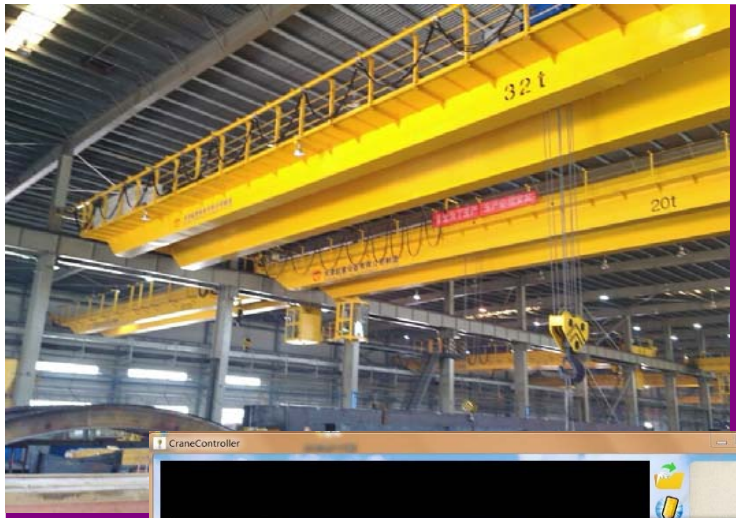


安全高效自动桥式吊车关键技术与系统集成

方勇纯

南开大学

Nankai University

汇报提纲

- 一、研究背景介绍
- 二、主要研究思路
- 三、整体完成情况
- 四、主要创新成果
- 五、系统集成测试

研究背景

桥式吊车是一种十分常见的装配运输工具，它广泛应用在工业生产线和建筑工地等场所。

材料搬运

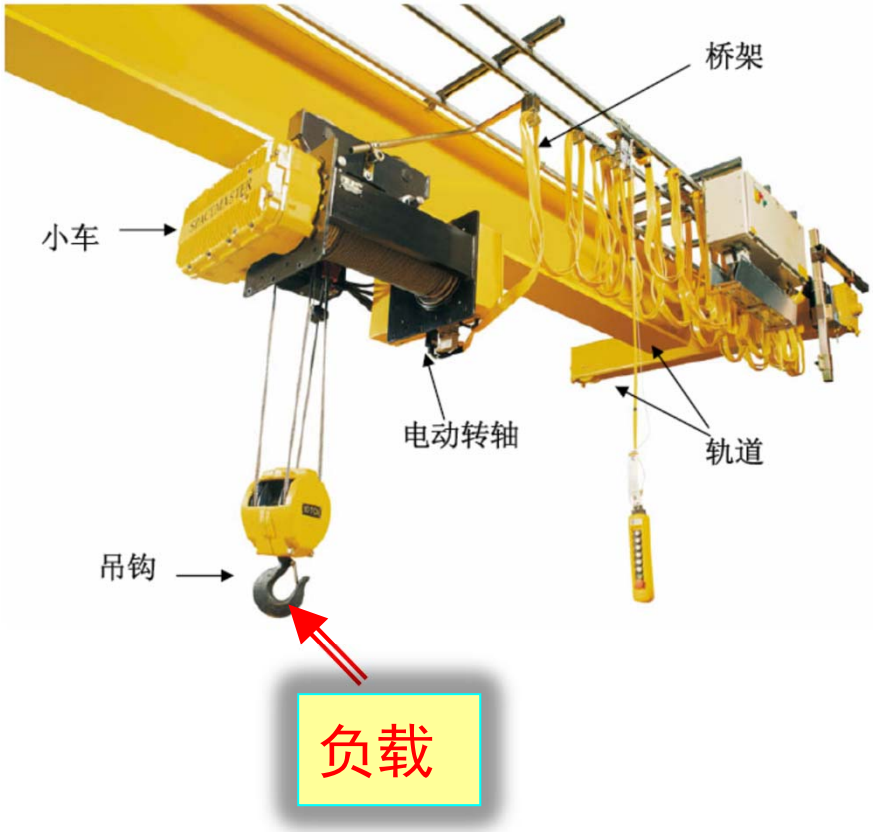
钢厂

道路建设

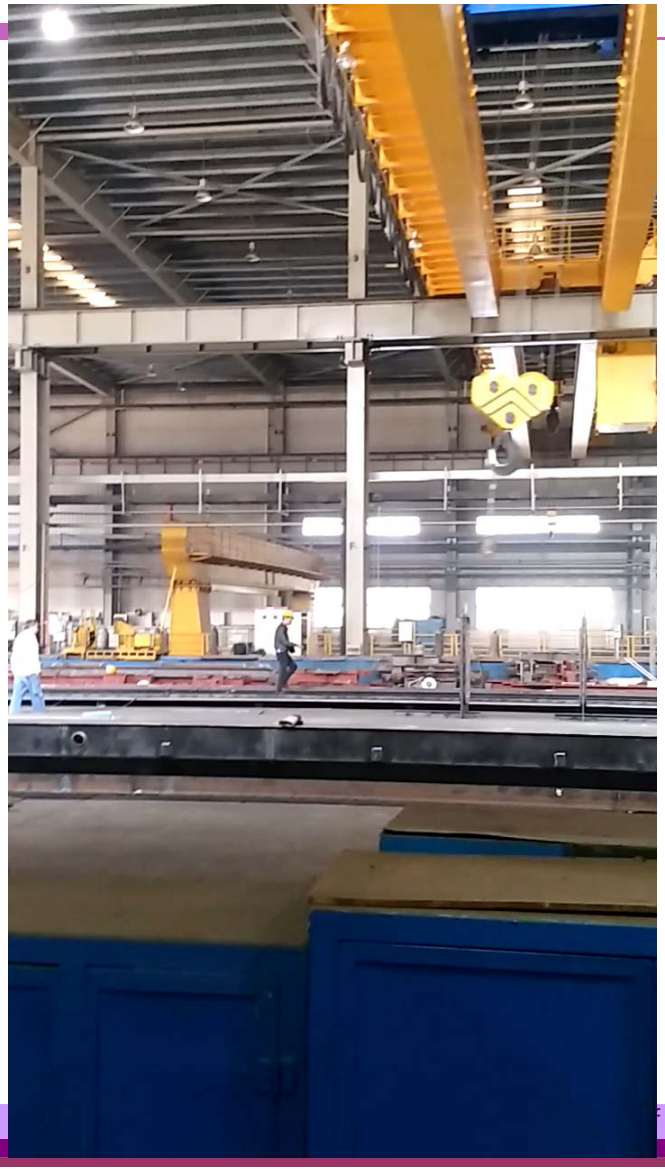
建筑

非线性欠驱动吊车

- 欠驱动特性：控制量少于自由度
- 台车加减速会引起负载的摆动，由于欠驱动特性，负载的摆动无法直接实施控制。
- 吊车操作目标
  - 台车快速精确定位
  - “无摆”或“微摆”



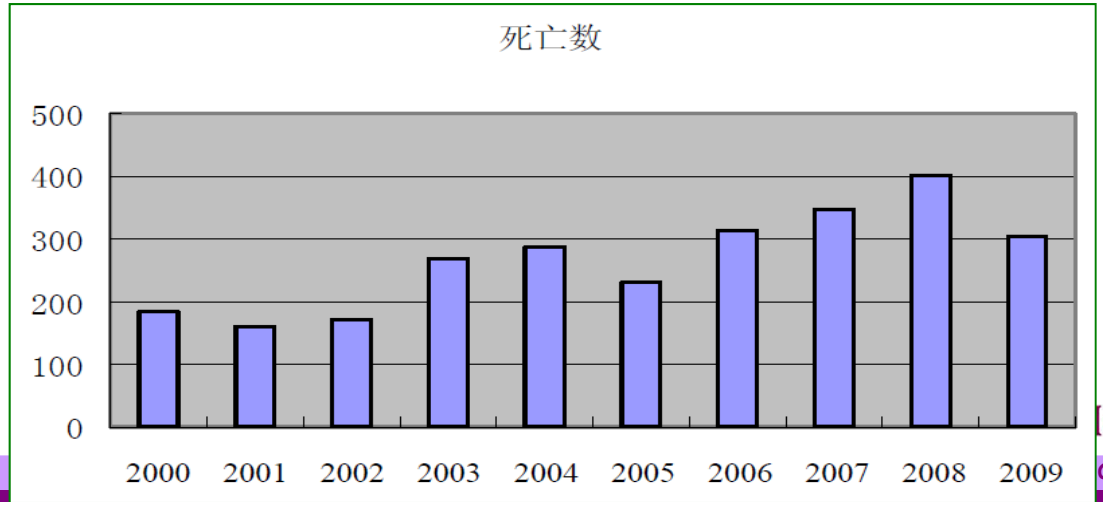
人工操作吊车录像



人工操作吊车的主要问题

现在一般是通过有经验的工人来操作吊车

- 工作效率低
- 定位准确度不高，难以应用在核电场合
- 人工操作安全系数低，伤亡事故频发
  - ◆国内统计：吊车作业伤亡事故占很大比率
  - ◆美国统计：年均死亡300~400人，死亡人数逐年上升



欠驱动吊车研究意义

- 欠驱动吊车研究具有很好的理论价值和实际应用前景。
  - 非线性复杂系统的分析与建模
  - 多变量、强耦合、非线性欠驱动系统的控制问题
  - 非线性系统的暂态性能分析：确保非线性欠驱动系统的暂态性能，这与倒立摆等系统完全不同。

