

# 一种基于三角模糊数的 VANETs 机会路由算法\*

王建强<sup>a</sup>, 吴辰文<sup>b</sup>

(兰州交通大学 a. 交通运输学院; b. 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 分析了现有车用自组织网络(VANETs)的路由算法,提出一种新的基于三角模糊数的机会路由算法。新算法将转发节点与目标节点的距离、到达目标节点的方向、行驶速度向量、重传次数、车流状况等因素作为目标函数进行分析计算,采用熵权系数法确定各因素权重。路由过程中,贪婪选择向量值最大的节点转发数据包;遇到网络不连续时,将采用存储—携带—转发的机会路由策略。仿真结果表明,该算法能够较好地适用于 VANETs 各种场景。

**关键词:** 车用自组织网络; 机会路由; 多属性决策; 三角模糊数; 车联网

**中图分类号:** TP393; TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2011)03-1084-04

**doi:**10.3969/j.issn.1001-3695.2011.03.082

## VANETs opportunistic routing algorithm based on triangular fuzzy number

WANG Jian-qiang<sup>a</sup>, WU Chen-wen<sup>b</sup>

(a. School of Traffic & Transportation, b. School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Introducing currently VANETs routing algorithms, the paper proposed a novel opportunistic routing algorithm based on triangular fuzzy number. The algorithm analyzed and calculated these factors as objective functions, including the distance between the forwarding and the destination, the direction to the destination, the forwarding velocity vector, retransmission numbers and traffic flow conditions. It adopted an entropy weight coefficient method to determine each factor weight. In routing process, the node would select greedily the highest vector-valued node to propagate packets, and used a store-carry-forward opportunistic strategy in spare networks. Simulation results indicate that the algorithm can apply better to various VANETs scenarios.

**Key words:** VANETs; opportunistic routing; multi-attribute decision-making; triangular fuzzy number; Internet of vehicles

## 0 引言

车用自组织网络(vehicular Ad hoc networks, VANETs)是智能交通系统(intelligent transportation systems, ITS)的重要组成部分,具有广阔的应用空间和巨大的商业价值。在 VANETs 当中,车辆一般装备有通信设备,可以实现车辆之间的通信(vehicle-to-vehicle communication, V2V)以及车辆与路旁固定设施之间的通信(vehicle-to-roadside communication, V2R)<sup>[1]</sup>。VANETs 的应用可以在车辆安全行驶、交通管理、公共交通服务以及商业增值业务方面得以体现,如 Internet 接入、事故预警、超速警告、车辆实时监控、协助驾驶、交通流诱导、天气预报等。

上海世博会期间,上汽—通用汽车馆里基于车联网概念设计的未来汽车引起全球瞩目,向全世界勾画出了一幅零排放、零油耗、零堵塞、零事故且驾乘充满时尚和乐趣的 2030 美好城市交通愿景,车联网也成了全球顶尖信息技术专家们竞相关注的焦点话题。VANETs 与车联网既有联系,也有区别。两者的目标是一致的,都是为了构建新一代智能交通系统,为人们提供更加便捷舒适的服务;它们所研究的对象也基本一致,都是道路上行驶的具备通信功能的智能车辆。但是,车联网研究的

内容要更为宽泛一些,包括了实现车联网所需的硬件、软件以及射频识别等技术;而 VANETs 研究的重点则是车辆间的通信技术。当然,技术细节上的差别就更大了,车联网是物联网技术在智能交通系统中的一种应用,而 VANETs 的技术基础则是 IEEE 802 系列的局域网技术。

VANETs 的本质是一种特殊的移动 Ad hoc 网络(mobile Ad hoc networks, MANETs),除具有 MANETs 的共同特点外,还有自身的一些特点,如快速变化的网络拓扑结构、节点的高速移动、整个网络时常被分隔为不连续的部分等<sup>[2]</sup>。文献[3]指出, VANETs 是一种密度不均匀的机会网络(opportunistic networks),可以考虑在 VANETs 中引入机会路由的思想及相关研究成果。机会网络不要求网络的全连通性,因此更适合实际 VANETs 的需求。

