

分类号_____ 密 级_____

UDC _____

学 位 论 文

带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化 控制系统的设计与实现

作 者 姓 名： 曲径幽

指 导 教 师： 李鸿儒 教授 东北大学自动化研究所

王建东 高工 首钢京唐钢铁公司能源部

申请学位级别： 硕 士 学 科 类 别： 专业学位

学科专业名称： 控制工程

论文提交日期： 2011 年 11 月 21 日 论文答辩日期： 2011 年 12 月 23 日

学位授予日期： 答辩委员会主席： 关守平 教授

评 阅 人： 袁 平 副教授 刘永军 高工

东 北 大 学

2011 年 11 月

A Thesis for the Degree of Master in Control Engineering



J0119763

Design and Realization on Control System of Seawater Desalination (MED-TVC)

By QuJingYou

**Supervisor : Professor Li Hong Ru
Senior Engineer WangJianDong**

Northeastern University

November 2011

独创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示诚挚的谢意。

学位论文作者签名： 

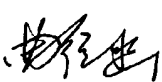
日 期： 2011.12.24

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 ☒ 一年 ☐ 一年半 ☐ 两年 ☐

学位论文作者签名：  导师签名： 

签 字 日 期： 2011.12.24 签 字 日 期： 2011.12.24

带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化控制系统的设计与实现

摘 要

本文以首钢京唐钢铁公司日产 5 万吨海水淡化项目为背景,以其中一套为例,设计和开发了一套基于西门子公司 S7-400 系统环网架构的过程控制系统,实现带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化过程的实时监测和控制。

首先,介绍了海水淡化技术现状,回顾海水淡化技术发展历程。然后详细地介绍带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化取水系统、预处理系统及海水淡化主体工艺流程和相应的主要设备组成,并且阐述了海水淡化工艺过程的控制要求。结合这些控制要求,设计和完成了海水淡化主体控制系统硬件和软件平台的选型工作,同时设计完成了海水淡化主体与海水预处理、成品水系统的环网结构。

针对海水淡化主体温度控制过程复杂、非线性、参数时变和滞后性的特点,采用模糊控制理论和 PID 控制理论相结合方法,综合 PID 控制具有算法简单、可靠性高和稳态误差小的优点和模糊控制具有灵活性和鲁棒性好的优点,研究和设计了模糊-PID 温度控制器,实现了海水淡化主体的稳定控制。

最后,完成了海水淡化过程控制系统的实现,包括控制功能和监控管理界面等。该系统自从投入使用以来,生产运行稳定可靠,自动化控制效果良好,提高生产效率、降低运行成本和劳动强度,取得了显著的经济效益和社会效益。

关键词: 海水淡化; 低温多效; 环网结构; 温度控制; 模糊-PID 控制器

Design and Realization on Control System of Seawater Desalination (MED-TVC)

Abstract

Based on an annual output of 50,000 tons seawater desalination plant in shougang jingtang united iron and steel Co. LTD, the paper expounds in detail how to design and develop a control system under simatic s7-400 system ring network architecture, which realizes the monitor and control of important manufacturing parameters of whole With thermal vapor compressor for low-temperature multi-effect desalination.

To begin with, Introduces the current situation of seawater desalination technology, technology development of seawater desalination is also reviewed. Moreover, sea water intake system, pre processing system, seawater desalination system as well as the main equipment parts, is explained in detail. the control requirements of seawater desalination manufacturing process are advanced. according to above requirements, the network architecture, hardware and software platform of control system of seawater desalination system are designed.

In addition, according to the complex, nonlinear, parameter time-varying and having lag characteristics of temperature control process of seawater desalination plant, the paper applies a method of combined the theory of the fuzzy with PID control, which synthesizes advantages of both PID control system in simple arithmetic, high reliability and low steady error, and fuzzy control system in agility and moronity. So a Fuzzy-PID temperature controller is proposed and the problem of stabilization in temperature control process of seawater desalination plant is resolved.

Finally, the whole system including hardware configuration, software function of the control system is accomplished. Since the system has been put into use, the process of production and operation is stable and reliable, that increases production efficiency, reduces operating costs and labour intensity and achieves significant economic and social benefits.

Keywords : seawater desalination, low-temperature multi-effect, ring network architecture, temperature control, fuzzy-PID controller

目 录

独创性声明 I

摘 要 II

ABSTRACT III

第 1 章 绪论 1

1.1 研究背景 1

1.1.1 我国水资源现状 1

1.1.2 海水淡化对沿海钢铁厂循环经济的意义 1

1.2 海水淡化历史 2

1.3 海水淡化的方法及技术现状 3

1.3.1 蒸馏法 3

1.3.2 膜法 5

1.3.3 其他方法 6

1.4 本文主要研究内容 6

第 2 章 海水淡化工艺流程 9

2.1 首钢京唐钢铁公司海水淡化运行情况 9

2.2 海水淡化取水与预处理工艺流程 10

2.2.1 海水取水系统工艺流程 11

2.2.2 海水预处理系统工艺流程 12

2.3 海水淡化主体工艺流程 15

2.3.1 带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化工作原理 15

2.3.2 海水淡化的蒸汽流程 17

2.3.3 海水流程 18

2.3.4 蒸馏水流程 18

2.3.5 浓盐水流程 19

2.3.6 药剂添加 19

2.4 海水淡化在 E 模式下与热电机组联产工艺流程 19

2.5 本章小结 20

第 3 章 海水淡化控制系统的总体设计 21

3.1 带热蒸汽压缩低温多效海水淡化对控制系统的要求 21

3.1.1 海水系统的控制要求 21

3.1.2 蒸汽和真空系统的控制要求 22

3.1.3 成品水系统的控制要求 22

3.1.4 化学处理系统的控制要求	23
3.1.5 海水淡化装置的停运控制要求	23
3.1.6 海水淡化联锁保护控制要求	24
3.1.7 监控计算机的控制要求	27
3.1.8 可编程序逻辑控制器 (PLC) 的要求	28
3.2 控制系统设计原则	28
3.3 系统硬件总体设计	29
3.3.1 西门子 SIMATIC S7-400H 介绍	29
3.3.2 海水淡化主体的控制系统硬件组成	31
3.4 海水淡化主体控制系统软件平台	33
3.4.1 监控软件平台	33
3.4.2 编程软件平台	33
3.5 海水淡化的网络结构	34
3.5.1 网络拓扑结构的选择	34
3.5.2 海水淡化区域的网络架构	34
3.5.3 海水淡化网络 IP 设定	36
3.5.4 网络配置软件 HiVision	36
3.6 本章小结	36
第 4 章 浓盐水温度模糊-PID 控制器的设计	37
4.1 海水淡化主要控制对象	37
4.1.1 控制对象	37
4.1.2 控制目标	38
4.2 海水淡化第七效浓盐水温度的控制	38
4.2.1 浓盐水温度的控制过程	38
4.2.2 浓盐水温度的控制策略	39
4.3 基于模糊-PID 的理论和算法	39
4.3.1 PID 控制的基本理论	39
4.3.2 模糊控制的基本理论	40
4.3.3 模糊-PID 控制算法研究	45
4.4 模糊-PID 复合控制器的设计	48
4.4.1 模糊控制器的输入、输出变量确立	49
4.4.2 模糊控制器输入量和输出量的模糊化	49
4.4.3 模糊规则表的确立	50
4.4.4 模糊控制表的建立	52
4.4.5 PID 温度控制器的设计	52
4.5 本章小结	53
第 5 章 海水淡化控制系统的实现	55

5.1 海水淡化控制功能的具体实现55

 5.1.1 泵类控制的实现55

 5.1.2 工作模式选择的实现57

 5.1.3 联锁功能的实现59

 5.1.4 调节阀控制功能的实现60

5.2 监控系统的功能实现65

5.3 本章小结68

第6章 结束语69

参考文献71

致 谢75

第1章 绪论

1.1 研究背景

1.1.1 我国水资源现状

水是人类的宝贵资源，是生命之泉。地球上水资源总量约 13 亿 8600 万千米立方，其中淡水尽占水资源总量的 2.5%—3%，而全世界 69.5%的淡水是人类难以利用的诸如冰山、永久积雪及永久冻土层中的冰等以固态形式存在的。由于淡水的短缺，淡水危机已成为我国及全世界所关注的焦点问题。人类所赖以生存的淡水资源正在迅速减少，水资源的短缺导致了全球的水质恶化、干旱及土壤盐碱化现象不断扩大，影响到全球经济发展与生态环境。据联合国教科文组织预测：今后的 25 年内，受到缺水影响的人口将会增加 4 倍以上，与此同时，世界供水量每 20 年翻一番，需求量的增长是人口增长速度的两倍。

我国多年平均天然河川年径流量为 27115 亿 m^3 ，位居全球各国第六位，但人均水资源较低，是联合国公认的 13 个贫水国之一。中国淡水资源总量约 28124 亿 m^3 ，若按目前全国 13 亿人口计算，人均占有淡水资源量 2163 m^3 ，不足世界平均水平的 1/4，人均占有的可利用量仅 850 m^3 。且南北分布极不平衡，东西差异也很明显，东南部水量丰富，西北部严重缺水，北方几乎所有的城市都严重缺水。北京、天津、河北、山西、辽宁、上海、江苏、山东、河南和宁夏 10 省（自治区、直辖市）人均水资源都在 200 m^3 左右，全国占地面积大于 500 km^2 的岛屿有 6500 多个，其中绝大部分严重缺水^[1]。

1.1.2 海水淡化对沿海钢铁厂循环经济的意义

随着我国沿海经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，部分沿海城市的供水不能满足发展的需要，为了解决沿海地区的水资源的短缺的问题，基本途径就是开源节流，一方面号召全民节水，努力构建节水型社会，提高利用水的效率；另一方面是积极寻找代替水源，对沿海缺水城市来说，有效利用海水淡化是一种开源方式。目前，海水淡化已是成熟技术，一般成本在 4—10 元/ m^3 （包括取水、生产、回收、日常运行、管理及经营单位的利润等）。如海水淡化产量在 8 万—10 万 m^3/d 规模时，其成本可以降至 5 元/ m^3 。目前，我国海水用量为 $2.56 \times 10^{11} \text{m}^3$ ，比日本（ $1.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ ）和美国（ $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ ）少许多。这是我国工业用水量高的主要原因之一。

钢铁产业是国家的重要基础产业，是国民经济支柱产业，钢铁工业属于典型的流程制造业，钢铁是传统型基础材料，被认为是工业化的“粮食”。同时钢铁产业获取自然资源和能源都属于“不可再生”的资源，这些资源、能源通过不同的工序进行串联作业，协

同运行，生产出大量的产品和副产品，用作生产资料或生活资料。钢铁工业生产过程中资源、能源消耗大，随着国民经济的发展，对钢铁需求日益增长，如此巨大的生产总量，加剧了能源、资源和运输的困难。所以高效的利用和循环利用资源与能源是钢铁产业循环经济的核心。

为了提高运输效率，优化钢铁工业布局，近几年国内各大钢铁集团分别依托沿海港口建设新的钢铁厂，然而我国沿海地区本来就缺少淡水资源，按照我国钢铁工业每吨钢需消耗 3—8 吨淡水，如果以每吨钢需消耗 5 吨淡水，那么沿海 1000 万吨钢铁产能的钢厂年耗水量将达到 5000 万吨淡水。为了减少淡水的消耗，沿海钢铁厂除了实现水的多层次串级使用、采用节水技术改造主体设备及兴建污水处理厂等方法提高水循环率来进一步降低吨钢耗新水量之外，通过利用钢铁厂自备电厂余热蒸汽及干熄焦（CDQ）产生的蒸汽进行海水淡化就是一种补充淡水的有效方式。也是提高钢铁厂二次能源回收利用率的一种有效方法。总之，海水淡化是实现沿海钢铁产业循环经济的重要一环。

1.2 海水淡化历史

目前，全世界有一百二十多个国家和地区采用海水或苦咸水淡化技术取得淡水。据统计，海水淡化系统生产量以每年 10% 以上的速度在增加。亚洲国家如日本、新加坡、韩国、印尼与中国等也都积极发展或应用海水淡化做为替代水源，以增加自主水源的数量。海水淡化的技术主要有蒸馏、冻结、反渗透、离子迁移、化学法等办法。海水淡化虽然耗电耗能，成本很高，但是意义重大。有人估计，海水淡化可能是 21 世纪诞生出的一种新型的生产淡水的未来水产业。就目前经济技术水平而言，海水淡化的成本还是比较高的。

第一个海水淡化工厂于 1954 年建于美国，现在仍在得克萨斯的弗里波特运转着。佛罗里达州的基韦斯特市的海水淡化工厂是世界上最大的一个，它供应着城市用水。表面看海水淡化很简单，只要将咸水中的盐与淡水分开即可。最简单的方法，一个是蒸馏法，将水蒸发而盐留下，再将水蒸气冷凝为液态淡水。这个过程与海水逐渐变咸的过程是类似的，只不过人类要攫取的是淡水。另一个海水淡化的方法是冷冻法，冷冻海水，使之结冰，在液态淡水变成固态的冰的同时，盐被分离了出去。两种方法都有难以克服的弊病。蒸馏法会消耗大量的能源，并在仪器里产生大量的锅垢，相反得到的淡水却并不多。这是一种很不划算的方式。冷冻法同样要消耗许多能源，得到的淡水却味道不佳，难以使用^[2]。

1953 年，一种新的海水淡化方式问世了，这就是反渗透法。这种方法利用半透膜来达到将淡水与盐分离的目的。在通常情况下，半透膜允许溶液中的溶剂通过，而不允许溶质透过。由于海水含盐高，如果用半透膜将海水与淡水隔开，淡水会通过半透膜扩

散到海水的一侧,从而使海水一侧的液面升高,直到一定的高度产生压力,使淡水不再扩散过来。这个过程是渗透。如果反其道而行之,要得到淡水,只要对半透膜中的海水施以压力,就会使海水中的淡水渗透到半透膜外,而盐却被膜阻挡在海水中。这就是反渗透法。反渗透法最大的优点就是节能,生产同等质量的淡水,它的能源消耗仅为蒸馏法的1/40。因此,从1974年以来,世界上的发达国家不约而同地将海水淡化的研究方向转向了反渗透法^[3]。

在新兴的反渗透法研究方兴未艾的时候,古老的蒸馏法也改弦易辙,重新焕发了青春。常识告诉我们,水在常温常压下要加热到100℃才沸腾,产生大量的水蒸气。传统的蒸馏法只考虑了通过升高温度获得水蒸气的方式,耗能甚巨。而新的方法是将气压降下来,把经过适当加温的海水,送入人造的真空蒸馏室中,海水中的淡水会在瞬间急速蒸发,全部变成水蒸气。许多这样的真空蒸馏室连接起来,就组成了大型的海水淡化工厂。如果海水淡化工厂与热电厂建在一起,利用热电厂的余热给海水加温,成本就更低了。

现在世界上的大型海水淡化工厂,大多采用新的蒸馏法。在西亚盛产石油的国度,往往土地“富得流油”,却打不出一口淡水井。水比油贵的现实,使海水淡化工厂如雨后春笋般出现在西亚的海岸线上。1983年,西亚第一大国沙特阿拉伯在吉达港修建了日产淡水30万吨的海水淡化工厂;在另一个西亚国家科威特,现在每天可以生产淡水100万吨。波斯湾沿岸地区,有的国家的淡化海水已经占到了本国淡水使用量的80%—90%。

1.3 海水淡化的方法及技术现状

海水淡化技术经过半个世纪的发展,从技术上讲,已经比较成熟,大规模地把海水变成淡水,已经在世界各地,主要是海湾地区出现。目前主要海水淡化方法分为膜法和热法两种,其中热法包括多级闪蒸(MSF)、多效蒸发(MED)、压汽蒸馏(VC)及太阳能蒸馏法等,膜法包括电透析法(ED)和反渗透(RO)。除了这两种方法外还有核能海水淡化法。而适用于大型的海水淡化的方法只反渗透(RO)、多级闪蒸(MSF)和多效蒸发(MED)。

1.3.1 蒸馏法

蒸馏法是海水淡化最古老的方法。蒸馏法的原理是把苦碱水或海水加热使之沸腾蒸发,再把蒸汽冷凝成淡水的过程。蒸馏法目前有许多种,主要的有多级闪蒸、多效蒸馏、压汽蒸馏及利用太阳能蒸馏等。

(1) 多级闪蒸法(MSF)

多级闪蒸是多级闪急蒸馏法的简称。是一种20世纪50年代新发展起来的海水淡化

法。多级闪蒸是针对多效蒸发结垢较严重的缺点而发展起来的,具有设备简单可靠、防垢性能好、易于大型化、操作弹性大以及可利用低位热能和废热等优点。因此一经问世就得到应用和发展。多级闪蒸法不仅用于海水淡化,而且已广泛用于火力发电厂、石油化工厂的锅炉供水,工业废水和矿井苦咸水的处理与回收,以及印染、造纸工业废碱液的回收等。多级闪蒸是海水淡化工业中最成熟,运行安全性最高的一种技术,弹性大,适用于大型和超大型淡化装置,主要在海湾国家使用。MSF总是与火力发电厂联合运行,以汽轮机低压抽汽作为热源。

多级闪蒸过程原理如下:将原料海水加热到一定温度后引入闪蒸室,由于该闪蒸室中的压力控制在低于热盐水温度所对应的饱和蒸汽压的条件下,故热盐水进入闪蒸室后即成为过热水而急速地部分汽化,从而使热盐水自身的温度降低,所产生的蒸汽冷凝后即所需的淡水。多级闪蒸就是以此原理为基础,使热盐水依次流经若干个压力逐渐降低的闪蒸室,逐级蒸发降温,同时盐水也逐级增浓,直到其温度接近(但高于)天然海水温度^[4]。

(2) 低温多效蒸馏法(MED)

所谓低温多效蒸馏海水淡化技术是指盐水最高温度约70℃的海水淡化技术。低温多效蒸馏海水淡化技术利用火力发电厂、化工厂或是由化工厂的低品位余热,生产纯度极高的蒸馏水(电导率 $<10\mu\text{S}/\text{cm}$),以作为锅炉的补充用水、生产过程的工艺用水或者大规模的市政供水。与传统的多级闪蒸相比,它具有设备的一次性投资少、热电消耗低、传热效率高、操作弹性大、装置的安全性好等诸多优点。特别适合于利用低品位余热的大中型海水淡化使用。

低温多效原理如下:进料海水在排热冷凝器中被预热和脱气,之后被分成两股物流。一股物流作为冷凝液排弃并排回大海,另外一股物流变成蒸馏过程的进料液。料液经加入阻垢分散剂之后被引入到热回收段各效温度最低的一组中。喷淋系统把料液喷淋分布到各蒸发器中的顶排管上,在沿顶排管向下以薄膜形式自由流动的过程中,一部分海水由于吸收了蒸发器内冷凝蒸汽的潜热而汽化。被轻微浓缩的剩余的料液用泵打入到下一个蒸发器效组中,该组的操作温度要比上一组高一些。在新的组中又重复了蒸发和喷淋过程。剩余的料液接着往前打,直到最后在温度最高的效组中以浓缩液的形式离开该效组。产生蒸汽输入到温度最高一效的蒸发管内部。在管内发生冷凝的同时,在管外也产生了与冷凝量基本相同的蒸发。产生的二次蒸汽在穿过了浓盐水液滴分离器以保证蒸馏水的纯度之后,又引入到下一效的传热管内,第二效的操作温度和压力要略低于第一效。这种蒸发和冷凝过程沿着一串蒸发器的各效一直重复,每效都产生了相当数量的蒸馏水,到最后效的蒸汽在排热段被海水冷却液冷凝。第一效的冷凝液被收集起来,该蒸馏水的一部分又返回到蒸汽发生器,超过输入的生蒸汽量的部分流入到一系列特殊

容器的首个容器中, 每一个容器都连接到下一低温效的冷凝侧。这样使一部分蒸馏水产生闪蒸并使剩余的产品水冷却下来, 同时把热量传给热回收效的主体中去。产品水如此呈阶梯状流动并被逐级闪蒸冷却。放出的热量提高了系统的总效率。被冷却的蒸馏水最后用产品水泵抽出并输入到储液罐中, 如此生产出的产品水是完全的纯水。它不含有任何污染物, 平均含盐量小于 5 mg/L。像蒸馏水一样, 浓缩海水从第一效呈阶梯状流入一系列的浓盐水闪蒸罐中, 闪蒸冷却以回收其热量。经过冷却之后, 浓盐水经浓盐水泵打入大海。不凝性气体从每一根冷凝管中抽出, 并从一效流到另一效。这些不凝性气体最后在排热冷凝器的最冷端富集, 并用蒸汽喷射器或机械式真空泵抽出^[5]。

(3) 压汽蒸馏 (VC)

压汽蒸馏的淡化工工艺同低温多效(MED) 蒸馏法, 不同的是压汽蒸馏应用热耗非常低的热泵, 用压缩蒸汽作为蒸发器热管束的加热蒸汽, 是一种高效的蒸馏淡化法^[6]。蒸发过程中产生的二次蒸汽具有极高的焓值, 将其轻易冷却或排出是很浪费的。压汽蒸馏主要利用蒸发过程的二次蒸汽, 根据任何气体被压缩温度升高的这一特性, 二次蒸汽通过压缩, 使其温度升高后蒸汽再送回到蒸发器的加热室, 作为加热蒸汽使用, 蒸汽潜热得到了反复利用。压缩可采用蒸汽喷射器, 称为热压缩(TVC), 或采用机械蒸汽压缩机, 即机械压缩(MVC), 后者是仅仅依靠电能的淡化技术。

(4) 太阳能蒸馏法

太阳能既是一次能源又是丰富的可再生能源。太阳能蒸馏法原理是利用太阳的辐射热能, 加热海水进行淡化。所以早期的太阳能海水淡化装置一般都称为太阳能蒸馏器。被动式太阳能蒸馏系统的例子就是盘式太阳能蒸馏器, 为了增加吸热效率, 盛海水的盘底涂成黑色, 产生的蒸汽在太阳辐射透过率较高的玻璃板或塑料膜上冷凝而得到淡水, 人们对它的应用有了近 150 年的历史。由于它结构简单、取材方便, 至今仍被广泛采用。目前对盘式太阳能蒸馏器的研究主要集中于材料的选取、各种热性能的改善以及将它与各类太阳能集热器配合使用上。与传统动力源和热源相比, 太阳能具有安全、环保等优点, 将太阳能采集与脱盐工艺两个系统结合是一种可持续发展的海水淡化技术。太阳能海水淡化技术由于不消耗常规能源、无污染、所得淡水纯度高等优点而逐渐受到人们重视。缺点是占地面积大, 面积产水量低, 且受地区气候条件影响^[7]。

1.3.2 膜法

膜法海水淡化包括逆渗透法(又称为反渗透法或超过滤法, Reverse Osmosis, RO)及电透析法(亦换膜电渗析法, Electrodialysis, ED)两种, RO 较适用于咸水及海水脱盐; 而 ED 只适用于咸水。

(1) 电透析法 (ED)

电渗析法 (Electrodialysis) 是以直流电为推力, 利用阴阳离子交换膜对水溶液中阴阳离子的选择透过性, 使一个水体中的离子通过膜迁移到另一个水体物质分离过程。其原理是将很多的阴 / 阳离子薄膜交错地串联在一起, 电解质溶液则在膜间流动, 两侧施加直流电的电压之后, 阳离子向阴极移动而阴离子向阳极移动。其中阴离子可顺利通过阴离子膜, 但再往前移动时却被邻近的阳离子膜挡住。同样, 阳离子也可以顺利地通过阳离子膜而无法通过阴离子膜。最终将分离得到低电解质浓度的溶液 (淡水) 以及高电解质浓度的溶液 (卤水)。电透析法所耗用的能源与溶液中盐类含量成正比。此方法较少被应用在海水淡化方面, 因海水所含的溶解性总固体 TDS 较高, 耗电能较反渗透法高, 经济效益较差, 因此此方法多用于淡化碱水。

(2) 反渗透法 (RO)

反渗透技术 (Reverse Osmosis) 是 20 世纪 60 年代初发展起来的以压力为驱动力的膜分离技术。反渗透海水淡化只是 RO 反渗透技术应用的一种, 反渗透法通常又称过滤法, 该法是利用只允许溶剂透过、不允许溶质透过的半透膜, 将海水与淡水分隔开的。在通常情况下, 淡水通过半透膜扩散到海水一侧, 从而使海水一侧的液面逐渐升高, 直至一定的高度才停止, 这个过程为渗透, 海水一侧高出的水柱静压称为渗透压。如果对海水一侧施加一大于海水渗透压的外压, 那么海水中的纯水将反渗透到淡水中。

反渗透除盐率的高低主要决定于反渗透半透膜的选择性。目前, 较高选择性的反渗透膜元件除盐率可以高达 99.7%^[8-9]。反渗透技术海水淡化具有组件化、流程简单、占地面积小、投资省、耗电低等优点; 但膜法需定期更换反渗透膜, 备件费用比较高。

1.3.3 其他方法

目前海水淡化方法除了热法和膜法以外, 因为大规模海水淡化装置将需要大量的能源。在众多的能源解决方案里, 核能是理想的能源之一。核能海水淡化是指以核能作为海水淡化装置能源的一种海水淡化技术。这种能源可以是电能也可以是热能, 相关设备可以专用海水淡化生产, 也可以水电联产。很多国家目前也启动了核能海水淡化项目。利用核能进行海水淡化也是未来海水淡化的一个新的方向^[10]。

1.4 本文主要研究内容

本文主要研究首钢京唐钢铁公司带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化 (MED-TVC) 控制系统的设计与实现。具体研究内容如下:

(1) 介绍首钢京唐钢铁公司海水淡化工程建设概况, 详述首钢京唐钢铁公司带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化 (MED-TVC) 的各部分工艺流程。其中主要包括海水取水系统工艺流程、海水预处理系统工艺流程、海水淡化主体工艺流程及海水淡化在 E

模式下与热电机组联产工艺流程。

(2) 详细分析了低温多效海水淡化对控制系统的要求, 确立了系统的设计原则, 根据设计原则设计选择了控制系统的硬件、网络结构和上下位软件, 同时详细分析系统硬件、网络结构及上下位软件的优点。

(3) 介绍了海水淡化的主要控制对象, 介绍了 PID 控制和模糊控制的基本理论, 根据海水淡化第七效浓盐水温度的控制特点设计了模糊-PID 混合控制器。

(4) 根据海水淡化 (MED-TVC) 工艺流程及控制要求, 实现了带热蒸汽压缩低温多效海水淡化泵类的控制、调节阀的控制、运行模式的变换和连锁保护功能。同时采用 WINCC6.0 组态软件开发了海水淡化监控系统, 实现了生产过程自动化和一体控制。

(5) 总结海水淡化整体运行情况及取得的经济效益, 同时对带热蒸汽压缩低温多效海水淡化 (MED-TVC) 应用的前景进行展望。

第2章 海水淡化工艺流程

2.1 首钢京唐钢铁公司海水淡化运行情况

首钢京唐钢铁公司钢铁厂项目是纳入国家“十一五”规划纲要的重点工程。钢铁厂临海优势明显，利用曹妃甸“面向大海有深槽，背靠陆地有浅滩”的地理优势进行建设。深水港可满足 25 万吨级以上大型船舶进出，有利于大幅度降低原料和产品运输成本。钢铁厂建设用地来源于滩涂围海造地，不占用耕地资源。钢铁厂完全按循环经济理念设计，以“减量化、再利用、资源化”为原则，以低消耗、低排放、高效率为特征，对生产过程中的余热、余压、余气、废水、含铁物质和固体废弃物充分循环利用，基本实现零排放。最终目标是使新钢厂具有钢铁生产、能源转换和为相关行业提供资源等功能，成为我国钢铁行业循环经济的示范基地，见图 2.1 首钢京唐公司循环经济示意图。

