

基于自适应模糊控制的混凝土配料系统 研究与应用

何小宁^{1,2}, 肖伸平^{1,2}, 李浩³, 黄云章^{1,2}

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007;

3. 湖南明泰项目管理有限公司, 长沙 412000)

摘要: 分析了混凝土自动配料系统影响成品质量的主要原因, 即动态称重过程中产生的配比误差, 将自适应模糊控制原理用于取料环节的控制; 针对影响控制精度的下料速度和提前量两个参数, 根据其非线性和不确定性特征, 运用系统的自学习和自适应能力, 反复多次修改控制规则; 对配料速度按照粗调和精调分段模糊控制, 满足了快速配料的动态性能要求; 用重量偏差和偏差变化量对提前量及时调整, 以满足配料精度的要求, 提高系统的静态性能; 保证了不同强度配方和不同级配量的各批次产品抗压强度符合设计标准, 减少建筑工程质量隐患, 并在实际工程应用中得到了验证。

关键词: 自适应模糊控制; 配料系统; 配料速度; 提前量

Research and Application of Concrete Batching System Based on Adaptive Fuzzy Control

He Xiaoning^{1,2}, Xiao Shenping^{1,2}, Li Hao³, Huang Yunzhang^{1,2}

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hu'nan University of Technology, Zhuzhou 412007, China;

2. Hu'nan Provincial Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent Equipment, Zhuzhou 412007, China;

3. Hunan Mingtai Project Management Co., Ltd., Changsha 412000, China)

Abstract: The main reason affecting the product quality of the automatic batching system of the concrete is analyzed, namely the proportioning error generated during the dynamic weighing process. The adaptive fuzzy control principle is used for the control of the reclaiming link. According to the characteristics of nonlinearity and uncertainty, the self-learning and self-adaptive ability of the system are applied to repeatedly modify the control rules. The segmented fuzzy control of rough/fine adjustment is applied on the batching speed, to satisfy the dynamic performance requirements for fast batching. The advance value is adjusted in time with weight deviation and the deviation variation, to meet the accuracy requirements of batching system and improve the static performance of the system. The design standards of the products with different compressive strength and different gradations can be satisfied, and the hidden quality dangers of the construction engineering can be reduced. These have been verified in practical engineering applications.

Keywords: adaptive fuzzy control; batching system; batching speed; advance

0 引言

混凝土配料系统主要用于大型水泥预制件生产线、建筑施工现场的混凝土搅拌站或商业混凝土搅拌炉(简称商混炉)等。根据《混凝土强度检验评定标准》(GB/T50107-2010)的规定,按配方生产的混凝土产品,其强度必须达到相应等级的要求。影响混凝土强度等级的主要因素有水泥等级、水灰比、骨料、龄期、养护温度和湿度等因素。在保证水泥等级的情况下,养护条件易于满足,而水、灰、

骨料的重量控制是难点。自动配料过程中,各原料的配比即动态称重产生的误差,是影响成品质量的主要原因。由于原料成分和性能的差异,使得下料速度和称量结果受到多种不同因素的影响,因此被控系统具有很大的随机性和非线性特征,其变化规律无法用数学模型描述^[1]。

随着模糊控制理论的成熟和发展,模糊控制技术逐步进入实践应用阶段,但常规的模糊控制器仍存在稳态精度低、动态特性不够理想,以及适应对象变化的能力较差等弱点。自适应模糊控制理论,又称自组织模糊控制,它能在控制过程中根据被控参量和外界环境的变化,经过辨识、聚类 and 决策,自动地对模糊控制规则进行调整和修改,从而生成新的控制规律,使之具有自适应和自学习的能力^[2]。基于此,将自适应模糊控制算法用于混凝土配料系统,以根据不同的配方参数和工况及时调整和更新控制规则。

收稿日期: 2019-07-08; **修回日期:** 2019-08-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61672225); 国家级大学生创新创业训练计划项目(201711535007)。

