

# 工业过程控制系统 设计范例

王永初 任秀珍 著

科学出版社

# 工业过程控制系统设计范例

王永初 任秀珍 著

科学出版社

1986

## 内 容 简 介

本书主要介绍化工、炼油、冶金、电厂、造纸、纺织、水泥等工业生产过程典型控制系统的组成、设计、分析以及仪表参数的计算。全书共分八章,包括热交换与反应过程控制;物质料面与液位控制;燃烧过程控制;供料与配料过程控制;升压、减压与均压过程控制;节能控制;多变量与复杂过程控制以及安全保护系统等,共一百零八例子。通过具体实例把古典和现代控制理论与生产实践中的问题紧密地结合起来,既有理论分析,又有具体的实施线路,并说明各种系统设计与调试的关键性问题,内容比较丰富、实用。

本书可供工业自动化仪表与过程控制等专业的科研、设计人员以及大专院校有关专业的师生参考。

3283/30  
12

## 工业过程控制系统设计范例

王永初 任秀珍 著

责任编辑 李淑兰 鞠丽娜

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1986年6月第一版 开本:850×1168 1/32

1986年6月第一次印刷 印张:16 3/8

印数:0001—4,600 字数:432,000

统一书号:15001·725

本社书号:4814·15—8

定价:4.60元

## 前 言

近年来我国出版了许多控制理论与自动化仪表方面的专著和教材,这对我国自动化事业无疑是一个促进。读者在学完这些教材或专著以后,总有一个把学过的知识应用于自己工作实践的迫切愿望,在他们开始从事自动化系统实践的时候,经常要找一些共同的设计实例作为蓝本,然后结合研究对象的具体特点,经过适当的改造,就能得到一个符合生产过程要求的仪表控制系统。遗憾的是这些书籍很难找到,鉴于上述情况,我们把自己多年来从事化工、炼油、冶金、电站以及轻工等行业的实践作比较系统的总结与归纳,并参阅了许多国内外生产过程成功的例子,最后写成《工业过程控制系统设计范例》一书。

在撰写过程中,我们考虑到当前生产过程自动化主要还是仪表化,大多数工厂的自动化系统都是应用工业自动化仪表来实现的,因此本书主要是介绍以工业自动化仪表为工具组成控制系统的范例。由于简单的单回路控制系统在设计上已经成熟,许多工厂自己设计的系统都能得到很高的投运率,因此本书重点是介绍一些比较特殊(不是一般PID)和比较复杂(不是单回路)的系统。本书分八章,共一百零八例子,除了介绍系统的设计与组成外,还着重介绍工程技术人员普遍关心的几个问题,如仪表信号的静态匹配、调节器工作点与整定参数的设置、不同系统之间的动态匹配、多变量系统的解耦与协调,以及在一般控制系统基础上引进某些逻辑功能的设计问题等。这些问题正是一个系统设计成功的关键,这些方法贯穿在实例中介绍,更容易为读者所理解。这里我们所指的特殊规律系统是对一般的PID调节系统而言,其实特殊系统并不特殊,在许多场合下,应用得巧可以得到异乎寻常的效果。然而这些系统对不少读者来说可能是比较陌生的,本书则提

供了许多这样的实例。

我们在撰写此书的过程中考虑到如下两个因素：1. 有些例子引用国外的应用报道，对于这些例子进行了解剖分析，并结合国产的仪表加以介绍；2. 有些例子是七十年代以前已用得较好的系统，但其采用的仪表目前已经停产。因此本书的取材都有实际应用的背景，许多例子都是目前正在应用的系统。我们撰写此书的目的是向读者推荐新型的系统与仪表，设计一个切实可行的工业控制系统，因此我们在广泛分析的基础上，从几百个控制系统的范例中挑选了一百零八个例子，这些范例各具特色，基本上概括了当前自动化仪表在工业过程控制系统中的应用，并且设计水平略高于某些实际的系统。

我们希望通过本书的介绍，能使更多读者了解工业自动化仪表在许多新领域的应用，能在解决他们各自的实践问题中发挥作用。因我们水平不高、经验不足，书中难免有不妥之处，欢迎读者批评指正。

浙江大学曹润生同志和谭祖根教授在百忙中仔细地审阅了本书，提出许多宝贵的修改意见，化工部万学达高级工程师以及有关同志对本书的编写大纲、部分初稿提出许多有益的建议，在此一并致谢。

