

doi: 10.7690/bgzd.2015.10.018

基于 Bently3500 的风洞压缩机轴系监测系统

张文¹, 周恩民¹, 刘恺¹, 王军², 郭祥波², 张武军²

(1. 中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000;

2. 西安陕鼓动力股份有限公司自动化中心, 西安 710075)

摘要:为准确监测 0.6 m 连续式跨声速风洞压缩机轴系的径向振动、轴向位移和键相位信号,设计基于 Bently3500 的轴系监测系统。采用 Bently3500 机械保护系统进行硬件配置和参数组态,通过 PLC 下位程序和上位机 HMI 设计,建立一套连续的在线轴系检测系统,并成功应用于压缩机运行和风洞调试。结果表明:系统能准确反映压缩机轴系的实时运行状态,实现轴系关键运行参数的连续采集、在线监测和逻辑报警,为压缩机的安全运行保护提供依据。

关键词:连续式风洞;透平压缩机;Bently3500;轴系监测

中图分类号:TJ06 **文献标志码:**A

Compressor Shafting Monitoring System of Wind Tunnel Based on Bently3500

Zhang Wen¹, Zhou Enmin¹, Liu Kai¹, Wang Jun², Guo Xiangbo², Zhang Wujun²

(1. High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China;

2. Automation Center, Xi'an Shaangu Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to monitor radial vibration, thrust position and key phase of compressor shafting in 0.6 m continuous transonic wind tunnel accurately, a shafting monitoring system based on Bently3500 machinery protection system was developed. By Bently3500 configuration, PLC and HMI program designing, the developed continuous online monitoring system was successfully used in wind tunnel testing and compressor commissioning. The debugging results show that: the system fully meets the requirements of compressor shafting monitoring, achieves continuous acquisition, monitoring and logic alarm of shafting working parameters, provides operation protection for compressor.

Keywords: continuous wind tunnel; turbo compressor; Bently3500; shafting monitoring

0 引言

中国空气动力研究与发展中心新建的 0.6 m×0.6 m 连续式跨声速风洞(简称 0.6 m 连续式风洞)配置了主、辅 2 套压缩机。其中:主压缩机为 AV90-3 轴流压缩机,是风洞的动力系统,用于驱动主回路气流流动;辅压缩机为 E71-3 离心压缩机,用于跨声速时的驻室抽气。

主压缩机安装在风洞管道内,入口和出口均与洞体相连,设计最高转速 3 600 r/min;辅压缩机安装在驻室抽气回路,通过齿轮箱增速,最高转速 8 571 r/min。压缩机高速运转时,轴系产生径向振动和轴向位移是不可避免的^[1],尤其当机组通过临界转速或出现喘振等不稳定工况^[2]时,振动和位移急剧增大,极易损坏密封和轴承,严重时使转子和定子碰撞,叶片粉碎^[3],甚至引发风洞轴线偏移,造成重大安全事故。

为实时、准确监测压缩机轴系运行工况,笔者设计了基于 Bently3500 的轴系监测系统,对振动和位移等参数进行了连续采集、在线监测和逻辑报警,

保证了机组及风洞的安全运行。

1 系统组成

轴系监测与控制系统由 Bently3500 系统、PLC 系统、高压变频系统和上位机监控系统等组成,工作示意图如图 1。

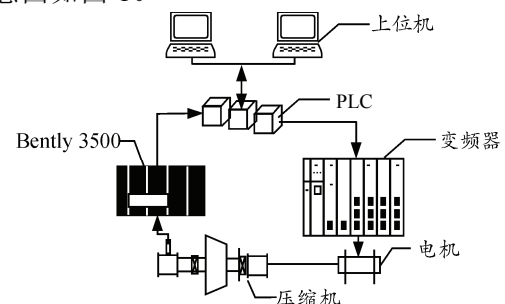


图 1 轴系监控系统工作示意图

Bently3500 系统是最前端的数采设备,为 PLC 系统提供径向振动、轴向位移和键相位等原始数据与报警信号;PLC 系统与 3500 系统通信,完成信号的存储与逻辑处理,并通过高压变频系统实现压缩机的急停控制;上位机监控系统通过 WinCC 组态,实现信号的显示、监测和报警。

