

桥吊吊具电缆系统改造

上海国际港务（集团）股份有限公司振东集装箱码头分公司 顾连锋、何平、张凌峰

一、项目背景及研究意义

随着集装箱航运业务的发展，第七代巴拿马集装箱船型开始要求港口的岸边集装箱起重机（下称集装箱桥吊）的总起升高度不小于 51 米，主起升速度不低于 150m/min，小车运行速度更是达到了 240m/min。对于如此高速且繁忙集装箱装卸作业，吊具电缆系统延袭原来盛行于巴拿马型岸桥上的重型垂缆+储缆筐的设计已经不合适了。本公司 101#桥吊所处位置在码头最边沿，吊具电缆为电缆下垂结构。当在大风、天气情况比较恶劣或者作业能见度较低的情况下，常导致电缆不能顺利进电缆框，因此而发生电缆拉断等事件，给生产带来较大影响。在风比较大的情况下，司机需要将一部分注意力放在电缆进电缆框的过程，影响工作效率。

大约从十余年前起，大型集装箱桥吊的吊具电缆系统已经开始摒弃重型垂缆+储缆筐的设计，在小车上安装一套能随主起升机构运行同步收放吊具电缆的吊具电缆卷筒系统。吊具电缆卷筒的改造利用卷筒缠绕电缆，使电缆始终保持张紧状态，从而消除天气因素的影响，避免电缆因逃出电缆框发生拉断现象，同时提高司机的工作效率，减小吊具电缆故障对生产的影响。为了提高装卸作业效率，开始有计划的对本公司旧岸桥上的重型垂缆+储缆筐系统，逐台进行技术改造。

二、项目内容及原理

摘要：传统的储框式吊具电缆容易出现不进电缆框现象，特别是在大风天气，易钩挂外物，导致电缆断芯或者拉断，引起故障和安全隐患，针对司机操作不便和维修成本较高的弊端，结合机构特点，扬长避短地进行吊具电缆的卷筒式改造，提高了电缆的可靠性、安全性、便利性，从而达到提高整机作业效率的目的。

关键词：吊具电缆、卷筒、改造

1、引言

我公司现有桥吊共 26 台，吊具电缆主要有储框式和电缆卷盘式。总体上来说，上述这 2 种吊具电缆结构的工作表现各具特色。吊具电缆卷筒式以其独立的控制系统、电缆运动速度始终灵敏地、准确地跟随吊具的升降速度，不会发生因电缆与吊具的速度差异而造成的电缆过度受拉或过度松弛。

2、问题的提出

多年来，在作业运行过程中，我们发现吊具电缆储框式、卷盘式在个别方面存在一些问题，比如：

储框式结构当处于大风天气时，吊具电缆易被风吹出电缆储框，如桥吊司机没有注意到该现象把电缆重新调整至电缆框内，将极易发生吊具电缆钩拉破皮事故，严重的将发生吊具电缆的破断事故，给生产安全带来极大的影响。

卷盘式结构虽然可以有效的解决上述问题。但是由于卷盘式结构采用的是 2 套磁滞联轴节带驱动电机的驱动方式。经常会发生磁滞联

轴节轴承损坏而使得永磁盘吸合、气隙为零，驱动电机电流增大，导致电机热继电器动作的设备故障；由于电机和减速机之间的磁滞离合器是一个相对独立的靠磁力传动的机械零件，因此一旦其磁力不足以传递电机和制动器的扭矩，其后果就如同电机/制动器和减速机脱开，导致吊具电缆发生坠落事故。

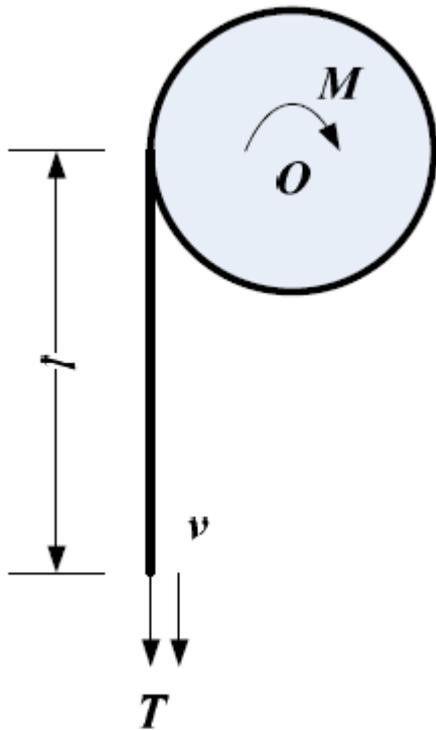
同时由于现代船舶作业的大型化趋势，我们需要保证一定的桥吊起升高度，如将储框式结构改为卷盘式结构将降低桥吊的起升高度，给大船作业造成困难。

