

系统动态响应快。但模糊控制缺少积分控制的作用，导致了模糊控制的静态性能比较差。PID 控制的静态性能比较好，恰好可以弥补这一缺陷，在小压差范围内，PID 控制供水系统，水压也很恒定。因此，在供水系统中应用 Fuzzy—PID 复合控制，可以获得满意的控制效果。同时引入自调整修正因子以增强控制系统的自适应能力，从而构成自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统。

本论文较为全面地系统地研究探讨了供水系统的整个设计计算过程，包括水泵流体力学，水泵节能原理及计算模型，供水系统流量扬程管路计算，自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制系统的软硬件设计计算选型实现等。

关键词：供水系统，Fuzzy-PID，自调整，修正因子，寿命周期成本，变频器，PLC

## ABSTRACT

Pump system are widespread, they account for nearly 1/3 of the world's electrical energy demand and range from 25~50% of the energy usage in certain industrial plant operation. In Pump life cycle costs, energy costs and maintenance costs made up to 80% of their total costs, so it is very important to optimize control of pump systems. The help of the advance technique and experience of internal and external give us a opportunity to degrade costs and solve a series of problem.

The study on the optimal control of pump system is very superficial and the literature on them concentrated on the pumps combinations and pump life cycle costs. So we must look for new algorithms and stand on highlight of pump system life cycle costs to minimize waste and maximize energy efficiency.

The installed capacity of pumps is selected according to the largest required flow and the largest required head at disadvantageous conditions. But in fact, water demand is much less than the flow and the head at most of the time, the pump system's ability is oversized, and at the same time, pumps head rise up much more than head demand and pump's efficiency is degraded, so pump system waste much head, flow and efficiency. Variable speed can change the pump's character to fit the changeable water demand. Degrade the excrescent head and upgrade the pump's

efficiency, so improve the system's efficiency and save the energy usage.

Pump system's control process have nonlinear, coupling, multi-variable and fluky character, which lead to pressure unstable, and hard to establish mathematical model, ordinal method is hard to keep constant pressure. But fuzzy control can solve this problem. Fuzzy control need not establish mathematical model, control pump system have good effect. Because fuzzy controller have error and error movement as input, when error is large, dynamic response quickly, but fuzzy control lack of integral effect, lead to fuzzy control static performance worse. PID control has good static performance, just make up of the defect, when error is small, PID control can ensure constant pressure. So we use fuzzy-PID compound control in pump.system, we adhibit a self-adjusting regulation factor to improve the control system adapt ability,also.

This paper study roundly the pump system's design and calculate process. Including pump hydromechanics, pump energy saving theory and its calculating. Pump system flow, head, pipe calculating, control system hardware and software design of fuzzy-PID control with a self-adjusting regulation factor.

Key words: water supply, pump system, fuzzy-PID, self-adjusting, regulation factor, life cycle cost, inverter, PLC

# 上海交通大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：邓炎成

日期：2002年2月16日

# 上海交通大学

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在 5 年解密后适用本授权书。  
本学位论文属于  
不保密。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名: 张炎成

指导教师签名: 张秀林

日期: 2002年2月16日

日期: 2002年3月1日

# 第一章 绪论

“水—生命之源”，“请节约每一滴水，否则最后一滴流下的将是您的眼泪”。确实如此，这些公益广告说得很好，要做到这一点，得先从设备上加以改善。我国水资源虽然较丰富，但由于水资源在我国的分布不均匀性，尤其是在城市中，城市居民的大量增加，城市中居民生活用水和工厂用水出现了紧张的形势。据统计，我国一百八十余座大、中城市中 80 % 缺水，由于城市人口过快增长和工业进程的加快，我国城市的规模日趋扩大，城市住宅、工业区成片开发，高楼大宇的建设如雨后春笋般蓬勃发展。生产和生活用水与日俱增，原各大中城市的供水设施从数量上和質量上已远远不能满足需要，造成了用水难的问题，这样摆在用户面前的一个突出问题就是储水和加压。解决这一问题的供水设施习惯上被称之为二次供水设备。目前城市中供水的方法主要采用市政供水、水塔、水箱供水以及气压供水设备供水。其中市政供水目前仍然是城市中最主要的供水方式，所谓市政供水，就是由自来水公司对河流、湖泊或水库的自然水净化处理之后，再以一定的压力通过铺设在地下的管道向城市各个各楼宇供水。其出现的最主要问题是用水压力不稳定，时高时低。在用水高峰期，稍高一点的楼层就供不上水，甚至停水的现象时有发生，或者有水但压力太低，热水器等不能启动或忽然停止工作。由于市政供水的水压不稳定的不足之处，使得城市居民的生活、生产受到了很大的影响。为了弥补市政供水的这种不足之处，传统方法是居住小区企事业单位在高楼的楼顶层修建水箱或直接修造塔。由市政供给的水储备在水箱水塔中，或用水泵电机带动水泵将水送至水箱水塔，利用水箱水塔的高度形成压差给用户供水。解决市政供水的水压不稳定的第二个方法是利用气压罐来补充压力不足时的供水压力。利用封闭式的气囊，在供水压力高时在气压罐中储备一定量的水，从而利用水的压力压缩气囊，使气囊内外的压力达到一种平衡状态；而在供水压力低的时候，气囊内、外的水压值就不平衡，气囊中空气压力要高于气囊外的储水压出来，这样能在供水压力低时短时间地解决用户的供水问题。

解决这一问题的供水设施习惯上被称之为二次供水设备。目前我国采用的二次供水设备主要有水塔、高位水箱、气压供水设备、变频调速供水设备以及各种派生产品。由于水塔、高位水箱占地面积及基建投资大，不利于建筑物承重、抗震及美观设计，已不适合当今寸土寸金的现状，且存在二次污染，水塔、水箱供水方式的另一个最大的不足之处是水质污染严重，用户用不上新鲜水。故在各大中城市新建设施中已被淘汰。80 年代初发展起来的气压供水设备，由于其占地面积及基建投资少，且因采用隔膜式而初步解决了二次污染问题而在 80 年代盛行一时，但气压供水设备讨厌的水噪声、水气混合带来的计量误差、污染气体混入水中带来的二次污染、气压罐供水方式的储水量较小、（而储水量加大的话成本又太高，体积大）、水泵的频繁启停、还需有额外的补气设备等不足，这些都限制了其使用和推广。因此这种产品只能是过渡性产品，必将被新的技术产品所取代。随着交流变频调速技术及单片机技术的发展，其产品价格将大幅度降低，为变频调速供水原理的实现提供了基本保证。

根据美国能源部及欧洲水泵最新研究显示，水泵装机总容量占电力总容量 20%，电力消耗则占 30~50%，如果经过节能降耗改造，仍可在在此基础上节能 30%~50%。目前我国的电力能源一方面供应不足，另一方面浪费很大。据第三次全国工业普查资料统计，我国电力拖动设备以风机、水泵为主，总装机容量达 1.7 亿千瓦。其中风机 0.52 亿千瓦，水泵 1.18 亿千瓦，年总耗电 3300 亿千瓦时，占全国年耗电总量的三分之一强，占工业用电量的 40 %，是耗电量最大的设备。目前我国风机、水泵的实际应用水平仍普遍低于国际水平，差距大，但节约潜力也很大，国家已将风机、水泵节能改造推广工作列入节能重点之一。

供水向来是城市的用电大户，而城市供水用电量又主要体现在水泵机组的电耗上。从经

济角度来看,各种类型的供水泵站所消耗的动力费用,在整个给水系统中占有相当大的比重。因此供水泵站水泵机组高效运行的意义重大。

供水泵站的装机,是按最不利条件下,最大时流量和所需的扬程配置的。我们在最大用水量  $Q_s$  时,要求有扬程  $H_s$ ,才可满足我们的最高要求,所以我们选一台额定流量为  $Q_s$ ,额定扬程为  $H_s$  的水泵。然而,由于受地域、时间和习惯等诸多因素的影响,导致用水量在不同季节、不同时间内有不同幅度的变化,实际所需的流量根本就达不到  $Q_s$ ,可能在供水低峰期,供水量  $Q_1$  要远远小于  $Q_s$ ,在绝大部分时间里,泵站的供水流量和扬程都远远低于所设计的流量和扬程。水泵的运行效率却变的很低,耗电增加。因此,必须采取一定的调节措施使泵站供水量适应用水量的频繁变化,调节选择水泵应尽量使管网经常用水量包含在水泵特性的高效区间,才能实现节能的要求。

推广变频供水,能保证泵站向用户安全可靠供水,并最大限度地节约电能。在实现合理和经济运行的同时,还可以简化运行管理、减轻体力劳动。所有这些,在当前具有极为重要的意义。

目前,国内供水行业水泵运行的效率普遍偏低。虽然经过十多年的更新改造,取得了显著成绩,但仍然存在以下问题:1)设备陈旧。按全行业统计,90年代生产的水泵还达不到应用总量的一半;2)“大马拉小车”现象严重,在用设备的出力一般都在额定出力的50%~70%左右;3)控制系统及系统调节方式落后。目前国内的一些企业还停留在依靠阀门开启度来调整水量的落后状态。除了调节滞后、稳定性差、安全性差等问题外,还存在大量的截流损失。国内城镇给水厂目前大多采用调整并联运行水泵台数结合调整阀门开度的方式来适应管网中流量的变化。这样就会出现高峰供水以外的时间内,水泵的运行工况点偏离了较佳工作范围。流量变化越大,偏离程度也就越大,造成了水泵在年运行中长期处于低效率运转。好在这一问题受到了国家的重视,许多大中城市的自来水公司已积极采取行动,引进国外先进技术,各地中小水厂进行技术改造的意识也逐渐浓厚。一些大中城市的水厂及建筑给水中虽然开发了不同型式的调速设备,但是多数运行不够合理,节能效果不显著,达不到预期效果。目前变频调速供水泵站的工作方式,主要有恒压变流量供水与变压变流量供水两种方式。其中恒压供水实现起来比较简单方便,是目前绝大多数拥有变频调速供水设备的自来水企业所采取的供水方式。但是这种方式并未充分发挥变频调速供水的节能潜力,而采用变压变流量供水方式能使供水压力线与管道系统特性曲线一致,达到最佳节能供水状况。

为了解决上述问题,本人根据高层楼宇建设的实际情况,总结和吸取了国内外的先进技术和经验,研制成功变频调速自动供水设备,较好地解决了上述问题。

本人设计的变频调速供水设备是利用交流变频器对水泵电机进行无级调速。通过压力传感器和压力控制器根据用水量的变化自动控制一台或多台水泵依次进行循环,软起、软停达到不同工况下实行稳压供水。

为了保证系统具有良好的性能和很好的可靠性,系统采用日本三菱FX系列PLC作为主控机,变频器采用日本三菱FR系列变频器是国家节能计划中推荐使用的产品。

该变频调速供水设备的主要特点有:

### 1、高效节能

采用变频调速器,按需要设定恒定压力,依据用水量来变频调速,使水泵始终在高效率工况下运行,与目前国内带有恒速泵的供水设备相比节能效果显著,一般可达30—50%。同时,由于采用多台小泵机组代替大泵适合流量变化,避免‘大马拉小车’现象,提高总体效率。

### 2、运行压力稳定

在实际工作中,可根据管网所需求的供水压力,通过操作按钮来改变设定压力值,从而使供水系统经常处于最佳的节水节电工作状态。由于采用Fuzzy+PID复合控制规律,

在启停水泵时压力波动小，调压精度高，延长水泵寿命。

### 3、自动控制，保证供水可靠，延长水泵寿命

变频调速水泵与工频恒速自动循环进行。设备电机为软起动，无冲击电流。自动化程度高，操作简便，寿命长。同时，变频器本身具备短路、过流、过载、过压、欠压、失速、过热等各种保护功能，大大提高了设备的安全可靠性。

### 4、系统整体结构紧凑，占地少，投资省

变频调速供水设备极大地简化了过去通常采用的供水系统，可取消高位水箱、水塔和大型气压罐，利于建筑物承重、抗震及美观设计，占地少，安装简洁，节省投资。与相同供水能力的带有水塔或大型气压罐的设备相比，总造价可减少 10—15 %。

### 5、无人值守，运行可靠，维护费用低，

在水泵的寿命周期里，能耗占 45%，维护成本占 40%，这两项占 85%，变频供水能大大降低这两项费用，也就大大降低了供水系统寿命周期成本。

### 6、应用前景广阔

该设备可广泛适用于城市各类高层建筑、生活小区、工矿企业以及大中型船舶用生活、生产、消防供水和循环冷却水系统，稍加改变可适于园林公园、喷泉、军民机场及油站的输油，中央式空调的冷却系统。预计今后的几年里国家在变频供水投资将达到每年 20~30 亿元，平均 2~3 年即可收回投资。



## 第二章 国内外高层建筑给水方式概述

高层建筑与低层建筑的划分没有明确的界限,世界各地的区分标准也不相同。我国指10层以上的住宅和建筑高度超过24m的其它民用建筑为高层建筑。

与少层建筑比较,高层建筑在给水方面,具有下列特点:

- (1) 给水卫生设备标准高,使用人数多,瞬时给水量大;
- (2) 建筑层数多,高度高,给水及热水管中的静水压力大;
- (3) 建筑使用功能复杂,譬如一旦发生火灾,蔓延快,疏散扑救困难;
- (4) 给水管道及设备多,噪音源、震源多,必须严格采取措施,以保证良好环境和系统的安全运行;
- (5) 建筑物的沉降量大。

基于这些特点,高层建筑对建筑内部给排水工程的设计、施工及材料设备选择等方面,都比一般建筑给排水工程提出了更高的要求。

高层建筑的层数多、高度高,如果仅设一个系统供水,则建筑下层给水管道承受的静水压力势必很大,使得配水附件、阀门及管道接头容易漏水,影响系统的正常使用。因此,为使管道及配件承受的水压小于其工作压力,高层建筑的给水系统必须进行合理的竖向分区,这样可减小下层管道中静水压力,以避免水击而产生的噪音和振动以及喷溅现象。

竖向分区的高度应根据使用要求,管道、附件和设备的承压能力,供水安全性,节能情况以及维修管理条件等因素确定。分区高度过大固然不好,分区过小则不经济,且使管道设备复杂化。

国产管道配件和卫生器具零件的工作压力目前一般为0.3—0.4MPa。因此,我国建筑给水排水设计规范(GBJ15—88)规定高层建筑生活给水系统竖向分区最低卫生器具配水点处的静压力为:住宅、旅馆、医院宜为0.3—0.35MPa,办公楼宜为0.35—0.45MPa。高层建筑给水系统有多种给水方式,传统方式主要有并联给水方式,串联给水方式,减压给水方式,新型方式有气压罐给水方式和变频给水方式。

### 2.1 高层建筑的分区水箱给水方式

分区水箱给水方式的主要特点是在各区之上适当位置设分区水箱。其作用是贮存、调节本区的用水量和稳定水压。水箱内的水由设在底层或地下室的水泵输送,供水模式:水池—水泵—分区水箱—给水管网—用水点,是世界各国采用得最广泛的高层建筑给水方式。

水箱给水方式又可分为并联给水方式,串联给水方式,减压水箱给水方式,减压阀给水方式以及多出口水泵供水方式等。

#### 2.1.1 分区水箱并联给水方式

分区并联供水方式可分为多管供水方式(如图2-1)<sup>[1]</sup>和单管供水方式(如图2-2)<sup>[1]</sup>两种。目前工程中常采用生活和消防合用贮水池和水箱,分区水箱并联多管供水方式。

多管供水方式的优点是:①各区独立运行互不干扰,供水可靠;②水管集中布置便于维护管理;③能源消耗较小。

缺点是:①设备管材耗用较多,投资较大;②泵房、管道井、分区水箱所占建筑面积太大,减小了高层建筑有效使用面积,影响经济效益;③不能很好解决消防竖向分区的分界处的供水问题;④火灾初期消防管网易出现超压,会造成消防工作困难和消防设备损坏。

单管供水方式具有供水可靠,管道设备数量较少,投资较节省,维护管理较简单的优点,但能源消耗较大,水箱占用上层使用面积。

典型的分区水箱并联多管供水方式有日本京王广场旅馆给水系统,典型的分区水箱并联单管供水方式有广州人民大厦新楼给水系统。

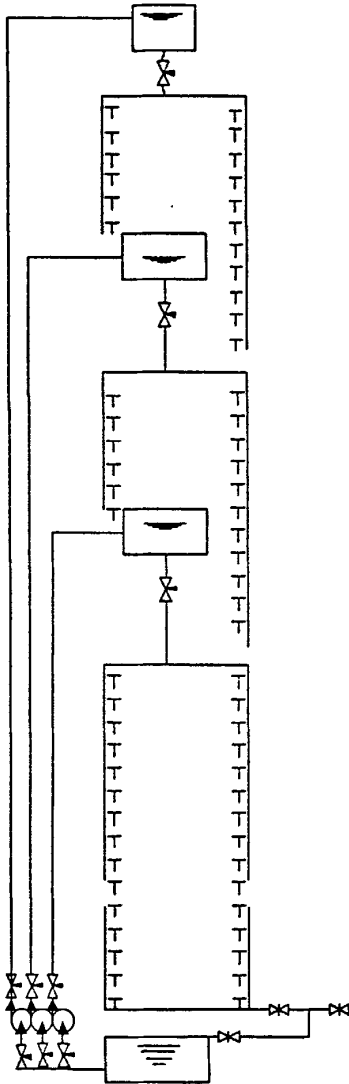


图 2-1 分区水箱并联多管供水示意图

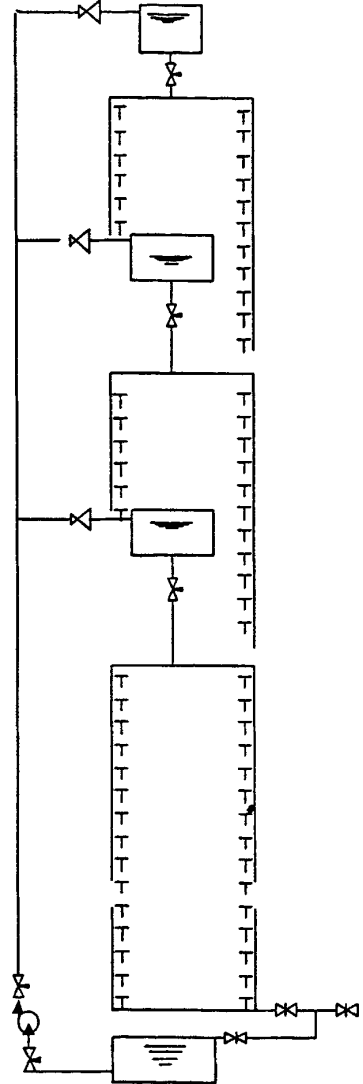


图 2-2 分区水箱并联单管供水示意图

### 2.1.2 分区水箱串联给水方式

这种给水方式为水泵分散设置在各区的楼层,低区的高位水箱兼作上区水泵的吸水池。此种给水方式多用于超高层建筑(如图 2-3)<sup>[1]</sup>。

其优点:①无高压水泵和高压管线,管道较简单;②运行动力费用经济低。

其缺点:①水泵台数多,水箱多,设备费用高;②泵分散设置,连同水箱所占楼层面积较大,给建筑总体布局带来困难,减少了高层建筑的有效使用面积,影响经济效益;③水泵

设在楼层，防震隔音要求高；④水泵分散，管理维护不便；⑤若下区发生事故，其上部数区供水受影响，供水可靠性差。

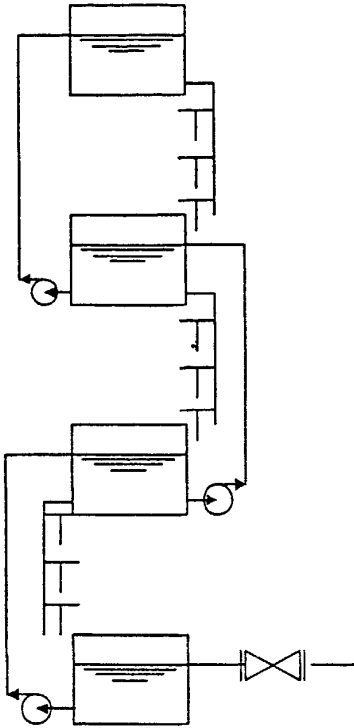


图 2-3 高层串联给水系统

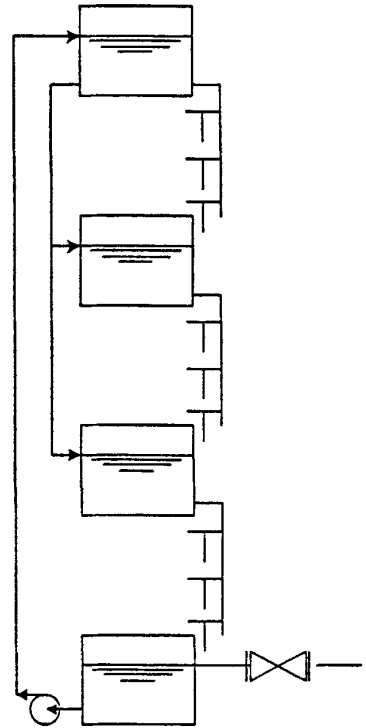


图 2-4 高层减压水箱给水方式

### 2.1.3 减压水箱供水方式

此供水方式为整个高层建筑的用水量全部由设置在底层的水泵提升到屋顶总水箱，然后再逐级通过水箱减压供水，分区水箱起减压作用（如图 2-4）<sup>[1]</sup>。

其优点：①水泵数量最少，管线较少，设备费用降低，管理维护简单；②水泵房面积小，各分区减压水箱调节容积小。其缺点：①水泵运行动力费用高；②屋顶总水箱容积大，对建筑的结构和抗地震不利；③建筑物高度较高，分区较多时，主干管要用高压管道，投资较大。典型工程实例有广州白云宾馆给水系统。

### 2.1.4 减压阀供水方式

减压阀供水方式是用减压阀代替减压水箱（如图 2-5）<sup>[1]</sup>。此供水方式的关键设备是减压阀。设计中常采用比例式减压阀，已生产有 2:1, 3:1, 4:1 三种系列。

其优点：①不占楼层房间面积，重叠管路少和噪声小，可实现分区分压供水；②阀体内没有弹簧，不会因弹性疲劳而失效；③构造上采用软密封，软密封的密封性能比硬密封性能好，不会产生渗漏；④它能减静压（流量为 0 时），亦能减动压（水流动时），减压而不减流量；⑤安装方位不受限制。