收稿日期: 2015-05-26; 修回日期: 2015-07-15

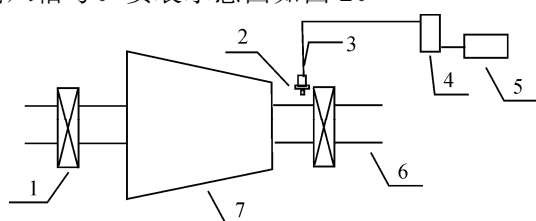
作者简介: 张文(1984—),男,四川人,工学学士,工程师,从事连续式风洞压缩机自动控制技术研究。

1.1 Bently3500 系统

Bently3500 系统由电涡流传感器和框架模块组成，具有组态方便、模块兼容和继电器逻辑编程等优点，可为大型透平机械(压缩机、汽轮机等)提供连续的在线监测功能，并在超过设定运行极限时发出报警信息^[1,4]。

1.1.1 电涡流传感器

电涡流传感器主要由探头、延伸电缆和前置器等组成，输出正比于探头端部与被测轴表面之间间隙的电压信号，为 Bently3500 系统各监测器模块提供输入信号。安装示意图如图 2。



1. 轴承；2. 探头；3. 延伸电缆；4. 前置器；5. 3500 框架模块；6. 被测轴；7. 轴流压缩机。

图 2 主压缩机电涡流传感器安装示意图

1) 3300XL-8 mm 探头。电涡流传感器的敏感元件，由线圈、头部、壳体、高频电缆和接头组成，振动测量的安装示意图见图 3。安装时需正对被测轴表面，通过电涡流效应^[5-6]，可精确测量被测轴表面相对于探头端面间隙的变化。

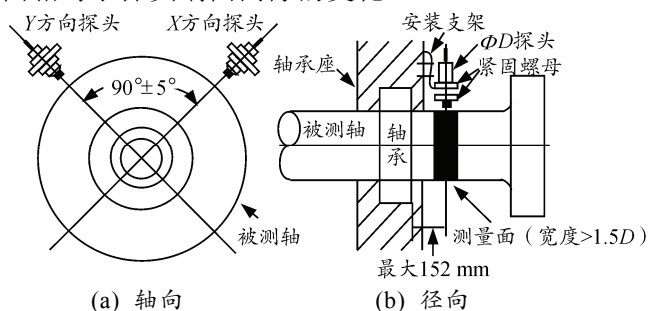


图 3 径向振动探头安装示意图

2) 3300XL-8 mm 延伸电缆。用于传输探头的测量信号，延长传输距离，缩短探头尾部电缆长度，方便探头安装时的任意转动。延伸电缆长度加上探头自带电缆长度，应与配套前置器所要求的一致。

3) 3300XL-8 mm 前置器。既为探头线圈提供高频交流电流，也感受探头端面由于被测轴靠近而引起的参数变化。经过滤波、放大和线性修正，产生随探头端面与被测轴间隙变化的电压信号。

1.1.2 框架模块

1) 3500/05 全尺寸框架。用于安装监测器模块

和框架电源，并为监测器模块提供电源；电源采用 3500/15 半高度电源模块，给整个框架供电，输入电源为交流高压电源，175~264 V。

2) 3500/22M 瞬态数据接口 (TDI)。运行在 RIM 插槽中，连续采集稳态和瞬态波形数据。每个框架要求一个 TDI 或 RIM，当框架安装了可选的使用以太网的通信网关模块时，可以代替 RIM 与 3500 组态软件通信，但框架中仍需安装 RIM。

3) 3500/25 半高型 2 通道键相器模块。安装于框架第 2 插槽内，工位号 KT201 和 KT701，分别为主压缩机键相和辅压缩机键相。键相器模块将来自电涡流传感器的脉冲信号转化为数字信号，指示何时转轴上的键相位凹槽标记通过键相位探头。

4) 3500/40M 4 通道位移监测器模块。安装于框架第 3~6 插槽内，用于检测轴系的径向振动和轴向位移，信号分配见表 1。位移监测器模块将压缩机轴系振动和位移的当前值与组态报警值进行比较，驱动报警系统工作，达到保护机组的目的。