- 提高运输效率，经济效益良好。
- 降低事故率，减少人员伤亡。
- 缓解吊车操作人员严重不足的问题。

国内外主要研究单位

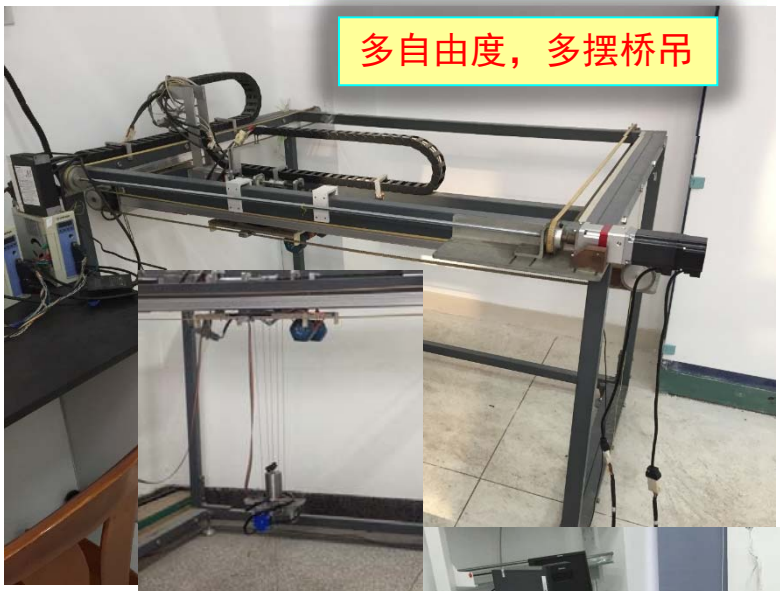
国外	国内
美国佐治亚理工大学	南开大学
[redacted]	中科院自动化所
德国Ulm大学	哈尔滨工业大学
日本九州工业大学	上海交通大学
韩国科学技术研究院	台湾清云科技大学
韩国亚洲大学	山东建筑大学
⋮	⋮

南开大学自动吊车课题组

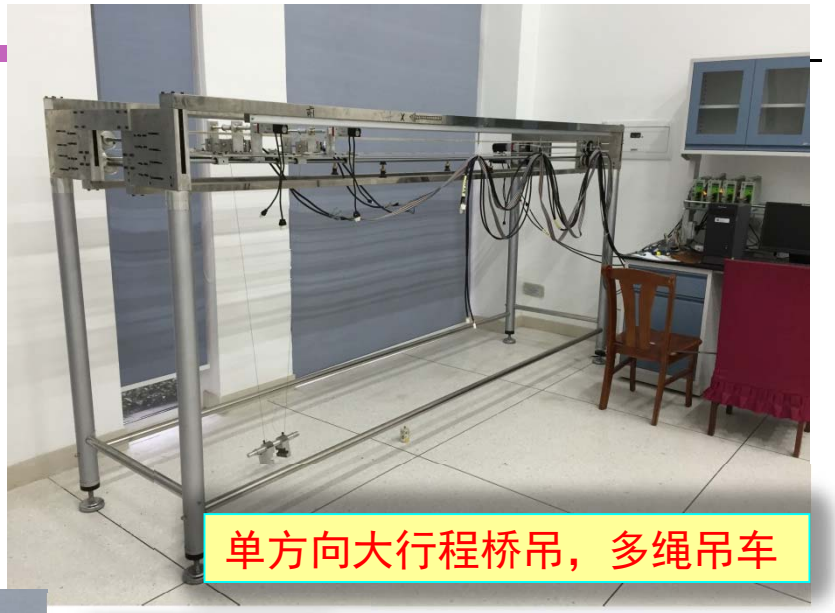
- 方勇纯在美国攻读博士期间开始进行自动吊车研究，2003年在南开大学组建自动吊车研究课题组，已完成多项国家级课题，研制出32吨级安全高效自动桥式吊车系统。
- 实验与仿真平台开发
  - 多自由度桥式吊车原理样机
  - 单方向大行程桥式吊车
  - 回转悬臂式船用吊车样机
  - TORA实验平台
  - 吊车操作仿真与培训软件
- 和天津起重设备有限公司等单位开展长期实质性合作。

自动吊车实验室(2层，95m²）

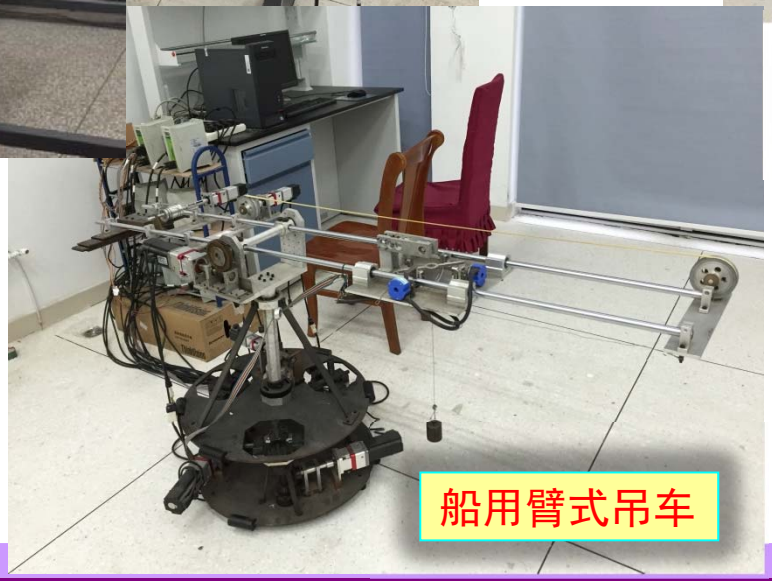
自行开发的欠驱动系统平台



多自由度，多摆桥吊



单方向大行程桥吊，多绳吊车



船用臂式吊车

TORA平台

国家科技支撑计划项目

面向工程机械行业的关键技术研发及示范应用（4100万）：2013-2015

序号	课题名称	承担单位
1	挖掘机关键液压基础件及成套系统	中航力源液压股份有限公司
2	智能化挖掘机关键共性技术研究及应用	湖南山河智能机械股份有限公司
3	安全高效自动桥式吊车关键技术与系统集成	南开大学（473万）
4	面向节能与安全的集成智能化工程机械装备研发	厦门厦工机械股份有限公司
5	全地形工程车关键技术产业化与应用示范	贵阳永青仪电科技有限公司
6	预切槽隧道施工成套设备关键技术研究	中国铁道建筑总公司
7	旧水泥路面共振破碎再生技术及关键设备研制	中铁科工集团有限公司
8	建筑板材机器人化施工装备与示范应用	河北建工集团有限责任公司

自动吊车研究目标

研究自动操作桥式吊车系统的关键技术，并进行系统集成。

- 对负载的自动快速运输，提高运输效率与自动化水平；
- 对负载的摆动进行抑制，提高效率、安全性与操作精度；
- 对各种紧急情况的自动处理，提高安全性。

◆ 就我国而言，全国约有近百万台桥式吊车，自动化程度普遍较低。

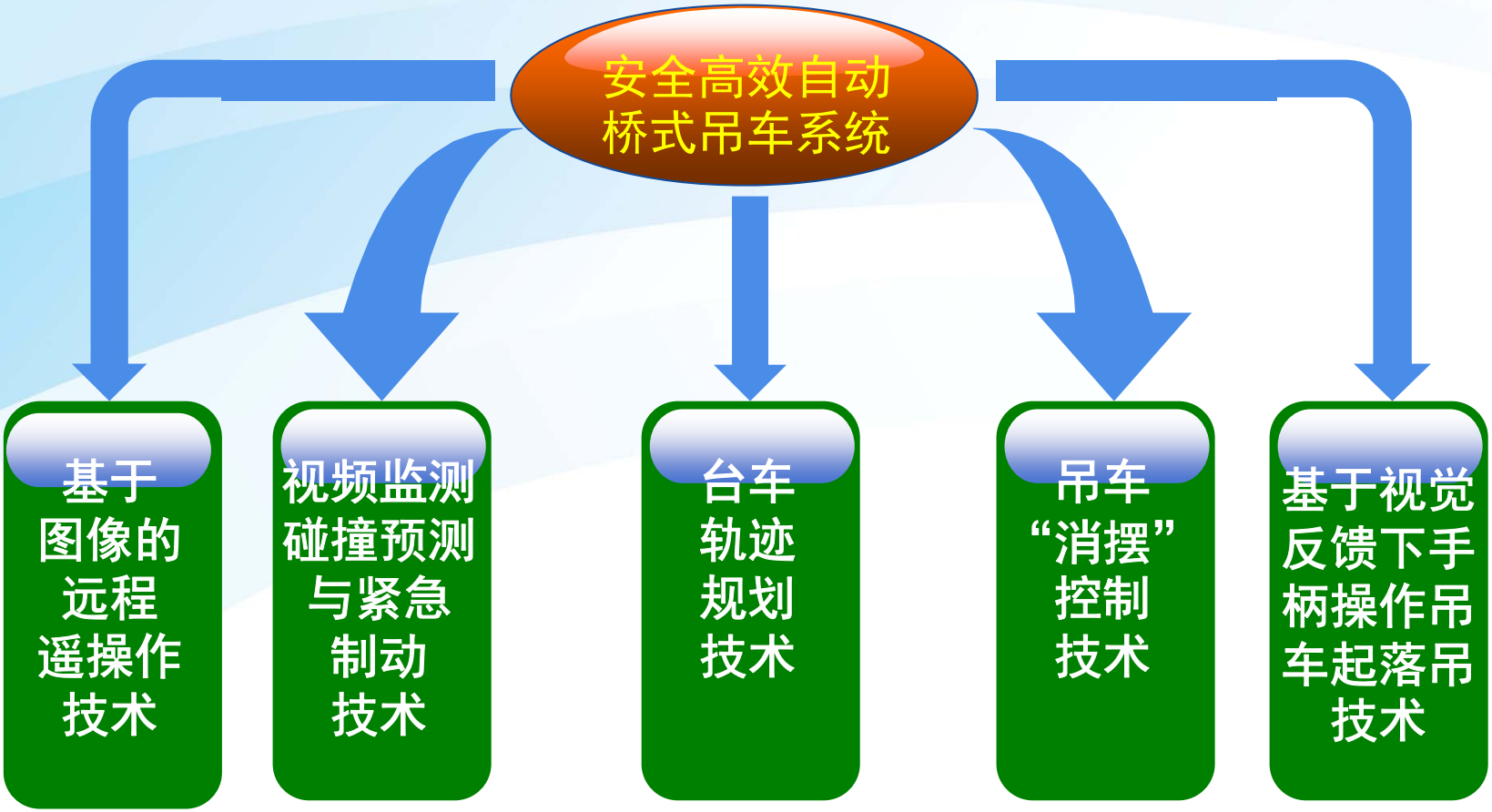
◆ 据估计，20～30%的桥式吊车需要安装自动化控制装置。

◆ 熟练的吊车操作人员供不应求。

汇报提纲

- 一、研究背景介绍
- 二、主要研究思路
- 三、整体完成情况
- 四、主要创新成果
- 五、系统集成测试

技术路线


安全高效自动
桥式吊车系统
基于图像的远程遥操作技术
视频监测碰撞预测与紧急制动技术
台车轨迹规划技术
吊车“消摆”控制技术
基于视觉反馈下手柄操作吊车起落吊技术