本文在分析比较现有的 VANETs 路由算法的基础上,结合 VANETs 的实际特点,提出一种可以适用于 VANETs 各种实际应用场景的新型机会路由算法。新算法中引入了三角模糊数(triangular fuzzy number)分析方法、贪婪转发机制以及机会路由思想等,考虑比对了多种路由判据,最大程度地避免了局部优化、路径冗余等传统的路由难题。仿真结果表明,新算法具

**收稿日期:** 2010-08-28; **修回日期:** 2010-10-19 **基金项目:** 甘肃省自然科学基金资助项目(3ZS062-B25-006);兰州市科技计划资助项目(2009-1-5)

**作者简介:** 王建强(1980-),男,山东临沂人,讲师,硕士,主要研究方向为计算机网络在智能交通中的应用(xinxijwq@126.com);吴辰文(1964-),男,教授,主要研究方向为无线分布式网络性能评测及应用、网络安全。

有较好的网络性能,具备一定的可扩展性和动态适应性。

### 1 VANETs 路由协议的研究进展

当前,国内外学者已经提出了一些相关的VANETs路由算法<sup>[4-6]</sup>,具体归纳如表1所示。

表1 VANETs路由算法的分类

分类	主要代表
传统 Ad hoc 路由	AODV、DSR、OLSR、PRAODV、PRAODVM、ZOR
基于位置信息的路由	GPSR、GPCR、SAR、CAR、GSR、A-STAR、STAR
聚簇路由	COIN、LORA_CBF
广播路由	UMB、BROADCOMM
地域性组播路由	IVG、Abiding Geocast
机会路由	MOVE、VADD、SADV、GeOpps

传统的 Ad hoc 网络路由算法并非专门为 VANETs 设计,没有充分考虑到 VANETs 的动态特性,在 VANETs 中表现出来的性能不够理想。

基于位置信息的路由算法较其他的一些路由算法可能更具有优势<sup>[7]</sup>,是 VANETs 中一种主流的路由算法。这类算法的工作过程都需要地理位置信息的辅助,个别算法的实现过程还需要借助于电子地图,如 GSR、SAR、A-STAR、STAR 等协议。

聚簇路由算法(cluster-based)一般是将网络中的所有节点按照一定的算法形成不同的簇,在每个簇内部选择产生一个簇头,由此簇头负责本簇内部以及不同簇之间的通信。这类算法具有较好的稳定性以及较少的网络负载,对于节点的移动以及网络规模的变化具有较好的自适应性;主要问题在于为了形成簇以及维护簇内部的信息造成了额外的网络开销,相应地也增加了传输延迟。

广播路由算法(broadcast)主要应用于一些特定的场合(如紧急数据分发、实时路况信息传递等),需要使用广播方式来传递数据包;主要问题在于随着节点数的不断增加,对带宽的需求量将会呈指数倍增长,同时还会带来信道争用、网络拥塞等一系列问题。

地域性组播路由算法(geocast routing)本质上是一种基于位置信息的组播路由,实现上可以借助于受限的广播方式,也可以使用特殊的单播方式,工作时只在指定的相关区域(zone of relevance, ZOR)内进行受限的广播。这类路由算法的研究重点是如何有选择性地广播以便提高传输性能,节省网络带宽。

机会路由算法是一种新型路由策略,其核心思想是在网络不连续的情况下改变传统的转发模式,采用新型的存储—携带—转发机制,也就是说,让当前节点携带数据运行一段时间,直到遇见更为合适的转发节点的时候才将数据进行转发<sup>[8]</sup>。研究表明,机会路由机制比较适合 VANETs 的实际特点,表现出来的性能要优于其他种类的路由算法<sup>[9,10]</sup>。

