

# 核废物库吊车高精度自动定位的技术实现

栾秀春<sup>1</sup>, 韩伟实<sup>1</sup>, 王俊玲<sup>1</sup>, 杨爱光<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学核科学与技术学院, 哈尔滨 150001; 2. 青岛科技大学信息科学技术学院, 山东青岛 266061)

[摘要] 阐述了田湾核电站核废物库 21UKT 吊车自动化改造工程中高精度自动定位的技术实现, 包括控制系统的硬件配置和软件配置、控制逻辑、程序结构以及变频调速函数曲线, 并给出了现场检测结果。

[关键词] 核废物; 吊车; 自动控制; 定位

[中图分类号] TM623.4; TL941 [文献标志码] A [文章编号] 1009-1742(2010)03-0045-06

## 1 前言

田湾核电站 11UKT, 21UKT, 91UKT 厂房是中、低放固化废物的暂存库, 储存反应堆一回路产生的废树脂、浓缩液和压缩固体废物等。这些废物装在  $\phi 1\ 400 \times 1\ 300$  mm 钢结构的混凝土圆桶中, 用库房内的吊车从固化厂房搬运至废物库内, 按正方形阵列分层堆放, 暂时存储, 等待进一步处理。

吊车在改造前, 操作人员在库房内直接操作吊车对废物桶进行吊装, 存在很多弊端: 首先是核废物库房存在很强的放射性, 使操作人员受到核辐射; 其次人工操作还存在其他安全隐患, 劳动强度比较大、精确性差, 吊装工作质量与操作人员的熟练水平有很大关系。因此, 有必要对核废物库吊车进行自动化改造, 以减轻操作员劳动强度和提高了吊装效率。

文献[1]已对此改造工程中的精确定位关键技术进行了探讨, 笔者将对 21UKT 改造中的技术细节进行阐述。

## 2 系统的构成

《田湾核电站 6.3 吨吊车改造工程招标技术规格书》规定了用户的要求: a. 在与作业区域隔离的控制室内, 实现吊车的监测与控制; b. 大小车启动、

停止及行走平稳, 实现吊车的自动控制精确定位; c. 数据实时处理和显示, 故障报警及事故紧急处理<sup>[1,2]</sup>。

为实现系统功能和技术要求, 自动控制定位系统的硬件和软件配置如下。

### 2.1 硬件配置

1) 上位机: 西门子工控机 SIEMENS SIMATIC Rack PC IL40S;

2) 可编程控制器(PLC): 西门子 S7-300 系列 PLC, 其构成(见图 1)如下:

PLC1#——电源模块: PS 307 10A

PLC2#——CPU 模块: CPU314C-2PtP (内置 SIEMENS SIMATIC Micro Memory Card 64KB)

PLC3#——模拟量输入模块: SM331 AI8 × 12Bit

PLC4#——通信模块: CP340-RS422/485

PLC5#——通信模块: CP340-RS422/485

PLC6#——计数器模块: FM350-1 COUNTER MODULE

PLC7#——数字量输出模块: SM322 DO16 × DC24V/0.5A

3) 上位机与 PLC 的通信连接卡: SIMATIC NET CP5611 PCI CARD;

4) 传感器: LMC-J-0040 型激光测距仪, EL-

[收稿日期] 2008-12-29; 修回日期 2009-11-09

[基金项目] 黑龙江省博士后科研启动金资助项目(LBH\_Q08121)

[作者简介] 栾秀春(1975-), 男, 山东掖县人, 哈尔滨工程大学副教授, 主要从事核电站自动化设备的设计与分析以及核动力装置性能与设备的分析研究; E-mail: luanxiuchun@hrbeu.edu.cn

TRA TECH 旋转编码器;

5) 变频执行装置: SIEMENS MICROMASTER 440 变频器(2.2 kW);

6) 中间继电器;

