

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.046

基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统设计与试验

郭庆贺 赵丁选

(燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 针对刚性支腿调平装置灵活性差、调平耗时长等问题,设计了一种基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统,该系统主要包括三轴六轮车辆底盘、惯性测量单元、控制系统和液压系统。通过悬架互联方式将悬挂作动油缸对车载稳定平台的六点支撑结构等效转换为三点支撑结构,采用“中心不动”调平算法对三支撑点高度进行调节,从而实现车载稳定平台的调平控制。为验证所设计调平系统的可行性,试制了车载稳定平台样机,并进行了驻车调平和行车调平试验。驻车调平试验包括基于本文设计的调平系统调平试验和基于样机自带的刚性支腿调平装置的调平试验,行车调平试验包括过单边桥调平试验和过双边桥调平试验。结果表明,在驻车调平试验中,采用本文设计的基于主动悬挂的调平系统进行调平,平台俯仰角由2.5°调至水平状态约需5.5 s,调平精度为0.1°,相比刚性支腿调平装置,在调平速度和调平精度方面具有明显优势;在行车调平试验中,过单边桥调平时,平台侧倾角最大误差为0.58°,过双边桥调平时,平台俯仰角最大误差为0.55°,行车调平过程中平台倾角变化误差较小,可基本满足实际使用要求。所设计的基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统不仅能保证车载稳定平台驻车调平时的调平速度和调平精度,而且能实现在行车过程中边行走、边调平的功能。

关键词: 车载稳定平台; 主动悬挂; 调平系统; 试验

中图分类号: U463.94; U463.33+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)10-0403-08 OSID: 

Design and Experiment of Vehicle-borne Stabilized Platform Leveling System Based on Active Suspension

GUO Qinghe ZHAO Dingxuan

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor flexibility and long leveling time of the current rigid outrigger leveling device, the vehicle-borne stabilized platform leveling system was designed based on active suspension. The system mainly included three-axle six-wheel vehicle chassis, inertial measurement unit, control system and hydraulic system. By the means of suspension interconnection, the six points support structure of the suspension cylinder to the vehicle platform was equivalent to three points support structure, and the height of the three support points were adjusted by the center fixed leveling algorithm, so as to realize the leveling control of the vehicle-borne stabilized platform. In order to verify the feasibility of the leveling system, the prototype was trial manufactured and experimented. The experiment included parking leveling experiment and driving leveling experiment. The parking leveling experiment included two kinds of experiment, one was based on the designed leveling system and the other was based on the original rigid outrigger leveling device of the prototype. The experimental results of the parking leveling showed that during parking leveling, it took about 5.5 s to adjust the platform pitch angle from 2.5° to horizontal state and the leveling process was smooth, and the leveling accuracy was 0.1°. Compared with the rigid outriggers, the designed leveling system had obvious advantages in leveling speed and leveling accuracy during the parking leveling. The driving leveling experiment also included two kinds of experiment: unilateral bridge leveling and bilateral bridge leveling. The experimental results of the driving leveling showed that when passing the unilateral bridge for leveling, the maximum platform

inclination error was 0.58° and when passing the bilateral bridge for leveling, the maximum platform pitch error was 0.55° . The platform inclination error was small during the driving leveling process which can basically meet the requirements of actual job. It was proved that the vehicle-borne stabilized platform leveling system based on active suspension not only can ensure the leveling speed and leveling accuracy during the parking leveling, but also can realize the function of leveling while driving.

Key words: vehicle-borne stabilized platform; active suspension; leveling system; experiment

0 引言

目前,轮式起重机、混凝土搅拌车和消防车等工程机械、救援装备的车载稳定平台调平系统多采用刚性支腿调平装置^[1-6]。刚性支腿调平装置结构简单、易操作、易控制,但调平时需将其先伸出、再调平,调平耗时较长。在执行救援任务时,调平时间过长,则会滞缓消防车救援进程,造成生命和财产损失。在工程建设中,要求轮式起重机能在吊重过程中行走,若遇路面不平,则会造成车载平台及起重臂架侧倾,导致起吊重物大幅摆动,严重时会发生碰撞或倾翻,导致事故发生,而刚性支腿仅能在驻车调平时使用,无法满足边行走、边调平功能的需要。

国外对调平系统的研究相对较早。HOEHN等^[7]研究了一种应用于耕作机具的调平系统,在作业过程中可实时调节耕作机具与地面的高度,有利于保持恒定的土壤切削深度;KIM等^[8]研究了一种控制挖掘机机架自动调平的系统和方法,可使上机架在挖掘机静止或移动中均能保持水平;PIJUAN等^[9]设计了一种使车辆底盘高度可调的悬挂机构,该机构使车辆具有较强的越障能力,但对底盘调平精度没有过高要求;XIE等^[10]研制了一种二自由度高度控制器,将其应用于联合收获机割台高度控制,可实现收割过程中割台高度的实时调节。目前,国内对行车过程中调平系统的研究多集中于农机具的调平^[11-14],对车载稳定平台调平系统的研究大多集中在驻车刚性支腿调平系统^[15-18],鲜见对行车过程中保持车载稳定平台水平的调平系统研究。本文基于主动悬挂技术设计一种调平系统,以期使车载稳定平台在驻车或行车时均能保持水平状态。

