

水幕冷却过程中供水系统的模糊建模与仿真

王金航¹, 秦世引², 陈明跃³

(1. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100022; 2. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;
3. 首钢集团技术中心轧钢工艺研究室, 北京 100041)

摘要: 本研究是对板带材轧后处理中水幕冷却过程实施智能优化控制的重要组成部分, 文中针对首钢中厚板厂的水幕冷却实际生产流程, 深入分析了供水系统的动态和稳态特性并采集到实际试验数据, 运用模糊推理合成法建立了其实际运行过程的模糊模型; 进而运用 MATLAB 的 GUI 工具对所建模糊模型进行了仿真检验。其结果表明, 该模糊模型能很好地逼近实际系统的动态响应过程, 从而可为进一步的智能优化控制工作做好铺垫。

关键词: 模糊建模; 推理合成规则; 水幕冷却系统; 供水系统; MATLAB

中图分类号: TP 273A.4

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2002)04-0430-06

中厚钢板轧后水幕控制冷却是钢板生产中的重要环节, 它能大幅度提高板材的强度、韧性和平整度, 缩短热轧冷却时间, 从而提高生产能力和效率, 因而成为现代中厚板生产过程中的一种关键技术。而供水系统是水幕控制冷却系统中的重要子系统之一, 其控制的好坏直接影响到水幕冷却的效果。由于供水系统是一非线性、强耦合的多输入多输出系统, 其动态特性难以用精确的数学模型描述, 因此作者首先将此系统分解为多输入单输出系统, 然后采用算法较为简单的模糊推理合成法建立其模糊模型, 并用 MATLAB 工具进行了仿真, 仿真结果证明所建模型能够很好逼近实际系统的动态响应过程。

1 供水系统的机理分析

供水系统的组织功能结构如图 1 所示, 其中变频泵连接于供水总管道上为上下水幕提供冷却水。供水总管道分为两个支管, 每一个支管上都安装有一个气动调节球阀, 用来调节上下水幕的流量比。

考虑到在整个供水系统中, 各管路的流量直接受控于水泵的供水压力和调节阀的开度; 又考虑到上水幕供水流量与下水幕供水流量的相关性, 将供水系统抽象为一个 3 输入 2 输出的多变量系统。3 输入分别为: p 为水泵机组产生的供水压力; L_u 为上水幕供水管道调节阀的开度; L_d 为下水幕供水管道调节阀的开度。2 输出分别为: Q 为供水总流量; $K_b = Q_d / Q_u$ 为下水幕供水流量 Q_d 与上水幕供水流量 Q_u 之比。同时, 供水系统还是一个强耦合的系统, 即当调节压力 p 以改变供水总流量 Q 时, 必定会引起 K_b 的变化; 反之, 当调节上下水幕供水管道调节阀的开度以改变流量比 K_b 时, 供水压力 p 将发生变化, 从而导致供水总流量 Q 的变化。因此不能通过单独调节压力来独立地控制供水总流量; 也不能通过单独调节上、下水幕阀门的开度来独立地控制流量的比例。图 2 表示了这种耦合关系。此外, 供水系统还具有较强的非线性, 且其动态特性难以用精确的数学模型来描述^[1,2]。

此外, 首钢中板厂评价冷却性能的主要技术指标有^[2]: 1) 厚度、长度和宽度各方向的冷却均匀性; 2) 冷却平直度; 3) 冷却速度; 4) 终冷温度。相应的调节手段是: 对于厚度方向的均匀冷却用调节辊道速度或流量大小的方法实现。对于平直度, 可通过调节上下水幕的供水量, 即合理确定上下水幕流量比来保证冷却后钢板的平直度。由于上水幕向下喷射, 与钢板表面接触时间较长, 冷却效率较高; 而下水幕向上喷射, 与钢板表面

收稿日期: 2002-05-27。

基金项目: 北京市教委科技发展计划基金资助项目(00KJ-037)。

作者简介: 王金航(1975-), 男, 硕士生。

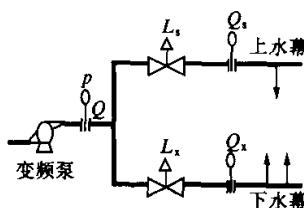


图1 供水系统功能结构简图

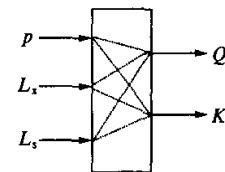


图2 供水系统的变量耦合关系

接触时间较短,冷却效率较低;为保证冷却平直度,下幕流量应比上幕流量大;所以下幕为双幕,上幕为单幕。对于冷却速度和终冷温度控制,则用调节总流量的大小或调节辊道速度来达到其质量指标^[2]。

