基于 Modbus 通讯的变频器在某地浸矿山的应用

庄治旭，李喜龙，曹俊鹏，田 爽，周文蒙

（中核通辽铀业有限责任公司，内蒙古 通辽 028000）

摘要：自动化工控系统常应用于原地浸出采铀行业，随着地浸矿山生产中监测与控制设备的增多，传统模拟量通讯存在线路敷设成本高、I/O 模块使用数量多等缺点。在内蒙古某地浸矿山井场控制系统中，采区变频器使用 Modbus 通讯方式，完成其参数的远程采集与控制，降低项目建设成本，实现了在地浸采铀监控中心远程一键式启/停变频器及频率调节，提高了工作效率。

关键词：地浸采铀；Modbus 通讯；变频器

中图分类号：TP273；TD868 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-8063(2023)03-0050-07

DOI：10.13426/j.cnki.yky.2023.01.01

随着原地浸出采铀行业的发展，搭建自动化、数字化、智能化矿山成为必然趋势。在自动化程度越来越高的情况下，变频器的应用领域得到拓展，变频技术与微电子技术[1]结合，可通过改变电机工作电源频率的方式进行交流电动机的控制。

在原地浸出采铀工艺中，通过安装在抽液井中的潜水泵将浸出液抽至地表。潜水泵电机由集控室中的变频器进行频率调节及控制[2]。传统自动化系统常采用模拟量的方式进行频率调节及反馈采集[3]，这种方式需要敷设大量线路，项目建设成本较高，维护工作量也较大，其应用具有一定的局限性。Modbus 现场总线方式能有效解决这些问题，更具经济性[4]。

通辽某地浸采铀矿山一期井场存在集控室位置分散且相距较远的情况。以该井场为研究对象，集控室内的变频器、电磁流量计等设备采用 Modbus 现场总线方式进行通讯，以期提高对采区变频器控制的便捷性。

1 井场控制系统结构

某地浸矿山一期井场共建设 10 个集控室，每个集控室配置 32 台变频器、32 台抽液流量计、80 台注液流量计、1 套自动化控制柜，系统结构见图 1。

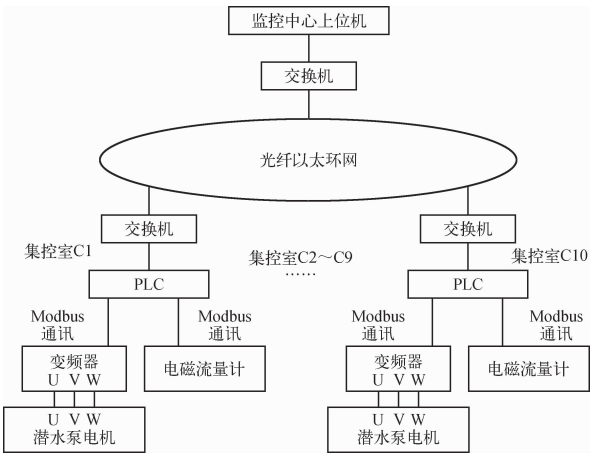


图 1 某地浸采铀矿山井场控制系统结构

Fig. 1 Well site control system structure of an in-situ leaching uranium mine

收稿日期：2023-01-01

第一作者简介：庄治旭(1995—)，男，辽宁丹东人，学士，助理工程师，主要从事原地浸出采铀自动化技术工作。

采用 CPU 1513-1 PN 作为井场各集控室的中央处理单元，该 CPU 支持多个从站扩展，网络连接功能强，处理速度快[5]。下位机使用 TIA Portal 软件进行组态、编程及调试。电磁流量计、变频器与 CPU 之间通过 Modbus 通讯进行数据交换，最终通过光纤以太环网将所有集控室数据传输至生产监控中心[6]，完成各设备状态的采集与控制。

为保证现场网络可靠性，选择环网冗余协议，可以实现在一个环路中形成备份链路。本矿山光纤以太环网由 MOXA 交换机完成信号的转换与传输。普通以太网交换机一旦形成环形网络，容易出现 Loop 情况（环网风暴），造成网络瘫痪；而 MOXA 交换机支持 Turbo Ring V2 冗余协议，在该协议下交换机之间通过手拉手形式构成环形网络拓扑，环网上的某一路断开，不影响网络上的数据转发，避免了环网风暴的产生，提高了环网的可靠性。

