doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.013

自走式宽幅作业平台自适应调平系统研究

徐志刚[1]　闫洪峰[1,2]　李蓉萱[2,3]　李法镰[2,3]　邓育荣[1]　陈　度[4]

（1. 北京金轮坤天特种机械有限公司，北京 100083；2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司，北京 100083；
3. 农业装备技术全国重点实验室，北京 100083；4. 中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：为了提升自走式宽幅作业平台行走作业时的稳定性和安全性，以自走式宽幅作业平台为研究对象，设计了基于四点液压主动悬架的自适应全向调平系统。采用LUDV负载敏感技术以提高液压系统控制性能，实现四点式悬架液压系统中多负载并行工况下的同步控制。采用多传感器实时感知作业平台姿态，结合“追中调平”和“防虚腿”的控制策略，采用抗饱和积分的双环PID算法计算并输出控制信号，并与悬架油缸保护逻辑算法和防虚腿逻辑算法的输出结果进行校对，最终以控制悬架油缸实现作业平台姿态的实时全向调整。为测试LUDV负载敏感技术在四点液压主动悬架中的有效性，在AMESim中建立了悬架系统仿真模型并开展了试验。试验结果表明，在同开度不同负载的情况下，各柱塞缸最大行程偏差为19.51 mm，最大偏差率为6.27%。为说明各执行器的流量与负载无关，在不同负载且开度控制信号比例为1:1.35:1.71:2.07的条件下，柱塞缸的运动行程比例偏差为1:1.35:1.71:1.92，说明各执行器的流量与负载无关且同步性良好，证明LUDV负载敏感技术对四点液压主动悬架的有效性。在实车试验中，静态试验结果表明系统可以将车身倾角收敛在0.5°以内，动态试验结果表明自适应调平系统在平台横行和纵行的状态下分别使车身最大倾角降低58.0%和55.4%，并避免了虚腿现象发生，能够有效提高作业时的稳定性与安全性。

关键词：自走式宽幅作业平台；自适应调平；主动悬架；AMESim仿真；抗饱和积分PID

中图分类号：S232.3　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0116-09

Adaptive Leveling System for Self-propelled Wide-width Working Platform

XU Zhigang[1]　YAN Hongfeng[1,2]　LI Rongxuan[2,3]　LI Falian[2,3]　DENG Yurong[1]　CHEN Du[4]

(1. *Beijing Jinlun Kuntian Special Machinery Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*
4. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To enhance the stability and safety of the self-propelled wide-span operation platform during its walking operation, an adaptive omnidirectional leveling system based on a four-point hydraulic active suspension was designed, using the self-propelled platform as the research subject. The system employs LUDV load-sensing technology to improve hydraulic control performance and achieve synchronous control under multi-load parallel conditions in the four-point suspension hydraulic system. A multi-sensor setup was used to detect the platform′s posture in real-time, and through the integration of "following leveling" and "anti-false leg" control strategies, a dual-loop PID algorithm with anti-saturation integration was employed to compute and output control signals. These signals were cross-validated with the results from the suspension cylinder protection logic and anti-false leg logic algorithms to realize real-time omnidirectional posture adjustment of the platform by controlling the suspension cylinders. To validate the effectiveness of the LUDV load-sensing technology in the four-point hydraulic active suspension, a simulation model of the suspension system was developed in AMESim, followed by experimental testing. The test results indicated that under

收稿日期：2024－07－22　修回日期：2024－09－28

基金项目：国机集团科研专项(ZDZX2022-1)

作者简介：徐志刚(2000—)，男，硕士生，主要从事特种行走车辆研究，E-mail: xzg20000510@163.com

通信作者：闫洪峰(1979—)，男，研究员，博士，主要从事机场地面保障车辆和特种行走车辆研究，E-mail: hongfeng 216@163.com

varying loads with identical openings, the maximum stroke deviation among the cylinders was 19.51 mm, with a maximum deviation rate of 6.27%. Furthermore, to demonstrate that the flow rate of each actuator was independent of load size, tests under load ratios of 1∶1.35∶1.71∶2.07 with proportional control signals showed a motion stroke ratio deviation of 1∶1.35∶1.71∶1.92, confirming both the independence of flow from load size and good synchronization. This verified the effectiveness of the LUDV load-sensing technology for the four-point hydraulic active suspension. In real vehicle tests, the static test results showed that the system could converge the vehicle′s body tilt angle within 0.5°. Dynamic tests revealed that the adaptive leveling system reduced the maximum body tilt angle by 58.0% during lateral movements and 55.4% during longitudinal movements, while preventing the occurrence of false leg phenomena, effectively improving the platform′s stability and safety during operation.

Key words: self-propelled wide-width working platform; adaptive leveling; active suspension; AMESim simulation; anti-saturation integral PID

0　引言

农业机械化的发展有效缓解了由于农村劳动力短缺对农业生产带来的负面影响，提高了土地产出率、资源利用率和劳动生产率，为粮食安全和农业农村现代化提供了有力支撑[1-3]。其中，农业机械自动化调平技术能够显著降低操作人员的工作强度，提高作业效率与质量，保障作业安全[4-6]。

国内自走式农业机械自动调平技术主要集中于丘陵山地拖拉机等小型化农机装备[7-8]。常见调平机构形式有差高式[9]、摆动桥式[10]和扭腰式[11]，但以上机构均主要实现横向调平而缺乏纵向调平，为此王忠山等[12]研发了一种四轮独立液压调平山地拖拉机，四轮可实现独立升降具有全向调平功能。孙泽宇等[13]设计了一种基于“三层车架”的履带式丘陵山地作业机，实现了全向调平功能。国外针对大型农业非道路作业底盘主动调平技术的相关研究和应用较多。DENIS 等[14]提出了基于车辆动力学模型的自适应观测器以评估葡萄收获机的侧翻风险，通过四点独立液压悬架实现了自适应调平功能并保持了负载均匀分布。DETTU 等[15]提出了基于系统辨识的灰盒模型控制方法运用于大型联合收获机的自动调平系统。美国 Hillco Technologies 公司生产的自适应调平系统可以无损安装在 Deere 的 S 系列和凯斯的 IH 系列大型联合收获机上，用户可以自行选择加装而不必对底盘进行大范围改动，通用性较好。大型农业非道路作业底盘作业功率大，作业效率更高，因此加快研究适用于大型作业底盘的自适应调平系统十分重要。

