

基于专家—模糊 PID 控制的松散回潮出口水分控制系统设计

段荣华

(红塔烟草(集团)有限责任公司 大理卷烟厂, 云南 大理 671000)

摘要: 松散回潮属于大时滞系统, 其出口烟叶水分控制所采用的带前馈—串级控制达不到理想的控制效果; 在生产过程中需要根据经验手动修改加水系数, 并没有真正实现完全自动化控制; 提出了一种将专家系统、模糊推理和常规 PID 控制相结合的新方法实现了松散回潮出口水分的控制, 利用专家系统对加水系数进行自动决策; 采用模糊推理方法分别对前室加水控制器与后室水分控制器的 PID 参数进行了在线自适应整定, 实现了松散回潮出口水分控制的全自动化, 提高了松散回潮出口水分的稳定性与精确性。

关键词: 专家系统; 模糊推理; 在线参数整定; 出口水分

Design of Control System for the Outlet Moisture Content of the Looseness and Moisture Regain Based on Expert—fuzzy PID Control

Duan Ronghua

(Hongta Tobacco (Group) Co., Ltd., Dali Cigarette Factory, Dali 671000, China)

Abstract: The looseness and moisture regain belongs to large time delay system, the feed—cascade control used for the moisture content control of the outlet tobacco leaves can not achieve ideal control effect. In the process of production, it is necessary to manually modify the water adding coefficient according to experience, and do not truly realize complete automation control. A new method of combining expert system, fuzzy inference and PID control is proposed to control the outlet moisture content of the looseness and moisture regain. The expert system is used to make decision on water adding coefficient automatically, and the fuzzy inference method is used to tune the PID parameters of the front chamber water controller and the back chamber moisture controller respectively online. The full automatization control of the outlet moisture content of the looseness and moisture regain is realized, and the stability and accuracy of the outlet moisture content of the looseness and moisture regain are improved.

Keywords: expert system; fuzzy inference; on—line parameter tuning; outlet moisture content

0 引言

松散回潮的工艺任务是将切片后的烟块进行松散, 并通过加水和加蒸汽使烟叶松软, 提高片烟的韧性和耐加工性, 为后续的加工奠定基础^[1]。滚筒式松散回潮机的工作过程是振动输送机将烟块从前室进料口送入到滚筒内, 前室双介质喷嘴将增湿水和蒸汽喷洒到烟块上, 烟块因受热吸水而舒展。滚筒在传动装置的带动下作旋转运动, 受潮烟块在滚筒的轴向倾角和筒体内密布的导料板与扒钉的疏导作用下翻滚向前, 使未松散的烟块得到进一步的机械松散, 松散后的烟叶从出料口排出。后室的热风与蒸汽利用循环风机使其从圆形风管流动回前室加以循环利用, 前室与后室外溢的蒸汽由排潮系统吸走。出口水分是松散回潮工序的重要工艺指标, 其稳定性和精确性对后续产品质量有着重要的影响^[2]。松散回潮出口水分目前所采用的控制方法是带前馈—串级控制, 控制器由主控制器、副控制器

和前馈环节组成。副控制器作为内环, 在控制中起到粗调作用; 主控制器作为外环, 在控制中起到细调作用; 前馈环节根据烟叶流量和烟叶水分等可测量的干扰因素计算加水补偿量。主控制器的输出与前馈环节的输出之和作为副控制器的给定值。除了可测量的干扰因素外, 烟叶出口水分还受到烟叶自身的特性、烟草薄片的吸水特性、蒸汽和热风的循环状况以及排潮等难以测量干扰因素的影响。为了避免前馈调节出现欠补偿或过补偿, 在生产过程中由现场操作人员根据经验手动修改加水系数, 水分控制很大程度上取决于现场操作人员的实践经验, 所以带前馈—串级控制并没有真正实现松散回潮出口水分的完全自动化控制。此外, 带前馈—串级控制的喷嘴安装在前室, 加水点与控制点之间的距离较长, 属于大时滞系统, 烟叶出口水分波动较大, 达不到理想的控制效果。随着科技的进步和烟草工业的发展, 由人工修改加水系数的带前馈—串级控制已经满足不了新时代背景下的工艺要求, 因此有必要研究和开发新的控制方法来实现控制的全自动化以及提高松散回潮出口水分的稳定性与精确性。

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-19。

作者简介: 段荣华(1975-), 男, 云南漾濞县人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事机电系统设计及智能控制技术研究。