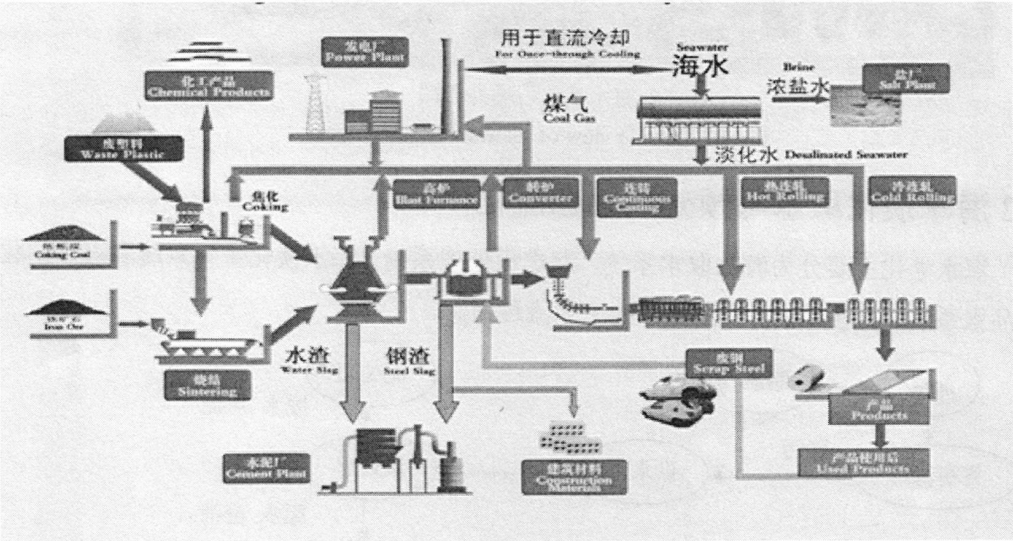


图 2.1 首钢京唐公司循环经济示意图
Fig2.1 SGJT Circular Economy Chart

首钢京唐钢铁公司海水淡化工程第一期规模为 50000m³/日（见图 2.2 海水淡化现场外景图）。第一期分为两步建设，第一期第一步的规模为 25000 m³/日。由两套带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化（MED-TVC）装置组成，每套规模为 12500 m³/日。京唐钢铁公司用先进的技术回收利用低温热源用于海水淡化，使钢铁厂生产过程中所产生的能源得到充分利用。采用海水淡化技术，一期工程全部结束后，每年可生产 1800 万吨淡水，占钢铁厂用水总量的 50%左右，剩下的浓盐水用于制盐。目前，一期工程 4 套带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化（MED-TVC）装已投入使用。纯 TVC 模式时的造水比

（蒸汽与产水量比值）达到设计要求 9.8，电导率满足设计要求小于 $10\mu\text{S}/\text{cm}$ 。生产出的成品水满足生产要求已送入管网。其中海水淡化（MED-TVC）装置与热电联产 MED 模式已有一套主体投入使用，通过利用 25MW 发电机组的乏汽作为海水淡化 MED 模式下的汽源，充分利用钢铁厂的富裕蒸汽，提高了能源的利用率。

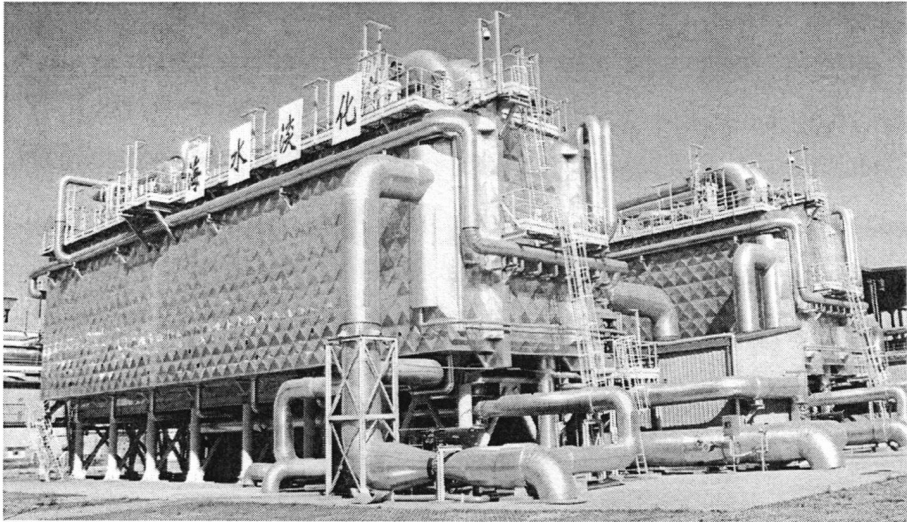


图 2.2 海水淡化现场外景图
Fig 2.2 Outside view of seawater desalination

2.2 海水淡化取水与预处理工艺流程

海水淡化主要分为海水取水系统、海水预处理系统、海水淡化主体系统和海水淡化成品水系统。见图 2.3 海水淡化系统工艺流程图。

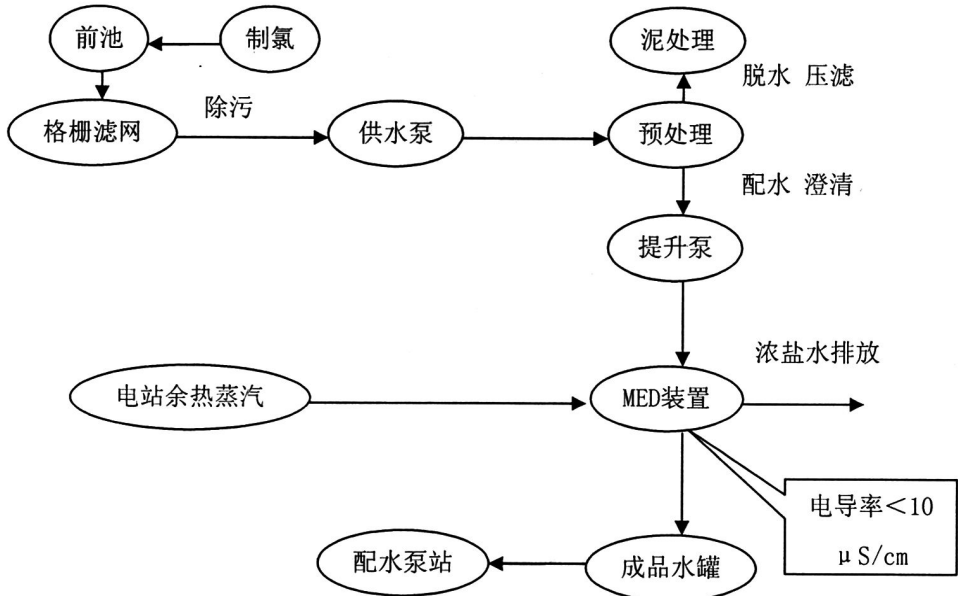


图 2.3 海水淡化系统工艺流程图
Fig 2.3 Process flow sheet of seawater desalination

2.2.1 海水取水系统工艺流程

首钢京唐钢铁公司使用的海水取自内港池，取水口与取水泵房合建，采用岸边敞开式引水，海水经前池、拦污栅、旋转滤网进入水泵间，经立式斜流泵加压后供给海水淡化（其中为了抑制海生物的大量繁殖及杀菌灭藻，在海水前池取水进行海水电解制氯，制成次氯酸钠后加入前池及各加药点进行杀菌）。一期工程海水总取水量为 116970m³/h，主要供给煤-气混烧发电站和作为海水淡化工程的水源^[1]。

（1）海水前池及制氯系统

海水取水泵站取水口建于曹妃甸工业区内港池。为保证港池内船舶和码头运行的安全性，取水口处的流速将控制在 0.3m/s 左右。经取水口直接进入海水前池。海水前池为长 76.3 米，宽 12.4 米的水池，其前端通过两个各 4 米宽的流道与大海联通。后面有 13 各流道与泵房联通。

海水通过前池输送到制氯间通过海水泵（两用一备）升压后，然后通过自动反冲洗过滤器除去直径在 0.4mm 以上的固体污物后进入电解槽组件电解。每组电解槽前设流量、压力传感器、流量控制阀。制氯单元是由两组 70kg/h 电解槽模块组成，每组电解槽模块是由两列水路并联的 SC330/1 型电解槽组成，每列电解槽水路串联。两套整流装置将 6.3kVAC 交流电转化为直流电分别供给对应的电解槽组，将流经电解槽的海水电解，在电解槽中发生化学反映（ $\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaClO} + \text{H}_2\uparrow$ ），产生次氯酸钠溶液及副产物氢气进入次氯酸钠储罐。在次氯酸钠储罐内通过风机把氢气稀释后排放大气。次氯酸钠储罐内的溶液通过各种加药泵输送至各个加药点。加药点设置在海水取水泵房进水流道内。

其中电解海水制氯设施整套装置的核心部分由两组电解槽组成，并各配一套整流柜和整流变压器，每组电解槽可实现独立运行。系统设海水升压泵三台：二用一备，自动切换；自动反冲洗过滤器三台，二用一备，过滤器可防止海水中的固体颗粒进入次氯酸钠发生系统，造成系统的堵塞和对系统管道、电极等的磨蚀。次氯酸钠加药泵五台：三台连续加药泵，二用一备，自动切换，两台冲击加药泵，一用一备；次氯酸钠贮罐设一台，采用强制排氢方式，让氢气自然稀释排入大气。

（2）拦污栅及清污机

海水经过前池后，通过流道进入泵房，每个流道设一闸板，便于检修时切断海水。经闸板后为防止较大污物进入水泵吸水口，每个流道前部设置一道拦污栅。拦污栅宽 5.2m，栅室深 16.5m，共设 13 套，为便于清污，根据水源条件，13 套拦污栅配用一台移动式直耙清污机。每个流道拦污栅前后设液位检测。当液位差达到 0.4 米时，直耙清污机对该流道进行清污。

（3）旋转滤网

海水通过拦污栅及清污机，为满足过水面积，改善水流条件、拦截较细小污物，同时，尽量减少泵房尺寸及旋转滤网尺寸，每个流道内配置一台侧面进水全框架型的旋转滤网。海水淡化单台旋转滤网设计过水流量 $2\text{ m}^3/\text{s}$ ，最大过水流量 $2.5\text{ m}^3/\text{s}$ 。旋转滤网前后设有液位检测，根据液位差自动启动每个流道的旋转滤网。当液位差达到 0.3M 时，该流道旋转滤网自动启动。当液位差达到 0.6M 时，上位开始报警，运行人员检查旋转滤网。

(4) 海水供水泵

海水经过加次氯酸钠抑制海生物的大量繁殖及杀菌灭藻，经过拦污栅及清污机除去海水中较大污物及经过旋转滤网拦截较细小污物后，由海水供水泵送出，海水淡化共 6 台海水供水泵，占用 3 个流道，每个流道安装两台供水泵。海水供水泵为立式混流泵，采用湿坑型、转子不可抽式。考虑到海水介质特性及砂砾度，水泵导轴承采用合成纤维轴承加耐磨保护套，并配备外部润滑系统，润滑介质为海水。海水供水泵与流道前液位联锁，当液位低于 4.3M 时，联锁停止海水供水泵。为了保护电机及泵，每台电机 3 各定子温度、电机轴承温度及泵轴承温度设有报警点及连锁停机点。

2.2.2 海水预处理系统工艺流程

海水通过供水泵后，为了保证合格海水进入海水淡化装置制取淡水。需进入海水预处理单元。海水预处理由法国威立雅公司 ACTIFLO® 高效沉淀池系统、泥处理系统及提升泵站三部分组成。整体布局见图 2.4 海水淡化系统平面图。

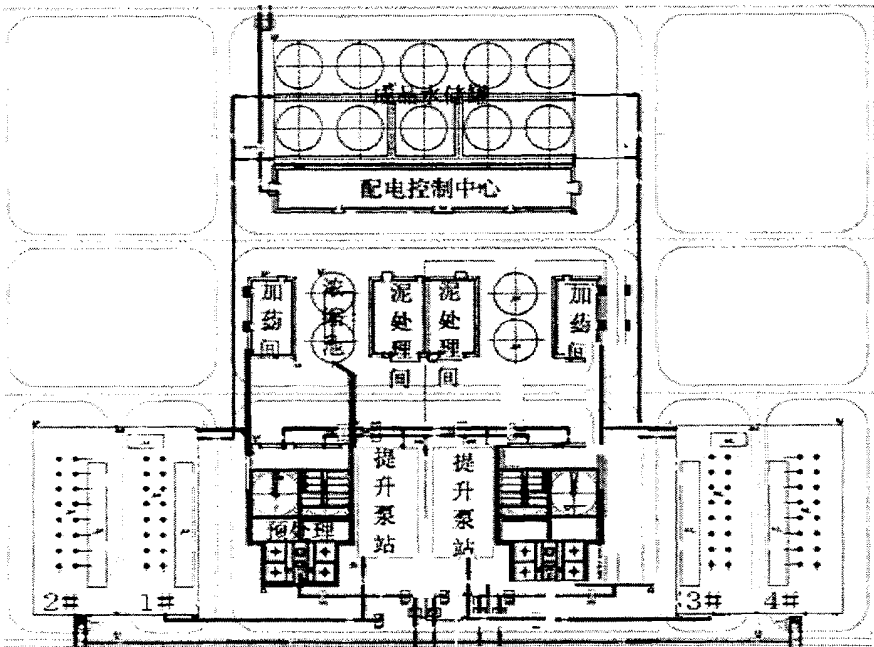


图 2.4 海水淡化系统平面图

Fig2.4 Systematic plan of the desalination

(1) ACTIFLO® 高效沉淀池工艺

首钢京唐公司的海水预处理采用法国威立雅公司的 ACTIFLO® 高效沉淀池工艺，其规模为正常运行条件下运行四套 ACTIFLO® 装置，每套装置的产水流量为 5,000 m³/h，保证正常情况下 20,000 m³/h 的产水量，当一套 ACTIFLO® 装置维修时，另一套 ACTIFLO® 装置可以供应 70% 的总产水量，即 7,000 m³/hr，并保证此情况下对应的出水水质。

高效沉淀池的工艺流程截面图（见图 2.5）。海水首先进入混凝池，引起海水中浊度的自然微粒是带有负电荷的并且互相排斥从而形成了高度稳定状态。为了去除它们，首先要对这些微粒进行脱稳，这个过程需要混凝剂的投加（如：聚合氯化铝，硫酸铝，氯化铁），并通过搅拌机搅拌。混凝过程的动力学过程非常短，合适的搅拌可以保证一个快速和完全的扩散作用。混凝池的容积可以保证在最大流量时的接触时间约为 2 分钟。

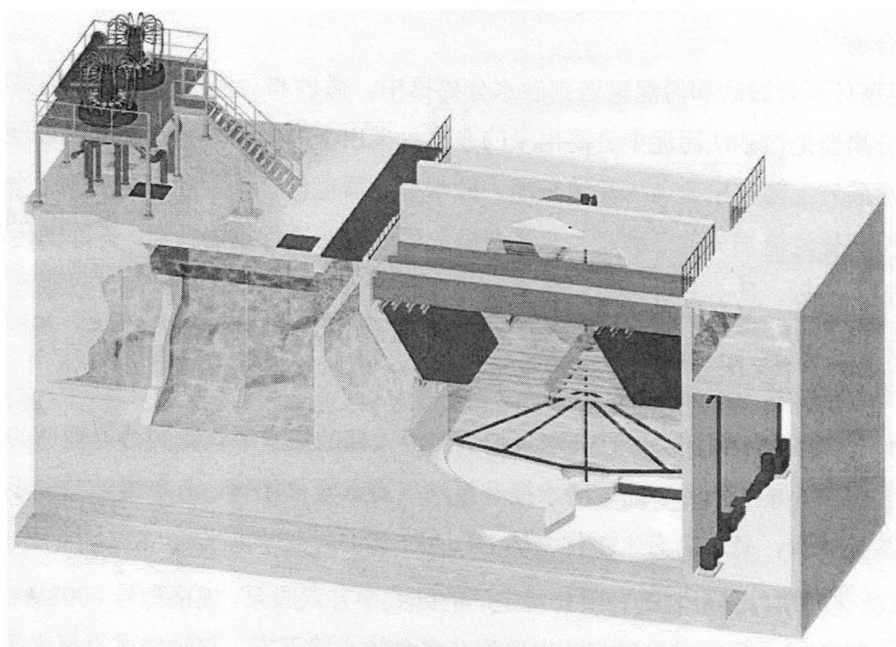


图 2.5 微砂加速沉淀池的截面图

Fig 2.5 Sectional drawing of Micro-sand accelerated sedimentation tank

海水经过混凝池后，进入注射池，注射池的主要目的是投入粒径大约为 100μm 的微砂已加重絮凝，微砂持续循环以增加凝聚的几率和保证合适的絮体以增加它们的增长速率和重量。另外，对于通常由于低温水而导致的絮凝困难，微砂可以显著的增大反应范围而得到良好的处理效果。在注射池中，通过搅拌机对水的搅拌是迅速和剧烈的。注射池的尺寸可以保证在峰值流量时停留时间为 1.4 分钟。

经过注射池后，为了形成更大的絮凝体需进入熟化絮凝池，絮凝是一个物理机械过

程, 该过程由于分子间的作用力和物理搅拌作用而增强絮凝体的生长。高分子聚合物的投加可以通过吸附, 电性中和颗粒之间的架桥作用来提高絮凝体生成。得益于微砂的加速絮凝, 其获得的速度梯度相当于传统的絮凝工艺在相同的沉淀性能情况下的 10 倍。在搅拌时间有限和絮凝体积的有限的情况下, 高的絮凝动力效用导致颗粒间碰撞机率的增加。熟化池搅拌机的搅动力度柔和, 以防止絮体破碎。在该阶段中尽管其搅动烈度小于先前的混凝阶段, 但也足够能保持絮体的悬浮状态。

海水经过絮凝池后进入沉淀池, 沉淀池采用逆向流斜管系统增加沉淀面积, 在絮凝后, 海水进入沉淀池的底部然后从斜管底部向上方流动至渠道。颗粒和絮体沉淀在斜管的壁上并在于重力的作用下下滑。该系统采用较大的镜向速率, 同时由于斜管的 60 度倾斜, 可以形成一个连续自刮的过程。所以在斜管上不会积累絮体。微砂和污泥的排除, 微砂加速沉淀的污泥被沉淀在池底, 一台刮泥机把沉淀下的微砂和污泥混合物刮向中心坑中。上清液由分布在斜管沉淀池顶部的集水堰收集。污泥循环泵连续抽取集中在中心坑中的混合物^[12]。

污泥循环泵把微砂和污泥输送到砂水分离器中。微砂和污泥进行分离采用离心原理, 砂水分离器把微砂从污泥中分离出来的并将分离出来的微砂直接投加到注射池中。污泥从分离装置上部溢出流向污泥浓缩池。砂水分离器能保证微砂和污泥的高效分离。通过砂水分离器溢流损失的微砂极少, 这个损失可以间断进行投加补充。排除的污泥中含有很少量的微砂, 且不会对污泥的性质和处理产生特别的影响, 其污泥可以进行常规浓缩和脱水。

(2) 海水淡化提升泵站

海水经过高效沉淀池后, 通过清水泵把沉淀池顶部的集水堰收集到得处理后的海水送到海水提升泵站的吸水井。通过海水提升泵送入海水淡化主体。海水提升泵一步和二步工程各安装四台, 负责为海水淡化主体 U1、U2 和 U3、U4 供水。

海水淡化采用日立泵制造有限公司生产的卧式中开双吸泵, 规格型号 600SW-30。3100m³/h, H=30m, 泵的吸入口与吐出口均在水泵轴心线下方, 与轴线垂直呈水平方向, 泵壳中开, 检修时无需拆卸进出口管路及电机。双吸密封环通过间隙密封减小泵腔水从高压侧流向叶轮进口侧, 提高容积效率。水泵通过弹性联轴器与电机直联传动。

(3) 海水淡化泥处理系统

海水淡化预处理设施的污泥水自流至浓缩池, 浓缩池进行沉淀浓缩的同时对泥浆量有一定的调节作用。在泥浆来水中加入絮凝剂加强絮凝沉淀作用。浓缩池底部浓缩泥浆由气动隔膜泵加压送入自动厢式压滤机进行机械脱水, 脱水后的泥饼运出回收利用。压滤机的滤液、浓缩池的上清液及管沟内的排水排入外线排水管网, 见图 2.6 泥处理工艺流程图。

设置 $\Phi 13\text{m}$ 浓缩池 2 座，池深约 4.5m，单池容积约 600m^3 ，表面负荷 $1.09\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ，进浓缩池污泥含水率约 99.6%，单池污泥流量约 $290\text{m}^3/\text{h}$ ，经浓缩后泥浆含水率约 97%，SS 含量 $31\sim 69\text{kg}$ 干固体/ m^3 ，比重 $1.04\text{t}/\text{m}^3$ 。污泥在池底中心污泥槽中浓缩后，由泥浆提升泵加压送入压滤机脱水，浓缩污泥流量约每池 $38.7\text{m}^3/\text{h}$ 。泥浆提升泵为气动隔膜泵（共 3 台，2 用 1 备）。泥浆经提升后进入泥处理间二层设置的 3 台自动厢式压滤机进行机械脱水，脱水后的泥饼落至压滤机下面的储泥斗内，待装车运出至指定地点回收利用。压滤机采用自动液压锁紧、自动液压松开、自动拉板系统、明流排液的形式，泥饼量 $>3.3\text{m}^3/\text{h}$ ，含水率 $\leq 65\%$ ，排液 $\text{SS} < 50\text{mg}/\text{L}$ ，单台设备工作周期 $\leq 3\text{h}$ 。系统成套的主机附属设备、液压设备系统、空气压缩设备、自动成套加药装置、移动冲洗设备等均设置于泥处理间内。压滤机共 3 配备台，单台过滤面积 300m^2 ，滤室容积 5.2m^3 ，进料压力 $0.4\sim 0.6\text{MPa}$ ，压榨压力 $0.7\sim 0.8\text{MPa}$ 。采用 2 用 1 备运行模式，最不利时 3 台同时投用。同时设储气罐两台，空气压缩机一台。

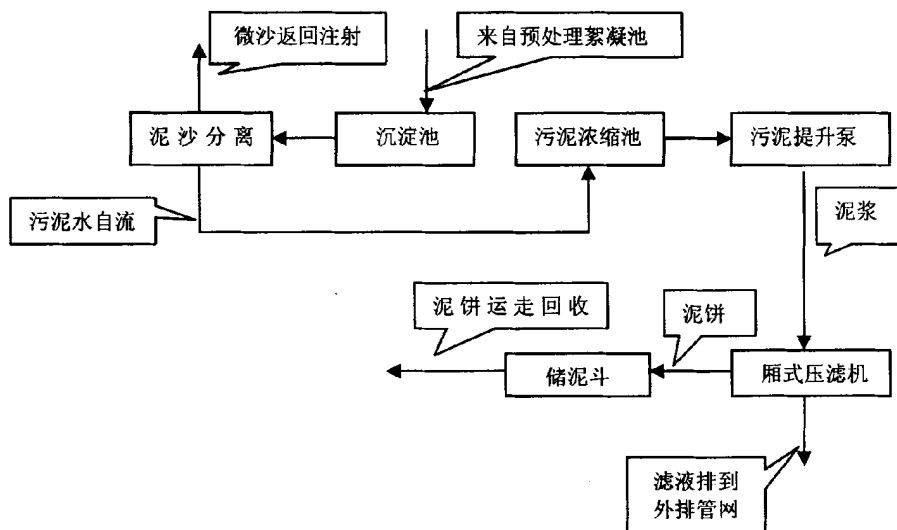


图 2.6 泥处理工艺流程图

Fig 2.6 Process flow sheet of sludge treatment

2.3 海水淡化主体工艺流程

2.3.1 带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化工作原理

(1) 带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化基本工作原理

带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化是结合了蒸汽蒸馏与低温多效蒸馏法优点的一种海水淡化方法，其基本原理如下：

海水淡化的基本过程是海水在真空下的蒸馏（低温蒸发），蒸发器内换热管束水平布置，蒸汽在管内冷凝放热，进料海水喷淋至管束顶部，呈膜状向下流动并吸热部分蒸发，因此装置称为水平管降膜式低温多效蒸发器。装置中低温蒸发独立发生的一段称为

一效，共七效，第一效为最热效，第七效为最低温效。蒸发器内第七效后布置一管式冷凝器，其中海水走管侧升温但不产生蒸发，蒸汽走壳侧发生冷凝。

运行时进入装置介质为蒸汽、海水，系统排出介质为浓盐水、冷凝水及成品水，主要工艺流程见图2.7低温多效海水淡化流程示意图。

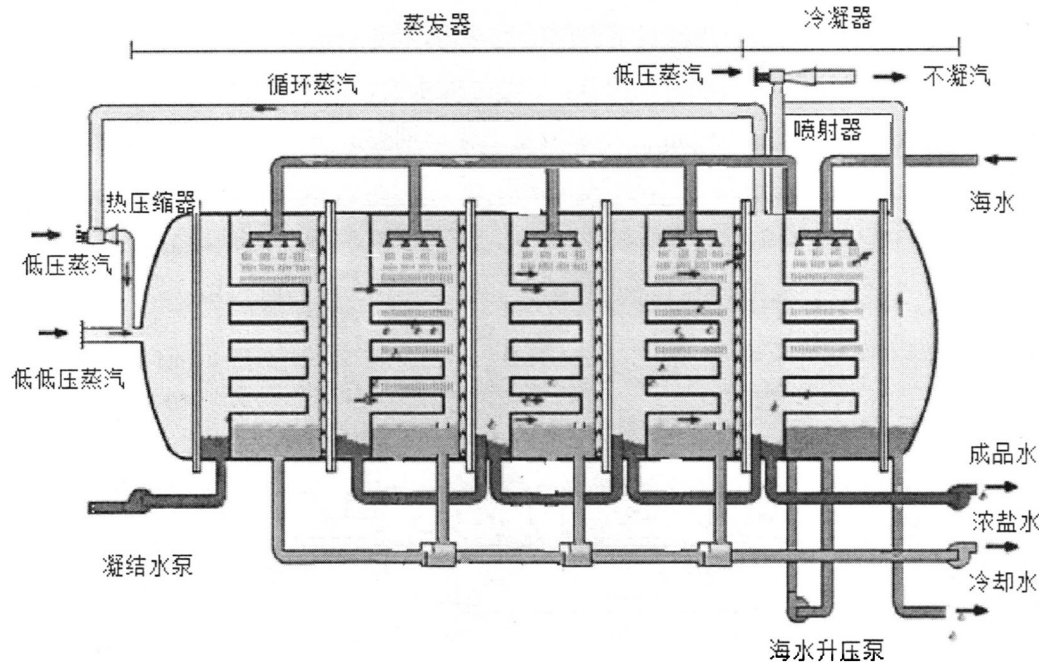


图2.7 低温多效海水淡化流程示意图

Fig 2.7 Flow schematic drawing of the desalination (MED)