作者简介: 何小宁(1969-),女,湖南长沙人,大学本科,副教授,主要从事自动化教学及工控机方向的研究与开发。

肖伸平(1965-),男,湖南东安人,博士,教授,主要从事过程控制、时滞系统等方向的研究。

1 混凝土配料系统描述

混凝土配料系统主要由原料仓、配料斗、搅拌仓、执行电机、主控器及相关外围器件组成。目前以单片机或 PLC 为核心的配料系统,一般是按照给定的配方预置各成分的重量参数^[3],并根据调试和运行经验设定提前量,以控制原料的下料重量和误差。

1.1 混凝土配料系统工作原理

混凝土配料系统的一般工作过程为:1)主机按照本批次产品配方和级配量要求,向原料仓发出取料指令。包括开仓门信号、仓门开度、电振机振动频率和重量信号等;2)原料仓门打开后,向配料斗喂料,重量传感器同时将数据传送到主机;3)当配料重量达到预先设定值时,关闭取料门;4)当滞留在配料通道中的原料在振动和惯性作用下完全进入配料斗之后,打开斗门,将原料加入搅拌仓内混合搅拌。至此,一个混合配料周期便算完成。

配料时,每种原料分别由相应的原料仓对各配料斗喂料;各配料斗内的压力传感器将测量到的动态重量信号输入采样模块,并转换为电气量信号;经数字化处理后,进入控制器;再由比较判断单元进行判别。当重量达到配方要求值时,将该料加入搅拌仓中与其它原料混合搅拌^[4]。如未达到设定的参考值,则继续加料,再重复上述过程,直到满足要求。

1.2 控制要求

混凝土的主要质量指标是抗压强度,该指标是通过坍落度实验和立方体试件,在经过与产品配方对应的养护周期之后,通过专业测试才能获得,属于事后检测。在生产过程中,因混凝土还未硬化成型,所以无法在线获得本批次产品的性能参数,这是混凝土产品与其他工业生产过程不同的地方。如果某一原料实际的进料量大于给定的误差,必然会影响该批次产品的质量,导致混凝土成批报废。更为严重的是,如果是现场浇筑的建筑物结构,待事后检测出混凝土的强度不合格,将造成安全隐患,极端情况下只有推倒重建。所以生产的混凝土产品必须按照配方要求,准确控制各原料成分的配比,严格限制超调量。

在配料过程中,原料从取料门出来到进入配料斗,再由传感器检测到信号,有一个滞后时间。如果等传感器检测到足量的原料时,才停止喂料,到最后实际上进入配料斗的原料就会超量。所以必须在配料重量还未达配方设定值时就要提前关闭取料门,这就是预设提前量。预设提前量有两条途径:一是设定时间提前量,即根据调试过程获得的取料时间,提前一段时间关闭取料门;二是设定重量提前量,当测量到配料斗内的动态重量离配方值还有一定的差距时,提前关闭取料门。

因此要实现混凝土在线过程质量控制,配料系统应能按照配方值、级配量和原料性能,自动调整下料速度和提前量的设定值。在保证原材料质量的前提下,对原料的取料过程进行高精度动态测量和控制,是保证产品质量的重要环节。

2 配料过程的自适应模糊控制原理

实际运行中发现,对于不同强度要求的产品配方和级配量,因各种原料的物理性能不稳定,如砂石材料的含水率和含泥量不同、水泥等粉状物的粘结程度有差异;还有可能因原材料批次不同而出现的性能参数变化等,都将影响到控制精度。特别是砂石、碎石等骨料的比例在混凝土原料中占 60% 以上,其机械惯性大,下料速度不易控制,使得称量结果呈现出严重的滞后性和非线性变化,导致实际的配料重量出现较大误差^[4],成为影响混凝土强度等级的重要因素。

