

## 摘要

本论文根据中国城市小区的供水要求，设计了一套基于 PLC 的变频调速恒压供水系统，并利用组态软件开发良好的运行管理界面。变频恒压供水系统由可编程控制器、变频器、水泵机组、压力传感器、工控机等构成。

本系统包含三台水泵电机，它们组成变频循环运行方式。采用变频器实现对三相水泵电机的软启动和变频调速，运行切换采用“先启先停”的原则。压力传感器检测当前水压信号，送入 PLC 与设定值比较后进行 PID 运算，从而控制变频器的输出电压和频率，进而改变水泵电机的转速来改变供水量，最终保持管网压力稳定在设定值附近。通过工控机与 PLC 的连接，采用组态软件完成系统监控，实现了运行状态动态显示及数据、报警的查询。

**关键词：**变频调速，恒压供水，PLC，组态软件

## ABSTRACT

According to the requirement of China's urban water supply, this paper designs a set of water supply system of frequency control of constant voltage based on PLC, and have developed good operation management interface using Supervision Control and Data Acquisition. The system is made up of PLC, transducer, units of pumps, pressure sensor and control machine and so on.

This system is formed by three pump generators, and they form the circulating run mode of frequency conversion. With general frequency converter realize for three phase pump generator soft start with frequency control, operation switch adopts the principle of "start first stop first". The detection signal of pressure sensor of hydraulic pressure, via PLC with set value by carry out PID comparison operation, so, control frequency and the export voltage of frequency converter, and then the rotational speed that changes pump generator come to change water supply quantity, eventually, it is nearby to maintain pipe net pressure to stabilize when set value. Through work control machine the connection with PLC, with group form software consummately systematic monitoring, have realized operation state development to show and data, report to the police inquiry.

**Keywords:** variable frequency speed-regulating, constant-pressure water supply, PLC, supervision control and data acquisition.

# 目录

1 绪论.....	1
1.1 课题的提出.....	1
1.2 变频恒压供水系统的国内外研究现状.....	3
1.3 PLC 概述.....	5
1.4 本课题的主要研究内容.....	7
2 系统的理论分析及控制方案确定.....	8
2.1 变频恒压供水系统的理论分析.....	8
2.2 变频恒压供水系统控制方案的确定.....	11
3 系统的硬件设计.....	19
3.1 系统主要设备的选型.....	19
3.2 系统主电路分析及其设计.....	23
3.3 系统控制电路分析及其设计.....	25
3.4 PLC 的 I/O 端口分配及外围接线图.....	27
4 系统的软件设计.....	31
4.1 系统软件设计分析.....	31
4.2 PLC 程序设计.....	33
4.3 PID 控制器参数整定.....	40
5 监控系统的设计.....	46
5.1 组态软件简介.....	46
5.2 监控系统的设计.....	46
6 结束语.....	51

---

参考文献.....	53
致谢.....	55
附录.....	56
附录 A 英文文献.....	56
附录 B 中文翻译.....	65
附录 C 主程序梯形图.....	71

# 1 绪论

## 1.1 课题的提出

水和电是人类生活、生产中不可缺少的重要物质，在节水节能已成为时代特征的现实条件下，我们这个水资源和电能源短缺的国家，长期以来在市政供水、高层建筑供水、工业生产循环供水等方面技术一直比较落后，自动化程度较低，而随着我国社会经济的发展，人们生活水平的不断提高，以及住房制度改革不断深入，城市中各类小区建设发展十分迅速，同时也对小区的基础设施建设提出了更高的要求。小区供水系统的建设是其中的一个重要方面，供水的可靠性、稳定性、经济性直接影响到小区住户的正常工作和生活，也直接体现了小区物业管理水平的高低。

传统的小区供水方式有：恒速泵加压供水、气压罐供水、水塔高位水箱供水、液力耦合器和电池滑差离合器调速的供水方式、单片机变频调速供水系统等方式，其优、缺点如下<sup>[1]</sup>：

(1) 恒速泵加压供水方式无法对供水管网的压力做出及时的反应，水泵的增减都依赖人工进行手工操作，自动化程度低，而且为保证供水，机组常处于满负荷运行，不但效率低、耗电量大，而且在用水量较少时，管网长期处于超压运行状态，爆损现象严重，电机硬起动易产生水锤效应，破坏性大，目前较少采用。

(2) 气压罐供水具有体积小、技术简单、不受高度限制等特点，但此方式调节量小、水泵电机为硬起动且起动频繁，对电器设备要求较高、系统维护工作量大，而且为减少水泵起动次数，停泵压力往往比较高，致使水泵在低效段工作，而出水压力无谓的增高，也使浪费加大，从而限制了其发展。

(3) 水塔高位水箱供水具有控制方式简单、运行经济合理、短时间维修

或停电可不停水等优点，但存在基建投资大，占地面积大，维护不方便，水泵电机为硬起动，启动电流大等缺点，频繁起动易损坏联轴器，目前主要应用于高层建筑。

(4) 液力耦合器和液力滑差离合器调速的供水方式易漏油，发热需冷却，效率低，改造麻烦，只能是一对一驱动，需经常检修；优点是价格低廉，结构简单明了，维修方便。

(5) 单片机变频调速供水系统也能做到变频调速，自动化程度要优于上面 4 种供水方式，但是系统开发周期比较长，对操作员的素质要求比较高，可靠性比较低，维修不方便，且不适用于恶劣的工业环境。

综上所述，传统的供水方式普遍不同程度的存在浪费水力、电力资源；效率低；可靠性差；自动化程度不高等缺点，严重影响了居民的用水和工业系统中的用水。目前的供水方式朝向高效节能、自动可靠的方向发展，变频调速技术以其显著的节能效果和稳定可靠的控制方式，在风机、水泵、空气压缩机、制冷压缩机等高能耗设备上广泛应用，特别是在城乡工业用水的各级加压系统，居民生活用水的恒压供水系统中，变频调速水泵节能效果尤为突出，其优越性表现在：一是节能显著；二是在开、停机时能减小电流对电网的冲击以及供水水压对管网系统的冲击；三是能减小水泵、电机自身的机械冲击损耗<sup>[2]</sup>。

基于 PLC 和变频技术的恒压供水系统集成变频技术、电气技术、现代控制技术于一体。采用该系统进行供水可以提高供水系统的稳定性和可靠性，同时系统具有良好的节能性，这在能源日益紧缺的今天尤为重要，所以研究设计该系统，对于提高企业效率以及人民的生活水平、降低能耗等方面具有重要的现实意义。

## 1.2 变频恒压供水系统的国内外研究现状

### 1.2.1 变频调速技术的国内外发展与现状

变频器的快速发展得益于电力电子技术、计算机技术和自动控制技术及电机控制理论的发展。1964年,最先提出把通信技术中的脉宽调制 PWM 技术应用到交流传动中的是德国人。20世纪80年代初,日本学者提出了基于磁通轨迹的磁通轨迹控制方法。从20世纪80年代后半期开始,美、日、德、英等发达国家的基于VVVF技术的通用变频器已商品化并广泛应用。在我国,60%的发电量是通过电动机消耗掉的,因此如何利用电机调速技术进行电机运行方式的改造以节约电能,一直受到国家和业界人士的重视。现在,我国约有200家左右的公司、工厂和研究所从事变频调速技术的工作,但自行开发生产的变频调速产品和国际市场上的同类产品相比,还有比较大的技术差距。随着改革开放和经济的高速发展,我国采取要么直接从发达国家进口现成的变频调速设备,要么内外结合,即在自行设计制造的成套装置中采用外国进口或合资企业的先进变频调速设备,然后自己开发应用软件的办法,很好地为国内重大工程项目提供了电气传动控制系统的解决办法,适应了社会的需要。总之,虽然国内变频调速技术取得了较好的成绩,但是总体上来说国内自行开发、生产相关设备的能力还比较弱,对国外公司的依赖还很严重。

### 1.2.2 变频恒压供水系统的国内外研究与现状

变频恒压供水是在变频调速技术的发展之后逐渐发展起来的。在早期,由于国外生产的变频器的功能主要限定在频率控制、升降速控制、正反转控制、起动控制以及制动控制、压频比控制以及各种保护功能。应用在变频恒压供水系统中,变频器仅作为执行机构,为了满足供水量大小需求不

同时, 保证管网压力恒定, 需在变频器外部提供压力控制器和压力传感器, 对压力进行闭环控制。随着变频技术的发展和变频恒压供水系统的稳定性、可靠性以及自动化程度高等方面的优点以及显著的节能效果被大家发现和认可后, 国外许多生产变频器的厂家开始重视并推出具有恒压供水功能的变频器, 像日本 Samco 公司, 就推出了恒压供水基板, 备有“变频泵固定方式”、“变频泵循环方式”两种模式它将 PID 调节器和 PLC 可编程控制器等硬件集成在变频器控制基板上, 通过设置指令代码实现 PLC 和 PID 等电控系统的功能, 只要搭载配套的恒压供水单元, 便可直接控制多个内置的电磁接触器工作, 可构成最多 7 台电机(泵)的供水系统。这类设备虽微化了电路结构, 降低了设备成本, 但其输出接口的扩展功能缺乏灵活性, 系统的动态性能和稳定性不高, 与别的监控系统(如 BA 系统)和组态软件难以实现数据通信, 并且限制了带负载的容量, 因此在实际使用时其范围将会受到限制<sup>[3]</sup>。目前国内有不少公司在做变频恒压供水的工程, 大多采用国外的变频器控制水泵的转速, 水管管网压力的闭环调节及多台水泵的循环控制, 有的采用可编程控制器(PLC)及相应的软件予以实现; 有的采用单片机及相应的软件予以实现。但在系统的动态性能、稳定性能、抗扰性能以及开放性等多方面的综合技术指标来说, 还远远没能达到所有用户的要求。原深圳华为电气公司和成都希望集团也推出了恒压供水专用变频器(5.5kw~22kw), 无需外接 PLC 和 PID 调节器, 可完成最多 4 台水泵的循环切换、定时起、停和定时循环。该变频器将压力闭环调节与循环逻辑控制功能集成在变频器内部实现, 但其输出接口限制了带负载容量, 同时操作不方便且不具有数据通信功能, 因此只适用于小容量, 控制要求不高的供水场所。可以看出, 目前在国内外变频调速恒压供水控制系统的研究设计中, 对于能适应不同的用水场合, 结合现代控制技术、网络和通讯技术同时兼顾系统的电磁兼容性(EMC)的变频恒压供水系统的水压闭环控制研究

得不够。因此，有待于进一步研究改善变频恒压供水系统的性能，使其能被更好的应用于生活、生产实践<sup>[4]</sup>。

## 1.3 PLC 概述

### 1.3.1 可编程控制器的定义

可编程控制器，简称 PLC (Programmable logic Controller)，是指以计算机技术为基础的新型工业控制装置。在 1987 年国际电工委员会 (International Electrical Committee) 颁布的 PLC 标准草案中对 PLC 做了如下定义：“PLC 是一种专门为在工业环境下应用而设计的数字运算操作的电子装置。它采用可以编制程序的存储器，用来在其内部存储执行逻辑运算、顺序运算、计时、计数和算术运算等操作的指令，并能通过数字式或模拟式的输入和输出控制各种类型的机械或生产过程。PLC 及其有关的外围设备都应该按易于与工业控制系统形成一个整体，易于扩展其功能的原則而设计。”

### 1.3.2 PLC 的发展和应用

世界上公认的第一台 PLC 是 1969 年美国数字设备公司 (DEC) 研制的。限于当时的元器件条件及计算机发展水平，早期的 PLC 主要由分立组件和中小规模集成电路组成，可以完成简单的逻辑控制及定时、计数功能。20 世纪 70 年代初出现了微处理器。人们很快将其引入可编程控制器，使 PLC 增加了运算、数据传送及处理等功能，完成了真正具有计算机特征的工业控制装置。为了方便熟悉继电器、接触器系统的工程技术人员使用，可编程控制器采用和继电器电路图类似的梯形图作为主要编程语言<sup>[5]</sup>，并将参加运算及处理的计算机存储组件都以继电器命名。此时的 PLC 为微机技术

和继电器常规控制概念相结合的产物。20 世纪 70 年代中末期，可编程控制器进入实用化发展阶段，计算机技术已全面引入可编程控制器中，使其功能发生了飞跃。更高的运算速度、超小型体积、更可靠的工业抗干扰设计、模拟量运算、PID 功能及极高的性价比奠定了它在现代工业中的地位。20 世纪 80 年代初，可编程控制器在先进工业国家中已获得广泛应用。这个时期可编程控制器发展的特点是大规模、高速度、高性能、产品系列化。这个阶段的另一个特点是世界上生产可编程控制器的国家日益增多，产量日益上升。这标志着可编程控制器已步入成熟阶段。20 世纪末期，可编程控制器的发展特点是更加适应于现代工业的需要。从控制规模上来说，这个时期发展了大型机和超小型机；从控制能力上来说，诞生了各种各样的特殊功能单元，用于压力、温度、转速、位移等各式各样的控制场合；从产品的配套能力来说，生产了各种人机界面单元、通信单元，使应用可编程控制器的工业控制设备的配套更加容易。目前，PLC 在国内外已广泛应用于钢铁、石油、化工、电力、建材、机械制造、轻纺、交通运输、及文化娱乐等各个行业，被称为现代技术的三大支柱之一。

### 1.3.3 西门子 S7-200PLC 简介

西门子公司具有品种非常丰富的 PLC 产品。S7 系列是传统意义的 PLC，S7-200 属于小型 PLC，在 1998 年升级为第二代产品，2004 年升级为第三代产品，其特点如下<sup>[6]</sup>：

- (1) 功能强大。S7-200 有 5 种 CPU 模块，最多可扩展 7 个扩展模块，扩展到 248 点数字量 I/O 或 38 路模拟量 I/O，最多有 30 多 KB 的程序存储空间和数据存储空间；
- (2) 先进的程序结构，功能强大、使用方便的编程软件；
- (3) 灵活方便的寻址方法；

- (4) 强大的通信功能和品种丰富的配套人机界面；
- (5) 有竞争力的价格；
- (6) 完善的网上技术支持等。

## 1.4 本课题的主要研究内容

本设计是以小区供水系统为控制对象，采用 PLC 和变频技术相结合技术，设计一套城市小区恒压供水系统，并引用计算机对供水系统进行远程监控和管理保证整个系统运行可靠，安全节能，获得最佳的运行工况。

PLC 控制变频恒压供水系统主要有变频器、可编程控制器、压力变送器和现场的水泵机组一起组成一个完整的闭环调节系统，本设计中有 3 个贮水池，3 台水泵，采用部分流量调节方法，即 3 台水泵中只有 1 台水泵在变频器控制下作变速运行，其余水泵做恒速运行。PLC 根据管网压力自动控制各个水泵之间切换，并根据压力检测值和给定值之间偏差进行 PID 运算，输出给变频器控制其输出频率，调节流量，使供水管网压力恒定。各水泵切换遵循先起先停、先停先起原则。

根据以上控制要求，进行系统总体控制方案设计。硬件设备选型、PLC 选型，估算所需 I/O 点数，进行 I/O 模块选型，绘制系统硬件连接图：包括系统硬件配置图、I/O 连接图，分配 I/O 点数，列出 I/O 分配表，熟练使用相关软件，设计梯形图控制程序，对程序进行调试和修改并设计监控系统。

## 2 系统的理论分析及控制方案确定

### 2.1 变频恒压供水系统的理论分析

#### 2.1.1 电动机的调速原理

水泵电机多采用三相异步电动机，而其转速公式为：

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (2.1)$$

式中： $f$  表示电源频率， $p$  表示电动机极对数， $s$  表示转差率。

从上式可知，三相异步电动机的调速方法有：

- (1) 改变电源频率
- (2) 改变电机极对数
- (3) 改变转差率

改变电机极对数调速的调控方式控制简单，投资省，节能效果显著，效率高，但需要专门的变极电机，是有级调速，而且级差比较大，即变速时转速变化较大，转矩也变化大，因此只适用于特定转速的生产机器。改变转差率调速为了保证其较大的调速范围一般采用串级调速的方式，其最大优点是它可以回收转差功率，节能效果好，且调速性能也好，但由于线路过于复杂，增加了中间环节的电能损耗<sup>[7]</sup>，且成本高而影响它的推广价值。下面重点分析改变电源频率调速的方法及特点。

根据公式可知，当转差率变化不大时，异步电动机的转速  $n$  基本上与电源频率  $f$  成正比。连续调节电源频率，就可以平滑地改变电动机的转速。但是，单一地调节电源频率，将导致电机运行性能恶化。随着电力电子技术的发展，已出现了各种性能良好、工作可靠的变频调速电源装置，它们促进了变频调速的广泛应用。

### 2.1.2 变频恒压供水系统的节能原理

供水系统的扬程特性是以供水系统管路中的阀门开度不变为前提，表明水泵在某一转速下扬程  $H$  与流量  $Q$  之间的关系曲线，如图 2.1 所示。由于在阀门开度和水泵转速都不变的情况下，流量的大小主要取决于用户的用水情况，因此，扬程特性所反映的是扬程  $H$  与用水流量  $Q_u$  间的关系  $H=f(Q_u)$ 。而管阻特性是以水泵的转速不变为前提，表明阀门在某一开度下扬程  $H$  与流量  $Q$  之间的关系曲线，如图 2.1 所示。管阻特性反映了水泵的能量用来克服泵系统的水位及压力差、液体在管道中流动阻力的变化规律。由于阀门开度的改变，实际上是改变了在某一扬程下，供水系统向用户的供水能力。因此，管阻特性所反映的是扬程与供水流量  $Q_c$  之间的关系  $H=f(Q_c)$ 。扬程特性曲线和管阻特性曲线的交点，称为供水系统的工作点，如图 2.1 中 A 点。在这一点，用户的用水流量  $Q_u$  和供水系统的供水流量  $Q_c$  处于平衡状态，供水系统既满足了扬程特性，也符合了管阻特性，系统稳定运行。

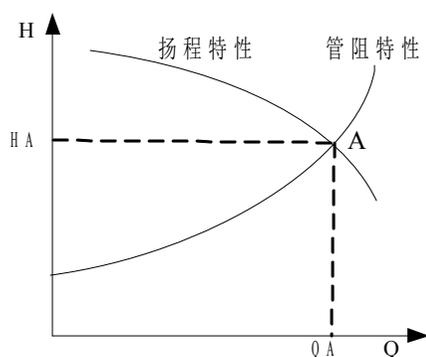


图 2.1 恒压供水系统的基本特征

变频恒压供水系统的供水部分主要由水泵、电动机、管道和阀门等构成。通常由异步电动机驱动水泵旋转来供水，并且把电机和水泵做成一体，通过变频器调节异步电机的转速，从而改变水泵的出水流量而实现恒压供

水的。因此，供水系统变频的实质是异步电动机的变频调速。异步电动机的变频调速是通过改变定子供电频率来改变同步转速而实现调速的。

在供水系统中，通常以流量为控制目的，常用的控制方法为阀门控制法和转速控制法。阀门控制法是通过调节阀门开度来调节流量，水泵电机转速保持不变。其实质是通过改变水路中的阻力大小来改变流量，因此，管阻将随阀门开度的改变而改变，但扬程特性不变。由于实际用水中，需水量是变化的，若阀门开度在一段时间内保持不变，必然要造成超压或欠压现象的出现。转速控制法是通过改变水泵电机的转速来调节流量，而阀门开度保持不变，是通过改变水的动能改变流量。因此，扬程特性将随水泵转速的改变而改变，但管阻特性不变。变频调速供水方式属于转速控制。其工作原理是根据用户用水量的变化自动地调整水泵电机的转速，使管网压力始终保持恒定，当用水量增大时电机加速，用水量减小时电机减速。