经预处理后的海水被提升至海水淡化系统，首先作为冷却水进入 MED 装置末效冷凝器；海水在末效冷凝器中预热、脱气后分成两股水流，一部分返回大海，另一部则作为蒸馏工艺的补给水进入蒸发效；部分补给海水进入处于真空状态的低温效组蒸发，其余部分经再预热后进入到高温效组中；输入蒸汽被引入到第一效的换热管中，冷凝释放潜热传给管外的海水，几乎等量的二次蒸汽在管外产生；二次蒸汽通过除雾器后，被引入下一效换热管，蒸发—冷凝过程在所有效段中反复进行，每一效产出相当量的蒸馏水；最后一效产生的二次蒸汽在末效冷凝器被海水冷却水冷凝；第一效的蒸馏水被收集，返回蒸汽发生地，称作冷凝水；其余效产生的蒸馏水自流至末效冷凝器，与其中的蒸馏水被共同收集得产品水；每效中补给海水蒸发浓缩液称为浓盐水，自流至最后一效后被共同收集排出；最后一效产生的二次蒸汽中部分被热喷射压缩器抽出，与动力蒸汽混合被共同引入第一效作加热蒸汽^[13]。

(2) 主蒸发器结构

主体蒸发器为大型平行六面体装置，主要由蒸发器壳体与内部换热管束及其他结构

组成，内部处于真空状态。蒸发器尺寸约为35x8.75x7m，壳体材质及换热管束支撑板为双相不锈钢，海水喷嘴为ABS材质，换热管束材质为钛管（上三排）及铝黄铜管，内置冷凝器换热管全部为钛管，壳体外部加强筋为碳钢材质。热压缩器及补给水加热器、两级蒸汽喷射器及其表面喷射冷凝器布置于蒸发器顶部，海水过滤器、工艺泵、板式换热器及加药系统布置于主体附跨间内，在1#主体侧管廊架内设置减温减压站。

2.3.2 海水淡化的蒸汽流程

（1）海水淡化所需加热及抽真空使用的汽源

海水淡化所需加热及抽真空使用的汽源有两种，如表2.1所示。根据汽源情况，淡化装置可在三种不同的工况下运行，如表2.2所示。

表2.1 海水淡化使用的汽源
Table 2.1 steam source of the desalination

汽源	参数	
蒸汽管网（LP—低压蒸汽）	0.4-0.9MPa(a),250℃	绝压
汽机乏汽（LLP—低低压蒸汽）	0.03MPa(a),2625kJ/g	绝压

表2.2 海水淡化的运行模式
Table 2.2 run mode of seawater desalination

运行模式	汽源使用		产水量
纯TVC	仅使用LP蒸汽，单台用量	53t/h	额定产量
部分TVC	使用LP蒸汽，单台用量	15t/h	
（MED-TVC）	使用LLP蒸汽，单台用量	62t/h	
纯MED	仅使用LLP蒸汽，单台用量	62t/h	70%产量

（2）蒸汽系统工艺流程

低压蒸汽入口管线与蒸汽管网之间的连接由减温减压站的两台气动隔离阀控制，由两台减压阀控制蒸汽压力，由两台减温减压泵将蒸馏水打入蒸汽以降低温度。低低压蒸汽入口与汽机蒸汽之间连接由气动阀控制。低压蒸汽通过减温减压后输入 2 台热压缩器（MED-TVC 模式下只输入 2#热压缩器，MED 模式下不使用），在其中与第七效被抽出的部分二次蒸汽混合后被送入蒸发器蒸汽入口（热压缩工作原理图见图 2.8）。低低压蒸汽直接进入第一效换热管内（MED-TVC 及 MED 模式下）作为加热蒸汽。加热蒸汽在换热管内冷凝后由冷凝水泵抽出，至冷凝水冷却器冷却，经电导率检测合格后输回冷凝水网络，输回压力 0.25 MPa。输出产品蒸馏水量与输入系统加热蒸汽量之比称为造水比（GOR），本套 MED-TVC 装置在纯 TVC 模式下造水比为 9.8。补给海水及真空系统泄漏将向蒸发器内部带入不凝气，动力蒸汽连续通入喷射器将不凝气抽出。系统真空由启动喷射器建立，由两级蒸汽喷射器维持，包括：启动用蒸汽不可回收，1 级喷射器将末

效冷凝器中空气及1级喷射冷凝器中的空气蒸汽混合物抽出,蒸汽冷凝后送入蒸发器第一效;2级喷射器将1级喷射冷凝器中空气抽出排至大气,冷凝水直接排出^[13]。

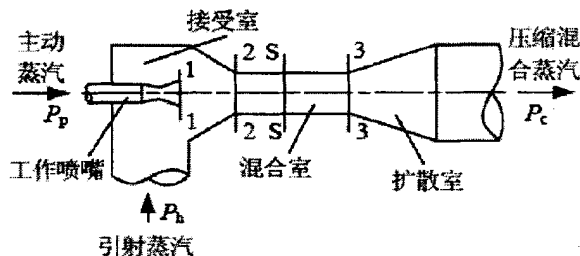


图2.8 热压缩器工作原理图

Fig 2.8 Working Principle chart of Thermal compressor

2.3.3 海水流程

(1) 冷却海水流程

进入海水淡化区域海水压力为 0.35 MPa, 温度范围-2.4~30.9℃。每一套装置海水进口设一阀门, 用来关断海水。温度控制由控制阀完成, 系统的功能需在进料海水温度过低的情况下也保证每年的正常产量。海水在装置入口通过一个过滤器, 之后作为冷却水进入主体装置末效冷凝器换热管内, 其中部分海水先通过蒸馏水冷却器、冷凝水冷却器及海水预热器预热 (根据海水温度决定)。海水在末效冷凝器将第七效产生的二次蒸汽冷凝, 预热后分为两股, 大部分由气动阀控制排出, 其余部分由泵提升进入主体装置作为工艺补给水, 其流量由流量测量装置及气动阀控制。主要设备由海水进水过滤器及末效冷凝器组成。

(2) 补给海水流程

海水经海水升压泵升压后直接进入蒸发器低温效组 (五、六、七效), 其余部分经补给水加热器再次预热后进入高温效组中的二、三、四效, 最后一部分通过两级喷射冷凝器预热至接近加热蒸汽温度后进入蒸发器第一效。总补给水在各效分配流量为 247t/h, 每一效的分配管线均装有流量指示装置, 由孔板调节控制每一效补给水量。

2.3.4 蒸馏水流程

第一效中, 加热蒸汽冷凝释放的热量传递至管外海水补给水使之部分蒸发, 产生的二次蒸汽经过不锈钢丝网状的除雾器后进入在第二效换热管束内冷凝, 其热量随之传递于换热管外的补给海水, 使其部分蒸发, 同样, 其产生的二次蒸汽进入第三效换热管束作为加热介质, 其余每效相同 (除第四效部分二次蒸汽被抽至补给水加热器预热补给水), 直至最后一效, 最后一效中二次蒸汽在末效冷凝器管外冷凝 (TVC 及 MED-TVC 模式下部分蒸汽被抽出)。各效二次蒸汽冷凝后蒸馏水由玻璃钢制 U 型管相连, 逐效自

流至末效冷凝器，在其中设置一台蒸馏水液位控制器，蒸馏水收集后由泵抽至蒸馏水冷却器，冷却至 33℃ 以下后，经电导率检测合格后作为产品水输出，输出压力 0.25 MPa。

2.3.5 浓盐水流程

各效中补给海水部分蒸发，其余部分流至底部浓缩后通过堰板逐效自流至最后一效收集槽，与海水预热器相连，设置一台浓盐水液位控制器及控制阀，用于将热量从浓盐水传至可调量的进料海水，同时设置一台浓盐水旁通电动控制阀。浓盐水排放温度小于 43℃，排放压力 0.05 MPa，其中系统中主要工艺泵参数见表 2.3

表 2.3 工艺泵参数表
Table 2.3 Process pump parameter table

离心水泵	单位	海水升压泵	盐水排放泵	蒸馏水排放泵	冷凝水排放泵
类型		水平式	水平式	水平式	水平式
流体		海水	浓盐水	蒸馏水	冷凝水
盐度	g/kg	32.5	44	0.01	0.01
温度	℃	40.5	44	43	68.1
额定流量	t/h	1730	1208	521	80
最大流量	t/h	1900	1500	580	100
最小流量	t/h	1300	800	300	50
介质密度	kg/m ³	1021	1033	990	979
总扬程	m	17	26	49	40
耗电量	kW	120	135	110	16

2.3.6 药剂添加

海水淡化系统中海水将在较低温度蒸发，根据钙镁盐的化学特性，68℃ 以上结垢现象将很容易产生，因此尽管换热管表明结垢的机率减小了，但需向补给水连续投加阻垢剂及消泡剂，以避免换热管表面结垢以泡沫产生对系统换热造成影响。每套淡化装置设 1 个药剂罐与 2 台隔膜计量泵^[14]。

2.4 海水淡化在 E 模式下与热电机组联产工艺流程

热法海水淡化在 MED 模式下与热电机组联产工艺流程目前国内属于首创(见海淡与热电联产工艺流程图 2.9)。其基本流程是为了充分使用钢铁厂的富裕煤气，首钢京唐公司在 2010 年先后建起两座 130 吨中压锅炉，中压锅炉产生的蒸汽一部分经过锅炉的减温减压器把压力降到 2-2.5MPa，送给炼钢 RH 炉，供 RH 炉使用。另外一部分富裕中压蒸汽，压力为 3.82MPa 送给新建两套 25MW 发电机组，作为发电机组汽轮机的

动力汽源，汽轮机乏汽直接连接海水淡化的入口，一套汽轮机对应一套海水淡化主体，乏汽压力为-0.065MPa；由海水淡化装置取代汽轮机的真空泵，同时汽轮机乏汽作为热法海水淡化 MED 模式下的低低压汽源，海水淡化产出淡水后送往除盐水管网，供给公司各个用户。汽轮机的低压抽汽为 0.6MPa，送入低压蒸汽管网，可以给另外两套海水淡化装置在 TVC 模式下作为低压蒸汽使用。发电机组发出的电经 10KV 变电站与电网并网后送入电网。

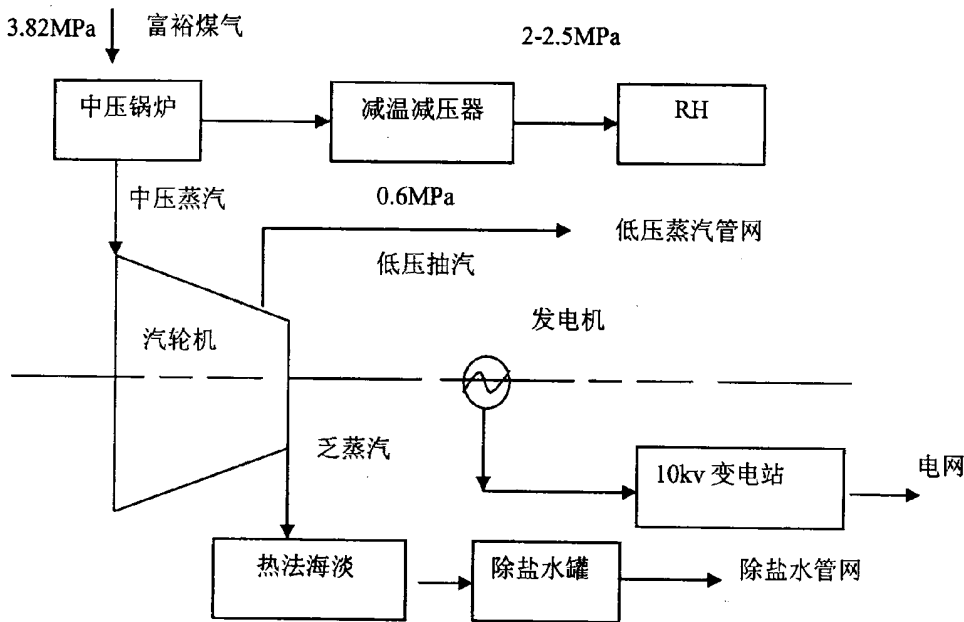


图 2.9 工艺流程图
Fig 2.9 Process flow sheet

2.5 本章小结

本章主要介绍首钢京唐钢铁公司海水淡化工程建设概况，并详述了带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化的海水取水、海水预处理、海水淡化主体和海水淡化在 E 模式下与热电机组联产的工艺流程。

第3章 海水淡化控制系统的总体设计

为了确保带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化安全高效运行,须有一套完整和全面的控制系统做后盾,本章首先对控制对象的工作过程和工艺流程进行分析归纳,明确具体要求,确定系统所要完成的任务后,确定了可靠性高、实用性强、技术先进和通用性强的控制系统设计原则。本章主要根据控制原则设计先择了控制系统的硬件、网络结构和上下位软件,同时详细分析系统硬件、网络结构及上下位软件的优点。

3.1 带热蒸汽压缩低温多效海水淡化对控制系统的要求

带热蒸汽压缩低温多效海水淡化各个系统联系比较紧密,根据工艺要求,连锁关系比较复杂,从海水淡化装置启用前的条件准备到海水淡化装置的启用以及装置的停用都需要进行控制。其中装置启用后,需实现全自动运行,尽量减少人为操作。同时由于海水的强腐蚀性与海水淡化系统的特殊性,一旦发生控制故障造成事故,后果相当严重,如果控制不好造成主体停机玻璃钢管道不堪重压破裂,修复通水需要时间比较长,管道破裂造成的海水泄漏将严重影响设备的正常运行及使用寿命,海水淡化系统的突然停机对综合管网系统也会造成严重的影响,损失无法估计。这就要求海水淡化的控制系统可靠性要高,下面以一套海水淡化主体为例,主要包括海水系统、蒸汽和真空系统、成品水系统及化学处理系统四个部分,详细分析各工艺流程的控制要求。

3.1.1 海水系统的控制要求

(1) 海水补给水系统控制要求

海水淡化装置启动前,要求保持海水过滤器进水阀 WS10V1 和旁路阀 WS09V1 均处于关闭状态;海水进水调节阀 WS10V4 处于全开 100%状态;海水排放调节阀 WS20V1 处于打开 20%状态,海水升压泵处于无故障状态。

海水淡化装置的开启时,要求首先打开海水进水阀 WS10V1,接通海水进水过滤器的控制柜,选择自动控制。然后起动海水补给水升压泵 WS30D1;打开海水补给水流量调节阀 WS40V1,调节流量至 1,200 t/h,将流量控制切换到自动模式(设置点 1200 t/h)。海水淡化蒸汽系统、蒸馏水泵和冷凝水泵运行后,将海水补给水流量调节阀 WS40V1 打到手动状态,逐步调节海水补给水流量调节阀 WS40V1,使流量达到 1,700 t/h 时,再将流量控制切换到自动模式(设置点 1,700 t/h)。

(2) 浓盐水系统控制要求

海水淡化装置启动前,关闭酸洗再循环至海水补给水管线隔离阀 WK30V1;浓盐

水泵处于无故障状态。

海水淡化海水补给水系统开启后，当浓盐水液位达到满量程的 70%时，启动浓盐水泵 WB10D1；打开浓盐水液位调节阀 WB20V2，将液位调节至满量程的 50%；将浓盐水液位控制切换到自动模式（设置点 50%）。

当蒸汽系统投运后，第 7 效浓盐水温度 WE07T1 稳定在大约 35℃，再逐步增加温度控制器的设定值至 42℃，温度控制切换到自动模式。通过温度调节阀 WS10V4 或 WS20V1 控制第 7 效浓盐水温度在 42℃，最高不能超过 50℃。

3.1.2 蒸汽和真空系统的控制要求

（1）真空系统控制要求

海水淡化装置启动前，要求关闭真空喷射器吸入阀 WV20V2；关闭启动喷射器低压 LP 蒸汽进汽阀 WM20V1。

海水淡化浓盐水液位调节稳定后，开始抽真空，要求打开启动喷射器低压 LP 蒸汽进汽阀 WM20V1；打开蒸馏水或服务水至热压缩器和喷射器出口的隔离阀 WD61V1；打开低压 LP 蒸汽至真空喷射器阀门 WM30V1；打开二级喷射器蒸汽进汽阀 WM30V2；打开一级喷射器蒸汽进汽阀 WM30V3；关闭启动喷射器吸入阀 WV30V1；打开真空喷射器吸入阀 WV20V1；关闭启动喷射器低压 LP 蒸汽进汽阀 WM20V1。最后开启冷凝水至减温水调节阀 WC60V1，将至真空喷射器的低压 LP 蒸汽温度 WM30T1 调节至 154℃，随后切换控制器至自动模式（设定值 154℃）^[13,14]。

（2）蒸汽系统控制要求

海水淡化装置启动前，要求 1 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力调节阀 WM10V1 处于关闭状态；2 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力调节阀 WM11V1 处于关闭状态；低压 LP 蒸汽至真空喷射器阀门 WM30V1 处于关闭状态。在 TVC 模式下需关闭低低压蒸汽入口阀。

海水淡化装置开始抽真空后，当蒸发器的压力低于 -0.09MPa 时，要求将以下阀门切换到自动模式：1 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力调节阀 WM10V1，2 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力调节阀 WM11V1，逐步调节低压 LP 蒸汽至热压缩的压力到 0.2 MPa，再将该压力控制切换到自动模式（设定值 0.2 MPa）。打开 1 号热压缩器吸入阀 WV80V1，2 号热压缩器吸入阀 WV90V1。启用减温站调节阀 00WC40V1 将通往淡化装置的低压 LP 蒸汽温度调节为 154℃。

3.1.3 成品水系统的控制要求

（1）冷凝水系统控制要求

海水淡化装置启动前，冷凝水液位调节阀 WC20V2 处于关闭状态；冷凝水泵

WC10D1 无故障状态。拒收排放阀 WC40V1 打开，产品回收阀 WC40V2 关闭。

海水淡化蒸汽系统开启后，当第 1 效冷凝水液位 WC10L2 到满量程的 70%时，起动冷凝水泵 WC10D1；打开冷凝水液位调节阀 WC20V2；手动调节冷凝水液位并将控制器选择到自动模式（设定值 50%）。将冷凝水选择阀组的选择开关切换到自动模式。

当海水淡化装置出水电导率 $<10\mu\text{S}/\text{cm}$ ，打开冷凝水产品回收阀，关闭冷凝水拒收排放阀。

（2）蒸馏水系统控制要求

海水淡化装置启动前，要求关闭至热压缩器和真空喷射器出口的减温器供水阀 WD61V1。蒸馏水冷凝器蒸馏水液位调节阀 WD20V2 处于无故障状态；蒸馏水选择阀组已准备就绪，拒收排放阀 WD40V1 打开，产品回收阀 WD40V2 关闭；打开至热压缩器和真空喷射器出口的减温器供水阀 V1；打开至安全淋浴器的隔离阀 WD80V1。

海水淡化装置的蒸汽系统开启后，当蒸馏水冷凝器液位 WD10L2 达到满量程的 70%时，起动蒸馏水泵 WD10D1；打开蒸馏水液位调节阀 WD20V2；手动调节蒸馏水液位并将控制器选择到自动模式（设定值 50%）。将蒸馏水选择阀组的选择开关切换到自动模式。

当海水淡化装置出水电导率 $<10\mu\text{S}/\text{cm}$ ，打开蒸馏水产品回收阀，关闭蒸馏水拒收排放阀。

3.1.4 化学处理系统的控制要求

海水淡化装置启动前，打开阻垢剂加药泵吸入阀 WK01V1 和 WK01V3；打开阻垢剂加药泵排放阀 WK01V2 和 WK01V4。打开消泡剂加药泵吸入阀 WK02V1 和 WK02V3；打开消泡剂加药泵排放阀 WK02V2 和 WK02V4。

海水淡化装置的开启后，当蒸发器的压力仍低于 -0.09MPa 时，要求将阻垢剂和消泡剂加药泵的运行/备用功能切换到自动模式，然后起动。

3.1.5 海水淡化装置的停运控制要求

（1）关闭蒸汽、蒸馏水和冷凝水回路

首先将第 7 效浓盐水温度调节 WE07T1 切换到手动状态。选择 2 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力控制的手动模式，逐步地关闭阀门 WM11V1 直至将其完全关闭。然后选择 1 号热压缩器低压 LP 蒸汽压力控制的手动模式，逐步地关闭阀门 WM10V1 直至将其完全关闭。

一旦蒸汽压力调节阀 WM11V1 和 WM10V1 被关闭，用冷凝水至减温水调节阀 WC60V1 将通往喷射器的低压 LP 蒸汽温度调节到 154°C ，关闭减温站调节阀

00WC4V1，但应保持 1 台减温水泵运转以向阀门 WC60V1 供水。

当供给热压缩器的低压 LP 蒸汽或供给蒸发器的低低压 LLP 蒸汽减少至接近停止时，关闭冷凝水至减温水隔离阀 WC21V1， 打开蒸馏水/服务水至热压缩器和喷射器出口的隔离阀 WD61V1；切换冷凝水液位控制器至手动模式（当它在自动模式时），关闭液位调节阀 WC20V2，然后立即停止冷凝水泵 WC10D1，同时投用拒收模式。

当蒸馏水流量较低或蒸馏水液位调节阀开度降低时，切换蒸馏水液位控制器至手动模式，打开蒸馏水液位调节阀 WD20V2，将液位减至 0%，要求立即关闭阀门调节阀 WD20V2，并停止蒸馏水泵 WD10D1，同时投用拒收模式。与此同时，将补给水流量控制器 WS40F1 的设定值逐渐降低至 1200 t/h。

当第 1 效浓盐水温度 WE01T3 降至 40℃ 以下时，自动将运转中的阻垢剂加药泵 WK01D1 或 WK01D2 停止。

(2) 关闭真空系统

当第 1 效浓盐水温度 WE01T3 低于 40℃ 时。关闭真空喷射器吸入阀 WV20V1，关闭一级喷射器蒸汽进汽阀 WM30V3，关闭二级喷射器蒸汽进汽阀 WM30V2，切换冷凝水至减温水调节阀 WC60V1 至手动模式，将阀门完全关闭；关闭蒸馏水/服务水至热压缩器和喷射器出口隔离阀 WD61V1^[14]。

(3) 关闭淡化装置的海水系统

将运转中的消泡剂加药泵 WK02D1 或 WK02D2 停止。

逐渐降低补给水流量控制器 WS40F1 的设定值至 0 t/h，立即停止海水升压泵 WS30D1。切换海水补给水流量控制器 WS40F1 至手动模式，完全关闭补给水流量调节阀 WS40V1。

当第 7 效浓盐水液位调节阀的开度已经降低时，切换浓盐水液位控制器至手动模式，打开浓盐水液位调节阀 WB20V2 将液位降至 0%，然后立即关闭阀门，并停止浓盐水泵 WB10D1。

关闭海水进水阀 WS10V1，在手动模式关闭海水排放调节阀 WS20V1。

3.1.6 海水淡化联锁保护控制要求

为了保证海水淡化装置自身的安全，防止海水淡化装置因控制问题造成成品水不合格，避免误操作对设备本身造成损坏，海水淡化装置需要以下连锁保护（见表 3.1）。

表 3.1 海水淡化主体连锁保护列表
Table 3.1 interlock protection list of the desalinization

设备名称	停机点（以下信号到来，停机或禁止开机）
冷凝水泵（WC10D1）	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪（01WC10D1_READY）

	设备故障 (01WC10D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	冷凝水液位低低 (01WC10L1ZALL)
蒸馏水泵 (WD10D1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WD10D1_READY)
	设备故障 (01WD10D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
浓盐水泵 (WB10D1)	蒸馏水液位低低(01WD10L1ALL)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WB10D1_READY)
	设备故障 (01WB10D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
阻垢剂搅拌机 (WK01M3)	浓盐水液位低低 (01WB10L1ALL)
	设备就绪(01WK01M3_READY)
	设备故障(01WK01M3_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
阻垢剂加药泵 1 (WK01D1)	阻垢剂罐液位低 (01WK01L1ZAL)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WK01D1_READY)
	设备故障 (01WK01D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAAH)
阻垢剂加药泵 2 (WK01D2)	阻垢剂液位低低 (01WK01L1ZALL)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WK01D2_READY)
	设备故障 (01WK01D2_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAAH)
消泡剂搅拌机 (WK02M3)	阻垢剂液位低低 (01WK01L1ZALL)
	设备就绪(01WK02M3_READY)
	设备故障(01WK02M3_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
消泡剂加药泵 1 (WK02D1)	消泡剂罐液位低 (01WK02L1ZAL)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WK02D1_READY)
	设备故障 (01WK02D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAAH)
	消泡剂液位低低 (01WK02L1ZALL)

消泡剂加药泵 2 (WK02D2)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WK02D2_READY)
	设备故障 (01WK02D2_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAHH)
	消泡剂液位低低 (01WK02L1ZALL)
海水升压泵 (WS30D1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备就绪 (01WS30D1_READY)
	设备故障 (01WS30D1_FAULT)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAHH)
	升压泵入口压力低低 (01WS08P2ZALL)
低低压蒸汽至装置截止阀 (WL10V1)	设备故障 (01WL10V1_FAULT 取反)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	浓盐水温度高高 (01WE01T3ZAHH)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	阻垢剂加药泵启动失败 (持续 1 小时) (01WK01E3ZA)
	冷凝水泵启动失败 (01WC10D1ZA)
	冷凝水液位高高 (01WC10L2ZAHH)
浓盐水排放截止阀 (WB21V3)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	设备故障 (01WB21V3_FAULT)
低压蒸汽至 1 号热压缩机截止阀 (WV80V1)	设备故障 (01WV80V1_FAULT)
低压蒸汽至 2 号热压缩机截止阀 (WV90V1)	设备故障 (01WV90V1_FAULT)
海水排放截止阀 (WS12V1)	设备故障 (01WS12V1_FAULT)
冷凝水回收截止阀 (WC40V2)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
冷凝水拒收截止阀 (WC40V1)	冷凝水电导高高 (01WC30Q1ZAHH)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
蒸馏水回收截止阀 (WD40V2)	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
	蒸馏水电导高高 (01WD40Q1ZAHH)
蒸馏水拒收截止阀 (WD40V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
低压蒸汽至真空喷射器截止阀 (WM30V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)

1#热压缩机低压蒸气调节阀 (WM10V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	浓盐水温度高高 (01WE01T3ZAHH)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	阻垢剂加药泵启动失败 (持续 1 小时) (01WK01E3ZA)
	冷凝水泵启动失败 (01WC10D1ZA)
	冷凝水液位高高 (01WC10L2ZAHH)
	蒸发器入口蒸汽温度高高 (01WE01T1ZAHH)
	低压蒸气入口温度低低 (01WM30T1ZAHH)
	低压蒸气入口压力高高 (00WM01P1ZAHH)
浓盐水液位调节阀 (WB20V2)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	浓盐水泵停止, 且超过 5s (01WB10D1_RUN)
冷凝水液位调节阀 (WC20V2)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	冷凝水泵停止, 且超过 5s (01WC10D1_RUN)
U1 真空喷射器温度调节阀 (WC60V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	低压蒸汽至真空喷射器截止阀关闭, 超过 5s (01WM30V1_OCL)
	低压蒸气旁路减压阀开 (00WM03V2ZALL)
蒸馏水液位调节阀 (WD20V2)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	蒸馏水泵停止, 且超过 5s (01WD10D1_RUN)
2#热压缩机低压蒸气调节阀 (WM11V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	浓盐水温度高高 (01WE01T3ZAHH)
	海水升压泵出口流量低低 (01WS40F1ZALL)
	阻垢剂加药泵启动失败 (持续 1 小时) (01WK01E3ZA)
	冷凝水泵启动失败 (01WC10D1ZA)
	冷凝水液位高高 (01WC10L2ZAHH)
	蒸发器入口蒸汽温度高高 (01WE01T1ZAHH)
	低压蒸气入口温度低低 (01WM30T1ZAHH)
蒸发器海水入口温度调节阀 (WS10V4)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	紧急停车(01WE00E3ZA)
海水排放调节阀 (WS20V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
海水补给水流量调节阀 (WS40V1)	紧急停车(01WE00E3ZA)
	海水升压泵停止, 且超过 5s (01WS30D1_RUN)
	仪表风压力低低 (00XY01P1ZALL)
	浓盐水液位高高 (01WB10L3ZAHH)

