

目 录

第 1 章 前言.....	3
第 2 章 长输管道教学实验环道的开发.....	4
2.1 系统概述	4
2.1.1 主要工艺流程	4
2.1.2 主要流体设备.....	6
2.1.3 主要仪表设备.....	9
2.1.4 SCADA 系统与分级.....	12
2.2 就地控制与 PLC.....	13
2.2.1 就地控制柜.....	13
2.2.2 PLC 的选型.....	14
2.2.3 PLC 的连接.....	15
2.3 PLC 的程序设计	16
2.3.1 PLC 编程软件简介.....	16
2.3.2 泵与阀的操作.....	17
2.3.3 仪表数据监控.....	18
2.3.4 自动流程切换.....	19
2.3.5 以太网通讯.....	21
2.3.6 调压阀 PID 控制.....	22
2.3.7 无扰动 PID 切换.....	23
2.4 基于 HMI 的站控系统	24
2.4.1 站控 HMI 的安装.....	24
2.4.2 HMI 的组态编程.....	25
2.4.3 变量数据库连接.....	26
2.4.4 组态画面.....	27
2.5 基于力控的控制中心系统	30
2.5.1 实时数据库通信.....	30
2.5.2 控制界面的编写.....	32
第 3 章 长输管道教学实验环道的应用.....	37
3.1 实验准备	37
3.2 环道密闭输送实验	37

3.2.1 管线启输.....	37
3.2.2 管线停输.....	41
3.2.3 双泵并联运行.....	41
3.3 环道动态调节实验	43
3.3.1 调节阀手动操作.....	43
3.3.2 调节阀自动控制.....	44
3.3.3 泵调转速.....	45
3.3.4 压力越站.....	46
3.3.5 其它动态调节.....	47
3.4 环道异常工况实验	48
3.4.1 环道堵塞工况实验.....	48
3.4.2 环道泄漏工况实验.....	48
3.4.3 其它异常工况.....	49
附录 A 长输管道教学实验环道总流程图	51
附录 B 长输管道教学实验环道布置图.....	52

第1章 前言

管道输送是油气产品最主要、最理想的输送方式，在我国经济高速发展的今天，长输管道为经济的发展提供着源源不断的动力，在国民经济中的地位日趋重要^[1-3]。

油气储运学科专业知识的教学主要是通过理论知识的讲解结合实际现场的生产实习，从而促使学生对专业知识的掌握，提高学生的专业素养^[4]。但现场实习成本高，受场地限制，且不允许学生对现场设备进行操作。站场实习时，学生可通过管道SCADA系统站控部分了解管道的运行情况，但实习时间短，很少能遇到事故工况及其处理方法。至于作为高度保密的中心控制室，实习学生恐怕连界面样子都看不到。故学生无法得到真正的锻炼。另外，随着石油石化企业现代化管理制度的日益完善，学生进入其现场的难度在增大，实习内容在不断简化，现场实习时间缩短，因此实习教学效果在下降。为了解决这些问题，油气储运实验室提出了仿真教学的设想，希望通过模拟实际管道的运行工况和监控系统，提高教学效果，降低实习成本和风险。

本课题来源于中国石油大学（北京）仿真教学实验室的建设项目——长输管道教学实验环道和长输管道仿真操作软件。长输管道教学实验环道依托储运实验环道，配备自动化控制设备，仿照实际SCADA系统物理环境，建立具有三级控制网络微型真实版的SCADA系统。该实验环道具有直观、可操作性等优点，但也有其自身的局限性。出于安全和经济方面的考虑，对于某些特殊工况，如过高和过低压力、严重水击、气蚀等，不能通过该环道来演示，以避免造成人身或财产损失。此外，环道只有一套，而学生却在逐年增加。故需要通过长输管道仿真操作软件来向学生演示这些特殊工况可能造成的严重后果，从而让学生们有更深刻的认识和体会。长输管道仿真操作软件以LPS管道瞬态计算软件为内核，采用力控组态软件为平台，搭建完全基于LPS软件结构的SCADA仿真培训系统。

如此一来，学生不但能“看得到”，还能“摸得到”，从调控中心到各个工艺站场的操作和流程都真实地展示在学生面前，同时还可以亲自动手对管道系统进行控制操作。学生通过对阀门和泵机组的操作，对管道SCADA控制系统有更为真切的认知。

长输管道教学实验环道完整模拟了管道SCADA控制系统的各个环节^[19]。实验环道包括4个泵站、1个水罐、1套清管器、1个翻越实验段、1个压气站和1个高压气罐。泵站具有可远程操作的变频泵机组、气动阀门和电动调节阀。各种现场仪表和设备跟PLC控制器连接，PLC可根据内部逻辑程序选择就地按钮、站控嵌入式系统或远程控制中心计算机三级控制方式。除了液体管道实验，由于该系统配有压缩机，还可以演示输气管道末站和多相流动的教学或科研实验。

第2章 长输管道教学实验环道的开发

2.1 系统概述

长输管道教学实验环道用于储运专业教学实验，主要模拟长输管道水力系统及其控制模式，实验装置包括约 600m 长的直径为 DN25 不锈钢管道环路、4 座模拟泵站（共 8 台泵）、1 台储液罐、1 台储气罐、1 台空气压缩机以及相应的配电和自动化测控系统等组成。

装置设在研修大厦 122，121，120 号，其中房屋 122 号安置管道，泵站，控制系统及相关设备，房屋 121 及 120 的部分被用于安置大部分管道，另外还有安置其它仿真模型。

2.1.1 主要工艺流程

本装置的主要工艺流程是仿照目前长距离输油管道的主要运行流程设置的。在整条管线的沿线上共设有 4 个增压泵站，从而形成一个密闭的水力系统，与目前长输管线所使用的密闭输油方式的基本流程是一致的。整个系统的基本流程可参见图 2.2 所示的系统流程简图。本装置的流动介质是自来水，储存在水罐中。这里的水罐既是首站的储罐，同时也作为管线末站的储罐。水从水罐流入 1 号泵站，经增压后进入管道。1 号泵站为模拟管道的首站，除 1 号泵站外，其余泵站还具有越站流程。在每个泵站内配有 2 台小型离心泵，可实现串、并联运行，其中 1 台可控制转速，用以模拟现场管线的调速泵。在 2 号泵站和 3 号泵站之间的管段上还设置了一段演示段，包括清管器收发管段以及不满流演示段。管道中输送的水依次经过各个泵站和管道后最终流回水罐^[26]。

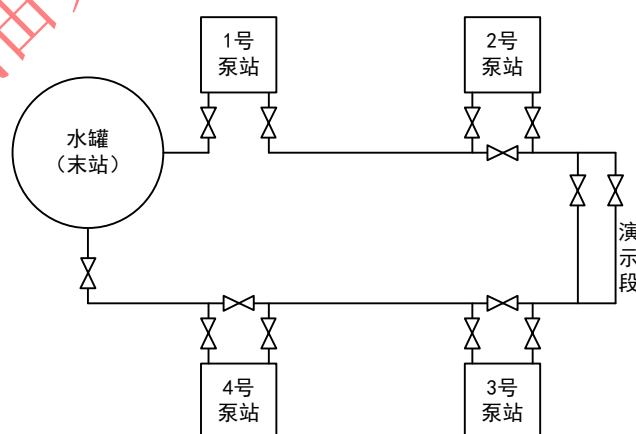


图 2.1 实验装置工艺流程简图

Fig 2.1 process flow diagram of experimental facilities

为了实现更多的实验内容，在各站间的管道上安装有模拟管道堵塞的阻力阀，共 4 个；以及模拟管道泄漏的泄漏点共 3 个。除此之外，在 1 号泵站后还设置了一个气液混输演示段，结合压缩空气系统和透明观察管段可演示和观察的气液混输时管内的不同流型，使培训人员对油田集输过程中的气液两相流动有较为直观的认识。

环道上留有高、低点的放空阀各 1 个。

为了准确测量实验过程中管道各处的工艺过程参数，在每个模拟泵站都配有电磁流量计 1 台和水泵的进出口压力计 4 台、进出站压力变送器 2 台，在每个站间还各设置有 1 台差压变送器。这些仪表的数据都可由控制区的 PLC 控制器进行采集，并通过站控 HMI 面板或中控计算机集中显示。流量计、差压变送器还配有现场显示器，可供培训人员直接观察仪表的示数。本装置所采用的仪表均为工业级仪表，部分仪表的类型与管道企业所选用的型号是相似的。

为了方便实验装置的控制以及教学科研的开展，本实验装置设置有一套简单的三级控制系统，用于数据采集和控制系统^[23-25]。通过站场 PLC 可实现现场信号的采集，记录和显示所有的模拟量、并对状态量进行控制。通过这套监控系统，所有模拟泵站中的水泵的启停操作均可在控制区由计算机完成，也可在现场由手动或站控 HMI 完成。每个泵站的出站调节阀配有电动执行器，也可由计算机或站控 HMI 进行阀位的远程控制和显示，同时也具有现场手动操作功能。每个泵站的两台泵机组可以并联工作，也可以串联工作，更可以单泵运行，4 种操作方式通过 3 个气动阀的开关来切换工作流程，气动阀切换流程可由中控计算机、站控 HMI 面板自动/手动操作，同时就地控制柜也可通过按键现场手动开关阀们。这些功能与目前现场的操作模式是基本一致的，培训人员通过这些操作可初步了解现场管道的多级控制模式。本系统所有软硬件均采用工业通用产品，组态方式灵活，数据采集速度快，精度较高，并允许用户在平台上自行开发各种应用，适用于教学和科研的需要，而且具备较强的扩展能力，便于维护。

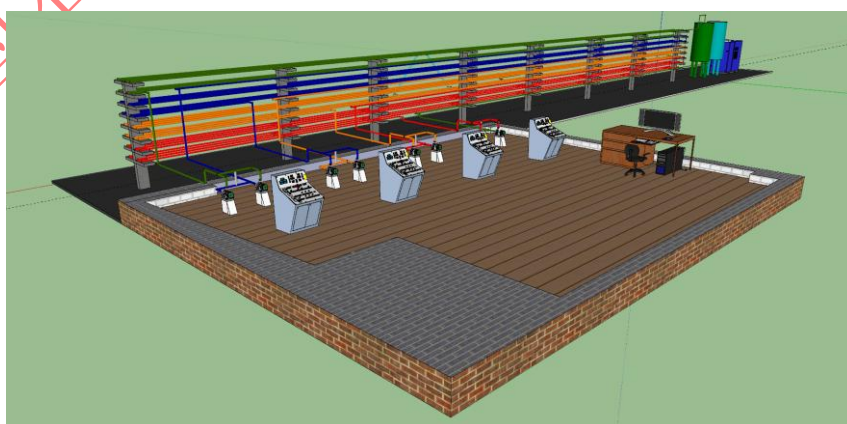


图 2.2 实验装置效果图

Fig 2.2 effect drawings of experimental facilities

本实验装置根据如上所述的工艺流程，配合油气储运专业教学，可开展如下实验：

- ① “从泵到泵” 密闭输送实验
- ② 管道动态调节实验
- ③ 管道异常工况实验
- ④ 管道堵塞工况实验
- ⑤ 管道泄漏工况实验
- ⑥ 管道收发清管器演示实验
- ⑦ 管道不满流工况演示实验
- ⑧ 气液混输工况演示实验

为完成这些工艺，环道上需要配备一定流体设备和仪表设备，只有选择了合适的设备才能完成所需的教学实验需求。

2.1.2 主要流体设备

作为长输管道教学实验环道，主要的流体设备都分布于环道管路和模拟泵站上。

(1) 环道管路

本装置的管路分为模拟泵站管路、主管路和辅助管路几部分。管径主要为 DN25 的无缝不锈钢管，材质为 SS304，管路的连接形式为焊接和法兰。

模拟泵站管路是指各个模拟泵站内的连接管路，主要实现进站增压、2 台水泵的串并联流程切换等功能。在这部分管路上还安装了该站的各种检测仪表。

主管路指的是模拟长输管线的管路，是环道装置中最大的设备，本装置的主管路长度约为 600 米。主管路均架设在一组管架上，共 8 层，每层盘绕了 2 圈管路。从第一个泵站的出口开始依次从下向上盘绕，并从第 8 层返回水罐。

辅助管路是指与主管路相连的一些管路，主要用于连接水罐、气罐、以及放空和排气等功能。

(2) 模拟泵站

本装置共设有 4 座模拟泵站，每个泵站配有 2 台小型不锈钢离心式水泵。每座泵站的 2 台离心泵可单台运行，也可 2 台串联或并联运行。为了便于调节每个泵站的特性，每座泵站的第 1 台泵为工频定速泵，第 2 台泵可工频运行，也可通过变频器进行调速运行。通过这种配置，每座泵站的调节范围非常大，可以适应各种实验工况的要求。

每台水泵设有一个进口阀和一个出口阀，都为手动球阀。泵出口还设有一个单向阀。2 台泵的串并联流程切换可通过之间的 3 个气动球阀实现。泵站的主要流程可参见图 8，图中灰色的阀门表示关闭。另外除了 1 号泵站外，其余 3 个泵

站均设有越站阀，一般情况下该阀是关闭的。如果可以实现全越站流程，可打开 VX06 阀。因为模拟泵站未安装泵站的进出口阀，可采用同时关闭泵站中各泵的进出口阀的方法，或者关闭站内流程阀 VX01~VX03 也可以实现相同的效果。

在站的出口还设有一台压力调节阀，用于调节出站的压力。该阀可通过计算机控制，但在正常使用中不可将该阀完全关闭，否则很容易造成憋压事故。建议调节范围为 30%~100%。

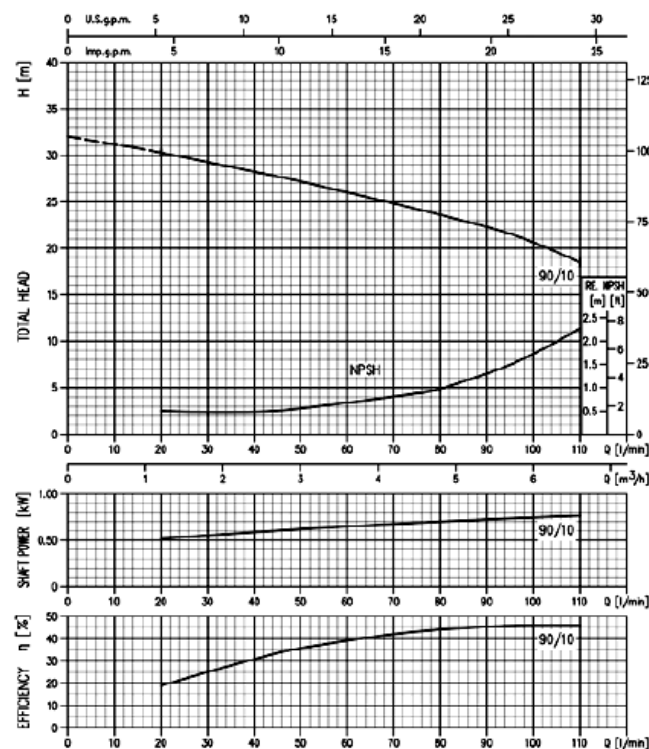
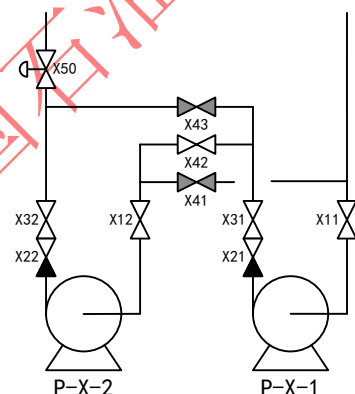


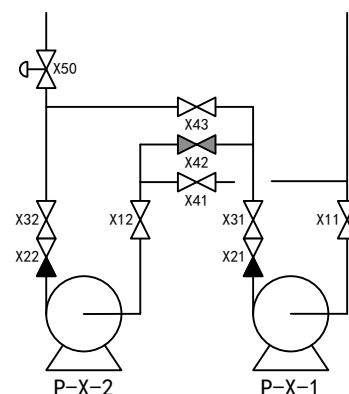
图 2.3 清水泵的特性曲线

Fig2.3 characteristic curve of clean waterpump



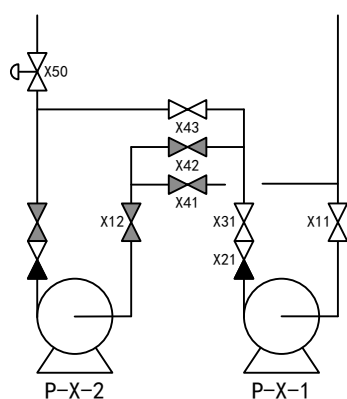
a 串联

a series

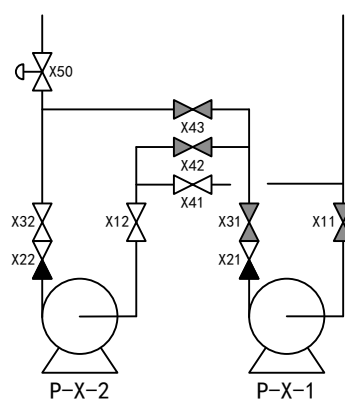


b 并联

b multiple



c 单启 1 号泵
c start pump 1



d 单启 2 号泵
d start pump 2

图 2.3 泵站流程示意图

Fig 2.3 flow diagram of pump

各站设有一台流量计用于测量该站的出站流量。在每台水泵的进出口还分别设有 1 台压力表用于指示该处的压力，在站的进出口位置还设有 1 台压力变送器用于测量泵站的进出口压力（1 号泵站未设进站压力变送器）。

(3) 其它水力设备

收发清管器：位于 2 号泵站和 3 号泵站之间的管段上，是一个旁通管段，在进行其他实验时可关闭。该管段的主要功能是用于演示：在长距离输油管道的输油站内所设置的清管器收发筒的基本操作，并可观察到清管器在管道内的运动过程。为了更好的观察清管器的运动，该管段的管径为 DN50，其中有 2 段 2m 长的有机玻璃透明管段。在管段的两端分别设有清管器发球筒和清管器收球筒。收、发球筒的一端为 1 台 DN50 的不锈钢球阀，另一端为快开盲板，可通过专用扳手打开和关闭。

不满流实验段：演示在长距离输油管道的运行中，当存在翻越点时，管道内由于压力过低所造成的不满流工况。不满流的演示必须通过出口调压阀精确控制压力，不易实现。管道最高点与泵入口大约 3 米高程差，当水以较慢流速流动时，下游泵站入口压力的汽蚀余量小于 30kPa 时，才有可能产生不满流。但汽蚀余量过小很容易产生汽蚀，对泵设备损害严重。

