

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206057

# 多影响因素下混凝土浑浆浓度智能模糊监测\*

刘凌峰<sup>1</sup> 陈晓雷<sup>1</sup> 仇国庆<sup>1</sup> 刘平<sup>1</sup> 任小红<sup>2</sup> 陈家全<sup>2</sup>

(1. 重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065; 2. 重庆永固新型建材有限公司 重庆 400000)

**摘要:** 本文提出了一种考虑多影响因素的混凝土浑浆浓度智能模糊监测算法。首先,分析了影响商品混凝土浑浆浓度监测周期的4种因素,包括生产计划、交通限制、降水量以及气温并进行了函数描述;其次,结合模糊理论建立影响因素的模糊论域集并根据专家打分法进行权重设定;然后,分别设计了影响因素的梯形(半梯形)隶属度函数;最后,以模糊理论为基础给出了浑浆浓度监测周期计算公式。某厂搅拌站实验平台测试结果表明,相较于等间隔自动监测,所提出的算法能够自适应调整监测周期,在满足监测需求同时有效减少浓度传感器使用时长达16.7%,显示出研究算法的实际应用价值。

**关键词:** 商品混凝土;浑浆浓度;多影响因素;监测周期;模糊决策

中图分类号: TP273

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 120.5

## Intelligent fuzzy monitoring of concrete slurry concentration under multiple influence factors

Liu Lingfeng<sup>1</sup> Chen Xiaolei<sup>1</sup> Qiu Guoqing<sup>1</sup> Liu Ping<sup>1</sup> Ren Xiaohong<sup>2</sup> Chen Jiaquan<sup>2</sup>

(1. School of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;

2. Chongqing Yonggu New Building Materials Co., Ltd., Chongqing 400000, China)

**Abstract:** An intelligent fuzzy monitoring algorithm for concrete slurry concentration considering multiple influencing factors is proposed. Firstly, the influence factors, including production plan, traffic restriction, precipitation and temperature, which will affect the monitoring cycle of the muddy commercial concrete concentration, are analyzed and described with mathematical functions. Secondly, the fuzzy domain set of four factors is established by combining the fuzzy theory with the expert scoring weight. Accordingly, the trapezoid (semi-trapezoid) membership functions of the influence factors are designed respectively. Finally, a fuzzy decision calculation formula for the slurry concentration monitoring cycle is given based on fuzzy theory. The test results of a stirring station plant experimental platform show that the proposed algorithm can adaptively decide the monitoring period. Result analysis indicates that the proposed method can meet the monitoring requirements and effectively reduce the working time of concentration sensor by 16.7% when compared with other automatic monitoring method, revealing the practical application value of the proposed algorithm.

**Keywords:** commercial concrete; muddy slurry concentration; multiple influence factors; monitoring cycle; fuzzy decision

## 0 引言

商品混凝土作为建筑业重要材料在近十年实现了快速发展与广泛应用,对社会发展做出了巨大贡献<sup>[1]</sup>。2022年1月,住建部发布了《“十四五”建筑业发展规划》,提出在2035年初步形成建筑业高质量发展体系框架、建筑市场运行机制更加完善,建筑市场秩序不断优化

加强,工程质量安全保障体系基本健全,建筑工业化、数字化、智能化水平大幅提升<sup>[2]</sup>。为适应时代发展,建筑业生产企业也正积极朝自动化、智能化转型升级,对精细化监测提出了更高要求<sup>[3-4]</sup>。

根据文献分析所知,影响混凝土强度等级的因素主要有水灰比、骨料、龄期、养护温度和湿度等<sup>[5]</sup>,其中最重要的因素是水灰比,混凝土水灰比(本文称之为浑浆浓度)就是配制混凝土时水与水泥等干料的重量之比,它是

收稿日期: 2022-11-29 Received Date: 2022-11-29

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61803060)项目资助

决定混凝土强度的主要因素<sup>[6-7]</sup>。混凝土浑浆浓度不仅影响混凝土的强度和密实性,还影响着混凝土的抗渗性、抗冻性、抗蚀性和抗碳化性能。此外,根据文献[8]的混凝土凝固理论,全部拌和用水量并非全部参与了水泥的水化反应,只有 1/3~1/2 的拌和用水参加了水泥的水化反应,而其余的水则均用来增加拌和物的工作度;同时,混凝土浑浆浓度的测量在试拌和生产配料过程中都十分重要。因此,浑浆浓度是混凝土生产监测重要的参数之一。

然而,我国目前在混凝土生产过程中,对于该参数的测量方式依旧主要以人工测量为主,自动化、智能化的监测算法及系统还比较少。通过工厂调研和文献检索后发现,当前有关混凝土浑浆浓度的监测方法国内研究还较匮乏,大部分工厂主要还是基于人工的方法,小部分先进工厂采用了自动化的监测传感器设备,智能化的方法和系统还比较少,参数精细化监测水平还很有限。此外,单纯自动化的方法也主要通过设定固定的测量时间间隔来进行测量,并没有考虑生产计划、环境等因素对测量间隔的影响,而过于密集测量间隔虽然可以提高参数监测精细化程度,但也加大了监测仪器的损耗,影响其寿命。如何在满足监测需要的前提下有效减少传感器使用时间,对于工厂精细化生产和提质增效具有重要的现实意义。

本质上来讲,浑浆浓度的监测可以归结为维修周期或检修周期设定问题。国内外开展了大量智能化监测研究,如文献[9]提出了基于全寿命周期指标的输电网规划模糊决策评价,对电网寿命周期决策提供了有效的算法;文献[10]研究了模糊环境下多周期多决策生鲜闭环物流网络;文献[11]提出了基于直觉模糊推理与系统动力学的产品生命周期成本控制模型;文献[12]研究了以模糊多准则决策方式为基础对软件生命周期进行选择;文献[13]建立了模糊决策下的生命周期成本模型,实证模拟表明该模型能更有效对产品生命周期成本进行控制;文献[14]在高维监测物理参量结合灰色理论开展了航空发动机剩余寿命预测并取得了良好的预测效果。对于混凝土浓度的监测来说,影响浓度的因素具有模糊性和不确定性。通过对重庆市某混凝土搅拌基站实地调研,考察了多种可能会影响混凝土浑浆浓度的因素,主要有生产计划、骨料颗粒的质量、水泥浆的数量及质量、添加剂的种类及含量、搅拌机械及工艺、交通运输、气温、降水量等八种因素。然而,对于某一型号的商品混凝土(如 C30 型号),其用料以及水泥和其他用料的配比都是固定的,所以骨料颗粒的质量、水泥的数量及质量、添加剂的种类及含量并不作为主要影响因素进行分析;同时,由于生产混凝土的搅拌机械均是同一器械,生产工艺流程由控制程序所决定,所以本文不分析搅拌器械与工艺对浓度的影响;此外,由于生产计划是企业经营计划的重要组

