

DOI: 10.3901/JME.2015.07.162

基于虚拟墙的汽车起重机吊装防碰撞技术*

任卫军^{1,2} 王 飞¹ 史先信² 焦生杰¹ 朱长建²

(1. 长安大学信息工程学院 西安 710064;

2. 徐州工程机械集团有限公司 徐州 221004)

摘要: 为减少汽车起重机在吊装作业过程中吊臂与作业区障碍物发生碰撞的事故, 建立障碍物分类模型, 采用吊臂臂头自主探测学习方法, 准确采集作业区障碍物的外形与位置信息。建立起起重机圆柱坐标系, 作业区按回转角度分成不同扇区, 扇区按距回转中心距离分成不同扇格, 以扇格精确存储作业区环境数据, 利用扇格数据生成吊装安全作业三维虚拟墙。以吊臂最近的 20 个时刻位置信息, 用加权线性回归模型预测下一时刻吊臂的动作与位置参数。针对吊臂的预测动作及与虚拟墙的不同距离, 采取不干预、限速、微动与禁止等吊臂控制策略。实际作业环境下的功能测试表明, 该系统能有效地防止吊臂与作业区障碍物发生碰撞。

关键词: 汽车起重机; 吊装作业; 防碰撞; 安全

中图分类号: TH213; U469

Anti-collision during Truck Crane Lifting Based on Virtual Wall

REN Weijun^{1,2} WANG Fei¹ SHI Xianxin² JIAO Shengjie¹ ZHU Changjian²

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064;

2. Xuzhou Construction Machinery Group Co., Ltd., Xuzhou 221004)

Abstract: To reduce collision accident occurred between the boom of truck crane and obstacles in work area during lifting operations. Based on obstacle classification model, the shape and location data of obstacles are collected accurately by adopting self-exploration way for boom head of crane. By establishing cylinder coordinate system of crane, the work area is divided into many sectors according to crane slewing angle, and then the sectors are divided into many fan grids based on the distance to the rotation center. Since obstacle data are stored precisely in the fan grids, the three-dimensional virtual walls of safe lifting operations are built by using these fan grids' data. The next boom's movement and position are predicted by the weighted linear regression model by using last 20 boom position data. Based on boom's movement trend and different distances to the virtual wall, the different boom control strategies of non-intervention, deceleration, micro-movement and prohibition are utilized. The function testing of actual operating environment demonstrate that the system could effectively prevent the collisions between the boom and obstacles of work area.

Key words: truck crane; lifting operation; anti-collision; safety

0 前言

起重机在建筑与运输行业被广泛使用, 但涉及起重机吊装作业过程的工业事故却频发。据公开资料统计, 我国因起重机事故造成的死亡人数如下: 2005 年 231 人, 2006 年 314 人, 2007 年 347 人, 在所有机械事故死亡人数中居首位^[1]。据美国劳工安

全与健康委员会统计, 从 1992 年到 2001 年期间, 在美国涉及起重机造成人员死亡事故就有 137 起^[2-3]。对这些事故原因调查发现, 操作不当占事故原因 48%, 其中观察不周导致的碰撞和起吊过载是主因^[4-5]。

为减少因操作不当造成的起重机事故, 人们从技术层面做了不懈努力^[6]。为防止起吊过载, 在起重机上安装力矩限制器, 当起吊重量超过额定负荷时, 起重机告警并采取相应保护措施^[7]。为防止在吊装过程中起重机与作业区的物体发生碰撞, 人们从吊装前的路径规划和吊装过程中的实时控制两个方面进行了研究。路径规划就是把起重机看作一个

* 中国博士后科学基金面上(2013M532003)、江苏省博士后集聚计划(2012097)和中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2011JC179)资助项目。20140420 收到初稿, 20141224 收到修改稿

多自由度的机器人^[8], 在其可配置空间内采用一定的算法寻找优化防碰撞路径^[9-10], 但采用的防碰撞搜索算法通常比较复杂, 无法在资源有限的车载控制器内实现。在吊装过程中, 通过在起重机与作业区内障碍物上安装各式传感器, 如全球定位系统^[11]、雷达、超宽带传感器^[12]、视频采集卡^[13]、无线远程射频卡、红外检测仪或三维激光扫描仪^[14-15]等, 检测起重机作业区内的人和物体以建立位置系统来实时地避免潜在的碰撞, 这种技术多应用于长时间在相对固定位置作业的塔式、桥式和履带式起重机。对于汽车起重机来说, 因其机动性强, 多用于频繁变更作业环境的吊装作业, 因此该技术对其并不适用。

