

# 门式起重机安全监控管理系统设计\*

## Design of Security Monitoring and Management System for Gantry Crane

卞永明<sup>1</sup> 阳 刚<sup>1</sup> 李 军<sup>2</sup>

(1 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804;

2 内蒙古交通设计研究院有限责任公司, 呼和浩特 010010)

**摘 要:** 从集装箱堆场起吊工作的防碰撞问题和堆场管理的需求出发, 研究并设计了起重机安全监控管理系统。系统采用分布式结构, 由起重机电控系统、防碰撞安全系统和监控管理系统组成, 使用 TIA Portal V14、力控组态软件等工具编写基于虚拟墙的防碰撞算法和监控管理软件, 实现对起重机运行状态和堆场信息的监控与管理。系统功能完善, 操作简便, 具有较广阔的应用前景。

**关键词:** 起重机 分布式结构 防碰撞算法 监控管理

**DOI:** 10.16413/j.cnki.issn.1007-080x.2018.10.007

**Abstract:** Starting from the anti-collision problem of container yard hoisting and the requirement of yard management, the crane safety monitoring and management system is studied and designed. The system adopts distributed structure which consists of crane electronic control system, anti-collision safety system and monitoring management system. The anti-collision algorithm that based on virtual wall and the monitoring management software are developed by TIA Portal V14, forcecontrol configuration software and other tools to realize the monitoring and management of crane status and yard information. The system has perfect functions, simple operation and broad application prospects.

**Key words:** crane distributed frame anti-collision algorithm monitoring and management

### 0 引 言

自 20 世纪 70 年代以来, 集装箱运输逐渐成为我国货物运输和开展国际贸易的重要运输方式之一<sup>[1]</sup>。集装箱运输依赖起重设备, 而近年来集装箱起重机的事故发生率呈逐年上升趋势<sup>[2]</sup>,

事故多为集装箱在吊装过程中的相互碰撞。司机违规操作、疲劳驾驶, 地面人员违章指挥, 起重机自身设备故障等问题都有可能引起碰撞事故的发生<sup>[3]</sup>。因为集装箱巨大的体积和物资储量, 碰撞事故经常造成严重的经济损失或人员伤亡,

\* 基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项。

作者简介: 卞永明 1966 年生, 博士研究生, 教授。主要研究方向为实时网络控制理论。

阳 刚 1994 年生, 硕士研究生。主要研究方向为机械设计及理论。

李 军 1980 年生, 硕士研究生, 高级工程师。主要研究方向为钢结构桥梁设计。

因此如何保障集装箱堆场起重机的工作安全并对集装箱堆场进行有序管理,已成为亟待解决的问题。从生产厂家直接购买的起重设备仅提供载荷和力矩限位等基本保护措施<sup>[4]</sup>,无法防范起吊工作中的碰撞风险以及其他各类突发状况,更无法有效杜绝危险操作和错误指令、对起吊工作流程和堆场集装箱进行规范管理。因此,为了防止重大事故的发生,保证堆场起吊工作安全有序进行,减少因事故造成的人员和经济损失<sup>[5]</sup>,非常有必要开发一套可靠性和实时性高、功能强大、使用便捷的安全监控管理系统。

针对集装箱堆场常用的集装箱门式起重机设计并构建了分布式的安全监控管理系统,在满足起重机电控输出和运行状态采集的基础上,编写基于虚拟墙的防碰撞算法和监控管理软件,消除起重机工作过程中的碰撞隐患,完成集装箱堆场在远程和本地的同步监管,进而实现对不同堆场区域、多个起重机工作的统一调配与管理。

1 系统结构与功能

起重机安全监控管理系统主要由起重机电控系统、防碰撞安全系统和监控管理系统组成。其中起重机电控系统和防碰撞安全系统位于起重机设备上;监控管理系统由位于起重机设备上的本地客户端与位于堆场总指挥中心的远程服务器两部分组成,二者通过 Internet 网络完成数据通信。安全监控管理系统的总体结构如图 1 所示。

