

小区开放对道路通行的影响

摘要

随着我国经济的快速发展，城市对交通道路的需求量大大提升。而在我国大部分城市，封闭型小区还是主要的开发模式和空间组织形式。目前我国封闭型小区的主要特点：封闭性、面积大、功能单一、相互之间联系少。在当前住区规模化建设的背景下，封闭住区所带来的城市和社会问题日益突出，使城市路网密度和可达性降低，且内部出行主要依赖城市主要道路完成，对城市道路造成干扰，增加了周围路网的交通压力。

在上述社会背景下，本文以封闭型小区周边的道路交通情况为基础，选取位于城市主干道周边的封闭型小区为研究对象，并以 BPR 函数模型为理论基础，对其进行深入的实证研究。

针对问题 1：我们通过查阅文献、资料，建立了相对全面的评价指标体系，用树状图的形式直观、具体地呈现，主要分为内部条件和外部因素两大模块，再具体分析，评价小区的开放对周边道路通行的影响。

针对问题 2：通过对道路阻滞情况的具体分析，利用图像处理软件模拟绘制所选取小区的交通路况图，并根据研究需要对该路段可能发生的通行情况进行模拟分析、计算，建立 BPR 函数模型，采用相关数据对其进行模拟验证，分析出小区开放对道路通行的影响主要体现在小区周围的道路通行情况上。

针对问题 3：通过问题 2 分析出小区是否适合开放主要体现在周边道路的通行情况以及道路交叉口、信号灯等方面，利用图像处理软件绘制出不同道路交通情况下同一个小区的周边道路的通行情况，利用时间为具体指标，定量比较小区开放前后对道路通行的影响，对不同的小区进行开放性预测。

针对问题 4：根据探讨问题 1、2、3 所得出的结论，封闭型小区在某种程度上影响了城市原本合理的路网结构形态，而开放型小区具有分流、减少主干道的车流量的优点。优化小区周围路网结构，加强小区路网的规划和建设，才能合理疏导城市的交通流，完善城市公共设施配置。

关键词：BPR 函数模型 模拟分析 通行能力 开放性预测

1 问题重述

开放小区除了可能引发的安保等问题，能否达到优化路网结构，提高道路通行能力，改善交通状况的目的，以及改善效果如何更是社会上热议的焦点。观点一认为封闭式小区破坏了城市路网结构，容易造成交通阻塞。小区开放后，路网密度提高，道路面积增加，通行能力自然提升。观点二认为小区面积、位置、外部及内部道路状况等诸多因素影响道路通行。观点三认为小区开放后，可通行道路增多了，但是小区周边主路上进出小区的交叉路口的车辆也会增多，也可能会影响主路的通行速度。

建立数学模型，就小区开放对周边道路通行的影响进行研究，为科学决策提供定量依据，需要解决一下四个问题：

1. 选取合适的评价指标体系，用以评价小区开放对周边道路通行的影响。
2. 建立关于车辆通行的数学模型，用以研究小区开放对周边道路通行的影响。
3. 小区开放产生的效果，可能会与小区结构及周边道路结构、车流量有关。请选取或构建不同类型的小区，应用建立的模型，定量比较各类型小区开放前后对道路通行的影响。
4. 根据研究结果，从交通通行的角度，向城市规划和交通管理部门提出关于小区开放的合理化建议。

2 问题分析

2.1 问题 1 分析

封闭型小区虽然给小区的管理带来方便，但所带的各种城市和社会问题得到显现^[1]。第一，封闭型小区破坏了城市原本合理的路网结构形态，加剧城市道路交通矛盾，给居民出行生活带来不便；第二，导致城市空间格局割裂，城市公共空间的质量与数量下降；第三，封闭型小区公共服务与配套设施资源浪费突出，配套设施存在大量重复建设、各自为政、不能相互共享的局面。城市的全局可视为一个大系统或者母系统^[3]，开放型小区强调住区是城市空间与功能的有机组成部分，能做到住区形态结构的开放和配套设施的社会化开放，表现为沟通城市的交通组织和适宜的路网密度、共享的配套设施和景观空间资源。