2009 年汽车起重机在我国的销量就达 1.9 万辆^[16]。由于其作业环境变化频繁, 起重机操作员对吊装环境不熟悉, 在吊装作业过程中, 注意力通常集中在吊重上, 而忽视了臂架位置, 以致吊臂与障碍物(墙体、柱体、高压线等)发生碰撞, 导致高压触电、吊物坠落、翻车等恶性事故频发。本文对汽车起重机在吊装作业过程中的防碰撞技术进行了深入研究, 建立了障碍物分类模型, 利用吊臂臂头采集障碍物的位置与外形数据, 并以扇格方式进行存贮, 建立吊臂安全运行区间虚拟墙, 用三维图像实时跟踪吊臂与障碍物之间的相对位置, 采用自适应吊臂运动控制策略, 辅助操作员做出决策, 避免吊臂与作业区物体碰撞事故的发生。

1 防碰撞系统的硬件组成

汽车起重机吊装作业防碰撞系统是起重机智能控制的一个组成部分, 其硬件拓扑图如图 1 所示。

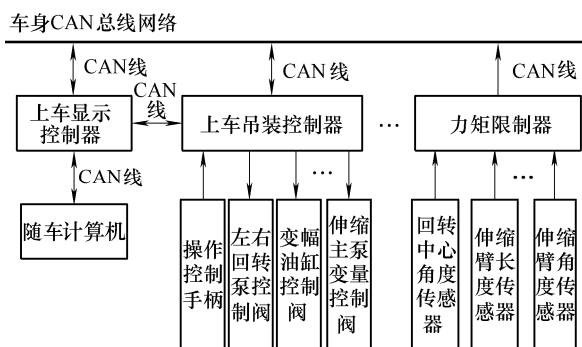


图1 防碰撞系统硬件拓扑图

上车吊装控制器承担着整个吊装过程控制, 任务繁重, 内部资源有限, 因此防碰撞控制策略由上车显示控制器来运行, 上车吊装控制器作为该策略的执行机构。上车吊装控制器通过 CAN 总线收到指令后, 结合当前操作控制手柄的状态, 向左右回

转泵控制阀、变幅油缸控制阀和伸缩主泵变量控制阀等液压执行部件发送控制脉冲, 完成相应的控制动作。为避免车身 CAN 总线网络拥堵延时, 在上车显示控制器与上车吊装控制器之间通过一根独立 CAN 总线连接。力矩限制器实时读取回转中心角度传感器、伸缩臂长度传感器和伸缩臂角度传感器等值, 为减轻 CAN 总线网络负载, 当传感器值的变化超过一定阈值时, 将传感器值送车身 CAN 总线网络。上车显示控制器从 CAN 总线网络读取传感器值, 即可确定当前吊臂准确位置, 执行防碰撞控制策略。随车电脑通过 CAN 总线读取上车显示控制器中存贮的作业区环境数据, 进行吊装作业模拟。

2 防碰撞系统的功能实现

整个系统功能流程图如图 2 所示。

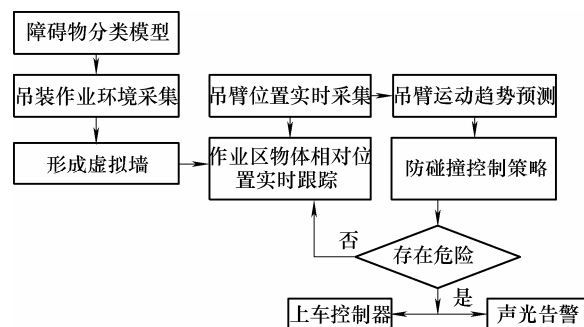


图2 防碰撞系统功能实现流程图

汽车起重机在吊装作业过程中, 作业环境变更频繁, 吊臂时刻处于运动之中, 为防止吊臂与作业区障碍物发生碰撞, 就必须采集到作业区障碍物的形状与位置数据, 对吊臂运动趋势做出预测, 实时确知障碍物与吊臂之间的相对位置, 执行相适应的控制策略。