其缺点：①水泵运行动力费用较高；②一旦杂质卡在密封面处，造成活塞不能关闭到位，就会引起渗漏，一般在减压阀前设 Y 型过滤器，同时对水质有严格要求。

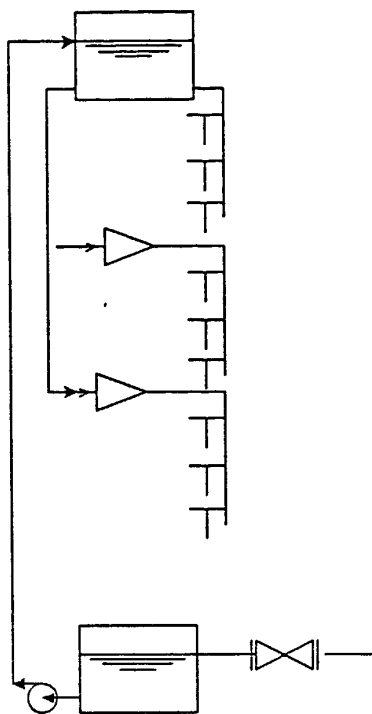


图 2-5 高层减压阀给水方式

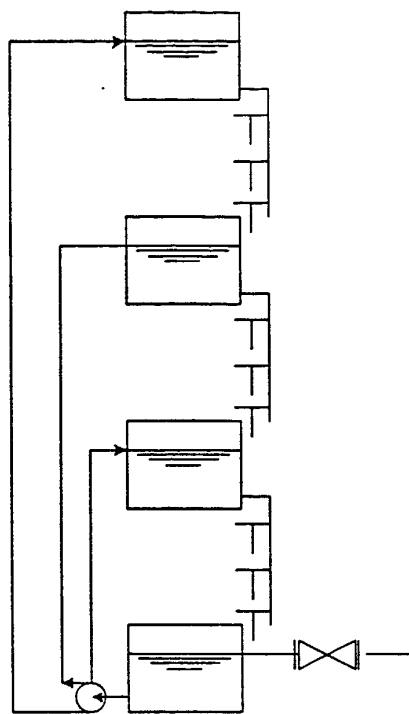


图 2-6 高层多出口泵给水方式

## 2.2 多出口水泵供水方式

多出口水泵在国外早已运用于高层建筑给水工程，国内目前已研制成功。多出口多级离心泵的工作原理和构造与普通多级离心泵基本一样，都具有共同的一个壳体和随着同一泵轴而旋转的几个工作叶轮，流体自进水口流过几个工作叶轮之后获得的总扬程等于几个叶轮产生的扬程之和。但普通多级离心泵只有一个出口，而多出口多级离心泵则在壳体上，轴的不同位置设有两个出水口，即高压出水口和低压出水口。高压出水口由于流体流经的工作叶轮个数多而产生的扬程高；低压出水口由于流体流经的工作叶轮个数少而产生的扬程低。高低压出水口的扬程大小按需要而定，但必须是单个工作叶轮扬程的整数倍。该泵进口流量等于高低出水口流量之和，多个出水口可同时出水，也可单独出水，水泵所配的电机容量按高压出水口单独出水的工况来确定。

根据多出口多级离心泵的工作原理，把它运用于高层建筑消防分区给水系统最为合理，将其高压出水口连接在高区系统管网，低压出水口连接在低区系统管网。（如图 2-6）

工程实例有广东电视中心。广东电视中心主楼 33 层，总高 144m。消防栓系统按高度分为 4 区。I 区：8F 以下；II 区：9—13F；III 区：14—25F。I 区由 14F 水箱供给；II、III 区由 30F 水箱供给；IV 区设稳压泵保持该区所需的水压。火灾 10min 后由地下室消防泵供水，在 14F 设一组减压阀确保 II 区各层消防栓栓口压力不超过 50MPa。整个消防栓给水系统仅在地下室设两台（一用一备）双出口水泵供消防用水，流量为 40L/S。第一个出水口扬程为 68m，供 I 区消防栓用水；第二个出水口扬程为 145m，供 II、III、IV 区消防用水。这样，双出口水泵起到一泵当二泵的作用，较好地解决了分区的分界处的楼层发生火灾时的消防给水问题，既减少变配电设备，又减少泵房及变配电间建筑面积，省掉低压用电的增容费，达到

了降低工程设备费用的目的。所以双出口水泵最适用于高层建筑分区消防给水系统，是一种有发展前途的设备。

## 2.3 高层建筑气压罐供水方式

气压罐供水方式是近几年发展起来的，其特点是气压罐的位置不受建筑条件的制约，根据设计要求，可设于建筑物的顶层、中间层、地下室以及室外适当位置。但是按 95[高规]的要求，临时高压消防给水系统应设高位消防水箱，所以在实际工程中气压罐供水并不能代替高位水箱，而只是一个补充措施。

其优点：①作为生活给水方式时，不需高位水箱；②作为消防高压增压设备，满足最不利点消防水压要求，运行可靠，方便。

其缺点：①耗用钢材较多，设备投资大；②富余水头较大，经常费用高；③贮水量有限，供水安全可靠不如高位水箱。

具体在给方案时，气压罐给水方式有并联给水方式（如图 2-7）<sup>[2]</sup>和减压阀给水方式（如图 2-8）；若按气压罐所处位置又可分为高置气压罐给水方式和低置气压罐给水方式。

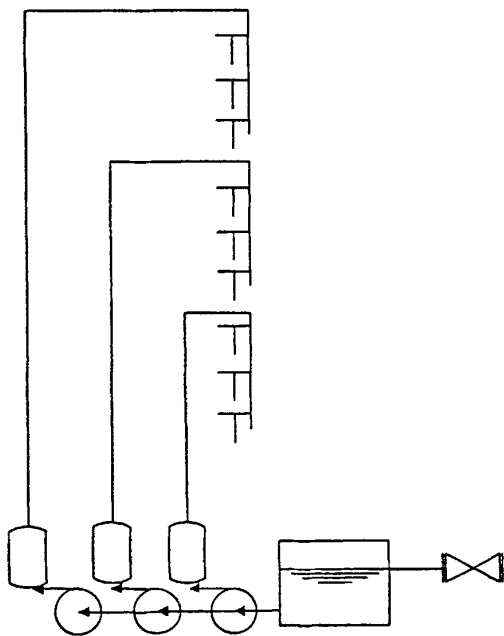


图 2-7 气压罐并联给水方式

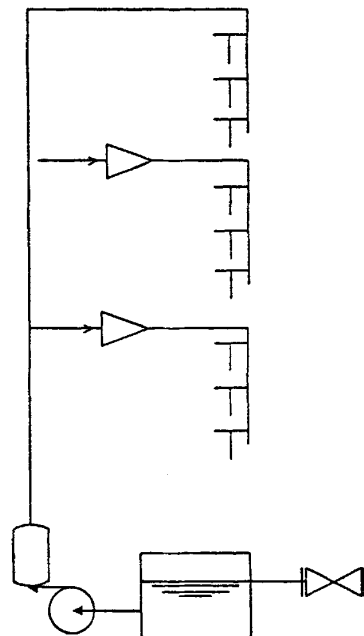


图 2-8 气压罐减压阀给水方式

## 2.4 变频调速泵给水方式

变频调速泵供水方式是通过自动地改变水泵转速，达到流量调节的目的。近年来，国外不少大型高层建筑采用无水箱的变速水泵给水方式。在国内，也有不少高层建筑采用此给水方式。其优点：①满足最不利点消防的水压和水量要求，缓减火灾初期消防管网超压；②可省去高位水箱。

其缺点：①投资较大；②对供电要求较高；③维护复杂，经常费用较高

给水方式可分为并联给水方式（如图 2-9）<sup>[2]</sup>和减压阀给水方式（如图 2-10）。

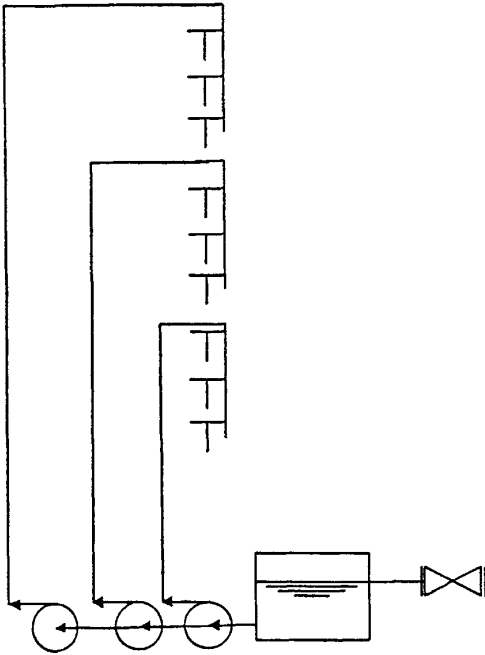


图 2-9 变频调速并联给水方式

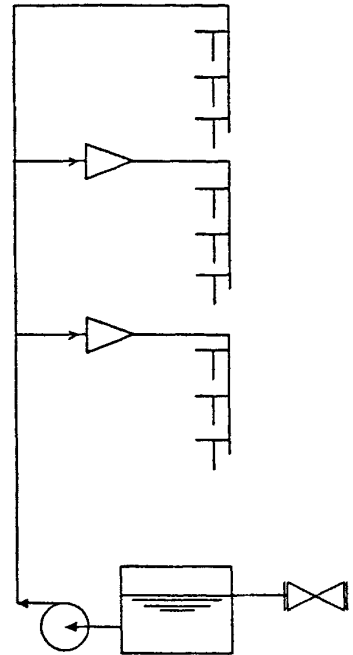


图 2-10 变频调速减压阀给水方式

除此之外，还有分质给水方式，中水给水方式等，及其复合给水方式。本工程采用变频调速及气压罐复合给水方式。详见第五章第一节工程概况。

## 第三章 水泵节能原理

水泵是一种应用很广的水力机械，它有多种类型，供水系统中广泛使用的是离心泵。要对供水系统进行最优控制研究，首先必须了解水泵的特性。

### 3.1 水泵特性

水泵的流量  $Q(\text{m}^3/\text{h}$  或  $\text{L/s})$ 、扬程  $H(\text{m})$ 、轴功率  $N(\text{kW})$ 、效率  $\eta$ 、转速  $n(\text{r}/\text{min})$  及允吸高度  $H_s(\text{m})$ ，被称为泵的基本性能参数。

#### 3.1.1 水泵特性曲线

在额定转速下，以流量为横坐标，分别以扬程、轴功率和效率为纵坐标表示的关系曲线，总称为水泵的基本性能曲线。经过不同的流量/扬程/压力/转速/功率等测试，可以得到水泵的一组性能曲线。

一般情况下，水泵生产厂家是在一张图上给出上述三条曲线的： $H-Q$  曲线、 $\eta-Q$  曲线和  $N-Q$  曲线，如图 3-1<sup>[3]</sup>。

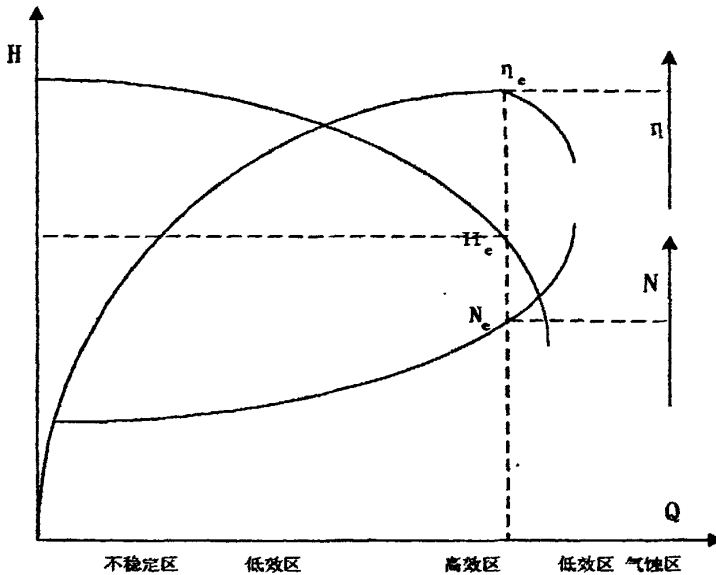


图 3-1 水泵的性能曲线

根据上图，只要我们知道水泵现在的流量  $Q$ ，就可查出此时水泵扬程  $H$  以及对应的轴功率  $N$  和效率  $\eta$ 。

在实际运行中，水泵的各项性能参数并不一定总是处于额定值，而是在一定范围内变化，一般把不低于最高效率值 85% 的区域称为水泵的高效区。

泵的运行工况分高效、低效、不稳定和汽蚀四种情形，在基本性能曲线  $\eta$  上的分段如上图所示

#### 3.1.2 水泵的并联

在供水工作中，如果发生用水量过大，一台泵供水已不能满足要求时，就需要再增加一台泵或几台泵同时向管网供水来提高出水量，这就需要使用水泵的并联方式。

在泵的并联中, 为了避免高扬程泵向低扬程泵回灌或低扬程泵不出水, 一般并联泵选用的首要问题是各泵扬程尽量一致, 同一型号的泵并联时, 效率相差不要太大, 即不要把用了多年的旧泵同新泵并联使用, 一起使用的泵也要经常替换, 以免某一台泵长期运行或长期不运行造成水泵效率与其它泵差别太大。并联泵的目的就是为了增加出水量或作为备用泵的方式使用(尤其在消防供水中)。

两台泵在一地并联时, 由于其共用一个出水管, 其扬程是相同的, 所以其流量总输出为对应同一扬程两泵的流量之和, 并联后系统总的  $H-Q$  曲线如图 3-2<sup>[3]</sup>, 图 3-3<sup>[3]</sup>所示。

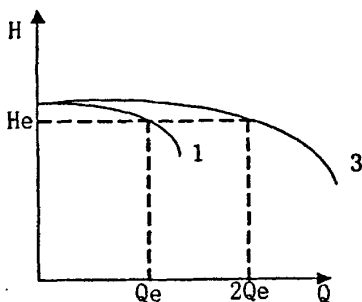


图 3-2 等扬程泵并联示意图

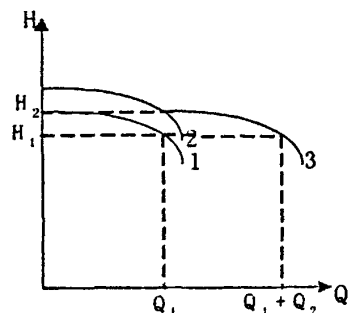


图 3-3 不等扬程泵并联示意图

图 3-2 为两台同型号泵并联后的情况, 曲线 1 为单泵  $H-Q$  曲线, 曲线 3 为两台同型号等扬程泵并联时总系统的  $H-Q$  曲线。当总出水量为两台泵额定流量之和, 扬程为水泵额定扬程时, 该系统中两台泵均工作在高效段。

两台不同额定扬程的泵并联时,  $H-Q$  特性曲线如图 3-3, 图中曲线 1 为 1# 泵  $H-Q$  曲线, 曲线 2 为 2# 泵  $H-Q$  曲线, 曲线 3 为总  $H-Q$  曲线。由于 2 台泵  $H-Q$  曲线不相同, 当管网用水量小于  $Q_1$ , 扬程高于  $H_2$  时, 1# 泵由于扬程低, 止回阀关闭而流量为零, 总  $H-Q$  曲线同曲线 2; 管网用水量大于  $Q_1$  时, 1# 泵才逐渐出水, 但效率仍很低, 总出水量为对应同一扬程时的两泵流量之和。

多台泵并联时,  $H-Q$  特性曲线也可通过上述方法, 将对应同一扬程处的各泵流量相加即可, 并非额定流量的叠加。

### 3.1.3 水泵的串联

当供水过程中发生因用户地理位置较高(如山区或城市中的高层建筑), 一台泵的扬程达不到, 或不便一次加压过高以免发生爆管或损阀现象, 这时就需要再加一台泵或几台泵采用接力的方法把水打上去, 这就是泵的串联方式。

在泵的串联使用中, 为了避免因水泵的额定流量不一致造成的互相牵扯, 而使有些泵偏离高效区, 水泵串联选取的主要问题就是各泵的额定流量要尽量一致, 串联的目的就是为了增加扬程。(多级泵, 也是水泵串联的一种特殊形式, 不同的是各级叶轮是穿在一根轴上, 并由同一台电机驱动的, 每级叶轮的作用就是为了提高一定的扬程。)两台水泵串联时, 由于两泵是串联在同一条管路中的, 所以两泵流量相同, 串联后的总扬程为对应同一流量处两泵的扬程之和。图 3-4<sup>[3]</sup>为两台同型号泵串联的情况, 图中曲线 1 为单台泵的  $H-Q$  曲线, 曲线 3 是两台泵串联后的  $H-Q$  曲线, 当流量为单泵额定流量  $Q_e$  时, 两台泵均工作在高效段, 总扬程为两泵额定扬程之和。



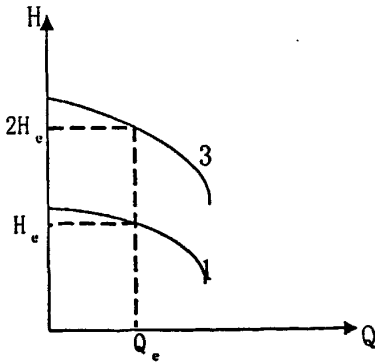


图 3-4 等流量泵串联示意图

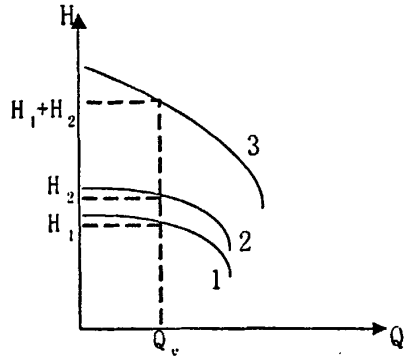


图 3-5 不等流量泵串联示意图

图 3-5<sup>[3]</sup>为两台额定流量不相同的泵串联时的情况，曲线 1 为 1# 泵的 H-Q 曲线，曲线 2 为 2# 泵的 H-Q 曲线，曲线 3 为串联后总系统的 H-Q 曲线，当管路中的流量大于 1# 泵的额定流量时，将有可能烧坏 1# 泵电机，所以两泵串联只能工作于两泵中额定流量最小的那台水泵的额定流量以下，效率不能同时达到最大，并且要考虑底下的泵流量过小两泵间距又大时的气蚀问题。

多台泵串联时，与上述方法相同，将对应同一流量 Q 处的扬程相加即可，但并非额定扬程的叠加。

### 3.2 调速供水的节能分析

当系统的实际工况远离高效区运行时，会消耗过多电能，为了减少这种浪费，通过改变水泵运行的办法来使水泵的工况点尽量处于高效区内，即水泵调速的必要性问题。

#### 3.2.1 供水系统效率与转速关系<sup>[3]</sup>

水泵的有效功率为

$$N_E = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{102} \quad [\text{Kw}] \quad (3-1)$$

水泵的全效率公式

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{N \cdot 1000 \cdot 3600} = \frac{QH}{367N} \quad (3-2)$$

由供水条件确定  $H = \text{const}$ ，及水泵比例定律

$$Q / Q_e = n / n_e \quad (3-3)$$

$$H / H_e = (n / n_e)^2 \quad (3-4)$$

$$N / N_e = (n / n_e)^3 \quad (3-5)$$

得

$$\eta' = \frac{Q \cdot H}{367 N} = \frac{\frac{n}{n_e} Q_e \cdot H_e}{367 \left(\frac{n}{n_e}\right)^3 N_e} = \frac{Q_e \cdot H_e}{367 \left(\frac{n}{n_e}\right)^2 N_e} = \frac{n_e^2 Q_e H_e}{n^2 367 N_e} = \frac{n_e^2}{367 n^2} \eta_e'$$

或

$$\eta' = \frac{K}{n^2} \quad (3-6)$$

式中:

$\eta'$ : 供水系统效率

$\eta$ : 水泵全效率;

$Q$ : 流量  $\text{m}^3/\text{h}$

$H$ : 水泵扬程  $\text{m}$

$N_a$ : 输入功率  $\text{Kw}$

$N_E$ : 有效功率

$n$ : 转速  $\text{转}/\text{min}$

$Q_e, H_e, N_e$ : 水泵转速为  $n_e$  时,  $H-Q$  和  $N-Q$  特性曲线上的参数值,

$Q, H, N$ : 水泵转速为  $n$  时, 与上述  $Q_e, H_e, N_e$  相对应的参数值

$$K = \eta_e' n_e^2 / 367$$

由此可见在保证压力满足要求的情况下, 当转速  $n$  下降时, 系统效率  $\eta, \eta'$  上升, 节能的效果是明显的。同时, 从特性曲线的变化已可证实以上结论。

### 3.2.2 转速变化对水泵特性曲线的影响

水泵出厂时, 生产厂家给出的  $H-Q, N-Q$  和  $\eta-Q$  特性曲线一般都是在水泵转速为所配电机额定转速的情况下给出的。当改变电机的转速, 由水泵的比例定律知其特性曲线也将有如图 3-6<sup>[4]</sup>, 图 3-7<sup>[4]</sup>所示的变化。

#### (1) $H-Q$ 特性的变化

在图 3-6<sup>[4]</sup>中曲线 1 为额定转速  $n_e$  时  $H-Q$  特性曲线, 当我们需要的水泵扬程为  $H_s$  时, 可从  $H-Q$  曲线上查出该扬程下对应的出水量为  $Q_s$ , 曲线 2 为水泵转速变为  $n_x$  时的  $H-Q$  特性曲线。根据水泵的比例定律可推算出, 当要求水泵出口扬程为  $H_s$  时, 水泵对应的最小转速  $n_2$ 。曲线 1 和曲线 3 在  $Q=0$  处的截止扬程分别为  $H_c$  和  $H_s$ , 根据水泵比例定律:

$$H_c / H_s = (n_2 / n_e)^2 \quad \text{得}$$

$$n_2 = n_e \sqrt{H_c / H_s} \quad (3-7)$$

式中:

$H_s$ : 供水系统要求的最合适扬程

$n_2$ : 对应  $H_s$  的水泵最低转速

$n_e$ : 电机额定转速

把曲线上所有的  $(Q, H)$  点, 根据水泵比例定律, 对应到转速变为  $n_1$  和  $n_x$  的特性曲线上来, 即得曲线 2 和曲线 3。

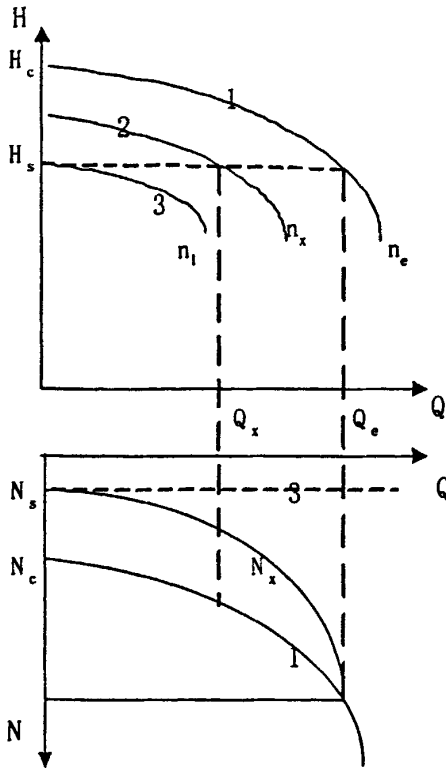


图 3-6 H—Q 及 N—Q 特性曲线的变化

## (2) N—Q 特性曲线的变化

在图 3-6<sup>[4]</sup>中, 曲线 1 为额定转速为  $n_e$  时的水泵 N—Q 特性曲线, 曲线 3 为转速  $n_2$  (上一节求出的对应  $H_s$  的最小转速) 时的水泵轴功率曲线,  $N_c$  为额定转速  $n_e$  时流量  $Q=0$  的截止轴功率,  $N_s$  为转速  $n_2$  时的截止轴功率, 根据比例定律:

$$N_s / N_c = (n_2 / n_e)^3 \quad \text{得}$$

$$N_s = N_c (n_2 / n_e)^3 \quad (3-8)$$

式中:

