

基于作用模糊子集推理的单片机模糊控制实现原理及其应用*

张吉礼

(哈尔滨工业大学动力机械与工程博士后流动站·哈尔滨, 150090) (哈尔滨建筑大学建筑工程学院·哈尔滨, 150090)

欧进萍

孙德兴

(哈尔滨建筑大学建筑热能工程系·哈尔滨, 150090)

摘要: 针对 CRI 模糊推理方法的复杂性, 首先提出了作用模糊子集推理方法; 然后将该推理方法与单片机数字运算特点相结合, 提出了基于作用模糊子集推理的单片机模糊控制实现原理, 研制开发了 80C552 型单片机模糊控制器; 最后以建筑热工系统为被控对象, 试验研究了测试室温度模糊控制过程。

关键词: 作用模糊子集推理; 单片机模糊控制; 建筑热工系统; 室内温度; 试验

文献标识码: A

Realizing Principle of the Single-Chip Microcomputer Fuzzy Control Based on the Functioning-Fuzzy-Subset Inference and Its Application

ZHANG Jili

(The Post-doctor Flowing Station of the Dynamical Machine and Engineering,
Harbin Institute of Technology·Harbin, 150090, P.R. China)

OU Jinping

(School of the Building Engineering, Harbin University of Civil Engineering & Architecture·Harbin, 150090, P. R. China)

SUN Dexing

(Department of the Building Thermal Energy Engineering, Harbin University of Civil Engineering & Architecture·Harbin, 150090, P. R. China)

Abstract: Aiming at the complexity of the compositional rule of inference (CRI), the functioning-fuzzy-subset inference (FFSI) has been put forward at first. Then the realizing principle of the single-chip microcomputer fuzzy control based on the FFSI been discussed, which has combined the FFSI with the digital operation characteristic of the single-chip microcomputer, and the single-chip microcomputer fuzzy controller 80C552 has been developed. In the end, the process of the fuzzy control for the temperature indoor has been studied by experiments, by using the building thermal system as the controlled object.

Key words: functioning-fuzzy-subset inference; single-chip microcomputer fuzzy control; building thermal system; temperature indoor; experiment

1 引言(Introduction)

模糊控制与单片机技术的结合一类是模糊单片机控制器, 另一类是数字式单片机模糊控制器; 前者由硬件完成模糊推理, 对硬件技术、生产工艺等要求较高; 后者由软件完成模糊推理, 实现简单, 被普遍采用。以 CRI 法为基础的模糊控制方法^[1,2], 由于其推理过程复杂, 在应用中常采用查模糊控制响应表的方法来完成模糊决策过程; 模糊控制响应表一旦确定, 控制过程就以响应表为基础进行工作, 当响应表不能适应被控过程的状态变化时, 则很难满足控

制要求。用于单片机模糊控制的推理方法还有强度转移法、特征展开推理法和真值流推理(truth-valued-flow inference)法等^[3~5], 上述推理方法在一次推理中其所有模糊控制规则均参与推理运算, 这不仅增加了单片机实现模糊推理的难度, 而且不能反映模糊推理的本质, 即在一次推理过程中, 并非所有的模糊控制规则都参与推理。为此, 我们提出了作用模糊子集推理(functioning-fuzzy-subset inference, FFSI)方法^[6], 其推理过程简捷明了, 易于实现单片机实时模糊推理过程, 在实际应用中具有较明显的优越性。本

* 基金项目: 国家自然科学基金(59908001), 中国博士后科学基金, 哈尔滨工业大学跨学科交叉性研究基金(HIT-MD200030)资助项目。
收稿日期: 1999-02-28; 收修改稿日期: 2000-04-14.