由上所述可以看出,供水总流量和供水流量比的控制问题是整个供水系统中两个关键问题。因此,本文选取压力 p , 调节阀开度 L_s 和 L_x 相对于其稳态值的变化量作为所建模型的输入变量;采用供水总流量 Q 和下水幕与上水幕供水流量比 K_b 相对于其稳态值的变化量作为所建模型的输出变量。

供水系统上述的特点使得传统的控制理论方法难以胜任,而模糊控制理论方法由于其自身的特点,尤其适合于那些解析型数学模型难以得到,且呈现非线性或强耦合等特性的对象,因而成为解决这一难题的可行途径。尽管大多数模糊控制器是基于操作员的经验或控制工程师的专业知识而设计的,但是,由于供水系统的复杂性,技术难度大,操作员经验规则的提取也较为困难。另外,也无法保证操作员的控制是最优的^[3]。因此,为了设计有效的供水控制系统,本文采用模糊推理合成法建立供水系统的模糊模型。

2 基于模糊推理合成法的建模

应用模糊集合理论辨识那些难于建立精确数学模型的复杂系统的模糊模型问题,早期采用的方法大都是以相关分析法和模糊统计为主要数学工具,计算量大,比较复杂。李友善提出的基于推理合成规则建立系统模糊模型的模糊推理合成法^[4],为模糊建模更加客观化和最佳化开辟了简单而又容易实现的有效途径。作者针对供水系统的组织功能结构,将这个3输入2输出的多变量控制系统视为2个3输入单输出系统的组合^[5],继而采用模糊推理合成法建立供水系统的模糊模型。具体建模过程如下。

1) 量测数据对的模糊化

① 确定输入输出语言变量的基本论域:取 $E(p)$ 、 $E(L_s)$ 、 $E(L_x)$ 、 $E(K_b)$ 、 $E(Q)$, 分别为 p 、 L_s 、 L_x 、 K_b 、 Q 相对于其稳态值的变化量。各模糊变量的基本论域如表1所示。

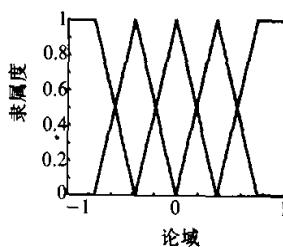
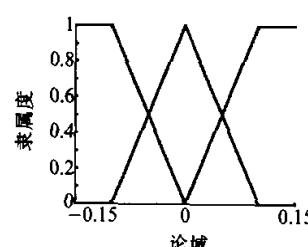
② 根据各输入输出变量基本论域和隶属函数的单峰性,输入输出空间的模糊划分及模糊子集隶属函数的定义如下^[6]:

在 $E(p)$ 的基本论域上定义 5 个模糊子集: A_{PB} (正大)、 A_{PS} (正小)、 A_Z (零)、 A_{NS} (负小)、 A_{NB} (负大), 其隶属函数如图 3 所示。

在 $E(L_s)$ 的基本论域上定义 3 个模糊子集: A_B (大)、 A_Z (零)、 A_S (小), 其隶属函数如图 4 所示。

表1 输入输出语言变量的基本论域

输入输出变量	基本论域
$E(p)$	$[-1 1]$
$E(L_s)$	$[-0.15 0.15]$
$E(L_x)$	$[-0.15 0.15]$
$E(K_b)$	$[-0.4 0.4]$
$E(Q)$	$[-156 156]$

图3 压力 $E(p)$ 的隶属函数图4 下阀开度 $E(L_x)$ 的隶属函数

在 $\tilde{E}(L_s)$ 的基本论域上定义 3 个模糊子集: A_B (大)、 A_Z (零)、 A_S (小), 其隶属函数如图 5 所示.

在 $\tilde{E}(K_b)$ 的基本论域上定义 7 个模糊子集: A_{PB} (正大)、 A_{PM} (正中)、 A_{PS} (正小)、 A_Z (零)、 A_{NS} (负小)、 A_{NM} (负中)、 A_{NB} (负大), 其隶属函数如图 6 所示.