成部分,是企业进行生产管理的重要依据,既是实现企业经营目标的重要手段,也是组织和指导企业生产活动有计划进行的依据,因而生产计划是影响浓度的重要因素之一;与此同时,混凝土生产属于流程工业,混凝土搅拌池需要 24 h 不停歇搅拌工作,其出料情况也会对生产造成影响,且一旦砼车因交通情况来不及运输,会积压混凝土的生产,进而影响浑浆浓度;考虑到搅拌池为露天水池,且处于地势低洼位置,短时暴雨会导致浑浆池含水量的增加,而较高的气温也会导致水分增加和化学反应加快,所以降雨以及室外温度对混凝土浑浆搅拌过程中浓度的影响也较大。综合上述影响因素分析,本文重点选取生产计划、交通限制、降雨量、气温这 4 种因素为对象对混凝土的浑浆浓度监测开展研究。

因此,本文结合模糊决策理论<sup>[15-17]</sup>进行多影响因素下浑浆浓度监测研究,分析影响浑浆浓度的 4 种重要因素,并提出浑浆浓度监测周期智能模糊决策算法。首先,对影响混凝土浑浆浓度因素进行分析,得到生产计划、交通限制、降水量、气温 4 种主要影响因素的函数表达;然后,针对 4 种影响因素建立模糊论域集并进行权重设定;进一步,对 4 种影响因素分别设计模糊隶属度函数;在此基础上结合重心法解模糊理论得到结合模糊隶属度函数的监测周期模糊计算公式。最后,以某搅拌站设备为基础搭建实验平台测试智能监测算法有效性,并与等间隔自动测量对比。

## 1 混凝土浑浆浓度监测影响因素建模

### 1.1 浑浆浓度监测工艺流程

根据前述分析可知,混凝土浑浆浓度是混凝土生产的重要参数之一,直接影响混凝土的标号和质量。本文以重庆市某公司浑浆浓度监测工艺流程为例对该参数自动监测工艺进行分析,其流程图如图 1 所示。

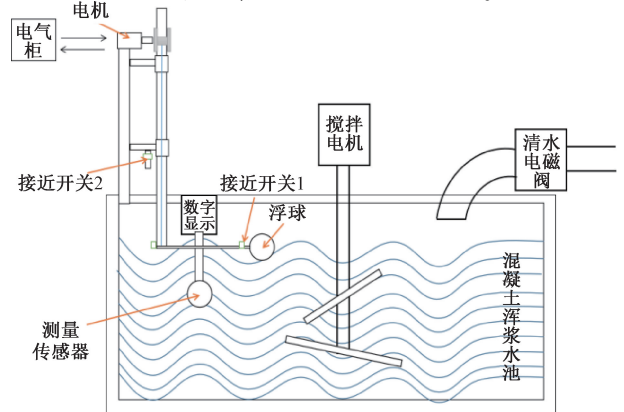


图 1 混凝土浑浆浓度监测工艺流程

Fig. 1 Process flow chart of concrete muddy slurry concentration monitoring

图 1 中,水泥等干料和清水通过管道一同加入浑浆水池中进行混合,搅拌电机运行对干料和清水进行充分搅拌,使浑浆均匀。浑浆浓度的测量传感器通过电机完成升降。此外,由于水池水位存在波动,在监测系统中加入了浮球系统,在测量下降过程中,当浮球浮起时,触发接近开关 1,以此控制电机停止工作,进而保证测量传感器与水面相对位置的固定,确保测量的一致性。同时,本工艺中加入了提升功能,当系统无需进行测量时,电机工作,拉动测量传感器上升,当到达接近开关 2 时,电机停止工作,从而确保测量传感器能够远离测量工况。在本工艺中,测量传感器采用音叉式在线浓度计,该传感器基于振动原理工作,测量元器件部分为浸入被测液体中的音叉。音叉通过内在的固定于叉体底部一端的压电设备感应振动,而固定于叉体另一端的二次压电设备则可以进行震荡频率的检测,从而通过顶部的电路放大实现信号的测量。本文被测液体浓度主要通过式(1)计算:

$$C = K_0 + K_1s + K_2s \quad (1)$$

其中,  $C$  为被测介质的浓度值(0~100%),  $s$  为振动频率( $\mu\text{s}$ ),  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$  均为常量,由传感器校准后给出。

分析可知,在浑浆池中含有砂石、水泥、骨料、添加剂等材料,因而音叉式在线浓度计传感器会受到环境工况的影响。一方面,在搅拌工况下会对测量传感器造成较大的磨损,在影响测量精度的同时还会影响使用寿命;另一方面,浑浆池中含有骨料、水泥等原料,音叉式在线浓度计传感器长时间浸入池中会导致传感器结垢,也会对测量精度和使用寿命造成影响。因此,本文综合分析影响浑浆浓度参数的多种因素,提出智能监测方法,在满足浑浆浓度参数测量需求的前提下减少音叉式在线浓度计传感器使用时间。

### 1.2 浑浆浓度监测影响因素模型

根据混凝土浑浆浓度监测工艺流程可知,浑浆浓度的监测主要通过 GB-CMR 型音叉在线浓度计传感器进行参数测量,而测量时间主要靠电机的上升和下降控制。因此,本文分析影响浑浆浓度监测的因素并设计合理的测量周期,在满足浑浆浓度参数监测需求的同时减少传感器使用时长。结合浑浆浓度监测工艺和前文分析,本文对以下 4 种因素进行重点分析。

#### 1) 生产计划因素

生产计划是企业经营计划的重要组成部分,是企业进行生产管理的重要依据,既是实现企业经营目标的重要手段,也是组织和指导企业生产活动有计划进行的依据<sup>[18]</sup>。因此,生产计划因素是影响浑浆浓度监测最为重要的影响因素。本文以重庆市某混凝土搅拌站的 C30 型号商品混凝土 2022 年 4 月第 1 周的生产计划表为例进行分析,其具体数值如表 1 所示。

表 1 C30 商品混凝土一周生产计划表

Table 1 Weekly production schedule of C30 commercial concrete (m<sup>3</sup>)

项目名	2022 年 4 月						
	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7
招商空港中建	150	0	0	0	80	0	55
蔡家 113 宝冶	200	200	0	0	0	0	0
金科禹州 I6-1	170	0	0	0	0	0	0
两路组团 Ga8	0	275	0	0	0	89	0
两路组团 I1	0	0	150	140	126	0	62
海尔洗衣机厂	0	0	100	0	0	100	0
两路组团 C19	0	0	105	0	0	0	0
前沿商务中心	0	0	0	200	0	0	0
万科临空智能	0	0	0	30	0	0	0
翠云横三路	0	0	0	0	115	150	0
观音桥 C 段	0	0	0	0	0	0	0
上东汇	0	0	0	0	0	0	90
总量	520	475	355	370	321	339	207

