

同濟大學

2016 年同濟大學 數學建模競賽

D “禁摩限電”問題

隊員信息：

姓名	學號	學院	專業	聯繫方式

深圳市“禁摩限电”效果综合分析及可行方案研究

摘要：

本文基于 2010 年至 2014 年深圳市综合交通年度报告、城市居民出行特征等数据，对未来短期内的交通量及结构进行了预测；之后根据预测的交通量，从效率层面入手，利用效用理论模型、连续流延误和转移模型以及 Pareto 多目标最优化求解模型提出了可行的改进方案；最后从安全、效率、环保三个方面，利用层次分析法和模糊评判法对“禁摩限电”的现行方案和改进方案的效果进行了评价和比较。

首先，利用多元线性回归和趋势外推法对未来深圳市出行总量与出行结构进行预测，计算得到出行总量和出行结构。其次，从平均出行时间、平均出行费用和事故率出发，运用多元 logit 模型对出行效用函数进行标定，得到各方式的分担率为 $P_{\text{私家车}}=2.26\%$ ， $P_{\text{公交车}}=58.45\%$ ， $P_{\text{地铁}}=32.17\%$ ， $P_{\text{出租车}}=7.12\%$ 。从而计算出“禁摩限电”实施后转移至各方式的交通量为： $V_{\text{私家车}}=2.27$ 万人次， $V_{\text{公交车}}=361.96$ 万人次， $V_{\text{地铁}}=199.26$ 万人次， $V_{\text{出租车}}=44.06$ 万人次

接着，从效率层面入手，通过连续流延误计算，得到微观层面上某条路段受到摩托车和电动车干扰的拥挤车辆总数；同时，根据“禁摩限电”政策影响，计算出从摩托车、电动车出行转移到其他交通方式出行所带来的受拥挤车辆的增量；最后，我们基于 Pareto 多目标最优和线性规划的思想建立模型，将微观层面的路段受拥挤车辆数拓展到深圳市整个路网中的受拥挤车辆数，并求出使得整体受拥挤车辆数最小的“禁摩限电”方案的可行解，将其作为我们的改进方案。

最后，从安全、效率、环保三个方面考虑，建立模糊综合评价模型对现行方案和改进方案进行评价和比较，并通过最小加权相对偏差距离理论对改进方案的改善程度进行验证，结果显示：改进方案的评分相较于现行方案高出 10.59%。

关键词：

“禁摩限电”、多元线性回归、效用理论、转移—延误模型、模糊综合评价、层次分析法

2016 年同济大学数学建模竞赛 D 题 “禁摩限电” 问题

一. 问题重述

随着社会、经济的发展，城市道路交通问题越来越复杂，也越来越引人关注。城市道路交通资源是有限的，而人们出行的需求是不断增长的，不加限制地满足所有人的要求和愿望是不现实的，也是难以为继的。我们对不同类型交通的发展必须有所倡导、有所发展、有所限制，特别是针对摩托车、电动三轮车这一类型的交通，其对安全 and 环境的影响必须得到控制。不少城市之前采取的限牌、限号、收取局部区域拥堵费、淘汰污染超标车辆及其他管理措施收到了较好的效果，也得到了公众的理解。

而现在为了让 “禁摩限电” 这一政策同样能够得到大多数人的支持，对它进行科学的、不带意识形态的论证是必要的。请从深圳的交通资源总量（即道路通行能力）、交通需求结构、各种交通工具的效率及对安全 and 环境的影响等因素和指标出发，建立数学模型并进行定量分析，提出一个可行的方案。需要的数据资料在难以收集到的情况下，可提出要求。

二. 问题背景

从 2016 年 3 月 21 日开始，一场被称为史上最严厉的 “禁摩限电” 集中整治行动在深圳开展。该行动重点打击在地铁口、公交站点、口岸和商业区等聚集非法拉客违法行为。据深圳市交管局通报，行动开展 10 天内，共查扣电动车 17975 辆、拘留 874 人。