在 $\tilde{E}(Q)$ 的基本论域上定义 9 个模糊子集: A_{VB} (极大)、 A_{PB} (正大)、 A_{PM} (正中)、 A_{PS} (正小)、 A_Z (零)、 A_{NS} (负小)、 A_{NM} (负中)、 A_{NB} (负大)、 A_{VS} (极小). 其隶属函数定义如图 7 所示.

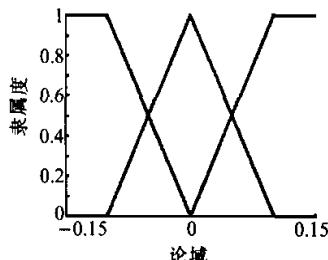


图 5 上阀开度 $\tilde{E}(L_s)$ 的隶属函数

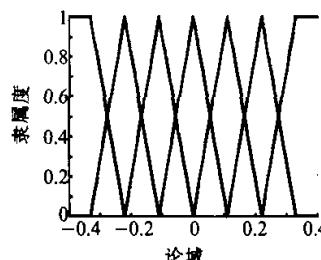


图 6 流量比 $\tilde{E}(K_b)$ 的隶属函数

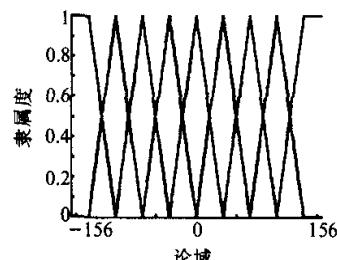


图 7 总流量 $\tilde{E}(Q)$ 的隶属函数

③ 定义了各语言变量的模糊子集后, 便可以对 81 组数据进行模糊化. 对于其中一组数据 $p_i = -0.75, L_{x_i} = 0.15, L_{z_i} = 0.06, K_{b_i} = 0.07, Q_i = -80$, 模糊化后可得

$$\tilde{E}(p_i) = 0 / A_{PB} + 0 / A_{PS} + 0 / A_Z + 0 / A_{NS} + 0.97 / A_{NB} \quad (1)$$

$$\tilde{E}(L_{x_i}) = 1 / A_B + 0 / A_Z + 0 / A_S \quad (2)$$

$$\tilde{E}(L_{z_i}) = 0.6 / A_B + 0.4 / A_Z + 0 / A_S \quad (3)$$

$$\tilde{E}(K_{b_i}) = 0 / A_{PB} + 0 / A_{PM} + 0.64 / A_{PS} + 0.36 / A_Z + 0 / A_{NS} + 0 / A_{NM} + 0 / A_{NB} \quad (4)$$

2) 计算 3 输入 $\tilde{E}(p)$ 、 $\tilde{E}(L_{x_i})$ 、 $\tilde{E}(L_{z_i})$ “交”运算的模糊关系 $\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})}$

首先计算二元模糊关系

$$\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i})} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.97]^T \circ [1 \ 0 \ 0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.97 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

然后, 把二元模糊关系 $\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i})}$ 排列成列向量形式 $\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i})}^T$, 即

$$\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i})}^T = [0 \ \cdots \ 0 \ 0.97 \ 0 \ 0]^T$$

三元模糊关系 $\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})}$ 计算如下:

$$\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})} = \tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i})}^T \circ [0.6 \ 0.4 \ 0] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})}$ 是一个 15 行 3 列的模糊关系矩阵.

3) 完成每一组模糊输入输出数据对由输入到输出的模糊推理. 根据模糊关系 $\tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})}$, 计算模糊输出 $\tilde{E}(K_b)$ 分别属于其各模糊子集 A_{PB} 、 A_{PM} 、 A_{PS} 、 A_Z 、 A_{NS} 、 A_{NM} 、 A_{NB} 的模糊关系, 即

$$\tilde{R}_{A_{PB}} = 0 \wedge \tilde{R}_{E(p) \times E(L_{x_i}) \times E(L_{z_i})} = 0 \quad (7)$$

0 是一 15 行 3 列的矩阵.

类似的方法可以求 $\tilde{R}_{A_{PM}}, \tilde{R}_{A_{PS}}, \tilde{R}_{A_Z}, \tilde{R}_{A_{NS}}, \tilde{R}_{A_{NM}}, \tilde{R}_{A_{NB}}$.

