

文章编号: 1001-0920(2005)03-0285-05

基于CAN网的模糊优先级配置策略

白涛^{1,2}, 吴智铭¹, 杨根科¹

(1. 上海交通大学自动化系, 上海 200030; 2. 太原重型机械学院自动化系, 山西太原 030024)

摘要: 利用CAN网的广播特性, 提出一种新的闭环模糊优先级配置策略。各节点数据优先级的设定既与其QoS需求有关, 又与其节点标识位及前一个传输数据的优先级有关。该策略尽管使用较少的优先级, 但仍能保证实时数据较高的可调度性和非实时数据的服务公平性。较少的优先级只占用较少的bit位, 这样不仅扩大了CAN网的服务能力, 而且提高了CAN网的带宽利用率。

关键词: CAN网; 模糊逻辑; 可调度性; 公平性

中图分类号: TP302.1 **文献标识码:** A

CAN-based fuzzy priority allocation scheme

BAI Tao^{1,2}, WU Zhi-ming¹, YANG Gen-ke¹

(1. Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Department of Automation, Taiyuan Heavy Machinery Institute, Taiyuan 030024, China. Correspondent: BAI Tao, Email: zhaobait@sjtu.edu.cn)

Abstract: Using the broadcast nature of CAN, a scheme of closed-loop fuzzy priority scheduling is proposed. Besides the QoS requirement of a message, the message identifier and the broadcast information on the priority of last transmitted message of some other node are used to update its priority. Although fewer priority levels are used, the proposed scheme can not only gain the higher network schedulability for real-time messages, but also ensure the fairness among non-real-time messages. Moreover, it makes the service range wide and improves the bandwidth utility of CAN bus.

Key words: CAN bus; fuzzy logic control; schedulability; fairness

1 引言

CAN总线是现场总线中广泛采用的网络协议之一, 它具有低执行成本、高可靠性、优良的响应特性和灵活的可重构性, 因而广泛应用于汽车、工业楼宇自动化等分布式实时控制领域^[1]。随着分布式实时系统的日益复杂, 对CAN网的性能需求也越来越高, 但由于采用多主数字总线形式, CAN网的最大传输速度只有1 M bps, 其有限的网络带宽成为限制CAN网服务性能的瓶颈。已有的静态优先级调度策略(如RM和DM), 只能保证较低的网络可调度性(或资源利用率)。为此, 大量文献致力于动态优先级调度策略的研究, 如M/T S和EDF线性或对数编码

的有限优先级分布式调度^[2-5]、EDF集中式调度^[6,7]等, 以实现较高的网络资源利用率, 提高网络运行性能。但由于使用了较多的优先级别, 占用了过多的bit位, 使得可服务的节点数量大大降低, 或在保证服务节点数量一定时, 有效的带宽资源因过大的头开销而浪费, 从而降低了带宽资源的利用率。上述策略均为开环调度模式, 且没有利用CAN协议的广播特性。

针对上述缺陷, 本文提出一种新的闭环模糊优先级配置策略。各节点数据优先级的设定既与其QoS需求有关, 又与其节点标识位及前一个传输数据的优先级有关。尽管使用较少的优先级, 该策略仍

收稿日期: 2004-05-28; 修回日期: 2004-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(60074011, 60174009)

作者简介: 白涛(1975—), 女(回族), 河北正定人, 讲师, 博士生, 从事网络化控制系统、系统仿真的研究; 吴智铭(1936—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事混合动态系统、Petri网等研究

能保证实时数据较高的可调度性和非实时数据的服务公平性,并且扩大了CAN网的服务能力,提高了CAN网的带宽利用率

2 CAN网的运行机制^[1]

CAN网的MAC层采用基于CSMA/CD的非破坏性总线仲裁技术。CAN数据帧具有多个域,如图1所示。其中标识域根据CAN协议的版本长度有所不同,在2.0A版的标准帧中为11位,在2.0B版的扩展帧中为29位。标识域有两个作用:一是用于总线仲裁(即优先级);二是用于数据路由(标识不同节点的不同类型数据)。