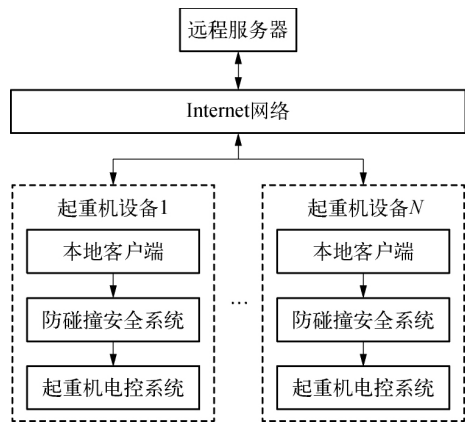


图 1 系统总体结构

起重机电控系统根据控制逻辑将操作指令转化为起重机电作信号输出,同时采集现场的状态数据并发送到防碰撞安全系统。防碰撞安全系统根据集装箱分布及吊钩位置,使用基于虚拟墙的防碰撞算法计算出起重机吊钩的实时安全工作范围,在有碰撞危险时自动向电控系统输出急停或减速动作,并将当前堆场的工作信息反馈到监控管理系统。监控管理系统使用双端监控管理的模式,本地客户端与远程服务器分别面向起重机操作人员与远程指挥人员进行开发,各自承担系统的部分功能模块,通过 Internet 网络完成数据的共享与存储,协作完成本地与远程的同步管理工作。

2 起重机电控系统

2.1 系统硬件结构与功能

起重机电控系统位于起重机电控房与操作室内,使用可编程控制器(programable logic controller, PLC)完成起重机状态信号的采集和基本动作逻辑的实现。电控系统由大车 PLC、小车 PLC、操作室 PLC、通信转换 PLC 和各类传感器及继电器组成,系统硬件配置如图 2 所示。

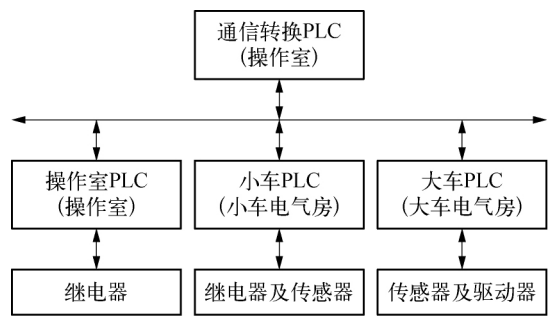


图 2 起重机电控系统硬件配置

操作室 PLC 采集司机下达的控制指令,根据控制逻辑生成动作指令,并将指令传递到大车 PLC、小车 PLC;大车 PLC、小车 PLC 根据指令输出动作,同时采集起重机各电气设备的状态信息;通信转换 PLC 收集指令和状态信息,封装整理为指令字与状态字并发送到安全监控终端。

2.2 N : N 网络通信

为便于电控系统内部的数据传输,选用三菱

FX 系列 PLC 作为控制器,构建 N:N 网络进行通信。N:N 网络通信是三菱 FX 系列 PLC 特有的数据通信方式。N:N 网络基于 RS485 总线,采用半双工通信,波特率固定为 38 400 bps,网络中各节点间的距离最大为 500 M,最多可并行连接 8 台 FX 系列 PLC 进行数据通信。N:N 网络中的所有站点共享相同的 M 区位数据寄存器和 D 区字节数据寄存器。每个站点只能向数据寄存器内规定的发送区写入数据,网络中任意站点的发送区数据会在系统运行时自动共享到其他站点,完成数据同步。在起重机电控系统中,将操作室 PLC 设置为主站,其余均为从站,各站点通信设置如图 3 所示。

操作室PLC 站点ID:0 (主站)	大车PLC 站点ID:1 (从站)	小车PLC 站点ID:2 (从站)	通信转换PLC 站点ID:3 (从站)
M 1 000~1 063 D 0~7	M 1 000~1 063 D 0~7	M 1 000~1 063 D 0~7	M 1 000~1 063 D 0~7
M 1 064~1 127 D 10~17	M 1 064~1 127 D 10~17	M 1 064~1 127 D 10~17	M 1 064~1 127 D 10~17
M 1 128~1 191 D 20~27	M 1 128~1 191 D 20~27	M 1 128~1 191 D 20~27	M 1 128~1 191 D 20~27
M 1 448~1 511 D 70~77	M 1 448~1 511 D 70~77	M 1 448~1 511 D 70~77	M 1 448~1 511 D 70~77