2.1 作业区障碍物信息采集与存贮

对吊装作业区障碍物信息的采集, 有的采用红外测距仪, 但在室外 40 m 以外时, 误差大, 需要加反光板, 实际使用不现实; 有的采用图像识别技术, 但误差较大, 目前车载控制器还无法实时处理视频数据, 需要离线处理^[13-15]。因此, 采用起重臂自主探测学习的方法, 通过臂头接近障碍物, 获取障碍物外形与位置信息。

2.1.1 建立起重机圆柱坐标系

针对起重机吊装作业范围是一个圆柱的特点, 其半径是吊臂的最大长度, 高度是吊臂最大长度加车身高度。结合直角坐标系 (X, Y, Z) 与球面坐标系 (ρ, θ, ϕ) , 提出一种新的圆柱坐标系 (ϕ, d, h) 。新坐

标系如图 3 所示。

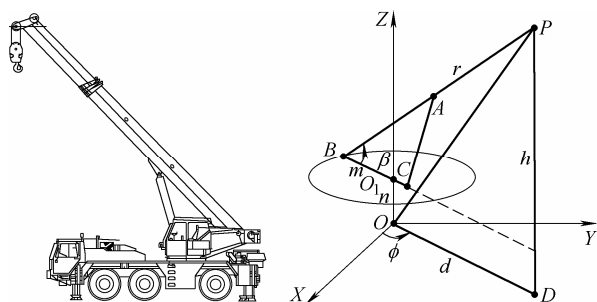


图 3 起重机圆柱坐标系

坐标系原点 O 选起重机回转中心在地面的投影, X 轴选起重机车身中轴线, X 轴正向指向起重机车头, Y 轴与 X 轴垂直, Y 轴正向与 X 轴正向逆时针夹角 90° 。则该坐标系中一点 $P(\phi, d, h)$, ϕ 表示点 P 在 XY 平面投影 D 所形成 OD 线与 X 正向轴的逆时针夹角, d 表示投影 D 到坐标原点 O 的距离, h 表示点 P 到投影 D 之间的高度。

表 1 以扇格记录吊装作业区环境数据表

夹角范围/(°)	区间						
	0~0.2 m	0.2~0.4 m	0.4~0.6 m	0.6~0.8 m	...	99.6~99.8 m	99.8~100 m
0~0.5	[0, 100]	[0, 100]	[5.8, 100]	[10.8, 100]	...	[100, 100]	[100, 100]
0.5~1.0	[0, 70]	[0, 70]	[10.8, 70]	[10.8, 70]	...	[100, 100]	[100, 100]
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
359.5~360.0	[100, 100]	[100, 100]	[100, 100]	[100, 100]	...	[100, 100]	[100, 100]

为平衡上车显示控制器内数据存贮容量与作业区环境数据的记录精度, 将作业区按转台转角每隔 0.5° 分成 720 个扇区, 每个扇区按每隔 0.2 m 总长为 100 m 分成 500 个扇格, 整个作业区分成 $720 \times 500 = 360\,000$ 扇格。每个扇格环境数据用两组数据记录, 分别表示在该扇格空间中吊臂可活动区域的上边界和下边界, 精度为 0.1 m, 每组数据整型化后用两个字节存贮, 该表需要存贮空间约为 1.4 MB。

数据表依次按扇区号、扇格号存贮, 对每个扇格数据的存取可按扇格号直接进行。如表 1 中第二行数据可解释为: 在转角 $0.5^\circ \sim 1.0^\circ$ 的扇区内, 离回转中心 0.4 m 范围内, 地面无障碍物, 顶部有离地面 70 m 高的悬挂障碍物, 如天花板、水平墙体等, 吊臂起升幅度不能超过 70 m; 在 0.4~0.8 m 范围内, 地面有 10.8 m 障碍物, 顶部有距地面 70 m 的悬挂障碍物。

初始化时, 每个扇格数据中的下边界初始化为 0, 上边界初始化为该型号吊车的最大臂长(本文填充 100)。该表是整个防撞系统的核心, 作业区环境数据采集就是填充这张表, 防撞控制时读取这张表来获取作业区环境信息。