汇报提纲

- 一、研究背景介绍
- 二、主要研究思路
- 三、整体完成情况
- 四、主要创新成果
- 五、系统集成测试

约束性考核指标对比

项目整体目标	完成情况
自动化吊车样机1套	研制出32吨自动操作吊车系统
实现远程遥操作、紧急制动、手自动操作平滑切换功能	相应功能已通过测试
台车最大速度：60 m/min	台车最大速度：62.38 m/min。 台车最大加速度：0.26 m/s^2
台车最大加速度：0.25 m/s^2	
最大运行速度下，吊绳长度4m，负载质量2t，无碰撞情况下最大摆角：5度	无碰情况下最大摆角：0.65度
相比PID控制，运送效率提高20%左右	运送效率提高 20% 以上
台车定位误差：±5 mm	台车定位误差：±5 mm

主要预期性考核指标对比

项目整体目标	完成情况
在天津起重设备有限公司形成小规模自动吊车应用示范基地	自动吊车在天起车间进行测试与实际应用
培养优秀青年学者1-2名	方勇纯获杰青资助，张雪波入选南开百青，孙宁入选学科振兴计划，方勇纯，张雪波获天津市自然科学二等奖
博士生13名，硕士生30名，省级以上优博论文1篇	培养博士生24名，硕士生42名，2人获天津市优博，1人获天津市优硕
高水平学术论文20篇以上，其中15篇以上被SCI或EI检索	已发表论文44篇，其中SCI/EI源刊论文40篇
申请并受理国家发明专利5项	申请并受理发明专利24项，4项已获授权
申请软件登记1项。	获得软件登记1项，正申请另外1项

汇报提纲

- 一、研究背景介绍
- 二、主要研究思路
- 三、整体完成情况
- 四、主要创新成果
- 五、系统集成测试

主要研究成果

1. 基于智能优化算法等桥式吊车建模 （浙大，南开）
2. 欠驱动系统模拟，桥式吊车自适应控制 （浙工大）
3. 多种高性能轨迹规划和跟踪控制算法 （南开）
4. 基于激光信息的吊车场景三维重建 （南开）
5. 碰撞预测与紧急制动方法研究 （南开）
6. 开发远程遥操作单元并完成测试 （南开）
7. 自动吊车机械设计与加工 （天起）
8. 自动桥式吊车核心控制电路开发 （南开）
9. 自动桥式吊车软件开发 （南开）
10. 自动吊车系统集成与调试 （南开，天起）
11. 自动吊车系统应用 （天起）

单方向吊车系统动态模型

- 考虑到系统的欠驱动系统，将其拆分为两个子系统：

$$\begin{cases} \ddot{x} = \dfrac{F}{m(\theta)} - \dfrac{\eta(\theta,\dot{\theta})}{m(\theta)} \\ \ddot{\theta} = \dfrac{1}{l}\cos(\theta)\ddot{x} - \dfrac{g}{l}\sin(\theta) \end{cases}$$

台车位移子系统

负载摆角子系统

$$m(\theta) = m_c + m_p \sin^2\theta \geq m_c > 0$$

$$\eta(\theta,\dot{\theta}) = m_p \sin\theta\left(l\dot{\theta}^2 + g\cos\theta\right)$$

基于能量分析的控制器设计

- 欠驱动系统是当前自动控制领域的一个热点和难点问题，通常的线性控制方法对于这类系统无能为力。
- 针对具有欠驱动特性的桥式吊车系统，从其能量分析着手来设计相应的控制器。
  - ◆提出以系统能量为主体的李雅普诺夫函数，并且分析其随时间变化的规律。
  - ◆通过构造非线性控制器尽量使系统能量单调递减或者维持不变，从而实现控制误差渐近收敛的目标。

- ◆ Nonlinear Tracking Control of Underactuated Cranes with Load Transferring and Lowering: Theory and Experimentation, *Automatica*, Vol. 50, No. 9, pp. 2350-2357, 2014.
- ◆ An Energy Exchanging and Dropping-Based Model-Free Output Feedback Crane Control Method, *Mechatronics*, Vol. 23, No. 6, pp. 549–558, 2013.

欠驱动特性的分析与处理

■ 桥式吊车是一种欠驱动系统，要同时实现台车快速定位和负载防摆控制非常困难。

■ 借鉴机器人技术，提出了基于轨迹规划的欠驱动吊车控制方法，将欠驱动系统的镇定控制问题转化为驱动状态的运动规划和跟踪控制器设计两个步骤。

- ➢ 根据运动学特性来规划台车轨迹
- ➢ 根据动力学特性设计控制器使台车沿规划好的轨迹运动
- ➢ 在控制器中引入消摆环节来处理干扰导致的摆动

- □ 基于微分平坦与B样条的时间最优桥式吊车轨迹规划方法，发明专利，公开。
- □ 基于伪谱法的双摆吊车全局时间最优轨迹规划方法，发明专利，公开。
- □ 欠驱动吊车自适应消摆定位控制方法，发明专利，公开。

高性能吊车轨迹规划方法

研究目的

构造台车轨迹，满足安全性与物理约束，将台车速度、加速度及负载摆角等始终保持在设定范围内，保证轨迹具有良好的可跟踪性。

- 方法1：基于非线性耦合分析的在线轨迹规划
  - ✓ 无须离线迭代优化，参数调节方便，可在线应用
  - ✓ 当目标位置变化时，无须对轨迹参数进行再整定
- 方法2：最小时间轨迹规划方法
  - ✓ 得到时间最优的台车轨迹，在理论上确保满足实际物理约束
  - ✓ 同时完成负载定位与摆动抑制的目标

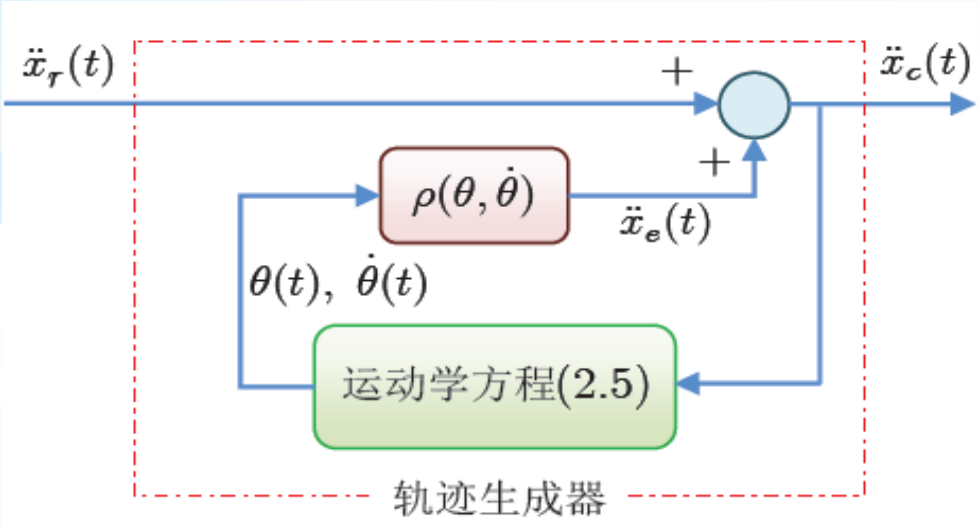
- Minimum-Time Trajectory Planning for Underactuated Overhead Crane Systems with State and Control Constraints, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 12, pp. 6915-6925, 2014.
- An Efficient Online Trajectory Generating Method for Underactuated Crane Systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014; 24:1653–1663.
- A Novel Optimal Trajectory Planning and Tracking Control Method for Overhead Cranes，*IET Control Theory & Applications*, in press.

基于非线性耦合分析的在线轨迹规划

在线规划加速度轨迹

$$\ddot{x}_c(t) = \ddot{x}_r(t) + \rho(\theta, \dot{\theta})$$

1. $\ddot{x}_r(t)$：定位参考轨迹
2. $\rho(\theta, \dot{\theta})$：消摆环节



图：在线轨迹规划示意图

定理：规划的台车轨迹**光滑、一致连续**，且有如下特点：

- 能使负载摆角、角速度、角加速度收敛至零
- 能保证台车准确到达目标位置，其速度、加速度收敛为零

吊车控制算法研究

现有吊车控制方法遇到的主要问题

- 现有方法暂态性能达不到要求
- 跟踪效果不理想，对参考轨迹要求苛刻
- 易受到模型参数不确定性的影响
- 无法确保摆角位于允许范围内
- 控制器结构复杂，参数调整繁琐
- 需全状态反馈
- ……

控制算法研究

针对不同的工作情况，提出了多种控制方法，并成功应用于研制32吨级自动桥式吊车。

- 考虑执行器饱和约束的输出反馈控制
- 适用于持续扰动的非线性复合消摆方法
- 基于预测的摆角抑制方法
- 考虑未知参数的自适应非线性控制

- A New Antiswing Control Method for Underactuated Cranes with Unmodeled Uncertainties: Theoretical Design and Hardware Experiments, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 1, pp. 453-465, 2015.
- Adaptive Nonlinear Crane Control with Load Hoisting/Lowering and Unknown Parameters: Design and experiments, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, vol. 20, no.5, pp. 2107-2119, 2015.
- Dynamics Analysis and Nonlinear Control of an Offshore Boom Crane, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 414-427, 2014.