小区开放对道路的道路通行影响主要体现在小区的外部因素。小区的外部因素主要

体现在道路通行能力，包括基本通行能力、可能通行能力和实际通行能力；车流量；交叉口影响，包括有信号灯和无信号灯的情况；运营速度，包括行车速度和车流速度。

2.2 问题 2 分析

我们以上海古北新虹桥中心花园为例，收集该小区的俯视图以及卫星全景图模拟出该小区的交通路况图，对该小区的空间布局和路况进行具体分析，讨论直行道、交叉路口（有无信号灯）、道路通行情况等指标，运用 BPR 数学模型进行建模，以时间为具体指标，综合分析出该小区开放与周围道路通行情况的关系。

2.3 问题 3 分析

通过问题 2 的数学模型，对小区周边道路结构和车流量进行分析。针对周边道路结构和车流量构建同一小区不同的周边路况的情况，带入模拟的相关数据，定量比较小区开放前后对道路通行的影响。

2.4 问题 4 分析

封闭型小区在某种程度上影响了城市原本合理的路网结构形态，城市道路交通矛盾加剧，造成交通阻塞，而开放型小区具有分流、减少主干道的车流量的优点^[2]。优化小区周围路网结构，加强小区路网的规划和建设，才能合理疏导城市的交通流，完善城市公共设施配置^[5]。

3 问题假设

- 1、假设模型的建立是基于正常天气的前提下，无台风、冰雹等不良自然环境的影响，无交通事故等不可抗力因素发生。
- 2、高峰期单位时间内通过的车流量相等。
- 3、模型中所给定的系数不变。

4 符号假设

符号	符号说明
N_{\max}	基本通行能力
N_k	可能通行能力

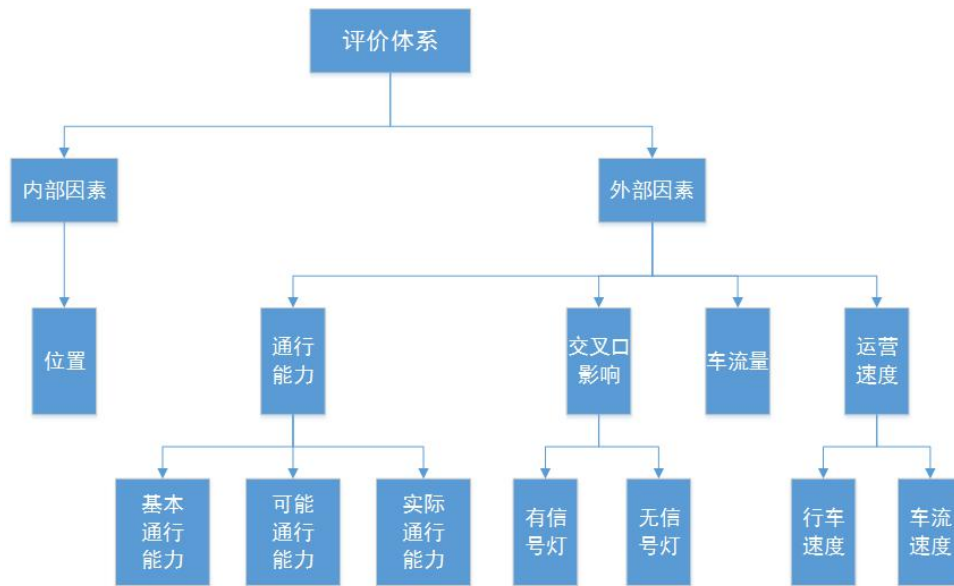
N_s	实际通行能力
V	行车速度
L_0	车头最小间隔
t	实际通过该路段所需时间
t_0	路段自由行驶时间
q	当时通过该路段的交通量
C_{mn}	支路理论最大通车量
C_{mj}	主路理论最大通车量
V_n	支路车流速度
V_j	主路车流速度
L_0	车头最小间距
P	主路支路通车的时间分配比
T_z	信号灯周期时间