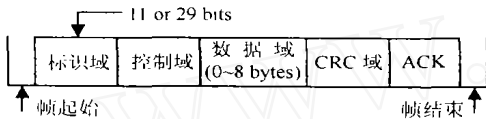


图1 CAN数据帧结构

CAN网的运行机制如下:各节点在传输数据时,首先侦听网络的状态。若网络空闲,则节点发送数据。若同时有多个节点发送数据,则网络中发生数据冲突,解决方法是利用线与机制比较冲突数据帧的标识域。各节点在传输数据帧的标识位时,同时侦听网络状态,对比网络中的数据是否与发送的数据相一致。若节点发送逻辑“1”,侦听到逻辑“0”,则说明网络中有优先级高于该节点的节点传输数据。此时低优先级节点停止数据传输,继续侦听网络状态,以等待下一次竞争,而高优先级节点继续数据传输。为避免数据不一致,在CAN网的应用中,要求不同节点发送的数据必须具有不同的标识。

3 模糊优先级配置策略

在静态优先级配置策略中,各节点的不同类型数据具有唯一的标识,该标识同时也是其固定的优先级。因而可服务的数据类型或节点数为 2^{11} (或 2^{29})个,但网络资源的利用率很低。以RM为例,其最小下限仅为69%^[2]。在已有的分布式动态优先级调度策略中,标识域划分为两部分:一部分根据不同的实时需求进行优先级编码;另一部分用于标识数据。为保证较高的实时可调度性能,较多的标识位用于编码优先级,如文献[2,3]使用64个优先级。这意味着若采用11 bits的标准帧,则可服务的数据数量仅为32个,服务范围受到限制;若采用29 bits的扩展帧,则虽可保证服务范围,但与11 bits的标准帧相比,由于过大的头开销,将有(20~30)%的带宽被浪费。为此,本文提出一种新的模糊优先级配置策略。

3.1 模糊优先级配置中的标识域结构

模糊优先级配置策略采用标准帧,其标识域划

分为两部分,如图2所示。第1部分为优先级域(Pri(\cdot)),根据数据不同的QoS需求进行优先级编码。其中:1 bit用于区分实时(逻辑0)和非实时(逻辑1)数据,任何实时数据都比非实时数据具有更高的优先级;3 bits对实时和非实时数据分别编码8个优先级别。第2部分为数据标识域(Id(\cdot)),用于标识数据。由于只用4 bits编码优先级,可服务的节点数量或数据类型为128个,是已有动态优先级调度策略^[2,3]的4倍,从而保证了一定的服务范围。



图2 模糊优先级配置策略的标识域结构

3.2 模糊优先级配置策略的机理

借助于CAN网的广播特性,节点可以获得网络的运行状态,如空闲或忙碌。当前传输数据的优先级和数据来源及类型。各节点可根据QoS需求的状况及网络的运行状态设定相应数据的优先级,从而构成闭环调度。由于使用了模糊逻辑,各节点优先级的设定具有非线性性,不再需要过多的优先级别。

