

文章编号: 1001-0920(2005)08-0866-07

一种新的基于二维云模型不确定性推理的智能控制器

李 众^{1,2}, 杨一栋¹

(1. 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016; 2. 江苏科技大学 电子与信息学院, 江苏 镇江, 212003)

摘 要: 提出一种新型的二维云模型智能控制器结构。这种结构模型是一种本质非线性模型, 可以很容易由一组不确定性推理规则构成。分析了一维和二维云模型的非线性映射特性, 并给出了基于此结构模型的智能控制器的设计方法及仿真实例。

关键词: 云模型; 智能控制器; 不确定性推理; 非线性映射

中图分类号: TP273; TP183 **文献标识码:** A

A Novel Intelligent Controller Based on Uncertainty Reasoning of Two-dimension Cloud Model

LI Zhong^{1, 2}, YANG Yi-dong¹

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Electronics and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China. Correspondent: LI Zhong, Email: xlizhong@163.com)

Abstract: A novel intelligent control structure based on 2-D cloud model is proposed. The model is a non-linear model, and can be easily constructed by a group of uncertain reasoning rules. The non-linear mapping characteristics of 1-D and 2-D cloud model, are analyzed and the design method of the intelligent controller based on the structure model is given. Simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: Cloud model; Intelligent controller; Uncertainty reasoning; Non-linear mapping

1 引 言

在数据挖掘、人工智能、智能控制等领域, 首先要解决的是如何表达知识的问题。显然, 自然语言是最好的表达方式。给定一组相同属性范畴的定量数据, 寻找概括这些数据并用自然语言值表示的定性概念, 是知识发现的基础。然而, 定性概念和定量数据之间普遍存在着不确定性, 尤其是随机性和模糊性^[1]。因此, 建立一种从数据到概念的转换关系是很有实际意义的。

云模型是用自然语言值表示的定性概念与其定量数据表示之间的不确定性转换模型, 可以构成定性与定量相互间的映射关系^[2]。云模型的 3 个数字特征是期望值、熵和超熵。期望值是概念在论域中的中心值, 完全隶属于该定性概念; 熵是定性概念模糊

度的度量, 熵越大, 概念所接受的数值范围越广, 概念也越模糊; 超熵反映云滴的离散程度, 超熵越大, 隶属的随机离散度也越大^[3]。

云模型已应用于挖掘空间广义知识和关联规则, 表达发现的知识, 连续数据离散化, 空间数据库的不确定性查询和推理, 遥感影像的解译和识别^[4~7]等领域。将云模型应用于飞行器导航系统模糊可靠性分析和故障检测, 可以有效地提高飞行器导航系统的可靠性分析^[8]。将云模型引入概念树中, 便于进一步丰富概念树的基本内涵, 解决模糊属性域的抽象问题, 实现概念的提升、规则的提取和知识的预测^[9]。

在智能控制领域, 将云模型方法应用于控制器设计是一种有益的尝试^[10, 11]。将人的控制经验, 通

收稿日期: 2004-09-09; 修回日期: 2005-03-28

作者简介: 李众(1964—), 男, 河北丰润人, 副教授, 博士生, 从事智能控制、电气自动化等研究; 杨一栋(1936—), 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士生导师, 从事飞行器控制等研究。

过语言原子和云模型转换到语言控制规则器中, 可以设计一种控制器, 对倒立摆系统进行有效的控制^[12]. 基于一维和二维云模型, 文献[13]提出了混合维规则推理方法, 简化了复杂控制规则. 根据电液伺服变距系统的特点, 文献[14]设计了一种二维云模型控制器. 从云模型的非线性映射角度出发, 文献[15]设计了一种新的一维云模型控制器.

云模型应用于智能控制器设计已取得了一些控制效果, 但这仅仅是开始, 仍有许多值得进一步研究的问题. 例如基于云模型的语言子集和不确定性推理规则设计, 对控制器输入输出非线性映射关系的影响; 基于一维和二维云模型推理的智能控制器设计等. 本文针对这两方面问题进行研究, 并给出了相关的仿真结果.

2 二维云模型概念

云模型的含义是: 设 $U = \{x\}$ 是一个普通集合, 称为论域 T 为 U 上的语言子集, $C_T(x)$ 是 U 到闭区间 $[0, 1]$ 的映射. 对于任意元素 $x \in U$, 如果存在一个有稳定倾向的随机数 $C_T(x)$, 则称 $C_T(x)$ 在 U 上的分布为云模型^[2]. 特别地, 设 $R_1(E_1, E_2)$ 表示服从正态分布的随机函数, 其中 E_1 为期望值, E_2 为标准差, 则有

$$x_i = R_1(E_x, E_n), \quad (1)$$

$$P_i = R_1(E_n, H_e), \quad (2)$$

$$\mu_i = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x_i - E_x}{P_i} \right)^2}. \quad (3)$$

由满足式(1)~(3)的数据对 $\text{drop}(x_i, \mu_i)$ ($i = 1, 2, \dots$) 构成的云模型称为一维正态云模型^[4], 记为 (E_x, E_n, H_e) .