1 松散回潮出口水分控制系统的组成原理

松散回潮出口水分控制系统由前室加水控制系统和后室水分控制系统组成，其结构原理如图 1 所示。前室加水控制系统主要由专家系统、前馈环节、前室加水控制器和模糊推理系统、前室气动薄膜阀、电磁流量计和前室喷嘴等组成，用于对烟叶水分进行粗调。专家系统利用工艺专家和工艺工程师的知识和经验根据干扰的变化对加水系数进行决策。前馈环节先根据烟叶流量和烟叶水分等干扰因素确定理论加水流量，然后用加水系数对理论加水流量进行修正，前馈环节的输出作为加水控制器的给定值。后室水分控制系统由后室水分控制器、模糊推理系统、后室气动薄膜阀、水分仪和后室喷嘴等组成，用于对前室加水后的烟叶水分进行二次细调。前室加水控制器与后室水分控制器独立工作，共同分时复用模糊推理系统。前室加水控制系统的工作原理：首先前馈环节计算出理论加水流量，同时由专家系统确定加水系数，然后计算前馈环节的输出；将前馈环节的输出值作为前室加水控制器的给定值，前室加水控制器根据给定值与实际值的偏差对前室气动薄膜阀的开度进行 PID 控制来调整加水流量，同时根据偏差与偏差变化率利用模糊推理系统对加水控制器的 K_{1P} 、 K_{1I} 和 K_{1D} 等 3 个参数进行在线整定，实现对加水流量快速灵敏地调整。后室水分控制系统的工作原理：后室水分控制器根据出口水分的设定值与实际水分值的偏差对后室气动薄膜阀的开度进行 PID 控制来调整补水量实现烟叶出口水分的细调，同时根据偏差与偏差的变化率利用模糊推理系统对水分控制器的 K_{2P} 、 K_{2I} 和 K_{2D} 等 3 个参数进行在线整定，从而提高烟叶出口水分的精确性和稳定性。

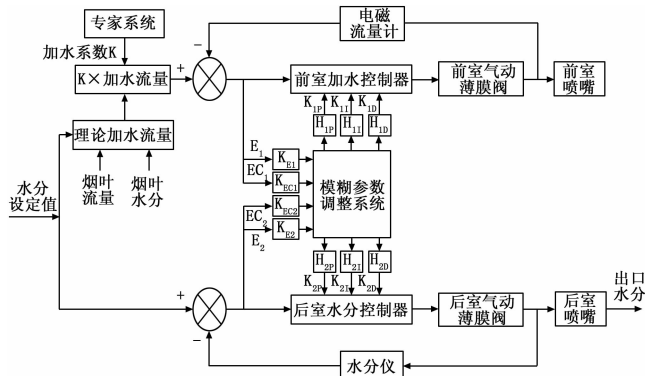


图 1 控制系统结构原理图

2 前馈环节与专家系统设计

2.1 前馈环节的设计

每种牌号卷烟的叶组配方都是由若干个来自不同厂家的烟包和烟草薄片所组成。不同的烟包其烟叶等级各不相同，其水分也各不相同；不同牌号的卷烟其烟草薄片的掺配比例也各不相同。因此有必要采用前馈环节补偿干扰对被控参数产生的影响。入口烟叶流量和入口烟叶水分是可测量的干扰因素，由此可计算出理论加水流量。

$$\text{干料流量} = \text{入口烟叶流量} \times (1 - \text{入口烟叶水分}\%)$$

$$\text{理论加水流量} = \text{干料流量} \times \text{出口烟叶水分设定值}\% - \text{入口烟叶流量} \times \text{入口烟叶水分}\%$$

此外，被控参数还受到烟草薄片流量和蒸汽喷射流量等其它可测量干扰因素以及烟叶自身的特性、烟草薄片的吸水特性、滚筒内的环境和排潮等难以测量干扰因素的影响。实践经验证明，在烟叶流量、烟草薄片流量、蒸汽喷射流量、滚筒内环境和排潮作用等稳定的情况下，被控参数的不可测量干扰因素主要在于烟叶自身的特性。如果按理论加水流量进行加水，容易造成过补偿或欠补偿。为了补偿前馈调节的不准确，利用加水系数 K 对理论加水流量进行修正。

$$\text{前馈输出} = K \times \text{理论加水流量}$$

在生产过程中，根据干扰的变化实时调整加水系数 K。如果 K 值过大则会出现过补偿，后室水分控制器对烟叶水分的调整没有余量；如果 K 值过小则会出现欠补偿，后室水分控制器无法补偿烟叶过多的水分不足。前室加水控制系统要给烟叶提供绝大部分的增湿水，后室水分控制系统只进行 15% 左右的水分调节^[2]。因此，要根据干扰的变化实时调整加水系数 K 使前室加水满足以上的要求。为了实现加水系数 K 的自动调整使用专家系统对其进行自动决策。

2.2 专家系统设计

专家系统是模拟工艺专家和工艺工程师根据干扰的变化对加水系数进行决策的计算机软件系统，它综合了松散回潮工序各类烟包的烟叶出口水分在受到烟叶流量、烟叶水分、烟草薄片流量、蒸汽喷射流量和烟叶自身特性等干扰因素的影响时工艺专家和工艺工程师对加水系数进行决策的知识和经验，能够像工艺专家和工艺工程师一样在生产过程中根据干扰的变化实时对加水系数做出准确推断。专家系统由数据库、知识库、推理机、解释机、人机接口和知识获取模块等几个部分组成^[3-5]，其基本结构如图 2 所示。

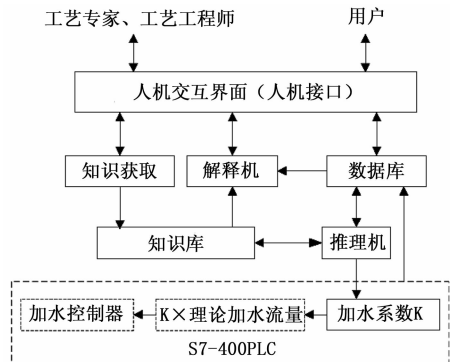


图 2 专家系统结构原理图

2.2.1 数据库

数据库是用于存放推理过程所需的事实前提、中间结果和推理结论的工作存储器^[5]。松散回潮机采用 S7-400 PLC 作为主控制器，用于设备控制和加水系数决策所需事实前提的数据采集，采集到的信息存储在相应的 DB 数据块中。烟叶流量、烟叶水分、蒸汽喷射流量和烟草薄片流量