国内目前针对四点悬架的大型自走式农业装备调平系统的相关研究较为薄弱[16]，并且大多针对特定底盘结构和单一场景下的应用，而自走式宽幅作业平台能够覆盖种、管、收等多环节场景，具有可变幅宽的特点，基于自走式宽幅作业平台设计自适应调平系统可以使农机调平系统从单场景应用覆盖至多场景应用，从专用型走向模块化，有效推动农机自适应调平系统的普及和运用[17]。本文基于自走式宽幅作业平台的四点式主动悬架，设计自适应调平系统搭载自适应调平系统，实现底盘的全向调平，以期提高宽幅平台作业时的稳定性与安全性。

1　调平系统总体结构及原理分析

1.1　自走式宽幅作业平台整机结构

自走式宽幅作业平台为四点液压悬架结构的履带车辆，整车采用静液压驱动，车架为U形结构，U形口内挂载模块化作业机具，车架内置动力仓端。通过加装连接仓可快速实现作业幅宽的调整，通过调整履带朝向切换横行状态的作业模式和纵行状态的转场模式。图1为自走式宽幅作业平台横行与纵行下总体状态图。表1为自走式宽幅作业平台的技术参数。图2为自走式宽幅平台的总体设计方案。

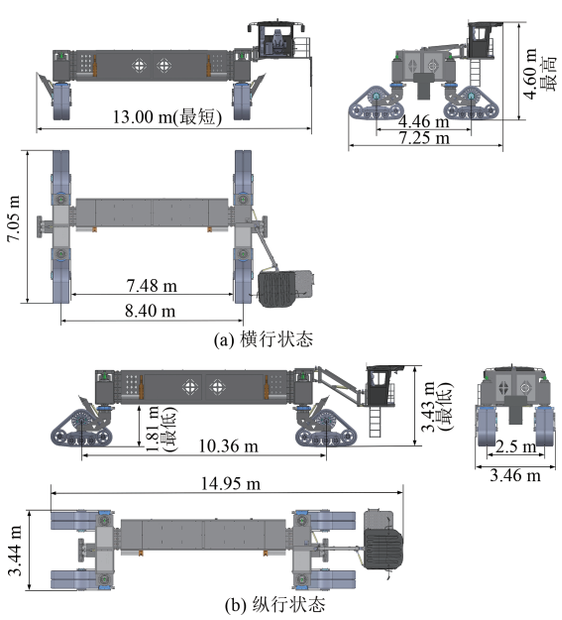

图1　宽幅平台状态总体图

Fig. 1　General view of wide platform state

表 1 宽幅平台技术参数

Tab. 1 Wide platform technical parameters

参数	数值/类型
整机尺寸(长×宽×高)	14 950×3 440×3 430(纵行)
/(mm×mm×mm)	13 000×7 250×4 600(横行)
作业宽度/行	≥12(标准玉米行距 60 cm)
驱动形式	静液压驱动
转向模式	前轮转向/后轮转向/向心/蟹行
总功率/kW	356
最小地隙/mm	1 805
最大地隙/mm	2 305

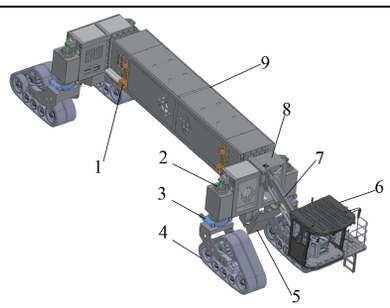

图 2 宽幅作业平台总体方案图

Fig. 2 General plan diagram of wide-span operation platform

1. 机具模块挂接装置 2. 悬架装置 3. 转向装置 4. 行走装置 5. 前后支撑装置 6. 驾驶室 7. 驾驶室姿态调整装置 8. 横向梁架 9. 纵向梁架

纵向梁架和横向梁架共同组成了U形架,U形口内侧设置有机具模块挂接装置。调整履带朝向来切换状态则是通过前后支撑装置与悬架装置协同工作实现,自适应调平系统也是基于悬架装置实现。此外还有行走装置、转向装置和驾驶室及其姿态调整装置等。

1.2 调平系统组成

调平系统由执行机构、感知决策机构和操纵交互机构组成。其中执行机构包括主动悬架(由导向筒和双作用柱塞杆组成)、液压阀组、负载敏感泵;感知决策机构包括双轴动态倾角传感器、柱塞缸压力传感器、位置传感器、底盘控制ECU和DTU数据记录仪;操纵机构包括驾驶室操纵手柄与面板、远程遥控器和HMI触摸屏。当系统工作时,由ECU通过多传感器感知宽幅作业平台的姿态,ECU根据控制逻辑与算法计算出四点悬架的控制信号并发送至执行机构的液压阀组中,通过液压阀组控制悬架的升降使得各悬架达到预期位置以实现调平功能。操纵人员可以实时从HMI触摸屏上监测系统运行状态。图3为调平系统硬件架构。

1.3 调平原理

宽幅作业平台为四点支承结构,对平台的调平实质上可以简化为对一个平面的调平[18]。以宽幅作业平台纵行状态下为基准建立车身坐标系,原点O为各悬架与车身连接点构成的矩形平面的几何中心点,前进方向为X轴正方向,前进方向左侧为Y轴正方向,垂直向上为Z轴正方向,旋转角度方向遵循右手坐标系。当平台处于完全水平条件下则有水平参考坐标系$OX_0Y_0Z_0$,当平台处于任意倾斜状态时,则有车身坐标系$OX_1Y_1Z_1$。那么$OX_1Y_1Z_1$则可看作由$OX_0Y_0Z_0$在空间中旋转得来,其中X轴与水平面夹角为β,Y轴与水平面夹角为α,如图4所示。

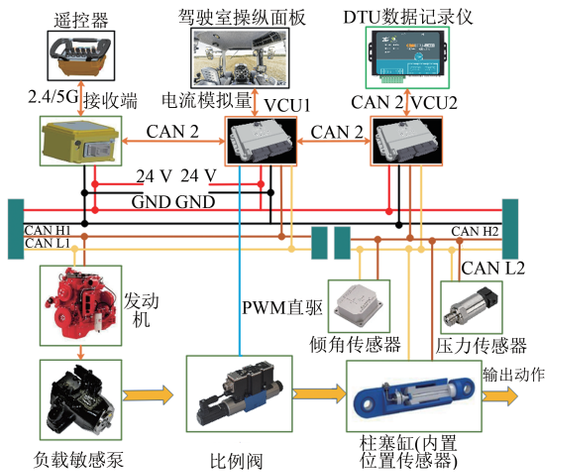

图 3 调平系统硬件架构图

Fig. 3 Leveling system hardware architecture diagram

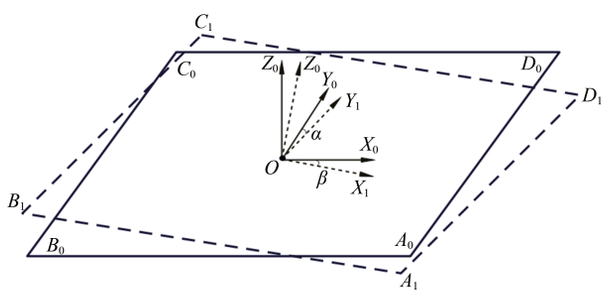

图 4 简化平台坐标系

Fig. 4 Simplified platform coordinate system

在空间坐标系中,绕X轴旋转角α的变换矩阵为

$$\boldsymbol{R}(X,\alpha)=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&\cos\alpha&-\sin\alpha\\0&\sin\alpha&\cos\alpha\end{bmatrix} \tag{1}$$

