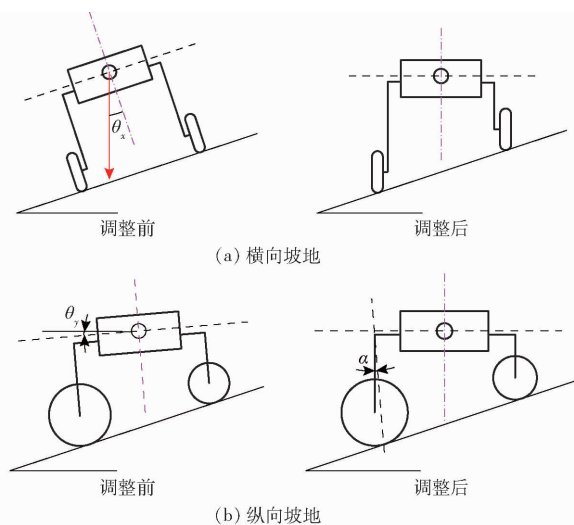


图 10 姿态调整示意图

Fig. 10 Attitude adjustment diagrams on slope

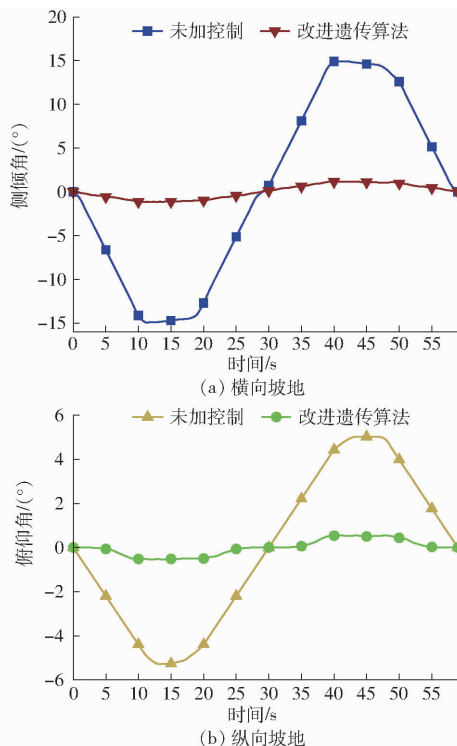


图 11 侧倾角和俯仰角变化曲线

Fig. 11 Variation of roll angle and pitch angle on slope

降低 4.3°。结果表明,使用运动控制方法进行姿态调整,可有效降低拖拉机在横向坡地上的车身侧倾角,以及纵向坡地上的车身俯仰角。

在实际作业中,路面条件是随机的,一般同时具有横向和纵向两种坡度,该情况下单独控制俯仰角或侧倾角效果都不理想。此时可以利用后桥两侧机构摆动方向影响调整效果的特性,将控制过程分为 2 部分分步调整车身倾角。即先调整车身侧倾角,以该调整结果作为初始姿态再调整车身俯仰角,最终实现横向和纵向坡地的综合调平,提高运动控制方法的适用性。根据该地形描述设置两种坡度兼有



的仿真环境,验证该环境下的控制效果。假设拖拉机匀速行驶,拖拉机轮系示意如图5所示,尺寸信息如图7所示,设计仿真地形环境为

$$z_1 = \begin{cases} 0 & (x_1 \leq 2000 \text{ mm}) \\ 0.3(x_1 - 2000) & (2000 \text{ mm} < x_1 \leq 3000 \text{ mm}) \\ 300 & (3000 \text{ mm} < x_1 \leq 4000 \text{ mm}) \\ 300 - 0.3(x_1 - 4000) & (4000 \text{ mm} < x_1 \leq 5000 \text{ mm}) \\ 0 & (x_1 > 5000 \text{ mm}) \end{cases} \quad (17)$$

$$z_3 = \begin{cases} -165 & (x_3 \leq 2000 \text{ mm}) \\ 0.3(x_3 - 2000) - 165 & (2000 \text{ mm} < x_3 \leq 3000 \text{ mm}) \\ 135 & (3000 \text{ mm} < x_3 \leq 4000 \text{ mm}) \\ 300 - 0.3(x_3 - 4000) - 165 & (4000 \text{ mm} < x_3 \leq 5000 \text{ mm}) \\ -165 & (x_3 > 5000 \text{ mm}) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} z_2 = 0 \\ z_4 = -165 \text{ mm} \end{cases} \quad (19)$$