$N_c$ : 不调速时出水量 0 的功率

$N_s$ : 最低转速  $n_2$  时的最小功率

流量为零时, 经调速后的节能最大比例为:  $(N_c - N_s) / N_c * 100\%$ , 由式 (3-7) 可知  $n_2$  是同系统额定压力  $H_s$  相关的, 所以上式节能百分比也同  $H_s$  有关,  $H_s$  越小, 节能越明显,  $H_s$  越大节能越少。

(3)  $\eta$ —Q 特性曲线的变化

在图 3-7<sup>[4]</sup>中, 曲线 1 为对应额定转速  $n_e$  时的效率曲线, 曲线 2 为对应转速为  $n_1$  时的  $\eta$ —Q 效率曲线。该曲线可通过根据  $n_1$  时 H—Q 曲线和 N—Q 曲线来求出。

$$\eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{N \cdot 1000 \cdot 3600} = \frac{QH}{367N} \quad (3-9)$$

当管网需水量为  $Q_2$  时, 管网所需的扬程仍为  $H_s$ , 不调速时的效率值为  $\eta_A$ , 变速为  $n_1$  时的效率为  $\eta_B$ 。从图中可以看出随着水泵转速的降低, 水泵效率的最大值也将逐渐向流

量减小处移动, 并且, 水泵工作点在曲线上的位置也逐渐向曲线的左边移动。从上述这一特性, 我们可以看出, 在水泵流量发生变化时, 为了通过调速使水泵尽量较大范围内工作在高效率曲线段, 我们就应选择水泵使要求的扬程  $H_s$  所对应的最大流量  $Q_s$  稍微处于效率曲线最大值的右侧, 也就是让水泵有一定的低扬程大流量的过载能力, 这样当水泵用水量有一定减少时效率点在效率曲线上的位置将在较高—最高—较高一定范围内变化时, 水泵始终可以工作在效率曲线最高点的左右一定范围内。

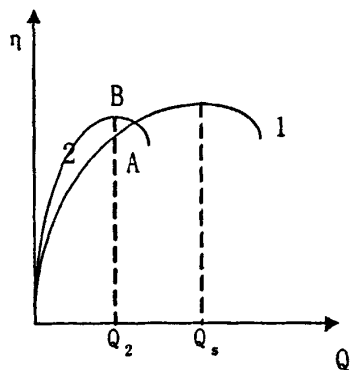


图 3-7  $\eta-Q$  特性的变化

### 3.3 水泵调速的节电量计算

选择水泵应尽量使管网经常用水量包含在水泵特性的高效区间内, 然而, 由于受地域、时间和习惯等诸多因素的影响, 导致用水量在不同季节、不同时间内有不同幅度的变化, 有时光靠水泵特性和自然变化已不能很好地满足节能高效运行的要求。比如在最大用水量  $Q_s$  时, 要求有扬程  $H_s$ , 即可满足用户要求, 所以我们可以选一台额定流量为  $Q_s$ , 额定扬程为  $H_s$  的水泵。但在经常性的供水过程中, 实际所需的流量根本就达不到  $Q_s$ , 可能在供水低峰期, 供水量  $Q_1$  要远远小于  $Q_s$ , 由于一般供水系统的供水量多是由用户的实际情况决定的, 所以供水设备只能是根据实际用水量的大小, 来合理调度和控制设备使水泵出水量能满足要求。由于管路所需的扬程和流量都是由水泵提供的, 所以两者配合后的工作点是既要满足水泵  $H-Q$  特性曲线, 又要符合管路的  $H-Q$  特性曲线, 两条曲线的交点即为该工作点, 如图 3-8<sup>[4]</sup>

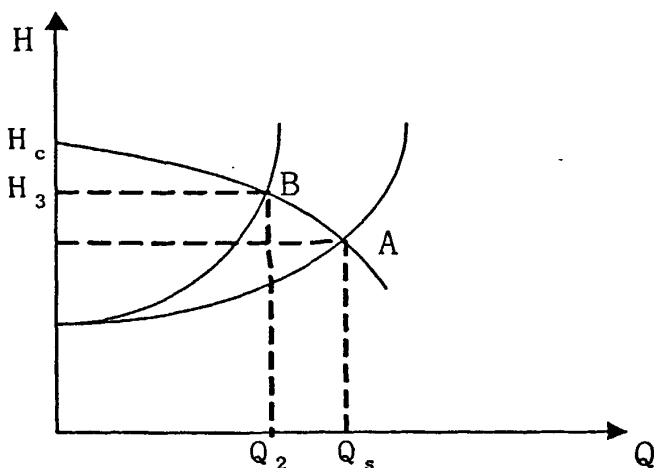


图 3-8 用水量变化水泵工况变化示意图

在上图中,当用户用水量为最大  $Q_3$  时,水泵扬程和管路所需的扬程都为  $H_3$ ,其工作点为 A,当用户用水量减为  $Q_2$  时,则两者的工作点将移至 B 点。可以看出,随着水龙头关闭数量的增加,也就是用户用水量的减少,水泵的扬程将升高,管路的压力也将升高;当管路中的水龙头全关闭时,即  $Q=0$  时,水泵的扬程为截止扬程  $H_c$ ,此时管路的压力将变得比较大。

根据前面的分析,当管网用水量减少致使水泵出水压力过高而浪费的电能可由式 (3-10) 求出,为了减少这种浪费,人们经过分析与实验发现,用调节水泵转速来改变水泵特性曲线以适合不断变化是解决这一问题的有效途径。

这时从泵的  $H-Q$  特性曲线可知,水泵的扬程将有大幅度地升高为  $H_1$ ,相反水泵的运行效率却变得很低,从而使实际的吨水耗电增加很多。其增加的吨水功耗 ( $kW/m^3$ ) 由下式计算。

$$\Delta W = W_1 - W_e = \frac{Q_1 H_1}{\eta_1 Q_1} - \frac{Q_1 H_e}{\eta_e Q_1} = H_1 / 367 \eta_1 - H_e / 367 \eta_e \quad (3-10)$$

式中:

$H_1$ : 所需的扬程(同水泵的额定扬程)

$\eta_e$ : 调速后的效率,根据相似原理等于水泵额定扬程时的高效点

$H_e$ : 用水低峰时升高后的水压值

$\eta_1$ : 不调速用水低峰时的低效率值

从  $\eta-Q$  效率曲线知道,  $Q$  越小效率  $\eta$  越小,不调速吨水耗电就越大,如果调节水泵的转速改变  $H-Q$  特性曲线,如图 3-9<sup>(4)</sup>,使对应同一较小流量时的扬程不再有大幅度上升,基本维持在  $H_e$  附近或略有降低(因流量减少时,管路阻力损失减小,水泵出水压力即使有一个合适的降低,也可满足正常要求),同时,效率  $\eta$  尽量维持在一个较高的数值上,这就实现了节能的要求。供水系统只要保证压力的情况下即可保证用户供水,故调速与不调速的系统效率可由下式计算。

$$\eta' = \frac{Q \cdot H}{N} = \frac{\frac{n}{n_e} Q_e \cdot H_e}{\left(\frac{n}{n_e}\right)^3 N_e} = \frac{Q_e \cdot H_e}{\left(\frac{n}{n_e}\right)^2 N_e} = \left(\frac{n_e}{n}\right)^2 \eta' \quad (3-11)$$

式中:

$\eta'$ : 供水系统效率;

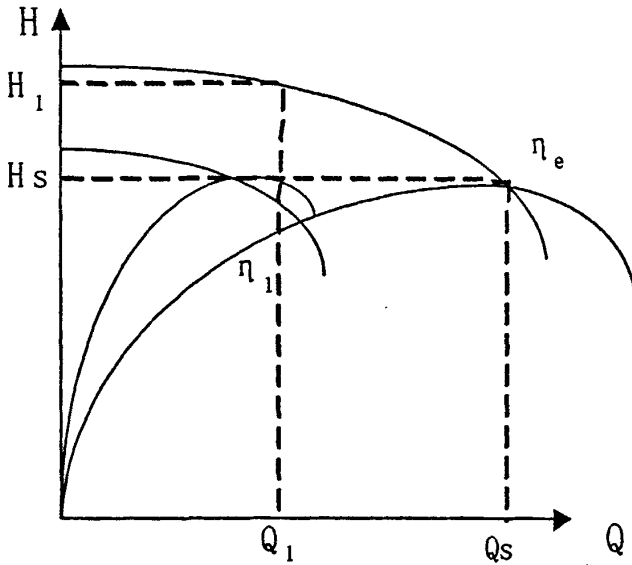


图 3-9 调速水泵特性变化示意图

### (1) 采用泵出口恒压供水方式

通过调节水泵转速，使在管路特性发生变化时水泵出口的压力保持恒定不再升高来达到节能的目的，如图 3-10<sup>[4]</sup>。

当管路为最大流量  $Q_s$  时，水泵出口扬程达到  $H_s$  即能满足最大供水要求，所以，我们可以确定此  $H_s$  值为我们的恒压控制值。管路需水量为  $Q_s$  时，水泵为额定转速  $n_e$ ，工作点为 A；当管网用水量减至  $Q_2$ ，调节水泵转速为  $n_1$  使水泵 H-Q 特性曲线变为曲线 2，水泵和管网的工作点移至 C 点。如果水泵不调速，工作点变为 E，从图 3-13 可以看出，如果水泵不调速，当管网用水量为  $Q_2$  时，其效率低至  $\eta_F$ ，其扬程升高为  $H_2$ ，而调速后的效率为  $\eta_D$ ，水泵出口扬程仍保持  $H_s$ ，可以计算出不调速时的吨水耗电值为：

$$W_1 = \frac{Q_2 * H_2 / 367 \eta_F}{Q_2} = H_2 / 367 \eta_F \quad (3-12)$$

水泵泵出口恒压调速时的吨水耗电为：

$$W_2 = \frac{Q_2 * H_s / 367 \eta_D}{Q_2} = H_s / 367 \eta_D \quad (3-13)$$

流量为  $Q_2$  时，不调速比泵出口恒压调速多增加的吨水耗电值为：

$$\Delta W = W_1 - W_2 = (H_2 / \eta_F - H_s / \eta_D) / 367 \quad (3-14)$$

从式 3-12 知道，当水泵流量减少时，吨水耗电增高的两个主要原因：一是水泵扬程过高为  $H_2$ ；二是水泵效率降低，为  $\eta_F$ 。

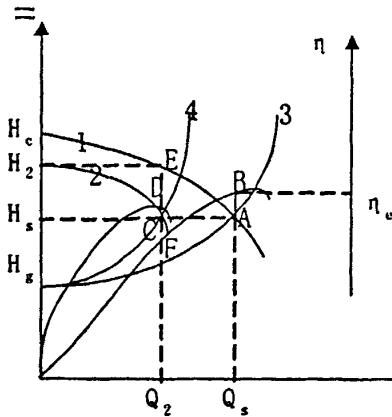


图 3-10 泵出口恒压供水方式节能示意图

(2) 采用末端恒压泵出口变压供水方式  
管网所需的扬程  $H$  与流量有关系式:

$$H = H_g + R_T Q^2$$

$H_g$  为吸水面到出水面的高度, 在这种供水方式中, 要求水泵扬程能随着管网流量的变化而变化。流量为零时, 扬程为  $H_g$ 。随着流量的增加, 使水泵扬程按

$$H = H_g + R_T Q^2$$

变化, 管网流量达到  $Q_s$  时, 水泵扬程达到  $H_s$ , 如图 3-11<sup>[4]</sup>。

在这种系统中, 认为管网特性没有变, 只是管网需水量在发生变化, 通过水泵调速来满足管网在不同流量时的要求。当流量减为  $Q_3$  时, 对应水泵转速降为  $n_3$ , 所需扬程为  $H_3$ , 效率为  $\eta_E$ 。如果采用恒压供水, 则转速为  $n_2$ , 扬程仍为  $H_s$ , 效率为  $\eta_D$ , 如图中可以看出对应同一流量时, 变压供水方式比恒压供水方式还要节能。当流量为  $Q_3$  时, 泵出口变压末端恒压供水方法比泵出口恒压供水方式减少的吨水电耗为:

$$W_3 = H_3 / 367 \eta_E$$

$$\Delta W_2 = W_2 - W_3 = (H_s / \eta_D - H_3 / \eta_E) / 367 \tag{3-15}$$

由于  $H_s$  是泵出口恒压供水方式中以最大供水量  $Q_s$  时仍能满足管网的扬程来选定的, 所以当流量减少时, 扬程的富裕度将变得较大(此处为  $H_s - H_3$ )。从上节转速对  $\eta-Q$  效率曲线的影响可知, 在流量下降过程中, 对应同一流量, 位于  $\eta-Q$  曲线的同一上升侧, 转速低的效率反而高, 如在式 3-14 中,  $\eta_E > \eta_D$ 。所以, 从节能效果讲, 泵出口变压末端恒压供水比泵出口恒压供水又要好一些; 对应于流量  $Q_3$  其吨水电耗减少的数值, 可通过式 3-14 算出。泵出口变压末端恒压供水比泵出口恒压供水节能有两个原因: 1, 水量少时管路损耗也少, 故水泵扬程还可以进一步降低; 2, 水泵的效率进一步提高。

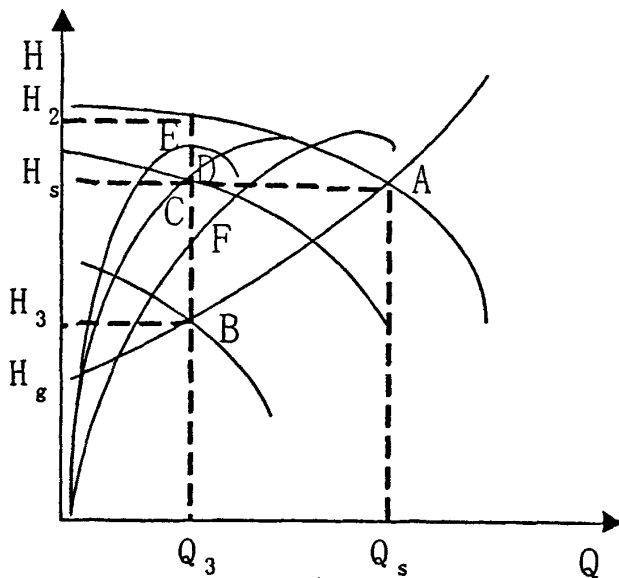


图 3-11 末端恒压供水方式节能示意图

### (3). 泵出口恒压供水与末端恒压供水的比较

1)从节能角度讲末端恒压优于泵出口恒压控制。

2)从控制的简单性来讲，泵出口恒压比末端恒压简单且容易实现，泵出口恒压控制时测压点放在水泵出口管网上即可；如采用末端恒压，测压点也放在水泵出口时，需了解管网特性，由于管网特性较复杂，所以一般只能是近似实现；在末端恒压系统中如果取压点设在最不利用水点处，可使计算简单化，只需保持不利用水点有一定的余压即可。但如果不利点离设备较远，则安装和布线会有一定的难度。

3)如果供水主管网管径较粗，距离较近，阻力损失不大，采用泵出口恒压和末端恒压耗电效果差不多。

4)如果最不利用水点是必须要保证的，并且距离设备又不太远时，采用末端恒压供水不会增加太多的安装难度，可优先选用末端恒压供水。

5)在大的供水系统中，由于用水量较大，吨水耗电是个关键性的问题，即使距离较远，采用无线方式测压，也要优先选用末端恒压供水方式。



下表为日本统计的水泵变频调速的实际节能效果。

表 3-1 国外应用水泵变频调速的实际节能效果<sup>[4]</sup>

运转模式 电机容量	每年节电量/kWh			
	(a) 连续低流量型	(b) 全流量变化型	(c) 低流量变化型	(d) 间歇运转型
1.5	1707	320	627	212
2.2	2915	941	1398	800
3.7	4851	2128	2596	1562
5.5	10042	2302	2809	2009
7.5	15018	6069	6813	4420
11	18420	9136	10783	8139
15	24733	14491	18915	14425
22	46651	20556	21104	16719
30	67859	40010	45380	38689
37	77372	49001	57942	47900
45	111724	65182	73195	56604
55	137401	79964	89726	69299

## 第四章 控制系统与策略

### 4.1 系统动力学模型

早期的供水系统为开环控制，如图 4.1-1 所示，

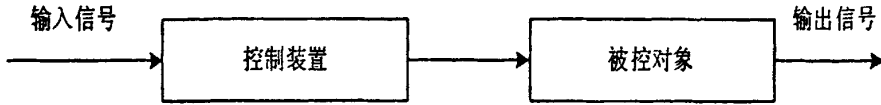


图 4.1-1 开环控制系统

现在市政供水的小区，按照设计规划时的估算估计用水量布置管道，随着社会的发展，用水量变化，水管结垢老化，用水高峰用水压力就降低，甚至停水。所以就在屋顶设置水箱，利用用水低谷期压力比较大时，注入屋顶水箱，补充高峰时期的用水。对于高层建筑，必须假设二次供水设备。高层的二次供水设备中，分区水箱供水的，用水泵保持水箱在一定水位，水箱水位低时打开水泵，达到水箱高位时关闭水泵；气压光给水的，用压力控制水泵组的开关。属于简单的闭环控制。如图 4.1-2 所示

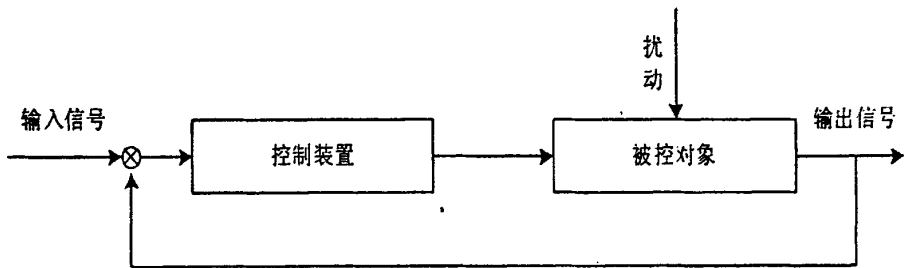


图 4.1-2 闭环控制系统

要提高控制精度，应考虑采用复合控制如图 4.1-3 所示

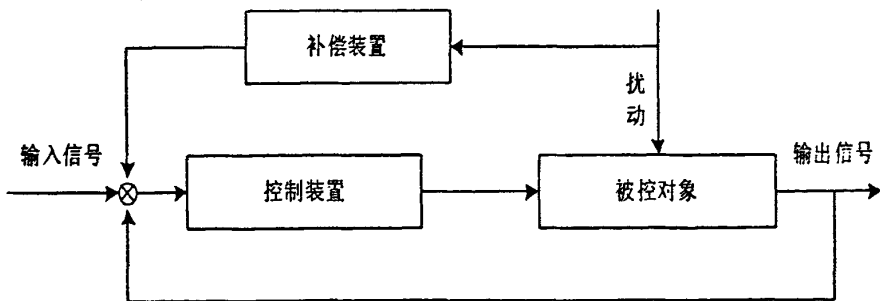


图 4.1-3 复合控制系统

根据理性液体的运动微分方程，即欧拉方程<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} f_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{du_x}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} \\ f_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \frac{du_y}{dt} = \frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ f_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \frac{du_z}{dt} = \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{cases} \quad (4.1-1)$$

又根据流体运动连续性方程<sup>[6]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (4.1-2)$$

可求出  $p, u_x, u_y, u_z$  四个变量。

在供水系统中符合理想液体伯努利积分条件，即：

$$1、\text{近似恒定流，则 } \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(u_x)}{\partial t} = \frac{\partial(u_y)}{\partial t} = \frac{\partial(u_z)}{\partial t} = 0，$$

$$\text{因此 } dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz$$

2、液体为不可压缩的均质液体， $\rho = \text{const}$

3、质量力有势，即质量力存在力势函数  $U(x, y, z)$ ，并有

$$f_x = \frac{\partial U}{\partial x}, f_y = \frac{\partial U}{\partial y}, f_z = \frac{\partial U}{\partial z}$$

4、沿流线积分，此时  $u_x = \frac{dx}{dt}, u_y = \frac{dy}{dt}, u_z = \frac{dz}{dt}$

将欧拉方程三是分别乘以  $dx, dy, dz$ ，然后相加得

$$(f_x dx + f_y dy + f_z dz) - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy + \frac{\partial p}{\partial z} dz \right) = \frac{du_x}{dt} dx + \frac{du_y}{dt} dy + \frac{du_z}{dt} dz$$

利用上述的四个条件得

$$dU - d\left(\frac{P}{\rho}\right) = u_x du_x + u_y du_y + u_z du_z = d\left(\frac{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}{2}\right) = d\left(\frac{U^2}{2}\right)$$

即

$$d\left(U - \frac{P}{\rho} - \frac{u^2}{2}\right) = 0$$

$$\text{积分得： } U - \frac{P}{\rho} - \frac{u^2}{2} = \text{const} \quad (4.1-3)$$

供水系统中质量力只有重力，去  $Z$  轴铅垂向上，则  $f_x=f_y=0, f_z=-g, dU=-gdz, U=-gz+\text{常数}$ ，上式可化简为：

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{u^2}{2g} = \text{const}3 \quad (4.1-4)$$

上式表示位置水头+压强水头+流速水头=流体所具有的机械能总水头  
对于同一流线上两点1和点2

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g}$$

考虑到损耗  $h_w'$ , 实际流体能量方程为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w' \quad (4.1-5)$$

供水系统中水泵运转时水泵出口点2比水泵吸入口点1的能量增加水头H, 则

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w' \quad (4.1-6)$$

$$\begin{aligned} H &= z_2 - z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_w' = (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + h_w' \\ &= H_1 + H_2 + H_3 + h_w' \end{aligned} \quad (4.1-7)$$

对于测量点控制点来说, 测量控制的是全压, 即

$$z_3 + \frac{p_3}{\gamma} + \frac{u_3^2}{2g} = \text{const}4 \quad (4.1-8)$$

而且, 对于测量点控制点来说, 高度是不变的,

$$\frac{p_3}{\gamma} + \frac{u_3^2}{2g} = \text{const}5 \quad (4.1-9)$$

因  $u_3 = \omega \cdot R = 2\pi \cdot n \cdot R$

$$\frac{p_3}{\gamma} + \frac{u_3^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{(2\pi \cdot n \cdot R)^2}{2g} = \text{const}5 \quad (4.1-10)$$

得

$$n = \frac{\sqrt{(\text{const}5 - \frac{p_3}{\gamma}) \cdot 2g}}{2 \cdot \pi \cdot R} = k_1 \sqrt{(\text{const}6 - p_3)} \quad (4.1-11)$$

考虑到管路会造成水头损失, 应考虑对其进行损失补偿, 必须引入修正系数  $K_2$ , 则有

$$n = k_2 k_1 \sqrt{(\text{const6} - p_3)} = k \cdot \sqrt{(\text{const6} - p_3)}$$

$$n = k \cdot \sqrt{(\text{const6} - p_3)} \quad (4.1-12)$$

式中:

$p_1$ ——进口压力, Pa

$p_2$ ——出口压力, Pa

$D_1$ ——进口管径, m

$D_2$ ——出口管径, m

$R$ ——叶轮半径

$\Delta Z$ ——进出口压力表高差, m

$N$ ——电功率, kW

$u_1$ ——进口水流速度, m/s, 可按  $u_1=4Q/(\pi D_1^2)$  计算

$u_2$ ——出口水流速度, m/s, 可按  $u_2=4Q/(\pi D_2^2)$  计算

$Q$ ——流量,  $\text{m}^3/\text{s}$

$\gamma$ ——重度  $\text{kgf}/\text{m}^3$

$g$ ——当地重力加速度,  $g=9.81\text{m}/\text{s}^2$

$\rho$ ——水的密度值,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$H_1 = (P_2 - P_1) / (g\rho)$ , 压能差

$H_2 = z_2 - z_1 = \Delta Z$ , 位能差

$H_3 = (u_2^2 - u_1^2) / (2g)$  动能差

$\eta_1 = (P_2 - P_1) Q / (102gN)$

$\eta_2 = \rho Q \Delta Z / (102N)$

$\eta_3 = \rho (V_2^2 - V_1^2) Q / (204gN)$

根据以上分析供水系统特定环境条件与技术要求, 该系统构成如图 4.1-4 所示

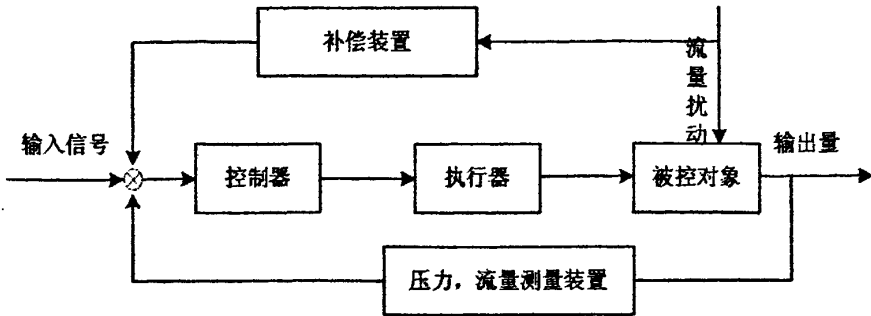


图 4.1-4 供水复合控制系统

由以上分析可知， $n = k \cdot \sqrt{(const6 - p_3)}$ ，测出用水点的压力，便可得出所需的转速。

但由于  $p_3$  的变化是随机的，非线性的， $k$ 、 $const6$  实际也是变化的，而且还有随时发生的水锤效应，用水规律无法用解析式描述。供水系统控制过程的主要特点是非线性、多变量、强耦合和时变性，因此无法建立精确管网水压的数学模型，所以用常规的控制方法很难使水压保持恒定。但模糊控制能够解决类似的控制问题，模糊控制无需建立数学模型，控制供水系统有较好的效果。因为，通常的模糊控制器以误差和误差变化作为输入，具有相似于比例微分控制的作用，因而具有良好的动态性能，在大压差范围内，系统动态响应快。但模糊控制缺少积分控制的作用，导致了模糊控制的静态性能比较差。PID 控制的静态性能比较好，恰好可以弥补这一缺陷，在小压差范围内，PID 控制供水系统，水压也很恒定。因此，在供水系统中应用 Fuzzy—PID 复合控制，可以获得满意的控制效果。同时引入自调整修正因子以增强控制系统的自适应能力，从而构成自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统。

## 4.2 数字 PID 控制在供水系统中的应用

在生产过程自动控制的发展历程中，PID 控制是历史最久、生命力最强的基本控制方式。在本世纪 40 年代以前，除了最简单的情况可以采用开关控制外，它就是唯一的控制方式。如今虽有许多新的控制方法，但 PID 控制由于它自身的优点仍然是使用得到最广泛的基本控制方式。

PID 控制具有以下优点：

原理简单，使用方便；适应性强，可广泛应用于化工、热工、冶金，炼油以及造纸、建材等各种部门。即使目前最新式的过程控制计算机，其基本的控制功能仍然是 PID 控制；鲁棒性强，即其控制品质对被控对象特性的变化不太敏感。用单参数的 PID 调节器构成的控制系统是一个单变量小闭环控制系统，如图 4.2—1 所示。

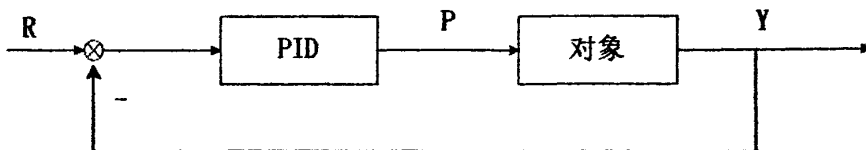


图 4.2—1 单闭环控制系统框图

PID 调节器的动作规律是：

$$P = K_p e + S_0 \int edt + S_2 \frac{de}{dt} \tag{4.2-1}$$

或

$$P = \frac{1}{\delta} \left( e + \frac{1}{T_I} \int edt + T_D \frac{de}{dt} \right) \tag{4.2-2}$$

式中  $\delta$ 、 $T_I$ 、和  $T_D$  参数意义与 PI、PD 调节器相同。

为了用计算机实现 PID 控制规律，当采样时间  $T$  很小时，可以通过离散化将这一方程直接化为差分方程。用矩形积分来求连续积分的连续值，用一阶差分代替一阶微分，其差分方程的表达形式如下：

$$\begin{aligned} P(k) &= K_p \left\{ e(k) + \frac{\Delta T}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) + [e(k) - e(k-1)] \right\} \\ &= K_p \left[ e(k) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^k e(i) \Delta T + T_D \frac{\Delta e(k)}{\Delta T} \right] \end{aligned} \tag{4.2-3}$$

$P(k)$ —第  $k$  次采样时的输出量；

$e(k)$ —第  $k$  次采样时的偏差值， $e(k) = R(k) - Y(k)$ ；

$R(k)$ —第  $k$  次采样时的给定值；

$Y(k)$ —第  $k$  次测量采样值；

$K_p$ 、 $T_I$ 、 $T_D$ —比例、积分、微分系数；

$k$ —采样序号， $k=1, 2, 3, \dots, n$ ；

$\Delta T$ —采样间隔时间(S)；

$\Delta e(k)$ —本次与上次偏差值之差， $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 。

上面的算式称为位置式算式，每次的  $P(k)$  值输出与过去的所有状态有关，当  $k$  值很大时要花费很大的时间去计算且占用很多的计算机内存。为此，可将之化为递推式。

根据 (4.2-3) 式可写出  $(k-1)$  采样时刻的输出为：

$$P(k-1) = K_p \left[ e(k-1) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \Delta T + T_D \frac{\Delta e(k-1)}{\Delta T} \right] \tag{4.2-4}$$

式 (4.2-3) 减去式 (4.2-4) 得：

$$\begin{aligned} \Delta P(k) &= P(k) - P(k-1) \\ &= K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{1}{T_I} e(k) \Delta T + T_D \frac{\Delta e(k) - \Delta e(k-1)}{\Delta T} \right\} \end{aligned} \tag{4.2-5}$$

又因为 
$$\begin{aligned} \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ \Delta e(k-1) &= e(k-1) - e(k-2) \end{aligned}$$

所以

$$\begin{aligned} \Delta P(k) &= K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{1}{T_I} e(k) \Delta T + \frac{T_D}{\Delta T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\} \\ &= K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \\ &= K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D \Delta^2 e(k) \end{aligned} \tag{4.2-6}$$

其中  $K_I = K_p \frac{\Delta T}{T_I}$       ---积分系数;

$K_D = K_p \frac{T_D}{\Delta T}$       ---微分系数;

$$\Delta^2 e(k) = \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$$

式(4.2—6)计算出的  $\Delta P(k)$  是输出量的增量, 故又称此式为增量式。使用增量算式可以做到无冲击切换, 此外还使系统不会出现积分饱和现象。对于外部执行机构无积分能力的系统, 在增量算式完成后, 接着运算递推式, 如:

$$\Delta P(k) = K_p \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D \Delta^2 e(k) \quad (4.2-7)$$

$$P(k) = P(k-1) + \Delta P(k)$$

为对各种控制规律进行比较, 图 4.2—2 表示了同一对象在相同的阶跃扰动下, 采用不同的调节动作时具有同样的衰减率的响应过程。显然, PID 作用控制效果最佳。但 PID 调节器有三个待整定的参数, 如果整定不合适, 可能效果适得其反。

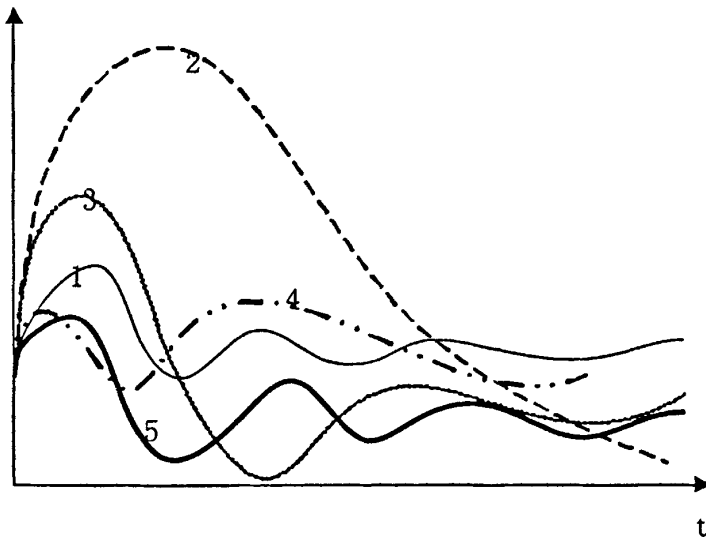


图 4.2—2 各种调节动作对应的响应过程

通常, 选择调节器动作规律时应根据对象特性、负荷变化、主要扰动和系统控制要求等具体情况, 同时还应考虑系统的经济性以及系统投入方便等。

### 4.3 模糊控制理论在供水系统中的应用

模糊控制是近年来兴起的一种新型控制方式。这种控制方式和传统的控制方式有着很大的区别。首先, 它的理论和以往的控制方法不同: 模糊控制理论是建点在模糊逻辑的基础上, 其数学基础是模糊数学。故而是以一种模糊控制理论为指导的全新控制方法; 其次, 模糊控制理论是以专家经验为依据的控制, 模糊控制理论可以说是一种智能控制方法; 再有,



模糊控制理论不需要知道对象的数学模型。在一些被控对象不明的场合，数字控制就显得无能为力，而模糊控制却能在被控对象的数学模型不知的情况下对对象实行控制。

#### 4.3.1 模糊控制的数学基础

模糊控制技术是以模糊数学为基础，模糊数学与经典数学有着本质上的区别。经典数学的主要特点是描述事物所用方法的精确性，它严格地建立在经典集合论的基础之上。而模糊数学是建立在模糊集合论基础上的。

##### 1、模糊集合与隶属函数

在普通集合中，一个元素(或对象) $x$ ，它对于某一论域 $U$ 的集合 $A$ ，要么 $x \in A$ ，要么 $x \notin A$ ，二者必居其一且只居其一。而模糊集合是指不同程度地具有某种特征的事物的总和。它不能用二值逻辑来表示。

为了表示模糊集合，引进隶属函数这一概念。

对于一个模糊集合 $A$ ，元素 $a$ 属于模糊集合 $A$ 的程度称为 $a$ 对模糊集合 $A$ 的隶属度，并且表示为 $\mu_A(a)$ ，它满足条件：

$$0 \leq \mu_A(a) \leq 1 \quad (4.3-1)$$

如果用 $x$ 表示模糊集合 $A$ 的元素变量，则有 $\mu_A(x)$ ，并称为隶属函数。隶属函数满足：

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1, \quad \text{即 } \mu_A(x) \in [0,1] \quad (4.3-2)$$

模糊集合的表示可借鉴经典集合的Zadeh表示法，表示方法如下：

$$\underline{A} = \frac{U_1}{X_1} + \frac{U_2}{X_2} + \dots + \frac{U_n}{X_n} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{X_i} \quad (4.3-3)$$

其中，“+”只表示相连的意思，并非相加。

##### 2、模糊关系

描述客观世界各事物间相互联系的数学表达式称为关系。对于一些不明确的关系必须用模糊关系来描述。

对于集合 $A$ 和集合 $B$ ，对它们的元素取序偶的过程称为直积运算。

$$A \times B = \{(x, y) | x \in A, y \in B\} \quad (4.3-4)$$

例如存在集合 $A$ 、 $B$ ：

$A = \{X_1, X_2, X_3\}$  和  $B = \{Y_1, Y_2\}$ ，则直积运算

$$A \times B = \{(X_1, Y_1), (X_1, Y_2), (X_2, Y_1), (X_2, Y_2), (X_3, Y_1), (X_3, Y_2)\} \quad (4.3-5)$$

从上可以看出：直积运算是在 $A$ 中取一个 $X_i$ 元素，然后在 $B$ 中取一个 $Y_j$ 元素，再把它们配成序偶 $(X_i, Y_j)$ 。

在模糊数学中，集合 $A$ 和集合 $B$ 的一个模糊子集 $R$ ，称为集合 $A$ 到集合 $B$ 的模糊关系。

一般，只有给出了直积空间 $A \times B$ 的模糊子集 $R$ 的隶属函数 $\mu_R(x, y)$ ，则 $A$ 到 $B$ 的模糊关系 $R$ 也就确定了。

### 3、模糊矩阵

如果论域  $A \times B$  为有限集时，模糊关系  $R$  可以用模糊矩阵来表示，其一般形式为：

$$\underline{R} = [\Gamma_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \cdots & \Gamma_{1m} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \cdots & \Gamma_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \Gamma_{n1} & \Gamma_{n2} & \cdots & \Gamma_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.3-6)$$

式中， $0 \leq \Gamma_{ij} \leq 1$ ； $i=1, 2, \dots, n$ ； $j=1, 2, \dots, m$ ；而  $\Gamma_{ij}$  表示集合中  $A$  第  $i$  个元素和集合  $B$  中第  $j$  个元素组成的的序对隶属于模糊关系  $R$  的程度。

模糊矩阵的求交和求并运算分别对应着取小、取大运算。

对模糊矩阵的合成  $S = X \cdot Y$ 。

若  $X = [X_{ij}]_{n \times m}$ ； $Y = [Y_{jk}]_{m \times p}$  则：

$$S = [S_{ik}]_{n \times p}, \quad \text{并且有: } S_{ik} = \bigvee_{j=1}^m (X_{ij} \wedge Y_{jk}) \quad (4.3-7)$$

### 4、模糊变换

从一个模糊向量  $A$  的一个模糊矩阵  $R$  的合成结果，可以确定一个模糊向量  $B$ 。

设有  $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  是  $n$  维模糊向量，而有

$$\underline{R} = [\Gamma_{ij}]_{n \times m} = \begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \cdots & \Gamma_{1m} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \cdots & \Gamma_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \Gamma_{n1} & \Gamma_{n2} & \cdots & \Gamma_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.3-8)$$

是  $n \times m$  维模糊矩阵表示的模糊关系，则称  $A \cdot R = B$  为模糊变换。由  $A$  和  $R$  通过模糊变换可以确定一个  $m$  维模糊向量  $B = (b_1, b_2, \dots, b_m)$

在实际中，可以把模糊关系  $R$  看作一个模糊变换器，其作用如图 4.3-1 所示。

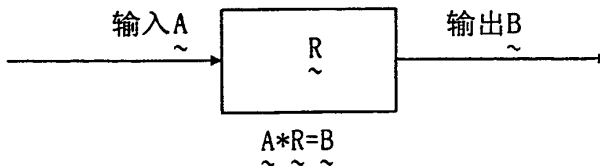


图 4.3-1 模糊关系

在模糊控制中，模糊关系  $R$  是由大量的模糊规则通过处理得到的。一般来说，从一条模糊规则可以得到一个相应关系  $R_i$ ，而控制系统的总关系  $R$  是由各条规则所得的关系求得

的，即有：

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i \tag{4.3-9}$$

式中  $n$  为规则条数。

### 4.3.2 模糊控制原理

模糊控制系统的原理框图如图 4.3—2 所示：

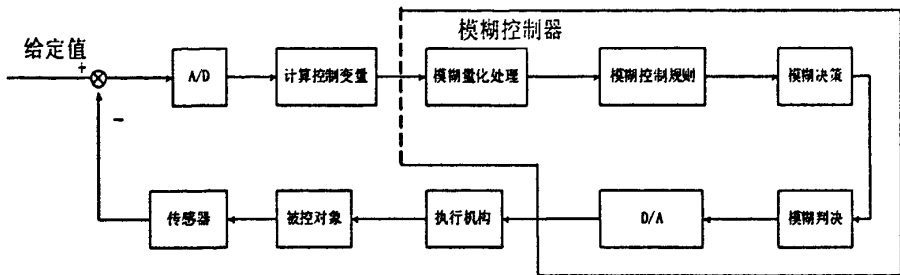


图 4.3—2 模糊控制系统原理框图

在该系统中，由系统输出的观测值和给定值经过采样和 A / D 转换得到一个确定的数字量，再将此数字量模糊化，然后根据所确定的模糊控制规则作出模糊决策还必须经过模糊判决以得到一个确切的控制量，通过 D / A 变换后施加于被控对象上。

以上输入量的模糊量化、模糊控制规则、模糊决策等部分就构成了一个模糊控制器。模糊控制系统与一般的计算机控制系统在整体结构上并没有什么明显差别，只是实现控制算法的软件不同而已。

### 4.3.3 基本模糊控制器及其设计

#### (一)基本模糊控制器介绍

自从模糊控制产生以来，为改善系统稳态性能和动态性能，其控制器的算法经过了不断的改进和发展。那类采用最常用、最基本的算法的模糊控制器称之为基本模糊控制器。

基本模糊控制器的结构框图如图 4.3—3 所示：

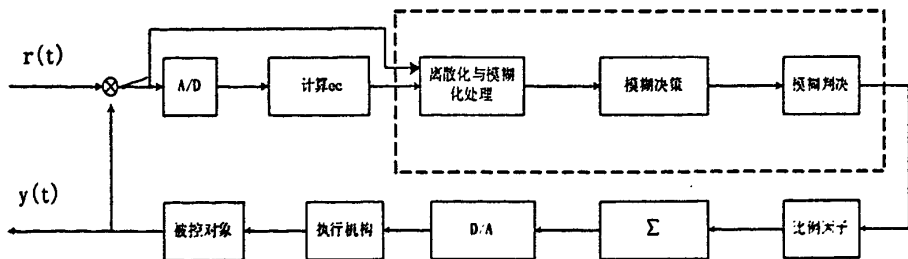


图 4.3—3 基本模糊控制器结构框图

基本模糊控制器包括三个组成部分：精确量的模糊化、模糊控制算法的实现、输出信息的模糊判决。

### (1)、精确量的模糊化

模糊控制器的输入量是偏差  $e$  和偏差变化率  $e'$ ，模糊化是针对  $e$  和  $e'$  而言的。一般在实际应用中将精确量离散化，即将连续取值量分为几挡，每一档对应一个模糊集。

若基本论域为  $[-x, x]$ ，模糊集的论域为  $(-n, -n+1, \dots, n)$ ，即可给出精确量的模糊化的量化因子  $k$ ：

$$k = \frac{n}{x} \quad (4.3-10)$$

在实际中，取模糊集在  $[-6, +6]$  之间，如果实际值与所设的  $[-6, +6]$  不符合，而在  $[a, b]$  范围，可由下式将  $[a, b]$  之间的变量  $x$  转换为  $[-6, +6]$  之间的量  $y$ 。

$$y = \frac{12}{b-a} \left[ x - \frac{a+b}{2} \right] \quad (4.3-11)$$

### (2)、建立模糊控制规则

模糊自动控制的规则实质上是把操作在控制过程中的经验加以总结，并将这些经验得来的相应措施总结成一条条的控制规则，据以制造一个“模糊控制器”，达到用机器代替人对工业过程进行控制。

模糊控制规则是用语言值描述的语句，在实际应用中，可用一系列的模糊条件语句来描述。模糊条件语句可以总结为模糊关系，在确定模糊关系之后，可用模糊推理规则输出模糊响应。

例如：如有 7 条控制规则，则可得到 7 个关系矩阵  $R_1 \sim R_7$ ，求出系统总关系为  $R$ ：

$$R = \bigcup_{i=1}^7 R_i \quad (4.3-12)$$

在得到系统总关系为  $R$  后，对于任何输入偏差  $e$ ，都可以求出输出控制量  $U$

$$\underline{u} = \underline{e} \cdot R \quad (4.3-13)$$

式中  $\cdot$  为合成关系。

这样，就完成了控制中的推理过程。控制规则的处理，关键就是通过这些规则求出可供推理的总关系  $R$ 。

### (3)、输出的模糊判决

从上面的输出控制量的求取过程可知道，得到的控制量  $u$  是一个模糊量。在实际控制过程中，加给被控对象的控制信号只能是一个精确值。把模糊量处理为精确量的过程称为模糊判决。

模糊判决一般有三种方法：

#### 1、最大隶属度法

如果对应的模糊子集为  $U$ ，则取该模糊子集中隶属度最大的那个元素  $C$  作为执行量，

即应满足：

$$U_u(C) \geq U_u(X) \quad (4.3-14)$$

例如，当

$$U = \frac{0.1}{2} + \frac{0.4}{3} + \frac{0.7}{4} + \frac{1.0}{5} + \frac{0.7}{6} + \frac{0.3}{7}$$

按最大隶属度原则，应取执行量  $C=5$ 。

### 2、中位数法

中位数法是利用模糊控制量  $u$  的隶属函数曲线和元素坐标所围成的面积并把这个面积分成两个相等的部分，分界点对应的元素为精确控制量  $c$ 。

如果存在

$$\sum_{i=1}^n U_u(x_i) = \sum_{j=1}^m U_u(x_j) \tag{4.3-15}$$

则取精确量  $c=x_n$ 。

### 3、加权平均法

在加权平均法中，一般取隶属度为加权系数。在这种方法中精确控制量  $c$  由下式给出：

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n U_u(X_i) \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n U_u(X_i)} \tag{4.3-16}$$

比较上面三种方法，第一种方法简单易行，第二、三种方法能充分利用模糊子集提供的有用信息量，这一点要优于第一种方法，但是计算量大。根据变频调速压力控制系统的实际情况，选用第一种方法。

### (二)基本模糊控制器设计

通常将模糊控制器输入变量的个数称为模糊控制的维数。从理论上说，模糊控制器的维数越高，控制精度越精细，但是维数越高，模糊控制规则变得过于复杂，控制算法的实现相当困难，系统不稳定。

一般情况下，一维模糊控制器用于一阶被控对象。由于这种控制器输入变量只选用误差一个，它的动态性能不佳。根据实际情况，在供水压力控制系统中选定二维模糊控制器，即双输入单输出模糊控制器的模式。