3.1.7 监控计算机的控制要求

(1) 操作员站控制要求

设置集中式监控操作员站实时监控海水淡化海水系统、蒸汽与真空系统、成品水系

统和化学处理系统的运行状态；远程集中操作控制全部工艺流程设备和在线实时调整各类工艺参数；各类报警及故障的显示和记录；建立工艺参数数据库用于工艺参数的归档和查询；在线对海水淡化成品水的质量进行跟踪和记录以便于判定和检验；生产报表的生成、打印。

（2）工程师站控制要求

为了满足日常生产过程中，自动化维护人员对计算机系统进行组态、编程、修改等工作的同时，又不影响运行人员的运行操作。要求每两个主体配备一个工程师站。

3.1.8 可编程序逻辑控制器（PLC）的要求

要求可编程序逻辑控制器配有冗余的中央处理单元（CPU）、冗余电源供应模块、为每台淡化装置分别设置的冗余通讯模块及存储器，输入/输出模块、机柜、专用电缆和实时操作系统等。所有硬件设备均为制造商提供的标准产品或标准的备选产品。如为电气设计时所必须，模块应选用独立的 I/O 卡。硬件设备具有防电涌和抵御一般大气条件的保护功能。PLC 可以在存在高压电气干扰、无线电射频干扰和现场设备振动的环境下连续运行。系统正常运行不受距 PLC 设备 1.2m 以外发出的电磁干扰和射频干扰影响（工作频率 470 MHz，输出功率 5 W）。除了根据下列的原则考虑备用容量外（不包括冗余及最不利情况下的余量与用量），还应考虑部分辅助系统所需的 I/O 点数。I/O 模块应“智能化”，以减轻控制系统的处理量。I/O 模块应能够完成扫描、修整、数字输入与输出、线性化、温度补偿，如必要时能够完成工艺点质量检查和工程单位换算等功能。所有的 I/O 模块有标明模块状态的有功 LED 指示和其它诊断显示，例如电源有效显示等。在分配 I/O 模块和控制回路时，应考虑使得在 I/O 模板或处理器模块损坏时，对系统安全运行的影响尽可能小。当电源供应发生故障时，I/O 应维持在保证工艺系统安全的状态，不出现误动作。系统之间的连接，并与其它控制系统进行数据交换时，对这些 I/O 模块采取电气隔离措施。所有的 I/O 模块均符合 ANSI / IEEE 472《冲击电压承受能力（SWC）试验导则》的要求，在误连接到峰—峰交流电压时不会被损坏。任何 I/O 模块的故障不会导致任何设备受到损坏（失效保护关机）。I/O 模块到现场干式接点的供电电压为直流 24V 至 120V。PLC 对外部执行电路的数字输出信号采用继电器 I/O 通道或另外安装继电器。当使用模拟信号将 DCS 控制系统与执行单元相连接时，需要延迟及双接地，否则必须采取电气隔离措施。

3.2 控制系统设计原则

控制系统的设计是以海水淡化工艺特点和应用要求为主要依据，本着从满足生产的实际需要出发，我们立足于建设高度集成自动化系统的宗旨，在带热蒸汽压缩低温多效海水淡化生产过程自动化系统的设计中，我们始终坚持着如下原则：

(1) 可靠性

对工业控制系统最基本的要求就是可靠性高。一旦系统出现故障,将造成整个控制过程的混乱,引起严重的后果,由此造成的损失往往大于控制系统本身的价值^[15]。特别是在一些连续生产过程的企业中,是不允许故障率高的设备存在的。因为海水淡化工艺比较复杂,联锁关系比较多,在保证生产稳定运行同时,必须要保证设备的安全,这就要求控制系统必须有高可靠性,PLC 系统需选成熟可靠、在相关领域有投运业绩的系统。

(2) 实用性

实用性好包括三个含义,既使用方便又要便于维护,同时还能够最大限度地满足实际工作要求,这是在设备选型与系统设计过程中所必须考虑的一种系统性能。对于本套自动控制系统的软硬件设备选型、系统配置、人机操作设计等方面,在满足生产、管理功能及可靠性需求的前提下,均采用了性能/价格比较优的产品与装置系统。

(3) 技术先进性

采用当前国内外先进的计算机技术、控制技术、通信技术,使整个控制系统能够最大限度地适应今后技术的发展变化并且满足不断提高的日常生产与管理要求^[17]。

(4) 通用性

整个控制系统的结构具有较好的标准性、开放性与互连性,易于扩展和未来升级,以便使其与快速发展的自动化及信息化技术保持同步。在基础自动化级中选用的现场设备监控 I/O 模块,均具有信号隔离功能;同时控制系统均具有完善的自诊断与简明、准确的故障指示功能,以进一步保证系统故障排除与维护的及时性、简易性。在系统设计时,各设计指标要留有一定的余量,为日后系统的扩充创造了有利的条件^[16-18]。

3.3 系统硬件总体设计

3.3.1 西门子 SIMATIC S7-400H 介绍

根据控制系统的设计原则,为了同时能满足海水淡化对控制系统高可靠性、实用性、技术先进性及通用性与易维护性的需要,我们选用西门子公司 S7-400H 系列 PLC。模块化及无风扇的设计,坚固耐用,容易扩展和广泛的通讯能力,容易实现的分布式结构以及用户友好的操作使 SIMATIC S7-400 成为中、高档性能控制领域中首选的理想解决方案。S7-400H 是西门子提供的最新冗余 PLC,由于他是 SIMATIC S7 家族的一员,这意味 S7-400H 拥有所有 SIMATIC S7 具有的先进性,同时通过将发生中断的单元自动切换到备用单元的方法实现系统的不中断工作,S7-400H 系统通过部件的冗余实现系统的高可靠性^[19]。主要应用于可靠性和容错能力要求较高的场合,而且当控制任务变得更加复杂时,任何时候控制系统都可以逐步升级,而不必过多的添加额外的模板。S7-400H 它所具有的模板的扩展和配置功能使其能够按照每个不同的需求灵活组合。SIMATIC

S7-400H 是一种通用控制器，由于有很高的电磁兼容性和抗冲击、耐振动性能，因而能最大限度的满足各种工业标准。模板能带电插、拔。

(1) SIMATIC S7-400H 系统主要包括

电源模板，将 SIMATIC S7-400H 连接到 120/230 V AC 或 24 V DC 电源上。中央处理单元（CPU）有多种 CPU 可供用户选择，有些带有内置的 PROFIBUS-DP 接口，用于各种性能范围。一个中央控制器可包括多个 CPU，以加强其性能。各种信号模板（SM）用于数字量输入和输出（DI/DO）以及模拟量的输入和输出（AI/AO），通讯模板（CP）用于总线连接和点到点的连接。功能模板（FM），专门用于计数、定位、凸轮控制等任务。接口模板（IM），用于连接中央控制单元和扩展单元。SIMATIC S7-400 中央控制器最多能连接 21 个扩展单元^[20]。

(2) S7-400H 系统的冗余架构

S7-400H 系统的冗余结构确保了任何时候的系统可靠性，例如所有的重要部件都是冗余配置。这包括了冗余的 CPU、供电模件和用于冗余 CPU 通信的同步模块。根据特定的自动化控制过程需要，还可以配置冗余客户服务器、冗余通讯介质、冗余接口模件 IM153-2 等，如图 3.1 所示。

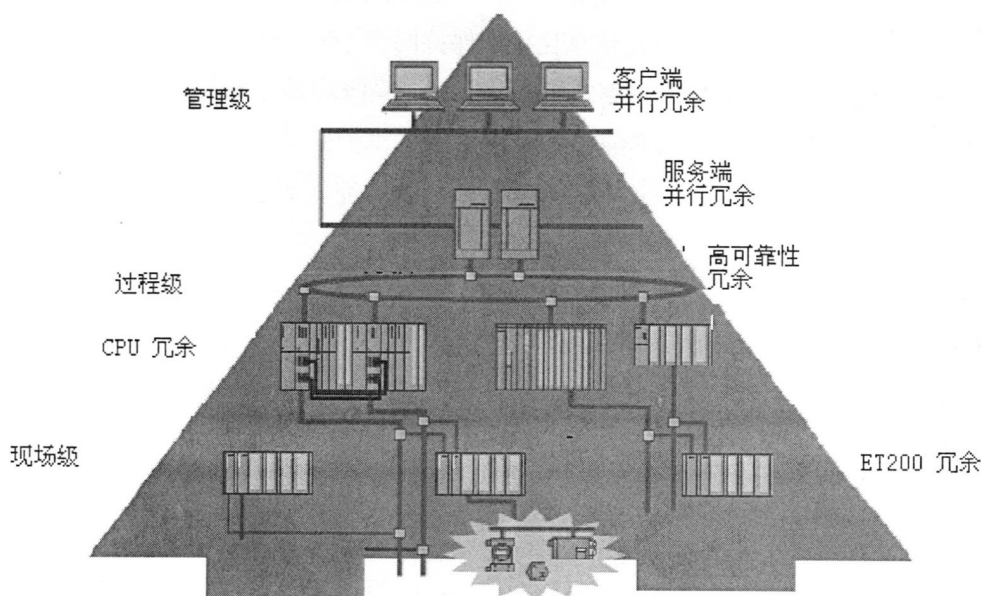


图 3.1 S7-400H 的冗余架构

Fig 3.1 Redundant architecture of S7-400H

(3) SIMATIC S7-400H 的特点

S7-400H 系统受益于用户，对于用户来说，可以将 H 系统作为普通的系统，因为 H 系统具有隐藏的冗余性、通明的编程（与非冗余系统编程方法一致），标准的系统参数

化和标准的处理方法可以使 S7-400H 系统可无限制使用所有的 SIMATIC 编程语言。S7-400H 系统中两个 CPU 同时工作, CPU 没有切换时间^[24]。具有自动事件同步功能, 集成的错误识别和错误定位功能。操作期间可对系统进行修改。S7-400H 系统可以在线进行编程修改。与标准系统的在线修改一样, 修改后的程序被下载到连接的 CPU 中, 通过光纤同步模块将程序传输到另一个 CPU 中。可以通过 MPI、PROFIBUS 或 Ethernet 接口在线修改程序^[23]。H 系统采用西门子专利的事件同步方式进行同步。保证同步的有效性的同时又不会增加 CPU 的运算负担。全面的自测试功能, SIMATIC S7-400H 系统的自测试功能处理的范围包括: CPU、内存、同步连接。测试形式包括 H 系统启动时的自测试和循环模式的自测试。

(4) 备份 CPU 与主 CPU 同步建立的过程

CPU 故障后, 替换的备份 CPU 与主 CPU 同步连接自动建立, 备份 CPU 发出 Link-up 请求, 主站在禁止删除、拷贝和生成块功能后将所有数据发送给备份 CPU。备份 CPU 执行自测试, 然后向主站发出更新请求。主站在终止已组态连接的通讯和禁止低级别的报警后, 拷贝动态数据给备份 CPU。主站运行用户程序, 在禁止所有报警和中断后向已 Link-up 的备份 CPU 发送上次更新后发生改变的动态数据。备份 CPU 接收主 CPU 的输入、输出、定时器、计数器和内存位信息, 主 CPU 使能报警/中断和通讯, 主、备 CPU 进入到冗余、同步操作过程^[21,24]。

3.3.2 海水淡化主体的控制系统硬件组成

(1) 可编程序逻辑控制器 (PLC) 的配置

按照对控制系统高可靠性、实用性、技术先进性及通用性与易维护性的需要, 海水淡化主体控制系统采用现今较先进的西门子公司 S7-400 系列中的 414H, 搭配 ET200M 分布式远程 I/O 系统和 Y-LINK 组成了主体的自控系统。海水淡化每套主体的控制系统结构见图 3.2, 每个主体由两套 PLC 柜组成, 系统包括一套冗错功能的西门子 CPU414-4-2H, 两个 PS407 电源模块, 3 个 32 点数字量输入模块 6ES7 321-1BL00-0AA0, 8 个通信模块 6ES7 153-2AR03-0XA0, 2 个 32 点数字量输出模块 6ES7 322-1BL00-0AA0, 3 个 8 点数字量输出模块 6ES7 331-5FF00-0AB0, 11 个 8 点模拟量输入模块 6ES7 331-7KF02-0AB0, 6 个 4 点模拟量输出模块 6ES7 332-5HD01-0AB0 组成, I/O 点数的对照表见表 3.2。

(2) 操作员站和工程师站的配置

操作员站是海水淡化厂的监测与控制中心, 具有数据存储、数据恢复、图形显示、参数处理、报警及打印等功能。配备 21 英寸彩色液晶显示器 (LCD)。整个控制系统设运行配置组态相同的两套操作员站, 互为备用, 即操作人员可以在任一操作员站上监

测与控制整个系统。当一台操作员站故障时, 整套系统的操作、监测与控制不受影响。操作员站的配置包括 Pentium IV 处理器、2G 内存、80G 硬盘、50 倍速光驱、128M 显示卡、双向以太网卡, 操作员站使用 Windows NT 操作系统并安装最新版本的防病毒软件, 操作运行的画面为中英文。操作员站采用 ABB 工业计算机。

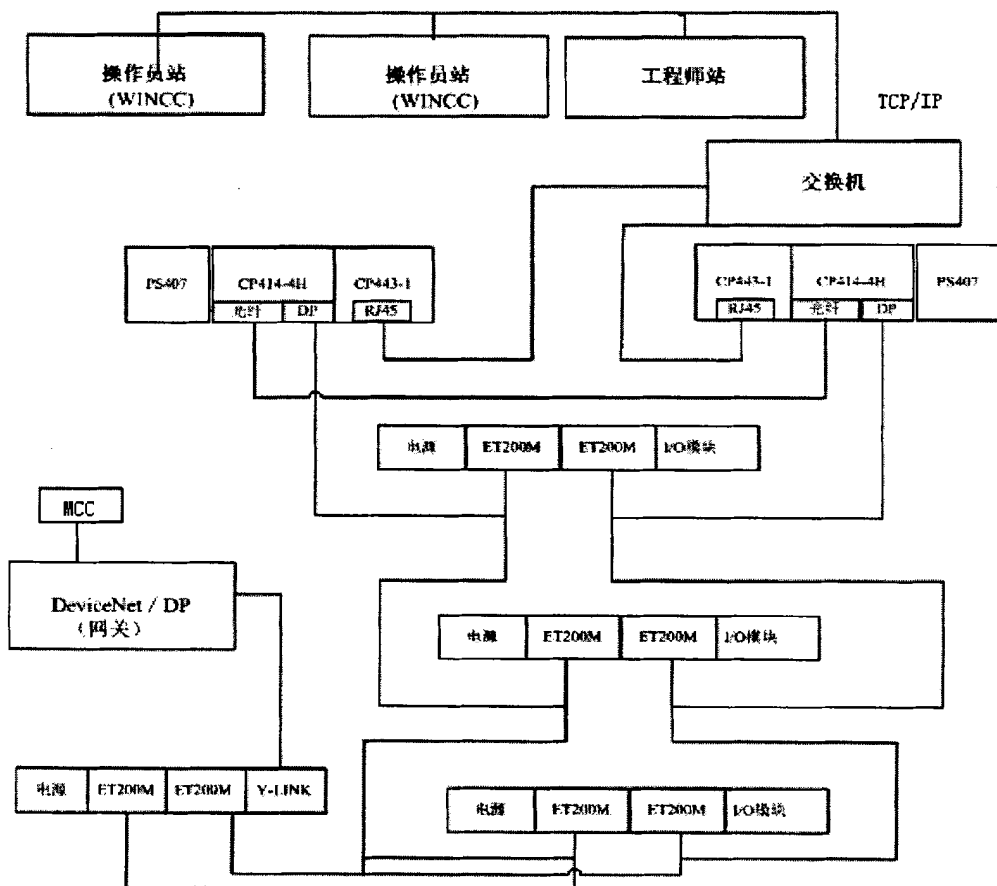


图 3.2 海水淡化主体控制系统结构图

Fig 3.2 Control system structure of the desalinization

表 3.2 模块的类型和数量

Table 3.2 type and points of the module

序号	模块类型	实际点数	总点数	备用点数	备注
1	模拟量输入 (4—20mA)	74	88	14	热电阻带温变器
2	模拟量输出 (4—20mA)	17	24	7	
3	开关量输入	78	96	18	
4	开关量输出	74	88	14	

配备 1 台工程师站。工程师站的功能包括现场编程、调试和数据管理等，工程师站是承担从系统开发到系统保养等工程技术工作的多功能站，工程师站配置包括 Pentium

IV 处理器、2G 内存、160G 硬盘、50 倍速光驱、128M 显示卡、双向以太网卡，工程师站使用 Windows NT 操作系统并安装最新版本的防病毒软件，具有与操作员站一样操作运行的画面，在操作员站故障时，可代替操作员站使用。

配备 1 台 A4 激光打印机与 1 台 A3 彩色喷墨打印机，及其所有相关配件和预制电缆，打印机型号为 HP LASTER 5200 和 HP DESKJET 1280。

(3) 通讯设备的配置

考虑到与海水淡化整个系统的联网，每套海水淡化主体配备一台德国赫斯曼公司的 RS20-0800M2M2SDAUHC 交换机一台，具备 4 个光口和 6 个电口，用于与工程师站、操作员站、两套主体之间相互通讯。同时为了实现与低压电气系统的通讯，每套主体配备一个 ANYBUS 网关，主要用来 DP 网与低压电气系统 DeviceNet 网络协议转换，确保 PLC 与电气低压系统 MCC 之间（低压变频启动器、E3 等）的网络通讯畅通。

3.4 海水淡化主体控制系统软件平台

3.4.1 监控软件平台

在选择海水淡化主体上下位软件时，考虑到与硬件系统的兼容性与维护人员对软件的熟悉程度，在 2008 年选型时，并没有采用 PCS7，PCS7 相当于 STEP7+WinCC+各种工具软件，PCS7 是基于西门子 TIA 概念提出的一个高度集成的软件集，它将工程项目中可能用到的软件有机结合在了一起，能够提供更为强大和完善的功能。PCS7 可以完成基础自动化和过程自动化的功能，对应于控制系统的现场级、车间级和管理级。上位监控软件选择了西门子公司 SIMATIC WinCC 6.0 系统。

WinCC 是在生产和过程自动化中解决可视化和控制任务的工业技术系统，它提供了适用于工业的图形显示、消息、归档以及报表的功能模块。高性能的过程耦合、快速的画面更新、以及可靠的数据使其具有高度的实用性。WinCC 编辑器主要包括：图形编辑器，用于创建过程画面的面向矢量的作图程序；报警记录，提供显示和操作选项来获取和归档结果；变量记录，用于从运行过程中采集数据并将它们显示和归档；用户管理器，用于分配和控制用户的单个组态和运行系统编辑器的访问权限。WinCC 编辑器的主要任务包括：完整组态，自定义分配、调用和项目的存储，组态数据的图形表示，画面体系/系统结构的控制和组态，用户位置的组态，交叉索引的创建和编辑，运行和组态之间的切换等。采用 WINCC 6.0 作为上位监控软件既能满足控制功能的需要，又与西门子 S7-400H 系统相匹配，同时维护人员对该软件掌握的比较熟练，便于维护^[25]。

3.4.2 编程软件平台

在编程软件的选择上，要求与监控软件要求一样，既要与硬件系统相匹配，又要选择维护人员熟悉，便于掌握的编程软件，编程软件采用 STEP7 V5.4，STEP7 是针对

西门子 S7-300/400 的组态和编程软件。它能完成基础自动化部分的功能，对应于控制系统的现场级和车间级。在首钢各生产厂中得到广泛的应用，可使用梯形图逻辑、功能块图和语句表进行编程操作。在常规功能之外还具备以下的优点：

- (1) DK 3964 R/RK 512 等标准协议已经集成到控制器内，不需要额外驱动。
- (2) MPI 接口集成，支持内置 modem 功能，可进行远程编程、诊断或数据传输。
- (3) 编程不需 MPI 转换器，直接通过 PC 上的 RS232 口。
- (4) 现场总线通讯功能，控制器功能中已集成了 Profibus DP Master / Slave, Profibus FMS 和 LONWorks。
- (5) 利用 web server 进行监控， 储存 HTML 网页、图片、PDF 文件等到控制器里供通用浏览器查看。
- (6) 兼容普遍使用的编程环境，使用熟悉的编程测试功能 可以使用 STL, LAD, FBD 编程 。
- (7) 扩展操作系统功能，如保护技术秘密，防止被非法查看或复制。
- (8) 使用 Siemens 工程工具，监视修改变量，程序状态等。
- (9) 具有一些特殊功能，如串口通讯、计数等可在系统功能中编辑。

3.5 海水淡化的网络结构

3.5.1 网络拓扑结构的选择

根据整个海水淡化的控制要求，为了实现各个系统更好的通讯，需要把海水淡化预处理系统、泥处理系统、供配电系统和海水淡化主体系统进行联网，同时要满足向上一级首钢京唐钢铁能源中心通讯需求。这就要求整个海水淡化要选择一个可靠性高的、经济性强的网络拓扑结构，通过对星型、环型、双星型和双环型等常用的几种网络拓扑结构比较（见表 3.3），结合海水淡化的实际情况，我们选择了环型网络拓扑结构，系统能允许光线出现一处断点，而且交换机故障只影响到该交换机所负责的设备通讯，不会对整个网络通讯造成影响^[26,28]。环型结构在 LAN 中使用较多，这种结构中的传输媒体从一个端用户到另一个端用户，直到将所有的端用户连成环型。数据在环路中沿着一个方向在各个节点间传输，信息从一个节点传到另一个节点。这种结构显而易见消除了端用户通信时对中心系统的依赖性，能够满足海水淡化各系统的通讯^[27]。

3.5.2 海水淡化区域的网络架构

在确定海水淡化区域选择环型网络拓扑结构之后，为了便于网络管理，各个系统的交换机进行统一选型，各个分系统的交换机均选择德国赫斯曼公司的 RS20-0800M2M2SDAUHC 交换机一台，用于连接能源中心的交换机选择德国赫斯

曼公司可扩展的模块化交换机 MS20 系列，交换机由 MS20-2400、MM2-4TX1 和 MM3-4FXM2 三个模块组成。海水淡化区域网络见图 3.3。

表 3.3 网络拓扑结构优缺点
Table 3.3 Advantages and disadvantages of network topology

	星型	环型	双星型	双环型
优点	布线简单，管理方便，直接通过背板交换，交换速度快。	分布式网络，允许光纤出现一处断点。发生链路故障时，网络自动在 500ms 之内切换到总线。	冗余网络，允许交换机、光纤、网线（网卡）三种故障，直接通过背板交换，交换速度快。	冗余网络，允许交换机、两处光纤、网线（网卡）四种故障。是常用的高级工业冗余网络。
缺点	没有冗余，且中央交换机风险过于集中。	属于简单冗余，当某一交换机发生故障时，会导致单点网络故障。	布线复杂，所有网络设备、网络光（电）缆、网卡均为双份，成本高。冗余实际上是通过软件编程实现的，因此切换时间与程序编制有较大关系。	布线较双星形简单，其它成本，如网络设备、网络光（电）缆、网卡均为双份，与双星型一样。
成本	低	最低	最高	高

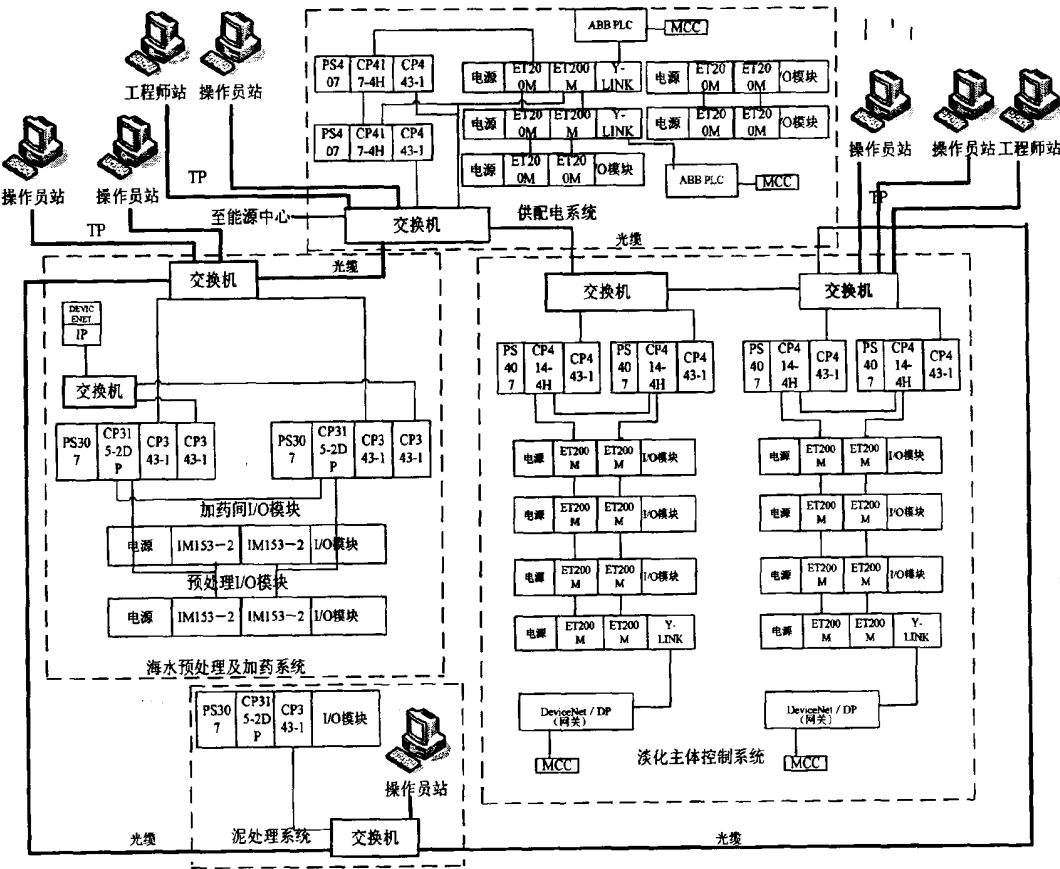


图 3.3 海水淡化区域网络图
Fig 3.3 Network diagram of the desalinization

3.5.3 海水淡化网络 IP 设定

为了使海水淡化区域网络不发生 IP 地址冲突，同时不因为 IP 地址问题造成对上一级网络的影响，按照能源中心的统一要求，给海水淡化区域设备分配具体网络 IP 地址，海水淡化区域 IP 地址设定见表 3.4，网关地址统一设成 192.168.6.1。

表 3.4 海水淡化 IP 设定
Table 3.4 IP setting of the desalinization

序号	区域	IP 地址	设备
1	海水淡化供配电	192.168.6.16/17	PLC
		192.168.6.18/19	上位机
		192.168.6.70/71	Anybus
2	海水淡化预处理及加药	192.168.6.72/73	PLC
		192.168.6.80/82	上位机
		192.168.6.108/110	U1 PLC
3	海水淡化主体	192.168.6.102/104	U2 PLC
		192.168.6/2/57	上位机
		192.168.6.112/113	PLC
4	海水淡化泥处理	192.168.6.115	上位机