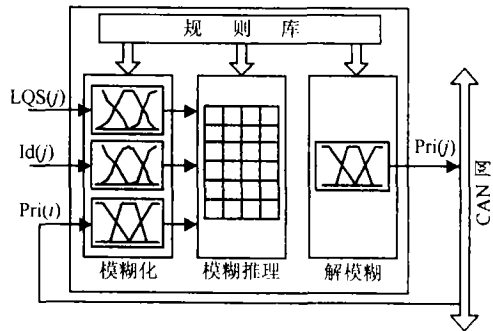


图3 节点j的模糊优先级配置机理

模糊优先级配置策略的工作机理如图3所示,它主要由4部分构成:1)模糊化接口:将实数域中的3个输入变量变换为语言变量;2)规则库:存储论域变换方法、变量的模糊集合定义及其隶属度函数、模糊控制规则、解模糊算法等;3)模糊推理机:利用规则库的模糊控制规则,根据模糊输入产生相应的模糊输出;4)解模糊接口:将模糊输出变量转换为实数域中的输出变量。节点j的优先级3个输入分别是:1)LQS(j):反映节点j当前数据QoS需求的紧迫程度;2)Id(j):节点j的数据标识,当网络中竞争的多个数据具有相同优先级时,Id(j)将作为二级优先级参与资源竞争而影响网络服务性能,是必不可少的输入;3)Pri(i):当网络始终处于忙状态时前一次成功传输数据的优先级,当网络长期空闲时Pri(i)设为最低优先级。唯一的输出Pri(j)是节点j当前数据

的优先级设定值

3.3 模糊化、模糊推理及解模糊

各输入输出变量的语言变量及其隶属度函数定义如图 4 所示 $Pri(i)/Pri(j)$ 的语言变量定义为 High, Medium 和 Low. 与 CAN 协议的优先级定义一致, 数值越小, 优先级别越高 其隶属度函数均为梯形函数 $Id(j)$ 的语言变量定义为 Near, Medium 和 Far, 其中 Near 和 Far 的隶属度函数为 S 型函数, Medium 的隶属度函数为 π 型函数 实时和非实时数据具有不同的 QoS 需求, 因此 $LQS(j)$ 的定义也不同

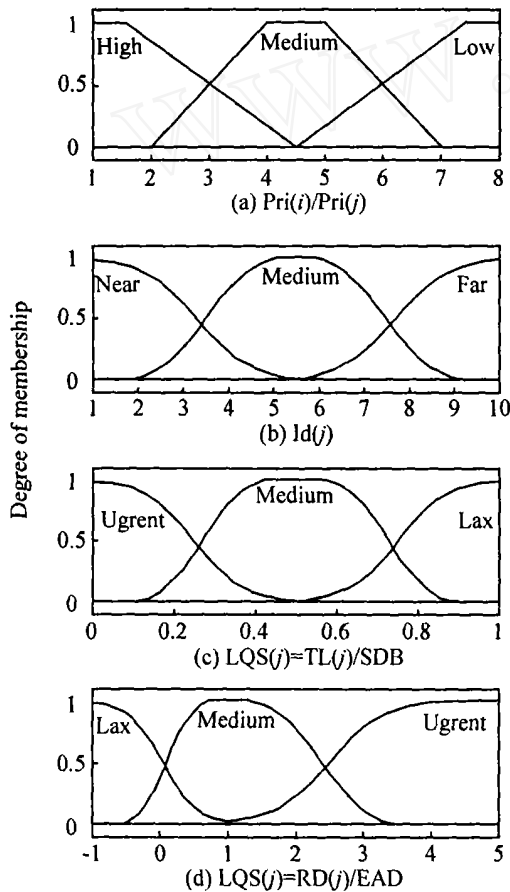


图 4 $Pri(i)/Pri(j)$, $Id(j)$, $LQS(i)$ 的语言变量及隶属函数

对于实时数据, 数据传输的实时性是其关键的 QoS 需求, 因此 $LQS(j)$ 的定义为规范化的相对松弛时间, 即

$$LQS(j) = TL(j) / SDB = [rd(j) - (t_n - t_g(j))] / SDB. \quad (1)$$

其中: $TL(j)$ 是当前数据的相对松弛时间, 定义为数据的相对死限 $rd(j)$ 与其等待时间 $t_n - t_g(j)$ 之差, t_n 是当前时间, t_g 是数据生成时间; SDB 是设定的死限界, 该数值的选取会影响系统的可调度性能 $LQS(j)$ 的语言变量定义为 Urgent, Medium 和 Lax, 其中 Urgent 和 Lax 的隶属度函数为 S 型函数, Medium 的隶属度函数为 π 型函数

