

## 摘 要

投药工序是给水处理中至关重要的一个环节，而长期以来如何实现投药的自动化是供水行业非常关注的课题之一。由于受到原水浊度、PH 值、配水流量、原水温度和其他水质污染的影响，投药絮凝过程是一个非常复杂的反应过程，为实现投药系统的自动化和降低混凝剂耗率，国内外相当多的科研机构 and 院校在进行投药机理和自动化处理的研究，主要有流动电流仪检测法（SCD）、现场模拟实验法、数学模型、显示絮凝控制法（FCD 法）等自动投药方式的研究和实验。

通过查阅大量国内外的文献资料，深入分析比较国内外重点研究的几种自动投药控制方式，同时结合成都市自来水六厂多年来在投药自动化方面实践和探索的经验，在本文中确定了应用数学模型建立投药自动化系统这一课题目标。

本文详细阐述了六厂数学模型自动投药系统建立的全部过程及研究成果。

(1) 选取适合六厂原水水质情况的混凝剂材料碱式氯化铝，减少由于药剂特异性对投药效果造成的影响。

(2) 建立 PLC 控制网络，实现计算机自动采集和储存水质参数功能，为模型的分析建立提供充分的数据资源。

(3) 建立了完善的投药硬件系统，如选用浊度仪、流量计和计量泵等关键设备，为实现投药系统的全自动控制提供必须的设备基础。

(4) 通过杯罐试验方法检验原始数据，找出影响投药量的要因；然后通过相关回归数据分析方法对各变量进行分析，建立以三阶方程为核心的数学模型。

(5) 最后通过 PLC 和 RSVIEW 软件编程实现系统的控制流程和计算机图形界面人机交互监控功能。

六厂实现数学模型自动投药后，在保证沉淀池出水浊度的情况下，混凝剂耗率得到了较大幅度的降低，达到了预期的效果。沉淀出水浊度合格率从 83.42% 提高到 92.23%，年平均提高 8.81%。该系统成为目前国内少有的真正实现了全自动投药的系统，其运行率高达 99.8% 以上。英国约翰夏水务局专家在参观了解了该系统运行情况后，认为其已经达到国外先进水厂同等水平。

关键词：混凝，投药，自动控制系统，流动电流，相关，回归，杯罐试验

## ABSTRACT

Coagulant Dosage Process is a very important procedure in water supply. How to implement the automation of coagulant dosage is one of remarkable tasks in water trade for a long time. Because of the influences of the turbidity, PH of raw water, current, temperature and the pollutions of raw water, the process of coagulant dosage is a very complex reaction. To find out the automation of coagulant dosage and reduce the cost of the coagulant, many domestic and international scientific research organizations make research into the theory and mechanism of automation of coagulant dosage, such as the Streaming Current Control method (SCD), the Emulation Experimenting method in spot, mathematics model, Flocculation Control Device (FCD).

After studying large quantity of data, combining with our experience, Water Plant Six of Chengdu City selected mathematics model to establishing Coagulant Dosage Automatic Controlling System.

The dissertation introduces the process how the Coagulant Dosage Automatic Controlling System was established and the result of research.

(1) Because different raw water need right coagulant PAC, we selected appropriate coagulant to fit into our condition.

(2) By establishing PLC control net, we can collect and storage data with computer, for mathematics model analyzing.

(3) The equipments, including the turbidimeter, flowmeter and metering pump was selected to establish the hardware system.

(4) By Coagulation-Flocculation Jar Test, we found out the pivotal element affecting coagulant dosage. Then, we used method for Correlativity and Regression analytical to analyze data. At last we successfully establish the mathematics model based on a three square equation.

After the system running, the cost of the coagulant got obviously lower, having come to the anticipant. The qualified rate of turbidity after deposition water increase from 83.42% to 92.23%, average heightened 8.81% yearly. The Coagulant Dosage Automatic Controlling System in Water plant six current rare and real realize the system of full-automatic control. Running rate of the system is above amount to 99.8%. The

experts of England John Summer Water Management Bureau think it has already attained the equal level abroad.

**Key Words:** Coagulant, Dosage, Automatic Controlling System,  
Streaming Current, Correlativity, Regression,  
Coagulation-Flocculation Jar Test

# 1 绪 论

## 1.1 问题的提出和研究的意义

### 1.1.1 问题的提出

成都市自来水总公司六厂位于成都市区西郊 27 公里的郫县三道堰镇，占地 300 余亩。设计供水能力为 60 万吨/天，分三期工程建成，每期工程日供水能力为 20 万吨。水处理工艺采用常规处理工艺，工艺流程为预沉-混合-絮凝-过滤-消毒-输水管线（工艺流程见图 1.1）。六厂最大的特点是利用地理位置高差，采用重力自流取水和送水，可以节约大量的电能。

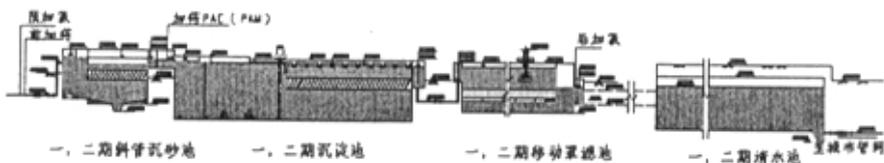


图 1.1 工艺流程图

Fig1.1 Working procedure

(1)在六厂运行初期，采用人工投药的方式，既由运行人员在现场操作设备，完成：提取原药到配液池—>向配液池放入清水并启动搅拌设备配置出一定浓度的药液->通过重力自流进行投加，投药的效果主要通过运行人员观察絮凝池的絮凝颗粒大小、絮凝颗粒层与水的界面、沉淀水和过滤水浑浊度、出厂水浊度检测值等进行控制。

我们在长期的运行过程中发现人工操作具有以下缺点：

A、 由于需要人对整个生产流程进行现场和观察，以及对设备进行现场操作，需要的劳动力资源较多，单人劳动强度较大；在夏季高浊度时期和供水量高峰期间，劳动强度更大，人为因素对投药可靠性和供水安全性的影响较大。

B、 人工进行配药，提药量和加水量不能精确计量，造成配药浓度不能准确控制，降低了投药的精确度和可靠性，既是对混凝沉淀效果和出厂水浊度控制的精确性。

C、 投药的依据主要是根据运行人员的目测结果和各自的经验判断，于是个人主观认识的差异性，造成不同的人投药量控制情况不同，药耗和成品水水质不稳定。

D、对于原水浊度突然变化情况（主要表现为浊度突然升高）的适应性差和

预防性很差,容易发生生产水质安全事故。

E、人工方式只适用于出厂水浊度合格标准要求较低(控制在1NTU以上)的情况。

(2)成都市自来水总公司六厂的原水取自岷江水系地表水,原水浊度随不同季节、特别是在洪水期的变化很大(可能从几个NTU突然上升到几千个NTU),为保证出厂水水质、避免水质事故的发生,建立一套高度可靠、高效率的自动投药系统势在必行。

建立自动投药系统有以下优点:

A、实现全自动投药和车间无人职守可以减少运行人员数量,降低个人劳动强度。

B、采用液位仪、流量计自动计量并实现自动配药,可以提高配药的精度,使配药浓度满足实际需要。

C、通过浊度在线检测仪表对沉淀水和滤后水浊度等过程参数以及出厂水浊度进行实时准确检测,确定实际需要的投药量,达到较准确的自动投加,在保证出厂水水质的情况下降低药耗。

D、通过对取水头部原水的预先检测,可实现对配液和投加需求的预测,因此可以提高对原水浊度突变情况的应急处理能力,提高供水安全可靠。

可见,采用自动投药方式可以提高供水水质和提高供水安全可靠,同时降低药耗、节约成本。

从1992年开始六厂逐步引入自动化的观念,同时开始逐步建立符合生产工艺需要的控制系统,实现部分设备的自动控制,投入运行了新的先进投药计量泵和浊度、流量检测设备,同时对生产水质提出了更高的要求:沉淀出水浊度在1-3NTU之间,合格率90%;出水浊度 $<0.5$ NTU,合格率99.5%。为提高供水质量,避免水质事故(出厂水浊度超过2NTU半小时为水质事故)的发生,建立一套高度可靠、高效率自动投药系统的工作进入了实际操作阶段。

### 1.1.2 研究的意义

由于受到原水浊度、PH值、配水流量、原水温度和其他水质污染的影响,投药絮凝过程是一个非常复杂的反应过程<sup>[1]</sup>,为实现投药系统的自动化和降低混凝剂耗率,国内外相当多的科研机构和院校在进行投药机理和自动化处理的研究。

采用投药数学模型的控制方式不受水厂规模大小的影响,只要建立了自动化控制硬件系统就可以实现,是解决SCD(流动电流仪)控制等控制方式控制滞后、精度较低等缺陷的极佳方案。从投资规模上看要略小于投资SCD规模,但可靠性和稳定性有较大提高<sup>[2]</sup>。

数学模型控制方式效果虽然好,但建立起来相对较复杂,不同地域、不同气

候、不同水源等条件下建立的系统有不同的要求，在学术界目前正处于积极研究的状态。本课题的成功开展，可以为数学模型控制方法的深入研究、大力推广起到积极作用，为投药自动化技术的发展开辟起到推动。

## 1.2 国内外研究的现状

由于受到原水浊度、PH 值、配水流量、原水温度和其他水质污染的影响，投药絮凝过程是一个非常复杂的反应过程，国内外相当多的科研机构 and 院校在进行投药机理和自动化处理的研究，目前主要有流动电流仪检测法（SCD）、现场模拟实验法、数学模型、显示絮凝控制法（FCD 法）、透光率脉动检测技术等自动投药方式的研究和实验。

### 1.2.1 流动电流仪检测法（SCD）

流动电流指胶体扩散层中反离子在外力作用下随液体流动（胶体固定不动）而产生的电流。SCD 法由在线 SCD 检测仪连续检测加药后水的流动电流，通过控制器将测得值与基准值比较，给出调节信号，从而控制加注设备自动调节混凝剂投加量<sup>[4]</sup>。

SCD 主要由检测水样的传感器和检测信号放大处理器两部分组成，其核心是传感器，传感器由圆筒和活塞组成（见图 1.2），此两部件之间为一环形空间，其间隙较小。投药后的水样流入环形空间，活塞以每秒数次的频率做往复运动，不断吸入和排除水样，水中的胶体颗粒则短暂地附着与圆筒和活塞的表面，活塞做往复运动时，环形空间内的水也随之做相应的运动，胶体颗粒双电层受到扰动，水流便携带胶体扩散层中反离子一起运动，从而形成流动电流，此流动电流由两段电极收集，经信号放大器放大，整流成直流信号输出。当加药量、水中胶体颗粒浓度和水量等变化时，最终反映出的就是胶体颗粒残留余电荷的变化即流动电流的变化，因此，可以用流动电流一个参数来控制调节混凝剂投加量，SCD 法也称为单因子控制法<sup>[12][13][14]</sup>。

SCD 法在生产运用中需要进行基准值的设定，一般的方法为：在相对稳定的原水水质和水量条件下，先投加足够量的混凝剂，随后逐渐减少投加量，同时测出沉淀池出水浊度，当出水达到即定的浊度目标时，将此时的 SCD 值设定为“0.00”

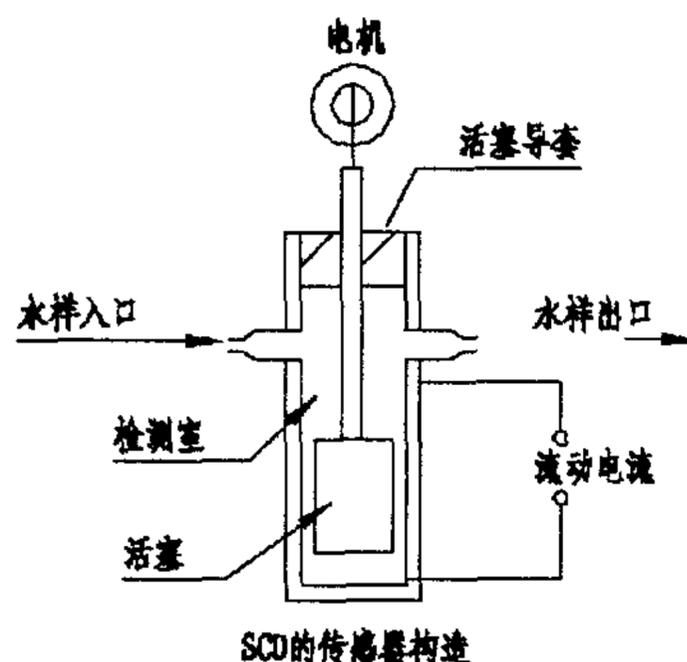


图 1.2 SCD 传感器的构造

Fig1.2 The structure of the SCD sensor

点,即为基准值。在运行中如果原水水质、流量等发生变化时,SCD 值就偏离基准值,SCD 输出信号给投药控制器,从而达到自动调节加量<sup>[19][25]</sup>。

根据近年来实际使用和实验结果,SCD 对原水浊度有一定的适应范围,基准点要随浊度变化及时调整;表面活性剂对流动电流也有干扰,即使其浓度很低 SCD 也无法进行控制;其他如油类、农药、原水盐类和 PH 值瞬时突变对 SCD 的控制精度都有较大影响;即使同一水源的季节性差异对 SCD 的使用效果影响也较大。另外,原水流量瞬时变化幅度较大时,SCD 值恢复到“基准值”的时间较长,这段时间的出水浊度会超出控制值<sup>[21][22]</sup>。

为了弥补单闭环 SCD 控制方式的不足,在众多的实验和应用中提出了原水流量前馈复合环控制的改进方法<sup>[5]</sup>,这里不再做详细介绍。

### 1.2.2 现场模拟实验法

现场模拟实验法是在生产现场建造一套小型装置模拟水厂生产构筑物的生产条件,找出模拟装置出水与生产构筑物出水之间的水质与加药量的关系,从而得出最优混凝剂投加量的方法。此种方法有模拟沉淀池法和模拟滤池法两种。

模拟沉淀池法是在水厂絮凝池后设一个模拟小型沉淀池(常用小型斜管沉淀池)。此方法已在上海、广州、武汉等部分水厂开始应用。模拟沉淀法的优点是解决了反馈信号滞后时间太长的问題,一般来说时间可缩短至 20 分钟之内。存在问題主要是模拟沉淀池与生产沉淀池的处理条件尚有差别,并还有一定时间的滞后。

模拟滤池法是模拟水厂混凝沉淀过滤全部净水工艺的一种方法。此方法上世纪 70 年代开始在美国等一些国家的水厂中开始运用。此方法的优点是把净水过程中的各种因素都考虑在内,比模拟沉淀池法更完善。主要不足是装置较复杂,运行技术要求比较高。此方法的关键仍是模拟装置与实际构筑物生产条件的相关程度<sup>[23]</sup>。

### 1.2.3 数学模型法

数学模型法是根据原水的相关水质参数,例如浊度、温度、PH 值、碱度、溶解氧、氨氮和原水流量等影响混凝效果的主要参数作为前馈值,以出水(沉淀后水)的浊度等参数作为反馈值,建立数学模型来自动调节加药量的方法。早期仅采用原水的参数称为前馈法,目前则一般采用前、反馈参数共同参与控制的闭环控制法<sup>[9]</sup>。

采用数学模型方法的关键是必须有大量可靠的生产数据,才能运用数理统计方法建立符合实际的数学模型。同时,由于各地各水源的条件不同和所采用混凝剂品种不同,因此建立的数学模型也各不相同。运用数学模型实现投药自动控制,可以采用以下几种方式:

A、用原水水质参数和原水流量共同建立数学模型,给出一个控制信号控

制投药设备的转速或冲程, 实现自动调节投药量;

B、用原水水质参数建立数学模型给出一个信号, 用原水流量给出另一个信号, 分别控制投药设备的冲程和转速, 实现自动调节投药量;

C、用原水水质参数作为前馈给出一个信号, 用沉淀水浊度作为后馈给出另一个信号, 分别控制投药设备的转速和冲程, 实现自动调节<sup>[3]</sup>;

D、用原水水质参数和流量建立数学模型, 用沉淀水浊度给出另外一个信号, 分别控制投药设备的冲程和转速, 实现自动调节。

#### 1.2.4 显示絮凝控制法 (FCD 法)

显示式絮凝控制系统(Flocculation Control Device), 简称 FCD。显示絮凝控制系统主要由絮体图像采集传感器和计算机两部分组成。图像采集传感器安装在絮凝池出口水流较稳定处, 水样经取样窗由高分辨率 CCD 摄像头摄像, 由 LED 发光管照明以提高絮体图像清晰度, 经视频电缆传送进计算机, 对图像进行处理以排除干扰, 改善图像的成像质量, 絮凝图像经放大在显示器上显示, 将图像进行计算机处理后得出每个絮体的大小和其他参数<sup>[30]</sup>。

FCD 控制的原理是依据絮体的沉淀特性用一个“等效直径”的代表性概念作为与沉淀水浊度相关的参量。在加矾技术上, 解决了非球体絮体状态的测量、计算和分析, 据此利用实测值与目标值比较后的偏差来自动调整混凝剂加注率(或加矾量); 同时, 又以沉淀池出水浊度的实测值与目标设定值比较后的偏差来自动修正絮体等效直径的目标值, 达到智能化控制。因此, 在应用中很明显地反映出: 絮体等效直径与加注率成正比, 而与浊度目标设定值成反比; 絮体等效直径与接触时间(反应池停留时间)成正比, 而与进水量成反比<sup>[31]</sup>。

絮体等效直径的实测值在加注率较稳定的情况下, 会因沉淀池进水量调整变化而出现明显的突变, 且成反比。主要是由于水量大小变化引起反应池流速和停留时间发生变化, 若进水量由小变大, 反应池流速相应地变快, 接触停留时间变短, 则絮体粒径实测值迅速变小。例如, 当沉淀池进水量按设计流量由流量增加 10% 时, 此时絮体粒径实测值变小约 0.02~0.05mm 左右, 粒径变小幅度的 5%~10% 左右。在此种情况下, 如絮体粒径的目标值不能同步或近似地响应调整, 则加注率的调整会发生误导, 可造成沉淀水浊度波动。若进水流量由大变小则出现相反情况。因此, 需要对流量系数、絮体粒径目标值的进行调整来实现对加注率的控制和调整, 以适应实际工况变化的需要, 并使加注率和沉淀水浊度在进水量变化时保持相对稳定。

絮体等效直径实测值与沉淀水浊度目标值的设定有关, 且成反比。浊度目标设定值小, 则絮体粒径实测值就大。因此絮体粒径实测值会因浊度目标值不同而不一样, 但实际生产中, 沉淀水浊度目标值往往是相对固定设置, 不会经常变化。

绒体等效直径的实测值、加注率与混合条件变化有关。当进水量、浊度目标值及加注率一定，混合条件较好时则绒体粒径实测值就大、加注率降低，即混合条件稳定则绒体粒径实测值也就相对稳定。反之，绒体粒径实测值会发生明显变化。这一点对保持系统运行的稳定性很重要，而在实际生产中过去往往容易忽视。显示絮凝控制法采用摄像分析新技术，将计算机科学中的图像处理技术应用在观测絮凝效果和控制投药量方面，以实现投药智能优化控制，保证水质和节约药剂耗用。这一投药系统比其他现有的投药系统具有：技术手段先进、可充分利用计算机技术已达到的图像处理和智能技术建立真正的投药自动化系统；通过大量的实时和历史数据分析处理，可获取最佳投药量；可通过连续采样，应付紧急情况，迅速调整投药量，防止水质事故的发生。通过把属于高科技的图像处理和智能技术拓宽到一个新的应用领域，使水处理自动化投药系统达到新的水平。不过目前该技术还处于实验尝试阶段，未得到推广应用<sup>[6]</sup>。

### 1.2.5 透光率脉动检测法

透光率脉动检测技术是由 Gregory 等人在 1984 年提出的一种新型的颗粒检测方法，它是一种在线光学检测装置，通过检测透过流动悬浮液的光强度的脉动状态反映絮凝后水中形成的絮凝体的生长情况，其检测参数少、灵敏度高、检测值  $R$  直接反映了水中的混凝效果。该项技术在 80 年代后期进入我国后，得到了广泛深入的研究，在许多领域中得到了应用，尤其在水处理混凝剂投加自动控制系统中更是取得了较大的成功。李圭白等人将其成功的应用到高浊度水的混凝剂投加系统中，并取得了较好的效果，可以说透光率脉动检测技术在高浊度水处理中的应用是该项技术最为成功的生产应用。而后该项技术在常规浊度水、矿井水、油田含油污水、超低浊度水以及水中病原微生物检测方面都取得了一定的成果<sup>[32]</sup>。

透光率脉动检测技术以透过流动悬浮液的光强度的脉动状态反映悬浊液中颗粒聚集状态和变化情况，其检测值可以作为反应混凝效果的指标来控制混凝剂的投加，在水处理的混凝剂投加自动控制方面得到了一定的应用，但对于常规浊度水，现行的控制系统和引水式管型传感器仍存在着一些不完善的方面。对此，一种新型的淹没式传感器和反应器被引入到控制系统中，研究表明：新型的淹没式传感器具有良好的控制性能，可以替代引水式管型传感器，同时淹没式传感器与反应器相配合可以解决现行系统在常规浊度水应用中的问题，使透光率脉动检测技术更加完善<sup>[29]</sup>。

大量的研究表明对于不同原水浊度的水样透光率脉动检测值与沉淀水浊度之间并不存在一一对应的关系。因此，在控制系统中，当原水浊度发生大幅度改变后，系统的设定值必须随之发生相应的变化，否则在一定的时间之后，沉淀水浊度会发生的变化会不利于控制。在夏季的洪水期，当原水浊度发生大幅度变化时，

需进行人工干预,对设定值进行人工调节,以防止控制系统不能及时的对药量作出调节,而影响出水水质。

从大量的试验中发现,对于相同的沉淀水浊度,一定的反应时间下的检测值与原水检测值的差与原水检测值的二分之三次方的比值,在不同原水浊度下相差较小。定义该比值为 $\beta$ 值,则以 $\beta$ 值替代 $R$ 值作为控制系统的控制参数可以消除原水浊度大幅度变化对系统设定值的影响,这已经在许多实验中得到了验证。

尽管透光率脉动检测技术在高浊度水处理的应用中取得了较大的成功,但在常规浊度水等水质的应用中仍存在着许多不完善的方面,使其自动控制效果受到一定的影响,其主要表现在以下几个方面:

(1) 由于水样具有一定的沉积特性,长期运行后容易在取样管中发生堵塞或部分堵塞现象,致使取样流量不稳定,检测值波动大,影响了控制效果。

(2) 引水式管型传感器采用取样管取样,无论是采用重力式还是采用泵取样方式,都增加了水样中絮凝粒子破碎的可能性,影响了检测的准确性。

(3) 对于常规浊度水等水质需要几分钟甚至十几分钟的絮凝时间才可以形成相当尺寸的絮凝体,因此,系统表现出相对较大的滞后时间。

(4) 在澄清池等水处理工艺中无法检测到具有一定尺寸的代表性的絮凝粒子颗粒,因此,该项技术无法应用于澄清池中。

### 1.3 混凝理论基础

六厂的投药水处理工艺流程包括混凝、絮凝、沉淀、过滤环节。

#### 1.3.1 混凝基本原理和主要影响因素

混凝是给水处理中的重要环节之一,也是本次论文重要研究的对象,混凝包括凝聚和絮凝两个阶段。在给水处理中,向原水投加混凝剂,以破坏水中胶体颗粒的稳定状态,使颗粒易于接触而吸附称为凝聚;在一定水力条件下,通过胶体以及其他微粒间的相互碰撞和聚集,从而形成易于从水中分离的絮状物质,称为絮凝<sup>[28]</sup>。

水中浊度是由细微悬浮物所造成,其分散度处于胶体状态时将产生最大的光散射,因而胶体物质是形成浊度的主要因素。原水中胶体物质可以长期处于稳定状态,很难靠重力自然沉降而得以去除,所以投加混凝剂可以使胶体的稳定状态破坏,聚集成较大的絮粒,从而易于从水中分离。所以混凝是去除浊度的主要方法<sup>[17]</sup>。

影响混凝的主要因素:

(1) 水温的影响:水温对混凝效果有明显的影响。水温低时,即使增加混凝剂的投加量往往也难取得良好的混凝效果,生产实践中表现为絮体细小、松散、

沉淀效果差。造成温度对混凝影响的重要原因是由于：

A. 无机盐混凝剂水解是吸热反应，低温时混凝剂水解困难。特别是硫酸铝，水温降低 10℃，水解速度常数约降低 2~4 倍。当水温在 5℃左右时，硫酸铝水解速度极其缓慢<sup>[20]</sup>；

B. 低水温的粘度大，使水中杂质颗粒布朗运动强度减弱，碰撞机会减少，不利于胶体颗粒脱稳凝聚。同时，水的粘度大，水流剪力增大，影响絮体的成长；

C. 水温低时，胶体颗粒水化作用增强，妨碍胶体凝聚，而水化膜内的水由于粘度和重度增大，影响了颗粒之间沾附强度。提高低温水混凝效果最常用的方法是投加高分子助凝剂，可对水中负电荷起粘结架桥作用，可提高絮体的密度和强度。

(2) PH 的影响：对于不同的混凝剂，水的 PH 值的影响程度也不同。铝盐和铁盐混凝剂，由于其水解产物直接受到水体 PH 的影响，所以影响程度较大，尤其如硫酸铝等的铝盐，对于聚合状态的混凝剂，如聚合氯化铝，其混凝效果受水体 PH 值的影响程度较小。

(3) 原水水质的影响：对于去除以浑浊度为主的地表水，重要的水质影响因素是水中悬浮物含量和碱度，水中电解质和有机物的含量对混凝也有一定的影响。水中悬浮物含量很低时，颗粒碰撞机率大大减小，混凝效果差，通常采用投加高分子助凝剂等方法来提高混凝效果。如果原水悬浮物含量很高，为了使悬浮物达到吸附电荷中和脱稳，铝盐或铁盐混凝剂的投加量将需要大大增加，为减少混凝剂，一般在水中先投加高分子助凝剂<sup>[26]</sup>。