区别于以往时间短，区域小的限制措施，这次禁摩限电持续时间长达 100 天（3 月起至 6 月底），整治范围则包括全市，重点区域为地铁口、公交站点、口岸、商业繁华等区域聚集区。并且，针对重点区域兜客揽客的行为一律采取行政拘留的惩罚措施。

这次集中整治活动禁止的路段具体包括：

对于摩托车，禁止摩托车（含二轮、三轮及轻便摩托车）在福田、罗湖、南山、盐田四区内所有道路行驶；禁止摩托车在宝安、龙岗区和光明新区及坪山、龙华、大鹏新区的部分道路行驶。

对于电动车，禁止电动车在部分城市快速干道上通行（包括盐龙大道，宝荷大道，丹平快速路等）；禁止电动车在福田区、罗湖区、南山区、盐田区、宝安区、龙岗区、光明新区、坪山新区、龙华新区的大部分城市主干道上通行。

但这次出于保障交通安全，打击非法营运目的的 “禁摩限电” 政策不同于以往的交通管理措施，引起了广泛的争议。产生争议的主要原因在于当前现行政策 “一刀切” 式的管理办法存在针对弱势群体粗暴执法，并严重影响快递业发展等诸多问题。因此，我们希望找到一个替代的，更加合理的方案，来帮助 “禁摩限电” 这一政策得到大多数人的支持。

三. 交通量预测

将深圳市各年综合交通、城市居民出行特征等报告收集到的数据在 Excel 列出，并导入 SAS9.3 进行数据分析。

导入结果如下：

	year	gdp	population	rate	income	visitor	total	motor
1	2010	9581.5	1027.2	0.188	32381	3285.32	3073	1510
2	2011	11505.5	1046.74	0.163	36505	3732.53	3350	1650
3	2012	12950.1	1054.74	0.109	40742	4147.72	3581	1765
4	2013	14500.2	1062.89	0.18	44653	4566.8	3784	1874
5	2014	16001	1077.89	0.128	46672	4970.62	3959	1977

式中：*year*——年份

gdp——深圳全市 GDP 总量（亿元）

population——深圳全市常住人口数（万人）

rate——交通运输业固定资产投资占比

income——城市居民可支配收入（元）

visitor——全年游客人数（万人）

total——深圳市日均总出行量（万人次）

motor——深圳市日均机动化出行量（万人次）

以 *total* 为因变量，*gdp*、*population*、*income*、*rate* 为自变量进行多元线性回归分析。结果显示 R^2 为 1.0，推测自变量可能存在严重的共线性。

SAS 系统

REG 过程

模型: MODEL1

因变量: total total

读取的观测数	5
使用的观测数	5

方差分析					
源	自由度	平方和	均方	F 值	Pr > F
模型	4	490525	122631	.	.
误差	0	0	.	.	.
校正合计	4	490525			

均方根误差	.	R 方	1.0000
因变量均值	3549.40000	调整 R 方	.
变异系数	.		.

共线性诊断

共线性(collinearity multicollinearity)问题是指独立变量间存在线性关系 共线性的诊断可使用方差膨胀因子、条件指数和方差比例方法

(1) 用条件数进行共线性诊断

先求出信息矩阵 $X'X$ 的各特征根，条件指数(condition index)定义为：最大特征根与每个特征根比值的平根，其中最大条件指数 k 称为矩阵 $X'X$ 的条件数。条件数大，说明设

计矩阵有较强的共线性，使结果不稳定，甚至使离开试验点的各估计值或预测值

毫无意义。直观上，条件数度量了信息矩阵 $X'X$ 的特征根散布程度，可用来判断多重共线性是否存在以及多重共线性严重程度。在应用经验中，若 $0 < k < 10$ ，则认为没有多重共线性； $10 < k < 30$ ，则认为存在中等程度或较强的多重共线性； $k > 30$ ，则认为存在严重的多重共线性。

