

文章编号: 1002-0411(2003)02-136-06

## 离散时间系统变结构控制研究综述

张益波 张井岗 陈志梅

(太原重型机械学院自动化系 030024)

摘要: 本文介绍了近年来对离散滑模变结构控制的研究工作,着重对几类主要的控制方案进行了论述,分析了它们各自的特点与相互之间的联系,最后对其发展趋势作了分析与探讨.\*

关键词: 离散时间系统; 变结构控制

中图分类号: TP13

文献标识码: B

### A SURVEY OF RESEARCH ON VARIABLE STRUCTURE CONTROL OF DISCRETE-TIME SYSTEM

ZHANG Yi-bo ZHANG Jing-gang CHEN Zhimei

(Taiyuan Heavy Machinery Institute 030024)

**Abstract:** This paper introduced the research work on discrete variable structure control in recent years, emphasizing on describing several kinds of control schemes. Moreover, their features were considered respectively and the relationships among them were analysed. At last, research tendencies in this field were discussed.

**Keywords:** discrete-time system, variable structure control

#### 1 引言(Introduction)

变结构控制是一种能用来实现线性和非线性系统鲁棒控制的方法. 由于变结构系统中的滑动模态具有不变性, 即它和系统的摄动性与外界干扰无关, 这种理想的鲁棒性引起了控制界的极大关注, 且在连续时间系统已得到了很大的发展. 随着计算机技术的高速发展和工业自动化等领域的实际需要, 控制算法的实现经常采用数字计算机, 但当采用数字计算机实现变结构控制算法时, 由于采样过程的限制, 理想的滑动模态不存在, 状态轨迹以抖动形式沿着滑平面运动. 在离散情况下, 滑动模态的性质、存在及到达条件都已经改变. 因此, 研究离散时间系统变结构控制方法具有重要的理论价值和实际意义.

采样周期的存在, 使离散系统具有与连续系统不同的变结构控制规则. 首先在到达条件上,  $s(k) < 0$  不再是保证系统状态能够到达滑平面的充分条件, 因为它不能保证系统在滑平面附近抖动的幅值是逐渐变小的. 而将该条件推广到离散时间系统为  $[s(k) - s(k-1)]s(k) < 0$  并不充分, 它提出了比较苛刻

的条件, 即  $|s(k+1)| < |s(k)|$  或等价形式  $[s(k+1) - s(k)]s(k) < 0$ ,  $[s(k+1) + s(k)]s(k) > 0$  这种形式上复杂的充分条件, 使得求解变结构控制十分困难, 求得的控制形式也相当复杂, 甚至可能求不出来; 用李亚普诺夫函数进行离散化后得到的到达条件  $v(k+1) - v(k) < 0$  给出的变结构控制比较复杂, 难以推广到多输入情况<sup>[1]</sup>.

此外, 由于采样周期的存在, 使系统状态轨迹以抖动形式沿滑平面运动, 因此离散控制必然存在准滑动区. “准滑动”(quasi-sliding)的概念是由 Miloslavjevic 首先提出的, 它描述了离散系统状态在滑平面附近抖动并最终趋向状态零点的过程. “在到达条件制约下, 离散系统的运动首先趋近切换面, 进入切换面的一个邻域后, 或者不断地穿越切换面呈抖动的运动, 或者转换成切换面上的运动, 这两类运动的总体称为离散变结构控制的准滑动模态, 在切换面上的运动, 称之为理想准滑动模态, 而另一类称之为非理想准滑动模态”<sup>[1]</sup>. 如果要达到理想准滑动模态, 必须满足两个条件: 第一, 状态必须恰好在

\* 收稿日期: 2001-12-25  
基金项目: 山西省青年科学基金资助项目

转换时刻到达滑平面上; 第二, 离散变结构控制下的受控系统动态性能必须与理想滑平面的特性相匹配以保证系统在滑平面上的运动. 但在实际中很难满足上述条件, 因此系统状态一般都会围绕滑平面做吱咯—吱嘎(Zig-Zag)运动.

可以看出, 离散变结构控制与连续变结构控制既有相似之处又各有特点. 针对离散变结构的特点, 专家学者做了很多的研究工作, 已取得了许多研究成果. 本文将根据控制方法的特点进行分类和论述.