表 1 位移监测器模块信号分配

插槽号	通道号	信号名称	工位号
3	第 1, 2 通道	主压缩机前轴 X, Y 向振动	YT201X, Y
3	第 3, 4 通道	主压缩机后轴 X, Y 向振动	YT202X, Y
4	第 1, 2 通道	辅压缩机前轴 X, Y 向振动	YT701X, Y
4	第 3, 4 通道	辅压缩机后轴 X, Y 向振动	YT702X, Y
5	第 1, 2 通道	齿轮箱高速轴 X, Y 向振动	YT711X, Y
5	第 3, 4 通道	齿轮箱低速轴 X, Y 向振动	YT712X, Y
6	第 1 通道	主压缩机轴位移	ZC201
6	第 3, 4 通道	辅压缩机轴位移 1, 轴位移 2	ZC701, 702

5) 3500/33 16 通道继电器模块。每个通道均具有独立的报警驱动逻辑，通过独立编程，执行所需的表决逻辑。

6) 3500/92 通信网关模块。该模块具有广泛的通信能力，通过内部高速网络从框架内的模块采集静态数据，经由 CP341 模块，将 Bently3500 系统已组态的寄存器组信号与 PLC 系统进行数据交换。

1.2 PLC 系统

采用 SIEMENS S7-400 PLC 控制系统，作为 3500 系统的通信主站^[7]，系统示意图见图 4。

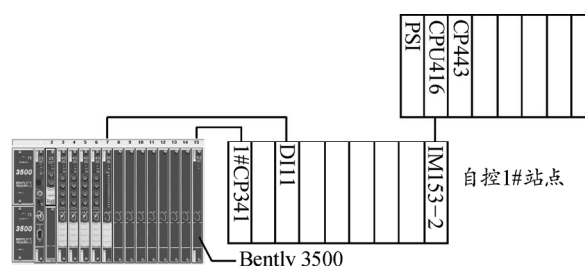


图 4 PLC 系统与 3500 系统连接示意图

3500/92 通信模块通过 RS485 与 PLC 机架的 CP341 通信, 将径向振动、轴向位移和键相位等实测信号传送至 PLC 存储器, 在上位机监控系统中进行实时显示; 来自 3500/33 模块的逻辑报警信号则通过 DI11 模块进行采集, 为上位机监控系统的报警设置和压缩机的急停控制提供原始信号。

1.3 上位机监控系统

上位机监控系统由工程师站和操作员站 2 台服务器组成, 分别独立对主、辅压缩机轴系的运转情况进行集中显示、监测和报警。监控画面采用 SIEMENS SIMATIC WinCC 过程可视化系统设计, 在 WinCC 资源管理器中调用变量、图形和报警等编辑器进行组态和项目管理^[8-9], 即可实现轴系参数的在线显示、过程监控和报警提示等功能。

2 程序设计

2.1 3500 框架组态

框架组态通过框架组态软件完成, 根据框架模块的物理配置、I/O 通道分配和报警设置, 在 PC 机上建立相应的组态文件, 并下载到 3500 框架。

2.1.1 报警设置

在 3500/40M 位移监测器模块 Setpoints 选项设置, 可对每个通道进行报警组态, 组态画面见图 5, 报警参数及延时设置见表 2。报警分为一级报警和二级报警, 对应压缩机轴系监测信号大或者过大。

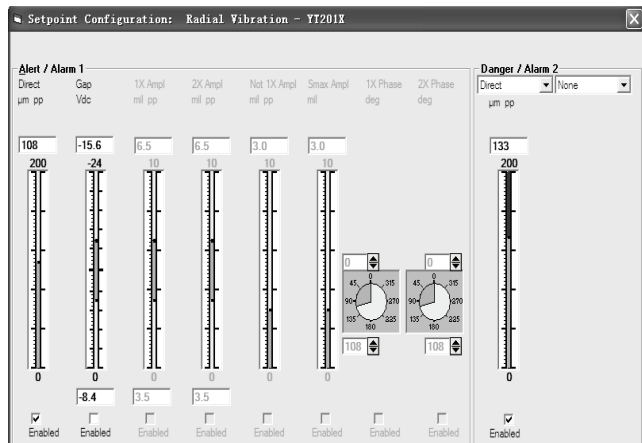


图 5 主压缩机前轴振动报警组态画面

表 2 位移监测器报警与延时设置

信号名称	一级报警	一级延时/s	二级报警	二级延时/s
主压缩机轴向振动/ μm	108	3	133	1
辅压缩机轴向振动/ μm	91	3	112	2
齿轮箱高速轴振动/ μm	50	3	70	3
齿轮箱低速轴振动/ μm	70	3	90	3
主、辅压缩机轴位移/mm	-0.4~0.4	3	-0.6~0.6	1