图 3 N:N 网络通信设置

### 3 防碰撞安全系统设计

#### 3.1 防碰撞安全系统组成

防碰撞安全系统由防碰撞控制器与位置编码器构成。位置编码器采集起重机各运动机构的实时位置,协助防碰撞控制器计算准确的吊钩中心位置坐标。防碰撞控制器选用综合性能稳定、系统可扩展性强的西门子 PLC S7 1200,使用 TIA Portal V14 进行程序开发。程序运行时保持与起重机电控系统和监控管理系统的数据互通,使用基于虚拟墙的防碰撞算法,结合各方数据计算当前起重机吊钩的安全运动范围,在超出安全范围时向监控管理系统输出报警信号,并向起重机电控系统传递减速或急停指令。

#### 3.2 防碰撞算法

##### 3.2.1 算法流程

防碰撞算法是整个系统的重点之一,为计算集装箱吊钩在工作时的安全活动区域,需要得到当前状态下的可活动(前后进给、左右进给、上升和下降)空间的边界值,建立虚拟墙体限制吊钩的活动。算法的主要流程如图 4 所示。

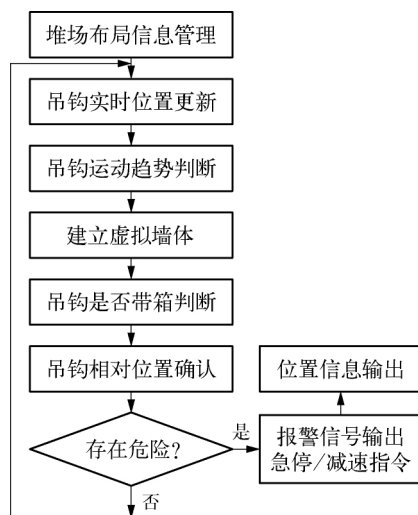


图 4 防碰撞算法流程

防碰撞算法激活后,首先从远程服务器读取堆场的集装箱分布数据,对堆场的布局信息进行更新。信息更新完成后,根据起重机传感器的位置反馈值确定吊钩的位置,并根据起重机操作指令判断吊钩的运动趋势。综合以上信息计算吊钩当前状态下的活动边界,建立虚拟墙体,最后判断吊钩是否为带箱状态,计算并输出吊钩与虚拟墙体之间的相对位置,判断是否满足安全距离,并在不满足要求时向起重机电控系统和监控管理系统输出应急指令与报警信号。

##### 3.2.2 堆场布局信息管理

系统使用四维数组  $\text{Box\_Stack}[n][i][j][k]$  来记录各堆场集装箱的空间布局。数组下标  $n$  表示堆场的编号,  $i$  表示集装箱行数,  $j$  表示集装箱列数,  $k$  表示集装箱层数,数组元素表示堆场内对应位置集装箱的 ID。如  $\text{Box\_Stack}[1][1][2][3]=123456$ ,表示 1 号堆场第一行第二列第三层

有 ID 为 123456(若为 0 则表示该处无集装箱)。空间布局数组储存在系统的远程服务器上,远程服务器按照堆场编号将集装箱布局信息传递到对应堆场的本地客户端与防碰撞控制器。防碰撞控制器接收自身所在堆场的布局信息后,为方便算法对于位置信息的提取,将布局信息整理为位置信息矩阵  $K$ ,矩阵的元素  $k_{i,j}$  代表堆场第  $i$  行第  $j$  列摆放的集装箱层数。

### 3.2.3 吊钩实时位置更新

防碰撞控制器根据位置信息矩阵  $K$  提取堆场各行、列、层的集装箱分布情况。结合堆场与吊钩的实际尺寸与吊钩中心位置坐标  $(X, Y, Z)$  转化为吊钩轮廓位置集合  $\text{Position}\{i_F, i_B, j_L, j_R, k_D\}$ ,其中  $i_F, i_B, j_L, j_R$  分别表示吊钩的前、后、左、右侧所在的行或列,  $k_D$  表示吊钩底部高度坐标。如图 5 所示。