等事实前提由 S7-400 PLC 直接采集获取，烟包的条形码通过间接方式推出。每种牌号卷烟一个批次的叶组都是由各类不同的烟包按一定的顺序排列进行加工的，每个烟包都有识别条形码。烟包经扫码出库后，要进行解包、称重和切片等工序才到松散回潮工序，从烟包扫码到松散回潮工序有很长的过程。根据烟包顺序、烟包重量和烟草薄片流量确定出累计重量与烟包顺序号之间的对应关系，然后由松散回潮入口电子秤的累计重量推出该工序当前所加工的烟包的顺序号，即可得到其条形码。专家系统的数据库与 S7-400 PLC 程序中相应的 DB 数据块相连接，加水系数决策所需的事实前提通过实时通讯从 S7-400 PLC 中相应的 DB 数据块中读取，读取到的信息存储到数据库中。每隔一个系统的采样周期，会从 S7-400 PLC 中提取一次新的数据，同时事实类对象中的内容也会作相应的改变。

2.2.2 知识库

知识库用于存储加水系数决策规则，其基本任务是为推理机提供问题求解以及为解释机提供问题解释所需的知识^[4]。加水系数决策规则是根据工艺专家和工艺工程师的知识与经验总结出来的。每条规则就是知识库中的一条记录，记录包括前提条件和结论，前提条件是由若干事实组成^[4]。知识的表示采用产生式规则表示方法，规则 R 表示为^[3]：

$$F_1 \wedge F_2 \wedge F_3 \wedge F_4 \wedge F_5 \rightarrow H$$

F_i 表示前提（条件或状态）， H 表示结论（或动作）。如果前提 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 和 F_5 的合取满足则可推出结论 H ”。加水系数决策规则示例如表 1 所示。

表 1 加水系数决策规则示例

规则	If(加水系数决策前提条件)	Then (结论)
1	烟包条形码: YLKFWP01A0495YY114 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 9.0% - 9.5% \wedge 蒸汽喷射流量: 134.5kg/h \wedge 烟草薄片流量: 650kg/h	1.1
2	烟包条形码: YLWBWW00C0021DDK15 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 9.5% - 10.0% \wedge 蒸汽喷射流量: 390.0kg/h \wedge 烟草薄片流量: 550kg/h	1.0
3	烟包条形码: YLKFWP00A0674JJ013 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 9.3% - 9.8% \wedge 蒸汽喷射流量: 430.0kg/h \wedge 烟草薄片流量: 0kg/h	0.95
4	烟包条形码: YLKFWP00A0659JB014 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 10.5% - 11.0% \wedge 蒸汽喷射流量: 590.0kg/h \wedge 烟草薄片流量: 650kg/h	0.85
5	烟包条形码: YLKFWP01A0499YY213 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 11.5% - 12.0% \wedge 蒸汽喷射流量: 445.0kg/h \wedge 烟草薄片流量: 700kg/h	1.05
...
n	烟包条形码: YLKFW03A0491YD012 \wedge 烟叶流量: 5000kg/h \wedge 烟叶水分: 8.7% - 9.2% \wedge 蒸汽喷射流量: 175.0kg/h \wedge 薄片流量: 0kg/h	0.98

2.2.3 推理机

推理机是进行各种推理或搜索等功能的程序模块，是专家系统的执行机构^[5]。加水系数决策推理采用正向推理。其工作过程为：首先，从 S7-400 PLC 相应的 DB 数据块中读取与加水系数决策推理有关的信息存入数据库。其次，推理机从数据库中提取与加水系数决策有关的事实信息，从加水系数决策规则知识库中首条规则开始把所提取的事实信息与当前规则记录的前提部分进行匹配，某条规则成立，则其所有事实前提都必须完全匹配成功^[6]。当发现某条规则只要有一个事实前提不成立，就跳过该规则，转而进行下一条规则的匹配^[6]。如果某条规则的所有事实前提均匹配成功，即该规则成立^[6]，则把该规则的结论存入数据库。如果推理结束后没有得到任何加水系数决策结论，实际情况确实不需要修改加水系数，说明加水系数决策规则是完善的。如果当前加水系数不能满足要求，说明知识库中缺少这方面的规则，需要把新的规则添加到加水系数决策规则知识库中。最后，从数据库中读出加水系数决策推理结论，将其写入 S7-400 PLC 相应的 DB 数据块中。推理过程程序流程图如图 3 所示。

