

## 传感器在自行式高空作业平台上的应用

高旭宏<sup>1</sup>, 徐向阳<sup>1</sup>, 孙迪<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100191; 2. 集美大学轮机工程学院, 福建厦门 361021)

**摘要:** 为保证自行式高空作业平台的行走和作业安全, 电控系统需要时刻监控整车的使用状态。因此, 对电控系统的安全设计采用运算设计和冗余设计相结合的方法, 以地面坡度、承载质量、底盘状态、车体位置、臂架长度、臂架角度等因素作为判据, 并使用角度传感器、称重传感器、位移传感器和接近传感器等元件作为核心检测装置, 控制整车的行走速度、作业速度和作业范围。当发生危险工况或误操作时, 电控系统会自动限制危害安全使用的动作发生, 同时警示操作者及时调整使用状态, 最大限度保证安全。最后, 通过场地实验测试和客户跟踪测试, 验证了使用各类传感器的电控系统的稳定性和可靠性。

**关键词:** 自行式高空作业平台; 电控系统; 运算设计; 冗余设计; 传感器; 稳定性

**中图分类号:** TH213.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-1841(2016)06-0084-04

## Application of Sensors in Self-propelled Aerial Work Platform

GAO Xu-hong<sup>1</sup>, XU Xiang-yang<sup>1</sup>, SUN Di<sup>2</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Marine Engineering College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Working status of the self-propelled aerial work platform (SAWP) need to be monitored at any time in order to ensure drive and operation safety, thus computation design and redundancy design were used in electric control system of the SAWP, at the same time, the key factors including ground slope, rated load, inclination angle of the chassis, luffing angle and telescopic length of the booms were all taken into consideration. Angle sensor, weight sensor, displacement sensor and proximity sensor, etc. were both used in the SAWP in order to control drive speed, operation speed and motion range so that hazards could be controlled automatically in case of risk conditions or misoperation at work. At the same time, the operator will be warned that the adjustment should be carried out immediately. At last, the stability and reliability of electric control system based on various sensors were verified by the ground test and the customer service, and the results are satisfied.

**Key words:** self-propelled aerial work platform; electric control system; computation design; redundancy design; sensor; stability

### 0 引言

自行式高空作业平台作为一种新型高效的工程机械, 广泛应用于航天、航空、船舶、石化、电力、建筑等行业, 相对于车载式高空作业车、脚手架、吊篮等设备, 具有机动、灵活、高效的优点, 能满足多种特殊环境下的使用需求<sup>[1-2]</sup>。

欧洲现行的 EN280<sup>[3]</sup> 技术规范是全世界自行式高空作业平台设计的指导标准。我国于 2010 年颁布了 GB25849<sup>[4]</sup> 作为国内设计及制造参照的执行标准。

电控系统作为自行式高空作业平台的控制中枢, 不仅控制整车的行走和作业功能, 而且还时刻监控整车的安全使用状态。如果使用过程中违反安全设计原则, 电控系统会自动启动安全保护功能, 限制危害整车安全使用的动作发生, 同时发出声光报警, 警告操作者及时调整使用状态, 最大限度保证作业安全<sup>[5-6]</sup>。

### 1 国内外研究现状

国内外科研人员对自行式高空作业平台等高空作业设备

电控系统的安全性及传感器应用做了大量的研究工作。其中, 芬兰坦佩雷理工大学 E. Keskinen 等人使用加速度传感器测量了高空作业平台工作斗的振动状态, 进而分析了臂架幅度变化对整车安全稳定性的影响<sup>[7]</sup>。美国乔治亚理工学院 John R. Huey 等人基于整形输入技术, 使用速度传感器和角度传感器测试吊钩的振动信号, 对三类高空起重设备的动力学特性进行了分析<sup>[8]</sup>。日本熊本大学 Ikuro Mizumoto 等人基于自适应输出反馈控制技术, 使用电压传感器对车载起重机进行作业数据采集, 并对电控系统闭环控制的稳定性进行了实物验证<sup>[9]</sup>。韩国庆熙大学 Sun - Kuk Kim 等人, 将称重传感器和位移传感器应用在电控系统中, 提出了一种基于塔吊安全控制的优化算法<sup>[10]</sup>。电子科技集团 52 所全剑敏等人开发了一款车载式高空作业车的智能控制器, 使用了长角传感器、压力传感器等检测元件搭建了整车的硬件控制电路, 并探讨了电控系统的硬软件设计方法<sup>[11]</sup>。西北机电工程研究所的周加永等人, 使用 EPEC 控制器构造电控系统的硬件设计, 并结合使用的各类传感器提出了基于 CAN 总线控制的自行式高空作业平台主程序流程图<sup>[12]</sup>。汉阳专用汽车研究所的詹斌等人, 使用位移传感器和角度传感器监测车载式高空车臂架的长度和角度的状态, 并开