## 2 离散变结构控制的几种主要方案 (Schemes of variable structure control for discrete-time system)

### 2.1 常规离散变结构控制

常规控制系统的变结构控制律一般都包括两部分, 一是等效控制  $u_{eq}$ , 它使  $s$  保持不变, 二是附加控制  $u_d$ . 当系统远离滑动面时二者的联合作用使系统运动总是向着滑平面  $s=0$ , 而一旦到达滑平面, 将只有前者的作用, 系统在滑动面上滑动直至误差零点. 对于线性系统, 等效控制的形式都是固定的, 因此系统的控制性能在很大程度上将取决于附加控制的选择. 在已有的文献中, 附加控制的选择大多基于系统状态或滑模函数, 而近期文献多采用二者的组合, 取得了较好的控制效果.

基于系统状态的附加控制常见于早期的文献中. 如文献[2]中采用状态向量的 1-范数作为  $u_d$ , 这种控制的缺点在于不能在控制过程中根据系统的状态对其进行调整. 与其相对应的是基于滑模函数  $s$  的附加控制, 最常见的形式为符号函数<sup>[3, 4]</sup>或相对平滑的饱和函数<sup>[5]</sup>, 这类基于滑模函数的附加控制将滑模函数引入控制中, 使系统的抗扰性能大大增强.

目前的常规控制多采用二者结合的方式, 从[6]的研究中可以看出, 这种线性组合结合了系统状态控制与滑模函数控制的优点, 对参数摄动下的系统具有很好的品质鲁棒性与稳定鲁棒性. 积分变结构 (IVSC)<sup>[7, 8]</sup>多属于这种类型, 这种控制除了采用二者结合的附加控制, 还利用积分环节能够消除静态误差的特性, 在变结构控制中插入积分控制环节, 当系统存在外部干扰和参数变化时仍可获得准确的跟踪性能和良好的鲁棒性, 文中的仿真结果和实际应用均证明了该方法的有效性.

需要指出的是, 目前常规控制中有时并不局限于一个控制律. 文献[9]中在引入准滑模区的概念后, 利用等效控制能保持  $s$  值不变的特性, 在滑模区

内采用等效控制而在滑模区外再增加校正控制(附加控制)的方法, 使系统在轨迹平行于滑模带的情况下逐步缩小与滑平面的距离而最终到达滑平面.

目前该类控制的主要缺陷在于: (1) 一些控制算法过于复杂. (2) 多为对定常线性系统的研究, 对时变系统、非线性系统和不确定系统的研究较少.

### 2.2 基于趋近律的离散变结构控制

趋近律是目前研究最多的控制方法, 趋近律控制的主要思路在于首先确定满足到达条件与收敛条件的趋近律, 使该控制轨迹具有期望的运动, 在此基础上寻找其相应的变结构控制. 用趋近律方法求变结构控制, 可以很容易地得到变结构控制算法, 控制形式也是最简单的<sup>[1]</sup>.

目前的趋近律研究基本上以高为炳的研究成果<sup>[1, 10]</sup>为理论基础, 文中指出这种控制应具有以下特征:

- (1) 从任意状态出发, 运动轨迹将在有限时间内单调地趋近并穿越滑平面.
- (2) 一旦轨迹穿越了滑平面, 将会在下一个采样周期内再次穿越, 形成吱咯-吱嘎运动.
- (3) 这种运动的幅值是非增的, 并且轨迹将限制在指定的带宽内.

由此, 文中提出一种新的控制律(指数趋近律), 该趋近律可以满足三个特征; 可以通过调整参数得到期望的响应, 也可以看到  $T$  的变化对系统性能的影响<sup>[10]</sup>.

但这种趋近律的缺点也很明显: (1) 利用这种控制, 系统会出现很大颤振, 不能保证渐近稳定; (2) 系统在切换带中运动时, 最后不能趋近于原点, 而只能趋近于原点附近的一个抖动; (3) 在不确定性存在时, 设计者需首先知道不确定性的上界, 而在实际中可能无法估计等等.