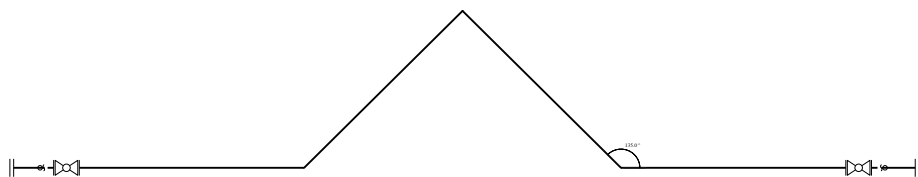


图 2.4 不满流实验段示意图

Fig 2.4 experimental section of slack flow

水罐：环道上安装有一台净容积约 0.6m^3 的不锈钢水罐，该罐为敞口常压容器。回水口在罐上部侧面，出水口在罐底部。实验前上水时，将连接自来水的进水软管伸入罐内即可。罐内水位可通过水罐侧面的玻璃管液位计显示。水罐底部为出水管线和放空阀。当实验完成后，可由罐底放空阀控制排水，将罐内存水排出。该罐即作为首站的注入罐，有作为末站接收罐。作为末站接收罐时，由于罐为敞口，回水口距地 2 米，计算时设末站进站压力恒为 20 kPa。

过滤器：本设备中的过滤器为一“Y”型不锈钢过滤器，连接方式为螺纹连接，安装在水罐与 1 号泵站之间，用于清除罐内存水中可能含有的机械杂质，以防杂质被吸入水泵，损坏叶轮。装置运行一段时间后，应打开下部的堵头进行检查和清洁。

空气压缩机：本装置配有 1 台空气压缩机。主要有 3 个功能，一是用于管线的扫线，即实验结束后将管道内的积水吹扫干净。二是为启动流程阀提供驱动起源。三是可在演示气液混输管路实验时提供气源。该型压缩机额定排气压力为 0.8MPa，电源为 AC380V，功率为 5.5kW。空气压缩机与储气罐相连，出口有一个球阀作为出口阀。在运行压缩机前务必打开出口阀，以免压缩机出现超压故障。每台压缩机均配有小型 PLC，可自动完成启动、运行、监测等操作，一般只需要设置启停即可。

压缩空气罐：压缩机出口连接 1 个容积约为 0.3m^3 的压缩空气罐，设计压力为 1MPa，材质为碳钢。气罐的进气口在侧面下部，出气口在侧面上部，出气口管线上设置有压力表用于检测罐内压力。罐顶部设有 1 个安全阀，底部有排污阀。

2.1.3 主要仪表设备

一条管道光有流体设备只能让介质流动起来，即不知道管道当前的运行状态，也无法对管道进行有效的控制，就像一个失去了眼和手的残疾人一样。要做到自动控制，检测与控制仪表就像眼和手一样，是必不可少的。本实验装置中包含以下仪表设备：

(1) 电动调节阀

每个模拟泵站的出口各安装了一台 Danfoss 电动调节阀，阀体上部安装有电动执行装置 AME 20。执行器可通过输入 0-10VDC 电信号远程调节阀门开度，对应 PLC 模拟量输出 AQW0。执行器还将其阀位信号以 0~10VDC 输出远传，对应 PLC 模拟量输入 AIW2。通过观察执行器上旋钮的角度也可在现场直接获知开度的大小。

执行器由电力驱动，电源为 24VAC，从配电柜直接获取。当无电源的情况下，该执行器也可通过按下执行器上的黑色按钮后，用手旋动旋钮的方式进行启闭，旋钮指向红色位置为开，指向蓝色位置为关。

执行器本身通过 DIP 拨动开设定工作模式，本实验环道中调节阀做如下设置：执行器接受 0-10VDC 的直流电压信号；阀的动作方向为正向，调节阀为常开阀，即控制信号 0V 时调节阀全开，控制信号 10V 时调节阀全关。设为常开阀保证了来自 PLC 的控制信号掉电时，调节阀能够全部开启，保证阀前不憋压，保证了管段安全。

(2) 变频器

变频器选用的是富士电机的 FRN1.5E1S-4C，该变频器为 FRENIC 系列的高性能、紧凑型变频器，适用额定功率为 1.5KW 以下 3 相 380VAC 的电机。

该变频器要接入到各站 2 号泵的供电回路中，通过改变交流电机供电频率达到调节泵的工作转速，从而改变了泵的输送能力，进一步改变管道的输量。

变频器的配线有两部分，一部分是由电源—继电器—变频器—电动泵组成的主电路配线，另一部分是控制变频器启停、频率、电机转速的控制电路配线。

主电路的作用是将 380VAC 的频率从工频的 50Hz 按需求转速改变成 0~50Hz，从而将泵的转速线性转化为 0~2800r/m（2 极泵）。当然工作频率若低于 10Hz 泵也无法启动起来，一般要求调速电机工作转速不得低于额定转速的 50%，转速低于额定转速 40%时会停泵保护。另外，本实验设备中设计变频器的供电还受 PLC 继电器型模拟量输出控制。

控制电路配线又包含模拟量输入、数字量输入和模拟监视输出。

模拟量输入，端子 12（模拟量设定电压输入 0~10VDC）和端子 11（模拟量公共端），信号来自 PLC 控制器 EM235 单元的模拟量输出点 AQW4，采用 0~10VDC 的模拟量信号设定变频器频率输出量。

数字量输入，端子 FWD（正转运转/停止指令输入）和端子 CM（数字量公共端），信号来源于 PLC 控制器 CPU 单元的数字量输出 Q0.5。

模拟监视输出，端子 FM（模拟监视 FMA 功能）和端子 11（模拟量公共端），将电机转速信号输出给 PLC 控制器 CPU 单元的模拟量输入 AIW0，采用 0-10VDC 的模拟量信号反馈电机的当前转速。

变频器出厂时，各工作参数是按照操作面板控制设计的，为了满足实验环道工作，需求需要对变频器的功能代码修改：

- ① F01=1，是变频器模拟量电压输入（端子 12）为 DC0~10V；
- ② C35=1，机型选择为单极性；
- ③ F02=1，运转操作方式为外部信号（数字量输入）数字量控制启动/停止；
- ④ F29=0，模拟量输出端子 FM 的动作选择为电压输出（DC0~10V）；
- ⑤ F31=0，FMA 功能选择为转差补偿前的输出频率；
- ⑥ H96=1，stop 键优先，突发事件发生需要就地控制时，操作面板上的 stop

键具有最高停止权限。

(3) 压力变送器

压力变送器共 8 台，均为德国 E+H 公司生产的压电式工业级压力变送器，测量范围为 0~1000kPa，精度为±0.2%。该仪表为 2 线制仪表，供电为 24VDC，采用 4~20mA 标准信号。

压力变送器分别安装在每个模拟泵站的进口和出口（1 号站无进站压力变送器），进站压力接在 PLC 模拟量模块 EM235 的 AIW4，出口压力接在 AIW6。在气体流量计后还安装有 1 台压力变送器用于测量气体压力，以便于计算气体的实际流量。

另外，在每台水泵的进出口均安装了一台弹簧管式的小型压力表用于指示该泵工作状态。

(4) 电磁流量计

本装置一共安装了 4 台电磁流量计，均为德国 E+H 公司生产，用于检测模拟泵站的出站流量。该流量计的测量范围为 0~100dm³/min，测量精度为±0.1%，配有背光 LCD 表头显示，便于现场观察。该仪表采用 220VAC 电源供电，采用法兰连接，输出 4~20mA 的标准信号，接 PLC 模拟量模块 EM235 的 AIW6。

(5) 流程切换气动阀

流程切换用的气动阀共 12 个，每个泵站 3 个，用于切换泵机组串并联工作方式。气动执行器选用的是韩国 AUTOMA 公司的双作用气动执行器，阀体是法兰式球阀。执行器工作气压为 45~70kPa，最大压力 1MPa。

控制信号来自韩国 DKC 的贴面式电磁阀 DSN352S，该电磁阀为两位五通式电磁阀，两位是两个位置可控——开/关，五通是有五个通道通气，其中 1 个与气源连接，两个与双作用气缸的外部气室的进出气口连接，两个与内部气室的进出气口接连。对于本装置中，气源为环道扫线用的空气压缩机。

DSN352S 的控制信号为 220VAC，通过 PLC 的继电器式数字量输出控制电源开关状态控制，对应 PLC 输出位地址分别为 Q0.2、Q0.3、Q0.4。

(6) 配电柜

本装置的配电柜的功能是从房屋的配电盘引入电源，并根据装置中各项设备的用电需求进行分配，为每个独立的用电单元设置合适的容量和开关。配电柜中包含了所有设备所需的供电类型。

表 2.1 配电柜供电说明

Table 2.1 manual of power distribution cabinet

380VAC	220VAC	24VAC	24VDC
压缩机、变频器	电磁流量计、清水泵、	电动调节阀供电	压力变送器、PLC 的

2.1.4 SCADA 系统与分级

SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition)系统全称为数据采集与监视控制系统，其在很多领域有着广泛的应用，尤其作用于电力系统、给水系统、油气储储存与运输、炼油化工等领域的数据采集与监视控制以及过程控制等诸多领域中。

长输管道 SCADA 由设在调控中心的操作员工作站或服务器通过数据传输系统对站控系统 SCS 和远控阀室 RTU 定期进行查询，完成数据采集、数据处理、存储归档、控制、故障处理、安全保护、报警等任务，全线紧急停车 ESD 及水击保护、输油泵（压缩机）运行优化、输油泵故障诊断及分析等功能。沿线各站场的站控系统或 RTU 完成相应站场的监控及联锁保护等任务，并执行和接受调控中心下达的命令。中心对整个管道进行统一监视、控制和调度管理。

长输管道 SCADA 系统控制模式分为以下三级：中控级、站控级和就地控制级。中控级又称控制中心级，由调度控制中心对全线集中监视和控制，泵的启停、电动阀门的开关、调节阀设定值的赋值。站控级由各工艺站场的远程监控站对所在站自动/手动控制。就地控制级由站场单体设备（如泵、压缩机组）的控制系统对设备自动/手动控制、远控阀的就地操作、调节阀的就地手动控制等。

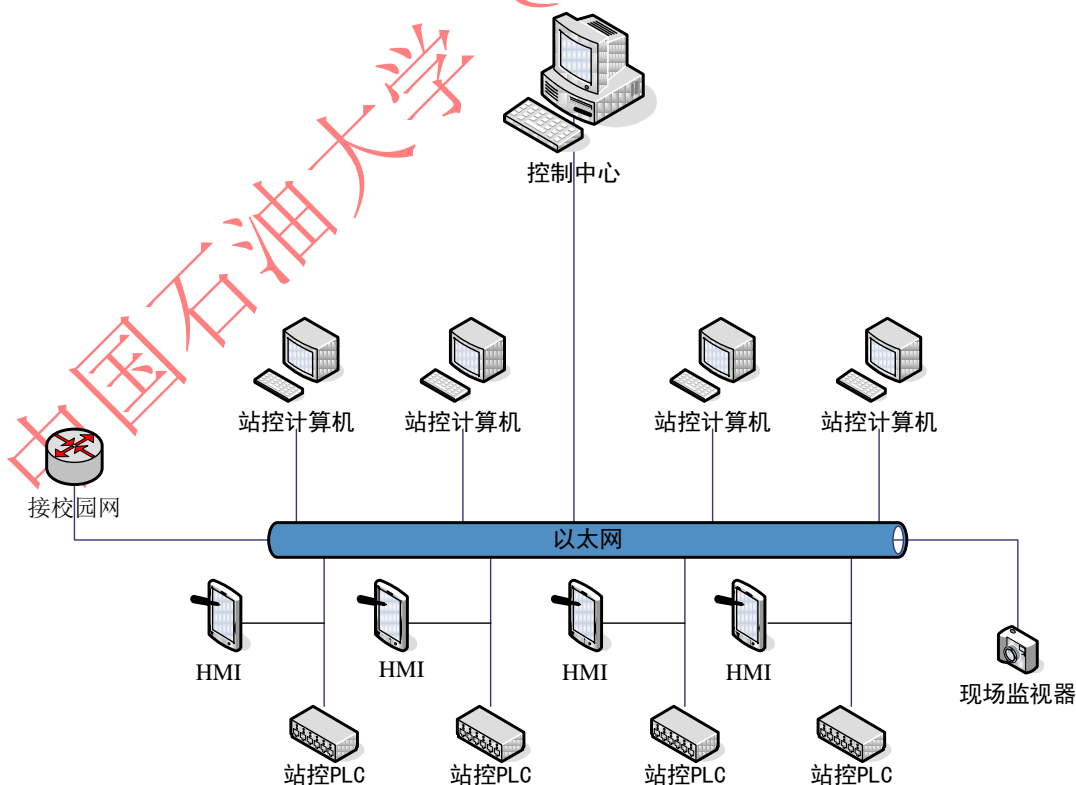


图 2.5 环道 SCADA 系统的结构图

Fig 2.5 structure chart of pipeline loop test system

为了适应教学需要，本系统简化了实际管道中的部分辅助系统，但保留了长输管道 SCADA 系统的基本结构和工艺控制系统的主要功能。就地控制级为基于 PLC 控制器和控制柜上按钮的就地硬开关控制，站控系统基于 HMI 嵌入式控制系统，控制中心级是通过以太网通讯的远程中控计算机。

2.2 就地控制与 PLC

2.2.1 就地控制柜

每个模拟泵站设有一个控制柜，负责该站两台水泵的就地启停控制，流程切换阀的开关以及 2 号泵工频变频工作的切换。水泵在工频状态下的启停可通过计算机或站控 HMI 设备远程操作。

控制柜上的按键按钮被视为就地控制按钮，HMI 面板被视为距离稍远些的站控系统。泵的状态指示灯位绿色，启动时点亮，开关状态为常闭开关。流程切换阀出于安全考虑，设置为常开阀，灯为红色，阀闭时点亮。急停按钮类似 ESD 开关的紧急关断开关，用于向培训人员演示 ESD 系统的，但本身功能还很原始，没有任何逻辑控制，只是简单的切断全站控制电源，算不得真正意义上的 ESD。

站控 HMI 为西门子的 KTP-178 micro 镶嵌在控制柜面板上触摸屏，与 PLC 通过 RS-485 线缆通讯。RS-485 线缆的实际通讯距离可以达到 1.2km，完全可以胜任站内布置站控系统的距离。但是由于仿真基地占地有限以及布线方便的原因，而将其安装在泵站控制柜上。

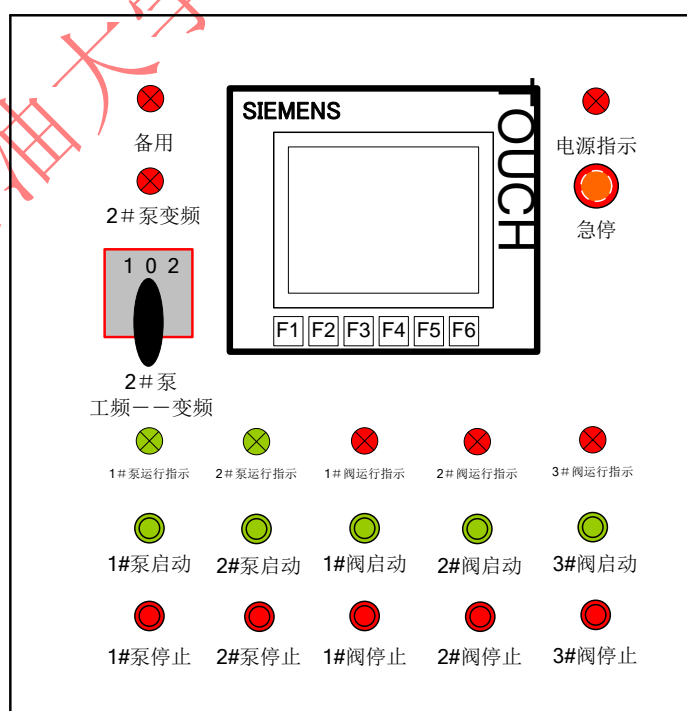


图 2.6 泵站控制柜操作面板示意图

Fig 2.6 operation panel of pump control cabinet

2.2.2 PLC 的选型

PLC 的全称为 Programmable Logic Controller，即可编程逻辑控制器，是一种专为在工业环境应用而设计的数字运算操作电子系统。它采用可编程的存储器，用于内部程序存储，可以执行定时、计数、逻辑运算、顺序控制与算术操作等面向用户的指令，通过数字量和模拟量的输入输出来控制生产过程和设备操作，是工业控制的核心部分。

PLC 的国内外生产厂家有很多，美国 AB、ABB、松下、西门子、汇川、三菱、欧姆龙、台达、富士、施耐德和信捷等。每个品牌旗下的产品又有很多，仅就西门子公司旗下的就有两大类 6 个系列的产品，小型 PLC 控制系统有 LOGO!、S7-200 和最新的 S7-1200，中大型 PLC 控制系统有 S7-300C、S7-300 和 S7-400。每个系列的设备又用很多型号，可选择性很大。

对于本实用环道，每个泵站的控制点数需求比较少，16 个数字量输入点（DI），6 个数字量输出（DO），5 个模拟量输入（AI），2 个模拟量输出（AO）。但由于需要模拟 SCADA 系统的三级控制，对 PLC 的网络通信要求比较高，需要数据远距离传输^[27]。

在实际工业生产中，高网络通信能力的解决往往是在中大型 PLC 控制系统上追加网络通信模块或者有专门的通信 PLC 作为 OPC 服务器。当控制点数比较多的时候，使用中大型 PLC 是很经济的，但对于控制点数少的时候，就必须使用小型 PLC 了。当兼顾了经济性和高通信能力之后，最终选择采用西门子的小型 PLC 系统 S7-200 外挂以太网通信模块 CP243-1 的解决方案，用比较经济的价格解决了依靠以太网远程通信的问题。当然 S7-1200 作为 S7-200 的替代产品也是个不错的选择，但由于 S7-1200 是新产品，系统稳定性还有待观察，而且其编程软件比起 S7-200 也有很大不同，特别是在采购时期，S7-1200 才刚上市，配套模块的供应尚不足以满足需求。最终选择了西门子紧凑型 PLC 系统 S7-200。

根据控制点的数量，在 S7-200 中选择最经济模块组合，最后得到了以下配置方案：CPU 模块 224XP CN AC/DC/继电器、数字量输入模块 EM221 CN 24VDC 8DI、模拟量输入输出模块 EM235 CN 4AI/1AO、以太网模块 CP243-1。下面对所选模块进行简单的功能介绍。

