

模糊控制在电子皮带秤自动配料系统中的应用

济南金钟电子衡器股份有限公司 申颖 孙春华 李嘉

【摘要】 论文指出了目前电子皮带秤自动配料系统中存在的影响配料精度的有关问题，通过对现状的分析，提出了将模糊控制理论应用于配料系统的方法和具体实现，有效地解决了皮带秤这一动态计量衡器的控制准确度问题。进一步提高了系统的计量准确度和配料速度。很大程度地降低了劳动强度，提高了生产效率和产品质量。

【关键词】 配料 电子皮带秤 模糊 PID 控制 控制准确度

Keywords: Batching; electronic belt scale; fuzzy PID control; control accuracy

一、概述

目前，电子衡器已广泛应用于工农业生产和社会生活的各个领域。尤其是冶金、煤炭、化工、水泥等行业中，常需要对散料进行皮带输送过程中的动态连续称量，而且还要对输送中的流量进行调节、控制、达到准确的配比。

电子皮带秤自动配料系统可以按照设定配比和流量控制各输入物料的瞬时流量，从而达到控制各种产品的质量和产量的目的，是实现生产过程自动化和智能化、企业的科学管理、安全稳定生产和节能降耗的重要技术手段。微机配料控制系统在生产中的应用不仅可以提高配料质量和产量，也大大减轻了岗位工人的劳动强度，提高了生产效率。

本论文涉及到的有效解决动态计量衡器的控制准确度问题。作为衡器发展的前沿产品，它可代替企业中陈旧的配料工艺设备，很大程度地降低劳动强度，提高生产效率和产品质量，带来可观的经济效益，推动国民经济的发展。

二、目前国内外的现状及存在的问题

企业内常见的皮带秤自动配料系统现场结构组成如图 1 所示，该结构形式是一种最基本、使用最广泛的皮带配料系统。本系统以 7 种原料混合的为例。系统共有 7 个给料仓，每个料仓下有一给料机，由一台驱动电机带动，电机的转速就决定了给料机的流量，电机可采用多种调速方式；每个料仓下面有一皮带秤，通过皮带秤仪表能称出下料的流量、累计量等数据；所有皮带秤的下面是一

