

基于小臂-作业平台联动的自动调平机制

曹学鹏^{1,3}, 焦生杰¹, 程 磊^{2,3}, 满 军³

(1. 长安大学 公路养护装备国家工程实验室, 陕西 西安 710064; 2. 中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 徐工集团工程机械股份有限公司, 江苏 徐州 221004)

摘 要:为使高空作业车在全举升空间均可实现作业平台的自动调平,结合混合臂架结构及举升运动特点,提出基于小臂-作业平台联动动作的双级自动调平方案,并设计出全作业模式的协调控制策略。采用机电液统一建模建立基于自动调平机制的虚拟样机模型,分析了臂架举升至最大作业高度与作业幅度时的自动调平特性。研究表明:在 2 种典型工况下,协调控制策略统一调度并实现了主、辅双级调平系统的输出调平角的合理分配和有效控制,切换点处存在一定的调平滞后,但作业平台倾角被调整至 3° 范围内,验证了基于小臂-作业平台联动模式的自动调平机制的有效性和合理性,确保了全举升空间范围内的调平性能,为大空间混合臂高空车调平系统的研制提供一种有效的调平方法。

关键词:机械工程;混合臂高空作业车;作业平台;联动调平;双级驱动;协调控制

中图分类号:TH112 **文献标志码:**A

Auto-leveling mechanism based on interaction of jip-work platform

CAO Xue-peng^{1,3}, JIAO Sheng-jie¹, CHENG Lei^{2,3}, MAN Jun³

(1. National Engineering Laboratory for Road Maintenance Equipment, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. Xuzhou Construction Machinery Group Co Ltd., Xuzhou 221004, Jiangsu, China)

Abstract: In order to achieve the automatic leveling function of work platform in whole lifting range for aerial vehicle, with mixed-boom structure and lifting motion features combined, an dual-stage auto-leveling scheme was proposed, meanwhile coordinated control strategies focused on the whole working model were designed, which were based on interactive model of jip and work platform. A virtual prototype model was built by using electro-hydraulic unified modeling based on the automatic leveling mechanism, to analyze the auto-leveling performances of work platform during booms rising to the maximum operating altitude and magnitude. The results show that in two typical cases, the coordinated control strategies by unified scheduling achieve rational assignment and effective control of the output leveling-angle for the primary and secondary dual-stage leveling system. Leveling lag exists at switching point, but platform inclination is adjusted in the range of 3°. All results verify the validity and rationality of dual-stage leveling mechanism based

on interactive model of jip and work platform, which ensures the leveling performance of the whole lifting range and provides an effective method for the leveling system of mixed-boom aerial vehicle working in large space. 2 tabs, 6 figs, 10 refs.

Key words: mechanical engineering; mixed-boom aerial vehicle; work platform; interactive leveling; dual-stage drive; coordinated control

0 引言

混合臂架式高空作业车拥有折叠臂和直臂高空作业车的双重优势,具有作业空间大、举升灵活、跨障作业、环境适应性强等诸多优点,适应于工况多变、环境复杂的应用场合,如建筑工地、石油管道、果树采摘等^[1-2]。较之于国外发达国家的产品化和系列化,中国尚处于起步阶段,故研制此类高空作业机械已变得日趋迫切^[3]。

作业平台自动调平方法作为混合臂高空作业车的核心技术之一,要求输出调平角大、响应快和调平精度高^[4]。采用流量分配阀将调平回路和主油路并联在一起,结构紧凑、成本低,但流量分配易受油温变化的影响,致使调平油液分配改变调平稳定性较差^[5]。通常采用独立的调平装置或回路实现作业平台水平度的调节,包括平行四连杆结构、静液压驱动、杆链条组合、机液组合等,机械或纯液压式的平稳性好、可靠性高,但快速响应性差、调平精度低,难以满足混合臂高空作业车在大空间作业时的调平要求^[6]。电液式调平融合了电子控制技术和液压控制技术的长处,机构简单、控制精度高、动态反应快,其中电液伺服调平的元件制造精度高、造价昂贵、对油液敏感且维护费用高,多用于大高度消防车的调平中^[7]。电液比例调平精度虽较电液伺服低,但具有反应速度较快、造价成本低和抗污能力强的优点,适应于各种臂架结构的高空作业车^[8]。受作业平台机械约束和调平缸运动的限制,电液比例调平系统通常以作业平台为单一控制对象,输出调平角偏小(小于 180°),难以满足大空间作业时混合臂架高空作业车的调平要求^[9]。就控制系统而言,刘子金对高空作业平台的电液比例调平系统进行理论研究,并获得系统稳定的条件^[9];李帅等的研究表明,广义预测自适应的闭环控制器较常规 PID 控制器具有良好的动态特性,对模型失配和负载扰动的适应性强,但实际运用难度大^[10]。为此,本文根据作业平台的举升特点,并借鉴已有电液比例调平方法,提出基于小臂-作业平台联动模式的高空作业车自动调平机制,实现全举升空间范围内的自动调平。