对于非实时数据, $LQS(j)$ 的定义为规范化的传输时延, 即

$$LQS(j) = RD(j) / EAD = (t_n(j) - t_g(j) - EAD) / EAD. \quad (2)$$

其中: $RD(j)$ 为相对传输时延, EAD 为系统所有非实时数据总的平均传输时延 当系统只有非实时数据且其数据到达符合泊松分布时, 可视为 $M/D/1$ 排队模型, 故 EAD 可根据下式计算:

$$EAD = \frac{2C - C^2 \sum_{i=1}^N \lambda_i}{2 \left(1 - C \sum_{i=1}^N \lambda_i \right)}. \quad (3)$$

其中: λ_i 为节点 i 的数据平均到达率, C 为 CAN 网中最大数据帧的传输时间 同样, $LQS(j)$ 的语言变量定义为 Urgent, Medium 和 Lax.

3.4 模糊推理规则

实时和非实时数据的模糊推理规则如表 1 所示 尽管二者的推理规则相同, 但其语言变量的定义不同, 故其输出也不同 表 1 说明, 如果 $LQS(j) = Lax$, 即当前数据的 QoS 需求不紧迫, 则只要其 $Id(j) = Not Far$, 即 $Id(j)$ 不是太大, 在多个数据具有相同优先级时, 节点 j 更有可能成功竞争带宽 因此, 不论前一个传输数据的优先级如何, 节点 j 只需设置低优先级即可 但当 $Pri(i)$ 较高时, 各节点需根据当前数据 QoS 需求的紧迫程度及其 $Id(j)$ 值确定相应的优先级别, 如规则 7~9 和 14

表 1 实时和非实时数据的模糊推理规则

Rule	Input			Output	Weight
	$LQS(j)$	$Id(j)$	$Pri(i)$	$Pri(j)$	
1	Lax	Not Far	—	Low	1
2	Lax	Far	Low	Low	0.5
3	Lax	Far	Not Low	Medium	0.5
4	Medium	Near	Not High	Low	1
5	Medium	Medium	Not High	Medium	0.5
6	Medium	Far	Not High	Medium	1
7	Medium	Near	High	Medium	0.5
8	Medium	Medium	High	Medium	1
9	Medium	Far	High	High	0.3
10	Urgent	Near	Low	Medium	1
11	Urgent	Medium	Not High	High	0.5
12	Urgent	Far	Low	High	0.5
13	Urgent	Near	Not Low	High	0.5
14	Urgent	Medium	High	High	0.8
15	Urgent	Far	Not Low	High	1

4 仿真实验

为测试模糊优先级配置策略的性能, 作者分别对实时数据传输的可调度性能和非实时数据的公平服务性能进行仿真实验, 并与其他调度策略进行比较

4.1 实时数据的可调度性能实验

实时数据可调度性能实验的网络负荷如表2所示。表中给出了周期数据的周期和非周期数据的最小到达间隔(MIT)及其死限范围,并列出了相应的节点数量。其中“*”表示该值为默认值,在不同的实验中会有所改变。假设周期数据的数据帧为79 bits,其中包括32 bits的有效数据和47 bits的头开销;非周期数据的数据帧为47 bits,主要用于标记事件的发生,有效数据为0 bit。设定的死限界SDB = 1 500 μs, CAN网的传输速率为1 M bps。

表2 实时数据可调度性能实验的网络负荷

Periodic Nodes			Aperiodic Nodes		
Period	Deadline	No. of Nodes	MIT	Deadline	No. of Node
1 250 μs	500 μs	4	1 s	300 μs*	2*
1 600 μs	700 μs*	8*	50 m s	50 m s	1
2 500 μs	1 000 μs	2	200 m s	80 m s	1
5 000 μs	2 000 μs	2			