输送主皮带，把混合好的原料送到下级容器中。

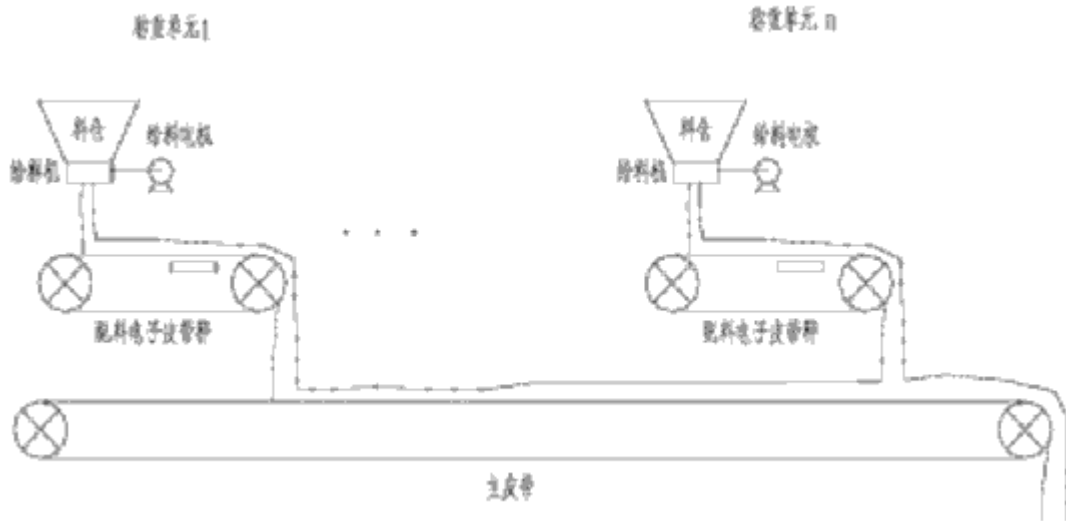


图 1 配料系统现场结构图

目前国内某些生产厂家从成本考虑，采用单片机进行简单的称量积算和 PID 调节，功能简单，控制准确度低，管理功能弱，可靠性不高。规模较大的公司则通常采用基于调节器和 WINDOWS 平台的皮带秤配料系统，该系统正常工作时，配料仪表接受来自秤体的称重信号和测速信号，经积算后显示瞬时流量和累计量，并将瞬时流量以 4~20 毫安模拟电流的形式送往 PID 调节器作为调节测量输入信号，调节器将该信号与机内设定值比较运算后输出 4~20 毫安模拟调节信号，控制给料电机转速，从而进一步控制该种物料的下料流量，最终使几种煤料的瞬时下料流量与阶段累计量都保持在用户要求的范围内。要改变流量及配比可直接在调节器上进行设定操作，操作简单方便。第 i 号给料机的控制方框图模型如图 2 所示。

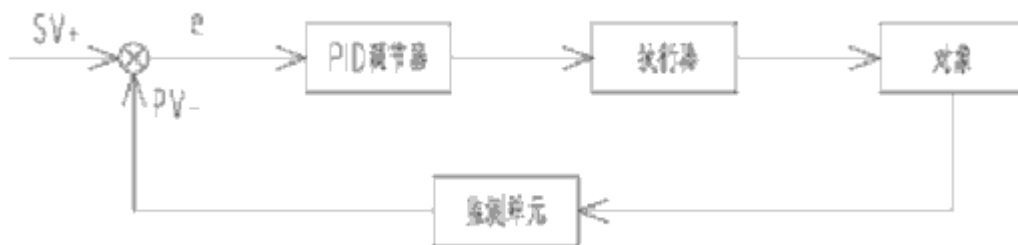


图 2 第 i 号给料机的控制方框图

适用上述解决方案的工艺现场首先必须满足这样一个前提条件，那就是物料给出量必须与给料控制电机的转速成正比。要使系统具有良好的调节品质，即有较高的稳定性、准确性和快速性，系统还必须具备两个条件：

- 1) 系统自身的结构性质稳定，这包括它的容量系数、阻力和传递距离等内容。
- 2) 调节器有合理的 PID 参数。只有将这三种作用的强度作适当的配合，才可以使调节器快速、平稳、准确地运行，从而获得满意的控制效果。

在这两者中，条件 1) 是条件 2) 的前提，因为 PID 参数取决于系统的动态特性，而影响系统动态特性的主要因素是系统本身的结构性质。

因为以往常用配料称重系统方案设计是采用一般的 PID 控制算法，其参数一般是按阶跃响应的过渡过程时间来整定的，灵敏度较高，对于固定参数的系统有着较好的调节品质，从理论上讲能做到无误差调节，在误差较小的范围内确有其优越性。但是，实际中电子皮带秤自动配料系统的控制准确度会受到多个因素的影响。如：物料物理特性、机械震动、给料设备安装准确度、料仓结构形状等因素的影响；而且现场环境较为复杂、恶劣，其他外界干扰频繁。由于以上因素的存在，系统误差往往较大，其动态特性并不理想，超调量一般较大，导致控制系统无法实现理想的控制效果。此时，皮带秤的计量性能和配料准确度都会受到影响。论文涉及到的新型电子皮带秤自动配料系统，采用模糊-PID 复合控制技术、将模糊控制技术结合传统的 PID 控制策略应用在配料系统的调节中，可有效解决上述问题。

三、模糊控制配料系统的基本组成和工作原理

以 7 台皮带秤组成的配料系统为例，系统组成如图 3 所示。本系统主要由配料电子皮带秤、仪表控制柜、动力控制柜、低压开关柜、变频器柜、现场操作盘、工业控制微型计算机、及监控管理软件几部分组成。