CPU 224XP CN AC/DC/继电器：程序存储区使用运行编程模式时 12288 字节，不使用时 16384 字节；数据存储区 10240 字节；本机数字量 IO 有 14 入 10 出，模拟量 IO 有 2 入 1 出，模拟量输入仅支持 $\pm 10\text{VDC}$ ，模拟量输出信号支持 0~20mA 的电流信号和 0~10V 的电压信号；IO 地址区数字量 128 入 128 出，模拟量 32 入 32 出；最大扩展模块数 7；定时器 256 个，其中 1ms 的 4 个，10ms

的 16 个, 100ms 的 236 个; 计数器 256 个; 本地 RS-485 通信端口 2 个; 输入电源 220VAC, 输出电源 24VDC, 280mA。

EM221 CN 24VDC 8DI: 数字量输入扩展模块, 8 点 24V DC 输入, 无单独的电源输入。

EM235 CN 4AI/1AO: 模拟量输入输出模块, 4 点输入 1 点输出。该模块的输入可以使用电流或电压, 根据不同的 DIP 开关设置, 可以选用不同的量程。模块输出为 $\pm 10\text{VDC}$ 的电压信号或者 $0\sim 20\text{mA}$ 的电流信号。该模块需要外接 24VDC 供电。

CP243-1: 10MB/100MB 工业以太网模块, 外接 24VDC 供电, RJ-45 接口与支持 TCP/IP 协议的以太网设备连接, 最多支持与 8 台设备通讯, 每个 S7-200CPU 仅支持一个 CP243-1 模块的连接。

2.2.3 PLC 的连接

S7-200 的各功能模块选好之后, 首先需要将各扩展模块通过扩展模块总线连接到 CPU 224XP CN 上, 再根据其各自功能特点连接到仪器仪表设备上去。

2 个泵、3 个流程切换阀各占 3 个数字量输入通道, 共 15 个数字量输入通道, 分别为开启、关闭、状态。对于泵的状态, 高电位是泵开, 低电位是泵关; 对于流程切换阀的状态, 为安全起见选用的是常开阀, 掉电开启, 所以反馈信号低电位是阀开, 高电位是阀关。

控制柜上的 2 号泵公频/变频切换开关占用 1 个数字量输入通道, 低电位为公频 50Hz 工作, 高电位为受变频器控制的变频工作。

对 2 个泵、3 个流程切换阀的操作占用 5 个数字量输出通道。对泵的操作, 继电器吸合为开泵, 断开为关泵; 对阀操作, 继电器吸合为关阀, 断开为开阀。

泵站的进口压力、出口压力和流量 3 个信号占用 EM235 块的 3 个模拟量输入通道。因为 3 块仪表的变送器输出的是 $4\sim 20\text{mA}$ 的电流信号, CPU 模块的模拟量输入通过只能采集 $\pm 10\text{VDC}$ 的信号, 不能采集电流信号。而 EM235 模块通过对配置开关进行相应的设定, 就可以采集到 $0\sim 20\text{mA}$ 的电流信号, 所以这 3 块仪表的信号只能通过 EM235 模块进行采集。为了抑制共模干扰, 信号的负端要连接到模块电源输入的 M 端

泵站出口调节阀的反馈信号和变频器的 FMA 监视信号都是 $0\sim 10\text{VDC}$ 的电压信号, 它们占用了 CPU 224XP 的 2 路模拟量输入通道。

2 号泵的转速设定和泵站出口调节阀开度分别占用了 224XP 和 EM235 上的模拟量输出通道, 信号都为 $0\sim 10\text{VDC}$ 的电压信号。

CP243-1 模块的 RJ-45 接口与无线路由连接, 通过无线网络与控制中心主机通讯。

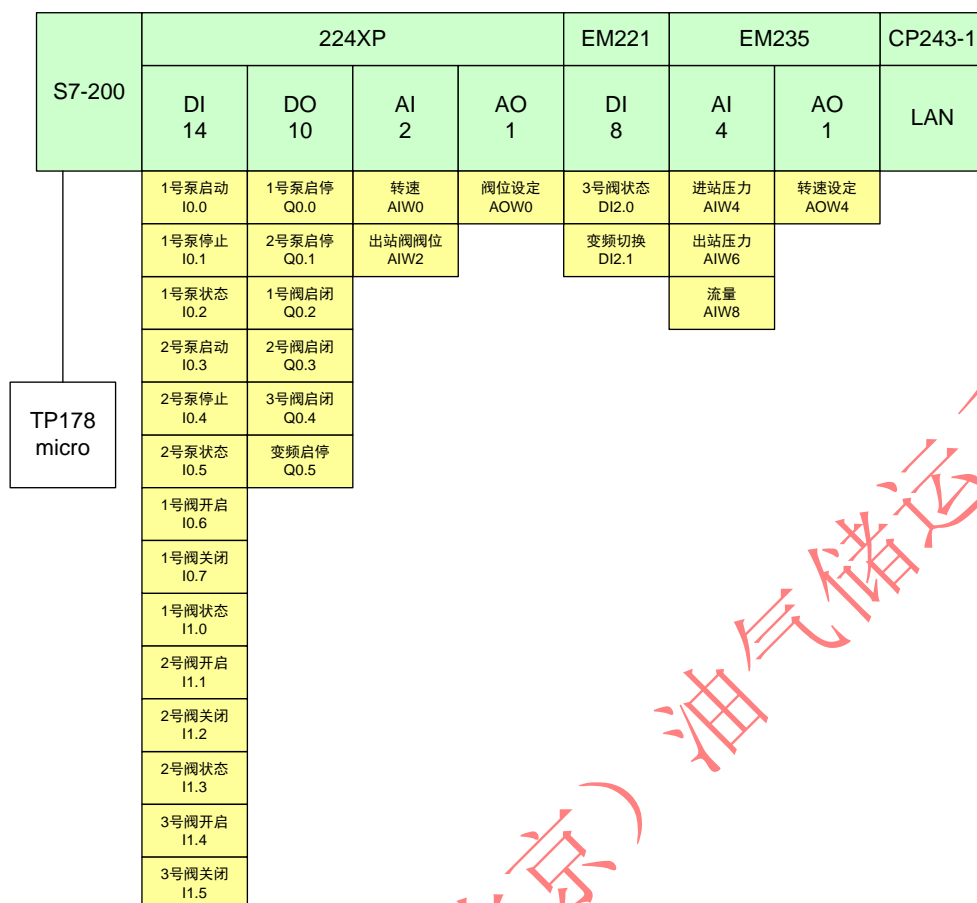


图 2.7 S7-200 控制器与相关仪器仪表的连接

Fig 2.7 connection between S7-200 controller and instrument

所以需要 24VDC 供电的模块理论上都可以从 CPU 模块的 24VDC 电源处接电，但考虑到 CPU 模块的输出电源负载有限，并且流量、压力等仪表也需要 24VDC 供电，故每个泵站统一由 1 个外接 24VDC 的开关电源盒供电。

CPU224XP 的 1 个 RS-485 端口 COM0 通过电缆与 HMI 面板 kTP-178micro 利用 PPI 协议进行通讯。

按照上述原因，S7-200 的整体连接如图 2.7 所示。

2.3 PLC 的程序设计

2.3.1 PLC 编程软件简介

对 S7-200 的 PLC 进行程序设计，除了 PLC 以外，还必须有装有编程软件的计算机和编程线缆。

编程线缆为 RS-232/PPI 电缆，连接 PG/PC 的串行通讯口和 CPU 的 COM 口通讯。当然，在第一次将以太网的配置写入 CPU 模块后，就可以通过 CP243-1 以太网模块的 RJ-45 端口进行通讯了，而不再需要编程电缆。但第一次不行，因

为 CP243-1 模块没有正确分配 IP 地址。

S7-200 的编程软件是 STEP 7-Micro/WIN V4.0, 支持三种编程模式: LAD(梯形图)、FBD(功能块图)和 STL(语句表), 本系统是应用梯形图模式编写的。STEP 7-Micro/WIN 还提供了程序在线编辑、调试和监控的功能, 可以对 CPU 内部的数据进行监视和修改^[28-30]。STEP 7-Micro/WIN 还提供了子程序和中断程序, 用户还可以自定义库程序。

2.3.2 泵与阀的操作

泵与阀的开关操作既需要能够被就地的按钮操作, 又需要能够被远程控制的计算机操作, 两种操作模式技能互动, 又互不影响。所以开关按键被设计成开启和关闭两个, 都是击发开关, 不具备保持作用。

这种泵与阀的操作是最简单的逻辑操作, 即以输出变量自己作保持器。如图 2.8 所示, 初始状态为 I0.0、I0.1、M0.0、M0.1、Q0.0 几个地址都为 OFF。但激活启动按键 I0.0 或 M0.0 时, I0.0 或 M0.0 变为 ON, 则输出 Q0.0 变为 ON。此时释放按键 I0.0 或 M0.0, 则 I0.0 或 M0.0 变为 OFF。由于先前 Q0.0 变为 ON, 所以输入 Q0.0 还是 ON, 因此输出 Q0.0 自锁, 保持在 ON 状态。此时, 若激活 I0.1 或 M0.1, 则 Q0.0 的自锁被打破从 ON 变为 OFF, 释放 I0.1 或 M0.1, Q0.0 保持 OFF 状态不变。

流程切换阀为了防止断电超压, 设定为常开阀, 所以开阀与泵停止对应, 关阀与泵启动对应。

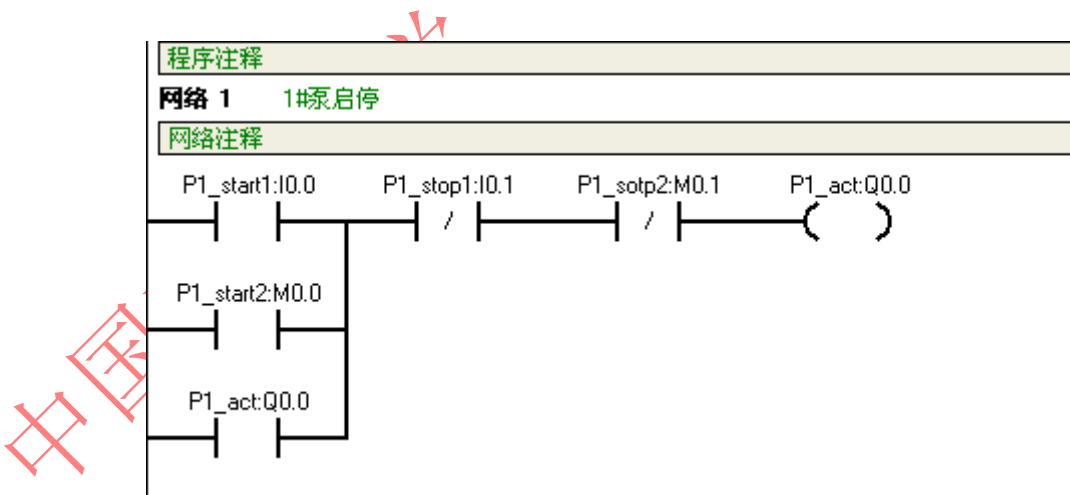


图 2.8 简单开关逻辑控制

Fig 2.8 logic control of simple switch

另外, M0.2 作为整个泵站中控/站控的切换开关, 而且中控与站控互斥。此切换只是限制中控或站控对现场设备的控制权, 不影响仪表监测。当然, 该开关的作用只是防止一方对设备操作, 另一方的误干预, 中控和站控都有权对此开关进行切换。真实站场, 每台控制设备都有单独的切换开关。站控若修改此开关前

需要取得中控授权，设备维护期间会切换到站控模式。而所有切换为中心控制的设备都被视为可以随时启动的备用机组。

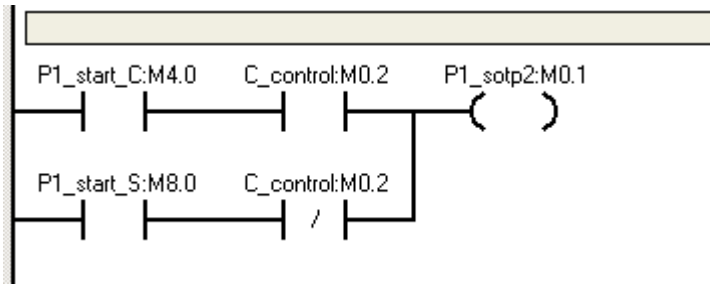


图 2.9 中控/站控切换

Fig 2.9 switching over of station control/center control

2.3.3 仪表数据监控

数据监控是 SCADA 系统最重要的功能之一，PLC 作为 SCADA 系统的组成部分，把对仪表数据传给上位机，并把上位机的控制动作送给控制仪表执行是 PLC 的最基本功能。因为 S7-200 中只有 V、I、Q、M 四个寄存器是对上位机的组态软件开放的，所以数字量和模拟量监控的需要区别对待。

因为 I 寄存器对于组态软件是开放的，所以对泵与阀的状态地址（I0.2、I0.5、I1.0、I1.3、I2.0）不需做任何处理，它们可以被组态软件直接调用。

对于模拟量输入输出寄存器 AI 和 AQ，因为不能被直接读取，所以必须让 V 寄存器作为过渡。为了使所有的组态软件不必关心仪表量程，设计人员会将量程变换直接写到 PLC，这样上位机的组态软件直接读写 PLC 中的实数变量即可。

在 S7-200 中，可以直接调用西门子免费的库 Scaling 来完成。Scaling 库中包含三个模块：Scale_I_to_R 模块，整型转实型；Scale_R_to_R 模块，实型数据之间变换；Scale_R_I 模块，实型转整型。

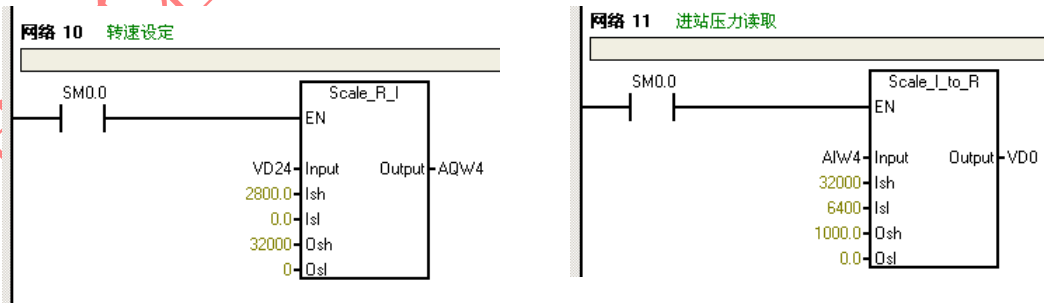


图 2.10 模拟量输入输出的量程转换

Fig 2.10 range switching of analog quantity inputs and outputs

经过量程转换，所有的输入输出地址都需要在 V 寄存器中有相应的实数映

射，而上位机的组态软件则可以直接调用量程转换完的实数，而不再需要考虑仪表的量程和模拟信号的类型等问题。

表 2.2 模拟量输入输出寄存器对 V 寄存器的映射关系

Table 2.2 projective relationship from analog quantity inputs and outputs register to V register

IO 寄存器	V 寄存器	功能	数值范围
AIW4	VD0	入口压力	0-1000
AIW6	VD4	出站压力	0-1000
AIW8	VD8	流量计	0-5.0
AIW2	VD12	读取泵转速	0-2800
AIW0	VD16	读取阀位	0-100
AQW0	VD20	阀位设定	0-100
AQW4	VD24	转速设定	0-2800
	VD28	压设定值	0-1000
	VD32	PID 设定（中间变量）	0-100
	VD36	PID 输出（中间变量）	0-100
	VW40	PID 输出	0-32000

2.3.4 自动流程切换

SCADA 系统作为一种先进的自动控制系统，自动连锁操作是其很重要的特点之一。本设备中设置的自动流程切换系统就是一种简单常见的连锁操作方式。

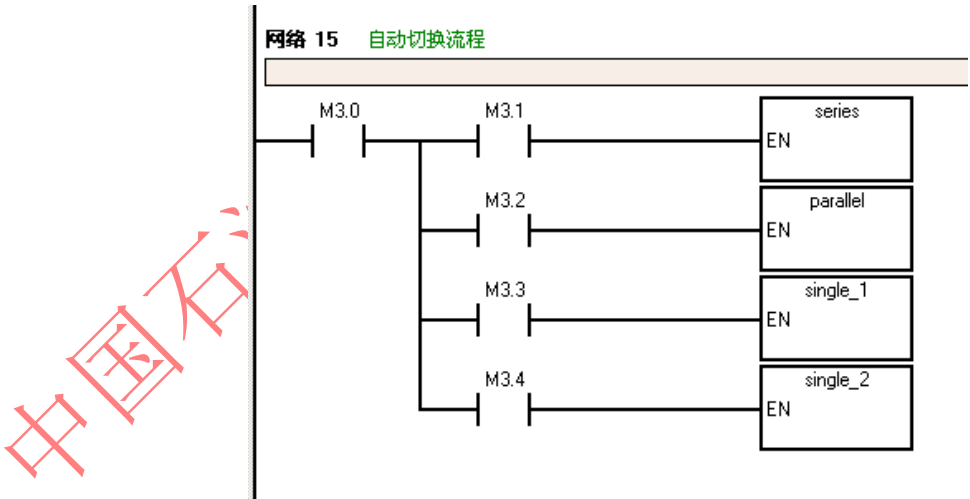


图 2.11 主程序中的自动切换流程

Fig 2.11 automatic switching process in main program

自动流程切换中，不同流程，阀状态可能会起冲突，所以操作不能全都写入主函数。应用子程序的功能则可以很好的解决这个问题。将不同的控制流程写入独立的子程序中，当需要切换到该流程的时候激活该子程序 6 秒钟，在这 6 秒钟

内完成流程切换，然后复位。正常工作时，流程切换子程序均不激活，故不会对流程切换阀的状态有所干扰冲突。

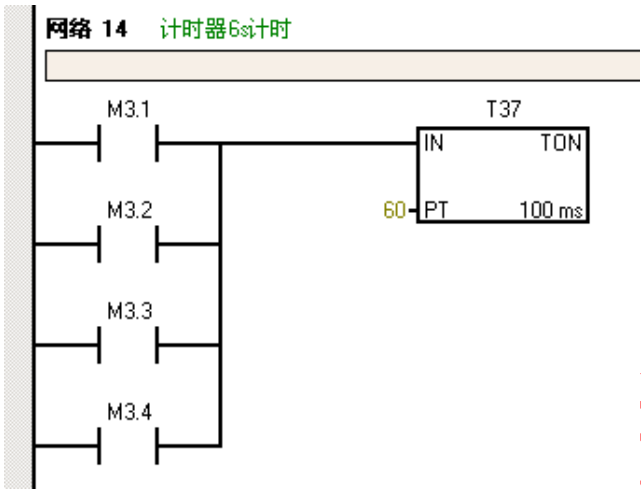


图 2.12 计时器 T37 进行 6 秒计时

Fig 2.12 calculator T37 times 6s

流程切换在设计上应该是停输状态下进行操作的。但对于教学仿真系统，培训人员容易误操作。故在设计上要考虑在 6 秒时间内，对阀门进行逐个操作，并且遵照先开后关的原则。