由流体力学可知，水泵给管网供水时，水泵的输出功率  $P$  与管网的水压  $H$  及出水流量  $Q$  的乘积成正比；水泵的转速  $n$  与出水流量  $Q$  成正比；管网的水压  $H$  与出水流量  $Q$  的平方成正比。由上述关系有，水泵的输出功率  $P$  与转速  $n$  三次方成正比，即：

$$P = k_1 H Q \quad (2.2)$$

$$n = k_2 Q \quad (2.3)$$

$$H = k_3 Q^2 \quad (2.4)$$

$$P = k n^3 \quad (2.5)$$

式中  $k$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  为比例常数。

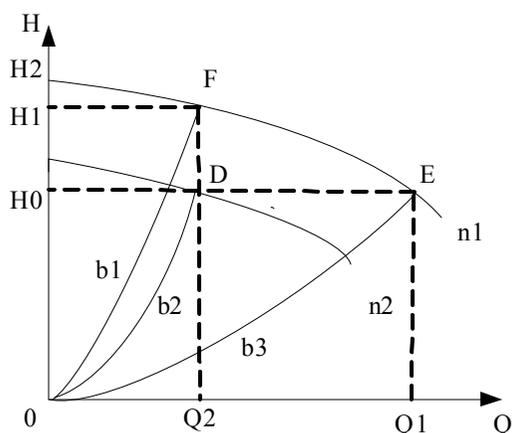


图 2.2 管网及水泵的运行特性曲线

当用阀门控制时，若供水量高峰水泵工作在 E 点，流量为  $Q_1$ ，扬程为  $H_0$ ，当供水量从  $Q_1$  减小到  $Q_2$  时，必须关小阀门，这时阀门的摩擦阻力变大，阻力曲线从  $b_3$  移到  $b_1$ ，扬程特性曲线不变。而扬程则从  $H_0$  上升到  $H_1$ ，运行工况点从 E 点移到 F 点，此时水泵的输出功率正比于  $H_1 \times Q_2$ 。当用调速控制时，若采用恒压( $H_0$ )，变速泵( $n_2$ )供水，管阻特性曲线为  $b_2$ ，扬程特性变为曲线  $n_2$ ，工作点从 E 点移到 D 点。此时水泵输出功率正比于  $H_0 \times Q_2$ ，由于  $H_1 > H_0$ ，所以当用阀门控制流量时，有正比于  $(H_1 - H_0) \times Q_2$  的功率被浪费掉，并且随着阀门的不断关小，阀门的摩擦阻力不断变大，管阻特性曲线上移，运行工况点也随之上移，于是  $H_1$  增大，而被浪费的功率要随之增加。所以调速控制方式要比阀门控制方式供水功率要小得多，节能效果显著。

## 2.2 变频恒压供水系统控制方案的确定

### 2.2.1 控制方案的比较和确定

恒压变频供水系统主要有压力变送器、变频器、恒压控制单元、水泵

机组以及低压电器组成。系统主要的任务是利用恒压控制单元使变频器控制一台水泵或循环控制多台水泵，实现管网水压的恒定和水泵电机的软启动以及变频水泵与工频水泵的切换，同时还要能对运行数据进行传输和监控。根据系统的设计任务要求，有以下几种方案可供选择<sup>[8]</sup>：

(1) 有供水基板的变频器+水泵机组+压力传感器

这种控制系统结构简单，它将 PID 调节器和 PLC 可编程控制器等硬件集成在变频器供水基板上，通过设置指令代码实现 PLC 和 PID 等电控系统的功能。它虽然微化了电路结构，降低了设备成本，但在压力设定和压力反馈值的显示方面比较麻烦，无法自动实现不同时段的不同恒压要求，在调试时，PID 调节参数寻优困难，调节范围小，系统的稳态、动态性能不易保证。其输出接口的扩展功能缺乏灵活性，数据通信困难，并且限制了带负载的容量，因此仅适用于要求不高的小容量场合。

(2) 通用变频器+单片机(包括变频控制、调节器控制)+人机界面+压力传感器

这种方式控制精度高、控制算法灵活、参数调整方便，具有较高的性价比，但开发周期长，程序一旦固化，修改较为麻烦，因此现场调试的灵活性差，同时变频器在运行时，将产生干扰，变频器的功率越大，产生的干扰越大，所以必须采取相应的抗干扰措施来保证系统的可靠性。该系统适用于某一特定领域的小容量的变频恒压供水中。

(3) 通用变频器+PLC(包括变频控制、调节器控制)+人机界面+压力传感器

这种控制方式灵活方便。具有良好的通信接口，可以方便地与其他系统进行数据交换，通用性强；由于 PLC 产品的系列化和模块化，用户可灵活组成各种规模和要求不同控制系统。在硬件设计上，只需确定 PLC 的硬件配置和 I/O 的外部接线，当控制要求发生改变时，可以方便地通过 PC 机来改变存储器中的控制程序，所以现场调试方便。同时由于 PLC 的抗干

扰能力强、可靠性高，因此系统的可靠性大大提高。该系统能适用于各类不同要求的恒压供水场合，并且与供水机组的容量大小无关。

通过对以上这几种方案的比较和分析，可以看出第三种控制方案更适用于本系统。这种控制方案既有扩展功能灵活方便、便于数据传输的优点，又能达到系统稳定性及控制精度的要求。

### 2.2.2 变频恒压供水系统的组成及原理图

PLC 控制变频恒压供水系统主要有变频器、可编程控制器、压力变送器和现场的水泵机组一起组成一个完整的闭环调节系统，该系统的控制流程图如图 2.3 所示：

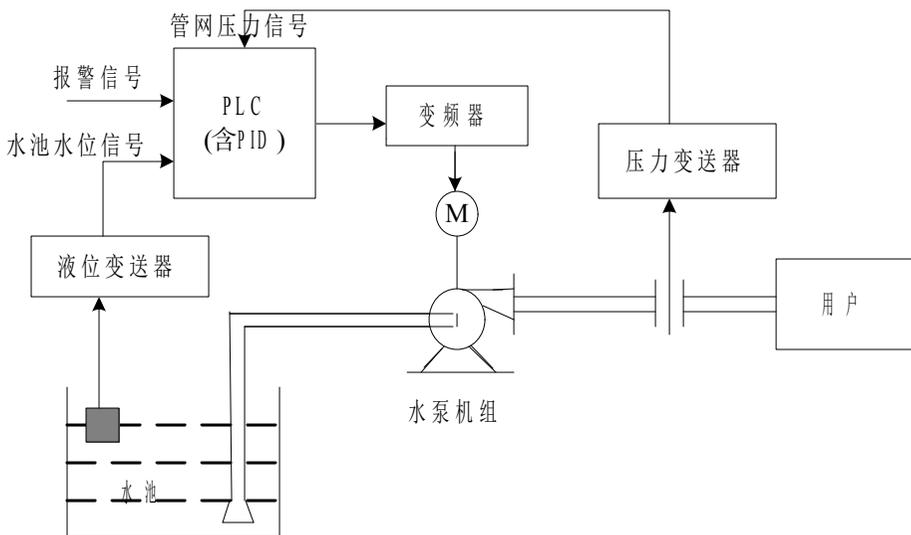


图 2.3 变频恒压供水系统控制流程图

从图中可看出，系统可分为：执行机构、信号检测机构、控制机构三大部分，具体为：

(1) 执行机构：执行机构是由一组水泵组成，它们用于将水供入用户管网，其中由一台变频泵和两台工频泵构成，变频泵是由变频调速器控制、可以进行变频调整的水泵，用以根据用水量的变化改变电机的转速，以维

持管网的水压恒定；工频泵只运行于启、停两种工作状态，用以在用水量很大（变频泵达到工频运行状态都无法满足用水要求时）的情况下投入工作。

(2) 信号检测机构：在系统控制过程中，需要检测的信号包括管网水压信号、水池水位信号和报警信号。管网水压信号反映的是用户管网的水压值，它是恒压供水控制的主要反馈信号。此信号是模拟信号，读入 PLC 时，需进行 A/D 转换。另外为加强系统的可靠性，还需对供水的上限压力和下限压力用电接点压力表进行检测，检测结果可以送给 PLC，作为数字量输入；水池水位信号反映水泵的进水水源是否充足。信号有效时，控制系统要对系统实施保护控制，以防止水泵空抽而损坏电机和水泵。此信号来自安装于水池中的液位传感器；报警信号反映系统是否正常运行，水泵电机是否过载、变频器是否有异常，该信号为开关量信号。

(3) 控制机构：供水控制系统一般安装在供水控制柜中，包括供水控制器(PLC 系统)、变频器和电控设备三个部分。供水控制器是整个变频恒压供水控制系统的核心。供水控制器直接对系统中的压力、液位、报警信号进行采集，对来自人机接口和通讯接口的数据信息进行分析、实施控制算法，得出对执行机构的控制方案，通过变频调速器和接触器对执行机构(即水泵机组)进行控制；变频器是对水泵进行转速控制的单元，其跟踪供水控制器送来的控制信号改变调速泵的运行频率，完成对调速泵的转速控制。

根据水泵机组中水泵被变频器拖动情况不同，变频器有两种工作方式即变频循环式和变频固定式，变频循环式即变频器拖动某一台水泵作为调速泵，当这台水泵运行在 50Hz 时，其供水量仍不能达到用水要求，需要增加水泵机组时，系统先将变频器从该水泵电机中脱出，将该泵切换为工频的同时用变频去拖动另一台水泵电机；变频固定式是变频器拖动某一台水泵作为调速泵，当这台水泵运行在 50Hz 时，其供水量仍不能达到用水要

求，需要增加水泵机组时，系统直接启动另一台恒速水泵，变频器不做切换，变频器固定拖动的水泵在系统运行前可以选择<sup>[9]</sup>，本设计中采用前者。

作为一个控制系统，报警是必不可少的重要组成部分。由于本系统能适用于不同的供水领域，所以为了保证系统安全、可靠、平稳的运行，防止因电机过载、变频器报警、电网过大波动、供水水源中断造成故障，因此系统必须要对各种报警量进行监测，由 PLC 判断报警类别，进行显示和保护动作控制，以免造成不必要的损失。

变频恒压供水系统以供水出口管网水压为控制目标，在控制上实现出口总管网的实际供水压力跟随设定的供水压力。设定的供水压力可以是一个常数，也可以是一个时间分段函数，在每一个时段内是一个常数。所以，在某个特定时段内，恒压控制的目标就是使出口总管网的实际供水压力维持在设定的供水压力上<sup>[10]</sup>。变频恒压供水系统的结构框图如图 2.4 所示：

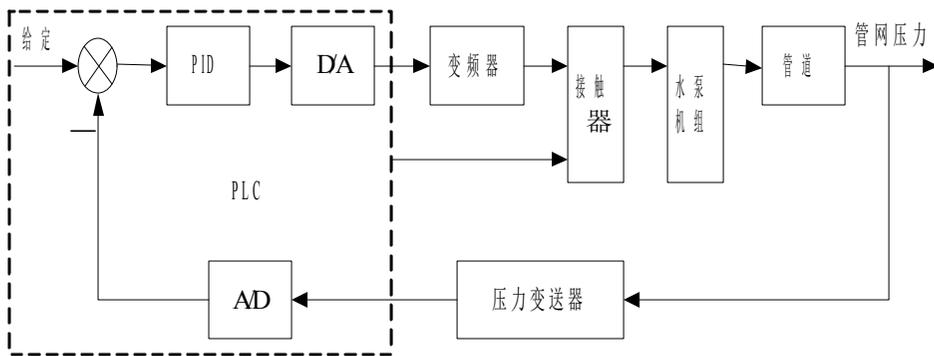


图 2.4 变频恒压供水系统框图

恒压供水系统通过安装在用户供水管道上的压力变送器实时地测量参考点的水压，检测管网出水压力，并将其转换为 4—20mA 的电信号，此检测信号是实现恒压供水的关键参数。由于电信号为模拟量，故必须通过 PLC 的 A/D 转换模块才能读入并与设定值进行比较，将比较后的偏差值进行 PID 运算，再将运算后的数字信号通过 D/A 转换模块转换成模拟信号作为变频

器的输入信号，控制变频器的输出频率，从而控制电动机的转速，进而控制水泵的供水流量，最终使用户供水管道上的压力恒定，实现变频恒压供水。

### 2.2.3 变频恒压供水系统控制流程

变频恒压供水系统控制流程如下：

(1) 系统通电，按照接收到有效的自控系统启动信号后，首先启动变频器拖动变频泵 M1 工作，根据压力变送器测得的用户管网实际压力和设定压力的偏差调节变频器的输出频率，控制 M1 的转速，当输出压力达到设定值，其供水量与用水量相平衡时，转速才稳定到某一定值，这期间 M1 工作在调速运行状态。

(2) 当用水量增加水压减小时，压力变送器反馈的水压信号减小，偏差变大，PLC 的输出信号变大，变频器的输出频率变大，所以水泵的转速增大，供水量增大，最终水泵的转速达到另一个新的稳定值。反之，当用水量减少水压增加时，通过压力闭环，减小水泵的转速到另一个新的稳定值。

(3) 当用水量继续增加，变频器的输出频率达到上限频率 50Hz 时，若此时用户管网的实际压力还未达到设定压力，并且满足增加水泵的条件(在下节有详细阐述)时，在变频循环式的控制方式下，系统将在 PLC 的控制下自动投入水泵 M2(变速运行)，同时变频泵 M1 做工频运行，系统恢复对水压的闭环调节，直到水压达到设定值为止。如果用水量继续增加，满足增加水泵的条件，将继续发生如上转换，将另一台工频泵 M3 投入运行，变频器输出频率达到上限频率 50Hz 时，压力仍未达到设定值时，控制系统就会发出水压超限报警。

(4) 当用水量下降水压升高，变频器的输出频率降至下限频率，用户管网的实际水压仍高于设定压力值，并且满足减少水泵的条件时，系统将

工频泵 M2 关掉，恢复对水压的闭环调节，使压力重新达到设定值。当用水量继续下降，并且满足减少水泵的条件时，将继续发生如上转换，将另一台工频泵 M3 关掉。

#### 2.2.4 水泵切换条件分析

在上述的系统工作流程中，我们提到当变频泵已运行在上限频率，此时管网的实际压力仍低于设定压力，此时需要增加水泵来满足供水要求，达到恒压的目的；当变频泵和工频泵都在运行且变频泵已运行在下限频率，此时管网的实际压力仍高于设定压力，此时需要减少工频泵来减少供水流量，达到恒压的目的。那么何时进行切换，才能使系统提供稳定可靠的供水压力，同时使机组不过于频繁的切换呢？

由于电网的限制以及变频器和电机工作频率的限制，50HZ 成为频率调节的上限频率。另外，变频器的输出频率不能够为负值，最低只能是 0HZ。其实，在实际应用中，变频器的输出频率是不可能降到 0HZ。因为当水泵机组运行，电机带动水泵向管网供水时，由于管网中的水压会反推水泵，给带动水泵运行的电机一个反向的力矩，同时这个水压也在一定程度上阻止源水池中的水进入管网，因此，当电机运行频率下降到一个值时，水泵就已经抽不出水了，实际的供水压力也不会随着电机频率的下降而下降。这个频率在实际应用中就是电机运行的下限频率。这个频率远大于 0HZ，具体数值与水泵特性及系统所使用的场所有关，一般在 20HZ 左右。所以选择 50HZ 和 20HZ 作为水泵机组切换的上下限频率。

当输出频率达到上限频率时，实际供水压力在设定压力上下波动。若出现  $P_s > P_f$  时就进行机组切换，很可能由于新增加了一台机组运行，供水压力一下就超过了设定压力。在极端的情况下，运行机组增加后，实际供水压力超过设定供水压力，而新增加的机组在变频器的下限频率运行，此

时又满足了机组切换的停机条件，需要将一个在工频状态下运行的机组停掉。如果用水状况不变，供水泵站中的所有能够自动投切的机组将一直这样投入一切出一再投入一再切出地循环下去，这增加了机组切换的次数，使系统一直处于不稳定的状态之中，实际供水压力也会在很大的压力范围内震荡。这样的工作状态既无法提供稳定可靠的供水压力，也使得机组由于相互切换频繁而增大磨损，减少运行寿命。另外，实际供水压力超调的影响以及现场的干扰使实际压力的测量值有尖峰，这两种情况都可能使机组切换的判别条件在一个比较短的时间内满足。所以，在实际应用中，相应的判别条件是通过上面两个判别条件的修改得到的，其实质就是增加了回滞环的应用和判别条件的延时成立。

实际的机组切换判别条件如下<sup>[11]</sup>：

$$\text{加泵条件: } f = f_{UP} \quad P_f < P_s - \frac{\Delta P_d}{2} \quad \text{且延时判别成立} \quad (2.6)$$

$$\text{减泵条件: } f = f_{LOW} \quad P_f > P_s + \frac{\Delta P_d}{2} \quad \text{且延时判别成立} \quad (2.7)$$

式中：  $f_{UP}$ ：上限频率                       $f_{LOW}$ ：下限频率

$P_s$ ：设定压力                       $P_f$ ：反馈压力

### 3 系统的硬件设计

#### 3.1 系统主要设备的选型

根据基于 PLC 的变频恒压供水系统的原理，系统的电气控制总框图如图 3.1 所示：

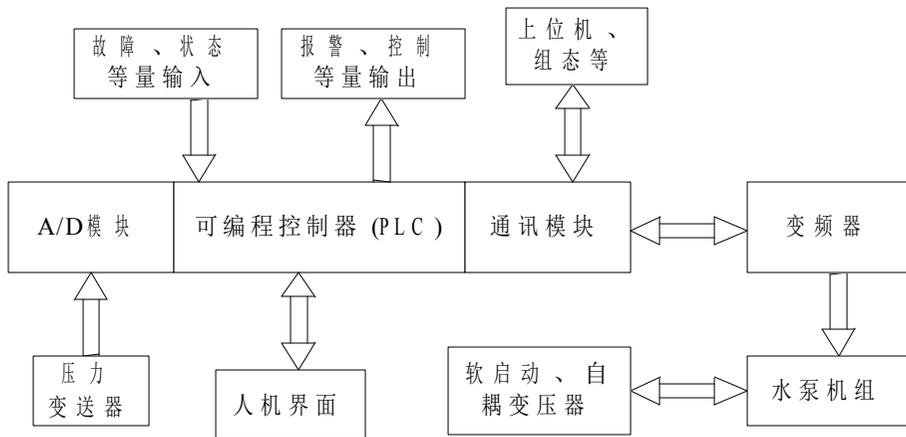


图 3.1 系统的电气控制总框图

由以上系统电气总框图可以看出,该系统的主要硬件设备应包括以下几部分：(1) PLC 及其扩展模块、(2) 变频器、(3) 水泵机组、(4) 压力变送器、(5) 液位变送器。主要设备选型如表 3.1 所示：

表 3.1 本系统主要硬件设备清单

主要设备	型号及其生产厂家
可编程控制器 (PLC)	Siemens CPU 226
模拟量扩展模块	Siemens EM 235
变频器	Siemens MM440
水泵机组	SFL 系列水泵 3 台(上海熊猫机械有限公司)
压力变送器及显示仪表	普通压力表 Y-100、XMT-1270 数显仪
液位变送器	分体式液位变送器 DS26(淄博丹佛斯公司)