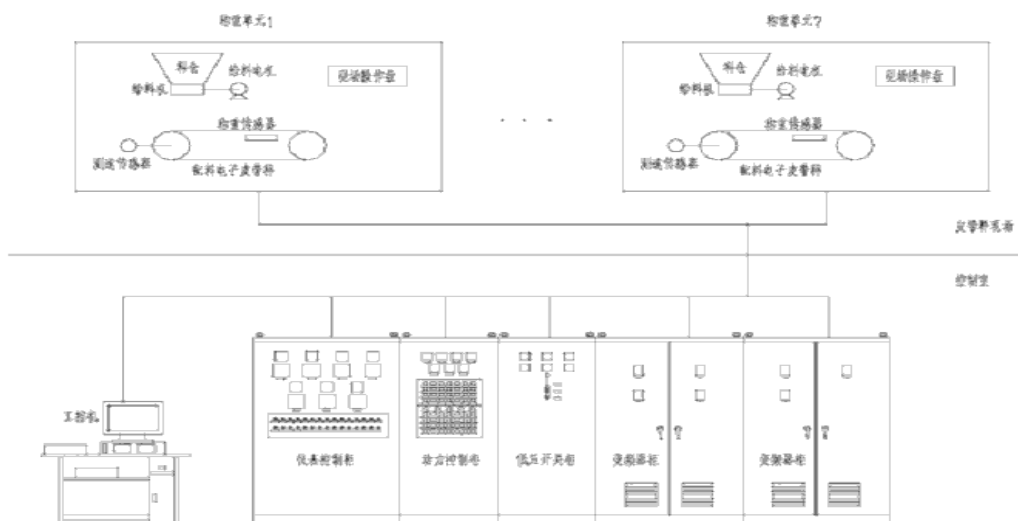


图 3 系统组成

系统开始工作时，工控机首先根据本次生产任务首先进行各种初始化，包括各成分的名称、仓号、产量、标准配比、标准流量等，然后按一定时序控制各给料机和皮带秤的启动，各给料机按一定流量给料，同时工控机读取皮带称重仪的重量信号和累计量数据，根据各成分的累积量值计算当前的实际配比，通过与标准配比的比较修正各给料机的给定量，使系统工作在最佳配比状态，当达到预定产量时，再按一定时序停止各给料机。

工控机主机选用研华 IPC-610 型 14 架装式工业 PC 机箱，配置 PCA-6179L 全长 CPU 卡(PIII/370 结构/支持 133M 外频)、512M 内存、80G 硬盘、一个 PCL-746+四端口 RS232/422/485 通讯接口卡、2 个 PCI-1720U 型 4 通路隔离模拟量输出卡（设置为 4~20 毫安模拟输出）。工控机作为上位机，通过 RS485 双向通讯接口与皮带秤仪表联机，通过 RS232 双向通讯接口与动力控制柜中的 PLC 联机，输出模拟量控制信号控制给料机的给料流量，从而构成完整的配料系统。工控机另留有一个 RS485 双向通讯接口，以备与全厂的上位工控机通讯。

监控软件的主要功能有：根据生产配方和产量目标对称重过程进行自动控制，包括 PID 和模糊控制；对称重数据进行统计管理并实现打印，包括对变频器进行调节控制的运算。系统软件有多种现场监控方式和配方输入方式，以适应不同的工程要求，用户可设定报警打印时间等参数。界面采用菜单方式，使用方便，用户可通过鼠标或键盘进行操作，对整个配料系统进行控制和管理。

四、系统控制模型分析

该系统的特点是由一台上位机来控制多台给料机，为了实现一定的配比，各给料机之间的工作又是相互联系的，而且给定量要随当前的实际配比进行修改，因此其控制结构是较为复杂的。第 i 号给料机的控制方框图模型如图 4 所示。

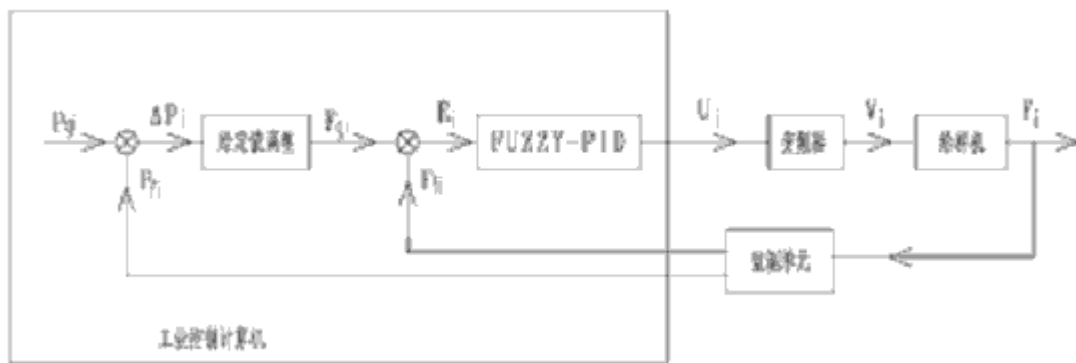


图 4 第 i 号给料机的控制方框图模型

从图 4 中可以看出，该系统属于一个多闭环有关联控制结构。就第 i 号给料仓而言，有两个闭环和一个前馈，内环是一个 FUZZY-PID 控制器，据给定流量 F_{gi} 去控制调速给料机，使其给料流