其中  $x_1 = 50 + 100t$  (20)

$x_3 = 1900 + 100t$  (21)

式中  $z_i$ ——四轮轮心沿  $Z$  轴高度坐标,  $i = 1, 2, 3, 4$   
 $x_i$ ——四轮轮心沿  $X$  轴坐标,  $i = 1, 3$   
 $t$ ——拖拉机运动时间, s

在上述地形条件下进行仿真,先调整车身侧倾角,以调整后的姿态作为初始姿态再调整俯仰

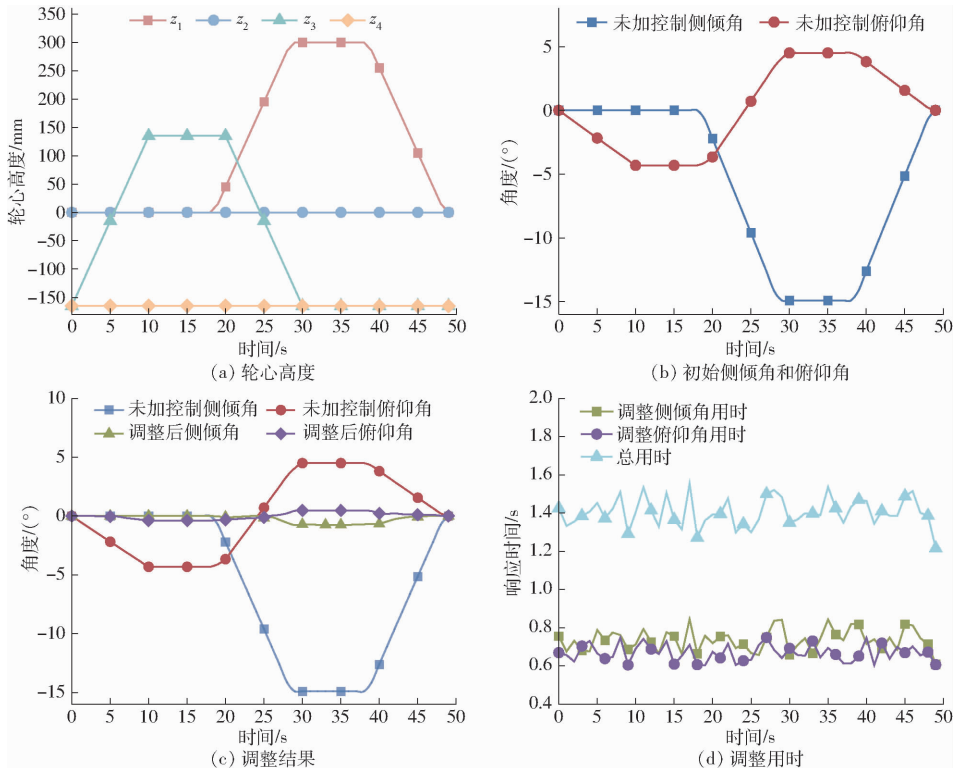


图12 综合调整仿真结果

Fig. 12 Simulation results of comprehensive adjustment

角,调整过程及结果如图12所示。图12a为在式(18)、(19)所构建地形下拖拉机轮心高度信息;由轮心高度通过式(10)计算实时得到该地形下拖拉机姿态参数值,侧倾角及俯仰角变化情况如图12b所示;在此基础上,通过算法先控制调整机构调整车身侧倾角,此时俯仰角未发生变化,以调整侧倾角后的车身姿态为初始姿态,再调整车身俯仰角,最终调整结果如图12c所示,最大侧倾角降低 $13.8^\circ$ ,最大俯仰角降低 $4^\circ$ ;图12d为两次调整算法所用的调整时间,整体用时较短,基本满足拖拉机在运动过程中的动态调整要求。结果表明,在横向和纵向坡度兼具的地形中,通过实时获得的车身姿态参数,采用分步控制侧倾角和俯仰角的策略,对连续运动的拖拉机进行动态调整,可以在调整结果互不干涉的基础上,实现一定角度范围内横向和纵向全姿态调平。

