

运用可变形环岛提高交叉口通行能力的方法

Improving Roundabout Capacity Using Irregular Geometry

吴 杰, 韩宝睿, 沈颖洁, 刘思思

(南京林业大学汽车与交通工程学院, 江苏 南京 210037)

WU Jie, HAN Bao-rui, SHEN Ying-jie, LIU Si-si

(College of Automobile and Traffic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing Jiangsu 210037)

摘要: 在环形交叉口增加信号控制设备对改善交叉口拥堵和混乱有积极意义,但会导致车辆行驶不连续。针对这一问题,探讨既可保障连续行车又可适应各进口道流量变化、提高环形交叉口通行能力的方法。利用交织理论模型和间隙-接受理论模型计算不同车道数、不同环行流量下交叉口的通行能力。提出提高环形交叉口通行能力的两个方案:改变环岛半径和平移环岛位置。利用交通仿真技术对不同车道数的环形交叉口进行交通流模拟,分析两个方案的交通适应性。评价分析结果表明:改变环岛半径,可提高高峰时段的通行能力和平峰时段的服务水平;早晚高峰时段将环岛进行相应偏心移动,可为主交通流方向提供更多的车道,从而适应潮汐交通现象。

Abstract: Signal control at a roundabout helps to manage traffic and relieve traffic congestion but interrupts vehicles' continuous flow. To address the problem, this paper researches a methodology to improve roundabout capacity by not providing uninterrupted flow but also accommodating all traffic maneuvers. Based on the weaving and gap acceptance theory, the paper calculates roundabout capacity with different number of lanes and traffic volume. By presenting two scenarios of improving roundabout capacity including changing roundabout radius and shifting the center of roundabout, the paper discusses the applicability of the two scenarios through simulating roundabout with different number of lanes. The evaluation results show that changing roundabout radius can improve the capacity at peak hour and level of service at non-peak hour; while shifting the center of roundabout during morning and afternoon peak hour provides adequate number of lanes for the main traffic flow.

关键词: 交通控制; 环形交叉口; 通行能力; 交通仿真; 环岛半径; 偏心环岛

Keywords: traffic control; roundabout; capacity; traffic simulation; roundabout radius; decentered roundabout

中图分类号: U412.35

文献标识码: A

收稿日期: 2010-07-27

作者简介: 吴杰(1989—), 男, 江苏无锡人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 交通规划、交通设计。E-mail: 740569954@qq.com

平面环形交叉口是一种不需要信号灯控制的使车辆绕中心环岛按同一方向自行行驶的交叉口形式,有车辆连续行驶、安全性高、所需管理设施少的优势,且环岛中心多为绿化景观,有助于美化城市环境。然而,由于其通行能力的局限,流量达到一定程度时就会引起拥堵和混乱,导致行车延误增加、平均车速降低;而且环岛一般采用圆形、圆角方形或菱形等对称图形,当早晚高峰出现潮汐交通时,容易引起环形交叉口某一交织段的拥堵。国内外主要通过增加信号控制设备来改进环形交叉口,这种方法对改善交叉口拥堵和混乱有积极意义,但丧失了车辆连续行驶的特性。因此,本文针对对称的圆形环形交叉口进行研究,以寻求既可保障环形交叉口连续行车,又可适应各进口道流量变化的方法,并从理论和仿真两方面对改进方案进行论证。

1 环形交叉口通行能力理论计算分析

环形交叉口通行能力理论计算方法主要有两种: 1) 交织理论模型,以交织段能通过的最大交织流

量反映环形交叉口的通行能力；2)根据穿插及合流的间隙-接受理论建立模型，以进口道能进入环形交叉口的最大流量反映环形交叉口的通行能力。下面运用上述两种方法探讨不同环岛半径(即不同环行车道数)下的通行能力。

1.1 交织理论模型

交织理论反映的是交织段长度对通行能力大小的影响。对于常规环形交叉口，若交织段相对较长，驾驶人可充分利用这段环道以交织方式完成车道变换，进入或转出交叉口。因此，交织段上的通行能力决定了环形交叉口的通行能力。最具有代表性的交织理论模型 Wardrop 公式为

$$Q_m = \frac{354W(1 + e/W)(1 - P/3)}{1 + W/L}, \quad (1)$$

式中： Q_m 为交织段上的最大通行能力/(pcu·h⁻¹)； W 为交织段宽度/m； e 为进口道宽度/m； P 为交织段内进行交织的车辆与进入交织段全部车辆的比值(交织比)； L 为交织段长度/m。