量 F_i 控制在理想的给定值 F_{gi} 附近。外环根据当前的累积值和希望产量之差 ΔP 以及前馈环节的给料机当前流量来修正内环的给定值。

控制器采用 FUZZY-PID 复合控制方式，当偏差较大时采用模糊控制，当偏差减小到较小范围时采用 PID 控制方式。这样就可以解决系统误差较大，其动态特性不理想，超调量较大的控制难题。

五、FUZZY-PID 复合控制器的设计

如图 5 所示，被控量为 F_i ，控制量为 U_i ，采用 FUZZY-PID 复合控制方式，当偏差较大时采用模糊控制，当偏差减小到较小范围时采用 PID 控制方式。二种控制采用并行的方法，由 Bang-Bang 开关进行切换，复合控制器结构图如图 5 所示。

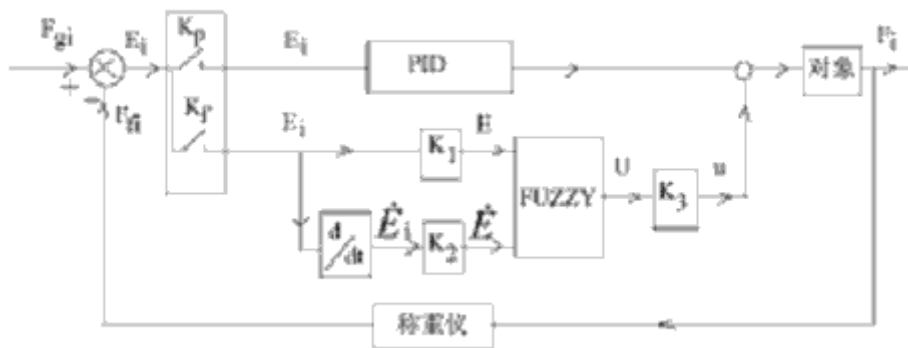


图 5 FUZZY-PID 复合控制器结构

1) Bang-Bang 转换开关

Bang-Bang 转换开关实际上是控制器中的软件开关，由其决定采用那种控制算法。设 e_1 表示大小偏差的分界值，其切换规律如下：

当 $|E_i| \leq e_1$ 时， $K_p = "1"$ ， $K_f = "0"$ ，即采用 PID 控制规律；

当 $|E_i| > e_1$ 时， $K_p = "0"$ ， $K_f = "1"$ ，即采用模糊控制规律。

2) PID 控制器

PID 控制器采用一般的增量式数字算法，其参数按常规整定。

理想的模拟 PID 控制算式见公式

$$p = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad \text{其中,}$$

p : 调节器输出

e : 调节器偏差输入信号

K_p : 比例系数，常用比例带 P 表示， $P = 1/K_p$

T_i : 积分时间， T_i 越大，积分作用越弱，积分时间越长

Td: 微分时间

3) 模糊控制原理及模糊控制器的实现

模糊控制通过模糊逻辑和近似推理方法，把人的经验形式化，模型化，变成计算机可以接受的控制模型，让计算机代替人来进行有效的实时控制，为实现模糊控制，计算机作为模糊控制器，必须解决以下三个问题：