由表 1 可知,该搅拌站每日同一型号的商品混凝土生产量各不相同,日最大生产可大日最小生产量的 2 倍以上。每日生产量不同,也会导致水池浑浆消耗量不同,因而会浑浆浓度的监测造成影响。为了进一步分析生产计划对浑浆浓度监测周期的影响,本文以小时为单位对当日每个小时的生产计划值分析,其模型计算公式如下所示:

$$u_1(t) = \sum_{i=1}^n f_1(t_k, d_i), k \in 1, 2, \dots, 24 \quad (2)$$

其中,  $n$  表示需求工地数量,  $t_k$  表示当日第  $k$  h,  $d_i$  表示第  $i$  个工地,  $f_1(t_k, d_i)$  表示代表目标项目工地商品混凝土当前小时需求量。

#### 2) 交通限行因素

考虑到混凝土的生产一般为 24 h 不停机运行,而生产好的混凝土若无法及时运出则会对后续生产造成影响,因而交通因素对于浑浆浓度监测周期上有一定的影响。同时,对于混凝土的运输车辆(简称砼车),在运输过程中始终保持搅拌筒转动,以保证所运载的混凝土不会凝固。因此,交通限行对混凝土的运输造成影响,是浓度监测的影响因素之一。考虑到交通限行的多样性和不确定性,本文以禁行时段为对象进行考虑。由于砼车属于大型货车系列,以重庆市主城区交通管制规定为例进行分析,当前持主城区有效通行证的载货汽车,每日 7:00~9:30 和 16:30~19:30 为禁行时段。因此,24 h 交通限行状况模型可以用式(3)表示:

$$u_2(t) = \begin{cases} 0, & t \in \{ [0, 7), [9.5, 16.5), [19.5, 24) \} \\ 1, & t \in \{ [7, 9.5), [16.5, 19.5) \} \end{cases} \quad (3)$$

其中,0、1 分别表示交通限行因素对于监测周期的影响因子。由于交通拥堵等情况很难预测,故本文暂未作考虑。

### 3) 降水量因素

由于浑浆池处于露天状况,因而会受到降水等影响增加池中的进水量,同时,结合文献[19]分析可知,降水会对混凝土生产及浇筑产生以下的影响:(1)混凝土的配合比会发生紊乱,降雨常会使露天堆放的骨料含水量大增,特别是砂子,变化最多。计量称量下料时,若仍沿用原混凝土配合比,可能出现砂率变小,水灰比增大现象,且波动不稳,以致产生混凝土强度值的偏低和数值的离散;(2)混凝土表面水泥浆流失,雨中生产或浇筑混凝土,由于雨水的流入,使水泥浆随雨水流失,裸露骨料,产生混凝土离析;振捣后的混凝土迎雨面的水泥浆被冲刷流失,前者则可能引起孔洞,后者可能出现麻面;(3)滞留雨水未排尽,混凝土将会产生孔洞、漏筋。因此,降水会影响浑浆浓度参数监测值,降水量也是影响监测周期的因素之一。

为了研究降雨量对监测周期的影响,本文以小时为单位分析当前降水量,建立降水量因素模型为:

$$u_3(t) = f_3(t_k), k = 1, 2, \dots, 24 \quad (4)$$

其中,  $f_3(t_k)$  表示  $t_k$  小时下当地的降水量。

### 4) 气温因素

混凝土拌合物是由水泥、骨料、拌和用水及外加剂等组成的混合物。在混凝土拌制过程中主要发生的化学变化是水泥的水化反应,水泥水化速度与水泥细度有关,同时也是随着温度的变化而变化的,温度越高反应越快。根据文献[20-22]分析可知,水泥在 20℃ 时水化速率是 5℃ 时的 3 倍。温度对混凝土坍落度的损失往往是难以精确计算的,一般认为混凝土的混度每上升 10℃,坍落度每小时要损失加快 10~40 mm。水泥的快速水化将造成混凝土坍落度损失加快,流动性降低,给混凝土施工带来不利的影响。温度的升高使水分蒸发速度加快,混凝土拌合物中气泡破裂的速度增加,也会导致混凝土流动性不同程度的降低。根据文献介绍,其间的关系服从普遍适用于各种物理化学反应的 Arrhenius 定律<sup>[23-25]</sup>,其表达式如下:

$$\gamma = Ae^{\frac{-Ea}{RT}} \quad (5)$$

其中,  $\gamma$  为速率常数,  $R$  为摩尔气体常量,  $T$  为热力学温度,  $Ea$  为表观活化能,  $A$  为指前因子。

分析式(5)可知,气温对速率具有很大的影响,因而成为浑浆浓度监测周期的因素之一,本文用以下模型描述该影响因素:

$$u_4(t) = f_4(t_k), k = 1, 2, \dots, 24 \quad (6)$$

其中,  $f_4(t_k)$  表示  $t_k$  时刻当地的气温(℃)。

## 2 智能模糊监测算法

在浑浆浓度监测影响因素分析基础上,进一步综合各项因素研究智能算法确定监测周期。考虑到气温、降水量、生产计划以及道路交通管制状况都不是一个恒定不变值,同时各个因素对于评判结果的影响程度也不明确,这些因素具有不确定性,导致测量间隔时间的确定具有模糊性。因此,本文提出智能模糊算法确定小时划分下的浑浆浓度监测周期。

### 2.1 论域构建

首先,本文结合影响浑浆浓度监测的生产计划、交通限行、降水量、气温 4 种主要影响因素构建模糊监测论域,采用多因素模糊综合评判对其各项因素进行模糊化,并组成模糊因素论域集  $U$ , 定义如下:

$$U = \{u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)\} \quad (7)$$

式中:  $u_1(t)$  为生产计划因素函数,  $u_2(t)$  为交通限行因素函数,  $u_3(t)$  为降水量因素函数,  $u_4(t)$  为气温因素函数。

### 2.2 权重集构建

在论域构建的基础上,进一步确定论域中各个因素的权重。考虑到各项因素无明确权重关系,本文采用专家评议法进行确定。结合文献[26]推荐,本文选取 10 位专家评议者采用 10 分制为系统每小时监测分段下的 4 种影响因素所占比重进行打分,分别记为  $p_{u_i,j}$  ( $i = 1, 2, \dots, 4; j = 1, 2, \dots, 10$ ), 各项影响因素打分情况如表 2 所示。

表 2 4 种影响因素专家打分表

Table 2 Expert evaluating scores of four factors

影响因素	描述函数	专家分数
生产计划	$f(u_1(t), p_{u_1,j})$	{10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10}
交通限制	$f(u_2(t), p_{u_2,j})$	{7, 6, 7, 7, 9, 6, 6, 7, 8, 7}
降水量	$f(u_3(t), p_{u_3,j})$	{4, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 4, 2}
气温	$f(u_4(t), p_{u_4,j})$	{2, 3, 4, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 2}

