

模糊多目标优化控制

贾利民 张锡第

(铁道科学研究院通信信号研究所·北京, 100081)

摘要: 本文提出了对复杂过程进行高质量控制的模糊多目标优化控制(FMOC), 它由两部分组成: 模糊多目标预测控制(FMPC)和自适应的模糊多目标控制(AFMPC). FMOC 不仅能体现操作人员控制行为的多目标性, 而且还能反映其心理过程对控制行为的影响, 它基于对控制目标的全面评价来实现对过程的控制. 将 FMOC 用于列车运行控制的仿真, 结果证明了它的适用性.

关键词: 模糊控制; 预测控制; 多目标化; 自适应控制; 列车自动控制; 优化控制

1 引言

近年来, 许多基于微型计算机的自动控制系统已被开发用来代替操作人员实现对一些复杂过程的控制. 但在很多情况下, 这些复杂的控制器的控制效果比熟练的操作人员的控制效果要差. 原因之一是控制所依据的过程模型不能足够准确地反映被控过程的真实行为; 另外一个重要原因则在于这些控制器的控制目标的单一性. 而操作人员则是通过对多个目标的估价来进行控制的. 虽然在大多数情况下, 这些目标都是用语言表达的, 是不精确的, 但却可以根据操作人员的知识和经验用适当的模糊集^[6]来表征. 用传统的控制方法无法对这类含有结构不确定性过程的高品质控制. 已有的模糊控制方法^[2,4,5]虽然在处理不确定性和启发式知识方面, 在对具有某些不确定性的过程控制方面比传统的控制及最优控制优越, 但是这类模糊控制方法是后果无关的, 即它们不能反映操作者对控制目标的实时估价. 为此本文提出模糊多目标预测控制(FMPC), 以及具有变结构特性的自适应模糊多目标预测控制(AFMPC). FMPC 和 AFMPC 就构成了模糊多目标优化控制(FMOC). FMOC 是多目标的、后果相关的模糊控制, 它已被用于列车运行过程的控制, 仿真的结果证明了其适用性.

2 模糊多目标预测控制(FMPC)

与其它预测控制方法^[8]类似, FMPC 也是利用过程模型根据对过程输出的预测来实现控制的, 只是 FMPC 对过程的模型没有任何限制, 并且其控制的导出取决于对多个目标的估价, 而不是仅仅跟踪一个参考轨迹或设定值. 因而从构成上讲 FMPC 比一般的预测控制方法具有更大的灵活性和适用于更一般、更复杂的情形.

FMPC 是通过以下步骤实现的:

Step 1 定义可能的控制集和控制目标;

Step 2 根据过程模型和控制算法预测每一个控制下的过程输出;

Step 3 估价过程输出对有关目标的满足程度;

Step 4 选择使过程输出最能满足控制目标的控制为对过程的控制输出.

即 FMPC 是通过对控制后果进行预测,并且根据控制效果是否满足目标来选择控制输出的. 为方便讨论,我们在此只涉及一步预测控制,而多步甚至长期预测控制可以以相同的方式讨论. 下面给出 FMPC 的详细算法.

设被控过程的模型是

$$\begin{cases} s(t) = \Phi(s(t-1), u(t-1)), \\ y(t) = \Psi(s(t)) = \Psi \circ \Phi(s(t-1), u(t-1)). \end{cases} \quad (1)$$

其中 $s(t) \in S, y(t) \in Y$ 和 $u(t) \in U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 分别是过程的状态变量矢量, 过程输出和控制; 映射 $\Phi: S \times U \rightarrow S$ 和 $\Psi: S \rightarrow Y$ 分别表征了过程的状态转移特性和输出特性, 它们根据具体情况可以是精确的或模糊的, $\circ$ 是映射复合算子.

控制目标集 $G = \{G_1, G_2, \dots, G_k\}$ 可以用一组适当论域上的模糊集来表征, 其隶属函数定义为 $\mu_{G_j}: Y \rightarrow [0, 1], j = 1, 2, \dots, k$. 于是, 预测输出 $\hat{y}(t+1)$ 对目标 G_j 的满足程度为

$$\mu_{G_j}(\hat{y}(t+1)) = \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t))), \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

它也是当 t 时刻过程状态矢量为 $s(t)$ 时, 控制 $u(t)$ 对目标 G_j 的满足程度. 则仅对目标 G_j 来说, 其在控制集 U 上导出的最优控制集为 C_{G_j} , 其隶属函数由 μ_{G_j} 导出为

$$\mu_{C_{G_j}}(u_i) = \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t-1), u(t-1) = u_i)), \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, n, \\ j = 1, 2, \dots, k. \end{matrix} \quad (3)$$

由此即可得 t 时刻的最优控制为

$$u_{G_j} = \{u_{G_j} / \mu_{C_{G_j}}(u_{G_j}) = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{C_{G_j}}(u_i)\}, \quad j = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

即最优控制是对最优控制集 C_{G_j} 具有最大隶属度的控制.