鉴于上述情况，我们决定对采用储缆式结构的桥吊进行吊具电缆的卷筒式改造。

3、电缆卷筒的机理及技术参数

经过分析研究我们意识到，吊具电缆卷筒要求能随高速运行的主起升机构同步地收放电缆，电缆卷筒驱动力矩的设计就必须考虑到主起升频繁的加、减速度，电缆垂重随起升高度的频繁变化和所有运动部件的转动惯量以及它们在运动中也发生变化的因素。变频线性自动变扭矩驱动技术是一种建立在对电缆卷筒系统精确计算的基础上设计的特殊的矢量变频拖动控制技术。

作为高速吊具电缆卷筒驱动设计的基础，其力学模型是：



假定:

1) 电缆总长度

$$L = l + N \cdot 2\pi R$$

2) 力平衡方程

$$M - (T + \rho \cdot g \cdot l) \cdot R = M - (T + \rho \cdot g) \cdot \int_0^t v dt \cdot R = \left[J_0 + J_c + J_m + J_r + \sum_{i=0}^{N-1} 2\pi \rho (R_0 + iD)^3 \right] \cdot \alpha$$

式中:

- | | |
|--------|-----------|
| M | : 马达驱动转矩 |
| T | : 电缆拉力 |
| v | : 电缆线速度 |
| L | : 电缆总长度 |
| N | : 电缆卷绕圈数 |
| l | : 电缆悬垂高度 |
| ρ | : 电缆密度 |
| R | : 卷绕半径 |
| J_0 | : 卷筒转动惯量 |
| J_c | : 卷筒联轴器惯量 |

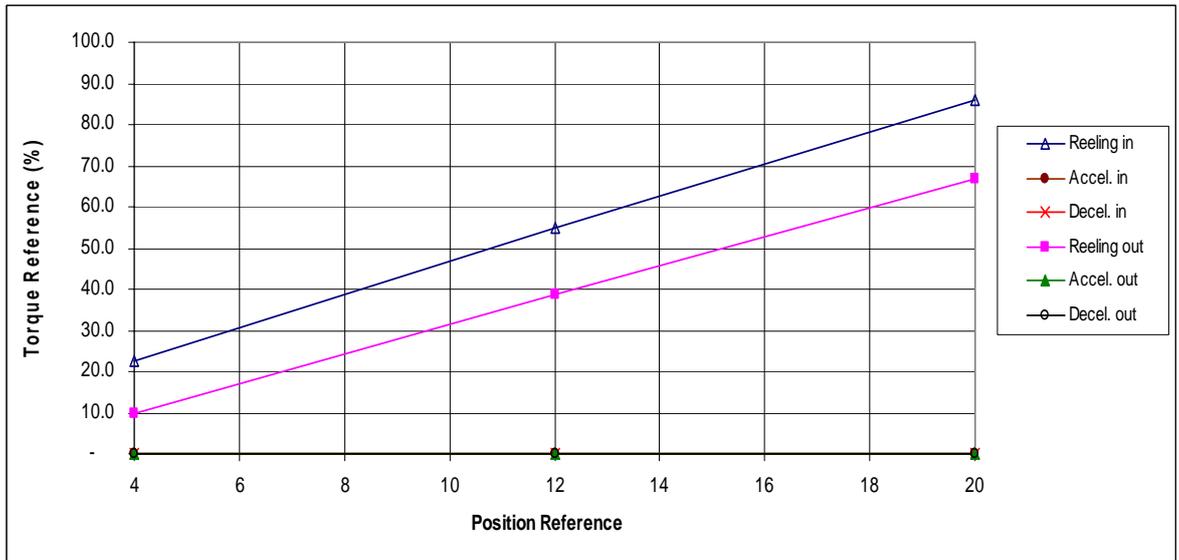
- J_m : 马达转动惯量
- J_r : 减速机转动惯量
- $\sum_{i=0}^{N-1} 2\pi\rho(R_0 + iD)^3$: 电缆在卷筒上随卷绕圈数变化的转动惯量
- $\ddot{\theta}$: 卷筒角加速度

根据正确的力学模型可以算出吊具电缆卷筒运行全程中在各类工况下的扭矩-电缆张力特性并据此设计出特殊的矢量变频拖动控制软件。

4、电缆卷筒的技术特点

- 1) 将速度分量人为地固定，使之不小于设备运行最高速度时的速度。而仅仅控制力矩分量使它和恒定的速度分量之矢量和不仅能使得电缆的张力适度，也能使电缆卷筒的卷绕能保证和设备的运行保持“同步”。这种特殊的驱动软件，令驱动系统既具有非常柔软的传动特性，又具有极快的响应速度。使得吊具电缆就如同在发条弹簧卷筒上一样，不管主起升瞬间加/减速上升/下降，还是允速运行，电缆的收放总能与之同步。柔软的驱动特性和快速响应就如同发条弹簧卷筒一样，对于因设备加减速作用在电缆上的突变载荷能做瞬时调整。
- 2) 线性自动变扭矩是根据精确计算的结果，通过对驱动软件的扭矩参数设置，形成卷筒随主起升运行全程中的卷绕的加，减速和匀速扭矩变化梯度以及“放缆”的加，减速和匀速扭矩变化梯度。对于我公司的改造项目，仅用以下两组扭矩梯