著 者

1984年4月

# 目 录

<b>第一章 热交换与反应过程的控制</b> .....	1
一、 氨冷器被冷却介质出口温度-液位超驰控制系统 .....	2
二、 丙烯冷却器的被冷却介质温度-压力串接控制系 统.....	10
三、 热交换器温度反馈-静态前馈控制系统 .....	15
四、 蒸汽加热器的串级-动态前馈控制系统 .....	19
五、 再沸器加热蒸汽的连续流量与限幅控制系统.....	22
六、 发电厂过热蒸汽中间温度微分控制系统.....	30
七、 减温器喷雾不均匀过热器的出口温度串级控制系 统.....	36
八、 冷凝器温度复合控制系统.....	41
九、 具有旁路的热交换器出口温度控制系统.....	43
十、 电热炉温度离散二位 PID 控制系统.....	46
十一、 惯性电热炉温度时间比例控制系统.....	51
十二、 夹套反应釜温度分程控制系统.....	55
十三、 间歇式反应釜温度控制系统.....	59
十四、 加热炉多点平均温度静态增益自适应的纯滞后 补偿控制系统.....	64
十五、 水泥窑温度的负荷自适应控制系统.....	69
十六、 氧化炉温度串级与氨/空气比值(限幅)的混合控 制系统.....	76
十七、 变换炉温度多级串级调节系统.....	81
十八、 烧结块破碎机温度超驰控制系统.....	89
<b>第二章 物质料面与液位控制</b> .....	96

十九、给水塔液位的多位式控制系统·····	96
二十、低洼地大型污料池液位位式控制系统·····	101
二十一、热水塔液位位式控制系统·····	105
二十二、夹套锅炉水位控制系统·····	109
二十三、小型工业锅炉水位位式控制系统·····	111
二十四、热电厂中压锅炉水位双冲量控制系统·····	119
二十五、锅炉水位三冲量控制系统·····	122
二十六、具有压力补偿的锅炉水位三冲量控制系统·····	125
二十七、石油化工厂脱甲烷塔塔釜液位与塔底产品流 量的均匀控制系统·····	132
二十八、油水分离器的液体界面控制系统·····	136
二十九、中间贮槽液位的比例-迟后(P-L)控制系统·····	139
三十、澄清池-清水池液位宽不灵敏区窄比例带控制 系统·····	143
三十一、回流罐压力与液面相关的前馈控制系统·····	150
三十二、粉性物质料位控制系统·····	153
三十三、钢带厚度自适应纯滞后补偿控制系统·····	156
三十四、固体料面控制系统·····	159
三十五、液态成品分装控制系统·····	161
三十六、电弧炉电极位置控制系统·····	163
<b>第三章 燃烧过程控制</b> ·····	176
三十七、热风炉多变量燃烧控制系统·····	176
三十八、热风炉燃烧串级控制系统·····	182
三十九、窑炉燃烧火焰温度控制系统·····	187
四十、陶瓷烧成炉温度及气氛控制系统·····	190
四十一、燃油锅炉低氧燃烧控制系统·····	192
四十二、负压燃油炉燃烧控制系统·····	196
四十三、燃煤锅炉氧含量校正的燃烧控制系统·····	200
四十四、利用热量与空气配比的煤粉锅炉燃烧控制系统 ·····	204

四十五、竖井式磨煤机锅炉的燃烧控制系统·····	207
四十六、重油与可燃气体混烧控制系统·····	212
四十七、混合燃料燃烧的串联控制系统·····	216
四十八、窑炉多变量选择性燃烧控制系统·····	219
<b>第四章 供料与配料过程控制</b> ·····	<b>223</b>
四十九、水泥配料控制系统·····	223
五十、 泥浆浓度控制系统·····	231
五十一、烧结炉送料控制系统·····	235
五十二、自来水厂氯气注入流量控制系统·····	237
五十三、药剂配制过程控制系统·····	241
五十四、具有成分量校正的配比控制系统·····	245
五十五、转炉供氧控制系统·····	249
五十六、醋酸乙烯生产的废液中和控制系统·····	252
五十七、不同滴定曲线的 pH 值控制系统·····	256
五十八、分级 pH 值控制系统·····	261
五十九、油品调和数模混合式控制系统·····	263
六十、 蒸汽/天然气配比控制系统·····	268
六十一、醋酸氧化反应器的给氧控制系统·····	271
六十二、滑差电机转速控制系统·····	277
六十三、直流电机转速控制系统·····	283
六十四、交流异步电机变频调速系统·····	291
<b>第五章 升压、减压与均压过程控制</b> ·····	<b>299</b>
六十五、玻璃熔炉窑压 PID 控制系统·····	299
六十六、年产 5 万吨合成氨工厂造气炉低压蒸汽位式 控制系统·····	303
六十七、蒸发器二次蒸汽双模控制系统·····	307
六十八、硫化炉振幅可调的压力位式控制系统·····	311
六十九、中压蒸汽压力选择性系统·····	314
七十、 集气站压力采样控制系统·····	317
七十一、加压气化炉负荷控制系统·····	328



