

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.043

丘陵山区农用预检测主动调平底盘设计与试验

刘平义 柯呈鹏 柯 婷 李海涛 魏文军 赵 晨

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对目前丘陵山区农用底盘倾斜后调平精度低、滞后的问题,提出一种预检测主动调平方法,该方法提前检测行驶前方地面情况,判断如何实施调平动作,并在底盘倾斜同时进行主动调整,可主动预防、避免或减少在崎岖不平地面上行驶作业过程中的底盘倾斜。设计了一种采用Y型可调悬架作为调平机构的农用车辆预检测主动调平底盘,分析计算了底盘悬架调整与预检测调平参数、承载能力与调平速度及调平执行策略,分析计算表明,可通过Y型可调悬架的高度调节实现底盘调平。利用样机在室外试验田中进行崎岖不平地面的行走试验验证,试验结果表明,在预检测主动调平行走过程中,丘陵山地农用预检测主动调平底盘可在精度 0.5° 范围内实现动态调平,验证了预检测主动调平方法以及丘陵山地农用预检测主动调平底盘设计方案的可行性。

关键词: 丘陵山区; 预检测主动调平; Y型可调悬架; 底盘

中图分类号: S232.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)03-0371-08

OSID:



Design and Experiment of Pre-detection Active Leveling Agricultural Chassis for Hilly Area

LIU Pingyi KE Chengpeng KE Ting LI Haitao WEI Wenjun ZHAO Chen

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of low precision and hysteresis for the agricultural chassis in the hilly area, a pre-detection active leveling method was proposed to detect the ground situation ahead of the road and determine how to implement the leveling action and actively adjust the body while tilting. It can actively prevent, reduce or avoid the body tilt during driving on rough terrain. An agricultural vehicle pre-detection active leveling chassis with Y-shaped adjustable suspension as the leveling mechanism was designed. The chassis suspension adjustment and pre-detection leveling parameters, load capacity and leveling speed and leveling execution strategy were analyzed and calculated. The analytical calculations showed that the chassis can be leveled by the height adjustment of each Y-shaped adjustable suspension. The prototype was developed and tested on the rugged ground in the outdoor test field. The test results showed that the active pre-detection leveling chassis of the hilly mountain was controlled well that the accuracy of both roll angle and pitch angle just was within 0.5° , verifying the pre-detection active leveling method and the feasibility of the active leveling chassis for agricultural pre-detecting in hilly mountains, and providing theoretical basis and experimental reference for the promotion and application of agricultural chassis in hilly mountainous areas, which had high practical value in the future.

Key words: hilly area; pre-detection active leveling method; Y-shaped adjustable suspension; chassis

0 引言

我国地形多样,地貌复杂,丘陵山区面积比例超过50%的省份广泛分布在中南、东南、西南和西北地区,这些地区同时是粮食和特色经济作物的主产

区,农业经济发展潜力巨大^[1-2]。目前,丘陵山地农业机械化水平薄弱,农机作业时车身及作业部件难以保持水平,影响作业质量,车辆容易倾翻,严重影响操作人员安全^[3-5]。

目前,国外丘陵山地农用底盘的研究主要向降

收稿日期: 2019-07-11 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405494)

作者简介: 刘平义(1978—),女,副教授,主要从事机械设计及理论研究,E-mail: liupingyi@cau.edu.cn

低重心、控制车体的方向发展^[6-9],CASE IH 公司的大型联合收获机,可实时监测谷物情况和作业信息,根据田间作业情况自动调节工作部件。国内自动控制技术也已得到应用^[10-12],采用自动控制技术能够有效提高土地整理效率。彭贺等^[13]设计了一种能实现丘陵山地轮式拖拉机车身实时调平且传递动力的新型车身调平系统。张季琴等^[14]研发的山地微耕机,安装有调整车身倾斜度的专用液压差高装置,同时实现调平和调高功能。

随着调平精度、调平支撑、悬架数目的增加,以车身四点调平为代表的车身多点调平将是发展趋势。文献[15-16]研究了一种具有4组主动可调悬架及前、后车体折腰自由度的主动调平底盘。刘平义等^[17]提出了一种农用底盘自适应调平方法,在幅值和波长特定的波形地面上行走作业时,侧倾角和俯仰角之和可降低60%左右;并进一步提出了丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘,该底盘可在1°精度范围内实现动态调平^[18]。

目前调平技术基于被调平部件不平信息,根据不平信息由控制器控制执行机构完成调平^[19-22],是一种被动、滞后的调平方法,尤其在车辆动态行走时,调平总在倾斜之后,无法在理论上实现绝对调平。

本文提出一种适用于丘陵山地作业的农用底盘预检测主动调平方法,该方法提前检测底盘行驶前方地面情况,判断如何实施调平动作,在底盘倾斜同时进行调平,以期通过主动预防,避免或减少农用车辆在崎岖不平地面上行驶作业过程中发生的底盘倾斜。