度就获得了非常好的效果（表 1）:



图表中蓝色的斜线是卷入电缆的扭矩变化梯度，粉色的斜线是“放出电缆”的扭矩变化梯度。理论上两者差值和电缆垂直有关。

- 3) 自动控制变频器输出扭矩的给定信号是来自和卷盘同步转动的转角编码器。这是一组 4 ~ 20mA 模拟量信号。可以直接输入变频器按预设的扭矩梯度控制变频器自动地随卷缆长度的变化调节驱动扭矩。

当卷筒缠满了电缆，吊具在最高位置（放出电缆为 0 圈）时，位置编码器输出为 4.1mA，当吊具处于最低的深舱位置（电缆放出了 14 圈）时，编码器输出值为 12.16mA。

- 4) 出色的“防抱死”设计使电缆卷筒制动器不仅具有足够的 Holding Force，确保电缆卷筒断电停机时在任和高度为置上电缆不会下坠，而且当主起升机构高速下降时发生起重机紧急停电时，即便此刻吊具会因惯性下滑，吊具电缆仍可被从卷筒

上拽出而不会拉坏电缆。这种具有“防抱死”功能的制动力矩是不可调。完全是基于对系统的准确计算结果，出厂前就选定了制动元件。因为曾经有人统计过马达制动器失效的原因，超过70%是因不正确的调整所致。而因这种电缆卷筒的制动器因连续使用时间越长，制动抱闸时间就越短暂。4~5年都不一定需要更换制动器元件。

5) 变频自动线性变扭矩驱动系统充分利用了变频器自带的 I/O 端口和功能模板实现了闭环逻辑控制。但仅从起重机的控制系统获取：

- 电缆卷筒用 380VAC 50HZ 动力电源（带独立断路器，不小于 32A）；

- KC1 起重机控制合上信号；
- KC2 吊具下降信号；
- KC3 主起升手柄离开零位信号（此信号需要延时 6 秒断开）；
- KC4 起重机故障信号；
- SC4 起重机故障复位信号。

而电缆卷筒仅向起重机的控制系统输送以下信号：

- Reel Driver Ready 可操作起重机信号；
- Reel Drive Running 电缆卷筒驱动正在运行信号；
- Reel Brake Energised 电缆卷筒开闸信号；
- Reel Automatic Mode Selected 电缆卷筒选择了自动运行模式信号；

- Motor Over-temperature 电缆卷筒马达过热信号;

因此,起重机的控制系统并不参与变频自动线性变扭矩驱动的控制,两者之间是开环的关系。

5、设计改造

针对上述分析,我们采用小车下沉式结构,在保证不改变小车整体受力的情况,给司机操作也带来极大的方便,放线采用原来电缆的走线,变频器放置司机室。

6、实施改造

6.1. 机械部分改造

本改造项目的新增设备吊具动力电缆卷筒设备总成安装在岸桥起重机的小车上,碍于小车的通行高度限制,在小车台架平面上开孔设置悬挂式下沉钢平台,以放置吊具动力电缆设备总成。该悬挂式下沉钢平台连同吊具动力电缆设备总成的重量约为 3500kg,其安装位置高度约为 42m。具体改造如下:

6.1.1 在解除有关的动力与控制的电气连接的情况下通过测量、放线,定位,割除小车钢平台约 9 平方米,并拆除一切影响下沉式钢平台安装的障碍物。

6.1.2 安装并焊接固定新的悬挂式下沉钢平台的 4 个牛腿,卷筒钢平台组件就位后先用安装螺栓预固定,经校平后紧固螺栓予以施焊。

6.1.3 钢平台上扶梯栏杆及节点加固等安装,电焊及拆除钢板处修补打磨补漆,撤除起重设备。

6.1.4 驾驶室内电气控制箱安装，原电气控制柜内加装空气开关等改装。

6.1.5 敷设电气管道及电缆, 接线及校对。

6.2. 电气部分改造

6.2.1 电气部分主要实现以下功能：

卷盘系统设计用于自动卷缆和放缆操作。电缆卷盘电机由一台 Vacon NX 变频器驱动，配备自主研发的应用程序，由安装在电机尾部的编码器以及箱体内的线性编码器提供控制反馈，变频器内部配 2 套参数分别控制卷缆和放缆的扭矩输出，输出扭矩线性变化使得电缆能够平稳的跟随主起升动作。由于需要克服电缆的重力，在同一位置的卷缆扭矩比放缆扭矩大。其电路图如下：