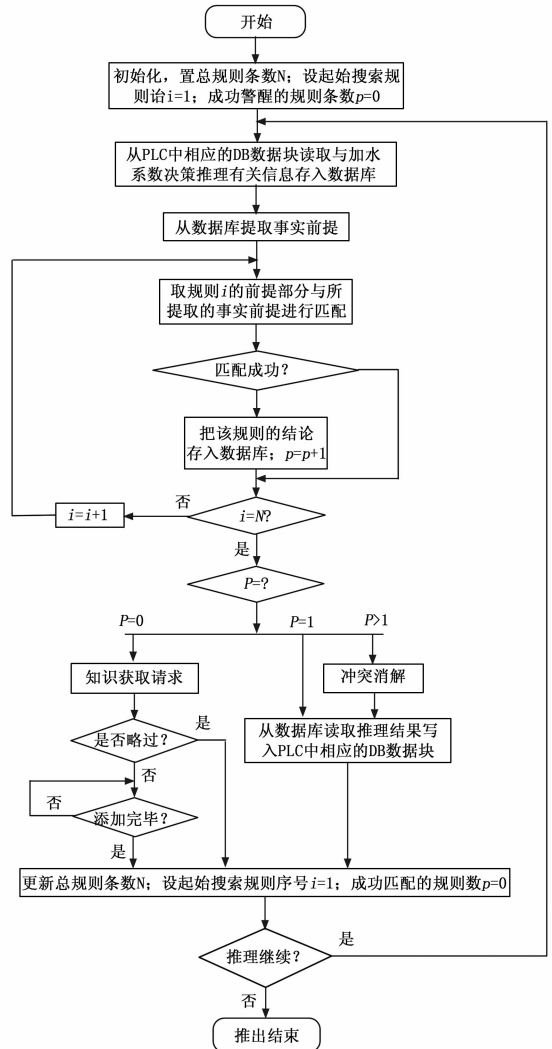


图 3 推理过程程序流程图

2.2.4 解释机

解释机的主要作用是向用户说明专家系统推理的过程,使用户了解推理时所用的事实前提和推理过程中所运用的规则^[4]。由于规则是计算机中的一条记录,是用符号语言来表示的,非专业人员无法理解这种符号的表达形式。当系统推出某种结论时,将导出该结论所用到的知识和数据用符号语言的形式保存到数据库中,同时解释机把这些符号语言翻译成“如果...,那么...”形式的语句,通过人机接口提供给用户查阅。

2.2.5 人机接口

人机接口是用户和专家系统进行交互的界面^[5],主要用于完成两部分的工作:一是实现对加水系数决策规则知识库和数据库的维护与操作,用户可以根据需要添加、删除和修改加水系数决策规则。二是为用户提供解释机的查看窗口。用户可以在人机接口查看加水系数决策推理的路径和相关解释以及其它的信息,为将来优化加水系数决策规则提供依据。

2.2.6 知识获取

知识获取模块的功能在于能根据专家提供的知识,经过理解或编辑成所需的内部形式,作为新的知识加入知识库^[5]。该模块的功能通过数据库的插入、修改和删除语句来实现。知识规则的获取有 2 种方法:第一种方法是离线方式通过人机接口事先把加水系数决策规则加入到知识库中。第二种方法是在生产过程中,发现问题时现场修改和添加。当发现加水系数决策错误或推理无法推导出任何结论但加水系数又不能需要时,需对加水系数决策规则进行完善,根据实际需要把新的加水系数决策规则添加到知识库中。

3 前室加水控制器和后室水分控制器的设计

前室加水控制器的给定值是前馈环节的输出,被控对象是前室气动薄膜阀的开度,被控参数是加水流量。前室加水控制器由 PID 控制器和参数整定两部分组成。后室水分控制器的给定值是烟叶出口水分设定值,被控制对象是后室气动薄膜阀的开度,被控参数是出口烟叶的水分。后室水分控制器也是由 PID 控制器和参数整定两部分组成。前室加水控制器和后室水分控制器的参数整定由同一个模糊推理系统通过分时复用来进行,其结构如图 1 所示。

通常,数字式 PID 控制器可以用以下函数表示^[7]:

$$u_x(k) = K_{XP}E_X(k) + K_{XI} \sum_1^k E_X(i) + K_{XD}EC_X(k)$$

式中, $X=1, 2$ 。1 表示前室加水控制器; 2 表示后室水分控制器。 $E_X(k)$ 为偏差; $EC_X(k)$ 为偏差变化率; K_{XP} 为比例系数; K_{XI} 为积分系数; K_{XD} 为微分系数。在 S7-400 PLC 中加水控制器和水分控制器分别调用两个 FB41 功能块来实现, FB41 功能块的 K_{XP} 、 K_{XI} 和 K_{XD} 等 3 个参数的实时整定值由下式确定:

$$\left. \begin{aligned} K_{XP} &= K_{XP0} + K_{XP}^* \\ K_{XI} &= K_{XI0} + K_{XI}^* \\ K_{XD} &= K_{XD0} + K_{XD}^* \end{aligned} \right\}$$

式中, K_{XP0} 、 K_{XI0} 和 K_{XD0} 为 PID 参数的初始值。 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* 由一个二输入三输出模糊控制器来进行自适应在线整定。设模糊控制器的输入量为:前室加水流量的偏差 E_1 和偏差变化率 EC_1 ; 后室烟叶出口水分的偏差 E_2 和偏差变化率 EC_2 。输出量为:① K_{1P}^* 、 K_{1I}^* 和 K_{1D}^* 等 3 个参数; ② K_{2P}^* 、 K_{2I}^* 和 K_{2D}^* 等 3 个参数。

3.1 模糊化

将 E_1 、 EC_1 、 E_2 和 EC_2 的各模糊子集均取为 {负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)}, 论域均取为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。将 K_{1P}^* 、 K_{1I}^* 、 K_{1D}^* 、 K_{2P}^* 、 K_{2I}^* 和 K_{2D}^* 的各模糊子集均取为 {负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)}, 论域均取为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。输入输出各模糊子集均选用三角形隶属函数。