设 R_2 表示服从正态分布的二维随机函数, 其中 E_1 和 E_2 为期望值, E_3 和 E_4 为标准差, 则有

$$(x_i, y_i) = R_2(E_x, E_y, E_{n_x}, E_{n_y}), \quad (4)$$

$$(P_{x_i}, P_{y_i}) = R_2(E_{n_x}, E_{n_y}, H_{e_x}, H_{e_y}), \quad (5)$$

$$\mu_i = e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x_i - E_x)^2}{P_{x_i}^2} + \frac{(y_i - E_y)^2}{P_{y_i}^2} \right]}. \quad (6)$$

由满足式(4)~(6)的数据对 $\text{drop}(x_i, y_i, \mu_i)$ ($i = 1, 2, \dots$) 构成的云模型称为二维正态云模型, 简称二维正态云^[9]; 组成该云模型的数据对 $\text{drop}(x_i, y_i, \mu_i)$ 称为二维云滴. 其中 (E_x, E_{n_x}, H_{e_x}) 和 (E_y, E_{n_y}, H_{e_y}) 分别为两个相对独立的一维云, E_x 和 E_y 为期望值, E_{n_x} 和 E_{n_y} 为熵, H_{e_x} 和 H_{e_y} 为超熵, 记为 (E_x, E_{n_x}, H_{e_x}) 和 (E_y, E_{n_y}, H_{e_y}) .

在对语言子集的处理过程中, 论域中某一点到它的分布值之间的映射是一对多的转换, 而不是一条明晰的分布曲线. 在云模型中, 经过映射属于一个定性语言值的数值是不确定的, 而是始终在细微地

变化, 但是这种变化并不剧烈地影响云的整个特征. 对云模型而言, 其整体形状是最重要的, 云滴的分布特性反映了语言概念的模糊性和随机性.

云模型的不确定规则推理是根据已知条件, 在一定的环境中推导得到目标规则的过程. 规则一般由规则前件(条件)和规则后件(规则知识)两部分组成. 在给定论域的数域空间中, 当已知云的 3 个数字特征 (E_x, E_n, H_e) 后, 如果还有特定的输入 $x = x_0$ 条件, 则由此产生的云模型称为 X 条件云模型, 记为 C_{G_x} ; 如果特定的条件不是 $x = x_0$, 而是 $\mu = C_T(x) = C_T(x_0)$, 则由此产生的云模型称为 Y 条件云模型^[5, 6], 记为 C_{G_y} .

一维 X 条件云模型为

$$P_i = R_1(E_n, H_e), \quad (7)$$

$$\mu_i = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - E_x}{P_i} \right)^2}. \quad (8)$$

二维 X 条件云模型为

$$(P_{A_i}, P_{B_i}) = R_2(E_{n_A}, E_{n_B}, H_{e_A}, H_{e_B}), \quad (9)$$

$$\mu_i = e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(x_A - E_{x_A})^2}{P_{A_i}^2} + \frac{(x_B - E_{x_B})^2}{P_{B_i}^2} \right]}. \quad (10)$$

Y 条件云模型为

$$P_i = R_1(E_n, H_e), \quad (11)$$

$$y_i = E_y \pm \sqrt{-2 \ln(\mu) P_i}. \quad (12)$$

式(7)和(8)中的 E_x, E_n, H_e 是规则前件的一维云模型数字特征; 式(9)和(10)中的 $E_{x_A}, E_{n_A}, H_{e_A}, E_{x_B}, E_{n_B}, H_{e_B}$ 是规则前件的二维云模型数字特征; 式(11)和(12)中的 E_y, E_n, H_e 是规则后件的云模型数字特征.

当输入 x 多次刺激 C_{G_x} 时, C_{G_x} 随机地产生一组 μ_i 值. 这些值反映了对定性规则的激活强度, 而这组 μ_i 又刺激 C_{G_y} , 定量地产生一组随机云滴 $\text{drop}(y_i, \mu_i)$. 同理, 双输入 x_1 和 x_2 多次刺激 $C_{G_{x_1, x_2}}$, 也产生一组 μ_i 值及随机云滴 $\text{drop}(y_i, \mu_i)$. 对这些随机云滴的处理, 可以采用逆向云的方法^[7, 8], 也可采用加权平均法^[14], 最终得到对应于定量输入 x (或 x_1 和 x_2) 的定量输出值 y .

3 云模型的非线性映射

考虑一维云模型推理过程, 推理结构为

$$\text{if } A_i, \text{ then } B_i; \quad i = 1 \sim N.$$

设输入云模型 A_i 的论域为 $U = [-1, 1]$, 输出云模型集合 B_i 的论域为 $V = [-1, 1]$, 定义云模型如式(12), 取 $N = 5$, 则有

$$A_1 = (-1, 0.3, 0.01),$$

$$A_2 = (-0.5, 0.3, 0.01),$$

$$A_3 = (0, 0.3, 0.01),$$

$$\begin{aligned}
A_4 &= (0.5, 0.3, 0.01), \\
A_5 &= (1, 0.3, 0.01); \\
B_1 &= (-1, 0.3, 0.01), \\
B_2 &= (-0.5, 0.3, 0.01), \\
B_3 &= (0, 0.3, 0.01), \\
B_4 &= (0.5, 0.3, 0.01), \\
B_5 &= (1, 0.3, 0.01). \tag{13}
\end{aligned}$$

根据上述 X 条件云和 Y 条件云以及加权平均定量输出算法, 已知任一个属于 U 的输入 x , 便可计算出所对应的属于 V 的输出 y . 当 x 在 U 内任意变化时, 对应的输出 y 如图 1 中曲线 所示. 显然, 此映射关系类似于线性映射