式(1)适用于下列条件： $W = 6.1 \sim 18 \text{ m}$ ， $e/W = 0.4 \sim 1.0$ ， $P = 0.4 \sim 1.0$ ， $W/L = 0.12 \sim 0.4$ ^[1]。

值得注意的是，式(1)中隐含着交通状况、驾驶行为等较多的影响因素。若考虑所有因素，环岛半径对应的通行能力不是单一值，而是一个范围。本文仅针对交叉口面积固定的情况进行研究，简化了这一问题。

假设环形交叉口总面积不变，每条车道宽度均为 5 m，以南京市中山北路—热河路环形交叉口规模(3 车道，环岛半径为 30 m)为参照，探讨环岛半径以一个车道宽度递减或递增若干种情况下的通行能力。将环形交叉口的交织比 P 的实际观测值以及通过几何关系得出的不同环岛半径下的 W ， e ， L 作为已知条件代入式(1)进行试算，取环岛半径为 15~35 m 范围内的 5 种情况进行讨论。当环岛半径为 15 m 时设置专用右转车道，其上车辆不参与环道的交织， P 取公式适用的最小值 0.4；当环岛半径为 35 m 时，不设专用右转车道， P 取 1.0，其余的 P 值由内差法获得。计算得到的交叉口环岛半径与最大通行能力的关系见表 1 和图 1，可以看出，在面积一定的环形交叉口内，其通行能力随着环岛半径的增大而增大，到达某一值

后，通行能力开始降低，环岛半径为 30 m 的 3 车道环形交叉口在半径为 20~25 m 时的理论通行能力最大。

虽然改变环岛半径能够较大幅度提高交织段的通行能力，但是交织理论主要从交织段长度出发，未能反映车道数增加带来的交织次数增加而引发的延误增加。为了验证变化车道数对环形交叉口通行能力的影响，下面利用间隙-接受理论探讨不同环形交叉口车道数与其通行能力的规律。

1.2 间隙-接受理论模型

间隙-接受理论反映的是环道内车辆车头时距及其分布规律对进口道最大流量的影响。当环道内车辆车头时距大于某一临界间隙 t_c /s 时车辆才能进入环道，否则必须等待直到大于 t_c 的间隙出现^[2]。

进口道通行能力理论计算公式为

$$C_e = 3\,600 \frac{qe^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_f}} \left[1 - \frac{2q_1q_2}{q_1 + q_2} \right] + 3\,600 \frac{\alpha_1q_1e^{-\lambda(t_c - t_m)}}{1 - e^{-\lambda t_f}}, \quad (2)$$

式中： q 为环行流量/(pcu·h⁻¹)， $q = q_1 + q_2$ ， q_1 ， q_2 分别为内、外侧环行流量； λ 为环行车流车头时距的

表 1 交织理论模型计算结果
Tab.1 Calculation based on weaving theory

环岛半径/m	车道数/条	最大通行能力/(pcu·h ⁻¹)
15	6	3 486
20	5	4 244
25	4	4 382
30	3	3 369
35	2	3 221

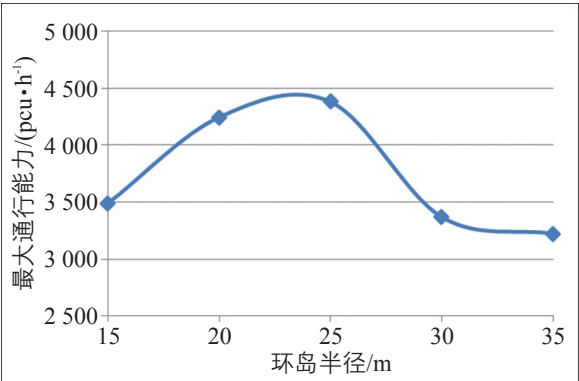


图 1 环岛半径与最大通行能力的关系趋势
Fig.1 Relationship between roundabout radius and maximum capacity

分布参数, $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 = \frac{\alpha_1 q_1}{1 - t_m q_1} + \frac{\alpha_2 q_2}{1 - t_m q_2}$, λ_1, λ_2 分别为内、外侧环行车流车头时距服从位移负指数分布的参数, α_1, α_2 为内、外侧车流车头时距大于 t_m 时的概率; t_c 为临界间隙时间/s; t_m 为环道车流最小车头时距/s; t_f 为进口道车流的跟车时距/s^[3]。