对以点 P 为臂头的吊臂 BP 来说, 通过臂长 r , 仰角 β 与回转角度 ϕ 可描述其空间位置 $P(r, \beta, \phi)$ 。其中 B 为臂架与上车铰链点, C 为变幅缸与上车铰链点, A 为变幅缸与臂架铰链点, 臂末端 B 距回转中心 O 距离为 m 。车身高度为 n , 由于臂架俯仰铰链点 B 与上车回转中心 O 不在同一点。则 P 点坐标 $P(r, \beta, \phi)$ 与新坐标系下的坐标 $P(\phi, d, h)$ 的转换关系为

$$\phi = \phi \quad d = r \cos \beta - m \quad h = r \sin \beta + n \quad (1)$$

2.1.2 扇格化存贮吊装作业区环境数据

为精确记录吊装作业区障碍物数据, 把吊装作业区按回转角度划分为许多个扇区, 再把每个扇区依据到坐标原点 O 的距离划分为许多个扇格, 每个扇格记录其内部的环境数据, 划分得越细, 环境数据记录的精度越高。建立如表 1 所示的数据表, 记录每个扇格环境数据。

2.1.3 障碍物分类模型

起重机吊装作业环境复杂, 可能遇到各种各样的障碍物, 如电线、树木、建筑物等。为采集环境数据时操作简易, 依照障碍物外形大小, 分为墙体对象和普通对象。

墙体对象是指在起重机作业区内, 外形比较大、结构简单的障碍物, 如大型建筑物的墙体等, 若外形超过吊臂作业范围的墙体均可看作无限墙体, 构成吊装作业区基本环境。依墙体形状与位置, 将墙体对象分为水平墙体、垂直墙体、外倾斜墙体和内倾斜墙体四种。

普通对象是指在起重机吊臂最大作业范围内, 相互独立、外形较小且相对简单的障碍物, 如电线、树木、杆状物、柱状物、低矮物体等。将普通对象分为垂直着地物体、水平悬挂物体、内倾斜物体和外倾斜物体。外形复杂的障碍物可由若干个简单物体构成。

2.1.4 障碍物外形数据采集与存贮

当用户采集吊装作业区障碍物外形数据时, 依据障碍物外形选择合适的障碍物分类模型, 不同模型所需数据采集点的数量不同。如水平墙体只需采集一个数据点, 垂直墙体则需要采集两个数据点,

垂直着地物体需左边界、右边界、前边界、后边界以及高边界 5 个数据点, 对于倾斜物体除了垂直着地物体 5 个数据点外, 对于倾斜面再多测 3 个数据点。

采集时, 依据数据点的提示, 操作员操作吊臂使臂头接近障碍物的相应位置, 当位置恰当后, 操作员按下采集按钮, 系统自动记录当前吊臂的臂长 r 、仰角 β 和转角 ϕ 三个参数, 当障碍物所需数据点采集完成后, 系统自动将障碍物位置及外形数据填写到环境数据表中。

填充扇格数据时, 若下边界有值, 则取两者的最大值, 若上边界有值, 则取两者最小值。若转角度数为两量化角度之间, 如 73.8° , 为最大限度保证安全, 则向 73.5° 与 74° 两个扇区中均填充值, 同理, 若得的位置数值为两个扇格之间, 如 25.9 m , 则向 25.8 m 和 26.0 m 两个扇格均填充值。

以垂直墙体为例来说明如何填充数据表。对于垂直墙体, 操作吊臂使臂头沿着墙面采集两个点 $P_i(r_i, \beta_i, \phi_i)(i=1, 2)$, 依据坐标系变换公式(1), 可得到两个采集点桶形坐标系的值 $P_i(\phi_i, d_i, h_i)(i=1, 2)$ 。如图 4 所示, 其两点在 XY 平面垂直投影为 $Q_1(\phi_1, d_1)$ 和 $Q_2(\phi_2, d_2)$ 。通过 Q_1 与 Q_2 的直线 L 的极坐标系方程为式(2), 与最大作业半径圆的交点分别为 $Q_3(\phi_3, 100)$ 与 $Q_4(\phi_4, 100)$ 。

$$\begin{aligned} A &= d_1 \sin \phi_1 (d_2 \cos \phi_2 - d_1 \sin \phi_2) \\ B &= d_1 \cos \phi_1 (d_2 \sin \phi_2 - d_1 \sin \phi_1) \\ C &= \sin \phi_1 (d_2 \cos \phi_2 - d_1 \sin \phi_2) \\ D &= \cos \phi_1 (d_2 \sin \phi_2 - d_1 \sin \phi_1) \\ \rho &= (A - B) / (C - D) \end{aligned} \quad (2)$$