七十二、流量校验装置的压力流量解耦控制系统·····	333
七十三、高炉压力分程控制系统·····	336
七十四、高炉均压控制系统·····	340
七十五、发泡水泥混凝土制件的条件压力控制系统·····	344
七十六、精馏塔压力控制系统·····	350
七十七、造纸厂烘缸蒸汽压力控制系统·····	352
<b>第六章 节能控制</b> ·····	357
七十八、精馏塔浮压控制节能系统·····	357
七十九、再沸器加热油节能控制系统·····	363
八十、连续铸钢过程的结晶器流量控制系统·····	368
八十一、糖液浓缩效率控制系统·····	374
八十二、冷却水流量控制系统·····	379
八十三、连续铸锭过程的喷雾水控制系统·····	382
八十四、多效蒸发器供料与加热蒸汽流量控制系统·····	386
八十五、吸收塔富液能量回收控制系统·····	389
八十六、改变调节阀安装位置的节能控制系统·····	393
八十七、利用低压蒸汽的加热控制系统·····	397
八十八、多种燃料的条件燃烧节能控制系统·····	399
八十九、具有节能效果的压缩机输出压力控制系统·····	401
九十、催化裂化再生器具有节能的压力比例控制系统 ·····	404
九十一、直流电机节能控制系统·····	408
<b>第七章 多变量与复杂过程控制</b> ·····	417
九十二、热风量多变量条件控制系统·····	418
九十三、多台锅炉并联运行的负荷分配控制系统·····	423
九十四、多台除氧器并联运行的压力相关控制系统·····	428
九十五、磨煤机多变量解耦控制系统·····	439
九十六、直流锅炉-汽机协调控制系统·····	454
九十七、间歇加热炉整体控制系统·····	459
九十八、三级闪蒸制冷的液位关联控制系统·····	462

九十九、中压锅炉多种燃料的混烧控制系统·····	467
一〇〇、裂解炉列管介质出口温度解耦控制系统·····	473
一〇一、乙烯装置出料控制系统·····	480
<b>第八章 安全保护系统</b> ·····	<b>489</b>
一〇二、具有安全界限保护的高炉气体净化装置液位 控制系统·····	489
一〇三、防止辅助锅炉燃烧熄火与脱火的安全控制系统 ·····	492
一〇四、防止过热蒸汽携带冷凝水的过热器温度控制 系统·····	495
一〇五、防止再生器与反应器物料倒流的压力安全控 制系统·····	500
一〇六、仪表双功保护的喷雾水流量控制系统·····	501
一〇七、防止喘振的泵输出压力控制系统·····	503
一〇八、压力控制与喘振模型结合的压缩机控制系统··	508
<b>参考文献</b> ·····	<b>513</b>

## 第一章 热交换与反应过程的控制

热交换过程与反应过程经常要求温度控制。这类对象的特性比较复杂,迟后时间特性相当明显,而且不同的对象在控制方式与调节品质方面有很大差异,如裂解炉、烧结炉要求恒温控制,而硫化炉与热处理炉要求按一定的温度时间程序进行控制,均热炉则要求按平均温度控制,并且防止各个测量温度超出最高的温度界限。在这类控制系统中执行部件的差别更大,如电炉加热过程控制的是电热丝的通断时间,反应釜控制的是两种调节介质(热与冷)的气动阀门,一般的系统则采用电动执行器。对于电炉采用的是断续PID调节,而反应釜则是采用分程调节。因此,对一个自动化系统设计者来说,了解这些不同对象、不同控制要求与不同形式执行器组成系统的方法及其仪表参数设置是相当重要的。