基金项目: 福建省教育厅基金项目 (JA15285); 航天新长征电动汽车技术有限公司高空作业平台产业化支持项目 (HTXCZ-050201)  
收稿日期: 2015-10-21

发了一套可视化的防倾翻预警系统<sup>[13]</sup>。秦皇岛通联重工的江剑平等人,使用测力传感器设计了一套适合自行式高空作业平台使用的工作斗称重装置<sup>[14]</sup>。

综上所述,针对国内对自行式高空作业平台的使用要求,遵照“简单、实用、可靠、优化”的原则,提出采用运算设计和冗余设计相结合的方法设计自行式高空作业平台的电控系统,合理选用各类传感器,实现对整车的行走速度、作业速度和作业范围的综合控制。

## 2 电控系统设计

### 2.1 安全逻辑

某型号自行式高空作业平台电控系统安全设计的逻辑关系如图1所示。由图1可见,电控系统安全设计首先要考虑使用环境和承载条件的影响,然后确定底盘的安全状态和车体位置状态。整车进入工作状态后,传感器将时刻检测臂架的伸缩长度和举升角度,将各种动作限制在安全使用范围内,一旦出现危害安全的工况或误操作,各类传感器将实时检测的信号反馈给控制器或硬件电路,电控系统的安全保护功能将自动启动,立即限制危害安全使用的动作发生,同时发出报警信息,警告操作者及时调整工作状态,最大限度保障使用安全。

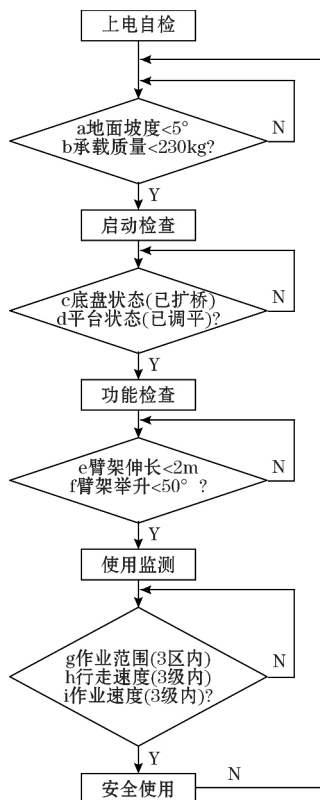


图1 电控系统安全设计的逻辑关系

### 2.2 运算设计

从图1电控系统安全设计的逻辑关系可见,每一级的安全控制必须经过检测,辨识系统和工况的状态后方可执行后续的操作功能,而对应控制的操作功能实际上互为关联和影响,从而使安全控制关系变得更加复杂。因此,要进行运算控制设计,现以某型号自行式高空作业平台(三节直臂结构)为例,对其臂架伸缩长度( $L_1 \sim L_3$ )和升降角度( $A_1 \sim A_3$ )的安全逻辑控

制细节进行分析,臂架伸缩长度和升降角度的逻辑组合关系见表1。

表1 臂架长度和角度逻辑关系

	$L_1$	$L_2$	$L_3$
$A_1$	and	or	or
$A_2$	or	and	or
$A_3$	or	or	and

从表1可见, $A_1$ 与 $L_1$ 组合,只有同时满足条件(即“and”),能控制高速行走状态和1级回转速度; $A_1$ 与 $L_2$ 组合,只需满足任一条件(即“or”),能控制低速行走状态和2级回转速度; $A_1$ 与 $L_3$ 组合,只需满足任一条件(即“or”),能控制低速行走状态和3级回转速度;同理, $A_2$ 、 $A_3$ 与 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 组合时,将控制臂架不同级别的升降速度、伸缩速度和极限到位状态,最终确定整车的作业范围。

由此可见,每一级安全控制都有很多细节设计,尽管逻辑关系清晰,但控制关系复杂。因此,在进行运算控制设计的过程中,硬件方面需要使用各种传感器进行检测,将各类检测信号传递到控制器综合处理;软件方面要优化控制设计,使控制程序尽量简单、简洁,减少多层次逻辑关系控制。