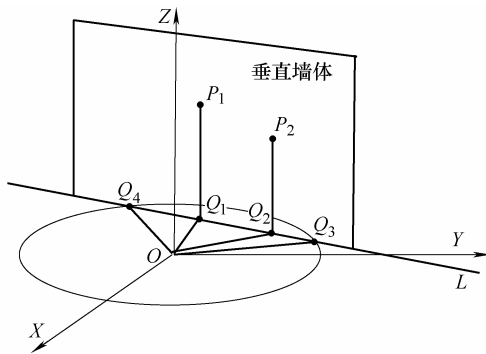


图 4 垂直墙体数据采集与填充示意图

填充数据表时, 以 ϕ_1 为基点, 以 0.5° 为步进减值, 代入式(2)的 ϕ 中, 计算 ρ 值, 若 $\rho \leq 100$, 即 $\phi_3 \leq \phi \leq \phi_4$ 将该 ϕ 值扇面从该 ρ 值到 100 的扇格下边界值均填充为 100, 表示在该区域吊臂不可到达, 直到计算的 ρ 值大于 100。再以 ϕ_1 为基点 0.5° 为步进增值, 即 $\phi_1 \leq \phi \leq \phi_4$ 按上述方法再次计算填充数值。

2.2 建立吊装作业虚拟墙

为避免在吊装作业过程中吊臂与障碍物发生碰撞, 就需要得到吊臂在当前状态下可活动(伸缩臂、左右回转、上下变幅)空间的边界值, 虚拟墙体, 即吊臂只要在这些虚拟墙体所限定区域内活动, 就能避免与障碍物发生碰撞。

2.2.1 吊臂伸臂虚拟墙计算

吊臂在不同转角与仰角的位置下, 可伸臂的最大长度是不同的, 因此, 需要确定吊臂在某一位置下可伸最大臂长。设吊臂当前位置的仰角为 β , 转角为 ϕ , 臂末端 B 距回转中心 O 距离为 m , 车身高度为 n 。设在数据表 1 中存贮在该转角 ϕ 下不同距离为 $d_i (d_i=0.2, 0.4, \dots, 100)$ 的扇格上限值为 U_i , 下限值为 B_i 。初始化 $i=0$, 臂头位置 $M_\beta=(m+d_i)/\cos \beta$, 当 $B_i \leq (m+d_i) \tan \beta + n \leq U_i$ 时, 说明臂头在此位置可以活动, 于是 $i=i+1$, 判断下一个位置, 直到该条件不成立或运算结束。条件不成立的前一个 M_β 就是此 (ϕ, β) 下的最大可伸臂长。同理, 可依据数据表 1 计算出吊臂在不同转角与仰角下的最大可伸臂长, 形成转角 ϕ 、仰角 β 与最大可伸臂长 $M_{(\phi, \beta)}$ 的三维数据表。

2.2.2 吊臂回转虚拟墙计算

吊臂回转时, 通常臂长与仰角保持不变。设吊臂当前状态转角为 ϕ 、仰角为 β 、臂长为 r , 左回转, 则下一个回转角为 $\theta=\phi+\omega$, ω 为回转步进角, 查上述的转角、仰角与最大可伸臂长数据表, 得到在转角 θ , 仰角 β 下的最大可伸臂长为 $M_{(\theta, \beta)}$, 若 $M_{(\theta, \beta)} \geq r$, 则当前仰角为 β 、臂长为 r 的吊臂可从转角 ϕ 左回转到转角 θ 下, 再令 $\theta=\theta+\omega$, 重复上述步骤直到 $M_{(\theta, \beta)} < r$ 或 $\theta-\phi \geq 360$, 则此时的 $\theta-\phi$ 就是吊臂在转角为 ϕ 、仰角为 β 、臂长为 r 状态下的可左回转的范围。同理, 令右回转的下一个转角为 $\theta=\phi-\omega$, 按上述过程, 就可得到可右回转的范围。