1 设计方案与工作原理

预检测主动调平底盘采用独立悬架,前端安装地面检测装置提前获取底盘行驶前方某一特定距离处的地面信息,根据已获得的地面信息和底盘当前行驶状态,分别计算底盘在检测点处保持水平情况下,各悬架将要完成的调节量,在当前位置至检测点处的行驶过程中完成各独立悬架高度调节,实现底盘预检测实时动态主动调平。

1.1 底盘设计方案

预检测主动调平底盘主要包括:前车架、后车架、Y型可调悬架、底盘倾角状态传感器、车轮、高度测距传感器,如图1所示。前后车架通过刚性连接机构进行连接,车轮通过Y型可调悬架与车架相连,前、后车架上分别平行且对称布置两组Y型可调悬架。通过4组Y型可调悬架高度调节车身俯仰角和侧倾角。沿各车轮正前方向、在车架上分别

布置4个高度测距传感器,高度测距传感器竖直方向上分别与各车轮中心在同一平面内,水平方向与前车架和后车架在同一平面内,能够实时测量车轮即将通过的地面相对高度信息。

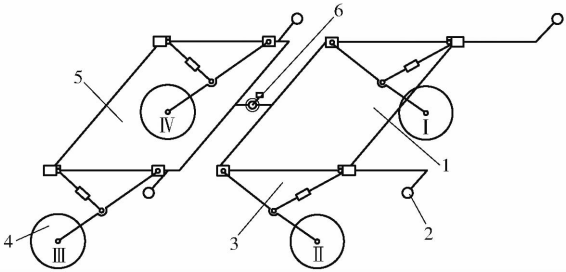


图1 预检测主动调平底盘结构简图
Fig.1 Pre-detection active leveling chassis structure diagram
1.前车架 2.高度测距传感器 3.Y型可调悬架 4.车轮 5.后车架 6.底盘倾角状态传感器

Y型可调悬架主要由滑块、连杆、支撑杆、丝杠电机、滑块测距传感器和直线导轨组成,如图2所示。通过控制直线导轨末端的丝杠电机驱动滑块沿直线导轨首、末端移动,实现Y型可调悬架高度调整,从首端移向末端时悬架高度增大,反之高度减小。滑块测距传感器布置在直线导轨末端,通过实时测量滑块与直线导轨末端的距离,获取滑块位置信息。

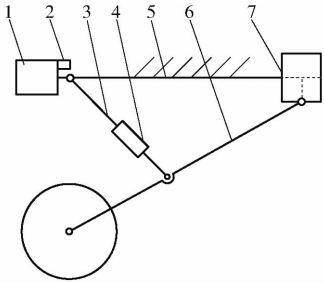


图2 Y型可调悬架结构简图
Fig.2 Y-shaped adjustable suspension structure diagram
1.丝杠电机 2.滑块测距传感器 3.支撑杆 4.减振器 5.直线导轨 6.连杆 7.滑块

1.2 调平底盘工作原理

图3为调平底盘工作原理图,底盘通过平坦路面时,各Y型可调悬架的滑块在直线导轨上相对位置一致时,各悬架高度相等,底盘保持水平,状态如图3a所示;当底盘前轮即将通过凸型地面时,前车架左、右可调悬架上的滑块沿直线导轨向首端移动,前车架左、右悬架高度降低,后车架悬架高度保持不变,底盘在凸型地面保持水平,状态如图3b所示;当底盘前轮即将通过凹型地面时,前车架左、右可调悬架上的滑块沿直线导轨向末端移动,前车架左、右悬架高度升高,后车架悬架高度保持不变,底盘在凹型

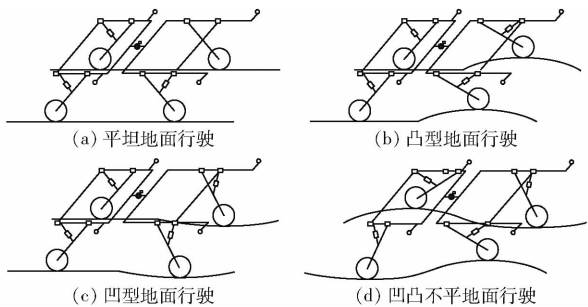


图 3 悬架调平原理图

Fig. 3 Suspension leveling schematic diagram

地面水平,状态如图 3c 所示;在凹凸不平地面上行驶时,根据提前检测到的地面信息,前、后车架的左、右悬架上各滑块分别沿直线导轨向末、首、首和末端移动,分别通过前、后车架的左、右悬架升高、降低、降低和升高,实现底盘水平,状态如图 3d 所示。

1.3 控制系统设计

控制系统基于微处理器 Arduino Mega 2560,硬件主要包括高度测距传感器、滑块测距传感器、底盘倾角状态传感器、丝杠步进电机等,控制系统结构如图 4 所示。