1 调平系统结构与工作原理

1.1 系统结构组成

基于三轴六轮车辆底盘进行车载稳定平台调平系统的设计,如图1所示。该系统主要由车体、车载稳定平台、惯性测量单元(Inertial measurement unit, IMU)、控制系统、液压系统、悬挂作动油缸以及与悬挂作动油缸一一对应的位移传感器等组成。

1.2 工作原理

车载稳定平台与车体固连;惯性测量装置固定

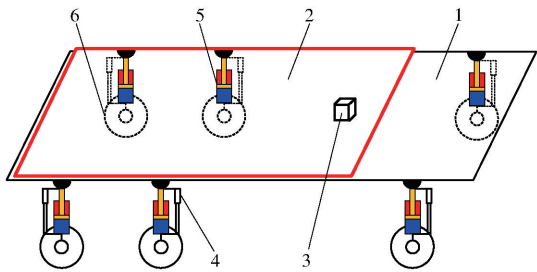


图1 车载稳定平台调平系统结构示意图
Fig.1 Structure diagram of vehicle-borne stabilized platform leveling system

1. 车体 2. 车载稳定平台 3. IMU 4. 位移传感器 5. 悬挂作动油缸 6. 车轮

在车载稳定平台上,用于测量车载稳定平台的俯仰角和侧倾角;车轮通过悬挂作动油缸连接于车体下方;位移传感器用于测量悬挂作动油缸的伸缩行程;电控系统分别与惯性测量单元和位移传感器通信连接,用于接收信号和输出控制信号;液压系统用于接收来自电控系统的控制信号并控制悬挂作动油缸动作。

车辆行驶过程中,车体姿态因路面不平发生改变,导致车载稳定平台不再处于水平状态,产生一定的俯仰角和侧倾角,电控系统读取惯性测量单元测得的俯仰角和侧倾角,并依此计算使车载稳定平台恢复水平所需的各悬挂作动油缸伸缩量,并将伸缩量控制信号输出至液压系统控制各悬挂作动油缸伸缩,最终使车载稳定平台恢复至原水平状态。车载稳定平台调平系统工作原理如图2所示。

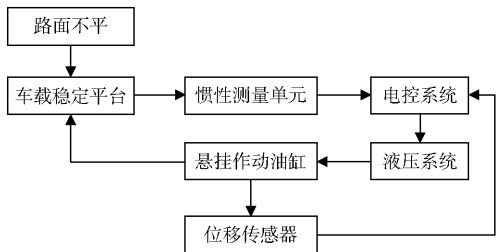


图2 车载稳定平台调平系统工作原理图
Fig.2 Schematic of vehicle-borne stabilized platform leveling system

2 调平系统设计

2.1 调平算法设计

2.1.1 平台支撑结构

按支撑点数量划分,平台支撑结构可分为三点

支撑、四点支撑或多点支撑^[19-21]。四点或多点支撑因存在冗余约束易产生“虚支撑点”,可导致平台发生倾覆,且支点数量越多,控制过程越复杂。由数学定理知,空间中不共线的 3 点可以确定一个唯一的平面,即三点支撑不存在冗余约束,不会产生虚支撑点。因此,采用三点支撑作为车载稳定平台支撑结构,并在此基础上设计调平算法。

2.1.2 调平算法

目前,采用刚性支腿结构对车载稳定平台进行调平的算法主要分为:基于位置误差的调平算法和基于角度误差的调平算法。其中,基于位置误差的调平算法主要包括“追逐式”调平算法、“中心不动”调平算法和“设定点不动”调平算法^[22]。“中心不动”调平算法是指在调节车载稳定平台各支腿时,以支撑点围成的几何图形中心的高度为基准,调节各支腿的伸缩,使各支撑点与几何中心处于同一水平高度,从而达到恢复平台至水平状态的目的。以三点支撑结构为例,“中心不动”调平算法的调节过程如图 3 所示。相比其他算法,采用“中心不动”^[23]调平算法调平时支腿伸缩距离最短,且调节精度高、调节速度快,因此,本文采用“中心不动”调平算法对车载稳定平台进行调平控制。