对丘陵山地拖拉机进行田间试验,如图13所示,在坡地上行驶时,其通过控制后桥摆动机构对车身姿态进行调整,同时前桥随动调整完成车身调平。当前条件下,多次调整试验结果表明,在坡地地形下,通过采集地面倾角信息,通过算法将其转换为后桥摆动机构摆动角,完成车身姿态的调整,最终可实现横向(最大倾角小于 $15^\circ$ )和纵向(最大倾角小于 $5^\circ$ )坡地上的姿态调平。

在实际工况中,地面倾角与控制车身摆角的关系是非线性的,因此关键在于进行两者间的转换。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field experimental site

本研究基于运动学建模和改进遗传算法提出的控制策略,可根据地面倾角的变化,给出较为精确的摆角机构控制量。在田间试验中,根据地面倾角通过控制策略给出最优结果,拖拉机摆动机构执行摆动角度,完成在不同地形下的姿态调整。

#### 4.2 算法对比

对比传统遗传算法、模拟退火算法以及基于两者的改进遗传算法在响应时间和控制误差上的差距,验证改进遗传算法的性能提升。仿真环境设置为单独控制车身俯仰角,输入一组轮心位置坐标,计算出该轮心高度下调整误差量最小的解作为标准解;在其他条件不变的情况下,分别在依

次递增的种群规模下对 3 种算法各进行 100 次仿真,统计其响应时间平均值和调整误差平均值。如表 3 所示,传统遗传算法与改进遗传算法对比结果表明,算法控制精度与种群规模相关,随着种群规模的增加,在遗传算法的迭代过程中,优秀个体占比增加,2 种算法的误差都有一定程度降低;但种群规模的扩大增加了计算量,使算法响应时间增加。在种群规模较低时,两种算法响应时间差距不大,但传统遗传算法的结果不仅精度较低,而且在大量试验中多次出现陷入局部最优解的情况,出现单次极大偏差,严重影响其调整精度,改进遗传算法由于存在模拟退火算法的对比接受机制,基本不会陷入局部最优解。随着种群规模的增加,传统遗传算法的计算精度提升明显,但其响应时间也大大增加,而改进遗传算法可以通过对模拟退火算法部分的降温速率、迭代次数、初始温度等环节进行适当调整,在保证较低误差的同时减少算法响应时间。试验结果表明,改进遗传算法在算法响应时间和调整误差方面均优于传统遗传算法,种群规模为 50 时,较传统遗传算法在算法响应时间上降低 63.93%,在调整误差上降低 0.19%。

表 3 算法响应时间及调整误差对比

Tab. 3 Comparison of response time and adjustment error of algorithm

参数	算法	种群规模				
		10	20	30	40	50
响应时间/s	模拟退火算法	30.965 6	31.815 7	32.435 3	34.023 7	34.294 3
	传统遗传算法	0.243 4	0.606 5	1.122 2	1.704 5	2.159 8
	改进遗传算法	0.236 8	0.387 3	0.503 2	0.619 7	0.779 2
调整误差/(°)	模拟退火算法	14.695 3	7.487 8	3.089 5	8.608 7	2.002 9
	传统遗传算法	1.117 7	1.216 9	0.093 5	0.033 1	0.097 8
	改进遗传算法	0.079 8	0.016 8	0.011 1	0.014 6	0.006 1