根据南京市中山北路—热河路环形交叉口平峰(15:00—16:00)和高峰小时(17:30—18:30)环行流量、车头时距等调查分析, t_c 取 6.0 s, t_m 取 2.0 s, t_f 取 3.0 s, α_1, α_2 取 1.0~0.7, 并在流量范围内逐级假设内、外车道环行流量, 计算得到 2 车道和 3 车道环形交叉口的进口道通行能力 C_e 。交织段此时的流量 Q 为 q 与 C_e 的总和, 见图 2 和表 2。

图 3 为 2 车道环形交叉口 q, C_e 和 Q 的关系。可以看出, 随着环行流量 q 的增大, 进口道通行能力 C_e 随之减小; 当 q 和 C_e 接近时, 该交织段的流量最小; 随着 q 继续增大, 交织段流量 Q 增大, 一旦增大至饱和, 该交织段成为环形交叉口瓶颈, 引起拥堵。进一步分析得出, 潮汐主交通流方向进口道和交织段的通行能力是制约环形交叉口通行能力增长的主要原因。早晚高峰时段, 主交通流进口道方向流量较大而其他进口道流量

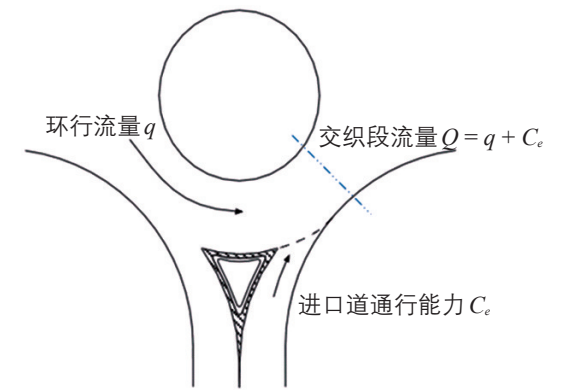


图 2 环形交叉口计算图示
Fig.2 Demonstration of roundabout calculation

较小, 主方向多为 q 小 C_e 大的情况, 此时若提高交织段通行能力可使环形交叉口整体通行能力有更大提升空间。分析 3 车道环形交叉口可得到相同的结论。比较 2 车道和 3 车道环形交叉口交织段流量 Q 可以明显看出, 随着环道车道数从 2 条增至 3 条, 环形交叉口通行能力增加, 这进一步证明增加车道数可提高环形交叉口通行能力。

2 改进方案设计

交织理论和间隙-接受理论模型都可以得出以下结论: 根据各进口道流量有效地增加车道数可以提高整个环形交叉口的通行能力。由此设想: 通过不对称地改变环形交叉口的车道数或通过移动环岛位置, 来提高交叉口的通行能力, 改善服务水平, 应对潮汐交通现象造成的多向流量不平衡问题。

针对环形交叉口以上特性, 提出两种改进方案:

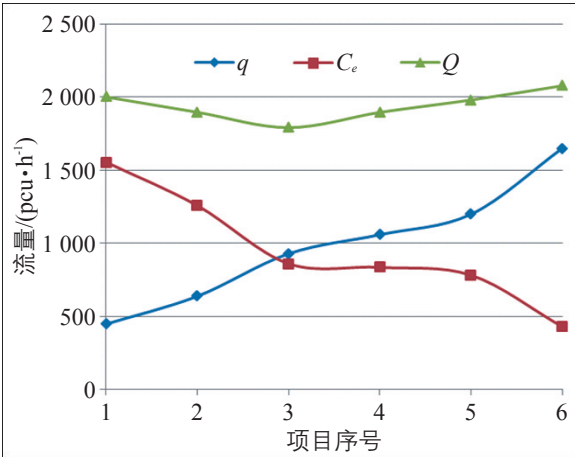


图 3 2 车道环形交叉口间隙-接受理论通行能力计算结果
Fig.3 Capacity calculation for roundabout with two lanes based on gap acceptance theory

表 2 2 车道和 3 车道环形交叉口的间隙-接受理论通行能力计算结果

		2 车道						3 车道						pcu · h ⁻¹	
项目															
q		450	640	930	1 060	1 200	1 650	675	960	1 390	1 590	1 800	2 475		
C_e		1 553	1 258	862	837	782	430	2 578	1 642	1 053	1 011	945	489		
Q		2 003	1 898	1 792	1 897	1 982	2 080	3 253	2 602	2 443	2 601	2 745	2 964		