用于校正误差的时间提前量和重量提前量一般是根据调试过程或者操作人员的运行经验获得,具有一定的主观性。但是,称量结果的滞后程度与原材料的性能紧密相关,对于粘性大的砂石和惯性大的骨料相关度完全不同。由于原料性能的分散性,以往的调试结果和配料过程的经验值不足以保证后续配料的准确性。产品配方改变、级配量不同或原料性能差异等都有可能引起提前量发生变化,如果不能及时调整,将会产生无法确定的配料重量误差,从而影响混凝土质量参数。

如采用自适应模糊控制原理,将影响下料速度的参数如该批次产品的级配量、原料的重量、砂石的含水率和含泥量、骨料的体积大小、水泥及其他粉状材料的粘结程度等组成输入变量矩阵;经过性能测量环节后形成第一级控制量,再送入第一级模糊控制器;模糊控制器结合重量偏差反馈和过程状态判断规则,经过第一次模糊判断后,输出第二级控制量;同时控制量校正模块输出校正量;再经过第二级模糊控制器进行控制规则修正,最后输出新的控制规则,该规则就是经过自学习后的自适应模糊控制规则,控制原理如图 1 所示。

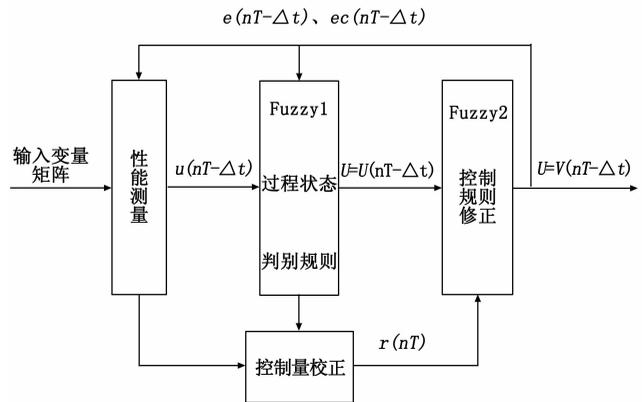


图 1 自适应模糊控制原理

本系统采用的自适应模糊控制器增加了 3 个功能模块,即:性能测量模块、控制量校正模块和控制规则修正模块^[5]。

设系统时滞为 Δt ,当前采样时刻为 nT 。 $e(nT-\Delta t)$ 、 $ec(nT-\Delta t)$ 分别为过去时刻的偏差和偏差变化量。由性

能测量后得到第一级控制量 $u(nT - \Delta t)$, 再经过两级模糊化处理, 最后可得到自适应模糊控制量。

模糊控制规则修改前的 $(nT - \Delta t)$ 时刻, 若有 $E = \tilde{E}(nT - \Delta t)$ 且 $EC = \tilde{E}\tilde{C}(nT - \Delta t)$, 则控制量为:

$$U = \tilde{U}(nT - \Delta t) = F(u(nT - \Delta t))$$

修改后, 若 $E = \tilde{E}(nT - \Delta t)$ 且 $EC = \tilde{E}\tilde{C}(nT - \Delta t)$, 则控制量为:

$$U = \tilde{V}(nT - \Delta t) = F(u(nT - \Delta t) + r(nT))$$

其中: F 表示模糊化过程; $r(nT)$ 为校正量。 $r(nT)$ 可以用下式求得:

$$\begin{bmatrix} r_1(nT) \\ r_2(nT) \\ \vdots \\ r_k(nT) \end{bmatrix} = \mathbf{H}^{-1} \begin{bmatrix} u_1(nT - \Delta t) \\ u_2(nT - \Delta t) \\ \vdots \\ u_k(nT - \Delta t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: \mathbf{H} 为表示输出量与输入量关系的矩阵^[1]。