定义与式(13) 相同的输入输出云模型集合, 令规则数 $N = 4$, 仅修改控制规则如下:

$$\begin{cases} \text{if } A_1, \text{ then } B_1; & \text{if } A_3, \text{ then } B_5; \\ \text{if } A_4, \text{ then } B_5; & \text{if } A_5, \text{ then } B_5 \end{cases} \tag{14}$$

则对应的非线性映射变为图 1 曲线 . 显然, 此映射类似于非线性饱和特性

仅修改输入云模型集合, 保留与式(13) 相同的输出云模型集合, 有

$$\begin{aligned}
A_1 &= (-1, 0.2, 0.01), \\
A_2 &= (-0.67, 0.2, 0.01), \\
A_3 &= (-0.33, 0.2, 0.01), \\
A_4 &= (0.33, 0.2, 0.01), \\
A_5 &= (0.67, 0.2, 0.01), \\
A_6 &= (1, 0.2, 0.01); \\
B_1 &= (-1, 0.3, 0.01), \\
B_2 &= (-0.5, 0.3, 0.01), \\
B_3 &= (0, 0.3, 0.01), \\
B_4 &= (0.5, 0.3, 0.01), \\
B_5 &= (1, 0.3, 0.01). \tag{15}
\end{aligned}$$

定义控制规则如下 ($N = 5$):

$$\begin{aligned}
&\text{if } A_1, \text{ then } B_5; \text{ if } A_2, \text{ then } B_4; \\
&\text{if } A_3, \text{ then } B_3; \text{ if } A_4, \text{ then } B_2; \\
&\text{if } A_6, \text{ then } B_1. \tag{16}
\end{aligned}$$

则对应的非线性映射如图 1 曲线 所示

定义与式(15) 相同的云模型集合, 仅修改控制规则如下 ($N = 5$):

$$\begin{aligned}
&\text{if } A_1, \text{ then } B_1; \text{ if } A_3, \text{ then } B_2; \\
&\text{if } A_4, \text{ then } B_3; \text{ if } A_5, \text{ then } B_4; \\
&\text{if } A_6, \text{ then } B_5 \tag{17}
\end{aligned}$$

则对应的非线性映射变为图 1 曲线 .

考虑二维云模型推理过程, 推理结构为

$$\begin{aligned}
R_{ij}: &\text{ if } A_i \text{ and } B_j, \text{ then } C_k; \\
&i = 1 \sim N, j = 1 \sim M, k = 1 \sim K.
\end{aligned}$$

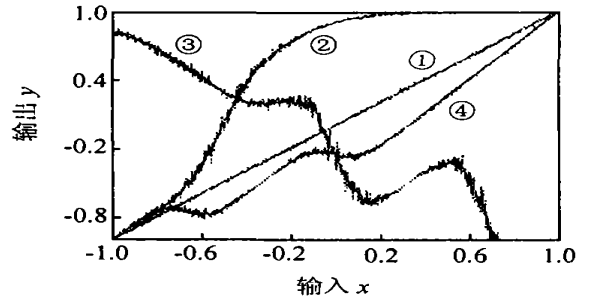


图 1 一维云模型非线性映射

设 A_i 论域 $U = [-1, 1], B_i$ 论域 $V = [-1, 1], C_i$ 论域 $W = [-1, 1]$. 令 $N = M = K = 5$, 定义云模型 $A = \{A_i\}, B = \{B_j\}$ 和 $C = \{C_k\}$ 如下:

$$\begin{aligned}
A_1 &= (-1, 0.3, 1.E-4), \\
A_2 &= (-0.5, 0.3, 1.E-4), \\
A_3 &= (0, 0.3, 1.E-4), \\
A_4 &= (0.5, 0.3, 1.E-4), \\
A_5 &= (1, 0.3, 1.E-4); \\
B_1 &= (-1, 0.3, 1.E-4), \\
B_2 &= (-0.5, 0.3, 1.E-4), \\
B_3 &= (0, 0.3, 1.E-4), \\
B_4 &= (0.5, 0.3, 1.E-4), \\
B_5 &= (1, 0.3, 1.E-4); \\
C_1 &= (-1, 0.3, 1.E-4), \\
C_2 &= (-0.5, 0.3, 1.E-4), \\
C_3 &= (0, 0.3, 1.E-4), \\
C_4 &= (0.5, 0.3, 1.E-4), \\
C_5 &= (1, 0.3, 1.E-4). \tag{18}
\end{aligned}$$

用矩阵形式表示二维云模型推理规则, 有

$$R = \{r_{ij}\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}. \tag{19}$$

其中 r_{ij} 表示二维控制规则

$$\text{if } A = A_i, B = B_j, \text{ then } C = C_k;$$

$$i = 1 \sim 5, j = 1 \sim 5, k = r_{ij} = 1 \sim 5.$$

例如: 当 $i = 3, j = 5$ 时, 则 $k = r_{ij} = 3$, 表示控制规则: $\text{if } A = A_3, B = B_5, \text{ then } C = C_3$