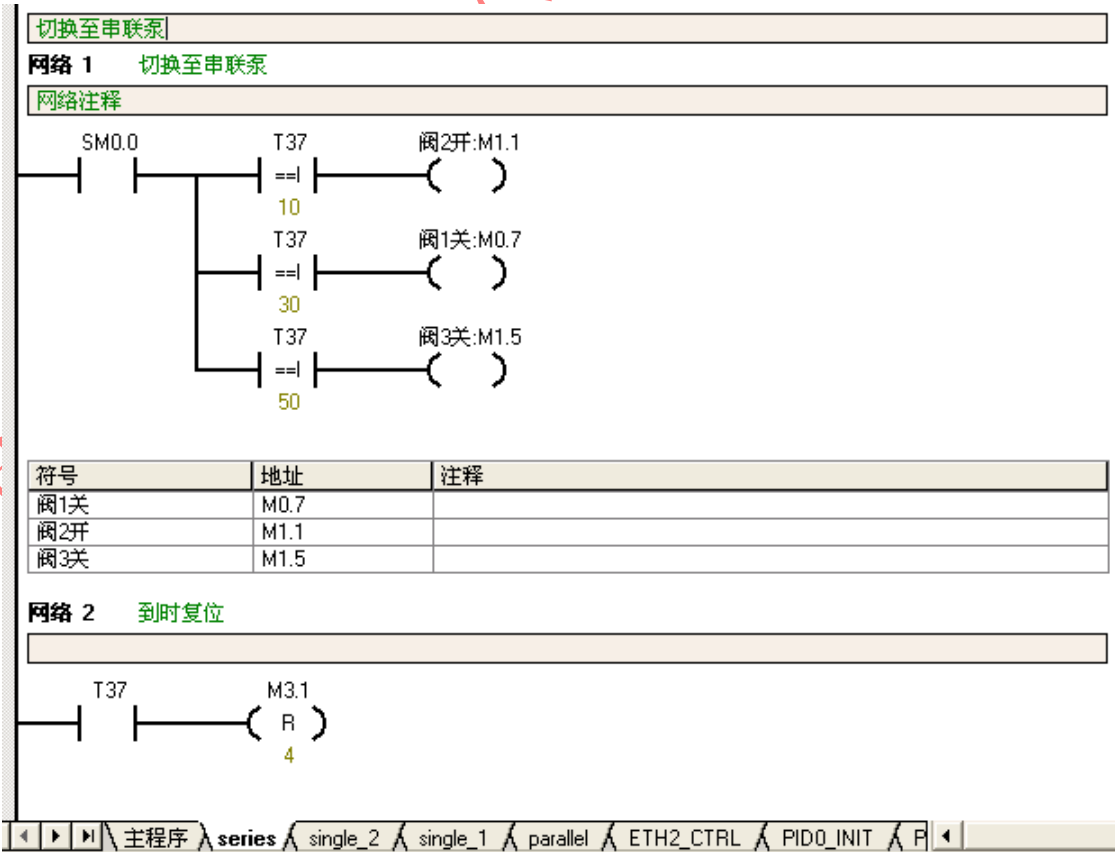


图 2.13 切换至串联泵子函数

Fig 2.13 subfunction of switch over pumps in series

以切换至串联泵为例，流程切换 M3.1 被激发后，100ms 计时器 T37 开始计时，第 1 秒时 2 号流程阀开启，第 3 秒时 1 号阀关闭，第 5 秒时 3 号阀关闭，6 秒计时完成时 M3.1 被释放，流程切换操作完成。

根据流程图 2.3 可知，泵的工作流程切换按串联运行、并联运行、1 号单泵运行和 2 号单泵运行编写逻辑，如表 2.3 所示，创建 4 个子程序。

表 2.3 流程切换子程序

Table2.3 subfunction of switching process

功能	子程序名	激发变量	操作			
			1s	3s	5s	6s
泵串联	series	M3.1	M1.1 阀 2 开	M0.7 阀 1 关	M1.5 阀 3 关	
泵并联	parallel	M3.2	M0.6 阀 1 开	M1.4 阀 3 开	M1.2 阀 2 关	M3.1-M3.4 复位释放
1 号单泵	single_1	M3.3	M1.4 阀 3 开	M0.7 阀 1 关	M1.2 阀 2 关	
2 号单泵	single_2	M3.4	M0.6 阀 1 开	M1.2 阀 2 关	M1.5 阀 3 关	

2.3.5 以太网通讯

如果没有距离因素，SCADA 系统只不过是一个过程控制系统而已。所以说 SCADA 系统的远程控制功能是其区别于其它控制系统的重要标志。本系统基于以太网通讯的方式，演示了 SCADA 系统的远程通讯能力。通过以太网，可以方便的任意转换成卫星、光纤、GPRS 等多种远距离传输方式。本系统中 PLC 与上位机之间的以太网通讯是通过 S7-200 的专用以太网模块 CP243-1 来完成的^[31]。

以太网模块连接之后，必须在 STEP 7-Micro/WIN 中进行正确设置，并把编译好的程序下载到 CPU 模块中，才能正常工作。启动 STEP 7-Micro/WIN，打开指令树中的“向导”文件夹并随后打开“以太网”向导。指定模块位置号，对于“读取模块”的命令可能出现兼容性问题，推荐手动指定。模块位置号为 2，手动指定 IP 地址，4 个泵站的 PLC 分别被指定为 192.168.1.11~192.168.1.14，填写子网掩码和网关地址。

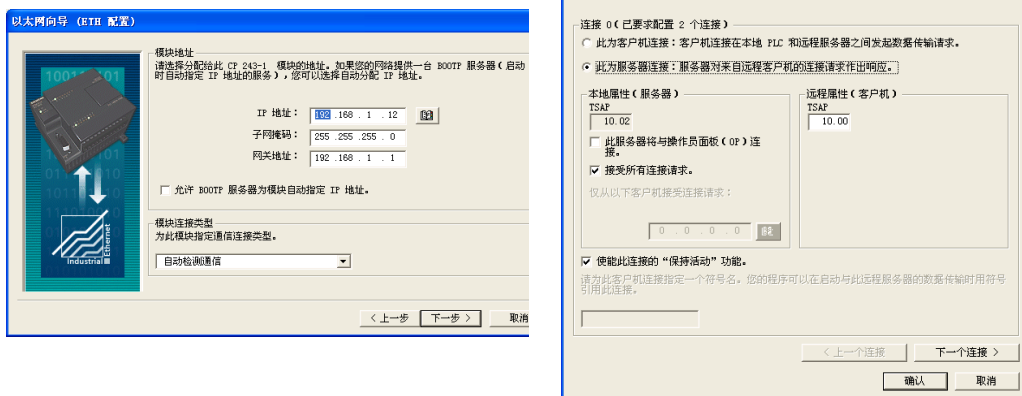


图 2.15 以太网模块设置
Fig 2.15 module settings of ethernet network

配置连接属性，将 2 个连接都指定为服务器，并如图 2.15 所示配置。服务器连接的工作方式是从远程客户机接收连接请求，服务器配置为接受来自任何客户机或限定的客户机连接。有点类似 OPC 服务器的功能，即只对客户端的请求进行应答。设置允许两个客户端接入，即一个站控计算机和一个控制中心计算机。最后完成以太网向导的配置。

如此设置以后，不但组态软件可以通过以太网与 S7-200 通信，STEP 7-Micro/WIN 也可以通过以太网对 CPU 进行程序操作和运行监控。

2.3.6 调压阀 PID 控制

在 S7-200 系统中，应用 PID 控制，调节泵站出口调节阀开度，进而对泵站出口压力自动控制。使用 PID 指令向导创建 PID 控制器，设定 PID 控制器相关参数：给定值范围 0~100、采样时间 0.1 秒、PV 为单极性、PV 范围 6400~32000、PID 输出范围为 0~32000。这里所设的值与 PID 模块的使用息息相关。PID 的整定可以通过实验时软件自带的 PID 调节面板来完成。

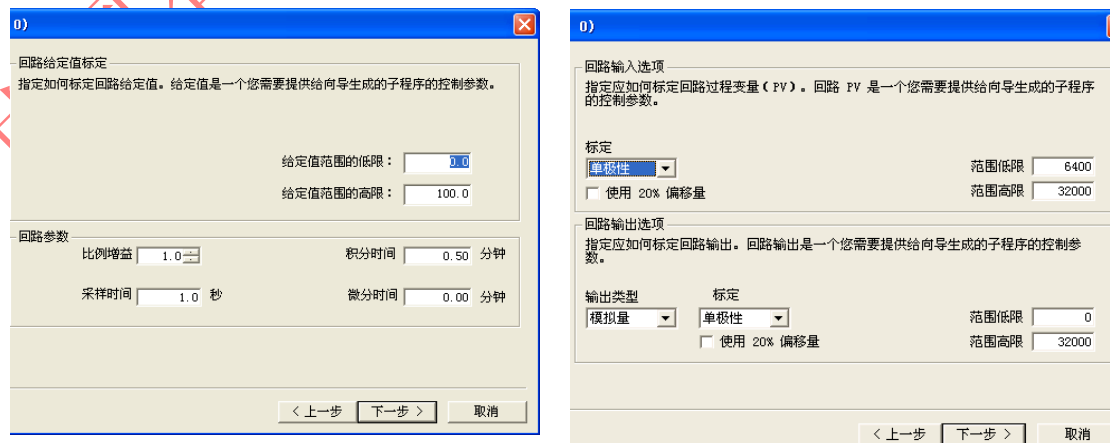


图 2.16 设置 PID 控制参数

Fig 2.16 setting PID controls parameter

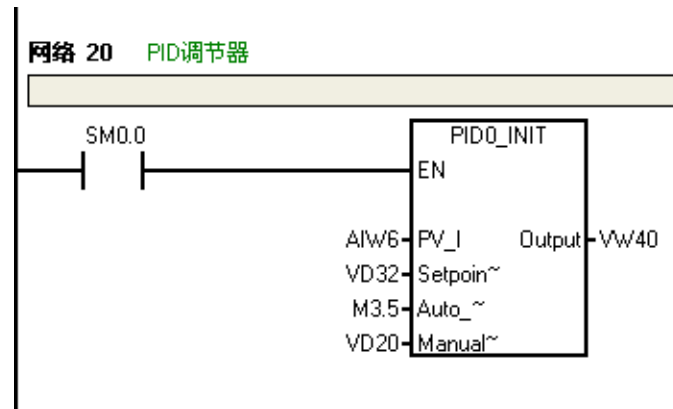


图 2.17 向导生成的 PID 模块

Fig 2.17 PID module which wizard generates

回路输入 (PV_I): 出站压力的当前值, 压力变送器的反馈信号为 4~20mA, 代表量程 0~1MPa, 所以 PV 的范围是 6400~32000, 对应地址 AIW6。

回路输出 (output): 出口调节阀开度, 模拟量输出信号为 0~10VDC, 代表阀门开度 100~0%, 所以输出的范围为 0~32000, 对应地址 VW40, 后转 AQW0。

回路给定值标定 (Setpoint): 出站压力设定值, 表示给定值的取值范围占过程反馈量程的百分比, 使用默认范围 0~100, 对应地址 VD32, 后量程变换为 0~1000 的 VD28。

手动输出 (ManualOutput): 手动模式下调节阀开度设定, PID 手动状态下的输出, 范围为 0~1, 对应地址 VD20。

自动/手动模式 (Auto_Manual): 控制 PID 的手/自动方式。当 M3.5 为 1 时, 切换到自动模式, 调节阀开度经过 PID 运算输出; 当 M3.5 为 0 时, PID 将停止计算, 调节阀开度为 ManualOutput (VD20) 中的设定值。

由于电动调节阀是常开阀, 所以输出前需要量程变换。

2.3.7 无扰动 PID 切换

长输管道工艺要求在不同的时刻投入、或者退出 PID 自动控制; 退出 PID 自动控制时, 控制器的输出部分可以由操作人员直接手动控制。这就是所谓的 PID 手动/自动切换。

PID 控制处于自动方式时, PID 控制器 (S7-200 中的 PID 调节功能) 会按照 PID 算法, 自动通过输出的作用使过程反馈值跟随给定值变化, 并保持稳定。这是一个自动的闭环控制系统。操作人员可以根据现场工艺的要求, 改变给定 (即设定值) 的值。

PID 控制处于手动方式时, PID 控制器不再起自动计算的作用。这时, 控

制回路的输出是由操作人员手动控制、调整，由操作人员观察现场的控制效果，从而构成人工闭环控制。

管道控制系统的执行机构不能承受较大的冲击，这样会产生水击事故。因此就要求在进行 PID 自动/手动切换时，保持控制输出的稳定。这就是要求无扰动切换。为此，编写如图 2.18 所示的程序，放在 PID 控制子程序前。

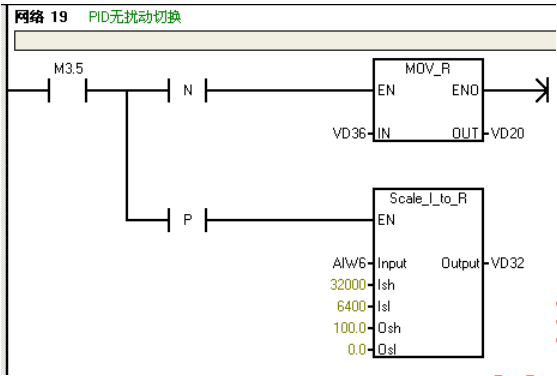


图 2.18 无扰动切换处理程序

Fig 2.18 undisturbed handovers processed program

该程序为了达到 PID 自动/手动控制的无扰动切换，做了如下处理：

- ① 在从自动向手动切换时，使手动输出值（VD20）等于当前的实际控制输出值；
- ② 在从手动向自动切换使，使设定值相当于当前的过程反馈值。

2.4 基于 HMI 的站控系统

2.4.1 站控 HMI 的安装

HMI 设备全称人机交互界面接口，HMI 上可以显示和控制自控系统（PLC）的当前控制状态、过程变量等数字量和模拟量数值。西门子专门为 S7-200 开发了几款 HMI，其中 K-TP178 micro 在性能和价格上较好满足了设计需求。

K-TP178micro 是专为 S7-200 开发的具有图形功能的设备。触摸屏和功能键的组合操作极大地简化了操作和监视过程。在操作 K-TP 178micro 时，LED 会显示操作状态，同时在进行触摸操作时将发出声音提示。K-TP 178micro 具有 5.7 英寸触摸屏，蓝色 4 级灰度显示，分辨率为 320×240，6 个可编程控制键，24VDC 供电，通讯端口为 RS-485，编程软件为 WinCC flexible 2008。

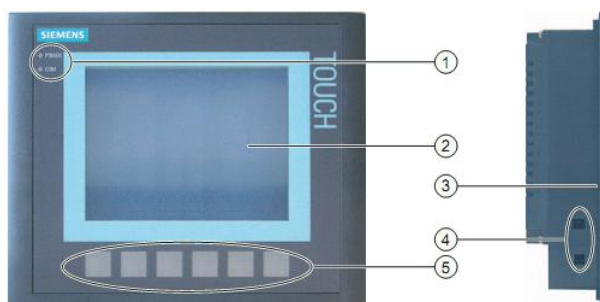


图 2.19 K-TP 178micro 的正视图 and 侧视图

Fig 2.19 front and side view of K-TP 178micro

K-TP 178micro 的正面左上角有两个 LED 指示灯（图 2.19 的①），分别指示 HMI 面板的供电状态和 COM 口的通讯状态。正中央为蓝色 4 级灰度的电阻式触摸屏。正下方为 6 个可编程控制键。

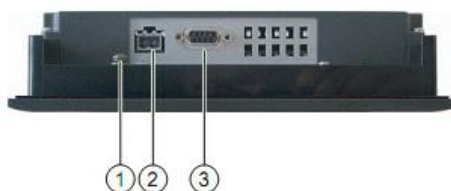


图 2.20 K-TP 178micro 的底部接口

Fig 2.20 bottom interface of K-TP 178micro

图 2.20 中所示的为 K-TP 178micro 的全部对外接口，①为机壳接地端子，②为 24VDC 电源端口，③为 RS-485 接口(IF 1B)。

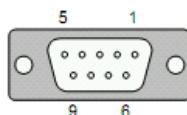


图 2.21 RS-485 接口针脚分配

Fig 2.21 distribution of connective pins

作为 RS-485 通讯时只有两个针脚有效，即数据通道 B (+) 的 3 号针脚和数据通道 A (-) 的 8 号针脚。

西门子为 K-TP 178micro 与 S7-200 通讯专门设计有隔离接头。线缆使用 profile-bus 专用线缆，通过 RS-485 的中继器，最远通讯距离可达到 1200 米，足够泵站内部站控系统通讯需求。

在本项目中由于空间限制，通信距离较短，RS-485 没有使用西门子专用的隔离接头，所以只将 3 和 8 号对等连接，线缆两边同样方式连接成 COM(公)口。

2.4.2 HMI 的组态编程

WinCC flexible 是西门子公司用来处理基本组态任务的软件，包括了性能从

micro Panel 到简单 PC 的可视化组态编程，同时也是 K-TP 178micro 唯一的专用组态软件^[32]。

打开 WinCC flexible，新建项目，按照创建向导创建组态项目。在“设备选择”（如图 2.22）窗口选择 Micro panels=>170=>K-TP 178micro 6"，确定 HMI 设备型号，进入组态界面。