在本章里,我们向读者介绍18个典型的热交换与反应过程的例子。读者可以了解到离散二位式PID调节器与连续PID调节器的参数是如何整定的。在组成一个串级调节系统时,副回路的传递函数如何预期成一个单调的响应环节,主回路如何按照定值控制系统的要求设计调节器。尤其是间歇调节过程的预加载设置和抗积分饱和设置问题,对于进一步提高自动化水平都有重要的意义。前馈调节也是工业生产过程中常见的一种控制方式,多变量的静态前馈与多变量的动态前馈函数的引入,都具有明显改善调节品质的作用,这些前馈补偿函数的形式,决定了工艺参数之间的互相影响与联系。因此,了解传热过程的热量平衡或反应过程的主要扰动形式,是设计一个成功的控制系统的关键。

# 一、氨冷器被冷却介质出口温度-液位 超驰控制系统

## 1. 生产过程对系统设计的要求

在合成氨生产过程中，采用醋酸铜铵液吸收变换气体中的一氧化碳与二氧化碳。吸收是一个放热反应，吸收一氧化碳与二氧化碳以后的醋酸铜铵液温度高达 80℃ 以上。为了使醋酸铜铵液再生以便循环使用，其关键性的一个步骤就是将饱和的醋酸铜铵液冷却到 8~10℃。其冷却过程主要是借助于氨冷器来实现的，如图 1-1 所示。氨冷器是依靠液氨汽化吸收醋酸铜铵液的热量，

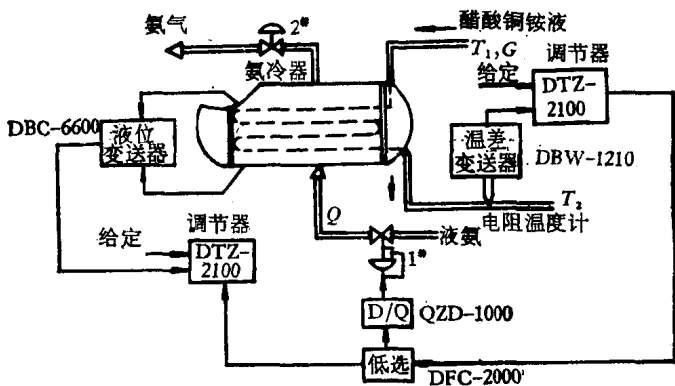


图 1-1 氨冷却器温度-液位超驰控制系统的组成

使铜铵液的温度下降这一原理进行的，因此在稳定条件下建立如下的热平衡关系：

$$Q\lambda = GC(T_2 - T_1) \quad (1-1a)$$

式中  $Q$  为液氨单位时间内的汽化量； $\lambda$  为液氨汽化热； $G$  为醋酸铜铵液的流量； $C$  为醋酸铜铵液的比热； $T_1$  与  $T_2$  为醋酸铜铵液的进、出氨冷器的温度，或记成

$$T_2 = T_1 + \alpha Q \quad (1-1b)$$

式中

$$\alpha = \frac{\lambda}{GC}$$

可见，改变 $Q$ 的大小可以达到改变氨冷器出口的醋酸铜铵液温度的目的。调节器既可装在液氨管线上，也可安装在氨气管线上。调节阀装在氨气管线上对象迟后较小，反应比较灵敏，但缺点是需要用一个较大管径耐高压的气体阀门，这种阀门成本比较高，而且受氨气的腐蚀比液氨严重得多，所以调节阀一般是安装在液氨管线上。液氨在氨冷器中汽化需要一定的空间，氨冷器在某一个液位高度上汽化面积为最大，因此，当液氨高度超过最大的汽化面积高度后，液位越高，汽化面积就越小，调节过程会出现反常现象，这是氨冷器调节的一个重要特点。本系统设计需要解决两个问题：