进一步,结合表 2 的专家打分,得到各因素决策指标算子为:

$$a_1 = \frac{\sum_{j=1}^{10} f(u_1(t), p_{u_1,j})}{10} = 10, a_3 = \frac{\sum_{j=1}^{10} f(u_3(t), p_{u_3,j})}{10} = 3.7$$

$$a_2 = \frac{\sum_{j=1}^{10} f(u_2(t), p_{u_2,j})}{10} = 7, a_4 = \frac{\sum_{j=1}^{10} f(u_4(t), p_{u_4,j})}{10} = 2.5 \quad (8)$$

其中,  $a_1$  为专家评议生产计划平均得分,  $a_2$  专家评议交通限制平均得分,  $a_3$  为专家评议降水量平均得分,

$a_4$  为专家评议气温平均得分。

最后,将  $a_1, a_2, a_3, a_4$  进行归一化处理得到每项因素的权重值:

$$w_{u_1} = \frac{a_1}{\sum_{i=1}^4 a_i} \approx 0.43, w_{u_2} = \frac{a_2}{\sum_{i=1}^4 a_i} \approx 0.30 \quad (9)$$

$$w_{u_3} = \frac{a_3}{\sum_{i=1}^4 a_i} \approx 0.16, w_{u_4} = \frac{a_4}{\sum_{i=1}^4 a_i} \approx 0.11$$

最终,构建得到4项影响因素的权重指标集为:

$$W = \{w_{u_1}, w_{u_2}, w_{u_3}, w_{u_4}\} = \{0.43, 0.30, 0.16, 0.11\} \quad (10)$$

### 2.3 隶属度函数设计

考虑到浑浆浓度监测各影响因素的指标有正向指标和负向指标特性,即正向指标越大越好、负向指标越小越好,本文对各项因素进行梯形(半梯形)隶属函数设计<sup>[27-28]</sup>。

#### 1) 生产计划因素隶属度函数

以C30型号的混凝土生产计划为例进行分析,由于该厂限定该型号混凝土小时最大生产量为  $65 \text{ m}^3$ ,且产量与测量间隔成反比,所以隶属函数设计如下:

$$\mu_1 = \begin{cases} 0.43 & 0 \leq u_1(t) < 5 \\ -\frac{1}{150}u_1(t) + \frac{139}{300} & 5 \leq u_1(t) < 65 \end{cases} \quad (11)$$

#### 2) 交通限制因素隶属度函数

以重庆市为例,由于重庆市主城区对于大型载货卡车的管制时间是每日7:00~9:30和16:30~19:30,而混凝土的运输需要大货车载送到各个工地去,在交通管制时间内,该指标所占比重较大,禁行时段对监测间隔时间造成影响,故隶属函数设计如下所示:

$$\mu_2 = \begin{cases} 0.02, & 0 \leq u_2(t) < 7 \text{ 或 } 19 \leq u_2(t) < 24 \\ 0.30, & 7 \leq u_2(t) < 9 \text{ 或 } 17 \leq u_2(t) < 19 \\ 0.16, & 9 \leq u_2(t) < 10 \text{ 或 } 16 \leq u_2(t) < 17 \\ 0.02, & 10 \leq u_2(t) < 16 \end{cases} \quad (12)$$

#### 3) 降水量因素隶属度函数

以重庆市2022年4月降雨量为例进行分析。由于降雨量的大小与测量间隔时间成反比,即雨量越大,对浑浆浓度影响也就越大,系统测量间隔时间应越短。统计发现,重庆市4月期间每小时最大降雨量没有超过20 mm,故自变量最大值设置为20 mm,另外每小时降水量在0~5 mm之内时对浑浆浓度的影响很小,因此本文隶属函数设计为:

$$\mu_3 = \begin{cases} 0.16 & 0 \leq u_3(t) < 5 \\ -0.01u_3(t) + 0.21 & 5 \leq u_3(t) < 20 \end{cases} \quad (13)$$

#### 4) 气温因素隶属度函数

对于气温指标,气温在不同范围内与权重值可能成正比也可能成反比,因为在温度过高或过低的极端天气下,对混凝土浑浆的浓度影响会较大。因此,在特定的温度范围内系统的监测间隔周期应当调整,从而增加测量次数。由于重庆气温最高温度未超过  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,所以最高温度取  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ ,为了应用于极端天气温度下,最低温度取  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在常温下  $5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$  下影响极小。那么,气温因素的隶属函数设计如下:

$$\mu_4 = \begin{cases} 0.004u_4(t) + 0.09 & -20 \leq u_4(t) < 5 \\ 0.11 & 5 \leq u_4(t) < 20 \\ -0.004u_4(t) + 0.19 & 20 \leq u_4(t) < 45 \end{cases} \quad (14)$$

本文对4种因素的隶属度函数曲线进行了绘制,绘制结果如图2所示。

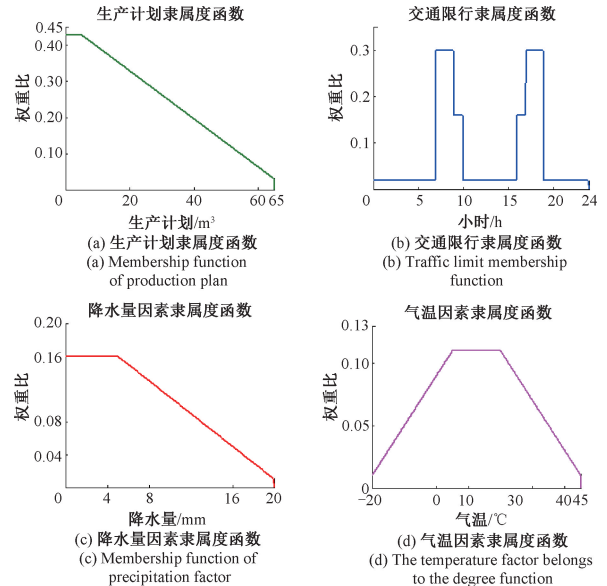


图2 4种因素的素隶属度曲线图

Fig. 2 Prime membership curves of the four factors

### 2.4 去模糊处理

在前述处理的基础上,对各项影响因素做综合决策处理。本文基于模糊理论,采用解模糊的方法解算混凝土浑浆浓度监测周期。首先,定义第  $k$  h 单位下4种影响因素指标的隶属函数矩阵如下:

$$A_k = [\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4] \quad (15)$$

进一步,设计各影响因素指标权重间隔时间矩阵如下:

$$G = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T \quad (16)$$

结合重心法,得到第  $k$  h 单位下浑浆浓度监测间隔周期的计算公式如式(17)所示:

$$T_k = \frac{\sum_{i=1}^4 \mu_i \cdot \beta_i}{\sum_{i=1}^4 w_{u_i}} = A_k \times G, k = 1, 2, \dots \quad (17)$$