当考虑所有目标 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 时, 我们得到

$$\mu_{G_j}(\hat{y}_i(t+1)) = \mu_{G_j}(\hat{y}_i(t+1)) = \odot \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

其中 $\hat{y}_i(t+1)$ 是当 $u(t) = u_i$ 时的过程输出的预测值, $\odot$ 是对应于集合合取运算的一个算子, 其作用是聚合所有 k 个目标. 此时各目标的聚合 $G = \bigcap_{j=1}^k G_j$ 即为过程输出所应满足的总目标. 当 $\odot$ 取极大化算子 $\max$ 或极小化算子 $\min$ 时, 被分别称为乐观聚合或悲观聚合^[2]. 通常 $\odot$ 取作 $\min = \wedge$, 则 t 时刻由所有这些目标导出的最优控制集 C_G 为

$$\mu_{C_G}(u_i) = \mu_{C_G}(\hat{y}_i(t+1)) = \bigwedge_j \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

将式(3)代入上式得 $\mu_{C_G}(u_i) = \bigwedge_j \mu_{C_{G_j}}(u_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$

显然, 此时的最优控制集是各目标分别导出的最优控制集的聚合. 而 t 时刻的最优控制 u_o 应是对 C_G 具有最大隶属度的控制, 即

$$u_o = \{u_o / \mu_{C_G}(u_o) = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{C_G}(u_i)\} = \{u_o / \mu_{C_G}(u_o) = \bigvee_j \bigwedge_j \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i))\}. \quad (8)$$

从以上可以看出, 通过估价控制 $u(t) = u_i$ 时的预测输出 $\hat{y}_i(t+1)$ 对目标 $G = \bigcap_{j=1}^k G_j$ 的满足程度, FMPC 选择具有最佳控制效果的控制作为 t 时刻对过程的控制输出.

在上面的讨论中, 各目标 $G_1, G_2, \dots, G_k$ 对于控制的导出是同等重要的. 但实际应用中, 各控制目标的重要性是不一样的, 而这种差别应该在控制中得到体现. 用权重来表征各目

标不同的重要性. 若权重集为 $W = \{w_j/j=1, 2, \dots, k\}$, 则此时控制应满足的目标成为

$$G = \bigcap_{j=1}^k (G_j \Delta w_j). \quad (9)$$

其中 Δ 是加权算子. 于是, 由式(5), (6)可得目标 G 导出的最优控制集为

$$\begin{aligned} \mu_{c_0}(u_i) &= \mu_{c_0}(\hat{y}_i(t+1)) = \mu_{\bigcap_j (G_j \Delta w_j)}(\hat{y}_i(t+1)) \\ &= \bigwedge_j \mu_{(G_j \Delta w_j)}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i)), \quad i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (10)$$

我们假设权重 w_j 与过程行为无关, 则上式成为

$$\mu_{c_0}(u_i) = \bigwedge_j \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

将上式代入式(8)可得 t 时刻的最优控制为

$$\begin{aligned} u_o &= \{u_o / \mu_{c_0}(u_o) = \max_{i=1, \dots, n} \mu_{c_0}(u_i)\} \\ &= \{u_o / \mu_{c_0}(u_o) = \bigvee_j \bigwedge_j \mu_{G_j}(\Psi \circ \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j\}. \end{aligned} \quad (12)$$

从以上可以看出, 加权算子 Δ 对最优控制的导出有重要的影响. Δ 的定义取决于具体的应用场合, 当我们取算术加权时, Δ 被定义为算术积, 并且各权重 w_j 满足约束 $\sum_{j=1}^k w_j = 1$. 而当使用指数加权时, Δ 则被定义为指数运算. 当 Δ 的定义确定后, 即可由式(12)获得在这种目标加权方式下的最优控制.