5 模型建立与求解

5.1 问题 1

5.1.1 评价指标体系的树状图模拟

对于问题 1，我们用 visio 软件模拟出树状图，建立指标评价体系：



5.2 问题 2

5.2.1 实例分析

对于问题 2，我们以上海古北新虹桥中心花园为例进行分析：



图 1：花园鸟瞰图

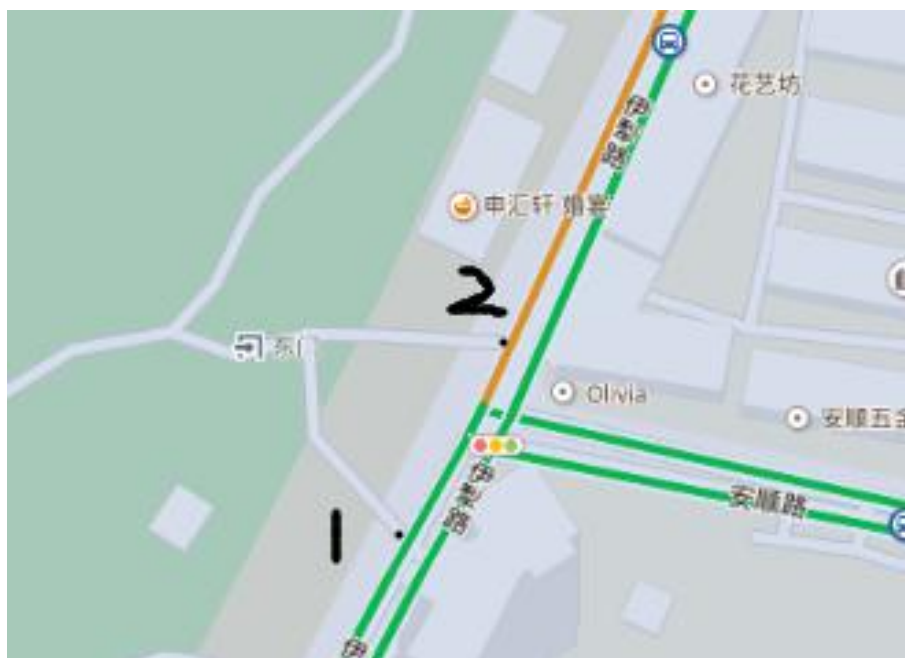


图 2：东门



图 3：南门

以上是 18:00 时上海古北新虹桥中心花园鸟瞰图及其东门、南门的细化图，绿色代表畅通，黄色代表阻滞，红色代表拥堵（下文同），在东门 1 和东门 2 之间有一处红绿灯，由此可以观察出东门 2 号周围路段的道路通行情况比较拥堵，东门 1 号周围路段的道路通行情况较为畅通，我们根据下面的全景图做出分析：



图 4：东门 1



图 5：东门 2



图 6：南门

由东门 1、东门 2 和南门三张全景图结合上面通行情况的比较分析可以得出，在没有设置机动车通行障碍的东门 1 周围道路通行情况较为通畅，在设置机动车通行障碍的东门 2 周围道路通行能力较为拥堵。

5.2.2 模型一的建立

由于本文选取特定的小区进行分析，影响道路通行的小区内部因素中，面积和位置为固定因素，故采用基于直行车道机动车通行能力的 BPR 模型，利用行车速度和最小车头间距，我们可以求出其基本通行能力。

为了城市不同道路进行区分，在此引入折算系数 a_c 。

道路分类	快速路	主干路	次干路	支路
a_c	0.75	0.80	0.85	0.90

表 1：机动车道通行能力分类系数^[4]

$$N_{\max} = \frac{1000v}{l_0} \quad (1)$$

$$N_s = N_{\max} \times r_1 \times r_2 \times r_3 \times r_4 \times r_5 \times r_6 \times a_c \quad (2)$$

由 (1) (2) 得：

$$N_s = \frac{1000v \times r_1 \times r_2 \times r_3 \times r_4 \times r_5 \times r_6}{l_0} \times a_c \quad (3)$$

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{N_s} \right)^\beta \right] \quad (4)$$

由 (3) (4) 得实际通过该路段所需时间：

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{l_0 \times q}{1000v \times r_1 \times r_2 \times r_3 \times r_4 \times r_5 \times r_6 \times a_c} \right)^\beta \right] \quad (5)$$

开放小区保证小区内部居住、办公、上班、休息、教育等正常运行情况下，把封闭型小区内部的一条或者多条道路与外界的市政道路连接，供车辆或者行人使用，发挥其重要的集散交通功能，为城市主要道路分担相应的交通压力。为定量比较车道数量改变