通过 IE 工具 Ping 交换机的默认 IP 地址，进入配置界面对每台交换机进行 IP 地址分配，使上位机、下位机及交换机的地址段保持一致，C1～C10 集控室交换机的 IP 地址见表 1，子网掩码均设置为 255.255.255.0。在 Communication Redundancy 的页面中，选择 Turbo Ring V2 冗余协议（图 2）。

表 1　各采区交换机 IP 地址

Table 1　IP address of switches in each mining area

位置	IP 地址
C1 集控室交换机	192.168.10.106
C2 集控室交换机	192.168.10.107
C3 集控室交换机	192.168.10.108
C4 集控室交换机	192.168.10.109
C5 集控室交换机	192.168.10.110
C6 集控室交换机	192.168.10.111
C7 集控室交换机	192.168.10.112
C8 集控室交换机	192.168.10.113
C9 集控室交换机	192.168.10.114
C10 集控室交换机	192.168.10.115



图 2　MOXA 交换机配置图

Fig. 2　Configuration diagram of MOXA switch

2　Modbus 通讯设备接线

在设备硬件层面上，西门子 PLC 与丹佛斯 FC101 变频器之间的 Modbus 通讯采用手拉手菊花链式拓扑结构将网关和各串行设备节点连接起来，并在网络起始端和末尾端设备的 RS485＋和 RS485－之间各并接 1 个 120 Ω 的电阻以减少信号在两端的反射，工作模式为半双工（RS485）两线制操作模式。PLC 通讯模块为主站，丹佛斯变频器为从站，从站设备数量控制在 31 台以内[7]。由于多个设备同时发送数据，会导致设备帧被破坏[8]34；因此在 RS485 通讯模式下，需确保任意时间内只有 1 台设备进行数据发送。

PLC 通讯模块的 15 针 D 型母头连接器，引脚 4 为 R(A)/T(A)－，引脚 11 为 R(B)/T(B)＋，引脚 8 为 GND[8]35。丹佛斯 FC 系列变频器端子 68

为 N(－)RS485，端子 69 为 P(＋)RS485。通讯模块与变频器之间的接线见图 3。

将焊接完成的 D 型母头连接器插入通讯模块，即可完成 Modbus 通讯硬件接线。为防止信号干扰，在接线过程中将双绞屏蔽线中的屏蔽金属层接到了变频器 61 端子上。为避免电位差的存在[9]，双绞屏蔽线的屏蔽层只能一端接地，其屏蔽金属层不与通讯模块的 GND 引脚连接。

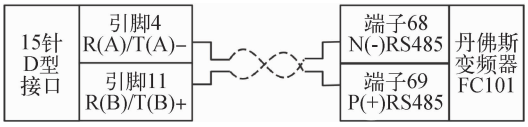


图 3 Modbus 通讯硬件接线

Fig. 3 Modbus communication hardware wiring

3 变频器 Modbus 通讯参数设置

在丹佛斯变频器与西门子 PLC1500 系列控制系统完成硬件通讯接线后，对变频器 Modbus 通讯协议进行内部参数设置。使用下位机 TIA Portal 软件完成变频器 PLC 控制程序编写[10]。

为实现丹佛斯 FC101 系列变频器原地控制与远程通讯控制自由切换，需要设置的参数如下：14-22，选择初始化后将变频器断电重启；8-42，设置 PCD 写配置；8-43，设置 PCD 读配置；5-10，设置为 0，端子 18 输入；8-53，总线(启动选择)；8-02，控制来源，选择 RS485；8-30，选择为 Modbus RTU 通讯协议；8-31，变频器的通讯地址，1～126 范围内地址有效；8-32，设置通讯速度，2 400～115 200，本控制系统选择[3]对应的速度为 19 200，各站速度要求一致；8-33，奇偶校验方式，选择偶校验，1 个停止位，各站要求设置一致[11]。

变频器参数配置后，控制系统采用博途编程软件实现通讯协议。丹佛斯变频器作为从站[12]，所要通讯的 Modbus RTU 地址为参数号前加 4 再乘 10。有 2 个特殊寄存器，对应参数设置的 8-42 和 8-43，相当于 1 个缓存，便于通讯时连续读写数据。“2910”为读配置地址，“2810”为写配置地址，西门子变频器需在地址参数号前加 4，即变频器 8-43.0 对应 2910(42910)，8-42.0 对应 2810(42810)。西门子控制器作为主站发送请求报文到变频器，变频器接到控制器报文后返回响应报文，系统之间数据交换通过功能码进行控制[7]196，报文结构见表 2。

