

# 基于 MODBUS 和 EGD 的双闭环增压 控制系统设计

卢 颀, 岳梦云, 李 茂, 张学英

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为适应当前增压过程控制系统, 特别是低温增压过程控制系统, 对自主性、快速性、可靠性以及安全性等方面日益提高的需求, 利用目前工业控制领域中应用最为普遍的 PLC 控制技术, 并结合 MODBUS 在 TCP/IP 和串行链路上的两种通讯协议以及具有高速、高效传输性能的 EGD 映射技术, 设计了一种具有“双闭环”架构的增压控制系统; 经验证, 该系统不仅可以有效规避网络故障对增压过程的影响, 提升系统的自动控制能力, 同时通过一系列软、硬件方面的可靠性设计, 提升了增压过程的安全性。

**关键词:** MODBUS; EGD; 双闭环; 增压控制

## Design of the Double-loop Pressurization Control System Based on MODBUS and EGD

Lu Di, Yue Mengyun, Li Mao, Zhang Xueying

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** For adapting to the increasing demand on the autonomy, rapidity, reliability and safety of the pressurization control systems, especially for the cryogenic ones, design a double-loop pressurization system based on MODBUS and EGD, by using of the most popular technology in current industrial control field - PLC. MODBUS has two protocols about TCP/IP and serial communication link, while EGD has the advantages of high speed and efficiency. It is proven that the system can not only effectively avoid network fault on the boosting process effect to increase the automatic control ability, but also enhance the safety of the pressurization process by using a series of reliability designs on software and hardware.

**Keywords:** MODBUS; EGD; double-loop; pressurization control

## 0 引言

随着系统复杂程度的日益扩大以及系统所处环境的日益严苛, 增压过程控制系统, 特别是低温增压过程控制系统, 对自主性、快速性、可靠性以及安全性等方面都提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。目前工业过程控制领域中应用最为广泛的当属 PLC 控制技术, 其应用范围覆盖了航空、航天、兵器、船舶等各个军工行业。PLC 设备 (Programmable Logical Controller) 是一大类以微处理器为核心的电子测控设备, 为在工业环境中应用而设计, 具有高可靠性、产品模块化、安装简单、维修方便、应用广泛等特点<sup>[2]</sup>, 而通用电气 (GE) 就是其重要生产厂家之一, 已推出了 9030、Rx7i、Rx3i 等多个系列产品。

MODBUS 协议和 EGD (Ethernet Global Data) 技术分别是 GE PLC 产品所支持的两项重要的核心技术。前者是应用于电子控制器上的一种通用语言, 由 Modicon 于 1979 年提出, 也是世界上第一个真正用于工业现场的总线协议, 支持以太网、RS232/422/485 等多种设备, 具有简单、紧凑、标准、开放等诸多优点; 而后者就是 GE 自行推出的一项以太网传输技术, 其采用非连接式和非应答式的通信模式, 周期性的将某一

设备中指定内存区域的数据映射至网络中其它指定设备中, 具有高速、高效的信号传输优势<sup>[3]</sup>。

基于上述两项技术, 本文设计了一种具有内、外“双闭环”架构的增压控制系统, 以适应当前系统对自主性、快速性、可靠性以及安全性等方面的更高要求。

## 1 系统总体设计

基于 MODBUS 和 EGD 的双闭环增压控制系统总体设计架构如图 1 所示。

由图 1 可知, 压力参数经由三冗余的压力传感器、前端采编/执行组合的回采数据处理单元先后回传至前端 PLC I/O 站和后端 PLC CPU 站; 之后, 前端 PLC I/O 站和后端 PLC CPU 站再依据得到的压力数据和系统工况, 将控制指令自动或手动发往前端采编/执行组合的执行机构驱动单元, 完成增压控制任务。由此就构成了系统的内、外“双闭环”架构。