自适应消摆输出反馈控制策略

控制器

$$F_x(t) = -k_{px}\tanh(\varepsilon_x) - k_{dx}\tanh(\xi_x),$$
$$F_y(t) = -k_{py}\tanh(\varepsilon_y) - k_{dy}\tanh(\xi_y),$$

定理

在输出反馈控制器的作用下，台车/桥架准确运动至目标位置，同时负载摆角得到充分抑制与消除，即

$$\lim_{t\to\infty}\begin{bmatrix} x(t) & y(t) & \theta_x(t) & \theta_y(t)\end{bmatrix}^{\top} = \begin{bmatrix} p_{dx} & p_{dy} & 0 & 0\end{bmatrix}^{\top}$$

证明：Lyapunov分析 + Barbalat引理 + 扩展Barbalat引理

- Energy Coupling Output Feedback Control of a 4-DOF Underactuated Cranes with Saturated Inputs, *Automatica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1318-1325, 2013.

吊车工作环境三维重建

（1）三维数据获取

硬件设备：线激光、步进电机、台车、吊车

（2）多片点云配准

算法：ICP、3D-NDT等

（3）表面模型建模

算法：Delaunay三角化、Greedy Projection等

（4）纹理映射

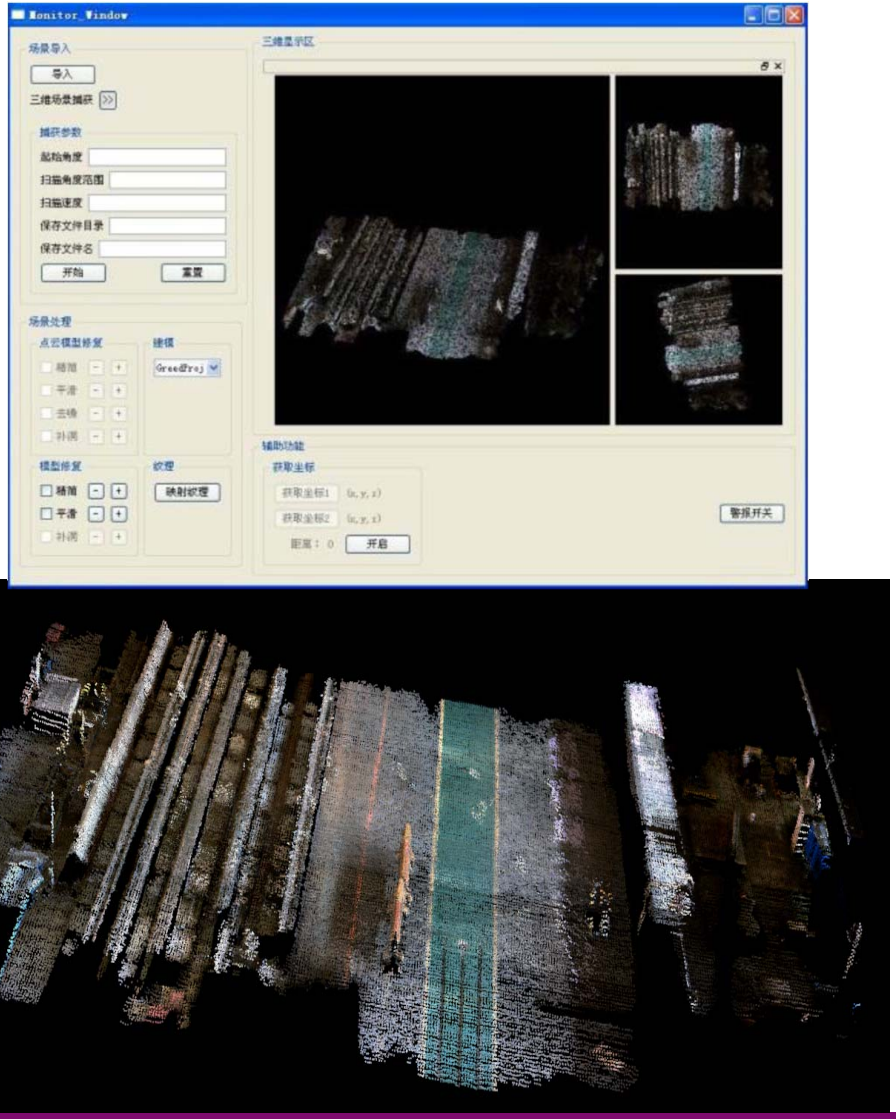
算法：摄像机自标定、摄像机与扫描装置固定

（5）操作界面展示

界面开发应用程序：QT

- 基于激光与视觉信息融合的动态场景三维重建系统V1.0，计算机软件著作权登记，2015SR149545，2015年5月20日。

吊车场景三维重建


Monitor_Window
场景导入
导入
三维场景捕获
捕获参数
起始角度
扫描角度范围
扫描速度
保存文件目录
保存文件名
开始
重置
场景处理
点云模型修复
精简
平滑
去噪
补洞
建模
GreedProj
模型修复
精简
平滑
补洞
纹理
映射纹理
三维显示区
辅助功能
获取坐标
获取坐标1
获取坐标2
距离：0
开启
警报开关

安全监控与紧急制动

- 设计目标

提高吊车系统应对突发事件时的安全性，当有人或其它设备进入到吊车工作区域并可能发生碰撞时，实施制动策略，避免造成人员伤亡或财产损失。

- 方法

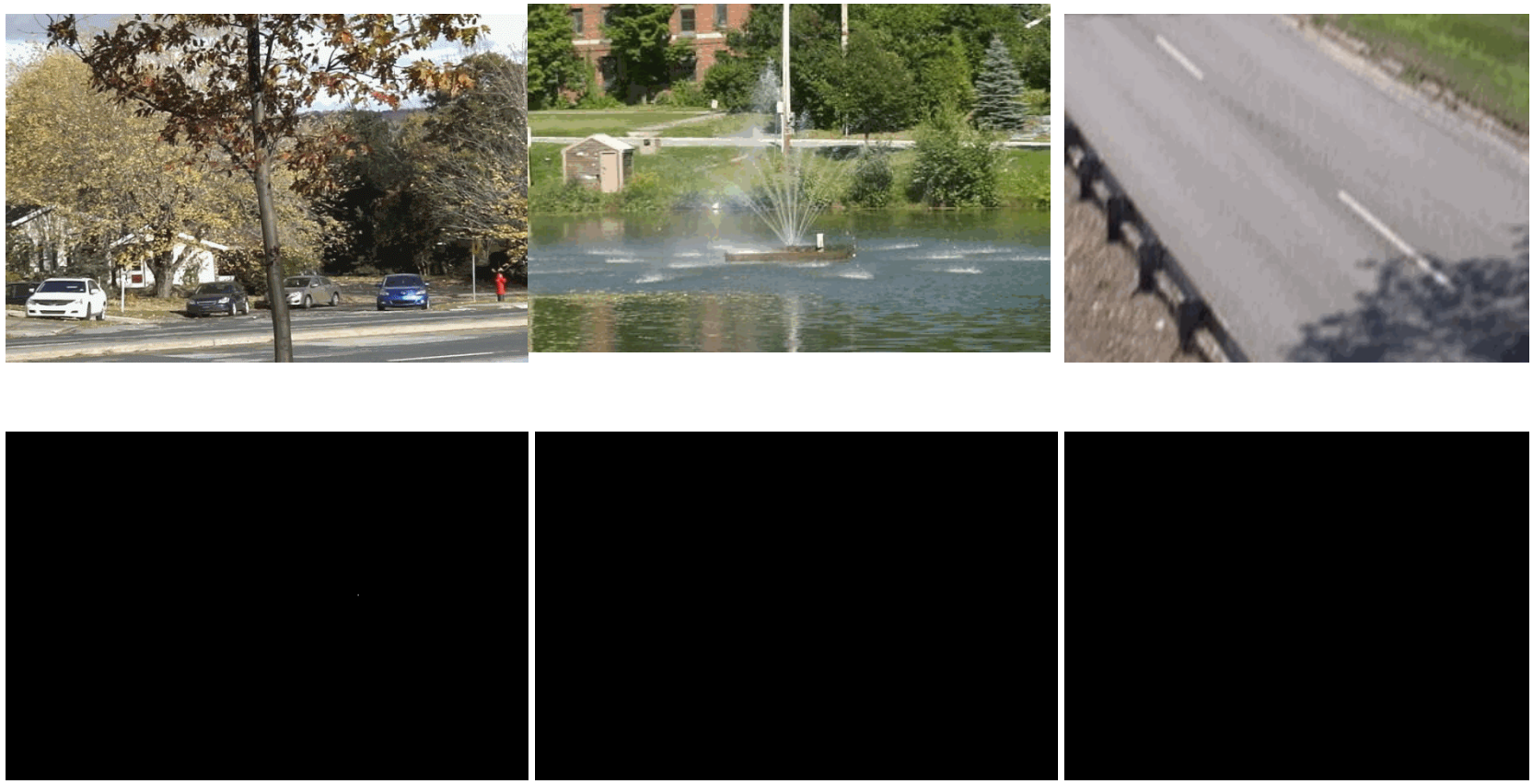
通过CCD摄像机等对周围的工作空间进行实时监控，对于所得到的图像，经过图像处理、目标筛选等几个步骤后，判断出是否有障碍物出现在负载的运动轨迹上，并进行相应处理。

安全监控与碰撞预测

- 基于凸优化方法，提出了一种新颖的多摄像机配置方法，可以借助于较少的摄像机实现对3维目标区域的快速覆盖。
- 提出一种基于栈式多层自组织图的方法，对实际工况下的吊车场景进行了背景建模，快速准确检测出可能导致碰撞的动态目标。
- 提出了一种基于筛选机制的概率占据图目标定位算法，在多摄像机监控环境下，快速计算出场景中运动物体的状态。

- Stacked multilayer self-organizing map for background modeling, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(9): 2841-2850.
- 3D Model-based Multi-Camera Deployment: A Recursive Convex Optimization Approach, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 3157-3169, 2015.