以上给出的 FMPC 算法, 在实际应用中, 可以表示成具有如下形式的 n 条规则:

$$\begin{aligned} R_i: & \text{IF } (u(t) \text{ IS } u_i \rightarrow y(t+1) \text{ SATISFY } \bigcap_{j=1}^k (G_j \Delta w_j)) \\ & \text{THEN } u(t) \text{ IS } u_i \\ & \text{ELSE} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} R_{i+1}: & \text{IF } (u(t) \text{ IS } u_{i+1} \rightarrow y(t+1) \text{ SATISFY } \bigcap_{j=1}^k (G_j \Delta w_j)) \\ & \text{THEN } u(t) \text{ IS } u_{i+1} \\ & \vdots \end{aligned}$$

其中 R_i 是对应于第 i 个控制的控制规则, 其意义是: 若当 $u(t) = u_i$ 时, 过程输出 $y(t+1)$ 满足目标 $\bigcap_j (G_j \Delta w_j)$, 则取 u_j 作为 t 时刻的控制输出. 从式(13)可看出, FMPC 是后果相关控制(RRC), 而 FMPC 所采取的推理是后果相关推理(RRR). 规则 R_i 是否被激发, 取决于控制 u_i 能否导致最佳控制效果, FMPC 一般结构如图 1 所示.

3 自适应的模糊多目标预测控制(AFMPC)

从以上可以看出, 虽然 FMPC 基本上反映了操作人员对复杂过程的控制行为, 但它所反映的操作人员的控制策略是静态的. 实际上, 在操作过程中, 操作人员的控制策略及

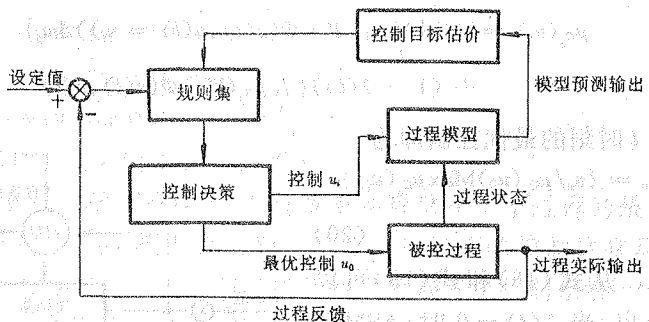


图 1 FMPC 的一般结构

其对各目标所赋予的重要性是处于动态的变化之中的.这也符合人的正常心理.例如:当列车越来越接近其停车位置时,司机将变得越来越谨慎,此时的控制策略与刚进入停车区段时的策略是不一致的. AFMPC 可以在其控制的导出中体现这种因操作人员心理变化所产生的控制策略的变化.

一般地说,在控制初期,操作人员的行为是比较乐观的,但随着过程输出越来越接近设定值时,他的行为将变得越来越谨慎.操作人员这种行为上的乐观和谨慎态度可以用各控制目标的乐观和悲观聚合来表征.

当操作人员完全乐观时,式(5)中的聚合算子 $\odot$ 被定义为 $\max = \vee$,则此时乐观最优控制集为

$$\mu_{c_o}^*(u_i) = \bigvee_j \mu_{a_j}(\Psi \cdot \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (14)$$

当操作人员采取完全谨慎的态度时, $\odot$ 取 $\min = \wedge$,此时悲观最优控制集即由(5)定义为

$$\mu_{c_o}^*(u_i) = \bigwedge_j \mu_{a_j}(\Psi \cdot \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

而实际上,操作人员在任何过程进行控制时,都不可能绝对地乐观或绝对地悲观,更合理的态度是二者的某种动态的折衷.我们用式(14)和式(15)的凸组合来表征这种折衷,此时最优控制集为乐观和悲观最优控制集的凸组合,即为

$$\mu_{c_o}(u_i) = \lambda \mu_{c_o}^*(u_i) + (1 - \lambda) \mu_{c_o}^*(u_i), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (16)$$

其中 λ 是折衷因子.因为 AFMPC 的自适应性是通过 λ 来实现的,所以也称为自适应因子. λ 是过程输出 $y(t)$ 与设定值 y_o 相对关系的函数,在此被用于反映操作人员在控制过程中心理变化对其控制行为的影响.即

$$\lambda(t) = f(y(t), y_o), \quad (17)$$

并且

$$0 \leq \lambda(t) \leq 1. \quad (18)$$

其中 $f(\cdot)$ 可以是某一精确的函数,也可以是表征 $\lambda(t)$ 与 $y(t), y_o$ 的模糊关系.它的定义取决于具体的应用环境和尽可能地准确反映操作人员的心理变化.