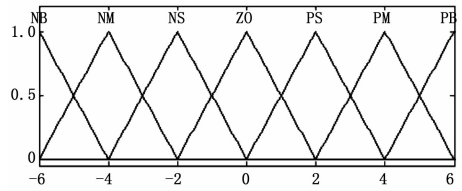


图 4 输入变量 E_1 、 EC_1 、 E_2 和 EC_2 的隶属度函数曲线

设 E_1 、 EC_1 、 E_2 和 EC_2 在实际运行时的取值分别处于 $[-E_{1max}, E_{1max}]$ 、 $[-EC_{1max}, EC_{1max}]$ 、 $[-E_{2max}, E_{2max}]$ 和 $[-EC_{2max}, EC_{2max}]$ 区间内,则需要通过量化因子将其论域变换到基本论域内。量化因子 K_{E1} 、 K_{EC1} 、 K_{E2} 和 K_{EC2} 分别定义为:

$$K_{E1} = \frac{6}{E_{1max}}; K_{EC1} = \frac{6}{EC_{1max}};$$

$$K_{E2} = \frac{6}{E_{2max}}; K_{EC2} = \frac{6}{EC_{2max}}.$$

利用以上的量化因子将输入变量 E_1 、 EC_1 、 E_2 和 EC_2 在实际取值区间内的值转换为 $[-6, 6]$ 之间变化的值,然后对其进行量化处理,得到含 13 个整数元素的离散集合: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。将输入变量 E_1 、 EC_1 、 E_2 和 EC_2 所对应的隶属度最大的模糊值分别当作当前模糊控制器的模糊输入量 E_1^* 、 EC_1^* 、 E_2^* 和 EC_2^* 。

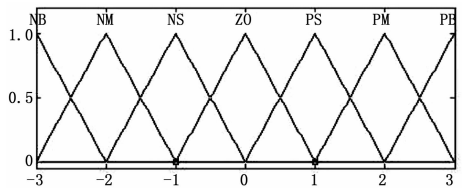


图 5 输出变量 K_{1P}^* 、 K_{1I}^* 、 K_{1D}^* 、 K_{2P}^* 、 K_{2I}^* 和 K_{2D}^* 的隶属度函数曲线

设 K_{1P}^* 、 K_{1I}^* 、 K_{1D}^* 、 K_{2P}^* 、 K_{2I}^* 和 K_{2D}^* 在实际运行时的取值分别处于 $[-K_{1P \max}, K_{1P \max}]$ 、 $[-K_{1I \max}, K_{1I \max}]$ 、 $[-K_{1D \max}, K_{1D \max}]$ 、 $[-K_{2P \max}, K_{2P \max}]$ 、 $[-K_{2I \max}, K_{2I \max}]$ 和 $[-K_{2D \max}, K_{2D \max}]$ 区间内，而模糊推理所得到的值处于基本论域内。量化因子 H_{1P} 、 H_{1I} 、 H_{1D} 、 H_{2P} 、 H_{2I} 和 H_{2D} 分别定义为：

$$H_{1P} = \frac{K_{1P \max}}{3}; H_{1I} = \frac{K_{1I \max}}{3}; H_{1D} = \frac{K_{1D \max}}{3};$$

$$H_{2P} = \frac{K_{2P \max}}{3}; H_{2I} = \frac{K_{2I \max}}{3}; H_{2D} = \frac{K_{2D \max}}{3}.$$

利用以上的量化因子将模糊推理所得到的基本论域内的各个值分别反变换到其各自实际论域内。

3.2 模糊推理

要使前室加水控制器和后室水分控制器具有较高的性能，必须具有一套完备的 PID 参数模糊推理规则，根据 K_{XP}^* 、 K_{XD}^* 和 K_{XI}^* 等 3 个参数在 PID 控制器中的不同作用及被控对象在不同阶段动态特性的基础上，经过大量的仿真实验和反复调试可得表 2—表 4 模糊自整定规则^[7-8]。

表 2 模糊自整定规则表(K_{2P}^*)

K_{XP}^*		E_X						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
EC_X	NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZO
	NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	NS	NS	NM	NM	NB	NB

表 3 模糊自整定规则表(K_{XI}^*)

K_{XI}^*		E_X						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
EC_X	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PB
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PB
	PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

表 4 模糊自整定规则表(K_{XD}^*)

K_{XD}^*		E_X						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
EC_X	NB	PB	PM	PS	ZO	ZO	PM	PB
	NM	NM	NS	NS	NS	ZO	PS	PM
	NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	PS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PS
	PM	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	PB	PM	PS	ZO	ZO	ZO	PM	PB

模糊推理采用双输入单输出的方式，控制规则由下列推理语言构成：

IF $E_X = NB$ AND $EC_X = NB$, THEN $K_{XP}^* = PB$;
 IF $E_X = NB$ AND $EC_X = NM$, THEN $K_{XP}^* = PB$;