表 2 FC101 变频器 Modbus 报文结构

Table 2 Modbus message structure of FC101 converter

地址	功能	数据	CRC 校验
8 位	8 位	N＊8 位	16 位

4 下位机变频器远程控制程序

该地浸采铀矿山井场一期计划投入生产抽液井约 200 口，每口抽液井安装 1 台潜水泵用于提升浸出液。通过对应采区集控室的变频器对每台潜水泵进行启/停及频率调节，从而实现对潜水泵抽液流量的调节[13]。在运行过程中，存在多种因素造成的停电情况。当采区大面积停电或恢复供电时，需要更快、更便捷的自动化远程控制。

4.1 单台变频器下位机控制程序

PLC 通讯模块与变频器完成设备通讯接线及硬件参数配置后，根据报文结构编写单台变频器的启/停与频率给定的远程控制，以站号为 1 的变频器为例，程序流程见图 4。

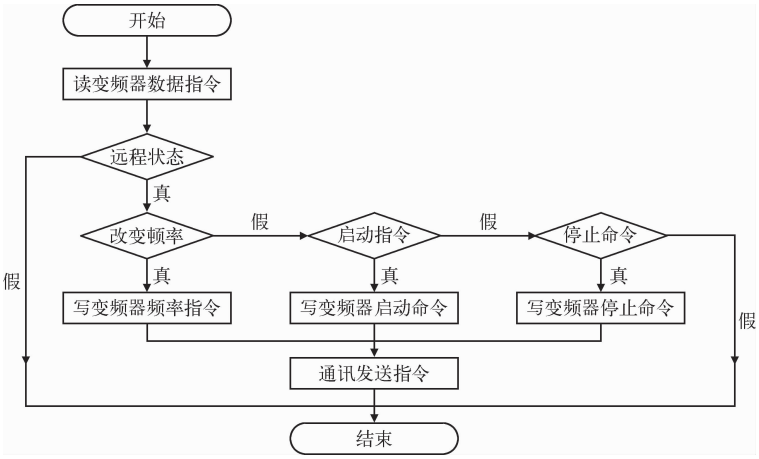


图 4 单台变频器控制程序图

Fig. 4 Control program diagram of single frequency converter

单台变频器控制程序段如下：

```
L  1
T  "BP_ParameterPublic". SlaveNo   //站号为 1 的变频器
L  0
T  "BP_ParameterPublic". Mode   //读模式
L  42910
T  "BP_ParameterPublic". DataAddress
   //变频器读配置地址
L  4
T  "BP_ParameterPublic". DataLength
   //长度为 4 分别对应启动/停止命令、频率、速度、电流
A  "BP_StateBOOL". BPBool[1]. Re
JCN laa1   //变频器不在远程状态，跳转至 laa1，程序不执行
   //改变频率
A(
L  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet
L  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet_save
<>I  )
JCN FF3   //给定频率与寄存器中不一致继续执行程序，否则跳转至 FF3
L  1
T  "BP_ParameterPublic". SlaveNo   //变频器站号
L  1
T  "BP_ParameterPublic". Mode   //写模式
L  42810
T  "BP_ParameterPublic". DataAddress
   //写配置地址
L  2
T  "BP_ParameterPublic". DataLength
   //长度为 2，对应启动/停止命令、频率
L  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet
T  "BP_ParameterPublic". V_DataSnd[2]
T  "BP_Parameter". Send[1]. V_Data[2]
   //2 号寄存器地址写入频率
L  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet
T  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet_save   //保持写入频率
FF3:  NOP 0
A  "BP_CommData". FreqComm[1]. StartHold
JCN FF1   //变频器状态为启动，则跳转至 FF1
L  1
T  "BP_ParameterPublic". Mode
L  42810
T  "BP_ParameterPublic". DataAddress
L  2
T  "BP_ParameterPublic". DataLength
L  1148   //对应 16 进制为 047C
T  "BP_ParameterPublic". V_DataSnd[1]
T  "BP_Parameter". Send[1]. V_Data[1]
   //写 047C 到 1 号寄存器地址，启动变频器
L  "BP_CommData". FreqComm[1]. FreqSet
T  "BP_ParameterPublic". V_DataSnd[2]
T  "BP_Parameter". Send[1]. V_Data[2]
   //将频率赋值到 2 号寄存器
R  "BP_CommData". FreqComm[1]. StartHold   //保持启动
FF1:  NOP 0
A  "BP_CommData". FreqComm[1]. StopHold
JCN FF2   //变频器状态为停止，则跳转至 FF2，结束程序
L  1
T  "BP_ParameterPublic". Mode
L  42810
T  "BP_ParameterPublic". DataAddress
L  2
T  "BP_ParameterPublic". DataLength
L  1084   //对应 16 进制为 043C
T  "BP_ParameterPublic". V_DataSnd[1]
   //写 043C 到 1 号寄存器地址 停止变频器
```

```
    T   "BP_Parameter". Send[1]. V_Data[1]
    R   "BP_CommData". FreqComm[1]. Stop-
        Hold//保持停止
FF2:  NOP 0
laa1: NOP 0
    JU snd   //程序结束
```

