

## 信号交叉口改进延误模型及实测分析\*

# Improved Model of Delay and Measurement Analysis at Signalized Intersection

陈 栋, 刘泽高, 贾丽斯, 薛 郁\*\*

CHEN Dong, LIU Ze-gao, JIA Li-si, XUE Yu

(广西大学物理科学与工程技术学院, 广西南宁 530004)

(Institute of Physics Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要:**【目的】为了给国内城市信号交叉口规划设计和评价提供科学依据, 研究城市交叉口延误模型。【方法】对比 Australian 延误模型和 Canadian 延误模型, 提出改进的延误模型, 再采用牌照法, 对饱和度接近 1 的道路交通延误进行实测, 并把实测结果与 3 个模型进行对比。【结果】改进的延误模型在饱和度较低和较高的情况下, 与 Australian 延误模型和 Canadian 模型的模拟数据很接近; 在饱和度接近 1 时, 改进的延误模型与实测结果能较好吻合; 改进模型与 Brilon 和 Wu 的马尔科夫链方法比较, 形式简单, 计算简便, 可操作性好。【结论】改进的模型适用于平面混合低速的城市交叉口道路延误分析。

**关键词:**城市路网 车辆延误 交通实测 牌照法

**中图分类号:** U491 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2015)02-0231-06

**Abstract:**【Objective】In urban road network, vehicles delay generally approaches 80% at the intersection. Survey and investigation of delay at the intersection play an important role in the practical significance for urban traffic management and control. 【Methods】Compared to Australian delay model and Canadian delay model, an improved delay model was proposed in this paper. The delay was measured by the License Number Matching Method when the saturation was closed to 1. And then the measured results were compared with that of the three models 【Results】The improved delay model is similar to Australian delay model and Canadian delay model in the case of lower and higher saturation, respectively. When the saturation is close to 1, the improved delay model is better agreement with the measured results and approaches high precision. Compared with Markov chain method proposed by Brilon and Wu, it is so simple, convenient and easy-to-operate for the improved delay model. 【Conclusion】The improved model is suitable for analyzing the delay that the urban road intersections are mixing low speed.

**Key words:** urban road networks, vehicle delay, survey of traffic, the license number matching method

收稿日期: 2014-08-25

修回日期: 2014-09-25

作者简介: 陈 栋(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事智能交能研究。

\* 国家自然科学基金(批准号: 11262003 和 11047003)和广西壮族自治区研究生创新基础项目(批准号: 105930903077)资助。

## 0 引言

【研究意义】信号交叉口延误是评价信号交叉口的运行能力和服务水平的重要指标之一, 它反映了驾驶员舒适度、受阻程度以及行车能耗油耗和行车等待时间, 是交叉口信号控制设计可行性和道路规划建设

合理性的重要依据。各种机动车、非机动车和行人之间的冲突、交叉、交织、分流、合流等<sup>[1]</sup>以及各种相互作用的影响,使交叉口的交通情况变得非常复杂。延误指标受众多因素的影响,变化量很多,目前很难找到准确的方程来描述它。目前,各国的信号交叉口延误算法都是基于国情开发,因而具有较大差异。我国道路环境与西方发达国家差异显著,主要体现在信号交叉口交通流种类,设计和控制管理方式,以及出行人员的文化差异和整体素质。因此,需要研究适合于我国城市交叉口的交通延误分析方法,为我国信号交叉口规划设计和评价提供科学依据。

**【前人研究进展】**Daniel 等<sup>[2]</sup>最早提出确定性排队延误模型。而 Lighthill 和 Whitham<sup>[3]</sup>,以及 Richard<sup>[4]</sup>利用交通流体力学理论,提出交通流波动理论,首次描述交通波的存在。Michalopoulos 等<sup>[5]</sup>研究孤立交叉口车辆排队和消散的动态过程,分析信号交叉口交通波的传播过程。由于冲击波延误模型和排队延误模型都是假设车辆均匀到达,忽略了车辆到达的随机性。所以,Webster<sup>[6]</sup>假设车辆到达服从泊松分布,提出 Webster 延误模型。然而在该模型中,当饱和度接近 1 时,其延误时间发散,不符合实测情况。随后许多研究人员想弥补该模型的缺陷。Robertson<sup>[7]</sup>提出依时延误模型的概念,并对稳态随机延误模型的缺陷进行改进。Kimber 等<sup>[8]</sup>使用协调变换方法导出延误模型。交通工程研究人员根据模型和实践总结,得出 HCM 延误模型<sup>[9]</sup>、Australian 延误模型<sup>[10]</sup>和 Canadian 延误模型<sup>[11]</sup>。国内研究员也提出一些适合本土的交通延误模型。隗志才等<sup>[12]</sup>以宏观交通流为基础,用准冲击波近似方法代替冲击波,得到车流在饱和状态下交叉路口的时间延误。邵长桥<sup>[13]</sup>运用随机过程理论、计算机模拟和协调变换方法,改进了车辆延误模型。杨晓光等<sup>[14]</sup>提出信号灯控制交叉口停车线车辆延误模型。