(2) 用方差分量进行共线性诊断

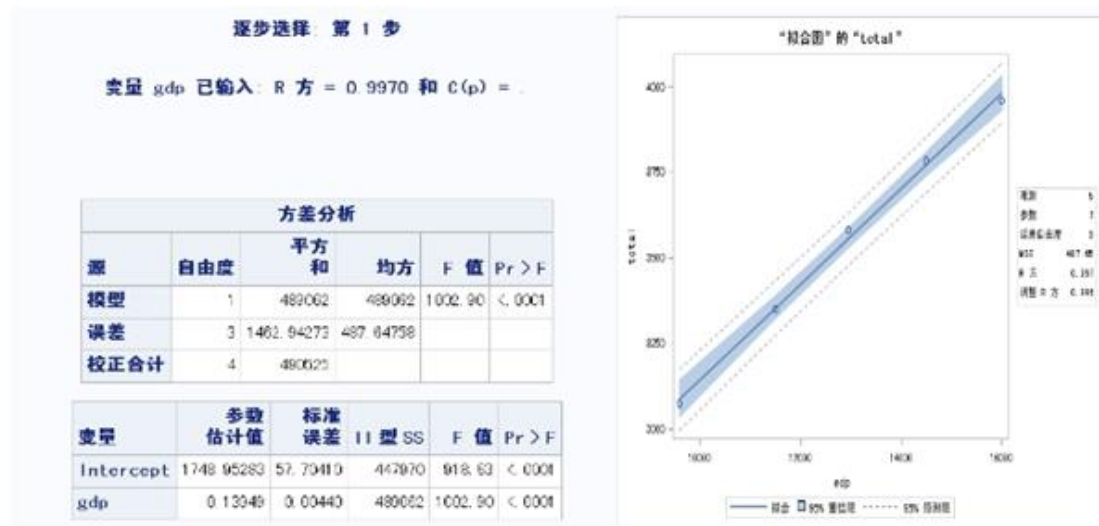
对大的条件数同时有 2 个以上变量的方差分量超过 50%，就意味这些变量间有一定程度的相关。

(3) 用方差膨胀系数进行共线性诊断

VIF > 5 或 10 时，就有严重的多重共线性存在
共线性诊断结果：

共线性诊断							
数字	特征值	条件指数	偏差比例				
			Intercept	gdp	population	income	rate
1	4.92947	1.00000	4.953658E-8	5.248168E-7	4.545195E-8	6.494372E-7	0.00053525
2	0.06198	8.91782	1.619956E-7	0.00005146	2.134247E-8	0.00003916	0.12925
3	0.00852	24.05738	0.00004697	0.00024182	0.00003208	0.00009433	0.33784
4	0.00002857	415.40354	0.00031781	0.18370	0.00227	0.31982	0.00287
5	5.445994E-7	3008.57943	0.99964	0.83601	0.99769	0.68005	0.52950

结果显示原多元线性模型存在严重共线性，无法使用该模型。可利用逐步筛选法对自变量进行筛选：



日均总出行量与 GDP 的关系式：

$$total = 0.1395gdp + 1748.9528$$

利用趋势外推法得到年份与 GDP 的关系式：

$$gdp = 1583.4(year - 2009) - 8157.5$$

资料数据从 2010 年至 2014 年各年交通资料数据推测，机动化比例较为稳定，公交分担占机动化出行比例逐步上升，而对于公共交通，出租车由于数量受政府约束，出行比例较为稳定；轨道交通在近些年不断发展，出行比例不断增长，而未来二期工程的完工将进一步提高其占比。基于上述分析，预计 2017 年机动化出行比例为 50%，摩托车占机动化 2.7%，小汽车占机动车 41.3%，公交分担占机动化的 56%。对于公交，出租车出行比例占 12%，常规公交占 58%，轨道交通占 30%；未实施“禁摩限电”政策时非机动车出行占总体 15%，步行占 35%。

由公式和比例得到：2017 年 GDP 为 20824.7 亿元；日均总出行量为 4654.0 万人次；其中出租车出行 149 万人次/日、常规公交出行 755.8 万人次/日，轨道交通 372.4 万人次/日。