最终,可以结合式(17)计算得到模糊监测周期下的传感器使用时长,其计算公式如下:

$$C_{per} = \sum_{k=1}^M \left( S_0 \lfloor \frac{60}{T_k + S_0} \rfloor \right) + F(T_k, S_0), k = 1, 2, \dots \quad (18)$$

其中,  $S_0$  表示单次测量下测量传感器使用时间 (min),  $F(T_k, S_0)$  表示修正函数,对  $\lfloor \frac{60}{T_k + S_0} \rfloor$  中舍弃的小数项部分进行补偿处理,以保证计算时长的准确性。

### 3 算法实现步骤

结合上述算法原理,本文提出基于多因素模糊决策的混凝土浑浆浓度智能模糊监测算法,其算法流程如图 3 所示,具体实现步骤如下:

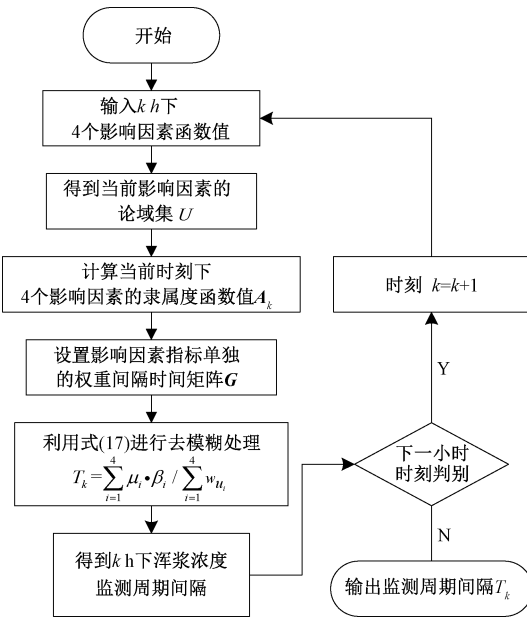


图 3 智能模糊监测算法流程

Fig. 3 Flow chart of intelligent fuzzy monitoring method

步骤 1) (INPUT) 输入当前  $k$  h 下 4 种影响因素函数值,得到论域集  $U = \{u_1(t), u_2(t), u_3(t), u_4(t)\}$ ;

步骤 2) 结合权重集,根据隶属度函数确定当前 4 种影响因素的隶属度函数值  $A_k = [\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4]$ ,对影响因素进行模糊化处理;

步骤 3) 根据生产工况及环境,设置各影响因素指标单独的权重间隔时间矩阵  $G = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T$ ;

步骤 4) 利用式 (17) 实现去模糊处理,计算得到当前  $k$  小时下的浑浆浓度监测周期间隔;

步骤 5) 判断测量是否进入下一小时,若是则回到步骤 1), 否则进入下一步;

步骤 6) (OUTPUT) 输出每小时监测周期间隔  $T_k$ 。

### 4 实验测试

#### 4.1 实验平台

为了验证本文研究算法的有效性,以重庆市某混凝土公司搅拌站相关设备为基础搭建如图 4 所示的实验测试平台。该平台中,远程电脑 (personal computer, PC) 端通过 IPV4 协议与工业电气柜中威纶通 CMT2079X 人机交互界面进行通信,实现远程监控;威纶通控制屏与 TIA-protal V16 的 Siemens S7-1200 型号 PLC 通过网络连接进行控制指令下发。对于所提出的智能模糊监测算法,通过在 PLC 中进行 SCL 编程实施;同时,还在 PLC 编程进行了操作编程,以此通过单相电机的控制实现浓度计传感器的升降操作,在该平台中,GB-CMR 型音叉在线浓度计传感器的升降操作,在该平台中,GB-CMR 型音叉在线浓度计传感器对混凝土浑浆浓度进行检测,单周期测量时间设定为 5 min,同时采用 D/A 转换将模拟信号转换为电信号反馈给 PLC 进行数值检测。此外,本实验平台还具有历史数据查询功能,可供数据查询和导出。

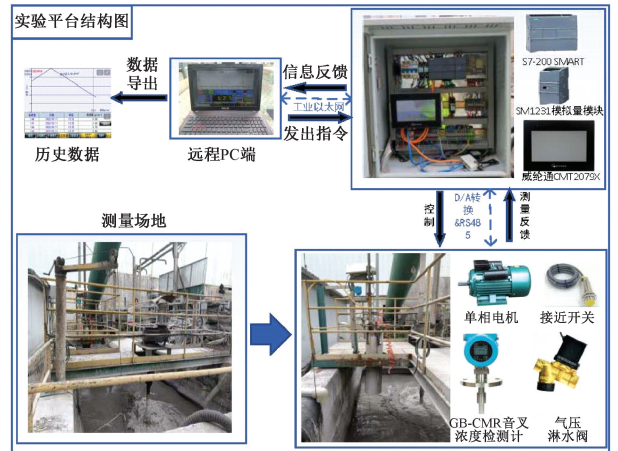


图 4 实验测试平台

Fig. 4 Platform of experiment test

#### 4.2 离线实验测试

##### 1) 影响因素数据

收集整理 4.1 节中混凝土搅拌站 2022 年 4 月份数据对 C30 型号的混凝土浑浆浓度监测进行测试。结合影响浑浆浓度的 4 种影响因素,分别对生产计划、气温、降水量、交通限行因素的实验数据进行收集整理,实验数据情况如表 3 所示。

表3 4种影响因素实验数据

Table 3 Experiment data of four influence factors

影响因素	数据量	最大值	最小值
生产计划	720	65 m <sup>3</sup>	0 m <sup>3</sup>
气温	720	32 ℃	12 ℃
降水量	720	17.43 mm	0 mm
交通限制	720	1	0

其中,该搅拌站4月份C30型号混凝土生产计划总量为11 362 m<sup>3</sup>,其中单日小时生产计划最大为65 m<sup>3</sup>(4月28日),单日小时生产计划最少为0 m<sup>3</sup>,生产计划按小时为单位采集,故生产计划影响因素共720条数据,其曲线如图5所示;通过中国气象网对4月份搅拌站所在地气温数据进行收集,得到该月搅拌站最高温度为32 ℃(4月11日),最低温度为12 ℃(4月16日),以小时为单位进行气温影响因素数据收集,共得到720条数据,其曲线如图6所示;同时,对降雨量数据进行收集,当月该地降雨总量为86.05 mm,其中小时最大降雨为17.43 mm(4月14日),小时最小降雨量为0 mm,当月共收集降水量影响因素数据720条,其曲线图如图7所示。