文根据单片机数字运算的特点,提出基于FFSI法单片机实现原理,研制开发了单片机模糊控制器,并进行了某建筑热工系统室内温度模糊控制的试验研究^[6]。

2 FFSI 法的基本原理及仿真(Basic principle and simulation of the FFSI)

2.1 FFSI 法的基本原理(Basic principle of the FFSI)

FFSI法首先考虑实测量的作用模糊子集及作用模糊控制规则,指出实时模糊推理过程仅与作用模糊子集和作用模糊控制规则有关。

定义 1 设 A_i 为变元 x 在论域 U 上的模糊子集, $i = 1, 2, \dots, n$, 若某时刻 x^* 对 A_i 的隶属度 $A_i(x^*) > 0$, 则该 A_i 为该时刻 x^* 的一个作用模糊子集, 记作 $A'_j (j = 1, 2, \dots, m)$, x^* 对 A'_j 的隶属度记作 $A'_j(x^*)$, 其中 m 为作用模糊子集的个数, 一般地 $m < n$ 。

定义 2 以 x^* 的作用模糊子集 $A'_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 为前件的模糊控制规则称为某时刻 x^* 的作用模糊控制规则, 记作 $R'_k (k = 1, \dots, p)$, 其中 p 为作用模糊控制规则的条数, 一般地 p 远小于总规则数。

定义 3 设 A_i, B_j 分别为论域 X, Y 上的模糊子集 ($i, j = 1, 2, \dots, n$), x, y 分别为 X, Y 中的个体变元, 则 (x, y) 对 (A_i, B_j) 的隶属度即为 (x, y) 对 $(A_i \times B_j)$ 的真值, 记作 $(A_i \times B_j)(x, y)$, 且有

$$(A_i \times B_j)(x, y) = A_i(x) \wedge B_j(y). \quad (1)$$

当 $(A_i \times B_j)(x, y) = 0$ 时, 模糊子集 $(A_i \times B_j)$ 对 (x, y) 的作用为零; 当 A'_i 和 B'_j 为作用模糊子集时, $(A'_i \times B'_j)(x, y) > 0$ 。

FFSI 法的推理过程如下:

1) 定义系统状态的偏差 e 、偏差变化 ec 和控制量 u 的论域、隶属函数和模糊控制规则。设 e, ec 和 u 的论域为 $[-6, 6]$, 隶属函数如图 1 所示, 模糊控制规则如表 1 所示。

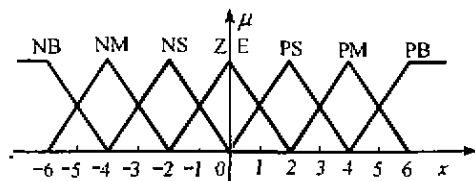


图 1 e, ec 和 u 的模糊子集隶属函数

Fig. 1 Membership function of the e, ec and u

2) 设某时刻的实测量为 (e^*, ec^*) , 确定 (e^*, ec^*) 的作用模糊子集 A'_i 和 B'_j 及其作用模糊控制规则 R'_k 。

表 1 模糊控制规则表

Table 1 Table of the fuzzy control rule

e	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PM	PM	PS	PS	ZE	NS
NS	PM	PM	PS	PS	ZE	NS	NS
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NS	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZE	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

3) 计算 (e^*, ec^*) 对 $(A'_i \times B'_j)$ 的真值:

$$(A'_i \times B'_j)(e^*, ec^*) = A'_i(e^*) \wedge B'_j(ec^*). \quad (2)$$

4) 计算模糊控制量:

$$C^*(u) = \bigvee_{k=1}^p \{ \bigvee_i [(A'_i \times B'_j)(e^*, ec^*)] \} \cdot C'_k(u), \quad (3)$$