四．问题分析

基于第三部分预测得到的未来各类型交通量，我们利用效用函数来估计因为现行的“禁摩限电”政策而导致的，原本属于摩托车和电动车的交通量转向其他类型交通方式的情况，并根据转移的交通量分析现行政策可能带来的效率方面的问题。

出行效用选择函数是指出行者通过选择不同的交通方式使自己的出行需求得到满足的一个度量。不同的人在面对抉择时会选择不同的出行方式，这就是由于人的价值取向不同而导致选择的方案也会不同。它主要用来衡量出行者从既定的出行方式集合内获得的满意程度。

p 根据效用理论，人们一般在特定的选择条件下，会选择自己认为效用值最大的备选方案，那么出行者选择满意出行方案的条件是：

$$U_{kn} \succ U_{jn}, j \neq k, \forall j \in A_n$$

其中， A_n 代表供出行者选择的出行方式的集合；

U_{kn} ，代表出行者选择第 k 种出行方式带来的效用；

U_{jn} ，代表出行者选择第 j 种出行方式带来的效用

在实际生活的应用中，由于带有主观色彩，所以效用值并不能够精确地计算出来，故我们在效用理论中一般将效用分为确定部分和随机部分，即：

$$U_{jn} = V_{jn} + \varepsilon_{jn}$$

其中， V_{jn} 代表出行者 n 选择第 j 种交通方式的效用函数的确定项；

其中， ε_{jn} 代表出行者 n 选择第 j 种交通方式的效用函数的随机项；

随机项主要是由于判断的误差和喜好的不同产生的。由此可知，根据效用值最大化原理，物流企业选择第种运输方式的概率为：

$$P_{kn} = \text{Prob}[U_{kn} \succ U_{jn}, j \neq k, \forall j \in A_n] \quad 0 \leq P_{kn} \leq 1, \sum_{k \in A_n} P_{kn} = 1$$

我们用多元 logit 模型来进行效用函数的标定。该模型的表达形式为：

$$P_k = \frac{e^{U_k}}{\sum_{j=1}^g e^{U_j}}$$

其中， U_k 代表选择第 k 种出行方式的效用值；

P_k 代表出行者选择第 k 中出行方式的概率；

g 代表可供选择的出行方式的个数；

下面我们利用 SPSS 软件求得各 U_k 的效用函数公式如下所示：

$$U_{\text{私家车}} = -2.04 \times \text{cost} - 17.12 \times \text{time} + 3.88 \times \text{safety}$$

$$U_{\text{公交车}} = -4.625 \times \text{cost} - 2.25 \times \text{time} + 1 \times \text{safety}$$

$$U_{\text{地铁}} = -1.67 \times \text{cost} - 6.5 \times \text{time} + 3.625 \times \text{safety}$$

$$U_{\text{出租车}} = -2.01 \times \text{cost} - 10.8 \times \text{time} + 6.5 \times \text{safety}$$

式中： cost ——出行费用

time ——出行时间

safety ——安全

我们分别代入摩托车和电动车的平均出行时间、平均出行费用、事故率的倒数。因为电动车，摩托车的平均出行费用、平均出行时间、事故率相同，所以我们只代入一次即可：

平均时间为 28.5min，平均出行费用为 3，安全性指数为 8.91

$$P_{\text{私家车}}=2.26\%, P_{\text{公交车}}=58.45\%, P_{\text{地铁}}=32.17\%, P_{\text{出租车}}=7.12\%$$

对于深圳市“禁摩限电”政策，限制电动车出行的主干道占 70%~80%。基于预测数据，取 70%计算 限行后电动车出行将占总体的 4.5%，而摩托车出行降为 0。电动车减少了 10.5%（约为 488.8 万人次/日），摩托车减少了 2.7%（约为 125.7 万人次/日）。