碰撞预测



多层自组织映射运动检测算法实验结果

紧急制动策略

- 势函数与状态反馈相结合的紧急制动方法
  - 针对台车快速制动，设计如下控制器

$$F_1 = -\frac{k_1 \dot{x}}{(\lambda - x_b)^2 - (x - x_b)^2} - k_2 \dot{x}$$

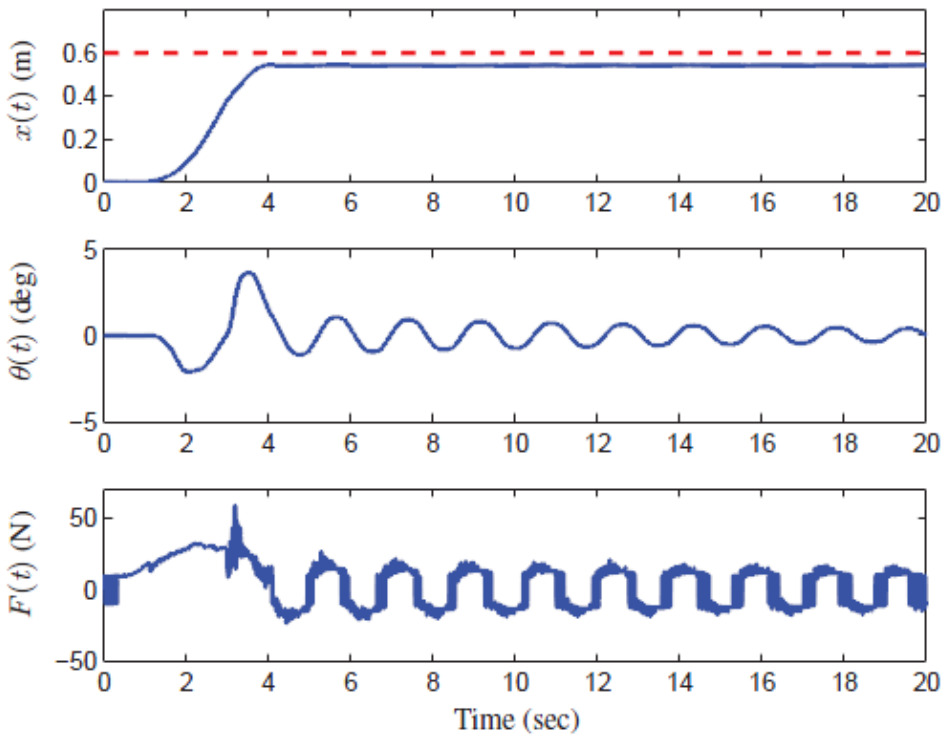
  - 针对负载摆动抑制，设计如下控制器

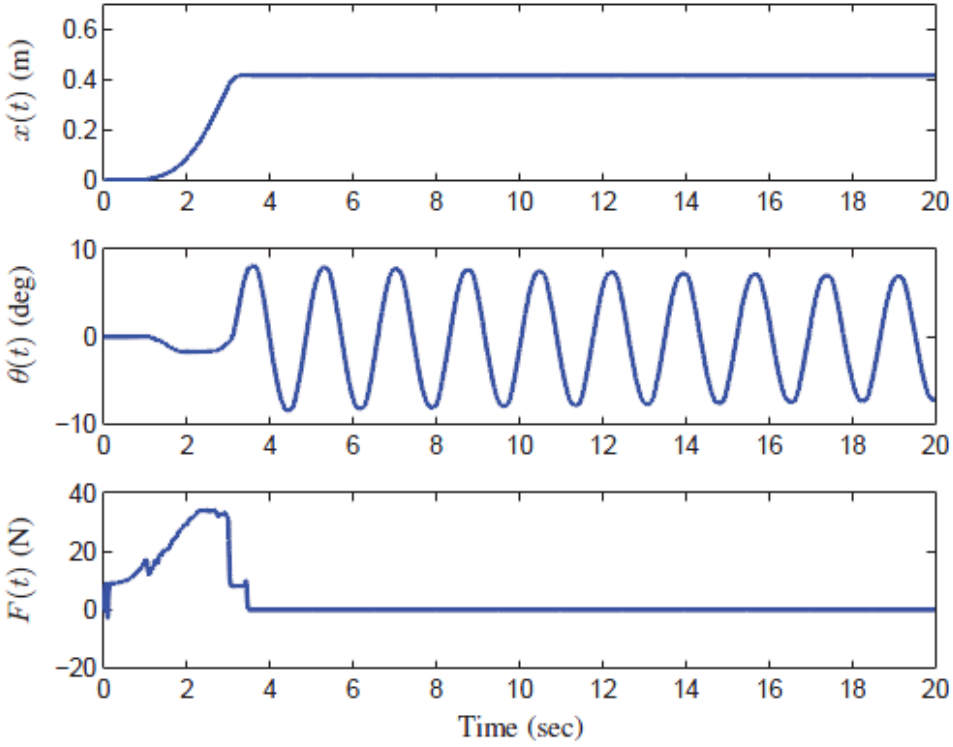
$$F_2 = k_3 \theta + k_4 \dot{\theta}$$

  - 针对两方面目标，综合所设计的控制器，得到相应的紧急制动控制器

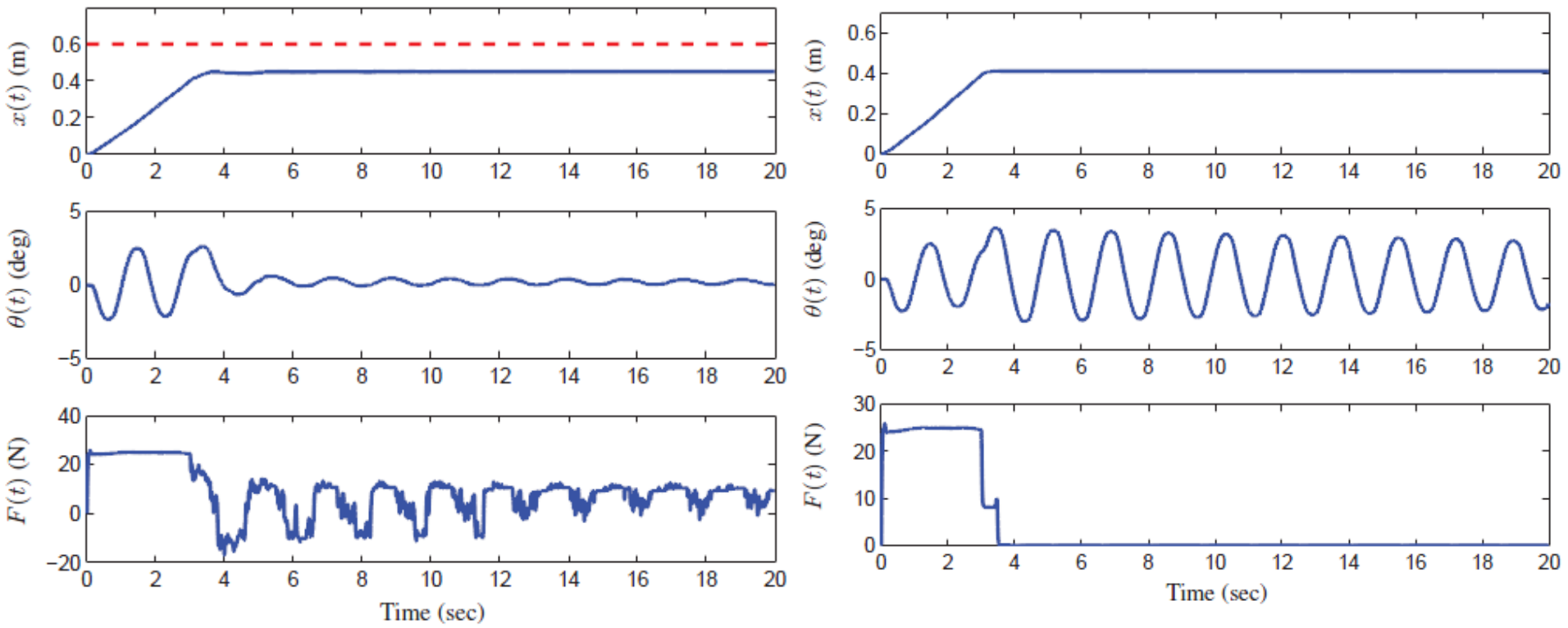
$$F = F_1 + F_2 = -\frac{k_1 \dot{x}}{(\lambda - x_b)^2 - (x - x_b)^2} - k_2 \dot{x} + k_3 \theta + k_4 \dot{\theta}$$

