

文章编号: 1001-0920(2001) 02-0245-04

具有模糊接口的智能控制系统混合模型

张苗苗, 谢剑英, 张学军
(上海交通大学 自动化系, 上海 200030)

摘要: 针对智能控制系统既包含连续变量又包含离散事件的特点, 给出了统一的混合模型结构。下层受控对象的状态演化导致事件的发生, 并由上层的离散事件系统控制器做出监督决策, 发出相应的控制命令。上下层之间的接口设计采用模糊逻辑的表示方法, 具有一定的智能性, 可处理受控对象的多模型结构以及对象模型的不确定性。

关键词: 智能控制系统; 混合系统; 模糊逻辑接口; 离散事件系统

中图分类号: TP 301

文献标识码: A

Hybrid Model of Intelligent Control System with Fuzzy Logical Interface

ZHANG Miao-miao, XIE Jian-ying, ZHANG Xue-jun

(Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: According to the character of intelligent control system including both continuous variables and discrete events, an unified hybrid model is given. The state evolution of low-level controlled plant conduces to event occurrence, whenever high-level discrete event system controller issues corresponding control commands and makes decision. Fuzzy logical tool is used to design the interface, which has certain intelligence and suits to the settlement of plant's multi-model structure as well as structure uncertainty.

Key words: intelligent control system; hybrid system; fuzzy logical interface; discrete event system

1 引言

智能控制系统(ICS)可看成是由基于知识的决策器和受控对象组成的系统^[1]。决策器通常用离散事件系统(DES)建模,受控对象是连续变量系统(CVDS)。所以说,ICS是DEDS和CVDS相互交互的一种混合动态系统(HDS)。

本文从混合系统的角度看待ICS的建模问题。混合系统的建模方法很多,如Collu等^[2]针对磁盘

控制器讨论了DEDS模型和接口的一致性问题,Peleties等^[3]介绍了基于Petri网的DEDS设计及基于事件的接口函数设计。本文则利用混合系统的建模机制,给出了ICS的统一混合模型结构,结构自上而下包括DES控制器、接口和CVDS。接口部分包括模糊解释器和激发器,解释器以对象的连续信号作为输入,并产生合适的事件信号作为上层决策器的输入。该模型具有一定的智能性,并可处理系统的不确定性问题。

收稿日期: 1999-08-20; 修回日期: 2000-02-14

作者简介: 张苗苗(1971—),女,安徽宿州人,博士生,从事混合系统的分析与验证研究;谢剑英(1940—),男,福建龙岩人,教授,博士生导师,从事复杂工业过程控制、离散事件与系统等研究。

2 ICS 的混合模型

ICS 的混合模型结构如图 1 所示。

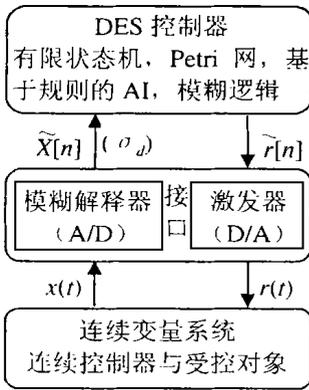


图 1 具有模糊接口的 ICS

该结构自上而下包括 DES 控制器、接口和连续变量系统 3 部分。控制器具有决策功能，它监视下层系统的状态演化，当下层有对象事件产生并经接口传至上层时，控制器启动相应的控制决策；接口的作用是提供上下层之间的通讯，因为 DES 和 CVDS 采用不同的数据类型和表达方式，故两者不能直接相连。CVDS 的受控对象为一线性或非线性系统，其演化可写成微分方程的形式，即

$$\dot{x}(t) = f(x(t), r(t)) \quad (1)$$

其中， $x(t) \in R^n, r(t) \in R^m, f: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ 为满足 Lipschitz 条件的连续函数。该部分包含了混合模型所有的连续动态及传统的连续控制器。上层控制器由离散事件系统充当监督决策的功能，这里采用 5 元组的可决策自动机 H 对其建模，其形式为