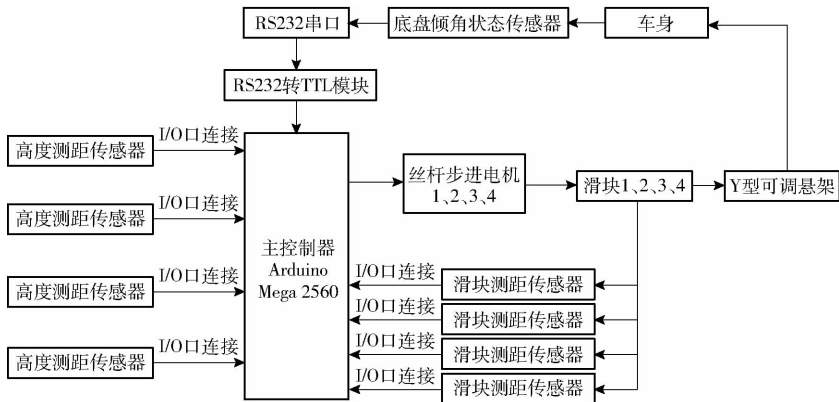


图 4 控制系统结构图

Fig. 4 Control system structure diagram

微处理器 Arduino Mega 2560 为控制系统核心部件,主要负责通信、调整机构调整量计算、传感器集成等。高度测距传感器和滑块测距传感器输出模拟量参数可以通过 I/O 口和微处理器直接相连。

高度测距传感器获取地面相对高度信息后,输入、并通过微处理器计算悬架所需调整量。滑块测距传感器实时监测滑块位置,输入、并通过微处理器计算滑块位移,最后通过控制丝杠步进电机驱动滑块移动到预定位置,完成悬架高度调整,实现底盘调平。底盘倾角状态传感器实时检测调平误差,并传输给微处理器,作为下个调整周期调整量的误差补偿量。

1.4 工作流程设计

预检测主动调平系统工作流程如图 5 所示。

2 调平参数分析

2.1 底盘悬架调整与预检测调平参数分析

j 时刻,底盘水平行驶,通过高度测距传感器获取车轮正前方地面的信息,根据各高度测距传感器检测的地面信息,得知 $j + T$ 时刻的悬架调整量,设每个高度测距传感器测量的地面相对高度为 $H_{j+T}^{(i)} (i = 1, 2, 3, 4)$ 。

以单个悬架为例,以可调悬架直线导轨末端与车架的铰接点 $A_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为坐标原点,建立平

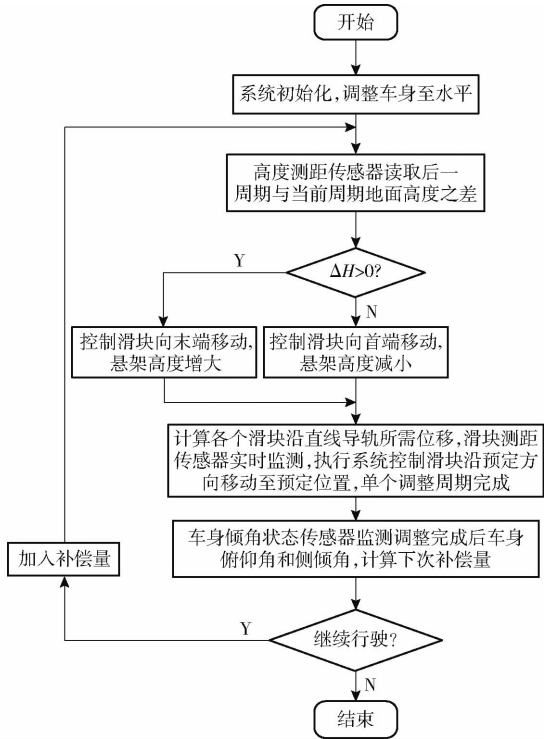


图 5 调平系统工作流程

Fig. 5 Leveling system workflow

面直角坐标系,如图 6 所示。分析 j 时刻 Y 型可调悬架的滑块位移 $S_j^{(i)} (i = 1, 2, 3, 4)$ 与悬架高度变化量 $\Delta H_j^{(i)} (i = 1, 2, 3, 4)$ 的函数关系。通过计算求出 $S_j^{(i)}$ 和 $\Delta H_j^{(i)}$ 之间的关系。假设轮胎为刚性,忽略其变形量,经相似三角形比例计算,则