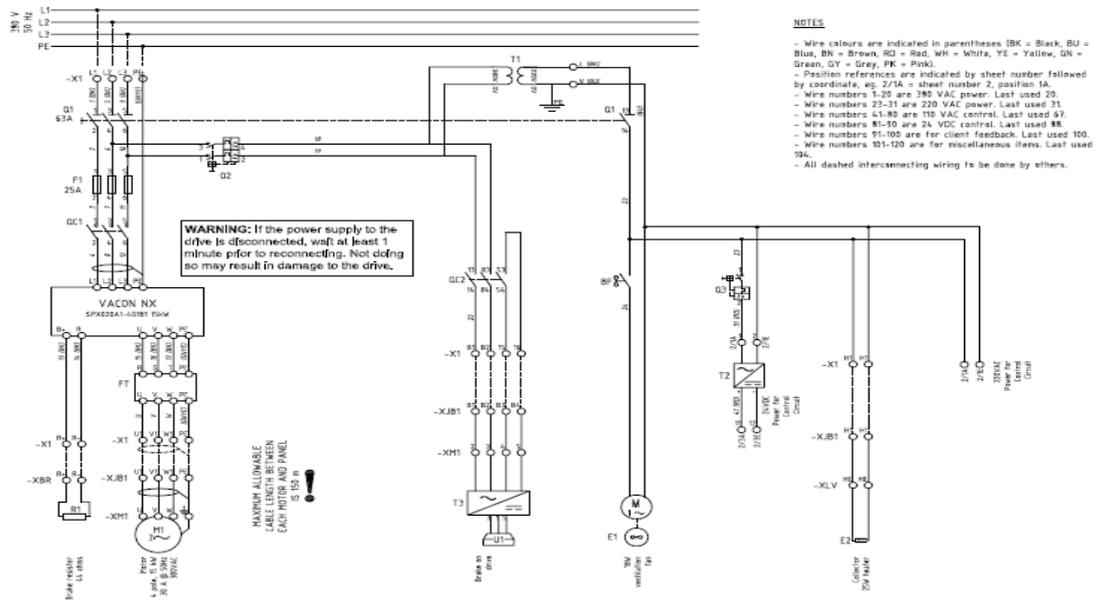


图 1

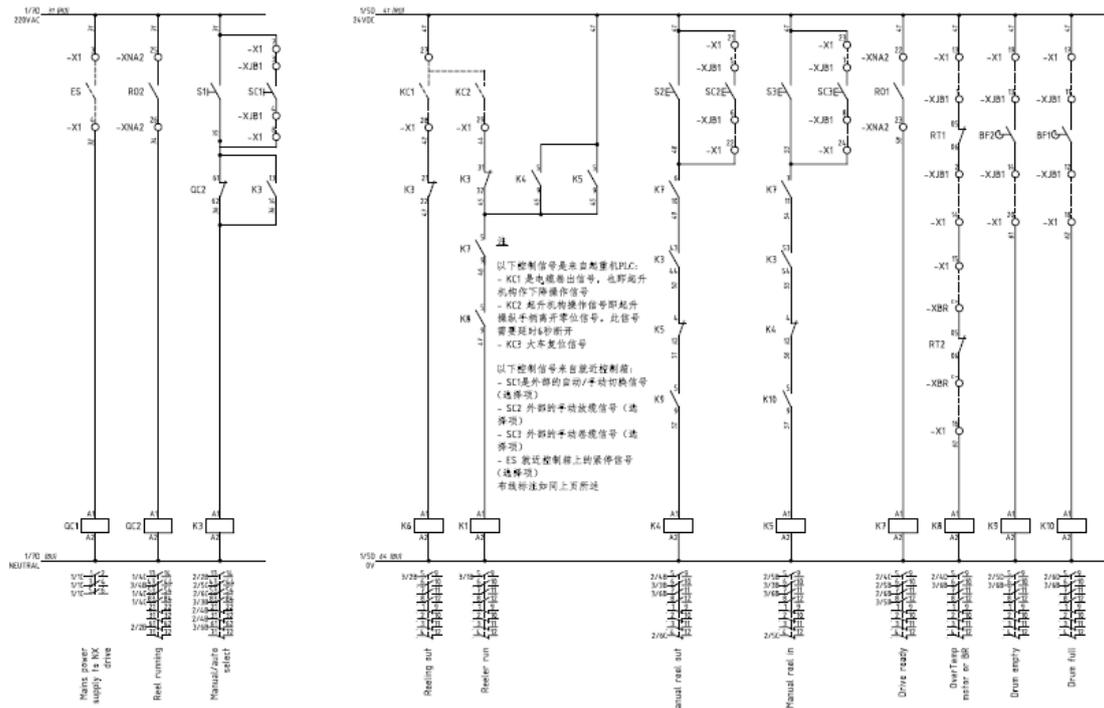


图 2

元器件说明:

Q1 总电源断路器 QC1, QC2, K3 接触器 Q2, Q3 带过温保护的断路器 F1 保险丝 FT 电抗器 R1, R2, R3 制动电阻 XM1 电机 BF 电控柜温控 E1 风扇 T1, T2 变压器 T3 整流桥 U1 制动器 E2 滑环箱加热器 E3 电机加热器 Kxx 继电器 RT1 电机温控 BF1 凸轮限位满盘信号 BF2 凸轮限位空盘信号 G1 编码器 S1, SC1 手动/自动选择 S2, SC2 手动放缆 S3, SC3 手动卷缆 S4, SC4 复位 KC1 控制电源合信号 KC2 放缆信号 KC3 卷缆信号 KC4 复位信号 R01 卷盘控制柜内部信号 (变频器正常) R02 卷盘控制柜内部信号 (变频器工作)