$$H = (S, X, R, \delta, \Phi) \quad (2)$$

其中， S 为控制器的状态， X 为对象符号集， R 为控制器符号； $\delta: S \times X \rightarrow S$ 为状态转移函数， $\Phi: S \rightarrow R$ 为输出函数。符号集 R 由控制器产生，故称其为控制器符号。同理，称 X 为对象符号。控制器的行为表示为

$$\begin{cases} \tilde{s}[n] = \delta(\tilde{s}[n-1], \tilde{x}[n]) \\ \tilde{r}[n] = \Phi(\tilde{s}[n]) \end{cases} \quad (3)$$

其中， $\tilde{s}[n] \in S, \tilde{x}[n] \in X, \tilde{r}[n] \in R, n$ 为符号在其序列的顺序，控制器的输入输出均为符号序列。

3 混合模型的接口设计原则

接口部分包括模糊解释器和激发器两个子系统^[4]。解释器相当于 A/D 转换，它将下层连续信息转换成能被上层识别的符号信息；而激发器则相当于 D/A 转换，它将控制器发出的控制符号命令转换

成下层可以接受的控制输入信号。其中解释器采用了模糊技术。

3.1 模糊解释器

虽然连续系统随时间进行连续演化或分段演化，但它与 DES 的交互是离散的，通过切换集 S 可划分连续状态空间， S 定义为两个子空间的交集。当连续状态 x 到达某一特定区域，即进入或穿越与其有关的一个切换集时，便产生一个对象事件 σ ；当穿越多个切换集时，则应产生多个对象事件。 $\sigma \in \Sigma \{e\}, \Sigma$ 为非空有限字母集，表示对象事件集合， e 表示无事件发生。

由图 1 可以看出，模糊解释器产生的对象符号 X 主要包括 σ ，它是解释器的最终环节——去模糊化后的输出， $\sigma \in \Sigma \{e\}$ 。DES 控制器根据从解释器获知的对象事件发出合适的控制符号，并经激发器 D/A 对连续系统启动一个控制策略。

解释器之所以用模糊逻辑建模，主要基于以下几点考虑：

- 1) 对 DES 控制器而言，事件信息是模糊的，因为通过对受控对象的信号观察可得到多种解释。
- 2) 受控对象观测器的描述一般采用微分或差分方程，不易扩展到离散事件系统。但对对象和离散事件的观测器则可利用模糊逻辑框架来统一。
- 3) 模糊逻辑框架的使用有利于将智能知识融合在观测器的设计中。

与许多模糊控制器一样，该解释器包括模糊化、模糊关系记忆 (FAM, 或模糊解释规则) 和去模糊化 3 部分，如图 2 所示。



图 2 ICS 的模糊接口

去模糊化可在 DES 控制器之前或之后，也可在控制器内进行^[5]，本文采用在控制器之前进行。模糊化部分将采集的信号向量 $x(t)$ 译成在语言变量零、负、正等上的值，记为 m_i ，语言变量记为 Y 。FAM 是一规则解释库，有如下 If-Then 形式

$$\text{If } x_1 = Y_{1i}, x_2 = Y_{2j}, \dots, \text{ Then } \sigma = \sigma_l$$

$$\sigma \in \Sigma \{e\}, l \in R$$

FAM 的模糊集输出为集合上的每个事件发生的可信度，即

$$\sigma = (\sigma_1/\alpha_1, \sigma_2/\alpha_2, \dots, \sigma_m/\alpha_m), m \in R$$

可信度 α 通过最小-最大模糊蕴含关系求得，一般为非零，这说明从信号解释出的事件可能不止

一个。应注意的是,由于采用在 DES 控制器之前去模糊化的方法, σ_i 对控制器而言是非模糊的,只在解释器里被看作模糊量。

图 2 的去模糊化过程不同于传统的去模糊化器,其输出一事件。下面给出去模糊化过程的两种方法。

方法 1 最大可信度去模糊化

去模糊化后的输出 α 对应可信度最大的事件,并作为 DES 控制器的输入,即

$$\sigma_i = \sigma_n, \quad n = \arg\{\max_i(\alpha_i)\} \quad (4)$$

去模糊化器可设置可信度的阈值 θ 。如果 α 事件发生的最大可信度小于 θ , 则去模糊化器对 DES 控制器产生一个信号,表明模糊解释不可信,要求采集更多的数据信息。