因此后期的文献多以此为基础进行趋近律的改进. 一种思路是将趋近律中人为指定的定常参数修改为关于状态或滑模的函数, 如[11]中针对  $\epsilon$  值的大小对系统的影响, 提出用时变的滑模函数值来替代固定值以使系统获得更好的控制性能的方案. 文中以  $|s(k)|/2$  取代  $\epsilon$ , 得到了较好的仿真效果. 而另一种思路是将多种趋近律相结合. [12]中将指数趋近律与等效控制律相结合, 在保证趋近模态良好品质的同时减小了准滑动模态带. [13]在准滑模区内采用了一种新的趋近律, 以  $-|s(k)|^2 \text{sgns}(k)$  作为  $s(k+1)$ , 使系统在进入滑模带后的收敛速度大大加快; 同时实现了该趋近律与指数趋近律的结合. [14,

15]中将变速趋近律与[1]中的指数趋近律相结合,保证系统状态最后能趋于状态零点,这种控制被称为比例-等速-变速控制。

在提高抗扰性能方面,多数文献都采用在原来的趋近律上附加其它控制方法的方案。[16]在[11]的基础上对不确定部分增加了一个灰色滑模估计器,改善了系统的抗扰性能。[17]中利用 $\delta$ 算子在动态特性上比移位算子更接近于连续系统的特性,给出了不确定系统的变结构控制算法。[18]利用时延技术对干扰进行在线估计,并将估计值引入变结构控制中以抵消系统中的慢变不确定性。该方法克服了以往控制方法中须已知不确定性界的限制,且不必满足匹配条件,用较低的控制增益保证了系统的鲁棒性,削弱了抖振。

除了上述控制方法外,A. Bartonszew icze 将扰动引入趋近律中,改进后的趋近律加快了系统误差的收敛速度,但系统的稳态误差较大<sup>[19]</sup>。

趋近律的控制方法已经取得了较大的发展,但仍有不足之处。指数趋近律要求系统穿越滑平面后必须在下一步再次穿越,虽然保证了算法的简单性,但该条件相对苛刻;多数文献都无法完全消除抖振现象;[14,15]中虽然对抖振现象控制较好,但其鲁棒性有待进一步的研究,而且两种趋近律的转换时刻的选择仍需进一步的讨论。在抗干扰控制上,[16]的灰色估计器的计算比较复杂,不利于在线的递推。因此,既能消除抖振现象,又具有良好的抗干扰能力,同时还能保证系统稳定且具有良好的稳态性能的趋近律仍有待于继续研究。

### 2.3 基于神经网络的离散变结构控制

在控制系统中,对非线性系统及不确定性上界未知系统的控制是一大难点。为了解决此类问题,基于神经网络控制的离散变结构控制应运而生。

首先考虑如下系统

$$x(k+1) = f(x, k) + B(x, k)u + d(x, k)$$

其中 $x(k)$ 为非线性系统在第 $k$ 个时刻的状态, $f(x, k)$ 为非线性函数, $u$ 为系统的输入, $d(x, k)$ 为扰动。

取滑模函数 $s(k+1) = Gx(k)$  其中 $G$ 为滑模函数的系数

取偏差 $\sigma(k) = Gx(k) - \mathcal{Q}(k)$   $\mathcal{Q}(k)$ 为第 $k$ 个采样周期时的期望值

对于无扰动的控制系统,我们可以得到其等效控制

$$u_{eq} = - (GC)^{-1} [Gf - x(k)] = - (GC)^{-1}$$

$$[Gf - \mathcal{Q}(k+1) - \sigma(k)]$$

我们的目标是寻找适合的控制 $u_{eq}$ 使 $\sigma(k)$ 趋于零。通过训练神经网络我们可以得到对应于期望值的等效控制。

利用训练神经网络得到等效控制,关键在于能够使偏差收敛;算法的选择必须使系统能够渐近稳定,因此需要证明系统的稳定性。另外,神经网络类型的选取也很重要,不恰当的神经网络可能会导致训练次数增加甚至无法收敛。