组态界面（图 2.22）中，左面的项目管理器，下边的属性管理器，右边的工具管理器和正中间的编辑器是最常用的窗口。

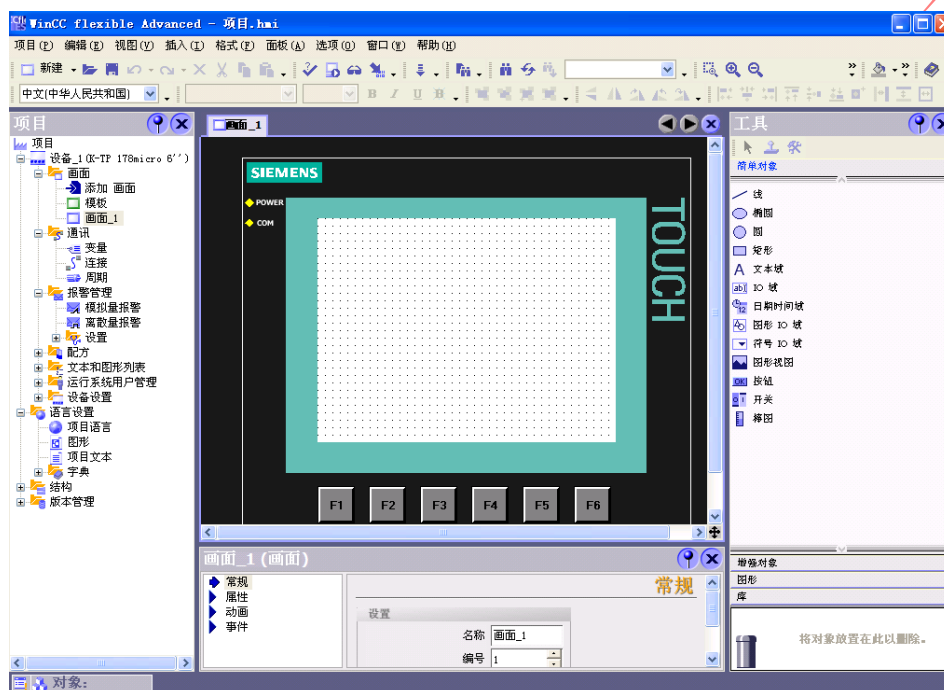


图 2.22 WinCC flexible 的组态界面

Fig 2.22 Interface of WinCC flexible

使用 WinCC flexible 为 HMI 新建项目，点击项目=>通讯=>连接，打开表格编辑器“连接”，对连接设置进行配置。连接名称为“连接_1”，通讯驱动程序为“SIMATIC S7 200”，在线开启。为避免冲突（即不和 PLC 的端口一样），HMI 的设备端口默认为 1。PLC 端的地址选择和配置 PLC 通讯端口一样，默认为 2。网络配置文选 PPI，K-TP 178micro 和 S7-200 连接的通讯协只有 PPI。

2.4.3 变量数据库连接

变量数据库是组态软件编程中很重要的一个环节。组态软件之所以不同于普通编程软件，除了其相对丰富的工业控件外，最重要的就是其变量数据与现场设备良好的兼容性和人性化的配置方法。组态软件中的变量可以很方便的与 PLC 中的寄存器建立相对应的连接关系。

设置好 HMI 与 PLC 的连接后，就可以定义 HMI 中的变量，并与其对应 PLC

寄存器地址建立连接。在 WinCC flexible 中可以对 4 中寄存器进行读取和写入操作：数字量输入寄存器 I，数字量输出寄存器 Q，内部内存 M 和变量内存 V。本次设计将内部内存 M 作为数字量内存，变量内存 V 作为模拟量。由于不能对模拟量输入输出寄存器 AI 和 AQ 进行读写，故在写 PLC 程序时，已将 AI 和 AQ 量程变换完后送入 V 寄存器中。

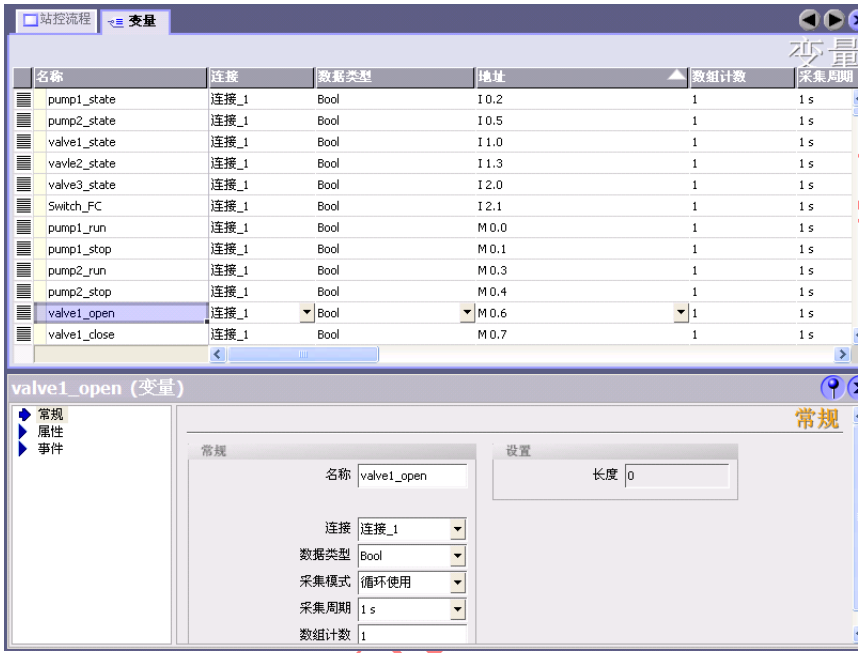


图 2.23 变量连接设置

Fig 2.23 setting of variables linking

变量连接时，需要 WinCC 中的变量对应 PLC 中合适的地址，由于软件和设备同属西门子的产品，所以具有很好的兼容性。

PLC 中的数字量地址需要连接到 WinCC flexible 中的 Bool 变量，在 PLC 中有两类这样的地址：数字量输入寄存器 I，主要完成读取气动阀和电动泵的状态反馈信号，以及 2 号泵工频变频切换开关的状态；寄存器 M 主要完成对气动阀和电动泵开关操作，另外还有硬开关所不具备的变频启动功能以及自动流程切换的功能。

PLC 中需要的通讯模拟量都为实型变量 real，主要是在 PLC 中已经将整型输入输出寄存器的数据进行了量程变化，存入了 V 寄存器供上位机调取。所以这里 WinCC 就不再需要考虑线性变换的问题了。

2.4.4 组态画面

建立数据连接后，根据站内流程规划泵站的控制界面图，进入系统后首先是整个泵站的站控流程图。通过面板下方的 6 个可编程控制键，可以分别进入不同的控制界面中。

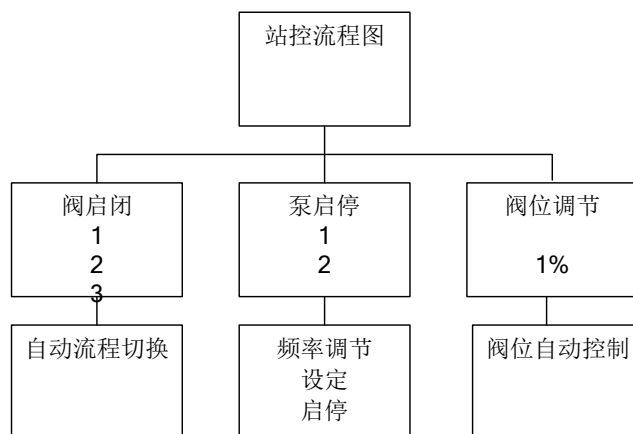


图 2.24 HMI 面板控制画面结构

Fig 2.24 video control structure of HMI panel

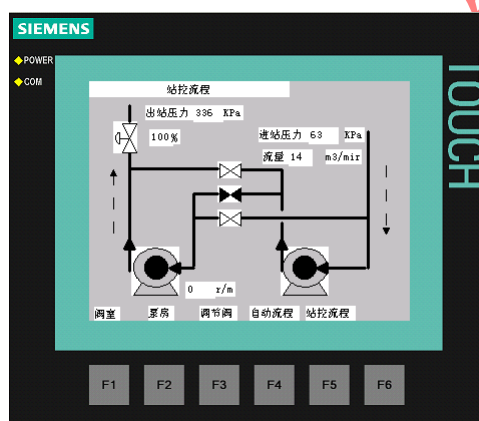


图 2.25HMI 面板站控流程图

Fig 2.25 station control Procedure of HMI panel

阀室画面：控制切换泵站工艺流程的 3 个气动阀门。通过画面两侧的开关阀按键，对阀门进行开启关闭操作。

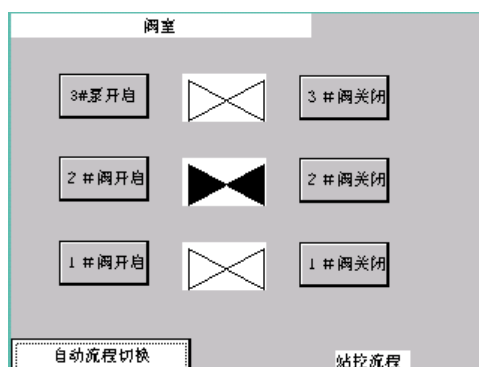


图 2.26 阀室画面

Fig 2.26 menu of valve chamber

泵房画面：对两台泵进行开关操作。当变频/工频开关处于变频状态时，弹

出调频按钮，进入调频画面。此时对 2 号泵的启动仅是启动了变频器，需要在变频器画面中完成变频启动。

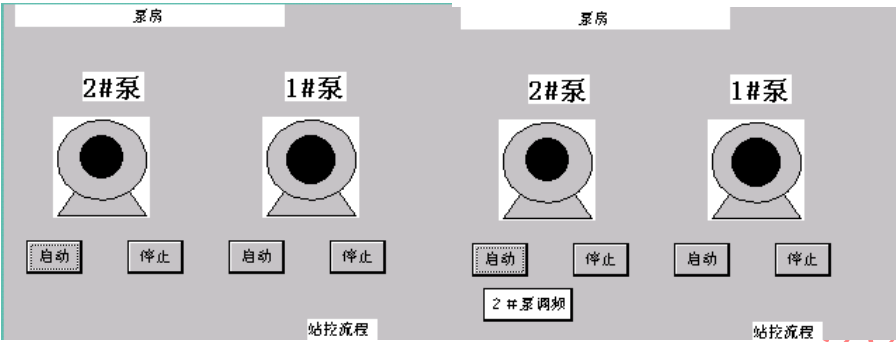


图 2.27 泵房
Fig 2.27 pump house

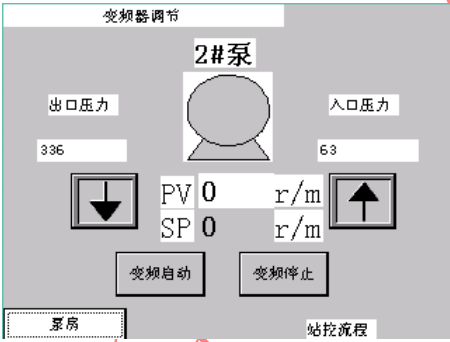


图 2.28 变频调节
Fig 2.28 frequency conversion

自动流程切换画面：有 4 种流程的切换按钮，该按钮激活已编写在 PLC 中的程序。为了防止误操作，这 4 个键正常情况下不显示，只有当自动流程切换功能被开启时才会出现。

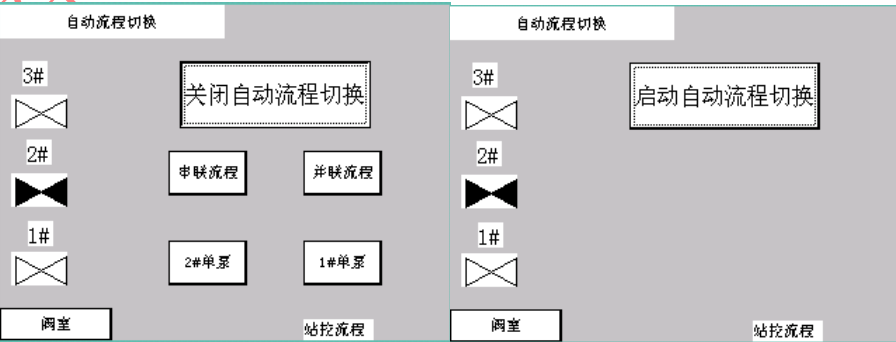


图 2.29 自动流程切换画面
Fig 2.29 interface switching of automatic flow

调节阀画面：用于手动控制泵站出口调节阀的开度。另外还设有自动控制方

式，通过 PID 控制器对出站压力进行闭环控制。

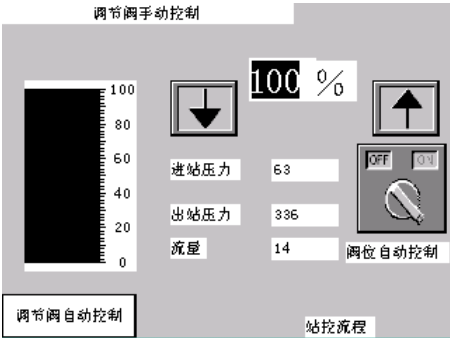


图 2.30 调节阀画面

Fig 2.30 frames of regulating valve

2.5 基于力控的控制中心系统

该仿真教学操作系统的控制中心级以组态软件“Force Control 6.1”作为仿真教学系统的开发平台，在此基础上进行系统操作界面和数据库系统的开发。通过力控组态软件的 IO 设备平台与 PLC 进行通信，在 PLC 内存地址和力控实时数据库间建立读写通信。开发基于计算机的控制界面，对全线 4 个泵站进行集中控制。

2.5.1 实时数据库通信

组态软件的关键之处在于其对现场设备的数据采集与监控能力。力控是款性能很强的组态软件，它的 IO 管理能力很强大。由于力控的 IO 驱动很全面，添加和管理 IO 设备比较容易。

打开力控后，通过项目管理浏览器打开 IO 设备组态窗口“IoManager”，选择 PLC 驱动、西门子公司的 S7-200 的 TCP 协议驱动^[33]。共 4 个泵站，每个泵站都有 1 台支持 TCP 协议的 PLC，所以 IoManager 中共添加 4 台设备（No1、No2、No3、No4），每个设备的通信 IP 为 PLC 编程时所写入的，在设备参数设定的时候相应输入。

表 2.4 站控系统设备连接

Table 2.4 device connections of station control system

站控系统	设备名称	连接 IP
1 号站系统	No1	192.168.1.11
2 号站系统	No2	192.168.1.12
3 号站系统	No3	192.168.1.13
4 号站系统	No4	192.168.1.14

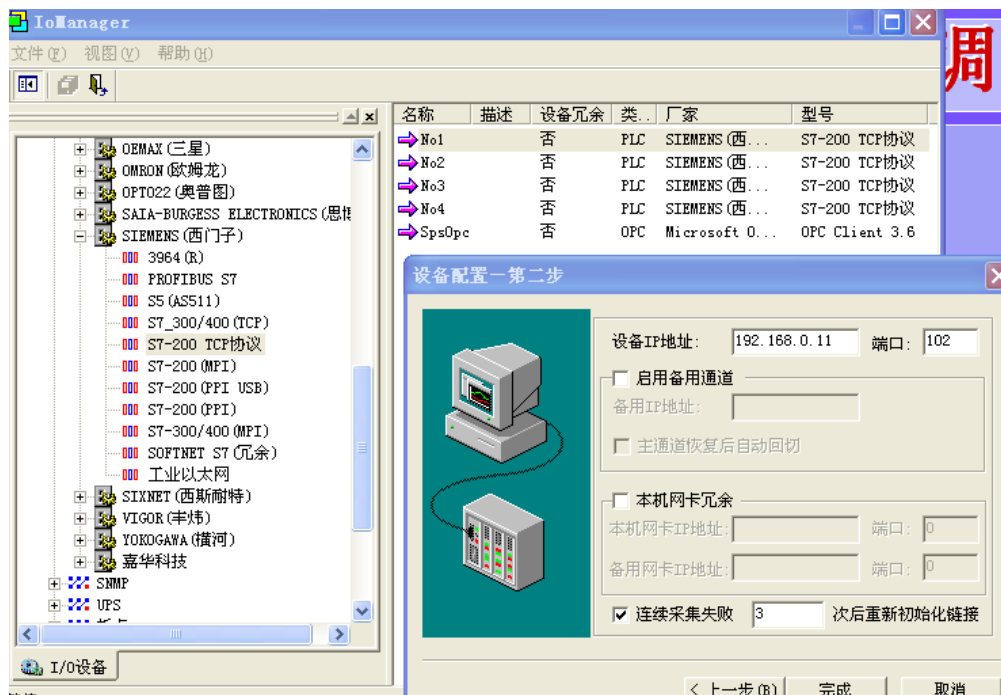


图 2.31 在力控中加载 PLC 驱动

Fig 2.31 PLC driver loading in forcecontrol

加载完 IO 设备驱动之后，即力控与完成 IO 设备，但还需要对实时数据库中的变量参数进行数据连接。数据连接是确定点参数值的数据来源的过程。力控数据库正是通过数据连接建立起与其它 I/O 驱动程序的通信、数据交互过程。这些操作是通过点组态来完成的。

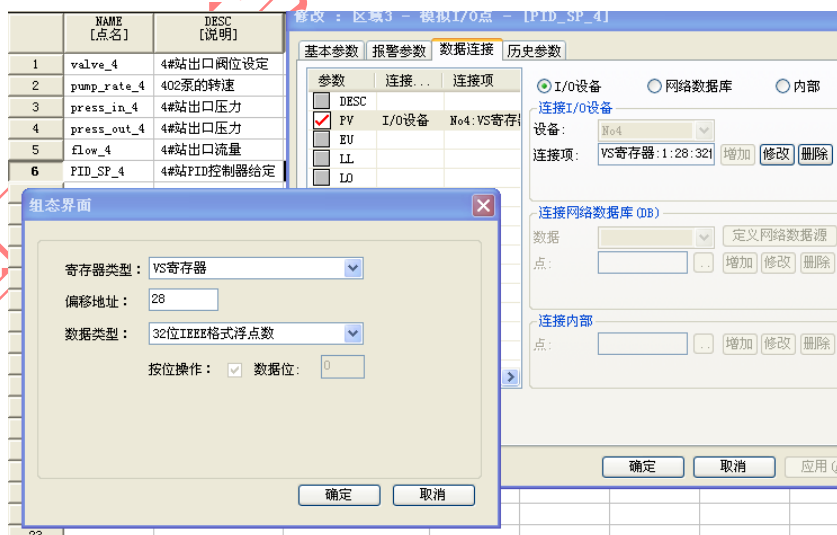


图 2.32 模拟量点组态设置

Fig 2.32 point builder setting of analog quantity

点组态就是将实时数据库中的点参数与 PLC 中的寄存器地址建立连接映射，

在力控驱动程序中可以对 M、I、Q、T、C、V、AI 几个寄存器进行读写通信操作。为了方便及嵌入式 HMI 面板统一，本装置就只对 M、I、Q、V 四个寄存器进行操作。

模拟量 IO 点主要连接 V 寄存器，力控驱动中写作 VS 寄存器。需要读写的寄存器在 PLC 内部都已经过量程转换为实型，所以力控中不需再做量程变换，对应 32 位浮点数。