### 2 新的 VANETs 机会路由算法

#### 2.1 问题分析

现有的路由算法一般只是单独考虑了位置信息、车辆运动信息和链路状态信息中的某一因素,将其作为算法的主要路由判据。而 VANETs 网络动态性较强、工作环境较为复杂,仅仅考虑某一方面的因素往往不能满足需要。因此,考虑采用多属性决策理论(multi-attribute decision-making)进行综合分析求解。多属性决策理论是决策理论研究的重要内容,已经在众多

领域中得以应用<sup>[11]</sup>。

由于 VANETs 的复杂性和多变性,使得一些决定路由性能的信息具有不确定性和模糊性;加之人类思维的模糊特性,决定采用三角模糊数方法进行分析是较为合理的方案,可以考虑使用三参数区间表示各具体属性值。对多属性决策中属性值为模糊值的情况,使用三角模糊数求解最优值是较为理想有效的一种方法<sup>[12]</sup>。

依据以上分析,本文选用转发节点与目标节点的距离、到达目标节点的方向、行驶速度向量的大小及方向、数据链路层重传次数以及车流状况作为路由判据,综合分析影响 VANETs 路由性能的各项因素,力求实现准确高效、简单易行的 VANETs 路由算法。

#### 2.2 基本假设

假设1 每个节点(车辆)都知道自己以及其他相关节点(如邻居节点、目标节点)的实时地理位置信息。通过车载 GPS 装置可以实现该功能。

假设2 对于当前节点  $s$  而言,自己的位置坐标是  $(x_s, y_s)$ ,第  $i$  个邻居节点的位置坐标是  $(x_i, y_i)$ ,目标节点  $d$  的位置坐标是  $(x_d, y_d)$ ,如图1所示。

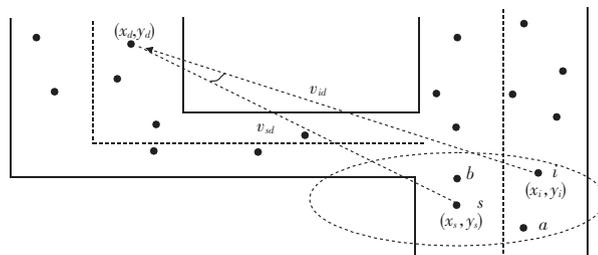


图1 算法中的路由判据说明

#### 2.3 路由判据分析

##### 1) 转发节点与目标节点的距离

数据转发过程中,需要逐跳接近目标节点,而距离就是一个最为重要的衡量指标。传统的一些基于位置信息的路由算法主要考虑的就是距离因素。对于源节点  $s$  而言,邻居节点  $i$  到达目标节点  $d$  的距离  $d_i$  可由式(1)计算得到:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_d)^2 + (y_i - y_d)^2} \tag{1}$$

##### 2) 转发节点距离目标节点的方向

转发节点距离目标节点的方向是一个重要的影响因素,特别是在交叉路口时,应该遵循方向优先的原则转发数据。路由过程中,方向可以由夹角的形式表示,而夹角可以依据节点位置坐标求得,如图1所示。节点  $i$  到达目标节点  $d$  的方向角  $\theta_i$  可由式(2)计算得到:

$$\theta_i = \begin{cases} \arctan \frac{y_d - y_i}{x_d - x_i} & x_d - x_i > 0 \\ \pi + \arctan \frac{y_d - y_i}{x_d - x_i} & x_d - x_i < 0 \end{cases} \tag{2}$$

##### 3) 转发节点(车辆)行驶速度

在某些情况下,车辆行驶速度(包括大小和方向)会直接影响到转发效率,如图2所示。在  $a, b, c$  三个转发节点中,  $s$  应该选择  $b$  作为下一跳转发节点,虽然  $b$  距离目标节点最远,但是  $b$  有可能最先将数据转发至目标节点  $d$ 。车辆行驶速度向量值可以通过位置信息计算得到。假设节点  $i$  在  $t$  时刻的位置坐标是  $(x_i, y_i)$ ,在此之前的  $t'$  时刻的位置坐标是  $(x'_i, y'_i)$ ,则