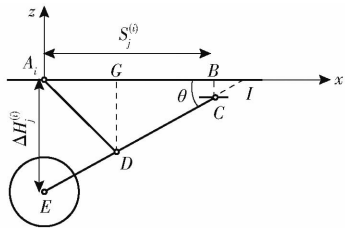


图 6 Y 型可调悬架位置调节关系图
Fig. 6 Adjustment relationship diagram

$$l_{BC}/l_{DG} = l_{CI}/(l_{CI} + l_{CD}) \tag{1}$$

$$l_{CI} = \frac{l_{BC}l_{CD}}{l_{DG} - l_{BC}} \tag{2}$$

$$\sin\theta = \frac{l_{BC}}{l_{CI}} = \frac{l_{DG} - l_{BC}}{l_{CD}} \tag{3}$$

可得 $\Delta H_j^{(i)} = l_{IE}\sin\theta = l_{DG} + l_{DE}\frac{l_{DG} - l_{BC}}{l_{CD}}$ (4)

由几何关系得

$$l_{DG} = \frac{\Delta H_j^{(i)}l_{CD} + l_{DE}l_{BC}}{l_{CD} + l_{DE}} \tag{5}$$

$$l_{AG} = \sqrt{l_{AD}^2 - l_{DG}^2} \tag{6}$$

$$l_{BG} = \sqrt{l_{CD}^2 - (l_{DG} - l_{BC})^2} \tag{7}$$

则 $S_j^{(i)} = \sqrt{l_{AD}^2 - \left(\frac{\Delta H_j^{(i)}l_{CD} + l_{DE}l_{BC}}{l_{CD} + l_{DE}}\right)^2} + \sqrt{l_{CD}^2 - \left(\frac{\Delta H_j^{(i)}l_{CD} + l_{DE}l_{BC}}{l_{CD} + l_{DE}} - l_{BC}\right)^2}$ (8)

根据式(8)可以推导 $j + T$ 时刻滑块沿直线导轨的位移与悬架高度变化量的关系为

$$S_{j+T}^{(i)} = \sqrt{l_{AD}^2 - \left(\frac{\Delta H_{j+T}^{(i)}l_{CD} + l_{DE}l_{BC}}{l_{CD} + l_{DE}}\right)^2} + \sqrt{l_{CD}^2 - \left(\frac{\Delta H_{j+T}^{(i)}l_{CD} + l_{DE}l_{BC}}{l_{CD} + l_{DE}} - l_{BC}\right)^2} \tag{9}$$

式中 l_{AD} ——杆 AD 段长度
 l_{DE} ——杆 DE 段长度
 l_{BC} ——杆 BC 段长度
 l_{CD} ——杆 CD 段长度
 θ ——支撑杆与直线导轨夹角

j 时刻通过 $F_1、F_2、F_3、F_4$ 点处的高度测距传感器,得出 $j + T$ 时刻地面相对高度信息 $H_{j+T}^{(i)}, H_{j+T}^{(i)} = \Delta H_{j+T}^{(i)} + r$, r 为轮胎半径。根据式(9),计算 $j + T$ 时刻底盘水平时,滑块应处的位置 $S_{j+T}^{(i)}$,在 j 时刻到 $j + T$ 时刻即调整周期 T 内,控制丝杠电机驱动滑块至 $S_{j+T}^{(i)}$ 位置,实现预检测调平。

2.2 底盘负载能力及调平速度分析

预检测主动调平底盘通过各悬架高度调节实现

调平时,通过对单个悬架进行受力分析,计算负载与调平速度的关系,受力如图 7 所示。

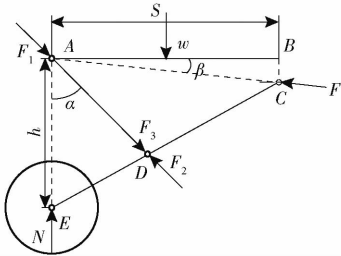


图 7 悬架受力分析图

Fig. 7 Suspension force analysis

设单个悬架质量与其所承载荷总质量为 w ,地面对车轮的支持力为 N 。 $F_1、F_2$ 为一对大小相等、方向相反、沿 AD 直线分别作用于 $A、D$ 点的平衡力,则

$$\cos\alpha = hl_{DE}/2$$

$$\tan\beta = l_{BC}/S$$

二力杆 AD 在 $A、D$ 点处分别受到的作用力为 $F_1、F_2$,大小相等,方向相反。长连杆 CE 在 D 点处受到的力 F_3 与 F_2 大小相等,方向相反,即

$$F_1 = F_2 = F_3$$

由长杆受力平衡得

$$F\cos\beta = F_3\sin\alpha$$

$$F\sin\beta + N = F_3\cos\alpha$$

得 $F_3 = \frac{Swg}{\frac{Sh}{2l_{DE}} - l_{BC}\sqrt{1 - \frac{h^2}{4l_{DE}^2}}}$

$$F = \frac{Swg\sqrt{1 - \frac{h^2}{4l_{DE}^2}}\arccos\left(\arctan\frac{l_{BC}}{S}\right)}{\frac{Sh}{2l_{DE}} - l_{BC}\sqrt{1 - \frac{h^2}{4l_{DE}^2}}}$$