典型的二维模糊控制器如图 4.3-4 所示。

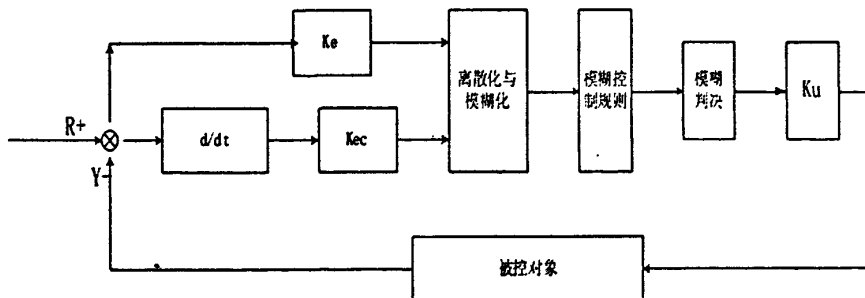


图 4.3-4 典型二维模糊控制器

图中：Ke—误差的量化因子

Kec—误差变化率的量化因子

Ku—输出量化因子

控制规则的设计是设计模糊控制器的关键。一般包括三部分的设计内容：选择描述输入、输出变量的词集、定义各模糊变量的模糊子集及建立模糊控制器的控制规则。

本文在压力控制系统设计中,对误差 E、误差的变化率 Ec 及控制量 U 的模糊集及其论域定义如表 4.3—1 所示:

表 4.3—1 误差 E、误差的变化率 Ec 及控制量 U 的模糊集及其论域定义

Ec 和 U 的模糊集	{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}
E 的模糊集	{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB}
E 和 Ec 的论域	{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}
U 的论域	{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}

表中 N: Negative, P: Positive, B: Big, S=small, 0: Zero. E 的模糊集之所以选择了 NO、PO, 主要是着眼于提高稳态精度。利用语言归纳控制策略形成模糊控制规则后,便要确定模糊变量赋值表,这里以变量 E 为例:

如表 4.3—2 模糊变量赋值表

E u E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	1	2	3	4	5	6
PB											0.1	0.4	0.8	1.0
PM										0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS									0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	
PO						0.1	0.6	0.1						
NO			0.1	0.6	1.0									
NS		0.1	0.5	1.0	0.8	0.3								
NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2									
NB	1.0	0.8	0.4	0.1										

将所有控制规则合成在一起，经大量计算，构成如表 4.3—3 所示的控制表，也称模糊控制查询表，并将此表放在计算机中，或其它工业控制设备的存储器中。当进行实时控制时，根据相关信息，从中查询出所需要的控制策略。

表 4.3—3 模糊控制查询表

Es Eu	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-5	6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
-4	7	6	7	6	7	7	7	4	4	2	0	0	0
-3	7	6	6	6	6	6	6	3	2	0	-1	-1	-1
-2	4	4	4	5	4	4	4	1	0	0	-1	-1	-1
-1	4	4	4	5	4	4	1	0	0	0	-1	-1	-1
0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+0	4	4	4	5	1	1	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4
+1	2	2	2	2	0	0	-1	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+2	1	2	1	2	0	-3	-4	-4	-4	-3	-4	-4	-4
+3	0	0	0	0	-3	-3	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
+4	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7
+5	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6	-6
+6	0	0	0	-2	-4	-4	-7	-7	-7	-6	-7	-6	-7

#### 4.4 带修正因子的模糊控制器在供水系统中的应用

以上的设计方法运算繁琐且计算量大,十分麻烦。为此,引入一修正因子<sup>[25]</sup>,用解析式概括地表示控制规则:

$$U = -\langle \alpha E + (1-\alpha)EC \rangle \quad \alpha \in [0-1] \quad (4.4-1)$$

通常控制规则中涉及变量有误差 E、误差变化率 EC 以及控制量 U,为方便讨论:将它们的论域简单的分为-3、-2、-1、0、1、2、3 七个等级。这样,我们可以通过调节  $\alpha$  值的大小,就可以对控制规则进行灵活的改变。表 4.4-1、4.4-2 分别列出  $\alpha=0.5$ 、 $\alpha=0.2$  时的控制表。

表 4.4-1  $\alpha=0.5$  时的控制表

EC \ U E	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	1	1	0
-2	3	2	2	1	1	0	-1
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
3	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3

表 4.4-2  $\alpha=0.2$  时的控制表

EC \ U E	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	2	1	1	0	-1	-2
-2	3	2	1	0	0	-1	-2
-1	3	2	1	0	-1	-1	-2
0	2	2	1	0	-1	-2	-2
1	2	1	1	0	-1	-2	-3
2	2	1	0	0	-1	-2	-3
3	2	1	0	-1	-1	-2	-3



带一个修正因子虽然可以方便的修改控制规则,但还存在某些不足之处。控制规则完全依赖  $\alpha$  一个参数,而  $\alpha$  值的大小则反应了对误差和误差变化率的加权程度, $\alpha$  一旦选定,这种加权程度就固定了,即控制规则再也改变不了。而在实际控制系统中,在不同的状态下,对误差及误差变化率的加权程度有不同的要求。当误差较大时,控制系统的主要任务是消除误差,这时,误差在控制规则中的加权应该大一些;当误差较小时,控制系统的主要任务是使系统尽快稳定,避免产生过大的超调,这时,误差变化在控制规则中的加权应该大一些。带一个修正因子的控制规则的方法无法满足这种要求,为此可以在不同的误差等级引入不同的修正因子,当误差较小时,用修正因子  $\alpha_1$  来描述控制规则;当误差较大时,用修正因子  $\alpha_2$  描述控制规则。这样,控制规则改为:

$$U = \begin{cases} -\langle \alpha_1 E + (!-\alpha_1) EC \rangle, E = \pm 1, 0 \\ -\langle \alpha_2 E + (!-\alpha_2) EC \rangle, E = \pm 2, \pm 3 \end{cases} \quad (4.4-2)$$

当  $\alpha_1=0.4$ ,  $\alpha_2=0.6$  时的控制表如表 4.4-3 所示。

表 4.4-3  $\alpha_1=0.4$ ,  $\alpha_2=0.6$  时的控制表

U \ E	EC	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	3	3	2	2	2	1	1
-2	-2	3	2	2	1	1	1	0
-1	-1	2	2	1	1	0	-1	-2
0	0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	2	1	0	-1	-1	-2	-2
2	2	0	-1	-1	-1	-2	-2	-3
3	3	-1	-1	-2	-2	-2	-3	-3

修正因子的控制规则虽然比带一个修正因子的控制规则灵活,优越,但它仍然不够完善, [李东辉, Fuzzy 控制规则自调整和 Fuzzy 控制系统寻优及其仿真研究,《模糊数学》, 1986. 9(3)P53-61], 修正因子的可调范围比较窄,不能完全满足控制系统在不同的状态下对修正因子的要求,并且引入多个修正因子,对每个误差等级都安排一修正因子,提出了带多个修正因子的控制规则。对带一个、两个和三个修正因子模糊控制器进行了数字仿真,得出以下结论:带两个修正因子的控制规则比带一个修正因子的控制规则灵活、优越,带三个修正因子的控制规则又比带两个修正因子的控制规则灵活优越。

#### 4.5 自调整修正因子 Fuzzy 控制器在供水系统中的应用

以  $\alpha$  作为修正因子修改控制规则十分方便,并且  $\alpha$  还有深刻的物理意义,因为  $\alpha$  值的大小直接表示了对误差 E 和误差变化 EC 的加权程度。在被控对象的阶次较高时,对误差变化 EC 的加权值就应该大于对误差 E 的加权值,故  $\alpha$  取较小的值;反之,在被控对象的阶次较低时,对误差变化 EC 的加权值就应该小于对误差 E 的加权值,故  $\alpha$  取较大的值。所以这种用修正因子  $\alpha$  修改控制规则的方法是合理可行的。

用修正因子修改控制规则,虽改善了控制性能,但控制规则的调整仍然是凭经验来确定,这势必带有一定的盲目性,很难得到最佳参数。另外,系统未能在运行中自动调整修正因子,不具有自动调整模糊控制规则的功能。人们自然希望系统能在运行中自动地修改、调整和完善控制规则。这里提出的一种自调整修正因子 Fuzzy 控制器的控制规则如下<sup>[21]</sup>:

$$U = -\langle \alpha E + (1-\alpha)EC \rangle \quad (4.5-1)$$

式中  $\alpha = (\alpha_s - \alpha_0) |E|/N + \alpha_0$ ,  $0 < \alpha_0 < \alpha < \alpha_s < 1$

且定义 E、EC、U 的论域:

$$E=EC=U=\{-N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N\}$$

当误差 E 增加时, 修正因子  $\alpha$  增加, E 的加权程度加大; 反之, 当误差 E 减小时, 修正因子  $\alpha$  减小, E 的加权程度变小。这样, 随着误差 E 变化, 修正因子  $\alpha$  自动地变化, 符合对 E 和 EC 权重的要求。

#### 4.6 FUZZY-PID 控制在供水系统中的应用

古典控制理论、现代控制理论(包括自适应控制理论和随机最优控制理论等)均是以被控对象的精确数学模型为基础的。而在实际工业过程中, 由于被控对象本身固有的时变性、强耦合及内部动力学的不确定性和外部干扰的随机性, 其精确的数学模型很难建立, 甚至无法建立。这就为上述控制理论的实际应用带来了很大的困难。目前, 工业过程中广泛采用的 PID 控制算法对具有非线性、时变、强耦合等特性的被控对象, 控制效果并不理想。虽然针对这些现象在实际应用中又出现了最优 PID, 非线性 PID 和自适应 PID 等控制算法, 但从根本上说, 由于对 PID 参数的寻优是对 P、I、D 三种控制作用的折衷及“干扰抑制整定”和“目标跟踪整定”的折衷, 从而对整定的参数并不是最优的, 它受到 PID 控制规律本身的限制。

另一方面, 模糊控制是一种新型算法, 它具有较强的鲁棒性, 并且具有动态响应好、上升时间快、超调小等优点。尤其是当被控对象的数学模型很难建立或系统具有非线性、时变和强耦合等特性时, 它的优越性更为突出。但模糊控制本身也存在一些缺点, 如稳态性能较差等。

模糊控制和 PID 控制阶跃响应曲线比较如图 4.6—1 所示。

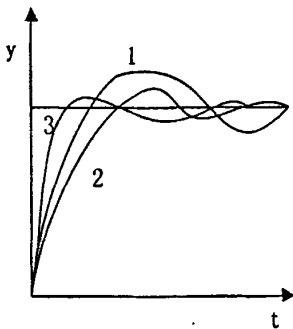


图 4.6—1 模糊控制和 PID 控制的比较 a)

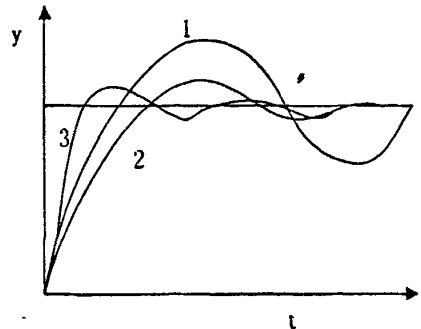


图 4.6—1 模糊控制和 PID 控制的比较 b)

对图 a) PID 控制: 1、超调 4%, 调节时间 9 秒; 2、超调 1%, 调节时间 7 秒; 3、超调 0.5%, 调节时间 3 秒;

对图 b) Fuzzy 控制: 1、不稳定; 2、超调 4%, 调节时间 11 秒; [3]超调 2%调节时间 8 秒。

FUZZY—PID 的复合方式有以下两种:

## (一)、串行 FUZZY—PID 控制方式

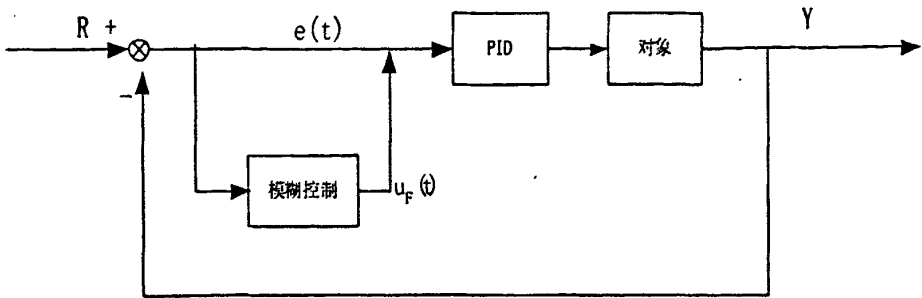


图 4.6-2 串行 FUZZY—PID 控制方式的原理图。

在线性控制系统的误差通道并联一个 FUZZY 控制器。这样组合的系统动态过程中作用于 PID 控制的输入值为  $e(t) + u_f(t)$ ，比稳态过程中的输入值  $e(t)$  有更大的驱动力。因为当  $e(t)$  处于模糊零级范围内时  $u_f(t)$  值为零，即仅有误差  $e(t)$  作用于 PID 控制器。这种方式 FUZZY 控制的输出是阶梯函数，靠调节 PID 控制的输入偏差的突然变化来提高系统的动态响应速度。

## (二)、并行 FUZZY-PID 控制

图 4.6-3 表示了并行 FUZZY—PID 控制的原理图。

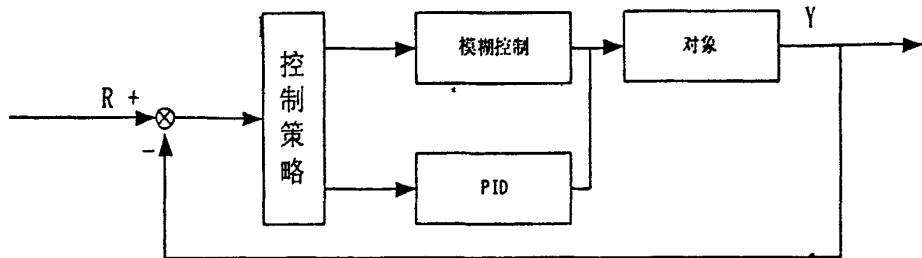


图 4.6-3 并行 FUZZY—PID 控制方式

将线性控制系统与模糊控制并联，其合成作用作为控制输出。结构简单，充分发挥了两者的优点（FUZZY 控制动态响应好，PID 控制稳态性能好），但同时也带来了两者的缺点。

控制策略选择是根据系统的信息，判断是采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，还是采用 PID 控制。控制策略选择的基本原则是：以误差的大小作为选择的条件，在大误差范围内，采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，以提高动态响应速度，增强自适应能力；在小误差范围内，采用 PID 控制，以消除静态误差，提高控制精度。同时，为了防止控制策略的切换过于频繁，在误差的切换点，系统规定控制策略不作切换，维持上一一次的动作。控制策略选择的具体情况如下：

(1) 以误差  $E$  的大小作为自调整修正因子 Fuzzy 控制与 PID 控制的切换条件： $|E|=E_0$  为切换点；

(2) 在大误差范围内 ( $|E| > E_0$ )，采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，以提高系统的动态响应速度，同时随误差的变化自动调整修正因子，从而增加系统的自适应能力；

(3) 在小误差范围内 ( $E_2 < |E| < E_0$ )，采用 PID 控制，以消除静态误差，提高控制

精度。

(4) 在误差切换点 ( $|E|=E_0$ ) 以及系统允许误差范围内 ( $|E|<E_z$ )，系统保持上一次的动作；

自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制器的实际输出为：

$$U = \begin{cases} -K_3 < \alpha E + (1 - \alpha) EC >, |E| > E_0 \\ u_0, |E| = E_0, |E| \leq E_z \\ K_p e(n) + K_i \sum e(i) + K_d [e(n) - e(n-1)], E_z < |E| < E_0 \end{cases} \quad (4.6-1)$$

式中

$$\alpha = (\alpha_s - \alpha_0) |E| / N + \alpha_0, \quad 0 < \alpha_0 < \alpha < \alpha_s < 1$$

且定义 E、EC、U 的论域：

$$E = EC = U = \{-N, \dots, \dots, -1, 0, 1, \dots, \dots, N\}$$

$|E|=E_0$  为控制切换点，

$|E| \leq E_z$  为系统误差指标，

$u_0$  表示系统上一次的动作，

$K_3$  为控制量比例系数，

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为比例、积分、微分系数，

$e(i)$  为第  $i$  次采样误差。

## 第五章 硬件设计

### 5.1 工程概况

上海卢湾城市花园,由六幢联体板式26层高层,六幢联体板式11层小高层,及一幢4层的幼儿园组成的高档市中心居住小区,总建筑面积70000余平方米。供水系统拟采用变频调速竖向分区给水方式。地下室及1—6层为低区采用市政管网直接供水,7—16层为中区,17—26层为高区,中区和高区分别采用变频调速供水。如图5-1所示。其中高区由4台65DLX8水泵及一台50DLX8水泵组成,中区由4台65DLX6水泵及1台50DLX6水泵组成。本文主要论述高区水泵组的变频调速供水系统的应用设计。

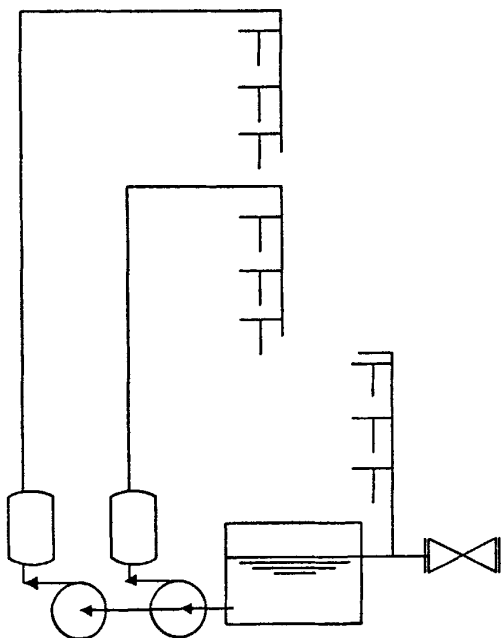


图 5.1-1 变频调速器压管并联给水系统

4台65DLX8水泵作为主泵,单泵流量 $30\text{m}^3/\text{h}$ ,扬程为116M,最大扬程为148M,单台电机为380V/22KW。1台50DLX8水泵作为辅泵组。单泵流量 $12.5\text{m}^3/\text{h}$ ,扬程为94M,最大扬程为116M,单台电机功率为380V/11KW。配备压力罐 $\Phi 1600\times 2200$ 。最不利用水点最小压力设定为 $1\text{kg}/\text{cm}^2$ ,最大用水量为 $100\text{m}^3/\text{h}$ 。如图5-2。

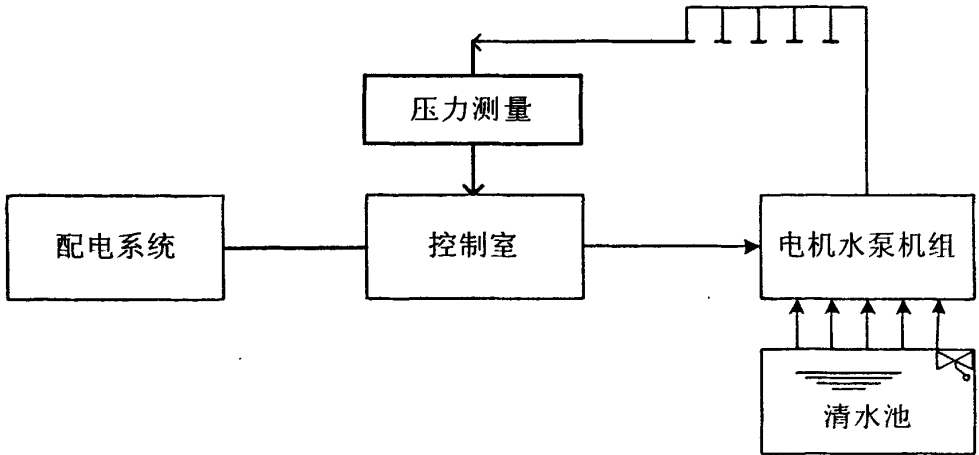


图 5.1-2 供水系统示意图

## 5.2 控制系统硬件设计

供水系统控制过程的主要特点是非线性、多变量、强耦合和时变性，影响水压的稳定，无法建立精确管网水压的数学模型，因此用常规的控制方法很难使水压保持恒定。但模糊控制能够解决类似的控制问题，模糊控制无需建立精确数学模型，控制供水系统有较好的效果。因为，通常的模糊控制器以误差和误差变化作为输入，具有相似于比例微分控制的作用，因而具有良好的动态性能，在大压差范围内，系统动态响应快。但模糊控制缺少积分控制的作用，导致了模糊控制的静态性能比较差。而 PID 控制的静态性能比较好，恰好可以弥补这一缺陷。在小压差压力小扰动范围内，PID 控制供水系统，水压也很恒定。因此，在供水系统中应用 Fuzzy—PID 复合控制，可以获得满意的控制效果。同时引入自调整修正因子以增强控制系统的自适应能力，从而构成自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统。

### 5.2.1 水泵组运行的控制策略

水泵组运行的控制策略实际上是一个二次供水系统的优化调度问题，目标就是实现稳定水压的控制，在达到稳定、高质供水的基础上降低能耗和供水成本。水压和流量调节有三种方法：不同台数水泵并联组合调节、阀门开度调节，水泵变速调节。不同台数水泵并联组合调节一般选用不等容量的恒速泵进行优化组合，只能实现有级调节，而且级差大，它通常作为大范围的粗调。阀门开度调节比较简单，但是其效率低，因为大量的能量都消耗在阀门的水头损失上。水泵变速调节控制复杂、设备费用较高，但节能效果显著，可连续调节。根据以上情况，目前普遍采用的是“不同台数水泵并联组合调节+水泵变速调节”方式，不同台数水泵并联组合调节起分段粗调的作用，变速调节在段内实现连续调节，段的划分原则是使转速范围在额定转速的 70%~100% (105%) 之间。必须指出，越是用水低谷，变频器控制的消耗功率越是显著减小。但在高峰区 (90%~100%)，要增加变频器自身的损耗，所以，最大 (96~100%) 用水时用工频电源使电机运转比变频器控制效率高。因此，在高峰区我们采用工频电源使电机定速运转，只在低谷区采用变频器控制，这样可以获得更好的节能效果，如果采用变频控制加并联几台定速泵，那么就可以在广阔范围内进行连续的流量控

制。

一台调速(a)和三台恒速泵(b 和 c 和 d)并联组合的运行曲线如图 5.2-1 所示。在运行中根据要求调节流量的大小有四种组合方式：“a”、“a+b”、“a+b+c”和“a+b+c+d”。这四种组合方式对应于图中四个工作区域，四个工作区域对应的流量调节范围分别为  $0-Q_1$ 、 $Q_1-Q_2$ 、 $Q_2-Q_3$  和  $Q_3-Q_4$ 。在工作点 A 时是一台调速泵运行且转速达到额定转速，此时保持水压在  $H_1$  时所提供的最大流量为  $Q_1$ ；在工作点 B 时，是一台恒速泵和一台调速泵并联投入运行，且调速泵达到额定转速的情况，此时保持水压在  $H_1$  时所提供的最大流量为  $Q_2$ ；同样，在工作点 C 时，是两台恒速泵和一台调速泵并联投入运行，且调速泵达到额定转速的情况，流量为  $Q_3-Q_4$  时，三台泵恒速运转，一台泵调速运转，在 D 点，此时保持水压在  $H_1$  时所提供的最大流量为  $Q_4$ ，流量超过  $Q_4$  时，已超过系统理想供水能力，将无法调节使水压保持在  $H_1$  值，水压下降。