(4) 原水中藻类的影响：藻类代谢产生的有机物对絮凝和过滤也有影响，其原因是该有机物中的酸性物质与混凝剂(铁盐或铝盐)的水解产物发生反应，生成的表面络合物附着在絮体颗粒表面，阻碍了颗粒相互碰撞，因此必须增加混凝剂的投量，补偿由于表面络合物的形成对颗粒脱稳和絮凝造成的影响<sup>[33]</sup>。

(5) 混合方式的影响：混合是将药剂充分、均匀地扩散与水体的工艺过程，是取得良好混凝效果的重要前提；影响混合效果的因素很多，如药剂品种、浓度、原水温度、水中颗粒大性质大小，但是采用的混合方式是最主要的影响因素<sup>[27]</sup>。

(6) 絮凝过程就是在外力的作用下，使具有絮凝性能的微絮粒互相接触碰撞，而形成更大的絮粒，一适应沉降分离的要求。在净水构筑物中，完成絮凝过程的设备称为絮凝池。絮凝过程在整个净水工艺中是一个十分重要的环节。而絮凝的效果是由絮凝方式决定。所以絮凝方式的选择对混凝效果的影响也是显著的。

### 1.3.2 预氧化处理原理

化学预氧化是通过在给水处理工艺前段投加氧化剂强化处理效果的一类预处理措施。化学预氧化目的主要是：除去微量有机污染；除藻；除臭味；控制氯化

消毒副产物；氧化助凝；除去铁锰。水六厂采用的是前加氯预氧化的工艺。所以这里主要介绍预氯化的原理。

氯是一种经济有效的消毒剂，在给水处理中得到了广泛的应用。氯除了作为消毒剂外，也被用作预氧化剂控制臭味、防止藻类繁殖、维护与清洗滤料、除去水中硫化氢、色度等。当水中藻类浓度较高时，预氯化能够促进混凝、改善过滤。预氯化可以破坏水中色度物质的发色基团，从而降低水的色度。预氯化对水中藻类有明显的灭活作用，能够促进混凝、沉淀、气浮和过滤等过程对藻类的去除率。

预氯化的弱点是氯与水中高浓度有机物作用生成多种卤代副产物，如三卤甲烷（THM）、卤乙酸（HAA）等<sup>[33]</sup>。

#### 1.4 杯罐（烧杯）实验方法

由于影响混凝过程的因素较复杂，理论上浊度、PH、温度等条件对投药效果都有影响，所以设计杯罐试验找出原水浊度、PH、温度等因素对投药量关系，尽量排除影响较小的条件，减少数学公式的输入变量，简化数学模型。

实验的基本设备包括提供混凝过程所需搅拌作用的搅拌器和盛水样的烧杯，因此称为混凝杯罐试验（coagulation-flocculation jar test），或简称杯罐试验（jar test）。1964年起美国材料试验学会（ASTM）把混凝杯罐试验列为暂行的标准实验，并规定水样容积为1000mL，搅拌器所产生的速度梯度G值为10~100s<sup>-1</sup><sup>[24]</sup>。

多位搅拌器（multiple stirrer）也称成组搅拌器（gang stirrer），是杯罐试验的关键设备。多位搅拌器设有4个或6个搅拌桨，但常用的多位搅拌器有6个搅拌桨，也可按所设桨的数目把它们分别称为四位搅拌器和六位搅拌器。ASTM采用六位搅拌器，搅拌桨尺寸为25mm x 75mm，转速范围为20~150r/min。

多位搅拌器必须具有下列性能：

- A、全部搅拌桨的启动、运行和停车必须完全同步；
- B、搅拌的转速必须能在一个范围内连续变化，并在不停车的情况下，全部搅拌桨必须能平稳地同步随时变速；
- C、当全部搅拌桨在水样容积相等的容积中，按集合尺寸相似的淹没条件进行搅拌时，对每个水样的搅拌输入功率必须完全相等；
- D、搅拌器的搅拌功率应能对水样产生范围为10~150S<sup>-1</sup>的速度梯度；
- E、在整个杯罐试验的搅拌过程以及试验的观察测定过程中，搅拌桨淹入水中部分的材料以及搅拌器的各种功能设计必须做到对水样的水质成分、水温在观察过程中不产生任何影响。

上述条件对一组水样同时进行杯罐试验的混凝效果，提供了可比性的依据。例如，当只变化每个水样的加药量或PH值，其他混凝条件完全相同时，每个水

样混凝效果的好坏必然是由于加药量或 PH 值的不同所造成。

### 1.5 本文研究的目的是内容

本课题主要是通过实现全自动投药、车间无人职守来减少运行人员数量，降低劳动强度。通过采用液位仪、流量计自动计量，在自动配药过程中提高配药的精度，使配药浓度较准确地满足实际需要。通过浊度在线检测仪表对沉淀水和滤后水浊度等过程参数以及出厂水浊度的实时准确检测，确定实际需要的投药量，达到较准确自动投加，在保证出厂水水质的情况下降低药耗。通过对取水头部原水的预先检测，实现对配液和投加需求的预测，提高对原水浊度突变情况的应急处理能力，保证安全可靠供水。

总而言之采用数学模型自动投药方式是为了提高供水水质和供水安全性，同时降低药耗、节约成本。

本文主要是结合成都市自来水六厂投药工艺流程的实际情况，通过实验方法确定影响投药混凝效果的主要因素。水六厂的原水取自岷江水系，原水的水质情况较好，有机物和重金属污染的情况少有发生，同时六厂采用预氯化处理方式，基本消除了原水中少量藻类对混凝效果的影响，所以本次课题中不考虑原水中有机物污染和藻类影响因素。另外，六厂的混合设备和絮凝工艺已经定型，在长期的运行实践中能够满足简单投药自动控制的需求，因此本文也未考虑它的影响。

由于杯罐模拟混凝和絮凝实验的结果与工艺池的实际运行效果有一定的差异，且实验取得的数据较为有限，难以进行可靠的数据分析，通过杯罐实验来确定工艺池的模型参数具有不太可行，所以我们运行杯罐实验采用排除法来获取一般规律。对于其他的如：原水 PH、原水温度、原水浊度、进水流量等参数中哪些才是与混凝剂投加量和混凝效果紧密相关的因素，则需要通过对六厂通过计算机自动控制系统自动采集的多年的大量的原始数据进行分析，以及通过设计杯罐实验等方法逐一进行筛选排除，最后找到影响混凝效果的要因。

在找到影响混凝效果的要因之后是运用相关分析和回归分析的方法对长期积累的原水浊度、进水流量、对应的混凝剂耗率、沉淀水浊度、滤后水浊度和出厂水浊度等数据之间的相关关系进行数学分析，建立起基于数学模型的配药和投药自动控制系统。

### 1.6 预期结果和意义

投药工序是水处理过程中两个最关键的环节之一，实现投药自动化首先可以确保沉淀出水浊度在设定的范围之内，避免因混凝效果不佳造成的水质事故。另外，投药自动化可以节约大量的药耗和制水工作人员。要保证出厂水浊度合格率

和提供优质的自来水以满足人民群众不断提高的需要，投药自动化的意义非常重大。

投药数学模型的建立不受水厂规模大小的影响，只要建立了自动化控制系统就可以实现，是解决 SCD（流动电流仪）控制和 FCD 控制不能实现的难题的极佳方案。从投资规模上看要略小于投资 SCM 规模，但可靠性和稳定性有较大提高。

运用相关回归分析优化投药数学模型，提高整个投药自动化系统的运行率，减少沉淀池出水浊度的振荡和波动，达到沉淀池出水浊度合格率（1-4NTU）高于 95% 的目标。在保证出厂水水质合格率和优质率的同时降低药耗。

## 2 数学模型建立分析

### 2.1 引言

六厂建立数学模型自动投药系统经历了多年的试验和建设,从 PLC、浊度仪、计量泵、流量计等建立投药自动化系统所必需的设备陆续安装投入使用和成熟运用,到初步实现简单闭环自动投药功能,乃至最后建立较成功数学模型自动投药系统,经历了一个长期的摸索过程。六厂是重力自流水厂,每日水量变化不大,目前的相关回归分析只分析原水每日平均浊度(单位:NTU)和混凝剂耗率(单位:公斤碱铝/千吨原水)之间的关系。在 2001 年前,由于数据采集源的限制,六个工艺系统(每个系统 10 万吨/天)都使用同一个数学模型公式。经过六厂自控系统和数据库的完善,目前可以统计出每个工艺系统原水浊度和混凝剂耗率之间的关系。

六厂每日原水平均浊度由配水网室的两台高、低浊度仪连续检测后根据特定的算法后以每 5 分钟采集 1 次的数据入数据库后 24 小时求平均值确定。

六厂每个工艺系统每日混凝剂耗率由该系统当日混凝剂耗量曲线求平均值得到。

接下来主要阐述建立六厂数学模型自动投药系统的具体情况。从下表可以简单了解六厂数学模型自动投药系统的建立过程。

表 2.1 系统建立进度表

Table2.1 The schedule of establishing the system

序号	项目	实施内容
1	选用混凝剂	结合水六厂原水水质等实际情况,选择了碱式氯化铝作为混凝剂。
2	建立硬件系统	结合六厂建立计算机自动控制系统的工作,建立完善了建立自动投药控制系统所需要的硬件系统,需用了先进可靠的仪表、配液和投药设备。
3	配液系统控制优化	优化现有配药程序,使配液系统实现配液智能化,达到根据原水浊度、配水流量、计量泵转速自动调节配液浓度的目标。
4	原始数据采集	采集原水浊度数据,并对应配水流量、沉淀出水浊度、药液量求出某一原水浊度和配水流量下药液的耗量从而达到控制沉淀出水浊度的目的。
5	要因选择	通过对计算机自动采集的数据和设计杯罐实验,找出影响投药混凝效果的主要因素。
6	建立并调试数学模型	通过相关回归分析,原始数据得出每套投药系统的拟合数学模型公式,从而利用数学模型公式实现投药自动化。
7	提高系统抗冲击能力	为提高系统对浊度突变等突发情况的应急处理能力,建立投药应急处理系统。

## 2.2 混凝剂材料选取

由于六厂原水浊度随季节和洪水的影响变化很大，选用混凝剂是 PAC。

碱式氯化铝聚合氯化铝的统称，简称 PAC，化学通式为  $AL_n(OH)_mCL_{3n-m}$ ，它是三氯化铝和氢氧化铝的复合盐。碱式氯化铝是一种无机高分子化合物，其组成随原料及制作方法的不同而已，为非单一固定的分子结构，而由各种络合物混合而成，例如， $AL_2(OH)_5CL$ 、 $AL_6(OH)_{16}CL_2$ 、 $AL_{13}(OH)_{34}CL_5$  以及  $[AL_2(OH)_5CL]_n$  等。

碱化度是碱式氯化铝的一个重要指标，用下式表示：

$$B = \frac{[OH]}{3[Al]} \times 100\% \quad \text{式 (2.1)}$$

一般来说，碱化度越高，其粘结架桥性能越好，但是因越接近  $[AL(OH)_3CL]_n$  而易生成沉淀，稳定性差。碱式氯化铝因具有良好的混凝效果，现已被广泛使用，尤其是对于处理高浊度原水；对于低温低浊度原水也有良好的处理效果。

碱式氯化铝具有以下特点：

A、碱式氯化铝用于高浊度水、低温低浊度水、有色水和微污染水，一般均能得到良好的絮凝效果；对原水的 PH 值、温度、浊度、碱度、有机物等的变化，均有较强的适应性。由于在混凝过程中消耗碱度少，适应 PH 范围比其他混凝剂宽。

B、处理高浊度原水，效果显著，适应性仅次于聚丙烯酰胺。

C、絮体形成快，颗粒大，密度高，易于沉降。

D、含  $AL_2O_3$  成分高，投药量少，可降低制水成本。

E、腐蚀性小，设备简单，成本低于三氯化铁。

毒性实验表明，其急性中毒的投加量很高，属于实际无毒产品，特性实验证明，无致畸性和致突变性。

## 2.3 自动投药系统硬件的建立

### 2.3.1 系统的原理设计

六厂先后进行了 SCD 单因子、沉淀浊度反馈和模拟沉淀池等自动投药控制方法的实验和尝试，都存在测试参数漂移、控制时间滞后和系统不稳定的问题，实验效果不够理想。

后来利用历史积累的原水浊度数据和对应时间的混凝剂耗率数据进行相关回归分析，找出了混凝剂耗率与原水水质的对应关系，建立了以原水浊度和流量、混凝剂耗率、沉淀水浊度为主要相关因素，以其他原水水质（氨氮、PH 值等）为辅助修正参数的高阶方程式，并以此为基础建立数学模型自动投药系统。

根据六厂的生产工艺特点及投药自动化系统改造前的工艺构筑物配置情况，

我们拟通过系统工艺改造建立如下图 2.1 所示的投药自动化系统。

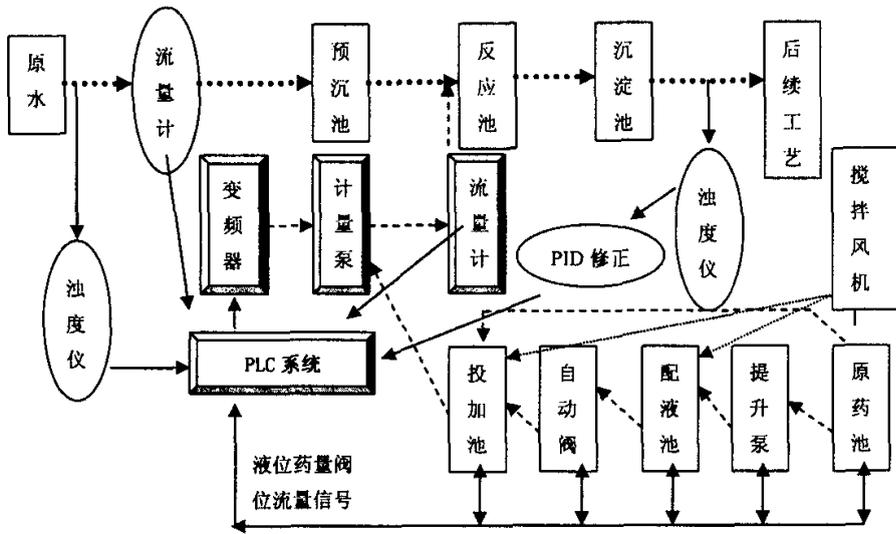


图 2.1 投药自动化系统原理及构成图

Fig2.1 The principle and structure of the system

该投药系统分为自动配液分系统和自动投加分系统。其中自动配液系统可分为主力配药系统和应急配药系统两个部分。该系统的作用是根据原水浊度、计量泵容量来配置出一定浓度的药液，在保证整个投药、混凝、沉淀工艺效果的前提下确保计量泵的负荷不过高或过低。系统包括：原药池（原药混凝剂为 10% 聚合氯化铝液体）、配液池、投加池、提升泵、自动阀、搅拌机、液位仪、流量计等构筑物和设备，系统可实现根据原水浊度和计量泵转速要求给定的任意浓度混凝剂的配置和浊度突变时的应急处理。

自动药液投加系统控制的主要作用是根据配药浓度、原水浊度、工艺池进水流速、沉淀池出水浊度来控制药液的投加量，确保沉淀池出水浊度在 1-4NTU 之间。系统包括：PLC 系统、变频器、计量泵及附件、投加流量计、原水流量计、原水浊度仪和工艺构筑物等，系统可实现任意浊度和流量的混凝剂手自动准确投加<sup>[15][16][18]</sup>。

### 2.3.2 配液系统的建立

从上图 2.1 可以看出，全自动配液系统的工作原理和过程是：当系统接收到改变配液浓度的指令后，计算各配液池、投加池中实际含药量和含水量，再根据所要求的药液浓度计算出所需配制的原药量或水量。计算完毕后，PLC 控制提升泵和电磁（动）阀依次为各配液池、投加池投加原药或清水，最后再打开空气搅

拌系统进行搅拌。该系统成功运行后，实际上可以实现使用配药池配药同时也可以避开配液池的配液过程而直接采用投加池进行配液和投加。但按正常的配液配液程序配液完毕后再将药液投入投加池可以避免计量泵吸入气泡，同时避免药液在投加池配制过程中药液浓度的不可预知性和波动，所以我厂拟在正常生产状态用配液池配液，当浊度突变和变化配液浓度时则采取投加池配液的方法。

### 2.3.3 重要设备介绍

投药系统的主要工艺构筑物设计有 6 组 PAC 原液池、2 组配液池和 5 格投加池，配液池和投加池设计为高位池，配好混凝剂可以通过重力方式经投加池向工艺池投加。

投药系统硬件设备包括：提升泵、电动（电磁）阀、搅拌风机、液位仪、流量计、PLC 系统、变频器、计量泵。

系统中关键的设备是计量泵。

#### (1) 混凝剂的配置与投加

净水厂混凝剂一般采用湿式投加，起系统包括药剂溶解、培植、计量和混合等，如图所示。当采用液体混凝剂时可不设溶解池，药剂储存于储液池时可不设溶解池，药剂储存于储液池（即原液池）后直接进入溶解池（即配液池）。

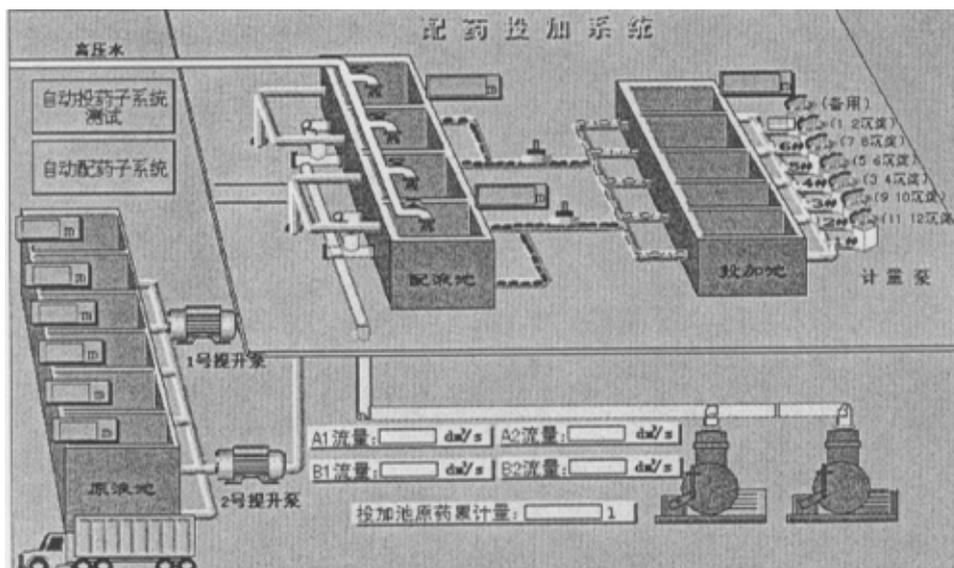


图 2.2 配液投加系统结构

Fig2.2 The coagulant dosage system

药剂的投加可以采用重力投加，也可以采用压力投加，一般以采用压力投加较多。

重力投加系统需设置高位溶液池，利用重力将药液投入水肿。溶液池与投药点水体水位高差应满足克服输液管的水头损失并留有一定的余量。中立投加适于中小型水厂，投加点教集中且背压一直的场合。重力投加书页管不宜过长，并力求平直，以避免堵塞和气阻。

压力投加可采用水射器和加药泵两种方法。利用水射器投加具有设备简单、使用方便、不受溶液池高程所限等优点，但效率低，并需另外设置水射器压力水系统，投加点背压不能大于 0.1Mpa。

加药泵投加通常采用计量泵。计量泵同时具有压力输送药液和计量两种功能，与加药自控设备和水质监测仪表配合，可以组成全自动投药系统，达到自动调节药剂加量的目的。目前常用的计量泵有隔膜泵和柱塞泵。采用计量泵投加具有计量精度高，加注量可调节，不受加压点背压所限等优点，适应于各种规模的水厂和各种场合，但计量泵价格较高。

#### (1) 提升设备

有搅拌池或储液池到溶液池，以及当溶液池高度不足以重力投加时，均需设置药液提升设备，最常用的是耐腐蚀泵和水射器。

#### (2) 投加计量设备

常用的投加计量设备有计量泵、转子流量计、孔口、浮杯。此外，尚有虹吸计量、三角堰计量等，但较少采用。计量泵由于计量精确度高、可实现自动调节投加，尽管价格高，系统较复杂，仍被广泛采用。

最常用的加药计量泵为隔膜式计量泵，其基本部件和作用如下：

A、驱动器：常用为电动机，为了能改变转速从而达到调节加药量，可采用变频调速电机；

B、齿轮机构：将电动机的转速转变成可往复运动的冲程；

C、活塞：有活塞通过腔内的液体或者有活塞直接推动泵头中的隔膜做往复运动，从而吸入，排除液体。

D、泵头：包括隔膜、吸入口和排除口的球型单向阀。当隔膜后退时，吸入口单向阀打开，同时排除口单向阀关闭，吸入溶液至泵头内；当隔膜前进时，吸入口单向阀关闭，同时排除口单向阀打开，将泵头内的溶液压出泵头。由于在一定的活塞冲程长度条件下，泵头内体积固定，因而每一次吸入、排除溶液体积也不便，达到定量加注药剂的目的。

E、冲程调节器：用来调节冲程的长度，一般在泵体上设有调节旋钮，可手动调节，也可附配冲程长度调节伺服电机等实现自动调节。

计量泵具有通过改变电机转速（即改变冲程频率）或改变冲程长度来调节加注量的功能。设计和生产中可按照水厂净水和加药的工艺要求，合理确定调节方式。

表 2.2 投药数学模型设备一览表

Table2.2 Equipments in the coagulant dosage system

序号	名称	规格	型号	生产厂家	单位	数量	功能	备注
1	电磁流量计	DN25	F30P25	德国E+H	台	1	测量投加流量	
2	电磁流量计	DN40	F30P40	德国E+H	台	5	测量投加流量	
3	PLC模拟量输入板		1771-IFE	美国A-B	个	2	流量、浊度信号采集	
4	PLC数字量输入板		1771-IMD	美国A-B	个	1	阀门等的控制信号采集	
5	PLC数字量输出板		1771-0MD	美国A-B	个	1	阀门等的控制	
6	电动阀门	DN50		德国+GF+	个	1	排泥	

## 2.4 原水参数和投药参数的收集

我厂各类仪器设备的配备率和运行率都很高，建立数学模型的 PH、原水浊度、配水流量、沉淀出水浊度、滤后水浊度等参数都能够实现自动采集。另外，我厂的投药系统经过改造以后已经可以实现远地手自动切换、中心控制室的远地调速、各类控制设备的启闭、各类控制参数的监测等各种功能。以上设备的可靠运行和系统设计的功能为建立投药自动控制数学模型打下了坚实的基础。

自 98 年底投药系统中心控制改造完毕后，我厂就开始进行了建模所需的数据收集工作。由于我厂每日的供水量变化不大且各工艺统都在额定负荷状态下工作，另外本厂 99 年沉淀出水合格率和出厂水合格率都在 85%以上，由此我厂可以通过原水浊度和千吨水耗率之间的关系建立数学模型。为此，我厂的工程技术人员收集了 1999 年 1 月至 12 月该厂每日的原水浊度平均值与混凝剂千吨水耗率的统计数据，并通过数学模型公式的推导，从而建立原水浊度平均值与千吨水耗率的模型公式。从理论上讲，知道某种原水浊度就可以通过运算求出千吨水耗率，再乘以配水流量就可以得出混凝剂加量，再通过变频调速和流量计控制加量，最终实现药液的自动投加。

系统采用控制数据见表 2.3

表 2.3 投药系统采集的数据表

Table2.3 The data table collected in the system

序号	名称	单位	量程	信号	安装位置	PLC子站
1	原水高浊度	NTU	0-2000	模拟量	取水头部	取水头部
2	原水低浊度	NTU	0-100	模拟量	取水头部	取水头部
3	原水PH值			模拟量	取水头部	取水头部
4	原水高浊度	NTU	0-2000	模拟量	配水网室	配水网室
5	原水低浊度	NTU	0-100	模拟量	配水网室	配水网室
6	原水PH值			模拟量	配水网室	配水网室
7	原水温度		0-50	模拟量	配水网室	配水网室

8	1、2#沉淀池进水流量	km <sup>2</sup> /h		模拟量	3、3#沉淀池	就地站
9	3、4#沉淀池进水流量	km <sup>3</sup> /h		模拟量	3、4#沉淀池	就地站
10	5、6#沉淀池进水流量	km <sup>3</sup> /h		模拟量	5、6#沉淀池	就地站
11	7、8#沉淀池进水流量	km <sup>3</sup> /h		模拟量	7、8#沉淀池	就地站
12	9、10#沉淀池进水流量	km <sup>3</sup> /h		模拟量	9、10#沉淀池	就地站
13	11、12#沉淀池进水流量	km <sup>3</sup> /h		模拟量	11、12#沉淀池	就地站
14	1#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	1#沉淀池出水	1期程控
15	2#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	2#沉淀池出水	1期程控
16	3#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	3#沉淀池出水	1期程控
17	4#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	4#沉淀池出水	1期程控
18	5#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	5#沉淀池出水	2期程控
19	6#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	6#沉淀池出水	2期程控
20	7#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	7#沉淀池出水	2期程控
21	8#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	8#沉淀池出水	2期程控
22	9、10#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	9、10#沉淀池出水	3期程控
23	11、12#沉淀池出水浊度	NTU		模拟量	11、12#沉淀池出水	3期程控
24	1#原药池液位	米	0-5	模拟量	1#原药池	投药站
25	2#原药池液位	米	0-5	模拟量	2#原药池	投药站
26	3#原药池液位	米	0-5	模拟量	3#原药池	投药站
27	4#原药池液位	米	0-5	模拟量	4#原药池	投药站
28	5#原药池液位	米	0-5	模拟量	5#原药池	投药站
29	6#原药池液位	米	0-5	模拟量	6#原药池	投药站
30	1、2#配液池液位	米	0-2	模拟量	1、2#配液池	投药站
31	3、4#配液池液位	米	0-2	模拟量	3、4#配液池	投药站
32	1#投加池液位	米	0-2	模拟量	1#投加池	投药站
33	2#投加池液位	米	0-2	模拟量	2#投加池	投药站
34	3#投加池液位	米	0-2	模拟量	3#投加池	投药站
35	4#投加池液位	米	0-2	模拟量	4#投加池	投药站
36	5#投加池液位	米	0-2	模拟量	5#投加池	投药站
37	1#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	1#工艺	就地站
38	2#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	2#工艺	就地站
39	3#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	3#工艺	就地站
40	4#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	4#工艺	就地站
41	5#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	5#工艺	就地站
42	6#工艺投药流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	6#工艺	就地站
43	1#配液流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	1#配液池	投药站
44	2#配液流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	2#配液池	投药站
45	3#配液流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	3#配液池	投药站
46	4#配液流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	4#配液池	投药站
47	应急系统药液提升流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	应急系统	投药站
48	应急系统高压水流量	m <sup>3</sup> /s		模拟量	应急系统	投药站