式中 S ——导轨 AB 长度
 h ——导轨 AB 与点 E 距离
 α ——AD 与垂直方向夹角
 g ——重力加速度
 β —— F 与导轨 AB 之间夹角

对导轨 AB 和滑块 BC 单独进行受力分析,如图 8 所示。

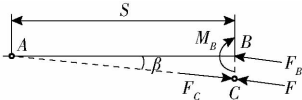


图 8 滑块受力分析图

Fig. 8 Slide force analysis

力 F 作用于 C 点,滑块 BC 在 C 点处受到的反作用力为 F_c ,所受扭矩为 M_B ,两者关系为

$$M_B = F_c l_{BC}\cos\beta$$

滑块受到水平拉力 F_{Bx} 为

$$F_{Bx} = \frac{Swg \sqrt{1 - \frac{h^2}{4l_{DE}^2}} \arccos \left(\arctan \frac{l_{BC}}{S} \right)}{\frac{Sh}{2l_{DE}} - l_{BC} \sqrt{1 - \frac{h^2}{4l_{DE}^2}}} \frac{S}{\sqrt{S^2 + l_{BC}^2}} = \frac{S^2 wg \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \arccos \left(\arctan \frac{l_{BC}}{S} \right)}{Sh \sqrt{S^2 + l_{BC}^2} - 2l_{DE} l_{BC} \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \sqrt{S^2 + l_{BC}^2}} \quad (10)$$

滚珠丝杆的驱动力经验公式为

$$F_s = \frac{2T_1}{d \tan(\varphi + \rho)} \quad (11)$$

式中 T_1 ——丝杆电机扭矩

d ——丝杆直径

φ ——螺纹升角

ρ ——当量摩擦角

联立式(10)、(11),滚珠丝杆驱动力等于滑块的水平拉力,得出单个悬架自身以及负载总质量 w 与丝杆电机扭矩 T_1 之间的关系为

$$w = \frac{2T_1 (Sh \sqrt{S^2 + l_{BC}^2} - 2l_{DE} l_{BC} \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \sqrt{S^2 + l_{BC}^2})}{d \tan(\varphi + \rho) g S^2 \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \arccos \left(\arctan \frac{l_{BC}}{S} \right)}$$

底盘负载质量 W_f 与丝杆电机扭矩 T_1 之间的关系为

$$W_f = 4w - m =$$

$$\frac{8T_1 (Sh \sqrt{S^2 + l_{BC}^2} - 2l_{DE} l_{BC} \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \sqrt{S^2 + l_{BC}^2})}{d \tan(\varphi + \rho) g S^2 \sqrt{4l_{DE}^2 - h^2} \arccos \left(\arctan \frac{l_{BC}}{S} \right)} - m \quad (12)$$

式中 m ——底盘质量

丝杆电机为步进电机,求出滑块的最大移动速度 v_2 与步进电机频率 f 之间的关系

$$v_2 = Ln = \frac{Lf\theta}{2\pi}$$

式中 L ——滚珠丝杆导程

n ——电机转速

f ——步进电机脉冲频率

θ ——步进电机步距角

设高度测距传感器与车轮中心正前方距离为 s_c ,车辆以速度 v_1 匀速运动,可得调整周期 T 为

$$T = s_c / v_1$$

单个调整周期 T 内滑块位移的最大距离 x 为

$$x = v_2 T = \frac{s_c L f \theta}{2\pi v_1}$$

式中 x ——底盘调整前、调整后滑块位置 $S_j^{(i)}$ 、 $S_{j+T}^{(i)}$ 的差值

根据式(8)、(9),求出调整前和调整后的悬架

高度变化量 $\Delta H_j^{(i)} (i = 1, 2, 3, 4)$ 、 $\Delta H_{j+T}^{(i)} (i = 1, 2, 3, 4)$,则二者之间的差值 H_t 为

$$H_t = \Delta H_{j+T}^{(i)} - \Delta H_j^{(i)}$$

底盘单个调整周期内的调平极限角 γ 为

$$\gamma = \arctan \frac{H_t}{s_c} \quad (13)$$

2.3 调平执行策略分析

为消除调平系统误差,通过底盘倾角状态传感器检测调平效果并作为反馈元件消除每个调整周期的误差,避免误差累积。

误差补偿步骤为:位于底盘中心点 O 的底盘倾角状态传感器实时监控每次调平结束后底盘的俯仰角与侧倾角,调整系统结合俯仰角与侧倾角,并根据点 $A_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 与点 O 的相对坐标,计算每个悬架的调整量,作为下个调整周期调整量的误差补偿量。

根据四点支撑平台调平原理^[23],采用“中心点”不动法计算误差补偿量,如图 9 所示。以点 O 为中心,建立动坐标系 $OXYZ$ 描述存在误差时的底盘平面 $A_1 A_2 A_3 A_4$ 、静坐标系 $OX'Y'Z'$ 描述水平时的底盘平面 $A'_1 A'_2 A'_3 A'_4$ 。设 $j+T$ 时刻调平后,底盘倾角状态传感器测得车身俯仰角 α_1 和侧倾角 β_1 。