### 3.1.1 PLC 及其扩展模块的选型

PLC 是整个变频恒压供水控制系统的核心，它要完成对系统中所有输入号的采集、所有输出单元的控制、恒压的实现以及对外的数据交换。因此我们在选择 PLC 时，要考虑 PLC 的指令执行速度、指令丰富程度、内存空间、通讯接口及协议、带扩展模块的能力和编程软件的方便与否等多方面因素。由于恒压供水自动控制系统控制设备相对较少，因此 PLC 选用德国 SIEMENS 公司的 S7-200 型。S7-200 型 PLC 的结构紧凑，价格低廉，具有较高的性价比，广泛适用于一些小型控制系统。SIEMENS 公司的 PLC 具有可靠性高，可扩展性好，又有较丰富的通信指令，且通信协议简单等优点；PLC 可以上接工控计算机，对自动控制系统进行监测控制。PLC 和上位机的通信采用 PC/PPI 电缆，支持点对点接口(PPI)协议，PC/PPI 电缆可以方便实现 PLC 的通信接口 RS485 到 PC 机的通信接口 RS232 的转换，用户程序有三级口令保护，可以对程序实施安全保护<sup>[12]</sup>。

根据控制系统实际所需端子数目，考虑 PLC 端子数目要有一定的预留量，因此选用的 S7-200 型 PLC 的主模块为 CPU226，其开关量输出为 16 点，输出形式为 AC220V 继电器输出；开关量输入 CPU226 为 24 点，输入形式为+24V 直流输入。由于实际中需要模拟量输入点 1 个，模拟量输出点 1 个，所以需要扩展，扩展模块选择的是 EM235，该模块有 4 个模拟输入(AIW)，1 个模拟输出(AQW)信号通道。输入输出信号接入端口时能够自动完成 A/D 的转换，标准输入信号能够转换成一个字长(16bit)的数字信号；输出信号接出端口时能够自动完成 D/A 的转换，一个字长(16bit)的数字信号能够转换成标准输出信号。EM235 模块可以针对不同的标准输入信号，通过 DIP 开关进行设置。

### 3.1.2 变频器的选型

变频器是本系统控制执行机构的硬件,通过频率的改变实现对电机转速的调节,从而改变出水量。变频器的选择必须根据水泵电机的功率和电流进行选择。本系统中要实现监控,所以变频器还应具有通讯功能。根据控制功能不同,通用变频器可分为三种类型:普通功能型 U/f 控制变频器、具有转矩控制功能的高功能型 U/f 控制变频器以及矢量控制高功能型变频器。供水系统属泵类负载,低速运行时的转矩小,可选用价格相对便宜的 U/f 控制变频器。

由于本设计中 PLC 选择的西门子 S7-200 型号,为了方便 PLC 和变频器之间的通信,我们选择西门子的 MicroMaster440 变频器。它是用于三相交流电动机调速的系列产品,由微处理器控制,采用绝缘栅双极型晶体管作为功率输出器件,具有很高的运行可靠性和很强的功能。它采用模块化结构,组态灵活,有多种完善的变频器和电动机保护功能,有内置的 RS-485/232C 接口和用于简单过程控制的 PI 闭环控制器,可以根据用户的特殊需要对 I/O 端子进行功能自定义。快速电流限制实现了无跳闸运行,磁通电流控制改善了动态响应特性,低频时也可以输出大力矩。MicroMaster440 变频器的输出功率为 0.75~90KW,适用于要求高、功率大的场合,恰好其输出信号能作为 75KW 的水泵电机的输入信号。另外选择西门子的变频器可以通过 RS-485 通信协议和接口直接与西门子 PLC 相连,更便于设备之间的通信。

### 3.1.3 水泵机组的选型

水泵机组的选型基本原则,一是要确保平稳运行;二是要经常处于高效区运行,以求取得较好的节能效果。要使泵组常处于高效区运行,则所选用的泵型必须与系统用水量的变化幅度相匹配。本设计的要求为:电动

机额定功率 75KW，供水压力控制在  $0.3 \pm 0.01\text{Mpa}$ 。根据本设计要求并结合实际中小区生活用水情况，最终确定采用 3 台上海熊猫机械有限公司生产的 SFL 系列水泵机组（电机功率 75KW）。SFL 型低噪音生活给水泵在外壳、轴上采用不锈钢材质，叶轮、导叶采用铸造件，经过静电喷塑处理，效率可提高 5% 以上；采用低噪音电机，机械密封，前端配有泄压保护装置，噪声更低（室外噪音 60 分贝）、磨损小、寿命更长；下轴承采用柔性耐磨轴承，噪音低，寿命长；采用低进低出的结构设计，水力模型先进，性能更可靠。它可以输送清水及理化性质类似于水的无颗粒、无杂质不挥发、弱腐蚀介质，一般用在城市给排水、锅炉给水、空调冷却系统、消防给水等。因此本设计中选择电机功率为 75KW 的上海熊猫机械有限公司生产的 SFL 系列水泵 3 台。

### 3.1.4 压力变送器的选型

压力变送器用于检测管网中的水压，常装设在泵站的出水口，压力传感器和压力变送器是将水管中的水压变化转变为 1~5V 或 4~20mA 的模拟量信号，作为模拟输入模块(A/D 模块)的输入，在选择时，为了防止传输过程中的干扰与损耗，我们采用 4~20mA 输出压力变送器。在运行过程中，当压力传感器和压力变送器出现故障时，系统有可能开启所有的水泵，而此时的用水量又达不到，这就使水管中的水压上升，为了防止爆管和超高水压损坏家中的用水设备(热水器、抽水马桶等)，本文中的供水系统使用电极点压力表的压力上限输出，作为 PLC 的一个数字量输入，当压力超出上限时，关闭所有水泵并进行报警输出<sup>[13]</sup>。

根据以上的分析，本设计中选用普通压力表 Y-100 和 XMT-1270 数显仪实现压力的检测、显示和变送。压力表测量范围 0~1Mpa，精度 1.0；数显仪输出一路 4~20mA 电流信号，送给与 CPU226 连接模拟量模块

EM235，作为 PID 调节的反馈电信号，可设定压力上、下限，通过两路继电器控制输出压力超限信号。

### 3.1.5 液位变送器选型

考虑到水泵电机空载时会影响电机寿命，因此需要对水池水位作必要的检测和控制。本设计要求贮水池水位：2m~5m，所以要通过液位变送器将检测到的水位转换成标准电信号（4~20mA 电压信号），再将其输入窗口比较器，用比较器输出的高电平作为贮水池水位的报警信号，输入 PLC。

综合以上因素：本设计选择淄博丹佛斯公司生产的型号为 DS26 分体式液位变送器，其量程为：0m~200m，适用于水池、深井以及其他各种液位的测量；零点和满量程外部可调；供电电源：24VDC；输出信号：两线制 4~20mADC 精度等级：0.25 级。

## 3.2 系统主电路分析及其设计

基于 PLC 的变频恒压供水系统主电路图如图 3.2 所示：三台电机分别为 M1、M2、M3，它们分别带动水泵 1#、2#、3#。接触器 KM1、KM3、KM5 分别控制 M1、M2、M3 的工频运行；接触器 KM2、KM4、KM6 分别控制 M1、M2、M3 的变频运行；FR1、FR2、FR3 分别为三台水泵电机过载保护用的热继电器；QS1、QS2、QS3、QS4 分别为变频器和三台水泵电机主电路的隔离开关；FU 为主电路的熔断器。

本系统采用三泵循环变频运行方式，即 3 台水泵中只有 1 台水泵在变频器控制下作变速运行，其余水泵在工频下做恒速运行，在用水量小的情况下，如果变频泵连续运行时间超过 3h，则要切换下一台水泵，即系统具有“倒泵功能”，避免某一台水泵工作时间过长。因此在同一时间内只

能有一台水泵工作在变频下，但不同时间段内三台水泵都可轮流做变频泵。

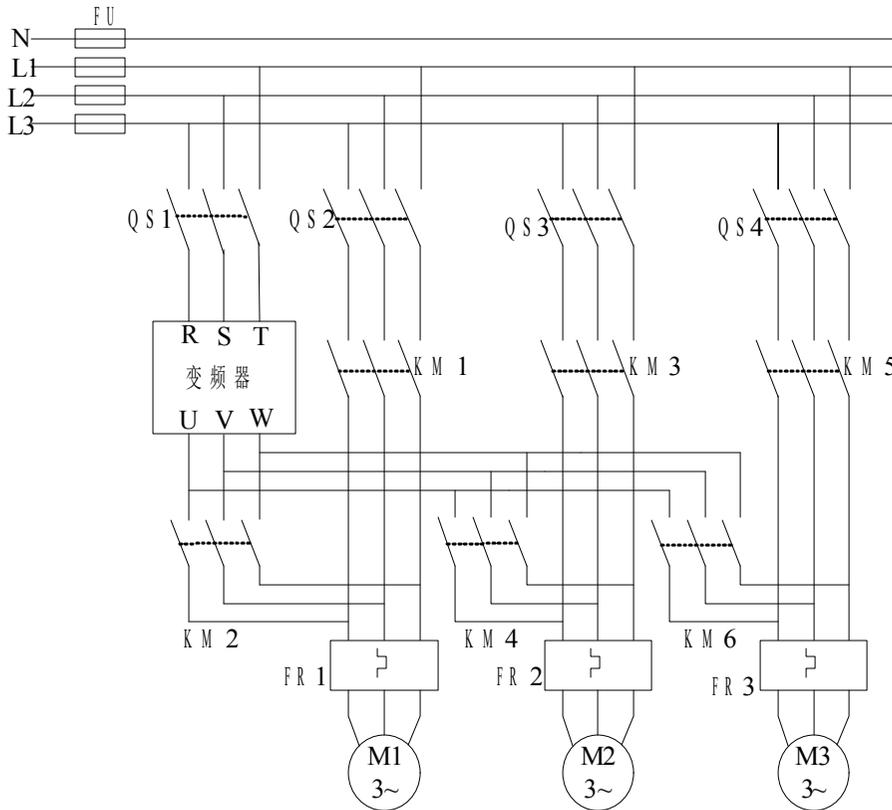


图 3.2 变频恒压供水系统主电路图

三相电源经低压熔断器、隔离开关接至变频器的 R、S、T 端，变频器的输出端 U、V、W 通过接触器的触点接至电机。当电机工频运行时，连接至变频器的隔离开关及变频器输出端的接触器断开，接通工频运行的接触器和隔离开关。主电路中的低压熔断器除接通电源外，同时实现短路保护，每台电动机的过载保护由相应的热继电器 FR 实现。变频和工频两个回路不允许同时接通。而且变频器的输出端绝对不允许直接接电源，故必须经过接触器的触点，当电动机接通工频回路时，变频回路接触器的触点必须先行断开。同样从工频转为变频时，也必须先将工频接触器断开，才允许接通变频器输出端接触器，所以 KM1 和 KM2、KM3 和 KM4、KM5

和 KM6 绝对不能同时动作, 相互之间必须设计可靠的互锁。为监控电机负载运行情况, 主回路的电流大小可以通过电流互感器和变送器将 4~20mA 电流信号送至上位机来显示。同时可以通过通过转换开关接电压表显示线电压。并通过转换开关利用同一个电压表显示不同相之间的线电压。初始运行时, 必须观察电动机的转向, 使之符合要求。如果转向相反, 则可以改变电源的相序来获得正确的转向。系统启动、运行和停止的操作不能直接断开主电路(如直接使熔断器或隔离开关断开), 而必须通过变频器实现软启动和软停。为提高变频器的功率因数, 必须接电抗器。当采用手动控制时, 必须采用自耦变压器降压启动或软启动的方式以降低电流, 本系统采用软启动器。

### 3.3 系统控制电路分析及其设计

系统实现恒压供水的主体控制设备是 PLC, 控制电路的合理性, 程序的可靠性直接关系到整个系统的运行性能。本系统采用西门子公司 S7-200 系列 PLC, 它体积小, 执行速度快, 抗干扰能力强, 性能优越。

PLC 主要是用于实现变频恒压供水系统的自动控制, 要完成以下功能: 自动控制三台水泵的投入运行; 能在三台水泵之间实现变频泵的切换; 三台水泵在启动时要有软启动功能; 对水泵的操作要有手动/自动控制功能, 手动只在应急或检修时临时使用; 系统要有完善的报警功能并能显示运行状况。

如图 3.3 为电控系统控制电路图。图中 SA 为手动/自动转换开关, SA 打在 1 的位置为手动控制状态; 打在 2 的状态为自动控制状态。手动运行时, 可用按钮 SB1~SB6 控制三台水泵的启/停; 自动运行时, 系统在 PLC 程序控制下运行。

图中的 HL10 为自动运行状态电源指示灯。对变频器频率进行复位是

只提供一个干触发点信号,本系统通过一个中间继电器 KA 的触点对变频器进行复频控制。图中的 Q0.0~Q0.5 及 Q1.1~Q1.5 为 PLC 的输出继电器触点,他们旁边的 4、6、8 等数字为接线编号,可结合下节中图 3.4 一起读图。

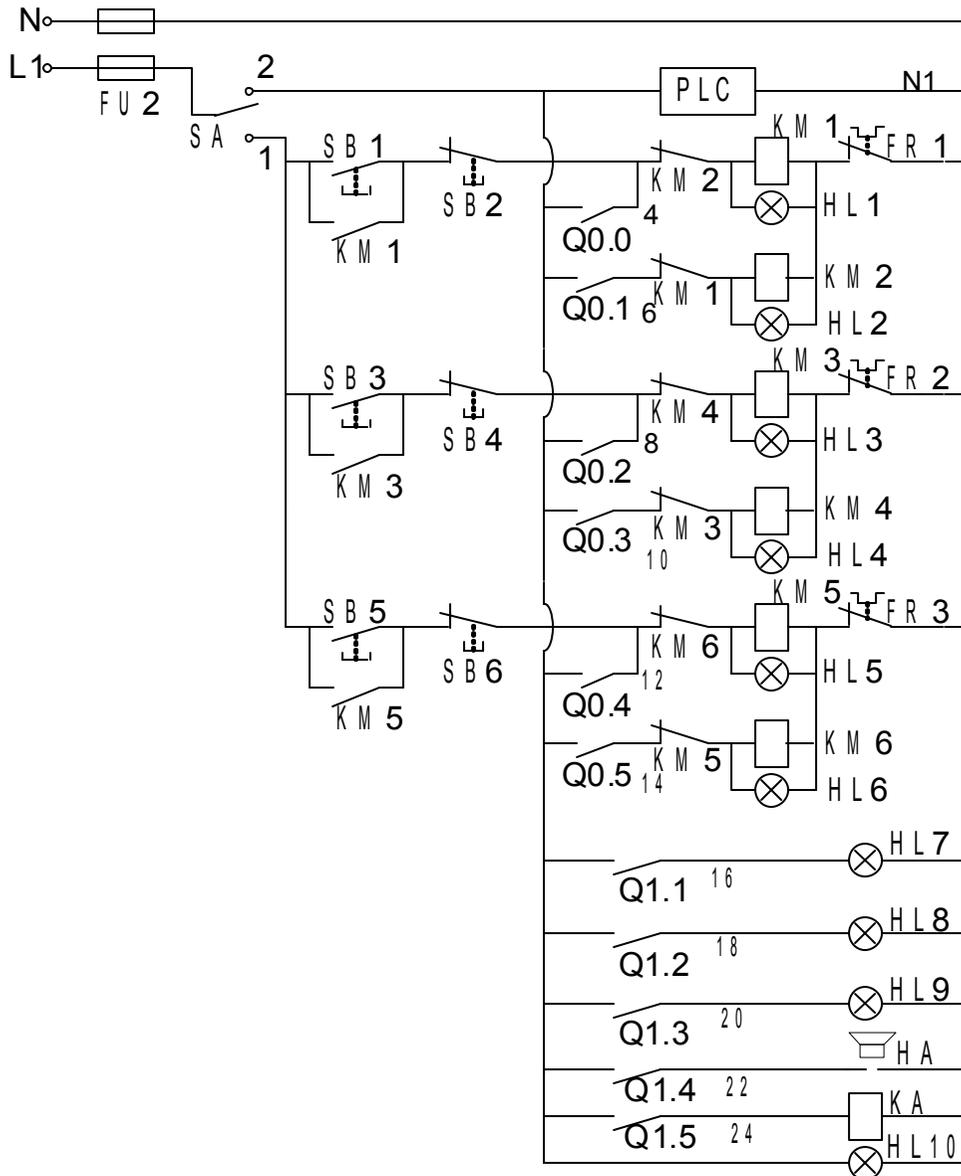


图 3.3 变频恒压供水系统控制电路图

注: PLC 各 I/O 端口、各指示灯所代表含义在下一节 I/O 端口分配中将详细介绍。

本系统在手动/自动控制下的运行过程如下：

(1) 手动控制：手动控制只在检查故障原因时才会用到，便于电机故障的检测与维修。单刀双掷开关 SA 打至 1 端时开启手动控制模式，此时可以通过开关分别控制三台水泵电机在工频下的运行和停止。SB1 按下时由于 KM2 常闭触点接通电路使得 KM1 的线圈得电，KM1 的常开触点闭合从而实现自锁功能，电机 M1 可以稳定的运行在工频下。只有当 SB2 按下时才会切断电路，KM1 线圈失电，电机 M1 停止运行。同理，可以通过按下 SB3、SB5 启动电机 M2、M3，通过按下 SB4、SB6 来使电机 M2、M3 停机。

(2) 自动控制：在正常情况下变频恒压供水系统工作在自动状态下。单刀双掷开关 SA 打至 2 端时开启自动控制模式，自动控制的工作状况由 PLC 程序控制。Q0.0 输出 1#水泵工频运行信号，Q0.1 输出 1#水泵变频运行信号，当 Q0.0 输出 1 时，KM1 线圈得电，1#水泵工频运行指示灯 HL1 点亮，同时 KM1 的常闭触点断开，实现 KM1、KM2 的电气互锁。当 Q0.1 输出 1 时，KM2 线圈得电，1#水泵变频运行指示灯 HL2 点亮，同时 KM2 的常闭触点断开，实现 KM2、KM1 的电气互锁。同理，2#、3#水泵的控制原理也是如此。当 Q1.1 输出 1 时，水池水位上下限报警指示灯 HL7 点亮；当 Q1.2 输出 1 时，变频器故障报警指示灯 HL8 点亮；当 Q1.3 输出 1 时，白天供水模式指示灯 HL9 点亮；当 Q1.4 输出 1 时，报警电铃 HA 响起；当 Q1.5 输出 1 时，中间继电器 KA 的线圈得电，常开触点 KA 闭合使得变频器的频率复位；处于自动控制状态下，自动运行状态电源指示灯 HL10 一直点亮。

### 3.4 PLC 的 I/O 端口分配及外围接线图

基于 PLC 的变频恒压供水系统设计的基本要求如下：

(1) 由于白天和夜间小区用水量明显不同，本设计采用白天供水和夜间供水两种模式，两种模式下设定的给定水压值不同。白天，小区的用水量大，系统高恒压值运行；夜间，小区用水量小，系统低恒压值运行。

(2) 在用水量小的情况下，如果一台水泵连续运行时间超过 3h，则要切换下一台水泵，即系统具有“倒泵功能”，避免某一台水泵工作时间过长。倒泵只用于系统只有一台变频泵长时间工作的情况下。