紧急制动-对比实验结果





紧急制动-对比实验结果



- 势函数与状态反馈相结合的桥式吊车紧急制动方法，发明专利，申请中。

自动吊车电气系统

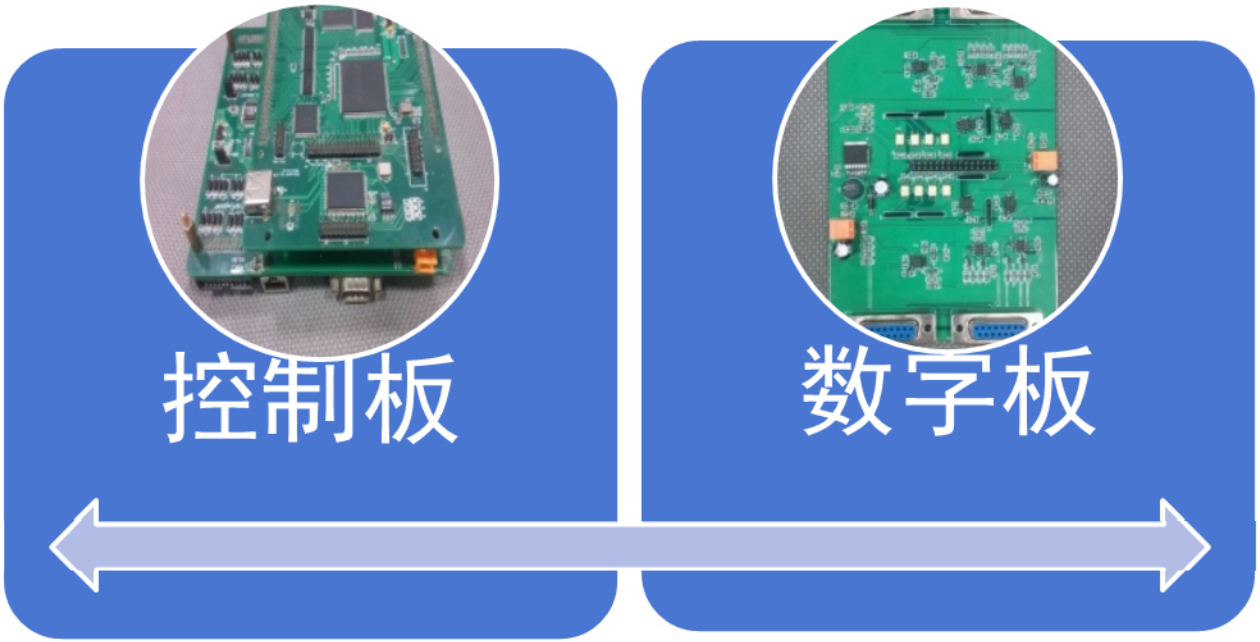
电气部分主要分为以下几个方面：

1. 大车，小车及升降驱动制动电路
2. 电机编码器反馈电路
3. PLC及相关电路
4. DSP控制电路
5. 摄像机，线激光，激光测距及相关电路
6. 遥控器及相关电路

- 一种基于PLC与变频电机的桥式吊车电气控制系统，发明专利，申请。

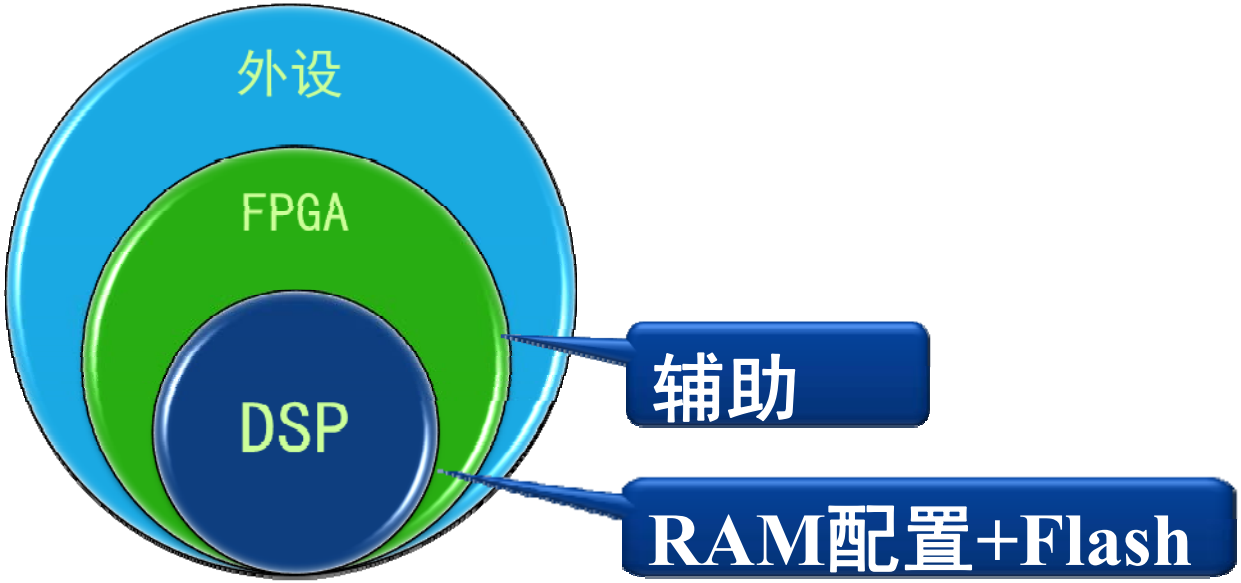
硬件控制电路设计

硬件控制电路是吊车控制的核心单元，主要负责实现吊车的自动控制算法，在预测到碰撞时紧急制动，并将采集到的吊车传感器信息发送给需要的各个单元。



硬件控制电路设计

- 自动吊车硬件控制电路采用DSP+FPGA的结构
  - DSP负责实现具体算法，是主要控制芯片
  - FPGA帮助DSP控制各种外设，实现与其它单元的通信。



- 基于DSP与FPGA的吊车自动控制系统硬件平台，发明专利，申请中。

自动吊车系统软件开发

- 开发了一套简单易用、界面友好的软件系统。为了避免功能冲突并保证系统运行流畅，采用多线程方法编程。
  - ◆ 可以使用任意数量的窗口显示点云及曲面重建结果，操作人员可以多角度同时观察运行结果。
  - ◆ 采用多线程编程，所有需要耗费大量计算或者需要持续运行的模块，均置入子线程中，使得操作者可以流畅操作。
  - ◆ 采用实时数据绘制，可以把传回的传感器数据进行实时显示，使得使用者对吊车状态及运动趋势一目了然。
  - ◆ 及时存储操作人员设置的重要数据，系统可以非常方便地回复到上次关闭时所设置的状态。

• 基于视觉信息的桥式吊车远程监控系统，软件登记，申请中。

自动吊车系统软件开发

CraneController
QserialPortTestoFNov
IMU(惯性传感器:用于测量吊钩摆角)通信串口设置
串口名
COM3
波特率
BAUD38400
校准IMU
未连接
DSP(数字信号处理器:用于控制吊车，这里传回吊钩位置信息)通信串口设置
串口名
COM4
波特率
BAUD57600
重置DSP
未连接
XY
Z
吊钩期望位置设定
吊钩横向位置
吊钩纵向位置
吊钩绳长
0.00
m
STOP
准备就绪
IMU输入
DSP输入
吊钩横向位置
吊钩纵向位置
吊钩横向速度
吊钩纵向速度
吊钩横向摆角
吊钩纵向摆角
吊钩绳长
TMS320F28335
TEXAS INSTRUMENTS

警告!
吊钩有碰撞危险

自动吊钩研制

- 基于工程实际需要，设计开发了面向起重设备应用的自动吊钩系统。
  - ◆跟据实时监测获得的负载质量信息，做出特定的控制动作，实现自动起吊。
  - ◆利用摄像机采集吊钩工作场景的信息，有效监测吊钩自动化作业系统，准确判断作业情况。
  - ◆实时判断负载的质量信息，将吊钩的运动状态传送给主控制器。

- 方勇纯，郝敬乾，李彬，孙宁，一种自动吊钩系统，发明专利，申请号：201510888543.6，受理。

汇报提纲

- 一、研究背景介绍
- 二、主要研究思路
- 三、整体完成情况
- 四、主要创新成果
- 五、系统集成测试

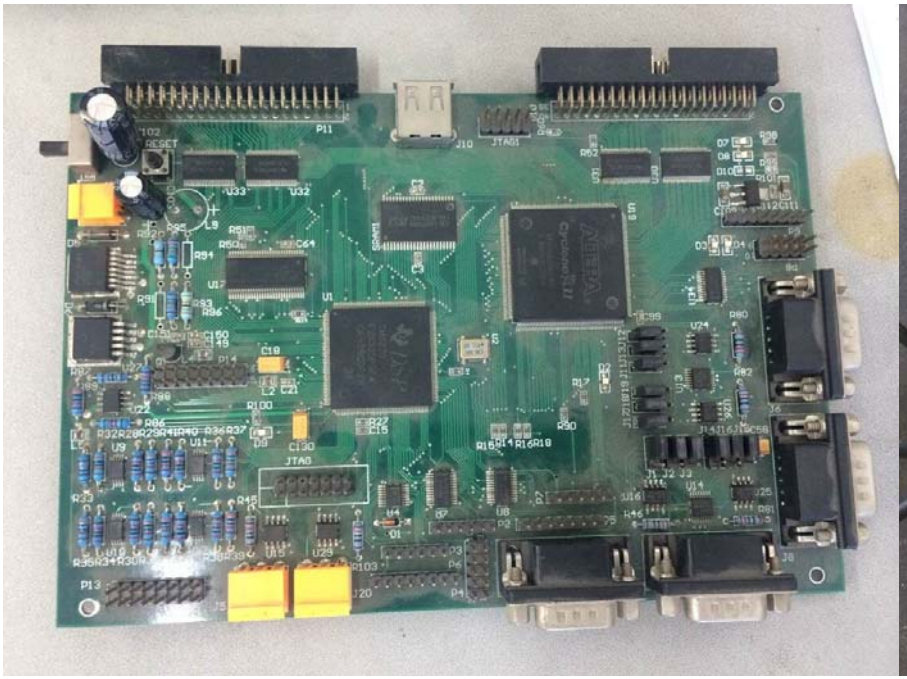
系统整体集成

- 在攻克了各项技术难关之后，将所设计的各个单元集成到工业吊车平台，开发了32吨级自动吊车系统。
- 对于大、小车的位置信号，使用电机自带的同轴码盘与激光传感器采集的信号融合后获得大/小车的位置信息。
- 对于角度信息，使用惯性测量单元IMU获取吊钩的空间信息，通过数学变换实时推算出吊钩的摆动信息。
- 根据设计的自动控制算法来控制大小车的运动，实现快速定位与消摆的功能，在监控软件上实时检测系统的运行情况。
- 通过视频软件自动监控工作空间的运行情况，当出现紧急情况时，自动启动紧急制动。