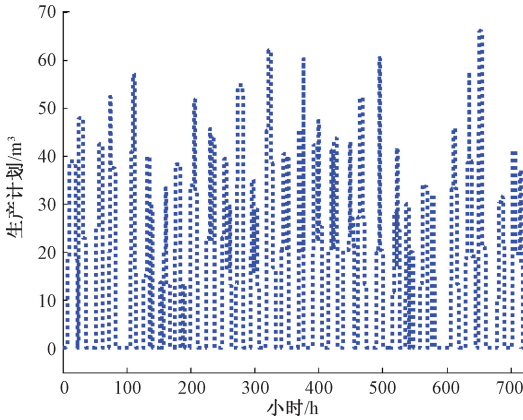


图5 4月份搅拌站生产计划曲线

Fig. 5 Production plan curve of factory in April

此外,根据重庆市交通管制规定,持主城区有效通行证载货汽车每日7:00~9:30和16:30~19:30为禁行时段,其交通限行数据由公式表示,故可以获取小时单位下的交通限行数据,共计720条。同时,本文设置各影响因素指标单独的权重间隔时间矩阵如下:

$$G = [\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T = [30, 45, 60, 90]^T \quad (19)$$

2) 浑浆浓度监测测试结果

将上述720组影响因素数据输入本文提出的混凝土浑浆浓度智能模糊监测算法进行离线测试,为了确保浑浆浓度的准确性,设置生产计划更新后随即执行一个周期的浑浆浓度监测,进而4种影响因素数据以小时为间隔输入算法。最终,得到混凝土浑浆浓度监测曲线如图

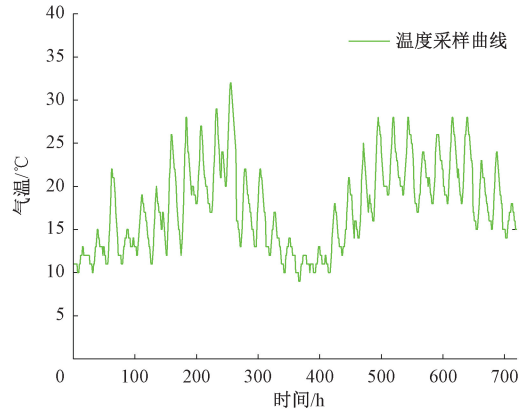


图6 重庆市主城区4月气温曲线

Fig. 6 Temperature curve of Chongqing municipality urban area in April

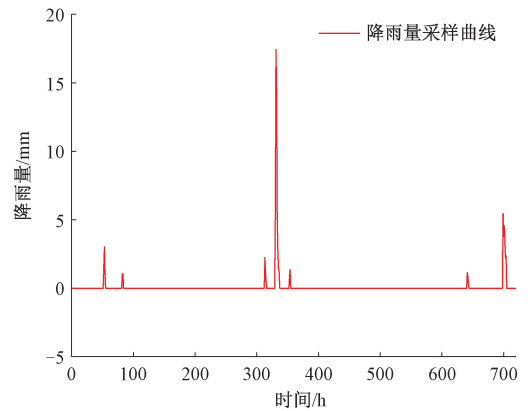


图7 重庆市主城区4月降水量曲线

Fig. 7 Precipitation curve of Chongqing municipality urban area in April

8所示,同时通过对音叉式在线浓度计的周期使用时长进行统计,得到浓度计传感器间隔使用时长曲线如图9所示。由图8可知,本文提出算法可以根据4种影响因素自适应地调整浓度计传感器的工作状态,在影响因素存在较大变化的时段可以有效地增加测量周期(图8中箭头标注位置)以确保浑浆浓度监测准确性需求,而在影响因素稳定的时段可以有效调整监测周期,减少浓度传感器的使用时长。另一方面,图9结果也进一步显示出本文方法能够自适应调整浓度计传感器间隔使用时长,周期监测下最短使用时长为5 min,占比为34.6%,最长使用时长为15 min,占比为1.1%,10 min使用时长占比64.3%。

为了进一步验证本文方法相比于等间隔周期监测自动测量的有效性。将本文方法与当前人工测量和等间隔自动监测进行对比。其中人工测量采用浑浆池取样方式进行实验室监测,其中白天每6 h采样一次,夜间不采

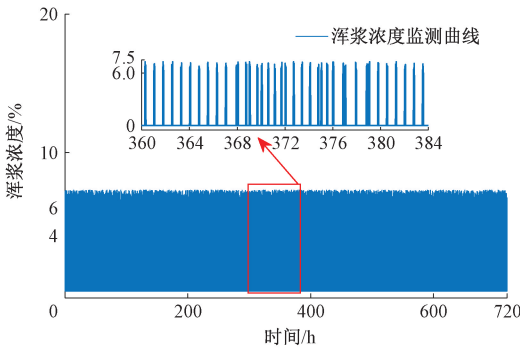


图 8 混凝土浑浆浓度监测曲线

Fig. 8 Monitoring curve of concrete muddy slurry concentration in April

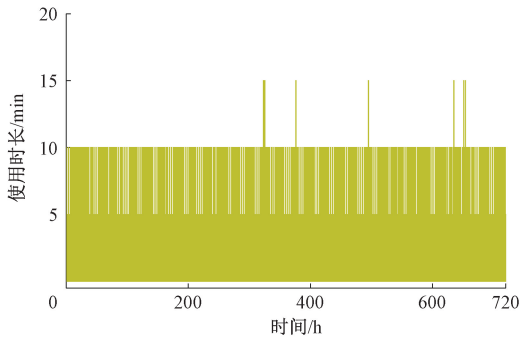


图 9 浓度计传感器间隔使用时长曲线

Fig. 9 Working hour curve of concentration sensor in each interval

样;考虑到生产计划按小时为单位进行更新,为了保证更新前后浑浆浓度的准确性,要求单位小时内浓度监测不少于两个周期,因此等间隔自动监测的监测间隔设置为 25 min,因而单位小时浓度计传感器的使用时长为 10 min。此外,根据公式计算音叉式在线浓度计传感器在测试时段的总使用时长为 5 995 min,不同方法浑浆浓度监测结果及传感器使用时长对比如表 4 所示。

表 4 不同方法传感器使用时长对比

Table 4 Working time comparison of sensor for different methods

方法	最大间隔/	最小间隔/	最大周期 监测数	传感器使用 时长/min
	min	min		
人工测量	1 080	360	—	—
等间隔自动测量	25	25	2	7 200
<b>本文方法</b>	<b>49</b>	<b>21</b>	<b>3</b>	<b>5 995</b>

从表 4 的结果对比可知,人工测量具有很强的滞后性,无法有效监测浑浆浓度变化;而采用等间隔固定监测周期无法根据生产及环境变化做出及时调整以适应浓度

监测需求,且固定的监测周期间隔无法自适应调整浓度传感器的使用时长;而采用本文提出方法后,可以自适应根据 4 种影响因素值调整监测周期,最短监测周期间隔为 21 min,最长监测周期间隔为 49 min,均满足生产计划变化时周期监测的需求;对比分析后发现,相较于 25 min 监测周期自动测量方法,本文方法在满足小时监测需求的同时,可以减少 16.7%的音叉式在线浓度计使用时长。此外,结合图 8 和 9 的综合分析可以看出采用智能模糊监测算法后,监测周期可以根据影响因素值自适应调整测量监测周期,根据生产及环境变化自动更新测量频次,具有更好的智能性和自适应性,进一步显示出本文方法在满足监测需求方面的智能性和减少音叉式在线浓度计传感器使用时的有效性。