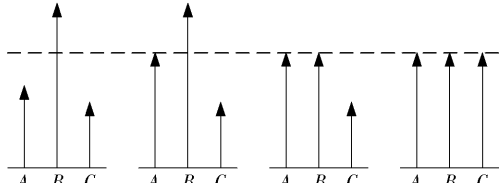


图 3 “中心不动”调平过程示意图

Fig. 3 Schematic of leveling process based on geometric center

依据“中心不动”调平算法对车载稳定平台进行调平首先对当前车载稳定平台进行姿态分析,然后根据当前姿态信息计算平台恢复至水平状态所需的悬挂油缸伸缩量。设车载稳定平台初始时刻为水平状态,此时车载稳定平台所在平面与大地(海平面)平行。设车载稳定平台处于水平状态时,三支撑点 A、B、C 所围成的等腰三角形的外心为坐标原点 O,以过原点 O 且垂直于大地水平面(海平面)向上的方向为 Z 轴正方向,以车辆前进的正前方为 X 轴正方向,以车辆前进方向的左侧方向为 Y 轴正方向,建立水平坐标系 OXYZ,如图 4 所示。水平坐标系 OXYZ 符合右手定则,且无论车辆是在行进中或是静止状态,水平面 XOY 相对大地(海平面)均始终保持水平不变。

当车载稳定平台因路面不平发生倾斜时,其支撑点在水平坐标系 OXYZ 中的坐标位置也将发生改

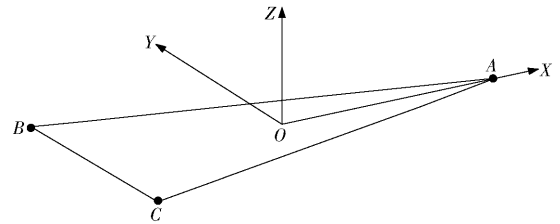


图 4 水平坐标系

Fig. 4 Horizontal coordinate system

变,如图 5 所示。设车载稳定平台倾斜后支撑点的新坐标点为 A_s 、 B_s 、 C_s ,则其所确定的平面 $A_s B_s C_s$ 将不再保持水平。设其与水平面 ABC 在 Y 轴方向的夹角(侧倾角)为 α ,在 X 轴方向的夹角(俯仰角)为 β ,由空间几何理论知识可知,倾斜面 $A_s B_s C_s$ 可由水平面 ABC 以原点 O 为旋转中心,先绕 X 轴旋转 α ,再绕 Y 轴旋转 β 得到。

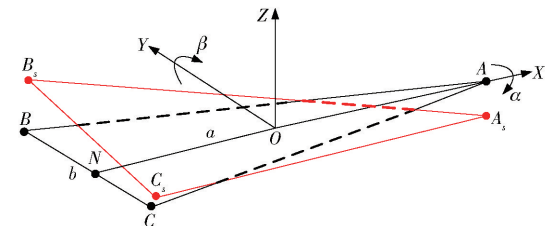


图 5 车载稳定平台姿态示意图

Fig. 5 Attitude schematic of vehicle-borne stabilized platform

如图 5 所示, N 为线段 BC 的中点,设线段 AN 长为 a , BC 长为 b ,支撑点 A、B、C 距原点 O 的距离为 r ,由几何关系知 $r = (4a^2 + b^2)/(8a)$ 。设车载稳定平台处于水平状态时各支撑点 A、B、C 的坐标矩阵分别为 P_A 、 P_B 、 P_C ,设 $M = [P_A \ P_B \ P_C]$,根据图 5 可得

$$M = \begin{bmatrix} r & r-a & r-a \\ 0 & b & -b \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设车载稳定平台倾斜时各支撑点 A_s 、 B_s 、 C_s 的坐标矩阵分别为 P_{A_s} 、 P_{B_s} 、 P_{C_s} ,设 $M_s = [P_{A_s} \ P_{B_s} \ P_{C_s}]$,根据位移矩阵法^[24]可知 M_s 和 M 关系为

$$M_s = RM \quad (2)$$

其中

$$R = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\alpha\sin\beta & \sin\beta\cos\alpha \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ -\sin\beta & \sin\alpha\cos\beta & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 R ——空间旋转矩阵

由式(2)、(3)可得

$$M_s = \begin{bmatrix} r\cos\beta & (r-a)\cos\beta + b\sin\alpha\sin\beta & (r-a)\cos\beta - b\sin\beta\cos\alpha \\ 0 & b\cos\alpha & -b\cos\alpha \\ -r\sin\beta & -(r-a)\sin\beta + b\sin\alpha\cos\beta & -(r-a)\sin\beta - b\sin\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

通常情况下, α 和 β 较小, 可以由极限定理近似认为 $\sin\alpha \approx \alpha$, $\sin\beta \approx \beta$, $\cos\alpha \approx \cos\beta \approx 1$, 因此, 式(4)可以简化为

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} r & r-a+b\alpha\beta & r-a-b\beta \\ 0 & b & -b \\ -r\beta & (a-r+b\alpha)\beta & (a-r)\beta-b\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可得, 车载稳定平台在发生倾斜前后, 支撑点 A_s 、 B_s 、 C_s 相对 A 、 B 、 C 在 Z 轴方向的变化量为

$$\begin{cases} \Delta A = -r\beta \\ \Delta B = (a-r+b\alpha)\beta \\ \Delta C = (a-r)\beta-b\alpha \end{cases} \quad (6)$$