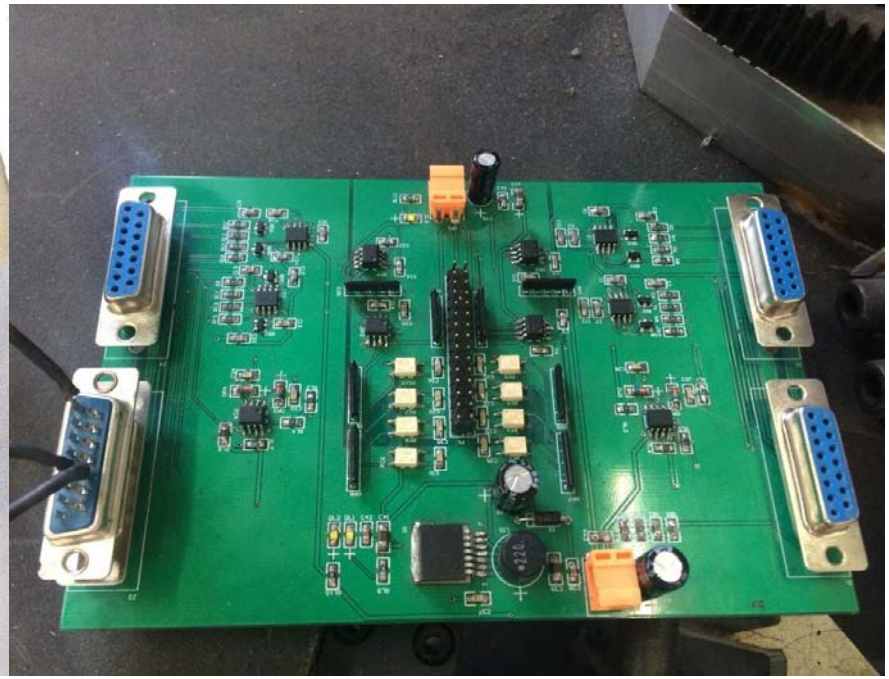
研制的32吨级自动吊车

设计的电气控制柜

设计的核心控制电路板

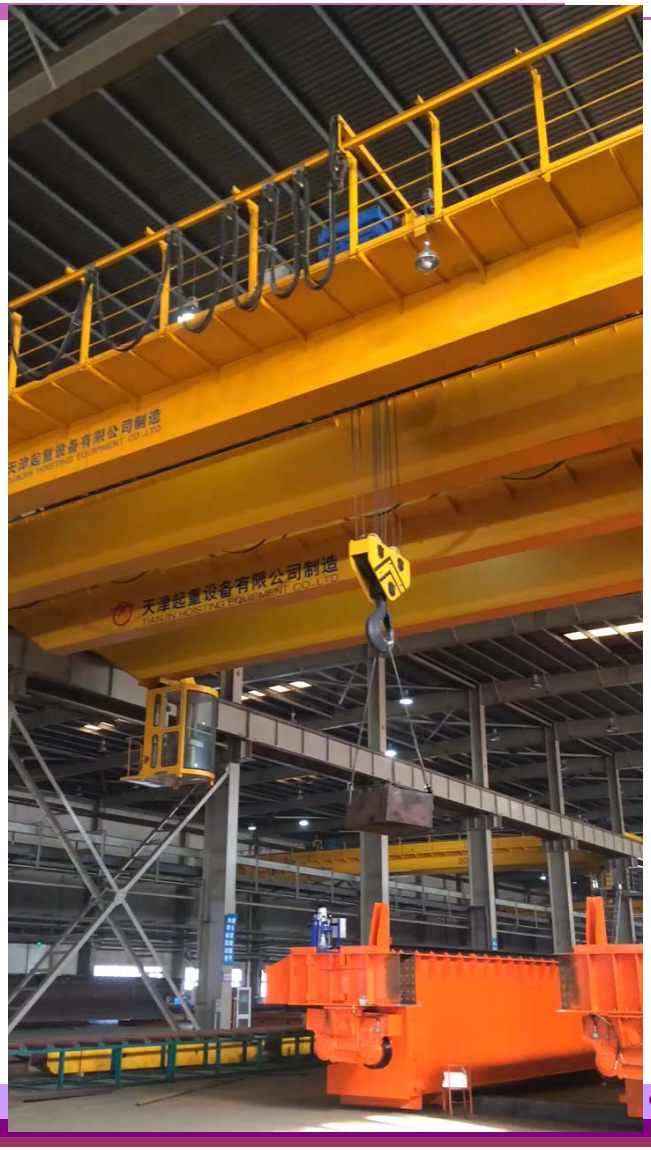


DSP+FPGA主控板

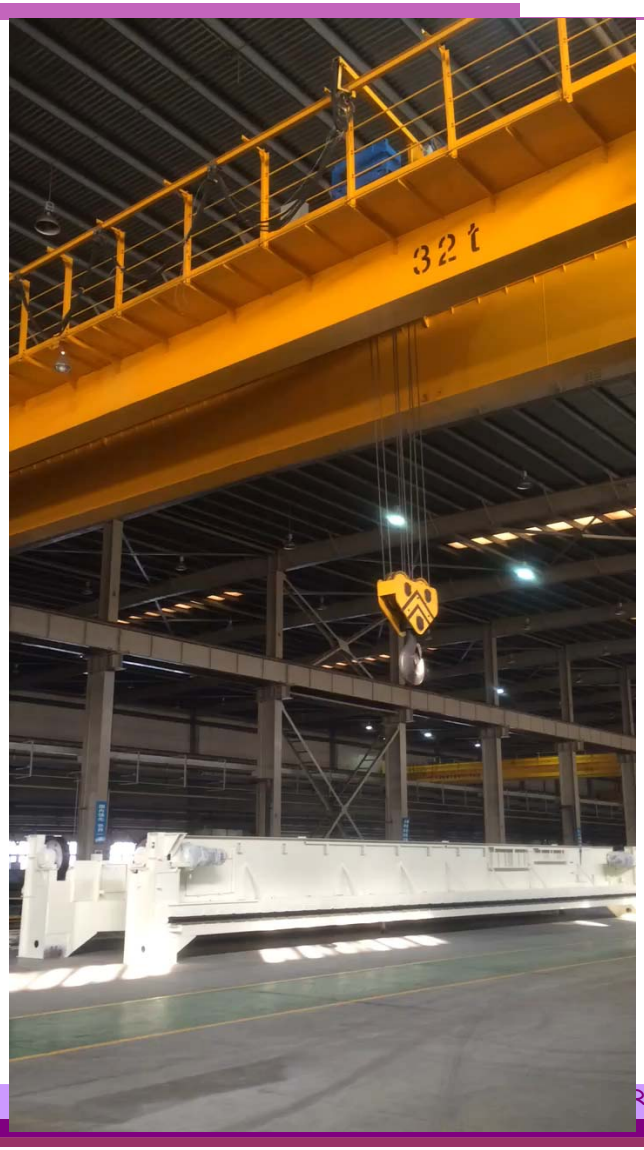


信号处理板

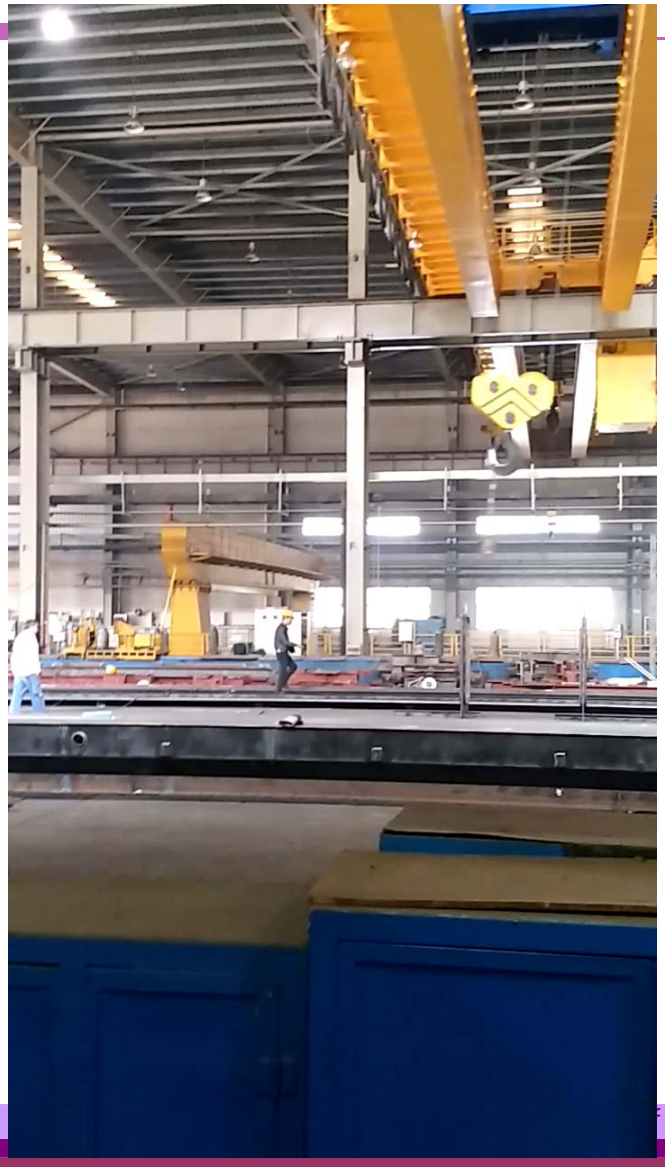
工业现场测试（大车）



工业现场测试（大小车联动）



人工操作吊车对比录像



系统整体测试-检验报告

国家起重运输机械质量监督检验中心 WBG-2014

国家起重运输机械质量监督检验中心

检验报告

№ 15-W-0611 共 3 页第 1 页

产品名称	通用桥式起重机（自动桥式起重机）	型号规格	QD32/5-31.5 A5
委托单位	南开大学	检验类别	委托检验
生产单位	天津起重设备有限公司	样品状态	完好
样品数量	1 台	产品编号/生产日期	1309 试制 5/2014.03
送 样 者	南开大学	样品接受日期	2015 年 12 月 09 日
检验地点	天津起重设备有限公司	检验日期	2015 年 12 月 09 日 ～ 2015 年 12 月 10 日
检验依据	《自动桥式起重机检验大纲》		
检验项目	乙-W-2015-263 产品检验委托书 《自动桥式起重机检验大纲》规定项目		
检验结论	该产品经送样检验，所检项目的检验结果均达到《自动桥式起重机检验大纲》要求。 检测专用章 签发日期 2015 年 12 月 11 日		
备注			