- a 输入量输出量的模糊量化；
- b 建立模糊控制规则，或模糊控制规则表；
- c 输出信息的模糊判决。

如图 6 所示，为模糊控制的原理框图：

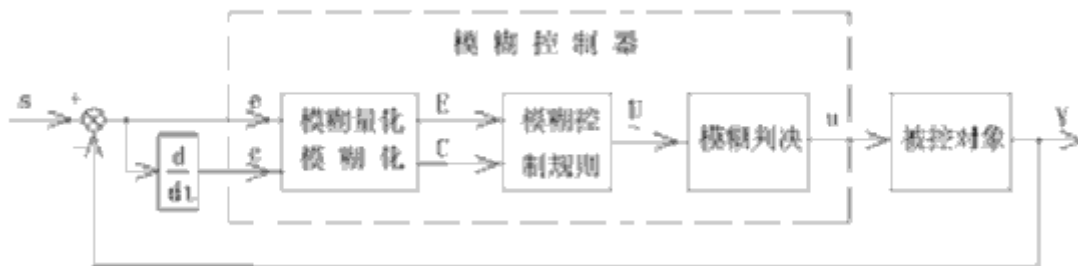


图 6 模糊控制的原理框图

S: 系统的设定值，是精确量。

e, c: 系统偏差与偏差变化率，均是精确量。

E, C: 经模糊量化处理后，偏差与偏差变化率变成的模糊量。

U: 模糊量的偏差与偏差变化率经模糊控制规则、近似推理处理后，得到模糊量的控制作用 U。

u: 对模糊量的控制作用 U，经模糊判决，得到模糊控制器输出的精确量的控制作用 u，去控制被控对象。

模糊控制系统的品质在很大程度上取决于控制规则及隶属度的确定，控制规则是其核心，一般用 IF a THEN b 的表达形式，条件 a 可以是多个条件逻辑积。下面主要介绍所采用控制器的结构、输入/输出和模糊控制规则。

本系统将给定值 F_{gi} 和输出反馈量 F_{fi} 进行比较，得到流量偏差 E_i ，进而可求出 E_i 的变化率 \dot{E}_i ，以 E_i 和 \dot{E}_i 作为 Fuzzy 控制器的输入，控制器的输出是控制量 U_i ，即采用二维模糊控制器，如图 5 所示。其中， K_1 、 K_2 为量化系数， K_3 为比例系数， E 、 \dot{E} 和 U 分别为偏差 E_i 、偏差变化率 \dot{E}_i 和控制量 U_i 的 Fuzzy 语言变量。

将输入信息 E_i 和 \dot{E}_i 量化在 $[-6, +6]$ 之中，偏差 E_i 对应的模糊子集 E 分为八档： $E = \{\text{负大, 负}$

中，负小，负零，正零，正小，正中，正大}，即={NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB}

与此对应，将偏差 E_i 分为 14 级，论域设为 X，则

$$X = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, -0, +0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

这样确定论域 X 的元素对模糊子集 E 的隶属度如表 1 所示。

表 1 输入 E_i 隶属度表

		-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
E1	NB	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	NS	0	0	0.1	0.7	1.0	0.7	0.1	0	0	0	0	0	0	0
E4	NO	0	0	0	0	0.1	0.7	1.0	0	0	0	0	0	0	0
E5	PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.7	0.1	0	0	0	0
E6	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.7	1.0	0.7	0.1	0	0
E7	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
E8	PB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0

同理，对于 \dot{E}_i 有： $\dot{E} = \{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}$ ，将偏差变化率 \dot{E}_i 分为 13 级，论域设为 Y，则 $Y = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$

这样可确定论域 Y 的元素对 \dot{E} 的隶属度。

控制量 U_i 的模糊子集为 U， U_i 分为 13 级，其论域为 Z，则有

$$U = \{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB\}, Z = \{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6\}$$

可确定 Z 对 U 的隶属度。

根据给料机操作经验，总结出如下控制规则：

IF E=NB AND ΔE =PB THEN U=NB

...

IF E=PB AND ΔE =NB THEN U=PB

全部规则如表 2 所示。

表 2 控制规则表

	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB
NB	×	×	PB	PM	PM	PM	NM	NB
NM	PM	PS	PS	PM	PM	PM	NM	NB
NS	PB	PM	PS	PS	PS	PS	NM	NB
O	PB	PM	PS	O	O	NS	NM	NB
PS	PB	PM	NS	NS	NS	NS	NM	NB
PM	PB	PM	NM	NM	NS	NS	NS	NM
PB	PB	PM	NB	NB	NB	NB	×	×

表中，“×”表示不可能出现的情况，即死区。

于是，对应每条控制规则，可得到一个三元模糊关系：

$$R_{ij}=(E \times \dot{E} j) \times U_{ij} \quad (1)$$

则有

$$\mu_{R_{ij}(x,y,z)} = \mu_{E_i(x)} \wedge \mu_{\Delta E_j(y)} \wedge \mu_{U_{ij}(z)}, \forall x \in X, \forall y \in Y, \forall z \in Z \quad (2)$$