## 2.5 实验确定影响投药效果的要因

水六厂在完全建立计算机自动控制系统之后,通过现场 PLC 子站将原水的 PH、温度、浊度、并对应配水流量、混凝剂投加量、沉淀出水浊度、滤后水和出厂水浊度等参数,采集频率为每个参数每 5 分钟采集一个数据,数据积累达到三年以上。但在如此众多的数据中选出数学模型的控制参数,需要通过分析数据和设计实验来完成。所以,我们进行了相应的实验分析工作。

### 2.5.1 杯罐实验的仪器和设备

#### A、 2100AN 台式浊度仪:

测量范围:	精度
<1NTU	小数点后三位;
1~10NTU	小数点后二位;
10~100NTU	小数点后一位;
100~10000NTU	整数。

#### B、 DC-506 型实验搅拌机

搅拌直径: 70mm;  
桨页宽度: 30mm;  
转速: 20~600 转/分;  
时间设置范围: 0~99 分 59 秒;  
速度梯度 G 值: 4 个段/次;

### 2.5.2 杯罐实验方案

#### (1)、温度影响实验:

由于基于环境和实验条件的制约,以及排除原水浊度等其它因素的影响,实验选用同一原水为一组,多组实验结果进行统计,以取得不同水温对混凝沉淀的影响。

实验周期长达 77 分钟,室温和水温相差较大,混凝时温度控制较难。虽对实验结果有明显的影晌,但仍可反映一定的规律。

- 取原水 10L 混合均匀后分为两份,一分放入冰箱冷至 4℃左右。
- 两份水样各自充分混合后,配成不同水温的水样。一般在 4℃-20℃之间取 5 个温度。
- 按照烧杯实验的方法和条件进行实验,得到水温对混凝效果的影响规律。

#### (2)、PH 影响实验:

从三年的原始数据可以看到,我厂原水多年 PH 变化不大,可忽略其对混凝沉淀的影响。

### 2.5.3 PH 和温度对混凝沉淀影响的分析

给水经典理论认为：当水温低时，尽管投加大量混凝剂也难获得良好的混凝效果，使絮凝体形成缓慢，絮凝颗粒细小、松散。为提高低温水混凝效果，常用方法是增加混凝剂投加量和投加高分子助凝剂。但其混凝效果仍不理想，故低温水的处理需进一步研究。

我厂原水水温变化较大，大约在  $4^{\circ}\text{C}$ —— $21^{\circ}\text{C}$  范围内。我厂实际生产情况也与此相符，在原水浊度相同季节不同即水温不同时，低水温的原水混凝剂耗量增加明显，且变化混凝剂投加量时，对沉淀水浊度影响缓慢。但在低温水时通过保证卧搅和增加立搅的手段，使低水温的混凝和沉淀效果有较可靠的保证。从而可证实低水温水难制的重要原因：低水温水粘度大，布朗运动减弱，碰撞机会减少，不利于胶粒脱稳凝聚，影响絮状体的成长。因此，水温对混凝效果影响这一问题，可以通过使用搅拌设备辅助增加胶体布朗运动的方法进行排除。从最后实验效果来看该方法基本可以排除温度因素的影响。

另一方面我厂的 PH 值变化范围不大，一般在 7.8——8.3 之间，且由于 PH 影响  $\text{Al}^{3+}$  的水解聚合反应，而聚合氯化铝在制造中已发生水解聚合反应，聚合物形态基本稳定，使其混凝效果受水的 PH 值影响较小。

## 2.6 数学模型的建立

### 2.6.1 相关回归分析原理

回归分析是研究变量关系的一种常用统计方法。在进行数据处理，寻求经验公式，制定规范，探索新配方与工艺、生产中的质量控制与预报，以及建立自动控制的数学模型方面是一种行之有效的数学工具<sup>[8]</sup>。

相关变量是在自然界大量存在的，变量间相互关联而不能用确切的函数表达的相关变量，他们之间不存在“一个取决于另一个”的确定关系。相关分析就是用来确定变量之间关联程度的手段。在相关分析中，要求个变量应按他们出现时的情况测得，而不是把一个变量固定在预定的水平上。如误差分析时，两个变量都必须假定其为正态分布，及相关方法不能用来建立自变量固定时的函数关系，它只能给出变量之间密切相关的程度，而不暗示其因果关系。但是事物的发展是由“量变到质变”，变量间的函数关系，往往是通过研究其相关关系而揭示出来的。相关分析和回归分析是不可分割的方法<sup>[8]</sup>。

回归分析就是用来确定变量间函数关系的方法。进行回归分析的主要步骤是：建立经验公式——验证公式的合理性——制定合理的生产工艺参数——进行生产中的预报和控制。在实际问题中，变量之间的关系往往是非线性的，因此我们采用一元非线性回归分析方法对数据进行分析<sup>[8]</sup>。

一元非线性关系, 可用下列回归方程表达

$$\hat{y} = a + b_1x + b_2x^2 \quad \text{二阶 (或抛物) 曲线 式 (2.2)}$$

$$\hat{y} = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 \quad \text{三阶 (或三次) 曲线 式 (2.3)}$$

$$\hat{y} = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + \dots + b_nx^n \quad \text{n 阶 (或 n 次) 曲线 式 (2.4)}$$

这里可用最小乘二法来估计回归参数  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3 \dots b_n$ , 也可以推倒出一组正规方程为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum y = na + b_1 \sum x + b_2 \sum x^2 + b_3 \sum x^3 \quad \text{式 (2.5)} \\ \sum yx = a \sum x + b_1 \sum x^2 + b_2 \sum x^3 + b_3 \sum x^4 \quad \text{式 (2.6)} \\ \sum yx^2 = a \sum x^2 + b_1 \sum x^3 + b_2 \sum x^4 + b_3 \sum x^5 \quad \text{式 (2.7)} \\ \sum yx^3 = a \sum x^3 + b_1 \sum x^4 + b_2 \sum x^5 + b_3 \sum x^6 \quad \text{式 (2.8)} \end{array} \right.$$

通过联解这一正规方程, 可以算出回归系数  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 。

接下来进行相关性检验:

$$\rho = 1 - \sqrt{\frac{S_{y \cdot x}^2}{S_y^2}} \quad \text{式 (2.9)}$$

公式中  $S_y$  为  $y$  的样本标准差;  $S_{y \cdot x}$  称为估计量的标准差,

$$S_y = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}; \quad \text{式 (2.10)}$$

$$S_{y \cdot x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-3}} \quad \text{式 (2.11)}$$

这里求  $S_{y \cdot x}$  所用公式中  $n-3$ , 其中 3 表示所估计的回归参数的数目。

## 2.6.2 数据处理和模型建立

通过数据分析和实验排除, 最后确定了以原水浊度和混凝剂耗率两个相关参数作为相关回归分析的对象, 数据处理和公式推导请参考附录 A。

我们分别对六厂一、二、三期的六组工艺池的混凝剂参数进行了推导, 发现各组工艺池的三阶公式各不相同, 但它们通式如下:

$$\hat{y} = Ax^3 - Bx^2 + Cx + D \quad \text{式 (2.12)}$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为各不相同的常数。这说明各组工艺池由于工艺池工艺特

性差异、进水分配差异、混合效果差异、絮凝效果差异等因素的影响，造成个组工艺池模型公式的差异。

该公式的具体分解实现，以及通过控制流程的解释见后面的控制流程原理。

## 2.7 投药应急系统的建立

随着投药数学模型在我厂的运行，我厂的配液系统在当初设备选型、设计施工中的一些问题逐渐暴露出来。由于设备和功能上的缺陷，使得我厂的配液系统的配液浓度不够稳定，同时原水浊度突变时甚至可能造成投药量不足的现象。为确保我厂配液系统的配液精度，同时应付原水浊度突变所造成的投药浓度不足的欠投药状态，我厂拟对配液系统进行改造，最终达到配液系统的自动智能化，配制出符合要求的药液。

从我厂投药配液系统运行的情况来看，主要存在配液浓度改变不及时和浓度不精确的问题。下面分别描述这两个问题，并最终得出解决这些问题的方案。

### (1) 原水浊度突然增加时，投加池配液浓度无法及时改变

从我厂投药配液系统的工艺和控制结构可以看出，原药经提升泵提升到配药池后与清水混和搅拌后由电动阀投入投加池，也就是说投加池的药液浓度取决于配液的浓度。当原水浊度突然暴涨时，比如从 50NTU 涨到 2000NTU，为保证投加到反应池中的药量，此时一方面计量泵的转速升高，但由于计量泵的投加量最高为 300 升/小时，如果以 50NTU 时的配液浓度（比如 5% 的质量百分比浓度）计算，我厂每小时 6000 吨水的投药量仅为  $3000 \times 5\% = 150$  升，以比重 1.26kg 计算，此时药耗约为  $150 \times 1.26 / 6 = 31.5 \text{kg/kt}$ ，而根据我厂以前的统计和经验，如此高浊度的原水药耗一般在 50 kg/kt 以上，因此当高浊度来临时，我厂的投药是处于欠投药状态。从另一方面来说，我厂取水头部安装有原水浊度仪，其测试值较厂内原水浊度仪提前 30 分钟，但我厂的配药系统看，一来投加池的液位在 90~125 厘米之间，二来配药时间一般需要 45 分钟，也就是说高浊度来临时，再改变配药浓度进行配药也根本无法满足工艺上所需要的及时提高配药浓度的要求。第三，从我厂配药工艺流程可以看出，配液池流出的药液并不是均匀的流向各投加池，而是从 1#、3#、5# 投加池通过底部的连通管流向其他三个投加池，这样即使 1#、3#、5# 投加池的药液浓度可以随配液浓度及时改变，但其他两个投加池却由于底部连通作用，其投加浓度仍将保持原来的值很长一段时间，这样既造成投药实际不足，同时也无法准确计量药液的实际投加量。

### (2) 改变配液浓度时，各投加池浓度无法计算

由于我厂各工艺池运行参数不一致，同时也可能遇到部分工艺池停池的现象，这样势必造成各工艺池药耗量的一致。由于各投加池底部连通，药液通过

连通管互相渗透，当浓度变化后的药液从1#、3#、5#投加池进入时，2#、4#投加池的药液还是维持原来的浓度。当2#、4#的原有药液用过一段时间后，新的配液浓度的药液与原有药液混合后，其准确浓度根本无法计算，同时2#、4#投加池真正到达现有配液浓度的时间也无法计算，这给我厂的自动投药数学模型的准确运行带来很大的困难。

为完善我厂的投药配液系统，我厂拟对该系统进行功能改造工作。具体方案增加一套由原液池直接提升药液到投加池的提升、控制和计量装置。下图为该系统改进后的配置原理图（图 2.2）。

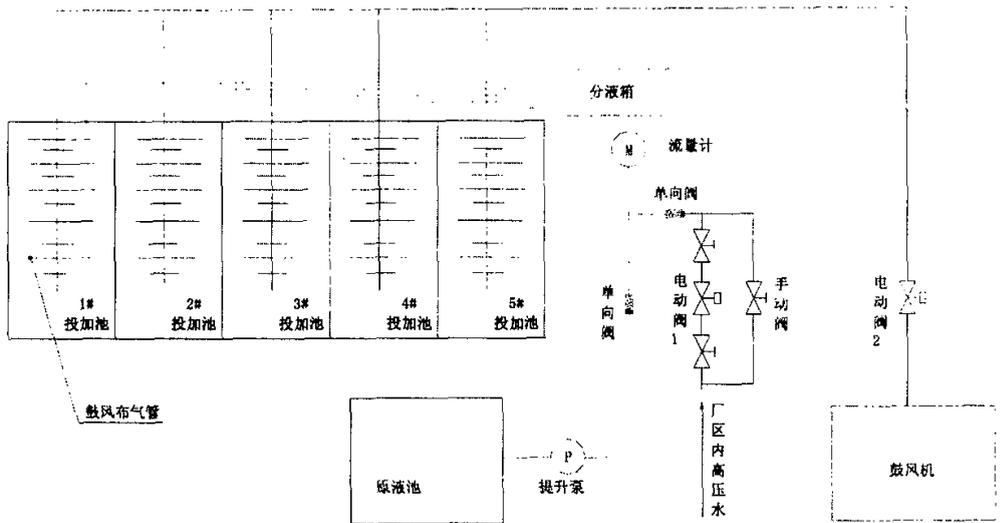


图 2.3 应急系统配置及原理图

Fig2.3 The structure and principle of the treating emergency system

其工作原理和过程是：当系统接收到改变配液浓度的指令后，计算各投加池中实际含药量和含水量，再根据所要求的药液浓度计算出所需配制的原药量或水量。计算完毕后，PLC 控制提升泵和电磁（动）阀依秩为各投加池投加原药或清水，最后再打开空气搅拌系统进行搅拌。该系统成功运行后，实际上可以避开配液池的配液过程而直接采用投加池进行配液和投加。但配液完毕后投入投加池可以避免计量吸入和浓度的稳定性，所以我厂拟在正常生产状态用配液池配液，当浊度突变和变化配液浓度时则采取投加池配液的方式

## 2.8 系统技术特征

### 2.8.1 配液自动化

投药自动化系统建立后，配液系统可以实现中心控制室设定浓度和依据原水

浊度和计量泵转速自动运算的全自动配液方式，同时还可以根据配液情况自动计算出投加池中的药液浓度，为药量的定量投加提供了依据。

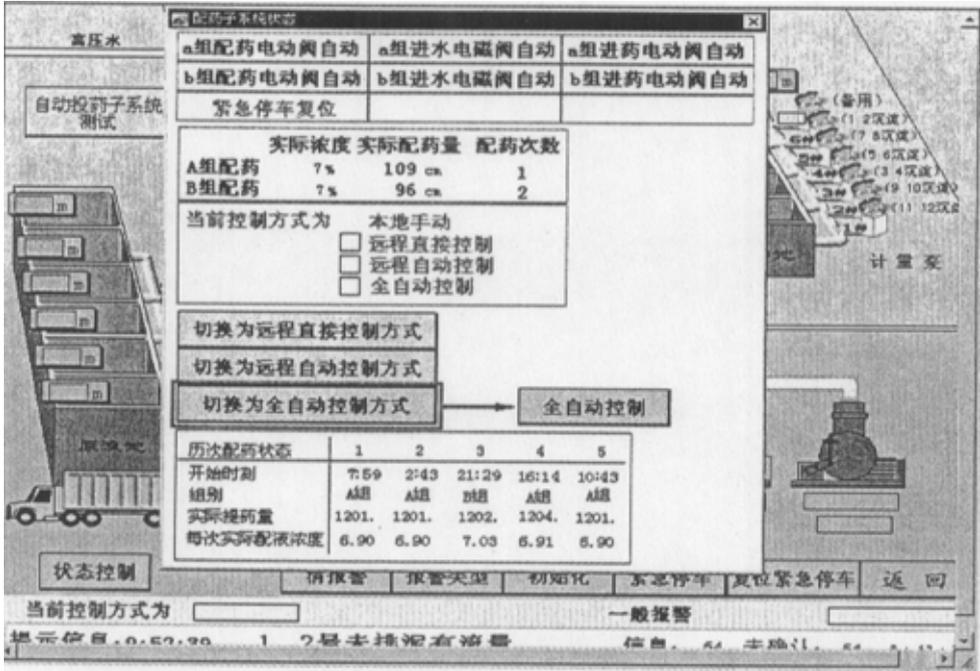


图 2.4 配液系统操作界面

Fig2.4 Dosage system working interface

从配液系统操作界面上可以看出，通过全自动配液系统的运行，各组配液池的配液精确度在 0.1%以内，足以满足药液的精确投加。

### 2.8.2 投加自动化

2000 年 1 月至 10 月中旬成都自来水六厂投药系统以中心控制室调速远动控制；2000 年 10 月中旬以后，实现了投药系统以数学模型方式全自动投加。

图 2.5 是成都市自来水总公司六厂投药数学模型运行较典型的状态效果。从图中可以看出沉淀出水浊度都控制在允许的范围之内，而单个系统的耗率却存在较大范围的差别，说明沉淀浊度负反馈起到了作用。

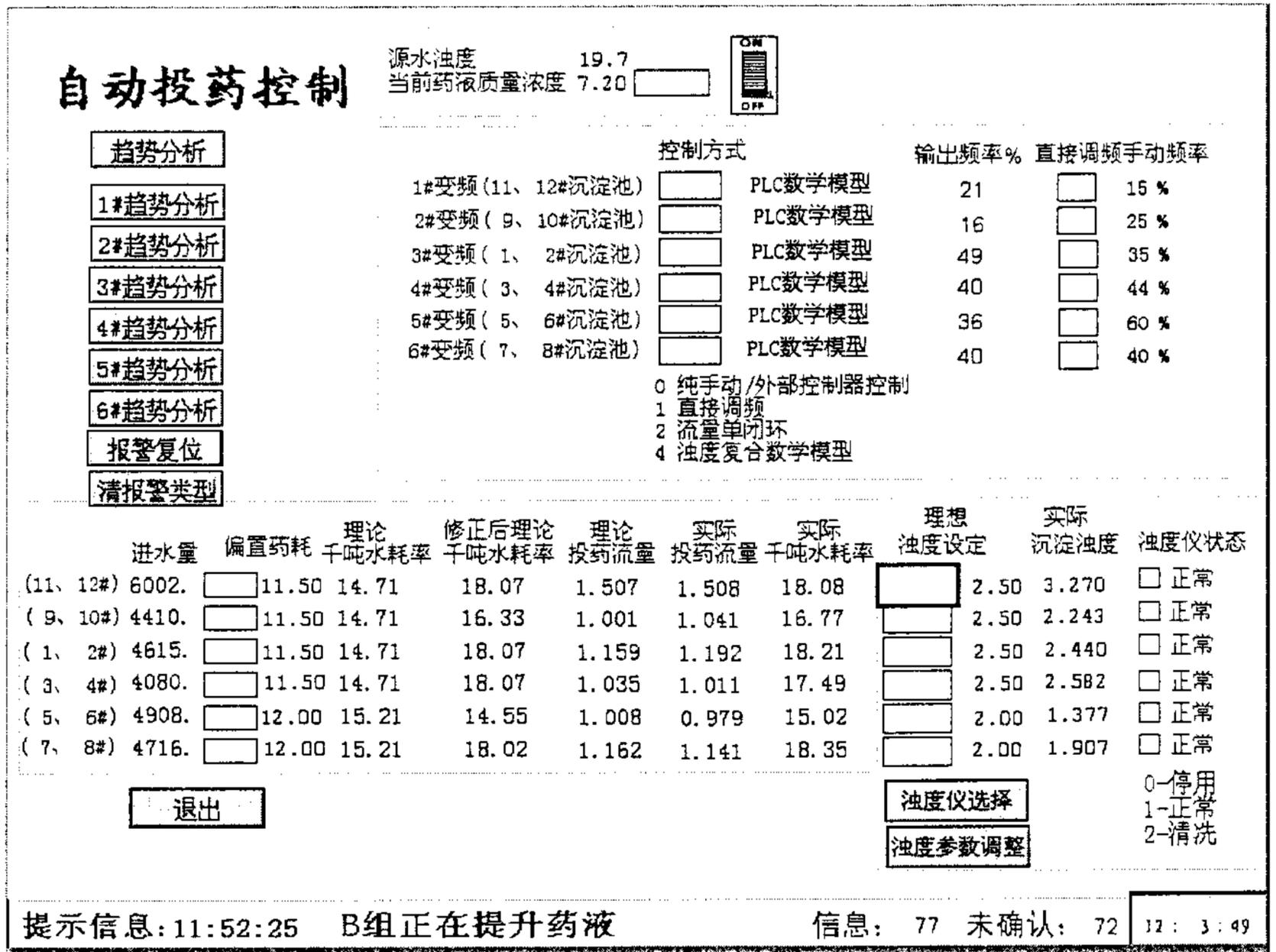


图 2.5 投药数学模型运行界面

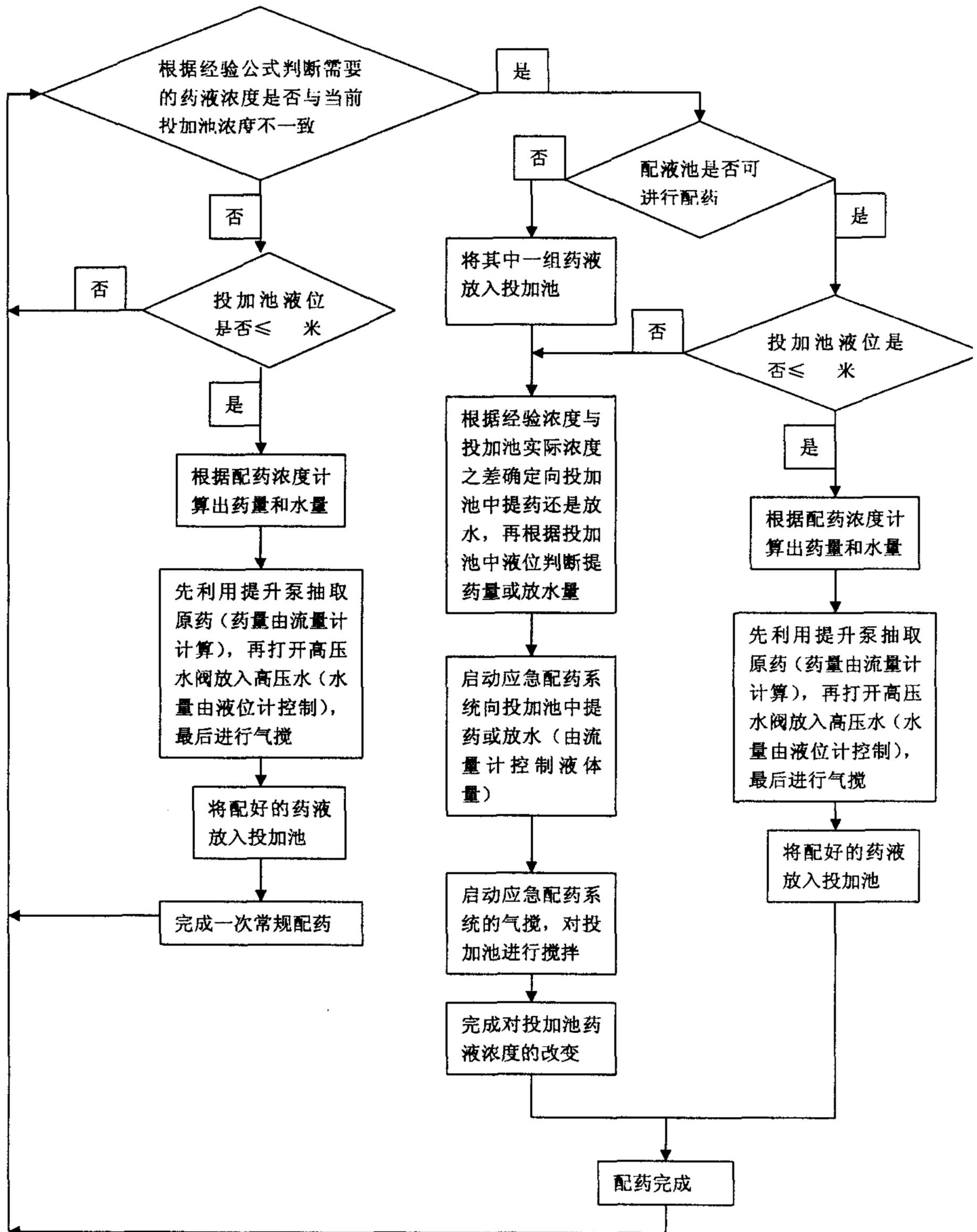
Fig2.5 Coagulant mathematical model running interface

### 2.8.3 智能的应付浊度突变的浓度变化能力

当原水浊度变化范围不大时，根据原水浊度值、投加量和计量泵的转速很容易确定优化的配液浓度，但当原水浊度因洪水等原因骤变时，由于千吨水耗率快速增加，如果此时投加的药液浓度不变或增加缓慢，计量泵将为保证药液投加量调高转速到高速运转直至极限而造成欠投药状态。为此，可以在取水上游建立原水检测点，通过提前二十分钟左右的预警作用及时调整配液浓度以保证充足的药液投加量和计量泵良好的工况。如果无法在取水上游建立原水检测点时，为应付浊度突变则必须建立智能的应付浊度变化的应急系统，也就是直接向投加池提升原药的精确浓度配制系统。

### 2.8.4 系统控制原理流程图

#### (1) 配药原理流程图

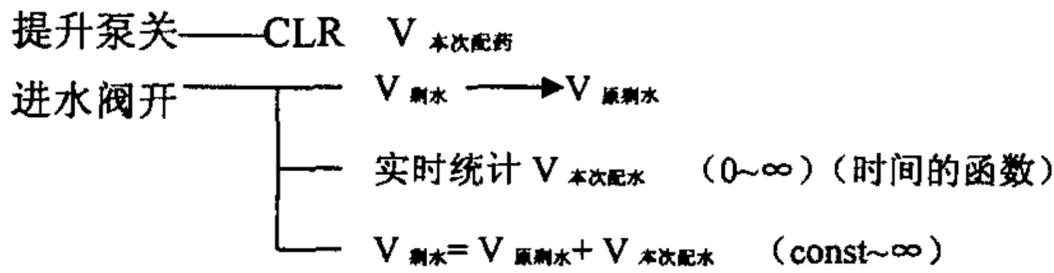
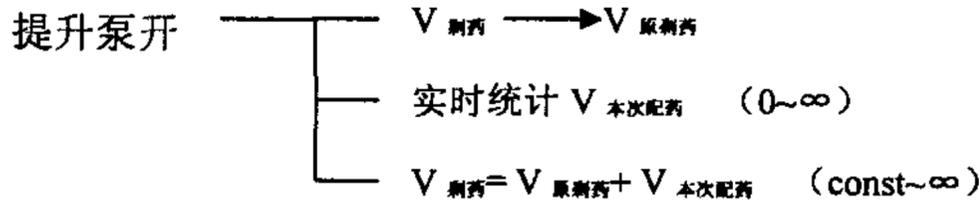