对于数字量信号，只需要选择正确的数据位即可，设置比较简单。如 1 号站泵 101 的状态量，连接设备 No1 的 I0.2 寄存器，比模拟量多选一项按位操作。

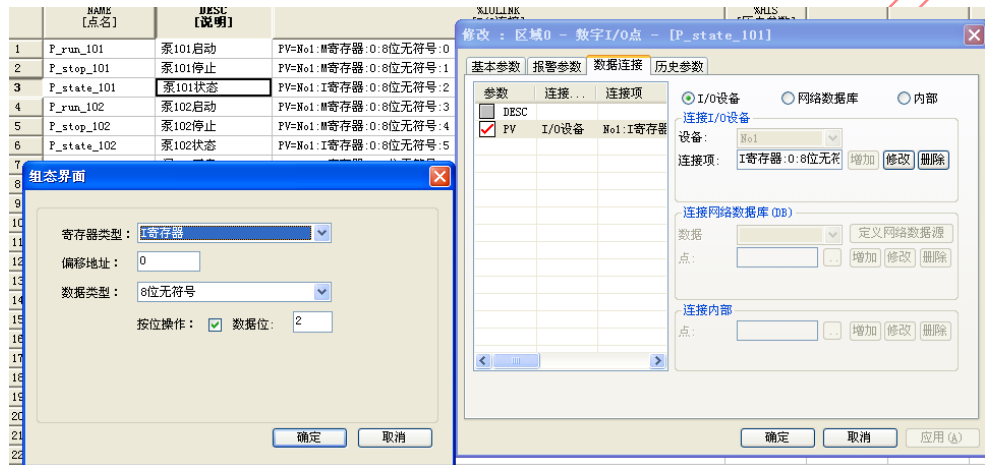


图 2.33 数字量点组态设置

Fig 2.33 point builder setting of digital quantity

2.5.2 控制界面的编写

组态软件主要是编写控制界面，帮助操作人员更加直观方便的了解现场工艺，操作现场设备^[34]。

总工艺流程画面（如图 2.34 所示）是该教学仿真系统的初始界面，主要是展示环道的整体工艺流程、现场工艺参数及设备状态。本系统为控制中心级，可以对全线各个泵站进行总体监视和控制。

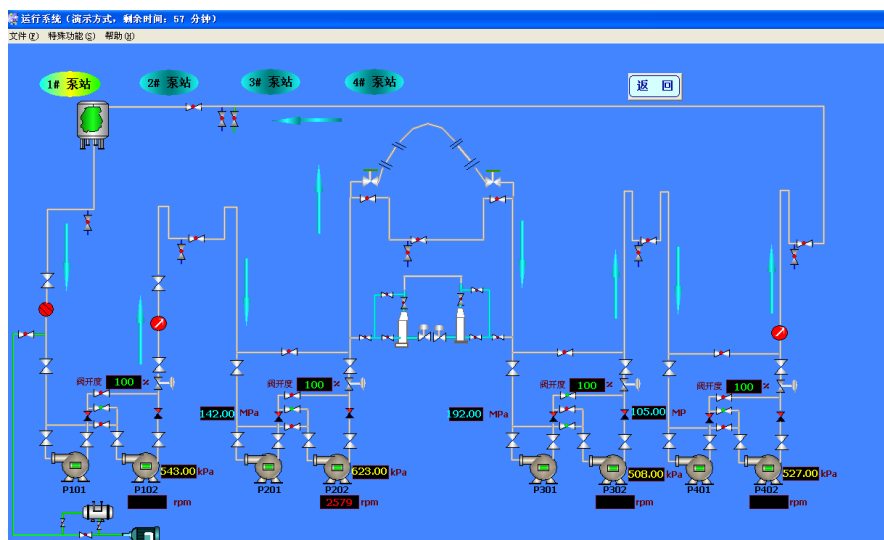


图 2.34 中控系统的总工艺流程监控画面

Fig 2.34 monitoring menu of total technical process in center control system

通过总流程界面，可以进入各站场工艺系统中了解泵站工作状态的相关参数，对各站的泵和阀进行操作，以及流程的自动切换和泵站出口调节阀的 PID 控制。作为控制中心的仿真控制系统，该系统已经具备了对多个泵站远程控制的主要功能。

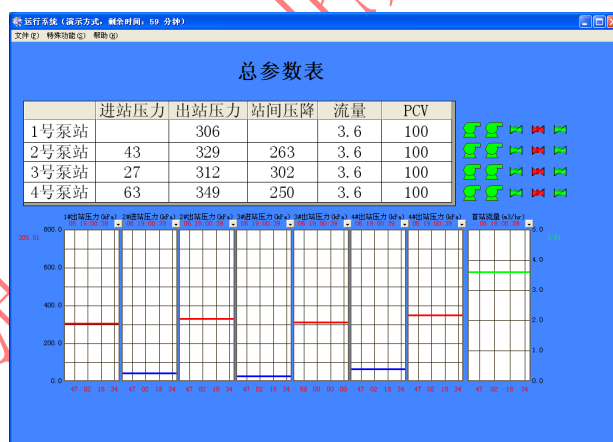


图 2.35 系统总参数表画面

Fig 2.35 menu of parameters table

除了总流程，总参表应该是 SCADA 系统中最重要监控画面了。通过总参表，调度人员可以对全线的运营情况一目了然。本系统中的总参表包括各站进出口压力、流量、调节阀开度、设备状况等，还包括 1 分钟之内各站压力的变换趋势。对于小系统来说，仅显示 1 分钟内的压力趋势已基本足够，更多的历史数据通过脚本程序存在了本地 ACCESS 数据库中。

控制中心系统中的站场控制界面是主要的控制方式。对于每个泵站至少需要

4 个画面表达所要控制的内容，控制系统总共完成了二十多个画面，这些画面大同小异，我们只抽取一个泵站画面来详细讲解控制中心系统。

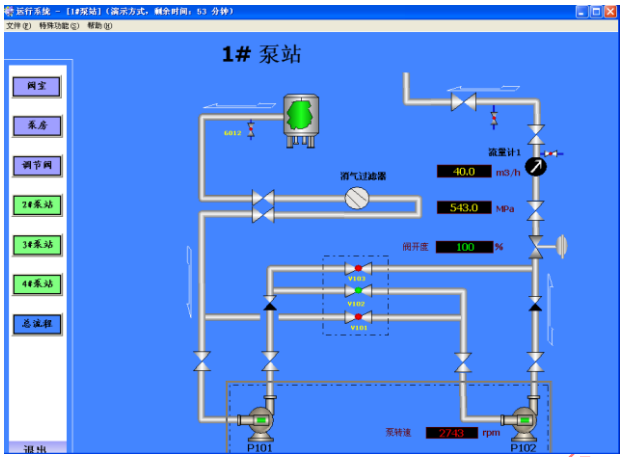


图 2.36 站控流程画面

Fig 2.36 picture of station control flow

站控流程画面显示泵站的工艺流程和各种设备的相关运行参数。比起总工艺流程来说，显示的信息更加全面，可以帮助培训人员更好的理解相关工艺。此外，在站控流程画面中点击左边栏的相关设备按钮或者相关设备区，可以进入相关设备的操作画面。左边栏的下方还有其它泵站的切换流程。

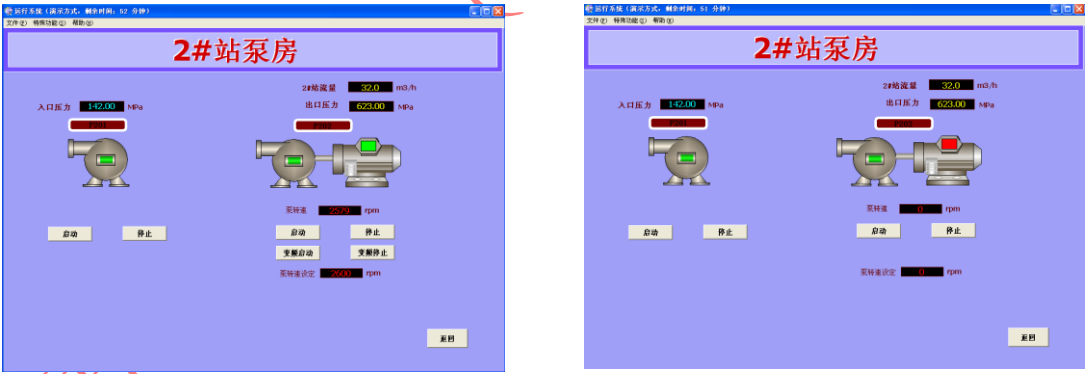


图 2.37 泵房控制画面

Fig 2.37 controlling menu of pump room

点击增压泵区域或泵房按钮，可进入泵房画面，如图 2.37 所示。泵房中有两个泵，左边是 1 号泵，右边是 2 号泵。1 号泵为不可调速泵，只有启停两种状态，由泵下方两个按钮控制，泵图标中的绿灯代表泵启动，红灯代表泵停止。2 号泵为工频变频可切换工作，切换开关在就地控制柜上。当 2 号泵工频工作时，变频启停开关是隐藏的，2 号泵右边的动力装置代表变频器变绿，设定频率和反馈频率显示为 0。当 2 号泵变频工作时，会多出变频启停的开关，变频器的指

指示灯也会随着变频器通电而变绿。通过泵转速设定的文本框，2 号泵还具有泵转速设定的功能。这里转速设定的本质就是将 0~2800 rpm 线性变化成 0~50Hz 的频率来表示。

此外，通过站控流程画面还可以进入阀室，如图 2.38 所示。阀室左右两部分分别是手动流程切换和自动流程切换，控制的对象是每个泵站决定泵机组串联或并联工作状况的启动流程切换阀门。手动切换流程通过手动点击开启和关闭按钮对阀门进行操作。当使用自动流程切换时，阀门会根据目标流程以 2 秒间隔依次对相关阀状态进行切换，依次操作是为了降低误操作时产生的水击影响。



图 2.38 阀室控制画面

Fig 2.38 controlling menu of valve chamber

每个泵站均有出口调节阀的控制画面，如图 2.39 所示。控制画面的主体是 PID 手操器。主要信号有反馈测量信号 PV（即泵站出口压力），设定压力信号 SV，调节阀设定开度 OP。手动状态下，调节阀开度可在 OP 处设定 0~1。自动状态下，出口调节阀运行于 PID 控制器状态下，在 SV 处设定目标压力，PID 控制器会自动控制调节阀开度，使压力稳定在设定压力附近。PID 控制器本身是内嵌在 PLC 中的子程序，参数整定通过 STEP 7-Micro/WIN V4.0 中的 PID 自整定功能完成的。



图 2.39 调节阀控制画面

Fig 2.39 controlling menu of regulating valve

第3章 长输管道教学实验环道的应用

长输管道教学实验环道仿照真实的管路 SCADA 系统，分别通过就地控制柜、嵌入式 HMI 面板和控制中心对现场各种设备进行操作。

对于完全自动控制的管道系统，主要依靠控制中心级。除非发生设备自锁，就地控制很少使用。中心控制级可以从全线角度分析工况，而站控系统只能看到本站情况，不能统筹决策。所以在长输管道教学实验环道的操作说明中，我们主要从控制中心角度分析总体工况。

3.1 实验准备

长输管道教学实验环道以水为实验介质，真实环道为控制对象。在实验开始之前要做好一系列的准备工作。

- ① 实验前应首先检查实验装置的水、电系统是否安全、完善；
- ② 根据实验的具体内容检查所有阀门状态；
- ③ 打开各种设备的电源，进行预热准备；
- ④ 打开计算机和 HMI，运行组态软件；
- ⑤ 检查各仪表读数和阀门状态；
- ⑥ 实验进行前，需要将管道内充满水，注水前应首先关闭阀门 901 和 902，此时可将流程切换阀全部打开；
- ⑦ 待水罐液位计指示到 70~80 刻度时，且压力稳定，则管道注水完毕。此时应检查所有的设备是否工作正常，仪表读数是否合理，法兰和各种连接处是否有滴、漏现象。一切正常后即可开始实验。

3.2 环道密闭输送实验

本环道采用从泵到泵的密闭式输送工艺，模拟时可以 4 个泵站全开启，也可开启部分泵站采取全越站的方式工作。

本实验通过从控制中心级的启动和停输两项基本的管道操作，来讲解该装置如何完成密闭输送。

3.2.1 管线启输

用户首先进入各站的阀室，手动或自动将流程切换到串联流程，各站调节阀调到 100% 开度。依次进入各站阀室，从首站到末站逐个启动 1 号泵。

首站泵 P101 启动后，管道中的水开始流动，各站进出口压力都有所上升。其中 1 号站出站压力最高，4 号站最低，2-4 号站由于站内摩阻，出口压力均小于入口压力。



图 3.1 首站启单泵后运行曲线

Fig 3.1 operation curve after starting single pump in initial station

依次启动泵 P201、P301 和 P401，观察压力曲线的最大最小值，保证各站进站压力不低于最小进站压力，出站压力不大于最大允许操作压力。

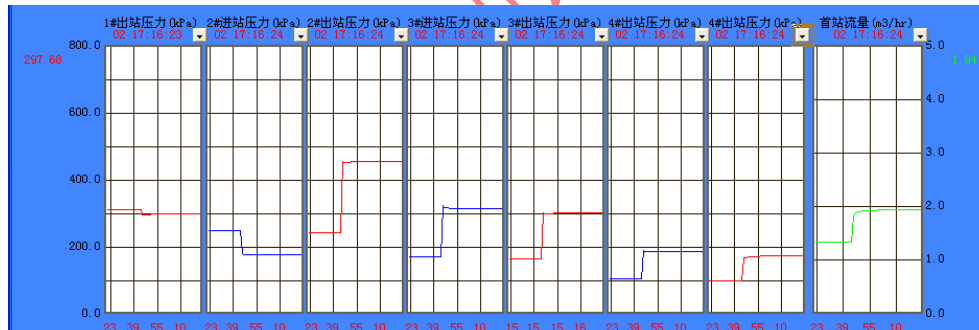


图 3.2 泵 P201 启动后压力流量变化

Fig 3.2 pressure and flow changes after starting pump P201

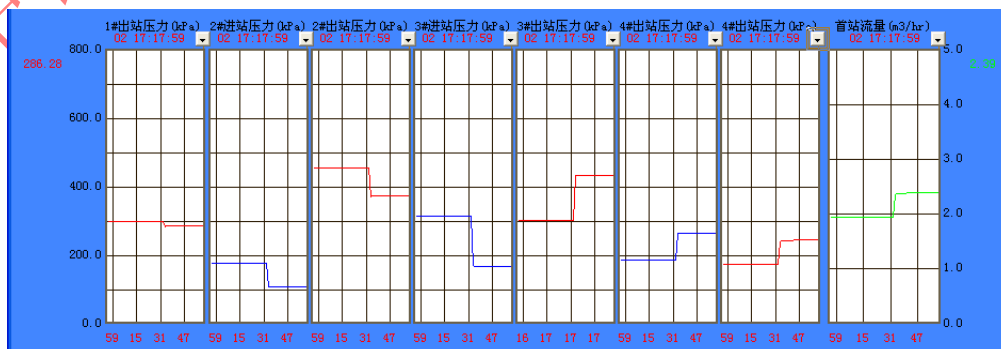


图 3.3 泵 P301 启动后压力流量变化

Fig 3.3 pressure and flow changes after starting pump P301

随着各站的泵开启，流量有所增加。稳定后，各泵站流量基本保持一致，压力维持恒定，管道自动达到平衡状态，完成单泵运行的密闭输送实验。

此时，读取总参数表（如图 3.4）中各站进出口压力和流量。并根据各站的压力参数绘制水力坡降曲线，如图 3.5 所示。由于整个环道上各泵站的进出口在同一高程，所以进出站压力可被视为总压头。

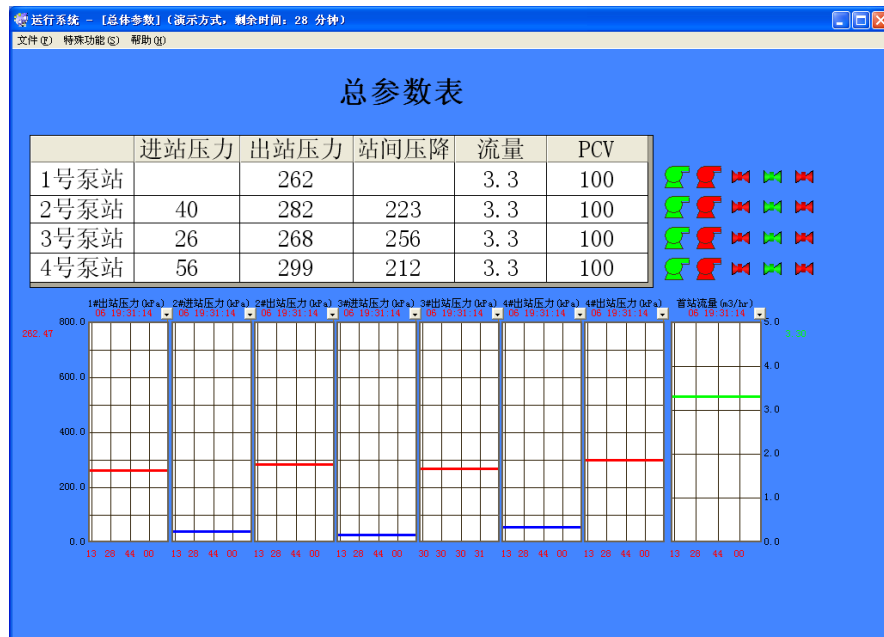


图 3.4 单泵运行总参表

Fig 3.4 operating parameters table when starting single pump

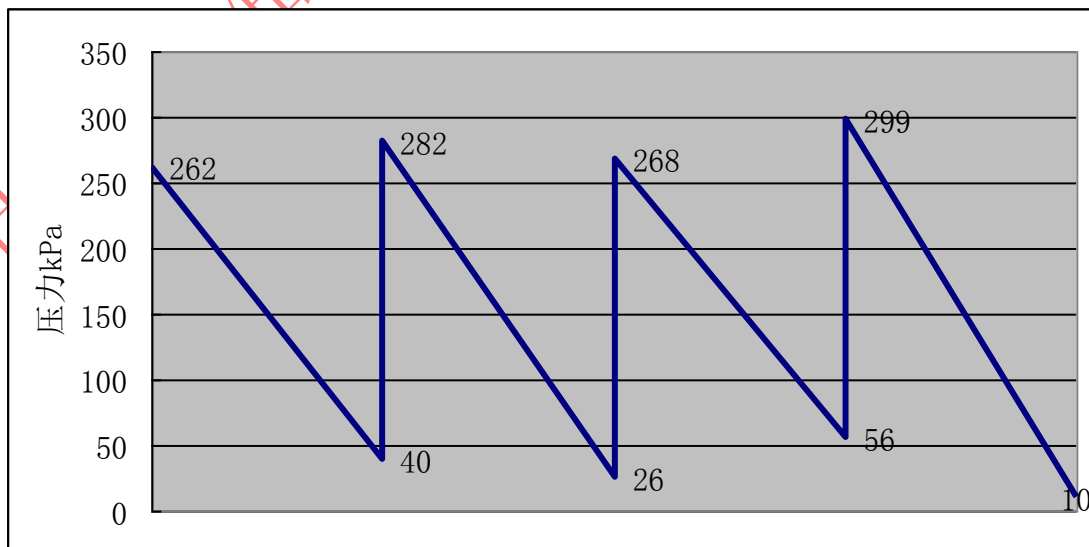


图 3.5 单泵运行时水力坡降图

Fig 3.5 hydraulic slope figure when starting single pump

用户点击总参表中泵的图标，弹出相应泵房，点击标题即可关闭泵房窗口退回到总参表窗口。从首站到末站依次启动各泵站的第二台泵，进行双泵串联运行的工艺流程。总参表（如图 3.6）下方为实时趋势图，显示各泵站的进出口压力在 1 分钟内的变化趋势，左起为首站。红线为出口压力，蓝线为入口压力。右边绿色曲线为 1 分钟内首站的流量变化趋势图。