1 举升特点及调平要求

1.1 臂架构造及举升特点

混合臂架高空作业车属双级伸缩带小臂型构造,如图 1 所示,其上车结构主要包括转台、工作臂(含下臂、上臂和小臂)、作业平台等,收车状态下上臂和下臂呈水平并行布置,各构件较初始位的转动角位移如表 1 所示。

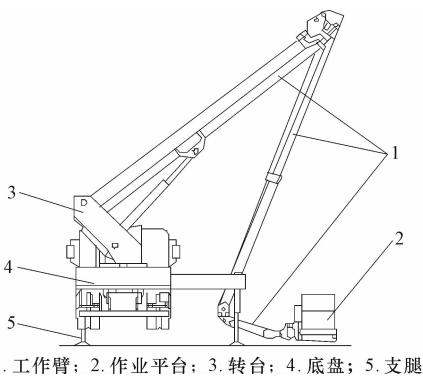


图 1 混合臂高空作业车臂架结构
Fig. 1 Composition structure of mixed-boom aerial vehicle

表 1 各构件角位移变化区间

| Tab. 1 Angular displacement range of each component | | | |
|---|----------|----------|------------|
| 下臂变幅/(°) | 上臂变幅/(°) | 小臂转动/(°) | 作业平台摆动/(°) |
| 0~+80 | 0~+180 | 0~-180 | 0~-180 |

注:构件较初始位逆时针转为“+”,顺时针为“-”。

结合臂架结构及举升幅角变化,该高空作业车的特点如下。

(1)上、下臂举升幅角之和在 0~260°范围变化,实现高、低空作业的有机融合,结合上、下臂架的伸缩动作,在高度和幅度两维方向拥有很大的展伸范围,再配合转台的回转,使其作业空间很大。

(2)小臂相对于上、下臂变幅可反向转动,使得作业平台具有较强的越障能力,适应于复杂、非结构性环境。

(3)臂架的举升由同 1 个手柄操控,即上臂、下臂、小臂的三输入间为互锁关系,减少了不必要的组合动作,提高作业的平稳性和可靠性。

1.2 调平要求

基于上述举升作业特点,对臂架末端作业平台

的调平性能有如下要求。

(1)调平输出角大。臂架举升将导致作业平台的倾斜,不考虑臂架柔性时,上、下臂幅角和达 260° ,为维持作业平台的水平状态,调平系统反向驱动作业平台转动与变幅角相同的摆角,即输出调平角补偿举升动作引起的平台倾斜。

(2)调平过程平稳。当作业高度较大时,作业平台较小的抖动易引起作业人员较大的安全感知,需尽量减小启停、切换等阶段的动态冲击。

(3)调平响应快速。对于采用电液式调平的大高度作业平台,调平缸及其控制阀通常布置在平台旁,软管管较长(大于30 m),易引起较大的调平滞后。

(4)调平精度高。该指标是调平系统平稳性、快速响应性等参数的综合反映,高空作业车国家标准规定任一工作位置作业平台底部与水平面的夹角都不应超过 5° 。^[10]

现有直臂或折叠臂高空作业车调平技术不能完全适用于混合臂高空作业车,需结合其举升特点及调平要求进行研究。

2 调平方案及元件选型

2.1 调平系统的驱动方案

由举升特点可知,作业平台的最大摆角为 180° ,若只选取以作业平台为控制对象的调平方法,输出调平角仅为 180° ,不足以完全平衡臂架举升引起的作业平台倾斜量,存在 80° 的调平角空白。考虑小臂和上、下臂架较各初始位转向相反的特点,提出基于小臂-作业平台联动模式的自动调平机制,即在作业平台一级调平系统的基础上,增加以小臂为二次控制对象的二级调平系统,控制小臂适当摆动,补偿工作输出调平角的不足,图2为基于小臂-作业平台联动模式的自动调平系统方案。