**【本研究切入点】**基于中国国情,对比并改进国外的模型,可以设计适合于我国道路的延误分析模型。**【拟解决的关键问题】**采用牌照法,对饱和度接近 1 的道路交通延误进行实测,把实测延误结果与 Australian 延误模型、Canadian 延误模型和改进的模型得到的结果对比,发现改进的模型与实测数据拟合较好。

## 1 交叉口车辆延误的产生过程

车辆在行驶过程中,受到道路环境、交通干扰、交通管理和控制设施,以及驾驶员自身等因素的影响,运行过程会引起额外的时间损耗。由于因素众多,对各个干扰源都进行量化处理几乎不可能,所以在研究

过程中,一般只研究车辆本身的轨迹和时间延误。如图 1 所示,定义总延误为加速延误、减速延误和停车延误之和。

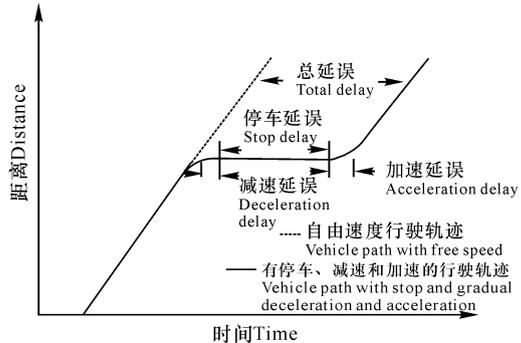


图 1 总延误定义

Fig. 1 Definition of total delay

由于驾驶员的反应时间延误和车辆加速限制,当交叉口信号灯从红色转换成绿色,车辆从停车线加速,短时间内就达到饱和流率;当信号灯从绿色转换成黄色,车辆需经过一段时间才会停止越过停车线。所以信号交叉口有效通行时间是有效绿灯时间,而不是实际绿灯持续时间,如图 2 所示。

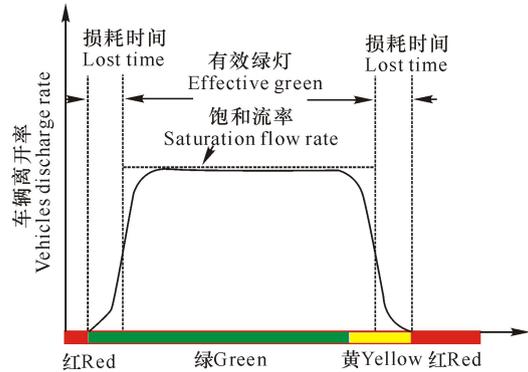


图 2 交叉口有效绿灯时间

Fig. 2 Effective green of the intersection

## 2 信号交叉口改进延误模型

### 2.1 稳态延误模型

经典的确定性排队模型能够预测欠饱和和交叉路口的平均车辆延误。根据几何及物理知识,由图 3 可知,交叉口车辆总的均匀延误为下半部分三角形面积。

由排队模型计算的车辆平均延误为

$$d = \frac{C(1 - \frac{g}{C})^2}{2(1 - x \frac{C}{g})} \quad (1)$$

式中,  $C$  为周期长度,  $g$  为有效绿灯时间,  $q$  为车辆到达率。若  $c$  为相位的通行能力,  $S$  为饱和流率,则  $x$  为饱和度  $x = \frac{q}{c} = \frac{q}{S} \frac{C}{g}$ 。

Webster<sup>[6]</sup>假设车辆到达服从泊松分布,离开车头时距是相等的,得到

$$d = \frac{C(1-\frac{g}{C})^2}{2(1-x\frac{C}{g})} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65(\frac{C}{q})\frac{1}{3}x^{2+5g/C}, \quad (2)$$