绕Y轴旋转角β的变换矩阵为

$$\boldsymbol{R}(Y,\beta)=\begin{bmatrix}\cos\beta&0&\sin\beta\\0&1&0\\-\sin\beta&0&\cos\beta\end{bmatrix} \tag{2}$$

那么可得倾斜状态下的车身坐标系相对于水平参考坐标系在空间中变换矩阵

$$\boldsymbol{T}_1=\boldsymbol{R}(X,\alpha)\boldsymbol{R}(Y,\beta)=\begin{bmatrix}\cos\beta&0&\sin\beta\\\sin\alpha\sin\beta&\cos\alpha&-\sin\alpha\cos\beta\\-\sin\beta\cos\alpha&\sin\alpha&\cos\alpha\cos\beta\end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{T}_2=\boldsymbol{R}(Y,\beta)\boldsymbol{R}(X,\alpha)=\begin{bmatrix}\cos\beta&\sin\alpha\sin\beta&\sin\beta\cos\alpha\\0&\cos\alpha&-\sin\alpha\\-\sin\beta&\sin\alpha\cos\beta&\cos\alpha\cos\beta\end{bmatrix} \tag{4}$$

α与β都较小,这种情况下可以忽略高阶小量并进行等价无穷小替换,所以近似为$\sin\beta=\beta$,$\sin\alpha=\alpha$,$\cos\alpha=\cos\beta=1$,可以得到最终的变换矩阵

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{T}_1=\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}1 & 0 & \beta\\ 0 & 1 & -\alpha\\ -\beta & \alpha & 1\end{bmatrix} \tag{5}$$

设平面$A_0B_0C_0D_0$上任一点P_0的位置为(x_0,y_0,z_0)，与之对应的旋转变换后平面$A_1B_1C_1D_1$上的点P_1位置为(x_1,y_1,z_1)。即

$$\begin{bmatrix}x_1 & y_1 & z_1\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{T}\begin{bmatrix}x_0 & y_0 & z_0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

可得到

$$z_1=-\beta x_0+\alpha y_0+z_0 \tag{7}$$

只需要测量出α和β就可以计算出z_1。据此可以计算出倾斜状态和水平姿态下各悬架支撑点的空间高度差，即调平过程中悬架需要的行程。

如图5所示，当同一侧的悬架升至最大行程，而另一侧的悬架降至最小行程时，便可得到最大的平台倾角α_{max}。计算方法为

$$\alpha_{\max}=\arctan\frac{h_{\max}-h_{\min}}{B} \tag{8}$$

式中　h_{max}——悬架最大行程

h_{min}——悬架最小行程

B——悬架中心点间距

以横行模式为基准，根据平台的基本参数可以计算得出平台的最大可调侧倾角为3.4°，最大可调俯仰角为11.3°。当平台在田间作业时因地形起伏造成的俯仰角和侧倾角小于最大可调侧倾角和最大可调俯仰角时，自适应调平系统可以将平台调整至水平。若超出最大允许范围，则可以相应减小侧倾角和俯仰角。

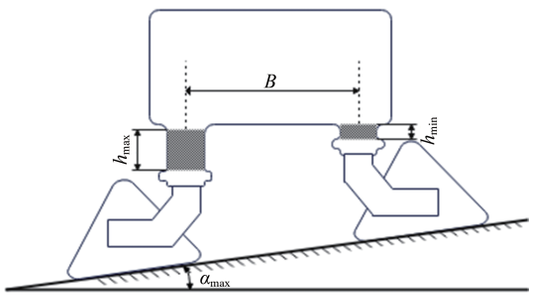

图5　坡面调平状态示意图

Fig. 5　Slope leveling state diagram

2　液压系统设计及仿真模型

2.1　主动悬架液压系统

从液压系统的整体构成来看，本系统为非对称阀控液压缸系统，系统内包含4个柱塞缸，柱塞缸为主动悬架的作动器。液压原理图如图6所示。

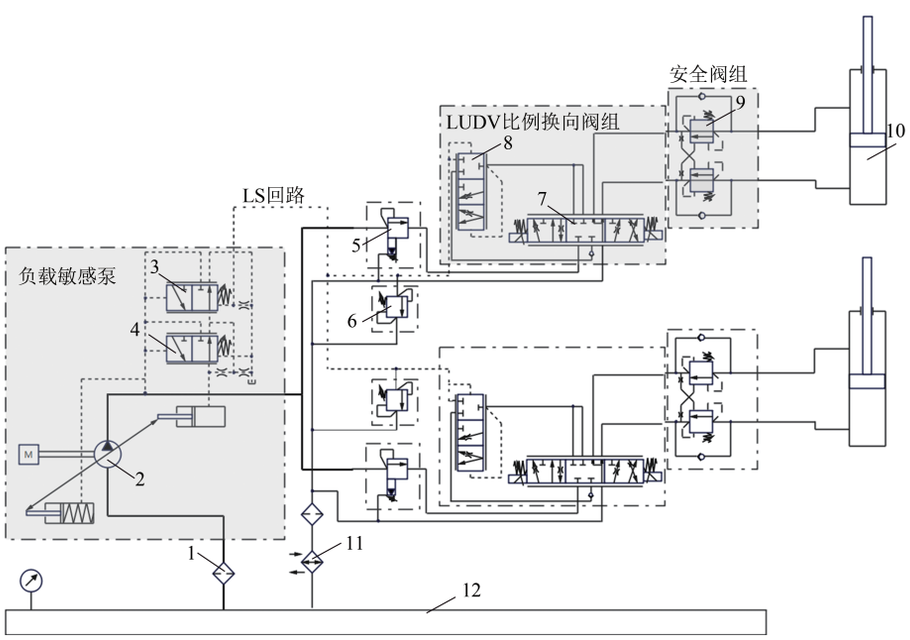

图6　悬架液压原理图

Fig. 6　Suspension hydraulic schematic diagram

1. 滤清器　2. 变量泵　3. 流量控制器　4. 压力控制器　5. 先导溢流阀　6. 溢流阀　7. 比例换向阀　8. 压力补偿阀　9. 安全阀　10. 非对称单作用柱塞缸　11. 散热器　12. 油箱