基于效用函数标定的结果，理论上转移至小汽车的比例为 2.26%，考虑部分人群的平均收入等情况实际转移低于理论值，取 1.5%得转移至小汽车的出行量为 9.20 万人次/日。2017 年人均出行次数预测值为 4.05 次/日，即约有 2.27 万辆小汽车的需求量。同时，将有 605.28 万人次/日的出行量转移至公共交通；

根据分担比例 $P_{\text{公交车}}=59.80\%$ ， $P_{\text{地铁}}=32.92\%$ ， $P_{\text{出租车}}=7.28\%$ ，得到公交出行量增加 361.96 万人次/日、地铁出行量增加 199.26 万人次/日、出租车出行量增加 44.06 万人次/日。

五.模型构建（改善方案提出）

5.1 机非混行时，受拥挤车辆数计算

对于深圳而言，由于没有非机动车道，主干道上的机动车驾驶员需要接受机非混行（这里的非机动车包括摩托车和电动车，因为摩托车的实际运行状况同非机动车相同，都会对机动车交通产生影响）的交通运行状况。机动车有时不得不面临在摩托车或电动车后面跟驰行驶的情况，此时的速度大大低于正常的行驶速度，跟驰过程中的行驶时间要多于正常速度通过跟驰路段的行驶时间，从而造成跟驰受到干扰。而在深圳的主干道上，车流密度较大，车辆间存在着相互约束，前后车辆的到达不是相互独立的，此时交通流具有流体的连续性特征，因此我们最终决定采用流体力学理论来计算拥挤车流。

当道路交通流中前车与后车的到达不是离散的、相互独立的，而是连续的、相互影响的，此时交通流的到达不是随机的，其车辆的到达不能用概率模型来描述。此时交通流可以比拟为流体，用流体力学理论来描述车流的运行状况。流体力学理论是英国学者 Lighthill 和 Whitham 于 1955 年在名著《论动力波》中提出的。该理论运用流体力学的基本原理，模拟流体的连续性方程，建立车流的连续性方程。把车流的疏密变化比拟成水波的起伏而抽象为车流波。当车流因道路或交通状况的改变而引起密度的改变时，在车流中产生车流波的传播。通过分析车流波的传播速度，以寻求车流流量和密度、速度之间的关系。因此，该理论又可称为车流波动理论。

1.交通流的连续性方程

假设车流顺次通过断面 I 和 II 的时间间隔为 dt ，两断面的间距为 dx 。同时，车流在断面 I 的流入量为 q ，密度为 k 。车流在断面 II 的流出量为 $(q + dq)$ ，密度为 $(k - dk)$ 。

根据质量守恒定律：

流入量-流出量=数量上的变化

即：
$$[q - (q + dq)]dt = [k - (k - dk)]dx$$

化简得：
$$dk/dt + dq/dx = 0$$

因为 $q = kv$,于是上式可化为: $dk/dt + d(kv)/dx = 0$

2.交通流集散波的基本方程

假设一分界线 S 将交通流分割为 A、B 两段, 如下图所示。

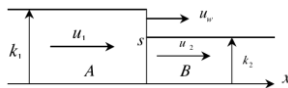


图 1 交通波示意图

A 段的车流密度为 k_1 , 速度为 u_1 , B 段的车流密度为 k_2 , 速度为 u_2 , 分界线 S 移动的速度为 u_w , 假设沿路线按照所画的箭头正方向运行, 速度为正, 反之为负。

则在时间 t 内横穿分界线 S 的车辆数 N 为:

$$N = k_1(u_1 - u_w)t = k_2(u_2 - u_w)t$$

$$\text{即: } u_w = (u_1 k_1 - u_2 k_2) / (k_1 - k_2)$$

由于流量 $q = ku$, 令 A、B 两部分的车流量分别为 q_1 、 q_2 , 则有 $u_w = (q_2 - q_1) / (k_1 - k_2)$, 此式即为交通波的基本方程。