- (1) 温度调节器的选型；
- (2) 防止液氨液位超过最大汽化面积的高度。

## 2. 系统设计

为了达到生产过程对控制系统的要求，在简单温度控制系统的基础上叠加上一个液位超驰调节系统，因此，系统设计包括简单调节系统调节器的选择与超驰调节系统的引入两个部分。

### (1) 调节器的选型

设调节器的传递函数为 $D(s)$ ，广义对象特性为 $G(s)$ ，则系统的闭环特性为

$$W(s) = \frac{D(s)G(s)}{1 + D(s)G(s)} \quad (1-2)$$

由式(1-2)求得调节器的传递函数为

$$D(s) = \frac{1}{G(s)} \cdot \frac{W(s)}{1 - W(s)} \quad (1-3)$$

传热过程都有一个共同的特性，就是可以用一个三阶容积迟后来模拟，即冷却介质到传热间壁的热传导、传热间壁自身的热传导、传热间壁对传热介质之间的热传导。因此，传热对象通常可以用

一个三阶的特性来表示,即

$$G(s) = \frac{K_0}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_3s + 1)} \quad (1-4a)$$

从工程实用的角度看,上式还可以用如下一个等时间常数的三阶传递函数来近似

$$G(s) = \frac{K_0}{(\hat{T}s + 1)^3} \quad (1-4b)$$

式中

$$\hat{T} \approx \frac{T_1T_2 + T_2T_3 + T_3T_1}{T_1 + T_2 + T_3}$$

譬如  $T_1 = 1$  秒,  $T_2 = 2$  秒,  $T_3 = 3$  秒的  $G(s)$  记为

$$G(s) = \frac{K_0}{6s^3 + 11s^2 + 6s + 1} \quad (1-4c)$$

其对应等三阶的时间常数为

$$\hat{T} = \frac{11}{6} \text{ 秒}$$

因此近似的等三阶传递函数为

$$G(s) = \frac{K_0}{6.16s^3 + 10.08s^2 + 5.5s + 1} \quad (1-4d)$$

比较式(1-4c)与式(1-4d)不难看出,这种近似方法具有较好的拟合精度。尤其值得指出的是,如果模型的获取是直接利用闭环测试的方法得到,利用等  $n$  阶表示相当方便。三阶等时间常数的对象模型,其时间常数  $\hat{T}$  同闭环系统等幅振荡的操作周期有如下关系:

$$\hat{T} = \frac{T_s \tan \frac{180^\circ}{3}}{2\pi}$$

根据上述说明,传热模型可以写成式(1-4b)所示的形式。

$\frac{K_0}{(\hat{T}s + 1)^3}$  可以转换成典型的简化形式  $\frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_s s + 1}$ 。曾利用闭

环测试方法求某对象的传递函数,即由比例调节器  $K_p$  与对象组成

闭环系统。由稳态关系求得  $K_0 = 0.95$ ，并调整调节器的比例增益  $K_p$ ，使系统出现等幅振荡，其振荡（操作）周期  $T_s$  为 72.5 秒，按下式求得对象的时间常数  $\hat{T}$  为

$$\hat{T} = \frac{T_s \tan \frac{180^\circ}{3}}{2\pi} = \frac{72.5 \times \tan 60^\circ}{6.28} = 20 \text{ 秒}$$

其对应的简化模型的一阶时间常数  $T$ （公式推导见本例附录）和  $\tau$  分别为

$$T = \frac{\hat{T} \sqrt{\left[ \left( \tan \frac{180^\circ}{3} \right)^2 + 1 \right]^3 - 1}}{\tan \frac{180^\circ}{3}} = \frac{20 \times 7.94}{1.732} = 91.65 \text{ 秒}$$

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{6.28 \hat{T} \left\{ 180^\circ - \tan^{-1} \sqrt{\left[ \left( \tan \frac{180^\circ}{3} \right)^2 + 1 \right]^3 - 1} \right\}}{360^\circ \tan \frac{180^\circ}{3}} \\ &= \frac{6.28 \times 20 \{ 180^\circ - 82.82^\circ \}}{360^\circ \times 1.732} = 19.58 \text{ 秒} \end{aligned}$$

因此得到一个简化的传热模型

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-19.58s}}{91.65s + 1}$$

不同的设备， $K_0$ ， $\tau$  与  $T$  可能不同，但其最简形式都是一样的，均可记成

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1-5)$$

根据达林设计原则，闭环控制系统的传递函数可以预期为

$$W(s) \approx e^{-\tau s}$$

式中  $\tau$  为控制对象的纯滞后时间。将  $W(s) \approx e^{-\tau s}$  及式 (1-5) 代入式 (1-3) 得

$$\begin{aligned}
 D(s) &= \frac{T}{K_0\tau} \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \\
 &= K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)
 \end{aligned}
 \tag{1-6}$$