上述偏差、偏差变化量与控制量的关系为:

$$\tilde{R}_1(nT) = \tilde{E}(nT - \Delta t) \times \tilde{E}\tilde{C}(nT - \Delta t) \times \tilde{U}(nT - \Delta t) \quad (2)$$

$$\tilde{R}_2(nT) = \tilde{E}(nT - \Delta t) \times \tilde{E}\tilde{C}(nT - \Delta t) \times \tilde{V}(nT - \Delta t) \quad (3)$$

自适应模糊控制器修正控制规则的方法为:

$$\tilde{R}(nT + T) = (\tilde{R}(nT) \text{ but not } \tilde{R}_1(nT)) \text{ else } \tilde{R}_2(nT) \quad (4)$$

式中, $\tilde{R}(nT)$ 为修正前的规则, $\tilde{R}(nT + T)$ 为修正后的规则。由 $\tilde{R}(nT + T)$ 以及偏差 $\tilde{E}(nT)$ 、偏差变化量 $\tilde{E}\tilde{C}(nT)$ 进行合成, 可求得控制量 $\tilde{U}(nT)$, 再经过解模糊后就可以得到精确的控制量^[6]。

经过多次反复的模糊化判断和修正, 控制规则从建立到修正到再建立的适应过程, 使得设定的提前量逐步逼近真实值, 最后可将配料误差控制在允许范围之内。

3 配料系统自适应模糊控制器设计

在混凝土产品中, 以混凝土的控制精度要求最高。该产品原材料一般包括碎石、砂石、水泥、水、碱水剂、及矿石粉等。每种原料的下料速度受到多种不同因素的影响, 除了前述原因以外, 粉状原料、砂石尤其是细磨砂容易粘结成块状, 有时会在取料门的开口处形成拱状(俗称“起拱”), 这不仅影响下料速度, 极端情况下还可能堵住取料门。在配料系统的实际运行过程中发现, 骨料和砂石的下料速度和提前量随机性最大, 是控制难点。配料中的水和碱水剂属于液体, 流量容易控制; 水泥和矿石粉属于粉状物, 但因为所占比例不大, 可由螺旋机从密封的容器挤压至配料斗中, 输送速度比较容易控制。

在改变产品配方或级配量时, 要输入新的配料参数, 系统必须经过学习才能获得最佳的控制规则^[5]。包括对配料速度、取料门的开度、电振机振动频率等的控制和提前量的设定。本节以砂石的下料环节为例, 说明系统的自适应过程。

3.1 输入、输出变量定义

设当次配方的砂石给定重量为 G_g , 提前量参考值为

ΔG_q 。输入、输出量定义如下。

1) 输入量:

(1) 重量偏差

$$E_k = (G_g - \Delta G_q) - G_{f(k)}$$

(2) 偏差变化量

$$EC_k = E_k - E_{k-1} =$$

$$[(G_g - \Delta G_q) - G_{f(k)}] - [(G_g - \Delta G_q) - G_{f(k-1)}] = G_{f(k-1)} - G_{f(k)}$$

其中: $k=1, 2, \dots$, 为采样次数; $G_{f(k)}$ 、 $G_{f(k-1)}$ 分别为当前和前次采样时刻的砂石重量。

(3) 输入变量矩阵。包括配方参数、级配量以及砂石的粗细程度、含泥量、含水率等。输入变量矩阵是决定控制规则的主要因素, 而重量偏差和偏差变化作为反馈量, 参与控制规则的修正。

2) 输出量: 电振机振动频率 Y_1 及取料门开度 Y_2 。输出量的大小直接关系到下料速度和下料时间, 对提前量的设定值起主要作用。

从控制过程分析, 输入输出量之间可以形成以下模糊关系:

$$R(E, EC, Y_1, Y_2)$$

这是一个双输入双输出的模糊控制关系。通过模糊解耦^[6], 可将它分解为两个双输入单输出的模糊关系, 即:

$$R_1(E, EC, Y_1) \text{ 和 } R_2(E, EC, Y_2)。$$

设重量偏差划分为: 正大、正中、正小、零、负小等 5 个模糊状态^[7], 分别对应模糊语言值 PB 、 PM 、 PS 、 0 、 NS ; 偏差变化量、电振机振动频率和配料门开度分别划分为: 正大、正中、正小、零等 4 个模糊状态, 分别对应模糊语言值 PB 、 PM 、 PS 、 0 。