因此, 当车载稳定平台相对水平面 XOY 发生倾斜产生侧倾角 α 和俯仰角 β 时, 依据“中心不动”调平算法, 欲使平台恢复至水平状态, 由式(1)、(6)可得对应各支撑点 A_s 、 B_s 、 C_s 的悬挂作动油缸伸缩量分别为

$$\begin{cases} l_{A_s} = -\Delta A \\ l_{B_s} = -\Delta B \\ l_{C_s} = -\Delta C \end{cases} \quad (7)$$

调控时, 由电控系统判断 l_{A_s} 、 l_{B_s} 和 l_{C_s} 各值的正负性, 若值为正, 则系统调控悬挂作动缸活塞杆伸长, 相反, 则调控悬挂作动缸活塞杆缩短。

2.2 液压系统设计

如图6所示, 液压系统包括液压泵、溢流阀、蓄能器、三位四通电液伺服阀和悬挂作动油缸等。发动机变速箱输出轴通过取力器驱动液压泵, 为整机液压系统提供动力; 溢流阀采用直动式溢流阀, 用于保护液压系统, 防止系统过载; 蓄能器采用隔膜式蓄能器, 用于吸收压力冲击和用作液压系统辅助动力源; 三位四通电液伺服阀采用航天钧和科技有限公司生产的 SFD234 型电反馈射流管式伺服阀, 伺服阀根据输入电信号对油液的流量和方向进行控制, 进而实现对悬挂作动油缸的伺服控制。本文采用三点支撑结构对车载稳定平台进行姿态调控, 但本文所用车辆底盘为三轴六轮, 拥有6个支撑点, 因此需对悬挂作动油缸进行适当耦连, 将六点支撑转换为三点支撑。根据油气平衡悬架^[25-26]相关结构与特性可知, 当一对悬挂油缸的大腔与大腔相连, 小腔与小腔相连时, 原有悬挂油缸对车体的两支撑点可等效转换为一个虚拟支撑点, 该虚拟支撑点位于原两支撑点连线的中间位置。本文所采用的三轴六轮车辆, 其6个悬挂作动油缸的结构参数完全相同, 因此可将6个悬挂作动油缸划分为3组, 前轴左右两侧悬挂作动油缸为第1组, 中轴和后轴左侧两悬挂作

动油缸为第2组, 右侧两悬挂作动油缸为第3组。如图7所示, 组内两悬挂油缸的大腔与大腔相连, 小腔与小腔相连, 由此可将支撑点1和支撑点2等效转换为虚拟支撑点A; 支撑点3和支撑点5等效转换为虚拟支撑点B; 支撑点4和支撑点6等效转换为虚拟支撑点C。

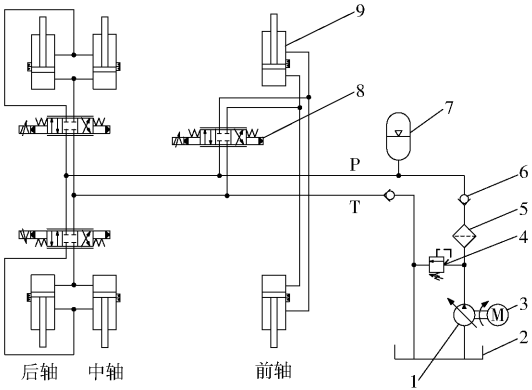


图6 液压系统原理图

Fig. 6 Schematic of hydraulic system

1. 液压泵 2. 油箱 3. 发动机 4. 溢流阀 5. 过滤器 6. 单向
阀 7. 蓄能器 8. 三位四通电液伺服阀 9. 悬挂作动油缸

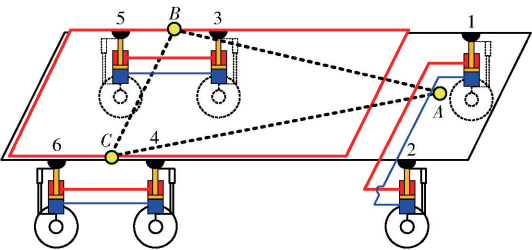


图7 支撑点等效转换示意图

Fig. 7 Schematic of support point equivalent transform

对虚拟支撑点高度的控制通过控制各组内两悬挂作动油缸活塞杆的平均伸缩量来实现。由于3组悬挂作动油缸结构和连通形式完全相同, 因此只取其中1组悬挂作动油缸为例进行说明, 其余同理。以第1组悬挂作动油缸(前轴左右两侧悬挂作动油缸)为例, 设定该组内两悬挂作动油缸行程中位为活塞杆位移零点, 活塞杆初始位置在零点位置, x_1 和 x_2 分别为两悬挂作动油缸活塞杆位移, 活塞杆伸出时 x_1 和 x_2 均为正值, 缩回时 x_1 和 x_2 均为负值, 两活塞杆平均伸缩量为 $x_A = (x_1 + x_2)/2$, 当车载稳定平台相对水平面 XOY 发生倾斜产生侧倾角 α 和俯仰角 β 时, 对虚拟支撑点 A_s 的高度控制量为 l_{A_s} , 此时电控系统将以 x_A 作为虚拟支撑点 A_s 的位移反馈量, 通过三位四通电液伺服阀调控悬挂作动油缸活塞杆的伸缩, 使虚拟支撑点 A_s 的最终伸缩量为 l_{A_s} 。