当把权重因素也考虑进去时,可以获得最优控制集为

$$\begin{aligned} \mu_{c_o}(u_i) = & \lambda(t) \{ \bigvee_j \mu_{a_j}(\Psi \cdot \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j \} \\ & + (1 - \lambda(t)) \{ \bigwedge_j \mu_{a_j}(\Psi \cdot \Phi(s(t), u(t) = u_i)) \Delta w_j \}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \end{aligned} \quad (19)$$

而 t 时刻的最优控制即为

$$u_o = \{ u_o / \mu_{c_o}(u_o) \text{Max}_i \mu_{c_o}(u_i) \}. \quad (20)$$

从式(16)和式(19)可以看出,当 $\lambda(t) = 0$ 时, AFMPC 就变成悲观的 FMPC,也就是第2节给出的 FMPC;而当 $\lambda(t) = 1$ 时,就得到了乐观的 FMPC.因而 AFMPC 是更一般的 FMPC.由于 $\lambda(t)$ 始终处于

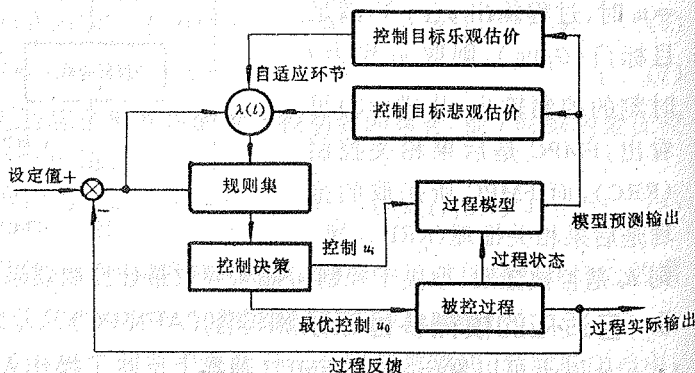


图 2 AFMPC 的一般结构

变化之中,这也意味着 AFMPC 控制器的结构始终处于变化之中,因而 AFMPC 是一种变结构的模糊预测控制器. AFMPC 的结构如图 2 所示.

以上给出的 FMPC 和 AFMPC 就组成了 FMOC 的基本内容. 在应用中,到底采用 FMPC 还是 AFMPC 这取决于应用者的选择,原则是获得尽可能好的控制效果.

4 FMOC 在列车运行控制(ATC)中的应用

众所周知,列车运行过程是一个非常复杂的过程. 在不同的工况下,控制策略和控制目标都是不一样的,而且过程本身的特性也不同. 传统的 ATC 方法如:线性化模式追踪,限制速度追踪和其它以节能为目标的优化控制方法的控制质量均低于一个熟练的司机对列车运行的控制. 出现这种情况的原因主要是上述方法都不能处理复杂的环境因素对控制的影响,并且在控制算法中忽略一些重要的运行目标如:运行的舒适性,停车的准确性等,并且不能体现运行过程中控制目标以及控制目标重要性的变化. 但是,司机却能在控制中考虑许多不确定性的因素和不精确的控制目标.

由于列车运行过程的复杂性,我们根据不同的工况将其划分成具有不同控制目标的 4 个子过程. 它们是:加速子过程(SUP),恒速子过程(CSP),调速制动子过程(SAP)和停车制动子过程(TSP). 而列车运行所必须满足的目标是:安全性,运行正点性,舒适性,节能,目标速度的跟随性和停车的准确性. 这些目标虽然都是语言化的,但可以根据司机和有关专家的知识 and 经验用适当的模糊集来表征.

控制集由牵引控制子集,动力制动子集和空气制动子集组成. 每个控制子集都包含若干控制级,分别对应着牵引手柄和制动手柄的不同位置.

每个子过程都由一个子模型来描述,并由一个 FMOC 控制器来完成对其的控制. 列车的 FMOC 控制系统由 4 个 FMOC 控制器组成. 系统根据地面设备给予的行车命令和列车的运行状态来确定列车运行过程处于那一个子过程,从而确定合适的 FMOC 控制器对其进行控制.