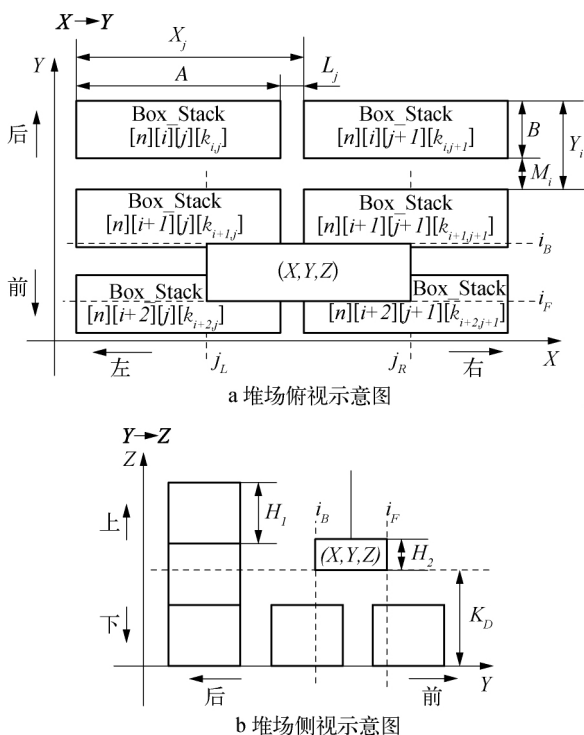


图 5 吊钩位置转换示意图

根据吊钩实际尺寸,提取出吊钩前、后、左、右侧的位置坐标  $Y_F, Y_B, X_L, X_R$ (吊钩的长、宽可近似等于集装箱统一尺寸):

$$X_R = \left(X + \frac{A}{2}\right); X_L = \left(X - \frac{A}{2}\right);$$

$$Y_F = \left(Y + \frac{B}{2}\right); Y_B = \left(Y - \frac{B}{2}\right).$$

测量各行列之间的间隔  $M_i, N_j$ ,使用  $Y_i, X_j$  表示堆场各行、列的总宽度 ( $I, J \geq 1$ ):

$$X_j = A + L_j; Y_i = B + M_i$$

从  $i = 1, j = 1$  开始,将吊钩的各侧实际位置与堆场前  $i$  行、 $j$  列的总宽度进行对比,计算差值:

$$Y_F^i = Y_F - \sum_1^{i-1} Y_i = \left(Y + \frac{B}{2}\right) - \sum_1^{i-1} Y_i;$$

$$Y_B^i = Y_B - \sum_1^{i-1} Y_i = \left(Y - \frac{B}{2}\right) - \sum_1^{i-1} Y_i;$$

$$X_L^j = X_L - \sum_1^{j-1} X_j = \left(X - \frac{A}{2}\right) - \sum_1^{j-1} X_j;$$

$$X_R^j = X_R - \sum_1^{j-1} X_j = \left(X + \frac{A}{2}\right) - \sum_1^{j-1} X_j.$$

当  $Y_F^i, Y_B^i, X_L^j, X_R^j$  首次为负时,分别记录  $i, j$  的值,记为  $i'_F, i'_B, j'_L, j'_R$ ,进而求得吊钩的前、后、左、右侧所在的行、列  $i_F, i_B, j_L, j_R$ :

$$i_F = i'_F - 1; i_B = i'_B - 1;$$

$$j_L = j'_L - 1; j_R = j'_R - 1.$$

最后将吊钩中心高度坐标  $Z$  转化为吊钩底部高度坐标  $k_D$ :

$$K_D = Z - H_2.$$

### 3.2.4 虚拟墙体的建立

吊钩的行进方向决定虚拟墙体的朝向和计算方法。根据起重机电控系统的操作指令,判断吊钩的预期行进方向。建立起重机当前状态在  $X, Y$  方向上的二维虚拟墙,计算虚拟墙的位置坐标。二维虚拟墙体的计算及其示意分别如表 1 和图 6 所示。