由于BP算法的简单可行以及理论上证明该网络可以以任意精度趋近于非线性函数,[20]中用BP算法(反向传播算法)训练FNN(前馈神经网络),成功将其应用于滑模控制。但是利用BP算法训练FNN网络具有一系列的缺陷<sup>[21]</sup>:首先是BP网络收敛较慢,其在线学习与自适应能力不能满足实时应用,也不能保证系统偏差能够收敛至零;其次,只有在所有样本都是有效的时候用BP算法训练FNN网络才是可行的。另一方面,虽然FNN模型能够反映出非线性映射,但FNN仅仅是统计型映射,在不考虑延迟的情况下,FNN不能够反映动态映射,而滑模变结构的控制恰是一个动态过程。因此在[21]中,采用了递推神经网络(RNN),同时采用实时迭代算法(RTRL)训练,在保证控制系统的稳定性的同时也得到了良好的实时特性,利用较少的迭代次数就可收敛。[22]中扩展[21]的方法,增加了一个线性神经网络(LNN)更新线性模型的权,得到了该系统等效的线性化模型。

神经网络控制在趋近非线性系统的滑模流形与消除抖振的有效性方面已经得到了广泛的认同,但大多数文献仍缺乏关于收敛性的严格的理论证明,因此对神经网络的选取以及能够保证严格收敛的训练算法仍需继续探索。

### 2.4 自适应离散变结构控制

自适应控制对象多为扰动作用下的线性系统和非线性系统及时变系统,自适应控制的优点在于能够产生一种更接近理想准滑模带的运动,而按控制方式分有基于状态反馈的控制<sup>[23-27]</sup>与基于输出反馈的控制。

[23]中引用了 $\delta$ 算子,利用 $\delta$ 算子较移位算子更接近于连续系统的特性进行滑平面选择,从而避免了对系统严格正实性的要求。[24]重新定义了所谓的“等效控制”,在趋近滑动模式的过程中设定了多个流形,并对各个流形分段控制。这种控制方法最大的优点是降低了相关偏差方程的阶数,并为处理

采样过程引起的不匹配的不确定性提供了可能. [25]的特点则在于能够通过对一个反馈增益和两个自适应增益的正确选择对线性滑平面的极点进行配置, 并且通过算法对滑平面动态进行解耦而得到自适应偏差动态. [26]在初始滑模算法中增加自适应规则, 而且将算法应用于神经网络, 对模型的误差进行在线的辨识. [27]则研究了时变系统, 文中指出: “时变系统的自适应控制的关键在于如何提高系统对由参数时变引起的摄动的鲁棒性能”. 该文采用模型偏差补偿的方法, 通过改进控制器的结构, 提高自适应算法对于未知时变参数等不确定性对象的鲁棒性能; 用两个补偿信号代替通常所需的切换信号, 迫使系统状态在滑模的邻域内运动, 从而避免了“抖”现象.

基于输出反馈的自适应控制的优点在于不需要对系统全部状态进行测量. [28]中主要研究了最小相位的输入输出模型(即传递函数)在扰动作用下的特性, 但该文章的收敛性证明依赖于系统的严格正定性, 因此限制了该方案的适用范围. [29]对[28]提出的模型进行了改进, 使该模型可应用于更广泛的离散时间系统, 在准滑模控制器中增加了  $s(k)$  的反馈以调整系统响应, 所以可以在扰动的上界未知的条件下对控制进行自适应的更新, 实现了鲁棒输出跟踪. [30]则结合了积分环节、非线性输出反馈、可调的滑动模态和自适应参数估计器, 通过李亚普诺夫直接方法配置极点, 以得到积分控制增益和滑平面系数, 用在线算法更新滑平面系数.

### 3 关于离散变结构的一些问题(Problems about variable structure control for discrete-time system)

除了对上述控制问题的研究外, 还有一些对离散变结构系统稳定性及参数选择方面的研究. [31]中主要针对离散方程中滑平面选择对系统性能的影响进行了分析, 证明对于系统  $x(k+1) = \Phi x(k) + \Gamma u$  及其对应的李亚普诺夫函数  $V(x) = x^T P x$  ( $P$  为对称正定阵), 如果选取滑平面系数  $C = \Gamma^T P$  且其等效控制  $u_q = (I - \Gamma(\Gamma^T P \Gamma)^{-1} \Gamma^T P) \Phi x$  满足  $\|u_q\|_p < 1$ , 则可使系统关于状态零点渐近稳定. 大多数参考文献中的滑平面系数都是任意指定的, 虽然其中一些证明了其控制方法对任意的滑平面选择都可以满足渐近稳定, 但从文[31]中可以看出, 适当的滑平面选择可以在相同条件下使系统获得更优良的性能.