7) 交流接触器。

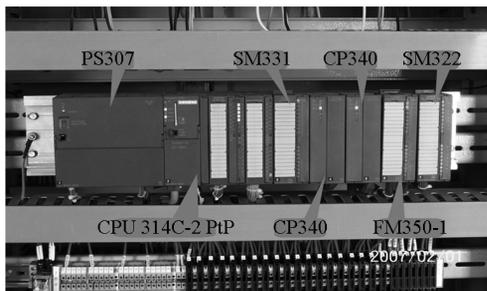


图1 可编程控制器的组成  
Fig.1 Composition of PLC

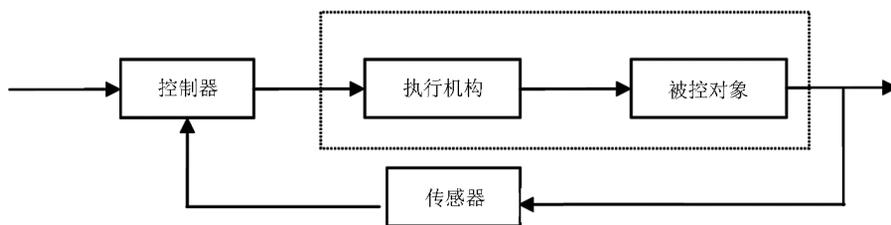


图2 控制系统的一般结构  
Fig.2 General structure of control systems

2) 执行机构: 执行机构包括变频器、交流接触器和电机。变频器接受 PLC 的指令, 将 50 Hz 的市电转换为指定频率变化规律、指定相序的交流电, 驱动电机运行; 交流接触器执行动力电源的隔离和控制功能; 电机接受来自变频器的交流电, 拖动吊车运行。

3) 被控对象: 吊车的三维运动。大车, 前后运动; 小车, 左右运动; 吊具, 上下运动。

4) 传感器: 传感器包括激光测距仪和旋转编码器。激光测距仪检测大车和小车的位置, 旋转编码器检测吊具的位置。行程开关也可看作是广义的传感器, 是传送开关量的传感器, 约束吊车在安全范围内运行。为了实现吊车的三维运动定位控制, 以 PLC 为核心, 构建 3 个控制回路: 大车和小车的运动, 通过中间继电器和交流接触器的开关控制以及变频器的变频调速, 驱动电机, 实现高精度自动定位; 吊具提升无精度要求, 通过中间继电器和交流接触器的开关控制, 驱动电机, 就能实现自动定位; 此外, 为了保证行车安全, 3 个运动方向上各自配置行程开关, 构成 3 个保护回路, 约束吊车在安全范围内运行。吊车自动定位控制系统的总体控制逻辑如

## 2.2 软件配置

1) 上位机操作系统: Windows2000 Professional 简体中文版;

2) 上位机编程软件: SIEMENS SIMATIC WinCC V5. X Service Pack;

3) PLC 编程软件: SIEMENS SIMATIC STEP7 V5.2。

## 3 控制逻辑

与一般的控制系统一样, 吊车自动定位控制系统的结构可用图 2 的形式表示。

1) 控制器: 控制器的功能由 PLC 执行, 它是整个控制系统的核心。工控机是 PLC 与人之间的接口, 完成人与 PLC 之间的信息交互, 自身不执行控制功能。

图 3 所示。

## 4 程序结构和 PLC 电气连接

### 4.1 程序结构

程序的编制主要分为两个部分, 即上位机程序和 PLC 程序, 见图 4。

SIEMENS 的上位机软件 SIMATIC WinCC (V5. X), 通过组态程控图形切换模式, 提供图形化的人机界面, 具有与 PLC 通信、吊车运行实时数据(3 个自由度)、报警指示、通信诊断、历史数据管理等功能。

SIEMENS 的 PLC 编程开发工具 SIMATIC STEP7 (V5.2), 通过硬件组态和 LAD 编程, 完成与各设备的通信(激光测距仪、旋转编码器、变频器)、数据采集、程序存储、数据存储、I/O 控制等功能。依据功能相对独立、子程序局部封装的原则, 进行结构化编程<sup>[3-5]</sup>, 包括 PLC 初始化程序、与传感器和变频执行装置的通信程序、信号变换程序、数据处理程序、手动行车程序、自动行车程序、提升操作程序、指示报警程序、停车程序等部分。