节点  $i$  的速度大小  $V_i$  可由式(3)计算得到,速度方向角  $\varphi_i$  可由式(4)计算得到:

$$V_i = \sqrt{(x'_i - x_i)^2 + (y'_i - y_i)^2} / (t' - t) \quad (3)$$

$$\varphi_i = \begin{cases} \arctan \frac{y'_i - y_i}{x'_i - x_i} & x'_i - x_i > 0 \\ \pi + \arctan \frac{y'_i - y_i}{x'_i - x_i} & x'_i - x_i < 0 \end{cases} \quad (4)$$

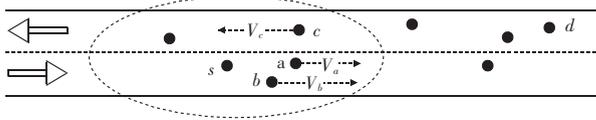


图 2 转发节点的速度影响因素

#### 4) 数据链路层重传次数

数据链路层的链路质量高低将会直接影响到路由的成败,这就决定了路由判据的选择过程中,需要考虑链路层传输质量的影响。重传次数是较为理想的链路层指标,因为它可以全面反映链路层的传输质量,获取也较为方便。本算法中,用  $RT_i$  表示第  $i$  个节点的重传次数。

#### 5) 转发节点所处的车流状况

进行路由选择时,转发节点应该考虑车流密度因素。处于车流密度较大区域的转发节点成功转发数据的概率要更高一些<sup>[13]</sup>。转发节点所处车流密度状况可以用自身的邻居节点个数  $N_i$  表示。在具体实现过程中,各节点将  $N_i$  连同自身的位置更新信息一同发送至自己所有的邻居节点。

### 2.4 算法过程

每个转发节点都依据自身当前的情况进行最优化决策,选择最佳节点转发数据;若当前邻居节点中不存在比自己更优的节点,则转入机会路由过程。具体流程如图 3 所示。

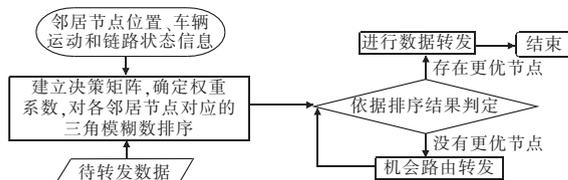


图 3 算法工作流程

决策过程中使用三参数区间数表示带有灰色性质的三角模糊数,记为  $A = [a_i^l, a_i^*, a_i^u]$  ( $0 \leq a_i^l \leq a_i^* \leq a_i^u \leq 1$ )。其中:  $a_i^l$ 、 $a_i^*$  分别表示对应属性区间数取值的上、下限,  $a_i^*$  表示对应的属性值。

三参数区间数的代数运算规则同一般代数运算。若  $X = (A_1, A_2, \dots, A_n)^T$  是任意三参数区间数列向量,则称  $\|X\| = \max\{|a_1^l|, |a_2^l|, \dots, |a_n^l|\}$  为  $X$  的范数。

#### 2.4.1 建立决策矩阵

在对以上六项路由判据分析计算的基础上,将计算得到的数值作为相应的属性值写入三参数区间数。对应的各目标函数的区间值如表 2 所示。在路由选择的过程中,如果某邻居节点的某一属性值不在相应的参数区间值内,则不考虑选择该节点作为下一跳转发节点。对于源节点  $s$  而言,若当前有  $n$  个邻居节点,分别记为  $N_1, N_2, \dots, N_n$ ,每个邻居节点都有自己相应的目标函数值。此时,可以建立三角模糊数表示的决策矩阵  $M$ :