式中,第1项为均匀延误,第2项为随机延误,第3项为修正因子,由实测分析和计算机拟合得到。该模型对于饱和度较低的孤立信号交叉口,结果符合很好。

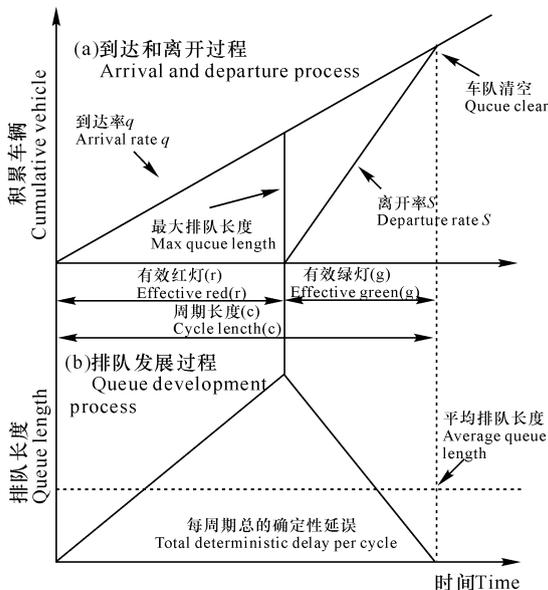


图3 欠饱和条件下的排队模型

Fig. 3 Queue model for undersaturation condition

## 2.2 依时随机延误模型

Webster 延误模型中,当饱和度接近 1 时,其延误时间发散。为克服这个缺陷,Robertson 提出依时延误模型,以期对稳态随机延误模型进行改进。他在研究过饱和交叉口的延误时发现,车辆延误可以分为均匀延误和过饱和延误两部分。

## 2.3 组合延误模型

由于稳态随机延误模型和依时随机延误模型使用的条件不一样,Whiting<sup>[15]</sup>提出用“组合”的表达式把两者统一:(1)对较低的饱和度,稳态延误模型较适合;(2)对大的饱和度,延误可用依时随机延误模型估计。该模型由 3 部分组成:均匀延误、随机延误和过饱和延误。但是当饱和度接近 1 时,稳态随机模型和依时随机延误模型的结果都不令人满意。

Kimber 和 Hollis 在此基础上进一步研究稳态模型与依时随机模型的协调问题。Akcelik 利用坐标变换方法获得实用的模型,建立 Australian 延误模型的主要数学形式。Australian 延误模型给出的延误函数,由式子(3)表示,

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + 900t_c[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{12(x-x_0)}{ct}}], \quad (3)$$

式中  $x_0 = 0.67 + \frac{gS}{600}$ ,  $t$  为观察时间段。

Canadian 延误模型来源于 Whiting 的基本思路,通常用于预测信号交叉口延误。该模型的数学表达式如下,

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + 900t_c[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{4x}{ct_c}}], \quad (4)$$

式中,  $t_c$  为估计时间段。

Brlon 等<sup>[16]</sup>使用马尔科夫链方法进行数值模拟,指出 Australian 模型和 Canadian 模型在饱和度 0.9~1.2 时,计算延误偏小;在较低饱和度和较高饱和度的结果几乎相同。Catling<sup>[17]</sup>分析发现,由于延误时间与饱和度存在某种不连续关系,采用分段函数取代连续函数表示延误方程,而每一分段函数部分连接成曲线,又能接近于或近似于连续曲线,既有利于描述各种不同交通状况,又能在数学上很好表述不连续关系。本文提出的改进模型是根据 Catling 模型思路,利用综合分析法,得到式(5),

$$d = \begin{cases} \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)}, & x < 1/2, \\ \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + 900t_c[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8x}{ct_c}}], & 1/2 \leq x < 1, \\ (C-g)/2 + 900t_c[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8x}{ct_c}}], & x \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

该式对于研究干扰繁多的交叉口可以较好的适用。而且对比 HCM2000 模型,该模型是其中的一个特例。

## 3 实测分析

### 3.1 调查方法

由于牌照法<sup>[18]</sup>取样速度快,室外工作时间短,能较准确的测得不同时段的平均行程时间及各种类型车辆的平均行程时间,便于交叉口延误分析,所以采用牌照法。