4.1.1 实时周期数据的可调度性能实验

当周期为1 600 μs的周期数据节点的数量发生变化时(网络负荷从34.89% ~ 104.02%变化),各动态调度策略可调度性能的比较如图5所示;当周期为1 600 μs的周期数据死限发生变化时,各动态调度策略可调度性能的比较如图6所示。图中EDF是具有无限优先级的理想调度策略;LogEDF(k, q)是文献[3]提出的策略,以网络中最大死限为标准,将最大死限对应的时间范围对数划分为k个时间段,每个时间段又平均分为q个单元,因此共有k × q个优先级;LinearEDF(k)是文献[2]提出的策略,其最大死限对应的时间范围平均划分为k个时间段;Fuzzy是本文提出的策略。

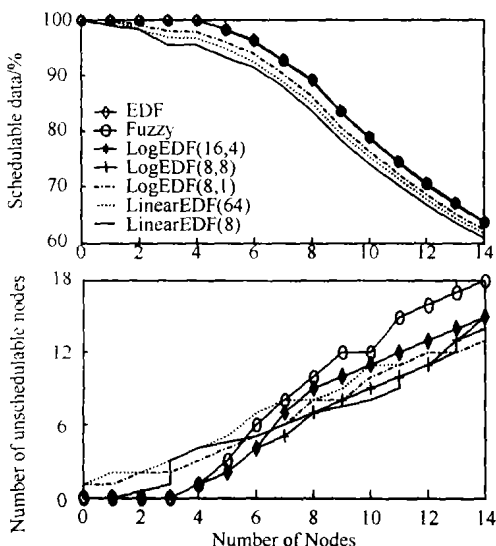


图5 网络负荷变化时各调度策略可调度性能的比较

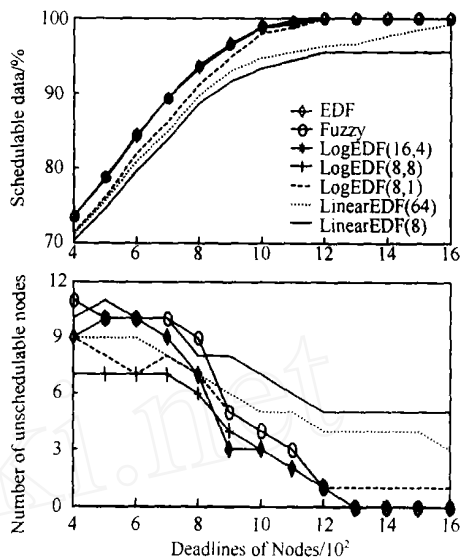


图6 死限范围变化时各调度策略可调度性能的比较

由图中可以看出, Fuzzy与EDF/LogEDF(16, 4)的可调度性能的差异很小,图5仅低0.01%,图6低0.04%,但好于LogEDF(8, 8);LinearEDF(8)和LinearEDF(64)的性能较差;LinearEDF(*)和LogEDF(8, 1)甚至当死限值达到1 600 μs时仍无法保证实时数据的完全调度。从不可调度的节点数量看, Fuzzy高于DEF/LogEDF(16, 4)策略,反映了模糊策略具有一定的平均性。

4.1.2 实时非周期数据的可调度性能实验

当非周期实时数据参数变化时,各动态调度策略的可调度性能比较如表3所示。表中第1行是周期为1 600 μs的周期数据节点取3个时,实时数据完全可调度条件下MIT = 1 s的非周期节点的最大允许数量;第2行是周期为1 600 μs的周期数据节点取4个时,实时数据完全可调度条件下MIT = 1 s的非周期节点的最小允许死限取值。可以看出,当模糊策略中的SDB选取合适时,可获得与EDF/LogEDF(16, 4)相似的可调度性能,并且优于LogEDF(8, 8)的可调度性能。但当SDB = 2 000 μs时,无论非周期节点的死限取为何值,均不能实现完全调度。

表3 非周期实时数据参数变化时可调度性能实验结果

	EDF	Fuzzy (SDB = 1 000 / 1 500 μs)	Fuzzy (SDB = 2 000 μs)	LogEDF (16, 4)	LogEDF (8, 8)
Node	3	3	2	3	2
Deadline	730 μs	730 μs	—	730 μs	890 μs