### 4.3 在线实验测试

为了进一步验证算法在线测试的有效性,本文在 2022 年 7 月 22 日对该搅拌站浑浆浓度监测进行 12 h 在线测试,其中生产计划由搅拌站生产计划部门下达,最大值为 28 m<sup>3</sup>,最小值为 14.5 m<sup>3</sup>,生产计划曲线如图 10 所示;气温和降水由中国气象网给出,交通禁行根据重庆市交通管制规定确定,4 种影响因素数据共 12 组数据,其参数特征如表 5 所示。此外,数据以小时为间隔输入 PC 端控制系统,系统自动读取输出参数并调用本文研究的模糊监测算法进行控制执行,PLC 实时记录浑浆浓度采集数据并保存在威纶通就地控制屏存储设备中。通过导出威纶通控制屏记录的 12 h 在线监测数据结果,整理后得到浑浆浓度监测记录曲线和传感器单位小时使用时长实验结果如图 11 所示。分析图 11 可知,采用本文模糊监测算法后能够根据影响因素值实时调整浑浆浓度监测周期,在影响因素变化较小的时段(图 11 中 7~8、12~13、14~15 区段)控制浓度计传感器使用时长,而在影响因素发生大的变化区段增加浓度计传感器监测周期。此外,通过对图 11 结果进行分析得到传感器使用时长结果,如表 6 所示。可以看出,浓度计传感器工作最大间隔为 45 min,最小间隔为 32 min,总使用时长为 105 min,传感器使用率为 14.6%,比等间隔自动测量下传感器使用率(16.7%)有效减少,进一步证明本文方法的有效性,显示出本文方法的在线应用价值。

表 5 4 种影响因素在线测试数据

Table 5 Online experiment data of four influence factors

影响因素	数据量	最大值	最小值
生产计划	12	28 m <sup>3</sup>	14.5 m <sup>3</sup>
气温	12	28 ℃	24 ℃
降水量	12	0 mm	0 mm
交通限制	12	1	0



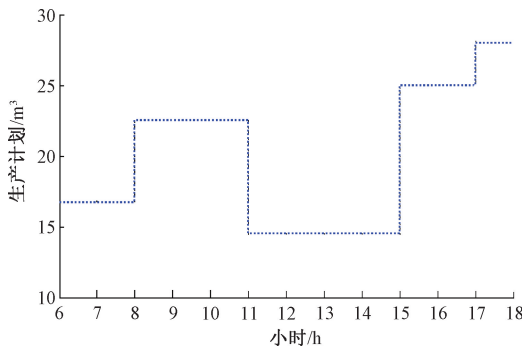


图 10 在线实验生产计划

Fig. 10 Production plan of online experiment

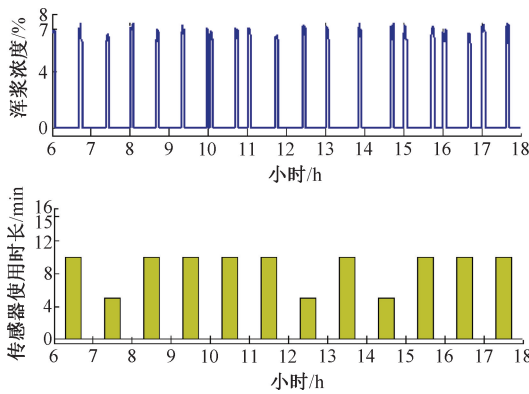


图 11 混凝土浑浆浓度在线监测实验结果

Fig. 11 Online experiment results of concrete muddy slurry concentration monitoring

表 6 在线实验传感器使用时长

Table 6 Working time of sensor in online experiment

方法	最大间隔/ min	最小间隔/ min	传感器使用 时长/min	传感器使 用率/%
本文方法	45	32	105	14.6

## 5 结 论

本文针对混凝土生产浑浆浓度参数周期监测问题,结合模糊理论,提出了一种考虑多影响因素的混凝土浑浆浓度智能模糊监测算法,在影响因素发生变化的情况下能够自动调整传感器监测周期,实现浑浆浓度的监测并减少传感器的使用时长。本文的创新工作在于将影响浑浆浓度参数的4种主要因素进行了分析并建立函数模型;采用模糊理论设计了4种因素的隶属度函数和权重系数;并通过去模糊化处理推导了多影响因素下的监测周期计算公式;最终形成了浑浆浓度智能模糊周期监测算法。所提出的智能模糊周期监测算法,能够根据生产计划及环境变化等4种影响因素自动调整浑浆浓度监测

周期,具有更好的智能性和自适应性。在某厂搅拌站的离线实验表明,所研究的监测算法能够有效运行,在满足监测需求的同时,可以有效减少音叉式在线浓度计传感器使用时长达16.7%;在线实验进一步验证了本文方法在减少传感器使用率的效能。研究工作对于提升混凝土工厂生产参数的精细化智能监测和传感器使用时长具有现实的应用价值。后续,将进一步结合大数据理论分析4个影响因素的输入的实时性和准确性,同时研究潜在的其他影响因素,提升监测算法的精度和广泛适应性。

## 参考文献

[1] 蒋正武,尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途径 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 957-963.  
JIANG ZH W, YIN J. Technical principles and approaches for development of sustainable concrete [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 957-963.

[2] 端木. 住建部发布《“十四五”建筑业发展规划》[J]. 中国房地产, 2022, 3: 4.  
DUAN M. The ministry of housing and urban-rural development issued the 14th five-year plan for the construction industry [J]. China Real Estate, 2022, 3: 4.

[3] MOHAMMAD D, ALIREZA S, ALI D, et al. Production of concrete using reclaimed water from a ready-mix concrete batching plant: Life cycle assessment (LCA), mechanical and durability properties [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103560.

[4] 丁伟利,任天赐,谭伟敏,等. 基于视觉的零部件振动裂纹在线监测系统研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 78-88.  
DING W L, REN T C, TAN W M, et al. Online vibration crack detection algorithm based on computer vision [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 78-88.

[5] 张大旺,王栋民. 地质聚合物混凝土研究现状 [J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1519-1527,1540.  
ZHANG D W, WANG D M. Research status of geopolymer concrete [J]. Materials Review, 2018, 32(9): 1519-1527,1540.

[6] AYINDE R A, OLOWU A, AJIBOLA H A, et al. Effects of water cement ratio on strengths characteristics of concrete produced with recycled iron and steel slag (RISS) aggregate [J]. Advances in Science and Technology, 2021, 107(1): 97-112.