观测方法:将交叉口入口引道停车线作为出口断面,记为断面 II;断面 I 位于引道上游,参照以往的人

口最大排队长度。断面 I, II 之间的距离为 248 m。调查时,两个人在断面 I 路侧,架设一台摄影机对准断面 I;另外两人在断面 II 路侧,将摄影机对准断面 II;通过手机联系,同时开始拍摄,每次拍摄持续 45 min,进行多次测量;将拍摄的视频在计算机上回放,记录车辆的特征、车型、车号和通行时间;最后对调查数据进行分析 and 整理,求出平均引道延误。

牌照法调查引道延误所需的最小样本数:

$$N = \left( \frac{S_i K}{E_i} \right)^2, \quad (6)$$

式中,  $S_i$  为引道时间的样本标准差;  $K$  为所要求的置信度下的  $K$  值,取置信度为 90% 的  $K$  值,即  $K = 1.64$ ;  $E_i$  为引道时间的容许误差。

### 3.2 分析结果及模型比对

调查南宁市大学衡阳路东进口方向 9:00~10:00 时段和 17:00~18:00 时段的车辆延误。观测引道路段的长度为 248 m,测得车辆自由行驶速度为 25 km/h,算出自由行驶时间为 35.7 s,对于牌照法,取置信度为 90%。该路口各个信号相位如表 1 所示,示意图见图 4。

表 1 信号相位(C=175 s)

信号相位 Signal phase	① ←	② ↘	③ ↓	④ ↑
绿灯 Green	52 s	22 s	46 s	46 s
黄灯 Yellow	3 s	3 s	3 s	3 s

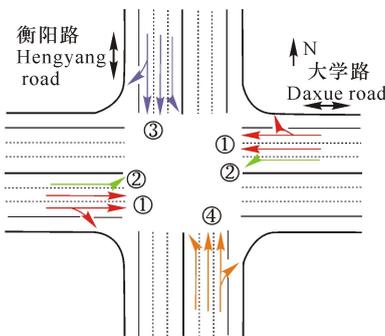


图 4 交叉路口示意图

Fig.4 Schematic of the measured intersection

对该路口进行两个时段的实测,每次采样时间为 45 min,路口通行能力和车辆到达率是通过多次采集数据的平均值。在测量延误中,每次取样车辆数都达到公式(6)所要求的最小样本数,测量数据的处理方法是根据牌照法分析延误方法。通过对南宁市大学衡阳路东进口方向进行现场实测,分析整理所得数据(表 2,3)。在 9:00~10:00 时段观测道路的车辆总

到达率  $Q = 1337$  veh/h,其中直行车辆占 60%,  $q = 803$  veh/h,直行相位通行能力  $c = 830$  veh/h,饱和流率  $S = 2793$  veh/h,饱和度  $x = q/c = 0.967$ 。取  $t = 1/2$  h,  $t_c = 1/2$  h,将有关参数代入 Australian 延误模型,Canadian 延误模型和改进的延误模型,得到表 4。

表 2 9:00~10:00 时段实测结果

日期 Date	测量延误 Measuring delay(s)	到达率 q Arrival rate (veh/h)	通行能力 Capacity (veh/h)	饱和度 Saturation
6月6日 June 6th	96.8	790	830	0.951
6月11日 June 11st	102.8	792	830	0.954
6月14日 June 14th	127.1	810	830	0.976
6月19日 June 19th	107.4	799	830	0.963
6月21日 June 21st	118.3	714	830	0.981

表 3 17:00~18:00 时段实测结果

日期 Date	测量延误 Measuring delay(s)	到达率 q Arrival rate (veh/h)	通行能力 Capacity (veh/h)	饱和度 Saturation
6月6日 June 6th	183.5	848	750	1.130
6月11日 June 11st	179.3	838	750	1.117
6月14日 June 14th	177.6	837	750	1.116

表 4 9:00~10:00 时段实测延误和模型延误对比

Table 4 Comparison between measured delay and model delay in the interval 9:00~10:00

项目 Item	实测延误 Measuring delay	澳大利亚 延误模型 Australian delay model	加拿大 延误模型 Canadian delay model	改进的延 误模型 Improved delay model
延误时间 Delay time(s)	110.5	85.5	91.5	108.6
相对误差 Relative error		22.6%	16.9%	1.8%