4.2 单采区变频器一键式启动

集控室原液间配备 32 台变频器，为保证设备保养、检修的直观性，将变频器分为 2 组，每组编号由 1 至 16。因潜水泵启动的瞬间功率过大，同时启动 32 台潜水泵会对供电线路造成负载过大的影响，所以在一键启动中加入了定时器，保证变频器按编号顺序每 5 s 启动 1 台[14]，定时器见图 5。

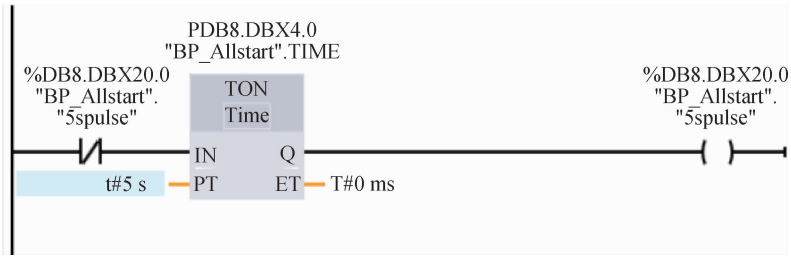


图 5 5 s 延时定时器

Fig. 5 5 s delay timer

在 WinCC 上位机中添加按钮命名为“一键启动”，并链接对应采区“一键启动”变量，变量的类型选择 BOOL 型。点击鼠标左键，向下位机发送启动信号，程序流程见图 6。

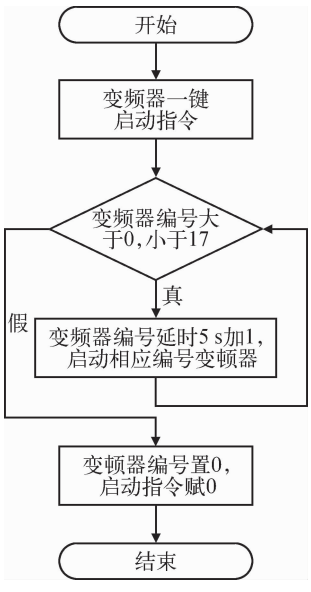


图 6 变频器一键启动程序流程图

Fig. 6 Frequency converter one-key start program diagram

博途下位机中使用 SCL 语言编写一键启动程序，如下：

```
IF "BP_Allstart"."5spulse"=1  AND "BP_All-
   start". All_StartHold=1 THEN
    "BP_Allstart". jishu:="BP_Allstart".
    jishu+1;
END_IF;
IF "BP_Allstart". All_StartHold=1 AND "BP_
   Allstart". jishu<17 AND"BP_Allstart". jishu
   >0 THEN
  "BP_CommData". FreqComm["BP_Allstart".
   jishu]. StartHold:=1;
  "BP_CommData_1". FreqComm["BP_All-
   start". jishu]. StartHold:=1;
END_IF;
IF "BP_Allstart". jishu>17  THEN
   "BP_Allstart". jishu:=0;
   "BP_Allstart". All_StartHold:=0;
END_IF;
```

操作人员按下“一键启动”按钮后，工控上位机的启动信号通过网线传送至机房交换机，再由光纤收发器传送至光纤以太环网，位于井场集控室的交换机进行信号的接收并将该信号传送至下位机 CPU 1513-1 PN。下位机接收到启动信号后，调用上述程序，逐一启动变频器；当变频器编号加至 17 时，程序段将变频器编号与启动信号均强制为 0，跳出变频启动程序，防止变频器全部启动后再次进入循环启动。

4.3　单采区变频器一键式关停

考虑到关停变频器对电网的冲击较小，所以一键关停的逻辑相较于一键启动简单，不需要使用延时定时器，程序流程见图 7。采用 STL 语言进行编程，不再循环判断变频器的状态，直接将关停信号传送给相应的寄存器地址，实现快速关停。