其中, s 为具有相同后件的规则数。

5) 利用重心法对模糊控制量 C^* 进行反模糊化。

2.2 FFSI 法的仿真(Simulation of the FFSI)

图 2 为 FFSI 法和 CRI 法对式(4)所示的被控系统的仿真控制结果。

$$HG(s) = \frac{1 - e^{-5s}}{(20s + 1)s} e^{-2s}. \quad (4)$$

由图 2 可知, CRI 法存在稳态误差, 而 FFSI 法不存在稳态误差。

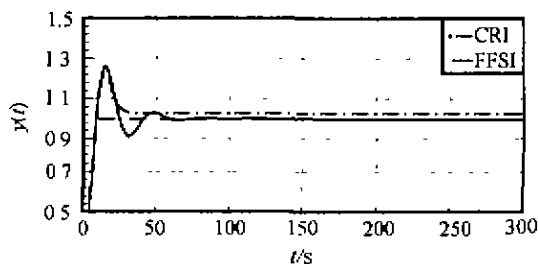


图 2 FFSI 法和 CRI 法的模糊控制仿真结果

Fig. 1 Simulating results of the FFSI and CRI control

3 FFSI 法的单片机实现原理(Realizing principle of the single-chip microcomputer based on the FFSI)

3.1 模糊子集隶属函数的二进制表示(Binary representation of the membership function)

单片机前向通道数据采集结果, 在没有进行标度变换之前, 是一个无量纲的无符号二进制数, 若模糊推理及控制过程能建立在无符号二进制数基础上, 则可以省去到浮点数的转换, 减少程序量, 为数

据的处理和存储带来方便。

设偏差 e 和偏差变化 ec 的论域为 $[6BH, 95H]$, 控制量 u 的论域对应于 D/A 转换器 DAC0832 的输入为 $[00H, FFH]$, e, ec 和 u 的模糊子集隶属函数分别如图 3 和图 4 所示。

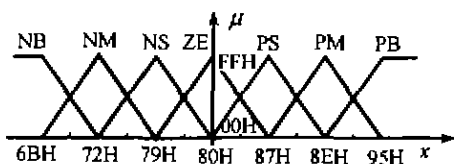


图 3 e 和 ec 模糊子集的十六进制隶属函数

Fig. 3 Membership function of the e and ec in hex

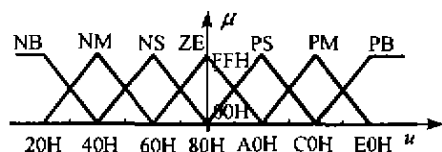


图 4 u 模糊子集的十六进制隶属函数

Fig. 4 Membership function of the u in hex

由图 3, 可计算出 e 或 ec 在某一时刻对其作用模糊子集的隶属度, 如 $e^* = 75H$ 时的作用模糊子集为 NM 和 NS, 隶属度为 $NM(e^*) = 91H$, $NS(e^*) = 6DH$, 且 $NM(e^*) + NS(e^*) = 91H + 6DH = FEH \approx FFH$ 。

3.2 基于二进制的 FFSI 法推理过程 (Reasoning process of the FFSI in binary)

FFSI 法推理过程可概括为真值的产生、传递和接收三个环节。设实测量 e^*, ec^* 的作用模糊子集分别为 A_1', A_2' 和 B_1', B_2' , e^* 和 ec^* 对各自作用模糊子集的隶属度分别为 $A_1'(e^*), A_2'(e^*)$ 和 $B_1'(ec^*), B_2'(ec^*)$, 相应的作用模糊控制规则为 $R_i' (i = 1, 2, 3, 4)$, 则有如下的基于二进制的 FFSI 法推理过程^[6]。