前后，即小区开放前后车辆实际通过该路段所需时间，我们利用作图工具模拟出小区疏通后的交通图：

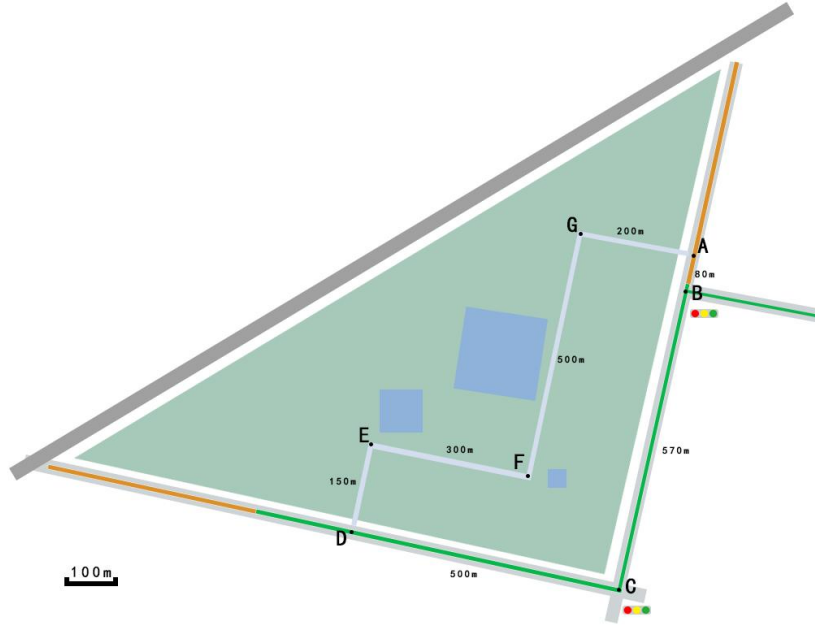


图 7：小区开放后的效果示意图

假设把小区开放，分出一部分交通流进入小区东门 2，使其从周围道路通行能力较为通畅的南门驶出，计算疏通前后不同的时间长短，分析、计算、比较得出疏通后，增加了直行车道小区对周围道路的通行起到疏导部分交通流、缓解交通压力的作用。

注：

r_1 ：车道宽度修正系数， r_2 ：侧向净空修正系数， r_3 ：纵坡度修正系数， r_4 ：视距不足修正系数， r_5 ：沿途条件修正系数， r_6 ：交通修正系数。

5.2.3 模型二的建立

无信号交叉口所在的地理位置、本身的形状构造都对过往车辆的通行构成一定的影响^[9]，对此我们采用基于无信号交叉口机动车通行能力 BPR 模型，通过支路理论最大通车量、主路理论最大通车量、支路车流速度和主路车流速度，讨论其实际通行能力。

$$N_s = \left\{ (1-p)C_{mn} + pC_{mj} \right\} K_t K_u^{[7]} \quad (6)$$

$$C_{mn} = \left(\frac{21000V_n}{L_0} \right) K_0 \quad (7)$$

$$C_{mj} = \left(\frac{21000V_j}{L_0} \right) K_0 \quad (8)$$

由 (6) (7) (8) 得：

$$N_s = \left\{ (1-p) \left(\frac{21000V_n}{L_0} \right) K_0 + p \left(\frac{21000V_j}{L_0} \right) K_0 \right\} K_t K_u \times a_c \quad (9)$$

c

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{N_s} \right)^\beta \right] \quad (10)$$

由 (9) (10) 得：

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{L_0 \times q}{(21000V_n(1-p)K_0 + 21000V_j p K_0) K_t K_u \times a_c} \right)^\beta \right] \quad (11)$$

注：

K_u ：无信号交叉口的有序系数， K_t ：减速、加速等造成的系统损失（取值一般为 0.88 到 0.94）， K_0 ：修正系数。

5.2.4 模型三的建立

针对道路车流量的不同情况，分别采用不同的 BPR 模型系数。

$$\begin{aligned} t &= t_0 \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right], \text{ 顺畅状态} \\ t &= t_0 \left[1 + 0.35 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{2.35} \right], \text{ 阻滞状态} \\ t &= t_0 \left[1 + 5.22 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.32} \right], \text{ 拥堵状态} \end{aligned}$$

图 8：分状态标定的累计流量 BPR 修正模型^[6]

信号交叉口机动车的通行能力 BPR 模型：

$$N_s = \frac{3600}{T_z} \times \frac{t_1 - t_s}{t_j} \times a_c \quad (12)$$

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q}{N_s} \right)^\beta \right] \quad (13)$$