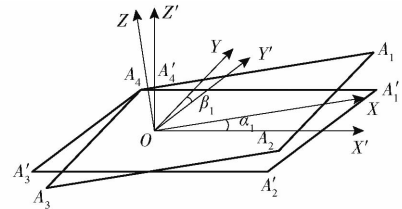


图 9 四点支撑平台坐标系旋转示意图

Fig. 9 Coordinate rotation diagram of platform with four points support

假设动坐标系先绕 X 轴旋转 β_1 ,再绕 Y 轴旋转 α_1 ,坐标转换矩阵为

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \sin\beta_1 \sin\alpha_1 & \sin\alpha_1 \cos\beta_1 \\ 0 & \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \\ -\sin\alpha_1 & \sin\beta_1 \cos\alpha_1 & \cos\beta_1 \cos\alpha_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

若动坐标系先绕 Y 轴旋转 β_1 ,再绕 X 轴旋转 α_1 ,坐标系转换矩阵为

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & 0 & \sin\alpha_1 \\ \sin\alpha_1 \sin\beta_1 & \cos\beta_1 & -\sin\beta_1 \cos\alpha_1 \\ -\sin\alpha_1 \cos\beta_1 & \sin\beta_1 & \cos\alpha_1 \cos\beta_1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

误差导致的俯仰角和侧倾角很小,故 $\sin\alpha_1 = \alpha_1$, $\sin\beta_1 = \beta_1$, $\sin\alpha_1 \sin\beta_1 = 0$, $\cos\alpha_1 = \cos\beta_1 = 1$,分别代入 T_1 和 T_2 得

$$T \approx T_1 \approx T_2 \approx \begin{bmatrix} 1 & 0 & \alpha_1 \\ 0 & 1 & \beta_1 \\ -\alpha_1 & -\beta_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

静坐标系内 $A'_i(X'_i, Y'_i, Z'_i)$ 与动坐标系内 $A_i(X_i, Y_i, Z_i)$ 关系为

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

点 A_i 的 Z 坐标误差调整值为

$$\Delta Z = Z - Z' = -\alpha_1 X'_i - \beta_1 Y'_i \quad (18)$$

3 试验

3.1 底盘样机参数

试制预检测主动调平底盘小比例样机,如图 10 所示。

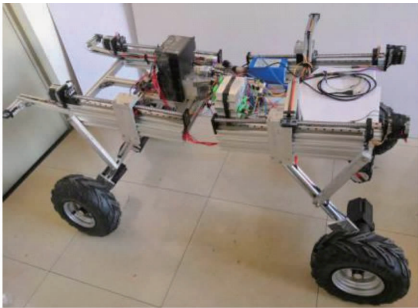


图 10 底盘样机实物图
Fig. 10 Prototype of chassis

样机尺寸为 1 m × 0.5 m × 0.6 m (长 × 宽 × 高), 车轮直径 0.3 m, 轴距 1.09 m, 轮距 0.58 m, 连杆长 0.483 m, 支撑杆长 0.72 m。直线导轨由滚珠丝杆组成,有效行程为 0.4 m,导程为 0.005 m,螺纹升角 7.11°。车架上安装 4 组 FLS40L40005C7 型带导轨丝杠的 57 步进电机,高度测距传感器安装在车轮中心正前方 0.3 m 处,4 个车轮由 4 个 86J1880-842 型带减速器的 86 步进电机单独驱动。底盘总质量为 80 kg,去除车轮和车轮步进电机质量后,底盘质量为 50 kg。

选定丘陵山区底盘常用行走速度 2、5 km/h,设离地间隙最低、调节难度最大时的状态为初始调节点,根据式(9)、(12)、(13)得到底盘负载 W_f 和单个调整周期内调平极限角 γ 的关系,如图 11 所示。

受限于所采用 57 步进电机、底盘小比例样机底盘最大负载为 130.41 kg(底盘质量的 2.6 倍)。由图 11 可知,给定底盘行走速度时,调平速度与负载成反比;行走速度为 2 km/h 时,单个调整周期内的最大调平极限角为 24°左右,行走速度为 5 km/h 时,单个调整周期内的最大调平极限角为 13°左右。考虑到国家禁止在 25°以上陡坡地开垦种植农作物,

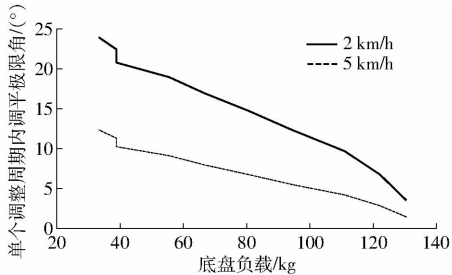


图 11 底盘负载和单个调整周期内调平极限角的关系
Fig. 11 Relationship between chassis load and reaction speed