2.1.2 继电器组态

根据框架中任意监测器通道或通道组合的报警输入, 在继电器关联界面进行“与门”或“或门”逻辑编程, 驱动继电器输出, 组态画面如图 6。下面以通道 1 和通道 2 组态为例进行说明。

通道 1 逻辑: $((S03C01P01A1 + S03C02P01A1) + S03C03P01A1) + S03C04P01A1$;

通道 2 逻辑: $((S03C01P01A2 + S03C02P01A2) + S03C03P01A2) + S03C04P01A2$ 。

其中: S 为插槽号; C 为通道号; P 为信号源; A 为报警级别, A1 为一级报警, A2 为二级报警; “+”为或逻辑。通道 1 表决的逻辑为第 3 插槽所有 4 个通道测量值的一级报警或逻辑, 即是主压缩机前轴或后轴的 X 或 Y 向振动超过了 $108 \mu\text{m}$; 通道 2 表决的逻辑为第 3 插槽所有 4 个通道测量值的二级报警或逻辑, 即是主压缩机前轴或后轴的 X 或 Y 向振动超过了 $133 \mu\text{m}$ 。报警激活后, 对应通道的继电器接点输出。

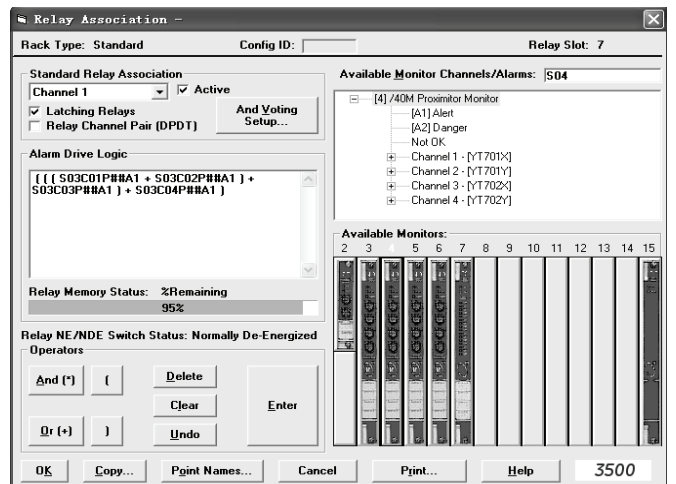


图 6 继电器组态画面

2.1.3 寄存器组态

Modbus 寄存器组由 500 个寄存器组成, 整数寄存器的地址为 45 000~45 499, 浮点寄存器的地址为 46 000~46 999。将振动、位移和键相的实测值进行寄存器组态, 以提高框架通信效率, 组态画面如图 7。采用浮点寄存器的组态代码为

46001-46002: S03:C01:Ppl's:Direct;

表示寄存器 1 和寄存器 2 内(浮点数占用 2 个寄存器的)信号为第 3 插槽第 1 通道的测量值, 即是主压缩机前轴 X 向振动实测值。其余寄存器组态方法相同, 共组态 34 个寄存器, 覆盖轴系全部实测信号。

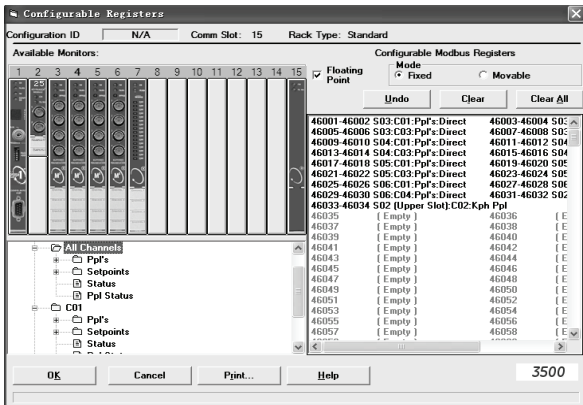


图 7 寄存器组态画面

2.2 PLC 程序设计

由 CP341 通信而来的振动、位移和键相位等实测信号存入 DB16 数据块，由上位机监控系统进行实时显示；继电器接点输出的报警信号由 FC10 块存储到 DB3 数据块，作为声音和图像报警、机组急停的信号源。一级报警仅用于提醒操作人员，二级报警用于机组急停。主压缩机轴振动报警与急停程序如图 8。