### 2.3 冗余设计

为保证整车安全控制功能的稳定可靠,电控系统应使用冗余设计方法。关键传感器的布置如图2所示,具体使用传感器的类型和功能及冗余设计的要求如表2所示。

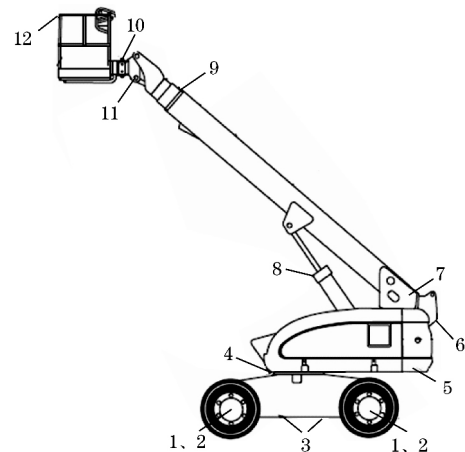


图2 关键传感器分布位置

在表2中,“○”表示必须使用冗余设计,“△”表示建议使用冗余设计。对必须使用冗余设计的位置,实际产品中采取两种设计方法。一种是增加传感器的数量,实施“双保险”式的控制方法,如臂架钢丝绳松动监测使用了2个接近传感器。另一种是独立于软件控制之外,增加硬件电路控制,这样可有效避免软件故障引起的危险,如对臂架升降角度的硬软件监测分别使用了角度传感器和位移传感器。

应用冗余设计的电控系统能有效提高整车的稳定性和可靠性。但是,综合考虑设计难度、车型特点、成本、故障率、维修性等各方面因素,并不要求所有关键点都使用冗余设计,具体设计方案要结合不同产品的特点确定。

表 2 关键传感器使用要求

位置	类型	功能	冗余
1	位移传感器	扩桥	○
2	位移传感器	缩桥	△
3	位移传感器	支撑	△
4	角度传感器	方向	△
5	角度传感器	水平	○
6	接近传感器	松动	○
7	角度传感器	角度	○
8	压力传感器	压力	△
9	位移传感器	长度	○
10	称重传感器	称重	△
11	角度传感器	调平	△
12	触发传感器	防撞	△

2.4 控制结构

按照电控系统安全设计的逻辑关系,在运算设计和冗余设计中,使用了各类型的传感器,再选用 EPEC2024 + CAN 系列模块作为控制中枢,所涉及的信号类型很复杂,包括开关量输入输出、模拟量输入输出、PWM、高频脉冲量输入输出等。根据整车的安全控制逻辑,基于 CAN 总线通讯的控制结构及各种传感器使用关系如图 3 所示。

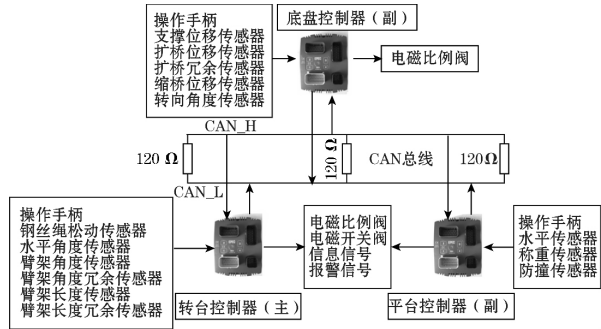


图 3 控制系统结构

各种关键传感器在某自行式高空作业平台上的安装使用情况如图 4 ~ 图 10 所示。

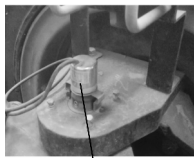


图 4 转向节位置

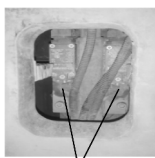


图 5 车桥内部



图 6 臂架侧面

3 试验及使用测试

3.1 场地试验

为检验应用了多种传感器的电控系统的稳定性和可靠性,模拟最恶劣和最危险的使用工况,对不同型号自行式高空作业平台进行了多项场地试验测试,包括过载测试、坡度测试、应急测试、硬软件独立测试等,试验中的部分环节如图 11 ~ 12 所示。

经过场地试验测试,得到如下结果:

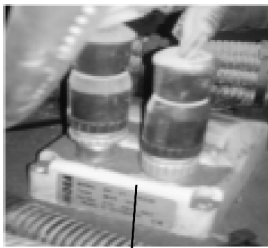


图 7 转台底板位置

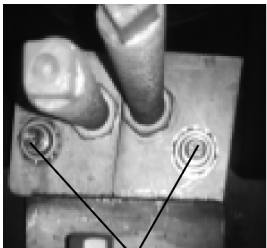


图 8 伸缩油缸端部

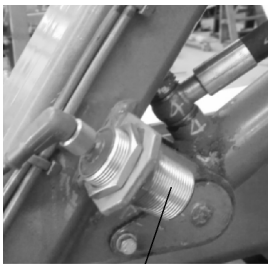


图 9 臂架底部

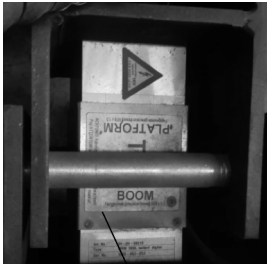


图 10 平台连接座处



图 11 过载测试

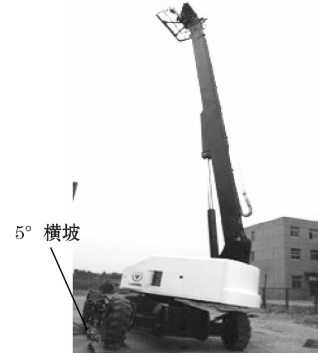


图 12 坡度测试

(1) 当承载超过 280 kg( 额载 230 kg) 或车体倾斜角度超过 4.5°时,称重传感器或角度传感器立即起作用,控制器切断任何动作的指令输出,并发出报警信号。

(2) 臂架处于不同的伸长长度和举升角度,整车分别处于 1 ~ 3 区不同的作业范围,并具有 1 ~ 3 级不同的行走速度和 1 ~ 3 级不同的作业速度。

(3) 独立测试各传感器的功能,只要达到触发条件,控制器切断任何动作的指令输出并发出报警信号;随后,破坏基于软件的监测控制,硬件级传感器达到触发条件时,立即切断了整车的动力输出。

通过各项场地实验测试,验证了电控系统的安全控制设计准确合理,各类传感器性能稳定、功能可靠。

3.2 客户反馈

自 2010 年以来,持续跟踪和检测多台自行式高空作业平台交付客户后的使用情况,调查结果表明,应用了各类传感器的电控系统稳定性好、可靠性高。尤其发生人为误操作、碰撞损坏引起的故障时,安全控制能够主动限制危险的进一步发

展,及时警告操作者调整工作状态,有效避免了安全事故发生。

#### 4 结束语

根据自行式高空作业平台在使用过程中存在的危险,可能发生的事故等条件,电控系统采用了多种传感器,对整车的安全控制设置多重限制和保护,通过场地试验测试和客户使用反馈,验证了使用多种传感器的电控系统的稳定性和可靠性,得出以下结论:

(1) 通过优化电控系统的安全设计,合理使用各类传感器,可以有效保证整车的使用安全,避免安全事故发生。

(2) 基于减少产品成本和设计难度的考虑,产品应按实际需求使用传感器,例如对承载限制的功能,可通过增加裕度设计,包括增加平衡配重、提高设计承载能力、明确提示额定载荷等方法实现非自动保护;部分功能也可以不安装冗余传感器,只通过控制器软件进行控制。

(3) 使用多种传感器对自行式高空作业平台进行安全控制的措施,具有性能稳定、安全可靠等优点,而且故障率低,维修性好,适合在其他高空作业设备上使用和推广。

#### 参考文献:

- [1] 王飞. 高空作业平台国内外市场发展概述[J]. 建筑机械化, 2009, 30(12): 34-36.
- [2] 张磊庆. 国内外高空作业平台市场展望[J]. 建筑机械化, 2014, 33(4): 42-43.
- [3] Mobile elevating work platforms-Design calculations-Stability criteria - Construction safety-Examinations and tests: EN 280:2010[S].
- [4] 移动式升降工作平台设计计算、安全要求和测试方法: GB25849—2010[S].