实时计算配液池浓度原理

A、校验：

$$V_{理论} = V_{剩药} + V_{剩水} \quad (\text{将 } 1 \text{ 单位 } V_{药} + 1 \text{ 单位 } V_{水} \text{ 视为 } 2 \text{ 单位 } V_{液})$$

$$V_{实际} = H_{液} + S_{底} \quad (50 \text{ 单位 } V_{药} + 1000 \text{ 单位 } V_{水} = 1060 \text{ 单位 } V_{液})$$



进水阀关——CLR  $V_{本次配水}$

放药阀开——实时统计  $V_{本次放液}$

放药阀关——CLR

$$\text{配液池剩余药液质量浓度} = \frac{V_{剩药} * 1.26}{V_{剩药} * 1.26 + V_{剩水} * 1}$$

由于药液均匀，放掉原药液中相对体积 K% 的药液既为放掉原药液含水部分中相对体积 K% 的水和原药液含药部分中 K% 的药，既为体积百分比也为质量百分比（不是浓度概念）

B、对一次放药过程而言：

$$\text{配液池相对放掉的药液百分比 } K = \frac{V_{液} - V_{液放}}{V_{液}} = \frac{V_{配水} - V_{放掉的水}}{V_{配水}}$$

$$\text{即可求出 } V_{放掉的水} = V_{配水} - \frac{(V_{液} - V_{液放}) V_{配水}}{V_{液}}$$

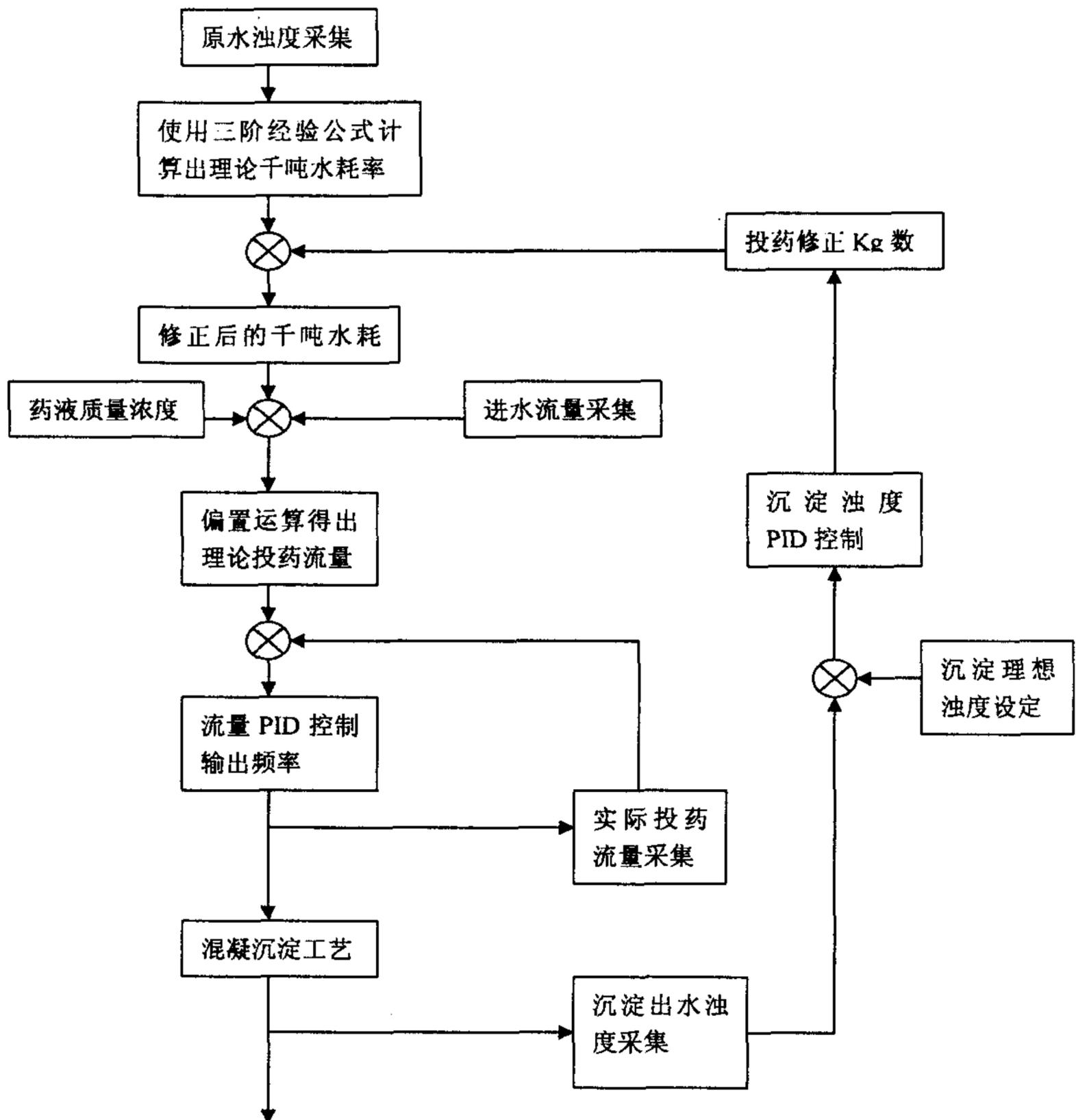
$$V_{剩水} = V_{配水} - V_{放掉的水}$$

$$\text{质量 } M_{放掉的药} = M_{提药} * K$$

$$\text{质量 } M_{剩药} = M_{提药} - M_{放掉的药}$$

$$\text{配液池剩余药液质量浓度} = \frac{M_{剩药}}{M_{剩药} + M_{剩水}}$$

## (2) 投加原理流程图



从投加原理流程图可以看出。模型中使用了原水浊度、进水流量、沉淀水浊度等由仪表检测的数据。

在控制流程图中有一个对偏置投药流量进行计算的 PID 模块这个模块在整个投加系统程序中地位非常重要，它的运算结果直接影响到沉淀池出水浊度的稳定性和准确性。目前，与六台计量泵相对应的 PID 模块都已经投入使用，但是我们并不能说这些模块就是最准确的。我们目前正在实际生产中正根据整个投药、混凝、沉淀的效果，对各种数据进行分析和计算（通过控制界面中的曲线），不断对这些 PID 模块进行改进。

## 2.9 程序设计<sup>[7][10][11]</sup>

### 2.9.1 配投药 PLC 控制程序说明

该 PLC 程序是成都水六厂自动配药、自动投药两大子系统的控制核心，采用模块化设计。配药子系统主要完成全自动配药控制，具有远程手动，远程半自动，远程全自动等多种控制方式。投加子系统主要完成全自动投药控制，具有远程直接调频、远程直接调投加量、数学模型等多种控制方式。整个配投药自控系统实现了车间无人化，并能自动计算和收集理想药耗、实际药耗等关键数据。

由于自动配液系统的精度保证主要是原药流量计和配水液位计的精度。目前我厂的原药流量计精度为千分之一，两台高精度雷达波液位仪精确到 2 毫米，通过 PLC 的运算和控制已经可以保证配药精度到千分之五。

投药自动化中自动药液投加系统是通过原水浊度计算出千吨水耗药率进而根据配水流量和配液浓度计算出投加到每组工艺池的药量，最后通过 PID 调节控制计量泵的转速达到药量的准确投加。另外，为消除配液精度、水质变化、排泥变化、参数设置等的误差，我们在药液投加的过程中还加入了一定范围内沉淀池出水浊度反馈的修正措施。当沉淀池出水浊度偏离设定点较高时，PID 调节增加投药量；反之，当沉淀池出水浊度偏离设定点较低时，PID 调节减少投药量。

#### (1) 投药子系统程序说明

由于一台工作变频器对应一组工艺池，而控制工艺基本一致，下面的算法讨论均针对各组工艺池而言。

#### (2) 主要算法说明

##### A、数学模型

数学模型方程的输出是数学模型方程方式（方式 4）下决定变频器输出的主要控制参数。

设数学模型方程  $Y=(AX^3+BX^2+CX)*D+E$ ，其中 A、B、C、D、E 为常数，X=源水浊度，Y=千吨水耗率

##### B、部分参数定义和说明

理论投药流量=（进水量\*耗率）/（ $10^4$ \*药液质量浓度）

实际耗率=实际投药流量\*浓度/进水量\* $10^4$

药液质量浓度=各次配液浓度平均值

##### C、沉淀浊度修正 PID 控制

沉淀浊度修正 PID 控制的输出仅作为数学模型方程输出的必要修正。设最大修正 $\pm 5\text{Kg}$ ，则最大可调  $10\text{Kg}*\text{PID}\%$ -最大可调/2= $\pm 5\text{Kg}$  修正

浊度仪状态

=0停用（不用沉淀浊度修正）

=1正常（PID休整使能）

=2清洗（保持原修正）

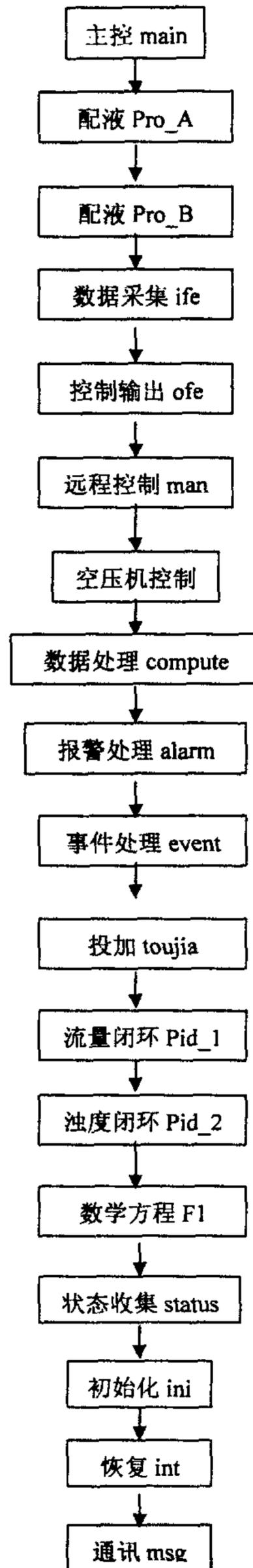
由于一、二期沉淀池一组工艺池包含 2 个沉淀池对应 2 个沉淀出水浊度仪，所以还存在浊度仪的选择问题，对应设计 3 种控制标志 A、B、AB 平均。

#### D、排泥流量损失修正控制

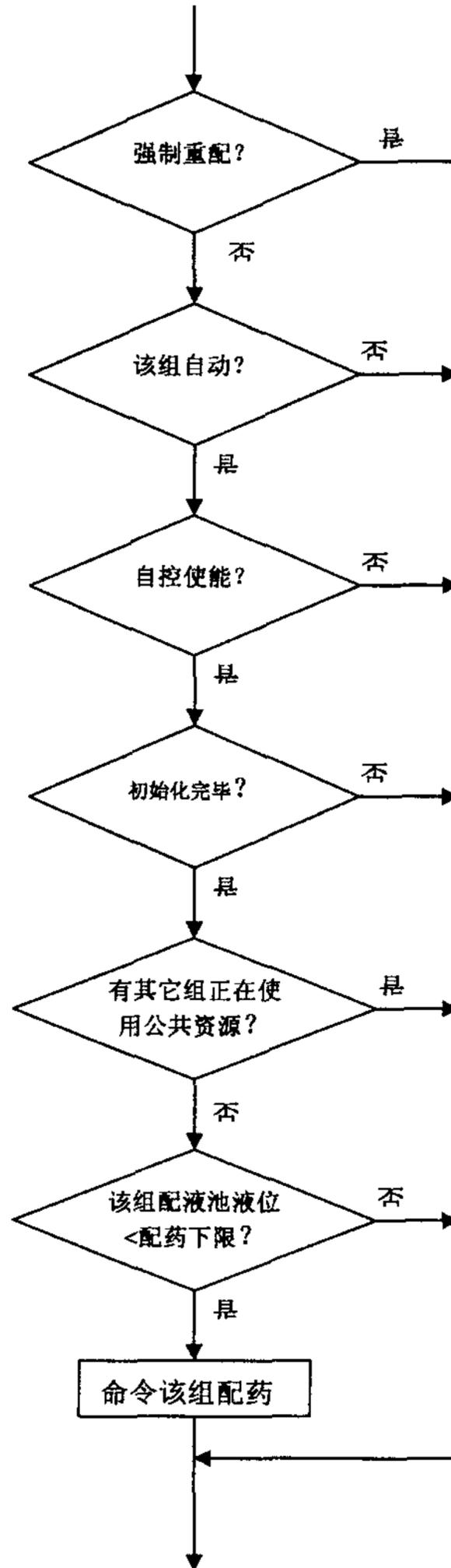
排泥流量损失修正控制的输出也仅作为数学模型方程输出的必要修正。根据水六厂实际情况，仅对沉砂池底阀排泥进行修正，而对沉淀池角阀排泥、行车排泥等不进行修正。沉砂池底阀排泥时，从对应的工艺池组扣除一定的耗率。