四点液压主动悬架的动力源为1台负载敏感泵，负载敏感泵由发动机驱动。油液从负载敏感泵输出后经过一些辅助元件到达LUDV阀，再由LUDV阀经由安全阀到达柱塞缸的腔室中。因此通过控制LUDV阀的开度就可实现对柱塞缸的控制，LUDV阀开度由底盘控制ECU发出的电流信号控制。从液压缸的数量来看，系统为多负载系统，在传统液压系统中在多负载并行作业的情况下会发生流量分配不均的问题[19-20]，例如同时驱动多个马达或油缸，执行器的流量分配会受到后端负载差异的影响，往往很难保证在不同负载条件下对所有执行器进行均等且独立的流量供给，导致液压系统的效率和精确度受限[21-23]。而宽幅作业平台作为搭载模块化机具的底盘且为重型农机车辆，面临的作业场景复杂多样，载质量和轴荷负载变化范围较大，因此流量分配不

均问题在宽幅作业平台的液压系统中影响较为显著，在液压系统设计时需要考虑流量分配问题所带来的影响[21]。

在液压系统的流量控制过程中，主阀通过改变节流口过流断面面积来调节液阻，进而控制通过阀口的流量，实现对执行元件运动速度的精确调节。流量通过节流口的特性可以表示为[24]

$$Q_T = C_T A_T (\Delta p_T)^m \tag{9}$$

式中 Q_T——通过节流口的流量

C_T——流量系数

A_T——节流口的过流断面面积

Δp_T——主阀口前后压差

m——节流口指数，与节流口的形状有关

根据流量特性公式(9)可知，在确定主阀类型的情况下，通过阀口的流量与主阀口的开度和阀口前后的压差存在相关性。主阀口的开度由控制信号确定，而主阀前后的压差受泵的供油压力、负载压力以及通过阀口的流量等多种因素的影响。如果能够保持阀口前后的压差为一个恒定值，则通过主阀的流量与主阀开口之间的关系近似为线性，这将极大有利于提高控制系统的性能。故本文主动悬架液压系统采用力乐士的负载敏感泵和LUDV阀共同构成LUDV负载敏感系统，提高了液压系统的效率，实现了执行器输入流量由阀的开度控制[25]。而阀的开度由输入信号控制，以电流控制信号为例，则在主动悬架液压系统中流量特性可表示为

$$Q = K\frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \tag{10}$$

式中 K——流量系数

Q——单位时间内悬架输入流量

I——控制系统给阀的控制电流

$I_{\min}$——比例阀死区电流

$I_{\max}$——阀最大电流

2.2 仿真模型建立

为了验证液压系统在多负载并行情况下的实际控制性能，本文基于AMESim构建主动悬架的液压系统模型。

图7为搭建好的完整的主动悬架液压系统的模型，在模型中设置有8个控制输入信号，分别为4个柱塞缸负载信号和4个主阀开度控制信号。通过这些控制信号，可以详细分析主动悬架子系统在不同负载和控制条件下的响应来验证LUDV负载敏感技术在主动悬架子系统中的有效性。

3 调平控制系统设计

3.1 控制系统硬件设计

国内研发的农机装备调平控制系统的主控通常采用单片机，单片机具有成本低、功耗低和部署方便等特点，但抗环境干扰能力差，在恶劣工况下稳定性较差。因此底盘控制ECU选用工程机械专用的C8工业控制器，C8工业控制器自带CAN通道和模拟电流量通道采集传感器信号，PWM输出通道直接驱动比例电磁阀，并且能适应宽幅作业平台恶劣的工作环境。倾角传感器选用迈科传感的LVG726T型动态高精度双轴倾角传感器，通过CANopen协议与ECU通信，压力传感器与位移传感器均使用模拟电流量与ECU通信，图8为控制系统硬件结构。

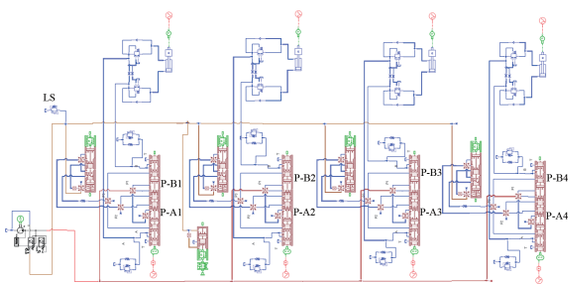

图7 悬架液压系统仿真模型

Fig. 7 Suspension hydraulic system simulation model

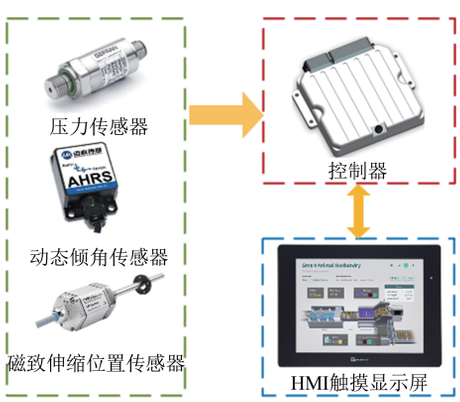

图8 控制系统硬件结构图

Fig. 8 Control system hardware diagram

3.2 控制系统软件设计

3.2.1 开发环境

图9为控制系统的开发环境，控制系统的软件环境为CODESYS 3.5，通过USB接口传输给USB转串口模块，最后通过RS232串口写入控制器中。在控制器上电运行后，通过上位机软件CODESYS监控程序运行状态和变量值，同时可以方便地对程序进行调试修改。

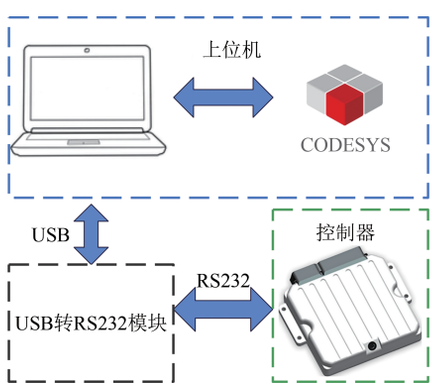

图9 开发环境示意图

Fig. 9 Development environment diagram

3.2.2　控制逻辑与算法

图 10 为控制流程图，在调节过程中由倾角传感器、悬架行程传感器和悬架压力传感器共同实时获取平台状态数据。其中倾角传感器获得的角度数据根据调平原理，通过抗饱和积分的双环 PID 控制器输出悬架油缸比例电磁阀的控制信号。同时由悬架行程和悬架压力进行一个条件判断，给出控制信号。出于安全考虑，当悬架虚腿和悬架行程到达极限位置时，悬架保护和防虚腿模块将被触发，两模块输出的控制信号与双环 PID 控制器的输出信号共同参与仲裁，悬架保护和防虚腿模块的控制信号优先级更高，将使悬架行程保持在允许的行程范围内并避免平台出现虚腿现象。针对宽幅作业平台可变幅宽的特点，仅需要在程序中修改车身尺寸参数即可以实现调平系统对不同幅宽的适配，无需对硬件系统作出任何变动。