6.2.2 各个电气设备详细功能介绍:

1 Vacon 变频器:

采用矢量控制方式控制电机的扭矩输出。

2 电机编码器:

安装在电机尾部的编码器提供电机的速度反馈，变频控制方式使得即使电机转速为0 的时也能够精确控制扭矩输出。编码器脉冲信号的传输使用Belden 六芯双层对绞屏蔽线，且当中不能有接头，调试时如果发现方向相反A 通道和B 通道整体互换。

3 制动器:

在变频器没有输出的时候，装于电机尾部的制动器制动防止掉缆。

4 电机过热保护:

为常闭点电机过热时断开，禁止卷盘的动作；

5 制动电阻:

安装于电气箱旁边，用于消耗卷盘放缆过程中电机反向旋转产生的电能。

6 线性编码器:

在卷盘运行的过程中，电缆当中始终保持适当的张力。由于卷筒运行时卷筒上的缠缆长度和转动惯量都在不停变化，所以要求系统在变扭矩情况下工作。扭矩数值具体根据卷筒上的电缆圈数和运行方式（放缆/卷缆）计算得到。安装于滑环箱的线性编码器可以把卷筒上的电缆缠绕圈数反馈给变频器，作为变频器自动控制扭矩输出的给定信号。使用4 芯双绞屏蔽线，当中不能有接头。

7 自动/手动模式:

电气箱和就近控制箱上有自动/手动模式控制按钮，在安装、调试或者设备维护时可以使用。当调到手动模式时，主起升不能动作。在手动模式下，手动卷缆和手动放缆会根据预先设定的速度在速度控制模式下运行。

8 凸轮限位:

滑环箱内的凸轮限位用于指示满缆和空缆。

9 满盘信号为保护信号:

为常闭点，在卷盘达到排缆极限时触发，限制卷盘和主起升的动作。

10 空盘信号为保护信号:

为常闭点，用于指示卷盘上已没有足够的电缆（只有2圈电缆剩余在卷盘上），触发时限制卷盘和主起升动作。

11 加热器:

在滑环箱内装有一个自调节加热器，防止结露，该加热器必须一直通电；电机内部的防结露加热器在电机运行时断电。

6.2.3 改造过程中与桥吊联锁电气元件及功能（图3）

1 稳定的电源供应:

380VAC，63A，带保险丝

2 放缆信号KC2:

吊具向下运行时触发该信号，该信号根据运算结果即时做出反应。

3 卷缆信号KC3:

主起升和小车运行时触发，该信号在上述动作停止后延迟6 秒断开，以保证电缆保持一定的张力。但在“紧急停车”时该信号立即断开。

5 复位信号KC4:

可以从司机室远程复位电缆卷盘故障，但在复位之前必须先根据屏幕提示排除故障

6.2.4反馈信号（图4）

//卷盘动作控制，

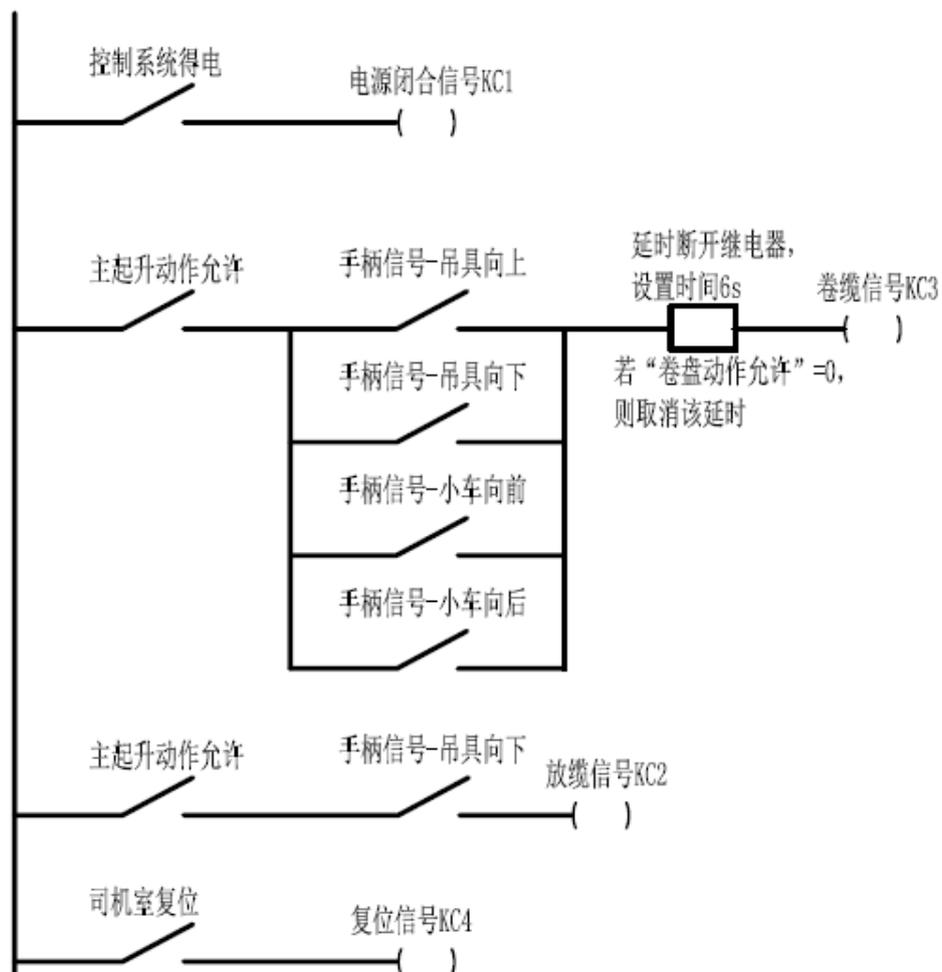


图 3

//保护信号，故障信息可同步显示在屏幕上，如：
 卷盘正常=0，显示“吊具电缆卷筒变频器未准备好”
 自动模式=0，显示“吊具电缆卷筒维修模式”
 电机过热故障=0，显示“吊具电缆卷筒电机过热”
 卷盘空盘信号=0，显示“电缆空盘，禁止吊具向下”
 卷盘满盘信号=0，显示“电缆满盘，禁止吊具向上”

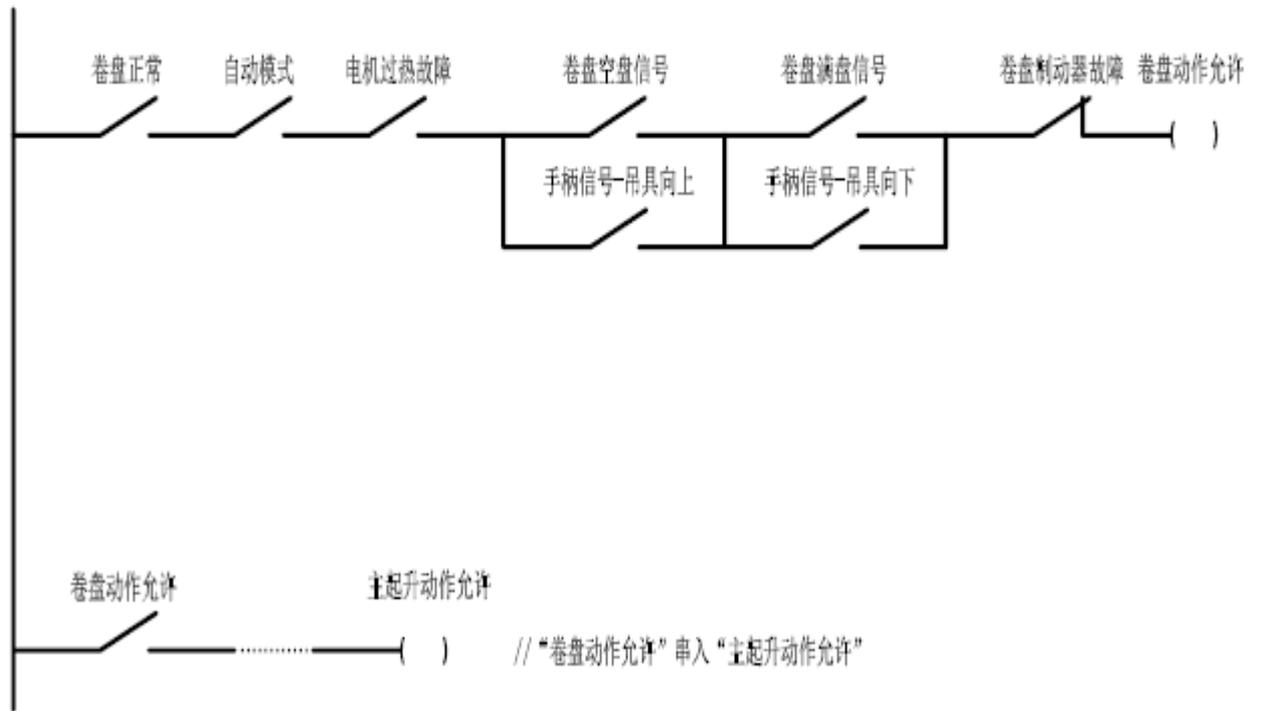


图 4

以下信号为卷盘反馈给主控PLC 的信号：

- 卷盘正常 - - - - - 编入程序，控制联锁
- 卷盘动作 - - - - - 可编入程序，仅用作显示
- 自动模式 - - - - - 编入程序，控制联锁
- 手动放缆模式 - - - - - 可编入程序，仅用作显示
- 手动卷缆模式 - - - - - 可编入程序，仅用作显示
- 电机过热故障 - - - - - 编入程序，控制联锁