每个模糊关系矩阵可由下式求出^[9-10]：

$$R_{X_{ji}} = [E_{X_i} \times EC_{X_i}] \times K_{X_{ji}}^*$$

总的模糊关系矩阵可由下式求出^[9-10]：

$$R_{X_j} = R_{X_{j1}} \cup R_{X_{j2}} \cup \dots \cup R_{X_{j49}}$$

当实时输入的模糊量为 E_X^* 、 EC_X^* 时，输出量为^[9-10]

$$K_{X_j}' = (E_X^* \times EC_X^*) \circ R_{X_j}$$

3.3 反模糊化

为了充分利用模糊向量所包含的信息，采用重心法^[9-10]将模糊向量转换为精确实数值。

$$K_{X_j}^* = \frac{\sum_{i=1}^6 \mu(K_{X_{ji}}') K_{X_{ji}}'}{\sum_{i=1}^6 \mu(K_{X_{ji}}')}$$

式中， $j = P、I、D$ 。利用此式可分别求出对应于每组 E_X^* 和 EC_X^* 的 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* 等 3 个参数值。将以上的模糊推理过程预先计算好，制成 PID 参数整定模糊推理表储存在 S7-400 PLC 的存储单元里，前室加水控制器和后室水分控制器分时复用 PID 参数整定模糊推理表。在前室加水控制时，只需将 E_1^* 和 EC_1^* 分别乘以 K_{E1} 和 K_{EC1} 将其变换到基本论域内的值，再经量化处理后，通过查表得出 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* ，将 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* 分别乘以量化因子 H_{1P} 、 H_{1I} 和 H_{1D} ，即可得到 K_{1P}^* 、 K_{1I}^* 和 K_{1D}^* 等 3 个参数的实时值。在后室水分控制时，只需将 E_2^* 和 EC_2^* 分别乘以 K_{E2} 和 K_{EC2} 将其变换到基本论域内的值，再经量化处理后，通过查表得出 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* ，将 K_{XP}^* 、 K_{XI}^* 和 K_{XD}^* 分别乘以量化因子 H_{2P} 、 H_{2I} 和 H_{2D} ，即可得到 K_{2P}^* 、 K_{2I}^* 和 K_{2D}^* 等 3 个参数的实时值。

4 控制系统的软硬件实现

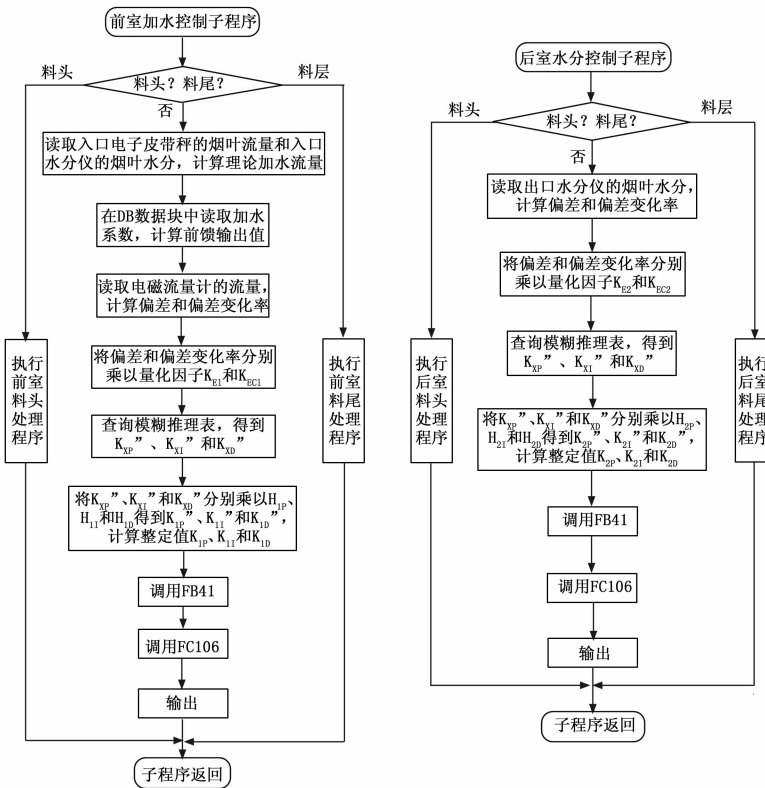
4.1 硬件组成

该系统的硬件结构主要由上位机、下位机和专家系统站组成，如图 6 所示。上位机选用西门子 IPC677C 作为现场操作站。专家系统站配置专用 PC 机和显示器。下位机由以 S7-400 PLC 为核心的测控系统组成。S7-400 PLC 主要用于前室加水控制和后室水分控制以及数据采集，根据需要配置 PS 407 电源模块、CPU 413-2DP 模块、CP443-1 以太网通信模块和 SM423 数字量输入输出接口模块等。前室加水控制系统由入口电子皮带秤、入口水分仪、前室气动薄膜阀、电磁流量计和前室喷嘴等组成。入口电子皮带秤用于控制和检测前室入口烟叶的流量以及检测前室入口烟叶的累计量；入口水分仪用于检测前室入口烟叶的水分，与入口电子皮带秤配合使用，为前馈加水计算提供依据；前室气动薄膜阀用于控制前室加水流量的大小；电磁流量计用于检测前室加水流量的瞬时值；前室喷嘴用于将