### 2.9.2 控制程序框图

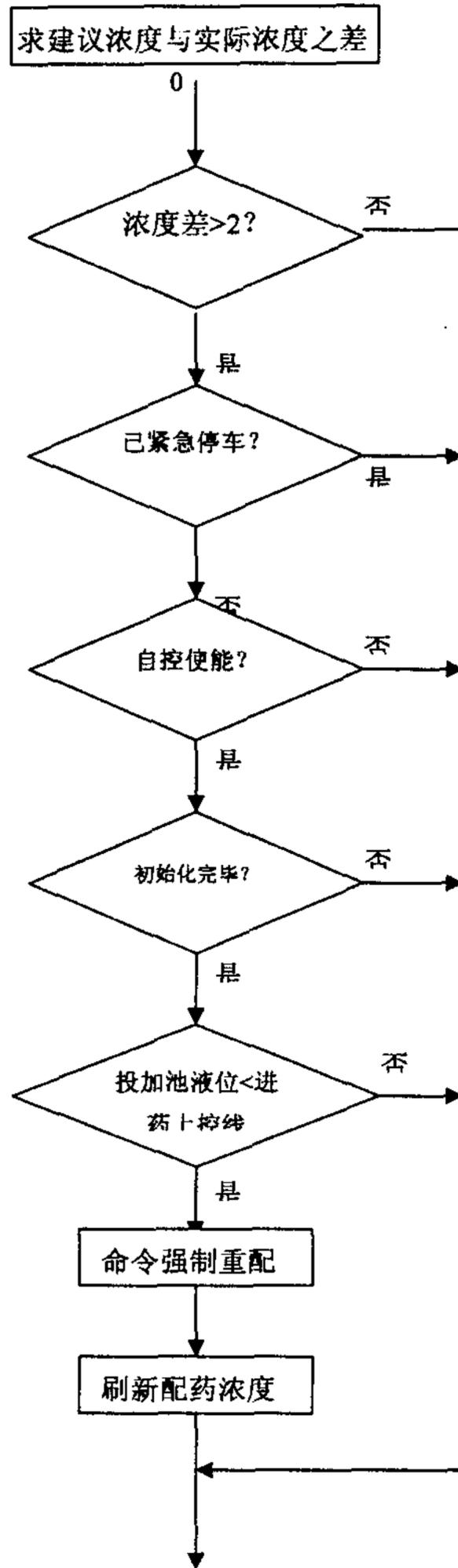
(1) 主程序模块流程图



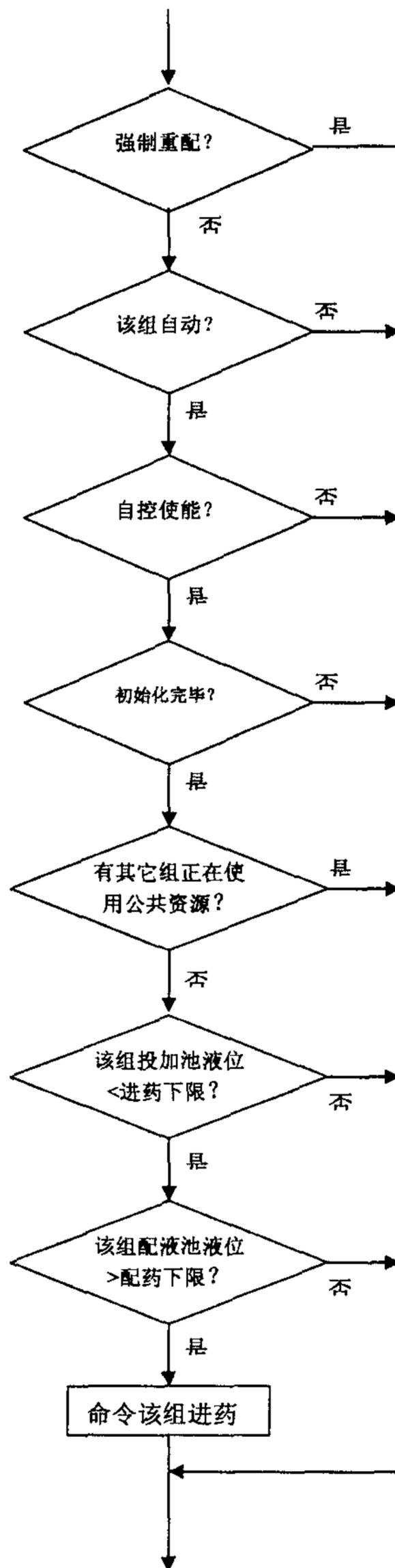
(2) 配药总体控制程序流程图



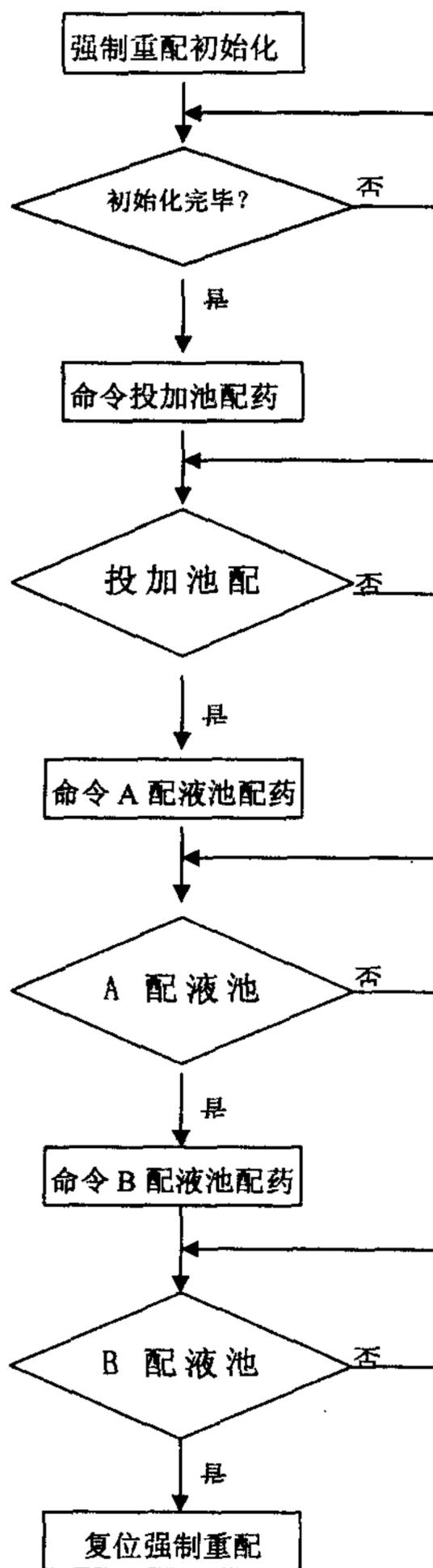
(3) 强制重配总体控制程序流程图



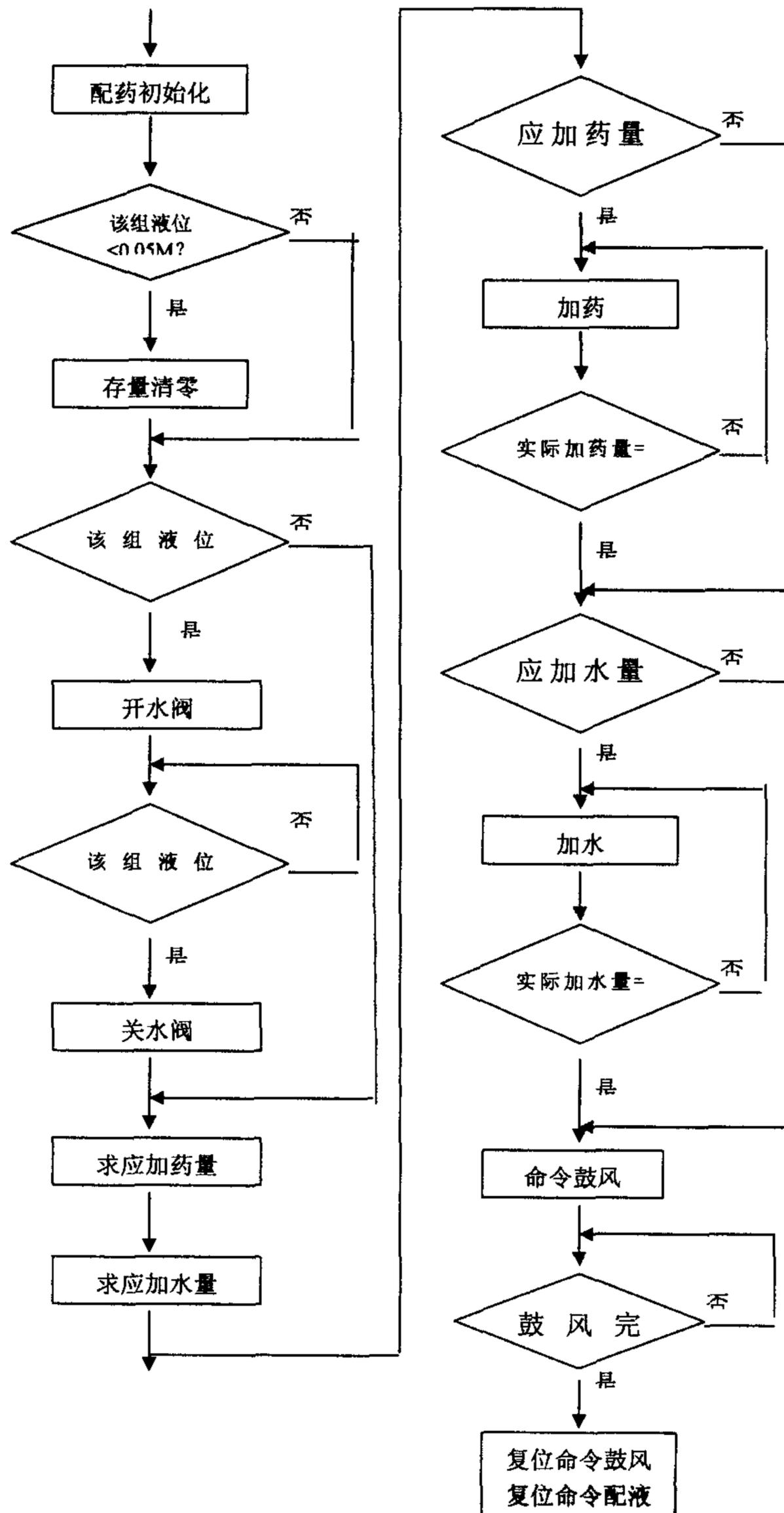
(4) 投加过程启动程序流程图



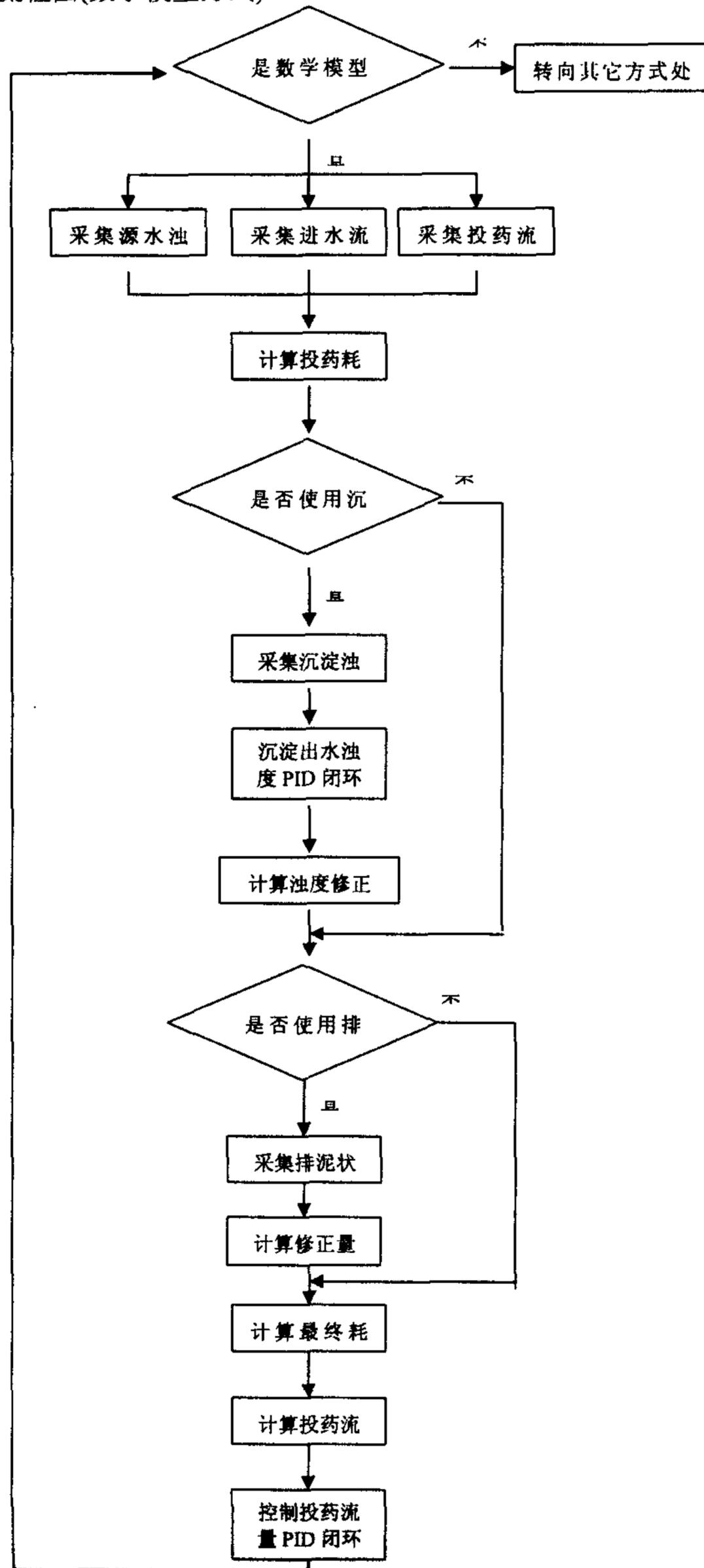
(5) 强制重配控制程序流程图



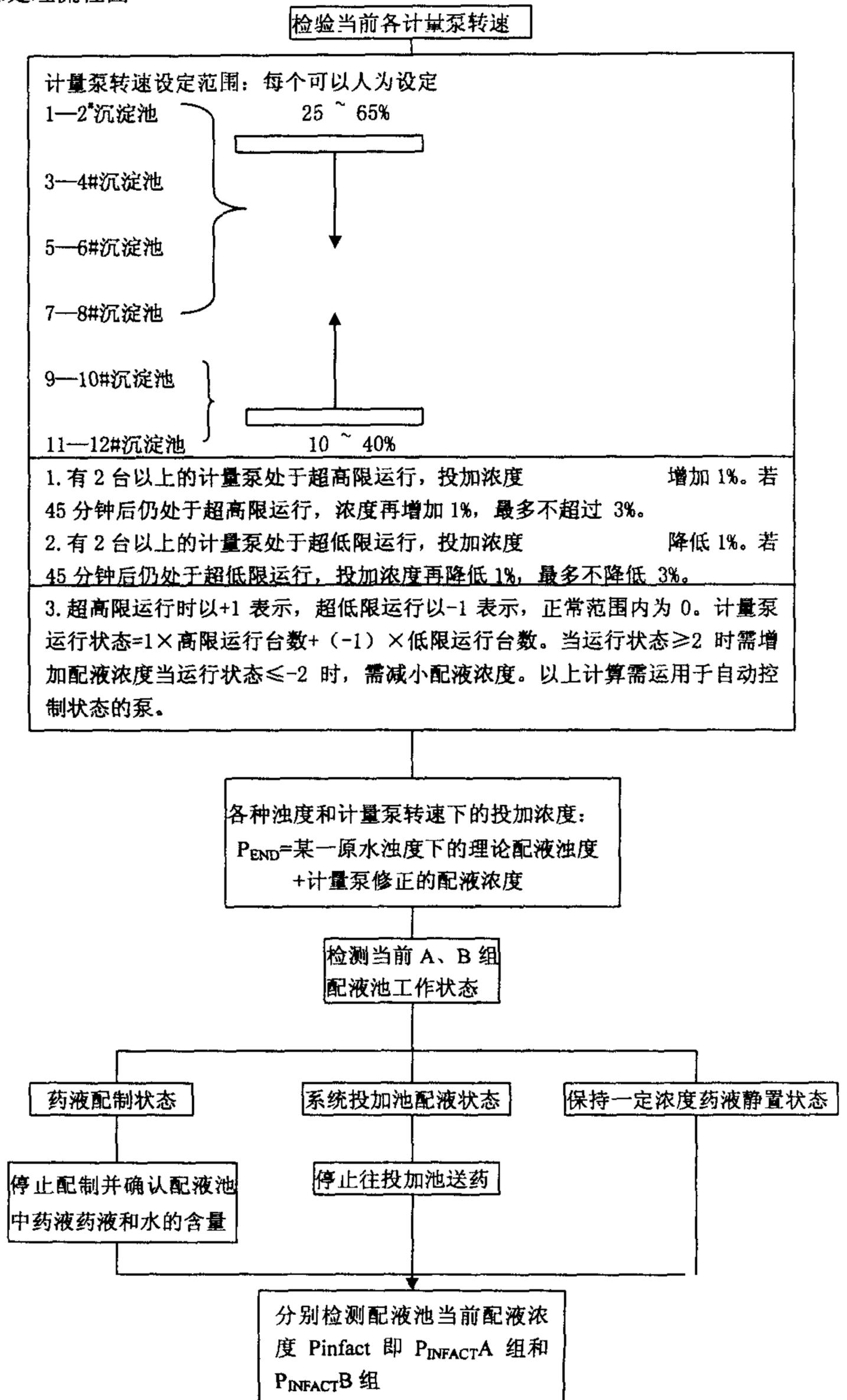
(6)、配液控制程序流程图



(7) 功能流程图(数学模型方式)



(8) 应急处理流程图



### 3 研究效果和存在不足

#### 3.1 研究所取得的成果

自动投药混凝工序是地表水净水厂生产过程中最重要的环节。投药系统自动化程度的高低、运行的效果是衡量一个水厂自控系统的主要参数之一。由于受到原水浊度、配水流量、原水 PH 值、原水碱度、原水温度等多方面的影响,要实现投药自动化具有很高的难度。同国内许多水厂一样,水六厂先后进行了 SCM 单因子、沉淀浊度反馈和模型沉淀池等自动投药方式的研究和实验,但由于种种原因实验效果都不太理想。随着计算机控制技术的不断发展和完善、各类仪器仪表运行的安全可靠性的提高,建立数学模型已经成为当今投药自动控制的新趋势。

成都市自来水六厂投药自动化系统成为目前国内少有的真正实现全自动投药系统,其运行率高达 99.8%以上。英国约翰夏水务局专家在了解了该系统运行情况后,认为其已经达到国外同等水平。

##### 3.1.1 系统运行率

表 3.1 2001 年投药自控系统自动运行率

Tabel3.1 The running rate of she system in 2001

	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	备注
配液	100%	100%	100%	100%	100%	99.5%	100%	100%	99.5%	100%	99.5%	100%	
投加	99.9%	100%	100%	100%	99.8%	99.5%	99.5%	99.8%	99.5%	99.5%	99.5%	99.5%	

##### 3.1.2 系统沉淀出水合格率

表 3.2 2000 年-2001 年投药自控系统沉淀出水合格率对比 (%)

Table3.2 Eligibility rate of sedimentation water contrasting in 2000 and 2001(%)

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
2000年	85.00	83.00	87.00	86.00	84.00	83.00	81.00	81.00	76.00	85.00	85.00	85.00	83.42
2001年	87.50	87.96	93.11	92.07	90.61	92.57	96.31	93.99	94.15	95.16	91.20	92.11	92.03
提高	2.94	5.98	7.02	7.06	7.87	11.53	18.90	16.04	23.88	11.95	7.29	8.36	8.61

备注: 以上统计数据均包括清洗仪表、停电和沉淀行车反冲造成的浊度超标时间。

### 3.1.3 混凝剂耗率

表 3.3 2000 年-2001 年投药自控系统混凝剂耗率对比 (%)

Table3.3 coagulant cost rate contrasting in 2000 and 2001(%)

时间	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	平均
2000年	85.00	83.00	87.00	86.00	84.00	83.00	81.00	81.00	76.00	85.00	85.00	85.00	83.42
2001年	87.50	87.96	93.11	92.07	90.61	92.57	96.31	93.99	94.15	95.16	91.20	92.11	92.23
提高	2.94	5.98	7.02	7.06	7.87	11.53	18.90	16.04	23.88	11.95	7.29	8.36	8.81

### 3.1.4 设备运行状况

在投药数学模型运行期间，影响系统运行率的主要原因是设备故障。为确保投药数学模型的准确运行，我厂对投药投加设备进行了整修。针对计量泵老化和进出药单向阀弹簧损坏的问题，我厂专门加工了单向阀弹簧，将损坏严重的计量泵进行了更换和检修。为保证系统正常运行，我厂请德国 PROMINENT 公司技术代表对投药设备进行了维护和了解，根据我厂设备的情况制定出了各设备的问题解决办法。这方面的进行的一些主要工作有：(1) 计量泵大修 (2) 备压阀更换 (3) 脉冲消除器更换 (4) 管道系统改造。

### 3.1.5 典型系统运行曲线

水六厂投药数学模型投入运行后，药耗和沉淀池出水浊度合格率都得到不同程度的改善，系统自动运行的时间接近 100%。详见以下趋势分析图。

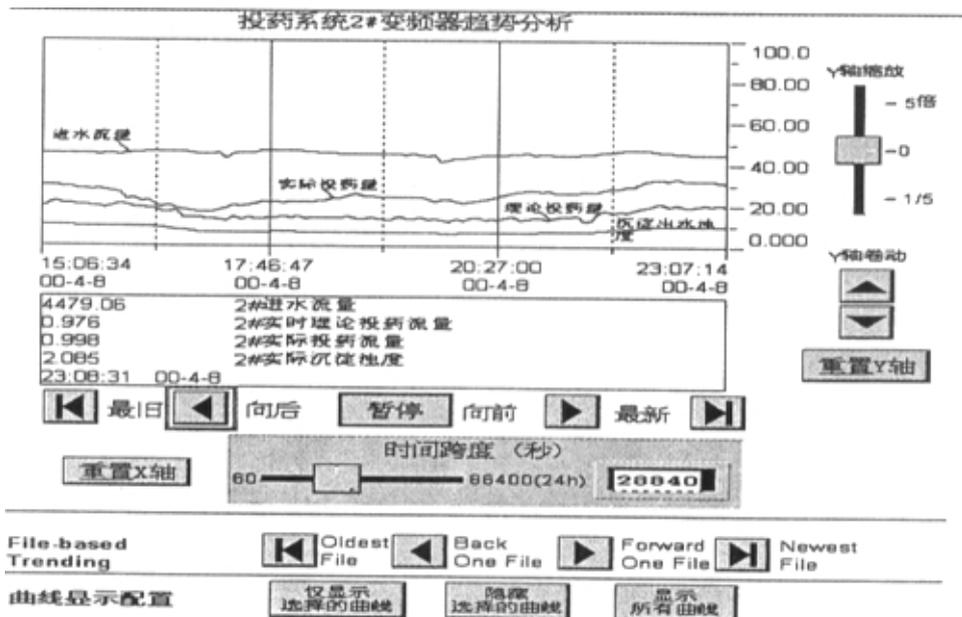


图 3.1 系统运行效果曲线

Fig3.1 Effect curve of the system running

### 3.1.6 经济效益

实现投药自动化后,使得劳动生产率大大提高。以前为保证浊度合格率需配备1名化验人员,1名调度人员,两名投药工,而目前只需1名调度人员,1名化验人员,可以节省两名工作人员,且劳动强度大大降低。如果以三班倒计算,工人每月工资1000元计算,每月可以节约工人工资 $M=3*2*1000=6000$ 元,每年节约资金7万元以上。我厂实现数学模型自动投药后,在保证沉淀池出水浊度的情况下混凝剂耗率得到了较大幅度的降低,从年平均30.51公斤/千吨水降低到24.80公斤/千吨水,平均降低18.71%,达到了预期的效果。按我厂每月药耗400KT计算,每月节省药耗70多吨,价值9万多元。投药数学模型运行后,沉淀出水浊度合格率从83.42%提高到92.23%,年平均提高8.81%。

### 3.2 存在的不足之处

成都市自来水六厂自动投药数学模型运行了一段时间,但沉淀池出水浊度存在一定的振荡,沉淀池出水浊度合格率(1-3NTU)还不够理想,我们认为这主要是因为系统时滞太长,排泥反冲造成的。

A、六厂沉淀池排泥采用虹吸排泥机排泥的方式,虹吸排泥机在端头自动反冲时必然造成沉淀池底积泥被冲起同时矾花被打碎,从而引起沉淀出水浊度周期性的变化超标。

B、数学模型运行的数据不足,沉淀出水浊度振荡较大,系统参数有待优化。目前生产数据采集系统将数据采集进入数据库,丰富的数据基础将有助于建立自动整定系统参数的专家系统,进行系统的自我统计分析,实现系统的智能化。进一步提高系统的应变能力,降低药耗。

C、未建立与数学模型投药控制系统相对应的智能分析系统(也可称专家分析系统),不能自动及时地对控制模型进行自适应更新和参数调整,模型的智能化程度有待深化。

D、由于我厂现采用的是数学模型方式控制投药(聚合氯化铝)量。实际就是把多年生产实际投药量与当时原水的浊度和制水量等数据进行统计,通过仪器仪表测试得出的适时原水水量和浊度,求得一个理论千吨水耗率。此过程中投药量历史数据已包含有原水PH、温度等变化情况的因素在内。由于此公式未考虑水温的影响,且历史数据中低温低浊原水比例较小,所以在生产实际中,冬季低温低浊水的理论投药量与实际投药量相差较大。在今后的数据积累和公式完善中应考虑水温对混凝沉淀效果的影响。

## 致 谢

本文的研究工作是在我的导师的精心指导和悉心关怀下完成的，在我的学业和论文的研究工作中无不倾注着导师辛勤的汗水和心血。导师的严谨治学态度、渊博知识、无私的奉献精神使我深受启迪。从尊敬的导师身上，我不仅学到了扎实、广阔的知识，也学到了做人的道理。在此我要向我的导师致以最衷心的感谢和深深的敬意。

在学习生活中，我还得到了许多领导和老师的深切关心和热心帮助，如：在日常学习和生活中，我的师兄弟袁本松、徐孝全等给予了我很大帮助。在此，向所有关心和帮助过我的领导、老师和朋友表示由衷的谢意！衷心感谢在百忙中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

刘泽华

二〇〇二年八月于成都

## 参 考 文 献

- [1] 水工业工程设计手册-水资源及给水处理, 中国建筑工业出版社, 2001 第一版
- [2] 给水工程, 中国建筑工业出版社, 第三版, 1995
- [3] 杨振海、陈霞, 混凝投药的前—反馈控制系统设计, 中国给水排水, 1999, 11
- [4] 黄国中、孙连鹏、李圭白, 流动电流混凝投药自动控制技术在低浊度水中应用范围的研究, 2001 年全国水处理自动化控制学术研究年会
- [5] 南军、李圭白, 新型混凝投药智能复合环控制系统, 中国给水排水, 2001, 9
- [6] 何寿平, 测定絮凝颗粒自动投药系统
- [7] 李友善, 自动控制原理上册-修订版, 北京, 国防工业出版社, 1994.7
- [8] 田胜元, 实验设计与数据处理, 重庆建筑大学城市设计院
- [9] 李继震、宋铁男、王欢, 阿贺野川水厂计算机自动投药系统数学模型及控制程序, 中国给水排水
- [10] 白桦、李圭白, 混凝投药的神经网络控制方法, 给水排水, 2001, 11 期
- [11] 戴汝为, 人机结合的综合集成系统, 四川省自动化与仪表学会 99 学术年会
- [12] Abu-Orf, M.M. and Dentel, S.K., Automatic Control of Polymer Dose Using the Streaming Current Detector, Water Environment Research 70, 1005-1018 (1998)
- [13] Abu-Orf, M.M. and Dentel, S.K., Polymer Dose Assessment Using the Streaming Current Detector, Water Environment Research 69, 1075-1085 (1997)
- [14] Dentel, SK and Kingery, KM, Using Streaming Current Detectors in Water Treatment, Journal American Water Works Association, 81, 85-94 (1989)
- [15] Fuji Electric Co.,Ltd, Fuji general-prupose Inverter FVR-Eqs series
- [16] ProMinent, Instruction Manual ProMinent MAKRO-TZ6 and MACRO-TZ20 metering pumps
- [17] HACH Company, Model 1720C LOW RANGE PROCESS TURBIDIMETER Instruction Manual
- [18] Endress+hauser, Promag 30 Electromagnetic Flow Measuring System Operating Manual.
- [19] H.Bernhardt、H Schell, Control of flocculants by use of a streaming current detector (SCD). Water STR Aqua, 1993, 42(4)
- [20] Hang-Bae Jun, Young-Ju Lee, Byung-Du Lee and Detlef R. U. Knappe , Effectiveness of coagulants and coagulant aids for the removal of filter-clogging Synedra
- [21] Dentel, S.K., "Characterizing Coagulation Processes with the Streaming Current Detector." Water Supply, 9(1), 571-577, 1991
- [22] Dentel, S.K. and Abu-Orf, M., "Control of Sludge Conditioning by Streaming Current

- Detector," Proc. 24th Mid-Atlantic Industrial and Hazardous Waste Conference, July 14-17, 1992, Morgantown, W.V
- [23] Dae-Sung Joo, Dong-Jin Choi and Heekyung Park, Determination of optimal coagulant dosing rate using an artificial neural network, *J Water SRT - Aqua* 49 (2000) 49-55
- [24] R-F Yu, S-F Kang, S-L Liaw and M-c Chen, Application of artificial neural network to control the coagulant dosing in water treatment plant, *Water Science & Technology* Vol 42 No 3-4 pp 403-408 , 2000
- [25] J. C. Liu and M. D. Wu, Fuzzy control of coagulation reaction through streaming current monitoring, *Water Science and Technology* Vol 36 No 4 pp 127-134 © IWA Publishing 1997.
- [26] Chichuan Kan , Chihpin Huang and Jill Ruhsing Pan, Coagulation of high turbidity water: the effects of rapid mixing, *J Water SRT - Aqua* 51 (2002)
- [27] J. Bridgeman, J. S. Simms and S. A. Parsons, Coagulation of high turbidity water: the effects of rapid mixing, *J Water SRT - Aqua* 51 (2002)
- [28] 崔福义、李圭白, 我国水处理混凝投药控制技术的研究与发展, 2001 年全国水处理自动化控制学术研究会年会。
- [29] 孙连鹏、李圭白, 新型透光率脉动混凝投药自动控制系统的研究, 2001 年中日水处理技术国际交流会, 2001.11
- [30] 宋启敏、丁云鹤, 显示式絮凝控制系统——介绍一种新型的自动加药系统(FCD), 中国土木工程学会给水委员会常规水处理研究会第二次年会, 2001.5
- [31] 杨凯人, 显示式絮凝控制系统(FCD)在水厂的应用, *中国给水排水*, 2000 第 3 期
- [32] 于水利, 李圭白, 田永平, 悬浊液透光脉动颗粒在线检测技术及其应用, *工业用水与废水*, 2001 年 第 1 期
- [33] 彭海清, 谭章荣, 高乃云, 孟长再, 给水处理中藻类的去除, *《中国给水排水》* 2002 年 第 2 期, 2002.2.15

## 附 录

## 附录 A 模型公式推导示例

由于六厂数据采集服务器的数据采集频率为每 5 分钟一个数据，全年数据量相当大，达到 10512 个数据行，如此大的数据量需要经过重复数据去除，再通过计算机编程实现数据处理，这里从六厂 98 年全年数据中选出较能代表全年水质情况的数据进行处理示范。

表附 A1 98 年生产数据表

Table appendix A1 production data in 1998

98 年数据 采集时间	原水浊度 (NTU)	混凝剂耗 率 (kg/km <sup>3</sup> )								
	$x$	$y$	$yx$	$yx^2$	$yx^3$	$x^2$	$x^3$	$x^4$	$x^5$	$x^6$
98.11.28	7.69	18.99	146.0331	1122.9945	8635.828	59.1361	454.75661	3497.07832	26892.532	206803.57
98.11.27	8.42	19.99	168.3158	1417.219	11932.984	70.8964	596.94769	5026.29953	42321.442	356346.54
98.11.26	8.54	18.24	155.7696	1330.2724	11360.526	72.9316	622.83586	5319.01828	45424.416	387924.51
98.11.6	9.16	27.33	250.3428	2293.14	21005.163	83.9056	768.5753	7040.14971	64487.771	590707.99
98.4.21	9.31	16.9	157.339	1464.8261	13637.531	86.6761	806.95449	7512.74631	69943.668	651175.55
98.3.29	9.33	12.56	117.1848	1093.3342	10200.808	87.0489	812.16624	7577.51099	70698.178	659614
98.11.10	9.35	29.03	271.4305	2537.8752	23729.133	87.4225	817.40038	7642.69351	71459.184	668143.37
98.11.23	9.35	28.78	269.093	2516.0196	23524.783	87.4225	817.40038	7642.69351	71459.184	668143.37
98.11.25	9.61	19.95	191.7195	1842.4244	17705.698	92.3521	887.50368	8528.91037	81962.829	787662.78
98.11.12	9.69	18.75	181.6875	1760.5519	17059.748	93.8961	909.85321	8816.4776	85431.668	827832.86
98.11.17	9.93	18.16	180.3288	1790.665	17781.303	98.6049	979.14666	9722.9263	96548.658	958728.18
98.11.16	10.08	18.63	187.7904	1892.9272	19080.706	101.6064	1024.1925	10323.8605	104064.51	1048970.3
98.4.19	10.2	22.63	230.826	2354.4252	24015.137	104.04	1061.208	10824.3216	110408.08	1126162.4
98.11.4	10.34	27.65	285.901	2956.2163	30567.277	106.9156	1105.5073	11430.9455	118195.98	1222146.4
98.11.9	10.42	26.2	273.004	2844.7017	29641.792	108.5764	1131.3661	11788.8346	122839.66	1279989.2
98.4.22	10.54	18.47	194.6738	2051.8619	21626.624	111.0916	1170.9055	12341.3436	130077.76	1371019.6
98.4.18	10.59	17.44	184.6896	1955.8629	20712.588	112.1481	1187.6484	12577.1963	133192.51	1410508.7
98.3.30	10.65	25.59	272.5335	2902.4818	30911.431	113.4225	1207.9496	12864.6635	137008.67	1459142.3
98.4.20	10.65	19.83	211.1895	2249.1682	23953.641	113.4225	1207.9496	12864.6635	137008.67	1459142.3
98.11.24	10.74	18.08	194.1792	2085.4846	22398.105	115.3476	1238.8332	13305.0688	142896.44	1534707.8
98.11.18	10.76	19.6	210.896	2269.241	24417.033	115.7776	1245.767	13404.4527	144231.91	1551935.4
98.11.11	10.86	24.3	263.898	2865.9323	31124.025	117.9396	1280.8241	13909.7492	151059.88	1640510.3
98.11.3	10.93	30.16	329.6488	3603.0614	39381.461	119.4649	1305.7514	14271.8623	155991.46	1704986.6
98.11.22	10.94	17.92	196.0448	2144.7301	23463.347	119.6836	1309.3386	14324.1641	156706.36	1714367.5
98.11.13	11.56	19.34	223.5704	2584.4738	29876.517	133.6336	1544.8044	17857.939	206437.78	2386420.7
98.10.2	11.82	21.32	252.0024	2978.6684	35207.86	139.7124	1651.4006	19519.5547	230721.14	2727123.8