不提倡在 15°以上陡坡地开垦种植农作物,因此调平速度与负载均满足要求,验证了调平方法的正确性与可行性。

高度测距传感器和滑块测距传感器均选择适应性强、价格便宜的超声波测距传感器。考虑到底盘倾角状态传感器作为反馈元件、测量精度要求较高,选择 SVT 626T 型双轴数字型倾角传感器,精度为 0.03°。底盘倾角状态传感器可通过 USB 和便携式计算机相连,含有一个电源接口和一个 RS232 串口可实现和微控制器通信,连续不断地将车身俯仰角、侧倾角信息传输到便携式计算机中进行记录。

3.2 试验验证

为验证预检测主动调平方法的可行性及预检测主动调平底盘的调平性能,在室外试验田进行不同地形条件下的试验,试验均在 2019 年 6 月进行。

考虑到底盘车轮直径为 300 mm、农用底盘作业地形复杂多样、并参照实际比例关系,人工堆砌图 12 所示幅值为 70 mm、波长为 600 mm 的坡形路面进行试验。



图 12 试验地形
Fig. 12 Experimental terrain

试验中调平底盘行走方向分别与地面波形呈 90°、60°通过,样机速度为 5 km/h,如图 13 所示。分别对比调平底盘不调平和预检测主动调平 2 种情况下俯仰角和侧倾角变化,以检验调平效果。



图 13 地面调平试验
Fig. 13 Leveling tests on ground

试验中俯仰角与侧倾角的变化曲线如图 14 所

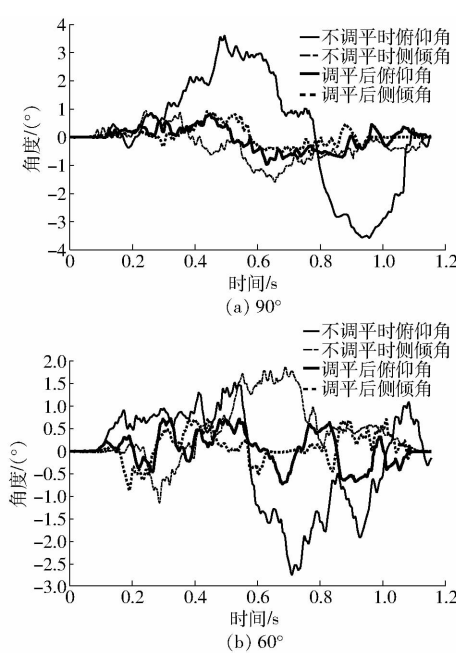


图 14 波形地面调平试验结果

Fig. 14 Roll angle and pitch angle during test of chassis prototype

示。由图 14a 可知，底盘不调平时，俯仰角完全随地形变化，波动范围比较大，最大俯仰角为 3.51° ；预检测主动调平时俯仰角在 0° 附近波动且在 90% 以上的时间内保持在 $\pm 0.5^{\circ}$ 以内，侧倾角不受地形影响，在 0° 范围内波动。由图 14b 可知，底盘不调平时最大俯仰角为 2.51° ，最大侧倾角为 2.82° ；

预检测主动调平时俯仰角、侧倾角都在 0° 附近波动且在 90% 以上的时间内保持在 $\pm 0.5^{\circ}$ 以内波动，具有较高的精度，验证了预检测主动调平方法的可行性和理论分析计算的正确性。预检测调平试验数据的波动主要来源于底盘制造误差与传感器测量误差。

4 结论

(1) 提出了预检测主动调平方法，该方法可提前获取底盘行驶前方某一特定距离处的地面信息，根据已获得地面信息和底盘当前行驶状态，分别计算底盘行驶至检测点处底盘保持水平时各悬架将要执行的调节量，在底盘倾斜的同时，通过各独立悬架高度调节实现底盘实时动态主动调平。

(2) 设计了一种采用 Y 型可调悬架作为调平机构的农用车预检测主动调平底盘，分析了底盘悬架调整与预检测调平参数、承载能力与调平速度及调平执行策略，结果表明，可通过 Y 型可调悬架的高度调节实现底盘调平。