3.2 模糊控制规则的建立

将系统分为粗调和精调两段模糊控制。在取料初期, 当实测值 $G_{f(k)}$ 较小时, 重量偏差大, 主要是保证给料速度, 采用粗调方式, 即将电振机振动频率 Y_1 和取料门开度 Y_2 都置于最大值, 以最快的速度下料, 提高工作效率; 当实测值 $G_{f(k)}$ 增大时, 重量偏差减小, 此时改为精调方式, 即将 Y_1 和 Y_2 适当减小来降低配料速度, 以保证控制精度和限制超调量。这样既满足了动态性能的要求, 又能达到良好的静态性能。据此可以形成粗调和精调两段多规则集结构^[6], 模糊控制规则如表 1 所示, Y_1 和 Y_2 均适用。

表 1 模糊控制规则

E Y	PB	PM	PS	0	NS
EC	PB	PM	PS	0	0
PB	PB	PM	PS	0	0
PM	PB	PM	PS	0	0
PS	PB	PM	PS	0	0
0	PB	PB	PM	0	0

粗调控制规则为:

if E is B then Y_1 is B and Y_2 is B ;

精调控制规则为

if EC is S then Y_1 is S and Y_2 is S ;

if E is 0 then Y_1 is 0 and Y_2 is 0 。

当 $E > 0$ 且 $EC > 0$ 时, 说明下料正常, 料斗内的砂石重量还没有到提前量的设定值, Y_1 、 Y_2 的大小分别按照粗调和精调两段模糊控制规则输出;

当 $E \leq 0$ 而 $EC \neq 0$ 时, 说明重量偏差已经小于或等于提前量, 但砂石重量还未达到给定值 G_g , 此时应关闭配料门和电振机, 使 $Y_1 = 0$ 、 $Y_2 = 0$, 等待 ΔG_q 落入配料斗;

特殊情况下, 当重量偏差 $E > 0$, 而偏差变化量 $EC = 0$ 时, 说明下料门已被堵住, 系统应发出报警信号, 并根据控制规则调节 Y_1 、 Y_2 。

3.3 参数自适应过程

系统开始运行时, 按照给定的参考规则进行模糊控制, 之后每一步的控制量和测量值都被存于存储器中, 作为生成新规则的依据^[8]。通过性能测量和控制量校正环节, 得到经过校正后的控制量, 再对控制规则进行修改, 并存于规则生成器^[8]。

3.3.1 速度规则的建立和适应

取料过程中原料的动态出料量、取料门开度和电振机频率与取料时间的关系, 可用图 2 所示的配料曲线表示。

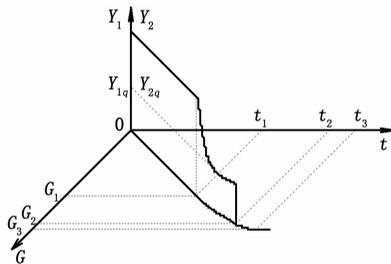


图 2 混凝土配料曲线

图中 $0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_3$ 分别为粗调 (快速配料) 时间段、精调 (低速配料) 时间段和提前量落差时间段; G_1 、 G_2 分别对应 t_1 、 t_2 时刻的实测取料重量, G_3 为配方设定的取料量; $\Delta G_q (= G_3 - G_2)$ 则为按剩余额原则给定的提前量。粗调过程 Y_1 、 Y_2 不变; 精调过程中, Y_1 、 Y_2 随着重量偏差的减小而减小; Y_{1q} 、 Y_{2q} 分别对应精调完成后的电振机频率和取料门开度。 $\Delta t_q = t_3 - t_2$ 为按时间原则给定的提前量, 与 ΔG_q 对应。到配料重量达到 G_2 时, 即对应 t_2 时刻, 关闭电振机和取料门。经过一个落差时间后, ΔG_q 进入配料斗, 重量显示为 G_3 , 本次取料过程完成。