98.4.23	11.94	15.69	187.3386	2236.8229	26707.665	142.5636	1702.2094	20324.38	242673.1	2897516.8
98.11.14	12.07	22.25	268.5575	3241.489	39124.773	145.6849	1758.4167	21224.0901	256174.77	3092029.4
98.11.1	12.25	24.02	294.245	3604.5013	44155.14	150.0625	1838.2656	22518.7539	275854.74	3379220.5
98.10.29	12.51	29.48	368.7948	4613.6229	57716.423	156.5001	1957.8163	24492.2813	306398.44	3833044.5
98.10.31	12.51	30.42	380.5542	4760.733	59556.77	156.5001	1957.8163	24492.2813	306398.44	3833044.5
98.4.3	12.55	17	213.35	2677.5425	33603.158	157.5025	1976.6564	24807.0375	311328.32	3907170.4
98.11.21	12.63	26.81	338.6103	4276.6481	54014.065	159.5169	2014.6984	25445.6414	321378.45	4059009.8
98.11.2	12.69	30.33	384.8877	4884.2249	61980.814	161.0361	2043.5481	25932.6255	329085.02	4176088.9
98.11.5	12.92	23.81	307.6252	3974.5176	51350.767	166.9264	2156.6891	27864.423	360008.35	4651307.8
98.10.28	13.11	25.18	330.1098	4327.7395	56736.665	171.8721	2253.2432	29540.0188	387269.65	5077105.1
98.11.7	13.17	21.65	285.1305	3755.1687	49455.572	173.4489	2284.322	30084.5209	396213.14	5218127.1
98.4.2	13.2	10.53	138.996	1834.7472	24218.663	174.24	2299.968	30359.5776	400746.42	5289852.8
98.4.15	13.25	14.18	187.885	2489.4763	32985.56	175.5625	2326.2031	30822.1914	408394.04	5411221
98.3.31	13.65	19.02	259.623	3543.854	48373.606	186.3225	2543.3021	34716.074	473874.41	6468385.7
98.11.8	14.13	19.58	276.6654	3909.2821	55238.156	199.6569	2821.152	39862.8777	563262.46	7958898.6
98.10.30	14.32	31.11	445.4952	6379.4913	91354.315	205.0624	2936.4936	42050.5879	602164.42	8622994.5
98.10.27	14.37	24.34	349.7658	5026.1345	72225.553	206.4969	2967.3605	42640.9697	612750.73	8805228.1
98.4.16	14.52	17.64	256.1328	3719.0483	54000.581	210.8304	3061.2574	44449.4576	645406.12	9371296.9
98.4.17	14.9	23.37	348.213	5188.3737	77306.768	222.01	3307.949	49288.4401	734397.76	10942527
98.10.26	15.06	33.19	499.8414	7527.6115	113365.83	226.8036	3415.6622	51439.873	774684.49	11666748
98.11.20	15.15	22.44	339.966	5150.4849	78029.846	229.5225	3477.2659	52680.578	798110.76	12091378
98.9.16	15.53	46.59	723.5427	11236.618	174504.68	241.1809	3745.5394	58168.2265	903352.56	14029065
98.6.30	15.79	17.28	272.8512	4308.3204	68028.38	249.3241	3936.8275	62162.5068	981545.98	15498611
98.10.5	15.93	31.99	509.6007	8117.9392	129318.77	253.7649	4042.4749	64396.6245	1025838.2	16341603
98.10.3	16.18	26.03	421.1654	6814.4562	110257.9	261.7924	4235.801	68535.2607	1108900.5	17942010
98.4.4	16.44	27.24	447.8256	7362.2529	121035.44	270.2736	4443.298	73047.8189	1200906.1	19742897
98.10.1	16.56	22.57	373.7592	6189.4524	102497.33	274.2336	4541.3084	75204.0674	1245379.4	20623482
98.4.1	16.73	18.9	316.197	5289.9758	88501.295	279.8929	4682.6082	78340.0355	1310628.8	21926820
98.6.24	16.83	31.07	522.9081	8800.5433	148113.14	283.2489	4767.079	80229.9394	1350269.9	22725042
98.9.14	16.88	26.06	439.8928	7425.3905	125340.59	284.9344	4809.6927	81187.6123	1370446.9	23133144
98.6.22	17.18	35.65	612.467	10522.183	180771.1	295.1524	5070.7182	87114.9392	1496634.7	25712183
98.11.19	17.26	18.51	319.4826	5514.2697	95176.295	297.9076	5141.8852	88748.9381	1531806.7	26438983
98.10.25	17.43	31.35	546.4305	9524.2836	166008.26	303.8049	5295.3194	92297.4173	1608744	28040408
98.9.15	17.52	23.41	410.1432	7185.7089	125893.62	306.9504	5377.771	94218.5481	1650709	28920421
98.9.30	17.61	26.12	459.9732	8100.1281	142643.25	310.1121	5461.0741	96169.5146	1693545.2	29823330
98.10.6	17.83	21.68	386.5544	6892.265	122889.08	317.9089	5668.3157	101066.069	1802008	32129803
98.4.14	17.88	21.05	376.374	6729.5671	120324.66	319.6944	5716.1359	102204.509	1827416.6	32674209
98.9.9	18.29	25.38	464.2002	8490.2217	155286.15	334.5241	6118.4458	111906.373	2046767.6	37435379
98.6.23	18.61	30.34	564.6274	10507.716	195548.59	346.3321	6445.2404	119945.923	2232193.6	41541124
98.10.24	18.73	37.5	702.375	13155.484	246402.21	350.8129	6570.7256	123069.691	2305095.3	43174435
98.9.10	19.09	24.97	476.6773	9099.7697	173714.6	364.4281	6956.9324	132807.84	2535301.7	48398909

98.4.5	19.11	26.61	508.5171	9717.7618	185706.43	365.1921	6978.821	133365.27	2548610.3	48703943
98.11.15	19.3	21.7	418.81	8083.033	156002.54	372.49	7189.057	138748.8	2677851.8	51682541
98.9.13	19.59	22.03	431.5677	8454.4112	165621.92	383.7681	7518.0171	147277.955	2885175.1	56520581
98.6.13	19.77	38.1	753.237	14891.495	294404.87	390.8529	7727.1618	152765.989	3020183.6	59709030
98.7.4	19.98	29.81	595.6038	11900.164	237765.28	399.2004	7976.024	159360.959	3184032	63616959
98.7.3	20.1	28.08	564.408	11344.601	228026.48	404.01	8120.601	163224.08	3280804	65944161
98.9.29	20.16	27.28	549.9648	11087.29	223519.77	406.4256	8193.5401	165181.768	3330064.4	67134099
98.6.29	20.17	24.3	490.131	9885.9423	199399.46	406.8289	8205.7389	165509.754	3338331.7	67334151
98.10.13	20.29	34.53	700.6137	14215.452	288431.52	411.6841	8353.0704	169483.798	3438826.3	69773785
98.10.21	20.29	38.2	775.078	15726.333	319087.29	411.6841	8353.0704	169483.798	3438826.3	69773785
98.10.9	20.52	28.93	593.6436	12181.567	249965.75	421.0704	8640.3646	177300.282	3638201.8	74655901
98.10.22	20.91	38.57	806.4987	16863.888	352623.89	437.2281	9142.4396	191168.411	3997331.5	83584201
98.10.18	21.1	43.89	926.079	19540.267	412299.63	445.21	9393.931	198211.944	4182272	88245940
98.10.23	21.31	39.83	848.7773	18087.444	385443.44	454.1161	9677.2141	206221.432	4394578.7	93648473
98.6.12	21.8	25.55	556.99	12142.382	264703.93	475.24	10360.232	225853.058	4923596.7	107334407
98.9.11	21.96	24.09	529.0164	11617.2	255113.72	482.2416	10590.026	232556.961	5106950.9	112148641
98.9.8	22.03	22.56	496.9968	10948.84	241202.93	485.3209	10691.619	235536.376	5188866.4	114310726
98.9.12	22.35	20.61	460.6335	10295.159	230096.8	499.5225	11164.328	249522.728	5576833	124642217
98.10.12	22.72	27.21	618.2112	14045.758	319119.63	516.1984	11728.028	266460.788	6053989.1	137546633
98.10.4	23.02	28.12	647.3224	14901.362	343029.35	529.9204	12198.768	280815.63	6464375.8	148809931
98.10.16	23.35	29.54	689.759	16105.873	376072.13	545.2225	12730.945	297267.575	6941197.9	162076970
98.4.24	23.53	25.32	595.7796	14018.694	329859.87	553.6609	13027.641	306540.392	7212895.4	169719429
98.10.19	23.74	34.74	824.7276	19579.033	464806.25	563.5876	13379.57	317630.983	7540559.5	179012883
98.4.6	24.14	15.1	364.514	8799.368	212416.74	582.7396	14067.334	339585.441	8197592.6	197889884
98.10.20	24.16	34.71	838.5936	20260.421	489491.78	583.7056	14102.327	340712.227	8231607.4	198875635
98.10.8	24.27	16.04	389.2908	9448.0877	229305.09	589.0329	14295.828	346959.757	8420713.3	204370712
98.4.7	24.49	26.3	644.087	15773.691	386297.68	599.7601	14688.125	359712.178	8809351.2	215741012
98.10.17	25.1	32.86	824.786	20702.129	519623.43	630.01	15813.251	396912.6	9962506.3	250058907
98.6.21	25.4	37.79	959.866	24380.596	619267.15	645.16	16387.064	416231.426	10572278	268535867
98.9.27	25.47	26.63	678.2661	17275.438	440005.39	648.7209	16522.921	420838.806	10718764	273006929
98.9.7	25.81	24.66	636.4746	16427.409	423991.44	666.1561	17193.489	443763.95	11453548	295616062
98.4.13	26.14	21.96	574.0344	15005.259	392237.48	683.2996	17861.452	466898.343	12204723	319031451
98.5.20	26.53	23.57	625.3121	16589.53	440120.23	703.8409	18672.899	495392.013	13142750	348677160
98.7.2	26.68	17.13	457.0284	12193.518	325323.05	711.8224	18991.422	506691.129	13518519	360674096
98.6.11	27.23	29.49	803.0127	21866.036	595412.16	741.4729	20190.307	549782.061	14970566	407648499
98.8.10	27.28	21.94	598.5232	16327.713	445420.01	744.1984	20301.732	553831.259	15108517	412160336
98.6.28	27.3	33.21	906.633	24751.081	675704.51	745.29	20346.417	555457.184	15163981	413976685
98.10.7	27.32	26.05	711.686	19443.262	531189.9	746.3824	20391.167	557086.687	15219608	415799698
98.9.23	27.37	30.59	837.2483	22915.486	627196.85	749.1169	20503.33	561176.13	15359391	420386523
98.9.25	28.5	26.67	760.095	21662.708	617387.16	812.25	23149.125	659750.063	18802877	535881988
98.5.21	28.67	36.43	1044.448	29944.327	858503.86	821.9689	23565.848	675632.873	19370394	555349209
98.10.11	28.71	27.08	777.4668	22321.072	640837.97	824.2641	23664.622	679411.307	19505899	560014349

98.9.24	28.72	30.23	868.2056	24934.865	716129.32	824.8384	23689.359	680358.386	19539893	561185723
98.6.9	29.05	25.87	751.5235	21831.758	634212.56	843.9025	24515.368	712171.43	20688580	601003250
98.6.10	29.26	35.56	1040.486	30444.609	890809.25	856.1476	25050.879	732988.713	21447250	627546527
98.9.2	29.27	24.53	717.9931	21015.658	615128.31	856.7329	25076.572	733991.262	21483924	628834462
98.9.28	29.27	26.25	768.3375	22489.239	658260.01	856.7329	25076.572	733991.262	21483924	628834462
98.8.11	29.38	19.78	581.1364	17073.787	501627.87	863.1844	25360.358	745087.308	21890665	643147741
98.9.26	29.39	28.27	830.8553	24418.837	717669.63	863.7721	25386.262	746102.241	21927945	644462299
98.10.10	29.42	31.87	937.6154	27584.645	811540.26	865.5364	25464.081	749153.26	22040089	648419415
98.6.20	30.34	30.52	925.9768	28094.136	852376.09	920.5156	27928.443	847348.97	25708568	779997945
98.8.9	30.87	19.31	596.0997	18401.598	568057.32	952.9569	29417.78	908126.853	28033876	865405751
98.6.25	31.3	41.05	1284.865	40216.275	1258769.4	979.69	30664.297	959792.496	30041505	940299111
98.7.1	31.49	42.77	1346.827	42411.592	1335541	991.6201	31226.117	983310.423	30964445	975070380
98.9.1	31.77	31.24	992.4948	31531.56	1001757.7	1009.3329	32066.506	1018752.9	32365780	1.028E+09
98.4.27	32.81	15.37	504.2897	16545.745	542865.9	1076.4961	35319.837	1158843.85	38021667	1.247E+09
98.9.6	33.02	31.39	1036.498	34225.157	1130114.7	1090.3204	36002.38	1188798.57	39254129	1.296E+09
98.6.17	33.07	25.8	853.206	28215.522	933087.33	1093.6249	36166.175	1196015.42	39552230	1.308E+09
98.4.9	33.51	24.16	809.6016	27129.75	909117.91	1122.9201	37629.053	1260949.55	42254419	1.416E+09
98.6.8	33.96	31.48	1069.061	36305.305	1232928.1	1153.2816	39165.443	1330058.45	45168785	1.534E+09
98.9.3	34.83	29.48	1026.788	35763.04	1245626.7	1213.1289	42253.28	1471681.73	51258675	1.785E+09
98.9.22	34.84	25.54	889.8136	31001.106	1080078.5	1213.8256	42289.684	1473372.59	51332301	1.788E+09
98.6.7	34.91	22.18	774.3038	27030.946	943650.31	1218.7081	42545.1	1485249.43	51850058	1.81E+09
98.8.12	35.18	25.57	899.5526	31646.26	1113315.4	1237.6324	43539.908	1531733.96	53886401	1.896E+09
98.6.18	35.5	36.39	1291.845	45860.498	1628047.7	1260.25	44738.875	1588230.06	56382167	2.002E+09
98.8.8	36.05	26.1	940.905	33919.625	1222802.5	1299.6025	46850.67	1688966.66	60887248	2.195E+09
98.7.27	36.95	37.82	1397.449	51635.741	1907940.6	1365.3025	50447.927	1864050.92	68876681	2.545E+09
98.4.26	37.18	15.23	566.2514	21053.227	782758.98	1382.3524	51395.862	1910898.16	71047194	2.642E+09
98.9.5	37.54	29.59	1110.809	41699.755	1565408.8	1409.2516	52903.305	1985990.07	74554067	2.799E+09
98.9.19	37.79	19.39	732.7481	27690.551	1046425.9	1428.0841	53967.298	2039424.2	77069840	2.912E+09
98.5.19	37.82	32.46	1227.637	46429.239	1755953.8	1430.3524	54095.928	2045907.99	77376240	2.926E+09
98.5.5	37.89	29.58	1120.786	42466.589	1609059.1	1435.6521	54396.858	2061096.95	78094964	2.959E+09
98.5.3	38.06	25.88	984.9928	37488.826	1426824.7	1448.5636	55132.331	2098336.5	79862687	3.04E+09
98.8.7	38.13	23.9	911.307	34748.136	1324946.4	1453.8969	55437.089	2113816.2	80599812	3.073E+09
98.9.4	38.5	36.55	1407.175	54176.238	2085785.1	1482.25	57066.625	2197065.06	84587005	3.257E+09
98.8.31	38.66	26.57	1027.196	39711.405	1535242.9	1494.5956	57781.066	2233816.01	86359327	3.339E+09
98.8.6	38.86	26.66	1036.008	40259.255	1564474.7	1510.0996	58682.47	2280400.8	88616375	3.444E+09
98.6.6	39.53	38.52	1522.696	60192.157	2379396	1562.6209	61770.404	2441784.08	96523725	3.816E+09
98.10.15	40.15	29.98	1203.697	48328.435	1940386.6	1612.0225	64722.703	2598616.54	104334454	4.189E+09
98.4.12	40.41	14.75	596.0475	24086.279	973326.55	1632.9681	65988.241	2666584.82	107756692	4.354E+09
98.4.8	40.47	28	1133.16	45858.985	1855913.1	1637.8209	66282.612	2682457.3	108559047	4.393E+09
98.5.4	41.54	27.31	1134.457	47125.36	1957587.5	1725.5716	71680.244	2977597.35	123689394	5.138E+09
98.6.19	41.78	33.95	1418.431	59262.047	2475968.3	1745.5684	72929.848	3047009.04	127304038	5.319E+09
98.7.26	41.88	28.4	1189.392	49811.737	2086115.5	1753.9344	73454.773	3076285.88	128834853	5.396E+09

98.5.31	42.59	33.55	1428.895	60856.617	2591883.3	1813.9081	77254.346	3290262.6	140132284	5.968E+09
98.5.6	42.79	21.87	935.8173	40043.622	1713466.6	1830.9841	78347.81	3352502.77	143453594	6.138E+09
98.7.30	43.31	31.74	1374.659	59536.499	2578525.8	1875.7561	81238.997	3518460.95	152384544	6.6E+09
98.6.16	43.38	28.17	1222.015	53010.993	2299616.9	1881.8244	81633.542	3541263.07	153619992	6.664E+09
98.8.30	45.01	29.78	1340.398	60331.305	2715512	2025.9001	91185.764	4104271.22	184733247	8.315E+09
98.4.11	45.86	22.94	1052.028	48246.022	2212562.6	2103.1396	96449.982	4423196.18	202847777	9.303E+09
98.5.30	46.11	25.72	1185.949	54684.118	2521484.7	2126.1321	98035.951	4520437.71	208437383	9.611E+09
98.5.7	46.86	37.01	1734.289	81268.764	3808254.3	2195.8596	102897.98	4821799.38	225949519	1.059E+10
98.5.18	47.14	28.91	1362.817	64243.212	3028425	2222.1796	104753.55	4938082.17	232781194	1.097E+10
98.6.15	47.4	29.37	1392.138	65987.341	3127800	2246.76	106496.42	5047930.5	239271906	1.134E+10
98.4.10	47.69	22.73	1083.994	51695.66	2465366	2274.3361	108463.09	5172604.7	246681518	1.176E+10
98.8.13	47.77	26.44	1263.039	60335.363	2882220.3	2281.9729	109009.85	5207400.32	248757513	1.188E+10
98.6.27	48.48	25.14	1218.787	59086.803	2864528.2	2350.3104	113943.05	5523958.98	267801531	1.298E+10
98.6.14	49.53	23.52	1164.946	57699.756	2857868.9	2453.2209	121508.03	6018292.78	298086042	1.476E+10
98.5.29	52.75	34.17	1802.468	95080.161	5015478.5	2782.5625	146780.17	7742654.07	408425002	2.154E+10
98.6.26	53.92	37.41	2017.147	108764.58	5864586	2907.3664	156765.2	8452779.38	455773864	2.458E+10
98.10.14	57.48	36.82	2116.414	121651.45	6992525.6	3303.9504	189911.07	10916088.2	627456752	3.607E+10
98.8.29	57.66	28.54	1645.616	94886.242	5471140.7	3324.6756	191700.8	11053467.8	637342956	3.675E+10
98.8.5	57.75	20.04	1157.31	66834.653	3859701.2	3335.0625	192599.86	11122641.9	642332569	3.709E+10
98.4.25	58.06	25.01	1452.081	84307.8	4894910.8	3370.9636	195718.15	11363395.6	659758748	3.831E+10
98.4.28	60.11	21.61	1298.977	78081.513	4693479.8	3613.2121	217190.18	13055301.7	784754184	4.717E+10
98.8.19	61.33	29.75	1824.568	111900.72	6862871.5	3761.3689	230684.75	14147896	867690462	5.322E+10
98.5.15	64.8	47.3	3065.04	198614.59	12870226	4199.04	272097.79	17631936.9	1.143E+09	7.404E+10
98.9.21	64.91	27.82	1805.796	117214.23	7608375.8	4213.3081	273485.83	17751965.1	1.152E+09	7.479E+10
98.7.25	65.24	44.32	2891.437	188637.34	12306700	4256.2576	277678.25	18115728.8	1.182E+09	7.711E+10
98.4.29	66.32	56.17	3725.194	247054.89	16384680	4398.3424	291698.07	19345415.9	1.283E+09	8.509E+10
98.5.13	66.45	34.27	2277.242	151322.7	10055393	4415.6025	293416.79	19497545.4	1.296E+09	8.609E+10
98.5.12	67.59	34.37	2323.068	157016.19	10612724	4568.4081	308778.7	20870352.6	1.411E+09	9.534E+10
98.5.10	68.47	48.24	3302.993	226155.92	15484896	4688.1409	320997.01	21978665.1	1.505E+09	1.03E+11
98.8.14	72.7	32.74	2380.198	173040.39	12580037	5285.29	384240.58	27934290.4	2.031E+09	1.476E+11
98.9.20	74.42	37.16	2765.447	205804.58	15315977	5538.3364	412162.99	30673170.1	2.283E+09	1.699E+11
98.6.1	74.48	38.89	2896.527	215733.35	16067820	5547.2704	413160.7	30772208.9	2.292E+09	1.707E+11
98.5.9	78.87	32.79	2586.147	203969.44	16087070	6220.4769	490609.01	38694332.9	3.052E+09	2.407E+11
98.8.20	80.97	30.84	2497.115	202191.39	16371436	6556.1409	530850.73	42982983.5	3.48E+09	2.818E+11
98.7.29	83.28	31.26	2603.333	216805.56	18055567	6935.5584	577593.3	48101970.3	4.006E+09	3.336E+11
98.7.28	83.56	26.32	2199.299	183773.44	15356109	6982.2736	583438.78	48752144.6	4.074E+09	3.404E+11
98.6.5	84.02	17.94	1507.319	126644.93	10640707	7059.3604	593127.46	49834569.3	4.187E+09	3.518E+11
98.8.26	84.1	22.39	1882.999	158360.22	13318094	7072.81	594823.32	50024641.3	4.207E+09	3.538E+11
98.5.14	84.15	35.58	2994.057	251949.9	21201584	7081.2225	595884.87	50143712.1	4.22E+09	3.551E+11
98.5.22	85.1	38.7	3293.37	280265.79	23850618	7242.01	616295.05	52446708.8	4.463E+09	3.798E+11
98.8.23	85.6	32.35	2769.16	237040.1	20290632	7327.36	627222.02	53690204.6	4.596E+09	3.934E+11
98.5.28	87.56	22.24	1947.334	170508.6	14929733	7666.7536	671300.95	58779110.8	5.147E+09	4.506E+11

98.6.4	87.89	40.07	3521.752	309526.81	27204311	7724.6521	678919.67	59670250.1	5.244E+09	4.609E+11
98.5.16	89.02	39.1	3480.682	309850.31	27582875	7924.5604	705444.37	62798657.5	5.59E+09	4.977E+11
98.8.1	91.78	33.5	3074.63	282189.54	25899356	8423.5684	773115.11	70956504.6	6.512E+09	5.977E+11
98.7.23	91.94	32	2942.08	270494.84	24869295	8452.9636	777165.47	71452593.6	6.569E+09	6.04E+11
98.8.27	105.25	23.84	2509.16	264089.09	27795377	11077.563	1165913.5	122712391	1.292E+10	1.359E+12
98.7.24	105.31	24.21	2549.555	268493.65	28275066	11090.196	1167908.6	122992450	1.295E+10	1.364E+12
98.5.17	105.63	35.33	3731.908	394201.43	41639497	11157.697	1178587.5	124494200	1.315E+10	1.389E+12
98.7.8	111.39	44.48	4954.627	551895.92	61475687	12407.732	1382097.3	153951816	1.715E+10	1.91E+12
98.7.21	111.52	34.95	3897.624	434663.03	48473621	12436.71	1386941.9	154671766	1.725E+10	1.924E+12
98.8.28	111.91	25.88	2896.231	324117.19	36271955	12523.848	1401543.8	156846771	1.755E+10	1.964E+12
98.8.22	112.88	34.47	3890.974	439213.1	49578375	12741.894	1438305	162355873	1.833E+10	2.069E+12
98.8.18	113.71	29.21	3321.469	377684.25	42946476	12929.964	1470266.2	167183972	1.901E+10	2.162E+12
98.5.27	115.7	20.76	2401.932	277903.53	32153439	13386.49	1548816.9	179198115	2.073E+10	2.399E+12
98.7.20	115.85	34.52	3999.142	463300.6	53673375	13421.223	1554848.6	180129213	2.087E+10	2.418E+12
98.8.25	117.09	27.93	3270.324	382922.2	44836361	13710.068	1605311.9	187965967	2.201E+10	2.577E+12
98.8.4	119.48	35.78	4274.994	510776.33	61027556	14275.47	1705633.2	203789055	2.435E+10	2.909E+12
98.7.19	125.18	37.43	4685.487	586529.31	73421739	15670.032	1961574.7	245549915	3.074E+10	3.848E+12
98.7.7	126.28	43.44	5485.603	692721.97	87476931	15946.638	2013741.5	254295276	3.211E+10	4.055E+12
98.7.9	129.25	51.31	6631.818	857162.41	110788242	16705.563	2159194	279075818	3.607E+10	4.662E+12
98.7.22	129.95	36.42	4732.779	615024.63	79922451	16887.003	2194466	285170853	3.706E+10	4.816E+12
98.6.3	133.83	47.13	6307.408	844120.4	112968633	17910.469	2396958.1	320784896	4.293E+10	5.745E+12
98.5.11	139.91	39.34	5504.059	770072.95	107740907	19574.808	2738711.4	383173112	5.361E+10	7.501E+12
98.5.8	146.65	35.28	5173.812	758739.53	111269152	21506.223	3153887.5	462517606	6.783E+10	9.947E+12
98.6.2	147.82	50.41	7451.606	1101496.4	162823202	21850.752	3229978.2	477455380	7.058E+10	1.043E+13
98.7.31	156.94	33.26	5219.824	819199.24	128565129	24630.164	3865457.9	606644959	9.521E+10	1.494E+13
98.8.15	164.59	35.25	5801.798	954917.85	157169929	27089.868	4458721.4	733860954	1.208E+11	1.988E+13
98.5.26	168.39	48.99	8249.426	1389120.9	233914062	28355.192	4774730.8	804016919	1.354E+11	2.28E+13
98.8.16	171.04	36.97	6323.349	1081545.6	184987556	29254.682	5003720.7	855836396	1.464E+11	2.504E+13
98.7.17	173.48	28.54	4951.119	858920.16	149005469	30095.31	5220934.4	905727708	1.571E+11	2.726E+13
98.8.21	174.88	32.75	5727.32	1001593.7	175158710	30583.014	5348357.6	935320770	1.636E+11	2.86E+13
98.7.5	175.65	101.34	17800.37	3126635.2	549193467	30852.923	5419315.8	951902827	1.672E+11	2.937E+13
98.5.2	181.79	46.96	8536.858	1551915.5	282122717	33047.604	6007723.9	1092144137	1.985E+11	3.609E+13
98.7.16	189.35	25.11	4754.579	900279.44	170467912	35853.423	6788845.6	1285467905	2.434E+11	4.609E+13
98.8.17	192.79	37.39	7208.418	1389710.9	267922369	37167.984	7165615.7	1381459042	2.663E+11	5.135E+13
98.5.23	195.32	45.82	8949.562	1748028.5	341424932	38149.902	7451438.9	1455415053	2.843E+11	5.552E+13
98.8.2	200.9	33.51	6732.159	1352490.7	271715390	40360.81	8108486.7	1628994984	3.273E+11	6.575E+13
98.9.18	204.56	31.39	6421.138	1313508.1	268691211	41844.794	8559771	1750986751	3.582E+11	7.327E+13
98.5.1	204.59	55.56	11367.02	2325578.7	475790147	41857.068	8563537.6	1752014150	3.584E+11	7.333E+13
98.7.18	205.96	33.66	6932.614	1427841.1	294078152	42419.522	8736724.7	1799415813	3.706E+11	7.633E+13
98.7.6	225.4	74.86	16873.44	3803274.3	857258022	50805.16	11451483	2581164283	5.818E+11	1.311E+14
98.7.10	228.74	59.94	13710.68	3136179.9	717369799	52321.988	11968131	2737590386	6.262E+11	1.432E+14
98.7.15	229.91	54.52	12534.69	2881851.3	662566436	52858.608	12152723	2794032450	6.424E+11	1.477E+14