对于总的控制规则所对应的模糊关系有 R，用取并的方法得到，即

$$R = \bigcup_{i=1, j=1}^{i=n, j=m} R_{ij} \quad (3)$$

其中，
$$\mu_{R(x,y,z)} = \text{MAX}_{i=1-n, j=1-m} [\mu_{R_{ij}(x,y,z)}]$$

根据输入 E 和 \dot{E} ，求出控制量的控制决策 U 如下：

$$U = (E \times \dot{E}) \bullet R \quad (4)$$

其中，
$$\mu_U(x) = \bigvee_{x \in X, y \in Y} \mu_R(x, y, z) \wedge [\mu_E(x) \wedge \mu_{\Delta E}(y)]$$

根据上面计算得到的模糊子集 U，采用取隶属函数最大值判决法，求出相应的控制量 u'，并结合实际情况对不合理处给予修正，即可得到模糊控制表，在每个控制周期，根据 E_i 和 \dot{E} 的值查模糊控制表，即可得到控制量 u'，再乘以系数 K3，即得到系统的实际控制量 u=K3×u'，用以控制实际的系统。

量化系数 K1、K2 是为了将输入变量变换为模糊论域内的离散整形值，即在输入量的变化范围

和模糊论域范围之间作一种影射变换（取整），其选择主要依赖于两个论域的变化范围.在本系统的应用中， K_1 取 8， K_2 取 90。比例系数 K_3 主要由控制量的模糊论域大小和实际对象控制量的大小来决定，本系统中，其输出是通过 8 位 D/A 来控制变频器， K_3 取 35。

根据配料系统的特点和实际物料特性及实验调试， e_1 取 0.2。 e_1 取得越大，系统的响应时间变慢，响应波动加大， e_1 取得越小，系统的响应时间加快，但 PID 作用不明显。

在系统实际调试过程中发现，采用 FUZZY-PID 复合控制方式比单纯采用 PID 控制，系统波动较小，更容易稳定，系统调整时间也有明显改善。

六、结论

该电子皮带秤自动配料系统采用当前运用广泛，技术成熟先进的模糊控制理论，有效解决了以往皮带秤配料系统存在的系统误差较大、动态特性不理想的问题，提高了系统的控制准确度和可靠性，有效解决了动态计量衡器的两个重要指标—快速性和准确性难以统一的问题。作为衡器发展的前沿产品，它可代替企业中陈旧的配料工艺设备，很大程度地降低劳动强度，提高生产效率和产品质量，带来可观的经济效益，推动国民经济的发展。该系统也可适用于连续给料的其他装置，如：螺旋给料秤、圆盘给料秤、冲板流量计及核子皮带秤等。

参考文献

- (1) 王 成，工业生产自动化[M]. 北京：科学出版社，2003。
- (2) 罗才生，皮带秤[M]. 北京：中国计量出版社，1992。
- (3) 申 颖，合钢焦化厂电子皮带秤自动配料系统[J]. 冶金自动化.2001，11：61-62。
- (4) 申 颖，PID 调节器在电子皮带秤配料系统中的应用[J]. 计量技术.2001，4:52-53。
- (5) 张荣善，散料输送与贮存[M]. 北京：化学工业出版社，1994。
- (6) 刘苗生，提高微机配料准确度的措施[J]. 机械与电子，1996，1：32-35。
- (7) 徐万红，金伟，李芬，皮带秤配料系统的智能综合控制[J]. 沈阳工业大学学报，1998，20：15-17。
- (8) 唐艺菁，微机配料控制系统的设计与开发[D]. 成都 四川大学，2003：20-23。
- (9) 杭柏林，袁伸雪，高彦臣，配料系统给料速度的自动控制[J]. 橡塑技术与装备，2001，27（2）：35-36。
- (10) 陶永华，新型 PID 控制及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，2002。
- (11) 何 平，模糊控制器的设计及应用[M]. 北京：科学出版社，1997。
- (12) 李士勇，模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1990。

作者简介

申颖，济南金钟电子衡器股份有限公司，高级工程师

地址：济南市英雄山路 147 号，邮编：250002，电话：0531-82569081，邮箱：msshening@163.com