由 (13) (14) 得

$$t = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q T_z t_j}{3600 (t_1 - t_s) \times a_c} \right)^\beta \right] \quad (14)$$

注：

t_j ：前后两车通过停车线的平均间隔时间， t_1 ：每个周期内绿灯时间， t_s ：一个周期内的绿灯损失时间，包括起动、加速时间。

5.2.5 模型计算与验证

(一) 图 7 AB 段主干路阻滞有信号灯交叉模型：

(1) BPR 模型：由阻滞状态确定系数 α 和 β ：

$$t = t_0 \left[1 + 0.35 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{2.35} \right]$$

(2) 该时段的交通量^[8]：

$$q_1 = \frac{V_1}{\frac{V_1}{3600} \times t_f + L_c} = \frac{50000}{\frac{50000}{3600} \times 1 + 4.5} = 2717.4$$

(3) 该时段车头最小间隔和前后两车通过停车线的平均间隔时间：

$$L_{01} = L_f + L_z + L_a + L_c = 4.5 + 32.9 + 19 + 13.9 = 70.3$$

$$t_j = \frac{L_{01}}{V_1} = \frac{70.3}{13.9} = 5.1$$

(4) 该路段的实际通行能力计算值^[9]及该路段自由行驶时间：

$$N_{s1} = \frac{3600}{T_z} \times \left(\frac{t_1 - t_s}{t_j} + 1 \right) \phi \times a_{c1} = \frac{3600}{220} \left(\frac{110 - 2.3}{5.1} + 1 \right) \times 0.9 \times 0.8 = 260.5$$

$$t_{01} = \frac{S_1}{V_1} = \frac{80}{\frac{50}{3.6}} = 6$$

(5) 车辆实际通过该路段所需时间:

$$t_{\alpha 1} = t_{01} \left[1 + 0.35 \left(\frac{q_1}{N_{s1}} \right)^{2.35} \right] = 6 \left[1 + 0.35 \left(\frac{2717.4}{260.5} \right)^{2.35} \right] = 508$$

注:

t_f : 反应时间, L_c : 车辆平均长度, L_f : 司机在反应时间内行驶的距离

L_z : 车辆的制动距离, L_a : 车辆间的安全距离, a_c : 机动车通行能力分类系数

(二) 图 7BC 段主干道畅通有信号灯交叉模型:

(1) BPR 模型: 由畅通状态确定系数 α 和 β :

$$t = t_0 \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right]$$

依据主干道阻滞有信号灯交叉模型得, N_{s1} 、 q_1 、 L_{01} 、 t_j 数据相同, 故不进行重复计算。

(2) 该路段自由行驶时间:

$$t_{02} = \frac{S_2}{V_1} = \frac{570}{\frac{50}{3.6}} = 41$$

(3) 车辆实际通过该路段所需时间:

$$t_{\alpha 2} = t_{02} \left[1 + 0.28 \left(\frac{q_1}{N_{s1}} \right)^{0.25} \right] = 41 \left[1 + 0.28 \left(\frac{2717.4}{260.5} \right)^{0.25} \right] = 62$$

(三) 图 7CD 段主干道无信号灯畅通直行模型:

(1) BPR 模型: 由畅通状态确定系数 α 和 β :

$$t = t_0 \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right]$$

(2) 该路段的基本通行能力:

$$N_{\max} = \frac{1000V_1}{L_0} = \frac{1000 \times \frac{50}{3.6}}{70.3} = 197.6$$

(3) 该路段的实际通行能力:

$$N_s = N_{\max} \times r_1 \times r_2 \times r_3 \times r_4 \times r_5 \times r_6 \times a_c = 197.6 \times 1 \times 0.8 = 158.0$$

(注解: 由于修正系数 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6$ 所造成的影响较小, 故均取值为1)

(4) 该路段自由行驶时间:

$$t_{03} = \frac{S_3}{V_1} = \frac{500}{\frac{50}{3.6}} = 36$$

(5) 车辆实际通过该路段所需时间:

$$t_{\alpha 3} = t_{03} \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right] = 36 \left[1 + 0.28 \left(\frac{2717.4}{158} \right)^{0.25} \right] = 57$$