1) 针对不同时段变化环岛半径，高峰时将半径变小，平峰时恢复原有半径，以适应流量的变化；

2) 早晚高峰时段，针对潮汐交通明显的道路节点，为适应主交通流方向流量的急剧增加，将环岛向主交通流进口道左侧偏心移动一条车道宽度，以提高整个环形交叉口的通行能力；平峰时段恢复原状。

为了更加直观和量化两种方案对通行能力的影响，采用交通仿真技术，对不同车道数的环形交叉口进行交通流模拟，分析其交通适应性。

3 变化环岛半径的仿真验证

3.1 基本假设

- 1) 四路交叉口且环形交叉口面积一定；
- 2) 车流各向均匀，且左转、直行、右转的比例为1:2:1；
- 3) 不考虑行人和非机动车的影响；
- 4) 建立环岛半径分别为35 m(2车道)、30 m(3车道)、25 m(4车道)和20 m(5车道)的4种仿真模

型，见图4。

3.2 仿真过程

为验证仿真模型的可靠性，高峰时段分别对南京市两个环形交叉口的两个交织段断面进行调查，利用摄像机录像法得到不同车道数下的环行车道断面饱和流量、交织车流比例、平均速度等信息，见表3。

建立基本假设中4种环形交叉口的仿真模型，通过在交织段设置仿真检测器，并结合仿真输出的评价文件，比较仿真和实测的交织段运行状况、交织车流比例、平均速度以及变道位置等交通流特性。通过反复地仿真试验对路径设置、让行规则、驾驶行为等参数进行修正，最终认为仿真模型与实际交通特性吻合，仿真误差在允许范围之内。仿真与实测结果的比较示例见图5。

对4个环形交叉口采用同样的参数设置，分别进行独立仿真，逐次增加各进口道流量，直至车辆无法进入环形交叉口。每次仿真选取200~1 100 s的数据进行分析，考虑到随机数种子不同对仿真的结果影响较大，选取了多个随机数种子，保证

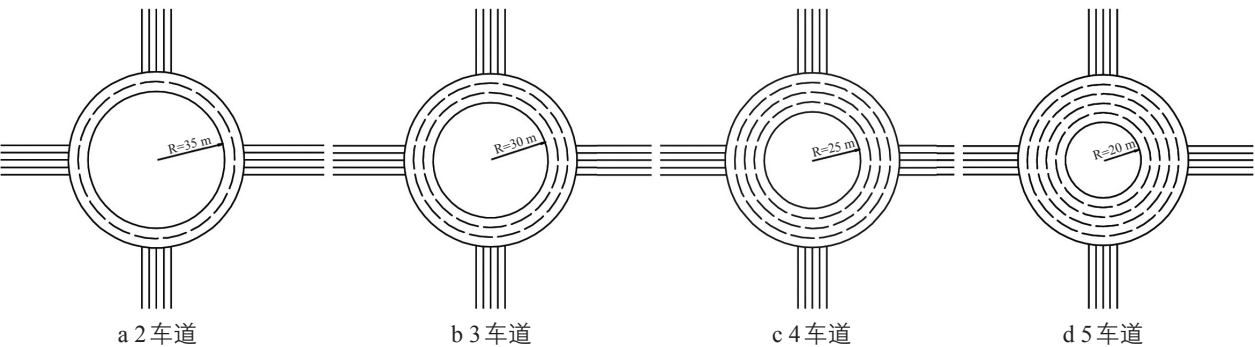


图4 不同半径的环形交叉口仿真示意图

Fig.4 Demonstration on roundabout simulation with different radius

表3 高峰时段环形交叉口实测数据

Tab.3 Observed traffic at roundabout during peak hour

调查地点	环行车道数/条	调查位置	环行车道断面饱和流量/pcu·h ⁻¹	交织车流比例	平均速度/(km·h ⁻¹)
中山北路—热河路环形交叉口	3	交织段1	1 805	0.7	19.0
		交织段2	1 536	0.7	21.3
新庄环形交叉口	4	交织段1	3 840	0.6	17.1
		交织段2	3 265	0.6	18.8

了仿真结果的稳定性。

3.3 结果分析

经统计分析绘制的车辆在不同半径、不同流量下的延误及平均车速随流量的变化趋势曲线如图6和图7所示。其中,延误指仿真过程中测得的车辆通过环形交叉口的平均延误;平均速度指仿真过程中车辆在环岛内的平均行驶速度。由图6可以看出,平均延误在车流量达到某一极限后随车流量增加而急剧增大,其拐点约在 $4\,500\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ 附近,2车道环形交叉口的通行能力远不如其他环