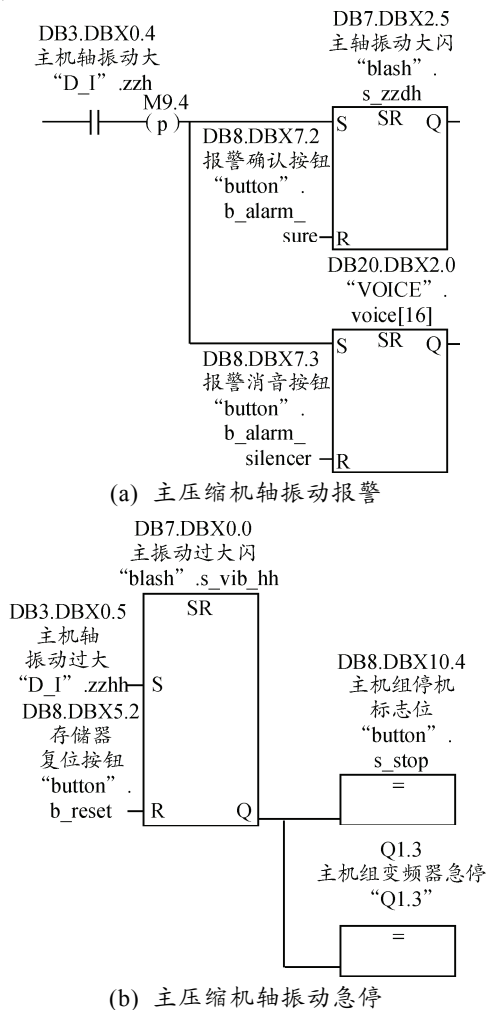


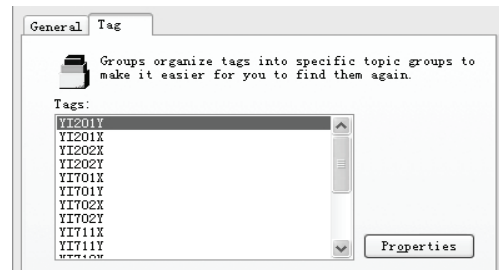
图 8 主压缩机轴振动报警与急停程序

2.3 WinCC 组态

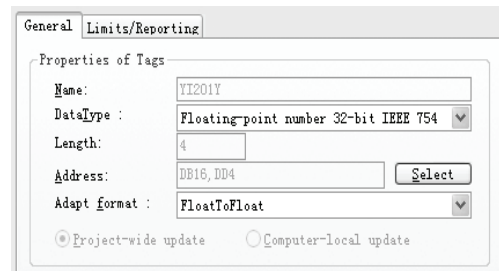
WinCC 组态包括变量、图形和报警器组态，将振动、位移和键相位等实测信号和继电器报警信号在监控画面中进行显示和报警，方便操作人员实时监控压缩机轴系运行状态。

2.3.1 变量组态

在 WinCC 变量管理器中，建立覆盖压缩机轴系所有实测信号的 bently 变量组，根据每个信号在 PLC 中的地址分别进行组态，方便监控画面实时调用和显示。组态画面如图 9。