首先要确定参数 G_1 , 在 $G_{f(k)} \leq G_1$ 时, Y_1 、 Y_2 应为最大值, 为快速配料过程。设 $G_1 = k_1 G_g$, 系统运行后, 如果 $t_2 - t_1 \geq k_2 t_1$, 说明精调时间太长, 则在下一次配料时加大 k_1 值; 如果 $t_2 - t_1 < k_3 t_1$, 说明精调时间太短, 则在下一次配料时减小 k_1 值 (其中 $k_3 < k_2$); 如果 $k_3 t_1 < t_2 - t_1 < k_2 t_1$, 在下次配料 k_1 值不变, 每次配料对上次的 k_1 值进行修改。 k_1 、 k_2 、 k_3 值是根据不同的配料重量 (或级配量) 确定

的。通过修改 k_1 、 k_2 及 k_3 , 使控制规则逐步完善, 直到无新的规则产生为止^[9]。

3.3.2 提前量的修正

设本次配料设定的提前量参考值为 ΔG_q , 配料完成后实际配料误差为 $e = G_3 - G_g$ 。如果误差 e 超出了允许范围, 需要对误差进行在线处理^[1]。

1) 当配料不足, 且 $e \leq -5\% G_g$ 时, 则按精调控制规则继续配料, 直到 $e > -5\% G_g$ 。下一次配料时加大 G_2 , 使提前量减小。

2) 当配料过量, 且 $e > 5\% G_g$ 时, 需要对配料斗的卸料过程进行控制。将超出部分留于斗内, 待下次配料之用。且在下次配料时减小 G_2 , 使提前量增加。

经过以上参数的自适应过程, 对砂石的配料速度和提前量参考值, 逐步建立起新的规则。

3.3.3 混凝土试块测试结果

本控制系统已经在多条大型水泥管桩生产线的配料系统以及商混站中应用。用于浇筑的混凝土产品由当地质检部门授权的建筑材料检测站随机抽样检测。为了确保混凝土检测结果的真实性和唯一性, 在混凝土试块中植入了 RFID (无线射频识别) 芯片, 以供抗压强度检测溯源。送检的立方体试件规格为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$, 从成型到试压, 经过了一周期标准养护, 即龄期为 28 d 的试块^[10], 抗压试验结果如表 2 所示。

表 2 混凝土抗压强度检测报告

样品编号	结构部位及构件名称	强度等级	混凝土流水号	单块抗压强度 / MPa	强度代表值 / MPa	达到设计强度等级 / %
11625	7# 栋二层框架柱 (5.80~9.60m)	C30	0091905 090002	34.8	34.7	115.7
				34.3		
				35.1		
11626	7# 栋屋面层梁板 (9.60m)	C30	0091905 090003	35.0	34.5	115.0
				34.1		
				34.3		
11627	7# 栋屋面层梁板 (9.60m)	C30	0091905 090003	34.5	35.0	116.7
				35.5		
				35.1		
14521	17# 栋 A-F 轴地下室梁板	C35	0021906 260012	36.2	36.3	103.6
				36.5		
				36.1		

大量的现场检测结果表明, 该系统控制效果良好。各批次混凝土试块强度性能均高于设计要求, 强度指标较一般控制方法稳定。

4 结束语

本文分析了自适应模糊控制理论在混凝土自动配料系统中的应用, 以及建立和修改控制规则的原理和方法, 并对两个主要参数: 配料速度和提前量的设定进行了研究。采用分段模糊控制规则, 既满足了快速配料的动态性能要求,

(下转第 116 页)