单采区变频器一键式关停程序如下：

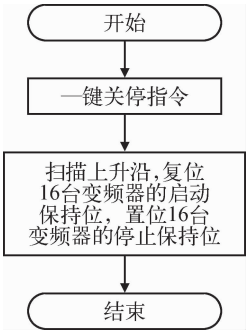


图 7　变频器一键关停程序流程图

Fig. 7　One-button shutdown program diagram of frequency converter

```
A   "BP_Allstart".All_Stop
    FP  "BP_Allstart".All_StopSave
    R   "BP_Allstart".All_StartHold
    R   "BP_CommData".FreqComm[1].StartHold
    R   "BP_CommData".FreqComm[2].StartHold
    …
    R   "BP_CommData".FreqComm[16].StartHold
    R   "BP_CommData_1".FreqComm[1].StartHold
    R   "BP_CommData_1".FreqComm[2].StartHold
    …
    R   "BP_CommData_1".FreqComm[16].StartHold
    S   "BP_CommData".FreqComm[1].StopHold
    S   "BP_CommData".FreqComm[2].StopHold
    …
    S   "BP_CommData".FreqComm[16].StopHold
    S   "BP_CommData_1".FreqComm[1].StopHold
    S   "BP_CommData_1".FreqComm[2].StopHold
    …
    S   "BP_CommData_1".FreqComm[16].StopHold
```

下位机收到上位机发送的一键停止信号后，调用该段程序，捕捉一键停止的上升沿信号，将 2 组变频器启动保持信号进行复位，将操作数清 0。停止保持信号置位，将操作数写为 1，达到一键关停的效果。

5　常见问题及处理措施

5.1　常见问题

井场控制系统全面采集潜水泵变频器的各项参数[15]并接入监控中心生产运行，监控员可通过上位机远程调节变频器。在调节过程中存在部分变频器无法远程控制以及读取的参数与现场实际运行状态不符的问题，通过现场排查设备运行状态，下位机程序监视，发现上述问题主要是由通讯线信号易受电源干扰、15 针 D 型母头连接器与通讯线焊接点松动等引起。

5.2　处理措施

为保证控制系统的平稳有效运行，针对上述问题将集控室内所有基于 Modbus 通讯的仪器仪表的电源线与通讯线进行合理布线，杜绝 2 种线缆的缠绕，增大 2 种线缆间的布线距离，从而降低干扰对信号采集准确性的影响。

由于变频器与 PLC 之间采用手拉手菊花链式拓扑结构，当尾端的 D 型母头连接器与通讯线焊接点松动时，会导致整条线路上的设备通讯中断；因此对焊点进行加固，并减小线缆在焊点的弯折角度。钱家店Ⅱ号铀矿床采用模拟量通讯，Ⅳ号铀矿床采用 Modbus 串行总线通讯，这 2 种通讯模式下的单台变频器的布线用量、故障类型及维修频次对比见表 3。可以看出，Modbus 总线通讯模式在建设成本及后期维护工作量方面更具有优势。

表 3 2 种通讯方式变频器的应用情况统计

Table 3 Application statistics of frequency converter with two communication modes

通讯模式	布线用量	模块点位用量	常见故障类型	维修频次
模拟量通讯	9 对 2 芯电缆	AI 点 4 个、DI 点 4 个，AO 点 1 个，DO 点 2 个	I/O 点故障导致单台变频器的运行参数采集不全	每季度 3 次
Modbus 串行总线通讯	1 对屏蔽双绞线缆	1 个通讯模块满足 16 台变频器通讯	信号干扰导致的变频器实际运行参数与采集数据不符	每季度 1 次

6 结论

本矿山集控室内的变频器基于 Modbus 通讯，仅需 1 根屏蔽双绞线将各变频串联即可完成远程备妥、运行或故障状态、运行频率、运行电流、运行功率、远程启/停、远程频率调节等信号的采集与控制。与传统模拟量加开关量控制方式相比，Modbus 通讯方式可节省大量的线缆敷设与 I/O 模块，控制方便、成本较低，大幅降低了维护工作量，进一步提升了控制效率。

对 WinCC 上位机与博途下位机的开发、编程与组态，实现单一变频器的启停与频率调节，优化了单采区变频器远程一键全部启动和关停。在供电线路发生异常时，监控中心的值班人员通过使用上述功能，操作简捷，缩减了处理异常状况的时间。

参考文献：

[1] 曾繁玲. 变频技术的应用及谐波治理[J]. 电气开关，2005，28(5)：28-31.