2.3 控制系统设计

车载稳定平台的调平控制系统为闭环系统,

如图 8(图中 α_0 和 β_0 分别为车载稳定平台目标侧倾角和俯仰角, α 和 β 分别为 IMU 测得的车载稳定平台实际侧倾角和俯仰角) 所示。IMU 测得的侧倾角 α 和俯仰角 β 信号经滤波和 A/D 转换后与设定值进行比较求偏差, 主控制单元中的悬挂作动油缸位移解算模块根据输入的角度偏差信号进

行油缸位移解算, 解算所得值与位移传感器测得的位移进行比较求偏差, 偏差信号经 D/A 转换并经伺服放大器放大后到达电液伺服阀, 电液伺服阀根据输入的控制量信号控制悬挂作动油缸产生相应的位移, 进而调节车载稳定平台恢复水平状态。

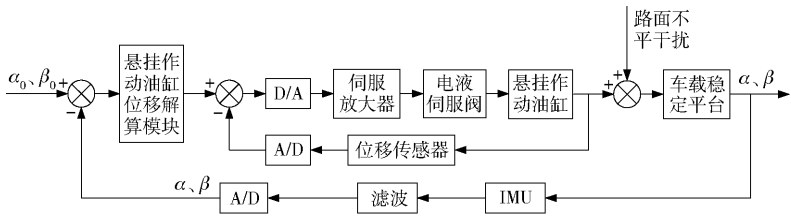


图 8 车载稳定平台调平系统控制原理图

Fig. 8 Principle diagram of vehicle-borne stabilized platform control system

2.3.1 硬件设计

作为车载稳定平台调平控制系统的核心部件, 工作过程中主控单元需要对传递的各种信号进行实时处理决策, 以实现悬挂作动油缸的精确控制, 所以要求其具有良好的反应速度、抗干扰和稳定性。选用盛博科技嵌入式计算机有限公司生产的 SCM9022 型 PC/104 主板, 其基于 Intel Atom N455/D525 处理器的超小型嵌入式核心模块, 板载 DDR3/2GB 内存, 1.8 GHz, 双核, AT 模式下 +5 V 供电, 支持 VGA + LVDS 双显示, 具有体积小、低功耗, 恶劣环境下可靠性高等优点。数据采集与输出采用盛博科技嵌入式计算机有限公司生产的 SysExpandModule/ADT882 - AT 型采集卡。ADT882 - AT 型采集卡是基于 PC/104 的扩展卡, 提供 32 个 16 位精度和软件可编程输入量程的模拟量输入通道, 配合 FIFO 操作, 可达 200 kHz 的采样速度, 其通过 PC/104 总线与 SCM9022 型主板通信连接。惯性测量单元采用荷兰 Xsens 公司生产的 MTi 300 - AHRS 型 IMU, 其是一款基于卡尔曼滤波融合算法的高精度姿态角测量传感器, 其角度传感精度为 0.3°。位移传感器采用美国 MTS 公司生产的 MH100 型磁致伸缩位移传感器, 其可在较为恶劣的工业环境下使用而不会产生损耗。伺服放大器采用自制放大器。

2.3.2 软件设计

控制系统的核心部分是软件, 软件系统性能将直接影响车载稳定平台的调平速度和精度。采用程序执行效率较高的 C 语言在 Visual C + + 6.0 环境下进行控制软件的开发。车载稳定平台控制系统软件主要由两部分组成, 分别是完成系统初始化、故障检测与通信接口控制等功能的主循环程序部分和调平算法程序部分。主程序流程图如图 9 所示。程序

启动后, 首先进行系统初始化, 检测系统各设备通信连接是否正常, 若无设备及通信连接故障问题, 则对 IMU 进行初始化, 初始化完成后对 IMU 和位移传感器进行数据采集并载入数据至缓冲区, 悬挂作动油缸位移解算模块读取缓冲区数据并解算, 解算完成后发送悬挂作动油缸位移控制指令至伺服驱动器。在控制指令发送完成后, 继续读取缓冲区数据并进行解算, 更新控制指令。