表1 虚拟墙体计算方法

行进方向	虚拟墙	行/列	位置坐标
左	WallX	$j_L - 1$	$\sum_1^{j_L-1} X_j$
右	WallX	$j_R + 1$	$\sum_1^{j_R+1} X_j$
前	WallY	$i_F + 1$	$\sum_1^{i_F+1} Y_i$
后	WallY	$i_B - 1$	$\sum_1^{i_B-1} Y_i$

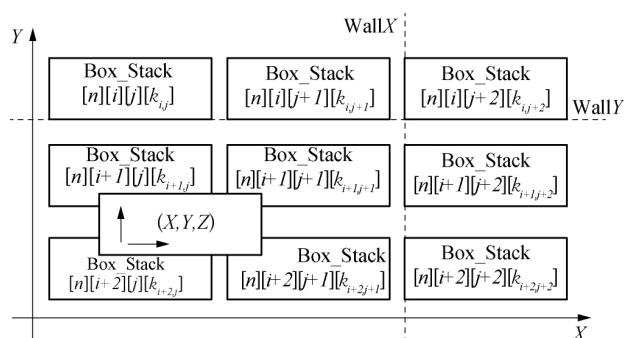


图6 二维虚拟墙体示意

吊钩在Z方向的虚拟墙与吊钩当前位置上的集装箱层数有关。根据吊钩轮廓位置集合  $\text{Position}\{i_F, i_B, j_L, j_R, k_D\}$ ，结合位置信息矩阵  $K$  构建吊钩在Z方向上的虚拟墙 WallZ 及其坐标  $Z_{\text{Wall}}$ ，完成三维虚拟墙的建立：

$$Z_1 = k_{i_B, j_L} \times H_1; \quad Z_2 = k_{i_B, j_R} \times H_1;$$

$$Z_3 = k_{i_F, j_L} \times H_1; \quad Z_4 = k_{i_F, j_R} \times H_1。$$

$$Z_{\text{Wall}} = \text{Max}\{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}。$$

### 3.2.5 相对位置跟踪与危险判据

完成虚拟墙建立之后，应用防碰撞算法，比较吊钩的轮廓位置坐标  $Y_F, Y_B, X_L, X_R, k_D$  与虚拟墙位置坐标之间的相对距离  $l_X, l_Y, h$ ，根据预先设置的危险判据来确定算法的输出。在带箱和空载状态下，吊钩在Z方向的高度不同，因此确定相对位置之前需要根据起重机电控系统的操作指令判断当前状态下吊钩是否处于夹紧状态。相对位置的计算以及危险的判据分别如图7、表2所示。

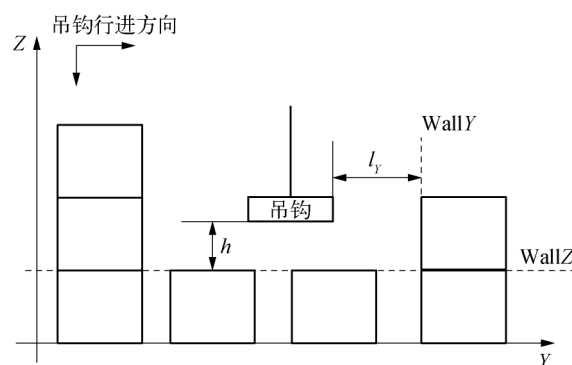


图7 相对位置计算

表2 危险判据

	$l_X, l_Y > 1 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < l_X, l_Y < 1 \text{ m}$	$0.2 \text{ m} < l_X, l_Y < 0.5 \text{ m}$
$h > 0.5 \text{ m}$	$V = 100\%$	$V = 50\%$	$V = 10\%$
$0.3 \text{ m} < h < 0.5 \text{ m}$	$V = 50\%$	$V = 10\%$	$V = 10\%$
$0.1 \text{ m} < h < 0.3 \text{ m}$	$V = 10\%$	$V = 10\%$	$V = 0\%$