方法 2 最大似然重心去模糊化

由于 Σ 的所有事件在解释器中被认为是模糊集,为简便起见,隶属度函数取为三角形。根据重心去模糊化法,可得重心值为

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \alpha_i \sigma_i}{\sum \alpha_i}, \quad \alpha_i = \sum \{c_j\} \quad (5)$$

由此解释出事件 σ^i 为

$$\sigma_i = \sigma_m, \quad m = \arg\{\min_i |\bar{\sigma} - \sigma_i|\} \quad (6)$$

如果 $\bar{\sigma}$ 与两个不同离散事件的距离相等,则去模糊化器对 DES 控制器产生一个信号,表明模糊解释不可信,要求采集更多的数据信息。

3.2 激发器

激发器(D/A)把离散控制器符号序列转换成对象控制信号,利用函数 $Y: \tilde{R} \rightarrow R^m$

$$r(t) = \sum_{n=0} Y(\tilde{r}[n])I(t, \tau[n], \tau[n+1]) \quad (7)$$

其中 $I(t, \tau[n], \tau[n+1]) = \begin{cases} 1, & \tau \in [\tau[n], \tau[n+1]) \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$

$\tau[n]$ 表示第 n 个控制符号产生的时刻。

4 模型实例

下面以小车倒立摆的平衡控制问题为例来说明上述思想。受控对象倒立摆的动力学方程为

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= x_2 \\ \ddot{x}_2 &= \frac{g \sin(x_1) - a m l x_2^2 \sin(2x_1) / 2 - a \cos(x_1) u}{4l/3 - a m l \cos^2(x_1)} \end{aligned}$$

其中, x_1 表示倒立摆与垂直线的偏角, x_2 表示角速度,重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, 摆的质量 $m = 2.0 \text{ kg}$,

小车的质量 $M = 8.0 \text{ kg}$, 摆的长度 $l = 1.0 \text{ m}$, $a = 1/(m + M)$, u 是作用于小车的作用力。

根据实际要求,通过 x_1, x_2 平面上的超曲面,可对其运行状态划分成多个子空间,每个子空间对应一定的线性系统。当系统状态由一个子空间经切换集进入另一个子空间时,便产生一个对象事件,而当对象状态的切换集之间有交集时,则产生多个事件。这里,状态空间 X 被划分为 5 个工作区域,即

$$X = \bigcup_{i=1}^5 \Omega_i$$

其中 $\Omega_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 为紧致集,表示第 i 个工作区域,并满足 $\Omega_i \cap \Omega_j = \emptyset (j = 1, 2, \dots, 5 \text{ 且 } i \neq j)$ 。每个区域 Ω_i 对应的线性系统描述为 $\dot{x} = A_i x + B_i u_i, u_i$ 定义为 $u_i = -k_i x$, 其设计可根据极点配置或 H_∞ 技术在模型下层进行,以满足系统的控制要求和目标。

接口部分的解释器用 5 条模糊规则来描述系统从某一工作区域进入另一工作区域的事件发生,CF 表示该规则成立的置信度。

Rule 1: If x_1 在 0 附近 And x_2 在 0 附近

Then 进入工作区域 1 (CF = 0.92);

Rule 2: If x_1 在 0 附近 And x_2 在 ± 4 附近

Then 进入工作区域 2 (CF = 0.89);

Rule 3: If x_1 在 $\pm \pi/3$ 附近 And x_2 在 0 附近

Then 进入工作区域 3 (CF = 0.79);

Rule 4: If x_1 在 $\pm \pi/3$ 附近 And x_2 在 ± 4 附近

Then 进入工作区域 4 (CF = 0.84);