3.连续流下的跟驰延误模型

假设机非混合道路上, 机动车正常行驶速度为 v_f , 流量为 q_1 , 密度为 k_1 , 非机动车在机动车道上行驶的速度为 v_b , 非机动车在出入机动车道过程中, 车流发生集散, 产生一个交通流集结波, 波速为 w_1 , 此时, 交通流速度为阻滞的非机动车速度 v_b , 密度为 k_2 , 交通量为 q_2 , 非机动车驶离机动车道后, 交通流开始消散, 产生一个交通流疏散波, 波速为 w_2 , 假设此时的交通流速度为 v_e , 流量为 q_3 , 密度为 k_3 。根据交通波基本方程, 集结波和消散波的波速分别为:

$$w_1 = (q_2 - q_1) / (k_2 - k_1) \quad w_2 = (q_3 - q_2) / (k_3 - k_2)$$

当车队中头车减速或刹车时, 跟驰车辆依次采取同样的行为, 此时, 一般会有: $k_2 > k_1$ 且 $q_2 < q_1$, 则压缩波波速 $w_1 < 0$, 其传播方向自前向后; 而低速行驶的车队逐渐加速消散时, 一般会有 $k_2 > k_3$ 且 $q_2 < q_3$, 则消散波波速 $w_2 < 0$, 其传播方向自前向后。当 $|w_1| < |w_2|$ 时, 集结车流可以消散, 车流经历疏散—集结—疏散 3

个状态。

设车辆跟驰非机动车的行驶时间为 t_f ，非机动车插入机动车流后，形成的车队尾部以 w_1 的速度向后移动，而拥挤车队的头部以 v_b 的速度前进，则拥挤车队的车辆增加率：

$$g_1 = (v_b - w_1) \times k_2$$

车辆跟驰时间 t_f 内，拥挤车数增至最大值：

$$N_m = g_1 \times t_f = (v_b - w_1) \times k_2 \times t_f$$

当非机动车离开机动车道时，拥挤车队开始消散，车辆减少率为：

$$r_2 = (w_2 - w_1) \times k_2$$

拥挤车队的消散时间为：

$$t_0 = N_m / r_2 = (v_b - w_1) \times t_f / (w_2 - w_1)$$

拥挤车队持续时间为：

$$t_j = t_f + t_0$$

受拥挤的车辆数为：

$$N_t = t_j \times g_1 = (v_b - w_2) \times (v_b - w_1) \times t_f \times k_2 / (w_2 - w_1)$$

5.2 实施“禁摩限电”政策后，受拥挤车辆数计算

表 1 深圳市龙岗区路网数据

道路等级	道路里程 (km)	道路网密度 (km/km^2)	深标密度 (km/km^2)
高速公路	91.5	0.36	0.3~0.4
快速路	3.96	0.01	0.4~0.6
主干路	236.23	0.89	1.2~1.8
次干路	155.16	0.59	1.6~2.4
合计	486.85	1.84	3.5~5.2

以龙岗区的路网规模情况（如上表）为例，可以推知，整个深圳市的城市次干路和支路网密度严重不足，导致片区短距离交通出行只能依靠城市主干路解决。根据“禁摩限电”政策的相关细则，摩托车和电动车在大部分主干路上都禁止限制通行，这无疑将造成摩托车、电动车使用人群很大程度上向私家车和公共交通等方式转移。下面，进行转移量的具体计算。

$$\Delta V = V_1 + V_2 / 72 + V_3 / 2.5$$

式中： ΔV ——转移后增加的交通量

V_1 ——使用摩托车、电动车转移到使用私家车的出行量

V_2 ——使用摩托车、电动车转移到使用常规公交的出行量

V_3 ——使用摩托车、电动车转移到使用出租车的出行量

注：按私家车车均 1 人、常规公交车均 72 人、出租车车均 2.5 人

$$N_v = \Delta V \times \omega$$

式中： N_v ——受拥挤车辆数

ω ——拥挤系数（根据当前道路服务水平确定）

5.3 “转移—延误”模型构建

实施“禁摩限电”政策后，由摩托车、电动车出行导致受拥挤机动车辆数将减少 N_t ，由摩托车、电动车使用人群转移导致受拥挤机动车辆数将增加 N_v ，因此，“禁摩限电”政策导致受拥挤机动车辆数的实际减少量为：