特别地, 当 $k = r_{ij} = 0$ 时, 表示无控制规则, 即对于已知两个输入 A_i 和 B_j , 没有相应的控制规则与之对应

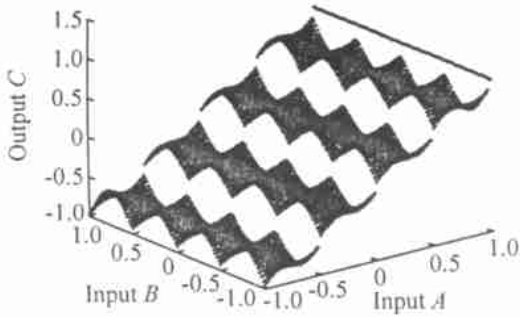
基于式(18) 和(19) 的二维云模型推理非线性映射, 三维可视图如图 2(a) 所示

定义与式(18) 相同的云模型集合, 仅修改控制

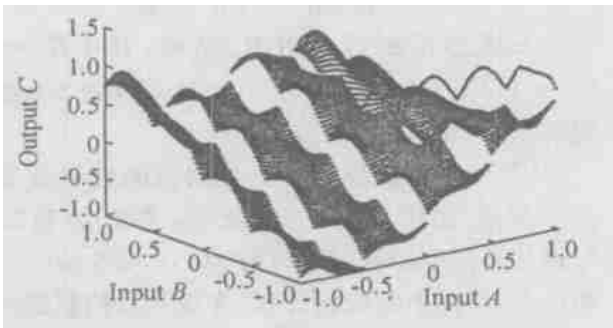
规则如下:

$$R = \{r_{ij}\} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 5 & 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

基于式(18)和(20)的二维云模型推理非线性映射, 三维可视图如图 2(b) 所示



(a) 基于式(18)和(19)的非线性映射



(b) 基于式(18)和(20)的非线性映射

图 2 二维云模型非线性映射

类似于二维云模型输入输出映射的特点, 改变输入和输出的云模型集合定义, 或修改云模型推理规则库, 均可获得不同的二维云模型推理输入输出映射关系。显然, 由于二维云模型的复杂性, 这种变化较一维云模型映射更为复杂, 也不直观。限于篇幅, 本文不作详细介绍。

4 智能控制器设计

控制器所实现的输入输出控制关系, 本质上是一种映射过程, 即从偏差输入到控制量输出的映射。考虑一个一维云模型映射器, 其结构如图 3 所示。映射器由两部分组成: 一维云模型多规则推理和加权平均处理。多规则推理部分实际上是由多个一维单规则推理结构组成。设规则库中的规则数为 N , 输入 x 刺激不同规则的前件部分 $C_{G_{A_1}} \sim C_{G_{A_N}}$, 产生不同的 μ_{N_j} 值, 再经规则的后件 $C_{G_{U_1}} \sim C_{G_{U_N}}$ 处理, 产生大量的云滴 $\text{drop}(y_{N_j}, \mu_{N_j})$ 。这些云滴经过加权平均处理后, 最终得到与输入 x 相对应的定量输出值 y 。

二维云模型映射器相对复杂一些, 但在结构上

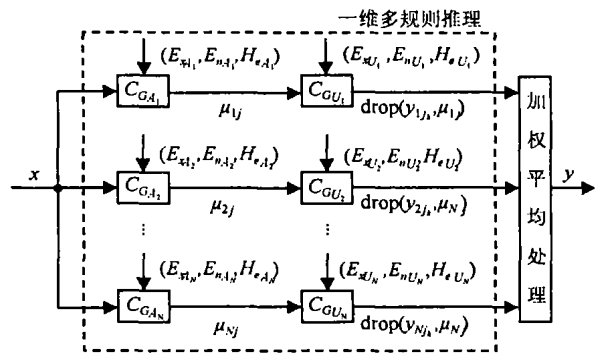


图 3 一维云模型映射器

与一维云模型映射器类似, 如图 4 所示。映射器由两部分组成: 二维云模型多规则推理和加权平均处理。二维多规则推理实际上是由多个二维单规则推理结构组成。设规则库中的规则数为 M , 二维输入 x_A 和 x_B 刺激不同规则的前件部分 $C_{G_{A_1, B_1}} \sim C_{G_{A_M, B_M}}$, 产生不同的 μ_{M_j} 值, 再经规则的后件 $C_{G_{U_1}} \sim C_{G_{U_M}}$ 处理, 产生大量的云滴 $\text{drop}(u_{M_j}, \mu_{M_j})$ 。这些云滴经过加权平均处理后, 最终得到与输入 x_A 和 x_B 相对应的定量输出值 z 。

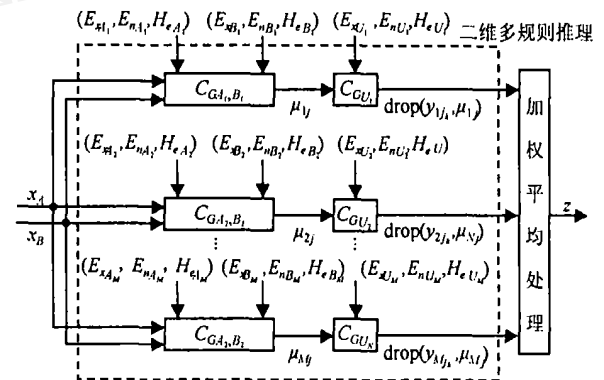


图 4 二维云模型映射器

设偏差 $e \in E = [-1, 1]$, 偏差积分值 $e_i \in E_I = [-1, 1]$, 偏差变化率 $e_c \in E_C = [-1, 1]$ 。定量输入 e_i 经过一维云模型映射器处理, 输出 u_1 控制量。定量输入 e 和 e_c 经过二维云模型映射器处理, 输出 u_{PD} 控制量。设 $u_1 \in U_1 = [-1, 1]$, $u_{PD} \in U_{PD} = [-1, 1]$ 。不失一般性, 用 -1 表示 -100% , 用 $+1$ 表示 $+100\%$ 。称 u_1 到 e 的映射为 I 型云模型控制器, 称 u_{PD} 到 e 的映射为 PD 型云模型控制器。