4) 将全部 81 组模糊输入输出数据对的推理结果加以合成, 即计算关系

$$\tilde{R}_{A_{\text{PB}}} = \bigcup_{i=1}^{81} \tilde{R}_{A_{\text{PB}}, i} \quad (8)$$

$$\tilde{R}_{A_{\text{PM}}} = \bigcup_{i=1}^{81} \tilde{R}_{A_{\text{PM}}, i} \quad (9)$$

$$\tilde{R}_{A_{\text{VS}}} = \bigcup_{i=1}^{81} \tilde{R}_{A_{\text{VS}}, i} \quad (10)$$

5) 求 λ 截集关系矩阵. 选取阈值 $\lambda = 0.6$, 将 $\tilde{R}_{A_{\text{PB}}}, \tilde{R}_{A_{\text{PM}}}, \tilde{R}_{A_{\text{VS}}}, \tilde{R}_{A_z}, \tilde{R}_{A_{\text{NS}}}, \tilde{R}_{A_{\text{NM}}}, \tilde{R}_{A_{\text{NB}}}$ 中等于或大于0.6的元素记为1, 小于0.6的元素记为0. 得相应的 λ 截关系矩阵 $R_{E(K_b), A_{\text{PB}}}, R_{E(K_b), A_{\text{PM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{VS}}}, R_{E(K_b), A_z}, R_{E(K_b), A_{\text{NS}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NB}}}$.

6) 用模糊输出的相应子集 $A_{\text{PB}}, A_{\text{PM}}, A_{\text{VS}}, A_z, A_{\text{NS}}, A_{\text{NM}}, A_{\text{NB}}$ 代替 $R_{E(K_b), A_{\text{PB}}}, R_{E(K_b), A_{\text{PM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{VS}}}, R_{E(K_b), A_z}, R_{E(K_b), A_{\text{NS}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NB}}}$ 中的元素1, 得到 $R_{E(K_b), A_{\text{PB}}}, R_{E(K_b), A_{\text{PM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{VS}}}, R_{E(K_b), A_z}, R_{E(K_b), A_{\text{NS}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NB}}}$.

7) 将 $R_{E(K_b), A_{\text{PB}}}, R_{E(K_b), A_{\text{PM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{VS}}}, R_{E(K_b), A_z}, R_{E(K_b), A_{\text{NS}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NM}}}, R_{E(K_b), A_{\text{NB}}}$ 叠加构成一张模糊关系总表 $R_{E(K_b)}$, 即是根据输入输出量测数据为系统建立的 $\tilde{E}(p), \tilde{E}(L_x), \tilde{E}(L_s) \rightarrow \tilde{E}(K_b)$ 的模糊模型, 如图8所示. 用同样的方法, 可以得到 $\tilde{E}(p), \tilde{E}(L_x), \tilde{E}(L_s) \rightarrow \tilde{E}(Q)$ 的规则模型, 如图9所示.

		$E(K_b)$	$E(L_s)$	A_{PB}	A_z	A_s
		$E(p)$	$E(L_x)$			
A_{PB}	A_{PB}					
	A_z				A_{PM}	
	A_s			A_{NB}	A_z	
A_{PS}	A_{PB}				A_{PB}	
	A_z				A_z	A_{PS}
	A_s	A_{NB}	A_{NB}	A_{NB}	A_z	
A_z	A_{PB}	A_{NS}	A_{PM}	A_{PB}		
	A_z	A_{NM}	A_{PS}	A_{PS}		
	A_s	A_{NB}	A_{NM}	A_{NS}		
A_{NS}	A_{PB}	A_z	A_{PM}	A_{PB}		
	A_z	A_{NS}	A_z	A_{PS}		
	A_s	A_{NB}	A_{NM}	A_{PS}		
A_{NB}	A_{PB}	A_{NS}	A_{PM}	A_{PB}		
	A_z	A_{NS}	A_{PS}	A_{PM}		
	A_s	A_{NB}	A_{NM}	A_z		

图8 $\tilde{E}(p), \tilde{E}(L_x), \tilde{E}(L_s) \rightarrow \tilde{E}(K_b)$ 的规则模型