前端采编/执行组合与前端 PLC I/O 站之间的压力参数传输、后端 PLC CPU 站与后端指控工作站之间的指令/状态交互分别采用了串行链路和 TCP/IP 上的 MODBUS 协议标准。该协议的模式为请求/应答的主、从架构, 并提供了明确的功能码服务, 具有标准、开放以及帧格式简单、紧凑等特点, 应用非常广泛。本文所用的基于 MODBUS 的 TCP/IP 协议和串行链路协议分别为 MODBUS/TCP 协议和 MODBUS/RTU 协议, 前者位于 OSI 模型的第 7 层 (应用层), 而后者位于 OSI

收稿日期: 2015-05-05; 修回日期: 2015-05-26。

作者简介: 卢 颀 (1984-), 男, 河南省郑州市人, 工程师, 主要从事电气系统线路综合设计方向研究。

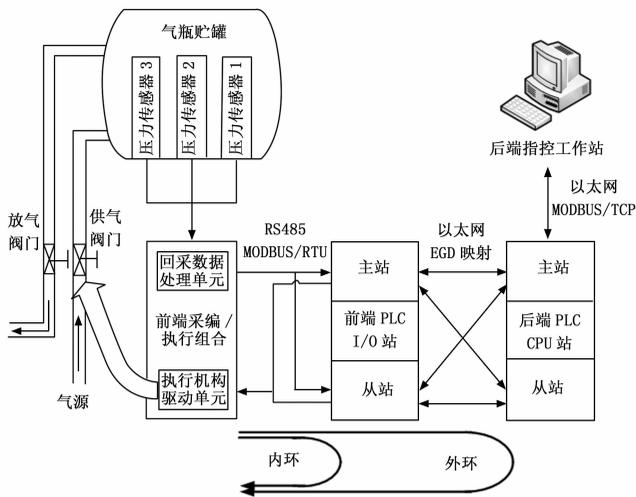


图 1 系统总体架构示意图

模型的第 1 层（物理层）和第 2 层（数据链路层），最常用的物理接口为 RS485 串行接口，这也是本文所采用的接口形式。

另外，前端 PLC I/O 站与后端 PLC CPU 站之间的上、下行状态/数据传输采用了 EGD 映射模式。该传输模式为以太网两端的设备提供了一种周期性的数据传输服务，其每隔一段时间（发送周期的设定范围可以从 2 ms 到 1 h）就会将某一设备上指定内存区域中的数据映射至网络上的其它指定设备中。并且，由于 EGD 映射采用的是基于非连接式的和非应答式的协议，因此其支持高速、高效的网络通信。

## 2 硬件设计

如图 1 所示，在充分考虑可靠性和冗余设计的前提下，基于 MODBUS 和 EGD 的双闭环压力控制系统由如下 6 部分硬件设备组成：管路阀门、压力传感器、前端采编/执行组合、前端 PLC I/O 站、后端 PLC CPU 站以及后端指控工作站。其中，管路阀门、压力传感器以及后端指控工作站均采用通用的市购仪器、仪表和 PC 机，依次用于气路的通断控制、压力测量以及人机交互，本文就不再予以赘述。下面仅对系统另外 3 个核心设备进行论述。

### 2.1 前端采编/执行组合硬件设计

前端采编/执行组合具有双向功能：其一，接收每个测点三路压力传感器（三冗余设计，在每个测点安装 3 个压力传感器，以供系统闭环控制指令的三取二表决使用，提升系统可靠性）回采的压力参数，并将其进行调理、编码后，通过 RS485 串口回传至前端 PLC I/O 站，以供前端闭环控制使用，具体 4 线制连接关系见图 2；其二，通过继电器线包接收前端 PLC I/O 站下发的供气阀门和放气阀门驱动指令，并以有源触点形式（28 VDC）驱动相应阀门动作。因此，前端采编/执行组合既是系统的回采数据处理单元，同时也是系统的执行机构（管路阀门）驱动单元。