[2] 王春霞，于长贵，陈梅芳，等. 抽、注液报警系统在地浸井场中的应用[J]. 铀矿冶，2015，34(3)：165-170.

[3] 宋宝宇，巴鹏，李岩. 基于 MODBUS 的 GCAN PLC 与变频器通讯系统[J]. 电力及自动化控制，2022(1)：57-60.

[4] 蓝丽，李红星. 基于 PROFIBUS 现场总线的集成方法和应用研究[D]. 北京：北京化工大学，2007.

[5] 德国西门子股份公司. SIMATIC S7-1500/ET200 MP 自动化系统手册[S]. 德国西门子股份公司，2021：47-48.

[6] 侯录，侯江，伍宪玉，等. 地浸铀矿山井场数字化集控室研究与应用[J]. 铀矿冶，2022，41(3)：271-277.

[7] 侯录，侯江，兰天，等. 基于 Modbus 现场总线优化地浸采铀生产过程自动监控系统[J]. 铀矿冶，2015，34(3)：194-198.

[8] 德国西门子股份公司. SIMATIC S7-1500/ET200 MP/ET 200SP CM PtP-点对点连接的组态功能手册[S]. 德国西门子股份公司，2021：34-36.

[9] 刘敏俊. 自动控制系统的抗干扰分析及应用[J]. 自动化技术与应用，2007，26(11)：132-134.

[10] 夏正龙，邓斌. 基于 PLC 的智能仪表通信协议解析设计与实现[J]. 自动化仪表，2020，41(6)：17-23.

[11] 满建江. 丹佛斯变频器 Modbus 通讯[S]. 济南创恒科技发展有限公司，2012：1-8.

[12] 魏戴宁. 西门子 PLC 与变频器在脱硫系统中的 DP 通信应用[J]. 机电设备，2021(5)：89-92.

[13] 王春霞，李进元，于常贵，等. 数字化矿山建设与应用[C]// 中国核学会. 中国核科学技术进展报告(第五卷)——中国核学会 2017 年学术年会论文集：第 2 册. 北京：中国核学会，2017：179-190.

[14] 庄治旭，李喜龙，滕飞，等. 内蒙古某地浸矿山自动化系统组成及上位机优化[J]. 铀矿冶，2023，42(1)：41-46.

[15] 伍宪玉，侯江，侯录. 地浸铀矿山自动化和信息化系统融合设计及应用[J]. 湿法冶金，2021，40(6)：523-526.

(下转第 62 页)

Discussion on Optimization Scheme of Mining Equipment Allocation in Mianhuakeng Mine

QIN Xuzhong[1], SONG Lixia[1], LI Zurong[2], WANG Wei[2], ZHANG Dequan[1], ZHANG Yuhui[1]
(1. China Nuclear Minging Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China;
2. Shaoguan Jinyuan Uranium Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512329, China)

Abstract: The problems of low production efficiency and poor safety exist in Mianhuakeng mine due to the imbalance of mining equipment allocation. According to the characteristics of mining equipment allocation and the production status of Mianhuakeng mine, an optimization model of mining equipment allocation based on linear theory is constructed, and the main mining equipment under two mining technologies are calculated and analyzed by using the model. The overall plan of intelligent construction of mining equipment in Mianhuakeng mine is proposed, which includes wireless remote control of shoveling equipment, precise guidance control of driving equipment and intelligent unmanned transportation of underground electric locomotive and rail. Meanwhile, the optimization plan of main mining equipment configuration under different mining technology is given.

Key words: linear theory; mining equipment; intelligentization

(Continued from page 56)

Application of Frequency Converter Based on Modbus Communication in an In-situ Leaching Mine

ZHUANG Zhixu, LI Xilong, CAO Junpeng, TIAN Shuang, ZHOU Wenmeng
(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

Abstract: The automatic industrial control system is often used in the in-situ leaching and mining industry. With the increase of the monitoring and control equipment in the in-situ leaching mine, the traditional analog communication has the disadvantages of high cost of line laying and large number of I/O modules. Modbus communication mode is used for the frequency converter in the well pad control system of an in-situ leaching mine in Inner Mongolia to complete the remote acquisition and control of its parameters and reduce the project construction cost. The remote one-button start and stop of the frequency converter and frequency regulation at the uranium leaching monitoring center in a certain place are realized, which further improves the work efficiency.

Key words: in-situ leaching uranium; Modbus communication; frequency converter