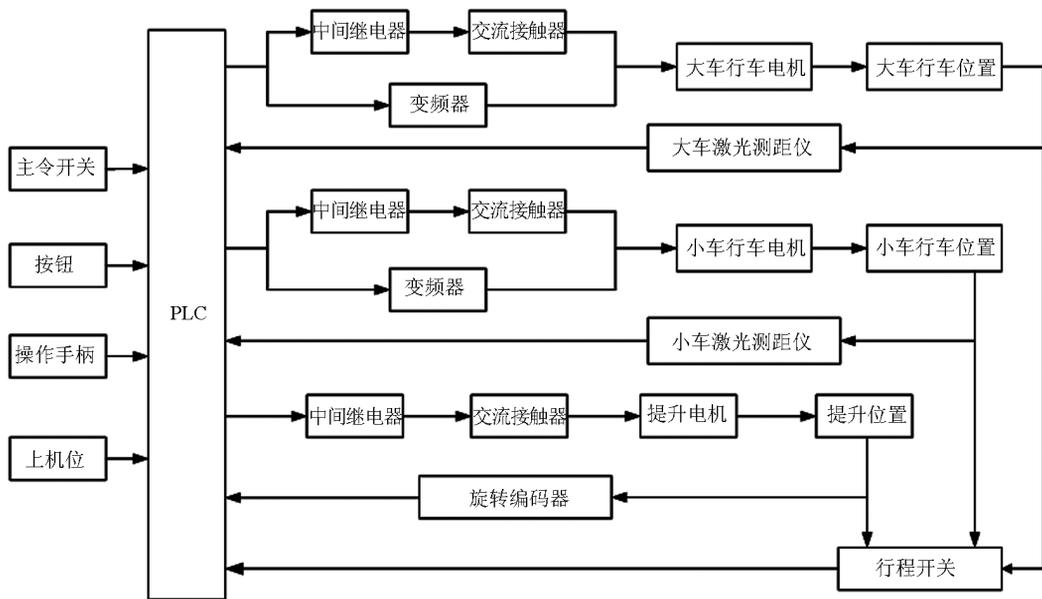


图3 总体控制逻辑

Fig. 3 Overall logic of control

#### 4.2 PLC 电气连接

PLC 与外围设备的电气连接依据功能分区管理、连线相对集中的原则配置<sup>[3-5]</sup> (见图4)：

1) 工控机的 PCI 插槽上插一块 SIMATIC NET CP5611 PCI CARD, 通过一条 Profibus 电缆与 PLC 的 CPU 模块的 MPI 口连接, 实现上位机与 PLC 的通信。

2) 按钮和中间继电器通过导线与 PLC 的 CPU 模块的 DI 口连接, 实现开关量的输入。

3) 中间继电器通过导线与 PLC 的 CPU 模块和数字量输出模块的 DO 口连接, 实现开关量的输出。

4) 操作手柄变阻器通过导线与 PLC 的 CPU 模块的 AI 口连接, 实现模拟量的输入。

5) 变频器采用 RS485 总线标准, 通过二芯屏蔽电缆与 PLC 的 CPU 模块的 PiP 口连接, 实现 PLC 与变频器的通信, 变频器接收 PLC 发出的控制字和频率指令, 并返回状态字。

6) 激光测距仪采用 RS422 总线标准, 通过六芯屏蔽电缆与 PLC 的通信模块的 PiP 口连接, 实现 PLC 与激光测距仪的通信, 激光测距仪向 PLC 发送大小车位置的测量数据。

7) 旋转编码器采用 RS422 总线标准, 通过八芯屏蔽电缆与 PLC 的计数器模块的计数器口连接, 实现 PLC 与旋转编码器的通信, 旋转编码器向 PLC 发送吊具位置的测量数据。

#### 5 自动行车变频调速规则

根据《田湾核电站 6.3 吨吊车改造工程招标技术规格书》的规定, 该系统的水平行车自动定位精度小于 2 mm。为实现此精度要求, 自动行车程序采用下面的电机行车指令频率函数曲线进行变频调速 (见图 5)。