形交叉口。由图7可以看出,平均速度在车流量到达某一极限值后随流量的增加而急剧减小,2车道环形交叉口的通行能力明显不如其他环形交叉口,但却能保证较高的车速;而4车道环形交叉口在通行能力上优于其他。

假设条件下的环形交叉口,若平峰时段流量为 $2\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,高峰时段为 $4\,000\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,可采用平峰3车道、高峰4车道的改进方案,在最内侧车道采用物理隔离或视觉诱导手段,并辅助车道动态指示,实现车道变化。此方法可保证两种交通状态下车流运行畅通,且有较好的适应性。

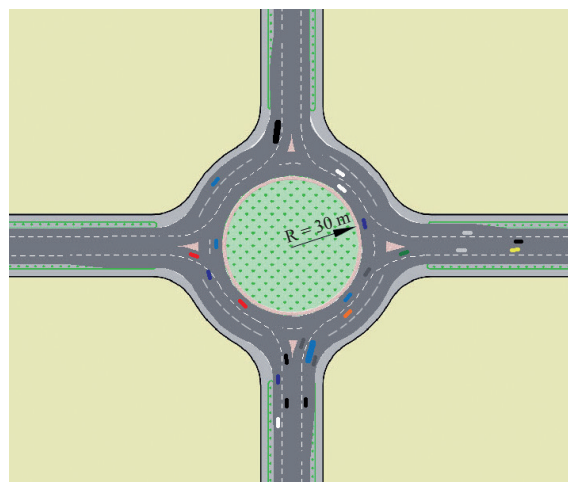


图5 中山北路—热河路环形交叉口仿真模型效果与实测视频比较

Fig.5 Comparison on simulation model and video-record at intersection of Zhongshanbei Road and Rehe Road

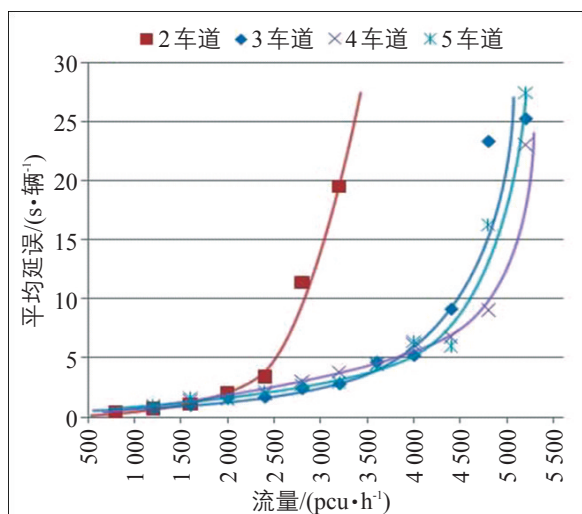


图6 不同环岛半径下延误-流量关系

Fig.6 Relationship between traffic delay and volume with different roundabout radius

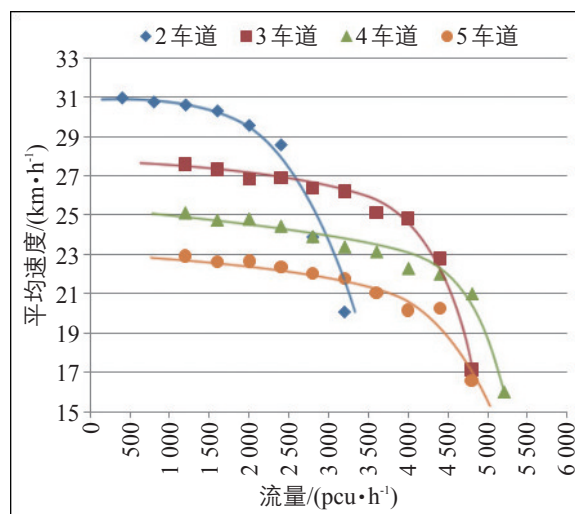


图7 不同环岛半径下平均速度-流量关系

Fig.7 Relationship between average travel speed and volume with different roundabout radius

4 平移环岛的仿真验证

建立半径为 25 m 的中心环岛和偏心环岛的交叉口模型，比较其对高峰时段流量的敏感性。仿真时假设高峰时段主交通流方向流量(南进口道，2 000 pcu·h⁻¹)达到路段的最大通行能力，其他 3 个方向流量相等且逐渐增加。偏心环岛仿真效果见图 8。