签发：[illegible] 审核：王军 主检：[illegible]

一、通用桥式起重机（自动桥式起重机）试验报告

№ 15-W-0611

试验项目及其内容		试验结果	试验结论
远程自动操作和手动遥控操作平滑切换功能	远程自动操作方式下，整机起吊 2t 载荷，完成设定的 1 个工作循环，车此循环执行的任意位置转换为手动遥控操作，继续执行此循环过程中，再次转换为远程自动操作方式，直至此工作循环执行完毕。按上述操作顺序，做 3 个工作循环。 远程自动操作和手动遥控操作方式下，在每个工作循环执行期间，各进行 1 次紧急制动。紧急制动应可靠，有效。 在两种操作方式进行功能切换时，如未出现故障停车或者误动作且整机无明显异常，则判定为两种操作方式可实现平滑切换。	两种操作方式进行功能切换时，未见故障停车和误动作及其他异常现象，且紧急制动可靠有效，符合要求。	合格
大车最大运行速度 [m/min]	远程自动操作方式下，整机起吊 2t 载荷，使吊钩保持在绳长 4m 位置，用激光测距仪记录大车运行 9m 所用时间，通过时间与距离曲线图，计算此过程中最大速度，测量 3 次，取其平均值 V。V≥60m/min。	V=62.38m/min	合格
大车最大运行加速度[m/s²]	远程自动操作方式下，整机起吊 2t 载荷，使吊钩保持在绳长 4m 位置，用激光测距仪记录大车运行 9m 所用时间，通过时间与距离曲线图，计算此过程中最大加速度，测量 3 次，取 3 次测量值的最大值 a，a≥0.25 m/s²。	a=0.26 m/s²	合格
吊钩最大偏摆角度[°]	远程自动操作方式下，整机起吊 2t 载荷，使吊钩保持在绳长 4m 位置，大车完成 1 个工作循环过程中，利用桥式起重机自带 IMU 角度传感器，读取 3 次吊钩最大偏摆角度 β，β≤5°	β=0.65°	合格

国家起重运输机械质量监督检验中心 WBG-2014

续表№ 15-W-0611

序号	试验项目及其内容		试验结果	试验结论	备注
5	远程自动操作方式和 PID 控制操作方式的运送效率比值	两种控制方法下按照程序设定的 1 个工作循环，各进行 3 次，测量每次工作循环所用时间。大车启动开始计时，直至目测吊钩无明显摆动，停止计时，分别取 3 次平均值 η1、η2 作为其对应的运送效率。(η2-η1)/η1≥20%	η1=21.29S η2=37.73S (η2-η1)/η1=77.22%	合格	工作循环：整机起吊 2t 载荷，使吊钩保持在绳长 4m 位置，启动大车运行 18m，计为 1 个工作循环。 η1-远程自动操作方式 η2-PID 控制操作方式
6	大车运行定位误差 [mm]	远程自动操作方式下，大车按程序设定运行 6m。用全站仪测量预设光标在水平方向的位移 S，计算 |S-6|=σ,σ≤5mm。	σ=5mm	合格	
7	残余摆动	远程自动操作方式下，整机起吊 2t 载荷，使吊钩保持在绳长 4m 位置，在程序设定 10m 内，启动大车运行至最大运行速度后减速至自动停止，目测吊钩应无明显摆动。	目测吊钩无明显摆动，符合要求。	合格	

台车最大速度：62.38 m/min

台车最大加速度：0.26 m/s2

无碰情况下最大摆角：0.65度

运送效率提高 20% 以上

台车定位误差：±5 mm

残余摆动时间：不大于 5 秒

课题验收（2016. 1. 18）

专家组听取课题工作汇报

课题验收（2016. 1. 18）

专家组现场考察32吨级自动吊车的运行性能

课题验收（2016. 1. 18）

课题验收会质询环节

2013年以来主要论文（南开）

1. **Adaptive Nonlinear Crane Control with Load Hoisting/Lowering and Unknown Paramters: Design and Experiments, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 20, No. 5, pp. 2107-2120, 2015.**
2. **3D Model-based Multi-Camera Deployment: A Recursive Convex Optimization Approach, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 20, No. 6, pp. 3157-3169, 2015.**
3. **Stacked Multi-layer Self-Organizing Map for Background Modeling, *IEEE Trans. on Image Processing*, Vol. 24, No. 9, pp. 2841-2850, 2015.**
4. **A New Anti-swing Control Method for Underactuated Cranes with Unmodeled Uncertainties: Theoretical Design and Hardware Experiments, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 1, pp. 453-465, 2015.**
5. **Adaptive Antiswing Control for Cranes in the Presence of Rail Length Constraints and, *Nonlinear Dynamics*, 2015: 1-11.**
6. **Minimum-time Trajectory Planning for Underactuated Overhead Crane Systems with State and Control Constraints, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 12, pp. 6915-6925, 2014.**
7. **An Enhanced Coupling Nonlinear Control Method for Bridge Cranes, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 8, Iss. 13, pp. 1215-1223, 2014.**
8. **Nonlinear Tracking Control of Underactuated Cranes with Load Transferring and Lowering: Theory and Experimentation, *Automatica*, Vol. 50, No. 9, pp. 2350-2357, 2014.**
9. **Dynamics Analysis and Nonlinear Control of an Offshore Boom Crane, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 414-427, 2014.**
10. **Energy Coupling Output Feedback Control of a 4-DOF Underactuated Cranes with Saturated Inputs, *Automatica*, Vol. 49, No. 5, pp. 1318-1325, 2013.**

2013年以来主要论文（南开）

11. A Continuous Robust Anti-Swing Tracking Control Scheme for Underactuated Crane Systems with Experimental Verification, *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Accepted.
12. A Novel Optimal Trajectory Planning and Tracking Control Method for Overhead Cranes，*IET Control Theory & Applications*, in press.
13. Partially Saturated Nonlinear Control for Gantry Cranes with Hardware Experiments, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 77, Iss. 3, pp. 655-666, 2014.
14. An Efficient Online Trajectory Generating Method for Underactuated Crane Systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2014; 24:1653–1663.
15. Enhanced Damping-based Anti-swing Control Method for Underactuated Overhead Cranes, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 9, No. 12, pp. 1893-1900, 2015.
16. An Energy Exchanging and Dropping-Based Model-Free Output Feedback Crane Control Method, *Mechatronics*, Vol. 23, No. 6, pp. 549–558, Sep. 2013.
17. A Direct Swing Constraint-Based Trajectory Planning Method for Underactuated Overhead Cranes, *ACTA AUTOMATICA SINICA*, Vol.40, No.11, pp. 2414-2419, 2014.
18. 欠驱动桥式吊车消摆跟踪控制，控制理论与应用，32(3): 326-333，2015年。
19. 基于伪谱法的双摆吊车时间最优消摆轨迹规划策略，自动化学报，Vol. 42, No. 1, 待刊。
20. 带有状态约束的双摆效应吊车轨迹规划，控制理论与应用(《关肇直奖》设立20周年获奖论文作者特邀专刊)，Vol. 31, No. 7，pp. 974-980, 2014。
21. 加速抑制随机初态误差影响的迭代学习控制，自动化学报, Vol. 40, No. 7, pp. 1295-1302, 2014。

2013年以来发明专利（南开）

- 方勇纯，孙宁，张一淳，基于轨迹在线规划的桥式吊车高效消摆控制方法，专利号：ZL 201210292959.8，发明专利，授权日：2014年3月21日。
- 方勇纯，张雪波，路晗，李宝全，室外环境下变焦云台摄像机全自动标定方法，专利号/专利号：201210159132，发明专利，授权日：2014年8月20日。
- 方勇纯，李宝全，张雪波，刘开征，基于球形投影模型的纯旋转摄像机自标定方法，专利号：201210243420.3，发明专利，授权日：2014年10月22日。

1. 方勇纯，张雪波，王聪媛，路晗，基于全局单应矩阵的单目视觉测量方法，专利号/申请号：201510021985.0，发明专利，公开。
2. 方勇纯，陈清艳，孙宁，陈鹤，一种基于曲率特征的三维正态分布变换点云配准方法，发明专利，申请号：201510582900.6，公开。
3. 方勇纯，陈鹤，孙宁，基于伪谱法的双摆吊车全局时间最优轨迹规划方法，发明专利，申请号/专利号：201510624100.6，公开。
4. 方勇纯，郝敬乾，李彬，孙宁，一种自动吊钩系统，发明专利，申请号：201510888543.6，受理。
5. 方勇纯，付一鸣，何博，卢彪，船用起重机自动控制实验系统，发明专利，申请号/专利号：2015108849069，受理
6. 孙宁，方勇纯，陈鹤，欠驱动吊车自适应消摆定位控制方法，发明专利，专利号/申请号：201410649866.5，公开。
7. 方勇纯，陈鹤，孙宁，基于微分平坦与B样条的时间最优桥式吊车轨迹规划方法，发明专利，申请号/专利号：201410457163.2，公开。
8. 方勇纯，刘海亮，何博，张一淳，许鹏，基于DSP与FPGA的远程吊车自动控制系统硬件平台，发明专利，申请。
9. 方勇纯，何博，刘海亮，一种基于PLC与变频电机的桥式吊车电气控制系统，发明专利，申请。
10. 方勇纯，陈鹤，孙宁，一种势函数与状态反馈相结合的桥式吊车紧急制动方法，发明专利，申请。
11. 方勇纯，何博，刘海亮，一种桥式吊车精准定位方法，发明专利，申请。

非常感谢！

南開大學

NANKAI

UNIVERSITY