发动机驱动双联泵分别给平台调平回路和小臂变幅回路供液,前者压力油经电液调平阀调节后驱动调平缸伸缩,带动调平机构摆动实现作业平台的摆动,形成驱动平台调节的一级调平系统;后者压力油经电液阀控制并推动变幅缸伸缩,驱动变幅机构动作并使小臂摆动,小臂和平台间通过定铰点连接,即小臂与平台一起转动,补偿作业平台处输出调平摆角的不足,平台自身调平装置和小臂变幅回路分别称作一级主调平系统和二级辅助调平系统。传感器1、2分别检测作业平台和小臂转角,并将检测结果送入协调控制器,控制器综合作业平台倾角传感

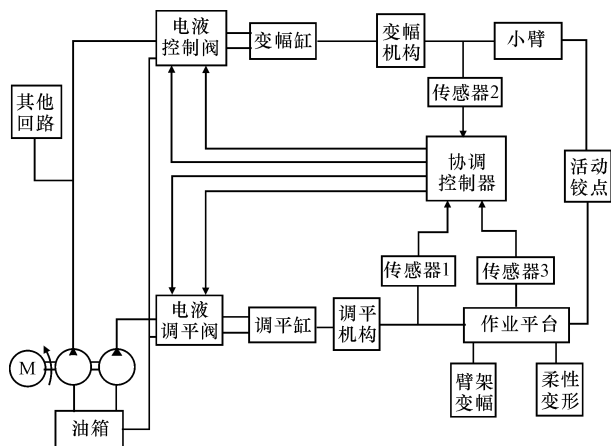


图2 作业平台的双级调平系统结构

Fig. 2 Dual-stage leveling system structure of work platform

器3反馈信号和2个转角信号,并根据一定的控制策略向一级调平系统的调平阀电磁铁或二级调平系统的控制阀电磁铁发出控制指令,实现不同举升幅度下平台倾角的实时动态调整。

2.2 元件选型

考虑实际应用情况,对液压泵进行择选,主油路定量泵除给小臂回路供油外,同时供油给其他回路,其排量要求较大,而辅助定量泵专用于作业平台的自身调平,其排量较小,泵额定压力的选择需兼顾各级负载的驱动要求,确保大于各回路的最高工作压力。液压缸的选择综合考虑伸缩速比、阀控缸动态响应性、长径比对传力稳定性等影响,阀自身应具有良好的快速响应性和控制精度,与被控缸参数相匹配。主要元件选型如下:采用TDXB63-32型双联柱塞泵为主辅回路供油,排量分别为63、32 mL/r;额定转速和工作压力分别为1 500 r/min、31.5 MPa;选择调平缸大、小径分别为80、40 mm;变幅缸大、小径分别为90、45 mm;选用LPCV20II型调平阀,通流量为40 L/min,最大工作压力为31.5 MPa,采用与定量控制相匹配的PSL型比例多路换向阀,通流量为80 L/min,最大工作压力42 MPa。