4.1.3 设定死限界SDB对系统可调度性能的影响

死限界SDB的设定直接影响模糊策略对于实时需求的敏感程度,从而影响网络的可调度性能。SDB取值越小,对实时需求的敏感度越低,可调度性能也越低;SDB取值越大,灵敏度越高,但由于引

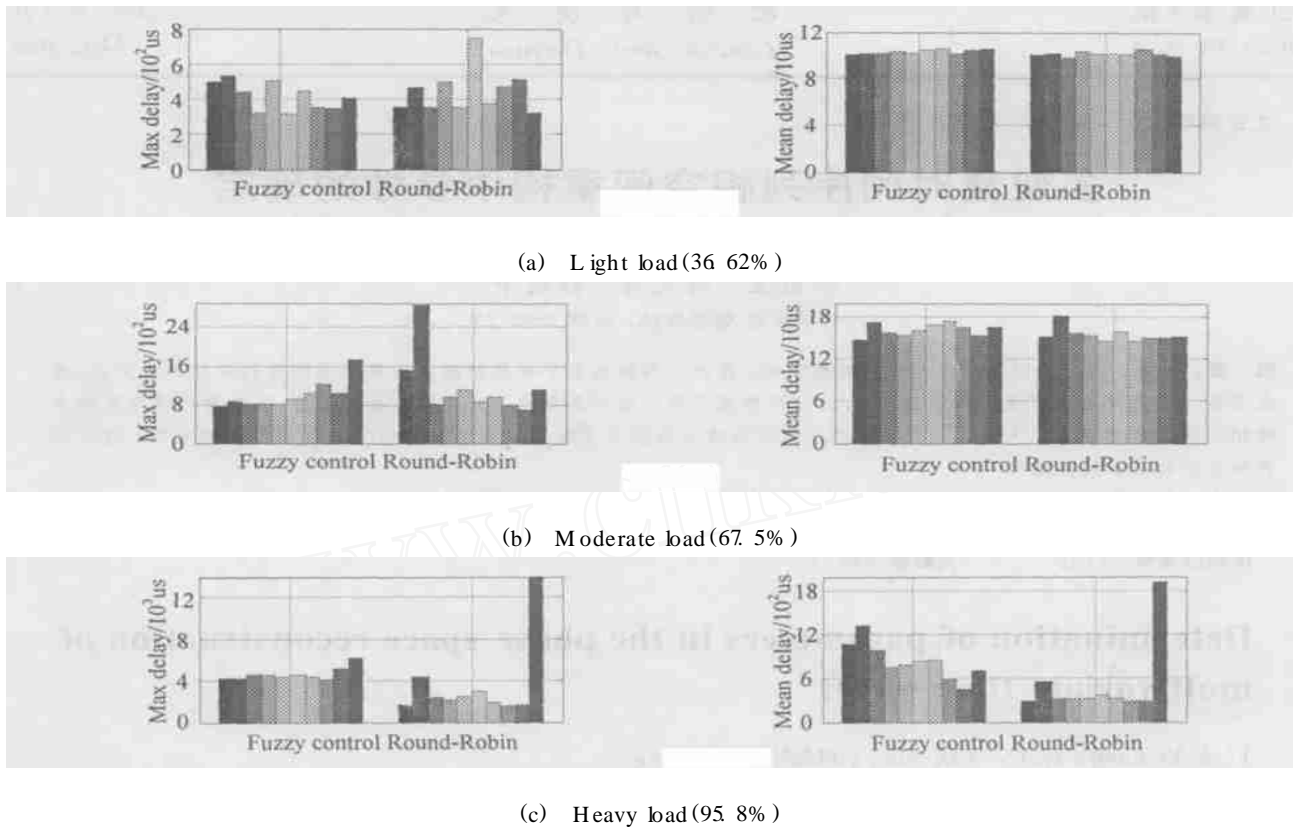


图7 两种不同策略下非实时数据服务性能的比较

入了优先级倒置问题,反而使可调度性能降低

当SDB选择过大($3\ 500\ \mu\text{s}$)或过小($500\ \mu\text{s}$)时,模糊策略的可调度性能较差。尽管死限增加到 $1\ 600\ \mu\text{s}$,模糊策略仍不能保证系统的完全可调度性能。当 $\text{SDB} = (1\ 000 \sim 2\ 000)\ \mu\text{s}$ 时,其性能与理想的EDF策略之差为4%,由表3可知, $\text{SDB} = (1\ 000 \sim 1\ 500)\ \mu\text{s}$,其性能与理想的EDF策略相差甚小。上述实验表明,只要参数选择合适,模糊策略只用8个优先级便可达到与理想EDF策略相近的实时数据可调度性能,从而在满足一定的服务范围条件下保证系统较高的资源利用率。

4.2 非实时数据的公平服务性能实验

在对非实时数据的公平服务性能的测试中,假定网络中无实时数据,非实时数据节点有10个,其数据到达满足泊松分布,平均到达率在 $0.4/\text{ms} \sim 1/\text{ms}$ 之间。当CAN网的传输速率为 $1\ \text{M}\ \text{bps}$ 时, $79\ \text{bits}$ 的非实时数据帧的传输时间为 $79\ \mu\text{s}$ 。在不同的网络负荷下:轻载(36.62%),中载(67.5%)和重载(95.8%),模糊策略与Round-Robin策略^[8]的服务性能如图7所示。

在Round-Robin策略下,由于带宽平均分配给各数据节点,高数据到达率节点将经历较大的平均传输时延,网络各节点的负荷不均衡。相比之下,本文提出的模糊策略具有较好的公平服务性能,说明

高数据到达率节点获得了相应需求的带宽,从而保证了网络各节点的负荷均衡。

5 结 论