水和蒸汽的混合物喷洒到前室烟叶上。后室水分控制系统由后室气动薄膜阀、后室喷嘴和出口水分仪等组成。后室气动薄膜阀用于控制后室加水流量的大小；后室喷嘴用于将水和蒸汽的混合物喷洒到后室烟叶上；出口水分仪用于检测后室烟叶出口水分的瞬时值。CP443-1 通信模块的以太网接口与交换机的网口相连，专家系统站和现场操作站分别通过网线与交换机的网口相连。CPU 413-2DP 模块的 Profibus-DP 接口与总线耦合器相连。入口电子皮带秤、入口水分仪和出口水分仪连接到总线耦合器的 Profibus-DP 接口；电磁流量计、前室气动薄膜阀和后室气动薄膜阀连接到总线耦合器的 PA 接口。开关量检测和控制信号接入 SM423 数字量输入输出接口模块。

4.2 软件组成

该系统的软件主要包括上位 WINCC 监控程序、专家系统程序和 PLC 程序等。上位 WINCC 监控程序主要用于对松散回潮工序过程数据及设备运行状态的监控，采用 WINCC7.0 开发。专家系统程序主要用于对加水系数进行决策，由人机接口程序、推理求解程序、知识获取程序、解释机程序、数据库和知识库等组成。人机接口程序、推理求解程序、知识获取程序和解释机程序均采用 C# 语言编制；数据库和知识库采用 SQL sever 2014 进行编制。PLC 程序主要由前室加水控制子程序、后室水分控制子程序和其它程序等组成，在 step7 中采用梯形图编制。本文重点讨论前室加水控制子程序和后室水分控制子程序，PLC 程序流程图如图 7 所示。前室加水控制子程序由前室料头处理程序、前室料尾处理程序和正常加水控制程序所组成。后室水分控制子程序由后室料头处理程序、后室料尾处理程序和正常水分控制程序所组成。料头处理程序是



前室加水控制子程序流程图

后室水分控制子程序流程图

图 7 PLC 程序流程图

指当烟叶到达滚筒内 1/4 位置之前所进行的处理程序。料尾处理程序是指当烟叶在滚筒内剩下约 3/4 的位置之后所进行的处理程序。前室加水控制子程序和后室水分控制子程序首先判断是否“料头或料尾?”。如果是料头或料尾阶段，则进入相应的料头或料尾处理子程序；如果不是料头或料尾阶段，则进入正常的前室加水控制程序或后室水分控制程序。

5 试验与效果分析

为了验证本系统的实际使用效果，在制丝线松散回潮工序进行了试验。首先使用原有的带前馈一串联控制方法，选取了一个批次红塔山（经典 1956）牌号卷烟叶组进行测试，按工艺要求将烟叶出口水分设定为 17.5%，在测试过程中由上位 WINCC 监控系统记录烟叶出口水分的变化情况，并形成趋势曲线，测试结束后截取该趋势曲线图，如图 8 所示。

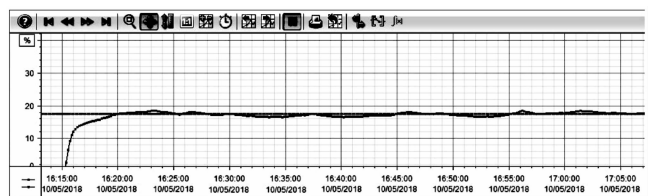
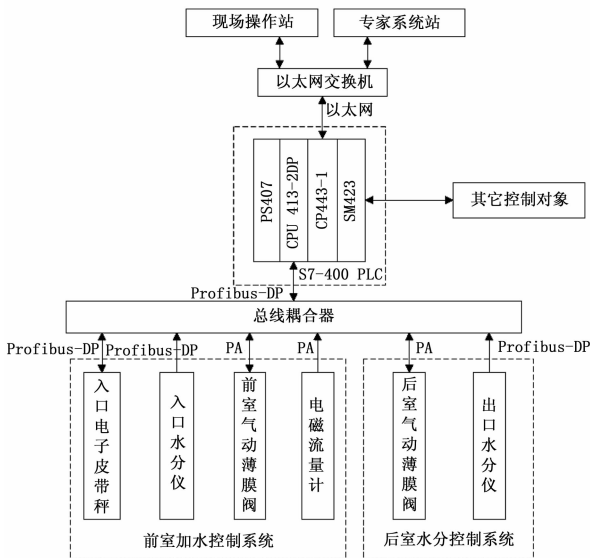


图 8 带前馈一串联控制烟叶出口水分趋势曲线

图 6 控制系统硬件组成框图



然后再使用专家一模糊 PID 控制方法，选取了另一个批次红塔山（经典 1956）牌号卷烟叶组进行测试，按工艺要求

也将烟叶出口水分设定为 17.5%，在测试过程中同样由上位 WINCC 监控系统记录烟叶出口水分的变化情况，并形成趋势曲线，测试结束后截取该趋势曲线图，如图 9 所示。

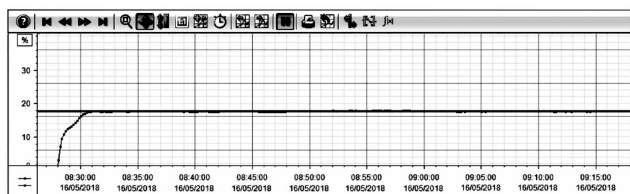


图 9 专家模糊 PID 控制烟叶出口水分趋势曲线

对比图 8 和图 9 可知，带前馈-串级控制方法，烟叶出口水分上升时间大约 5 分钟，存在一定的超调，整个过程烟叶水分在 ±3.0% 范围内波动，出口水分的稳定性较差；专家-模糊 PID 控制方法，烟叶出口水分上升时间大约 3 分钟，几乎无超调，整个过程烟叶水分在 ±1.0% 范围内波动，出口水分更加稳定。