		$E(L_s)$	$E(Q)$	A_{PB}	A_z	A_s
		$E(p)$	$E(L_x)$			
A_{PB}	A_{PB}					
	A_z				A_{VB}	
	A_s				A_{VB}	A_{VB}
A_{PS}	A_{PB}					
	A_z				A_{VB}	A_{VB}
	A_s	A_{VB}	A_{VB}	A_{VB}	A_{VB}	A_{PS}
A_z	A_{PB}	A_{VB}	A_{PB}	A_{PB}		
	A_z	A_{VB}	A_{PB}	A_{PS}		
	A_s	A_{VB}	A_{PB}	A_{PM}	A_{NS}	
A_{NS}	A_{PB}	A_{PM}	A_z	A_z		
	A_z	A_{PM}	A_z	A_z		
	A_s	A_z	A_z	A_{VS}		
A_{NB}	A_{PB}	A_{NM}	A_{VS}	A_{VS}	A_{NB}	
	A_z	A_{NM}	A_{NB}	A_{NB}	A_{NM}	
	A_s	A_{VS}	A_{VS}	A_{VS}	A_{VS}	

图9 $\tilde{E}(p), \tilde{E}(L_x), \tilde{E}(L_s) \rightarrow \tilde{E}(Q)$ 的规则模型

对于建模过程中阈值 λ 的选取, 既不应选得太小, 这样会出现个别元素上的重叠现象, 也不应选得太大, 这样会引起太多的空挡. 经过试探, 本建模过程选取的阈值 $\lambda = 0.6$. 图8和9中的空档表示被建模系统不存在此种状态组合.

将图8和9叠加在一起, 便得到供水系统的模型规则. 这些规则也可以表示如下:

Rule1: IF $\tilde{E}(p) = A_{\text{PB}}$ and $\tilde{E}(L_x) = A_z$ and $\tilde{E}(L_s) = A_s$ THEN $\tilde{E}(K_b) = A_{\text{PM}}$ and $\tilde{E}(Q) = A_{\text{VB}}$ ELSE

Rule2: IF $\tilde{E}(p) = A_{\text{PB}}$ and $\tilde{E}(L_x) = A_s$ and $\tilde{E}(L_s) = A_z$ THEN $\tilde{E}(K_b) = A_{\text{NB}}$ and $\tilde{E}(Q) = A_{\text{VB}}$ ELSE

⋮

Rule36: IF $E(p) = A_{NB}$ and $E(L_s) = A_s$ and $E(L_s) = A_s$ THEN $E(K_b) = A_z$ and $E(Q) = A_{vs}$

一个完整的模糊模型应该具有模糊化、推理机制和规则库以及解模糊 3 个部分组成。对于模糊化, 采用本文前面所述的方法; 对于推理方法, 本文采用 Mamdani 推理法; 对于解模糊化, 本文采用 MoM 法(平均最大隶属度法)。以上 3 个部分即构成了一个完整的模糊推理系统, 也即是本文所建的模糊模型。

3 仿真结果

为了验证模型的精度, 由建立的模糊推理系统, 就可以确定对于特定输入的模型输出, 因而建立 FIS(fuzzy inference system)是进行仿真的前提。利用 MATLAB 建立 FIS 有两种方法: 利用命令行或 GUI(图形用户界面)。本文利用 GUI 来建立 FIS, 因为 GUI 可以更方便地建立模糊推理系统。

建立了模糊推理系统, 就可以根据输入数据得到模型的输出, 并与实际系统的输出作比较, 得到仿真曲线分别如图 10、11 所示。表 2 列出了部分试验数据和模型数据的比较。