合理配置CAN数据帧的标识域以获得网络较高的资源利用率和数据满意的QoS需求,是CAN网络研究中的关键问题。本文利用CAN网的广播特性,提出一种新的闭环模糊优先级配置策略。由于使用了网络的状态信息和第2优先级信息(数据标识域),并借助于模糊控制逻辑,该策略可用较少的优先级实现实时数据较高的可调度性和非实时数据的服务公平性。较少的优先级只占用较少的bit位,因而该策略不仅保证了CAN网较高的带宽利用率,而且扩大了CAN网的服务范围。

参考文献(References)

- [1] Torngren M. A perspective to the design of distributed real-time control applications based on CAN [EB/OL], <http://www.damek.kth.se>, Oct 6, 2003
- [2] Zuberi K M, Shin K G. Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network [J]. *IEEE Trans on Computers*, 2000, 49(2): 182-188
- [3] Natale M D. Scheduling the CAN bus with earliest deadline techniques [A]. *Proc on Real-time Systems Symposium* [C]. Orlando, 2000: 259-268

(下转第293页)

$$V_n^{(2)} = (x_{1,n}, x_{1,n-6}, x_{1,n-12}, x_{1,n-18}, x_{1,n-24}, \\ x_{2,n}, x_{2,n-3}, x_{2,n-6}, x_{2,n-9}, \\ x_{3,n}, x_{3,n-5}, x_{3,n-10}, x_{3,n-15}, x_{3,n-20}).$$

为了验证以上所求得的两组重构参数的优劣性, 本文分别以相空间 $V_n^{(1)}$ 和 $V_n^{(2)}$ 为基础, 应用相空间重构预测算法来拟合测试序列 $\{y_i\}$, 并利用下式计算平均拟合误差

$$AE(V_n) = \frac{1}{14} \sum_{i=1}^{14} \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right|, \quad (15)$$