$$M = ([b_j^l, b_{ij}^*, b_j^u])_{n \times 6} \quad (5)$$

表 2 目标函数的区间值

序号	目标函数名称	取值区间	说明
1	转发节点与目标节点的距离	$[0, d_s]$	$d_s$ 是 $s$ 到 $d$ 的距离
2	转发节点距离目标节点的方向	$[-\pi/2, \pi/2]$	$ \theta_i - \theta_s  \leq \pi/2$ , 具体取值是 $\theta_i - \theta_s$
3	转发节点行驶速度大小	$[0, v_{i\_max}]$	$v_{i\_max}$ 是邻居节点中速度最大值
4	转发节点行驶速度方向	$[0, 1]$	相向方向为 1, 相反方向为 0
5	数据链路层重传次数	$[0, RT_{i\_max}]$	$RT_{i\_max}$ 是邻居节点中最大的重传次数
6	转发节点所处的车流状况	$[0, N_{i\_max}]$	$N_{i\_max}$ 是邻居节点中相邻节点数目的最大值

可以看出,六个目标函数值的计算方法和量纲不同,无法进行统一度量,需要对决策矩阵  $M$  进行标准化处理。六个目标函数中,第 1、2、5 项为极小型指标,其余均为极大型指标。对于第 1 项指标,采用  $d'_i = d_s - d_i$  的方法将其转变为极大型指标;对于第 2 项指标,采用如式(6)的方式将其转变为极大型指标;对于第 5 项指标,采用  $RT'_i = 1/RT_i$  的方式转变为极大型指标。这时,可以将决策矩阵  $M$  转变为  $M' = ([c_j^l, c_{ij}^*, c_j^u])_{n \times 6}$ ,其中的元素值均为转变后的极大型指标值。

$$\theta'_i = 1 - |\theta_i - \theta_s| / (\pi/2) \quad (6)$$

至此,令  $[r_j^l, r_{ij}^*, r_j^u] = [c_j^l, c_{ij}^*, c_j^u] / \|M'_j\|$  进行标准化处理,可以得到标准决策矩阵  $R$ :

$$R = ([r_j^l, r_{ij}^*, r_j^u])_{n \times 6} \quad (7)$$

#### 2.4.2 权重系数确定

权重系数表示了各影响因素在决策过程中的重要程度。确定权重系数的方法有两种,即主观赋权法和客观赋权法。客观赋权法依据当前收集的信息来确定各属性的权重分配,其所依据的事实清楚,理论充足。本文使用客观赋权法中的熵权系数法确定各因素权重。由信息论可知,第  $j$  个目标函数的熵为

$$H_j = -(1/\ln n) \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad j=1,2,3,\dots,6 \quad (8)$$

其中:  $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{i=1}^n r_{ij}$  ( $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,6$ ),当  $r_{ij} = 0$  时,令  $f_{ij} = 0$ 。第  $j$  个优化目标的权重系数  $\omega_j$  如式(9)所示,六个目标函数的权重向量如式(10)所示。

$$\omega_j = (1 - H_j) / (6 - \sum_{j=1}^6 H_j) \quad j=1,2,\dots,6 \quad (9)$$

$$W = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5, \omega_6) \quad (10)$$

#### 2.4.3 组合计算

依据权重向量  $W$  和标准决策矩阵  $R$ ,可以得到一个由三角模糊数构成的向量  $D$  为

$$D = W \cdot R^T = ([d_1^l, d_1^*, d_1^u], [d_2^l, d_2^*, d_2^u], \dots, [d_n^l, d_n^*, d_n^u]) \quad (11)$$

#### 2.4.4 灰色模糊数的排序

为了找出最优的转发节点,需要对向量  $D$  中的各三角模糊数进行排序,进而由最优的三角模糊数确定出最优的转发节点。若有两个三角模糊数  $X = [x^l, x^*, x^u]$ ,  $Y = [y^l, y^*, y^u]$ ,且  $p_{xy} = (x^l + x^* + x^u) / (y^l + y^* + y^u)$ ,则  $X$  与  $Y$  之间的关系如表 3 所示。据此可以对  $D$  中的各三角模糊数进行两两比较排序,从而找出最佳转发节点。