Rule 5: If x_1 在 $\pm \pi/3$ 附近 And x_2 在 ∓ 4 附近

Then 进入工作区域 5 (CF = 0.95)。

上层控制器为具有 5 个离散状态的自动机,每个状态分别对应于受控对象的演化方式。控制器接受对象事件后,根据当前离散状态发出相应的控制符号命令,进行工作方式切换。受控对象则以切换后的方式进行演化,直到演化状态进入另一工作区域,又出现新的对象事件产生新的切换。

5 结 论

本文在连续变量模型和离散事件模型的基础上,给出了 ICS 统一的混合模型。在接口设计中引进模糊逻辑,可处理下层信息的不确定性,使所设计的混合模型具有一定的智能性,并有利于对下层系统的连续状态进行空间划分,从而将非线性系统的时间演化转化为不同工作区域的线性系统的时间演化,简化了受控对象的设计工作。

5 结 语

本文给出了 H_2/l_1 混合优化问题的上逼近算法, 并通过算例验证了该算法。但由于收敛步数可能很大, 从而使得无法判断何时结束逼近。为克服这种情况, 可将文献[4] 给出的 H_2/l_1 混合优化问题的下逼近算法与上逼近算法相结合, 以判断何时收敛。文献[3] 给出了基于两个相同闭环传递函数的 H_2/l_1 混合优化问题的求解方法, 并指出算法可在有限步内终止。这正是我们今后在基于两个不同闭环传递函数的 H_2/l_1 混合优化问题中的研究方向。

(上接第 247 页)

参考文献:

- [1] Y F An, G Pang, D Aplevich. A hybrid model for intelligent control system[J]. J of Intelligent and Robotics System, 1994, 10(3): 221-241.
- [2] A Gollu, P Varaiya. Hybrid dynamic system[A]. Proc of the 28th CDC[C]. Tamps: IEEE Control System Soc, 1989. 2708-2712.
- [3] P Peleties, R Varaiya. A modelling strategy with event structure for hybrid systems[A]. Proc of the 28th CDC

(上接第 249 页)

3 结 语

本文利用能控集和能达集的概念, 给出了一类混合动态系统完全能控、完全能达的充分必要条件, 并指出二者是等价的。这一代数判定条件类似于正常线性系统的相关条件, 表明二者有一定的相似性。这一研究工具可用于研究更一般的混合动态系统的能控性。

参考文献:

- [1] Francis B A. On robustness of the stability of feedback systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1980, 25(4): 817-818.
- [2] Voulgaris P. Optimal H_2/l_1 control: The SISO case[J]. IEEE Proc Decision and Control, 1994, 4(4): 3181-3186.
- [3] Voulgaris P. Optimal H_2/l_1 control via duality theory [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1995, 40(11): 1881-1888.
- [4] 吴俊. H_2/l_1 混合优化控制研究[R]. 杭州: 浙江大学, 1996.
- [5] 寇述舜. 凸分析与凸二次规划[M]. 天津: 天津大学出版社, 1994.

参考文献:

- [C]. Tamps: IEEE Control System Soc, 1989. 1308-1313.
- [4] Rafael Fierro, Frank L Lewis, Kai Liu. Hybrid control system design using a fuzzy logic interface[J]. Circuits Systems Signal Proceeding, 1998, 17(3): 401-419.
- [5] Lin F, Sun J, Wang L Y. A hybrid control architecture with fuzzy interface for intelligent control[A]. Proc of the 31st IEEE Conf on Decision and Control [C]. Tamps: IEEE Control System Soc, 1992. 2539-2544.

参考文献:

- [1] Michael S B. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems[J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1998, 43(4): 475-482.
- [2] Ezzine J, Haddad H H. Controllability and observability of hybrid systems[J]. Int J Contr, 1989, 49(6): 2045-2055.
- [3] 谢广明, 郑大钟. 线性切换系统的能控性和能达性[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(增刊): 135-140.