$$\Delta N = N_t - N_v$$

可以看出， N_t 、 N_v 均与摩托车、电动车的量有关，于是：

定义一个区的禁、限行非机动车量占该区实施“禁摩限电”政策前非机动车出行总量的比例为 x ，受拥挤机动车辆数的实际减少量 ΔN 与 x 之间的对应关系为 f ，基于 Pareto 最优和线性规划的思想，建立“转移—延误”模型：

$$\max \sum_{i=1}^n \Delta N_i = \sum_{i=1}^n f(x)$$

$$\text{s.t. } f_i(x) \leq f_i(x_m), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中： x_m ——受拥挤机动车辆数的实际减少量 ΔN 达到最大时，禁、限行非机动车量占该区实施“禁摩限电”政策前通行非机动车总量的比例

$f_i(x)$ ——该区第 i 个路段受拥挤机动车辆数的实际减少量

说明：由于“禁摩限电”政策实施时间短，缺少相关统计数据，所以无法定量研究政策实施后深圳市各区各路段的交通运行状况和居民出行结构的变化，因而很难对此模型所涉及的函数表达式中的个别系数进行标定求解。

5.4 改善方案提出

除了对上述模型进行求解确定最优的禁摩限电“力度”外，我们还从未来交通发展的趋势之一——公共交通层面，提出了改善方案的思路。

查询深圳公共交通现状资料得到，单向高峰小时运量：轨道交通运量 6~8 万人次/h，常规公交 4000~5000 人次/h。现有公交资源包括 896 条公交线路、6 条轨道交通线路、1.5 万辆出租车。现有分担情况是常规公交 630 万人次/日、轨道交通 310 万人次/日、出租车 120 万人次/日。

按效用理论转移交通量情况：公交出行量将增加 361.96 万人次/日、地铁出行量将增加 199.26 万人次/日、出租车出行量将增加 44.06 万人次/日。

设高峰期人均出行量为 1 次，高峰期持续时间为 2 小时 且双向客流均衡（人均出行次数 4.05 次/日，按限制 70%的电动车与 2.7%的摩托车计算）：

$$\text{常规交通: } \frac{361.96}{4.05 \times 2 \times 2} = 22.3 \text{ (万人次/h)}$$

$$\text{需增加公交线路数 (运量取 4500 人次/h): } \frac{22.3}{0.45} = 49.6 \approx 50 \text{ (条)}$$

$$\text{轨道交通: } \frac{199.26}{4.05 \times 2 \times 2} = 12.3 \text{ (万人次/h)}$$

$$\text{需增加轨道交通线路 (运量取 7 万人次/h): } \frac{12.3}{7} = 1.76 \approx 2 \text{ (条)}$$

$$\text{出租车: } \frac{44.06}{4.05 \times 2} = 5.44 \text{ (万人次/h)}$$

$$\text{按车均载客 2.5 人计算, 需增加 } \frac{5.44}{2.5} \approx 2.17 \text{ (万辆)}$$

按《城市道路交通运输规划设计规范 (GB50220-95)》大城市出租车拥有量下限为 2veh/1000 人；按 2017 年预测人口数推出当年出租车数量为 2.4 万辆，实际出租车需增加量为：1.27 万辆。

六. 现行政策和改进方案效果的评价与检验

6.1 评价指标体系的设计原则

评价指标是指为了达到可行性分析的目的，从几个评价对象众多的特性中选出的一个整套特性数据来分析各对象的各方面情况。实际上，它是对实现复杂系统的一种简化，应当满足内容完整、全面，科学实用，客观公正，可适用性强及操作性强的基本原则。本章将本着这指导思想，尝试建立一套合理、有效，可行的指标体系，为接下来改善方案选择打好基础。为保证评价的科学性与合理性，综合现有理论对指标体系的分析与研究，本文遵循以下的原则来构建评价指标体系：