双泵串联运行，站内压力大幅度增加。同时流量受压力影响，也增加明显。

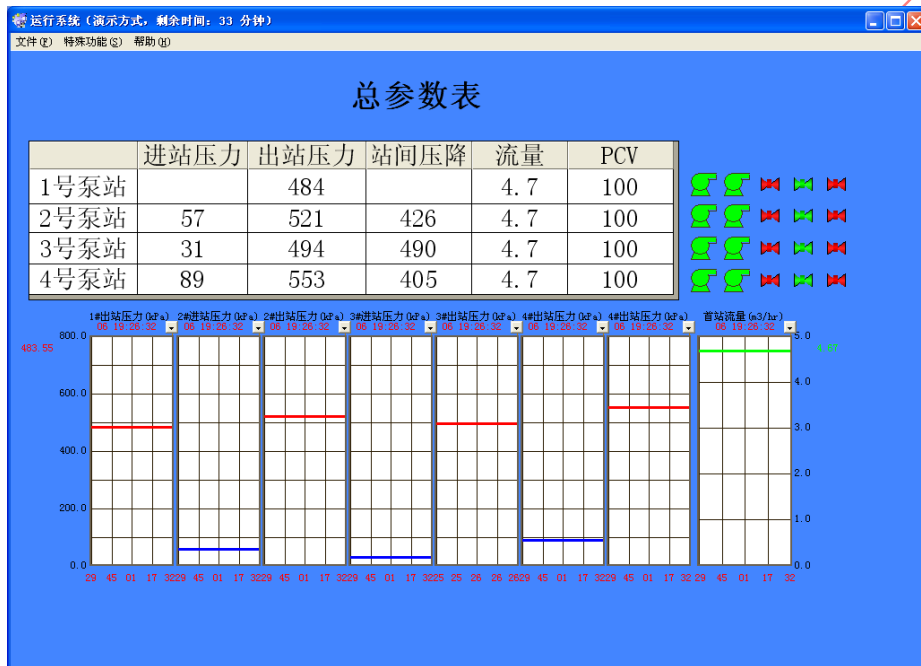


图 3.6 双泵串联运行参数

Fig 3.6 operating parameters table when starting two pumps in series

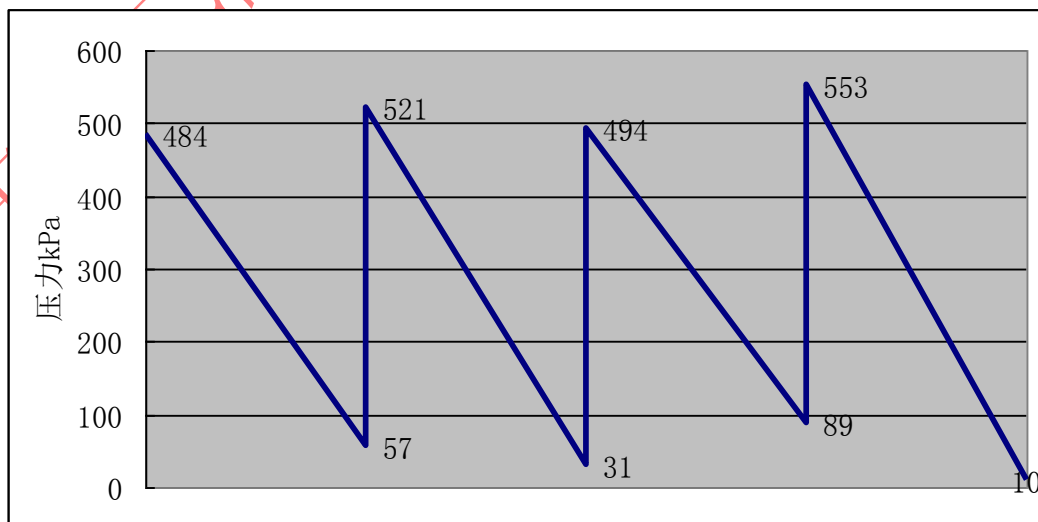


图 3.7 双泵串联运行的水力坡降曲线

Fig 3.7 hydraulic slope figure when starting two pumps in series

3.2.2 管线停输

停输也是密闭输送的正常工况之一。保持各截止阀和调节阀的开关状态，按以下次序停止各站的泵机组：P401->P301->P201->P101->P402->P302->P202->P102。

为了显示方便，本次停输实验在保证各站出口压力不超压的情况下，尽量缩短停泵间隔，在 1 分钟之内完成整个停输程序。

停输过程中注意进出站压力，防止进站低压和出站超压。这两种情况在真实的管道运营中决不允许出现。进站压力过低会在泵内产生汽蚀，对泵等设备有极大危害。出站超压会造成下游关键点的压力超过该点的最大允许操作压力，严重时甚至会爆管，极其危险。

正常情况下的实验，不允许同时关闭两个或两个以上的外输泵，以防止管线不平衡时的水击波叠加，造成不可预知的更大损害。长输液体管道执行顺序停泵程序时，要求相隔 20 秒逐个停泵。

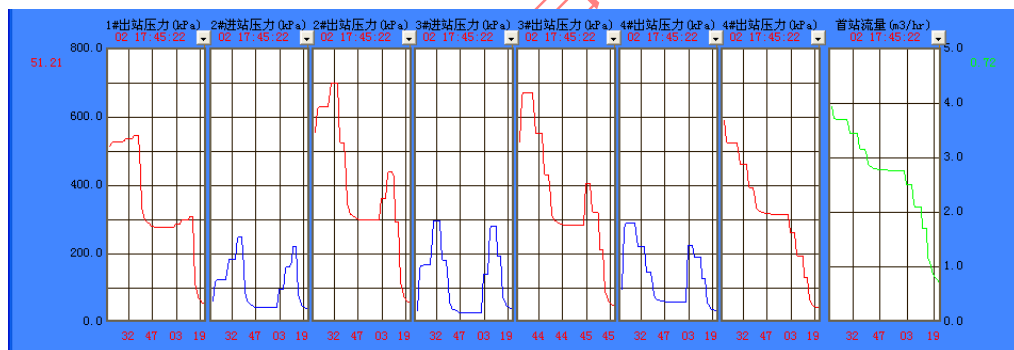


图 3.8 正常顺序停输的压力流量变化

Fig 3.8 pressure and flow changes of batch transportation

3.2.3 双泵并联运行

除了单泵和双泵串联运行外，该仿真系统还可以进行串并联切换。停输后，切换到并联流程，流程切换阀在操作中一定要“先开后关，防止憋压”，否则会导致错误的结果和设备的损坏。切换完阀门流程后，由首站开始逐个泵站单泵启动，待流量压力稳定后再逐站启动第二台泵。在不使用调节阀和变频器的前提下，这样启动最为平稳。

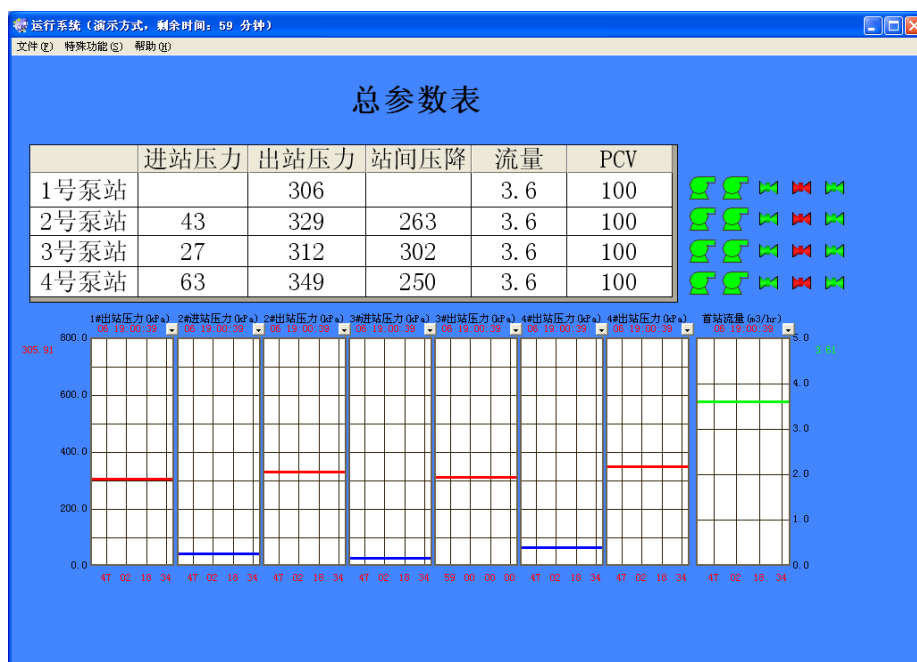


图 3.9 双泵并联运行参数

Fig 3.9 operating parameters table when starting two parallel pumps

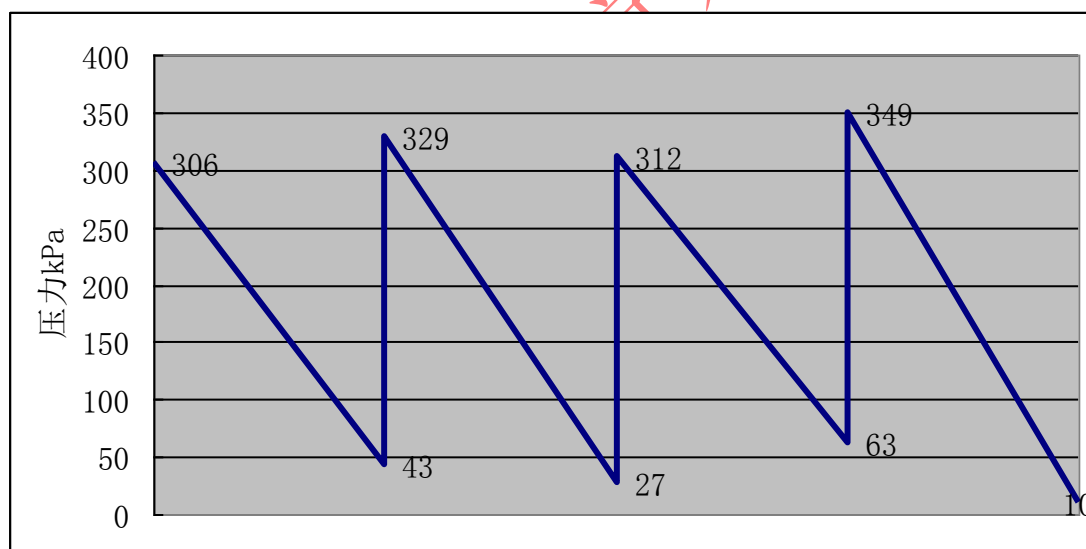


图 3.10 双泵并联运行的水力坡降曲线

Fig 3.10 hydraulic slope figure when starting two parallel pumps

双泵并联运行后, 管线流量是有所增加, 但增量有限, 远不如双泵串联工作的增量明显。并联后, 由于流速增加, 管线沿程摩阻增大, 各站站间摩阻增加, 随之对站内增压的需求增加。本系统清水泵的特性是压力流量曲线比较平缓, 泵在高流量运行的情况下, 需要牺牲更大量的流量来换出口压力的少许增加。所以对于本仿真系统, 串联运行更有效率, 这也是由具体管线差异而定。

3.3 环道动态调节实验

当本装置运行在稳定工况时，可模拟输油管道动态流动。SCADA 系统工作时，一般有如下几种压力流量动态调节方式。

3.3.1 调节阀手动操作

调节出站调节阀的开度是站场中最典型的临时性操作。



图 3.11 调节阀控制

Fig 3.11 controlling of regulating valve

本实验演示调节阀开度变化对进出口压力流量的影响。实验前，关小 4 号站的出口调节阀，降低流量，提高全线进站压力，防止进站压力低于外输泵的汽蚀余量。如表 3.1 所示，初始状态，观察 2 号站的参数，进站压力 127kPa，出站压力 603kPa，流量 4.3m³/h。

表 3.1 出站压力、流量与出站调压阀开度的关系

Table 3.1 the relation between pressure and flowrate and regulating valve in out-station

调节阀开度	出站压力 (kPa)	流量 (m ³ /h)
100%	603	4.3
90%	602	4.3
80%	600	4.3
70%	594	4.3
60%	582	4.3
50%	554	4.3
40%	483	4.3
30%	340	4.1

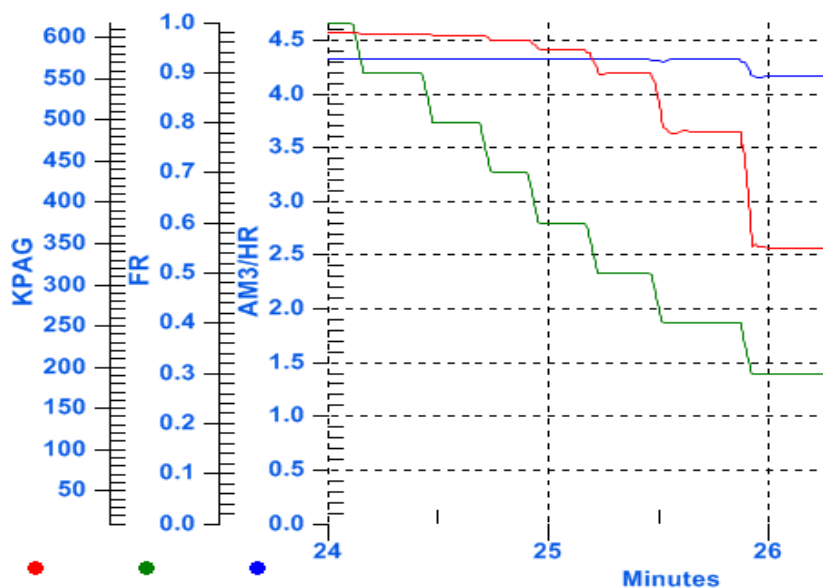


图 3.12 出站压力与流量随调节阀开度的变化曲线

Fig 3.12 the relation curves of pressure/ flowrate and regulating valve in out-station

调节阀的线性度一般很差，特性曲线接近快开阀。调节阀从全开降到 50%，压力流量的变化还很小；而从 50%到 30%对压力流量的影响却很大。长输管道中，调节阀有效工作区的开度为 30%~100%，一般不允许连续调节 70%以上。调节阀不同于截断阀，零开度也不会完全关死。

3.3.2 调节阀自动控制

PID 控制器普遍应用于长输管道的压力调节阀，部分泵站的变频泵也使用 PID 控制器进行出站压力调节。本实验装置的各站出口调节阀都还是压力控制阀（PCV），通过内置与 PLC 的 PID 算法对站出口调压阀实施出口压力控制。

表 3.2 PID 控制对压力流量影响

Table 3.2 influence of PID controlling on pressure and flowrate

压力设定值 kPa	出站压力 kPa	流量 m ³ /h	调节阀开度
500	500	4.61	68%
490	490	4.58	56%
480	480	4.56	50%
470	470	4.54	46%
460	460	4.52	43%
450	450	4.49	41%
440	440	4.47	39%
430	430	4.44	37%
420	420	4.42	36%
410	410	4.39	35%
400	400	4.37	34%

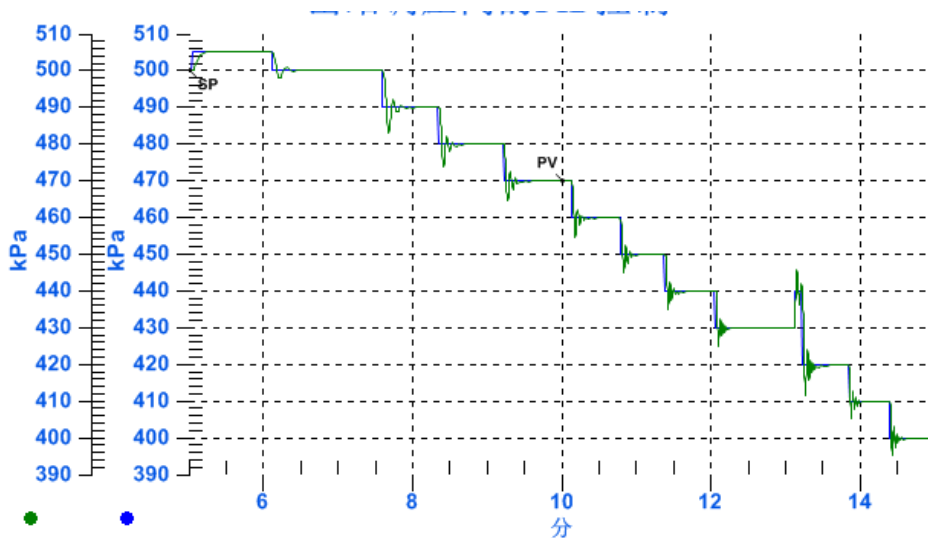


图 3.13 出站调压阀的 PID 控制

Fig 3.13 PID controlling of regulating valve in out-station

在本实验中，由于环道较小，执行器的行程较快，全开到全关只需 25s，滞后很小，故 PID 控制器只执行 PI 作用， $K_p=1.5$ ， $T_i=0.2\text{min}$ 。调节阀全开时的出站压力为 505 kPa，开度较大时阀门开度对压力影响较小，跟手动调节调节阀开度的结果一致。开始稳态误差较大，经过参数调整，调小了 T_i ，增强了积分作用，调节阀调整的结果比较理想。