3.5.4 网络配置软件 HiVision

由于交换机全部选用赫斯曼公司 MS20 和 RS20 系列交换机，为了便于环网的管理，选用赫斯曼公司的 HiVision 网络管理软件，通过 HiVision 网络管理软件可以管理 Hirschmann 的网络代理和监视网络上的所有支持标准 SNMP 的设备，它可以提供整个网络的总体运行情况，自动识别网络设备，显示网络设备当前状态，进行网络性能综合分析，网络故障搜索和网络的控制。HiVision 图形方式的交互式用户界面以及设备图案化使工作更直接，更容易理解，并且其他方便的附加功能在使用时增加了巨大的价值。它对于端口、基板、机架、风扇和电源模块按其实际状态区分显示颜色可以很容易地做到故障定位。通过自动搜索功能，系统管理员可以看到网络上所有支持 SNMP 的设备。

3.6 本章小结

本章主要在分析海水淡化系统应该具备那些功能后对系统进行了总体设计，确立系统开发所需的软硬件、系统的网络结构，同时对软硬件及系统的网络构架的优点进行详述。

第4章 浓盐水温度模糊-PID 控制器的设计

带热蒸汽压缩低温多效海水淡化是否能达到设计要求,对控制系统来说重点是要把主要的控制对象控制好,海水淡化是一项复杂的过程,其质量好坏决定于一系列因素,其中有些因素是固定的,固定因素是可控的,控制好这些固定因素,是控制的重点。海水淡化自动控制部分主要是控制调节阀使温度、压力、液位和流量等重要参数来满足工艺生产所需要。

本章主要介绍了海水淡化主要的控制对象和控制目的,根据控制对象的特点,通过对 PID 控制和模糊控制的比较,将 PID 控制策略引入模糊控制器,构成模糊-PID 复合控制器是改善模糊控制稳态性能的一种途径,使系统即具有较快的动态响应,又具有较高的稳态精度,设计一个以海水淡化第七效浓盐水温度控制为例的模糊-PID 控制器。

4.1 海水淡化主要控制对象

4.1.1 控制对象

带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化控制要点主要集中在几个重要的工艺参数控制,重要的工艺参数主要包括以下几点:

(1) 海水淡化第七效浓盐水液位的控制,通过浓盐水排放管线上的自动调节阀 WB20V2 保持第七效浓盐水液位变送器 WB10L2 值恒定。

(2) 海水淡化第一效冷凝水液位的控制,通过冷凝水排放管线上的自动调节阀 WC20V2 保持第一效冷凝水液位变送器 WC10L2 值的恒定。

(3) 海水淡化真空喷射器动力蒸汽温度的控制,通过过热减温冷凝水管线上的自动调节阀 WC60V1 保持真空喷射器动力蒸汽温度变送器 WM30T1 值的恒定。

(4) 海水淡化末效蒸馏水液位的控制,通过蒸馏水排放管线上的自动调节阀 WD20V2 保持冷凝器蒸馏水液位变送器 WD10L2 值的恒定。

(5) 海水淡化 1#热压缩器 LP 蒸汽入口压力的控制,通过 LP 蒸汽入口管线上的自动调节阀 WM10V1 保持 1#热压缩器 LP 蒸汽入口压力变送器 WM10P2 值的恒定。

(6) 海水淡化 2#热压缩器 LP 蒸汽入口压力的控制,通过 LP 蒸汽入口管线上的自动调节阀 WM11V1 保持 2#热压缩器 LP 蒸汽入口压力变送器 WM10P1 值的恒定。

(7) 海水淡化第七效浓盐水温度的控制,在海水分流模式下排水调节阀 WS20V1 保持第七效浓盐水温度变送器 WE07T1 值的恒定。

(8) 海水淡化海水给水流量的控制,通过海水补给水管线上的自动调节阀 WS40V1 保持海水流量变送器 WS40F1 值的恒定。

4.1.2 控制目标

(1) 海水淡化第七效浓盐水液位的控制的目标是保证浓盐水液位在自动控制状态下保持在 50%上下波动。如果浓盐水液位过高,浓盐水就会通过堰板流入蒸馏水收集侧,对蒸馏水造成污染;如果浓盐水液位过低,就必须停止浓盐水泵,造成泵的频繁启动,不利于连续生产并对设备造成损害。

(2) 海水淡化第一效冷凝水液位的控制目标是保证冷凝水收集器液位在自动控制状态下保持在 50%上下波动。如果冷凝水液位过高,将不得不关闭进入海水淡化蒸发器主体的蒸汽阀门,造成整个系统的停产;如果冷凝水液位过低,就必须停止冷凝水泵,造成泵的频繁启动,不利于连续生产并对设备造成损害。

(3) 海水淡化真空喷射器动力蒸汽温度的控制目标是把温度控制在 154℃左右,如果温度过高,真空系统将全停,整个海水淡化装置将全停。

(4) 海水淡化末效蒸馏水液位的控制的目标是保证蒸馏水液位在自动控制状态下保持在 50%上下波动。如果蒸馏水液位过低,就必须停止蒸馏水泵,造成泵的频繁启动,不利于连续生产并对设备造成损害。

(5) 海水淡化 1#热压缩器 LP 蒸汽入口压力在自动控制状态下保持在 0.2MPa 上下波动,蒸汽入口压力过低,无法满足海水淡化蒸发器主体对热源的需求,影响产水量或直接造成出水不合格,如果蒸汽入口压力过高,将对海水淡化蒸发器主体设备造成损坏。

(6) 海水淡化 2#热压缩器 LP 蒸汽入口压力在自动控制状态下保持在 0.2MPa 上下波动,蒸汽入口压力过低,无法满足海水淡化蒸发器主体对热源的需求,影响产水量或直接造成出水不合格,如果蒸汽入口压力过高,将对海水淡化蒸发器主体设备造成损坏。

(7) 海水淡化第七效浓盐水温度在自动控制状态下保持在 42℃,如果第 7 效浓盐水温度过低,证明补给海水温度过低或进入蒸发器蒸汽总量不够,影响产水量或直接造成出水不合格,如果第七效浓盐水温度过高,说明海水淡化蒸发器内温度过高,将增加蒸发器内换热管路结垢的风险,对海水淡化蒸发器主体设备造成损坏。

(8) 海水淡化海水给水流量的控制在自动控制状态下保持在 1700t/h 上下波动,海水补给水流量如果过低(不能低于产水量的 3 倍),将直接导致蒸发器内温度升高,将增加蒸发器内换热管路结垢的风险,系统将直接联锁停机。如果海水补给水流量过高,影响蒸发器内的换热效果,影响成品水产量。

4.2 海水淡化第七效浓盐水温度的控制

4.2.1 浓盐水温度的控制过程

海水淡化第七效浓盐水温度的控制,主要是为了防止蒸发器的结垢,工艺要求正常运行时温度不能高于 50℃,其最佳控制温度是 42℃,同时不能低于 35℃。我们对海水

第七效浓盐水 WE07T1 温度进行监测，并通过排水调节阀 WS20V1 调节海水排水流量来控制第七效浓盐水 WE07T1 温度。

4.2.2 浓盐水温度的控制策略

温度控制问题实质上是一个传热问题，不论其机理是辐射、传导还是对流。大多数传热过程都有一些随流量而变的参数（如传热系数、迟延时间等）。另外，被调量与调节量之间呈非线性关系，过程的增益随着温度设定值和流量的变化而变化，从混合点到温度测量元件之间的迟延也随流量变化。这些性质是多数温度控制回路的典型特性。

海水淡化蒸发器的内部是一个非均匀分布的温度场，整个装置内部处于负压状态，第七效浓盐水的温度不仅与海水进入主体的流量和温度有关，而且与进入蒸发器的蒸汽流量、压力、温度有关，同时还与海水淡化主体内蒸汽与海水的换热空间分布有关；另外，海水淡化正常生产过程中产量设定值动态调整和各种扰动影响经常出现，因此它是一个多变量、非线性、时变系统，要想建立它精确的数学模型是比较困难的，所以用传统的 PID 控制方法很难获得良好的动态和静态性能。模糊控制是一种仿人智能控制方法，它不依赖于对象的数学模型，并对被控对象参数变化适应能力强，通过对模糊信息的处理可以对复杂对象实施良好的控制^[29]。但是模糊控制也有它自身的缺陷，由于模糊等级所限，稳态精度不够存在较大稳态误差、在设定值附近容易产生震荡现象，这些问题通过常规模糊控制很难得到解决。PID 控制基于反馈原理，对于滞后大的过程，如温度控制，稳定时间过长，且系统响应时间与超调之间存在着难于解决的矛盾。但 PID 控制容易实现且稳态无静差，因此采用 PID 控制补偿 FUZZY 控制的稳态精度。提出一种以模糊-PID 复合控制为基础的温度控制系统较好地解决了上述不足，从而提高了系统的控制精度以及系统的跟踪和抗干扰能力^[30]。

4.3 基于模糊-PID 的理论和算法

4.3.1 PID 控制的基本理论

PID 的发展过程，很大程度上是它的参数整定方法和参数自适应方法的研究过程。自 ziegler 和 Nichols 提出 PID 参数整定方法起，有许多技术已经被用于 PID 控制器的手动和自动整定。PID 控制是迄今为止最通用的控制方法。大多数反馈控制用该方法或其较小的变形来控制。PID 调节器及其改进型是在工业过程控制中最常见的控制器(至今在全世界过程控制中用的 84%仍是纯 PID 调节器，若改进型包含在内则超过 90%)。

随着计算机的诞生与发展，传统的控制方式已经逐渐被数字控制方式所取代。在计算机控制系统中，PID 控制规律是用计算机算法程序来实现的，使用的是数字 PID 控制器，数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

设控制器的输入为 $u(t)$ ，输出为 $e(t)$ ，则理想 PID 控制器的特性可用如下微分方程

表示:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

式中, K_p 为控制器的比例系数; T_i 、 T_d 分别是控制器的积分时间常数和微分时间常数。

设采样周期为 T , 初始条件为 0, 由式(4.13)所示的微分方程变换成式(4.14)所示的差分方程。为简单起见, $e(nT)$, $u(nT)$ 分别记为 $e(n)$, $u(n)$, 微分项 $\frac{de(t)}{dt}$ 用 $\frac{e(n) - e(n-1)}{T}$ 表示, 积分项 $\frac{1}{T_i} \int e(t) dt$ 用 $\sum_{k=0}^n e(k)T$ 表示。

$$u(n) = K_p \left[e(n) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^n e(k)T + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{T} \right] \quad (4.2)$$

计算 nT 时刻的输出 $u(n)$ 需利用 nT 时刻之前的全部输入数据 $e(k)$ ($k=0, 1, \dots, n$)。显然, 这样既浪费存储空间, 计算又很繁琐, 故一般不采用式(4.2)所示的算法, 而采用下述的递推算法

(1) 位置式 PID 算法

由式(4.2)可得:

$$u(n-1) = K_p \left[e(n-1) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^{n-1} e(k)T + T_d \frac{e(n-1) - e(n-2)}{T} \right] \quad (4.3)$$

把式(4.2)和(4.3)相减, 可得

$$u(n) = u(n-1) + K_p \left\{ e(n) - e(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \right\} \quad (4.4)$$

按(4.3)式计算 $u(n)$ 只需最近 3 个输入数据 $e(n)$, $e(n-1)$, $e(n-2)$ 和上一次的输出 $u(n-1)$ 。

式(4.4)即为位置式算法, 它的计算值 $u(n)$ 对应于确定的控制量, 或者说, 对应于控制阀门等调节机构的确定位置。

(2) 增量式 PID 算法

由式(4.4)可得:

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p \left\{ e(n) - e(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \right\} \quad (4.5)$$

式(4.5)为增量式算法, 它的输出为控制量的增量, 这时需要一个积分单元 (多用于步进电机) 来完成 Δu 的积累。

4.3.2 模糊控制的基本理论

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的计算机智能控

制。模糊控制器是采用模糊数学知识,模拟人的思维方法,把人类自然语言描述对特定的被控对象或过程的控制策略改造成模糊控制规则,由模糊控制规则构造出模糊关系,而把模糊关系作为模拟变换器,把输入、输出的模糊向量按模糊推理方法处理,进而确定控制量,作用于被控对象或过程^[31]。

(1) 模糊推理机的结构

在一般的模糊控制系统中,考虑到模糊控制器实现的简易性和快速性,通常采用二维模糊控制器结构形式。这类控制器都是以系统误差 e 和误差变化率 $\dot{e}$ 为输入语句变量,基本模糊控制器构成原理图如图 4.1 所示。

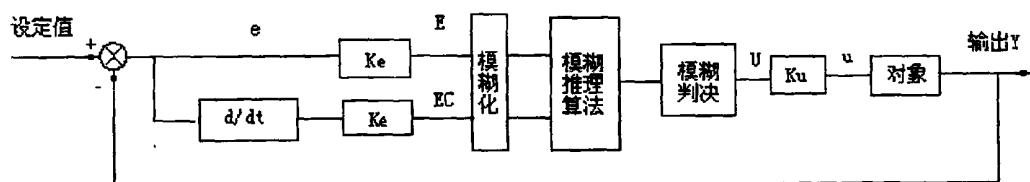


图 4.1 基本模糊控制器构成原理图

Fig 4.1 The constitute principle diagram of essential fuzzy controller

图中, K_e 、 $K_{\dot{e}}$ —量化因子; K_u —比例因子; E 、 EC 、 U —与 e 、 $\dot{e}$ 、 u 成比例的变量, 其中 $E=K_e \times e$, $EC=K_{\dot{e}} \times \dot{e}$, $U=u/K_u$ ^[32]。

(2) 模糊推理机的设计

依据模糊控制的基本原理,基本模糊控制器设计概括起来包括如下几方面内容:

1) 精确量的模糊化,过程参数的变化范围即模糊控制器输入量的实际范围称为基本论域,它是一个连续域,在模糊控制中需要将语言变量的基本论域转换成指定的有限整数的离散论域。假设某一语言变量的实际变化范围为 $[a_1, b_1]$,经过量化因子 k 变换后的范围为 $[a, b]=[ka_1, kb_1]$ 。设论域取为离散论域 $[-n, n]$ 之间变化的变量 Y 为

$$Y = \frac{2n}{b-a} \left[X - \frac{a+b}{2} \right] \quad (4.6)$$

按 Y 值大小,查隶属度赋值表,将其归类于某一模糊子集(如正大、负小等)。模糊子集通常可作如下划分:负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。

模糊变量的模糊集和论域确定后,需对模糊语言变量确定隶属函数,即所谓对模糊变量赋值,就是确定论域内元素对模糊语言变量的隶属度。对于同一个模糊概念,确定隶属函数的方法多种多样,没有统一的模式。在实际应用中为方便起见,常采用三角形、正态形、梯形。隶属度赋值表是先根据实际问题人为确定,再通过“学习”和实践检验逐步加以修正和完善的。在给定论域上确定模糊子集的隶属函数要注意下面 3 个问题:

任意两个相邻模糊子集的交集的最大隶属度在 0.4~0.7 之间。这个值取的较小时控制作用比较灵敏；较大时，对被控对象参数变化的适应性较强。若 A 是一个模糊子集，如果 $\sum_{i=1}^n \mu_A(U_i)$ 较大，则控制特性比较平缓，系统较为稳定；若 $\sum_{i=1}^n \mu_A(U_i)$ 较小，则控制作用的灵敏度较高。为了保证控制作用的隶属函数是单峰的，诸模糊子集必须正规突^[33]。

2) 建立模糊控制规则和模糊关系，模糊控制规则设计原则是：当误差较大时，控制量的变化应尽力使误差迅速减小；当误差较小时，除了要消除误差外，还要考虑系统的稳定性，防止系统产生不必要的超调，甚至发生振荡。模糊控制规则的一般形式为：

If $\underline{E}$ is $\underline{E}_i$, $\underline{EC}$ is $\underline{C}_j$ then $\underline{U}$ is $\underline{U}_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, m_1; j = 1, 2, \dots, m_2$)

其中， $\underline{E}_i$, $\underline{C}_j$, $\underline{U}_{ij}$ 是模糊子集； $\underline{E}$ 是被控量的设定值 R_f 对其实际值 Y 的偏差 $e = R_f - Y$ 所对应的模糊子集； $\underline{EC}$ 和 $\underline{U}$ 表示偏差变化率 $\dot{e}$ 和输出控制量的模糊子集； m_1 和 m_2 分别是 $\underline{E}$ 和 $\underline{EC}$ 的模糊子集划分数目。

上述模糊条件语句可归结为一个模糊关系 R ，即

$$\underline{R} = (\underline{E}_i \times \underline{C}_j) \times \underline{U}_{ij} = \underline{D}_{ij} \times \underline{U}_{ij} \quad (4.7)$$

式中， $\underline{D}_{ij} = \underline{E}_i \times \underline{C}_j$ ，符号“ $\times$ ”表示“Cartesian”积。

如果偏差、偏差变化率分别取为 $\underline{E}$ 和 $\underline{C}$ ，根据模糊推理合成规则，输出的控制量是模糊子集 $\underline{U}$ ，那么

$$\underline{U} = (\underline{E} \times \underline{C}) \circ \underline{R} \quad (4.8)$$

$$\text{即} \quad \mu_{\underline{U}}(Z) = \bigvee_{\substack{x \in X \\ y \in Y}} \mu_{\underline{R}}(x, y, z) \wedge (\mu_{\underline{E}}(x) \vee \mu_{\underline{C}}(y)) \quad (4.9)$$

式中， X , Y , $Z \in \underline{E}, \underline{EC}, \underline{U}$ 模糊子集的论域，“ $\vee$ ”和“ $\wedge$ ”—取大和取小运算符。

3) 输出信息的模糊决策，模糊控制器的输出是模糊子集，它反映控制语言的不同取值的一种组合。但被控对象只能接受一个精确的控制量，因此需要从输出的模糊子集中判决出一个控制量，将模糊量转化为精确量，也就是说推导出一个由模糊子集到普通集合的映射，这个映射称之为判决。现在的解模糊判决方法通常有以下三种：最大隶属度法、取中位数法、隶属度加权平均法等^[34]。最大隶属度法是直接选择模糊子集中隶属度最大的元素（或该模糊子集隶属度最大处的真值）作为控制量。它能突出主要信息，计算简单，但丢失了很多次要的信息，比较粗糙，适应于控制性能要求一般的控制系统。论域 U 上把隶属函数曲线与横坐标围成的面积平分为两部分的元素 z^* 称为模糊集的中位数。中位数法就是把模糊集中位数作为系统控制量。与最大隶属度法相比较，中位数法概括了更多的信息，但计算复杂，特别是在连续隶属函数时，需求解积分方程。加权平均法是模糊控制系统中应用极为广泛的一种判决方法。这一方法有三种形式，即普通加权平均法，权系数加权平均法和 $\mu \geq 0.5$ 加权平均法^[35]。

① 普通加权平均法

设 $\underline{U} = \{\mu(u_1)/u_1, \mu(u_2)/u_2, \dots, \mu(u_r)/u_r\}$ 模糊集, 取各隶属度为加权系数, 则控制量 U 由下式决定:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu(u_i)/u_i]}{\sum_{j=1}^n \mu(u_j)} \quad (4.10)$$

权系数加权平均法

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n k_i u_i}{\sum_{j=1}^n k_j} \quad (4.11)$$

其中, 权系数 k_i 的选择应根据实际情况来选定。对模糊控制来说, 要改善系统的响应特性, 选取和调整有关的权系数是关键。

② $\mu \geq 0.5$ 加权平均法

加权平均法比中位数法具有更好的性能, 而中位数法的动态性能要优于加权平均法, 静态性能则略逊于加权平均法。在实际应用中, 究竟采用何种方法不能一概而论, 应视具体情况而定。

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n \mu(u_i) \times u_i}{\sum_{j=1}^n \mu(u_j)} \quad \left| \mu(u_i) \geq 0.5 \right. \quad (4.12)$$

(3) 模糊控制器参数与控制系统响应特性关系

在模糊化方法、模糊推理算法、模糊决策方法确定情况下, 影响控制系统响应特性的因素包括两方面: 一是开环被控对象的动态特性, 二是量化因子的取值。下面我们讨论一下量化因子对系统响应的影响。

K_e 对系统性能的影响: K_e 越大, 系统的调节惰性越小, 系统的上升速率越大。但若系统的上升速率过大, 将产生较大的超调, 使调节时间增长, 严重时还会产生振荡, 甚至使系统不能稳定工作。 K_e 过小, 系统的上升速率较小, 导致快速性变差; 同时, 也严重影响系统的稳态特性, 导致稳态精度降低。扰动开始时, K_e 减小, 有利于减小正向超调量^[36]。

K_e 对系统性能的影响: K_e 过大, 系统输出的上升速率减小, 过渡过程时间变长, 甚至可能导致系统输出发散。 K_e 过小, 系统输出的上升速率将增大, 会导致系统输出产生过大的超调或振荡, 并且反向超调也增大。

K_u 对系统性能的影响: K_u 过大会导致系统输出的上升速率过大, 使系统产生波动, 导致等幅振荡甚至发散。 K_u 过小, 系统前向增益很小, 因此系统输出的上升速率较小, 快速性变差, 还将导致稳态误差增大。

(4) 模糊—PID 复合控制

模糊控制对复杂的和难以建立数学模型的系统能简单而有效地控制, 但因模糊控制不具有积分环节, 在变量分级不够多的情况下, 常常在平衡点附近会有小的震荡现象或存在稳态残差。而 PID 控制在平衡点附近的小范围调节效果是较理想的, 其积分作用可最终消除残差。在实际控制过程中, 把以上两种控制技术结合起来, 就可以构成兼有这两者优点的模糊—PID 控制器。显然这种控制器结合了比例、模糊和比例积分控制的优点, 不但可使系统具有较快的响应速度和抗参数变化的鲁棒性, 而且可以对系统实现高精度控制^[37-39]。

常规的二维模糊控制器是以误差和误差变化率作为输入变量的, 一般认为这种控制器具有比例-微分控制作用, 但缺少积分控制作用, 因而控制系统达到稳态时误差较大, 不能达到满意的效果。

积分控制作用能够消除误差, 但动态响应慢, 比例控制作用动态响应快, 微分控制能反映偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在偏差信号变化较大之前, 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。将 PID 控制策略引入模糊控制器, 构成模糊—PID 复合控制器是改善模糊控制稳态性能的一种途径, 使系统即具有较快的动态响应, 又具有较高的稳态精度。

这种复合控制策略是在大偏差范围内采用模糊控制, 在小偏差范围内转化为 PID 控制, 二者的转化由微机程序根据事先给定的偏差范围自动实现。这种改进的控制方法的出发点主要是因为模糊控制器本身消除其系统稳态误差的能力比较差难以达到较高的控制精度。尤其是在离散有限论域设计时更为明显。这可以从它处理输入输出的方法来分析。考虑典型的模糊控制器, 对于误差输入信号, 要把它转化为误差论域上的点, 即 $n_k = \text{INT}(k_e e_k + 0.5)$ 。其中, e_k 为某时刻 k 的输入误差, k_e 为误差的量程转化比例因子, INT 为四舍五入取整运算, n_k 为转化到误差论域上的点^[40]。

由上式可见, 当 $n_k=0$ 时仍有 $n_k = |k_e e_k| < 0.5$, 即 $|e_k| < 0.5/k_e$ 。式中, k_e 为误差信号的物理范围 $[-e, e]$ 的误差论域 $\{-n, -(n-1), \dots, 0, \dots, n-1, n\}$ 量程转换的比例因子, 考虑 $k_e = n/e$, 于是上式变为 $|e_k| < 0.5e/n$ 。

一般规范化的离散论域形式中常常取 $n=6$ 或 7 , 因此大约有 $|e_k| < 0.07e$, 也就是说 $|e_k|$ 在误差量程最大值 e 的大约 0.07 倍以内时, 模糊控制器已经把它当作 0 来处理了, 因此 $|e_k| < 0.07e$ 的稳态误差, 模糊控制器无法消除, 这是控制点附近的一个控制上的盲区和死区。对于控制作用, 模糊控制器可以采用它的增量 Δu_i 作为输出, 积分后输出给被控对

象, 这样相当于引入了积分作用, 有利于消除稳态误差。然而 Δu_i 是解模糊化后的离散点, 不连续, 因而控制作用不细腻, 不利于精确地消除稳态误差^[41]。例如, 到某一稳态时刻 k_n , 误差为 0。维持对象工作在这一点的控制作用应该是某一稳态值, 设为 u_n , 那么希望模糊控制器的控制输出此时等于 u_n , 即希望 $\sum_{i=0}^n k_u \Delta u_i = u_n$ 。其中, k_u 为控制作用量程转换的比例因子, 由于 Δu_i 不连续, 上式一般不能精确地成立, 这就造成了控制对象的状态还会变化, 误差不能自此时刻起就维持为 0。

PID 调节器的积分作用从理论上可使系统的稳态误差控制为 0, 有着很好的消除稳态误差作用。因此有人提出将模糊控制和 PID 控制相结合的方案。当误差在某一个阈值以内时, 则采用 PID 控制, 以获得良好的稳态性能。这种模糊控制和 PID 控制两种控制模式相结合的控制方案称为 FUZZY-PID 控制, 其结构图如图 4.2 所示。

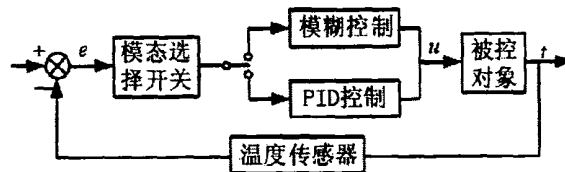


图 4.2 模糊—PID 控制器结构图

Fig 4.2 The constitute diagram of Fuzzy-PID controller

在大偏差 ($|e| \geq \varepsilon$) 的动态范围内实行模糊控制, 在小偏差 ($|e| < \varepsilon$) 范围内实行数字 PID 控制, 两者的切换由微机程序根据事先给定的偏差范围自动实现。

4.3.3 模糊-PID 控制算法研究

(1) 模糊控制算法研究

模糊控制算法应用于控制系统时的思想不同于经典控制方法或现代控制方法, 传统控制方法是以传递函数为基础实现的, 现代控制方法的基础是状态方程, 而模糊控制是根据人类的控制经验总结出若干条模糊控制规则或模糊控制矩阵, 在此为依据具体实施控制^[42]。

模糊推理 CRI(Compositional Rule of Inference)算法(A.Zadeh.1973)是对于模糊命题: “若 A 则 B”, 利用模糊关系合成运算提出一种近似推理方法。模糊蕴涵关系“若 A 则 B”, 设 $A \in U$, $B \in V$, 则 $R(u,v) = (A(u) \wedge B(v) \wedge (1-A(u)))$ 。Mamdani 推理属于推理 CRI 法, 比较适用于实时控制系统中, 故常用于模糊控制中, 设控制系统的控制规则格式为:

IF e 是 A_i , and $\dot{e}$ 是 B_j , THEN u 是 C_{ij} ($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$)

式中, e —偏差; A_i —偏差的语言变量值; $\dot{e}$ —偏差变化率; B_j —偏差变化率的语言变量值; u —控制量; C_{ij} —对应的控制量的语言变量值。

则有模糊关系 R , $R = \bigcup_{ij} A_i \times B_j \times C_{ij}$ 。

运算符“ $\times$ ”表示对模糊变量求内积，故模糊关系 R 为：

$$u_R(a,b,c) = \bigvee_{i=1, j=1}^{i=m, j=n} u_{A_i}(a)u_{B_j}(b)u_{C_{ij}}(c) \quad \forall a \in A, \forall b \in B, \forall c \in C$$

A, B, C 分别是偏差、偏差变化率、控制量的论域。

对特定输入精确量 a^*, b^* ，则有输出：

$$U = (A \times B) \circ R \quad (4.13)$$

即 $u(c) = u_{A_i}(a^*) \wedge u_{B_j}(b^*) \vee u_{C_{ij}}(a,b,c)$ 。

最后再用重心法对 U 求精确值，则可得到最终控制量 C 。

从上可知，每当有一对信号 (a^*, b^*) 输入，则必须用式(4.12)去计算一次。 R 是一个矩阵，故而每次都要 R 执行繁琐的合成运算，所以，这种关系矩阵法在实际中是不可行的。因为实时控制要求实时性好，不允许过长的计算时间^[43]。