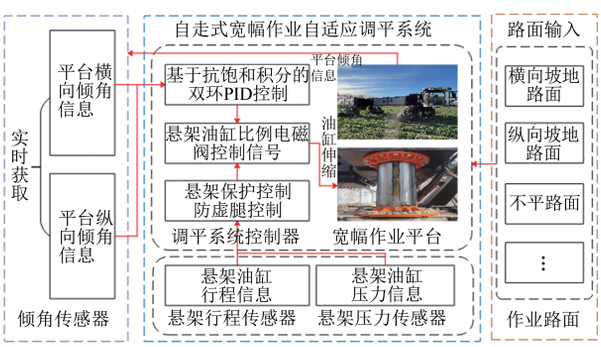

图 10　控制流程示意图

Fig. 10　Control flow diagram

4　仿真与试验

4.1　液压系统仿真

为了验证塞缸获得的流量不受负载影响，将 4 个主阀阀芯开度设置成相同数值，4 个柱塞缸负载设置成不同数值展开仿真。将 4 根油缸分别编号 A、B、C 和 D，在 AMESim 软件中分别对其加载负载 60、70、80、90 kN 进行仿真。仿真结果如表 2 所示。

表 2　同开度不同负载下仿真结果

Tab. 2　Simulation results under different loads with the same opening

油缸	负载/kN	输入电流/mA	稳态流量/(L·min^{-1})	稳态压力/MPa	位移/mm
A	60	500	22.795	5.447	316.61
B	70	500	22.781	6.281	316.15
C	80	500	22.742	7.146	315.31
D	90	500	21.064	8.023	296.49

加载在 4 根柱塞缸负载比例为 1∶1.17∶1.33∶1.50。4 根柱塞缸稳态压力比例为 1∶1.15∶1.31∶1.47，压力比例符合负载加载的比例，则在仿真过程中柱塞缸处于正常稳态，并未触发平衡阀组工作。结果显示 4 根柱塞缸平均流量为 22.345 L/min，两缸之间最大流量差距为 1.731 L，4 根柱塞缸平均行程为 311.14 mm，最大行程差距为 19.51 mm。上述数据说明在仿真过程中，柱塞缸输入流量基本是按照输入电流平均分配的，受到负载差距影响较小，LUDV 负载敏感技术有效工作。

为了验证流量能按照 4 个主阀阀芯开度比例分配，将 4 个主阀开度信号设置成不同数值，4 个柱塞缸负载设置成不同数值展开仿真。将 4 根油缸分别编号 A、B、C 和 D，在 AMESim 中进行仿真。仿真结果如表 3 所示。

表 3　不同开度不同负载下仿真结果

Tab. 3　Simulation results under different openings and different loads

油缸	负载/kN	输入电流/mA	稳态流量/(L·min^{-1})	稳态压力/MPa	位移/mm
A	60	400	10.836	5.377	149.62
B	70	425	14.637	6.256	202.19
C	80	450	18.521	7.137	255.79
D	90	475	20.743	8.023	289.03

加载在 4 根柱塞缸负载比例为 1∶1.17∶1.33∶1.50。4 根柱塞缸稳态压力比例为 1∶1.16∶1.32∶1.49，则在仿真过程中柱塞缸处于正常稳态，并未触发平衡阀组工作。结果显示 4 根柱塞缸的稳态流量比例为 1∶1.35∶1.71∶1.91，位移比例为 1∶1.35∶1.71∶1.92，而输入信号在去除死区电流 330 mA 后比例为 1∶1.35∶1.71∶2.07，执行器的输入流量比例和输入信号比例十分相近，可以说明流量分配正是按照输入信号的比例所分配，验证了 LUDV 负载敏感技术在本文四点液压主动悬架系统中的有效性。

4.2　实车试验

为了验证自适应调平系统在实际环境下的稳定性和准确性，开展实车试验。分为静态和动态 2 个试验，试验数据由车载 DTU 数据记录仪通过 CAN 总线与底盘控制 ECU 通信，读取并存储作业平台状态参数。为方便进行试验结果分析，规定平台车身坐标系采用右手坐标系，以纵行状态下车身前进方向为 X 轴正方向，前进方向左侧为 Y 轴正方向，竖直向上为 Z 轴正方向，左前方悬架及履带编号为 FL，右前方悬架及履带编号为 FR，左后方悬架及履带编号为 RL，右后方悬架及履带编号为 RR。

4.2.1　静态调平试验

静态调平试验首先使作业平台处于静止状态，并手动调节悬架高度使得平台处于倾斜状态模拟平台处在斜坡路面上的场景，随后打开自适应调平功能并记录开始时间，观察作业平台状态当车身不再动作时停止试验并读取记录仪中的试验数据。图 11 为平台模拟处于斜坡路面时车身姿态。静态调平试验结果如图 12、13 所示。

由图 12 可看出，启动自适应调平功能后，2 次试验 X 轴角度均从 2.4°成功收敛到 0.4°，小于设置的阈值 0.5°，调平精度良好，用时大约 8 s，调整过程角度曲线变化平稳。由图 13 可看出，启动自适应调平功能后，2 次试验 Y