6 结束语

本文提出了一种将专家系统、模糊推理和常规 PID 控制相结合的新方法实现了松散回潮出口水分的控制，利用专家系统对加水系数进行自动决策，提高了前馈输出调整的快速及时性；采用模糊推理方法分别对前室加水控制器 FB41 功能块的 K_{1P} 、 K_{1I} 和 K_{1D} 等 3 个参数与后室水控制器 FB41 功能块的 K_{2P} 、 K_{2I} 和 K_{2D} 等 3 个参数进行了在线自适应整定，在很大程度上改善了前室加水控制器和后室水控制器的性能，使出口水分控制比原有的带前馈-串级

(上接第 84 页)

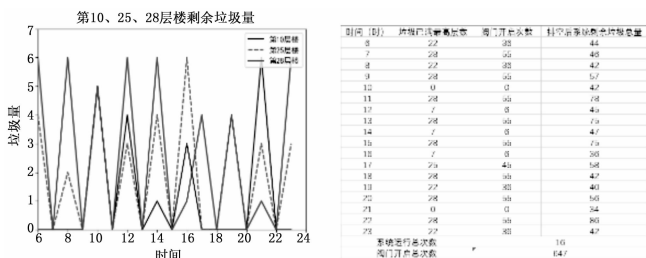


图 10 三层单元式排空策略仿真结果

在数值模拟仿真的过程中， $Q(n)$ 值以小时为节点进行模拟输入，但在系统实际应用过程中，垃圾投入系统的时刻是难以把握衡量的，这与数值模拟仿真过程并不矛盾。在仿真过程中，将时间轴进行细化，达到分、秒的级别，并将垃圾输入随机量进行相应调节，得到的实验结果将更加准确，与本文中的数值模拟仿真结果趋于一致，从侧面证明了设计方案的合理性。

4 小结

本文以气动垃圾回收系统为背景，详细研究了气动阀门在系统中的应用，提出三种控制策略并以减少系统运行和阀门开启次数为目标进行了分析比较，以数值模拟的形式直观展现了三种方案的优劣性，最终确定了三层单元式

控制方法取得了更好的效果，解决了松散回潮出口水分控制需要人工调整加水系数的缺陷，真正实现了松散回潮出口水分控制的全自动化，提高了松散回潮出口水分的稳定性与精确性。

参考文献：

[1] 张广标. 浅谈松散回潮出口水分控制 [J]. 中国设备工程, 2015 (10): 74-75.

[2] 李秀芳. 烟片松散回潮关键工艺参数过程控制系统的优化设计 [J]. 中国烟草学报, 2015, 21 (3): 34-41.

[3] 尹朝庆. 人工智能与专家系统 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009, 4.

[4] 甄彤, 何小平, 祝玉华. 基于专家系统的储粮机械通风控制系统 [J]. 现代电子技术, 2008 (8): 168-170.

[5] 向艳. 基于数据库的燃煤锅炉事故诊断专家系统的设计与实现 [J]. 计算机应用与软件, 2003 (7): 35-36.

[6] 胡翔, 陈登科. 基于图形拓扑的智能推理操作票专家系统 [J]. 科技创新导报, 2011 (19): 51-52.

[7] 曾竞, 谢又成. 基于模糊自整定 PID 的主汽温串级控制系统的设计 [J]. 微计算机信息, 2007 (19): 46-48.

[8] 吴兴纯, 赵金燕, 杨秀莲, 等. 基于 PID 参数自整定的炉温模糊串级控制系统设计 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2011 (5): 94-98.

[9] 谢宋和, 甘勇. 单片机模糊控制系统设计与应用实例 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1999, 7.

[10] 易继锋, 侯媛彬. 智能控制技术 [M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2007, 7.

控制策略为最佳方案，为气动垃圾回收系统阀门控制提供了新的思路与借鉴。

参考文献：

[1] 邓秉林. 单片机在阀门控制系统中的应用 [J]. 真空, 2009, 46 (5): 74-76.

[2] Schiettecatte, Wim, Tize, Ronald, De Wever, Heleen. Comparison of costs for three hypothetical alternative kitchen waste management systems [J]. Waste Management & Research, 2014, 1094-1012.

[3] 栾翔鹤, 李颀. 基于智能阀门定位器控制策略的研究与开发 [J]. 电气自动化, 2009, 31 (5): 32-34.

[4] 王贤明, 李元元. 上海世博园区垃圾气力输送系统工程设计 [J]. 科技创新导报, 2010 (30): 116-117.

[5] 汪乐, 汪政. 气动单缸双动刀闸阀及其自动化控制 [J]. 仪器仪表用户, 2016, 23 (11): 10-12.

[6] 邱晓来, 肖洁. 气动闸阀的设计与开发 [J]. 通用机械, 2016 (9): 40-42.

[7] 潘超. 对射式光电管在翻车机系统中的应用 [J]. 港口科技, 2016 (11): 29-34.

[8] 石朝锋, 薛立鹏, 张连万, 等. 气动阀门运动特性研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2018 (1): 41-44.

[9] 王军丽, 朱风培. 气动阀门驱动装置的抗震性能试验 [J]. 电工电气, 2017 (10): 70-71.