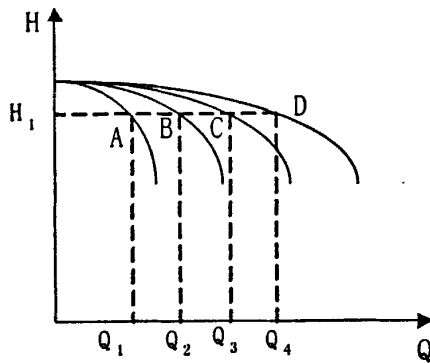


图 5.2-1 水泵组运行工况

控制策略的另一个问题是水压采样点的选取，一般有三种选取方法：出水母管压力恒定、管网末端压力恒定和管网多点压力恒定。第一种控制比较简单，不需要远距离传输压力采样信号，适合于管路较短，管道阻力较小，流量变化范围不大的场合。第二种控制是保持管网末端水压恒定，即保证最不利的用水点水压恒定，它比前者节能，也是合理的供水方式。第三种控制方式是前两种控制方式的折衷方案，也称为出口水压多恒压变量控制方式，即在整个流量范围内分段设定恒压给定值，根据段内的流量的变化范围，可计算出平均的出口水压设定值，段分得愈细，精确度愈高。市政水厂因无法确定供水最不利点，常采用这种方式。由于本工程管道并不长，管径较粗，故本文采用出口压力测量方式。

### 5.2.2 自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统的控制原理

自调整修正因子 Fuzzy 具有良好的动态性能，能够随着误差  $E$  的变化修改控制规则，有一定的自适应能力，但不具备 PID 控制良好的静态性能，为此，把 PID 控制引入自调整修正因子 Fuzzy 控制中，构成自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制器。将这种控制器用在供水系统中，构成自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统。其控制原理框图如图 5.2-2。

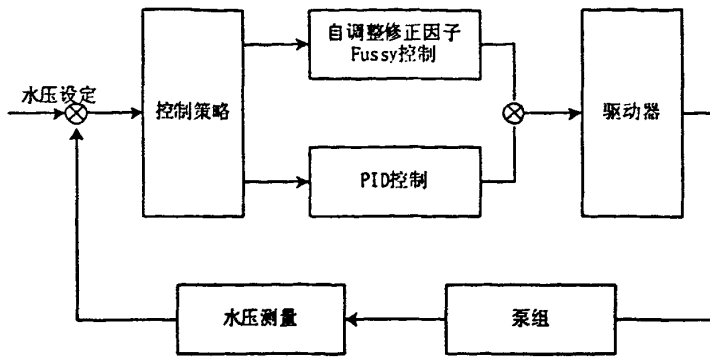


图 5.2-2 自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制供水系统的控制原理图

控制策略选择是根据供水系统水压误差的大小，判断是采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，还是采用 PID 控制。控制策略选择的基本原则是：以水压误差的大小作为选择的条件，在大误差范围内，采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，以提高动态响应速度，增强自适应能力；在小误差范围内，采用 PID 控制，以消除静态误差，提高控制精度。同时，为了防止控制切换过于频繁，在误差的切换点，系统规定控制策略不作切换，维持上一次动作。

控制策略选择的具体情况如下：

- (1)以压差 E 的大小作为自调整修正因子 Fuzzy 控制与 PID 控制的切换条件： $|E| = E_0$  为切换点；
- (2)在大压差范围内( $|E| > E_0$ )，采用自调整修正因子 Fuzzy 控制，以提高系统的动态响应速度，同时随误差的变化自动调整修正因子，从而增加系统的自适应能力；
- (3)在小压差范围内( $E_z < |E| < E_0$ )，采用 PID 控制，以消除静态误差，提高控制精度。
- (4)在误差切换点( $|E| = E_0$ )以及系统允许误差范围内( $|E| \leq E_z$ )，系统保持上一次的动作用，避免频繁切换；

自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制器的实际输出如下所示。

$$U = \begin{cases} -K_3 < \alpha E + (1 - \alpha)EC >, |E| > E_0 \\ u_0, |E| = E_0, |E| \leq E_z \\ K_p e(n) + K_i \sum e(i) + K_d [e(n) - e(n-1)], E_z < |E| < E_0 \end{cases} \quad (5.2-1)$$

式中

$$\alpha = (\alpha_s - \alpha_0) |E| / N + \alpha_0, \quad 0 < \alpha_0 < \alpha < \alpha_s < 1$$

且定义 E、EC、U 的论域：

$$E = EC = U = \{-N, \dots, \dots, -1, 0, 1, \dots, \dots, N\}$$

$|E| = E_0$  为控制切换点，

$|E| \leq E_z$  为系统误差指标，

$u_0$  表示系统上一次的动作用，

$K_3$  为控制量比例系数，

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为比例、积分、微分系数，

$e(i)$  为第 i 次采样误差。

PLC 定时采样管网水压，并求出水压误差值。根据差的大小，按照自调整修正因



子 Fuzzy-PID 控制器的控制策略选择原则，选择相应的控制策略，求得控制量，从而控制水泵的转速或者水泵的台数。这样就完成了对水压的一次控制算法，然后等待第二次采样，进行第二控制……这样循环下去，直至水压差在允许的范围内。而其中的参数如采样周期、量化因子、比例因子、修正因子中的变量，比例积分微分系数应在模拟调试中求得，然后根据系统的现场调试情况进行合理的选择。

### 5.2.3 自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制恒压供水系统的组成

该供水系统的结构框图如图 5.2-3，通过压力传感器将电气控制部分和水泵组联系起来，形成压力反馈闭环控制系统。整个系统根据水压设定值以及管网水压的情况按照自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法自动控制水泵的转速以及工频泵的投入 / 切出，以达到恒压的目的，值班人员只需在控制室通过控制台对水压、流量、电流以及水泵运行情况进行监视记录。当然，系统同时也可设置为手动工作方式。

系统利用 FX<sub>2</sub> 系列 PLC 具有体积小、成本低、高可靠性、易于使用以及配置方便等优点，以此作为整个系统的控制核心。系统选择 FX<sub>2</sub>—48MR 作为基本单元，以 FX—4AD 和 FX—2AD 作为模拟输入输出模块，以 FX-16EYT 扩展模块驱动七段码显示水位和水压的值。PLC 的主要工作是采样管网水压并与设定值作比较，然后根据压差大小采用自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制算法，控制调速泵的运行频率，输出工频泵投切信号。

系统使用三菱 FR-A100 泵类专用变频器拖动一台调速泵工作，通过选择合适的 V / f 曲线、转矩补偿曲线以及设定加减时间，使泵能够平稳的起停，并根据给定的转速信号进行调整。调速泵在一定的转速范围内工作，在保证管网压力恒定的同时，变频器可根据管网压力和流量变化自动或手动切换到某一机组中的任何一台泵组上工作。

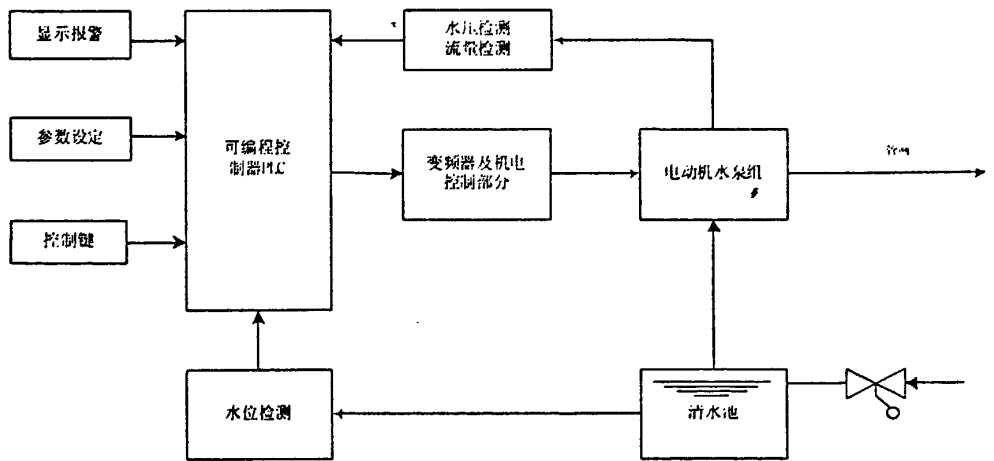


图 5.2-3 自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制恒压供水系统结构框图

系统配置水位变送器，监视清水池的水位变化，并发出上限 / 下限报警信号。为确保同一台泵不能同时运行在变频 / 工频状态，变频运行的机组在电气上设有互锁电路。为了使泵能平稳的起停，每台泵都可以工作在变频状态，但同一时刻系统只能有一台泵工作在变频状态，所以系统设有变频互锁电路。

### 5.2.4 自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制恒压供水系统的功能

采用自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法，以 PLC 和变频器为核心，具有手

动 / 自动的自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制恒压供水系统具有以下几个功能:

(1)根据现有的泵组情况: GC 型多级清水离心泵 4 大 1 小, 为合理的应用泵组, 提高工作效率, 用水高峰期采用效率高的大泵工作, 用水低谷期采用小容量的小泵工作, 以提高泵的使用率。系统能实现其切换;

(2)根据压差的大小, 按照自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制算法, 控制泵的转速以及工频泵的投切;

(3)为防止某些水泵因长期闲置而锈蚀, 系统按先进先出的原则, 经过一定的时间对工频泵进行轮流切换, 使泵均匀磨损, 提高水泵并联的整体效率, 延长使用寿命;

(4)系统具有手动和自动两种工作方式, 进一步提高系统的可靠性;

(5)由于采用变频器控制水泵机组, 所以调速泵可以实现软启动及软停车控制(从零逐渐加速到最大速度或从最大速度到零);

(6)为确保变频器输出不与工频短路, 机组在电气线路上设有工频 / 变频互锁电路;

(7)系统设有水位、压力和流量数字显示以及各泵工作状态指示, 便于值班人员监视;

(8)故障保护及报警功能: 过压、欠压的声光报警; 清水池水位上下限的声报警; 变频器故障报警; 变频器具有停电、过流、欠电压、过电压、过载、过热等多种保护措施。操作台设有相应的报警指示灯, 另外, 变频器本身显示故障代码, 并会自动切断变频器的主电路输出。

(9)技术指标: 水压波动不大于 0.01MPa。

### 5.2.5 PLC 的选择及设计

FX2 系列 PLC 既有单元式 PLC 体积小、成本低和安装方便等特点, 又有模块式 PLC 配置灵活的特点(其总体性能见表 5.2-1, 软件指标见表 5.2-2)它可以由基本单元、扩展单元、扩展模块以及特殊模块等四种产品构成不同功能的系统。基本单元最大点数可达 40 / 40 个 I / O 点, 若点数不够, 可选配多达 24 / 24I / 0 点的扩展单元, 或 16 / 0、0 / 16 点的扩展模块, 甚至可以采用点对点的通讯方式, 将多台机联接起来, 构成点数多几倍的系统。由此分析, 选用 FX2 系列 PLC 完全满足供水系统对 I / O 点数的要求。

FX2 系列 PLC 软件性能<sup>[17]</sup>

表 5.2-1 FX2 系列 PLC 总体性能<sup>[17]</sup>

环境温度	00-55 C
环境湿度	35—89%RH(不结露)
抗振	JIS 动作 C0911 标准 10-55HZ 0.5mm(最大 ZG)3 方向各 2 小时
抗噪声干扰	用噪声仿真器产生电压 100V, 噪声脉冲宽度为 1usec, 周期为 30-100HZ 的噪声, 在此噪声干扰下 PLC 工作正常。
耐压	AC1500V 1 分钟(各端子与接地端之间)
绝缘电阻	5M 以上(各端子与接地端之间)
接地	第 3 种接地, 不能接地时也可浮空

表 5.2-2 FX2 系列 PLC 软件性能<sup>[17]</sup>

项 目	性 能 指 标	备 注
操作控制方式	反复扫描程序	由逻辑控制器 LSI 执行
I/O 刷新时间	批处理方式 (END 指令执行时成批刷新)	有直接 I / O 指令及输入滤波时间常数调整指令
操作处理时间	基本指令: 0.72us / 步	功能指令: 几 $\mu$ s / 步
编程语言	继电器符号语言 (梯形图), 步进顺控指令	可用 SFC 方式编程
程序容量 / 存储器类型	2K 步 RAM (标准配置) 4K 步 EEPROM 卡盒 (选配) 8K 步, RAM, EEPROM, EPROM 卡盒 (选配)	
指令数	基本逻辑指令 20 条, 步进顺控指令 2 条功能指令 85 条	
输入继电器	24VDC, 7mA, 光电隔离	X0-X177 (8 进制)
输出继电器	继电器: 250VAC, 30VAC, 2A (电阻负载); 双向硅: 242VAC, 0.3A / 点, 0.8A / 4 点; 晶体管: 30VDC, 0.5A / 点, 0.8 / 4 点	Y0-Y177 (8 进制) I / O 点数一共 128 点

FX2 系列 PLC 具有算术运算, 数据传送等功能, 完全满足供水系统所需要的 A / D, D / A、PID 运算等工作。

FX2 系列 PLC 标准配置 2KSRAM, 也可配置容量达 8KSRAM 的 EEPROM 或 EPROM 卡盒。可以满足本系统完成三通道 A / D 转换、一通道 D / A 转换、自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法和故障报警等工作对程序容量的要求。

供水系统中, PLC 由 FX2-48MR、FX-16EYR, FX-16EYT, FX-4AD 以及 FX-2DA 四个部分组成, 当然应包括编程器 (作为独立的部件, 这里不作介绍)。其组成如图 5.2-4 所示。

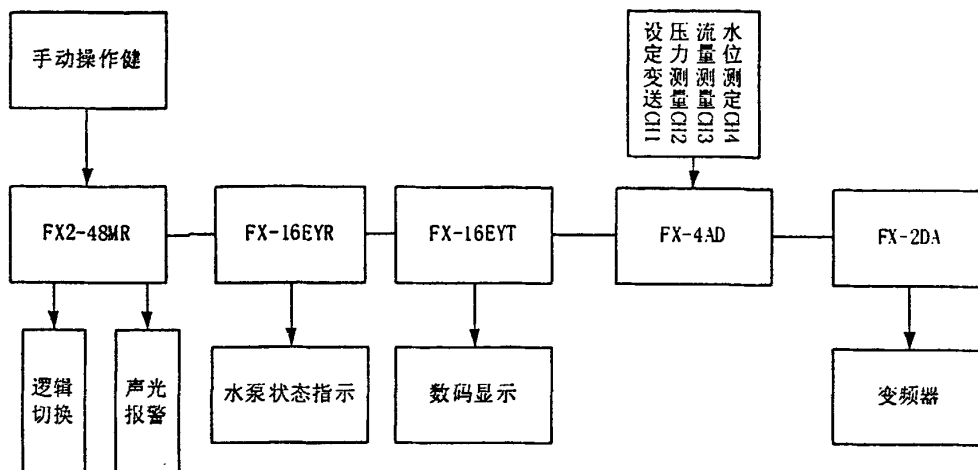


图 5.2-4 PLC 系统的组成

FX2-48MR 是基本单元，I/O 点为 24 / 24 点，采用继电器输出形式，是 PLC 核心部分。FX-16EYR 是扩展模块，点数为 0 / 16，继电器输出形式，用以增加输出点数。FX-16EYT 是扩展模块，点数为 0 / 16，采用晶体管输出形式，用以驱动七段码显示压力以及流量。FX-4AD 和 FX-2DA 是直接接在扩展总线的模拟量输入单元和模拟输出单元，分别完成对水压、流量以及清水池水位的 A / D 转换及控制模拟量的输出。有关性能表见表 5.2-3、5.2-4。

5.2-3 FX-4AD 特性<sup>[17]</sup>

项目	电压输入	电流输入
	四通道模拟量输入，通过输入端子可选定电压或电流输入	
输入范围	-10~+10VDC	-20~+20mADC
数字输出	12bits 转换，输出范围：-2048~+2048	
分辨率	5mv	20mA
综合精度	±1%	
一电源	24VDC+10% 50mA	
I/O 特性	占 8 个 I/O 点	

表 5.2-4 FX-2DA 的特性<sup>[17]</sup>

项目	电压输出	电流输出
	二通道模拟量输入, 通过输出端子可选定电压或电流输出	
输出范围	-10~+10VDC	-20~+20mADC
数字输入	-2048~+2048    0—1000	
分辨率	5mv	20mA
综合精度	±1 %	
电源	24VDC+10 %    50mA	
速度	18ms / 2 通道	
I/O 特性	占 8 个 I/O 点	

表 5.2-5 PLC I/O 分配表

类别		I / O 点	功能说明	输入 / 输出装置
输入	开关量	RUN, X0 X1~X5 X11~X15 X21 X22	PLC 运行 / 停止信号 1#~5#泵运行信号 I#~5#泵停止信号 A / B 泵组选择信号 工频泵轮流投切信号	按钮 1AN-20AN
	模拟量	CH1 CH2 CH3 CH4	水压设定输入 水压实测输入 流量输入 清水池水位输入	WTGP 压力变送器 HQ971 流量计 UQZ-51B 2 液位计
输出信号	继电器输出型	Y0~Y3 Y4~Y7 Y10~Y13 Y14~Y17 Y20~Y23 Y24~Y27 Y30~Y33 Y34~Y37 Y40~Y41 Y42~Y43	1=泵工频运行 / 停止、变频运行 / 停止控制 2=泵工频运行 / 停止、变频运行 / 停止控制 3=泵工频运行 / 停止、变频运行 / 停止控制 4=泵工频运行 / 停止、变频运行 / 停止控制 5=泵工频运行 / 停止、变频运行 / 停止控制  清水池水位上下限声光报警 过压、欠压声光报警	继电器 1J~32J 信号灯 1HL~32HL  信号灯 33HL~36HL 发声器 1SS~4SS
	晶体管输出型	Y50~Y63	水位、流量四位显示	二组四位七段码
	模拟量	CH1	泵转速控制信号	

### 5.2.6 变频器的选择

供水系统的机组设备分为大容量的主水泵组(四台)和小容量的辅助水泵组(一台),变频器具体配置依据水泵组电机来选择

变频器的容量可用下面的公式确定:

$$N_{VVF} = K_1 N_D \left( \frac{n_2}{n_e} \right)^3 \quad (5.2-2)$$

其中

$K_1$ : 为装置容量综合系数。考虑水泵电动机效率随负荷率下降和电动机功率因数随负荷下降的因素,一般水泵取 1.1 ;

$N_D$ : 为配套电动机额定功率;

$n_e$ : 为配套电动机额定转速;

$n_2$ : 为水泵调速范围的上限速度。

从节约投资角度来看,以最高转速运行时采用工频电源直接传动,而采用变频器调速运行时,转速取最高转速的 80%—90% 以下,这样可以减小变频器的容量。这种控制称为部分控制,但是因为即使电机输入电流在变频器额定电流以内,根据电机的容量和负载条件,由于电机漏抗的影响脉动电流值、峰值电流值是不相同的,而且越是人容量、轻负载,对于同一电机输入电流的脉动电流率变大。所以变频器容量(kVA)最多减小到电机容量(kW)左右。对于辅助小泵的调速,可以选择较大的调速范围到水泵最高转速,但以不超过其额定转速的 5% 为好。

综上所述,系统选用三菱 FR-A100 / 22KW 泵类专用变频器拖动。变频器安装环境规格如表 5.2-6;变频器控制电路端子配线表见表 5.2-7。

如表 5.2-7 变频器安装环境规格<sup>[15]</sup>

项 目	规 格
周围温度	-10~150°C(不结冰)
周围湿度	相对湿度 90%RH 以下(不结露)
大 气	室内并远离腐蚀气体、爆炸、气体、易燃气体、灰尘、污垢及油雾
标 高	海拔最高为 1000m
振 动	(0.6 G) 5.9m / 或更低(符号 JIS C0911)
AC 电压 / 频率	三相 200—220V, 50Hz, 200—230V 60Hz(200V 类型)
允许波动电压	170~242V, 50Hz, 170~253V, 60Hz(200V 类型)
允许波动频率	±5%

表 5.2-7 变频器控制电路端子配线表<sup>[15]</sup>

端子	形式	特定端子示例	公共端子
输入端	触点 (或集电极开路)	启动信号(STF, STR) 选择信号(RH, RU, RL, AU 等)	SD 或 PC(电源+公共端)
	模拟	频率设定信号(2, 1, 4 等)	5
输出端	触点	报警输出(A, B)	C
	集电极开路	运行信号(RUN, SU, OL, IPF, PU)	SE
	脉冲串	表头(频率表)(FM)	SD
	模拟	模拟信号输出(AM)	5

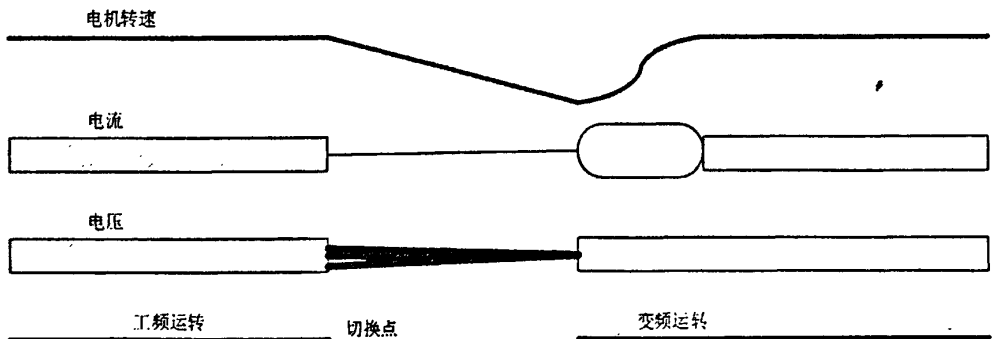
### 5.2.7 工频/变频切换控制

对于泵类机械主要是节能运转,从投资方面来看则希望价格便宜。另一方面,对于高可靠的连续运转要求迫切,需要有从工频电源到变频器的切换功能,以及从变频器到工频电源的切换功能,发生瞬时停电也继续运转的瞬停再启动功能等。

#### 1. 工频电源到变频器的切换控制

切换时,以前是在电机上装设传感器,从电机切离工频电源到电机残留电压衰减的数秒间,使电机自由停车运转。然后使变频器的输出频率与旋转传感器精确检出的电机旋转频率一致,再使变频器的输出电压由低电压逐渐增加,以防止切换时的过大电流。

对于高功能化的节能用变频器,不必采用旋转传感器,根据自由停车中的电机残留电压检出准确的旋转频率,可以实现平滑无冲击的从工频电源到变频器的切换,其特性实测如图 5.2-5 所示。对于泵等减速快的设备,有不需停止进行切换的方法,即使变频器与工频电源同步后进行切换。

图 5.2-5 工频到变频的切换特性<sup>[15]</sup>

#### 2. 变频器到工频电源的切换控制

将变频器运转中的电机切换到工频电源上,从节电方面来看很有必要。作为切换方式,根据电机特性、切换频率和对象系统的要求可考虑非同步切换和同步切换两种方式。

(1) 非同步切换方式: 电机的容量有电气的和机械的两种。如果对象系统能够容许切换时的转矩变化,可用比电机容量小的变频器进行下述的部分控制,将电机加速到变频器容量容许的转速,然后将电机从变频器切离,在电机残留电压衰减前的数秒间使它进行自由停车运转,然后投入工频电源。投入工频电源时,为了防止直接投入或投入时突然的大电流采用起动电抗器等。这种方式与加速到最高转速后进行切换的同步切换相比,有变频器容