2.2.3 吊臂变幅虚拟墙计算

吊臂变幅时, 通常臂长与转角保持不变。设吊臂当前状态转角为 ϕ 、仰角为 β 、臂长为 r , 若上变幅, 设下一个仰角为 $\varphi=\beta+\delta$, δ 为变幅步进值, 查最大可伸臂长数据表, 得到在转角 ϕ , 仰角 φ 下的最大可伸臂长为 $M_{(\phi, \varphi)}$, 若 $M_{(\phi, \varphi)} \geq r$, 则当前转角 ϕ 、臂长 r 的吊臂可从仰角 β 上变幅到仰角 φ 下, 再令 $\varphi=\varphi+\delta$, 重复上述步骤直到 $M_{(\phi, \varphi)} < r$ 或 $\varphi \geq 85^\circ$, 85° 为目前起重臂最大仰角, 此时的 $\varphi-\beta$ 就是吊臂在转角 ϕ 、仰角 β 、臂长 r 状态下可上变幅范围。下变幅同理计算。

2.3 吊装作业实时防碰撞策略

依据吊臂当前运动轨迹, 对下一时刻吊臂运动

趋势和位置做出预测, 根据预测值执行相应的防撞控制策略。为了既能防止吊臂与障碍物发生碰撞, 又能保证控制过程柔性平滑, 将控制区分为正常区、减速警告区、微动控制区与禁止区。

2.3.1 吊臂运动趋势预测模型

将吊臂动作分为伸臂、缩臂、上变幅、下变幅、左回转、右回转与静止七种状态。循环记录吊臂最近 20 个时刻(间隔时间为 0.2 s)的位置信息, 其转角 ϕ_i 、仰角 β_i 与臂长 r_i , $i=0\sim 19$, $i=0$ 表示当前时刻, 数值权值为 20, $i=19$, 表示最远时刻, 权值为 1。由于吊臂运动惯性, 采用加权线性回归模型^[17]来预测吊臂动作。例如对 20 个臂长 r_i 数据进行拟合, 通过拟合直线的斜率判断吊臂伸缩臂动作, 并预测下一时刻臂长。同理通过 ϕ_i 数据可判断左右回转动作及下一时刻的回转角度, 通过 β_i 数据可判断上下变幅动作及下一时刻变幅角度。若三个预测值都变化微小时, 说明吊臂处于静止状态。

2.3.2 吊臂运动控制策略

当前时刻吊臂位置参数为转角 ϕ_0 、仰角 β_0 与臂长 r_0 , 若吊臂运动趋势预测模型预测吊臂为伸臂动作, 下一时刻臂长为 r_f 。则查询转角、仰角与最大可伸臂长三维虚拟墙数据表, 得到在此位置下最大可伸臂长为 $M(\phi_0, \beta_0)$, 则控制策略如下。

若 $M(\phi_0, \beta_0) - r_f \geq 5$ m, 为正常控制区, 按用户操作伸臂速度进行伸臂, 不向吊装控制器发送任何指令。

若 $4 \text{ m} \leq M(\phi_0, \beta_0) - r_f < 5 \text{ m}$, 为减速警告区, 向吊装控制器发送限速 50% 指令, 操作显示屏进行慢闪图像告警。吊装控制器收到该指令后, 把控制手柄上控制电流减少一半送伸缩主泵变量控制阀。

若 $3 \text{ m} \leq M(\phi_0, \beta_0) - r_f < 4 \text{ m}$, 为减速警告区, 向吊装控制器发送限速 25% 指令, 操作显示屏进行快闪图像告警。控制器收到该指令后, 把控制手柄上控制电流减少四分之三送伸缩主泵变量控制阀。

若 $2 \text{ m} \leq M(\phi_0, \beta_0) - r_f < 3 \text{ m}$, 为微动控制区, 向吊装控制器发送限速 10% 指令, 操作显示屏进行快闪图像告警, 并伴随声音告警。控制器收到该指令后, 把控制手柄上控制电流减少到十分之一送伸缩主泵变量控制阀。

若 $0 \leq M(\phi_0, \beta_0) - r_f < 1 \text{ m}$, 为禁止控制区, 由于伸缩主泵存在惯性, 向吊装控制器发送停止伸臂指令, 操作显示屏进行快闪图像告警, 并伴随急促声音告警。控制器收到该指令后, 切断送往伸缩主泵变量控制阀电流。