3 工作模式与协调控制策略

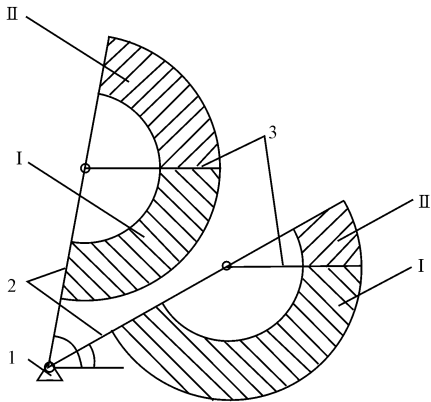
3.1 工作模式

为研究整个作业空间下作业平台的调平过程,将作业工况划分为中低空、高空2种工作模式,如下页图3所示。

(1)中低空作业模式:上、下臂架变幅角之和不超过 180° 的工况,即上臂举升未超过水平位置,如图3中I所示作业空间。

(2)高空作业模式:上、下臂架变幅角之和超过 180° 的工况,即上臂举升超过水平位置,如图 3 中 II 所示作业空间。

需要指出的是,中低空、高空 2 种工作模式通过上臂是否超过水平位置来判断,并不以平台所处的作业高度来区分。



1. 转台; 2. 下臂; 3. 上臂; I. 中低空作业模式; II. 高空作业模式

图 3 下臂 2 种举升角下的作业模式

Fig. 3 Working modes under two lifting angles

3.2 控制策略

调平系统的协调控制策略的作用在于将平衡平台倾斜所需的输出调平角自动合理地分配给一、二级调平系统。在此,择选平台转角和上下臂变幅角之和分别作为两级调平系统的主、次切换变量,按作业模式的变化,相应控制策略如下。

(1)主调平模式

主切换变量未超过平台转角上限 180° 的工况,即维持平台水平所需输出调平角未超过 180° ,此时全部调平角由一级调平系统输出。即若 $\delta < 180^\circ$, $\Delta\alpha + \Delta\beta \neq 0$ 或 $\delta = 180^\circ$, $\Delta\alpha + \Delta\beta < 0$ 且 $\Delta\alpha + \Delta\beta < 180^\circ$,处于中低空作业模式,则

$$\theta_o = \delta, \theta_i = \alpha + \beta - \sigma, \theta_o = \theta_i \quad (1)$$

式中: θ_o 、 θ_i 分别为调平系统输出的平台摆角和臂架举升引起的平台倾斜量; δ 为一级调平系统的输出调平角; α 、 β 分别为下、上臂架的变幅角; $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 分别为下、上臂架的变幅角增量; σ 为臂架柔性引起的平台倾斜量。

此模式下,小臂不参与自动调平过程,作业平台调节属于单级调平方式。

(2)辅助调平模式

主切换变量达到平台转角上限 180° 且臂架继续举升的工况,即所需输出调平角超过 180° ,此时,输出调平角由一级、二级调平系统一起提供。即若

$\delta = 180^\circ, \Delta\alpha + \Delta\beta > 0$ 或 $\delta = 180^\circ, \Delta\alpha + \Delta\beta < 0$ 且 $\alpha + \beta > 180^\circ$,处于高空作业模式,则

$$\theta_o = \delta + \gamma_i, \theta_i = \alpha + \beta - \sigma, \theta_o = \theta_i \quad (2)$$

式中: γ_i 为二级调平系统的输出调平角。

此时,自动调平系统通过一级调平保持平台最大输出调平角不变,并采用二级调平输出其余所需的调平角。

(3)小臂手动模式

(1)、(2)调平模式下,小臂并无变幅输入信号,即 $\gamma_c = 0$ 。考虑实际情形(如跨越障碍),即小臂手动调节,其辅助调平功能失效。此时, $\Delta\alpha = \Delta\beta = \gamma_i = 0, \Delta\gamma_c \neq 0$ 则

$$\theta_o = \delta + \gamma_{i0}, \theta_i = \alpha + \beta - \gamma_c - \sigma, \theta_o = \theta_i \quad (3)$$

式中: γ_c 为手动输入信号下小臂摆动的角位移量; γ_{i0} 为上一阶段输出调平角。

该模式下,维持平台水平的调平角亦由一级调平系统输出,范围为 $[0^\circ, 180^\circ]$,此时,小臂手动输入的幅角受到一定限制。不考虑臂架柔性时,满足约束准则:

①当输出调平角达到下极限点,即 $\delta = 0$ 时,则有 $\gamma_c \leq \alpha + \beta$;

②当输出调平角达到上极限点,即 $\delta = 180^\circ$ 时,则有 $\gamma_c \geq (\alpha + \beta) - 180^\circ$ 。

因此,不同作业模式下,小臂手动输入需满足不同的约束条件,即低空作业模式应满足 $\gamma_c \in [0, \alpha + \beta]$,高空作业模式需限制 $\gamma_c \in [(\alpha + \beta) - 180^\circ, 180^\circ]$ 。

需特别指出,作业平台举升至给定作业高度时,一般伴随着以上 3 种控制策略的相互切换和有机组合,控制器根据平台倾斜和臂架举升的变化统一协调相应的控制策略,调度并驱动主、辅调平系统有序运行,实现对平台倾角的实时动态调整。