对于 I 型云模型控制器, 在论域 E_I 和 U_1 上分别定义云模型

$$\begin{aligned} E_{II} &= (-1, 0, 3, 0, 01), \\ E_{I2} &= (-0.5, 0, 3, 0, 01), \\ E_{I3} &= (0, 0, 3, 0, 01), \\ E_{I4} &= (0.5, 0, 3, 0, 01), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_5 &= (1, 0, 3, 0, 01); \\
 U_{11} &= (-1, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{12} &= (-0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{13} &= (0, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{14} &= (0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{15} &= (1, 0, 3, 0, 01).
 \end{aligned} \tag{21}$$

I型云模型控制规则为

$$\begin{aligned}
 \text{if } E_1 = E_{11}, \text{ then } U_1 = U_{11}; \\
 \text{if } E_1 = E_{12}, \text{ then } U_1 = U_{12}; \\
 \text{if } E_1 = E_{13}, \text{ then } U_1 = U_{13}; \\
 \text{if } E_1 = E_{14}, \text{ then } U_1 = U_{14}; \\
 \text{if } E_1 = E_{15}, \text{ then } U_1 = U_{15}
 \end{aligned} \tag{22}$$

对于PD型云模型控制器,在论域 E, E_c 和 U_{PD} 上分别定义云模型

$$\begin{aligned}
 E_1 &= (-1, 0, 3, 0, 01), \\
 E_2 &= (-0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 E_3 &= (0, 0, 3, 0, 01), \\
 E_4 &= (0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 E_5 &= (1, 0, 3, 0, 01); \\
 E_{c1} &= (-1, 0, 3, 0, 01), \\
 E_{c2} &= (-0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 E_{c3} &= (0, 0, 3, 0, 01), \\
 E_{c4} &= (0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 E_{c5} &= (1, 0, 3, 0, 01); \\
 U_{PD1} &= (-1, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{PD2} &= (-0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{PD3} &= (0, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{PD4} &= (0.5, 0, 3, 0, 01), \\
 U_{PD5} &= (1, 0, 3, 0, 01).
 \end{aligned} \tag{23}$$

PD型二维云模型推理规则库共有25条规则,用二维矩阵形式表示为

$$R = \{r_{ij}\} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}. \tag{24}$$

以一维和二维云模型映射器为基础,可以设计一种新的智能控制器,其结构如图5所示。图中信号 e 表示设定值与反馈值的偏差信号,作为控制器的定量输入;信号 $u = K_{u1}z + K_{u2}y$,由两部分组成:二维云模型映射器定量输出 z 和一维云模型映射器定量输出 y ;参数 K_1, K_2, K_3 均为常系数,分别作为偏差信号、偏差变化率和偏差积分值的输入量化因子,用于调整云模型映射器的输入范围;参数 K_{u1} 和 K_{u2}

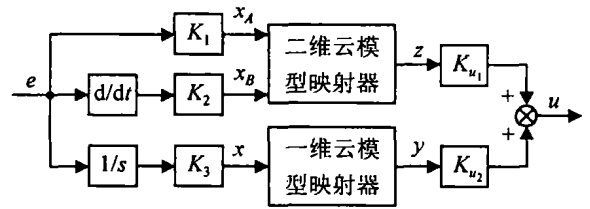


图5 基于云模型映射的智能控制器

为常系数,分别为二维映射器和一维映射器的输出放大倍数,用于调整控制器的驱动范围

该智能控制器由一个二维PD型云模型控制器和一个一维I型云模型控制器组成,称为PD+I型云模型控制器

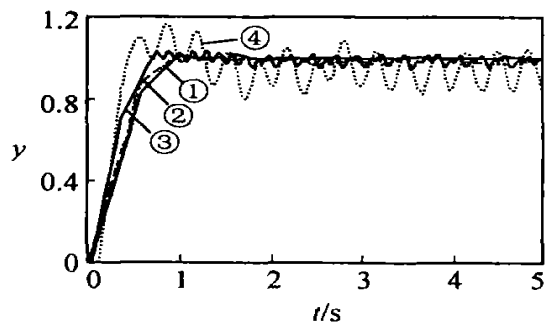
5 仿真结果及分析

首先考虑云模型控制器与常规PD控制器对同一被控对象,在不同时滞情况下的控制性能。被控对象为

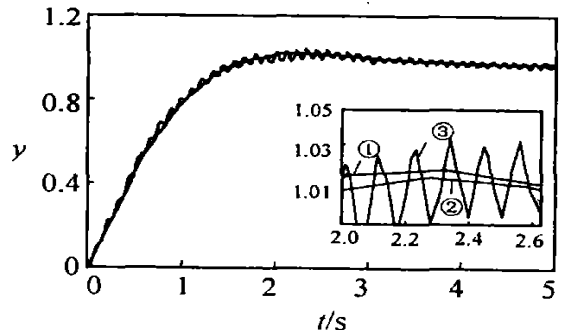
$$\frac{s+2}{s^3+22s^2-13s+43}$$

云模型控制器采用图5结构,其中 $K_1 = K_2 = K_3 = 1, K_{u1} = 85, K_{u2} = 30$ 。常规PD的3个参数分别取 $K_P = 85, K_I = 30, K_D = 65$ 。