[32]研究了准滑模态下的离散非线性变结构系

统. 文中证明, 当且仅当 
$$\begin{cases} x(k+1) = F(x(k), u(k)) \\ y(k) = h(x(k)) \end{cases}$$

输出满足  $|y(k+1) - y(k)| < y(k)^2$  时准滑模运动存在流形, 并且当非线性系统的相关度大于 1 时, 可引入输出函数并选取适当的系数使系统局部相关度为 1, 系统将以输出函数为流形. 在有扰动情况下, 当且仅当满足匹配条件  $\partial F / \partial u \in \text{range}(\partial F / \partial u)$  (其中  $\omega$  为扰动信号) 时, 理想准滑模动态可以完全不受扰动信号的影响.

[33]则在频域内研究了系统控制中常见的非线性函数. 文章指出: 对于非线性符号函数, 总存在一个极限环, 而该极限环的特性恰是抖振现象; 如果非线性函数无记忆, 函数值域在  $[0, 2)$  内并且滑模带足够宽, 将可以消除抖振, 否则将必然出现抖振现象. 文中还以定理形式给出了符号函数、饱和函数及 Sigmoid 函数的带宽应满足的条件.

### 4 关于离散变结构控制的展望(Prospect of variable structure control for discrete-time system)

根据对已有研究成果的论述和分析, 我们可以对该研究领域的进一步发展作出一些预测. 目前的研究成果已经为离散变结构控制与各种控制方法的结合提供了广阔的发展余地, 基于各种控制方法, 寻找更适合的控制或改进现有的控制模型, 提高系统的鲁棒性及抗扰性将成为今后研究的重点.

常规离散变结构控制已经在线性系统中取得了丰硕的成果, 但这种控制方法在抗扰性及收敛速度方面仍存在一定的缺陷, 为了增强控制性能, 一些控制变得过于复杂; 另外, 对非线性系统的研究仍处于起步阶段. 在一些文献中<sup>[7]</sup>已经有利用预测估计等方法消除实际系统中不确定性的影响, 由此可见, 结合神经网络或自适应控制进行有效的控制将成为该类控制发展的方向.

基于趋近律的控制方法近年来得到了很大的关注, 主要在于其具有控制方法简单、鲁棒性强的特点, 在实际应用中也显示出应用价值. 对于该类方法, 关键在于能够找到既具有强鲁棒性又能够消除抖振的控制策略. 例如在指数趋近律中, 系统在进入准滑动模态后只能在准滑模区边界做等幅振荡, 在到达状态零点的邻域后无法收敛等等, 而后期改进方案也各有缺陷. 总之, 对于这类控制仍需做深入的研究.

由于神经网络的自学习功能, 利用有效的学习

算法得到所需的控制,因此基于神经网络的离散变结构已经成为变结构控制中的另一个热点.神经网络应用于离散变结构控制的关键在于选取更适合的神经网络及与其匹配的学习算法,而其收敛性的证明也是利用神经网络进行控制的一个难点,因此今后的神经网络控制的研究将以此为出发点.

自适应离散变结构控制是发展相对较晚的控制方法,但由于其控制方面的突出优点,已经得到广泛的关注.虽然这种方法对非线性系统的控制较好,但提高系统的鲁棒性与提高总体性能之间的矛盾仍难以解决;同时多数系统要求具有严格正实性,但在不确定系统中却无法保证,该缺陷必将影响系统的实际应用价值.所以,设计无需知道系统不确定性上界的自适应控制方法仍有待继续研究.在文献中,出现了结合神经网络对系统的偏差进行预估的算法<sup>[26]</sup>,可以认为,将自适应算法应用于神经网络也将成为自适应控制发展的一个方向.