查表法就是为了克服繁琐的实时计算而提出的。查表法就是把可能的输入量都量化到语言变量的论域元素上，并以输入量元素论域作为输入量进行组合，求出输入量论域元素和输出量论域元素之间关系的表格，这个表格中元素的关系是按控制规则给出的，这个表格称之为控制表。实际控制中，模糊控制器首先把输入量量化到输入量的语言论域中，在根据量化的结果元素去查表求出控制量，查表法的关键在于制表，制表有两种方法：一种是间接求取法，一种是直接求取法^[44,46]。

间接求取法制作控制表，这种方法是首先求出模糊关系 R ，再根据输入的偏差和偏差变化率求出控制量，最后把控制量精确化，则可得控制表。

设有 k 条控制规则 If A_i and B_j Then C_{ij} ，则有：

$$R_1 = A_1 \times B_1 \times C_{11}$$

$$R_2 = A_2 \times B_2 \times C_{22}$$

.....

$$R_k = A_m \times B_n \times C_{mn}$$

从而有总的模糊关系：
$$R = \bigcup_{k=1}^k R_k$$

设 $A_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的论域为 $\{-p, -p+1, \dots, 0, \dots, p-1, p\}$

设 $B_j (j=1, 2, \dots, n)$ 的论域为 $\{-p, -p+1, \dots, 0, \dots, p-1, p\}$

设 C_{ij} 的论域为 $\{-p, -p+1, \dots, 0, \dots, p-1, p\}$

对于偏差 a^* ，经过量化之后，它必定对应于论域中的某个元素，故在 a^* 量化之后，它可能成为下列任一模糊量 $A_i (i=1, 2, \dots, 2p+1)$

$$A_1 = 1/(-p) + 0/(-p+1) + \dots + 0/0 + \dots + 0/(p+1) + 0/p$$

$$A_2 = 1/(-p) + 0/(-p+1) + \dots + 0/0 + \dots + 0/(p+1) + 0/p$$

.....

$$A_{2p} = 1/(-p) + 0/(-p+1) + \dots + 0/0 + \dots + 0/(p+1) + 0/p$$

$$A_{2p+1}=1/(-p) + 0/(-p+1) + \dots + 0/0 + \dots + 0/(p+1)+0/p$$

对于偏差变化率 b^* ，它的对应模糊量 $B_j(j=1, 2, \dots, 2p+1)$ 的形式与上面情况相同。这样，把 A_i 和 B_j 的输入情况一一对应之后，通过模糊关系 R ，则可求出对应的控制量 C_{ij} ，即

$$C_{ij} = (A_i \times B_j) \circ R$$

在求出了输出的控制量 C_{ij} 之后，再以最大隶属度法进行精确化，则可求出 C_{ij} 对应论域中的隶属度最大的元素，这个元素就是输出控制的精确值^[45]。只要把 $A_i(i=1, 2, \dots, 2p+1)$ 和 $B_j(j=1, 2, \dots, 2p+1)$ 的所有可能一一对应作为输入，全部求出相应的输出精确值，那么就可以得到一组组的数据：

$$A_1, B_{1,u} = \{c \mid \text{Max } u_{c11}(c)\}$$

$$A_1, B_{2,u} = \{c \mid \text{Max } u_{c12}(c)\}$$

.....

$$A_{2p+1}, B_{2p+1,u} = \{c \mid \text{Max } u_{c2p+1,2p+1}(c)\}$$

其中， $\{c \mid \text{Max } u_{cij}(c)\}$ 是表示对模糊量 C_{ij} 求最大隶属度最大的元素。

在得出上述的 $(2p+1) \times (2p+1)$ 组数据之后，就可以进行制表。在制表时，是按下列规则进行：以偏差 e 的论域元素为列，偏差变化率 $\dot{e}$ 的论域元素为行，两种元素相应的交点为输出精确值来产生一个表格，这个表格即是控制表。在实际控制中，只要执行对输入量量化和查表这两个步骤，就可得到控制值。可见查表法有很好的实时性，并且控制方法简单方便^[46,48]。

直接求取法制作控制表，这种方法就是直接从控制规则，即推理语句中去求出控制量，从而产生控制表，设有推理语句：If A_1 and B_1 Then C_1 ，并且有： $A_1 \in \{a_1, a_2, a_3\}$ ； $B_1 \in \{b_1, b_2, b_3\}$ ； $C_1 \in \{c_1, c_2, c_3\}$

对于输入 A_1, B_1 有 $A_1 \times B_1$ ：

$$A_1 \times B_1 = \begin{Bmatrix} a_1 \wedge b_1 & a_1 \wedge b_2 & a_1 \wedge b_3 \\ a_2 \wedge b_1 & a_2 \wedge b_2 & a_2 \wedge b_3 \\ a_3 \wedge b_1 & a_3 \wedge b_2 & a_3 \wedge b_3 \end{Bmatrix}$$

从而有关系矩阵：

$$R_1 = A_1 \times B_1 \times C_1 = \begin{Bmatrix} a_1 \wedge b_1 \wedge c_1 & a_1 \wedge b_2 \wedge c_2 & a_1 \wedge b_3 \wedge c_3 \\ a_2 \wedge b_1 \wedge c_1 & a_2 \wedge b_2 \wedge c_2 & a_2 \wedge b_3 \wedge c_3 \\ a_3 \wedge b_1 \wedge c_1 & a_3 \wedge b_2 \wedge c_2 & a_3 \wedge b_3 \wedge c_3 \end{Bmatrix}$$

$$\text{当有输入 } A^*_1=(1 \ 0 \ 0), B^*_1=(1 \ 0 \ 0) \text{ 时，则有： } A_1 \times B_1 = \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

根据 CRI 推理原理，对应的输出 C^*_1 为：

$$C^*_1=(A^*_1 \times B^*_1) R_1=(100 \ 000 \ 000) R_1=(a_1 \wedge b_1 \wedge c_1, a_1 \wedge b_2 \wedge c_2, a_3 \wedge b_3 \wedge c_3)$$

在上面执行 $(A^*_1 \times B^*_1)$ 运算时,为了使 $(A^*_1 \times B^*_1)$ 可以和 R_1 执行合成运算,故把 $(A^*_1 \times B^*_1)$ 写成行向量。

很明显,对于 A_1 的论域和 B_1 的论域,不管它的元素有多少,当 A^*_1 量化后只会选中某一个元素,例如第 i 个元素,则只有该元素的隶属度为 1,其余为 0,即有:

$$A^*_1 = (0 \dots 0 \ 1 \ 0 \dots 0) \quad \text{其中, } 1 \text{ 为第 } i \text{ 个元素。}$$

同理, B^*_1 量化后只会选中某一个元素,例如第 j 个元素,则只有该元素的隶属度为 1,其余为 0。这时,则有:

$$C^*_1 = (u_{A1}(a_1) \wedge u_{B1}(b_1) \wedge u_{C1}(c_1), u_{A1}(a_1) \wedge u_{B1}(b_j) \wedge u_{C1}(c_1), \dots, u_{A1}(a_i) \wedge u_{B1}(b_j) \wedge u_{C1}(c_{mn}))$$

式中, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。为了方便起见, C^*_1 也可用表示为: $U^*_{c1} = \min(u_{A1}(a_i) \wedge u_{B1}(b_j) \wedge u_{C1}(c_1))$ 同理,对于推理语句: If A_2 and B_2 Then C_2 ,则在输入为 A^*_i 、 B^*_j 时输出为:

$$U^*_{ck} = \min(u_{Ak}(a_i) \wedge u_{Bk}(b_j) \wedge u_{Ck}(c_k))$$

对求得的模糊控制量 $C^*_1, C^*_2, \dots, C^*_k$ 求集合运算,则可得到控制量 C^* 。

$$C^* = \bigcup_{i=1}^k C^*_k \quad (4.14)$$

最后,以最大隶属度法可以对 C^* 求出最大隶属度对应的元素,也就是精确的控制量。这个精确控制量就是输入为 A^*_i 、 B^*_j 时的控制量。把 A^*_i 、 B^*_j 的内容进行改变,令 A^*_i 量化之后对应的元素符号 i 从 $1 \sim m$ 变化($i=1, 2, \dots, m$),令 B^*_j 量化后对应的元素序号 j 从 $1 \sim n$ 变化($j=1, 2, \dots, n$),则分别可以得到精确的控制量。以 A^*_i 、 B^*_j 量化后的组合和对应的精确控制量就可以产生控制表^[47]。

4.4 模糊-PID 复合控制器的设计

针对海水淡化第七效浓盐水温度控制的问题,本文采用模糊-PID 复合控制算法海水进水流量进行控制。海水淡化第七效浓盐水温度模糊-PID 控制系统图如图 4.3 所示。

通过温度传感器测量第七效浓盐水温度 T 与设定温度 T_0 进行比较,海水淡化第七效浓盐水温度正常运行时设定值为 42°C 。得到温度偏差 e 及偏差变化率 $\dot{e}$ 。 e 和 $\dot{e}$ 作为控制器的输入。根据模态选择开关设定值选择采用 PID 控制还是模糊控制。当偏差 $|e| \geq 2^\circ\text{C}$,系统采取模糊控制,当 $|e| < 2^\circ\text{C}$,系统采取 PID 控制。

模糊控制器可以采用多种方法设计,如查表法、公式法等。本系统采用查表法,其做法是:首先通过离线计算,获得一个模糊控制表,然后将其控制表存放到计算机的内存中。在实际的第七效浓盐水温度控制中,控制器只需直接根据采样值和论域变换得来的论域元素,在控制表对应的行与列中找到相应的以论域元素形式表现的控制量 U ,将其乘以比例因子,即可用于控制被控过程,以达到预期的控制目的。

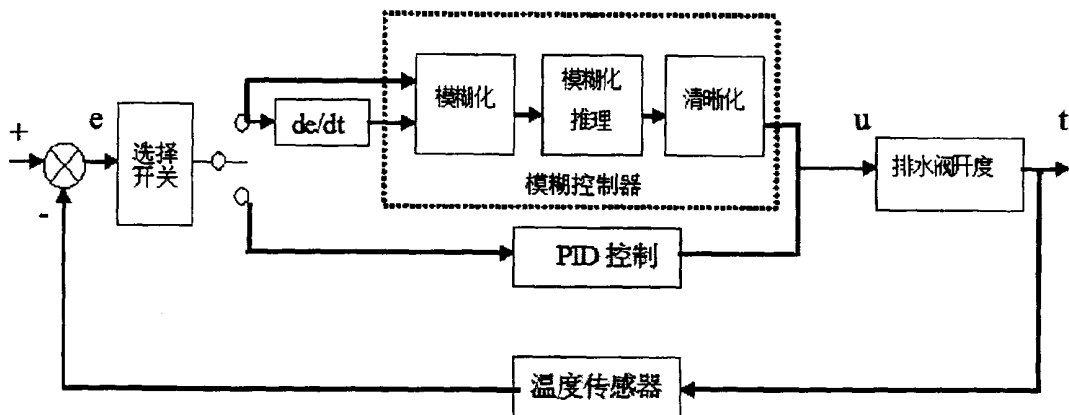


图 4.3 海水淡化温度模糊—PID 控制系统图

Fig 4.3 The system diagram of temperature Fuzzy-PID control of the desalination

4.4.1 模糊控制器的输入、输出变量确立

按照模糊控制器的输入输出变量数量，模糊控制器可分为：单输入单输出模糊控制器、二输入一输出模糊控制器、多输入一输出模糊控制器。从理论上讲模糊控制器的输入变量的个数（维数）与控制精度成正比，但维数越高，控制精度越高，模糊控制规则越复杂，控制算法越难以实现。因此，本文采用二输入一输出的二维模糊控制器。

模糊控制器的输入变量为： e —温度偏差， $\dot{e}$ —温度偏差变化率。

模糊控制器的输出变量为： u —海水排水流量调节阀阀门开度。

4.4.2 模糊控制器输入量和输出量的模糊化

(1) 输入温度偏差的模糊量化

输入温度偏差的论域设定为 $[-6^{\circ}\text{C}, +6^{\circ}\text{C}]$ ，将它们量化在模糊论域 $[-6, +6]$ 中，共分 13 个等级，即 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ ，则偏差量化因子为： $K_e=6/6=1$ 。温度偏差在模糊论域上取语言值 E 的集合为 $\{\text{负大 NL, 负中 NM, 负小 NS, 零 ZE, 正小 PS, 正中 PM, 正大 PL}\}$ 。

对于各语言值的隶属度有多种表示方法，由于温度控制系统的控制品质对于输入输出模糊量隶属函数的形状并不敏感，而主要取决于隶属函数的个数和每个隶属函数所覆盖的论域范围。因此，为便于计算本文采用了三角形函数，温度偏差 e 的模糊集合隶属函数如图 4.4 所示。

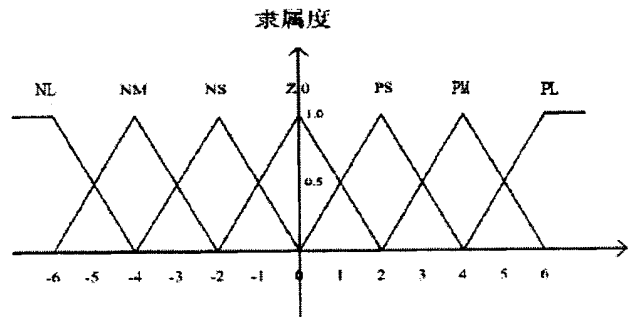


图 4.4 温度偏差隶属度函数 μ_e

Fig 4.4 Membership function of temperature deviation μ_e

(2) 输入温度偏差变化率的模糊量化

输入温度偏差变化率的论域设定为 $[-0.6^{\circ}\text{C}, +0.6^{\circ}\text{C}]$ ，将其量化在模糊集合 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ ，则量化因子为： $K_e=6/0.6=10$ 。温度偏差变化率在模糊论域上取语言值 EC 的集合为{负大 NL，负中 NM，负小 NS，零 ZE，正小 PS，正中 PM，正大 PL}。其模糊集合隶属函数如图 4.5 所示。

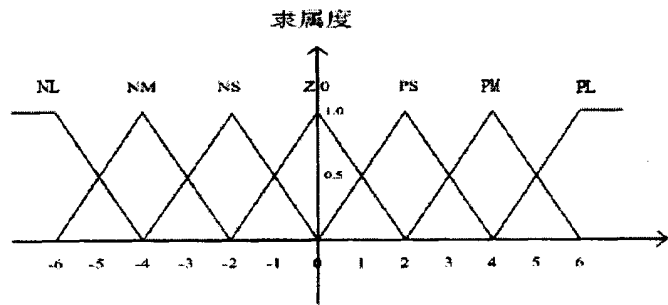


图 4.5 温度偏差变化率隶属度函数 $\mu_{\dot{e}}$

Fig 4.5 Membership function of temperature deviation changing rate $\mu_{\dot{e}}$

(3) 海水排水流量调节阀开度的模糊量化

输出海水排水流量调节阀开度的范围为 $[20, 80]$ ，将其量化在模糊集合 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$ ，则量化因子为： $K_u=30/6=5$ 。海水排水流量阀门在模糊论域上取语言值 U 的集合为{负大 NL，负中 NM，负小 NS，零 ZE，正小 PS，正中 PM，正大 PL}，分别代表最低允许调节阀到最高允许调节阀的开度。其模糊集合隶属函数如图 4.6 所示。

4.4.3 模糊规则表的确立

模糊控制规则是由一系列“IF-THEN”型的模糊条件句构成，并用适当语言来加以描述，最终可以表示成模糊控制规则的形式。针对海水淡化第七效浓盐水温度控制系统的特性和控制经验，将控制过程中各种可能出现的情况及相应的控制策略进行分析汇总，可得到 35 条控制规则，简述如下：

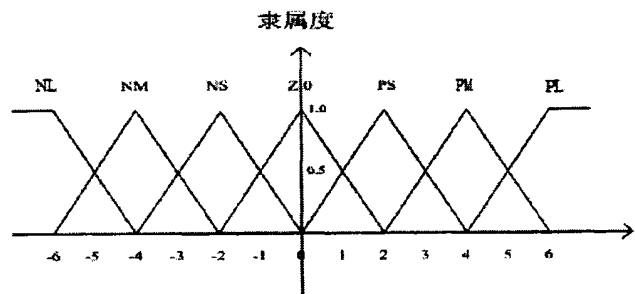


图 4.6 阀门开度隶属度函数 μ_u

Fig 4.6 Membership function of valve opening μ_u

- (1) If (E=NL) and (EC=NL or NM or NS or ZE) Then U=PL
- (2) If (E=NL) and (EC=PS) Then U=PM
- (3) If (E=NL) and (EC=PM) Then U=PS
- (4) If (E=NM) and (EC= NL or NM) Then U=PL
-
- (48) If (E=PL) and (EC= NS) Then U=NM
- (49) If (E=PL) and (EC=PL or PM or PS or ZE) Then U=NL

在建立模糊控制规则表时，首先考虑误差为负的情况，当误差为负大时，若当误差的变化为负，这时误差有增大的趋势，为尽快消除已有的负大误差并抑制误差变大，所以控制量的变化取正大。当误差为负大而误差的变化为正小时，控制量的变化取为正中。当误差为负大且误差变化为正中时，系统本身已有减少误差的趋势，所以为尽快消除误差且又不超调，应取较小的控制量。若误差变化率正大时，控制量不宜增加，否则造成超调会产生正误差，因此这时控制量变化取为零。当误差为负中、负小等情况，控制量的变化可以参照选取。上述选取控制量的原则是，当误差大或较大时，选择控制量以尽快消除误差为主；而当误差较小时，选择控制量要以防止超调，保证系统的稳定性为主。总结汇总的模糊控制规则表列于表 4.1。

表 4.1 模糊控制规则表

Table 4.1 Fuzzy control rule table

输 出 开度 U		温差变化率 EC						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
温 差 E	NL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	0
	NM	PL	PL	PM	PM	PS	0	0
	NS	PL	PM	PM	PS	0	0	NS
	ZE	PM	PS	PS	0	NS	NS	NM
	PS	PS	0	0	NS	NM	NM	NL
	PM	0	0	NS	NM	NM	NM	NL
	PL	0	NS	NM	NL	NL	NL	NL

4.4.4 模糊控制表的建立

经过模糊推理得到的输出模糊值必须通过解模糊过程转化为一个控制精确值。采用最大隶属度方法建立起模糊控制器查询的模糊控制表列于表 4.2。

表 4.2 模糊控制表
Table 4.2 Fuzzy control table

输出 开度 U	温差变化率 EC												
	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
温 差 E	-6	6	6	6	6	6	6	4	4	2	0	0	0
	-5	6	6	6	5	5	4	4	4	2	0	0	0
	-4	6	6	6	5	5	4	4	4	2	0	0	0
	-3	6	6	5	5	4	4	3	3	2	0	-1	-1
	-2	4	4	3	3	3	2	2	1	0	0	-1	-1
	-1	4	4	3	3	2	1	1	0	0	0	-1	-2
	0	4	4	2	1	1	1	0	-1	-1	-1	-3	-4
	1	2	2	2	1	0	0	-1	-1	-2	-3	-4	-4
	2	1	1	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4
	3	1	1	1	0	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6
	4	0	0	0	-2	-4	-4	-4	-4	-5	-5	-6	-6
E	5	0	0	0	-2	-4	-4	-4	-5	-5	-6	-6	-6
	6	0	0	0	-2	-4	-4	-6	-6	-6	-6	-6	-6

模糊控制表建立后，当温度偏差 $|e| \geq 2^{\circ}\text{C}$ ，系统采取模糊控制。根据模糊控制器的输入变量温差 e 和温差变化率 $\dot{e}$ ，可以求的 $E=e \times K_e$ ， $EC= K_{\dot{e}} \times \dot{e}$ ，根据 E 和 EC 查找阀门开度的对应值 U ，可以求出 $u=U \times K_u$ 。把 u 的值转换成 4-20mA 的标准信号后，就可以控制海水排水调节阀，达到通过模糊控制器控制海水淡化第七效浓盐水温度的目的。

4.4.5 PID 温度控制器的设计

(1) 对于 PID 温度控制器增量式 PID 算法

对于 PID 温度控制器采用增量式 PID 算法，形式如下：

$$\Delta u(n) = u(n) - u(n-1) = K_p \left\{ e(n) - e(n-1) + \frac{T}{T_i} e(n) + \frac{T_d}{T} [e(n) - 2e(n-1) + e(n-2)] \right\}$$

采用位置式 PID 算，具有以下优点：

增量式 PID 算法不需要做累加，控制量增量的计算仅与最近几次偏差采样值有关，容易获得较好控制效果，计算误差或计算精度问题对控制量的影响较小。增量式 PID 算法计算结果是控制量的增量，在阀门控制中，只输出阀门开度的变化部分，误动作影响小；当控制系统出现故障时，可以保持原值来减少影响范围。采用增量式 PID 算法，便于实现手动/自动的无扰动切换。

(2) PID 参数的整定

对于 PID 参数一般可以用试凑法、经验数据法和临界比例法来确定。试凑法是通过模拟或闭环运行观察系统的响应曲线,然后根据各调节参数对系统响应的大致影响来反复试凑参数,达到满意的控制效果,从而确定 PID 调节参数。对调节参数实行先比例、后积分再微分的整定步骤。PID 调节参数的整定不是唯一的,从应用角度来看,只要满足被控过程的设计要求即可。一般试凑程序为:先将 T_i 置于最大, T_D 放在零,比例度 K_p 置于某一值,系统投自动。若过渡过程时间太长,则应减小比例度;若振荡过于剧烈,则应加大比例度。引入积分作用时,需将已调好的比例度适当的放大 10%到 20%,然后将积分时间 T_i 由大到小不断凑试,直到获得满意的过渡过程。微分作用最后加入,这时 K_p 可放得比例作用时更小些,积分时间 T_i 也可相应地减小些。微分时间 T_D 取(1/3 到 1/4) T_i ,但也需不断凑试,使过渡时间最短,超调量最小。当温度偏差 $|e| < 2^\circ\text{C}$,系统采取 PID 控制。对于海水淡化第七效浓盐水温度控制用试凑法和经验数据法相结合的方法整定出一组 PID 参数为: $K_p=-0.6$, $K_i=4.0$, $K_d=0.0$ 从而使控制效果基本达到最佳状态。

4.5 本章小结

本章主要介绍了海水淡化的主要控制对象,介绍了 PID 控制和模糊控制的基本理论,根据海水淡化第七效浓盐水温度的控制的特点设计了模糊-PID 混合控制器。

第5章 海水淡化控制系统的实现

带热蒸汽压缩低温多效海水淡化控制系统的实现，主要包括海水淡化浓盐水泵、蒸馏水泵、海水升压泵、冷凝水泵、阻垢剂加药泵及消泡剂加药泵控制功能的实现；海水淡化浓盐水排放自动调节阀 WB20V2，冷凝水自动调节阀 WC20V2，冷凝水减温自动调节阀 WC60V1，蒸馏水自动调节阀 WD20V2，1#热压缩器自动调节阀 WM10V1，2#热压缩器自动调节阀 WM11V1，海水排水调节阀 WS20V1 和补给水自动调节阀 WS40V1 等主要调节阀控制功能的实现；海水淡化 T 模式到 E 模式的运行模式流程转换控制实现；连锁保护功能实现；机组监控系统的具体实现等五部分。

本章主要重点描述这五个部分的实现，其中分别以具有代表性的蒸馏水泵控制为例来介绍泵类控制功能的实现，以海水排水调节阀 WS20V1 的控制为例来介绍控制阀类的控制功能实现。

5.1 海水淡化控制功能的具体实现

5.1.1 泵类控制的实现

海水淡化系统泵类设备主要包括浓盐水泵、蒸馏水泵、海水升压泵、冷凝水泵、阻垢剂加药泵及消泡剂加药泵，因为泵类控制的相似性，下面以蒸馏水泵的控制程序为例来介绍泵类控制功能的实现。

(1) 蒸馏水泵的启动条件是蒸馏水排放阀开度小于 5%和无蒸馏水液位低报警信号（见图 5.1）。

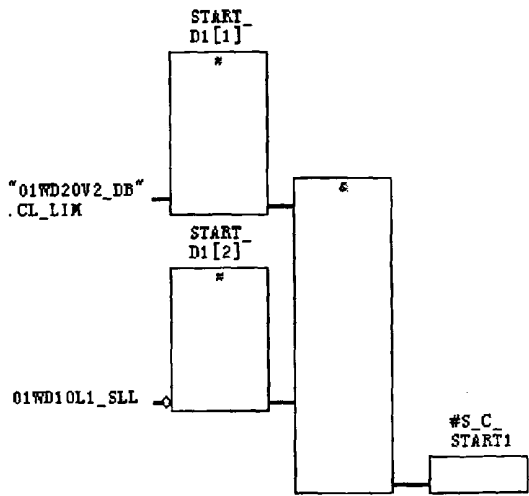


图 5.1 蒸馏水泵的启动条件
Fig 5.1 Start condition of distilled water pump

(2) 执行上位的确认命令，以及紧急停车命令。 $\#t_HIM_ACKN$ 此引脚是上位确认命令。见下面程序（见图 5.2）。

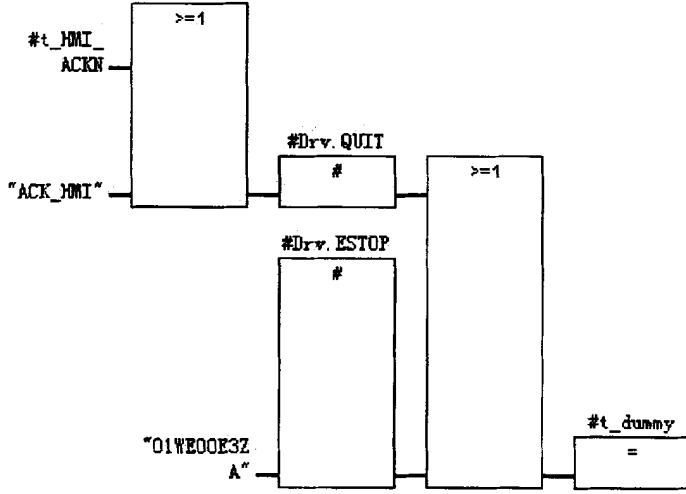


图 5.2 执行紧急停机命令

Fig 5.2 Execute emergency stop command

(3) 执行蒸馏水泵的手自动选择命令， $\#t_HIM_Auto$ 此引脚是上位选择自动控制命令。 $\#t_HIM_Manu$ 此引脚是上位选择手动控制命令，见下面程序，“ $\#s_OPM_AUTO$ ”是自动操作模式选择（见图 5.3）。