表 3 三角模糊数之间的比较

条件	结果
$x^l = y^l$ 且 $x^* = y^*$ 且 $x^u = y^u$	$X = Y$
$x^* \neq y^*$ 且 $p_{xy} > 0.5$	$X > Y$
$x^* \neq y^*$ 且 $p_{xy} = 0.5$	$X$ 等价于 $Y$
$x^* \neq y^*$ 且 $p_{xy} < 0.5$	$X < Y$

### 3 仿真验证

仿真过程中,将新算法同 AODV 和 OLSR 协议进行比较,仿真场景参考了实际场景中的运行情况,每组仿真时间均为 300 s,仿真参数如表 4 所示。

表 4 仿真参数

参数名称	取值	参数名称	取值
场景大小	2 800 m × 1 500 m	数据包大小	1 000 Byte
车辆数目	80 辆	路由算法	AODV、OLSR、新算法
信道类型	Wi-Fi channel	节点速度	8 ~ 47 m/s,分 8 组分别进行

以端到端时延和分组投递率两项性能指标来评价新算法性能,如图 4、5 所示。可以看出,新算法的端到端时延较低,且变化幅度较小;在车速低于 40 m/s 时,时延大致在 20 ms 左右。新算法的分组投递率较之传统的路由算法情况要理想很多,在车速低于 40 m/s 时,成功交付率基本高于 60%;但是当车速高于 40 m/s 时,由于网络拓扑变化过快,新算法的网络性能出现了明显的下滑。

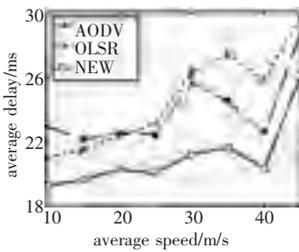


图 4 算法的端到端时延

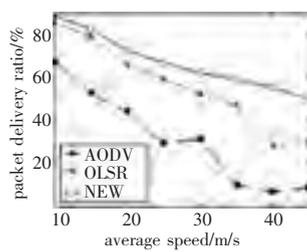


图 5 算法的分组投递率

由于采用了新的决策方法,避免了维护、查找路由表等复杂过程,加之考虑了更为周全的实际因素,新算法表现出了较为令人满意的结果。

### 4 结束语

VANETs 路由算法的研究是一项复杂而又极为重要的工作,涉及到通信、计算机、智能交通等诸多学科。本文探讨了 VANETs 与新近提出的车联网之间的关系,分析了基于三角模糊数的多属性决策方法在 VANETs 机会路由中的应用步骤,通过仿真验证了新算法的网络性能。将智能决策理论中的内容引入 VANETs 路由,是一项全新而又富有挑战的课题,尚有待