PD+I型云模型智能控制器的控制效果如图6(a)所示。图中曲线①、②、③和④分别是云模型控制器在时滞为0, 0.025 s, 0.029 6 s和0.1 s情况下的控制过程。常规PD控制器的控制



(a) 不同时滞下的云模型控制效果



(b) 不同时滞下的PD控制效果

图6 云模型控制与PD控制对比

效果如图 6(b) 所示, 图中曲线 , 曲线 和曲线 分别是 PD 控制器在时滞为 0, 0.025 s 和 0.029 6 s 情况下的控制过程 当时滞为 0.029 6 s 时, PD 控制器从控制过程的上升段开始, 已处于临界振荡状态(参见图中局部放大部分); 当时滞达到 0.1 s 时, PD 控制器已经失控, 控制曲线发散 PD + I 型云模型控制器在时滞达到 0.1 s 时, 并没有发散, 其输出控制量在 0.8 ~ 1.2 之间变化 可以看出, 云模型控制器相对于常规 PD 控制器来说, 对系统时滞的变化更不敏感

考虑文献[16] 提供的 3 组对象模型:

- 1) $\frac{1}{(s + 1)^3}$;
- 2) $\frac{e^{-0.2s}}{s(s + 1)^3}$;
- 3) $\frac{e^{-0.1s}}{s^2 + 0.02s + 1}$

云模型控制器结构仍采用图 5 所示结构, 3 组 PD + I 型云模型控制器中, I 型云模型控制器均采用相同的结构, 其输入云模型定义为

$$\begin{aligned} E_{11} &= (-1, 0.3, 0.001), \\ E_{12} &= (-0.5, 0.3, 0.001), \\ E_{13} &= (0, 0.3, 0.001), \\ E_{14} &= (0.5, 0.3, 0.001), \\ E_{15} &= (1, 0.3, 0.001). \end{aligned}$$

输出云模型为

$$\begin{aligned} U_{11} &= (-1, 0.3, 0.001), \\ U_{12} &= (-0.5, 0.3, 0.001), \\ U_{13} &= (0, 0.3, 0.001), \\ U_{14} &= (0.5, 0.3, 0.001), \\ U_{15} &= (1, 0.3, 0.001). \end{aligned}$$

控制规则定义为

- if $E_1 = E_{11}$, then $U_1 = U_{11}$;
- if $E_1 = E_{12}$, then $U_1 = U_{12}$;
- if $E_1 = E_{13}$, then $U_1 = U_{13}$;
- if $E_1 = E_{14}$, then $U_1 = U_{14}$;
- if $E_1 = E_{15}$, then $U_1 = U_{15}$.

控制对象 1) 的 PD 型云模型控制器参数设计如

下: $K_1 = 1, K_2 = 25, K_3 = 1, K_{u_1} = 9, K_{u_2} = 0.1$.

误差参数云模型为

$$\begin{aligned} E_1 &= (-1, 0.3, 0.001), \\ E_2 &= (-0.5, 0.3, 0.001), \\ E_3 &= (0, 0.3, 0.001), \\ E_4 &= (0.5, 0.3, 0.001), \\ E_5 &= (1, 0.3, 0.001). \end{aligned}$$

误差变化率参数云模型定义为

$$\begin{aligned} E_{c_1} &= (-1, 0.3, 0.001), \\ E_{c_2} &= (-0.5, 0.3, 0.001), \\ E_{c_3} &= (0, 0.3, 0.001), \\ E_{c_4} &= (0.5, 0.3, 0.001), \\ E_{c_5} &= (1, 0.3, 0.001). \end{aligned}$$

输出参数云模型定义为

$$\begin{aligned} U_1 &= (-1, 0.3, 0.001), \\ U_2 &= (-0.5, 0.3, 0.001), \\ U_3 &= (0, 0.3, 0.001), \\ U_4 &= (0.5, 0.3, 0.001), \\ U_5 &= (1, 0.3, 0.001). \end{aligned}$$

PD 型控制规则库为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 3 & 3 \\ 2 & 2 & 3 & 4 & 4 \\ 3 & 4 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

控制对象 2) 和 3) 的 PD 型云模型控制器完全相同, 但不同于控制对象 1) 的设计.