由于变结构控制仅在滑动阶段才具有对参数摄动和外界干扰的不敏感性,而在从初始阶段到达滑平面前系统仅是一般的反馈控制系统,不具有对参数摄动和外部干扰的鲁棒性,因此如何缩短到达时间以及提高系统在该阶段的鲁棒性就成为变结构系统设计中的重要问题.目前在连续时间系统中已有成功利用全局鲁棒性进行变结构控制的实例<sup>[34]</sup>,但在离散变结构控制中仍缺乏相应的研究,因此如何将这一类控制引入离散系统中也有待于继续探讨.

### 参 考 文 献 (References)

- 高为炳. 离散时间系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, **21**(2): 154~ 161
- Wang W-J, *et al.* Variable structure control design for uncertain discrete-time systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, **39**(1): 99~ 102
- Korondi P. Direct torsion control of flexible shaft in an observer-based discrete-time sliding mode[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, **45**(2): 291~ 296
- Stanislaw H. Zak, Stefan Hui. On variable structure output feedback controllers for uncertain dynamic systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, **38**(10): 1509~ 1512
- Cong S. Design of the sliding mode controller for position control systems[J]. 控制理论与应用, 1997, **14**(5): 716~ 721
- 李永华, 徐枋同, 方军. 对象参数摄动定位系统中离散滑模控制器的设计及其应用[J]. 控制理论与应用, 1999, **16**(4)
- 李运华等. 离散变结构控制的新方法及其在液压系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 1994, **11**(5): 611~ 616
- Tzuen-lih Chern, Geng-kwei Chang. Automatic voltage regulator design by modified discrete integral variable structure model following control[J]. Automatica, 1998, **34**(12): 1575~ 1582
- 姚琼荃, 黄继起, 吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆大学出版社, 1997
- Weibing Gao, *et al.* Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, **42**(2): 117~ 121
- 翟长连, 吴智铭. 一种离散时间系统的变结构控制方法[J]. 上海交通大学学报, 2000, **34**(5): 719~ 722
- 于双和, 强文义, 傅佩琛. 无抖振离散准滑模控制[J]. 控制与决策, 2001, **16**(3): 380~ 382
- 马克茂, 王子才, 张德成. 离散时间系统变结构控制新方法[J]. 电机与控制学报, 2001, **5**(3): 181~ 184
- 姚琼荃, 宋立忠, 温洪. 离散变结构控制系统的比例-等速-变速控制[J]. 控制与决策, 2000, **15**(3): 329~ 332
- 宋立忠, 卜乐平, 姚琼荃. 一种基于离散变结构控制理论的有功分配控制器[J]. 控制理论与应用, 2001, **18**(4): 539~ 542
- 翟长连, 吴智铭. 不确定离散时间系统的变结构控制设计[J]. 自动化学报, 2000, **26**(2): 184~ 191
- 翟长连, 刘晓琰, 吴智铭.  $\delta$ -算子描述离散系统的变结构控制[J]. 上海交通大学学报, 1998, **32**(8): 69~ 72
- 于双和, 傅佩琛, 强文义. 不确定离散时间系统的变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2000, **17**(1): 85~ 88
- Andrzej Bartoszewicz. Discrete-time quasi-sliding-mode control strategies[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, **45**(4): 633~ 637
- Moriok A H, Wada K. Neural network based chattering free sliding mode control[A]. Proceedings of the 34th SICE Annual Conference[C]. 1995. 1303~ 1308
- Fang Y, Chow T W S, Li X D. Use of a recurrent neural network in discrete sliding-mode control[J]. IEE, 1999: 84~ 90
- Yong Fang, Tommy W S Chow. Synthesis of the sliding-mode neural network controller for unknown nonlinear discrete-time systems[J]. Inter. J of Sys. Sci, 2000, **31**(3): 401~ 408
- Chan C Y. Discrete-time adaptive sliding mode control of a linear system in statespace form[J]. Int J. Control, 1997: 859~ 868
- Bartolin I G, Ferrara A, Utkin V I. Adaptive sliding mode control in discrete-time systems[J]. Automatica, 1995, **31**(5): 769~ 773
- Hedrick J K. Disturbance adaptive discrete-time sliding control with application to engine speed control[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2000, **123**(1)
- David Mufioz. An adaptive sliding-mode controller for discrete nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, **47**(3): 574~ 581
- 殷斌, 冯纯伯. 线性离散时变系统的鲁棒自适应控制[J]. 自动化学报, 1999, **25**(6): 786~ 790
- Chan C Y. Discrete adaptive sliding-mode tracking controller[J]. Automatica, 1997, **33**(5): 999~ 1002
- Xinkai Chen. Adaptive quasi-sliding-mode tracking control for discrete uncertain input-output systems[J]. IEEE Transactions