式中 V_n 表示重构相空间。经计算得到 $AE(V_n^{(1)}) = 3.98\%$, $AE(V_n^{(2)}) = 1.17\%$ 。 $AE(V_n^{(2)})$ 的值明显小于 $AE(V_n^{(1)})$, 其根本原因在于相空间 $V_n^{(2)}$ 的重构质量大大优于相空间 $V_n^{(1)}$, 而相空间的重构质量则完全取决于重构参数的选择。以上过程验证了本文方法相对于文献[3]方法的优越性。

5 结 语

本文首先介绍了多变量时间序列相空间重构理论, 然后提出一种基于平均预测误差最小化的相空间重构参数确定法。该方法能够同时确定重构嵌入维数及时间延迟, 而且所求得的重构参数更为优化。最后将所提出方法应用于股票市场非线性动力系统的相空间重构, 通过比较和分析, 验证了该方法的优越性。

参考文献(References)

- [1] Takens F M. Detecting strange attractors in fluid turbulence[A]. *Dynamical Systems and Turbulence*[C]. Berlin: Springer, 1981: 21-80
- [2] Hastings S P, Troy W C. A shooting approach to chaos in the Lorenz equations [J]. *J of Differential Equations*, 1996, 127(1): 41-53

- [3] Cao Liangyue, Mees A listair, Judd Kevin. Dynamics from multivariate time series [J]. *Physica D*, 1998, 121(1-2): 75-88
- [4] 陆婕, 顾圣士, 蒋巍. 多维时间序列在相空间重构中的应用[J]. *洛阳大学学报*, 2002, 17(2): 9-13
(Lu J, Gu S S, Jiang F. Application of multivariate time series in constructing phase space [J]. *J of Luoyang University*, 2002, 17(2): 9-13)
- [5] 王永忠, 曾昭磐. 混沌时间序列的局域线性回归预测方法[J]. *厦门大学学报*, 1999, 38(4): 636-640
(Wang Y Z, Zeng Z P. A local regression forecasting method of chaotic time series [J]. *J of Xiamen University*, 1999, 38(4): 636-640)
- [6] Rosenstein M T, Collins J J, Luca C. Reconstruction expansion as a geometry-based framework for choosing proper delay time[J]. *Physica D*, 1994, 73(1): 82-89
- [7] Fraser A M. Information and entropy in strange attractors[J]. *IEEE Trans on IT*, 1989, 35(2): 245-262
- [8] Abarbanel H D I, Brown R, Sidorowich J J, et al. The analysis of observed data in physical systems[J]. *Rev Mod Phy*, 1993, 65(4): 1331-1392
- [9] 岳毅宏, 韩文秀. 混沌系统可预测尺度研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2003, 23(6): 91-95
(Yue Y H, Han W X. Study on the predictable size of chaotic systems[J]. *Systems Engineering- Theory and Practice*, 2003, 23(6): 91-95)
- [10] 薛福珍, 韩怀中, 罗超. 结合混沌预测的改进的OGY控制方法[J]. *控制与决策*, 2002, 17(5): 536-540
(Xue F Z, Han H Z, Luo C. Algorithm combining chaos prediction with improved OGY control method [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(5): 536-540)

(上接第 289 页)

- [4] Livani M A, Kaiser J, Jia W J. Scheduling hard and soft real-time communication in a controller area network [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7: 1515-1523
- [5] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L. Error encoding algorithms for networked control[A]. *Proc of the 38th Conf on Decision and Control*[C]. Phoenix, 1999, 5: 4933-4938
- [6] Pedreiras P, Almeida L. EDF message scheduling on

- controller area network [J]. *Computing and Control Engineering J*, 2002, 13(4): 163-170
- [7] Nolte T, Sjodin M, Hansson H. Server-based scheduling of the CAN bus[EB/OL]. www.mrtc.mdh.se/publications/0534.pdf, May 7, 2003
- [8] Cena G, Valenzano A. Achieving round-robin access in controller area networks[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2002, 9(6): 1202-1213