误差参数云模型定义为

$$\begin{aligned} E_1 &= (-1, 0.3, 0.01), \\ E_2 &= (-0.4, 0.3, 0.01), \\ E_3 &= (-0.08, 0.3, 0.01), \\ E_4 &= (0.08, 0.3, 0.01), \\ E_5 &= (0.4, 0.3, 0.01), \\ E_6 &= (1, 0.3, 0.01). \end{aligned}$$

误差变化率参数云模型定义为

$$\begin{aligned} E_{c_1} &= (-1, 0.3, 0.01), \\ E_{c_2} &= (-0.5, 0.3, 0.01), \\ E_{c_3} &= (0, 0.3, 0.01), \\ E_{c_4} &= (0.5, 0.3, 0.01), \\ E_{c_5} &= (1, 0.3, 0.01). \end{aligned}$$

输出参数云模型定义为

$$\begin{aligned} U_1 &= (-1, 0.3, 0.01), \\ U_2 &= (-0.5, 0.3, 0.01), \\ U_3 &= (0, 0.3, 0.01), \\ U_4 &= (0.5, 0.3, 0.01), \\ U_5 &= (1, 0.3, 0.01). \end{aligned}$$

PD 型控制规则库为

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 5 \end{bmatrix}$$

对象2)的控制参数为: $K_1 = 3, K_2 = 9, K_3 = 0, K_{u_1} = 0.19, K_{u_2} = 0$ 对象3)的控制参数为: $K_1 = 3, K_2 = 4, K_3 = 1, K_{u_1} = 1.9, K_{u_2} = 1.21$ 。所设计的云模型控制器对3种不同被控对象的控制过程如图7所示。曲线①的稳差范围是: $+1.5\% \sim -2.5\%$; 曲线②的稳差范围是: $+1.4\% \sim -3.6\%$; 曲线③的稳差范围是: $+3.2\% \sim -3.3\%$ 。与文献[16]所设计的控制器的控制曲线相比, 本文所设计的云模型控制器在总体上优于文献[16]所设计的PD控制器。

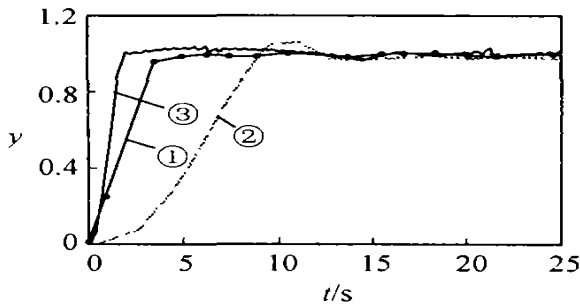


图7 对不同对象的云模型控制

6 结论

本文设计的智能控制器不要求给出被控对象的精确模型, 仅依据人的感觉和逻辑判断, 将人的自然语言表达的定性控制经验, 通过云模型转换到语言控制规则器中, 能较好地实现从定量到定性, 再从定性到定量的控制映射。基于此方法设计的智能控制器, 控制策略明确直观, 推理计算简单, 只需对一维和二维云模型的数字特征参数和控制规则稍加修改, 便可实现不同的控制映射。仿真实验表明, 该智能控制器的设计是成功的, 具有较高的应用价值。

参考文献(References)

- [1] 李德毅, 刘常昱, 杜鹤, 等. 不确定性人工智能[J]. *软件学报*, 2004, 15(9): 1-13
(Li D Y, Liu C Y, Du Y, et al. Artificial Intelligence with Uncertainty [J]. *J of Software*, 2004, 15(9): 1-13)
- [2] 李德毅, 淦文燕, 刘璐莹. 人工智能与认知物理学[A]. *中国人工智能进展第10届全国学术年会论文集*[C]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003: 6-15
(Li D Y, Gan W Y, Liu L Y. Artificial Intelligence and Cognitive Physics [A]. *CAA I-10* [C]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003: 6-15)
- [3] Wang S L, Li D R, Shi W Z, et al. Cloud Model Based Spatial Data Mining [J]. *Geographical Information Science*, 2003, 9(2): 67-78
- [4] Li D Y, Han J, Chan E, et al. Knowledge Representation and Discovery Based on Linguistic Atoms [A]. *Proc of the 1st Pacific Asia Conf on KDD & DM* [C]. Singapore, 1997: 89-97.
- [5] Li D Y, Di K C, Li D E, et al. Mining Association Rules with Linguistic Cloud Models [A]. *PA KDD '98 Proc of the Second Pacific Asia Conf on Knowledge Discovery and Data Mining* [C]. Melbourne, 1998: 392-394
- [6] 邱凯昌, 李德毅, 李德仁. 云理论及其在空间数据挖掘和知识发现中的应用[J]. *中国图象图形学报*, 1999, 11(4): 930-935
(Di K C, Li D Y, Li D R. Cloud Theory and Its Applications in Spatial Data Mining and Knowledge Discovery [J]. *J of Image and Graphics*, 1999, 11(4): 930-935)
- [7] 刘常昱, 戴晓军, 李德毅. 基于云 x 信息的逆向云新算法. *系统仿真学报*, 2004, 16(11): 2417-2420
(Liu C Y, Dai X J, Li D Y. A New Algorithm of Backward Cloud [J]. *J of Systems Simulation*, 2004, 16(11): 2417-2420)
- [8] 张飞舟, 范跃祖, 孙先仿. 基于云模型的导航系统模糊可靠性评测分析[J]. *自动化学报*, 2002, 28(1): 126-130
(Zhang F Z, Fan Y Z, Sun X F. Assessment and Analysis of Fuzzy Reliability Based on Cloud Models in Aircraft Navigation System [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(1): 126-130)
- [9] 杨朝晖, 李德毅. 二维云模型及其在预测中的应用[J]. *计算机学报*, 1998, 21(11): 961-969
(Yang Z H, Li D Y. Planar Model and Its Application in Prediction [J]. *Chinese J of Computers*, 1998, 21(11): 961-969)
- [10] Li D Y, Cheng D W, Shi X M, et al. Uncertainty Reasoning Based on Cloud Models in Controllers [J]. *J of Computer Science and Mathematics with Applications*, 1998, 35(3): 99-123
- [11] 张飞舟, 范跃祖, 李德毅. 基于隶属云发生器的智能控制[J]. *航空学报*, 1999, 20(1): 89-92
(Zhang F Z, Fan Y Z, Li D Y. Intelligent Control Based on Membership Cloud Generators [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1999, 20(1): 89-92)
- [12] 张飞舟, 范跃祖, 沈程智, 等. 利用云模型实现智能控制倒立摆[J]. *控制理论与应用*, 2000, 17(4): 519-523
(Zhang F Z, Fan Y Z, Shen C Z, et al. Intelligent Control Inverted Pendulum with Cloud Models [J]. *Control Theory and Applications*, 2000, 17(4): 519-523)