(a) 纵行状态



(b) 横行状态

图 11 静态模拟试验车身姿态图

Fig. 11 Static simulation test attitude diagrams

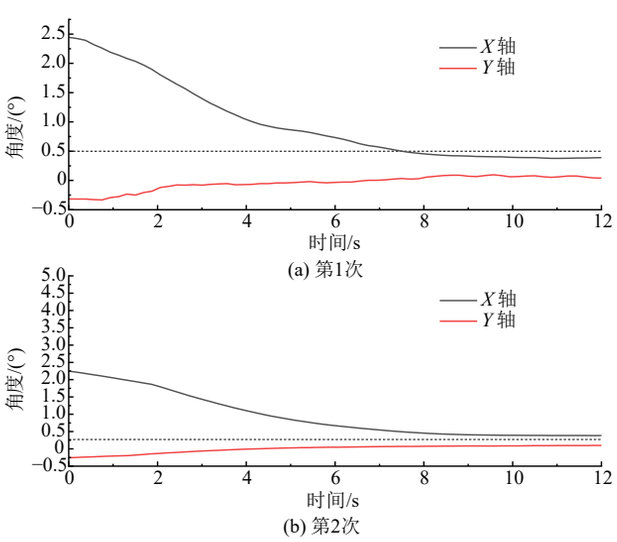

图 12 横行状态下角度-时间曲线

Fig. 12 Angle-time diagrams in horizontal state

轴角度均成功收敛到0.45°，小于阈值0.5°，调平精度良好，用时大约12 s。上述结论说明自适应调平功能在静止条件下无论在横向坡度还是纵向坡度都能有效工作，并且调整过程平稳可控，精度符合设计要求，系统性能良好。

4.2.2 动态调平试验

选取一块坡面以模拟在田间起伏路面作业的情况。坡道全长17 m，坡顶面长度7.85 m，两侧坡度分别为6.17°和4.75°，悬架行程为0.45 m，坡高为0.44 m，可以测试自适应调平系统在悬架行程接近极限情况下的系统

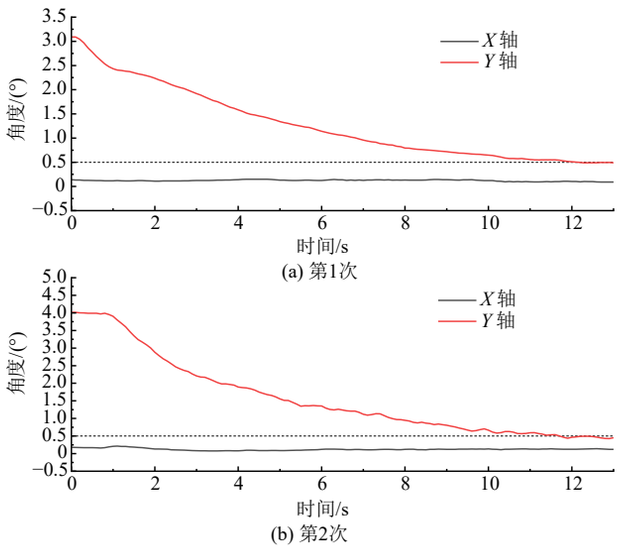

图 13 纵行状态下角度-时间曲线

Fig. 13 Angle-time graphs in longitudinal state

动态性能。在横行和纵行状态下，分别关闭和开启调平功能匀速驶过模拟田间起伏坡面路段。图14为动态测试时宽幅作业平台的车身姿态。



(a) 横行状态



(b) 纵行状态

图 14 动态试验平台姿态图

Fig. 14 Attitude diagrams of dynamic test platform

由图15可看出，纵向行驶模式下，启用自适应调平系统后，X轴角度明显趋于稳定。特别是在行驶至15 m后，由于平台的FL和RR履带已达到坡底，而FR和RL履带仍位于坡顶，未启用自适应调平系统时，X轴倾斜角度显著，最大倾斜角达到5.45°。启用自适应调平系统后，最大倾斜角度降至2.43°，下降幅度达55.4%。在20 m后进入稳态行驶直至停止过程中，未启用自适应调平功能时，X轴的稳态角度为3.62°，而启用后减少至1.12°。启用自适应调平系统后，Y轴角度也展现出收敛态势，在

20 m后稳态过程中，启用系统后Y轴角度为0.15°，未启用时为0.29°。由表4可以看出，启用自适应调平功能与未启用相比，4根柱塞缸的最大压力和最小压力均略有增加，平均压力亦略有升高。柱塞缸压力的升高反映了在主动调节过程中，由于负载的作用，柱塞缸压力会经历短暂增加。平均压力仅略微升高的原因在于，无论是否启用自适应调平功能，平台的总负载保持不变。基于以上分析可以得出结论，平台的自适应调平系统在纵向行驶模式下能够有效工作，性能表现良好。

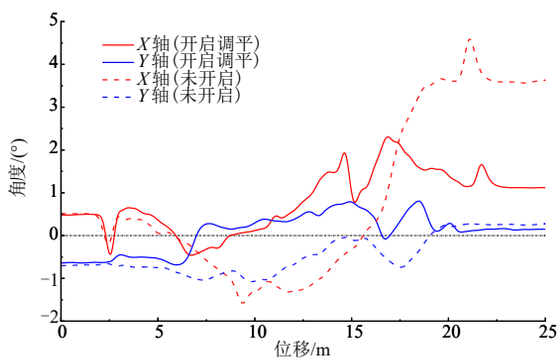

图 15　纵行状态下角度-位移曲线

Fig. 15　Angle-displacement diagram in longitudinal state

表 4　纵行状态下悬架油缸压力

Tab. 4　Suspension cylinder pressure gauge in longitudinal condition　MPa

参数	开启调平	悬架油缸编号			
		FL	FR	RL	RR
最大压力	是	13.56	11.51	13.08	14.56
	否	10.95	6.68	10.40	10.50
最小压力	是	6.48	4.27	5.33	5.25
	否	3.98	5.55	6.81	7.20
平均压力	是	9.56	6.98	9.54	9.09
	否	8.90	5.55	9.42	8.56

由图16可看出，在开启自适应调平功能后，X轴最大角度仅为1.74°，相比下降58%；最后稳态角度为1.05°，相比下降73%；平均角度为1.19°，相比下降60%。开启自适应调平功能后，Y轴角度也有所收敛，最后稳态角度从0.54°下降到0.32°。由表5可以看出，在未开启自适应调平功能的情况下，悬架FR油缸的最小压力为0.09 MPa，悬架RR最小压力为0.3 MPa，说明在模拟田间起伏路面工况时，柱塞缸B和柱塞缸C发生了严重的虚腿现象，这严重威胁到了平台的稳定性和安全性。开启自适应调平功能后，悬架FR油缸和悬架RR油缸最小压力分别上升到4.66 MPa和6.89 MPa，这说明开启自适应调平之后，有效避免了虚腿现象。上述横行状态下的试验结果不仅说明自适应调平功能的有效性，还验证了自适应调平系统避免虚腿的能力。