(3) 崎岖不平地面行走试验结果表明，在预检测主动调平行走过程中，底盘可在精度 0.5° 范围内实现动态调平，验证了预检测主动调平方法以及丘陵山地农用预检测主动调平底盘设计方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] 宋建武,刘恒新. 加快突破丘陵山区农业机械化的发展瓶颈[J]. 中国农机化, 2010,31(2):16-19.
SONG Jianwu, LIU Hengxin. Speed up breaking bottlenecks of the hilly agricultural mechanization development[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2010,31(2):16-19. (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. Development situation and countermeasures of agricultural mechanization in hilly and mountain areas[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(5):1-4. (in Chinese)
- [3] BOONE J C. Leveling system for hillside combines; US 3233909A[P]. 1966-02-08.
- [4] 高焕文,李问盈,李洪文. 我国农业机械化的跨世纪展望[J]. 农业工程学报, 2000,16(2):9-12.
GAO Huanwen, LI Wenying, LI Hongwen. Prospects of China agricultural mechanization facing the 21st century[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(2):9-12. (in Chinese)
- [5] 耿端阳,张铁中,罗辉,等. 我国农业机械发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2004,35(4):208-210.
GEN Duanyang, ZHANG Tiezhong, LUO Hui, et al. Analysis on the development trend of agricultural machinery in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(4):208-210. (in Chinese)
- [6] LI Z, MITSUOKA M, INOUE E, et al. Parameter sensitivity for tractor lateral stability against phase I overturn on random road surfaces[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150:10-23.
- [7] MASHADI B, NASROLAHI H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(6):299-311.
- [8] LEE S S, OH K S, HWANG H, et al. Automatic leveling control system for combine[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2000, 33(29):255-258.
- [9] LEE S S, MUN J H, LEE K S. Hydraulic level control system of combine body[J]. Dentição Permanente, 2004, 29(5):713-736.
- [10] 周浩,胡炼,罗锡文,等. 旋耕机自动调平系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(增刊):117-123.
ZHOU Hao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling system of rotary tiller[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):117-123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s018&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.018. (in

Chinese)

- [11] 陈君梅,赵祚喜,陈嘉琪,等. 水田激光平地机非线性水平控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(7):79-84.
CHEN Junmei,ZHAO Zuoxi,CHEN Jiaqi,et al. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(7):79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140713&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.013. (in Chinese)
- [12] 胡炼,罗锡文,赵祚喜,等. 超声波传感器评定水田激光平地机水平控制系统性[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):73-76.
HU Lian,LUO Xiwen,ZHAO Zuoxi,et al. Evaluation of leveling performance for laser-controlled leveling machine in paddy field based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(Supp.):73-76. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 张季琴,杨福增,刘美丽,等. 山地微耕机液压差高装置的设计[J]. 拖拉机与农用运输车,2011(3):92-93.
ZHANG Jiqin, YANG Fuzeng, LIU Meili, et al. Design of an hydraulic difference in elevation equipment used in mountainous micro-tiller[J]. Tractor & Farm Transporter, 2011(3):92-93. (in Chinese)
- [15] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis levelling for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(3-4):161-171.
- [16] POTAU X, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Comparison of different bogie configurations for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2011, 48(1):75-84.
- [17] 刘平义,彭凤娟,李海涛,等. 丘陵山区农用自适应调平底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):42-47.
LIU Pingyi, PENG Fengjuan, LI Haitao, et al. Design and experiment of adaptive leveling chassis for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):42-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.005. (in Chinese)
- [18] 刘平义,王春燕,李海涛,等. 丘陵山区农用仿形行走动态调平底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):74-81.
LIU Pingyi, WANG Chunyan, LI Haitao, et al. Terrain adaptive and dynamic leveling agricultural chassis for hilly area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):74-81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.010. (in Chinese)
- [19] WANG Z, YANG J, LIU P,et al. Development of an agricultural vehicle levelling system based on rapid active levelling[J]. Biosystems Engineering,2019,186(1):337-348.
- [20] 谭冠政,徐雄,肖宏峰. 工业机器人实时高精度路径跟踪与轨迹规划[J]. 中南大学学报(自然科学版),2005,36(1):102-107.
TAN Guanzheng, XU Xiong, XIAO Hongfeng. Real-time and accurate hand path tracking and joint trajectory planning for industrial robots[J]. Journal of South University(Science and Technology), 2005, 36(1):102-107. (in Chinese)
- [21] 黎运宇,李明. 我国农业机械化新技术应用与展望[J]. 中国农机化学报,2014,35(3):296-301.
LI Yunyu, LI Ming. Application of novel technologies in agricultural mechanization and its new directions[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(3):296-301. (in Chinese)
- [22] 王涛,杨福增,王元杰. 山地拖拉机车身自动调平控制系统的设计[J]. 农机化研究,2014,36(7):232-235.
WANG Tao, YANG Fuzeng, WANG Yuanjie. Design of body automatic leveling control system of hillside tractor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7):232-235. (in Chinese)
- [23] 赵静一,杨宇静,康绍鹏,等. 自行式液压平板车四点支撑“面追逐式”调平策略的研究与应用[J]. 机床与液压,2015,43(15):57-60.
ZHAO Jingyi, YANG Yujing, KANG Shaopeng, et al. Research and application of four-point support “flat chasing style” leveling strategy on self-propelled hydraulic transporter [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015, 43(15):57-60. (in Chinese)