## 4 监控管理系统设计

### 4.1 监控管理系统组成

监控管理系统由本地客户端与远程服务器组成，分别搭载监控管理软件的本地端与远程端，通过配合协作实现系统功能。本地客户端面向起重机操作工开发，选用便携式工业平板电脑作为硬件平台，主要负责显示当前堆场的各类信息，并作为远程端与防碰撞安全系统之间的数据收发中转。远程服务器面向堆场指挥人员开发，使用任意计算机作为硬件平台，主要负责多堆场工作的远程统一监管以及系统历史数据的存储与管理。

### 4.2 监控管理软件开发环境

监控管理软件使用力控组态软件进行开发，力控组态软件的系统结构如图8所示，由工程管理器、人机界面系统、实时数据库、IO驱动程序及其他扩展组件构成。实时数据库是系统的核心，各类组件的工作都依赖实时数据库进行开展。



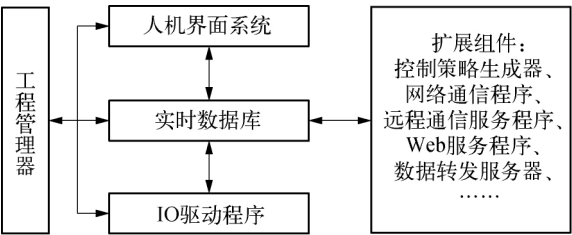


图 8 力控组态软件结构

监控管理软件通过 Modbus 通信协议与防撞碰撞控制器实现通信,完成现场实时数据的采集;借助实时数据库组件完成后台数据的处理以及与外部数据库的交互;人机界面系统完成显示窗口的组态设计与运行,为起重机操作人员提供交互接口;使用扩展组件中的网络通信程序配合实时数据库搭建通信网络,完成监控管理系统内部的数据互通。

4.3 人机界面编写

人机界面作为用户与程序交互的接口,是程序功能的直观体现,监控管理软件的本地端与远程端各自承担系统的部分功能,二者配合实现系统的设计需求。监控管理软件的人机界面设置如图 9 所示。

本地端界面包括防撞预警页、指令管理页与状态监控页,功能侧重于起重机与堆场的安全监控。防撞预警页负责预防和处理堆场工作过程中的集装箱碰撞风险,通过绘制堆场局部示意图的方式,显示当前坐标范围内吊钩和堆场集装箱的相对位置情况,并在距离过近时闪烁危险预警信号灯,根据危险等级弹出相应的操作提示。指令管理页负责协助远程进行指令下达,制订完善的任务发布流程,通过指令确认和完成反馈,规范堆场工作管理。状态监控页负责显示起重机的基本状态和操作指令,使用各类指示灯反映起重机当前的动作与状态,包括各机构行进方向、编码器位置、驱动系统故障信息等,同时设置工作时长与载荷监控模块,防止疲劳操作,杜绝超载危险。