于进一步的深入探讨。

#### 参考文献:

- [1] BOUKERCHE A, OLIVEIRA H A B F, NAKAMURA E F, et al. Vehicular Ad hoc networks; a new challenge for localization-based systems[J]. *Computer Communications*, 2008, 31(12): 2838-2849.
- [2] CHEN Y S, LIN Yun-wei, LEE Sing-ling. A mobicast routing protocol in vehicular Ad hoc networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2010, 15(1): 20-35.
- [3] LEBRUN J, CHUAH C N, GHOSAL D, et al. Knowledge-based opportunistic forwarding in vehicular wireless Ad hoc networks[C]//Proc of Vehicular Technology Conference. 2005: 2289-2293.
- [4] BERNSEN J, MANIVANNAN D. Greedy routing protocols for vehicular Ad hoc networks[C]//Proc of Wireless Communications and Mobile Computing Conference. 2008: 632-637.
- [5] LI Fan, WANG Yu. Routing in vehicular Ad hoc networks: a survey[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2007, 2(2): 12-22.
- [6] BERNSEN J, MANIVANNAN D. Unicast routing protocols for vehicular Ad hoc networks; a critical comparison and classification[J].  *pervasive and Mobile Computing*, 2009, 5(1): 1-18.
- [7] FÜBLER H, MAUVE M, HARTENSTEIN H, et al. A comparison of routing strategies for vehicular Ad hoc networks[R]. Mannheim: University of Mannheim, 2002.
- [8] PELUSI L, PASSARELLA A, CONTI M. Opportunistic networking; data forwarding in disconnected mobile Ad hoc networks[J]. *Communications Magazine*, 2006, 44(11): 134-141.
- [9] ABUELELA M, OLARIU S, STOJMENOVIC I. OPERA: opportunistic packet relaying in disconnected vehicular Ad hoc networks[C]//Proc of the 5th IEEE International Conference on Mobile Ad hoc and Sensor Systems. 2008: 285-294.
- [10] WANG Jian-qiang, WU Chen-wen. A novel opportunistic routing protocol applied to vehicular Ad hoc networks[C]//Proc of the 5th International Conference on Computer Science & Education. 2010: 1005-1009.
- [11] BRYSON N, MOBOLURIN A. An action learning evaluation procedure for multiple criteria decision making problems[J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 96(2): 379-386.
- [12] MENG F Y, ZENG X L, LI Z Y. Research the priority methods of interval numbers complementary judgment matrix[C]//Proc of IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services. 2007: 42-48.
- [13] 宋超, 刘明, 龚海刚. 基于车流信息的车载自组织网络路由协议[J]. *计算机应用研究*, 2009, 26(12): 4672-4675.

(上接第 1079 页)保证模板文件在客户端浏览器中的命中率。然而这样对于在客户端缓存的模板文件存在安全性问题,不过可以在下一步工作中通过散列(hash)算法对文件进行散列计算等,确保文件的唯一性,这样可以保证模板文件在客户端不被修改。本文提出的改进策略使系统性能得到很大提升,它提高了 Web 系统服务器的吞吐率,同时也有效地降低了网络带宽消耗。

#### 参考文献:

- [1] LEFF A, RAYFIELD J T. Web-application development using the model/view/controller design pattern[C]//Proc of the 5th International Enterprise Distributed Object Computing Conference. Seattle, WA: IEEE Computer Society, 2001: 118-127.
- [2] PARR T J. Enforcing strict model-view separation in template engines[C]//Proc of the 13th International Conference on World Wide Web. New York: ACM Press, 2004: 224-233.
- [3] GARCIA F J, CASTANEDO R I, FUENTE A A J. A double-model approach to achieve effective model-view separation in template based

- Web applications[C]//Proc of the 7th International Conference on Web Engineering. Berlin: Springer, 2007: 442-456.
- [4] YANG F, GUPTA N, GERNER N, et al. A unified platform for data driven Web applications with automatic client-server partitioning[C]//Proc of the 16th International Conference on World Wide Web. New York: ACM Press, 2007: 341-350.
- [5] Smarty: template engine[EB/OL]. <http://www.smarty.net/>.
- [6] Genshi: template engine[EB/OL]. <http://genshi.edgewall.org/>.
- [7] Velocity: template engine[EB/OL]. <http://velocity.apache.org/>.
- [8] ARNOLDUS J, BIJPOST J, BRAND van den M. Repleo: a syntax-safe template engine[C]//Proc of the 6th International Conference on Generative Programming and Component Engineering. New York: ACM Press, 2007: 25-32.
- [9] 刘佳, 卢显良. 小型高效模板引擎的设计与实现[J]. *计算机应用研究*, 2006, 23(4): 222-224.
- [10] BOTTGER H, MØLLER A, SCHWARTZBACH M I. Contracts for cooperation between Web service programmers and HTML designers[J]. *Journal of Web Engineering*, 2006, 5(1): 65-89.