式中

$$K_p = \frac{T}{K_0\tau} = \frac{91.65}{0.95 \times 19.58} = 4.93$$

$$T_i = T = 91.65 \text{ 秒}$$

$\delta$  可由下式求出

$$\delta = \frac{1}{K_p} \times 100\% = 20.3\%$$

式(1-6)表明,象氨冷器这样的设备可以选择积分外反馈型的比例积分(PI)调节器。但是,如果所选择的温度检测元件的迟后较大,广义对象可能是一个二阶容积迟后加上纯滞后的对象,在这种场合下,应选择积分外反馈型的比例-积分-微分(PID)调节器。假如液氨调节阀选择气开型,则PI调节器必须是正作用形式(即测量值增大,调节器的输出亦增大)。

(2) 引入超驰系统防止液氨液位超过最大汽化面积高度  $H_{\max}$

本系统的控制目标是维持温度在给定值附近,液位仅作为系统的一个参考信号。在正常工况下,液位调节系统对液氨调节阀不起作用,只是在当液位超过  $H_{\max}$  时才切断温度调节系统,由液位调节器取代温度调节器对液氨调节阀进行控制,不使  $H$  超过  $H_{\max}$ ,当  $H$  信号低于  $H_{\max}$  时,又重新由温度调节器对液氨调节阀进行控制。

液位变送器选择量程为  $0 \sim 160$  毫米水柱,已知  $0 \sim 26^\circ\text{C}$  时液氨的比重为  $0.91$ ,故可以测量液氨液位的变化量为

$$H = 160/0.91 = 176 \text{ 毫米}$$

当液位处在量程中值点位置上,其仪表(电动单元组合仪表 III 型)信号为

$$I_{H_0} = \frac{16}{176} \times 88 + 4 = 12 \text{ 毫安}$$

液位调节器亦选择积分外反馈型的比例-积分调节器,但必须



是反作用型(即液位升高,调节器的输出减少),且其比例带较小(通常取  $\delta = 5 \sim 15\%$ ),积分时间较长( $T_i \geq 5$ 分),调节器的给定值设置在液位信号的中值点上,即  $I_{H_0} = 12$  毫安。因为在正常工况下,  $I_H < I_{H_0}$ ,因液位调节器的比例带很小(或说放大系数很大),所以  $I_1$  输出的是一个高信号,不能通过低值选择器作用于液氨调节阀。温度调节器的输出  $I_2$  低于液位调节器的输出  $I_1$ ,所以温度调节系统处于闭环调节状态,而液位调节系统处于开环等待状态。一旦  $I_H > I_{H_0}$ ,由于液位调节器的放大系数比温度调节器的放大系数大得多,所以  $I_1$  会比  $I_2$  更低,液位调节器投入运行。为保证两个系统切换过程的平滑性,两个比例-积分调节器必须是积分外反馈形式的<sup>[1]</sup>。图 1-2 表示利用低值选择器构成抗积分饱和和调节器的连接方式。

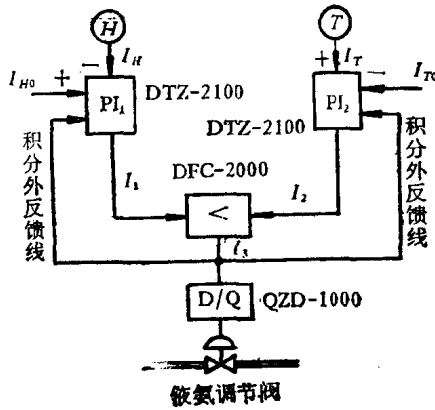


图 1-2 利用低值选择器组成抗积分饱和和调节器的连接方式

液位调节器输出的运算式可以写成

$$I_1(s) = K_{p_1} [I_{H_0}(s) - I_H(s)] + \frac{1}{T_{i_1}s + 1} I_3(s) \quad (1-7)$$

温度调节器输出的运算关系式为

$$I_2(s) = K_{p_2} [I_T(s) - I_{T_0}(s)] + \frac{1}{T_{i_2}s + 1} I_3(s) \quad (1-8)$$