在 17:00~18:00 时段观测道路的车辆总到达率:  $Q = 1402$  veh/h,直行车辆占 60%,  $q = 841$  veh/h,直行相位通行能力  $c = 750$  veh/h,饱和流率  $S = 2793$  veh/h,饱和度  $x = q/c = 1.121$ 。取  $t = 1/2$  h,  $t_c = 1/2$  h,将有关参数代入 Australian 延误模型,Canadian 延误模型和改进的延误模型,得到表 5。

根据图 5,表 4 及表 5 的分析结果,当饱和度远小于 1,3 个模型模拟结果较为接近。原因是 Aus-

tralian 延误模型,Canadian 延误模型和改进的延误

表 5 17:00~18:00 时段实测延误和模型延误对比

Table 5 Comparison between measured delay and model delay in the interval 17:00~18:00

项目 Item	实测延误 Measuring delay	澳大利亚 延误模型 Australian delay model	加拿大 延误模型 Canadian delay model	改进的 延误模型 Improved delay model
延误时间 Delay time(s)	180.1	193.6	192.9	197.2
相对误差 Relative error		7.5%	7.1%	9.5%

模型都是假设车辆以泊松分布到达,在饱和度远小于 1 时,与实际情况吻合。当饱和度大于 1,3 个模型的模拟结果较好符合。原因是在饱和度远大于 1 时,车辆受到随机延误较小,而 3 个模型都是用坐标变换方法。然而,在饱和度接近 1 时,改进的延误模型的结果优于 Australian 延误模型和 Canadian 延误模型。原因:考虑到我国的实际交通呈低速混合的特点,平面交叉路口处,机动车、非机动车、行人之间相互影响明显,车辆遭遇各种各样不确定的干扰,往往造成交叉口的时间延误增加。当饱和度较低,道路车辆密度较小,车辆随机到达,受到扰动后能很快进行调整,扰动的影响结果较小;当饱和度较高,道路车辆密度较大,车辆排队,周围的扰动对车辆几乎没有影响。综上所述,改进的模型与 Australian 延误模型和 Canadian 延误模型很接近。从图 5 还可以看出,改进的模型在饱和度为 0.7~1.2,时间延误偏大,是由于我国交叉口的扰动因素较多而且强烈,导致车辆的实际通行时间增大,延误就增大。

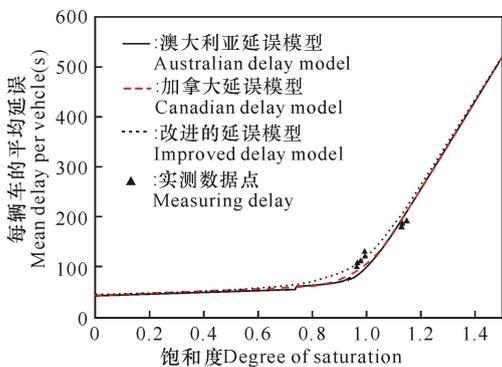


图 5 3 个模型对比

Fig. 5 Comparison diagram of three models

#### 4 结论

当饱和度远小于 1,Australian 延误模型,Canadian 延误模型和改进的延误模型模拟结果较为接近。原因是 3 模型都是假设车辆以泊松分布到达,在饱和度远小于 1 时,与实际情况非常吻合。当饱和度

远大于 1 时,3 个模型的模拟结果较好符合:(1)改进的延误模型在饱和度较低和饱和度较高的情况,与 Australian 延误模型和 Canadian 模型很接近;在饱和度接近 1 时,改进的延误模型较好地与实测结果吻合,模型提高了精度。(2)改进模型与 Brilon 和 Wu 的马尔科夫链方法比较,形式简单,计算简便,可操作性好。改进的模型适合研究我国混合低速,扰动较为频繁的交通状况下的车辆延误。