4 自动调平系统仿真

根据上述控制策略,结合某型混合臂架式高空作业车结构,采用机电液统一建模方法建立作业平台自动调平系统的虚拟样机模型,如下页图 4 所示,由机械臂架模型(左上角图)、上、下臂变幅回路模型、一二级调平系统、协调控制器模型等组成。采用恒压源为各执行元件供油,软管考虑压缩性和摩擦,回油路中通过溢流阀设定 2 MPa 的背压防止负向负载。仿真对举升至最大作业高度和作业幅度的调平性能进行分析。除元件选型中的基本参数外,其余参数取值如下页表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

| 组件 | | 质量/kg | 长度/m | 组件 | | 长度/m | 通径/mm |
|----|--------|-------|------|------|----------|------|-------|
| 臂架 | 下臂(三节) | 800 | 22.0 | 液压软管 | 油源—一级调平缸 | 40.0 | 10 |
| | 上臂(两节) | 350 | 8.0 | | 油源—二级调平缸 | 35.0 | 10 |
| | 小臂 | 50 | 1.5 | | 油源—上臂变幅缸 | 25.0 | 10 |
| | 作业平台 | 200 | | | 油源—下臂变幅缸 | 1.5 | 10 |

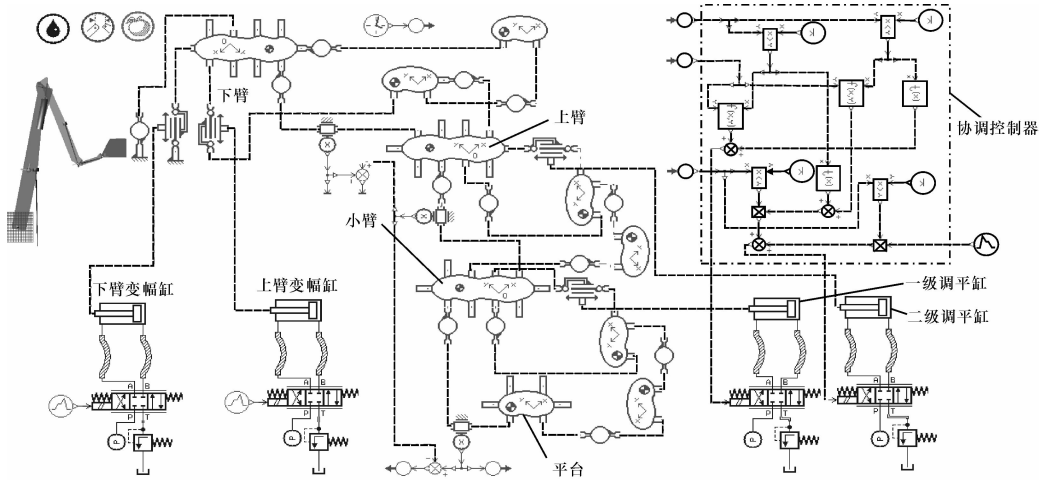


图 4 高空作业平台自动调平系统的虚拟样机模型

Fig. 4 Virtual prototype model of auto-leveling system for aerial work platform

下页图 5、图 6 分别为平台举升至最大作业高度和最大作业幅度过程中自动调平的仿真结果。其中,下臂、上臂、小臂手柄输入电信号进行了归一化处理,其相对电流值范围为 $[-1,1]$,正值表示臂架逆时针转动,负值则相反。自动控制策略下调平系统的工作模式编号为:“1”为主调平模式;“2”为辅助调平模式;“3”为小臂手动模式。

举升至最大作业高度过程中,各臂架输入信号如图 5(a)所示,相应的上、下臂架幅角和的变化如图 5(b)所示,当其值未超过 $180^{\circ}(t<48.3\text{ s})$ 时,随幅角的不断增大,一级调平系统输出的主调平角逐渐增大,即处于主调平模式,如图 5(c)“1”所示。此过程平台倾角存在 2 处波动,即下臂刚启动阶段和下臂举升停而上臂起的阶段,如图 5(d)所示,前者由长管道效应和基于偏差的调节方式所致,后者则主要由臂架启停产生的冲击效应叠加造成。当主调平角达 -180° 且臂架幅角继续增大($t>48.3\text{ s}$),保持该最大值 -180° 不变并由二级调平系统输出其余所需辅调平角,直至最大作业高度,即处于辅助调平模式,图 5(c)“2”所示。该阶段作业平台最大倾斜角约 2.4° ,如图 5(d)中“○”所示,其原因为进入辅助调平阶段,臂架变幅速度未受限而保持了快速举升,致使二级调平系统较小的启动滞后引起较大的平台倾斜。进入小臂手动变幅模式($t>64.8\text{ s}$),上下臂不再举升,图 5(a)、图 5(c)