3.3.3 泵调转速

如今的长输管道，出于节能经济的角度，尽量避免使用调节阀节流，大量使用变速驱动器来驱动泵与压缩机在低于额定转速下的工作，如成品油管道的柴油或汽油变速发动机、输气管道的涡轮增压发动机以及普遍应用于泵或压缩机上的变频电动机。

本装置中，各站 2 号调节阀既可定速工作，又可以变速工作。变速工作通过站控 HMI 面板或中控组态画面设定变频器转速，来改变泵的输出状态。

表 3.3 泵变频调速的影响

Table 3.3 influence of pump variable-frequency adjustable-speed system

转速设定(RPM)	实际转速(RPM)	进站压力(kPa)	出站压力(kPa)	流量(M ³ H)
2750	2720	28	264	3.3
2500	2473	53	241	3.2
2000	1978	95	202	3.1
1500	1483	173	126	3.0

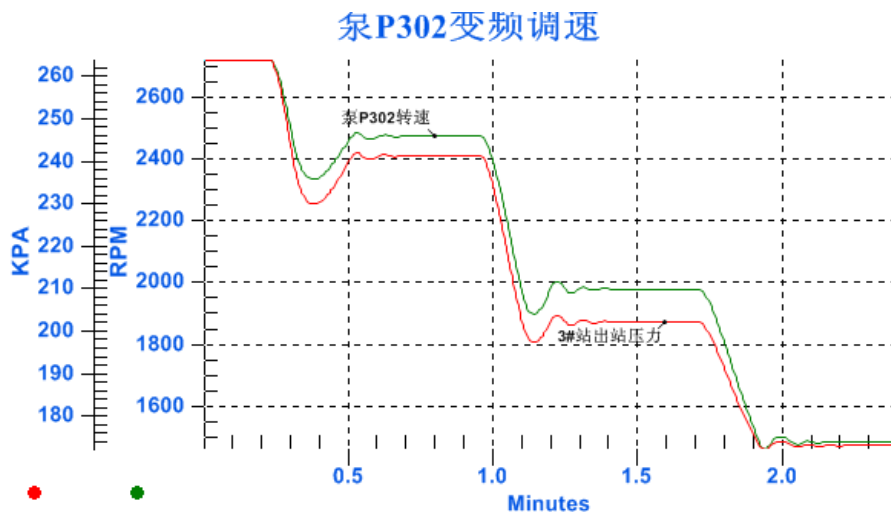


图 3.14 泵转速与出口压力曲线

Fig 3.14 curve of pump speed and outlet pressure

如图 3.14 所示，泵转速的改变对出站压力流量的影响还是很明显的。在很多站场，已普遍采用通过 PID 控制器调节泵转速，从而控制泵站进出口压力和流量。实际工程中，变速驱动不允许工作在额定转速的 50% 以下，转速降到 40% 额定转速时还将触发停泵保护。

3.3.4 压力越站

管线正常运行时，由于某些原因，需要减少中间站，这些被临时停掉的站需要压力越站。压力越站时要注意配合上下游站场的调节阀开度，保证各站压力越站后下游压力不会过低，以免造成下游泵站汽蚀。

以 3 号站压力越站为例，初始状态时各泵站都只开一台定速泵，流量和压力都保持平衡状态。缓慢关小 3 号站出口调压阀，3 号站上游压力上升，下游压力下降。为了保证 4 号站入口压力不过低，4 号站出口调节阀关小开度，节流憋压，使 4 号站入口压力足够高。

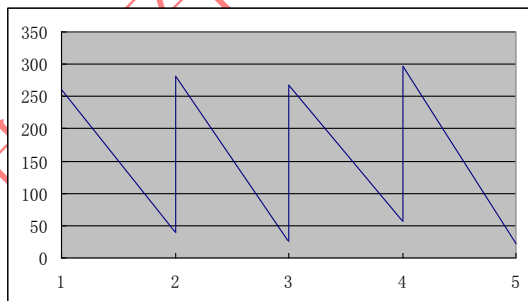


图 3.15 初始状态

Fig 3.15 initial state

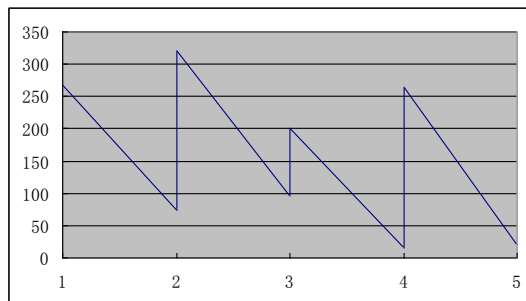


图 3.16 3 号站调压阀节流

Fig 3.16 NO.3 pressure-regulating valve throttling

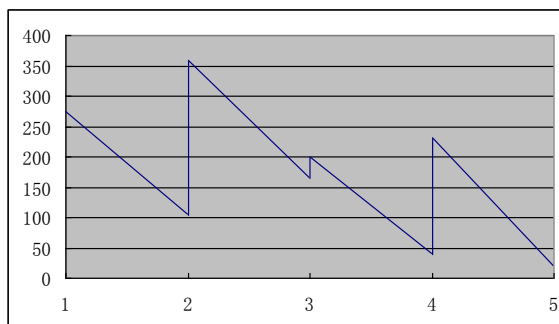


图 3.17 4 号站调压阀节流憋压

Fig 3.17 NO.4 pressure-regulating valve throttling and holding pressure

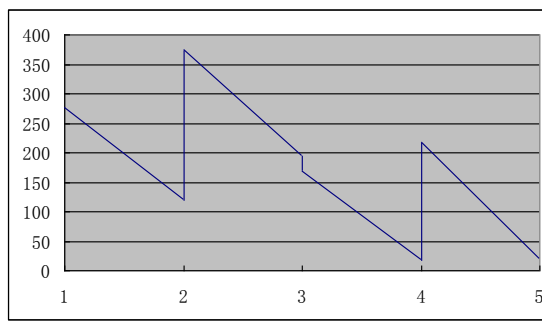


图 3.18 3 号站停泵越站

Fig.3.18 stopping NO.3 pump and non boasting operation

先将 3 号站出口调压阀切换到自动模式，对出口压力实施 PID 控制。然后，3 号站停泵，下游压力小幅下降。由于先前 4 号站的节流憋压，4 号站出口压力在可控的安全水平。没有切到越站之前，3 号站内存在一定摩阻，由水受泵制动造成。

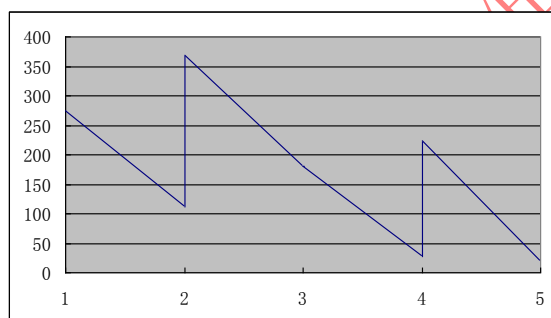


图 3.19 压力越站阀开启

Fig 3.19 non boasting operation and starting vavle

最后，手动开启越站球阀，3 号站进出口压差消失，管道达到平衡状态。整个越站过程，流量逐步下降，从初始的 $3.28\text{m}^3/\text{h}$ 降到 $2.77\text{m}^3/\text{h}$ 。

3.3.5 其它动态调节

该装置的就地控制级、站控级和中控级三层，都可以对 2 个泵和 3 个气动阀的开关启停状态进行控制。通过不同的组合可以如下方式工作：1 号泵单泵运行、2 号泵单泵运行、双泵并联运行、双泵串联运行。

该系统在 PLC 中写有自动切换泵工作流程的指令，通过站控 HMI 面板的自动流程切换窗口或中控的阀室界面控制 2 号泵的启停和转速控制的操作。切换流程本着先开后关的原则，防止憋压。切换时，按顺序以 2 秒间隔逐个切换阀门。

首站出口节流是最常见且易于理解的减小流量方法，操作方式和前面提到的调节阀开度调节类似。首站作为密闭环道的注入点，在满足临界点维持流动的情况下，控制住首站的流量就意味着控制住了全线流量。但还要注意维持各站的入

口压力水平。该系统作为简单的管道系统，其临界点就只是各站的入口压力。

这些调节都可以改变管道的运行工况，可通过观察调节后各站流量和压力的变化趋势来学习实际生产管道内各种操作对管道流动的影响。

3.4 环道异常工况实验

当本装置运行在稳定工况时，可以进行模拟输油管道异常工况的实验。

3.4.1 环道堵塞工况实验

长堵塞工况实验还可通过环道上的 4 个站间阀门来完成。当本装置运行在稳定的工况下时，可以进行模拟输油管道堵塞工况的实验。

4 个阀门是分别位于各模拟站管道中间的阻力阀，减小其开度可模拟管道的堵塞。由于其节流增加了沿程阻力，故也可以模拟更长的管道或更高的高程。管道阻力的增加，全线压力和流量也将相应地发生变化。本实验以 3 号站与 4 号站间阀门为例，演示管道堵塞。

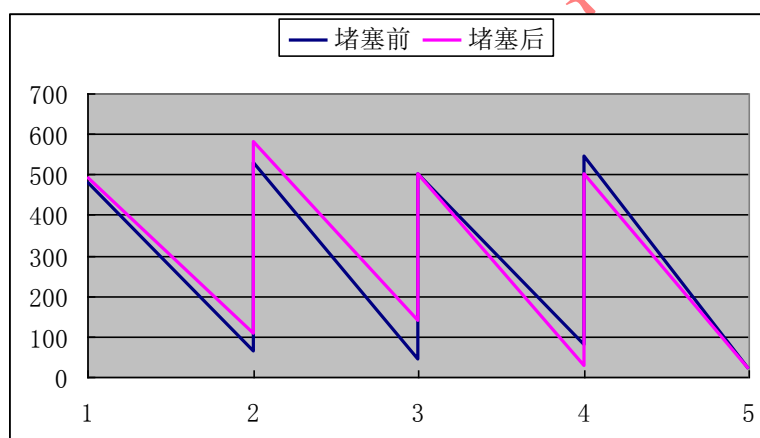


图 3.20 堵塞前后水力坡降线对比

Fig 3.20 contrast of hydraulic gradeline before and after blocking

常见的堵塞是由蜡沉积造成的，一般缓慢发生，因此研究堵塞瞬态意义并不大，只需对比堵塞前后的压力流量变化。如图 3.20 所示，堵塞发生后，堵塞点前平均压力上升，堵塞点后平均压力下降，全线流量从 $4.6\text{m}^3/\text{h}$ 下降到 $4.4\text{m}^3/\text{h}$ ，并保持平衡。堵塞点所在管道由于沿程摩阻的增加，3 号与 4 号站间压差增大，水力坡降线变陡；其它管段由于流量降低，沿程摩阻减小，水力坡降线变平缓。

3.4.2 环道泄漏工况实验

分别位于 1 号站和 2 号站、2 号站和 3 号站以及 3 号站和 4 号站间的 3 个泄漏阀用于进行管道泄漏工况实验。

实验时，通过缓缓打开 2 到 3 号站间泄漏阀，将泄漏流量控制在某一较小和稳定的范围内，观察沿线各站压力、流量的变化情况。

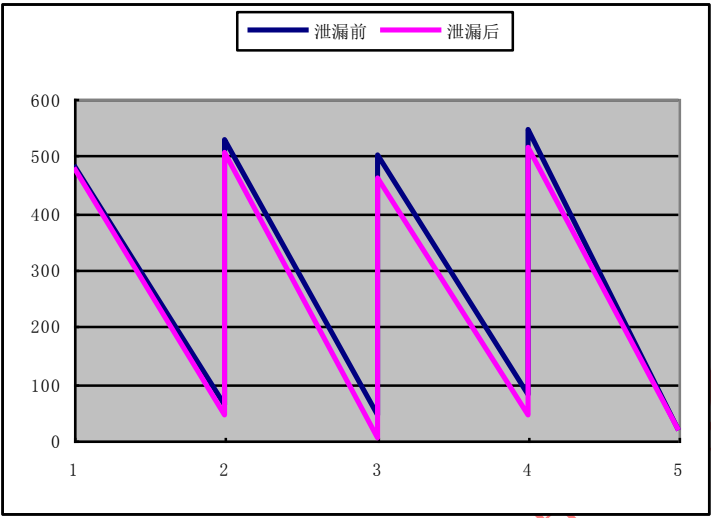


图 3.21 泄漏前后水力坡降线对比

Fig 3.21 the contrast of hydraulic gradeline before and after blocking

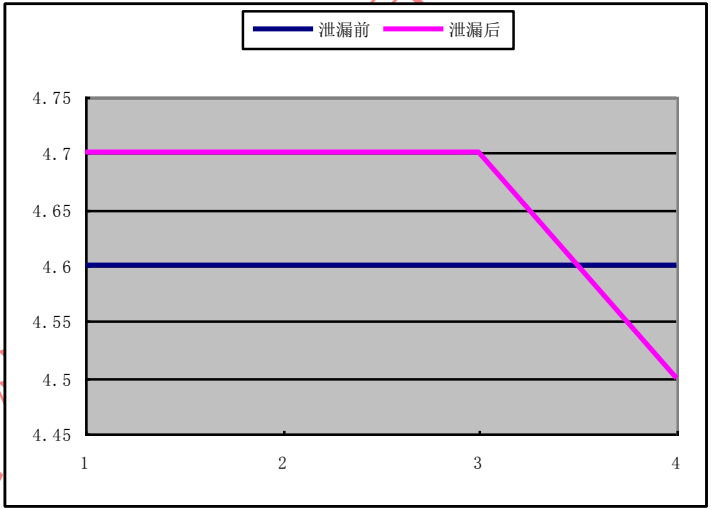


图 3.22 泄漏前后各站流量对比

Fig 3.22 the contrast of flowrate before and after blocking

泄漏发生后，泄漏点上下游压力同时下降，泄漏点上游流量上升，下游流量下降。上游由于流量增加，沿程摩阻的增加，水力坡降线变陡；下游由于流量下降，沿程摩阻降低，水力坡降线变平缓。

3.4.3 其它异常工况

(1) 中间站停泵（电）事故

模拟中间站停泵（电）事故时，可先将本装置运行在多泵站方式下，每各站

可运行 1 台泵，也可运行 2 台泵。模拟时，关闭某中间站的某台泵的电源，此时观察沿线各种参数的变化情况。实验参见 3.2.1 管道启输。

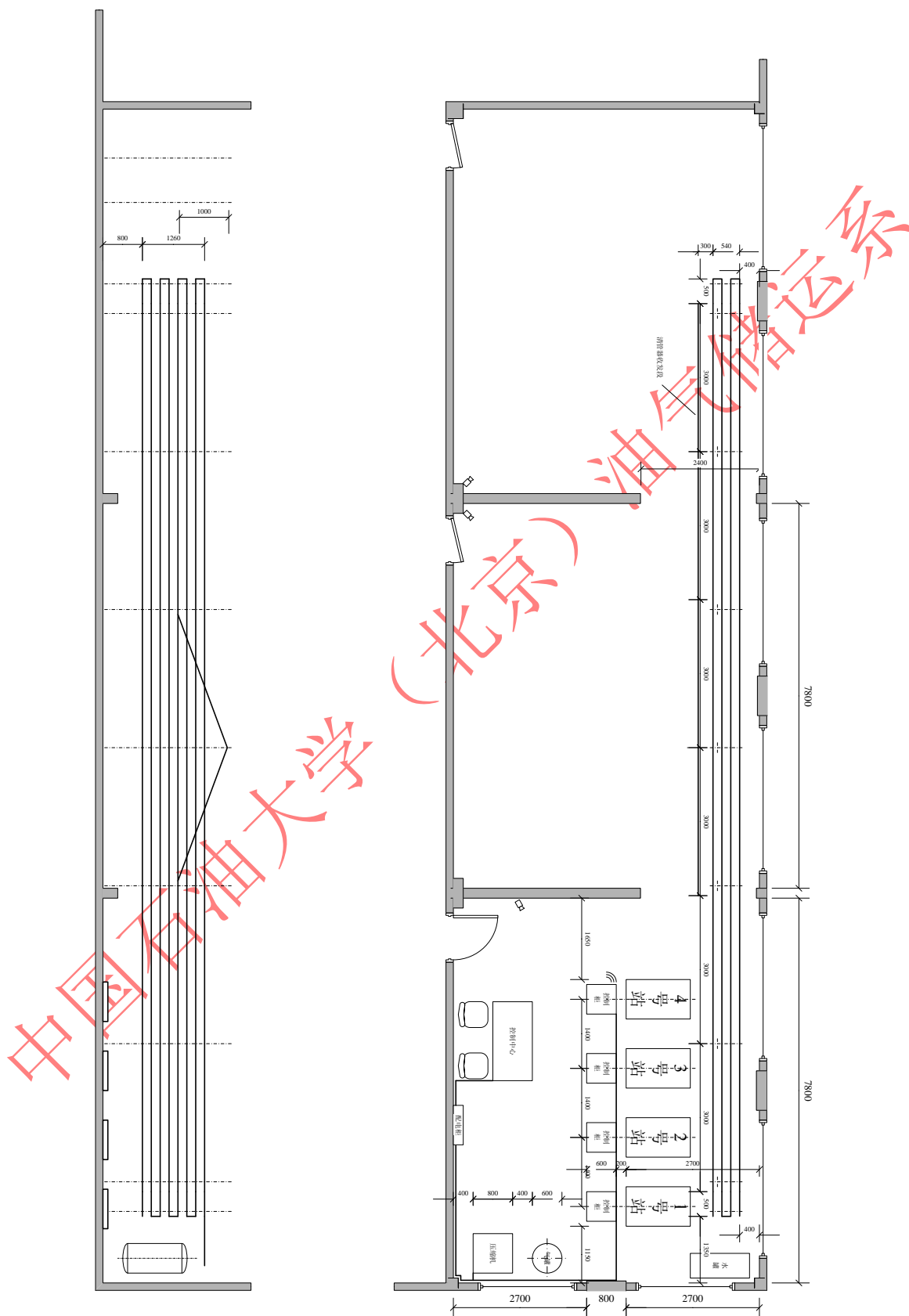
(2) 站内阀误操作

可使用单泵站或多泵站运行，可改变出站调节阀的开度（如减小），或大幅度减小某一已开阀的开度，观察参数变化。不建议完全关闭阀门，以防产生憋压，损坏设备。实验与出站调节阀的操作类似。

中国石油大学（北京）油气储运学院



附录 B 长输管道教学实验环道布置图



中国石油大学(北京) 油气储运系