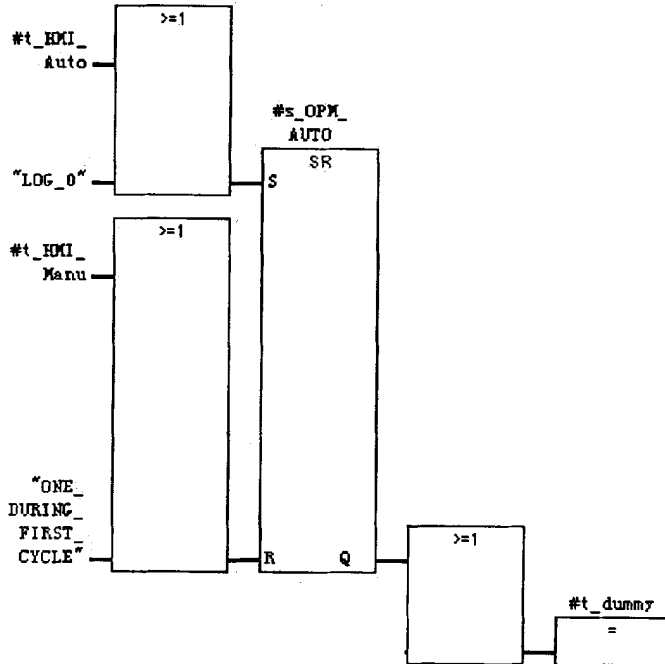


图 5.3 蒸馏水泵的手自动选择

Fig 5.3 Manual and automatic selection of distilled water pump

(4) 执行上位的取消命令。#t_HIM_OFF 此引脚是上位取消命令（见图 5.4）。

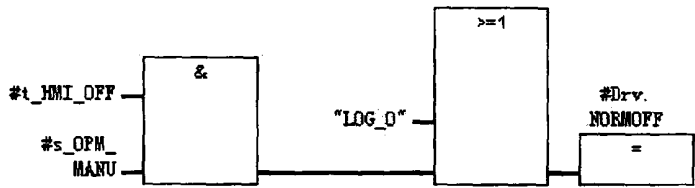


图 5.4 执行取消命令

Fig 5.4 Execute Cancel command

(5) 蒸馏水泵运行条件。“01WD10L1ZALL”引脚是蒸馏水液位低低报警信号,“00XY01P1ZALL”引脚是仪表用气压力低低报警信号,上述两个信号都没有时蒸馏水泵可以运行（见图 5.5）。

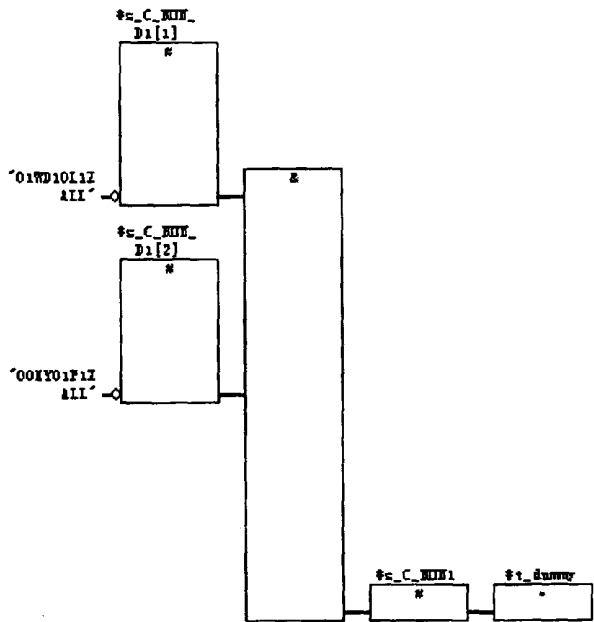


图 5.5 蒸馏水泵运行条件

Fig 5.5 Operating conditions of distilled water pump

5.1.2 工作模式选择的实现

海水淡化根据工艺要求，分三种工作模式， T 模式、T+E 模式和 E 模式，其中 T 模式是两台热压缩机全开，系统蒸汽为低压蒸汽， 压力不低于 0.3MPa（表压）； T+E 模式是在管网低压蒸汽不够用时， 只开一台热压缩器的运行模式； E 模式为两台热压缩机同时关闭， 低低压蒸汽直接进入蒸发器主体， 只有真空压缩机消耗少量的低压蒸汽用来维持蒸发器主体内部的真空。满足以下条件可以进行 T 模式选择：蒸汽阀门 01WM10V1、01WM11V1 处于自动模式， 01WL10V1 关闭， 01WV80V1、01WV90V1 打开或者上位

选择 T 模式在当前不是 E 模式的前提下即可切换至 T 模式。T+E 模式选择控制, 与 T 模式类似, 其模式选择使用的是置位复位功能块, 复位条件为选择 T 模式或 E 模式, 置位条件为手动选择 T+E 模式或在 01WL10V1 打开、01WV80V1 关闭、01WV90V1 打开、01WM11V1 处于自动模式的条件下即可自动选择 (见程序图 5.6 T+E 模式的选择)。同样 E 模式的选择也是使用置位复位功能块, 复位条件是选择了 T+E 模式, 在 E 模式与 T 模式之间是不可以直接切换的, 必须经过 T+E 模式。置位条件依然有手动选择和自动两种, 自动是在 01WM10V1 关到位 01WM11V1 关到位, 01WL10V1 打开, 01WV80V1 关闭, 01WV90V1 关闭的情况下选择的。

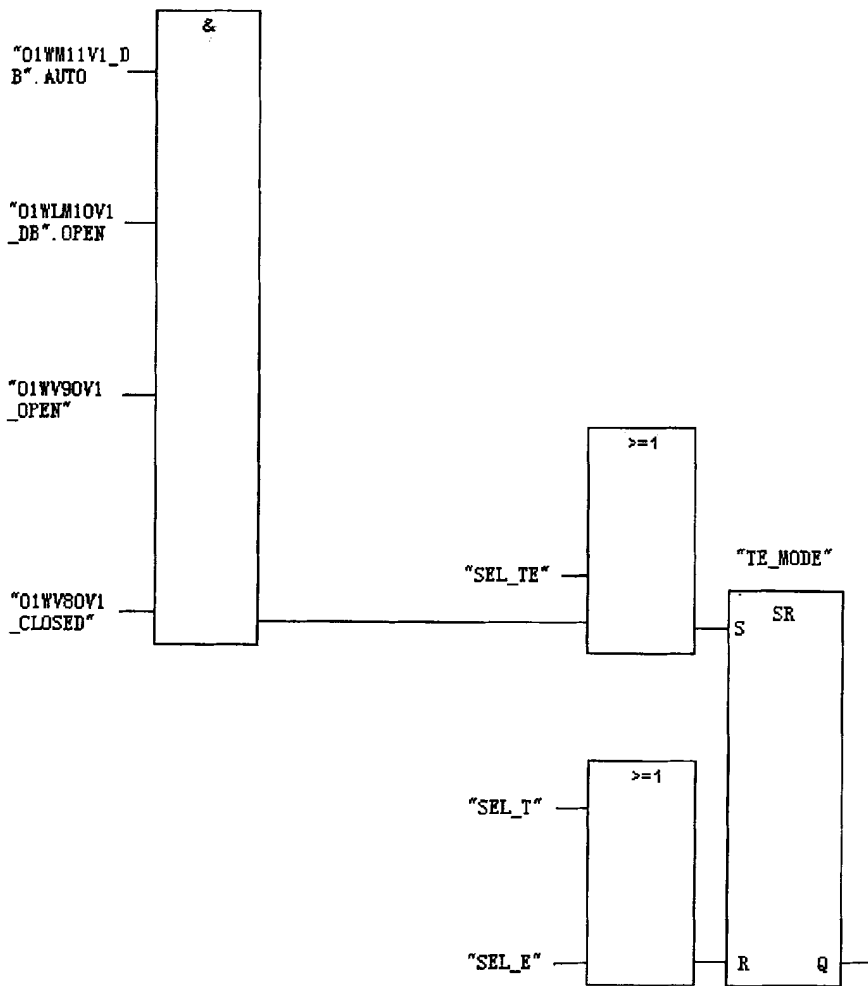


图 5.6 T+E 模式的选择
Fig 5.6 T+E Mode selection

5.1.3 联锁功能的实现

为了保证海水淡化装置自身的安全，防止海水淡化装置因控制问题造成成品水不合格，避免误操作对设备本身造成损坏，其主要联锁保护功能的实现程序放在 FB1202 内，以第一效浓盐水温度高高报警联锁为例，见下面程序，当第一效浓盐水温度高高信号触发后，延时 5s 触发联锁，可以通过复位取消联锁（见图 5.7）。

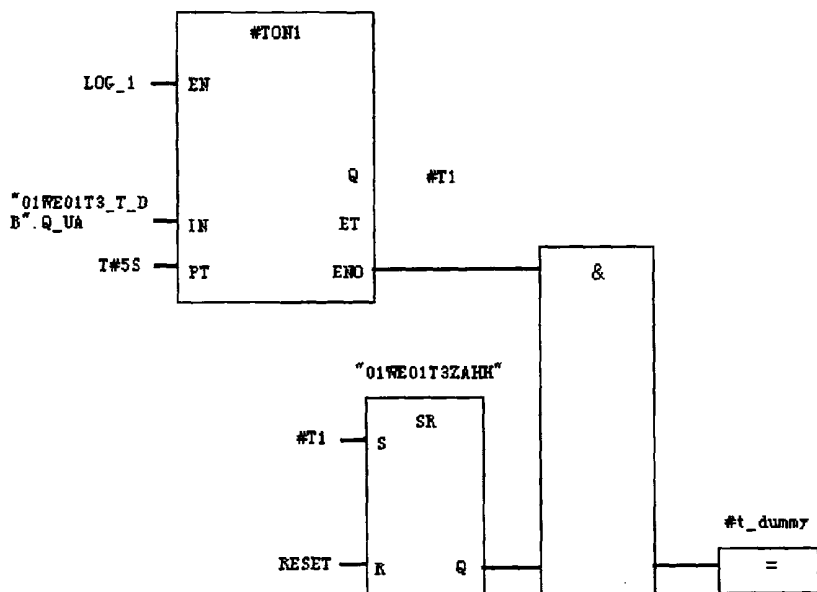


图 5.7 联锁功能的触发与复位

Fig5.7 Trigger and reset of Interlock program

当联锁触发后，将立即关闭 1#热压缩器入口调节阀、2#热压缩器入口调节阀和低压蒸汽入口截止阀。以 1#热压缩器入口阀为例，Interlock 16 触发后，将联锁关闭 1#热压缩器入口阀。

FB1202 内主要包括以下联锁：Interlock 100：联锁 100 紧急停车联锁；Interlock 1：第一效浓盐水温度高高报警联锁。浓盐水液位高高报警产生 5s 后此连锁起作用；Interlock 2：海水升压泵出口流量低低报警联锁。蒸馏水泵运行 1 小时，升压泵运行 5s，出口流量低低报警持续 5s 后此连锁起作用；Interlock 3：浓盐水液位高高报警联锁。浓盐水液位高高报警持续 5s 后此连锁起作用；Interlock 4：浓盐水液位低低报警联锁。浓盐水液位低低报警 5s 同时浓盐水泵运行 5s 后此连锁起作用；Interlock 5：蒸馏水液位低低报警联锁。蒸馏水液位低低报警 5s 同时蒸馏水泵运行 5s 后此连锁起作用；Interlock 6：蒸馏水电导率高高报警联锁。蒸馏水电导率高高报警 5s 后此连锁起作用；Interlock 7：冷凝水液位低低报警联锁。冷凝水液位低低报警 5s 同时冷凝水泵运行 5s 后此连锁起作用；Interlock 8：冷凝水电导率高高报警联锁。冷凝水电导率高高报警 5s 后此连锁起作用；

Interlock 9: 消泡剂液位低报警连锁。消泡剂液位低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 29: 消泡剂液位低报警连锁。消泡剂液位低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 10: 阻垢剂液位低报警连锁。阻垢剂液位低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 30: 阻垢剂液位低报警连锁。阻垢剂液位低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 11: 阻垢剂加药故障报警连锁。两个阻垢剂加药泵均无运行信号一小时后此连锁起作用;
 Interlock 12: 冷凝水泵故障报警连锁。冷凝水泵发出故障信号后此连锁起作用;
 Interlock 13: 仪表用气压力低报警连锁。仪表用气压力低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 14: 第一效冷凝水液位高高报警连锁。冷凝水液位高高报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 16: 进蒸发器第一效蒸汽温度高高报警。进蒸发器第一效蒸汽温度高高报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 17: 海水升压泵进口压力低报警连锁。海水升压泵进口压力低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 18: 1#热压缩器进汽阀关闭连锁;
 Interlock 19: 真空喷射器低压蒸汽入口温度高高报警连锁。真空喷射器低压蒸汽入口温度高高报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 20: 真空喷射器进汽阀关闭连锁;
 Interlock 25: 2#热压缩器进汽阀关闭连锁;
 Interlock 50: 低低压蒸汽入口温度高高报警连锁。低低压蒸汽入口温度高高报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 60: 减温减压水泵入口压力低报警连锁。减温减压水泵入口压力低报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 61: 减温减压站低压蒸汽入口压力高高报警连锁。减温减压站低压蒸汽入口压力高高报警持续 5s 后此连锁起作用;
 Interlock 62: 减温减压站低压蒸汽主管线减压阀小开度报警连锁。减温减压站低压蒸汽主管线减压阀开度在 5%以下持续 5s 后此连锁起作用。

5.1.4 调节阀控制功能的实现

调节阀的控制是整个海水淡化系统中控制重点,海水淡化中重要的控制对象大部分都是通过调节阀进行控制的,调节阀直接 PID 控制比较简单。下面以海水淡化排水调节阀 WS20V1 的模糊-PID 控制功能的实现为例进行介绍,通过调节排水调节阀 WS20V1 保持第 7 效浓盐水温度变送器 WE07T1 值的恒定。海水排水阀控制程序逻辑图如图 5.8。

根据逻辑图通过 STEP7 进行程序编写,控制的主程序发到组织块 OB32 内,功能块 FC1 用来通过 E 和 EC 找到 U 在模糊控制表中的位置,FC2 用来把 U 从模糊控制表中取出,并转换成可以控制的 u 。FC3 是通过 SETP7 中的 FB41 实现 PID 控制。其中模糊控制表按照从左到右的顺序存入 DB2 中。

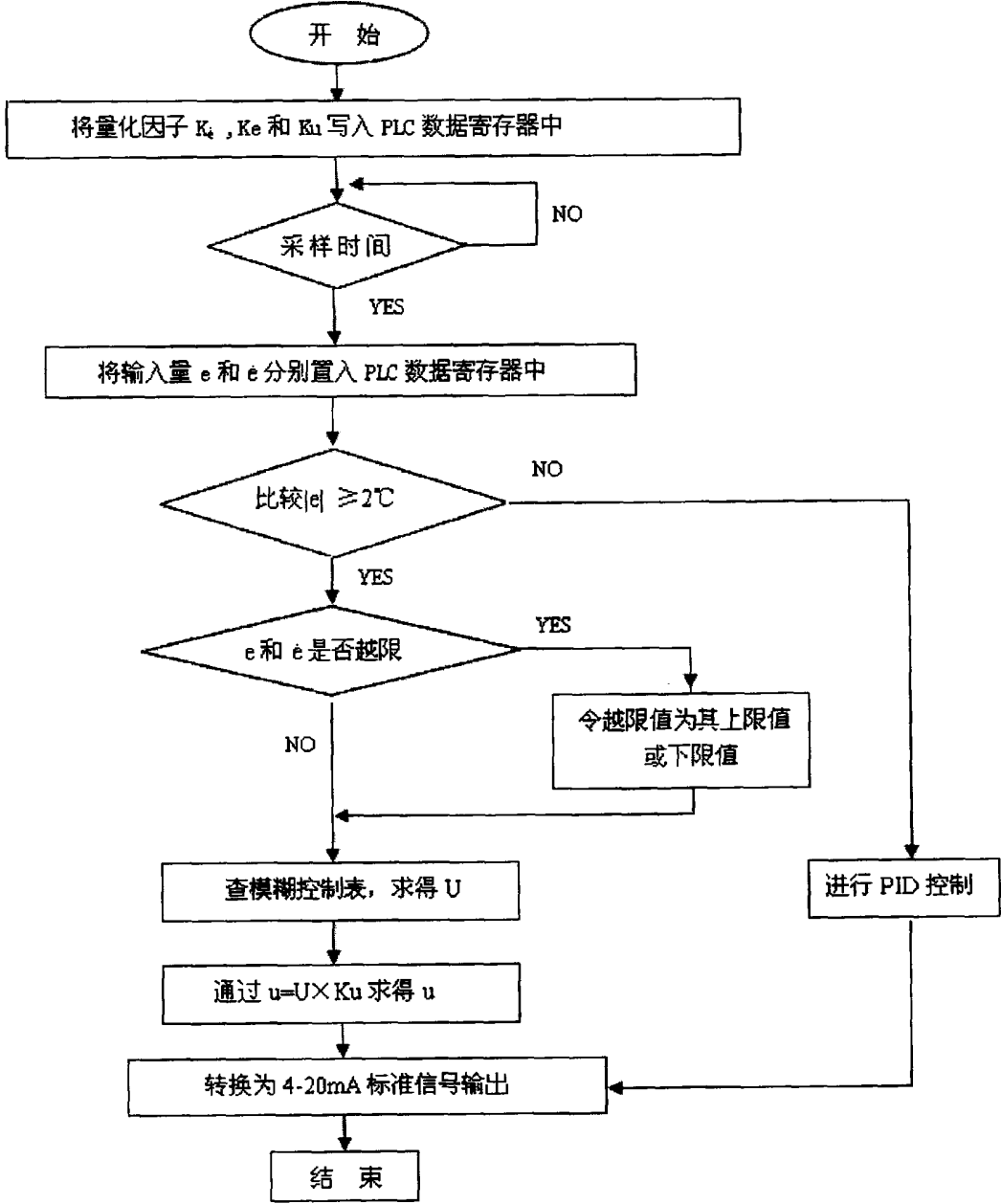


图 5.8 海水排水阀控制逻辑图

Fig 5.8 Control logic diagram of seawater discharge valve

(1) 首先求温度偏差 e 和温度偏差变化率 $\dot{e}$ (见图 5.9), 其中 DB1.DB D6 为温度测量过程值, DB1.DB D22 为温度控制实际值, 系统扫描时间为 1 秒, 变化率 $\dot{e}=e(n)-e(n-1)$ 。

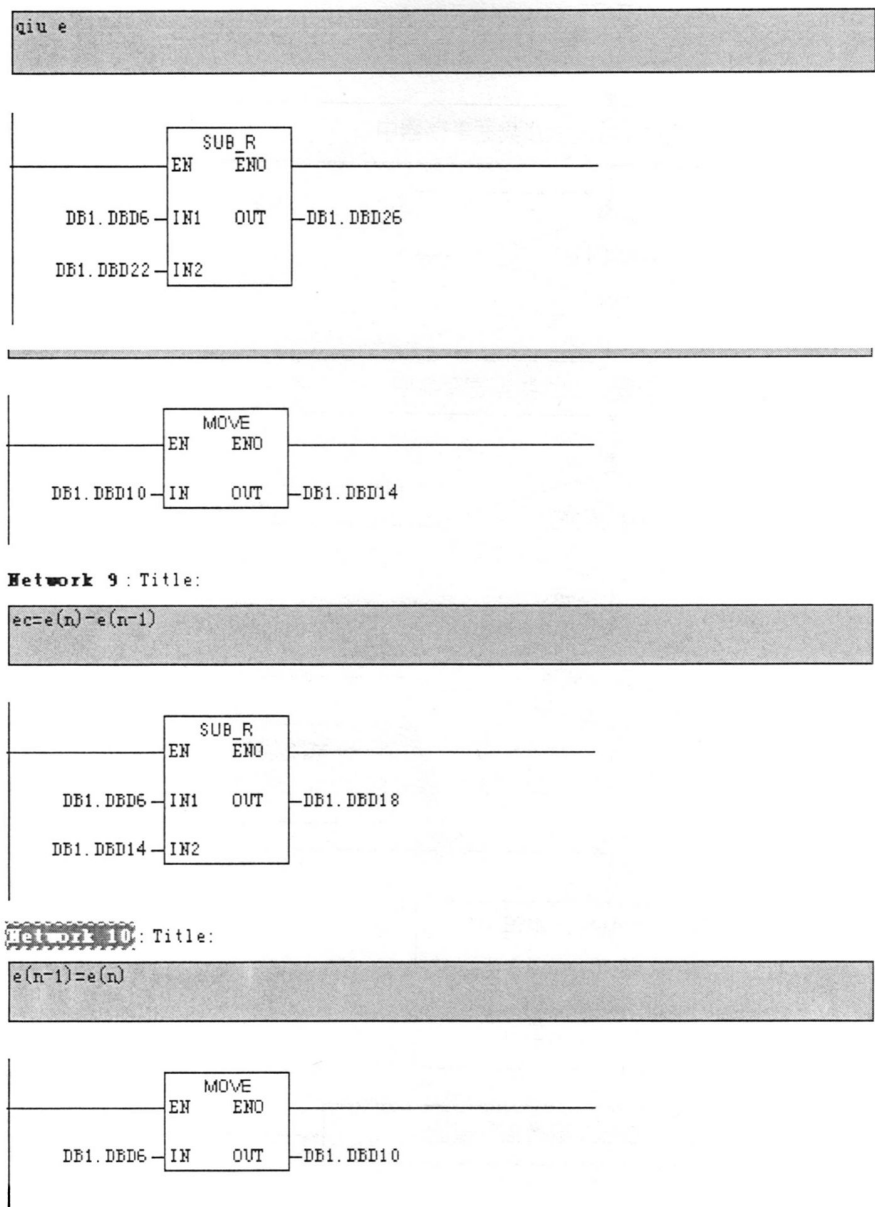


图 5.9 计算温度偏差和偏差变化率

Fig 5.9 Calculate temperature deviation and temperature deviation changing rate

(2) 对偏差进行判断，如果 $|e| < 2^{\circ}\text{C}$ ，系统进行 PID 控制，如果温度偏差 $|e| \geq 2^{\circ}\text{C}$ ，系统采取模糊控制（见图 5.10）。

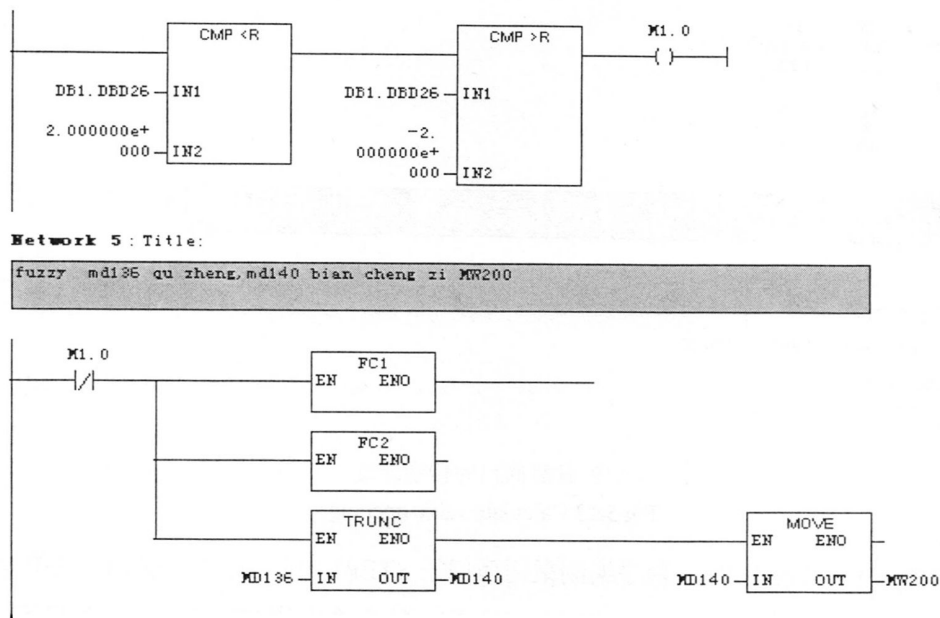


图 5.10 模糊控制和 PID 控制的选择

Fig 5.10 Selection of fuzzy control and PID

(3) 查表功能的实现（见图 5.11），查表程序设计利用变址寄存器，通过采取“基址+偏移地址”方法来实现，即 $U=E\times 13+EC$ ，(其中 MD104 为 E,MD100 为 EC,MD108 为 U)。

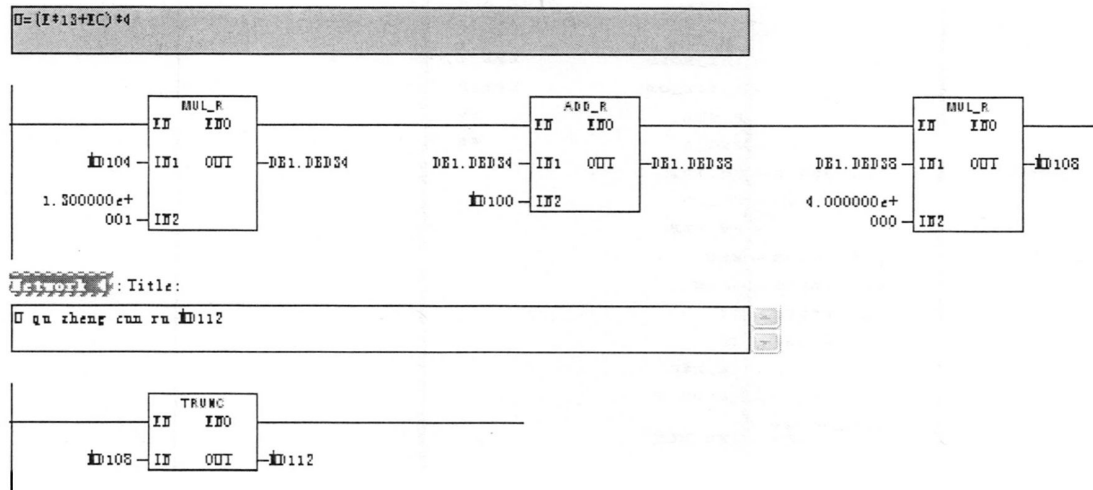
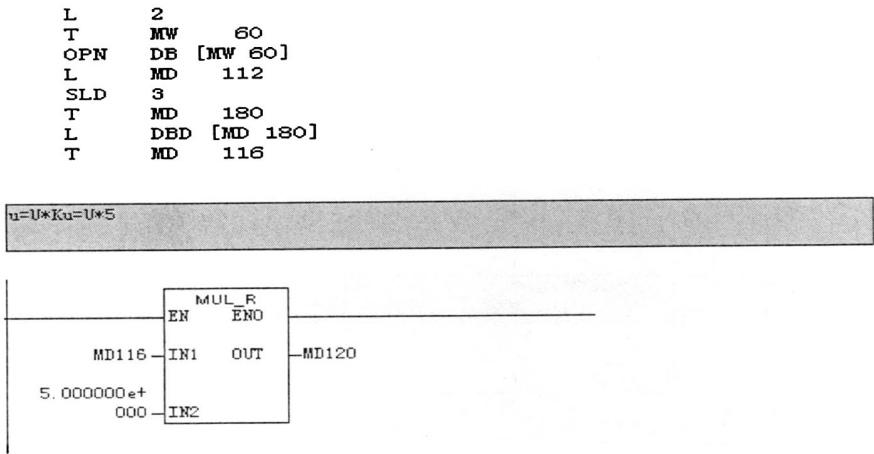


图 5.11 查表功能的实现

Fig 5.11 Function realization of Look-up table

(4) 把查到 U 从表中取出，首先打开 DB2，取出 U，并且计算 u， $u=U\times Ku$ ，因为 Ku 为 5，所以直接乘 5（见图 5.12）。



5.12 计算阀门的精确开度
Fig 5.12 Calculate valve opening

(5) PID 功能的实现，程序编制采用西门子 STEP7 中的 FB41 功能块，其中 M1.6 为手自动转化，0 为自动；DB1.DBW66 为 PID 控制输出值,DB1.DBD22 为设定值，DB1.DBD6 为过程值，DB.DBD58 为手动输入值，上下限取 20%到 80%（见图 5.13）。