[7] SUNDARARAJAN T, ARUNYA A, CHITRA R. Effect of

- water cement ratio in hybrid fibre reinforced concrete [J]. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019, 8(9): 2341-2408.
- [ 8 ] GONZÁLEZ L G, CAIRÓ I, SEGURA I. et al. Wireless sensing of concrete setting process [J]. *Sensors*, 2020, 20: 5965.
- [ 9 ] 郑旭, 丁坚勇, 彭昌勇, 等. 基于全寿命周期 SEC 指标的输电网规划模糊决策评价 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2019, 52(1): 51-57, 94.  
ZHENG X, DING J Y, PENG CH Y, et al. Fuzzy decision evaluation of grid planning based on SEC index of whole life cycle [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2019, 52(1): 51-57, 94.
- [ 10 ] 杨晓华, 郭健全. 模糊环境下多周期多决策生鲜闭环物流网络 [J]. *计算机应用*, 2019, 39(7): 2168-2174.  
YANG X H, GUO J Q. Multi-period multi-decision dosed-loop logistics network for fresh products with fuzzy variables [J]. *Journal of Computer Applications*, 2019, 39(7): 2168-2174.
- [ 11 ] 张笑言, 韩庆兰. 基于直觉模糊推理与系统动力学的产品生命周期成本控制模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2017, 37(11): 2863-2870.  
ZHANG X Y, HAN Q L. Product life cycle cost control model based on intuitionistic fuzzy logic and system dynamics [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2017, 37(11): 2863-2870.
- [ 12 ] HICDURMAZ M. A fuzzy multi criteria decision making approach to software life cycle model selection [C]. *Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*, 38th EUROMICRO Conference, 2012.
- [ 13 ] AMMAR M, ZAYED T, MOSELHI O. Fuzzy-based life-cycle cost model for decision making under subjectivity [J]. *Journal of Construction Engineering Management*, 2013, 139(5): 556-563.
- [ 14 ] 刘小峰, 叶榕婷, 柏林, 等. 基于灰色理论的航空发动机剩余寿命预测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 74-81.  
LIU X F, YE R T, BAI L, et al. Remaining useful life estimation for aero-engines based on grey theory [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(1): 74-81.
- [ 15 ] 冉钦文, 徐伟华. 优势关系下带属性权重模糊决策表的部分一致约简 [J]. *模糊系统与数学*, 2021, 35(6): 28-35.  
RAN Q W, XU W H. Partially consistent reduction in fuzzy decision table with attribute weights based on dominance relation [J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2021, 35(6): 28-35.
- [ 16 ] 徐泽水, 张申. 概率犹豫模糊决策理论与方法综述 [J]. *控制与决策*, 2021, 36(1): 42-51.  
XU Z SH, ZHANG SH. An overview of probabilistic hesitant fuzzy decision-making theory and methods [J]. *Control and Decision*, 2021, 36(1): 42-51.
- [ 17 ] 李茜, 苏天赐, 胡意茹, 等. 融合在线监测数据的海底电缆综合健康状态评估 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(9): 89-98.  
LI Q, SU T C, HU Y R, et al. Remaining useful life estimation for aero-engines based on grey theory [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(9): 89-98.
- [ 18 ] PARK K O. A study on the plan of production space in farm houses according to farm specialization [J]. *Korean Journal of Human Ecology*, 1997, 6(2): 173-185.
- [ 19 ] 杨磊, 周宜红, 冯立生. 降雨对碾压混凝土连续施工影响的试验研究 [J]. *水电能源科学*, 2002, 20(2): 50-52.  
YANG L, ZHOU Y H, FENG L SH. Experimental investigation for unremitting construction of roller-compacted concrete under influence of rainfall [J]. *Hydroelectric Energy*, 2002, 20(2): 50-52.
- [ 20 ] 谌超, 刘松, 邓华伟, 等. 大体积混凝土温度及温度应力影响因素研究 [J]. *材料导报*, 2015, 29(2): 198-201.  
CHEN CH, LIU S, DENG H W, et al. Influential factors of mass concrete temperature and temperature stress [J]. *Materials Review*, 2015, 29(2): 198-201.
- [ 21 ] 金浏, 张仁波, 杜修力, 等. 温度对混凝土结构力学性能影响的研究进展 [J]. *土木工程学报*, 2021, 54(3): 1-18.  
JIN L, ZHANG R B, DU X L, et al. Research progress on the influence of temperature on the mechanical performance of concrete structures [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(3): 1-18.
- [ 22 ] 陈宇, 姜彤, 黄志全, 等. 温度对沥青混凝土力学特性的影响 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2192-2196.  
CHEN Y, JIANG T, HUANG ZH Q, et al. Effect of temperature on mechanical properties of asphalt concrete [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2192-2196.
- [ 23 ] ALIREZA A. Representation and evaluation of the Arrhenius and general temperature integrals by special functions [J]. *Thermochimica Acta*, 2021, 705:

179034-179034.

- [24] JAN K. Modified arrhenius equation in materials science, chemistry and biology [J]. *Molecules*, 2021, 26(23): 7162.
- [25] YANG P R, LIU C X, GUO Q Y, et al. Variation of activation energy determined by a modified Arrhenius approach: Roles of dynamic recrystallization on the hot deformation of Ni-based superalloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2021, 72 (13): 162-171.
- [26] 陈玉科. 更新型预防维修周期的模糊决策 [J]. *运筹与管理*, 1999(3): 71-75.  
CHEN Y K. Fuzzy decision making about preventive maintenance period for renewal type [J]. *Operations Research and Management Science*, 1999(3): 71-75.
- [27] 曹开锐, 班晓军, 黄显林, 等. 基于阶梯隶属度函数的离散 T-S 模糊系统  $H_\infty$  控制 [J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(12): 107-113.  
CAO K R, BAN X J, HUANG X L, et al. Staircase membership functions-based  $H_\infty$  control of discrete T-S fuzzy control systems [J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(12): 107-113.
- [28] 王喜刚, 扶名福. 基于隶属度函数模糊弹塑性本构模型的研究 [J]. *振动与冲击*, 2015, 34(23): 115-120.  
WANG X G, FU M F. Constitutive model of fuzzy elastoplasticity based on membership functions [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34 (23): 115-120.

## 作者简介



刘凌峰, 2018 年于江苏理工学院获得学士学位, 现为重庆邮电大学硕士研究生, 主要研究方向为工业控制。

E-mail: S200331129@stu.cqupt.edu.cn

**Liu Lingfeng** received his B. Sc. degree from Jiangsu University of Technology in 2018.

Now he is a M. Sc. candidate in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interest includes industrial control.



陈晓雷, 2016 年于西北工业大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学讲师, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: chenxiaolei@cqupt.edu.cn

**Chen Xiaolei** received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnical University.

Now he is a lecturer in Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include detection technology and automation device.



刘平(通信作者), 2017 年于浙江大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为复杂系统最优控制与动态优化。

E-mail: liuping\_cqupt@cqupt.edu.cn

**Liu Ping** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2017. Now he is an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include optimal control and dynamic optimization of complex systems.