1) 真值的产生与传递。

实测量 (e^*, ec^*) 对其作用模糊控制规则前件的真值为:

$$(A_1' \times B_1')(e^*, ec^*) = A_1'(e^*) \wedge B_1'(ec^*) = V_1(u^*),$$

$$(A_1' \times B_2')(e^*, ec^*) = A_1'(e^*) \wedge B_2'(ec^*) = V_2(u^*),$$

$$(A_2' \times B_1')(e^*, ec^*) = A_2'(e^*) \wedge B_1'(ec^*) = V_3(u^*),$$

$$(A_2' \times B_2')(e^*, ec^*) = A_2'(e^*) \wedge B_2'(ec^*) = V_4(u^*).$$

上述各真值沿各自作用模糊控制规则 $R_i' (i = 1, 2, 3, 4)$ 传给后件。

2) 真值的接收。

设作用模糊控制规则的后件为 $C_i' (i = 1, 2, 3,$

4), 当控制量模糊子集的隶属函数用单点模糊集表示 (如表 2 所示) 时, u^* 的作用模糊子集 C_i' 可表示为

$$C_i' = [C_i'(u_1), C_i'(u_2), \dots, C_i'(u_7)], \quad (5)$$

其中, $C_i'(u_j)$ 为表 2 中的隶属度, $u_j (j = 1, 2, \dots, 7)$ 为第 j 个模糊子集的中心值。

表 2 控制量模糊子集的单点隶属函数表

Table 2 Membership function of u in singleton dot

模糊子集	隶属函数的中心值						
	20H	40H	60H	80H	A0H	C0H	E0H
NB	FFH	00H	00H	00H	00H	00H	00H
NM	00H	FFH	00H	00H	00H	00H	00H
NS	00H	00H	FFH	00H	00H	00H	00H
ZE	00H	00H	00H	FFH	00H	00H	00H
PS	00H	00H	00H	00H	FFH	00H	00H
PM	00H	00H	00H	00H	00H	FFH	00H
PB	00H	00H	00H	00H	00H	00H	FFH

u^* 的作用模糊子集接收前件传来的真值 $V_i(u^*)$, 除作用模糊子集编码位置处的隶属度不为 0 外, 其余均为 0, 记作:

$$C_i'(u^*) \triangleq V_i(u^*) \times C_i'(u_j), \quad (6)$$

其中, $C_i'(u_j) > 0$ 。

当 u^* 的同一作用模糊子集接收多个真值时, 有:

$$C_k'(u) = \bigvee_i C_i'(u^*), \quad (7)$$

其中, s 为 u^* 的同一作用模糊子集所接收的真值个数。

$$C^*(u) = \bigvee_{k=1}^{m'} C_k'(u), \quad (8)$$

其中, m' 是具有不同后件的作用模糊控制规则数。

根据 u^* 的作用模糊子集中心值 u_k , 由重心法对模糊控制量进行反模糊化。

在 CRI 法、强度转移法、特征展开推理法、真值流推理和 FFSI 法中, 其基本操作为“V-Λ”运算。以“V-Λ”运算的语句频率为考察标准, 以图 1 和表 1 所定义的 DISO 模糊控制系统为模糊推理模型, 分析上述推理方法完成一次推理时“V-Λ”运算的次数, 以此考察其推理速度。经过比较分析, FFSI 法在完成一次推理时的“V-Λ”运算次数最少, 推理速度最快, 真值流法和强度转移法完成一次推理“V-Λ”的运算次数是 FFSI 法的 68.6 倍, 特征展开法完成一次推理“V-Λ”的运算次数是 FFSI 法的 188 倍, CRI 法完成一次推理“V-Λ”的运算次数是 FFSI 法的 10882.95 倍。FFSI 法特别适合于快时变过程的控制。

可见, FFSI 法不仅真实地反映了实时模糊推理过程中各模糊子集和模糊控制规则对一次推理贡献

的大小,而且推理计算简单,适于单片机模糊控制器的实现.另外,模糊逻辑推理的结果直接对应于D/A转换所要求的数字量,不必经过比例因子的调整,使模糊控制过程更为简捷.

4 基于 FFSI 法的单片机模糊控制器及其应用 (Single-chip microcomputer fuzzy control based on the FFSI and its application)

本文研制开发的 80C552 型单片机模糊控制器的系统组成如图 5 所示^[7],可实现数据采集、数据处理、数据显示、模糊逻辑推理、控制输出和与 PC 机或其它单片机串行通讯等功能.