- on Industrial Electronics, 2001, 48(1), 216~ 224
- 30 Sha Daohang, Vladimir B Bajic. Robust discrete adaptive input-output-based sliding mode controller[J]. Int. J of Systems Science, 2000, 31(12): 1601~ 1614
- 31 Spurgeon S K. Hyperplane design techniques for discrete-time variable structure control systems[J]. INT. J. Control, 1992, 44(2): 445~ 456
- 32 Hebertt Sira-Ra, Orez. Non-linear discrete variable structure systems in quasisliding mode[J]. INT. J. Control, 1991, 54(5): 1171~ 1187
- 33 Steven Ching-Yei Chung. The frequency-domain analysis of discrete variable structure control and chattering-free criteria[J]. Int. J of System Science, 2000, 31(12): 1619~ 1626
- 34 张井岗. 交流伺服系统的全局鲁棒滑模控制[J]. 系统仿真学报, 1997, (2): 32~ 35
- 35 陈志梅, 张井岗. 交流伺服系统的积分模糊滑模控制[J]. 电机与控制学报, 1999, (1): 16~ 19
- 36 Chen Zhimei, Zhang Jinggang. Integral sliding mode variable structure control based on fuzzy logic[A]. Proc. 3RD WCICIA, 2000. 3009~ 3012

## 作者简介

张益波(1978- ), 男, 硕士生. 研究领域为变结构控制及智能控制.

张井岗(1965- ), 男, 教授, 工学硕士. 研究领域为智能控制、鲁棒控制及应用.

陈志梅(1970- ), 女, 硕士. 研究领域为智能控制理论及应用.

(上接第 135 页)

从图 3 可以看出, 利用模糊控制原理对拥挤路线交通量进行控制效果很好. 推算结果与实际操作结果进行比较, 其误差在 10% 左右, 基本上能够反映操作者的操作行为.

## 5 结论(Conclusion)

对突发性交通拥挤问题的解决, 要求道路管理者快速进行有效的控制策略. 大多数情况下拥挤控制方案的实施都是由操作者凭经验进行的, 这给拥挤的快速消散造成很大的不便. 本文利用模糊控制原理设计了发生突发性交通拥挤时路线交通量的模糊控制算法, 为交通工程师对拥挤的快速管理提供了理论上和方法上的指导. 在有关模糊规则推理方面, 本文采用了专家的知识 and 经验建立了规则库, 并将推理结果与实际交通工程师的管理经验进行比较, 效果很好. 这表明, 模糊控制原理在城市交通拥

挤管理中具有很好的应用前景, 而且在一定程度上能够取代交通工程师的管理工作, 从而提高运输系统利用效率.

## 参 考 文 献 (References)

- 1 谈晓洁, 周 晶, 盛昭瀚. 基于知识的城市交通拥挤疏导决策支持系统的构造[J]. 信息与控制, 2002, 31(1): 62~ 67
- 2 Kaan Ozbay, Pushkin Kachroo. Incident Management in Intelligent Transportation Systems[M]. Artech House, Inc, 1999
- 3 王俊普. 智能控制[M]. 中国科学技术大学出版社, 1996
- 4 徐吉谦. 交通工程总论[M]. 人民交通出版社, 1993
- 5 Al-Deek H M. A combined traveler behavior and system performance model with advanced traveler information systems[J]. Transpn Res. -A, 1998, 32(7): 479~ 493

## 作者简介

徐丽群(1963- ), 女, 博士. 研究领域为城市智能交通系统.