前端采编/执行组合的核心组件由基于 FPGA 芯片的回采数据处理模块和一系列继电器板构成。其中，FPGA 芯片选用 Altera 公司的 Cyclone V 系列产品<sup>[4]</sup>，具备低成本、低功耗、大容量和高性能的特点（其与前几代产品相比，总功耗降低了

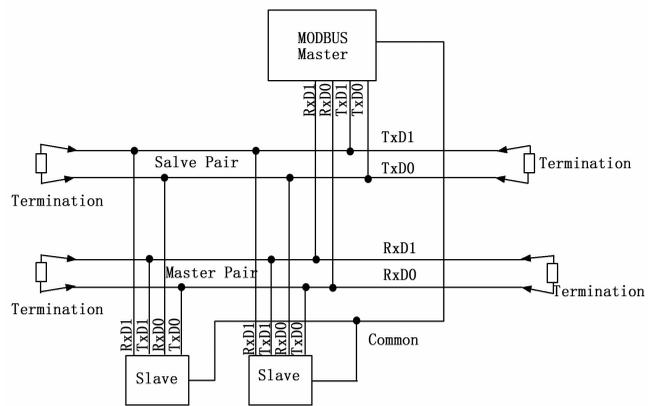


图 2 前端 PLC I/O 站串口线路连接图

40%，静态功耗降低了 30%，实现了业界最低的系统成本和功耗，并且具备高效的逻辑集成功能<sup>[5]</sup>，可以与压力传感器一起实现对压力参数的高速采集、高速处理以及高速转发功能。

### 2.2 前端 PLC I/O 站硬件设计

前端 PLC I/O 站主要具备三方面功能：（1）接收后端 CPU 站的驱动命令，并以无源触点形式，点对点完成对前端采编/执行组合具体通路的开/关控制；（2）以继电器线包形式，实现对前端采编/执行组合反馈动作情况的采集，并回传至后端 CPU 站；（3）接收前端采编/执行组合转发的状态和参数信号，自动响应、执行相应的逻辑程序，实现前端闭环控制功能。

前端 PLC I/O 站采用 GE Rx3i 系列产品，其核心控制模块为 IC695NIU001 模块。该模块资源相对紧张（用户可编程逻辑空间不超过 20 kB，用户数据闪存空间不超过 10 MB），并且通常部署于热、力学条件相对较差的环境中，因此，其上仅安装逻辑简单的点对点式驱动/采集程序和实时性要求比较高的快速调压时序功能程序。

为满足系统对接通可靠性和断开可靠性的双重要求（正常情况下，供气阀门和放气阀门均应优先考虑其接通可靠性；除此之外，为减弱一度故障对系统的影响，还应确保供气阀门在一度故障情况下的断开可靠性），前端 PLC I/O 站采用了串/并联相结合的冗余架构——对供气阀门的控制通路采用串/并联相结合输出模式，对放气阀门的控制通路采用并联输出模式，具体见图 3。

由图 3 可知，并联输出模式能够确保在一度故障下，不因单个开关（K1 或 K2）的闭合不上而影响通道的接通可靠性；而采用串/并联相结合的输出模式可以确保在一度故障下，不因单个开关（K1-1 或 K1-2 或 K2-1 或 K2-2）的粘连而影响通道的断开可靠性，并且，仅当 K1-1 和 K1-2（或 K2-1 和 K2-2）同时出现粘连问题时，才会导致通道断不开的问题，提升了通路抵御二度故障的能力。

### 2.3 后端 PLC CPU 站硬件设计

后端 PLC CPU 站主要具备两方面功能：一方面用于接收后端指控工作站的控制指令，并对网络指令信号进行滤波处理，完成相应的单点手动应急控制功能，最终实现在紧急情况