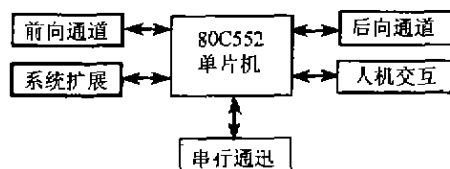
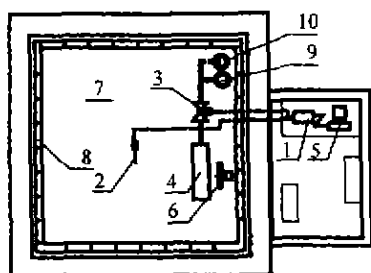


图 5 80C552 型单片机模糊控制器系统组成

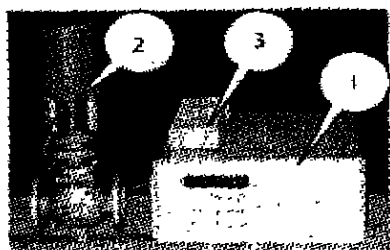
Fig. 5 System architecture of the 80C552



1—模糊控制器；2—温度传感器；3—电动调节阀；
4—换热器；5—PC 机；6—风机；7—测试室；
8—风管；9—供水管；10—回水管

图 6 测试室温度模糊控制试验平面图

Fig. 6 Plan of the testing-room for the temperature control experiment based on the FFSI



1—80C552 型单片机模糊控制器；2—电动调节阀；
3—铂电阻温度传感器

图 7 模糊控制主要仪表设备

Fig. 7 Main instruments for the FFSI control

图 6 为建筑热工系统室内温度模糊控制试验研究平面图^[6],图 7 为模糊控制试验主要仪表设备.当室内温度因外扰(风道温度)的变化而波动时,温度传感器将室温变化反馈到模糊控制器,经过模糊逻辑推理,决策电动调节阀开度,调节向室内的供热

量,以实现室温的控制.

图 8 为 FFSI 法模糊控制试验结果,图 9 为相应的阀门开度和热水流量调节曲线.在图 8 中, nc 为无控制(阀杆行程不变)时室温响应曲线, t_{rg} 为室温设定值,单位 $^{\circ}C$, t_r 为有控时室温曲线,单位 $^{\circ}C$;在图 9 中, V_1 为热水流量,单位 m^3/h ; DI_{0-7} 为 DAC0832 的输入数字量,代表阀门的开度.

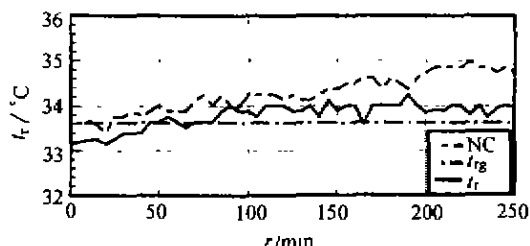


图 8 FFSI 法室温控制试验结果

Fig. 8 Experimental result of the temperature indoor based on the FFSI

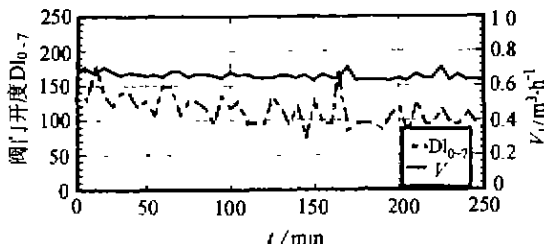


图 9 阀门开度和水流量调节曲线

Fig. 9 Adjusting curve of the valve's treval and the rate of flow

由图 8 可知,室内温度 FFSI 法模糊控制响应快、精度高 ($<0.5^{\circ}C$),但存在一定的稳态误差(该稳态误差已能满足测试室温度控制要求,即小于 $0.5^{\circ}C$).这主要因为连续型电动调节阀在实际系统中表现出快开特性,其实际流量变化范围约为 $(0.6, 0.8)m^3/h$,当流量小于 $0.6m^3/h$,调节阀工作不稳定,无法实现小流量调节,因此系统存在一定程度的稳态误差.