主干道上 AB-BC-CD 车辆行驶所需的实际时间:

$$t_{\mp} = t_{\alpha 1} + t_{\alpha 2} + t_{\alpha 3} = 508 + 62 + 57 = 627$$

(四) 图 7AG 和 ED 段干路-支路畅通无信号灯交叉模型

由于 AG 路段与 ED 路段情况相似，故合并讨论

(1) BPR 模型：由畅通状态确定系数 α 和 β ：

$$t = t_0 \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right]$$

(2) 该时段车头最小间隔和前后两车通过停车线的平均间隔时间：

$$L_{02} = L_f + L_z + L_a + L_c = 4.5 + 20.3 + 12 + 8.3 = 45.1$$

(3) 支路理论最大通车量计算：

$$C_{mn} = \left(\frac{21000V_n}{L_{02}} \right) K_0 = \left(\frac{21000 \times \frac{30}{3.6}}{45.1} \right) \times 1 = 3880.33$$

(4) 主干路理论最大通车量计算：

$$C_{mj} = \left(\frac{21000V_j}{L_{01}} \right) K_0 = \left(\frac{21000 \times \frac{50}{3.6}}{70.3} \right) \times 1 = 4148.89$$

(5) 该路段的实际通行能力：

$$N_{s2} = \{(1-p)C_{mn} + pC_{mj}\} K_t K_u \times a_c = \{(1-0.7) \times 3880.3 + 0.7 \times 4148.9\} \times 0.9 \times 0.54 \times 0.9 = 1779.5$$

(6) 该时段的交通量和该路段自由行驶时间计算：

$$q_2 = \frac{V_2}{\frac{V_2}{3600} \times t_f + L_c} = \left(\frac{30000}{\frac{30000}{3600} \times 1 + 4.5} \right) = 2338.27$$

$$t_{04} = \frac{S_4}{V_2} = \frac{200 + 150}{\frac{30}{3.6}} = 42$$

(7) 车辆实际通过该路段所需时间：

$$t_{\beta 1} = t_{04} \left[1 + 0.28 \left(\frac{q_2}{N_{s2}} \right)^{0.25} \right] = 42 \left[1 + 0.28 \left(\frac{2338.27}{1779.5} \right)^{0.25} \right] = 55$$

(五) 图 7GF-FE 段支路-支路畅通无信号灯交叉模型

(1) BPR 模型：由畅通状态确定系数 α 和 β ：

$$t = t_0 \left[1 + 0.28 \left(\frac{q}{N_s} \right)^{0.25} \right]$$

由于支路的理论通车量相同，故 $C_{mn} = C_{mj} = 3830.33$

(2) 该路段的实际通行能力和该路段自由行驶时间计算：

$$N_{s3} = \{(1-p)C_{mn} + pC_{mn}\}K_t K_u \times a_c = \{C_{mn} \times K_t \times K_u \times a_c\} = \{3830.33 \times 0.9 \times 0.54 \times 0.9\} = 1675.39$$

$$t_{05} = \frac{S_5}{V_2} = \frac{500+300}{\frac{30}{3.6}} = 96$$

(3) 车辆实际通过该路段所需时间：

$$t_{\beta 2} = t_{05} \left[1 + 0.28 \left(\frac{q_2}{N_{s3}} \right)^{0.25} \right] = 96 \left[1 + 0.28 \left(\frac{2338.27}{1675.39} \right)^{0.25} \right] = 125$$