电机行车指令频率函数曲线采用线性分段函数：

$$f(x) = \begin{cases} 50 & x \geq 2500 \\ \frac{50-5}{2500-200}(x-200) + 5 & 200 \leq x < 2500 \\ 5 & 15 \leq x < 200 \\ \frac{5-1}{15-2}(x-2) + 1 & 2 \leq x < 15 \\ 0 & x < 2 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中,  $x$  是当前位置与设定目标的距离, 单位为 mm;  $f$  是电机行车指令频率, 单位为 Hz。

#### 6 现场检测数据

依据《田湾核电站 6.3 吨吊车改造工程吊车自动定位精度检测方法》的规定, 采用 DZJ2 激光垂准仪检测吊车水平运动自动定位精度<sup>[5]</sup>。大车单独运动的定位精度检测记录如表 1 所示, 经计算, 根据水准仪读数偏差值的最大值得到大车自动定位精度

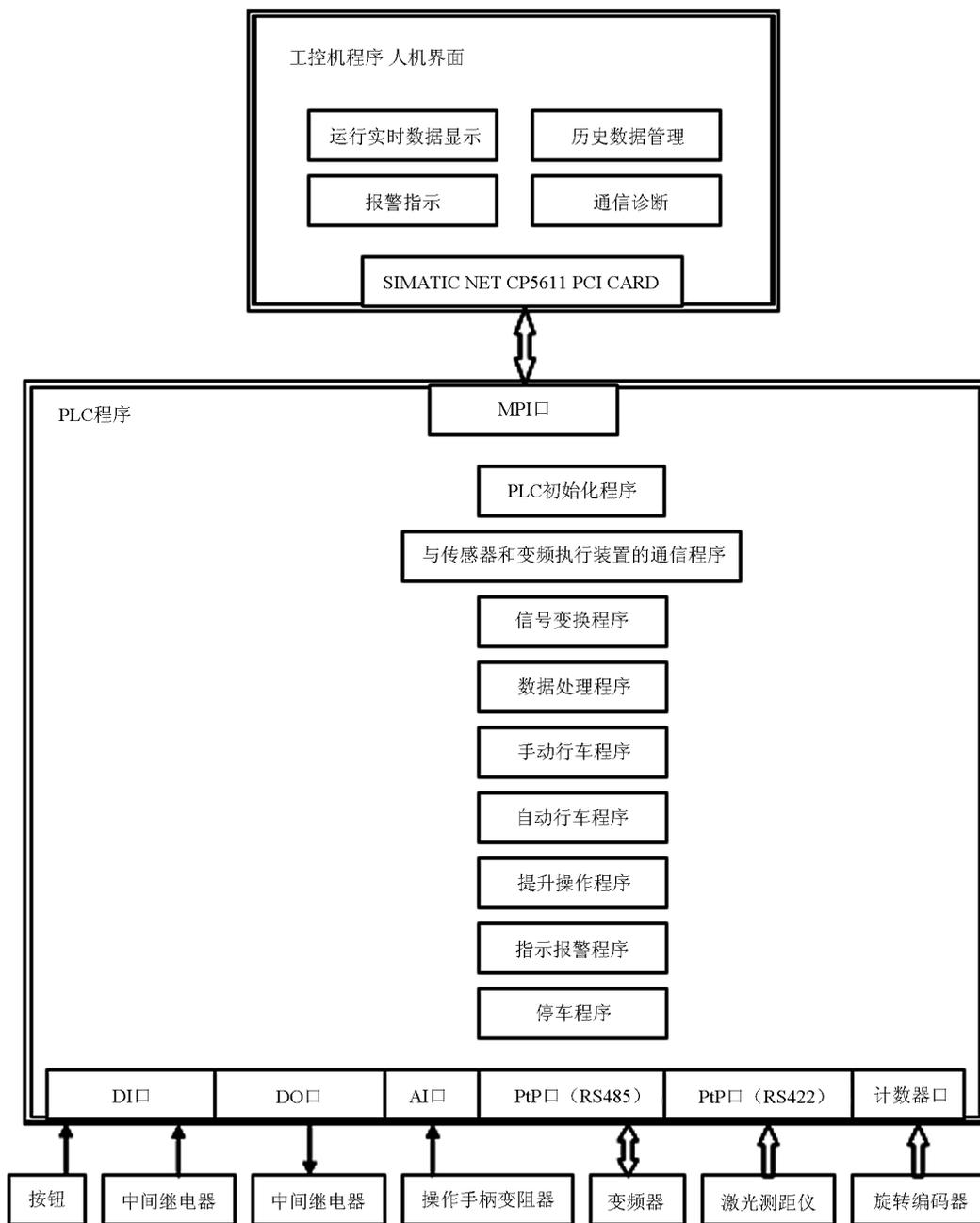


图 4 程序结构和 PLC 电气连接

Fig. 4 Structure of program and electric connection of PLC

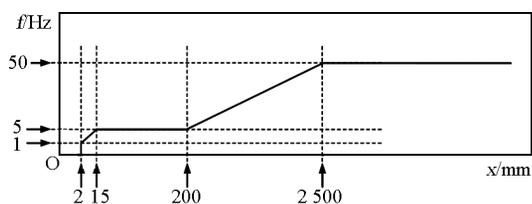


图 5 电机行车指令频率函数曲线

Fig. 5 Curve of function of frequency instruction to electric motor

$$D_x = \max\{\Delta x_j\} = \max\{\Delta I_j\} = \max\{0, 0, 2\} = 2(\text{mm}) \quad (2)$$

小车单独运动的定位精度检测记录如表 2 所示,经计算,根据水准仪读数偏差值的最大值得到小车自动定位精度

$$D_y = \max\{\Delta y_j\} = \max\{\Delta I_j\} = \max\{1, 0, 1\} = 1(\text{mm}) \quad (3)$$

表1 大车自动定位精度检测记录

Table 1 Test result of automatic positioning precision of crane bridge