#### 参考文献:

- [1] 李春艳. 信号交叉口左右转交通流延误模型研究[D]. 北京:北京工业大学,2004.  
Li C Y. Traffic Flows at Signalized Intersections Research on Delay Model of Left-turn and Right-turn[D]. Beijing:Beijing University of Technology,2004.
- [2] 丹尼尔 L 洛夫. 交通流理论(中译本)[M]. 北京:人民交通出版社,1983:36-45.  
Loff D L. Traffic Flow Theory(in Chinese) [M]. Beijing:China Communication Press,1983:36-45.
- [3] Lighthill M J,Whitham G B. On kinematic wave II , a theory of traffic flow on long crowded roads[J]. Proceedings of Royal Society of London,1955,229 (1178): 317-345.
- [4] Richards P I. Shock waves on the highway[J]. Operations Research,1956,4(1):42-51.
- [5] Michalopoulos P G,Stephanopoulos G,Pisharody V B. Modelling of traffic flow at signalized links[J]. Transportation Science,1980,14(1):9-41.
- [6] Webster F V. Traffic Signal Settings[R]. London,UK: Road Research Laboratory,Her Majesty Stationary Office,1958.
- [7] Robertson D I. Traffic models and optimum strategies of control[C]//Proceedings of the International Symposium on Traffic Control Systems,1979:262-288.
- [8] Kimber R M,Hollis E M. Traffic Queues and Delays at Road Junctions [R]. Crowthorne, UK: Transport and Road Research Laboratory,1979.
- [9] Transportation Research Board,Highway Capacity Manual 2000 [R]. Washington DC, US: National Research Council,2000.
- [10] Akcelik R. Traffic Signals:Capacity and Timing Analysis [R]. Melbourne, Australia: Australian Road Research Board,1981.
- [11] Troutbeck R,Blogg M. Queueing at congested intersections[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1646 (1): 124-131.
- [12] 魏丽英,隗志才,贾洪飞. 饱和状态下信号交叉口延误的模拟分析法[J]. 系统工程理论与实践,2000 (11):

Wei L Y, Juan Z C, Jia H F. A simulation model for evaluating delay at signalized intersection under over-saturated situation[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2000(11): 105-110.

[13] 邵长桥. 信号交叉口延误研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002: 55-58.

Shao C Q. The Study of Signalized Intersection Delay [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002: 55-58.

[14] 杨晓光, 杨佩昆. 信号灯控制交叉口停车线车辆延误模拟算法[J]. 同济大学学报, 1993(3): 67-73.

Yang X G, Yang P K. Simulative models on signalized intersection stop-line delay[J]. Journal of Tongji University, 1993(3): 67-73.

[15] Whiting P D. The Glasgow Traffic Control Experi-

ment; Interim Report on SIGOP and TRANSYT[R]. London, UK: Road Research Lab, 1972.

[16] Brilon W, Ning W U. Delays at fixed-time traffic signals under time-dependent traffic conditions[J]. Traffic Engineering & Control, 1990, 31(12): 623-631.

[17] Catling I. A time-dependent approach to junction delays [J]. Traffic Engineering & Control, 1977 (18): 520-526.

[18] 王建军, 严宝杰. 交通调查与分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 146-150.

Wang J J, Yan B J. Survey and Analysis of Traffic[M]. Beijing, China Communication Press, 2004: 146-150.

(责任编辑: 尹 闯)

(上接第 230 页 Continue from page 230)

Next, by the properties of  $\epsilon_{G \otimes G'}$ , we can easily get

$$(1 \otimes \epsilon_{G \otimes G'}) \Delta_{G \otimes G'}(kg \otimes lg') = kl \sum_{\substack{g_1 g_2 = g \\ g'_1 g'_2 = g'}} \delta_{g_2, e_G} \delta_{g'_2, e_{G'}}(g_1 \otimes g'_1) = kl(g \otimes g') = (kg \otimes lg').$$

In the same way, we can show that  $(\epsilon_{G \otimes G'} \otimes 1) \Delta_{G \otimes G'}(kg \otimes lg') = (kg \otimes lg')$ .

A similar result also holds when we consider monoid as set. Therefore we can obtain the following inclusion immediately.

**Theorem 2.1** The  $K$ -linear isomorphism  $K[G \times G'] \simeq K[G] \otimes K[G']$  defined by  $f'((g, g')) = g \otimes g'$ , for all  $g \in G, g' \in G'$  is an isomorphism of coalgebra.

**References:**

[1] Radford D E. Hopf Algebra[M]. London: World Scientific Publishing, INC, 2012: 20-34.

[2] Dascalesu S. Hopf Algebra[M]. New York: Marcel Dekker, INC, 2011.

[3] Fekake A E. Real Linear Algebra[M]. New York: Marcel Dekker, INC, 1985.

[4] Yokonuma T. Tensor Spaces and Exterior Algebra[M]. New York: American Mathematical Society, 1992: 7-26.

[5] Ren B S, Xia J Y, Lin S X, et al. The weak Hopf algebra structure on crossed coproduct[J]. Guangxi Sciences, 2012, 19(4): 309-312.

(责任编辑: 尹 闯)