(下转第 877 页)

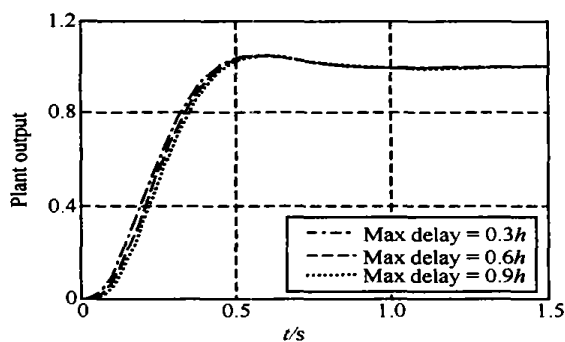


图 4 分段时戳DMC 算法的控制品质

4 结 论

本文针对NCS 中小于一个采样周期的随机延迟, 提出了分段时戳DMC 算法, 可以显著地改善随机NCS 的控制品质. 由于引入了分段近似算法, 与标准DMC 算法中的在线计算量相当, 从而解决了TSMPC 算法中控制器在线计算量过大的问题. 该算法可以方便地处理小于一个采样周期的固定延迟, 并可推广到多变量控制系统.

参考文献(References)

- [1] Ye H. *Research on Networked Control Systems* [D]. University of Maryland College Park, 2000
- [2] Alves M, Tovar E. *Ethernet Goes Real-time: A Survey on Research and Technological Developments* [R]. Porto: Polytechnic Institute of Porto, 1998
- [3] Tipsuan Y, Chow M Y. Control Methodologies in Networked Control Systems [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [4] Luck R, Ray A. Experimental Verification of a Delay Compensation Algorithm for Integrated Communication and Control Systems [J]. *Int J of Control*, 1994, 59(6): 1357-1372

- [5] Luck R, Ray A. An Observer-based Compensator for Distributed Delays [J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903-908
- [6] Goktas F. *Distributed Control of Systems over Communication Networks* [D]. University of Pennsylvania, 2000
- [7] 于之训, 陈辉堂, 王月娟. 具有随机通讯延迟和噪声干扰的网络系统控制 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 518-522
(Yu Z X, Chen H T, Wang Y J. Control of Network System with Random Communication Delay and Noise Disturbance [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 518-522)
- [8] Nilsson J. *Real-time Control Systems with Delays* [D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998
- [9] Srinivasagupta D, Schattler H, Joseph B. Time-stamped Model Predictive Control: An Algorithm for Control of Processes with Random Delays [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2004, 28(8): 1337-1346
- [10] 杜继宏, 谢学书. *自动控制原理(下册)* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992
(Du J H, Xie X S. *Automatic Control Principle (Vol 2)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992)
- [11] 席裕庚. *预测控制* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993
(Xi Y G. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993)
- [12] Henriksson D, Cervin A, Arzen K E. TrueTime: Simulation of Control Loops under Shared Computer Resources [A]. *Proc of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control* [C]. Barcelona, 2002
- [13] Henriksson D, Cervin A. *TrueTime 1.13 Reference Manual* [M]. Lund: Lund Institute of Technology, 2003

(上接第 872 页)

- [13] 李众, 杨一栋. 基于混合维云模型定性推理的调距桨螺距控制 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2003, 149(2): 162-167.
(Li Z, Yang Y D. The Controllable Pitch Propeller Control Based on Qualitative Reasoning of Variant Dimension Cloud Model [J]. *J of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 35(2): 162-167.)
- [14] 李众, 高键. 电液伺服变距系统的二维云模型控制研究 [J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(5): 1050-1052
(Li Z, Gao J. Study on Two-dimension Cloud Model

Control for Electric-hydraulic Servo Variable Pitch [J]. *J of System Simulation*, 2003, 16(5): 1050-1052)

- [15] 高键, 姜长生, 李众. 一种新的云模型控制器设计 [J]. *信息与控制*, 2005, 34(2): 157-162
(Gao J, Jiang C S, Li Z. A Novel Design of Controller Based on Cloud Model [J]. *Information and Control*, 2005, 34(2): 157-162)
- [16] Derek P A, Majhi S. Limitations of PD Controllers [A]. *Proc of the American Control Conf* [C]. San Diego, 1999: 3843-3847.