在模拟退火算法的验证过程中,其响应时间及调整误差结果均劣于遗传算法。响应时间较长,且调整误差过大,基本认为无法进行有效调整。由于模拟退火算法是对单个个体进行优化,在种群规模较大时,全局搜索能力差,计算时间过长,同时在种群范围较大时优化结果随机性较大,故单独使用模拟退火算法不适用于本研究的情况,本文使用模拟退火算法对传统遗传算法最优解进一步优化,以提高其结果稳定性。试验在单一轮心位置输入条件下进行,实际作业中会根据地形变化进行大量轮心位置输入、调整多种姿态角的过程,改进遗传算法在响应时间和调平精度方面的优势将被进一步放大。

## 5 结论

(1)建立了丘陵山地姿态调整轮式拖拉机的运

动力学模型,得到了表征轮心高度与空间姿态参数关系的数学模型,通过算例求解验证了运动学模型的正确与准确性,并得到正、逆运动学模型,为进一步的运动控制奠定基础。

(2)以提高拖拉机在非结构化地形上的稳定性为目标,提出了一种基于改进遗传算法的运动控制方法,改进算法将传统遗传算法与模拟退火算法相结合,同时拥有多目标控制、较强的全局搜索能力和局部搜索能力等优点,在完成预期控制目标的基础上提高了算法的稳定性和响应速度。

(3)通过在 ADAMS 中建立拖拉机和障碍路面模型,并在 Matlab 中进行仿真,分别验证拖拉机在横向坡度、纵向坡度地形下和两种坡度兼有的一般地形下算法的调整效果,试验结果表明,与不使

用运动控制算法相比,拖拉机在横向和纵向坡地上最大侧倾角和最大俯仰角分别降低 13.3°和 4.3°;在纵向、横向坡度兼有的路面上,采用分步调整的策略,先调平横向倾角再调平纵向倾角,使最大侧倾角降低 13.8°,最大俯仰角降低 4°,极大提高了拖拉机在非结构化地形下的车身稳定性,