98.5.25	238.82	39.48	9428.614	2251741.5	537760905	57034.992	13621097	3252990358	7.769E+11	1.855E+14
98.5.24	240.42	48.29	11609.88	2791247.8	671071792	57801.776	13896703	3341045355	8.033E+11	1.931E+14
98.4.30	273.47	47.18	12902.31	3528396	964910447	74785.841	20451684	5592921999	1.529E+12	4.183E+14
98.8.24	277.86	47.87	13301.16	3695859.8	1.027E+09	77206.18	21452509	5960794168	1.656E+12	4.602E+14
98.7.14	280.33	50.33	14109.01	3955178.5	1.109E+09	78584.909	22029708	6175587907	1.731E+12	4.853E+14
98.7.13	309.98	33.76	10464.92	3243917.4	1.006E+09	96087.6	29785234	9232826951	2.862E+12	8.872E+14
98.9.17	349.65	73.45	25681.79	8979638.7	3.14E+09	122255.12	42746504	1.4946E+10	5.226E+12	1.827E+15
98.7.12	403.21	54.87	22124.13	8920671.5	3.597E+09	162578.3	65553198	2.6432E+10	1.066E+13	4.297E+15
98.8.3	430.45	32.68	14067.11	6055185.8	2.606E+09	185287.2	79756876	3.4331E+10	1.478E+13	6.361E+15
98.7.11	489.63	79.58	38964.76	19078313	9.341E+09	239737.54	117382690	5.7474E+10	2.814E+13	1.378E+16
Σ	15493.6	7446.66	604906.3	113577701	3.212E+10	2410122	612161566	1.9864E+11	7.408E+13	3.004E+16

从上表可以得出方程组中的各参数分别为：

$$\sum yx = 604906.3, \sum yx^2 = 113577701, \sum yx^3 = 3.212E+10, \sum x^2 = 2410122, \\ \sum x^3 = 612161566, \sum x^4 = 1.9864E+11, \sum x^5 = 7.408E+13, \sum x^6 = 3.004E+16$$

将各参数代入方程组，计算出三阶方程为：

$$\hat{y} = 5E-07 x^3 - 0.0004 x^2 + 0.1706x + 22.514$$

原水浊度与混凝剂耗率关系曲线图

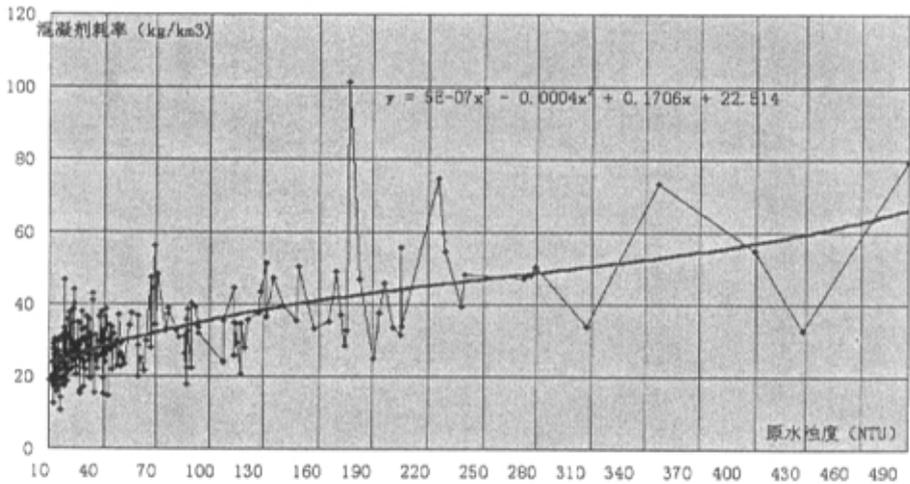
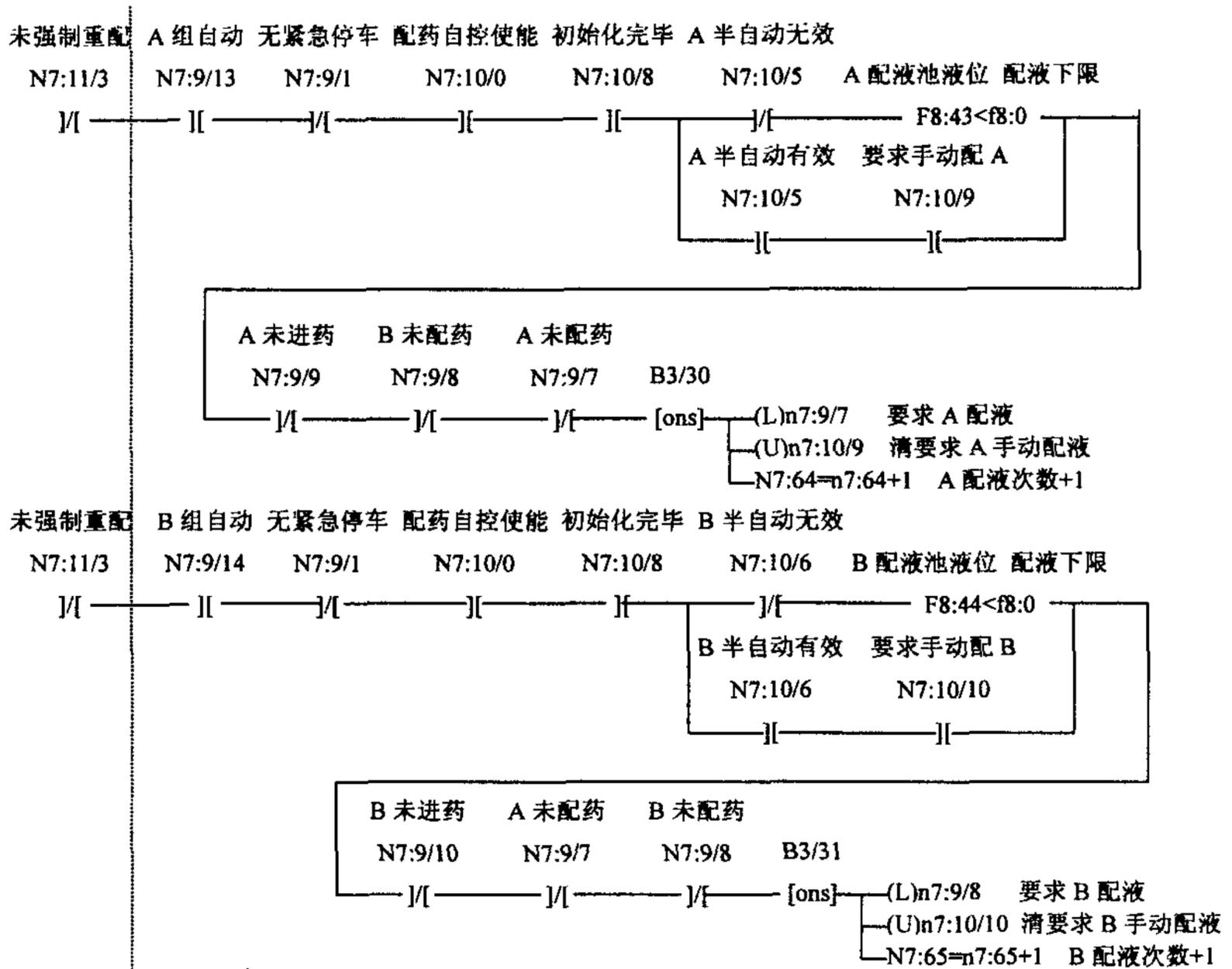


图 A1 原水浊度与混凝剂耗率关系

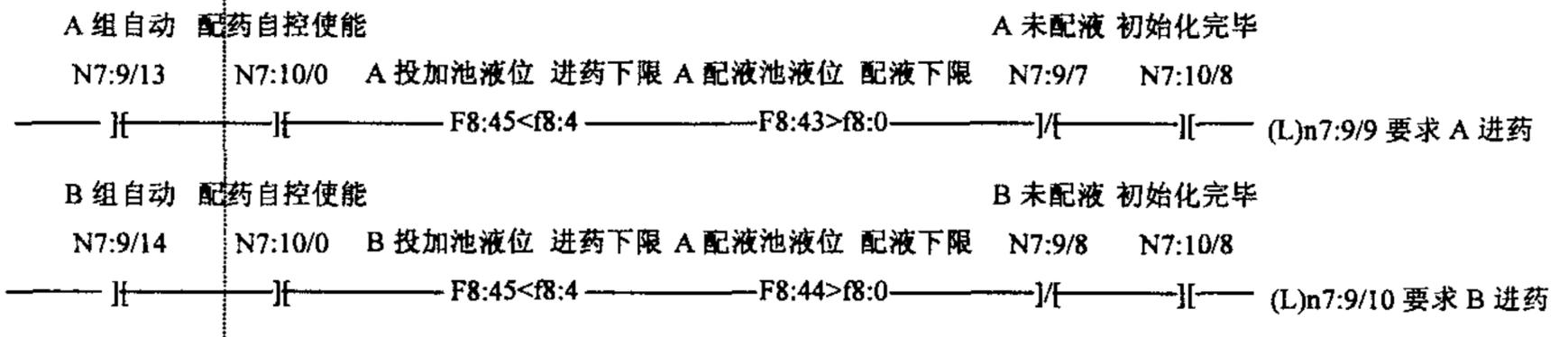
Fig A1 The graph about raw water turbidity and coagulant cost relation