卷盘空盘信号 - - - - - 编入程序，控制联锁

卷盘满盘信号 - - - - - 编入程序，控制联锁

注意事项

变频器断电后至少等待1 分钟后才能再给电，以免损坏变频器。

6.2.5 桥吊程序修改

1 添加电缆卷筒控制程序：

按照控制要求添加电缆卷筒程序控制段，将电缆卷筒的程序控制系统融入桥吊控制系统中，程序如下：

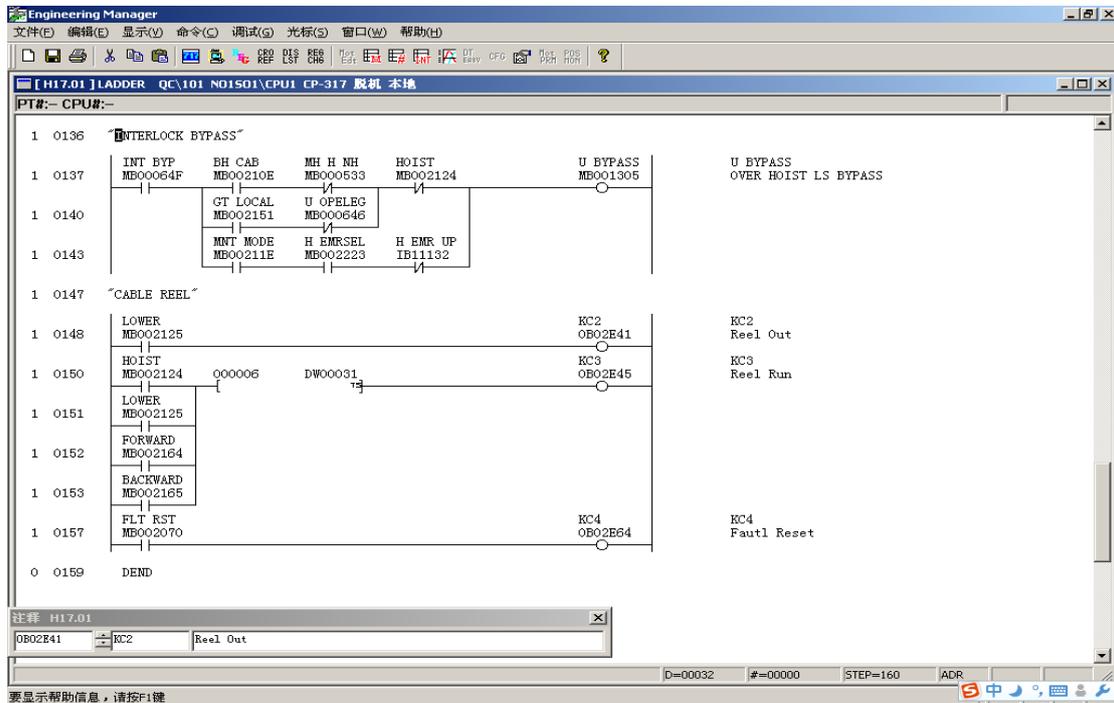


图5

2 对现有程序进行修改：

在原程序的起升联锁程序段中加入电缆卷筒联锁，分别为：电缆卷筒变频器正常联锁、电缆卷筒马达过温联锁及手动自动模式联锁。

黑框内为程序添加部分：

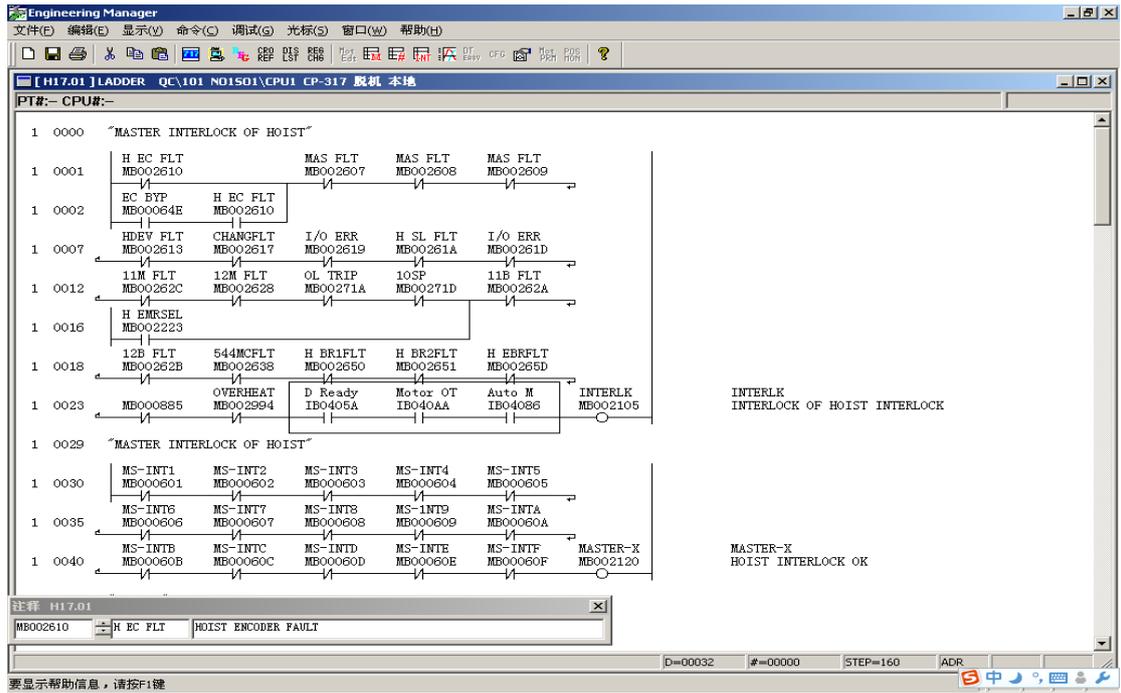


图6

在原程序的起升上升联锁程序段中加入电缆卷筒满缆联锁，在原程序的起升下降联锁程序段中加入电缆卷筒空缆联锁。

黑框内为程序添加部分：

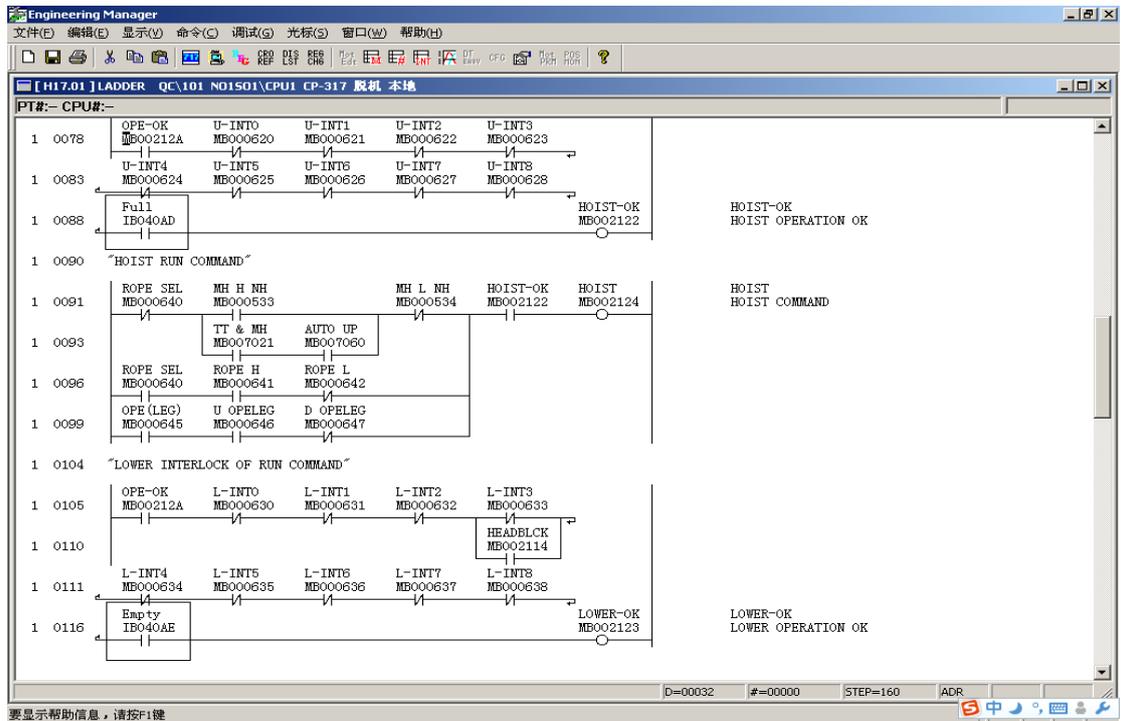


图7

6.2.6 通电调试

在所有改造完成以后进行调试，调试环境在不同环境下进行。

三、经济效益及成果运用前景

以 2010 年为例，本公司去年共发生司机操作失误拉断的吊具电缆总长度为 210 米（本公司使用帕拉力电缆，每米 885 元左右），损失的电缆及维修费用约为 19 万左右。随着原材料的不断涨价，吊具电缆的价格也随之提高。通过吊具电缆卷筒设备的改造，将大风对吊具电缆的影响消除，提高司机作业效率，同时可以有效控制吊具电缆拉断故障，降低吊具电缆钩损情况，从而降低了因吊具电缆所发生的维修及设备成本的费用。

由于变频自动线性变扭矩驱动的电 缆卷筒具有系统构成简单、控制精度高特点，吊具电缆卷筒随主起升机构运行能保持极高的同步性和高可靠性。我公司自 2010 年 3 月份用这种技术首先对 101 岸桥实施技术改造以来获得了非常好的效果后又用同样的技术相继取代了 108 和 102 岸桥上的重型垂缆+储缆筐系统。这一系列成功的改造大大提高司机作业效率，获得了公司操作部门的肯定。