支路上 AG-GF-FE-ED 车辆行驶所需的实际时间：

$$t_{支} = t_{\alpha 1} + t_{\alpha 2} = 55 + 125 = 180$$

5.3 问题 3

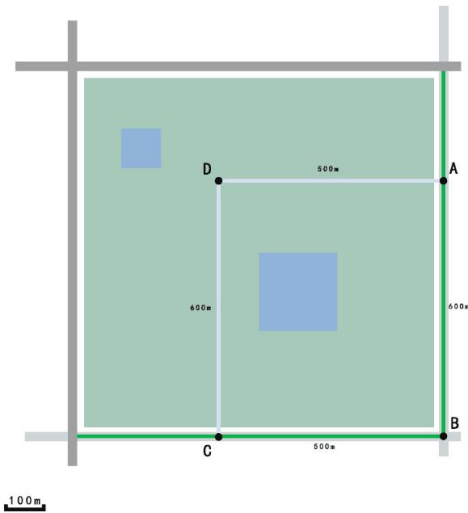


图 9：畅通无信号灯模型

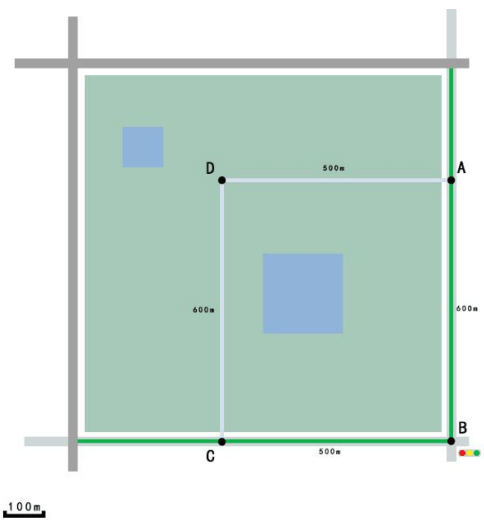


图 10：畅通有信号灯

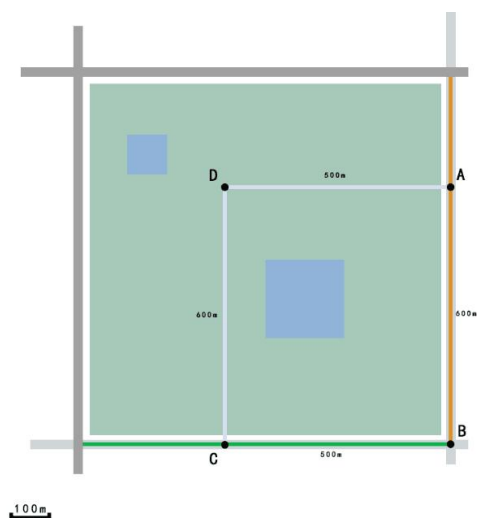


图 11：阻滞无信号灯模型

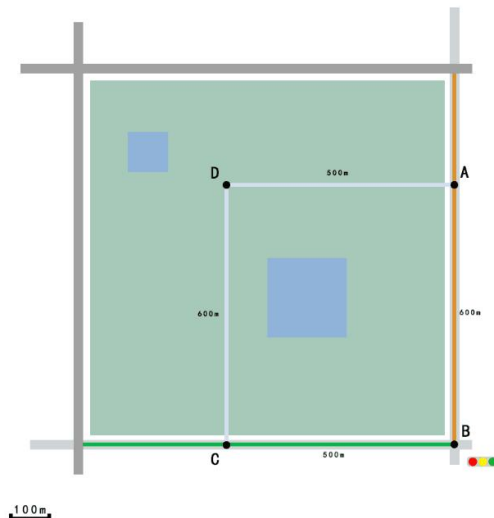


图 12：阻滞有信号灯模型

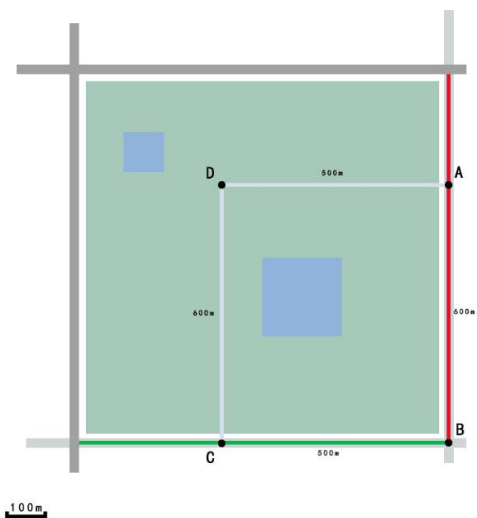


图 13：拥堵无信号灯模型

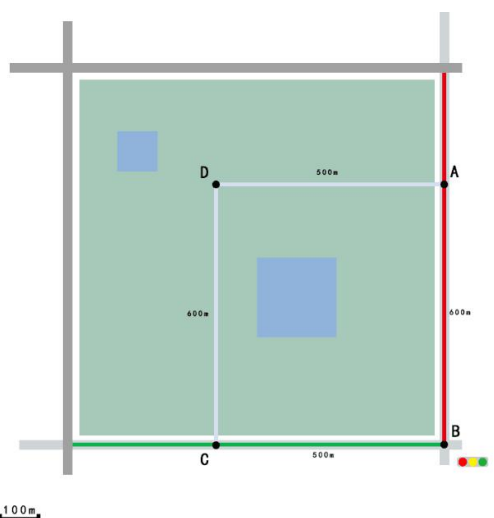


图 14：拥堵有信号灯模型

交通量及信号灯情况	开放前所需时间 (s)	开放后所需时间 (s)
	AB-BC	AD-DC
(a)畅通无信号灯	113	171.4
(b)畅通有信号灯	132	171.4
(c)阻滞无信号灯	139	171.4
(d)阻滞有信号灯	3838	171.4
(e)拥堵无信号灯	357	171.4
(f)拥堵有信号灯	577	171.4