(3) 考虑节能和水泵寿命的因素，各水泵切换遵循先启先停、先停先启原则。

(4) 三台水泵在启动时要有软启动功能，对水泵的操作要有手动/自动控制功能，手动只在应急或检修时临时使用。

(5) 系统要有完善的报警功能。

根据以上控制要求统计控制系统的输入输出信号的名称、代码及地址编号如表 3.2 所示。

表 3.2 输入输出点代码及地址编号

	名 称	代 码	地址编号
输 入 信 号	供水模式信号(1-白天, 0-夜间)	SA1	I0.0
	水池水位上下限信号	SLHL	I0.1
	变频器报警信号	SU	I0.2
	试灯按钮	SB7	I0.3
	压力变送器输出模拟量电压值	Up	AIW0
输 出 信	1#泵工频运行接触器及指示灯	KM1、HL1	Q0.0
	1#泵变频运行接触器及指示灯	KM2、HL2	Q0.1
	2#泵工频运行接触器及指示灯	KM3、HL3	Q0.2
	2#泵变频运行接触器及指示灯	KM4、HL4	Q0.3

号	3#泵工频运行接触器及指示灯	KM5、HL5	Q0.4
	3#泵变频运行接触器及指示灯	KM6、HL6	Q0.5
输出信号号	水池水位上下限报警指示灯	HL7	Q1.1
	变频器故障报警指示灯	HL8	Q1.2
	白天模式运行指示灯	HL9	Q1.3
	报警电铃	HA	Q1.4
	变频器频率复位控制	KA	Q1.5
	变频器输入电压信号	Uf	AQW0

结合系统控制电路图 3.3 和 PLC 的 I/O 端口分配表 3.2, 画出 PLC 及扩展模块外围接线图, 如图 3.4 所示:

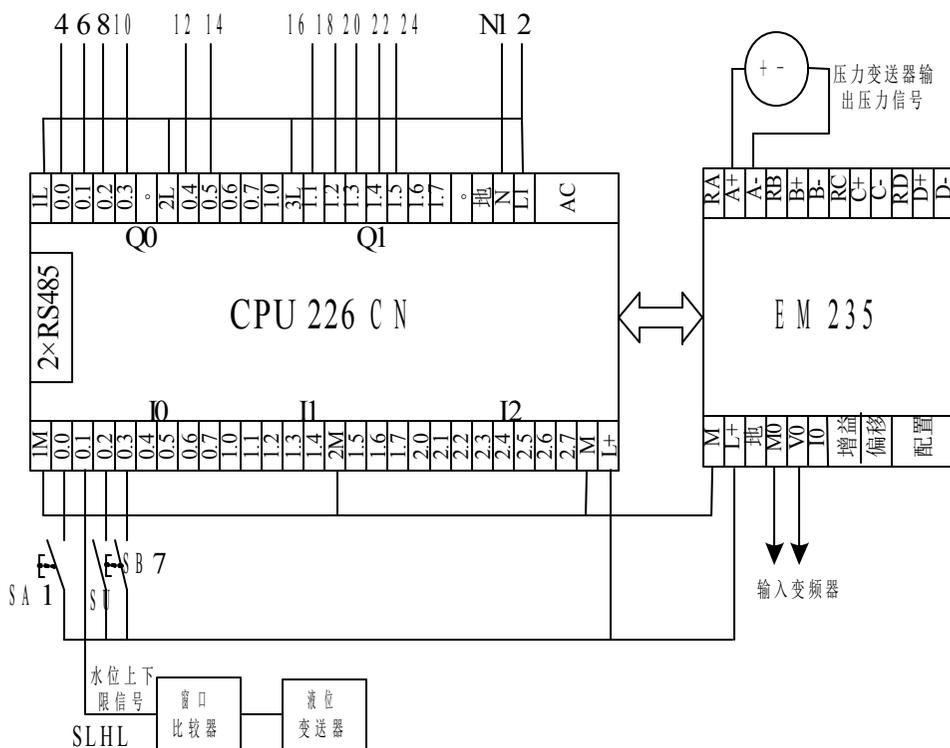


图 3.4 PLC 及扩展模块外围接线图

本变频恒压供水系统有五个输入量, 其中包括 4 个数字量和 1 个模拟

量。压力变送器将测得的管网压力输入 PLC 的扩展模块 EM235 的模拟量输入端口作为模拟量输入；开关 SA1 用来控制白天/夜间两种模式之间的切换，它作为开关量输入 I0.0；液位变送器把测得的水池水位转换成标准电信号后送入窗口比较器，在窗口比较器中设定水池水位的上下限，当超出上下限时，窗口比较其输出高电平 1，送入 I0.1；变频器的故障输出端与 PLC 的 I0.2 相连，作为变频器故障报警信号；开关 SB7 与 I0.3 相连作为试灯信号，用于手动检测各指示灯是否正常工作。

本变频恒压供水系统有 11 个数字量输出信号和 1 个模拟量输出信号。Q0.0~Q0.5 分别输出三台水泵电机的工频/变频运行信号；Q1.1 输出水位超限报警信号；Q1.2 输出变频器故障报警信号；Q1.3 输出白天模式运行信号；Q1.4 输出报警电铃信号；Q1.5 输出变频器复位控制信号；AQW0 输出的模拟信号用于控制变频器的输出频率。

图 3.4 只是简单的表明 PLC 及扩展模块的外围接线情况，并不是严格意义上的外围接线情况。它忽略了以下因素：(1) 直流电源的容量；(2) 电源方面的抗干扰措施；(3) 输出方面的保护措施；(4) 系统的保护措施等。

## 4 系统的软件设计

### 4.1 系统软件设计分析

硬件连接确定之后,系统的控制功能主要通过软件实现,结合泵站的控制要求,对泵站软件设计分析如下:

#### (1) 由“恒压”要求出发的工作泵组数量管理

为了恒定水压,在水压降落时要升高变频器的输出频率,且在一台水泵工作不能满足恒压要求时,需启动第二台水泵。判断需启动新水泵的标准是变频器的输出频率达到设定的上限值。这一功能可通过比较指令实现。为了判断变频器工作频率达上限值的确实性,应滤去偶然的频率波动引起的频率达到上限情况,在程序中应考虑采取时间滤波。

#### (2) 多泵组泵站泵组管理规范

由于变频器泵站希望每一次启动电动机均为软启动,又规定各台水泵必须交替使用,多泵组泵站泵组的投运要有个管理规范。在本设计中,控制要求中规定任一台泵连续变频运行不得超过 3h,因此每次需启动新水泵或切换变频泵时,以新运行泵为变频泵是合理的。具体的操作是:将现行运行的变频器从变频器上切除,并接上工频电源运行,将变频器复位并用于新运行泵的启动。除此之外,泵组管理还有一个问题就是泵的工作循环控制,本设计中使用泵号加 1 的方法实现变频泵的循环控制,用工频泵的总数结合泵号实现工频泵的轮换工作。

#### (3) 程序的结构及程序功能的实现

由于模拟量单元及 PID 调节都需要编制初始化及中断程序,本程序可分为三部分:主程序、子程序和中断程序。系统初始化的一些工作放在初始化子程序中完成,这样可以节省扫描时间。利用定时器中断功能实现 PID 控制的定时采样及输出控制。主程序的功能最多,如泵切换信号的生

成、泵组接触器逻辑控制信号的综合及报警处理等都在主程序。白天、夜间模式的给定压力值不同,两个恒压值是采用数字方式直接在程序中设定的。白天模式系统设定值为满量程的 90%, 夜间模式系统设定值为满量程的 70%。

程序中使用的 PLC 元件及其功能如表 4.1 所示。

表 4.1 程序中使用的 PLC 元件及其功能

器件地址	功 能	器件地址	功 能
VD100	过程变量标准化值	T37	工频泵增泵滤波时间控制
VD104	压力给定值	T38	工频泵减泵滤波时间控制
VD108	PID 计算值	M0.0	故障结束脉冲信号
VD112	比例系数 Kc	M0.1	水泵变频启动脉冲(增泵)
VD116	采样时间 Ts	M0.2	水泵变频启动脉冲(减泵)
VD120	积分时间 Ti	M0.3	倒泵变频启动脉冲
VD124	微分时间 Td	M0.4	复位当前变频泵运行脉冲
VD204	变频运行频率下限值	M0.5	当前泵工频运行启动脉冲
VD208	变频运行频率上限值	M0.6	新泵变频启动脉冲
VD250	PID 调节结果存储单元	M2.0	泵工频/变频转换逻辑控制
VB300	变频工作泵的泵号	M2.1	泵工频/变频转换逻辑控制
VB301	工频运行泵的总台数	M2.2	泵工频/变频转换逻辑控制
VD310	变频运行时间存储器	M3.0	故障信号汇总
T33	工频/变频转换逻辑控制	M3.1	水池水位越限逻辑
T34	工频/变频转换逻辑控制		
T35	工频/变频转换逻辑控制		

## 4.2 PLC 程序设计

PLC 控制程序采用 SIEMENS 公司提供的 STEP 7-MicroWIN-V40 编程软件开发。该软件的 SIMATIC 指令集包含三种语言, 即语句表(STL)语言、梯形图(LAD)语言、功能块图(FWD)语言<sup>[4]</sup>。语句表(STL)语言类似于计算机的汇编语言, 特别适合于来自计算机领域的工程人员, 它使用指令助记符创建用户程序, 属于面向机器硬件的语言。梯形图(LAD)语言最接近于继电器接触器控制系统中的电气控制原理图, 是应用最多的一种编程语言, 与计算机语言相比, 梯形图可以看作是 PLC 的高级语言, 几乎不用去考虑系统内部的结构原理和硬件逻辑, 因此, 它很容易被一般的电气工程设计和运行维护人员所接受, 是初学者理想的编程工具。功能块图(FWD)的图形结构与数字电路的结构极为相似, 功能块图中每个模块有输入和输出端, 输出和输入端的函数关系使用与、或、非、异或逻辑运算, 模块之间的连接方式与电路的连接方式基本相同。

PLC 控制程序由一个主程序、若干子程序构成, 程序的编制在计算机上完成, 编译后通过 PC/PPI 电缆把程序下载到 PLC, 控制任务的完成, 是通过在 RUN 模式下主机循环扫描并连续执行用户程序来实现的。

### 4.2.1 控制系统主程序设计

PLC 主程序主要由系统初始化程序、水泵电机起动程序、水泵电机变频/工频切换程序、水泵电机换机程序、模拟量(压力、频率)比较计算程序和报警程序等构成。

#### (1) 系统初始化程序

在系统开始工作的时候, 先要对整个系统进行初始化, 即在开始启动的时候, 先对系统的各个部分的当前工作状态进行检测, 如出错则报警, 接着对变频器变频运行的上下限频率、PID 控制的各参数进行初始化处

理，赋予一定的初值，在初始化子程序的最后进行中断连接。系统进行初始化是在主程序中通过调用子程序来是实现的。在初始化后紧接着要设定白天/夜间两种供水模式下的水压给定值以及变频泵泵号和工频泵投入台数。

### (2) 增、减泵判断和相应操作程序

当 PID 调解结果大于等于变频运行上限频率（或小于等于变频运行下限频率）且水泵稳定运行时，定时器计时 5min（以便消除水压波动的干扰）后执行工频泵台数加一（或减一）操作，并产生相应的泵变频启动脉冲信号。

### (3) 水泵的软启动程序

增减泵或倒泵时复位变频器为软启动做准备，同时变频泵号加一，并产生当前泵工频启动脉冲信号和下一台水泵变频启动脉冲信号，延时后启动运行。

当只有一台变频泵长时间运行时，对连续运行时间进行判断，超过 3h 则自动倒泵变频运行。

### (4) 各水泵变频运行控制逻辑程序

各水泵变频运行控制逻辑大体上是相同的，现在只以 1#水泵为例进行说明。当第一次上电、故障消除或者产生 1#泵变频启动脉冲信号并且系统无故障产生、未产生复位 1#水泵变频运行信号、1#泵未工作在工频状态时，Q0.1 置 1，KM2 常开触点闭合接通变频器，使 1#水泵变频运行，同时 KM2 常闭触点打开防止 KM1 线圈得电，从而在变频和工频之间实现良好的电气互锁，KM2 的常开触点还可实现自锁功能。

### (5) 各水泵工频运行控制逻辑程序

水泵的工频运行不但取决于变频泵的泵号，还取决于工频泵的台数。由于各水泵工频运行控制逻辑大体上是相同的，现在只以 1#水泵为例进

行说明。产生当前泵工频运行启动脉冲后，若当前 2#泵处于变频运行状态且工频泵数大于 0，或者当前 3#泵处于变频运行状态且工频泵数大于 1，则 Q0.0 置 1，KM1 线圈得电，使得 KM1 常开触点闭合，1#水泵工频运行，同时 KM1 常闭触点打开防止 KM2 线圈得电，从而实现变频和工频之间实现良好的电气互锁，KM1 的常开触点还可实现自锁功能。

#### (6) 报警及故障处理程序

本系统中包括水池水位越限报警指示灯、变频器故障报警指示灯白天模式运行指示灯以及报警电铃。当故障信号产生时，相应的指示灯会出现闪烁的现象，同时报警电铃响起。而试灯按钮按下时，各指示灯会一直点亮。

故障发生后重新设定变频泵号和工频泵运行台数，在故障结束后产生故障结束脉冲信号。

由于变频恒压供水系统主程序梯形图比较复杂，不方便全部画出，在此仅画出其控制过程的流程图。详细的主程序梯形图请参考附录 C。

主程序流程图如图 4.1 所示。由于在图 4.1 中并未对各台水泵的变频和工频运行控制做详细介绍，因此图 4.2 和图 4.3 对其作了完整的补充。其中图 4.2 是以 2#泵为例的变频运行控制流程图，图 4.3 是以 2#泵为例的工频运行控制流程图。1#、3#泵的运行控制情况与 2#泵相似，在此就不再重复。

如图 4.1 所示。本设计主程序大体包括以下几部分：

- (1) 调用初始化子程序，设定各初始值；
- (2) 根据增、减泵条件确定工频泵运行数；
- (3) 根据增泵、倒泵情况确定变频泵号；
- (4) 通过工频泵数和变频泵号对各泵运行情况进行控制；
- (5) 进行报警和故障处理。

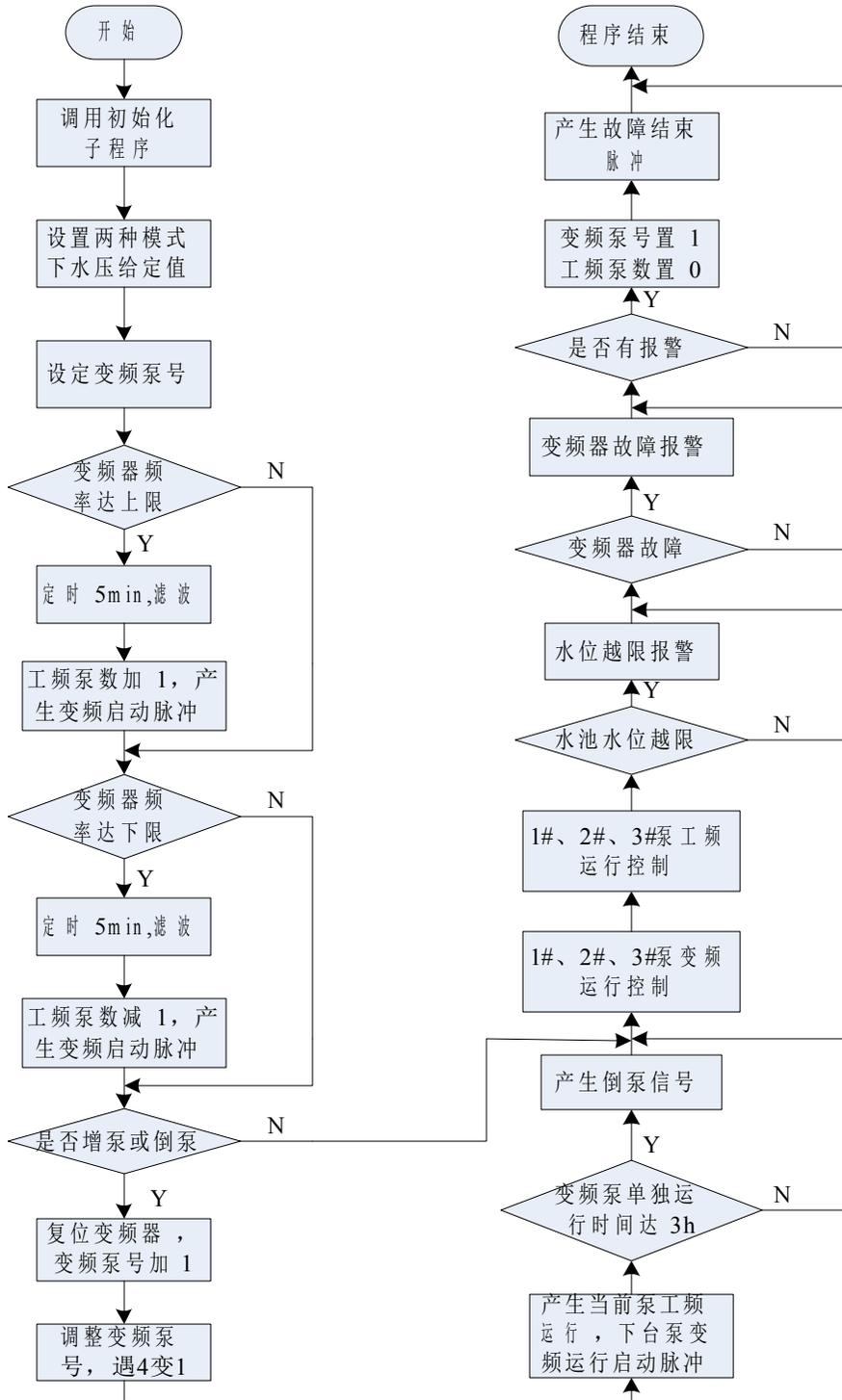


图 4.1 变频恒压供水系统主程序流程图

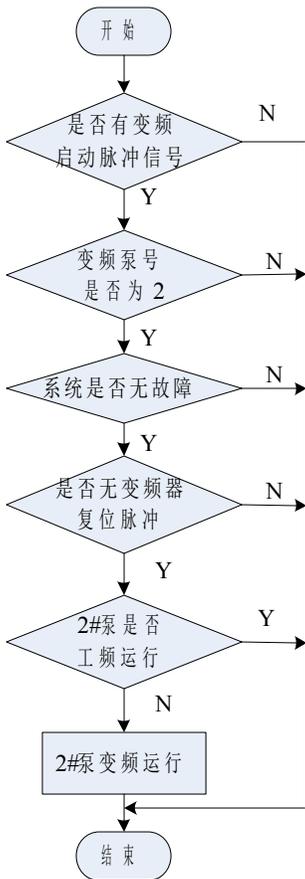


图 4.2 2#泵变频运行控制流程图

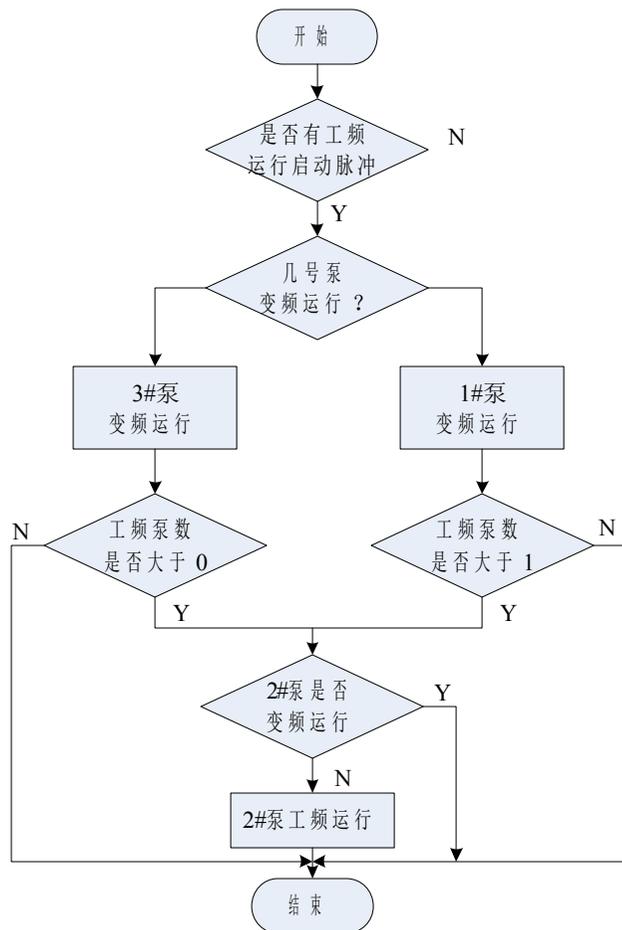


图 4.3 2#泵工频运行控制流程图

### 4.2.2 控制系统子程序设计

#### (1) 初始化子程序 SBR\_0

首先初始化变频运行的上下限频率,在第二章水泵切换分析中已说明水泵变频运行的上下限频率分别为 50HZ 和 20HZ。假设所选变频器的输出频率范围为 0~100HZ,则上下限给定值分别为 16000 和 6400。在初始