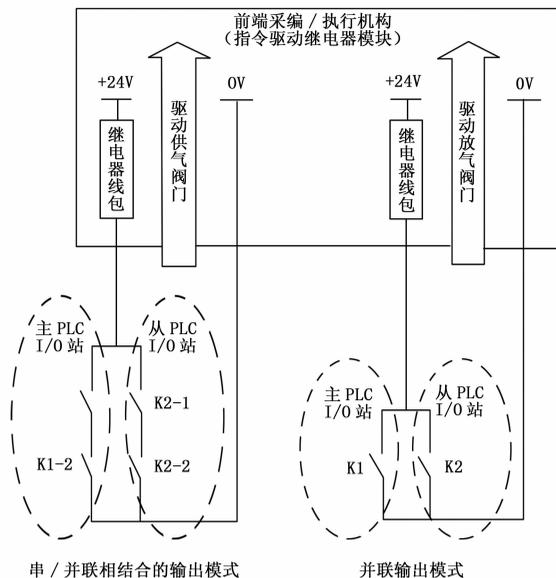


图 3 前端 PLC I/O 站冗余架构图

下对前端自动程序的人工干预，确保系统安全；另一方面用于对后端 PLC CPU 站的运行状态进行实时监测，并将其上传至后端指控工作站，同时据此实施相应的主从自动切换策略。

后端 PLC CPU 站采用 GE Rx7i 系列产品，其核心控制模块为 IC698CRE030 模块。该模块资源丰富（处理器速度不小于 600 MHz，用户可编程逻辑块不少于 512 个，每个可编程逻辑块的最大可用空间不小于 128 kB，用户数据闪存空间不小于 64 MB），并且，自身支持主从冗余同步切换功能，因此，其上安装了系统大部分测控功能模块，特别是安控模块，是系统优先级最高的第一“智能体”。

后端 PLC CPU 站采用主、从同步切换机制：主 CPU 站和从 CPU 站同时接收后端指控工作站的控制指令，但同一时刻只有一个 CPU 站向前端 I/O 站输出驱动命令（默认主 CPU 站输出），当且仅当主 CPU 站出现故障时，切换至从 CPU 站输出，并且主 CPU 站定期向从 CPU 站同步关键变量（同步周期和所需同步的关键变量可配置），从而实现主、从 CPU 站之间的无缝切换，确保系统安全。

### 3 软件设计

#### 3.1 前端压力数据采集编功能设计

前端压力数据采集编程序为 FPGA 软件，运行于前端采编/执行组合中，其主要功能就是将各路 A/D 转换好的压力参数，依据 MODBUS/RTU 协议要求，生成如表 1 所示格式的“写字寄存器 (Write Word Register)”指令帧，再以主节点 (Master) 的身份，将其以 115200bps 的波特率、每隔 20 ms 向各从节点 (Slave，前端 PLC I/O 站) 的相应字寄存器中写入一帧。

表 1 MODBUS/RTU 协议的数据帧格式

从节点地址	功能代码	寄存器数量	字节数	数据域	CRC 校验
1 字节	1 字节	2 字节	1 字节	n 字节	2 字节

上述数据帧中的各项定义如下：

- 1) 从节点地址：前端主 I/O 站为 0x01，从 I/O 站为 0x02；
- 2) 功能代码：0x03，表示写多个寄存器；
- 3) 寄存器数量、字节数和数据域：每个压力数据占用一个字寄存器，占用两个字节，因此，字节数为两倍的字寄存器数量；
- 4) CRC 校验：采用 16 位 CRC 校验方法；

#### 3.2 前端自动闭环控制功能设计

前端自动闭环控制程序安装部署于前端 PLC I/O 站中，其主要功能就是依据回传的三路压力参数，实现对增压过程的可靠、自动和快速控制。为满足上述要求，前端自动闭环控制功能软件设计划分为数据清洗、阈值控制以及三取二表决 3 个子程序。

##### 3.2.1 数据清洗子程序

数据清洗子程序用于对前端采编/执行组合转发的压力参数进行野点（无效数据）剔除和平滑滤波，提高用于闭环控制的数据有效性。其中，野点剔除的判定标准（阈值）依据压力传感器自身的量程范围和被测对象的物理约束而定，并且在每次读取数据时均执行该处理；而平滑滤波仅为一个控制周期内（每隔 20ms 读取一次，每读取 10 次为一个控制周期）执行一次，其基本算法为：对本控制周期内所有有效数据进行“去极值求算术平均值”的计算。