“3”所示,输出调平角再次等于主调平角,相应的平台倾角也从正偏差变为负向值。

举升至最大作业幅度过程中,各臂架输入信号及上、下臂架幅角和的变化分别如图 6(a)、图 6(b)所示;当上、下臂幅角和未超过 $180^{\circ}(t<40.2\text{ s})$ 时,同样由一级调平系统输出主调平角,如图 5(c)“1”所示;当该调平角达 -180° 且臂架幅角继续增大或超过 180° 并减小时,即图 5(b)中“a”或“b”工况,主调平角维持不变并由二级调平系统输出其余辅调平角,如图 5(c)中“2”所示。在小臂手动变幅模式($t>70\text{ s}$),即图中“3”所示阶段,调平角再次由主调平角输出。臂架启停及控制切换同样会引起平台的抖动,最大倾角约为 2.5° ,同样出现在一、二级调平系统的切换时刻,如下页图 6(d)中“○”所示。

仿真结果表明,调平系统据主次切换变量(主调平角及臂架幅角和)的变化及制定的控制策略,自动切换并启动一、二级调平系统,完成主、辅调平角的合理匹配与输出,实时平衡了臂架举升引起的平台倾斜,从而验证了基于小臂-作业平台联动模式的双级驱动方案和协调控制策略的合理性和有效性。自动调平系统实现了 $0\sim 260^{\circ}$ 全举升空间内的调平功能,作业平台最大倾角为 2.5° 左右,虽存在一定的小幅抖动,但小于国家标准规定的容许值。若臂架调节采用主动调节技术,即限制双级调平切换阶段