化 PID 控制的各参数 ( $K_c$ 、 $T_s$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ )，各参数的取值将在下一节中详细介绍。最后再设置定时中断和中断连接。具体程序梯形图如图 4.4 所示。

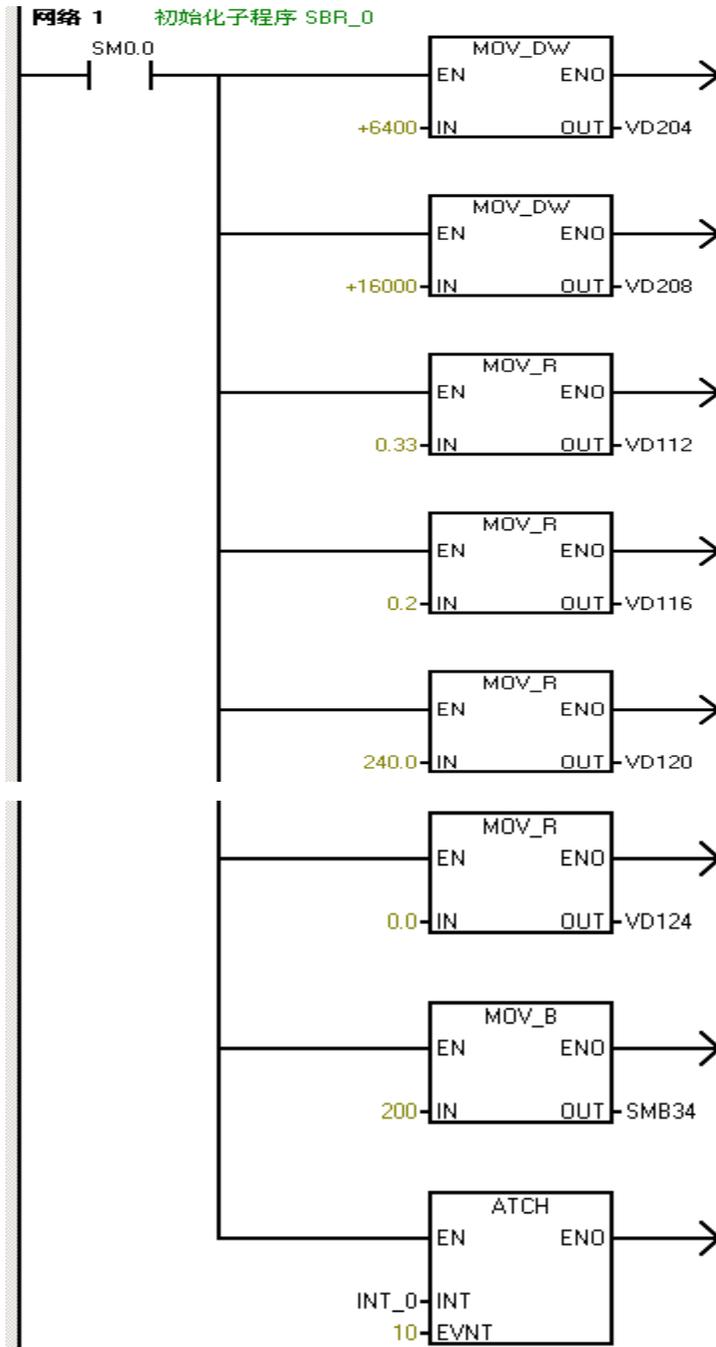
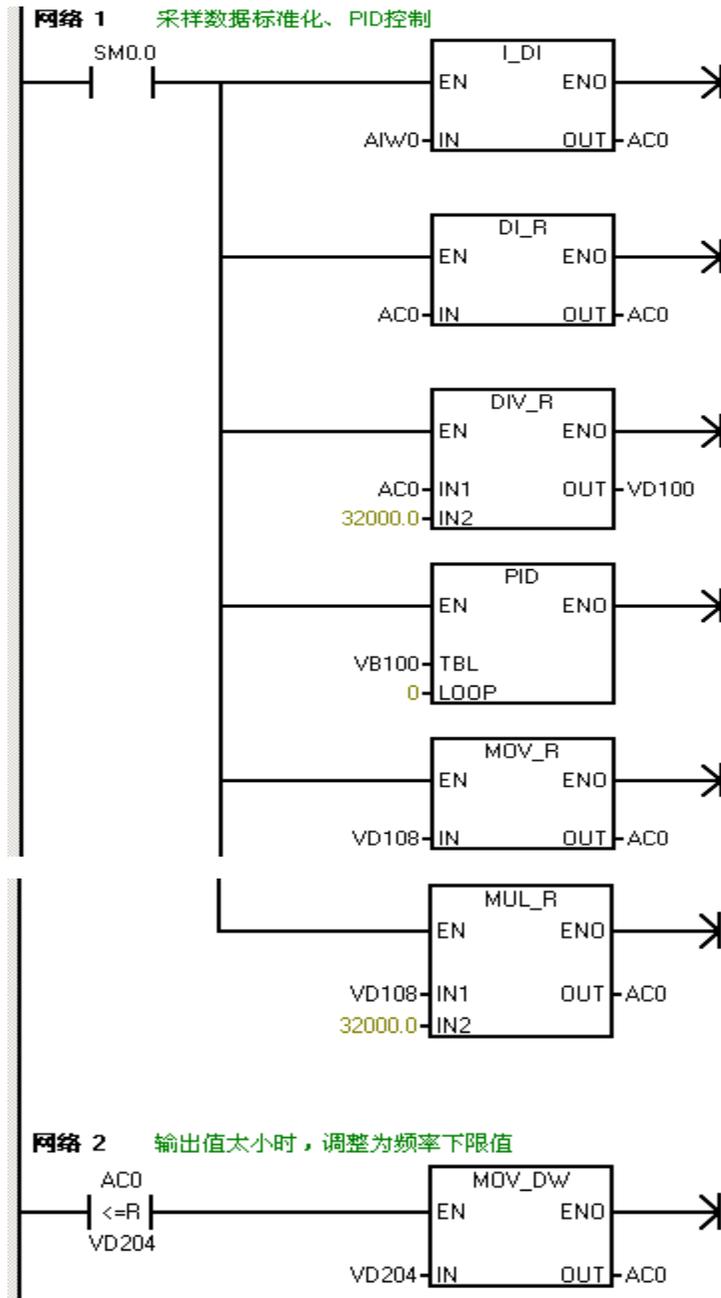


图 4.4 初始化子程序 SBR\_0 梯形图

### (2) PID 控制中断子程序

首先将由 AIW0 输入的采样数据进行标准化转换，经过 PID 运算后，再将标准值转化成输出值，由 AQW0 输出模拟信号。具体程序梯形图如图 4.5 所示。



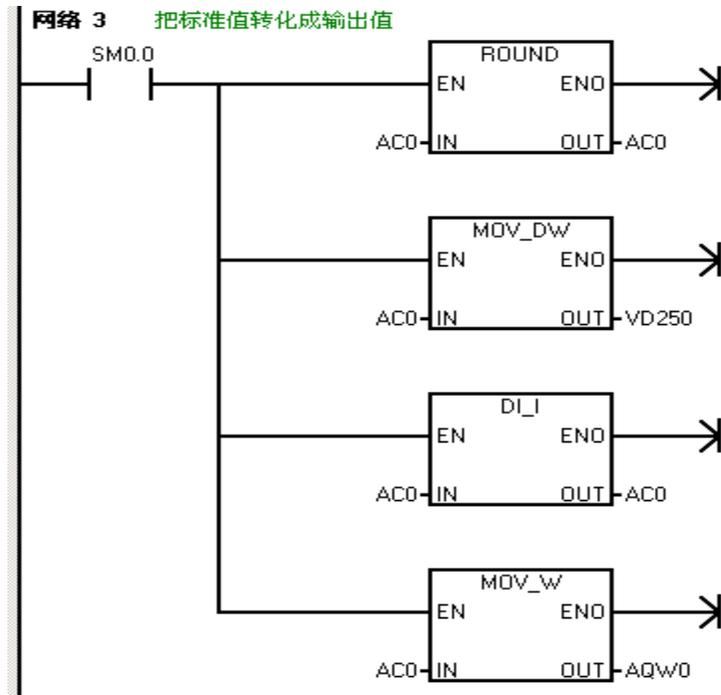


图 4.5 PID 控制中断子程序 INT\_0 梯形图

### 4.3 PID 控制器参数整定

#### 4.3.1 PID 控制及其控制算法

在供水系统的设计中，选用了含 PID 调节的 PLC 来实现闭环控制保证供水系统中的压力恒定。在连续控制系统中，常采用 Proportional(比例)、Integral(积分)、Derivative(微分)控制方式，称之为 PID 控制。PID 控制是连续控制系统中技术最成熟、应用最广泛的控制方式。具有理论成熟，算法简单，控制效果好，易于为人们熟悉和掌握等优点。PID 控制器是一种线性控制器，它是对给定值  $r(t)$  和实际输出值  $y(t)$  之间的偏差  $e(t)$ <sup>[15]</sup>：

$$e(t) = y(t) - r(t) \tag{4.1}$$

经比例 (P)、积分 (I) 和微分 (D) 运算后通过线性组合构成控制量

$u(t)$ ，对被控对象进行控制，故称 PID 控制器。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成，其控制系统原理框图如图 4.6 所示，图中  $u(t)$  为 PID 调节器输出的调节量。

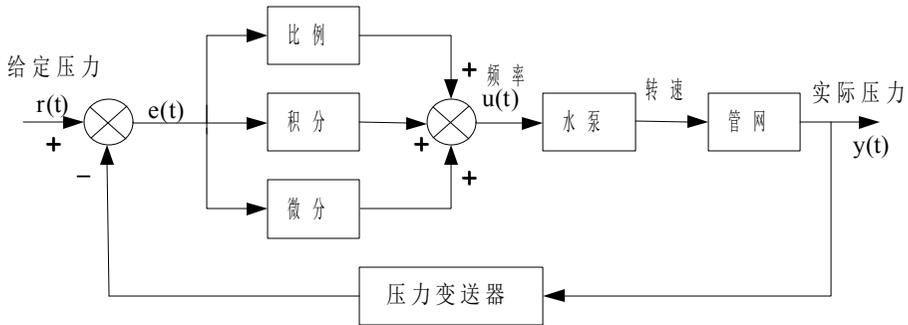


图 4.6 PID 控制原理框图

PID 控制规律为：

$$y(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.2)$$

式中： $K_p$  为比例系数； $T_i$  为积分时间常数； $T_d$  为微分时间常数。相应的传递函数形式：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.3)$$

PID 控制器各环节的作用及调节规律如下：

(1) 比例环节：成比例地反映控制系统偏差信号的作用，偏差  $e(t)$  一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差，但不能彻底消除系统偏差，系统偏差随比例系数  $K_p$  的增大而减少，比例系数过大将导致系统不稳定。

(2) 积分环节：表明控制器的输出与偏差持续的时间有关。只要偏差存在，控制就要发生改变，直到系统偏差为零。积分环节主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决于积分时间常数  $T_i$ ， $T_i$  越

大，积分作用越弱，易引起系统超调量加大，反之则越强，易引起系统振荡。

(3) 微分环节：对偏差信号的变化趋势做出反应，并能在偏差信号变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，减少调节时间。微分环节主要用来控制被调量的振荡，减小超调量，加快系统响应时间，改善系统的动态特性。

自从计算机进入控制领域以来，用数字计算机代替模拟调节器来实现 PID 控制算法具有更大的灵活性和可靠性。数字 PID 控制算法是通过式 (4.2) 离散化来实现的。以一阶后向差分近似代替连续系统的微分，得到 PID 位置控制算法表达式：

$$u(n) = K_p \left\{ e(n) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(j) + \frac{T_d}{T} [e(n) + e(n-1)] \right\} \quad (4.4)$$

式中：T 为采样周期；n 为采样序号；e(n) 为第 n 时刻的偏差信号；e(n-1) 为第 n-1 时刻的偏差信号。

实际控制中多采用增量式 PID 控制算法，其表达式为：

$$\begin{aligned} \Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = & K_p [e(n) - e(n-1)] \\ & + K_I e(n) + K_D [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \end{aligned} \quad (4.5)$$

式中： $\Delta u(n)$  为调节器输出的控制增量； $K_I = K_p \frac{T}{T_i}$ ； $K_D = K_p \frac{T_d}{T}$ 。

### 4.3.2 变频恒压供水系统的近似数学模型

由于变频恒压供水系统的控制对象是一个时变的、非线性的、滞后的、模型不稳定的对象，我们难以得出它的精确数学模型，只能进行近似等效。水泵由初始状态向管网进行恒压供水，供水管网从初始压力开始启动水泵运行，至管网压力达到稳定要求时经历两个过程：首先是水泵将水送到管

网中，这个阶段管网压力基本保持初始压力，这是一个纯滞后的过程；其次是水泵将水充满整个管网，压力随之逐渐增加直到稳定，这是一个大时间常数的惯性过程；然而系统中其他控制和检测环节，例如变频环节、继电控制转换、压力检测等的时间常数和滞后时间与供水系统的时间常数和滞后时间相比可忽略不计，均可等效为比例环节。因此，恒压供水系统的数学模型可以近似成一个带纯滞后的一阶惯性环节，即可以写成<sup>[16]</sup>：

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \quad (4.6)$$

式中：K 为系统的总增益，T 为系统的惯性时间常数， $\tau$  为系统滞后时间。

### 4.3.3 PID 参数整定

控制器参数整定的方法很多，归纳起来可分为两大类：理论计算整定法与工程整定法，常用的工程整定法有：动态特性参数法、稳定边界法、阻尼振荡法和现场经验整定法，本设计选用的是动态特性参数法，就是根据系统开环广义过程（包括调节阀  $W_v(s)$ 、被控对象  $W_o(s)$  和测量变送  $W_m(s)$ ）阶跃响应特性进行近似计算的方法<sup>[17]</sup>。

本系统是一个单闭环系统，结构框图如图 4.7 所示。

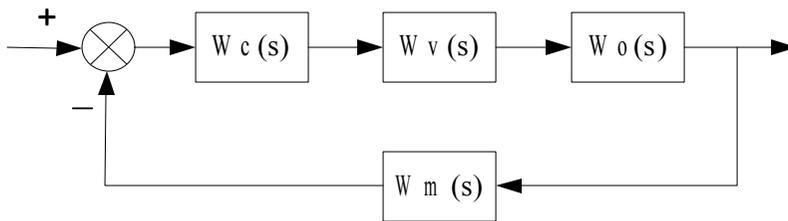


图 4.7 恒压供水系统结构框图

由于本设计对压力控制的要求较高，故选择 PI 控制器，其传递函数为：

$$W_c(s) = \frac{1}{\delta} \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad (4.7)$$

本系统可近似为带纯滞后的一阶惯性环节，假设其过程传递函数为  $W_o(s) = \frac{2}{300s+1} e^{-300s}$ ；变频器可近似为一个比例环节，即  $W_v(s) = 50$ ；反馈回路传递函数为  $W_m(s) = 0.03$ 。由于本系统具有自衡能力，与公式(4.8)、(4.9)可求的 PI 控制器各参数。

当  $0.2 \leq \frac{\tau}{T} \leq 1.5$  时，

$$\delta = 2.6 \frac{1}{\rho} \frac{\frac{\tau}{T} - 0.08}{\frac{\tau}{T} + 0.6} \quad (4.8)$$

$$T_I = 0.8T \quad (4.9)$$

计算的： $\delta = 3$ ， $T_I = 240$

PI 控制器的传递函数为： $W_c(s) = \frac{1}{3} \left( 1 + \frac{1}{240s} \right) = \frac{240s+1}{720s}$

用 matlab 软件仿真，编程如下：

```
s1=tf(2, [300, 1]);
s2=tf([240, 1], [720, 0]);
sk=s1*s2*50;
s=feedback(sk, 0.03);
step(s);
```