需要说明的是，无论是野点剔除，还是平滑滤波，均存在如下分支情况：

- 1) 当一个控制周期内的数据均为野点时，判定传感器故障，此时强制所有供气阀门为关，确保系统安全；
- 2) 当一个控制周期内的有效数据只有一个时，直接使用该数据进行闭环控制；
- 3) 当一个控制周期内的有效数据仅为两个时，直接取二者的算术平均值进行闭环控制。

##### 3.2.2 阈值控制子程序

阈值控制子程序的控制逻辑如下：

- 1) 当经过数据清洗后的压力低于压力带下限时，打开供气阀门；
- 2) 当经过数据清洗后的压力高于压力带上限时，关闭供气阀门；
- 3) 当经过数据清洗后的压力超过压力报警线，打开放气阀门，此后，放气阀门和供气阀门进行联动控制——当供气阀门打开时，放气阀门关闭；反之亦然，当供气阀门关闭时，放气阀门打开。

##### 3.2.3 三取二表决子程序

对依据三路不同压力传感器数据的阈值控制结果进行三取二表决，从而按照“少数服从多数”的原则，确定前端 PLC I/O 站最终的输出指令。

#### 3.3 后端手动应急干预功能设计

为进一步提高系统的可靠性和安全性，系统在后端 PLC CPU 站中增加了手动应急干预功能，以确保在前端自闭环控制程序失效时，依然可以通过后端的单点操作，控制相应的阀门动作。然而，由于前端 I/O 站和后端 CPU 站之间采用 EGD

映射的传输模式, 后者每隔一个发送周期 (26 ms) 就会向前端分配的相应寄存器地址执行一次地址映射, 并且, 前端自动闭环控制程序和后端手动应急干预程序又驱动的是同一个寄存器地址, 因此, 若不予特殊处置, 则必将导致如下阀门“闪动”现象的出现: 当后端手动应急干预未执行时, 后端相应位寄存器置 0, 若此时前端自动控制程序将该寄存器对应的前端位寄存器置 1, 就会发生“每隔一个扫描周期置位, 每隔一个发送周期又复位”的现象。

为解决上述问题, 后端手动应急控制程序首先在后端 CPU 站和前端 I/O 站之间的 EGD 映射中增加了一个中间变量转换环节, 如图 4 所示。该转换环节使得后端手动应急干预控制在后端 CPU 站的输出寄存器不直接映射至前端 I/O 站的实际物理输出地址寄存器中, 实现了对后端手动应急干预指令的一层隔离。其次, 后端手动应急控制程序借鉴了“中断”的设计思路, 为每一项应急控制均设置了相应的标志位, 以作为切换前、后端输出驱动的控制开关, 如图 4 所示。就像一道“闸”, 当且仅当后端手动应急控制指令确认有效后, 将中间转换变量映射至前端 I/O 站的实际输出寄存器; 反之, 当未收到后端手动应急控制指令时, 依据前端自动闭环控制程序的驱动指令执行。

调用服务请求功能 SVC\_REQ 26, 实现主从切换。

表 2 常见的故障模式列表

故障名称	状态变量	描述
CPU 硬件故障	%SA10	主 CPU 的运行状态为 Stop
电源故障	%SA05	主 CPU 启动失效或掉电
传输总线故障	%SB17	系统背板总线、同步总线、扩展总线、网线连接故障
RAM 故障	%SB10	上电过程中检测到 RAM 故障
软件存储故障	%SC15	PLC 软件在存储过程中意外中断, PLC 接收到了开始存储序列指令, 但是未接收到停止存储指令序列。
I/O 控制器故障	%SA14	NIU 模块故障
I/O 模块故障	%SA23	扩展机架上的 I/O 模块出现故障