量小的优点,但切换到工频电源时有较大的电流,所以采用时必须考虑切换频度、电机容量、再投入时间、负载特性等。对于切换频度高的用途应用困难。

(2)同步切换方式:这种方式是将电机用变频器加速到工业频率,再使变频器的输出与工频电网的频率及相位一致,确认后将电机无冲击地由变频器切换到工频电网。与非同步方式相比变频器容量增大,与电机容量相当,但投入工频电源时冲击电流小,适用于要求转矩冲击小的传动系统。

### 3. 减转矩负载用 V/F 模式

风机、泵等减转矩负载,随着转速的降低负载转矩大体与转速的平方成比例的减小。对于节能用变频器,可以选用减转矩负载专用的 V/F 模式(图 5.2-6)。由于电压下降时使减转矩负载的电动机输入电流减小,与恒转矩负载用 V/F 模式相比,这种模式可以改善电机效率和变频器效率。

图 5.2-6 显示出选用两种模式(恒转矩负载用和减转矩负载用 V/F 模式)时总效率的差别。

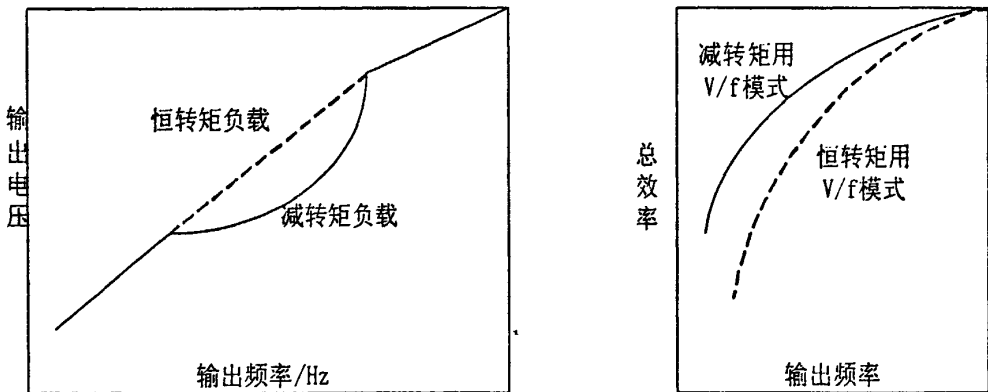


图 5.2-6 负载转矩模式<sup>[15]</sup>

对于减转矩负载,用变频器传动标准电机时,通常负载转矩比容许的连续运转转矩小,所以使用标准电机在低速区多可不考虑冷却。

### 4. 瞬停再起动控制

对于电源的瞬时停电,多数通用变频器在瞬停补偿时间后切断变频器的输出,要进一步保持则采用晶体管等保护。因此复电后的再起动,要等待电机转速停止后由外部给出再起动信号,以解除中断变频器的输出。但是,工厂作业上的重要设备的节能运转,运转系统的可靠性是重要关键,对于电源的瞬时停电或瞬时电压下降等需要继续运转。另外,对于无人值守的节能运转设备,当电源瞬时停电等异常情况发生时,为了继续运转需要补偿功能。

最近高功能化的节能用变频器,停电时不需停止电机,采用下列机构复电时可以自动再起动,提高了节能运转系统的可靠性。

(1)电源复电后,自动给出再起动信号,调整变频器到初期状态。

(2)根据自由停车运转中的电机残留电压检出电机旋转频率,并且使变频器输出频率跟踪它(但是,通常像泵负载那样自由停车运转时间极短的场所,在停止前的自由运转中再起动是不可能的)。

(3)自由运转中的电机残电压衰减后(通常为数秒),慢慢施加变频器的输出电压,使电机接入变频器。

如上所述,使变频器的输出频率与电机的转速一致,可以防止两者不一致时引起的过电流,并且能够自动地、平滑地恢复到原来的稳定运转状态。其动作概要示于图 5.2-7,



特性实测类示于工频到变频的切换。

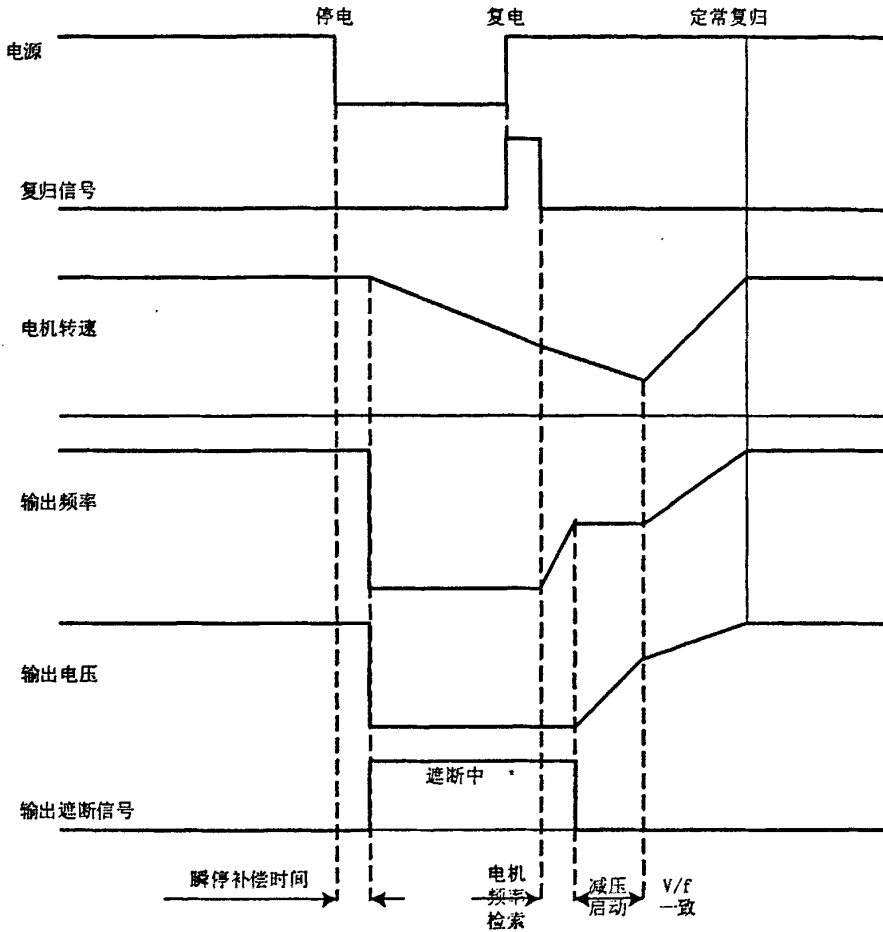


图 5.2-7 瞬停再起动特性<sup>[15]</sup>

### 5.2.8 各种传感器的选择

根据压力流量数据可能的变化范围选择传感器。

#### 1、压力变送器选用英国德鲁克有限公司 PTX1400 压力变送器，

性能稳定，质量可靠，且价格低廉：

精度高： 0.15%、 最大误差 0.25%；

测量范围可选 0-2MPa.

输入电压为 DC9V~28V，

输出为 4-20mA，.

#### 2、流量计选用 KROHNE IFM 5080 K-CAP 电磁流量计，具有以下特点：

电容电极非接触式，压力损失小，易于安装，安全卫生，可靠性高，温度/时间稳定性高

精度:  $v > 1\text{m/s}$ ,  $< 0.5\%$ ,  $v < 1\text{m/s}$ ,  $< 5\text{mm/s}$   
 耐压:  $40\text{Kg/cm}^2$   
 输入: 可多重选择, 交直流  $15\sim 32\text{V}$ , 交流  $100\sim 260\text{V}$   
 输出: 可多重输出, 电压, 电流, 脉冲都可以,  
 压力损失:  $\Delta P = \rho v^2 / 800\text{mbar}$   
 可选择带多种显示屏显示多种数据。

5.2.9 机组电气连接图

电气图如图 5.2-12 所示。

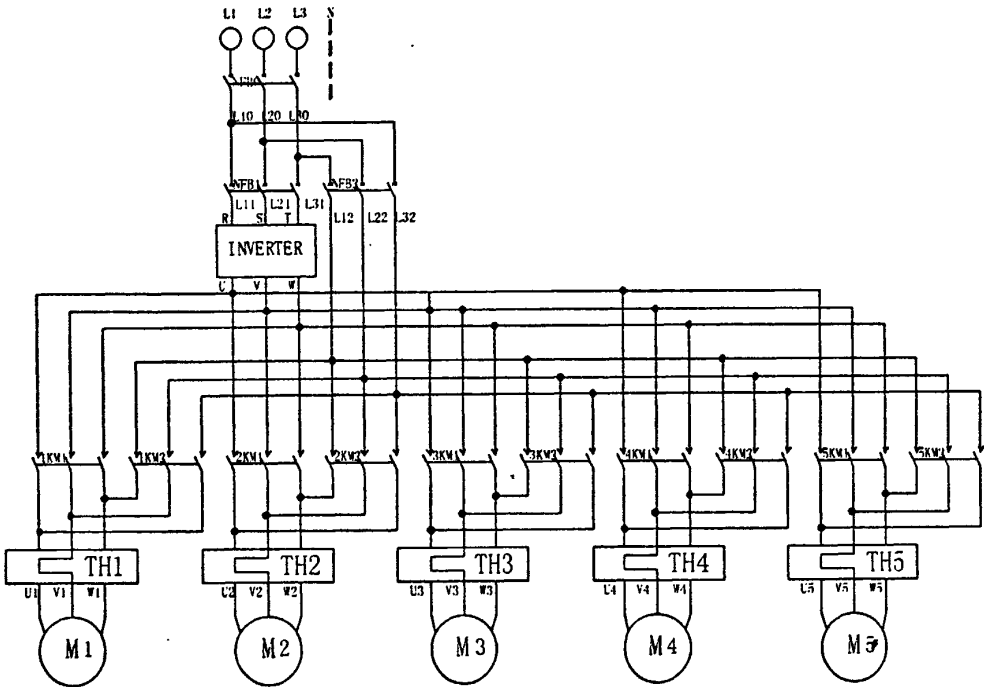


图 5.2-12 主电路

图中, 接触器  $1\text{KM}1\sim 5\text{KM}1$  的分别控制  $1\#-5\#$  泵的变频运行/停止, 接触器  $1\text{KM}2\sim 5\text{KM}2$  分别控制  $1\#-5\#$  泵的工频运行/停止, 接触器  $1\text{KM}1\sim 5\text{KM}1$  和接触器  $1\text{KM}2\sim 5\text{KM}2$  进行机械、电气软件三重互锁。而接触器  $1\text{KM}1\sim 5\text{KM}1$  接触器  $1\text{KM}2\sim 5\text{KM}2$  分别受接在 PLC 输出端  $\text{Y}0\sim \text{Y}37$  的继电器控制(详见表 5.2-5)。按钮  $1\text{SF}\sim 5\text{SF}$  分别手动控制  $1\#-5\#$  泵的运行, 按钮  $1\text{SS}\sim 5\text{SS}$  分别手动控制  $1\#-5\#$  泵的停止; 选择开关  $1\text{SAC}\sim 5\text{SAC}$  选择手动/自动的切换, 若选择手动则可手动操作  $1\#-5\#$  泵的变频/工频运行和停止。该电路实现手动/自动切换、工频/变频之间互锁及变频/变频之间联锁的功能。下面具体分析。

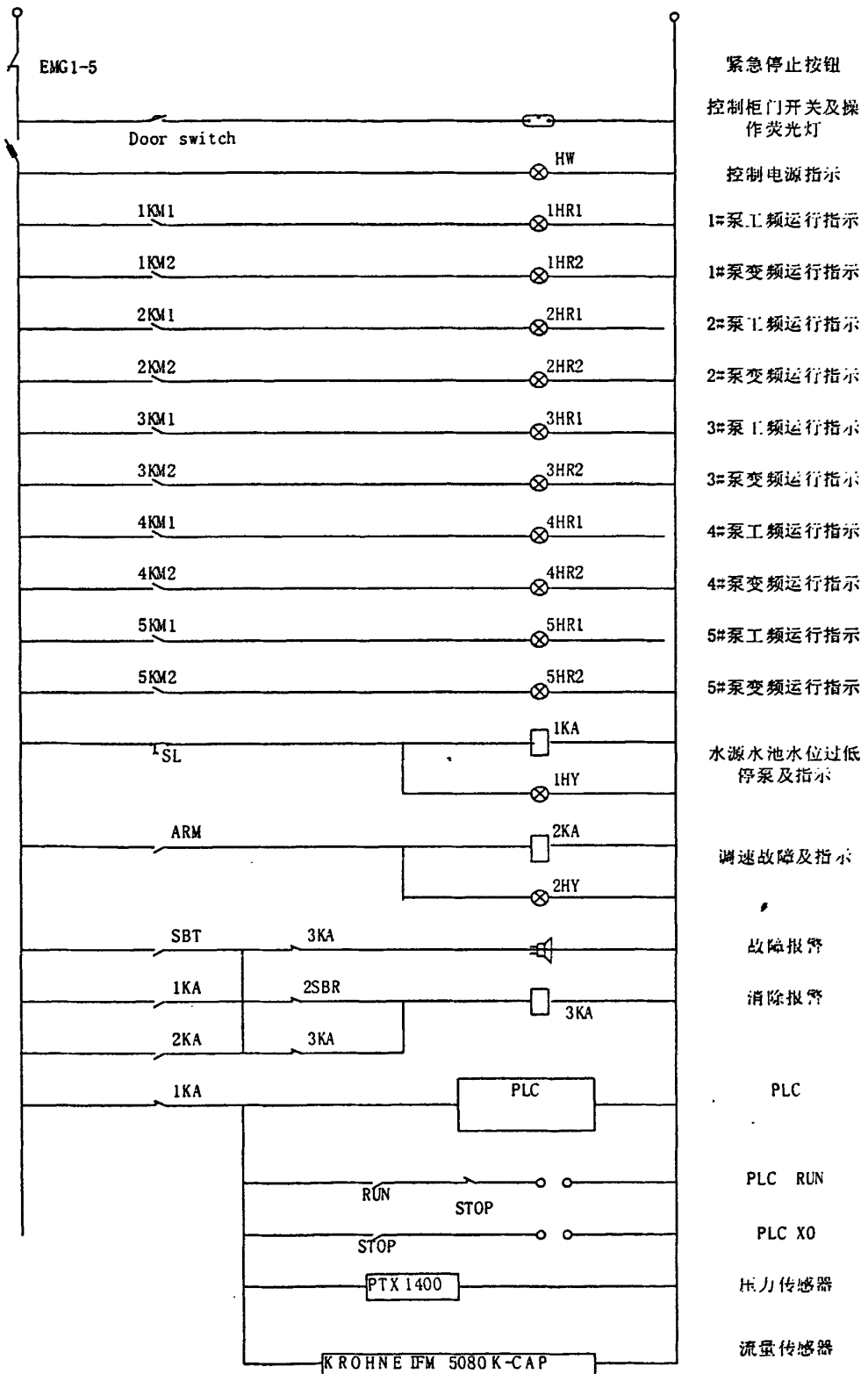


图 5.2-13 控制电路 (下页待续)

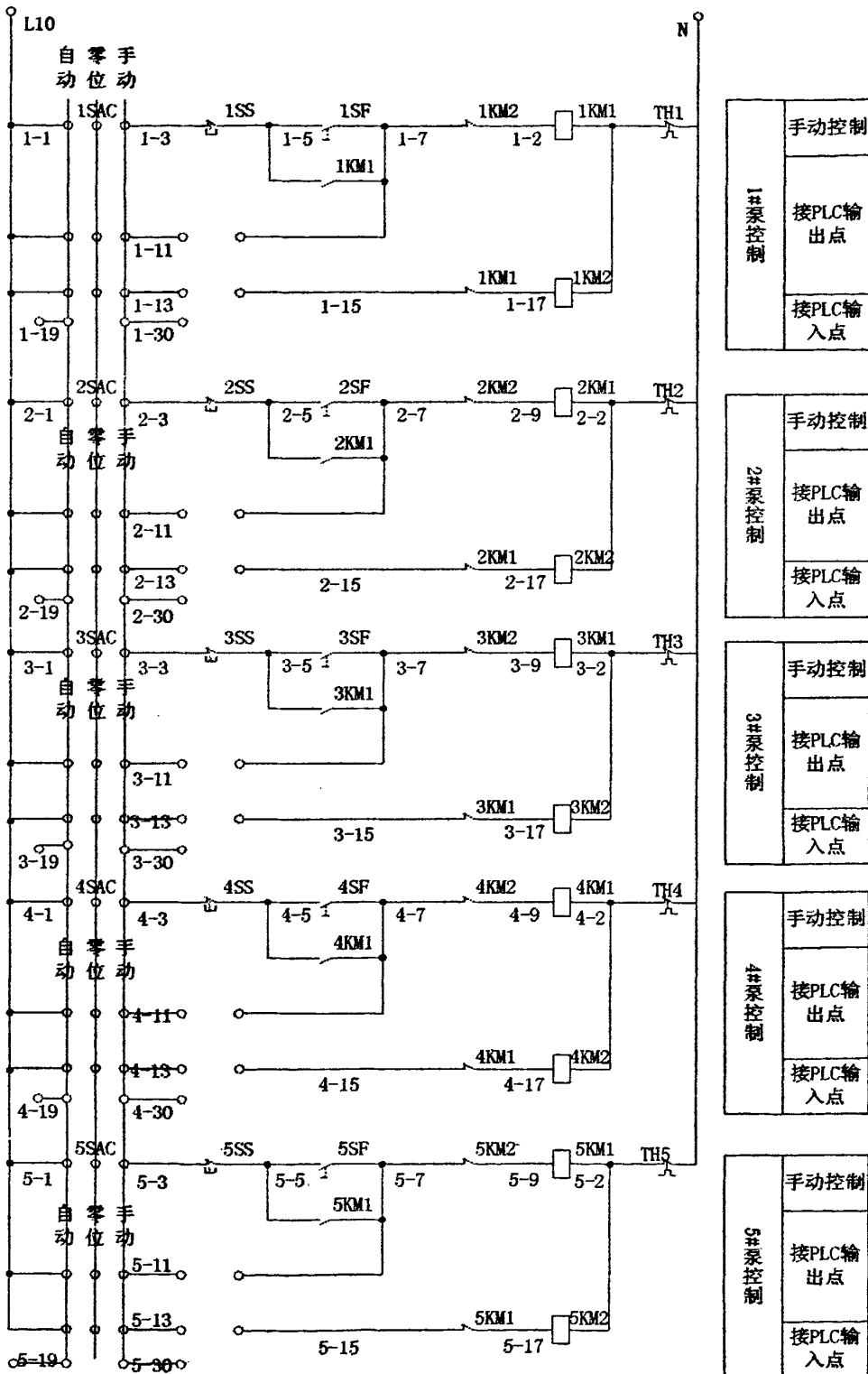


图 5.2-13 控制电路 (续上页)

有且只有一台水泵变频运行，其它泵或停车或工频运行，应禁止泵同时处于变频和工频状态，故系统应设计工频 / 变频互锁电路。这里 1# 泵的电气线路为例来说明。1KM1 和 1KM2 机械互锁，即从机械上保证二者只有一个闭合。电气互锁，1KM1 的吸合线圈串联 1KM2 的常闭触点，保证只有 1KM2 未吸合，1KM1 才有可能吸合；1KM2 的吸合线圈串联 1KM1 的常闭触点，既保证只有 1KM1 未吸合，1KM2 才有可能吸合；即只有 1# 泵不在变频运转状态才能投入工频运行，即只有 1# 泵不在工频运转状态才能投入变频运行；软件互锁在程序上保证更容易，只需二者输出不同时为 1 即可。这样就保证了一台泵不可能在同时运转在两种状态。为了保证只有一台泵投入变频运行的电气互锁同上所述，只需将其变频接触器 MC2 吸合线圈串联其他变频接触器 MC2 的常闭点即可。本电路在变频运行时只在软件程序保证变频输出只有一个为 1，这样就保证了只有一台泵在变频状态下运行。

自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制恒压供水系统是根据管网水压设定与实测水压的差值，按照自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法实现自动控制泵的转速以及工频泵的投切，以达到全自动恒压、节能的目的。为了防止因故障而影响供水，该系统还设计了手动操作方式。按钮 SAC 实现手动 / 自动的切换。手动运转时，对于 1# 泵，1SF 按下时，1KM1 吸合 1# 泵运行；1SS 按下时，1# 泵停止运转；自动运转时，手动按钮失效，只有 RUN、STOP、EMG 可以有效操作。按下紧急停止 EMG，系统无条件停止运转，以保证生命安全。按下 STOP，系统停止运转。按下 RUN，系统按程序自动运转，实现以下功能：

(1) 根据现有的泵组情况能实现泵组的切换；

(2) 根据压差的大小，按照自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法，控制泵的转速以及工频泵的投切；

(3) 为防止某些水泵因长期闲置而锈蚀，系统按先进先出的原则，经过一定的时间对工频泵进行轮流切换，使泵均匀磨损，提高水泵并联的整体效率，延长使用寿命；

(4) 系统具有手动和自动两种工作方式，进一步提高系统的可靠性；

(5) 由于采用变频器控制水泵机组，所以调速泵可以实现软启动及软停车控制(从零逐渐加速到最大速度或从最大速度到零)；

(6) 为确保变频器输出不与工频短路，机组在电气线路上设有工频 / 变频互锁电路；

(7) 系统设有水位、压力和流量数字显示以及各泵工作状态指示，便于值班人员监视；

(8) 故障保护及报警功能：过压、欠压的声光报警；清水池水位上下限的声报警；变频器故障报警；变频器具有停电、过流、欠电压、过电压、过载、过热等多种保护措施。操作台设有相应的报警指示灯，另外，变频器本身显示故障代码，并会自动切断变频器的主电路输出。

(9) 技术指标：水压波动不大于 0.01MPa。

## 第六章 系统软件的设计

### 6.1 软件要求

软件的内容主要包括：系统初始化、水位监测、泵组控制、主辅泵组的切换、自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法以及故障报警等，实现以下几个主要的功能：

(1)将 4 大 1 小的泵分为主泵、辅泵两组，一般情况主泵组工作，用水低谷期采用小容量的辅泵（组）工作，以提高泵的使用率。系统能实现两组的切换；

(2)根据压差的大小，按照自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法，控制泵的转速以及工频泵的投切；

(3)按先进先出的原则，经过一定的时间对工频泵进行轮流切换，使泵均匀磨损；

(4)水位、压力显示，各泵工作状态指示；

(5)过压、欠压及水位上下限报警；

(6)技术指标：水压波动不大于 0.01MPa。

### 6.2 主程序流程图

主程序如图 6-1 所示。按下按钮 RUN，PLC 运行，完成 FX-4AD、FX-2DA 模块的初始化以及自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制算法有关参数的预设置。初始化结束之后，系统对清水池的水位进行监测(水位高于上限或低于下限时报警)，然后系统根据流量大小选择相应的泵组工作。系统在自动运行中监测流量压力水位等参数中断进入相应的子程序。工作在手动状态时，根据按钮操作执行运算执行相应动作。