运行后得到的仿真波形图如图 4.8 所示，

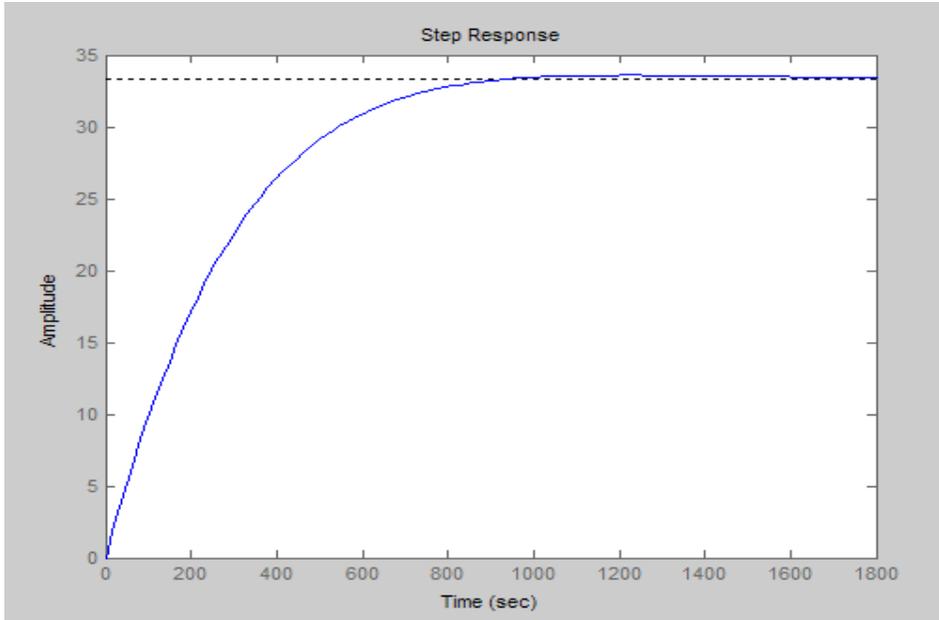


图 4.8 恒压供水系统阶跃响应仿真波形图

加入纯滞后环节后的仿真波形图如图 4.9 所示。

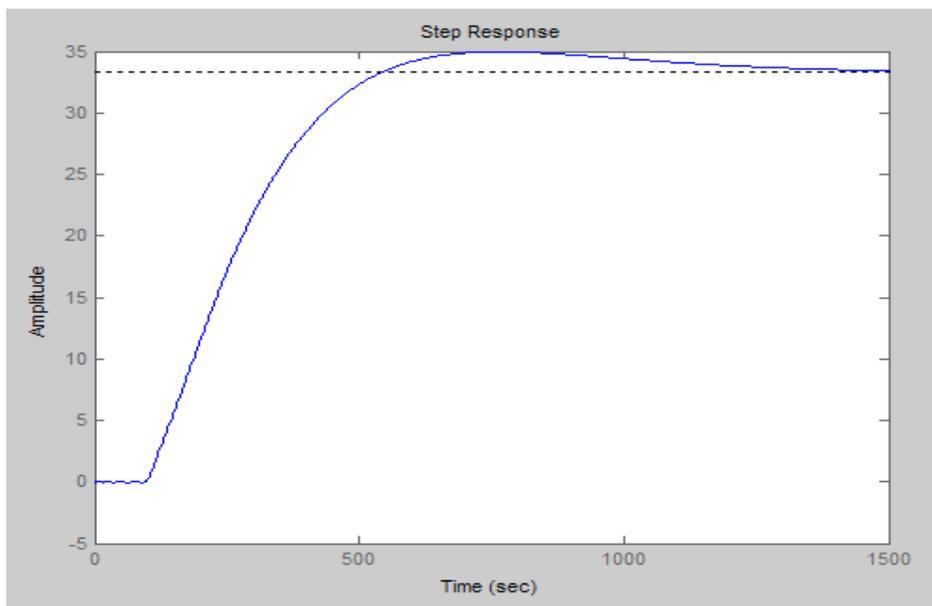


图 4.9 加入纯滞后环节后的仿真波形图

从图中不难看出，系统的调节时间较快，且能输出稳定的压力信号，完全符合设计的要求。

## 5 监控系统的设计

### 5.1 组态软件简介

组态软件一般有图形界面系统、实时数据库系统、第三方程序接口组件和控制功能组件组成。图形界面系统用于生成现场过程图形画面;实时数据库系统用于实时存储现场控制点的参数;第三方程序接口组件用于组态软件与其他应用程序交换数据;控制功能组件用于生成监控所需的控制策略。本设计中选择北京亚控公司的“组态王”软件制作监控系统。

### 5.2 监控系统的设计

#### 5.2.1 组态王的通信参数设置

本设计中用 S7-200 的 PPI 编程电缆实现计算机与 CPU 模块的通信。由于使用串行通信接口 1, 故双击工程浏览器的设备文件夹中的“COM1”图标, 在出现的对话框中设置波特率为 19200bit/s, 如图 5.1 所示。

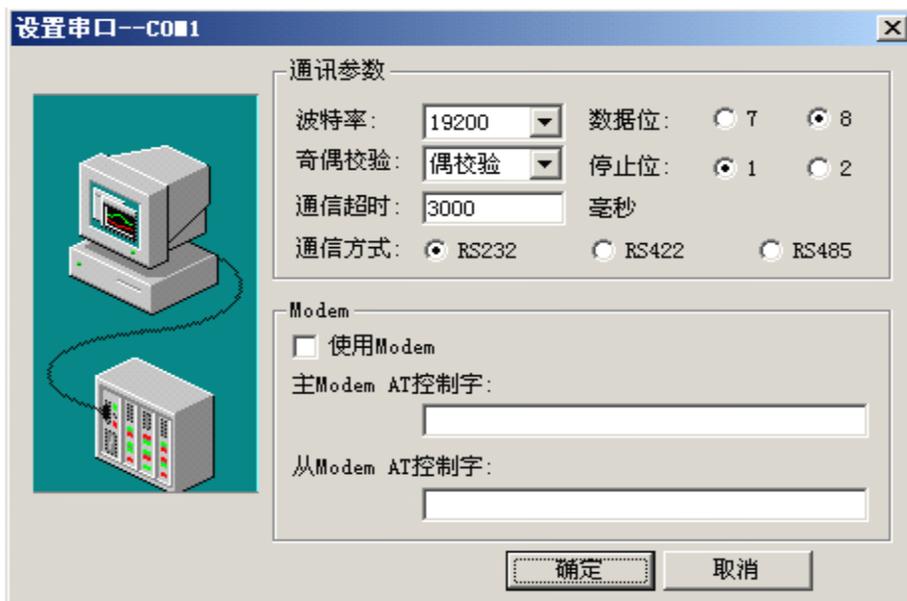


图 5.1 串行通信接口参数设置

选中“COM1”后，双击右侧工作区出现的“新建…”图标，在出现的对话框的“PLC”文件夹中选择西门子的 S7-200 系列，通信协议为 PPI（见图 5.2），设置好单击“下一步”直至“完成”，这样在右侧会出现刚生成的“新 IO 设备”图标，通信设置结束。



图 5.2 通信协议的设置

### 5.2.2 新建工程与组态变量

双击“组态王 6.52”启动工程管理器，新建一个工程，名为“恒压供水系统”，双击新建工程打开工程浏览器，点击工程浏览器中的“数据词典”图标，右面工作区会出现系统定义好的内存变量。双击最下面的“新建…”图标，弹出“定义变量”对话框（见图 5.3），开始定义输入输出变量。用同样的方法组态所有变量（见图 5.4）。

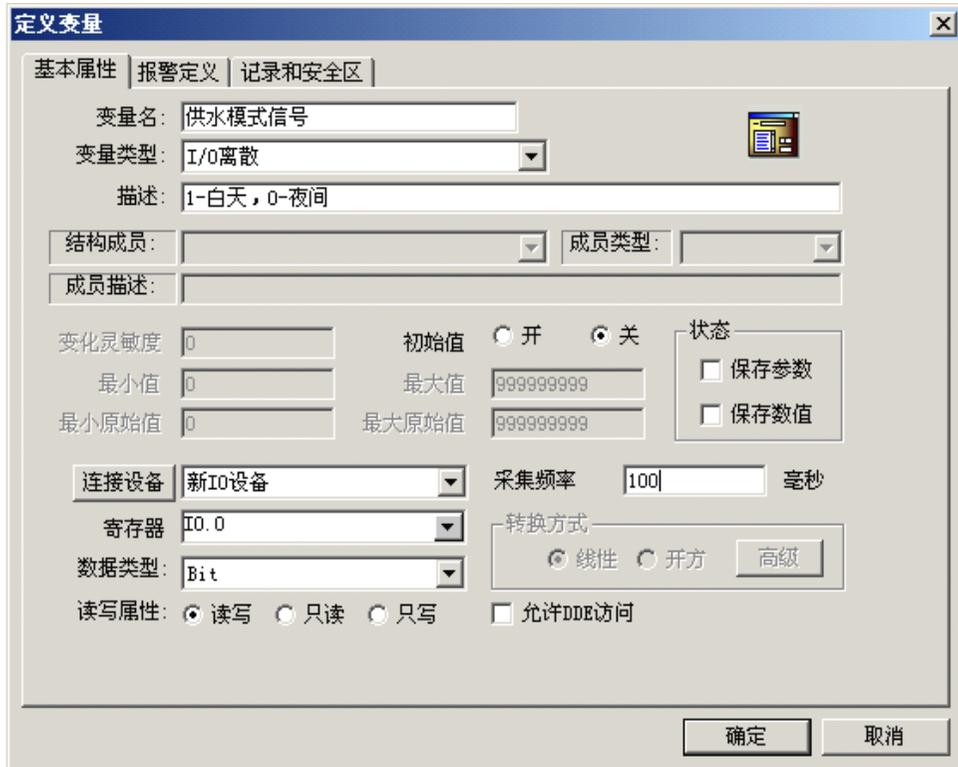


图 5.3 定义变量对话框

### 5.2.3 组态画面

#### (1) 建立新画面

单击工程浏览器左侧的“画面”图标，双击工作区“新建...”图标，弹出“新画面”对话框，输入名称点击确定进入组态王的开发系统。

#### (2) 制作动态监控画面

利用工具箱中各画图工具绘制监控系统界面，然后进行动画连接。

#### (3) 编写控制流程程序

双击工程浏览器左边窗口“\文件\命令语言\应用程序命令语言”进行编程。

#### (4) 按钮、指示灯组态

设定按钮或文字链接的对象，按钮既可以用来执行某些命令，还可以

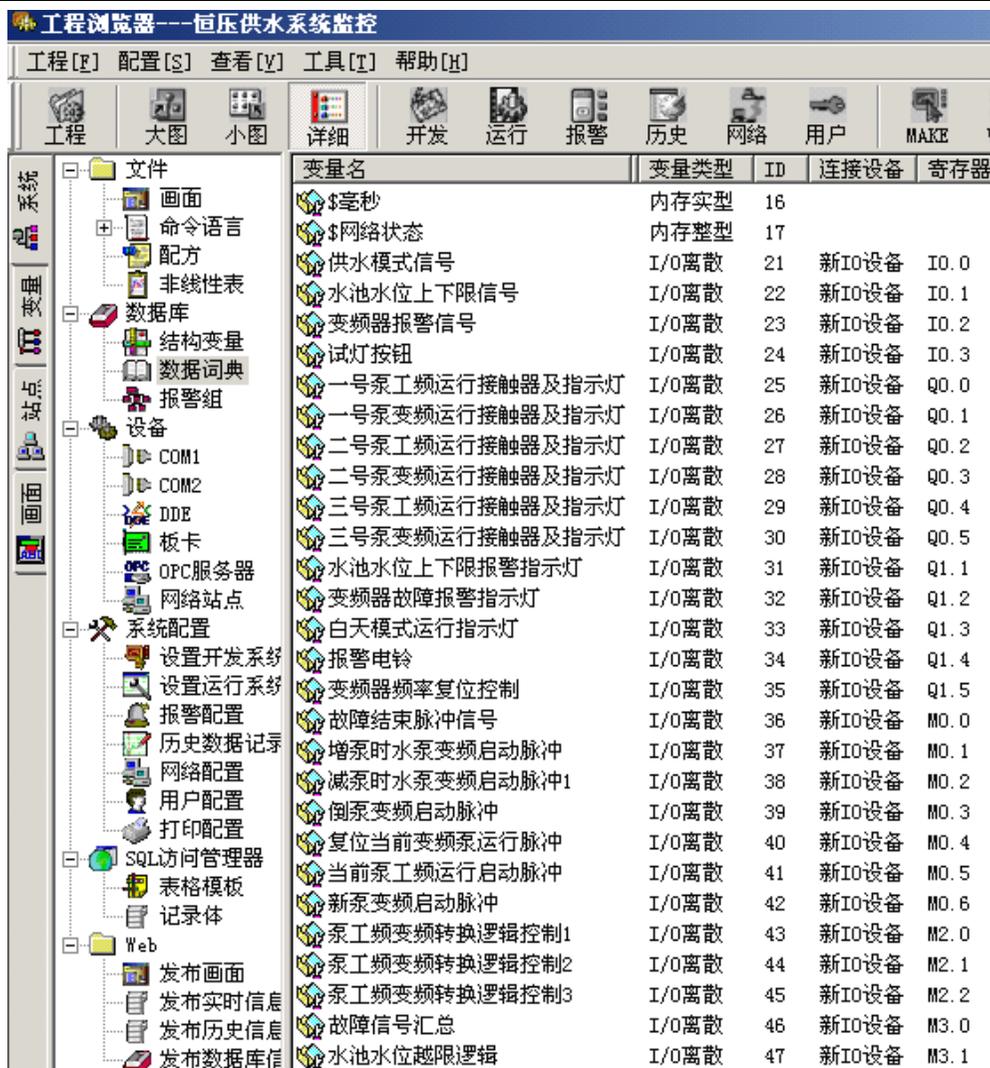


图 5.4 数据词典中的变量列表

输入数据给某些变量，当和外部的一些智能仪表、PLC 等进行连接时，会大大增加其数据传输的简洁性；指示灯组态后用于显示系统的工作状态。

### 5.2.4 监控系统界面

在本系统中，根据需要共开发了 5 个界面，包括启动界面(包含系统所有菜单)、系统运行主界面、历史和实时趋势曲线、数据报表、报警界

面。为了加强系统的安全性，系统还为不同的用户设置了相应的权限。通过主菜单界面可以调用不同的界面，也可根据需要在系统运行主界面中改变压力给定值。

系统运行主监控界面如图 5.5 所示，主界面实时显示了当前时间，设定的水压值和当前水压值，系统的自动/手动运行情况，三台水泵变频/工频运行状态、转速、运行频率，各设备的故障报警显示等。

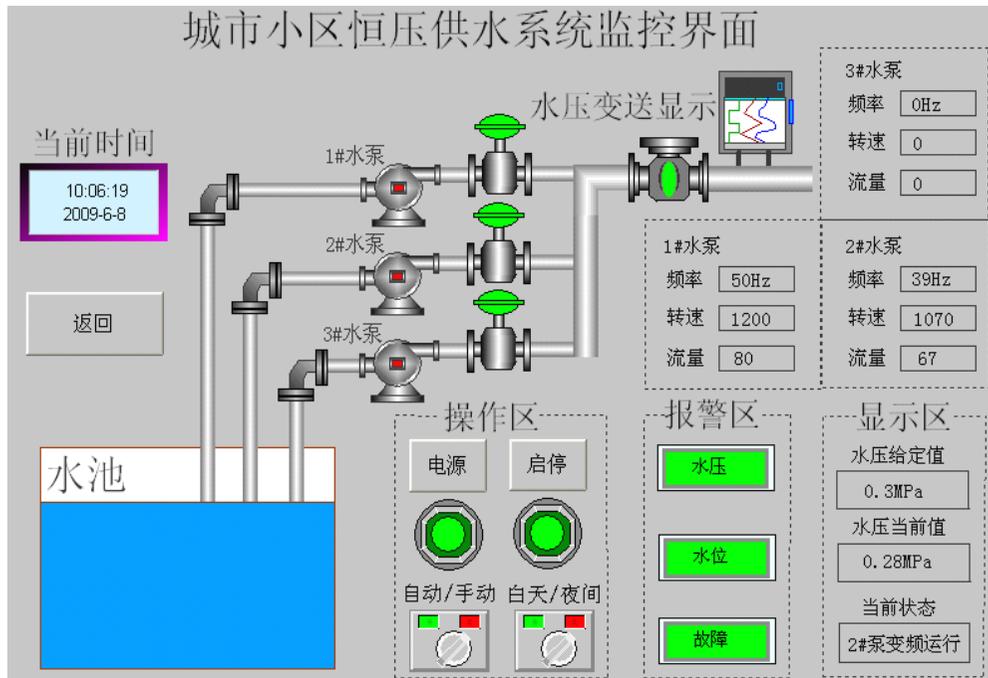


图 5.5 城市小区恒压供水系统监控界面

## 6 结束语

本文针对城市小区供水的特点，设计开发了一套基于 PLC 的变频恒压供水自动控制系统。该系统利用单台变频器实现多台水泵电机的软启动和调速，摒弃了原有的自耦降压启动装置，同时把水泵电机控制纳入自动控制系统。压力变送器采样管网压力信号经 PID 处理传送给变频器，变频器根据压力大小调节电机转速，通过改变水泵性能曲线来实现水泵的流量调节，保证管网压力恒定。该系统不仅有效地保证了供水系统管网压力恒定，而且具有工作可靠、施工简单、节能效果显著、全自动控制、无二次污染等优点。

本文主要的工作如下：

(1) 由 PLC、变频器实现生活用水的恒压控制。系统采用 PLC 实现对多泵切换的控制。通过变频器实现对三相水泵电机的软启动，由电动机的变频调速实现对水压的调节。

(2) 通过对控制过程和原理的分析，利用西门子 STEP7 MicroWIN 编程软件设计了一个用于恒压供水系统的程序，本程序包括顺序控制主程序，初始化子程序和中断子程序三部分。

(3) 对上位机组态监控系统进行了设计。根据泵站监控要求，利用组态王软件完成了泵站组态监控画面的各个功能的设计，系统界面清楚了，易于操作，能动态地显示当前运行情况、当前水压以及故障情况。

通过本次毕业设计，不仅使我巩固了对原有知识的掌握，还拓宽了我的知识面。在提高自己的同时，我也更加清楚地认识到自己的一些不足之处。比如：在硬件设备之间的连接，I/O 端口的分配，地址的分配这几方面自己起初不是很了解，但经过这半年的自学，以及向老师、同学们请教，我对这些知识有了更深入的理解。通过这半年的实践和学习，我学到了很

多课本中无法涉及到的知识，体会到了工程设计的复杂与困难，也感受到了亲自做出成绩的成功与喜悦，这些都为即将开始的研究生生活打下了坚实的基础。在以后的学习和生活中，我会不断的提高、充实自己，争取获得更大的成绩。

## 参考文献

1. 崔金贵. 变频调速恒压供水在建筑给水应用的理论探讨[J], 兰州铁道学院学报, 2000, 1:84-88
2. 张燕宾. 变频调速应用实践[M]. 北京:机械工业出版社, 2002, 135-137
3. 金传伟, 毛宗源. 变频调速技术在水泵控制系统中的应用[J], 电子技术应用, 2000, 2:38-39
4. 张燕宾. SPWM 变频调速应用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2002, 244-251
5. Cynthia Cooper. Programmable Logic Controller[J], the free wikipedia encyclopedia, 2002, 3:1-8
6. 廖常初. PLC 编程及应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2008, 14-16
7. 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1998, 316-317
8. 马桂梅, 谭光仪, 陈次昌. 泵变频调速时的节能方案讨论[J], 四川工业学院学报, 2003, 3:5-7
9. 林俊赞, 李雄松, 尹元日. PLC 在恒压供水控制系统中的应用[J], 电机电器技术, 1999, 3:45-48
10. 吴浩烈. 电机及电力拖动基础[M]. 重庆:重庆大学出版社, 1996, 173-174
11. 杨东平. 变频调速恒压供水系统综述[J], 南宁职业技术学院学报, 2004, 4:38-45
12. 耿红旗, 吕冬艳. 可编程序控制器应用教程[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2001, 45-60
13. M K Chung. Optimum values of design variables versus specific speed for centrifugal pumps[J], Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers,

1999, 3: 219-227

14. 郑兆生, 张伟, 郑新志. PLC 及变频器恒压供水控制系统设计[J], 山东轻工业学院学报, 2007, 3: 123-138

15. XueDun-song. The energy-saving technology of water-injection systems in domestic and abroad oil filed[J], Energy Conervation of Oilfield 1998, 9: 11-25

16. Russell P Fleming. Introducing the variable speed pump[J], NFPA Journal, 2004, 5: 26-33

17. 邵裕森, 戴先中. 过程控制工程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007, 166-169

## 致谢

首先衷心的感谢我的论文指导老师高宏岩老师。在我做毕业设计的过程中得到了高老师的悉心指导。从设计的开始到论文的定稿，整个过程处处凝结着老师的心血。高老师渊博的学识，严谨的治学态度，务实的工作作风都深深地影响着我，并将成为我以后学习和工作的榜样。在此谨向高老师表示衷心的感谢。

在这半年的毕业设计的过程中，我还得到了本组同学、本班同学的大力帮助，我们一起学习，一起探讨问题、解决问题。当我遇到困难时，他们给了我许多好的建议和无私的帮助。在此，对所有给予我帮助的同学表示衷心的感谢。

## 附录

### 附录 A 英文文献

#### **Programmable logic controller**

Cynthia Cooper

From Wikipedia, the free encyclopedia

A programmable logic controller or simply programmable controller is a digital computer used for automation of industrial processes, such as control of machinery on factory assembly lines. Unlike general-purpose computers, the PLC is designed for multiple inputs and output arrangements, extended temperature ranges, immunity to electrical noise, and resistance to vibration and impact. Programs to control machine operation are typically stored in battery-backed or non-volatile memory. A PLC is an example of a real time system since output results must be produced in response to input conditions within a bounded time, otherwise unintended operation will result.