4 个 FMOC 的协调使用由如下的一组协调规则(CR)来完成:

$$\begin{aligned}
 &\text{If } (v - v_0) > 0 \cap v_0 > 0 \text{ then FMOC for SAP else,} \\
 &\text{If } (v - v_0) < 0 \quad \quad \quad \text{then FMOC for SUP else,} \\
 &\text{If } (v - v_0) > 0 \cap v_0 = 0 \text{ then FMOC for TSP else,} \\
 &\text{If } (v - v_0) = 0 \cap v_0 > 0 \text{ then FMOC for CSP.}
 \end{aligned} \tag{21}$$

其中 v 是列车的目前速度, v_0 是地面信号给出的目标速度.

每个 FMOC 都由一组形如式(13)的规则组成,其任务是实现对每个子过程的最优控制,而 CR 的任务则是协调四个 FMOC 的使用,使对整个列车运行过程的控制达到最优. 这种基于 FMOC 和 CR 的控制系统实际上就是一种智能控制系统或专家控制系统^[1,3,9].

我们对韶山-I 型电力机车牵引的 3000 吨列车在一个典型区段上的运行进行了 FMOC 的仿真,结果是令人满意的,其能达到对过程的高品质控制,同时比人具有高得多的控制可靠性,因为疲劳会使人的控制质量下降,而 FMOC 永远不会疲劳^[7].

5 结 论

本文提出的 FMOC 适合于代替操作人员完成对具有不确定性的复杂过程的控制. 它适用于对用任何模型描述的过程的控制,对过程特性没有特殊的要求. FMOC 符合人的控

制行为,并且能反映其心理对行为的影响.控制的多目标化是改善复杂过程控制质量的有效途径.FMOC克服了现有模糊控制方法的缺陷,如:控制的后果无关性,控制机理过于简单等,从而使模糊控制适用于更一般的过程,具有更高的灵活性.将FMOC用于列车运行控制的仿真结果证明了它的适用性.

参 考 文 献

- [1] Astrom, K. J., et al.. Expert Control. Automatica, 1986, 22, 277—286
- [2] Dubois, D. and Prade, H.. Fuzzy Sets and Systems-Theory and Applications. New York: Academic Press, 1980
- [3] Meystel, A. and Luh, J. Y. S. (Eds.). Proceedings of IEEE Int. Symp. on Intelligent Control. Philadelphia, USA, 1987
- [4] Sugeno, M.. An Introductory Survey of Fuzzy Control. Information Sciences, 1985, 36, 59—93
- [5] Tong, R. M.. A Retrospective View of Fuzzy Control. FSS, 1984, 14, 199—210
- [6] Zadeh, L. A.. Fuzzy Sets. Information and Control, 1965, 8, 338—353
- [7] 贾利民,张锡第,李多寅.模糊多目标优化控制及其在列车自动控制中的应用.铁道科学研究院研究报告, TY488—1/(91)TH04—1号, 1991
- [8] Kramer, K. and Unbehauen, H.. Survey to Adaptive Long-Range Predictive Control. In: P. Borne (Ed.), Computing and Computers for Control System, Sci. Pub. Co., 1989, 105—110
- [9] Jia, L. M. and Zhang X. D.. Intelligent Multiobjective Optimal Control. In: Proceedings of IFAC/IEEE Int. Symp. on Intelligent Tuning and Adaptive Control, Singapore, January, 1991, 270—275

Fuzzy Multiobjective Optimal Control

JIA Limin and ZHANG Xidi

(Signal and Communication Research Institute, China Academy of Railway Sciences • Beijing, 100081, PRC)

Abstract: The fuzzy multiobjective optimal control (FMOC) is proposed to control complex processes with high quality. FMOC, which consists of fuzzy multiobjective predictive control (FMPC) and adaptive fuzzy multiobjective predictive control (AFMPC), can not only embody the multiobjectiveness of the human controller but also reflect the influence of his psychological process on his control behavior. FMOC controls the process based on the synthetical evaluation of the control objectives concerned. FMOC has been used to the automatic train control and its feasibility and superiority have been proved by the simulation results.

Key words: fuzzy control; predictive control; multiobjectivization; adaptive control; automatic train control; optimal control

本文作者简介

贾利民 1963年生.于1984年,1987年和1991年分别获工学学士,工学硕士和工学博士学位.现为助理研究员.近年来一直从事模糊控制,神经网络及智能控制研究.目前从事模糊控制,模糊神经网络,复杂动态系统建模及智能控制中知识表示方法研究.

张锡第 1918年生.1942年毕业于燕京大学物理系.自1951年以来主持完成多项国家级重大攻关项目,多次获国家级科技成果奖.现为研究员,博士生导师.近年来一直从事复杂系统理论,模糊控制,智能控制理论及C.I.系统研究.