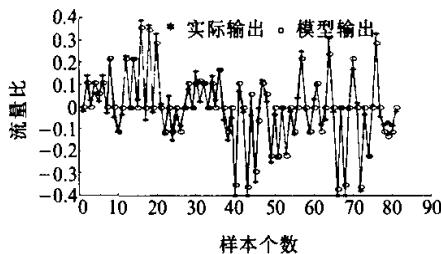


图10 流量比的实际与模型输出曲线

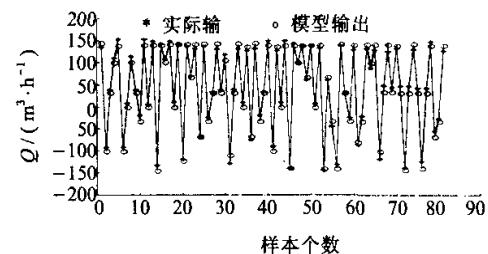


图11 总流量的实际与模型输出曲线及误差曲线

表2 部分试验数据和模型数据

实际输出 $E(K_b)$	模型输出 $E(K_b)$	实际输出 $E(Q)$	模型输出 $E(Q)$	实际输出 $E(K_b)$	模型输出 $E(K_b)$	实际输出 $E(Q)$	模型输出 $E(Q)$
0.14	0.11	-92.0	-99.8	-0.08	-0.11	-24.0	-32.8
0.01	0	137.6	142.0	-0.25	-0.22	62.0	67.1
0.23	0.22	5.0	0	0.04	0	-131	-140
-0.15	-0.11	-68.0	-67.1	0.25	0.22	139	142.0
0	0	38.3	32.8	-0.12	-0.11	-23.9	-32.8
0.17	0.17	-75.0	-67.0	0.10	0.11	-86.0	-79.3
0.14	0.11	10	0	-0.38	-0.36	-138.0	-141.0
-0.34	-0.29	-140.0	-138.8	-0.21	-0.22	-145	-140
0.12	0.11	100.0	99.8	-0.08	-0.11	-28.0	-32.8
-0.12	-0.11	-44.0	-32.8	-0.02	0	62.0	67.1

为检验和评价模型的精度, 取

$$J = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_m(k)]^2} \quad (11)$$

即均方值误差作为损失函数, 经测算有 $J_{E(K_b)} = 0.035$, $J_{E(Q)} = 9.60$, 分别为其设定值 $K_{b0} = 1.53$ 和 $Q_0 = 492$ 的 2.29% 和 1.95%。可以看出, 所建模型的输出与实际系统输出拟合得相当好。

另外, 根据首钢新的试验数据进行了仿真检验, 也证实了所建模型的有效性。图 12 和 13 显示了新的试验数据和模型输出的比较情况。

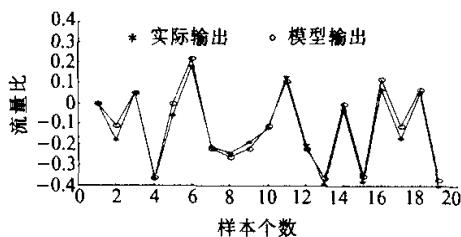


图12 新数据流量比实测值与模型输出曲线及误差曲线

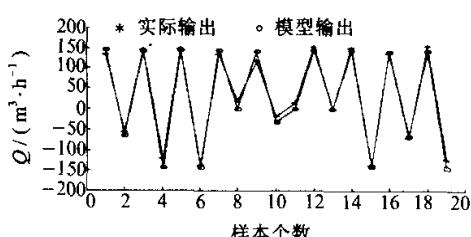


图13 新数据的总流量实测值与模型输出曲线及误差曲线

4 结束语

采用模糊推理合成法辨识多输入多输出的模糊模型是一种简易而行之有效的方法,而 MATLAB 的 GUI 工具的运用使建立模糊推理系统和进行仿真变得更为便捷。下一步要做的工作是利用所建立的模糊模型提取控制规则,设计供水系统的模糊控制器。

参考文献:

- [1] 尹延明. 钢板加速冷却计算机集散控制系统中供水系统的设计 [D]. 沈阳: 东北大学计算机系, 1996.
- [2] 陈明跃. 中厚钢板水幕冷却技术及计算机控制技术的研究 [D]. 沈阳: 东北大学计算机系, 1999.
- [3] TOMOHIRO T, MICHIO S. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1985, SMC-15(1): 116-134.
- [4] 李友善, 赵福顺. 应用 Fuzzy 集合测辨系统 Fuzzy 模型的新方法——Fuzzy 推理合成法 [J]. 自动化学报, 1991, 17(3): 257-263.
- [5] 诸静. 模糊控制原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 334-335.
- [6] WEI L. Fuzzy-logic-based reactive behavior control of an autonomous mobile system in unknown environments[J]. Engng Appli Artif Intell, 1994, 7(5): 521-531.

Fuzzy Modeling and Simulation of the Water Supply System in Watercurtain Cooling Process

WANG Jin-hang¹, QIN Shi-yin², CHEN Ming-yue³

(1. College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;
 2. Astronautics School, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;
 3. Steel Rolling Technology Department, Shougang (Group) Technical Center, Beijing 100041, China)

Abstract: Both the dynamic and static characteristics of the water supply system in watercurtain cooling process in the steel rolling production of Shougang (Group) Company are deeply analyzed. And then a series of practical testing data are acquired, with which a kind of fuzzy model is built based on the composite rule of inference. Finally the simulation test of the fuzzy model is carried out by using GUI in MATLAB, which shows that the model can approximate very well the dynamic response process of the real system.

Key words: fuzzy modeling; composite rule of inference; watercurtain cooling system; water supply system; MATLAB