#### Features

Control panel with PLC (grey elements in the center). The unit consists of separate elements, from left to right; power supply, controller, relay units for input and output.

The main difference from other computers is that PLCs are armored for severe condition (dust, moisture, heat, cold, etc) and have the facility for extensive input/output (I/O) arrangements. These connect the PLC to sensors and actuators. PLCs read limit switches, analog process variables (such as temperature and pressure), and the positions of complex positioning systems.

Some even use machine vision. On the actuator side, PLCs operate electric motors, pneumatic or hydraulic cylinders, magnetic relays or solenoids, or analog outputs. The input/output arrangements may be built into a simple PLC, or the PLC may have external I/O modules attached to a computer network that plugs into the PLC.

PLCs were invented as replacements for automated systems that would use hundreds or thousands of relays, cam timers, and drum sequencers. Often, a single PLC can be programmed to replace thousands of relays.

Programmable controllers were initially adopted by the automotive manufacturing industry, where software revision replaced the re-wiring of hard-wired control panels when production models changed.

Many of the earliest PLCs expressed all decision making logic in simple ladder logic which appeared similar to electrical schematic diagrams. The electricians were quite able to trace out circuit problems with schematic diagrams using ladder logic. This program notation was chosen to reduce training demands for the existing technicians. Other early PLCs used a form of instruction list programming, based on a stack-based logic solver.

The functionality of the PLC has evolved over the years to include sequential relay control, motion control, process control, distributed control systems and networking. The data handling, storage, processing power and communication capabilities of some modern PLCs are approximately equivalent to desktop computers. PLC-like programming combined with remote I/O hardware, allow a general-purpose desktop computer to overlap some PLCs in certain applications.

Under the IEC 61131-3 standard, PLCs can be programmed using standards-based programming languages. A graphical programming notation called Sequential Function Charts is available on certain programmable controllers.

#### PLC compared with other control systems

PLCs are well-adapted to a range of automation tasks. These are typically industrial processes in manufacturing where the cost of developing and maintaining the automation system is high relative to the total cost of the automation. PLCs contain input and output devices compatible with industrial pilot devices and controls. PLC applications are typically highly customized systems so the cost of a packaged PLC is low compared to the cost of a specific custom-built controller design. On the other hand, in the case of mass-produced goods, customized control systems are economic due to the lower cost of the components, which can be optimally chosen instead of a "generic" solution。

For high volume or very simple fixed automation tasks, different techniques are used. For example, a consumer dishwasher would be controlled by an electromechanical cam timer costing only a few dollars in production quantities.

A microcontroller-based design would be appropriate where hundreds or thousands of units will be produced and so the development cost (design of power supplies and input/output hardware) can be spread over many sales, and where the end-user would not need to alter the control. Automotive applications are an example; millions of units are built each year, and very few end-users alter the programming of these controllers. However, some

specialty vehicles such as transit busses economically use PLCs instead of custom-designed controls, because the volumes are low and the development cost would be uneconomic.

Very complex process control, such as used in the chemical industry, may require algorithms and performance beyond the capability of even high-performance PLCs. Very high-speed or precision controls may also require customized solutions; for example, aircraft flight controls.

PLCs may include logic for single-variable feedback analog control loop, a "proportional, integral, derivative" or "PID controller." A PID loop could be used to control the temperature of a manufacturing process, for example. Historically PLCs were usually configured with only a few analog control loops; where processes required hundreds or thousands of loops, a distributed control system (DCS) would instead be used. However, as PLCs have become more powerful, the boundary between DCS and PLC applications has become less clear-cut.

#### Digital and analog signals

Digital or discrete signals behave as binary switches, yielding simply an On or Off signal (1 or 0, True or False, respectively). Push buttons, limit switches, and photoelectric sensors are examples of devices providing a discrete signal. Discrete signals are sent using either voltage or current, where a specific range is designated as On and another as Off. For example, a PLC might use 24 V DC I/O, with values above 22 V DC representing On, values below 2VDC representing Off, and intermediate values undefined. Initially, PLCs had only discrete I/O.

Analog signals are like volume controls, with a range of values between zero and full-scale. These are typically interpreted as integer values (counts) by the PLC, with various ranges of accuracy depending on the device and the number of bits available to store the data. As PLCs typically use 16-bit signed binary processors, the integer values are limited between -32,768 and +32,767. Pressure, temperature, flow, and weight are often represented by analog signals. Analog signals can use voltage or current with a magnitude proportional to the value of the process signal. For example, an analog 4-20 mA or 0 - 10 V input would be converted into an integer value of 0 - 32767.

#### Example

As an example, say a facility needs to store water in a tank. The water is drawn from the tank by another system, as needed, and our example system must manage the water level in the tank.

Using only digital signals, the PLC has two digital inputs from float switches (tank empty and tank full). The PLC uses a digital output to open and close the inlet valve into the tank.

When the water level drops enough so that the tank empty float switch is off (down), the PLC will open the valve to let more water in. Once the water level raises enough so that the tank full switch is on (up), the PLC will shut the inlet to stop the water from overflowing.

An analog system might use a water pressure sensor or a load cell, and an adjustable (throttling)dripping out of the tank, the valve adjusts to slowly drip water back into the tank.

In this system, to avoid 'flutter' adjustments that can wear out the valve, many PLCs incorporate "hysteresis" which essentially creates a "deadband" of

activity. A technician adjusts this deadband so the valve moves only for a significant change in rate. This will in turn minimize the motion of the valve, and reduce its wear.

A real system might combine both approaches, using float switches and simple valves to prevent spills, and a rate sensor and rate valve to optimize refill rates and prevent water hammer. Backup and maintenance methods can make a real system very complicated.

### System scale

A small PLC will have a fixed number of connections built in for inputs and outputs. Typically, expansions are available if the base model does not have enough I/O.

PLCs used in larger I/O systems may have peer-to-peer (P2P) communication between processors. This allows separate parts of a complex process to have individual control while allowing the subsystems to co-ordinate over the communication link. These communication links are also often used for HMI (Human-Machine Interface) devices such as keypads or PC-type workstations. Some of today's PLCs can communicate over a wide range of media including RS-485, Coaxial, and even Ethernet for I/O control at network speeds up to 100 Mbit/s.

### Programming

Early PLCs, up to the mid-1980s, were programmed using proprietary programming panels or special-purpose programming terminals. they were designed to replace relay logic systems. These PLCs were programmed in "ladder logic", which strongly resembles a schematic diagram of relay logic. Modern PLCs can be programmed in a variety of ways, from ladder logic to

more traditional programming languages such as BASIC and C. Another method is State Logic, a Very High Level Programming Language designed to program PLCs based on State Transition Diagrams.

Recently, the International standard IEC 61131-3 has become popular. IEC 61131-3 currently defines five programming languages for programmable control systems: FBD (Function block diagram), LD (Ladder diagram), ST (Structured text, similar to the Pascal programming language), IL (Instruction list, similar to assembly language) and SFC (Sequential function chart). These techniques emphasize logical organization of operations.

While the fundamental concepts of PLC programming are common to all manufacturers, differences in I/O addressing, memory organization and instruction sets mean that PLC programs are never perfectly interchangeable between different makers. Even within the same product line of a single manufacturer, different models may not be directly compatible.

#### User interface

PLCs may need to interact with people for the purpose of configuration, alarm reporting or everyday control. A Human-Machine Interface (HMI) is employed for this purpose. HMI's are also referred to as MMI's (Man Machine Interface) and GUI (Graphical User Interface).

A simple system may use buttons and lights to interact with the user. Text displays are available as well as graphical touch screens. Most modern PLCs can communicate over a network to some other system, such as a computer running a SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) system or web browser.

#### Communications

PLCs usually have built in communications ports usually 9-Pin RS232, and optionally for RS485 and Ethernet. Modbus or DF1 is usually included as one of the communications protocols. Others' options include various fieldbuses such as DeviceNet or Profibus.

### History

The PLC was invented in response to the needs of the American automotive industry. Before the PLC, control, sequencing, and safety interlock logic for manufacturing automobiles was accomplished using relays, timers and dedicated closed-loop controllers. The process for updating such facilities for the yearly model change-over was very time consuming and expensive, as the relay systems needed to be rewired by skilled electricians. In 1968 GM Hydramatic (the automatic transmission division of General Motors) issued a request for proposal for an electronic replacement for hard-wired relay systems.

The winning proposal came from Bedford Associates of Bedford, Massachusetts. The first PLC, designated the 084 because it was Bedford Associates' eighty-fourth project, was the result. Bedford Associates started a new company dedicated to developing, manufacturing, selling, and servicing this new product: Modicon, which stood for MODular DIGital CONTroller. One of the people who worked on that project was Dick Morley, who is considered to be the "father" of the PLC. The Modicon brand was sold in 1977 to Gould Electronics, and later acquired by German Company AEG and then by French Schneider Electric, the current owner.

The automotive industry is still one of the largest users of PLCs, and Modicon still numbers some of its controller models. PLCs are used in many

---

different industries and machines such as packaging and semiconductor machines. Well known PLC brands are Toshiba, Siemens, Allen-Bradley, ABB, Mitsubishi, Omron, and General Electric.

## 附录 B 中文翻译

### 可编程逻辑控制器

辛西娅·库珀

维基自由百科全书

可编程逻辑控制器或者简易可编程控制器是一种数字化的计算机，它应用于工业自动化的生产过程中，比如工厂装配生产线中机械的控制。不同于普通用途的计算机，可编程逻辑控制器是专为安排多输入和多输出而设计的，它拓展了工作温度范围，可抑制电气噪声，抗振动和干扰。程序控制机器操作指令通常存储在备用电池或非易失性存储器中。PLC 要求实时系统的输出结果在一个时间范围内必须对输入条件做出响应，否则会导致意想不到的结果。

#### 特征

PLC 的控制面板（灰色元素的中心），它的每个单位都是由单独的元素组成的，由左向右分别是：电源供应器，控制器，继电器单元的输入输出。

PLC 和其他计算机的主要区别是它适用于各种恶劣环境条件下（如灰尘，潮湿，高温，低温等），并配备了适合于各种输入/输出端口的设备。这些设备将 PLC 连接到相应的传感器和信号发生器上。PLC 可以定义各种开关量，模拟量（如温度和压力等）用来配置各种复杂系统的各种变量，一些 PLC 甚至还需要使用机器视觉。在信号发生器方面，PLC 可以控制的设备有电动机，气压缸或液压缸，电磁继电器或螺线管继电器，以及一些模拟输出设备。通过输入/输出模块的配置，可以构建一个简单的 PLC 系统。这个 PLC 系统可以通过外部 I/O 模块连接到一个计算机网络上。

PLC 的出现改变了过去使用成百上千的继电器，凸轮定时器，鼓音序器来构建一个自动化系统的时代。通常，一个简单可编程控制器通过编程，以取代成千上万的继电器。可编程控制器最初应用于汽车制造业中，软件修改取代了硬连线控制面板的重新布线，这标志着生产模式发生了彻底的改变。

许多早期的 PLC 设计表明，在简单的梯形逻辑的决策中，已经出现了类似梯形图的电气原理图。电工们通过使用梯形逻辑能够很方便的查找出电路示意图的问题。这项计划符号的选择使用可以降低培训其现有的技术人员的要求。而其他早期的 PLC 则使用一种基于堆栈的逻辑解决方法——指令表编程的方式。

PLC 的功能经过多年的发展，已经包括顺序控制，运动控制，过程控制，分布式控制系统和网络控制系统等多个方面。一些现代的 PLC 的数据处理，储存，整理能力和通信能力，已大约相当于台式电脑了。可编程控制器的编程结合远程 I/O 硬件，允许通用台式电脑进行一些 PLC 方面的特定应用。

根据国际电工委员会 61131-3 标准，PLC 的编程可以使用基于标准的编程语言。所谓顺序功能图的图形符号编程适用于某些特定的可编程控制器。

#### 可编程控制器与其他控制系统

PLC 可以很好的适应各种自动化任务。这些都是典型的工业机械生产，在这些部门自动控制系统的高额费用是与其昂贵的的制造维护费用分不开的。PLC 能控制输入输出设备并兼容工业试验装置和控制。通常 PLC 应用于高度定制的系统，以便使组装 PLC 的成本低于设计控制器的成本。另外，在大规模生产产品方面，自定义的控制系统是经济的，由于他的组成部分成本较低。这是代替通用解决方案的最佳选择。

为大批量或者简单的固定自动化任务，不同的技术被采用。例如：消费者洗碗机被成本只有几美元的机电凸轮计时器控制。

微处理器的设计要考虑成百上千的组成单元，以便开发成本（电源供应器和输入输出硬件的设计）能遍布到很多销售领域，并且最终用户不需要改变控制。汽车应用是一个例子，每年有数以百万辆汽车被制造，只有极少数最终用户改变控制程序。然而，一些特殊车辆，如使用 PLC 系统代替定制设计控制的过境巴士因为使用量少所以开发费用不够经济。

复杂的过程控制，如用于化学工业的过程控制要求的算法和性能甚至超过了高性能的 PLC 控制。高速度和精度的控制也可能需要量身定制的解决方案，如飞机的飞行控制。

PLC 系统包括逻辑单变量反馈模拟控制回路，一个“比例、积分、导数”或“控制器”。PID 回路可用于控制制造过程的温度，例如历史上的 PLC 通常只用于少数模拟控制回路这个过程需要成百上千的循环、分布式控制系统（DCS）将代替使用。然而，由于 PLC 的功能越来越强大，DCS 与 PLC 的界定越发的不明确。

### 数字和模拟信号

数字或离散信号表现为二进制开关信号，收益率只是一个闭合或关断信号。按钮、限位开关、光电传感器能提供了一个离散信号。离散信号以电压或电流的形式传送，它在一个特定的范围内被设置成开和关。例如：PLC 必须使用 24 伏直流电压的 I/O 口，高于 22 伏直流电压代表开，低于 2 伏直流电压代表关，中间值不确定。最初，PLC 只有离散的 I/O 接口。

模拟信号和音量控制一样，在零和满量程之间有一系列的值。这些常常被定义为 PLC 中的整数，它的范围取决于设备中可用来存储比特数据的存储单元的数量。由于 PLC 通常使用 16 位有符号二进制处理器，整数值被限定在-32768—+32767 之间。压力、温度、流量、重量往往代表的

模拟信号。模拟型号可以使用与原信号成正比的电压或电流信号。例如：一个 4-20mA 的电流信号或者 0-10V 的电压信号将被转化成一个 0-32767 之间的整型值。

### 事例

水箱可以作为一个例子。一个设备用于向水箱中注水，另一个设备用于从水箱中取水，根据需要，我们必须建立一个系统去控制水箱的水位。

若只用数字信号，PLC 有两个数字输入开关量（水箱空和水箱满）。PLC 有一个数字输出量去控制水箱阀门的开关。

当水位下降使得水箱空箱开关关闭时，PLC 将会打开阀门使更多的水进入。一旦水位升高到一定高度使得满箱开关闭合，PLC 将会临时关闭进水阀门防止水的溢出。

一个模拟系统可能会使用水位的压力传感器、可调（节流）出水阀和调节阀来逐渐提高水箱水位。

在这一系统中，为了避免损坏阀的扰动调节器，很多的 PLC 加入“滞后”环节，基本上实现了“死区”的活动。技术员通过调整死区，使阀只在有一个显着变化率的时刻动作。这将依次把阀门的动作减到最少，从而减少其磨损。

一个真正的系统可能把这两种做法结合起来，使用浮动开关和简单阀门来防止泄漏，使用速率传感器和速度阀来优化水位上升速率并防止水锥的发生。考虑到支持性的维护方法，一个实际的系统将会非常复杂。

### 系统规模

一个小型 PLC 将有固定数量的 I/O 接口。通常情况下，如果相应的模型并没有足够的 I/O 接口，则需要扩展 I/O 口。

在较大的 I/O 系统中，PLC 可能使用点对点（P2P）的处理器通信。这使得一个复杂过程的单独部分有各自的控制，同时又允许各子系统同级

之间进行通信联系。这些通讯联系常常被用于 HMI（人机界面）设备，如键盘或 PC 型工作站。当今某些 PLC 可以通过各种各样的设备进行通信联系，包括 RS-485 接口，同轴电缆，和具有速度高达 100 兆比特/秒的网络控制 I/O 的以太网。

### 编程

早期的 PLC（直至 20 世纪 80 年代中期）使用专有的编程渠道或特殊用途的编程终端进行编程。它们是用来取代继电器逻辑系统的。这些 PLC 用梯形图编程，其非常类似于继电器逻辑示意图。现代的 PLC 可以以各种方式编程，从梯形图到更传统的编程语言，如 BASIC 和 C，另一种高级程序设计语言是 State Logic，它是基于状态转移图设计 PLC 程序的。

最近，国际标准 IEC61131-3 已经流行。目前的 IEC61131-3 为可编程控制系统定义了 5 种编程语言：FBD（功能框图），LD（梯形图），ST（结构化文本），IL（指示表）和 SFC（顺序功能图）。这些技术强调动作的逻辑组织。

所有制造商 PLC 编程的基本概念是共同的，分歧在于 I/O 的选择，存储组织的安排和指令集，所以不同生产商之间的 PLC 程序从来都不可以完全的互换。即使是同一制造商同一产品线，不同的模式也可能无法兼容。

### 用户界面

PLC 为了配置，报警或日常控制的目的可能需要人机互动交流。HMI（人机界面）因此而产生。人机界面包括 MMI（人机接口）和 GUI（图形用户界面）。

一个简单的系统可以使用按钮和灯来与用户互动。文字显示以及图形化的触摸屏也可能用到。最现代的 PLC 可以通过网络连接到其他的系统，如运行 SCADA（监控和数据采集系统）的计算机系统或网络浏览器。

### 通信

PLC 的内置通信端口通常使用 9 针的 RS232 串口，并选择性使用 RS485 的和以太网。Modbus 协议或 DF1 是常用的一种通信协议。其他通信协议包括各种现场总线，如 DeviceNet 现场总线或 Profibus 现场总线等。