### 附录 B 主要程序段清单及说明

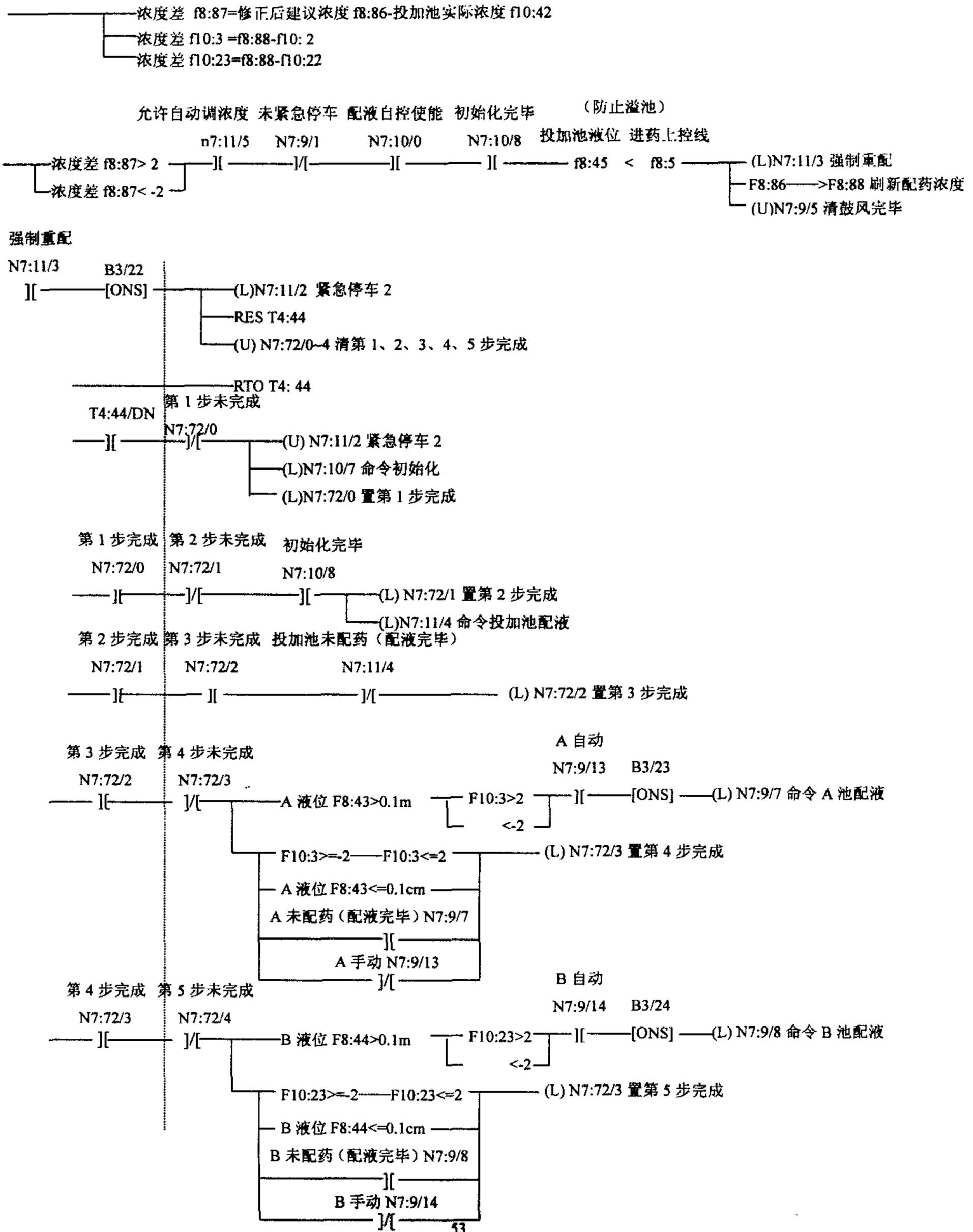
#### 附 B1 普通配液过程的启动

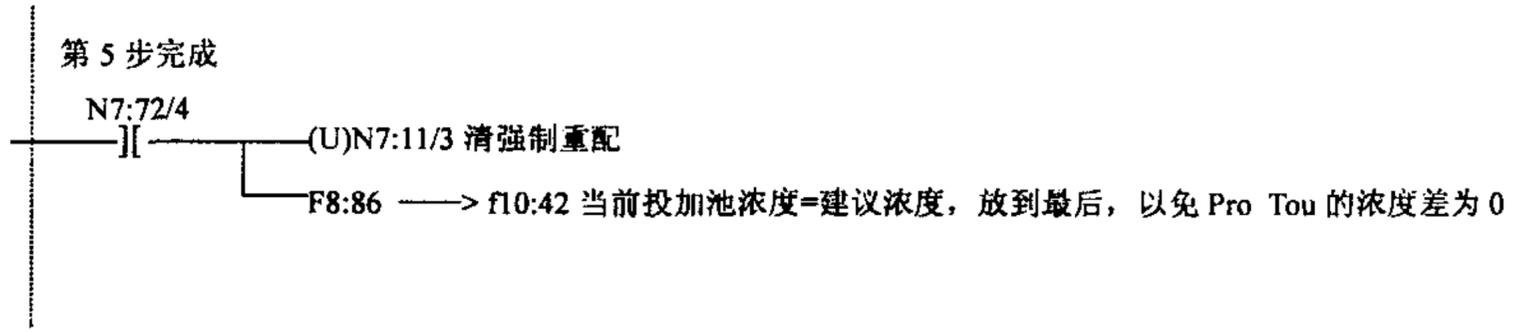


#### 附 B2 投加过程的启动

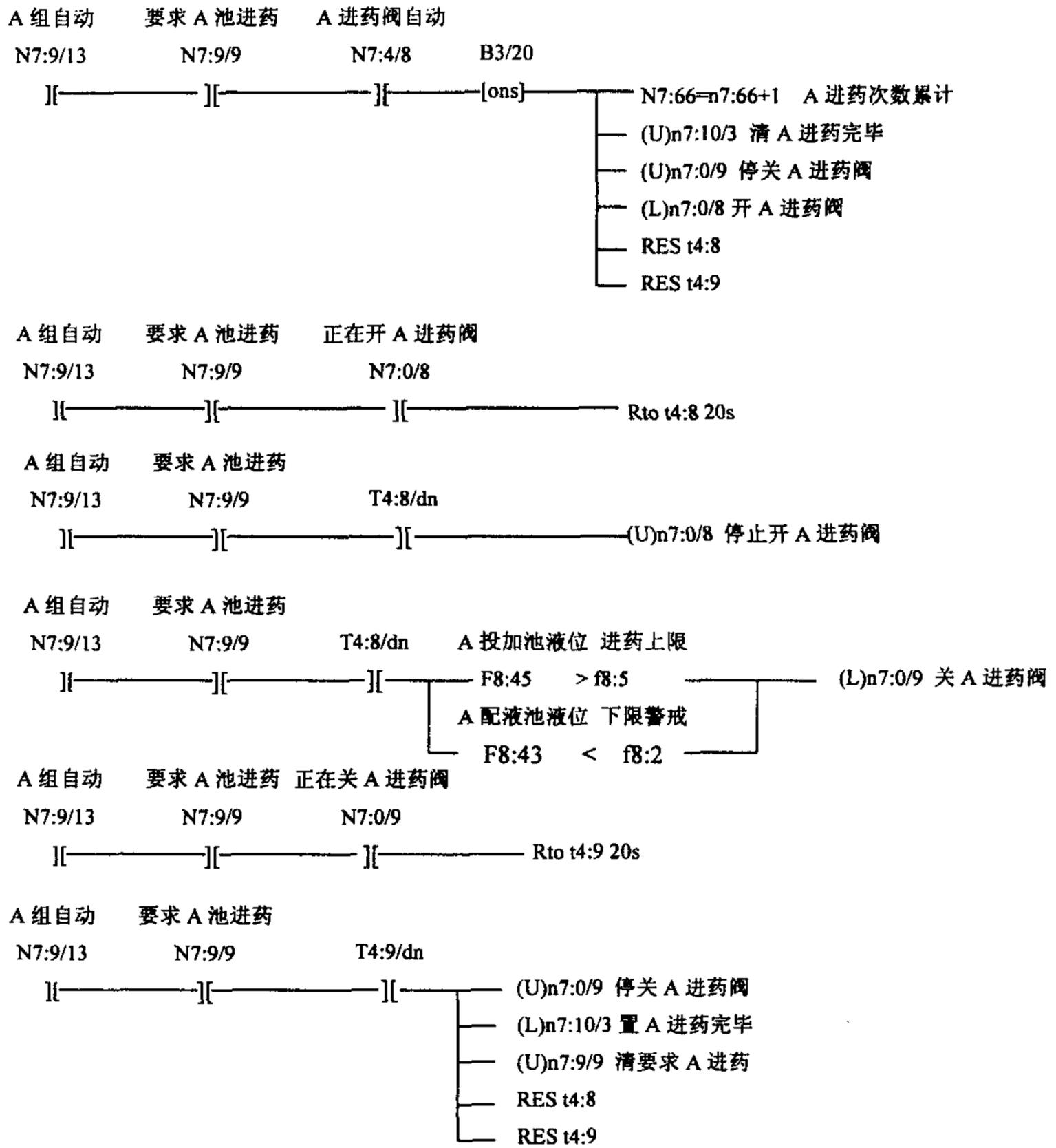


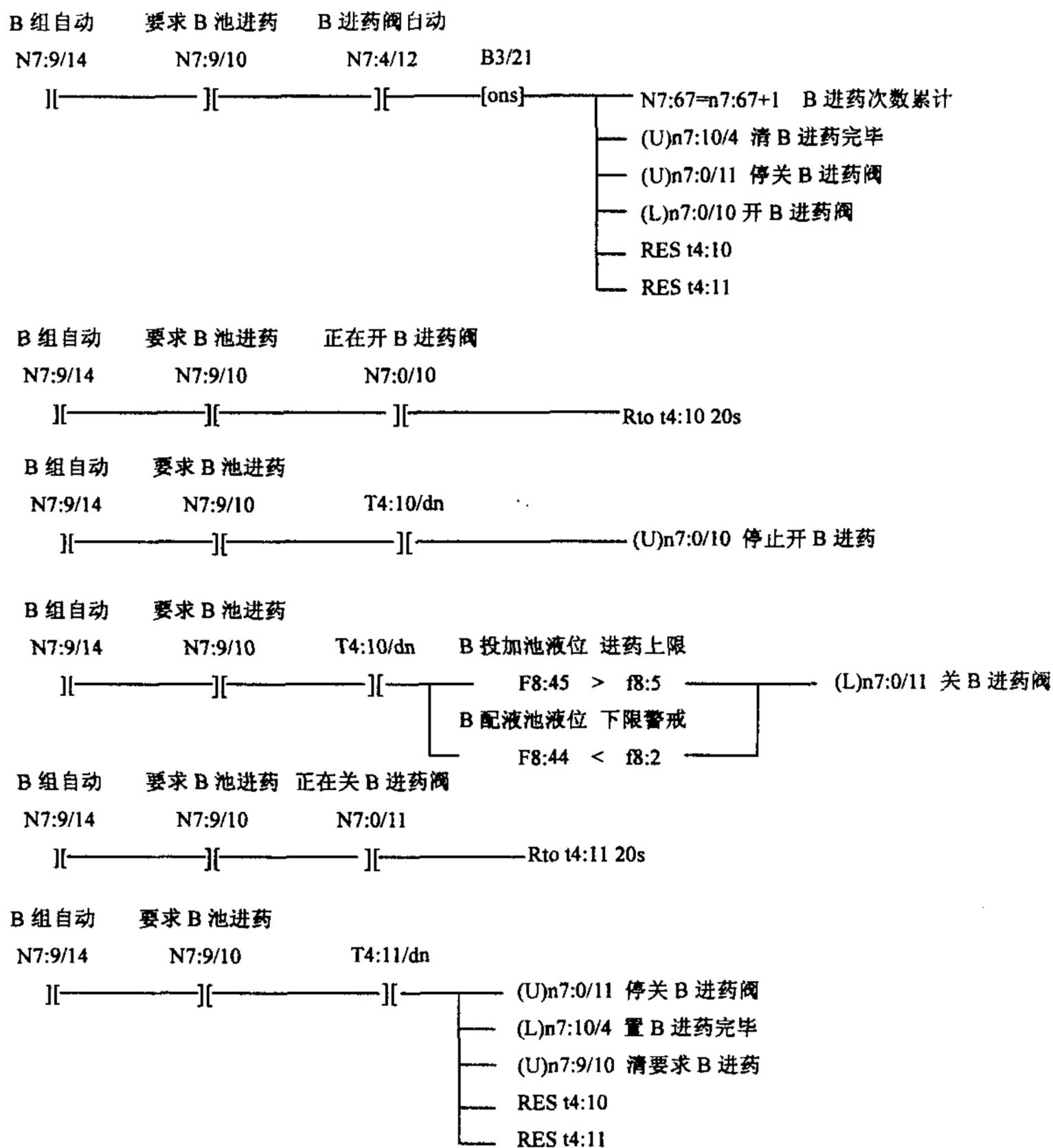
附 B3 强制重配控制



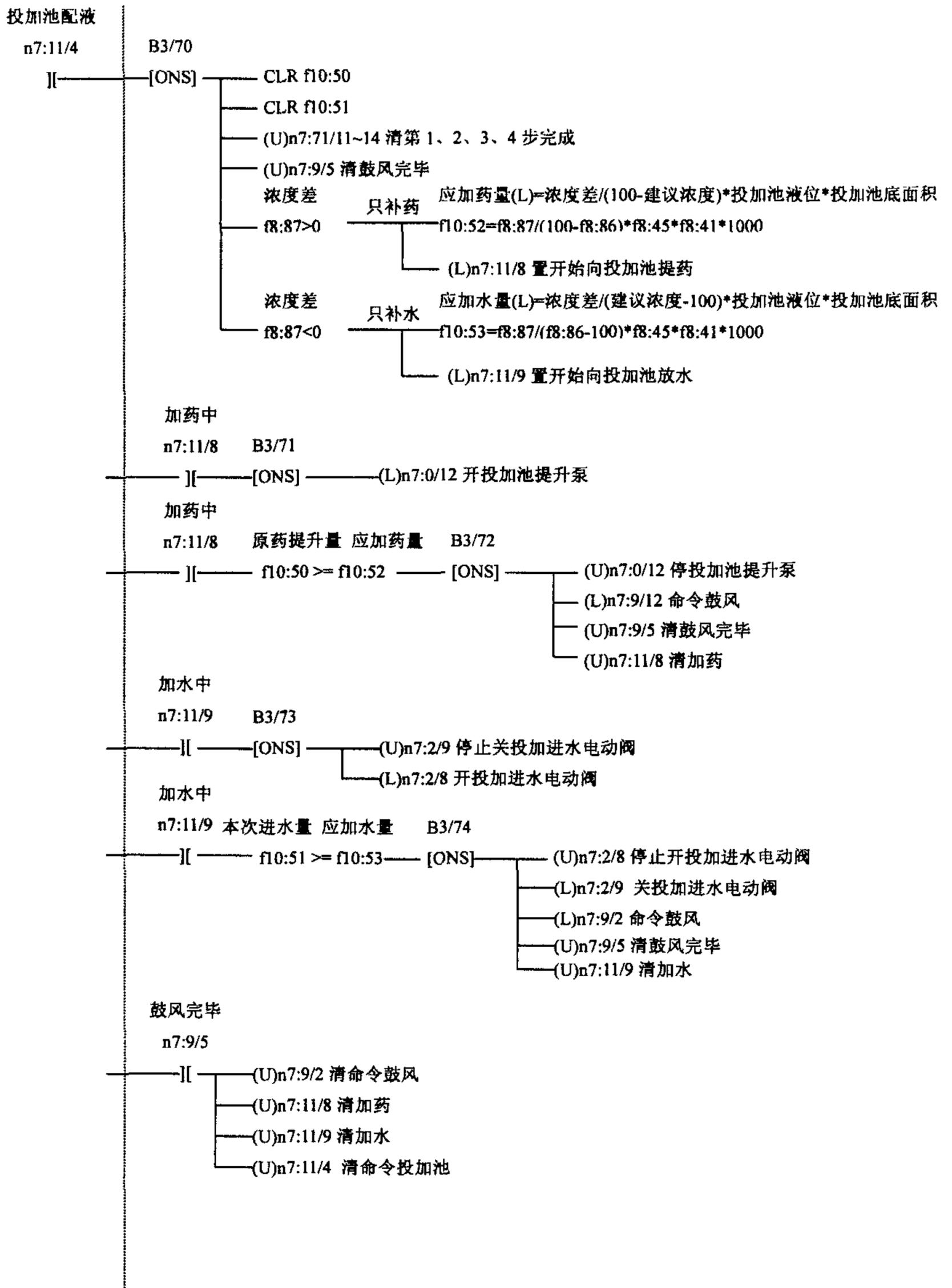


附 B4 投加过程



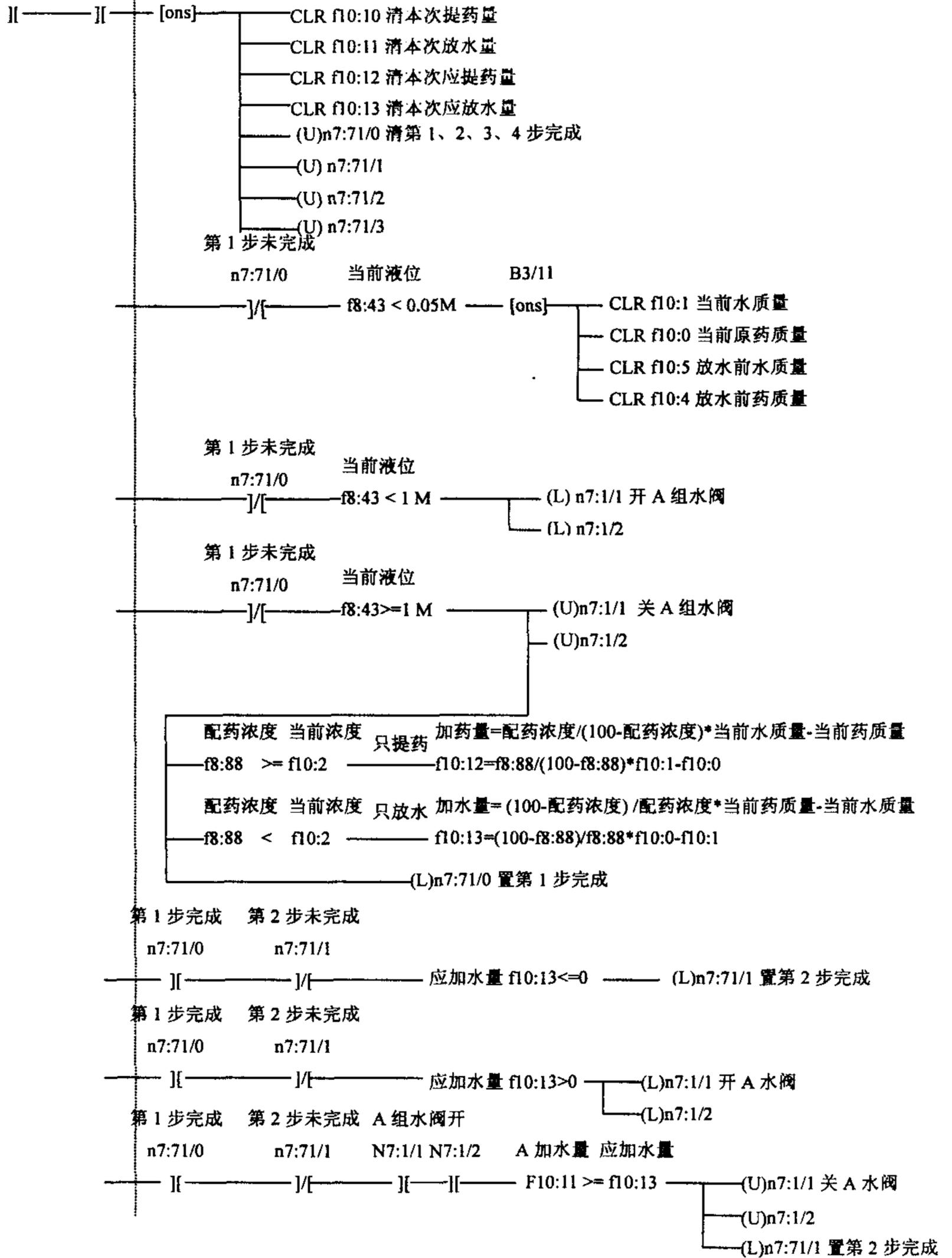


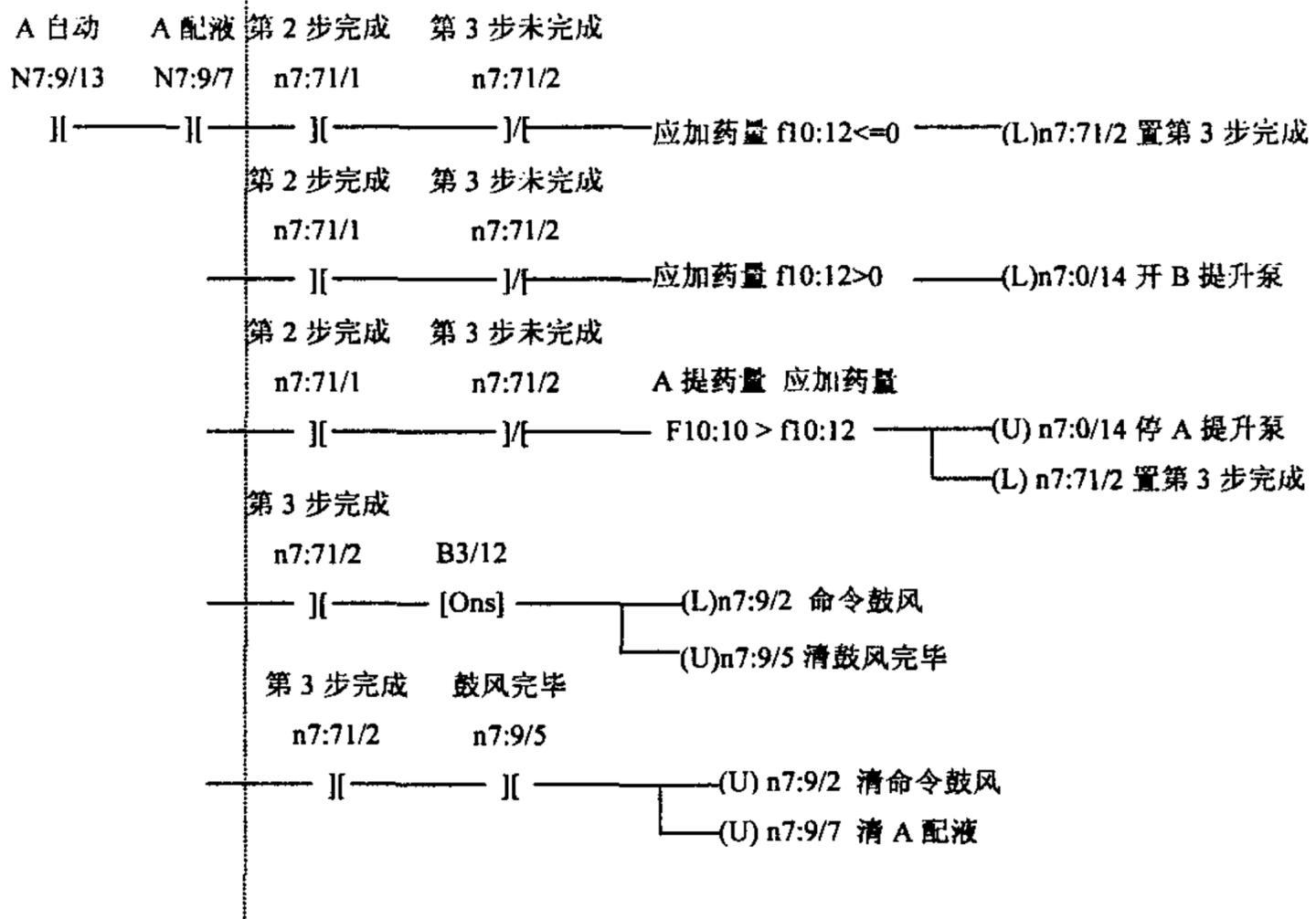
附 B5 投加池配液过程



附 B6 配液池配液过程

A 自动 A 配液  
N7:9/13 N7:9/7 B3/10



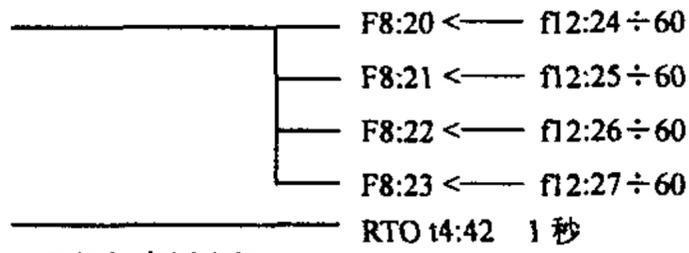


附 B7 部分算法及

投加池下控限

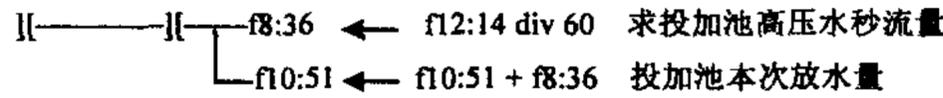
$$f8:8 = (F8:4 + f8:6) / 2$$

药耗统计



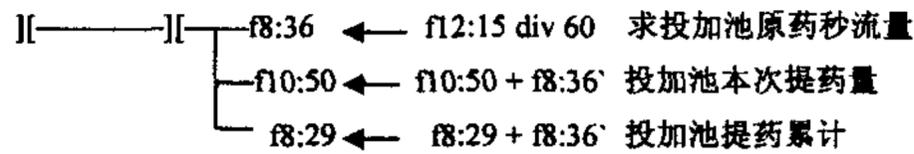
开投加高压水阀

t4:42/dn n7:2/8 (临) L/min



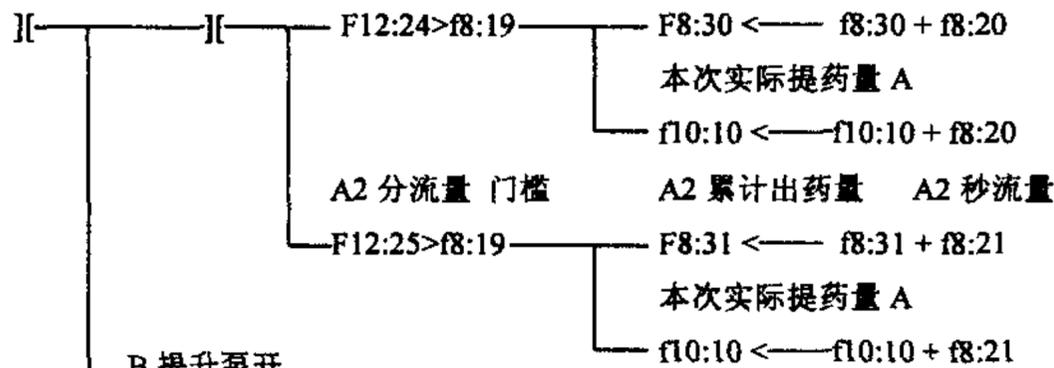
投加提升泵开

t4:42/dn n7:0/12 (临) L/min



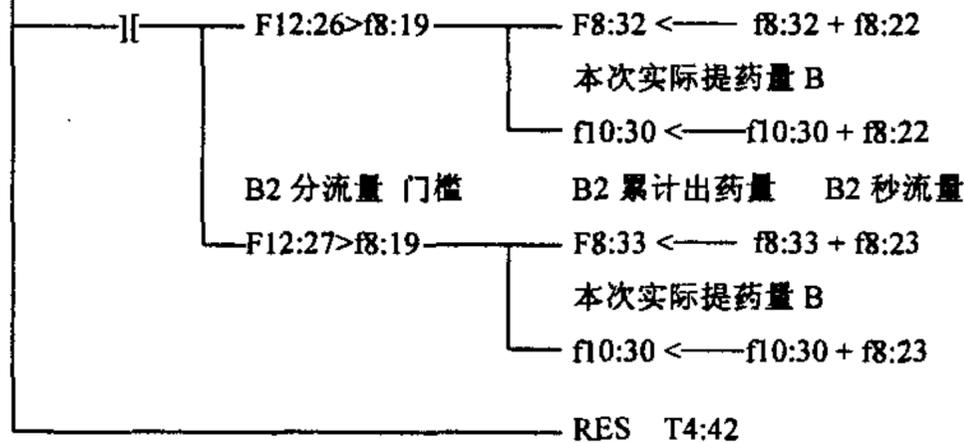
A 提升泵开

T4:42/DN n7:0/14 A1 分流量 门槛 A1 累计出药量 A1 秒流量



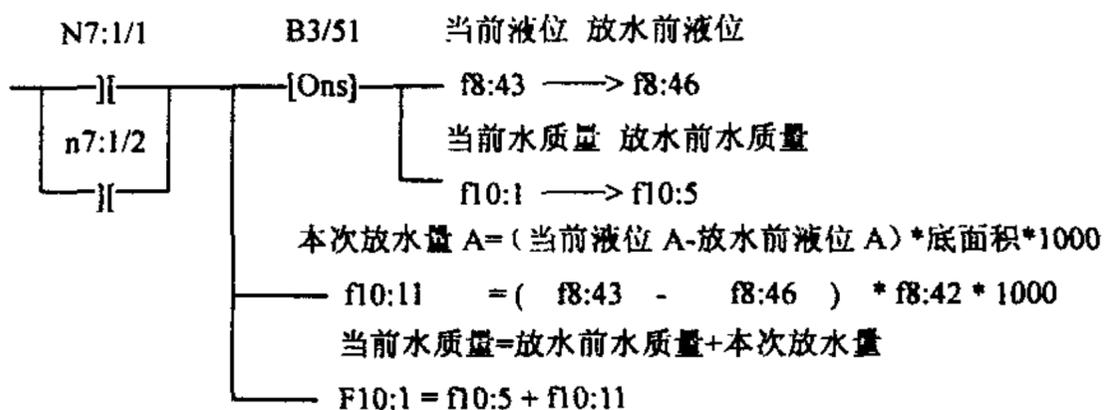
B 提升泵开

n7:0/13 B1 分流量 门槛 B1 累计出药量 B1 秒流量



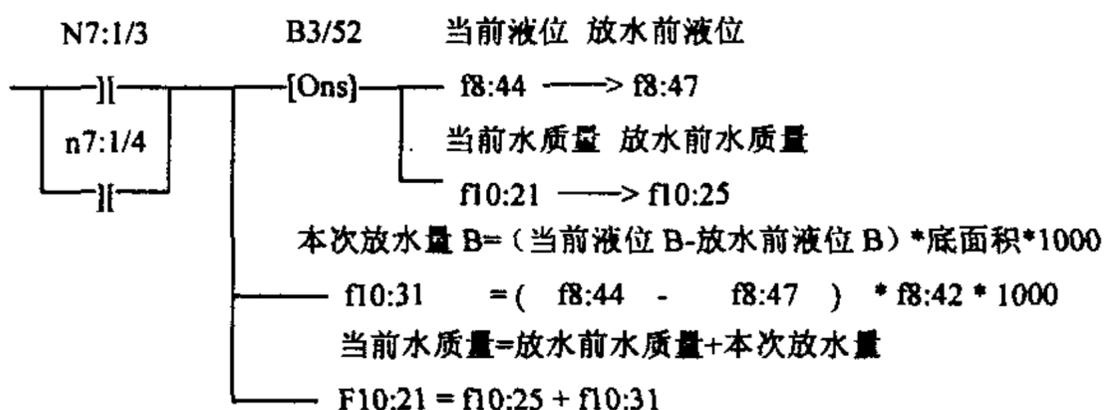
实时计算当前水质量

A 组水阀开

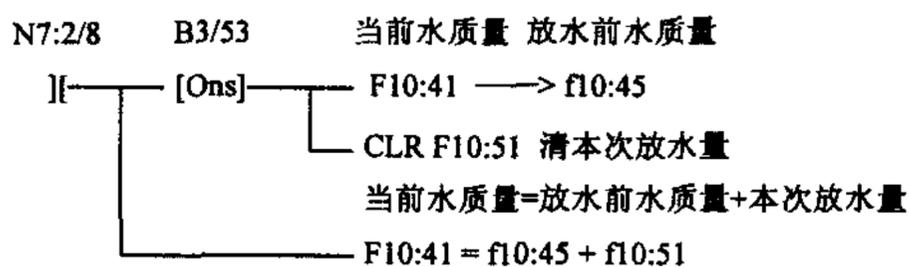


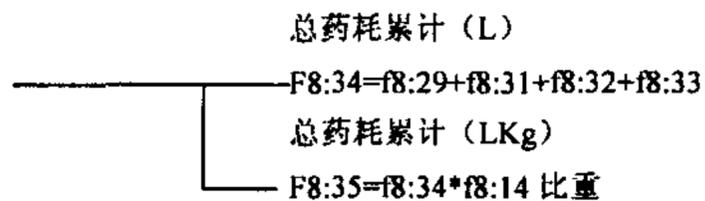
该算法决定配液池放水时，  
投加池不能同时进药

B 组水阀开

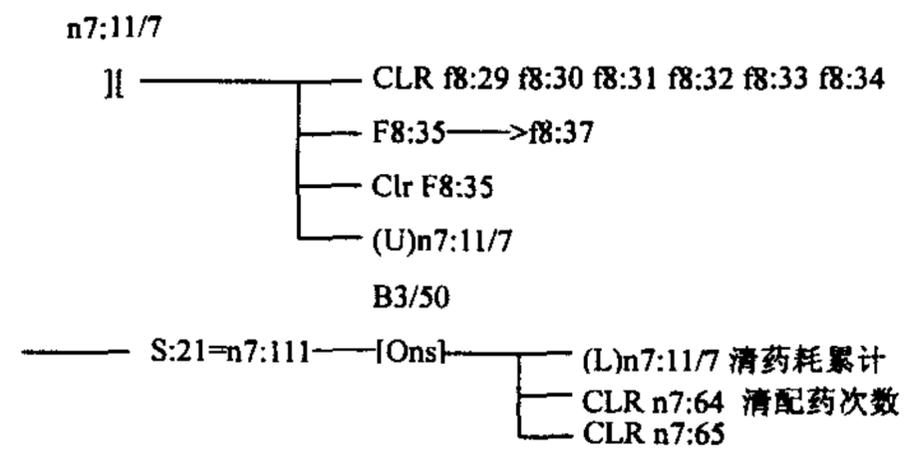


投加水阀开

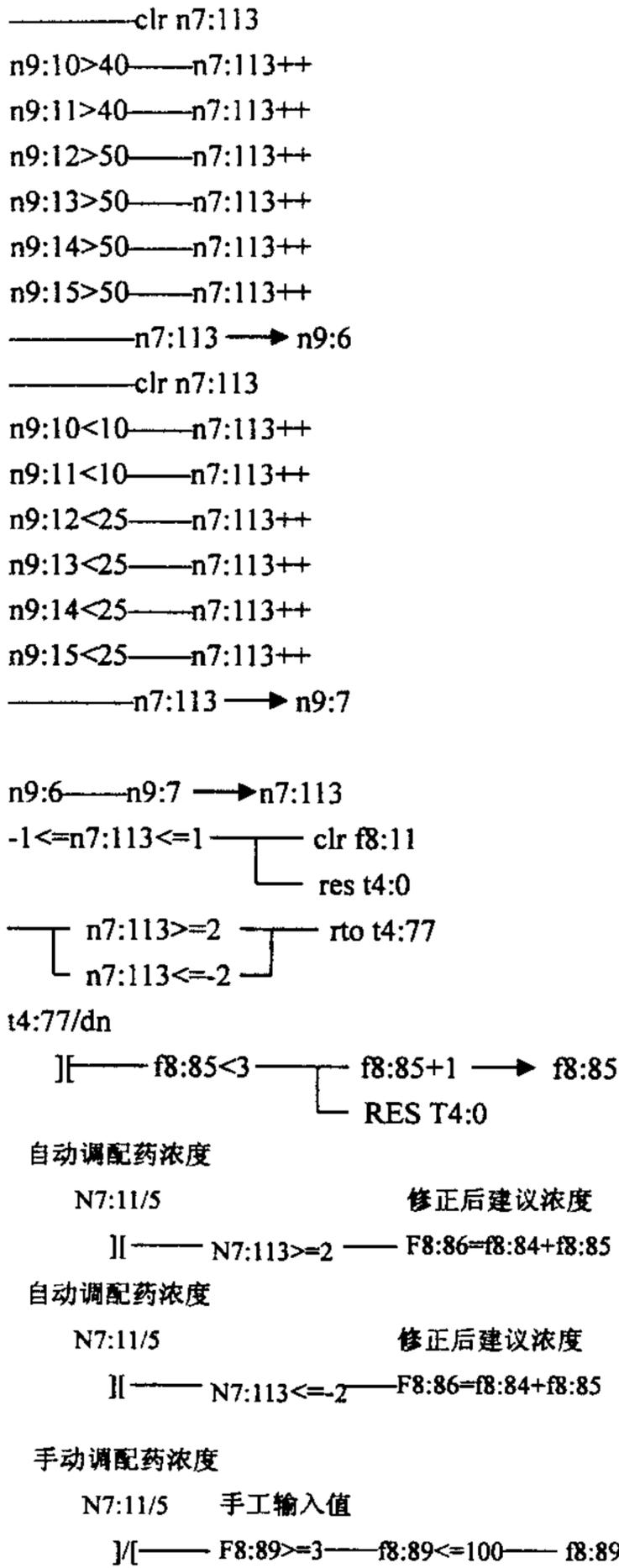




清所有药耗累计



计量泵转速超限的时间统计



实时计算当前浓度

$$\text{当前浓度}\% = \frac{\text{当前原药质量}}{\text{当前原药质量} + \text{当前水质量} + 1} * 100$$

防止“除零”

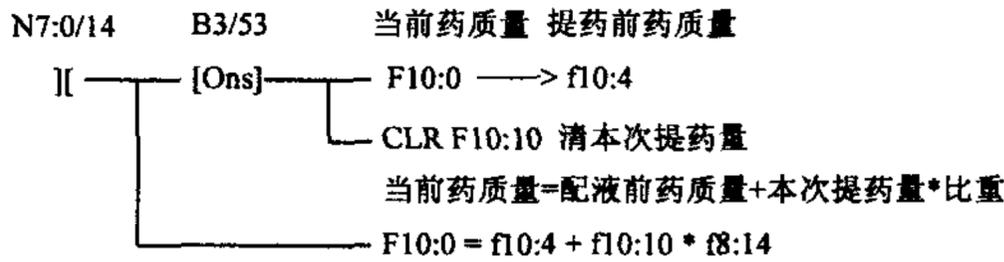
$$\text{A池 } f10:2 = \frac{F10:0}{F10:0 + f10:1 + 1} * 100$$

$$\text{B池 } f10:22 = \frac{F10:20}{F10:20 + f10:21 + 1} * 100$$

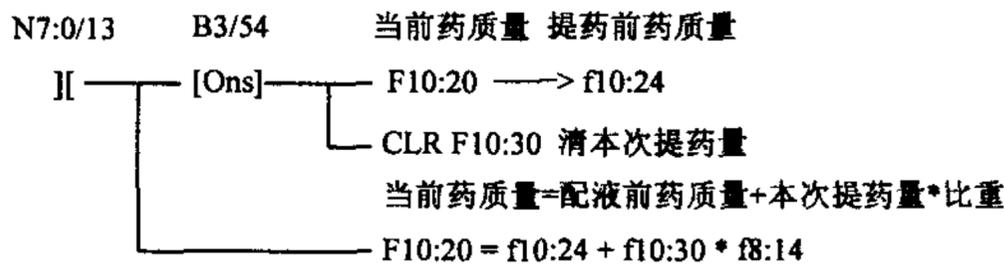
$$\text{投加 } f10:42 = \frac{F10:40}{F10:40 + f10:41 + 1} * 100$$

实时计算当前原药质量

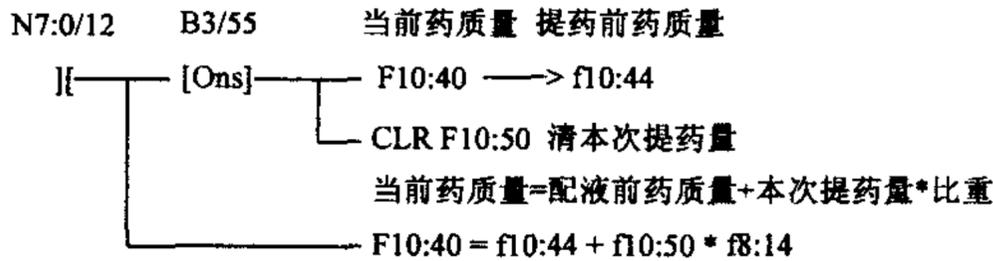
A 提升泵开



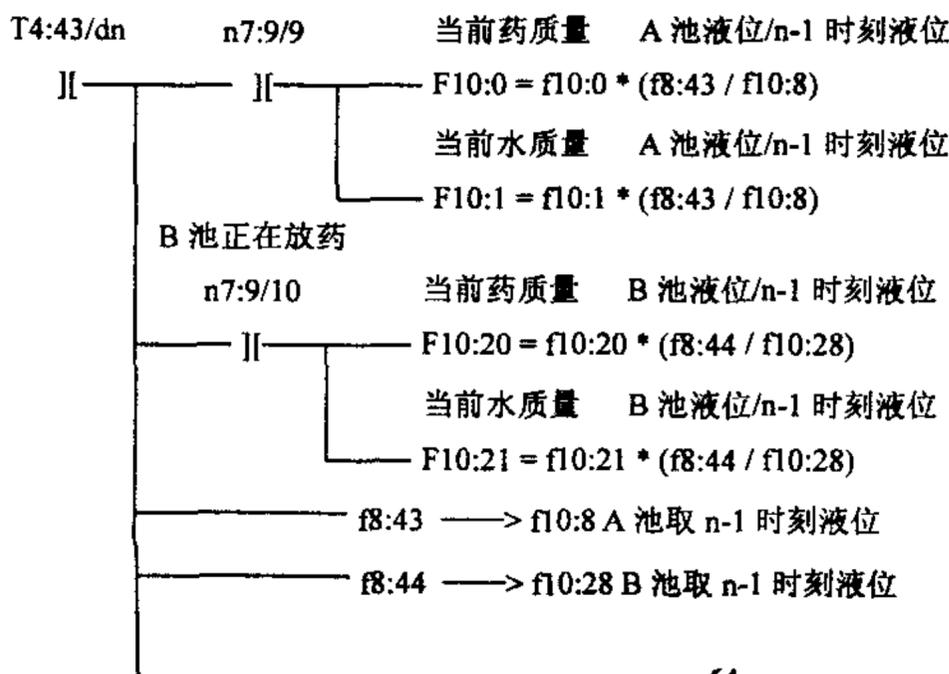
B 提升泵开



投加提升泵开



----- RTO    T4:43  
A 池正在放药



————— F12:13 ———> f10:48 投加池取 n-1 时刻液位  
————— Res T4:43