如果预测为缩臂动作, 则按用户操作的缩臂速度进行缩臂, 不向控制器发送任何指令。

同理, 如果预测出是变幅或回转动作, 分别查询上下变幅或左右回转三维虚拟墙数据表, 采用不同阈值, 进行正常区、减速警告区、微动区与禁止区的控制。如果是复合动作, 则分别依次按上述控制原理进行控制即可。

3 防碰撞系统功能验证

在硬件平台上, 选用奥地利 TTControl 公司生产的 eVision² 10.4 T 触摸式显示器, 作为汽车起重机上车显示控制器, HY-TTC 200 作为上车吊装控制器, 在 CoDeSys V3.4 集成环境下开发了防碰撞系统。并将该防碰撞系统应用到了徐工集团生产的全地面起重机和轮胎式起重机上, 其中开发的吊装作业区障碍物数据采集界面如图 5 所示, 系统可自动填充作业环境数据表与虚拟墙数据自动生成。



图 5 障碍物数据采集界面截图

考虑到显示器资源有限, 不能显示 3D 图形, 采用俯视图与侧视图两图结合, 实时动态显示吊装过程中吊臂与障碍物之间的相对位置, 并实时显示吊臂预测行为和临界告警, 运行界面如图 6 所示。

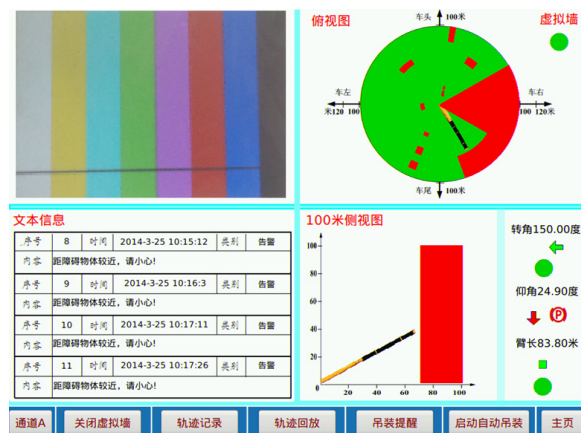


图 6 防碰撞系统监控界面截图

选择安装有该防碰撞系统的 QAY260、QAY400 全地面起重机和 RT80 轮胎式起重机各两台共 6 台

起重机, 在每台起重机上安装一台数据记录仪。选取两个测试场地, 每个测试场地选取 6 个吊装点, 其中一个吊装点如图 7 所示, 在该作业区内, 其障碍物有三个建筑物, 一堆建筑材料, 一台起重机和一个配电箱。随机从徐州工程机械集团有限公司调试中心选取 6 名驾驶员轮流分别操作每台起重机在每个吊装点进行一次吊装作业, 用数据记录仪记录起重机吊装过程中的数据, 总共可获取 $6 \times 6 \times 2 \times 6 = 432$ 组测试数据。



图 7 系统功能测试时的一个测试场地

当起重机进入吊装点开始测试时, 首先利用环境数据采集界面采集作业区环境数据, 再用人工方式采集环境数据, 将两个数据作比较来判断环境数据采集功能的性能。其次在每个作业区选取 3 个障碍物物体, 驾驶员操作吊臂逐步地向障碍物物体逼近, 观察并记录吊臂的运动状态, 来测试系统中的预测功能与防碰撞功能的性能。

测试过程持续了近两周时间, 测试完成后对这 432 组测试数据进行了统计分析, 结果显示: 在起重机作业区中 94.8% 的障碍物可以被采集, 障碍物位置信息数据采集误差小于 4.7%, 采集普通对象外形数据与实际外形的拟合度大于 86%, 吊臂运动趋势预测准确率大于 97.7%。操作员普遍反映控制过程比较柔和, 在整个测试期间, 没有发生一起吊臂与障碍物发生碰撞事故。统计数据也反映, 操作员对系统使用的熟练程度影响到障碍物数据采集的准确性与完整性。