序号 <i>j</i>	初始位置 $x_0$		转移位置 $x_1$		返回初始位置 $x_0$			偏差值 $\Delta x$ /mm	
	人机界面读数	水准仪读数	指令位置	人机界面读数	指令位置	人机界面读数	水准仪读数	人机界面读数	水准仪读数
	A/m	B/mm	C/m	D/m	E/m	F/m	G/mm	$H =  A - F $	$I =  B - G $
1	3.269	0	6.500	6.503	3.269	3.269	0	0	0
2	3.269	0	1.600	1.600	3.269	3.269	0	0	0
3	3.269	0	7.090	7.091	3.269	3.267	下2	2	2

注:序号1,2,3表示每一次行车的检测记录结果

表2 小车自动定位精度检测记录

Table 2 Test result of automatic positioning precision of trolley

序号 <i>j</i>	初始位置 $x_0$		转移位置 $x_1$		返回初始位置 $x_0$			偏差值 $\Delta x$ /mm	
	人机界面读数	水准仪读数	指令位置	人机界面读数	指令位置	人机界面读数	水准仪读数	人机界面读数	水准仪读数
	A/m	B/mm	C/m	D/m	E/m	F/m	G/mm	$H =  A - F $	$I =  B - G $
1	8.800	右3	3.348	3.348	8.800	8.801	右2	1	1
2	8.801	右2	13.012	13.012	8.801	8.800	右2	1	0
3	8.800	右2	5.109	5.110	8.800	8.800	右3	0	1

注:序号1,2,3表示每一次行车的检测记录结果

大小车联合运动的定位精度检测记录如表3和表4所示。对于第一次记录,按照几何距离计算,得到人机界面读数和水准仪读数的几何偏差值分别为

$$\Delta H_1 = \sqrt{(\Delta H_{1x})^2 + (\Delta H_{1y})^2} = \sqrt{0.4^2 + 0.1^2} = 0.412(\text{mm}) \quad (4)$$

$$\Delta I_1 = \sqrt{(\Delta I_{1x})^2 + (\Delta I_{1y})^2} = \sqrt{1^2 + 0^2} = 1(\text{mm}) \quad (5)$$