表 2：模拟小区开放前后通行时间对比

根据问题 2 的模型（剔除无效数据 d 后）定量算出车辆从主干道行驶所需的通行时间以及从支路（即小区内部）行驶所需的通行时间，并将两者进行比较，得出如下情况：

在我们讨论的六种情况中，a,b,c 所代表的小区并不适合开放，由开放前后通行时间的数值比较，开放前比开放后通行时间更短，即代表如开放该三种类型的小区则对路段交通情况无明显改善；e,f 所代表的小区适合开放，开放前后通行时间的数值比较，开放后比开放前通行时间更短，即代表如开放该两种类型的小区将对附近路段交通情况带来一定改善。

5.4 结论：

位于城市主干道附近的小区与位于次干道等其他车流量较少的路段附近的小区相比，交通量越大的路段附近的小区越适合开放；附近路段信号灯个数越多的小区越适合开放；附近路段具有越多岔路口的小区越适合开放。

5.5 问题 4

尊敬的城市规划和交通管理部门负责人：

您好！

作为本次高教社杯全国大学生数学建模竞赛的参赛人员，经过本次对小区开放对周边道路通行影响的研究探讨，我向你提出如下建议：

- 1、小区封锁的门逐步打开，实现内部道路公共化，解决交通路网布局问题，促进

土地节约利用。

2、扩大城市路网密度，积极采用单行道路方式组织交通，成快速路、主次干路和支路级配合合理的道路网系统。

3、对封闭的道路进行疏导，形成完整路网，提高道路通达性。

4、科学、规范设置道路交通安全设施和交通管理设施，提高道路安全性。

5、对自行车道和步行道进行系统建设，倡导绿色出行。

以上建议希望您能采纳！

此致

敬礼

建议人：数学建模小组

2016.9.12

6 模型的评价与改进

6.1 模型优点

针对车流量和交叉路口影响，对 BPR 模型进行改进，讨论了有无信号灯的情况，考虑较为全面、严谨；对不同不同指标进行定性和定量的分析与评估，建立 BPR 模型进行求解，思路清晰有条理，带入相关数据较易求解，容易验证 BPR 模型的准确性。

6.2 模型缺点

本模型只考虑了单行道的情况，没有考虑多行道的复杂情况，使得模型的实际应用具有一定的局限性；交通模型本身具有一定的偶然性，在假定的条件下的建模可能过于理想，存在被忽略掉的影响因素。

6.3 模型的改进

可以查阅更多资料，考虑权重模型把不同的影响因素整合，对评价指标体系进行细化分析，优化模型结构。

7 参考文献

- [1]李向朋, 城市交通拥堵对策—封闭型小区交通开放研究, 长沙理工大学, 2014 年。
- [2]马小凤, 开放型住区实证研究(硕士学位论文), 华中科技大学, 2013 年。
- [3]王一飞, 车伟光, 陈贤, 郑锋, 住宅小区对城市交通的互动影响, 云南农业大学学报(社会科学版), 2010 年。
- [4]茹红蕾, 城市道路通行能力的影响因素研究, 同济大学, 2008 年。
- [5]中共中央 国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见, 2016 年 2 月 6 日, 下载地址如下
http://www.gov.cn/zhengce/2016-02/21/content_5044367.htm。
- [6]姜桂艳; 李继伟; 张春勤, 城市主干路段行程时间估计的 BPR 修正模型, 西南交通大学学报, 2010 年。
- [7]高海龙; 王炜; 常玉林; 项乔君; 周荣贵, 交叉口通行能力的综合计算法, 公路交通科技, 2001 年。
- [8]李排昌, 韩凤春, 速度、流量与道路通行能力分析, 北京, 中国人民公安大学学报, 2013 年。
- [9]袁晶矜; 袁振洲, 信号交叉口通行能力计算方法的比较分析, 公路交通技术, 2006 第五期。