远程端界面包括堆场选择页、数据操作页、

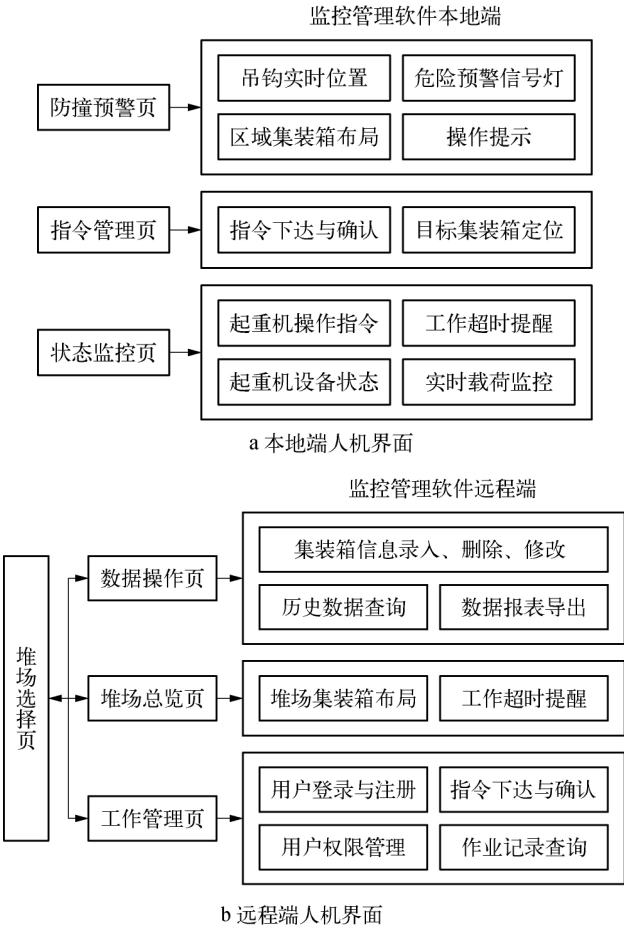


图 9 人机界面设置

堆场总览页与工作管理页,功能侧重于多堆场工作的统筹与管理。堆场选择页固定在软件侧边栏,便于用户进行堆场的快捷切换。数据操作页用于进行各堆场集装箱数据的增删与修改,并向用户提供数据储存、查询与导出功能。堆场总览页负责堆场布局的显示与工作状态监控,使用示意图和表格两种不同的形式反映集装箱的摆放信息。工作管理页负责堆场工作的总体管理,包括指令下达与确认、用户权限审查与授予及工作记录查询等功能。

4.4 实时数据库的网络通信

实时数据库是力控组态软件的核心组件,负责处理其他组件所需的系统后台数据。监控管理软件借助实时数据库提供的接口实现堆场数据的处理、存储以及本地与远程数据的

共享。

实时数据库在力控的网络应用中被称为数据源。力控组态软件支持分布式网络结构,多个力控应用软件可以分布运行在网络的多个节点上,各节点的数据源通过网络通信程序相互链接,网络中任意节点的任意组件都可以访问位于其他节点的数据源。为本地组件提供数据的,被称为本地数据源,反之则称为远程数据源,如图10所示。

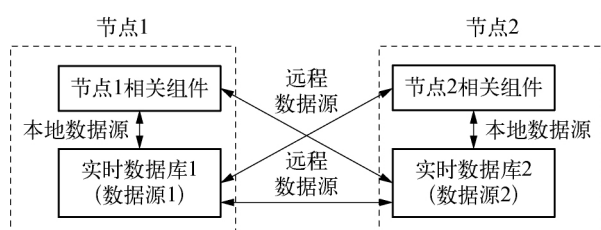


图10 数据源分类

完成节点数据源的链接需要进行节点配置和数据源配置两个步骤。在监控管理系统中,将软件的本地端与远程端接入同一局域网络,在节点配置中输入本机与网络节点的IP地址及网络端口,链接网络节点后在数据源配置中选择本机组件需要使用的节点与节点数据源,完成网络数据共享。

## 5 结束语

整个起重机安全监控管理系统采用分布式结构,系统各部分分别负责起重机动作输出、防碰撞计算与监控管理功能的实现,通过Modbus、Internet网络等方式完成内部的数据通信,最终呈现给用户的是一个简洁直观的人机界面,同时辅助图片、报表、信号灯等方式向用户提供相关信息与数据。该系统解决了集装箱起吊过程中的安全防碰撞问题,满足了集装箱堆场远程和本地端同步监控与统一管辖的设计需求,具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 符敦鉴.岸边集装箱起重机[M].湖北科学技术出版社,2007.
- [2] 杨辉,刘海龙.塔式起重机远程安全监控管理系统设计[J].自动化仪表,2012,33(10):27-29.
- [3] 杨巧萍,刘延雷.国内起重机事故分析与预防对策[J].机械管理开发,2011(2):140-141.
- [4] 韩利钧,张优,姚军.塔式起重机安全监控技术的研究与应用[J].建筑安全,2011(3):46-48.
- [5] 王仁群,殷晨波,张淞,等.基于CAN总线的塔机安全监控系统的设计[J].仪表技术与传感器,2010(4):48-51.