## 4 实验结果

经试验验证, 基于 MODBUS 和 EGD 的双闭环增压控制系统具有如下性能:

- 1) 经核算, 单组前端 PLC I/O 站可支持不少于 4 个气瓶贮罐的同步闭环增压控制;
- 2) 经测试, 前端 PLC I/O 站的一个扫描周期约为 11 ms, 对管路阀门的时序控制精度约为 15 ms;
- 3) 结合 20 ms 一帧的压力回传速率和 10 次采样一循环的增压控制周期, 可以计算系统增压控制周期  $T \approx (20 + 11) \times 10 + 15 = 325$  ms。

与此同时, 该系统还利用“内环”效应成功规避了网络传输延迟和不确定性所带来的负面影响, 增强了系统抵御网络故障能力, 并利用“外环”效应有效保障了系统过程控制的安全性和可靠性, 消除了由 EGD 所引发的“闪动”问题。此外, 该系统还结合多种冗余设计方法 (三冗余、串并联以及同步切换) 进一步提升了系统对过程控制的准确性和可靠性。

## 5 结论

本文设计了一种基于 MODBUS 和 EGD 的双闭环增压控制系统。该系统利用内、外“双环”优势, 在实现了前端自动闭环控制的同时, 确保了系统的安全性和可靠性, 能够满足增压过程控制系统对自主性、快速性、可靠性以及安全性等日益迫切的需求, 具有优良性能。

### 参考文献:

- [1] 吕卫阳. PLC 技术综述 [J]. 自动化博览, 2008 (S1): 16-25.
- [2] 彭 越, 等. 冗余可编程逻辑控制器测控系统传输性能研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2013, 4: 1264-1280.
- [3] GFK-2308E. PACSystems hot standby CPU redundancy [S]. GE, 2011.
- [4] GFK-2224F. TCP/IP Ethernet Communications for PACSystems [S]. GE, 2011.
- [5] GFK-2222K. PACSystems CPU Reference Manual [S]. GE, 2011.

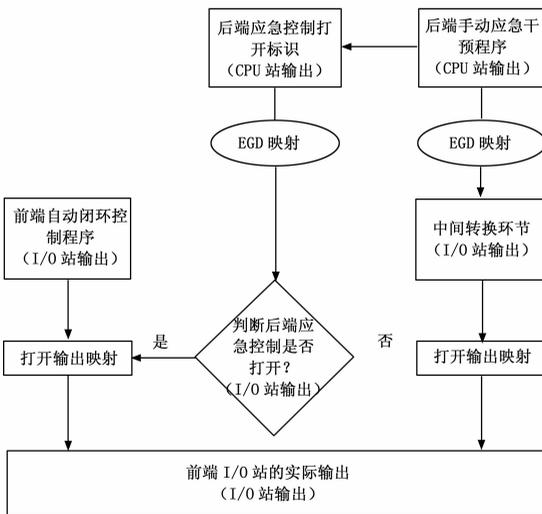


图 4 后端手动应急干预控制流程图

### 3.4 故障监测及主从切换功能设计

后端 PLC CPU 站采用主从冗余同步切换架构设计, 其核心就在于对内部各个模块运行状态的监测, 并据此判断是否实施主从切换。

后端 PLC CPU 站的主要模块有: CPU 模块、以太网模块、电源模块、同步模块以及背板机架。上述所有模块的运行状态都由 CPU 模块进行管理, 其内存地址中设置了固定数量的系统状态变量 (%S、%SA、%SB、%SC), 并对每一模块的常见故障模式分配了特定的系统状态变量, 一旦此故障发生, 该系统变量即被置 1。常见的故障模式见表 2。

通过对上述系统状态变量进行在线监测, 即可快速定位故障, 并在系统出现故障后, 通过调用服务请求功能 SVC\_REQ 20 对故障列表进行查询, 也可以根据故障的严重程度,