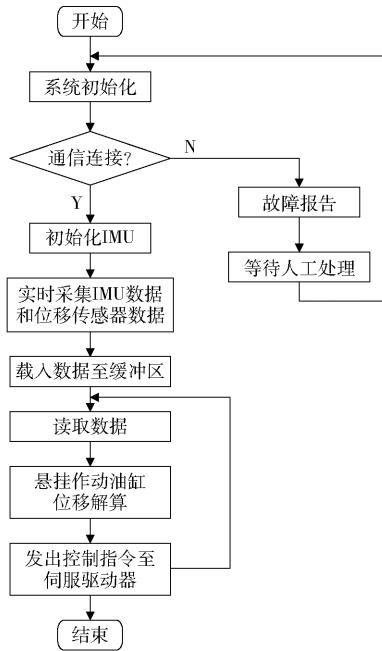


图 9 程序流程图

Fig. 9 Flowchart of program

3 试验

3.1 试验设备与器材

为验证本文设计的基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统的可行性, 试制了车载稳定平台样机, 如图 10 所示。试验所需器材还包括自制高台 (图 11) 和单边桥 (图 12)。高台高 $h_1 = 0.21$ m; 单边

桥长 $l=9\text{ m}$,高 $h_2=0.1\text{ m}$ 。试验地点为河北省特种运载装备重点实验室,试验场地为水泥路面,路面基本水平,试验时间为2019年1月12日至4月14日。



图 10 试验样机

Fig. 10 Experiment prototype

1. IMU 2. 三位四通电液伺服阀 3. 悬挂作动油缸 4. 位移传感器 5. 电控柜

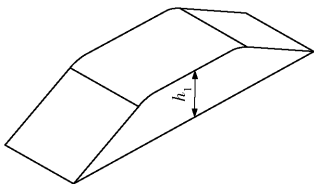


图 11 高台

Fig. 11 High platform

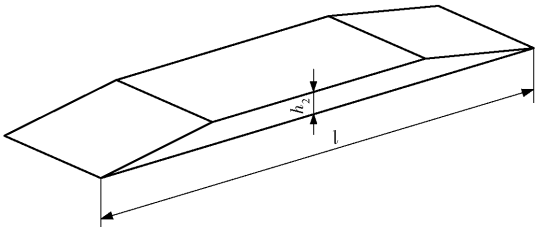


图 12 单边桥

Fig. 12 Unilateral bridge

3.2 试验内容

试验分为驻车调平和行车调平两组试验。

3.2.1 驻车调平试验

采用本文设计的基于主动悬挂的调平系统(简称主动悬挂调平)和样车自带的刚性支腿调平装置(简称刚性支腿调平)进行驻车调平对比试验,试验现场如图13所示。主动悬挂调平,在主动悬挂调平程序关闭状态下开动样车,使其前轴左右两轮分别置于左右两高台之上,驻车静止,随后启动调平控制程序。刚性支腿调平,样车自带的刚性支腿调平方式为人工手动调平。试验时,开动样车,使其前轴左右两轮分别置于左右两高台之上,驻车静止,然后通过观察水平仪的状态操作相应按钮对各支腿进行调节,直至车载稳定平台水平。

3.2.2 行车调平试验

行车调平试验采用过单边桥调平和过双边桥调



图 13 驻车调平试验现场

Fig. 13 Parking leveling experiment site

平两组试验方案。两组试验方案中均选择1挡(约2.3 km/h)车速行驶。

过单边桥试验方案:启动主动悬挂调平控制程序,开动样车,只让一侧车轮通过单边桥,另一侧车轮依旧行驶在水泥路面上,记录平台侧倾角变化情况。关闭主动悬挂调平控制程序,以同样的速度和方式通过单边桥,记录平台侧倾角变化情况。过单边桥调平试验方案主要用于测定平台样机通过单边桥时车身侧倾角的变化情况,试验场景如图14a所示。

过双边桥试验方案:根据轮距对称放置两套单边桥组成双边桥,启动主动悬挂调平控制程序后,开动样车通过双边桥,记录平台俯仰角变化情况。关闭主动悬挂调平控制程序,以同样的速度和方式通过双边桥,记录平台俯仰角变化情况。过双边桥调平试验方案主要用于测定平台样机通过双边桥时车身俯仰角的变化情况,试验场景如图14b所示。



(a) 过单边桥

(b) 过双边桥

图 14 行车调平试验现场

Fig. 14 Driving leveling experiment site

3.3 试验结果与分析

驻车调平试验结果如图15所示。当样车前轴左右两轮分别置于左右两高台之上,驻车静止,此时车载稳定平台俯仰角约为 2.5° ,相当于将整车置于 2.5° 纵坡路面上。由图15a可知,在主动悬挂调平方式下,平台俯仰角由 2.5° 调至水平状态需约5.5 s,调平精度为 0.1° ,调平过程平稳;由图15b可知,在刚性支腿手动调平方式下,平台俯仰角由 2.5° 调至水平状态需约35 s,调平精度为 0.3° ,调平