5 结论 (Conclusion)

研究表明:

1) 作用模糊子集推理方法推理计算简捷明了,易于实现实时模糊推理控制,且在仿真控制中,可以消除稳态误差;

2) 以二进制数为基础的 FFSI 法单片机模糊控制的实现原理具有较大的通用性和实用价值,易于具体实现和开发单片机模糊控制器;

3) 以 FFSI 法为基础的单片机模糊控制器在测试室温度控制试验中,响应速度快,控制精度高,但也存在一定程度的稳态误差.

参考文献(References)

- [1] Zadeh L A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes [J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1973, 3(3): 28 - 44
- [2] Mamdani E H and Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller [J]. Int. J. Man Machine Studies, 1974, (4): 1 - 13
- [3] Tsukamoto. Y. Fuzzy logic based on Lukasiewicz logic and its application to diagnosis and control [D]. Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 1979
- [4] Chen Yongyi, Chen Tuyun. The method of the characteristic expanding approximate inference [J]. J. of Liaoning Normal University, 1984, (3): 1 - 7 (in Chinese)
- [5] Wang Peizhuang, Zhang Hongmin. The truth - valued inference and its dynamical description [J]. J. of Beijing Normal University, 1989, (1): 1 - 9 (in Chinese)

- [6] Zhang Jili. Fuzzy-neural network control and its applications in the building thermal process [D]. Harbin: Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1998 (in Chinese)
- [7] Zhang Youde. Technique Handbook of the Principle and Application for the Single-Chip Microcomputer of the Philips 80C51 [M]. Beijing: The Publishing House of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1992, 1 - 45 (in Chinese)

本文作者简介

张吉礼 1969 年生, 博士. 现在哈尔滨工业大学能源科学与工程学院做博士后研究工作. 主要从事模糊-神经网络控制, 单片机控制系统研制与开发, 建筑热工系统控制与仿真.

欧进萍 1959 年生, 博士. 哈尔滨建筑大学副校长, 研究员, 博士生导师. 主要从事模糊随机动态系统与控制, 结构耗能减振与振动控制, 结构损伤、可靠度与维修决策.

孙德兴 1942 年生, 1986 年在德国获博士学位, 哈尔滨建筑大学建筑热能工程系主任, 教授. 主要研究方向为空调制冷和热工原理.

(上接第 575 页)

义和实际意义. 本文给出新型的控制器的工程上易于实现.

参考文献(References)

- [1] Petersen I R and Holot C V. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems [J]. Systems & Control Letters, 1987, 8 (3): 351 - 357
- [2] Saberi A and Khalil H. Decentralized stabilization of interconnected systems using output feedback [J]. Int. J. Control, 1985, 41(6): 1461 - 1475
- [3] Cheng C F. Output feedback stabilization for uncertain systems: constrained Riccati approach [J]. IEEE Trans. Automatic Control,

1988, 43(1): 81 - 84

- [4] Yang G H and Zhang S Y. Stabilizing controllers for uncertain symmetric composite systems [J]. Automatica, 1995, 31(2): 337 - 340
- [5] Sundarshan M K and Elbana R M. Qualitative analysis and decentralized controller synthesis for a class of large scale systems with symmetrically interconnected subsystems [J]. Automatica, 1991, 27 (2): 383 - 388

本文作者简介

张颖伟 1969 年生 东北大学控制理论与应用专业博士 研究方向为相似组合大系统.

王 剑 1957 年生. 东北大学信息学院副教授. 研究方向为相似组合大系统.

张嗣瀛 见本刊 2000 年第 1 期第 30 页.