实现了一定角度范围内的全姿态调平。

(4)与传统遗传算法进行对比验证改进遗传算法的性能提升,结果表明,改进遗传算法在调平精度优于传统遗传算法的基础上,算法响应时间缩短 63.93%,在保证调整精度与稳定性的前提下,大幅提高了算法效率。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨敏丽,白人朴.中国农业机械化发展的不平衡性研究[J].农业机械学报,2005,36(9):60-63.  
YANG Minli,BAI Renpu. Study on regional unbalance of agricultural mechanization development in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(9):60-63. (in Chinese)
- [2] 王升升,耿令新.丘陵山区农业机械化发展现状及对策[J].农业工程,2016,6(5):1-4.  
WANG Shengsheng,GENG Lingxin. Current situation and countermeasures of agricultural mechanization in hilly and mountainous area[J]. Agricultural Engineering,2016,6(5):1-4. (in Chinese)
- [3] 谢斌,武仲斌,毛恩荣.农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2018,49(8):1-17.  
XIE Bin,WU Zhongbin,MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(8):1-17. (in Chinese)
- [4] 傅泽强,蔡运龙,杨友孝,等.中国粮食安全与耕地资源变化的相关分析[J].自然资源学报,2001,16(4):313-319.  
FU Zeqiang, CAI Yunlong, YANG Youxiao, et al. Research on the relationship of cultivated land change and food security in China[J]. Journal of Natural Resources,2001,16(4):313-319. (in Chinese)
- [5] 孙景彬,刘志杰,杨福增,等.丘陵山地农业装备与坡地作业关键技术研究综述[J].农业机械学报,2023,54(5):1-18.  
SUN Jingbin,LIU Zhijie,YANG Fuzeng,et al. Research review of agricultural equipment and slope operation key technologies in hilly and mountains region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(5):1-18. (in Chinese)
- [6] 潘冠廷,杨福增,孙景彬,等.小型山地履带拖拉机爬坡越障性能分析与试验[J].农业机械学报,2020,51(9):374-383.  
PAN Guanting,YANG Fuzeng,SUN Jingbin,et al. Analysis and test of obstacle negotiation performance of small hillside crawler tractor during climbing process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(9):374-383. (in Chinese)
- [7] 张开兴,张澜,李政平,等.轮式丘陵山地拖拉机扭腰姿态调整装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(6):425-433.  
ZHANG Kaixing,ZHANG Lan,LI Zhengping,et al. Design and test of twisting and swinging attitude adjustment device of wheel hilly tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):425-433. (in Chinese)
- [8] YU J H, PARK J K, CHEON S H, et al. Development of a rolling angle estimation algorithm to improve the performance of implement leveling-control systems for agricultural tractors[J]. Advances in Mechanical Engineering,2022,14(11):1-16.
- [9] LIM T C, CHEOK K C, GANESAN S. Tractor automated ground leveling (AGL) simulation using artificial neural network[C]// 2021 IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT). IEEE,2021:202-208.
- [10] 彭贺,马文星,赵恩鹏,等.丘陵山地轮式拖拉机车身调平系统设计与物理模型试验[J].农业工程学报,2018,34(14):36-44.  
PENG He,MA Wenxing,ZHAO Enpeng,et al. Design and physical model experiment of body leveling system for roller tractor in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(14):36-44. (in Chinese)
- [11] 彭贺,马文星,王忠山,等.丘陵山地拖拉机车身调平控制仿真分析与试验[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(1):157-165.  
PENG He,MA Wenxing,WANG Zhongshan,et al. Control system of self-leveling in hilly tractor body through simulation and experiment[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2019,49(1):157-165. (in Chinese)
- [12] 齐文超,李彦明,陶建峰,等.丘陵山地拖拉机姿态主动调整系统设计与实验[J].农业机械学报,2019,50(7):381-388.  
QI Wenchao,LI Yanming,TAO Jianfeng,et al. Design and experiment of active attitude adjustment system for hilly area tractors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):381-388. (in Chinese)
- [13] 齐文超,李彦明,张锦辉,等.丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊PID控制方法[J].农业机械学报,2019,50(10):17-23.  
QI Wenchao,LI Yanming,ZHANG Jinhui,et al. Double closed loop fuzzy PID control method of tractor body leveling on hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(10):17-23. (in Chinese)
- [14] JIANG H, XU G, ZENG W, et al. Design and lateral stability analysis of an attitude adjustment tractor for moving on side slopes[J]. Applied Sciences,2024,14(5):2220.
- [15] MICHALEWICZ Z, JANIKOW C Z, KRAWCZYK J B. A modified genetic algorithm for optimal control problems[J]. Computers & Mathematics with Applications,1992,23(12):83-94.
- [16] KWOK D P, SHENG F. Genetic algorithm and simulated annealing for optimal robot arm PID control[C]// Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE,1994:707-713.
- [17] 种昆,李洪迁,李政平,等.丘陵山地姿态调整轮式拖拉机的设计与仿真[J].农机化研究,2021,43(1):247-251.