### 历史

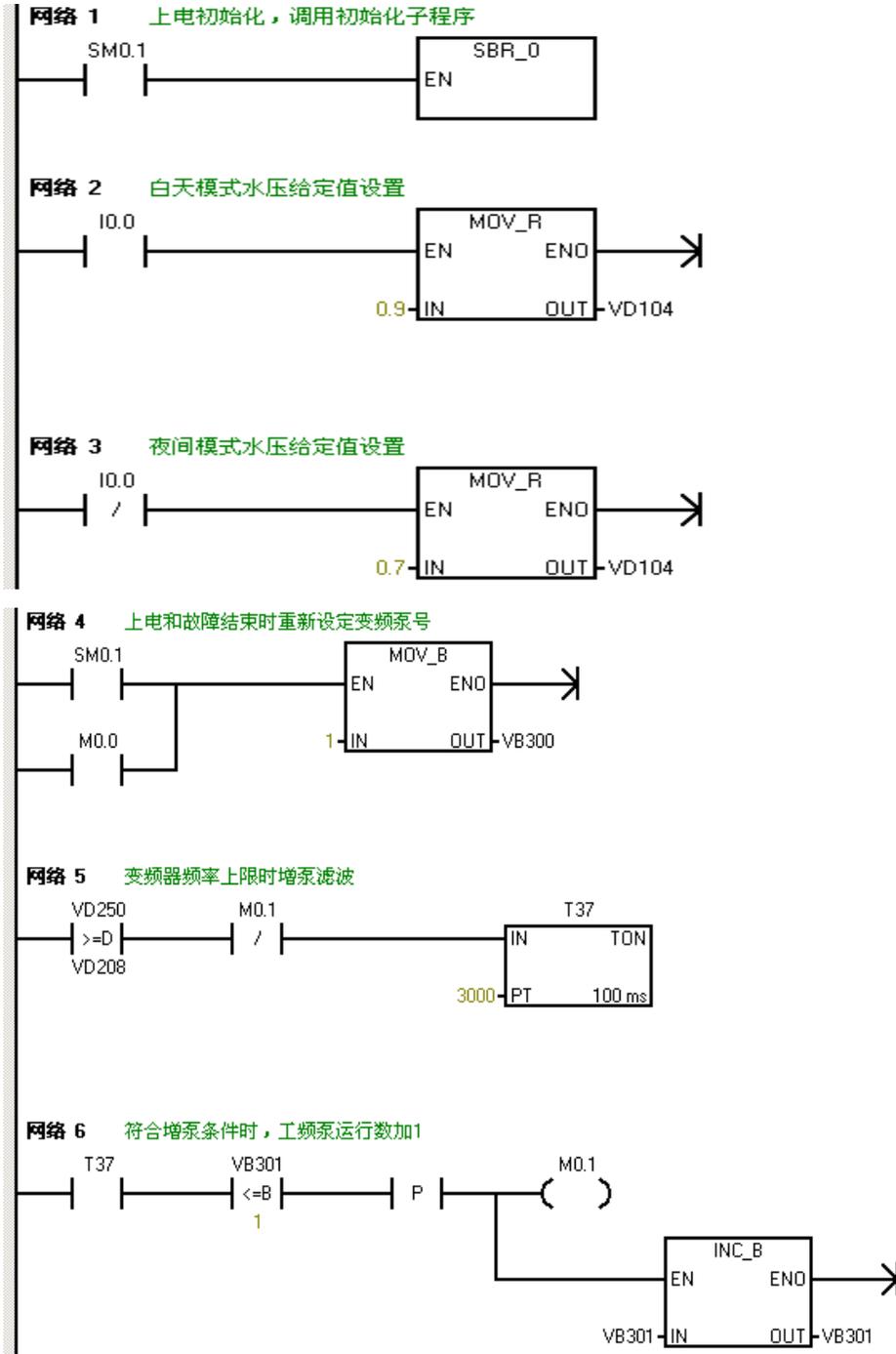
PLC 是应美国汽车业发展的需要而产生的。在 PLC 产生之前，汽车使用继电器进行顺序控制和安全联锁逻辑，制造定时器和专用闭环控制器。每年模型转换是非常耗时和昂贵的，而且中继系统需要有熟练的电工才能操作。在 1968 年通用汽车公司发出一份为硬连线中继系统寻找一个电子替代品的建议书。

中标投标书来自贝德福德，马萨诸塞州的贝德福德联营公司。第一个 PLC，被命名为 084，因为它是贝德福德的第八十四个项目的结果。贝德福德联营协会创建了一个新的公司，它致力于开发，制造，销售和服务这一新产品：莫迪康，它代表模块化数字控制器。该项目主持者切尼莫雷，被认为是“PLC 之父”。该莫迪康品牌在 1977 年被古尔德电子收购，后来又被德国 AEG 公司收购，然后是法国施耐德电气，也是目前的所有者。

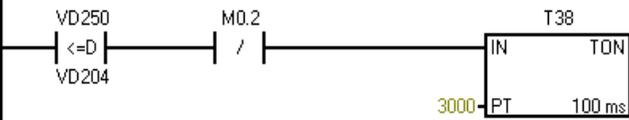
汽车行业仍然是最大的一个 PLC 用户，莫迪康仍然标称一些控制器的模型。PLC 应用在许多不同的行业和机器上，如包装机和半导体设备。众所周知，PLC 的品牌有东芝，西门子，艾伦布拉德利，ABB，三菱，欧姆龙和通用电气等。

### 附录 C 主程序梯形图

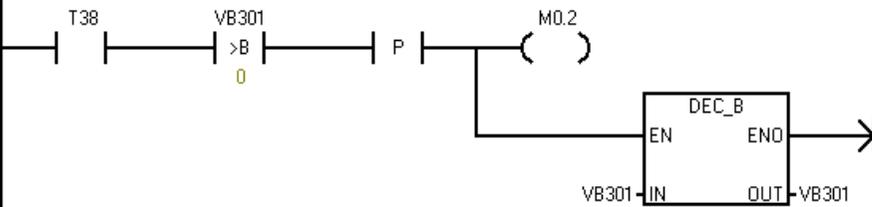
变频恒压供水系统主程序梯形图如图 c.1 所示。



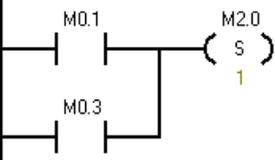
**网络 7** 变频器频率下限时减泵滤波



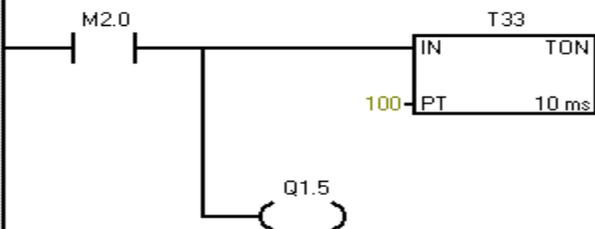
**网络 8** 符合减泵条件时，工频泵运行数减1



**网络 9** 变频增泵或倒泵时，置位M2.0



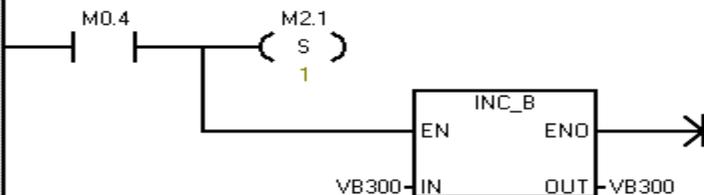
**网络 10** 复位变频器频率，为软启动做准备

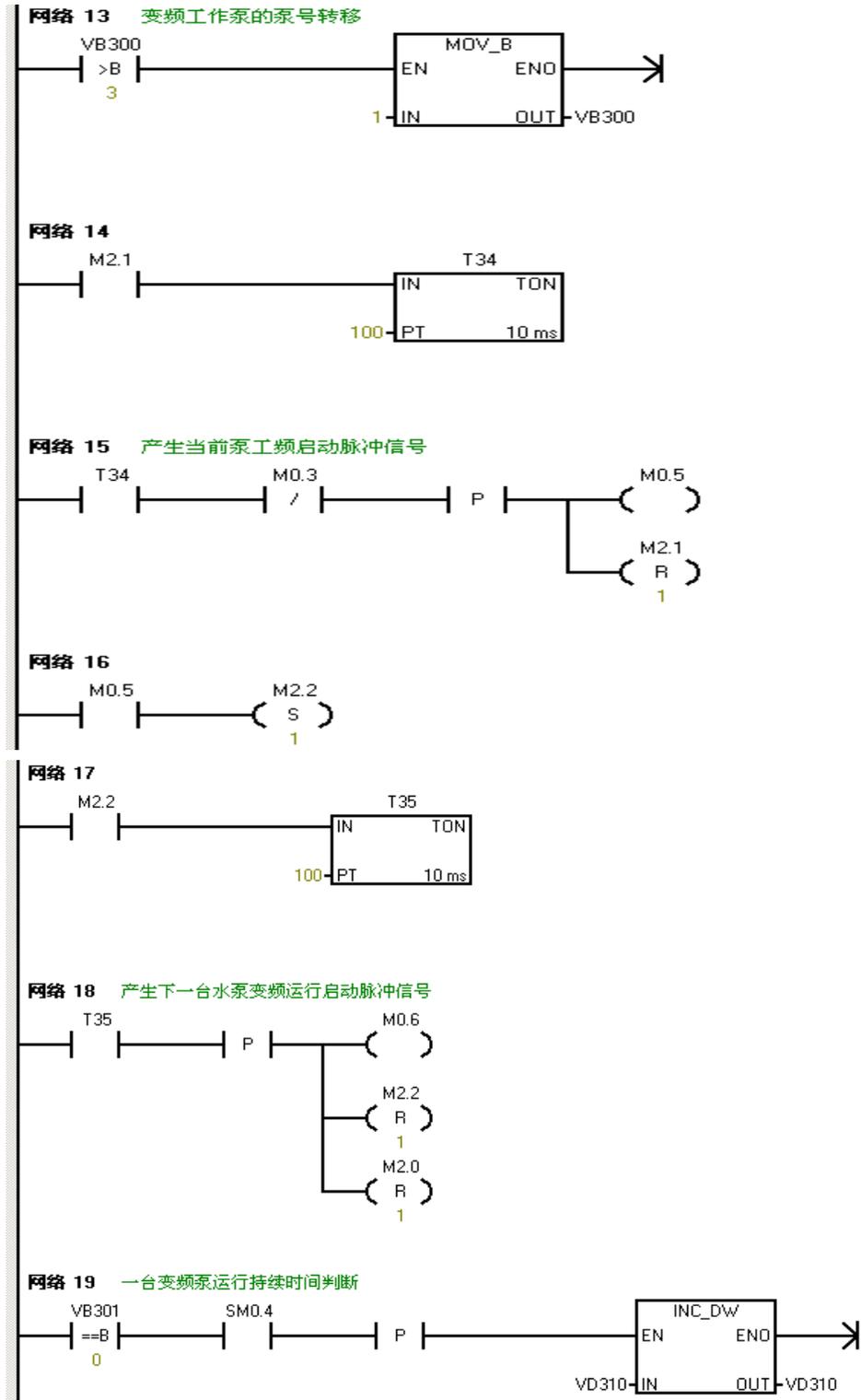


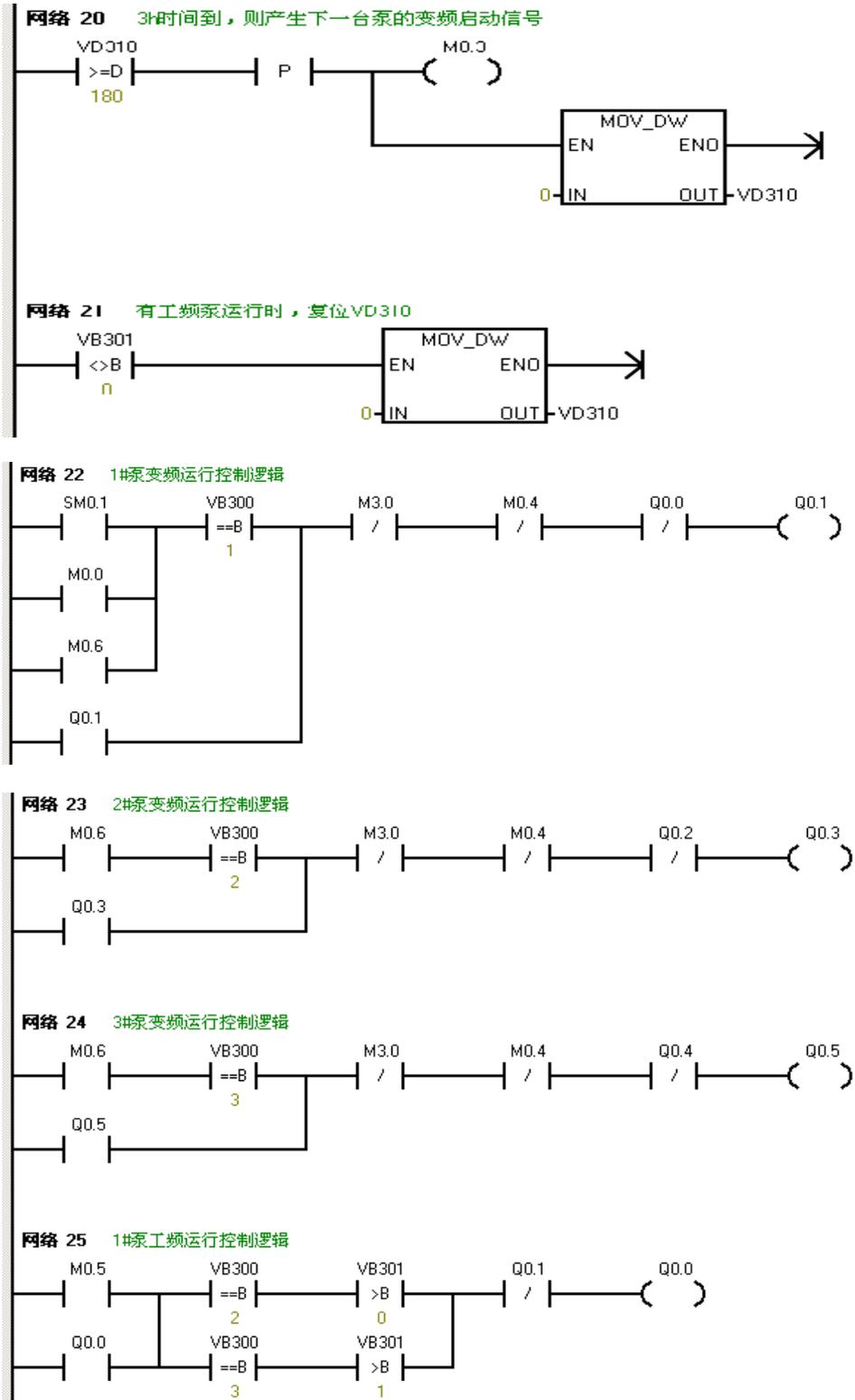
**网络 11** 产生关断当前变频泵脉冲信号

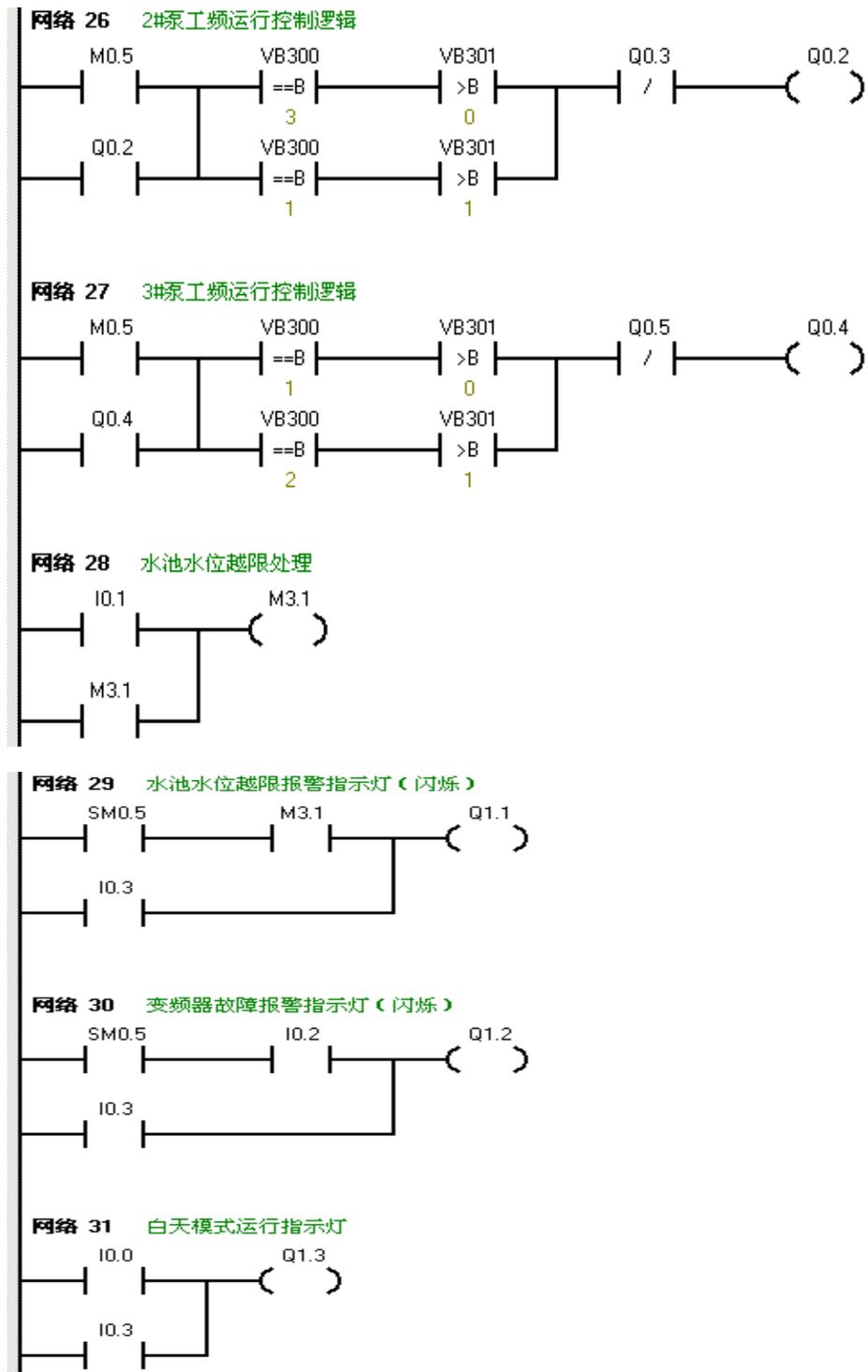


**网络 12** 变频泵号加1









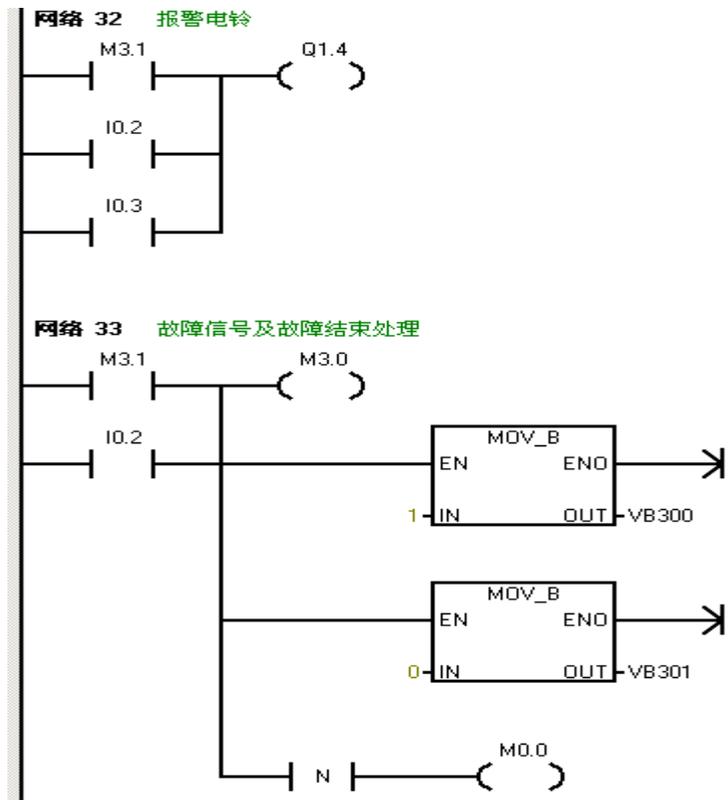


图 c.1 变频恒压供水系统主程序梯形图