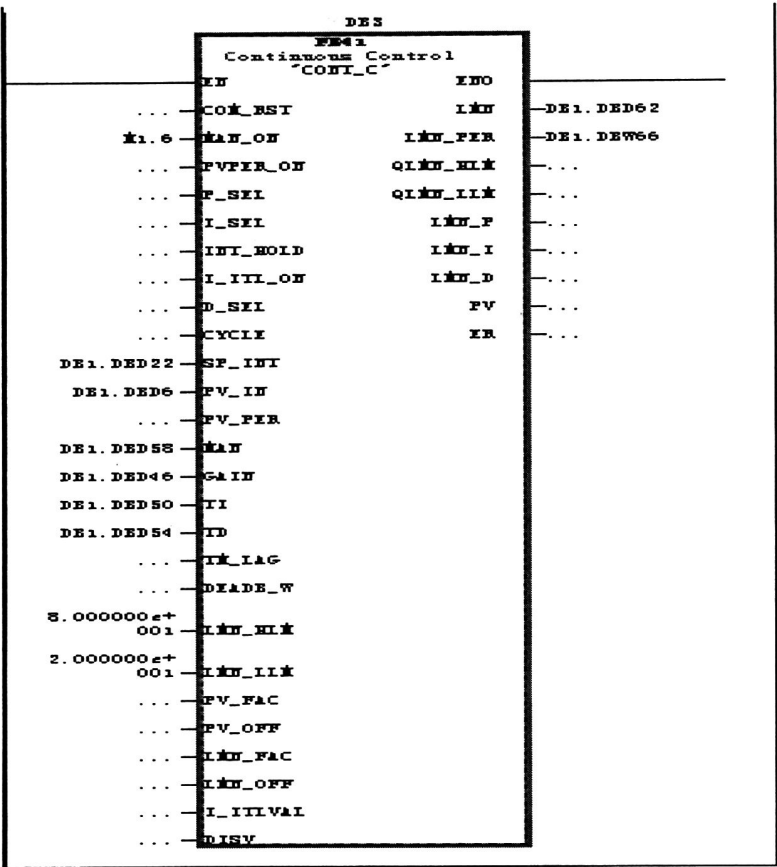


图 5.13 PID 控制功能的实现
Fig 5.13 Realization of PID control functions

5.2 监控系统的功能实现

所谓监控系统就是介于操作员与 PLC 控制系统之间的一个平台，操作人员可以通过监控系统与 PLC 控制系统进行信息、数据的处理和交流。为了现场操作人员的安全以及工厂的监控方便，该系统采用监控组态软件 WINCC6.0 来实时监控整个生产线。海水淡化监控系统软件主要实现了下列功能：

(1) 生产过程实时监控功能

远程实时监控是监控组态软件 WINCC6.0 的主要功能。在监控操作主机上的操作画面显示整个海水淡化系统的全过程工艺流程图以及重要工艺设备的详细状态图，在各流程图上能直观地、实时地显示系统所有电气设备、检测仪表的工作状态和工艺参数、设备位号等。在工艺流程模拟图中采用动态画面对生产过程的设备状态、过程变量（如：温度、压力、流量、PH 值和液位等参数）进行实时显示，可以便于操作人员能够及时准确地掌握整个生产过程的运行情况，并且能够对现场设备的故障进行实时诊断和处理，以便更高效率地安排设备的启停和生产调度。

工艺流程监控界面包括：减温减压站系统、UNIT Y3 系统和 UNIT Y4 系统，其中每套主体分别可分为蒸汽-冷凝水系统画面、海水-浓盐水-蒸馏水画面和参数设定画面。下面 UNIT Y3 系统画面为例，示于图 5.14 中。

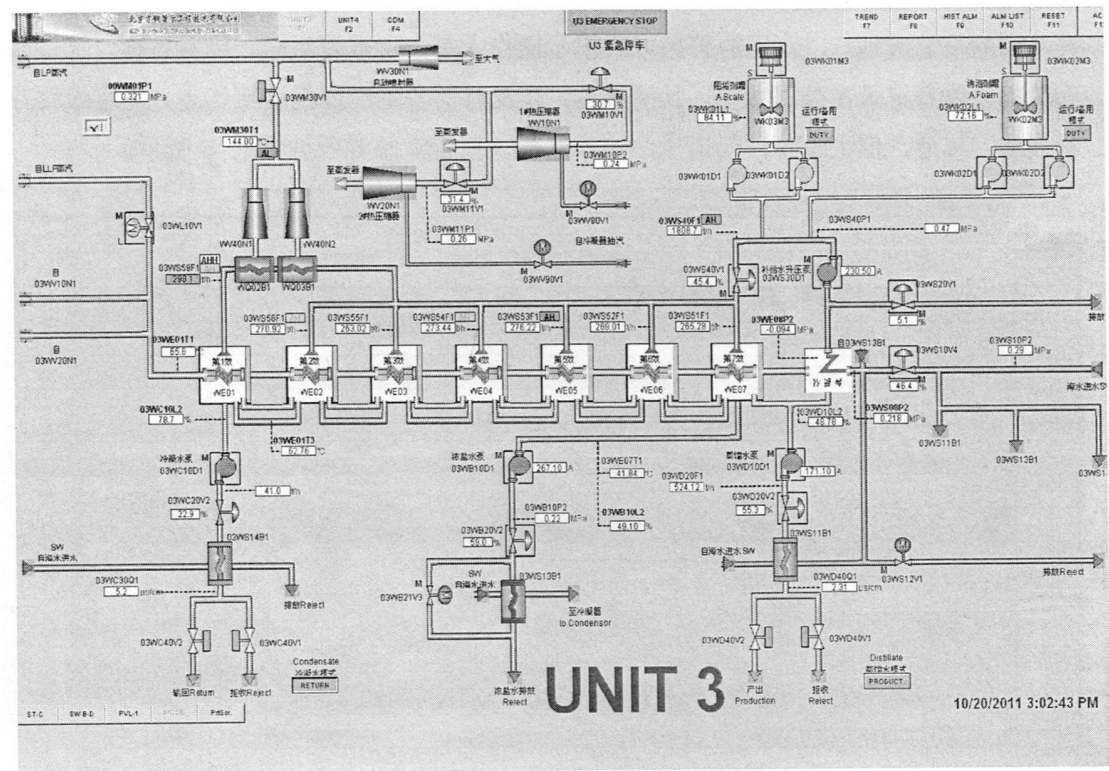


图 5.14 海水淡化主监控界面

Fig 5.14 The main screen of the desalination

(2) 设备操作功能

海水淡化主体系统设备操作功能画面主要包括开关阀操作界面，调节阀操作界面，泵类操作界面，模式转换操作界面，下面以调节阀操作界面为例，示于图 5.15

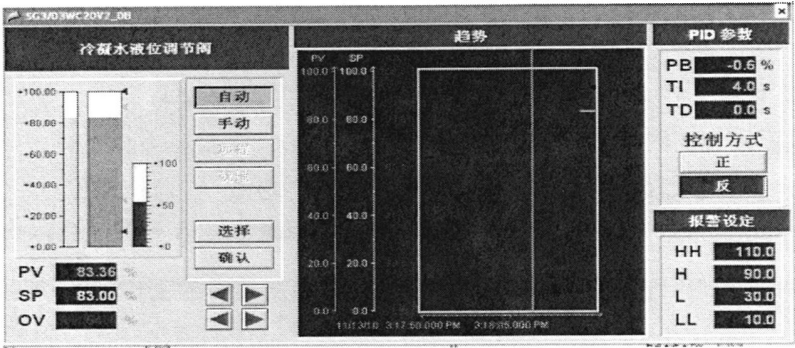


图 5.15 调节阀操作界面

Fig 5.15 The operation screen of control valve

(3) 报警、故障记录和显示功能

报警管理功能会在出现故障时提醒操作人员并显示记录故障信息。报警类别包括模拟量的超限报警和数字量的状态报警。对于如温度、压力、液位等一些重要的模拟量输入参数进行自动检测和实时报警，当重要参数超越上下限和设备出现报警、故障时，同时采用实时声光报警并应用色彩和闪烁变化表示各种报警信息和联锁保护措施，并且根据不同的报警级别，以不同的警报方式提示操作人员，将报警时间、报警名称、报警原因等报警信息记录在数据库中，以便查询。能及时反映生产过程运转状态，快速处理各种报警、事故，保护设备，保证生产正常运作。报警汇总界面如图 5.16 所示。

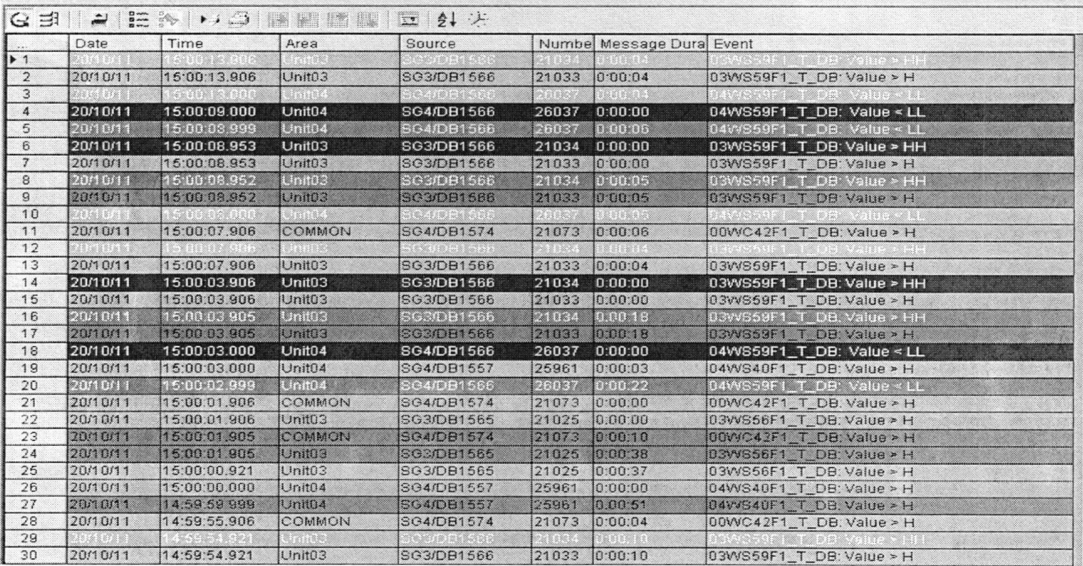


图 5.16 报警汇总界面图

Fig 5.16 The alarm history screen

(4) 实时和历史趋势图显示功能

监控系统还开发了趋势图显示功能，用来显示系统中一些重要模拟量参数的变化趋势，如浓盐水温度、浓盐水液位、入口蒸汽压力和补给水流量等。同时也记录了一些重要的开关量趋势，如浓盐水液位开关、冷凝水液位开关等。为了保证操作的正确性，对部分重要操作进行记录，如调节阀是否投自动、泵的开停是否上位操作等。生产系统工艺参数的实时趋势图可便于操作人员能及时掌握生产过程的工作趋势，及时地做出相应的调整，以达到确保稳定生产、提高产品质量的目的，而系统工艺参数的历史趋势图便于更详细的数据分析和处理，以便得到更完善、更丰富的生产过程控制经验。海水淡化的运行参数的历史趋势图如图 5.17 所示。

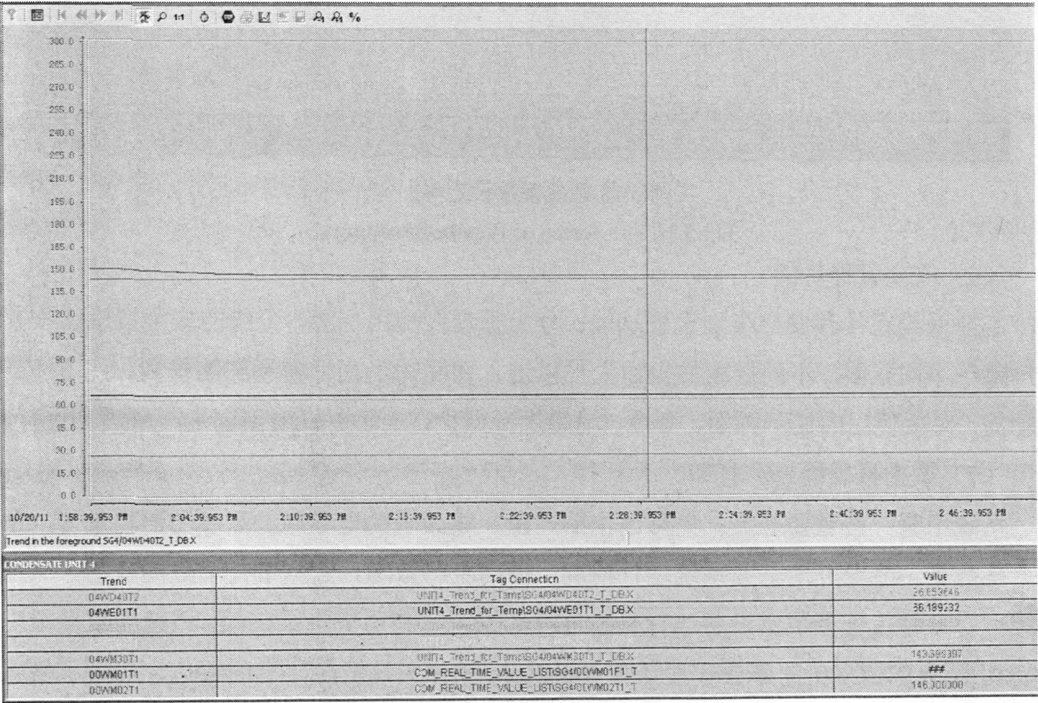


图 5.17 海水淡化运行参数的历史趋势画面

Fig 5.17 The trend screen of the desalinization

(5) 系统参数设定功能

根据工艺生产要求，系统需调节一些重要的工艺参数，如 T 模式下转换到 E 模式的情况时对海水的温度要求是不一样的，如果直接进入程序修改，既需要专业人员还比较麻烦，所以增加了系统参数设定功能，为了保证系统的稳定性，该功能只有作业长和系统工程师在输入密码后可以使用（见图 5.18）。

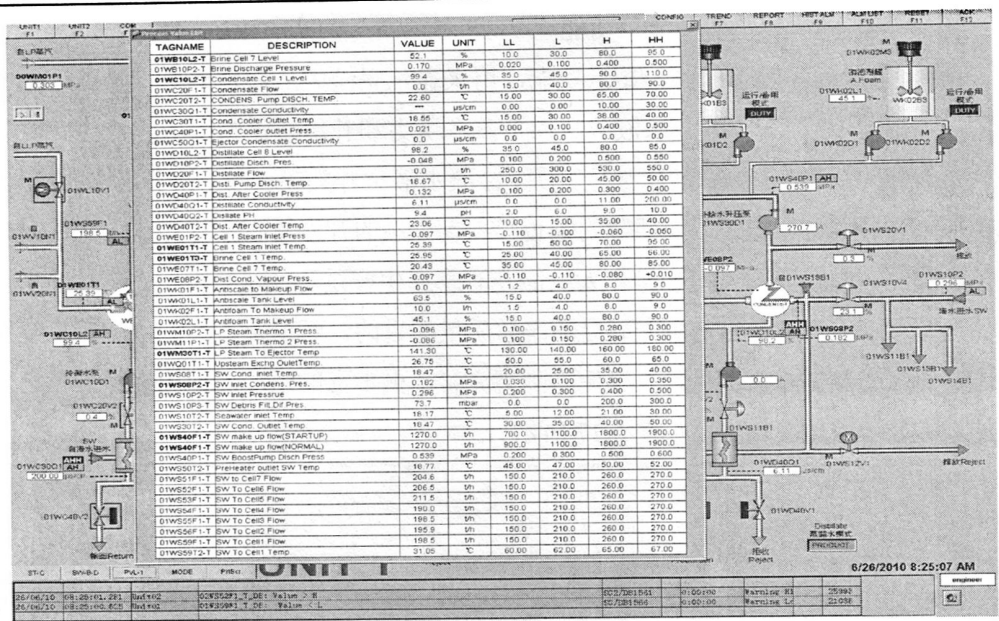


图 5.18 系统参数设定界面
Fig 5.18 The screen of Parameter setting

(6) 安全管理功能

监控系统还具有安全级别设置功能：分为管理级和用户级。分级的安全措施给不同用户赋予不同权限，不同权限的操作人员以键入密码的形式行使不同的权利、使用不同的功能，对所使用的显示画面、命令、标签进行保护，从而更好地保证生产的顺利进行。

(7) 数据报表统计和打印

系统中有一些重要数据：如蒸馏水的产量、成品水的电导率、蒸汽的消耗量等，掌握这些数据，能更好地掌握系统运行情况，提高生产效率，达到节能增效的目的。监控系统可对各种工艺参数及设备运行状态进行数据统计和历史记录归档，系统的数据报表功能利用 WINCC6.0 的开放式设计和 Windows 操作系统资源共享的特点，形成了格式灵活、界面美观且可查询的日报表、月报表及统计报表等多种形式的报表，方便生产管理者查询和打印。

5.3 本章小结

本章系统的介绍了带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化泵类控制、调节阀的控制、运行模式的变换和连锁保护功能的实现。同时采用 WINCC6.0 组态软件开发了海水淡化监控系统，实现了生产过程自动化和一体控制，监控界面友好，操作简单，历史趋势记录全面，降低了操作人员的强度。

第6章 结束语

本课题所研究的海水淡化控制系统是一个涉及设备较多、控制种类复杂的控制系统,综合运用了通信、网络、PLC、工业控制机、模糊控制、智能检测及自动控制等现代化信息和控制技术,实现对整个海水淡化生产过程的高度集成自动化控制。自从投入使用以来,生产运行平稳可靠,自动化控制效果良好,提高了生产效率、降低运行成本和劳动强度,取得了显著的经济效益和社会效益。

目前首钢京唐公司四套海水淡化主体造水比均达到或超过 9.8,同时 U2 主体在 E 模式下成功实现了与热电机组的联产,目前海水淡化平均成本基本控制在 10 元/ m^3 以内,如果 U1 主体在 E 模式下与热电机组的联产调试完成,海水淡化整体平均成本还能下降。现在京唐公司外购的淡水为 4.7 元/ m^3 ,通过处理及蒸发损耗后的平均成本约 6 元/ m^3 ,如果通过除盐站处理生产出工业用除盐水需增加处理成本 6-8 元/ m^3 ,经除盐站处理的除盐水平均成本约为 12-14 元/ m^3 ,通过带热蒸汽压缩低温多效海水淡化生产出来的除盐水比除盐站生产出的除盐水能够节约 2.5 元/ m^3 ,按海水淡化 50000 m^3 /日来计算,平均每天能节约成本 12.5 万元,平均每年能节约 4500 万元,在 E 模式下,同时能增加发电利润 6000 万元。如果计算富裕蒸汽、煤气循环利用的价值,海水淡化成本为 6.4 元/ m^3 ,每天节约成本更高。

对于热法海水淡化的能耗成本,使用外部能源时,成本构成中能耗费用将超过工程投资;而在使用价格较低的自用能源时,淡化成本甚至将低于供水站成本。由此可得,能源价格对海水淡化成本高低起着关键性作用。热法海水淡化工厂主要需要热能,通过供应中低压蒸汽,因此对热耗费用起着决定作用的蒸汽价格也就主要决定了热法淡化的成本;同时,热法工厂也需要少量的机械能和电能,通常由电力供应。实际工程中,冬季较低的水温需要通过少量蒸汽的预热来提高,对淡化成本也会造成一定影响。

事实上,已经有越来越多将海水淡化作为供水水源的工程应用,可以提供更多的借鉴经验,以青岛市为例,对青岛市目前的自来水制水成本作比较,即将建设的官路水库其自来水制水成本价为 3.8 元/ m^3 ,青岛利用南水北调供水制水成本价为 5.5 元/ m^3 。电水联产海水淡化成本为 4.3-5.1 元/ m^3 ,虽然成本略高于官路水库供水,但低于南水北调工程制水成本。独立海水淡化厂成本 6.0-6.7 元/ m^3 米,与南水北调基本接近,如果通过合理的选择淡化工艺和设备,采取较低的能源优惠价格,完全有可能达到比南水北调更低的制水成本。

我国作为淡水资源缺乏的国家,可以预见不久的将来,海水淡化将是沿海工业及生

活用水的主要水源。种种迹象显示，未来海水淡化装备国产化将是必然趋势，相关投资也会剧增。海水淡化是水资源的重要补充，是战略储备，也是重要的经济增长点。我们将在实际工作中不断完善带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化的自动化控制水平，通过不断提高带热蒸汽压缩低温多效蒸馏海水淡化的运营管理技术，降低运营成本，为解决中国和世界水资源短缺问题作出积极贡献。

参考文献

1. 乔世珊. 海水淡化技术及应用[M], 北京: 中国水利水电出版社, 2007, 3-56
2. 高从楷, 陈国华. 海水淡化技术与工程手册[M], 北京: 化学工业出版社, 2004, 22-25
3. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋标准汇编海水淡化卷[M], 北京: 中国标准出版社, 2009, 33-35
4. 王世昌. 海水淡化工程[M], 北京: 化学工业出版社, 2003, 10-65
5. 肖大维. 海水淡化控制设备及系统[M], 北京: 中国电力出版社, 2009, 101-205
6. 高从楷. 海水淡化及海水与苦咸水利用与发展建议[M], 北京: 高等教育出版社, 2007, 15-37
7. National Research Council(U.S). Desalination,A National Perspective[M], National Academies Press, 2008, 57-158
8. Sabine Lattenmn. Development Of An Environmental Impact Assessment And Decision Support System For Seawater Desalination Plants[M], Leiden,The Netherlands:CRC Press, 2010, 28-40
9. W.T.Hanbury. An Analytical Simulation Of Multiple Effect Distillation Plant[J], IDA World Congress. 1995, (4): 365-379
10. 邓润杰, 刘杰等. 热压缩器多效蒸馏海水淡化系统能量分析[J], 水处理技术, 2008 年, 34(8): 21-24.
11. 张全, 沈胜强. 低温多效蒸发海水淡化装置的计算分析[J], 热科学与技术, 2003, 24(7):17-19
12. 王世昌. 蒸馏法发展的十年[M], 北京: 水处理技术, 1985, 50-55
13. SIDEM. Technical Covering Letter of seawater desalination[Z], 2008, 25-88
14. 首钢设计院. 首钢京唐公司海水淡化工程初步设计[Z], 2007, 12-59
15. 刘翠玲, 黄建兵. 集散控制系统[M], 北京: 中国林业出版社 2005, 13-20
16. 郭巧菊. 计算机分散控制系统[M], 北京: 中国电力出版社, 2008, 33-35
17. 白焰, 吴鸿, 杨国田. 分散控制系统与现场总线控制系统 基础、选评、设计和应用 [M], 北京: 中国电力出版社, 2010, 17-19
18. 金以慧. 过程控制[M], 北京: 清华大学出版社, 2003, 133-149
19. 边春元. 实例解析 S7-300/400 PLC 系统设计基础与开发技巧[M], 北京: 机械工业出版社, 2008, 245-267
20. 刘华波. 西门子 S7-300/400 PLC 编程与应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2011,

144-148

21. 陈章平. 西门子 S7-300/400 PLC 控制系统设计与应用[M], 北京: 清华大学出版社
2008, 44-99
22. 胡建. 西门子 S7-300 PLC 应用教程[M], 机械工业出版社, 2007, 123-145
23. Berger.H .著 张同庄 译. 西门子 S7-300/400 PLC 编程: 语句表和结构化控制语言描述[M], 北京: 人民邮电出版社, 2008, 221-235
24. F. G. Shinskey 著; 萧德云, 吕伯明译. 过程控制系统—应用、设计与整定 (第 3 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004, 18-26
25. 刘华波等. 组态软件 WINCC 及其应用[M], 北京: 机械工业出版社, 2009, 77-81
26. 刘鲁. 信息系统设计原理与应用[M], 北京: 北京航空航天大学出版社, 1999, 46-67
27. 罗跃川. 计算机网络技术及应用[M], 北京: 航空工业出版社, 1997, 321-323
28. 高传善等. 数据通讯与计算机网络[M], 北京: 高等教育出版社, 2000, 276-278.
29. 葛 薇, 朱张青. 模糊 PID 控制及其进展[J], 安徽职业技术学院学报, 2007, 6(4):9-11,19
30. 李丹, 谢植, 程杰. 模糊控制在温度控制系统中的应用与发展[J], 黄金学报, 2000, 2(4): 294-297
31. Edson Silva Cruz. Fuzzy Control in Green Anode Plant Mixers[J], Light Metals, 2004: 517-521
32. Wang L, Mendel J. Fuzzy basis functions, approximation, and or trogon least squares learning [J], IEEE Trans. on Neural Network, 1992, 3(5): 807-814.
33. Sugeno M, Yasukawa T. A fuzzy logical based approach to qualitative modeling [J], IEEE Trans on Fuzzy Sets, 1993, 1(1): 7-25
34. Zhang J.and Morris A. PID Controller [J], IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2004, 3(3): 244-261
35. 范文礼, 胡彦奎. 温度复合模糊 PID 控制系统与仿真[J], 电气传动自动化, 2008, 30(1):37-49
36. 徐华中, 曲 鑫. 蒸纱锅系统中模糊 PID 复合控制方法的应用[J], 武汉理工大学学报·信息与管理工程版, 2006, 28(2):14-16,24
37. 孙增圻, 张再兴, 邓志东. 智能控制理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997, 137-142
38. 王立新. 自适应模糊系统与控制[M], 北京: 国防工业出版社, 1995, 188-190
39. 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1996, 99-108
40. 郑雪梅, 姜成国, 周广铭. 模糊 PID 控制器结构[J], 大庆石油学院学报, 2000, (3):46-50
41. 谢书明, 柴天佑. 一种参数自适应模糊 PID 控制器[J], 信息与控制, 1998, (4):18-19

42. 傅京孙, 蔡自兴, 徐光佑编著. 人工智能及其应用[M], 北京: 清华大学出版社, 1999, 47-78
43. 刘美霞编著. 两种 FUZZY 控制方式在温度控制系统中的研究[J], 四川工业学院学报, 2003, (3): 64-66
44. 唯刚 陈绍炳编著. 模糊预估 PID 控制及其应用[J], 东南大学学报, 1998, (2):44-49
45. 师黎. 智能控制理论及应用[M], 北京: 清华大学出版社, 2009, 47-48
46. 刘金铨. 智能控制[M], 北京: 电子工业出版社, 2009, 50-55
47. 韦巍. 智能控制技术[M], 北京: 机械工业出版社, 2003, 112-158

致 谢

在东北大学攻读工程硕士研究生的学习过程中，我结识了许多学识渊博的老师 and 勤奋好学团结互助的同学们，这些都给我留下许许多多的美好记忆。通过这段学习，丰富了我的知识，开阔了我的视野，使我受益匪浅。首先，我要特别感谢我的导师——李鸿儒老师，感谢李老师在课题的研究过程中给予的谆谆教导以及无微不至的关怀和帮助。李老师的渊博的学识、严谨的治学态度、丰富的工作经验都是我学习的楷模。在此，我向李老师致以诚挚的谢意！

在论文选题、设计和完成期间，导师都给予了极大的关心和支持，在此，向他致以最衷心的感谢。

我还要感谢同事王建东、张海忠、王小川等，在本论文的设计和完成期间，他们用其丰富的学识和实践经验，给予了我极大的帮助与支持，使我受益匪浅。

我最后要感激我的家人，正是他们始终如一地支持和理解，才使我有足够的耐心和勇气去迎接未来的挑战。

在此，向所有关心和帮助过我的领导、老师、同学和朋友表示由衷的谢意！衷心地感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！