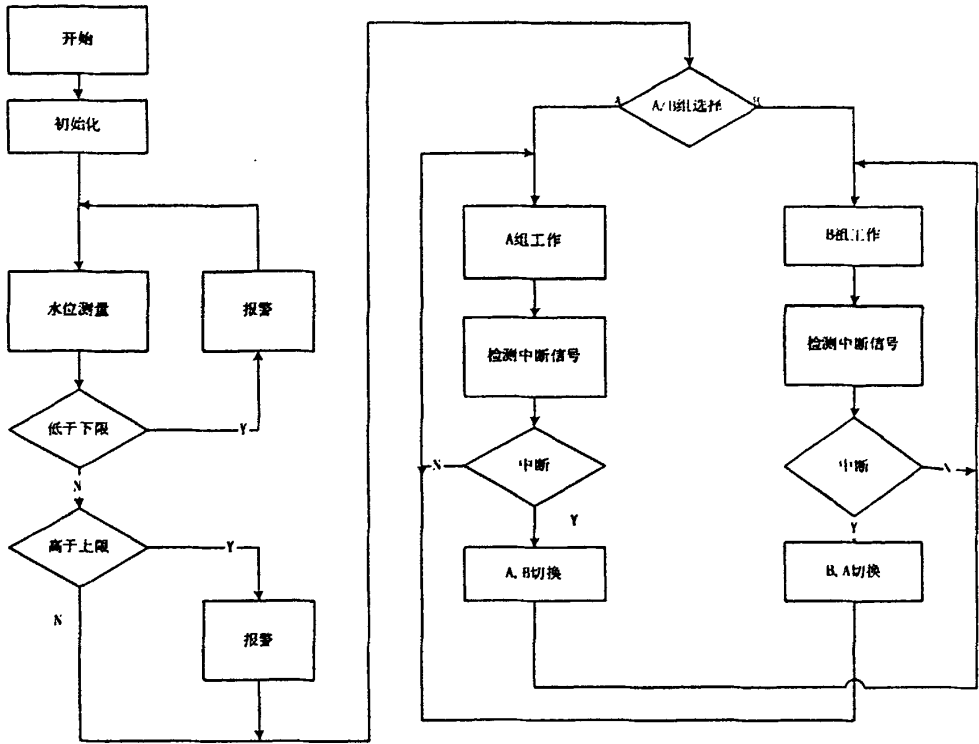


图 6-1 主程序流程图

### 6.3 泵组工作流程图

泵组工作流程图如图 6-2 所示。

系统初次投入时，先将 1#泵投入变频网进行软启动，然后将 1#投入工频网。1#泵投入人工频运行后，2#泵投入变频网，进行变频运行，系统对压力进行监控……过压和欠压时输出报警信号。如果压差的绝对值不大于 0.02MPa(技术指标)，系统可以按先入先出的原则对泵进行轮流切换，也可以只需等待下一次采样而不必作其它工作。如果压差不满足技术指标，系统根据压差和压差变化，按照自调整修正因子 Fuzzy—PID 算法，输出相应的控制信号，控制变频泵的转速或工频泵的投切。由于每台泵的四个工作状态(工频运行、工频停车、变频运行、变频停车)分别受四个输出继电器控制，系统通过读取输出继电器的状态，就可以判断某台泵是否可以投切，不必设置标志位。系统不会产生某台泵处于工频运行而再让它投入人工频运行的误动作。这里需说明的是，工频运行的水泵需停车，应该投入变频网进行软停车以减少对电网的冲击；同样，水泵需工频运行，应该投入变频网进行软启动 以减少对电网的冲击。

### 6.4 辅助小泵的投切

系统可以通过读取输出继电器的状态判断泵的工作状态。这里不妨假设 1#和 2#，3#泵停止运行，4#泵变频运行。流量继续下降到一定程度，4#泵停止，变频启动辅助小泵

辅助小泵切换到主泵运行的过程相反，当流量增加到辅助小泵不能满足时，变频启动其中一台主泵。

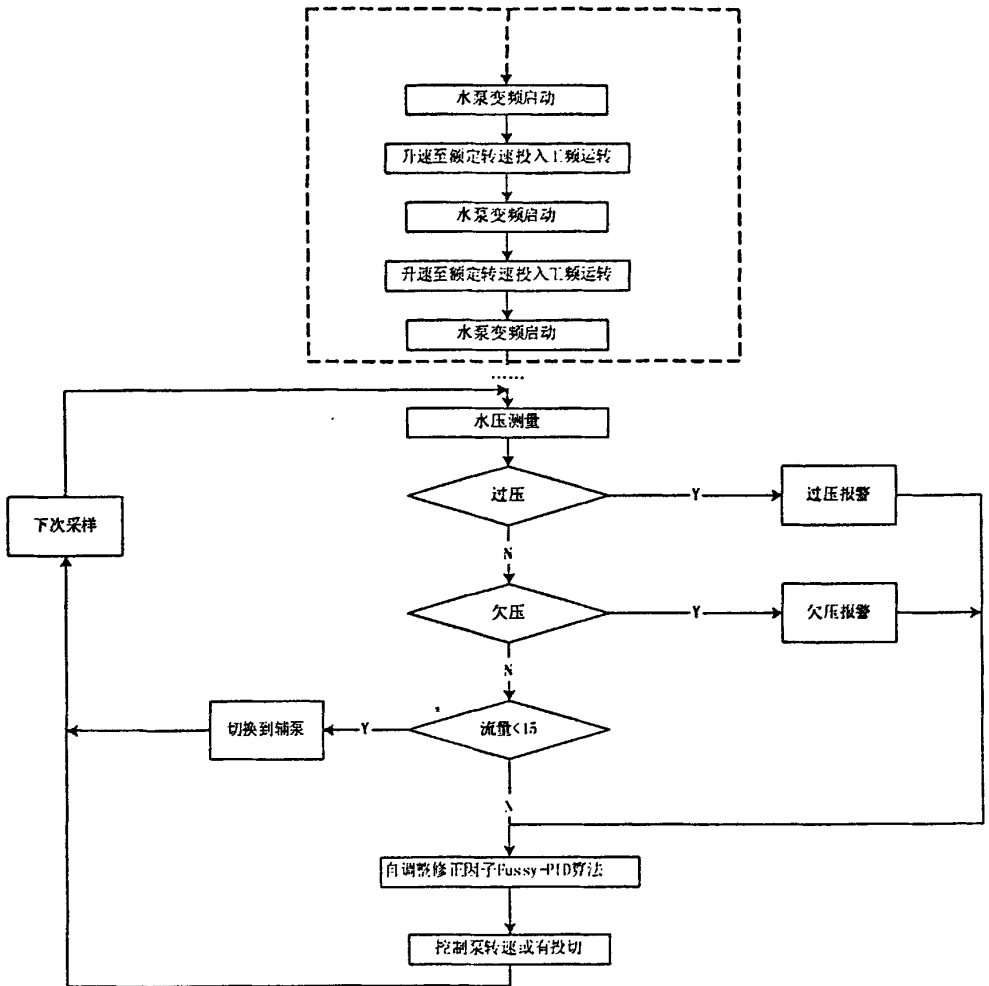


图 6-2 泵组工作流程图

### 6.5 自调整修正因子 Fuzzy—PID 控制算法程序

$K1$ 、 $K2$  为量化因子， $K3$  为比例系数， $\alpha$  为修正因子， $\gamma$  为水压设定值， $y$  为水压实际值， $e$  为  $\gamma$  与  $y$  之差， $E$ 、 $EC$ 、 $U$  分别为压差  $e$ 、压差变化  $ec$  和控制量  $u$  的模糊语言变量。

模糊语言变量的子集分别定义如下：

$$E = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

$$EC = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$

$$U = \{NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB\}$$



其含义为：负大、负中、负小、零、正小、正中、正大

E、EC、U 的论域均分为 15 个等级，即

$E = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

$EC = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

$U = \{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$

自调整修正因子 FUZZY-PID 控制器的实际输出为：

$$U = \begin{cases} -K_3 < \alpha E + (1 - \alpha)EC >, |E| > E_0 \\ u_0, |E| = E_0, |E| \leq E_z \\ K_p e(n) + K_i \sum e(i) + K_d [e(n) - e(n-1)], E_z < |E| < E_0 \end{cases} \quad (6-1)$$

式中

$\alpha = (\alpha_s - \alpha_0) |E| / 7 + \alpha_0, 0 < \alpha_0 < \alpha < \alpha_s < 1$

且定义 E、EC、U 的论域：

$E = EC = U = \{-7, \dots, \dots, -1, 0, 1, \dots, \dots, 7\}$

$|E| = E_0$  为控制切换点，

$|E| \leq E_z$  为系统误差指标，

$u_0$  表示系统上一次的动作，

$K_3$  为控制量比例系数，

$K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  为比例、积分、微分系数，

$e(i)$  为第  $i$  次采样误差。

在实际调试中，合理地选择自调整修正因子 FUZZY—PID 控制的参数，控制指标完全能满足对供水系统的要求。

## 第七章 系统实现

### 7.1 变频器功能的预置

在供水控制系统中，需要预置的主要是基本运行功能、升降速功能、保护功能等。

#### 7.1.1 升、降速时间的预置

1. 不采用内部 PID 功能时，升、降速时间的预置 在不采用变频器内部 PID 功能的情况下(如采用外部的 PID 调节器，或其他的频率给定方式)，变频器工作频率的变化速度主要取决于预置的升、降速时间。如用外部 PID 调节器，则 PID 调节器的预置值也对频率变化起作用。升、降速时间过短，变频器可能因过流或过压而跳闸；升、降速时间过长，则会使变频器调速系统反应迟缓，造成管路中欠压或超压时间过长，满足不了恒压供水要求。因此，升、降速时间的确定，应根据现场的实际情况来决定。

2. 采用变频器内部 PID 功能时的升降速 当采用变频器内部的 PID 功能时，其升、降速的时间由 PI 的预置值(一般 D 值无须设定)决定，而升降速时间的预置变得不起作用。

#### 7.1.2 V/F 图形及转矩补偿功能的预置

对于风机、水泵负载，通常选择负补偿最大的 V/F 曲线。如果满足不了转矩要求，则依次选取弯曲较小的 V/F 曲线。设定该功能的同时，要设定恒速运转时的电流限制功能。对于本工程三菱变频器而言，将 Pr. 14 设定为 1。

#### 7.1.3 运转开始频率的预置

一般来说，水泵在低频运行的意义并不大，有的水泵并不能从 0Hz 开始起动。所以，应该预置运转开始频率，在运转开始频率以下，变频器处于待机状态，以利于更好地节能。所以，在变频器起动无过流的前提下，运转开始频率可预置得高一些，一般设定范围为 5—20Hz(也可以通过预置下限频率来达到目的)。

#### 7.1.4 载波频率的预置

载波频率增高，可以减小电机噪声，但将增加对外电路的干扰，尤其是对共用电源的仪表、控制器等的干扰，并且增加输出端对地的漏电，不利于较长距离的输出。载波频率减低，则电机的噪声增加，且输出电流的谐波分量增大。

#### 7.1.5 保护功能的预置

保护功能中值得指出的是，输出电流限制功能和过负荷报警功能的预置。两者的出厂值一般是一样的。如果前者功能动作，则降低输出频率或减缓升降速过程中的频率变化；后者功能动作，则报警停机。为了更好地使系统工作，不希望出现停机，所以，输出电流限制功能的预置值应比过负荷报警功能的预置值小一些。

## 7.2 FX-4AD 以及 FX-2DA 的初始化

系统中水压设定信号, 水压测量信号、清水池水位信号和流量信号分别占用 FX-4AD 四个通道, 且部采用电流输入(FX-4AD 的缓冲寄存器 BFM 分配表如表 6-1 所示)。

FX-4AD 连接在最接近基本单元的地方, 其特殊模块号为 NO. 0, FX-4AD 的识别码为 2010。其初始化程序如下:

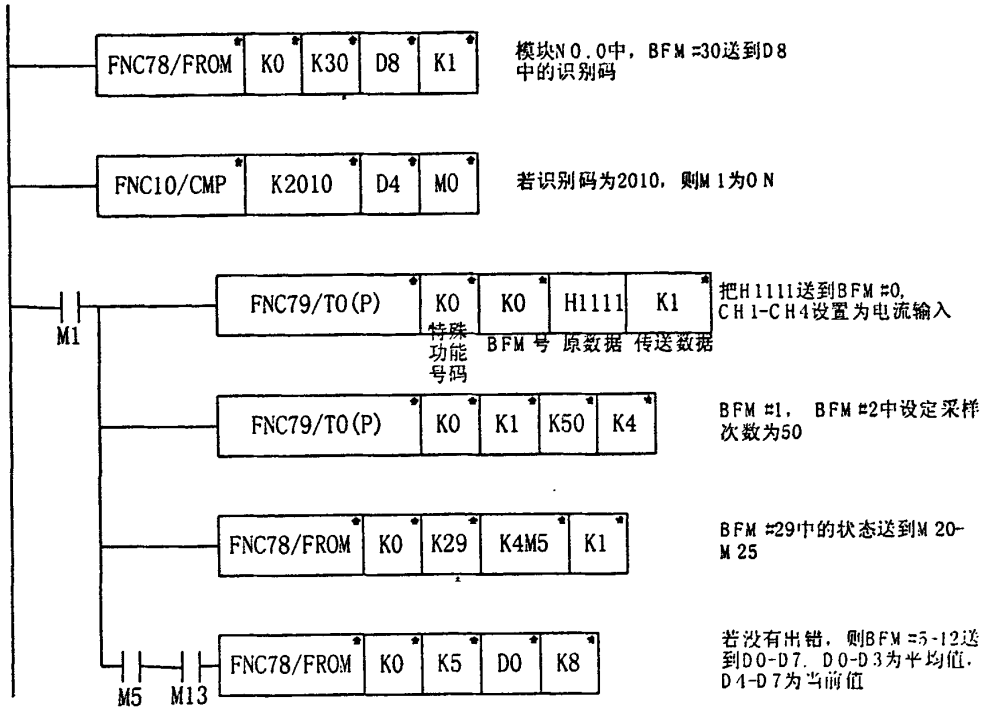


表 6-1 FX-4AD BFM 分配表

BFM	内容	
#0	通道初始化 缺省值=H0000	
#1	通道 1	平均值取样次数 缺省值=8
#2	通道 2	
#3	通道 3	
#4	通道 4	
#5	通道 1	平均值
#6	通道 2	
#7	通道 3	
#8	通道 4	
#9	通道 1	当前值
#10	通道 2	
#11	通道 3	
#12	通道 4	
#13-19	空置	
#20	重置为缺省设定值, 缺省设定值=H0000	
#21	禁止零点和增益调整 缺省值=0, 1	
#22	零点和增益调整 b7 b6 b5 b4 b3 b2 b1 b0 G4 O4 G3 O3 G2 O2 G1 O1	
#23	零点值 缺省设定值=0	
#24	增益值 缺省设定值=5000	
#25-28	空置	
#29	出错信息	
#30	识别码 K2010	
#31	空置	

FX-2DA 的 BFM 分配表如表 6-2 所示。FX-2DA 的 CH1 端输出变频器的频率设定信号(4~20mA)。其特殊模块号为 NO. 1, 识别码为 2010。其初始化程序如下:

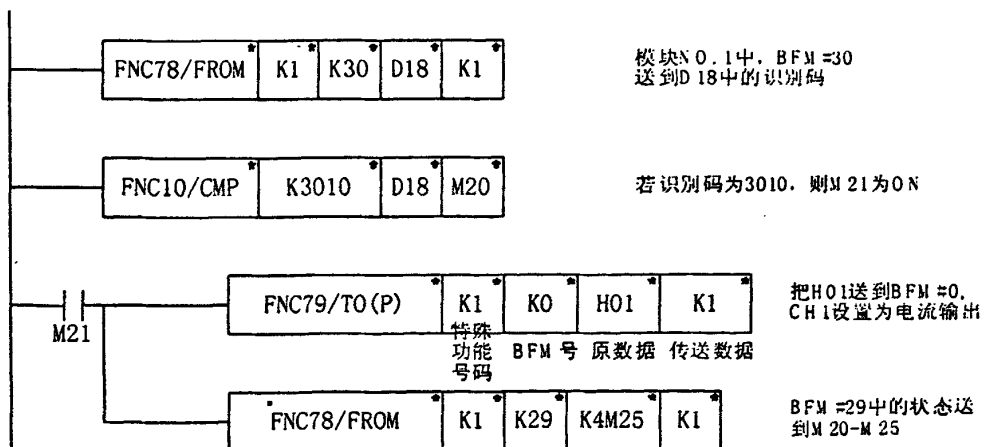


表 6-2 FX-2DA BFM 分配表

BFM	内容
#0	模拟量输出模式（电流 / 电压） 缺省值=H100
#1	通道 1 输出数据
#2	通道 1 输出数据
#3-4	空置
#5	输出保持或回零 缺省值=H00
#6-19	空置
#20	重置为缺省设定值 缺省设定值=H0000
#21	禁止零点和增益调整 缺省设定值=0, 1(允许)
#22	零点和增益调整   b3  b2  b1  b0 G2  O2  G1  O1
#23	零点值（单位 mV 或 uA）缺省设定值=0
#24	增益值（单位 mV 或 uA）缺省设定值=5000
#25-28	空置
#29	出错信息
#30	识别码 K3010
#31	空置

## 第八章 总结

模糊控制技术是一门发展迅速,有着广泛前景的新技术,模糊控制在工业生产过程中的应用使产品的质量和数量都有大幅度提高。随着科技的发展,模糊理论将不断完善,模糊控制技术的应用也会愈来愈广泛。但必须指出的是,模糊控制为我们提供了一种新的控制方法,其应用愈来愈广泛,但它不是万能的控制方法,那种认为模糊控制可以解决任何控制问题的想法是不现实的。

文中提出的自调整修正因子 Fuzzy-PID 控制恒压供水系统只是模糊控制应用的一个很小的方面。文中软件硬件的结构适合规模较小的供水系统,对于规模比较大的供水系统,按照同样的设计方法,建立成集散控制系统,实行分散控制集中管理。本系统具有重要的现实意义,有着广泛的应用前景。

### 一、调速调节应注意以下几点:

1、水泵调速有一定的范围,最大转速不能超过额定转速的 5%,否则会引起过载且使水泵的某些零件的损坏;最低转速不能低于额定转速的 50%,否则水泵的效率太低,很不经济。一般来说,调速范围控制在额定转速的 70%~100%之间。

2、调速装置的特性应尽可能符合水泵的负载特性,否则得不到良好的控制节能效果。

3、水泵特性曲线应尽量平,以保证在调速范围内,水泵保持较高的效率和与之并联的泵相近的扬程。

### 二、存在的问题:

1、应该从水泵系统的寿命周期来全盘考虑其本问题,水泵的初期基建投资只占寿命周期成本的 10%,而后期的电力消耗及维护费用占寿命周期成本超过 80%,故可能的话,应尽量增加水泵系统的初期基建投资,从而降低其寿命周期成本。

2、资金允许的话应在每台水泵上加装变频器,以保证水泵并联是具有相同的特性曲线,提高其并联的效率。其节能可降低到改造前的 20%。文中提到的几台定速泵加一台变速泵节能约为 30~50%。

3、资金允许的话水管应选择大一号直径的优质水管。以降低水头沿途损耗,使管道特性比较平缓,不仅可以节能,而且进一步降低因流量变化引起的压力波动。

4、由于现行法规的要求,高层建筑并不能取消屋顶消防水箱,故现阶段还是必须保留屋顶水箱,也不能取消地下水池,否则由于目前市政供水能力有限,可能造成市政管网水压成负压,这是自来水公司绝对不允许的。

## 参考文献

- 1、陈耀宗 姜文源 胡鹤钧 张延灿 张淼, 《建筑给水排水设计手册》, 中国建筑工业出版社, 1992
- 2、吴恬 吴祥生, 《建筑水暖设备工程》, 科学技术文献出版社, 1996
- 3、周谟仁, 《流体力学泵与风机》, 中国建筑工业出版社, 1985;
- 4、张红兵, 《工业泵选用手册》, 化学工业出版社, 1998;
- 5、许玉望, 《流体力学泵与风机》, 中国建筑工业出版社, 1995;
- 6、李炜 徐孝平, 《水力学》, 武汉水利电力大学出版社, 2000;
- 7、M.Hanif Chaudhry, Ph.D , APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS, Litton Educational Publishing, Inc, 1979
- 8、冬俊瑞 黄继汤, 《水力学实验》清华大学出版社。1991
- 9、谭蕤娃 金如麟, 《大功率电子学和电机控制》, 上海交通大学出版社, 1999
- 10、陈伯时 陆敏逊 《交流调速系统》, 机械工业出版社, 2000
- 11、王嵩, 《基本电路理论》, 上海交通大学出版社, 1993
- 12、程浩忠, 《电力系统谐波技术》, 上海交通大学出版社, 1998
- 13、杜金城, 《电器变频调速设计技术》, 中国电力出版社, 2001
- 14、张燕宾, 《变频调速应用实践》, 机械工业出版社, 2001
- 15、三菱电机株式会社, 《变频其原理与应用教程》, 国防工业出版社, 1998
- 16、吴忠智 吴加林, 《变频器应用手册》, 机械工业出版社, 1995
- 17、王兆义, 《可编程控制器教程》, 机械工业出版社, 1992
- 18、工凡, 《模糊数学与工程科学》, 哈尔滨船舶工程学院出版社, 1988
- 19、何新贵, 《模糊知识处理的理论与技术》, 国防工业出版社, 1994
- 20、雷勇, 单参数PID控制器的设计, 《电子技术应用》, 1992.4, P13—15
- 21、叶乐年 傅成华, 一种实用工业控制器, 《工业控制计算机》, 1995.4 P23—24
- 22、李东辉, Fuzzy 控制规则自调整和 Fuzzy 控制系统寻优及其仿真研究, 《模糊数学》, 1986.9(3)P53-61
- 23、龙升照, 汪培庄, Fuzzy 控制规则的自调整问题, 《模糊数学》, 1982.9 ( 3 ) P105-112
- 24、周文豪, PID 控制参数自整定的方法与实践, 《工业控制计算机》, 1991.5P22-25
- 25、纪宗南, Fuzzy-PID 控制器官的自动调节器设计, 《电气自动化》.1996.1P13-15
- 26、米摩西, 模糊PID控制器, 《工业控制计算机》, 1996.3P19-10
- 27、解宏基, 新型恒压供水单片机控制系统 《大连海事大学学报》 1999. 3
- 28、邵惠鹤 王亚刚, 自整定PID控制器的研究综述, 《电气自动化》2000.1

## 致 谢

本论文是在尊敬的张秀彬教授和陈演平研究员的精心指导下完成的。张老师和陈老师严谨的治学态度、渊博的知识以及对问题深刻独到的见解使我受益匪浅! 在整个研究生就读期间, 始终得到张老师和陈老师在学习上的指导和在生活上的关怀, 在此表示衷心的感谢!

在论文的进行过程中, 得到了汤亮同学和江晓光同学热情帮助, 在此一并致谢!

另外, 上海市政给排水公司, 上海证券大厦, 上海华侨大厦, 大连宏孚大厦, 大连万达物业公司, 宁波联合公司(原宁波开发区总公司), 深圳帝王大厦, 上海虹桥水泵厂, 上海安德利给水设备工程有限公司提供了现场参观的机会, 使我能够把理论与实际结合起来, 在此表示感谢!



## 攻读学位期间发表的学术论文目录

- 1、 邓炎成, 张秀彬, 《会议电视管理系统设计》, 微型电脑应用, 编号 3619, 2002
- 2、 汤亮, 张秀彬, 邓炎成, 《注册表在 ISDN USB-TA 安装程序设计中的作用》 微型电脑应用, 2002