(a) bently 变量组态画面



(b) bently 变量组态画面

图 9 WinCC 变量管理器组态画面

2.3.2 画面组态

调用图形编辑器，建立轴系在线监测画面，集中显示与监测振动、位移和键相位等实测信号，组态画面如图 10。

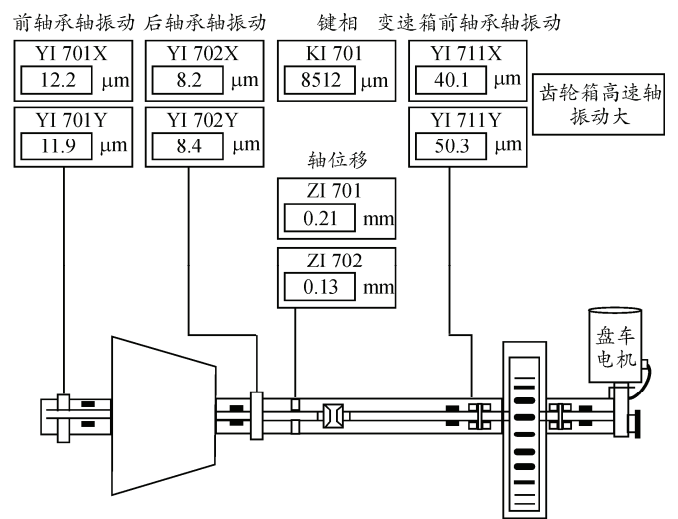


图 10 辅压缩机轴系在线监测画面

2.3.3 报警组态

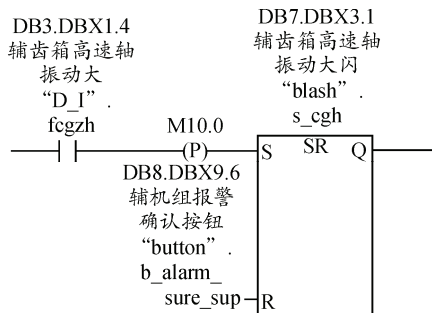
建立报警监测画面，将继电器输出的报警信号组态到 I/O 控件，当报警激活时，I/O 控件的信号图标将以黄绿交替闪烁的方式显示报警。此外，为更加明确地警示操作人员，调用了 WinCC 报警器，专门设置了声音报警。

3 应用效果

压缩机轴系监测系统已正式投运于 0.6 m 连续式风洞。风洞调试和压缩机运行期间，轴系振动、位移和键相位信号采集连续，监测画面友好，逻辑

报警实时，共监测到 50 余次轴系振动超过设定运行极限发出的报警信息。

以辅压缩机轴系振动大报警为例。辅压缩机升速或降速过程中，当转速位于临界转速 4 400 r/min 附近时，辅压缩机前轴、后轴及齿轮箱振动明显增大，幅值达到 55 μm 左右。由表 2 可知，已超过齿轮箱高速轴振动设置的一级报警值。监测系统准确监测到此振动值，PLC 程序中 DB3.DBX1.4 和 DB7.DBX3.1 信号置位，触发报警监测画面和报警器报警如图 11。操作人员查明报警出处，分析报警原因，并根据实际情况进行了妥善处理。



(a) 振动报警程序

辅压缩机轴振动大	润滑油总管压力低
辅压缩机轴位移大	润滑油需通冷却水
齿轮箱高速轴振动大	润滑油冷却后温度高
齿轮箱低速轴振动大	润滑油箱液位低
辅压缩机轴承温度高	润滑油过滤器差压高

(b) 画面

图 11 辅压缩机齿轮箱高速轴振动报警程序与画面

4 结束语

自轴系监测系统投运以来，系统运行稳定，工作可靠，实现了压缩机轴系振动、位移和键相位的连续采集、在线监测和逻辑报警，为操作人员全面掌握机组的实时运行状态和机组的安全运行提供了依据，也为后续连续式高速风洞压缩机轴系监测设计提供了参考和借鉴。

参考文献：

[1] 尹峰, 何鲜, 邢艳霞, 等. Bently3500 在空气压缩机组机械保护系统中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2013, 11(40): 1424-1424.

[2] 李超俊, 余文龙. 轴流压缩机原理与气动设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986: 223-242.

[3] 惠增宏. NF-6 风洞轴流压缩机喘振信号检测、分析与应

用[D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 14-22.

[4] 周瑞俊. Bently3500 在 300MW 汽轮机组监测系统中的应用[J]. 山西电力, 2008, 2(1): 44-45.

[5] 郑忠楷, 蒋学程, 罗志灶. 基于电涡流效应的金属探测器的设计与分析[J]. 实验科学与技术, 2013, 11(5): 13-14.

[6] 姜锐, 窦峰山. 基于差分结构的大间隙变面积电涡流式传感器[J]. 兵工自动化, 2011, 30(4): 53-53.

[7] 张利平, 刘宁, 董树泉. 基于 Modbus 协议 CP341 与 BENTLY3500 之间的通信[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011(2): 86-87.

[8] 向晓汉, 刘摇摇. 西门子 WinCC V7 从入门到提高[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 7-9.

[9] 陈海霞, 柴瑞娟, 任庆海, 等. 西门子 S7-300/400 PLC 编程技术及工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 26-27, 347-348.