- [5] MIRS J. Service Manual [Z]. Washington: Genie industries, inc. 2007.
- [6] DFFORD. Service and Maintenance Manual [Z]. Houston: JLG industries inc 2009.
- [7] KESKINEN E, ILTANEN M, SALONEN T, et al. Dynamics of training simulator for mobile elevating platforms [C]. The International Conference on Machine Automation ICMA2000, Osaka, Japan, 2001.
- [8] HUEY J R, SORESENSEN K L, SINGHOSE W E. Useful applications of closed-loop signal shaping controllers [J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(7): 836-846.
- [9] MIZUMOTO A I, CHEN B T, KUMONA M, et al. Adaptive output feedback control of general MIMO systems using multirate sampling and its application to a cart-crane system [J]. Automatica, 2007, 43(12): 2077-2085.
- [10] KIMA S K, KIM B J Y, LEE D H, et al. Automatic optimal design algorithm for the foundation of tower cranes [J]. Automation in Construction, 2011, 20(1): 56-65.
- [11] 金剑敏, 吴光荣, 汪晓波, 等. 高空作业车智能控制器的设计与开发[J]. 电子科技, 2010, 23(1): 88-90.
- [12] 周加永, 孟小净, 纪平鑫. 自行式高空作业车控制系统的设计[J]. 控制技术, 2014(5): 65-69.
- [13] 詹斌, 曾伟, 耿德斌, 等. 高空作业车防倾翻预警系统设计[J]. 专用汽车, 2012(5): 85-88.
- [14] 江剑华, 刘刚, 苑爱娟, 等. 高空作业平台作业斗称重装置的研究[J]. 工程机械, 2009, 40(7): 33-35.

作者简介: 高旭宏(1979—), 高级工程师, 博士研究生, 主要从事特种车辆总体设计。E-mail: gaohuhong@htxczgs.com

(上接第83页) 计真实图像的背景进行灰度校正,基本消除了表面图像的不均匀光照影响,与常用的图像校正方法进行比较,有更好的图像校正效果。

(2) 输送带表面图像故障检测算法将机器视觉与 PCNN 生物视觉相结合,检测出表面图像的故障区域,与常用的检测方法进行比较,消除了干扰信息,更清晰有效。

(3) 对于基于机器视觉的输送带故障在线监测系统采集的输送带不均匀光照表面图像,必须首先进行不均匀光照校正,然后进行故障区域检测,才能更好地检测出正确的故障区域。

#### 参考文献:

- [1] 李现国, 苗长云, 张艳, 等. 基于统计特征的钢丝绳芯输送带故障自动检测[J]. 煤炭学报, 2012, 37(7): 1233-1238.
- [2] 李召, 杨英华, 李智辉. 基于小波去噪结合 CVA-ICA 的故障检测方法的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2014(4): 80-84.
- [3] 李慧元, 姜心蕊, 徐国贤, 等. 基于直方图的图像增强技术在图像处理中的应用[J]. 科技信息, 2014(11): 84-85.
- [4] 吕卓纹, 王科俊, 邹国锋, 等. 基于改进 Gamma 校正的人脸光照补偿方法[C]. 第32届中国控制会议, 西安, 2013.
- [5] 张晞, 顾歆, 齐悦, 等. 输送带纵向撕裂差影法图像识别技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(11): 85-88.
- [6] 李泽潭, 苗长云, 李现国, 等. 基于机器视觉的输送带图像破损检测算法[J]. 天津工业大学学报, 2014, 33(3): 66-68.

- [7] LAND E. An alternative technique for the computation of the designator in the Retinex theory of color vision [J]. Proc. Nat. Acad. Sci. 1986, 83: 3078-3080.
- [8] LORENZO-GINORI J V. A method to determine the size of the structuring element in morphological correction of non-uniform illumination [C]. 2011 18th IEEE International Conference on Image Processing, Piscataway 2011: 1453-1456.
- [9] WANG W C, CUI X J. A background correction method for particle image under non-uniform illumination Conditions [C]. 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPPS), Dalian 2010: V1695-V1699.
- [10] ZHANG D N, PARK W J, LEE S J. Histogram partition based gamma correction for image contrast enhancement [C]. IEEE 16th International Symposium, Harrisburg 2012: 1-4.
- [11] 邓翔宇, 马义德. PCNN 参数自适应设定及其模型的改进[J]. 电子学报, 2012(11): 955-962.
- [12] 辛国江, 邹北骥, 李建峰, 等. 结合最大方差方差比准则和 PCNN 模型的图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(7): 1310-1316.

作者简介: 张凌宁(1990—), 硕士研究生, 主要研究方向为矿用输送带图像校正与故障检测。E-mail: tjzhanglingning@163.com

通讯作者: 苗长云(1962—), 教授、博士生导师, 主要研究方向为光电检测技术与系统、现代通信网络与系统等。

E-mail: miaochangyun@tjpu.edu.cn