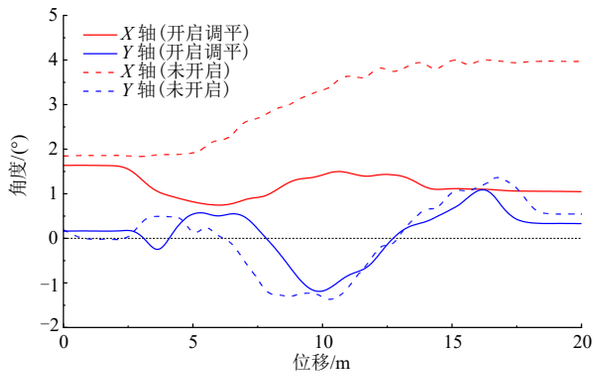

图 16　横行状态下角度-位移曲线

Fig. 16　Angle-displacement diagram in horizontal state

表 5　横行状态下悬架油缸压力

Tab. 5　Suspension cylinder pressure gauge in horizontal condition　MPa

参数	开启调平	悬架油缸编号			
		FL	FR	RL	RR
最大压力	是	13.89	8.14	10.00	12.75
	否	9.89	3.90	8.90	4.89
最小压力	是	9.09	4.66	5.18	6.89
	否	5.26	0.09	5.19	0.30
平均压力	是	10.98	6.69	8.08	10.15
	否	7.84	2.34	7.52	3.02

5　结论

（1）提出了适应宽幅作业平台自身可变幅宽、可挂载多种模块化机具等特点自适应调平方案。调平系统以主动悬架为执行机构，使用多传感器感知车身姿态，使用工业控制器作为控制ECU。当平台作业幅宽改变时调平系统仅需要选择对应的车身参数，而无需做硬件条件上的修改，提高了自适应调平系统的适应性。

（2）宽幅作业平台自身作为可搭载不同模块化机具的重型底盘，且面对的作业场景复杂多样，从而导致载质量和轴荷、轮荷变化范围较大，因此液压系统中流量分配不均问题带来的影响较为显著。针对此问题在主动悬架液压系统中引入了LUDV负载敏感技术以实现主动悬架中各作动器的流量独立分配。为验证是否有效，在AMESim中建立了仿真模型，通过设置不同的主阀开度和负载变量进行仿真试验证明了主动悬架中各作动器流量独立分配性能较好。

（3）进行了宽幅作业平台的实车调平试验。静态试验说明调平系统可以将车身倾角收敛到设置的阈值0.5°内，动态试验说明调平系统在横行和纵行状态下分别使车身倾角降低58.0%和55.4%，且能够有效避免虚腿现象。实车调平试验验证了调平方法和策略的正确性，验证了调平系统的有效性，可为调平系统在大型模块化农业装备上的推广与运用提供参考。

参 考 文 献

[1] 张宗毅，刘小伟，张萌. 劳动力转移背景下农业机械化对粮食生产贡献研究[J]. 农林经济管理学报，2014，13(6)：595－603.
ZHANG Zongyi ，LIU Xiaowei ，ZHANG Meng. Contribution of agricultural mechanization to grain production under agricultural labors migration[J]. Journal of Agro-Forestry Economics and Management，2014，13(6)：595－603.（in Chinese）

[2] 周晓时，樊胜根. 破解“谁来种粮”难题：全面推进农业机械化的基础与路径[J]. 中州学刊，2023(12)：54－60.
Zhou Xiaoshi ，Fan Shengqen. Solving the problem of “Who Will Grow Grain" ：The foundation and path of comprehensively promoting agricultural mechanization[J]. Academic Journal of Zhongzhou，2023(12)：54－60.（in Chinese）

[3] 姚成胜，何永波，曹紫怡. 中国主粮生产机械化水平的时空演变及其驱动机制[J]. 中国农业大学学报，2021，26(5)：208－220.
YAO Chengsheng，HE Yongbo，CAO Ziyi. Spatial-temporal evolution and driving mechanism of mechanization level of staple food grain production in China[J]. Journal of China Agricultural University，2021，26(5)：208－220.（in Chinese）

[4] 赵春江，李瑾，冯献，等. 关于我国智能农机装备发展的几点思考[J]. 农业经济问题，2023(10)：4－12.
ZHAO Chunjiang ，Ll Jin ，FENG Xian ，et al. Reflections on the development of intelligent agricultural machinery and equipment[J]. Issues in Agricultural Economy ，2023(10)：4－12.（in Chinese）

[5] 沈跃，张亚飞，刘慧，等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：1－18.
SHEN Yue ，ZHANG Yafei ，LIU Hui，et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(8)：1－18.（in Chinese）

[6] 李林林，邓干然，林卫国，等. 农业机械自动调平技术发展现状与趋势[J]. 现代农业装备，2021，42(5)：2－7，35.
LI Linlin ，DENG Ganran ，LIN Weiquo ，et al. Development status and trend of agricultural machinery automatic leveling technology[J]. Modern Agricultural Equipment，2021，42(5)：2－7，35.（in Chinese）

[7] 李钊，樊桂菊，张昊，等. 农机具自动调平现状及趋势分析[J]. 中国农机化学报，2019，40(4)：48－53.
LI Zhao ，FAN Guiju ，ZHANG Hao，et al. Analysis on the present situation and tendency of automatic leveling in agricultural machinery[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2019，40(4)：48－53.（in Chinese）

[8] 牟孝栋，杨福增，段罗佳，等. 丘陵山地拖拉机调平与防翻关键技术研究现状与发展趋势[J]. 智慧农业(中英文)，2024，6(3)：1－16.
MU Xiaodong ，YANG Fuzeng ，DUAN Luojia，et al. Research advances and development trend of mountainous tractor leveling and anti-rollover system[J]. Smart Agriculture，2024，6(3)：1－16.（in Chinese）

[9] 孙景彬，楚国评，潘冠廷，等. 遥控全向调平山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，CHl Guoping，PAN Guanting，et al. Design and perormance tet of remote control ommidirectional leveling hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(5)：358－369.（in Chinese）

[10] 张锦辉，李彦明，齐文超，等. 基于神经网络PID的丘陵山地拖拉机姿态同步控制系统[J]. 农业机械学报，2020，51(12)：356－366.
ZHANG Jimhui，Ll Yanming，QI Wenchao，et al. Synchronous control system of tractor attitude in hills and mountains based on neural network PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(12)：356－366.（in Chinese）

[11] 张开兴，张斓，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 ，Ll 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）

[12] 王忠山. 丘陵山地拖拉机车身调平系统及调平控制研究[D]. 长春：吉林大学，2023.
WANG Zhongshan. Research on body leveling system and leveling control of hily mountain tractor[D]. Changchun：Jilin University，2023.（in Chinese）

[13] 孙泽宇，夏长高，蒋俞，等. 基于QBP-PID的履带式作业机全向调平控制研究[J]. 农业机械学报，2023，54(12)：397－406.
SUN Zeyu，XIA Changgao，JIANG Yu，et al. Omnidirectional leveling control of crawler machine based on OBP-PID[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(12)：397－406.（in Chinese）

[14] DENIS D，THUILOT B，LENAIN R. Online adaptive observer for rollover avoidance of reconfigurable agricultural vehicles[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2016，126：32－43.