同理,得到对于第二次记录的人机界面读数和水准仪读数的几何偏差值分别为

$$\Delta H_2 = 1.5(\text{mm}) \quad (6)$$

$$\Delta I_2 = 1.414(\text{mm}) \quad (7)$$

根据水准仪读数的几何偏差值的最大值,得到大小车联合自动定位精度为

$$\Delta_{xy} = \max\{\Delta I_j\} = \max\{1, 1.414\} = 1.414(\text{mm}) \quad (8)$$

表3 大小车联合自动定位精度检测记录(第一次)

Table 3 Test result of automatic positioning precision of combination of crane bridge and trolley (First)

	初始位置		转移位置		返回初始位置			偏差值 $\Delta x$ /mm	
	人机界面读数	水准仪读数	指令位置	人机界面读数	指令位置	人机界面读数	水准仪读数	人机界面读数	水准仪读数
	A/m	B/mm	C/m	D/m	E/m	F/m	G/mm	$H =  A - F $	$I =  B - G $
x	3.267	下2	13.240	13.241	3.267	3.2674	下1	0.4	1
y	8.800	右3	6.439	6.439	8.800	8.8001	右3	0.1	0

表4 大小车联合自动定位精度检测记录(第二次)

Table 4 Test result of automatic positioning precision of combination of crane bridge and trolley (Second)

	初始位置		转移位置		返回初始位置			偏差值 $\Delta x$ /mm	
	人机界面读数	水准仪读数	指令位置	人机界面读数	指令位置	人机界面读数	水准仪读数	人机界面读数	水准仪读数
	A/m	B/mm	C/m	D/m	E/m	F/m	G/mm	$H =  A - F $	$I =  B - G $
x	3.267 4	下1	-3.039	-3.038	3.2674	3.266 2	下2	1.2	1
y	8.800 1	右3	7.962	7.962	8.8001	8.799 2	右2	0.9	1

由表1,表2,表3,表4和式(2),式(3),式(8)

可知,吊车水平运动自动定位精度都满足《田湾核

电站 6.3 吨吊车改造工程招标技术规格书》规定的小于 2 mm 的技术要求。

## 7 结语

通过对田湾核电站核废物库吊车的自动化改造,提高了定位精度,其精度可达 2 mm;实现了远程计算机操作,减轻了操作员的工作强度,降低了可能遭受的核辐射剂量。田湾核电站核废物库房 21UKT 吊车的改造已经完成,并顺利通过了江苏核电有限公司组织的验收,各项指标均达到技术规格书中的要求。

## 参考文献

- [1] 杨志达,刘少有,齐雪峰,等.核废物库吊车自动控制精确定位技术[J].核动力工程,2006,27(6):94-98
- [2] 江苏核电有限公司.田湾核电站 6.3 吨吊车改造工程招标技术规格书[R].2003
- [3] SIEMENS.使用 SIMATIC STEP 7 V5.2 编程手册[R].西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团,2004
- [4] 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团.深入浅出西门子 S7-300PLC[M].北京:北京航空航天大学出版社,2004
- [5] 廖常初.S7-300/400PLC 应用技术[M].北京:机械工业出版社,2006
- [6] 哈尔滨船大工程技术设计研究院能源工程技术研究所.田湾核电站 6.3 吨吊车改造工程 吊车自动定位精度检测方法[R].2004,9

# The realization of automatic positioning of crane in high precise in the storehouse for nuclear waste

Luan Xiuchun<sup>1</sup>, Han Weishi<sup>1</sup>, Wang Junling<sup>1</sup>, Yang Aiguang<sup>2</sup>

(1. College of Nuclear Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266061, China)

[Abstract] This paper sets forth the realization of automatic positioning of crane in high precise in the storehouse for nuclear waste, including the hardware configuration and software configuration of the control system, the control logic, the program structure and the the function curve of frequency control, and the results of field test are given.

[Key words] nuclear waste; crane; automatic control; positioning