4 结论

(1) 建立障碍物分类模型, 采用起重机吊臂臂头自主探测学习的方式, 可以准确采集作业区障碍物外形与位置信息, 不增加起重机成本。

(2) 建立起重机圆柱坐标系, 将作业区分成不同的扇区与扇格, 可准确记录作业区环境数据, 并依此数据可生成吊臂伸缩、变幅与回转三维虚拟墙。

(3) 依据吊臂最近运行轨迹, 采用加权线性回

归模型可准确预测下一时刻吊臂动作与位置参数, 依据到虚拟墙的不同距离, 采用不干预、限速、微动控制和禁止动作等控制策略, 保证控制过程柔和。

(4) 实际作业环境下的功能测试表明, 所开发的系统能有效防止吊臂与作业区障碍物发生碰撞。

参 考 文 献

- [1] 杨巧萍, 刘延雷. 国内起重机事故统计分析与预防对策[J]. 机械管理开发, 2011, 27(2): 139-141.
YANG Qiaoping, LIU Yanlei. Acoustics and counter measures on domestic hoist crane[J]. Mechanical Management and Development, 2011, 27(2): 139-141.
- [2] TAM V W Y, FUNG I W H. Tower crane safety in the construction industry: A Hong Kong study[J]. Safety Science, 2011, 49(2): 208-215.
- [3] AVIAD S, BENDY L. Identification and analysis of factors affecting safety on construction sites with tower cranes[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2009, 135(1): 24-33.
- [4] RAY A K. Analysis of crane and lifting accident in North America from 2004 to 2010[D]. Austin: The University of Texas, 2011.
- [5] XU Gening, JIANG Fan. Safety assessment on the crane based on FAHP[J]. Journal Safe Environment, 2010, 10(2): 196-200.
- [6] 张义民. 机械可靠性设计的内涵与递进[J]. 机械工程学报, 2010, 46(14): 168-188.
ZHANG Yimin. Connotation and development of mechanical reliability-based design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(14): 168-188.
- [7] LI Junqiu, JIA Yang. Design and control on automobile crane torque limiter[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 201(3): 657-660.
- [8] GAO Feng, WANG Guofu, CUI Ying, et al. Dynamic modeling and analysis of 9-DOF omnidirectional legged vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 24(4): 515-521.
- [9] 贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 等. A*算法的空间机械臂避障路径规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(13): 109-115.
JIA Qingxuan, CHEN Gang, SUN Hanxu. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(13): 109-115.
- [10] CHENG Zhang, AMIN H, TAREK M Z. Cell-based representation and analysis of spatial resources in construction simulation[J]. Automation in Construction, 2007, 16(5): 436-448.

- [11] WU H, TAO J, LI X, et al. A location based service approach for collision warning systems in concrete dam construction[J]. Safety Science, 2013, 51(1): 338-346.
- [12] ZHANG C, HAMMAD A, RODRIGUEZ S. Crane pose estimation using UWB real-time location system[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 26(5): 625-637.
- [13] YANG J, ARIF O, VELA P A, et al. Tracking multiple workers on construction sites using video cameras[J]. Advance Engineering Information, 2010, 24(4): 428-434.
- [14] YE X. Design of embedded infrared detection-based anti-collision system for bridge cranes[J]. Hoisting and Conveying Machinery, 2010, 2: 23-25.
- [15] VAUGHAN J, SMITH A, KANG S. Predictive graphical user interface elements to improve crane operator performance[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 2011, 41(2): 323-330.
- [16] 解晋, 张思淼. 2009 年中国汽车起重机市场预测分析[J]. 专用汽车, 2009, 34(4): 14-19.
- XIE Jin, ZHANG Simiao. The forecast analysis of Chinese truck crane market in 2009[J]. Special Purpose Vehicle, 2009, 34(4): 14-19.
- [17] JOHN L. A primer for biomedical scientists on how to execute model II linear regression analysis[J]. Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology, 2012, 39(4): 329-335.
-
- 作者简介: 任卫军(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士研究生。主要研究方向为起重机运行安全。
E-mail: wjren@chd.edu.cn
- 王飞, 男, 1989 年出生。主要研究方向为机械电器化。
E-mail: wangwang0122@163.com
- 史先信, 男, 1959 年出生, 研究员。主要研究方向起重机整体设计。
E-mail: shixiangxing@126.com
- 焦生杰, 男, 1956 年出生, 博士研究生导师。主要研究方向筑路机械整体设计。
E-mail: jsj@chd.edu.cn
- 朱长建, 男, 1973 年出生, 高级工程师。主要研究方向起重机电器控制。
E-mail: zhuchangjianxz@163.com