的臂架变幅速度,有利于减小作业平台的调平滞后,可进一步提高调平精度,同时在与作业平台相连的

一级调平油缸旁设置蓄能器吸收使平台产生抖动的压力脉动,增加调整过程的平稳性。

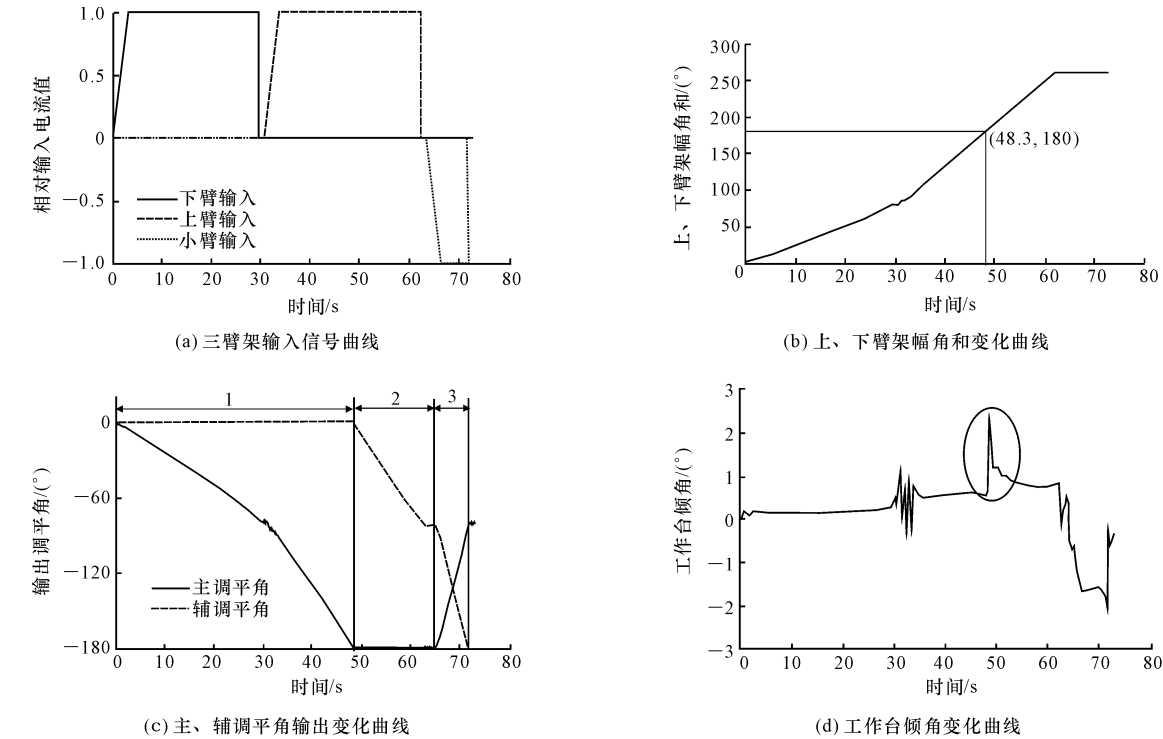


图 5 作业平台举升至最大作业高度过程中双级自动调平仿真结果

Fig. 5 Simulation results for dual auto-leveling system during platform rising to maximum working altitude

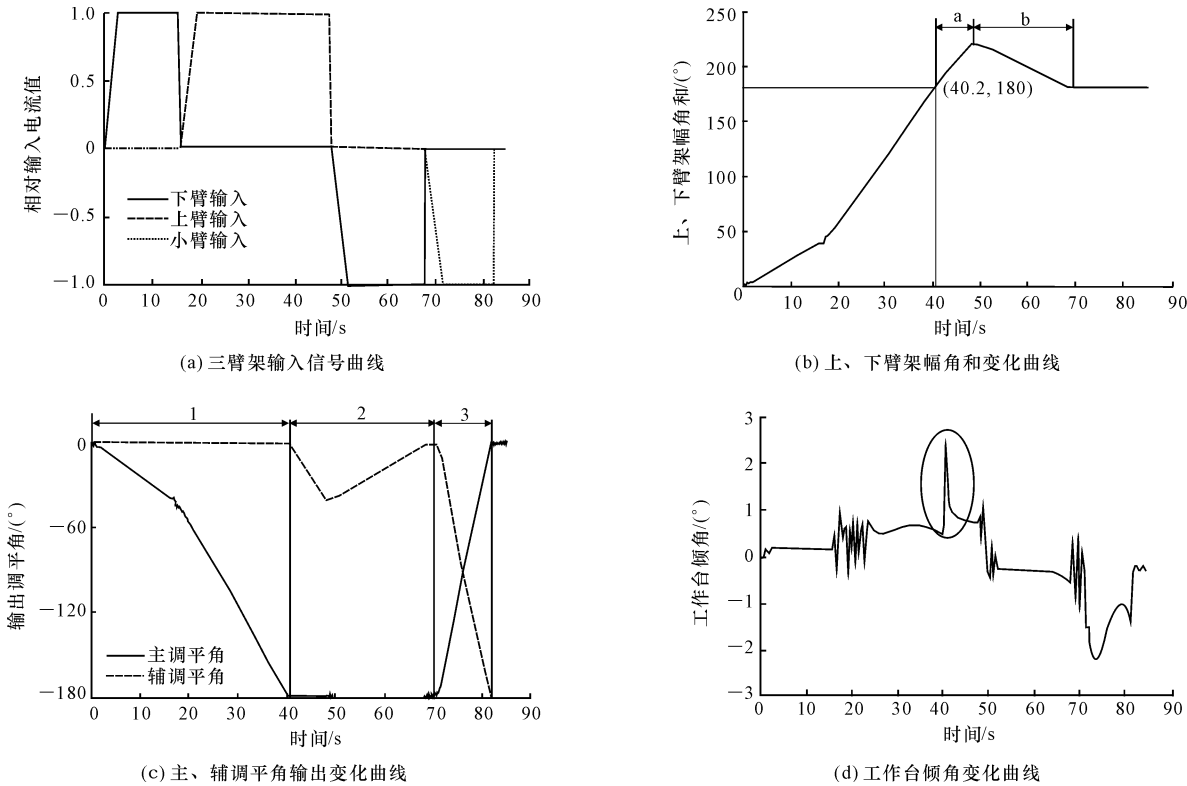


图 6 作业平台举升至最大作业幅度过程中双级自动调平仿真结果

Fig. 6 Simulation results for dual auto-leveling system during platform rising to maximum working magnitude