图 9 中各曲线显示车辆在环岛偏心移动前后的速度、延误随流量的变化趋势。可以看出，在其他 3 个方向流量达到 400 pcu·h⁻¹，即交叉口总流量达到 3 200 pcu·h⁻¹ 时中心环岛已经饱和，而偏心环岛仍能承受流量的继续增加，直到 4 200 pcu·h⁻¹

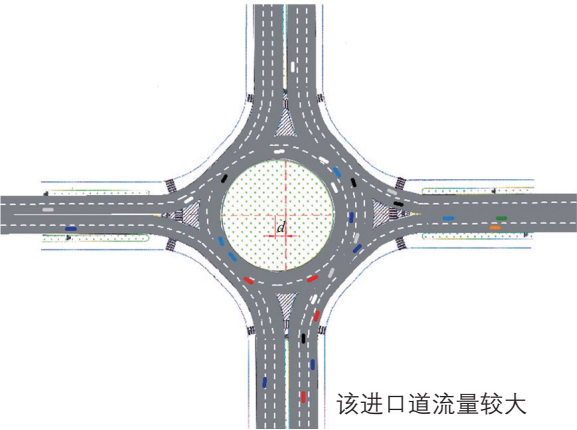


图 8 偏心环岛仿真效果图

Fig.8 Decentered roundabout simulation

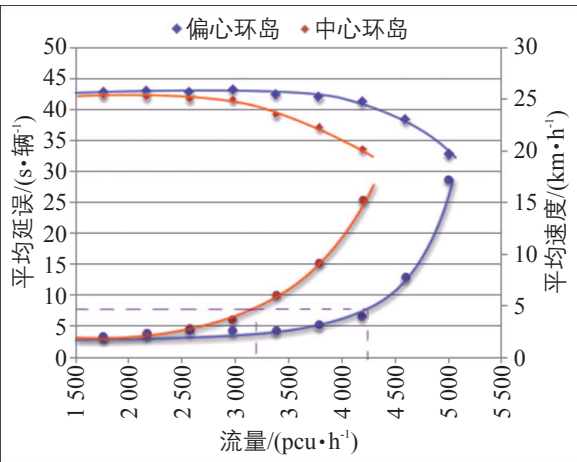


图 9 中心环岛和偏心环岛流量与平均延误、平均速度的关系

Fig.9 Relationship between traffic volume, average delay, and average travel speed of regular roundabout and decentered roundabout

才达到其最大通行能力。可见，对于半径为 25 m 左右的环形交叉口，高峰时段采用偏心环岛的适应性较中心环岛更好。环岛何时偏移应根据实际主交通流与其他方向流量差异大小而定。

5 结语

本文基于理论和仿真两个层面分别分析了环岛半径大小和位置移动对环形交叉口通行能力的影响，提出两种利用环岛变化来控制 and 引导交通流的改进方法，并在理论和仿真的基础上验证了其可行性。方案经反复校验，证明该改进方法对改善环形交叉口交通秩序、提高通行能力、适应交通流时空变化特点等方面有显著优势，并且保留了环形交叉口可以连续行驶减少延误的特点。特别针对目前中国大城市普遍出现的潮汐交通压力，提出了全新的解决思路和方法。

需要说明的是，因条件限制，本研究仅仅完成了室内仿真与计算，通过简化研究得到了初步结论，对交叉口中实际存在的非机动车及行人未做考虑，但研究结论依然成立，只是量化关系有所差别。

参考文献：

References:

[1] 王伟，高海龙，李文权，等. 公路交叉口通行能力分析[M]. 北京：科学出版社，2001.

[2] 美国交通研究委员会. 道路通行能力手册(第四版)[M]. 任福田，刘小明，荣建，等，译. 北京：人民交通出版社，2007.

Transportation Research Board. Highway Capacity Manual 2000[M]. REN Fu-tian, et al, translated. Beijing: China Communications Press, 2007.

[3] 项乔君，王伟，陈冰，等. 环形交叉口通行能力理论模型研究[J]. 中国公路学报，1999(4): 69-72.

XIANG Qiao-jun, WANG Wei, CHEN Bing, et al. A Study of the Model Construction for Roundabout's Capacity[J]. China Journal of Highway and Transport, 1999(4): 69-72.