[15] DETTU F，CORNO M，D’AMBROSIO D，et al. Modeling，control design and experimental automatic calibration of a leveling system for combine harvesters[J]. Control Engineering Practice，2023，132：105411.

[16] 赵建柱，高明远，马晨旭，等. 农用底盘主动平衡试验平台与控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(11)：358－364.
ZHAO Jianzhu ，GAO Minqyuan ，MA Chenxu，et al. Design and experiment on auto leveling system and control strategy for agricultural chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(11)：358－364.(in Chinese)

[17] 马家祥，闫洪峰，贾双龙，等. 通用型宽幅农机作业平台分析与设计[J]. 农业工程，2023，13(9)：97－101.
MA Jiaxiang，YAN Hongfeng，JIA Shuanglong，et al. Analysis and design of universal wide span agricultural machinery operation platform[J]. Agricultural Engineering，2023，13(9)：97－101.（in Chinese）

[18] 杨宇静. 重型平板车自动调平控制系统的研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2015.
YANG Yujing. Research of leveling control system of heavy duty flat vehicle[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2015.（in Chinese）

[19] GODOROZHA S，PROTOPOPOV A，RYABININ M. Development of an algorithm for determining the main quality indicators of the transition process on the example of a LUDV hydraulic system[J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2020，963(1)：012034.

（下转第185页）

XU Shanzhi, WANG Peng, DONG Yonggui, et al. Measurement of planar - interdigitated electrolyte impedance by triangular waveform voltage at low frequencies[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(2): 387 - 394.(in Chinese)

[16] GAO Qiyuea, SHAO Zhitaoa, SUN Simina, et al. Boosting photoresponse of self - powered photoelectrochemical photodetectors via planar interdigital electrodes[J]. Advanced Optical Materials, 2024,12(13): 651 - 662.

[17] YOGESH H, SHRUTI S, SOMNATH L, et al. Unraveling the properties of interdigital electrode - based γ - In2Se3 photodetectors for optimal performance[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(17): 80 - 92.

[18] 郑培亮，李倩，王淑香，等. 基于叉指电容阵列模块的宽量程微纳力源装置[J]. 计量科学与技术，2021(2)：49 - 53.
ZHENG Peiliang, LI Qian, WANG Shuxiang, et al. Wide range micro - nano force source device based on interdigital capacitor array module[J]. Metrology Science and Technology, 2021(2): 49 - 53. (in Chinese)

[19] WELLS B, BAKER E, FARWELL A, et al. An adjustable parallel - plate capacitor instrument - test of the theoretical capacitance formula[J]. American Journal of Physics, 2016, 84(9): 723 - 726.

[20] 刘剑，李永刚，黄猛，等. 小型机载光电平台电磁屏蔽设计[J]. 红外与激光工程，2016，45(9)：236 - 241.
LIU Jian, LI Yonggang, HUANG Meng, et al. Design of electromagnetic shielding for minitype airborne electric - optical platform[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 236 - 241.(in Chinese)

[21] 雷虎成，夏善红，彭春荣，等. 一种压电驱动互屏蔽电极 MEMS 电场传感器[J]. 微纳电子与智能制造，2020，2(4)：52 - 58.
LEI Hucheng, XIA Shanhong, PENG Chunrong, et al. Piezoelectric driven MEMS electric field sensor with mutual shielding electrodes [J]. Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing, 2020, 2(4): 52 - 58. (in Chinese)

[22] 郭强，谢康，姜海明，等. 电容数字转换器 AD7745 的工作原理和应用[J]. 现代电子技术，2008 (14)：170 - 172.
GUO Qiang, XIE Kang, JIANG Haiming, et al. Principle and application of capacitance to digital converter AD7745 [J]. Modern Electronics Technique, 2008(14): 170 - 172.(in Chinese)

[23] 刘佳昱，黄亦翔，李炳初，等. 基于双正交小波变换 QRS 波检测方法研究与改进[J]. 机电一体化，2014，20(5)：21 - 25.
LIU Jiayu, HUANG Yixiang, LI Bingchu, et al. QRS Wave detection method and improvement based on biorthogonal wavelet transform [J]. Mechatronics, 2014, 20(5): 21 - 25. (in Chinese)

[24] 薛忠新，呼少平，张艳军，等. 皮带机故障诊断中基于自适应小波阈值去噪法的应用[J]. 机械设计与研究，2023，39(4)：213 - 216.
XUE Zhongxin, HU Shaoping, ZHANG Yanjun, et al. Application of adaptive wavelet threshold denoising method in fault diagnosis of belt conveyor[J]. Machine Design & Research, 2023, 39(4): 213 - 216.(in Chinese)

[25] 何伟健，程良伦，邓广水. 吸收峰混叠的太赫兹光谱区间组合特征提取算法[J]. 光谱学与光谱分析，2020，40(2)：403 - 409.
HE Weijian, CHENG Lianglun, DENG Guangshui. Terahertz spectral interval combination feature extraction algorithm in the case of aliasing absorption peak[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(2): 403 - 409.(in Chinese)

(上接第124页)

[20] 李中复，唐维铁，熊文才. 行走机械 LUDV 控制及负载平衡补偿[J]. 机床与液压，2013，41(4)：102 - 104.
LI Zhongfu, TANG Weitie, XIONG Wencai. LUDV control for mobile machine and load balance compensating[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(4): 102 - 104. (in Chinese)

[21] LUO Y, CHEN W, CHI B. Modeling and simulation analysis of pre-valve compensation of flow-saturated resistant system [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 735(1): 012071.

[22] WANG H, FENG Z. A Review of flow saturation resistant techniques in multi-actuators load sensing hydraulic system [J]. Journal of Engineering Mechanics and Machinery, 2023, 8(3): 42 - 51.

[23] 张国泰. 负载口独立控制阀及系统的研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2020.
ZHANG Guotai. Study on independent metering control valve and system[D]. Oinhuangdao: Yanshan University, 2020. (in Chinese)

[24] 贾铭新，陈雪峰，刘博. 液压传动与控制[M]. 4 版. 北京：电子工业出版社，2017.

[25] 陶柳，徐化文，方婷. 阀后补偿负载敏感液压系统优化设计及 AMESim 仿真研究[J]. 机床与液压，2021，49(16)：150 - 153.
TAO Liu, XU Huawen, FANG Ting. Optimal design and AMESim simulation of the after-valve compensation load sensitive hydraulic system[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(16): 150 - 153. (in Chinese)