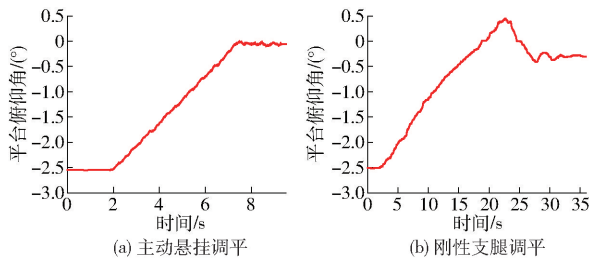
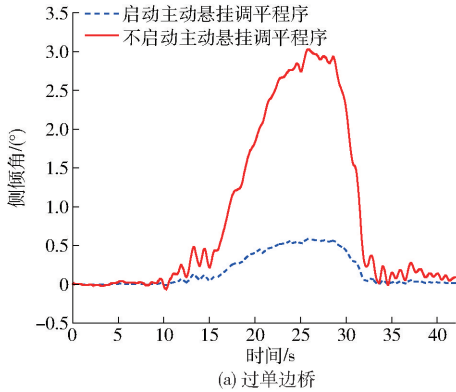


图 15 驻车调平试验结果

Fig. 15 Results of parking leveling experiment

过程中平台俯仰角波动较大。相比刚性支腿调平装置,本文设计的基于主动悬挂的调平系统在调平速度和调平精度方面均具有明显优势。

行车调平试验结果如图 16 所示。由图 16a 可知,在不启动主动悬挂调平控制程序时,样车由水泥路面至完全通过单边桥所产生的最大侧倾角为 3° ,而启动主动悬挂调平控制程序后,样车由水泥路面至完全通过单边桥,侧倾角最大误差为



0.58° ,平均绝对误差为 0.19° ,均方根误差为 0.27° ,平台可基本保持水平;由图 16b 可知,在不启动主动悬挂调平控制程序时,样车由水泥路面至完全通过双边桥产生的最大俯仰角为 1.56° ,而启动主动悬挂调平控制程序后,样车由水泥路面至完全通过双边桥,其俯仰角最大误差为 0.55° ,平均绝对误差为 0.15° ,均方根误差为 0.2° ,平台同样可基本保持水平。

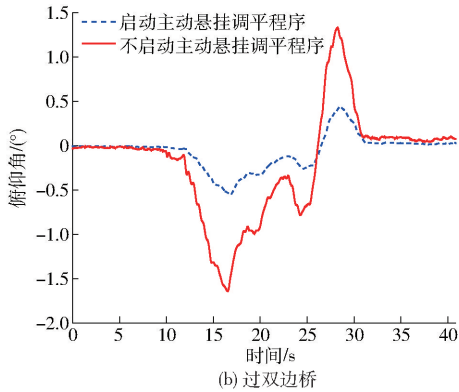


图 16 行车调平试验结果

Fig. 16 Results of driving leveling experiment

驻车调平和行车调平试验结果表明,本文设计的基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统无论在驻车或行车中均能使车载稳定平台保持较好的水平度。由文献[1-4]可知,轮式起重机、云梯消防车及混凝土搅拌机等工程机械设备对车载稳定平台的调平精度要求一般在 0.5° 以内,本文设计的调平系统驻车调平精度达 0.1° ,可完全满足上述设备的实际作业要求;行车调平时,最大调平误差在 $0.55^{\circ} \sim 0.58^{\circ}$ 范围内,可基本满足上述工程机械设备的实际作业使用要求。

4 结论

(1)在三轴六轮车辆底盘基础上,设计了一种

基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统。该系统通过悬架互联方式将平台六点支撑结构等效转换为三点支撑结构,采用“中心不动”调平算法对三支撑点高度进行调节,从而实现了车载稳定平台的调平控制。

(2)在驻车调平试验中,采用本文设计的调平系统,平台俯仰角由 2.5° 调至水平状态约需 5.5 s ,调平精度为 0.1° ,调平过程平稳,可满足实际使用要求;在行车调平试验中,过单边桥调平时,平台侧倾角最大误差为 0.58° ,过双边桥调平时,平台俯仰角最大误差为 0.55° ,行车调平过程中平台侧倾角和俯仰角变化误差均较小,可基本满足实际使用要求。

参 考 文 献

[1] 肖飞,张之善,王顺. 工程机械支腿自动调平的研究[J]. 液压与气动,2013(12):47-51.
XIAO Fei, ZHANG Zhishan, WANG Shun. The research of automatic leveling of construction machinery outriggers[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2013(12):47-51. (in Chinese)

[2] 辜玉良,董铁军,丁少伟,等. 一种泵车支腿自动调平控制方法[J]. 科技与企业,2012(13):315-316.
GU Yuliang, DONG Tiejun, DING Shaowei, et al. A kind of automatic leveling control method of pump truck legs[J]. Technology and Enterprise, 2012(13):315-316. (in Chinese)

[3] 罗郑裳棋,肖宁,谢智聪. 自密实混凝土搅拌车中的多种技术[J]. 建设机械技术与管理,2017,30(11):73-75.
LUOZHENG Shangqi, XIAO Ning, XIE Zhicong. Multiple techniques used in SCC vehicle[J]. Construction Machinery Technology & Management, 2017,30(11):73-75. (in Chinese)

[4] 何世涛,欧阳清,鲁付杰,等. 消防云梯车自动调平系统及调控策略研究[J]. 机械与电子,2016,34(12):8-10,15.
HE Shitao, OUYANG Qing, LU Fujie, et al. Study on automatic leveling system and control strategy of aerial ladder truck[J]. Machinery & Electronics, 2016,34(12):8-10,15. (in Chinese)

[5] 安徽柳工起重机有限公司. 汽车起重机支腿工况检测装置及支腿工况识别检测方法:201811499125.8[P]. 2018-12-08.