- ZHONG Kun, LI Hongqian, LI Zhengping, et al. Design and simulation of wheel tractor with full attitude adjustment in hilly and mountain areas[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(1): 247 – 251. (in Chinese)
- [18] 周开波, 王旭永, 罗小桃, 等. 摇臂式六轮探测车空间姿态建模与求解[J]. *上海交通大学学报*, 2013, 47(7): 1093 – 1098.  
ZHOU Kaibo, WANG Xuyong, LUO Xiaotao, et al. Spatial attitude model of six-wheeled rocker rover and its mathematical solution[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2013, 47(7): 1093 – 1098. (in Chinese)
- [19] JIANG H, XU G, ZENG W, et al. Design and kinematic modeling of a passively-actively transformable mobile robot[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2019, 142: 103591.
- [20] 孙景彬, 楚国评, 潘冠廷, 等. 遥控全向调平地履带拖拉机设计与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 358 – 369.  
SUN Jingbin, CHU Guoping, PAN Guanting, et al. Design and performance test of remote control omnidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 358 – 369. (in Chinese)
- [21] 葛继科, 邱玉辉, 吴春明, 等. 遗传算法研究综述[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(10): 2911 – 2916.  
GE Jike, QIU Yuhui, WU Chunming, et al. Summary of genetic algorithms research[J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 2911 – 2916. (in Chinese)
- [22] 林阳, 赵欢, 丁汉. 基于多种群遗传算法的一般机器人逆运动学求解[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(3): 1 – 8.  
LIN Yang, ZHAO Huan, DING Han. Solution of inverse kinematics for general robot manipulators based on multiple population genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(3): 1 – 8. (in Chinese)
- [23] 仪孝展. 基于改进遗传算法的物流车辆路径规划方法研究与应用[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
YI Xiaozhan. Research and application of logistics vehicle route planning based on improved genetic algorithm[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology 2018. (in Chinese)
- [24] 张立博, 李宇鹏, 朱德明, 等. 基于遗传算法的护理机器人逆运动学求解方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 48(10): 1925 – 1932.  
ZHANG Libo, LI Yupeng, ZHU Deming, et al. Inverse kinematic solution of nursing robot based on genetic algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 48(10): 1925 – 1932. (in Chinese)
- [25] 戈新生, 张奇志, 刘延柱. 基于遗传算法的空间机械臂运动规划的最优控制[J]. *空间科学学报*, 2000, 20(2): 185 – 191.  
GE Xinsheng, ZHANG Qizhi, LIU Yanzhu. An optimized method to control the motion planning of space manipulators base genetic algorithm[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2000, 20(2): 185 – 191. (in Chinese)
- [26] 李翠明, 任柯州, 龚俊. 基于改进遗传算法的清洁移动机械臂运动学逆解[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(7): 180 – 185.  
LI Cuiming, REN Kezhou, GONG Jun. Inverse kinematic solution of cleaning mobile manipulator based on improved genetic algorithm[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2022, 43(7): 180 – 185. (in Chinese)
- [27] PENCHEVA T, ATANASSOV K, SHANNON A. Modelling of a stochastic universal sampling selection operator in genetic algorithms using generalized nets[C]//*Proceedings of the Tenth International Workshop on Generalized Nets*, Sofia, 2009: 1 – 7.
- [28] WANG K, LI X, GAO L, et al. A genetic simulated annealing algorithm for parallel partial disassembly line balancing problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 107: 107404.
- [29] SAVSANI V, RAO R V, VAKHARIA D P. Optimal weight design of a gear train using particle swarm optimization and simulated annealing algorithms[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2010, 45(3): 531 – 541.
- [30] 刘本勇, 高峰, 姜惠, 等. 平衡摇臂式移动机器人姿态控制算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(2): 391 – 398.  
LIU Benyong, GAO Feng, JIANG Hui, et al. Attitude control algorithm of balancing-arm mobile robot[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(2): 391 – 398. (in Chinese)

(上接第 391 页)

- [26] NAGANO K, FUJIMOTO Y. A control method of low speed wheeled locomotion for a wheel-legged mobile robot[C]//*2014 IEEE 13th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC)*, 2014: 332 – 337.
- [27] 罗洋, 李奇敏, 温皓宇. 一种新型轮腿式机器人设计与分析[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(22): 3018 – 3023.  
LUO Yang, LI Qimin, WEN Haoyu. Design and analysis of a new type of wheeled legged robot[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(22): 3018 – 3023. (in Chinese)
- [28] 徐岩, 段星光. 轮腿式机器人的姿态耦合优化控制[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(4): 427 – 432.  
XU Yan, DUAN Xingguang. Attitude coupling optimization control of wheeled legged robots[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(4): 427 – 432. (in Chinese)
- [29] BOB Y. A wheeled car, quadruped and humanoid robot: Swiss-Mile robot from ETH Zurich[N]. *Tech Xplore*, 2021 – 12 – 08.
- [30] 王峻, 王辉, 傅杰, 等. 丘陵山地两段式履带行走机构的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2023, 45(9): 217 – 225.  
WANG Jun, WANG Hui, FU Jie, et al. Design and experiment of a two stage crawler walking mechanism in hilly and mountainous areas[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2023, 45(9): 217 – 225. (in Chinese)
- [31] MA Z, WANG J, ZHAO Y, et al. Research on multi-objective optimization model of foundation pit dewatering based on NSGA – II algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10865.