5 结 语

(1)结合高空作业车结构及举升运动特点,提出了基于小臂-作业平台联动模式的高空作业车自动调平机制,构建出作业平台基于双级联合驱动和协调控制的自动调平系统,以保证全举升空间的调平性能。

(2)以某混合臂高空作业车的实际调平系统为例,考虑管道效应、负向负载等影响,采用机电液统一建模方法建立基于双级自动调平机制的虚拟样机模型。

(3)仿真结果表明,随工况的变化,一、二级调平系统自动按照协调控制策略有序动作,完成主、辅调平角的匹配输出,实时满足 $0\sim 260^\circ$ 全举升空间的调平要求,切换点存在一定的调平滞后,但作业平台倾角被调整在 3° 范围内,验证了基于小臂-作业平台联动模式的高空作业车自动调平机制的有效性和合理性。

(4)在一、二级调平系统的切换点处存在较大的调平滞后和波动,在下一步的工作中宜就切换点的设置、切换点处臂架升降限制等方面开展更为深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] 张 华,霍玉兰.我国高空作业车行业发展与展望[J],建筑机械,2009(12):38-43.
ZHANG Hua, HUO YU-lan. Industry development and prospects of our country aerial vehicle[J]. Construction Machinery, 2009(12):38-43. (in Chinese)
- [2] 柏红专,罗亮平.国内高空作业机械行业现状及发展方向[J].建筑机械,2006(15):54-56.
BAI Hong-zhuan, LUO Liang-ping. Present situation of access working vehicles industry and its development stratagem in China[J]. Construction Machinery, 2006(15):54-56. (in Chinese)
- [3] 夏秀峰.浅谈我国高空作业车发展[J].建筑机械化,2010(9):33-35.
XIA Xiu-feng. Development of China's aerial platform vehicle[J]. Construction Mechanization, 2010(9):33-35. (in Chinese)

- [4] Schimaneck F, Merrifield D K. Aerial work platforms; safety, liability & the rental center[J]. Professional Safety, 1998, 73(1):25-28.
- [5] 陈晋市,元万荣,袁华山等.基于AMESim的滑移装载机自动调平系统[J].吉林大学学报:工学版,2012,42(6):1390-1395.
CHEN Jin-shi, YUAN Wan-rong, YUAN Hua-shan, et al. Self-level system of skid-steer loader based on AMESim[J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2012, 42(6):1390-1395. (in Chinese)
- [6] 田丽敏,郭维斌.全折叠臂小型高空作业车的调平机构[J].工程机械,2003(2):20-22.
TIAN Li-min, GUO Wei-bin. Leveling mechanism of small size aerial vehicle with folding booms [J]. Construction Machinery, 2003(2):20-22 (in Chinese)
- [7] 胡 元.高空作业车作业平台调平机构[J].工程机械,2006,37(12):34-36.
HU Yuan. Leveling mechanism working platform for aerial vehicle [J]. Construction Machinery, 2006. 37 (12):34-36. (in Chinese)
- [8] 王 欣,宋晓光,滕儒民,等.基于MATLAB高空作业车电液比例调平系统仿真研究[J].机床与液压,2008,36(4):162-164.
WANG Xin, SONG Xiao-Guang, TENG Ru-min, et al. Simulation and research in aerial work platform electro-hydraulic proportional leveling system based on MATLAB[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008, 36 (4):162-164. (in Chinese)
- [9] 刘子金,王振丰,井其作,等.高空作业车作业平台电液比例自动调平机构[J].建筑机械化,1996(5):24-26.
LIU Zi-jin, WANG Zhen-feng, JIN Qi-zuo, et al. Electro-hydraulically proportional auto-leveling mechanism of working platform for aerial vehicle [J]. Construction Mechanization, 1996(5):24-26. (in Chinese)
- [10] 李 帅,魏建华.高空作业平台广义预测自适应控制及联合仿真[J].计算机应用研究,2009,26(10):3830-3832.
LI Shuai, WEI Jian-hua. Generalized predictive adaptive control and combination of simulation of aerial work platform[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(10):3830-3832. (in Chinese)