[6] 解小琴. 车载平台液压控制调平系统的组成及其故障分析[J]. 科技风,2018(22):149.
XIE Xiaolin. Composition and fault analysis of hydraulic control leveling system of vehicle platform[J]. Technology Wind, 2018(22):149. (in Chinese)

- [7] HOEHN K W, TOMPSON W L. Remotely adjustable disk leveling system: US4809786[P]. 1989-03-07.
- [8] KIM J S, LEE C S, KIM I W. System and method for controlling automatic leveling of heavy equipment: US20090085311A1[P]. 2009-04-02.
- [9] PIJUAN J, COMELLAS M, NOGUES M, et al. Active bogies and chassis leveling for a vehicle operating in rough terrain[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(3-4): 161-171.
- [10] XIE Y M, ALLEYNE A. Two degree of freedom control synthesis with applications to agricultural systems[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2014, 136(5): 051006.
- [11] 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)
- [12] 舒鑫, 蒋蘋, 胡文武, 等. 高地隙植保机底盘调平系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 321-326.
SHU Xin, JIANG Ping, HU Wenwu, et al. Design and test of the chassis leveling system for the high ground gap plant protection machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(3): 321-326. (in Chinese)
- [13] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 381-388. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190742&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.042. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 娄华威, 杜春江, 卜德岭, 等. 雷达天线车液压自动调平系统设计与仿真研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(19): 92-95, 124.
LOU Huawei, DU Chunjiang, BU Deling, et al. Study on design and simulation of hydraulic automatic leveling system for radar antenna truck[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(19): 92-95, 124. (in Chinese)
- [16] 李志民, 黄辰. 基于 PLC 的车载自动调平系统设计[J]. 物联网技术, 2017, 7(4): 108-109.
LI Zhimin, HUANG Chen. Design of auto leveling system based on PLC[J]. Internet of Things Technologies, 2017, 7(4): 108-109. (in Chinese)
- [17] 朱鹏程, 吴庆和, 陈吉安, 等. 基于 PLC 与 PID 自整定算法的高精度调平系统设计[J]. 机床与液压, 2019, 47(17): 133-136.
ZHU Pengcheng, WU Qinghe, CHEN Ji'an, et al. Design of high-precision leveling system based on PLC and PID self-tuning algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019, 47(17): 133-136. (in Chinese)
- [18] 刘寒霜. 基于复杂环境下车载平台调平控制系统的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
LIU Hanshuang. Research on vehicle platform leveling control system based on complex environment[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 胡春辉. 基于三点调平的农田激光清平地设计与研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2011.
HU Chunhui. The design and research of farmland laser leveling machine based on three-point leveling[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [20] 孙利生. 一种大跨距四点支撑液压自动调平系统[J]. 液压与气动, 2004(7): 29-30.
SUN Lisheng. A hydraulic horizontal regulation system with four long span cylinders[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(7): 29-30. (in Chinese)
- [21] 盛英, 仇原鹰. 六点支撑液压式平台自动调平系统[J]. 液压与气动, 1999(4): 26-28.
SHENG Ying, QIU Yuanying. Six point support hydraulic platform automatic leveling system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 1999(4): 26-28. (in Chinese)
- [22] 卢朝双. 高精度、机电式车载雷达平台调平控制系统的研发[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
LU Chaoshuang. Research and development of leveling control system for high precision and electromechanical vehicle borne radar platform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [23] 王冰. 基于神经网络的车载平台自动调平控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
WANG Bing. Research on auto leveling control system of vehicle platform based on neural network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] FALLAH M S, BHAT R, XIE W F. Optimized control of semi-active suspension systems using H_{∞} robust control theory and current signal estimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(4): 767-778.
- [25] 过学迅, 吴涛. 多轴油气平衡悬架振动性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 30-32.
GUO Xuexun, WU Tao. Research on vibration of multi-spindled-hydropneumatic balanced suspension[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2001, 29(1): 30-32. (in Chinese)
- [26] 王勋, 陈思忠. 双气室油气平衡悬架的设计[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(5): 475-478, 507.
WANG Xun, CHEN Sizhong. Design of vehicle twin-accumulator hydro-pneumatic balanced suspension[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(5): 475-478, 507. (in Chinese)