1. 整体完备性原则

运输方式的复杂性，决定了评价指标体系的多因素、多层次性。要对运输方式的各方面进行不同层次的全方位评价，不能以偏代全、以局部代替整体，同时还要抓主流、抓本质。

2. 科学合理性原则

科学性要求评价者有严谨的科学态度，评价的手段、方法有充分的科学依据，评价指标体系有准确的含义和理论基础。合理性要求各指标有相对独立性，能协调一致，从不同侧面反映目标的要求，切忌相互矛盾和冲突；同时又不能重复和出现等价指标，造成重复评分现象。

3. 定性指标与定量指标相结合的原则

各种运输方式中涉及的指标较多，有些难以量化，而这些指标对评价又是很重要的，因此必

须用定性指标加以描述，在实际评价时再选取适当的方法进行量化处理

4. 可操作性原则

指标体系选择应尽量简单明了，相应指标量化及获取数据容易、准确可靠，尽量利用现有数据和已有规范标准。

6.2 评价指标的确定

6.2.1 查阅相关资料，结合专家意见，设定评价指标

本文综合已有的研究成果，并在结合深圳市交通发展白皮书和深圳市交通发展规划方案的基础上，根据改善方案选择的基本原则，经过反复推敲，也通过参考大量的相关文献及专家打分，对收集到的运输模式的选择评价指标进行了汇总和分类，将评价指标分成安全指标、效率指标、环保指标三类指标，对这些大类指标再进行细分，如下所示：

1. 安全指标：（1）年交通事故数 （2）事故伤亡率
2. 效率指标：（1）路网平均延误 （2）路网总体通行能力 （3）行车平均速度 （4）路网饱和度
3. 环保指标：（1）污染气体排放 （2）平均噪声污染等级 （3）能源消耗

6.2.2 评价指标的含义界定

（一）安全指标

安全指标是在城市道路交通安全评价中用于描述某一城市的交通安全程度的指标，是对交通安全情况的客观描述，同时也为客观分析城市道路交通安全条件提供重要的依据。城市道路交通安全直接影响和制约着城市交通运输的发展，是交通设计者们考虑改善方案需要注意的一个重要方面。

- （1）年交通事故数：是指在每一年深圳发生的交通事故数的总量。
- （2）事故伤亡率：是指事故涉及人员中死亡人员加受伤人员总和所占的比例。

（二）效率指标

效率指标是用于描述某一城市交通运行的效率程度的指标，是对交通效率情况的客观描述，同时也为客观分析城市道路交通运行效率提供重要的依据。城市道路交通效率直接反映了城市交通运行的合理程度和管理组织水平，是交通设计师考虑改善方案时的主要衡量因素。

- （1）路网平均延误：是指在路网中运行的车辆的平均延误时间。
- （2）路网总体通行能力：是指路网整体可承载的容量大小。
- （3）行车平均速度：是指路网中车辆运行的平均车速。
- （4）路网饱和度：描述路网的交通负荷程度的指标，由路网的交通流量除以路网的通行能力而得，即 V/C

（三）环保指标

环保指标是用于描述某一城市交通系统在防治能源消耗、污染排放方面做出努力程度的指标，是对交通系统环保措施实施情况的客观描述，同时也为进一步制定环保方面的政策提供了依据，是交通设计人员设计改善方案时的考虑的主要因素。

- （1）污染气体排放：当前改善方案下，交通系统中各类交通排放的污染气体的总量（选择 Cox ， Nox 作为定量分析的代表指标）。
- （2）平均噪声污染等级：深圳市各路段噪声等级的加权平均结果。
- （3）能源消耗：当前改善方案下，交通系统中各类交通消耗的能源总和（选取汽油、柴油使用量作为定量分析的代表指标）。

6.3 模糊综合评价模型的构建

基于以上论述的改善方案选择的评价指标，结合深圳城市交通的现状，进行构建的输模式选择的评价模型，基本步骤如下：

6.3.1. 评价指标体系的建立

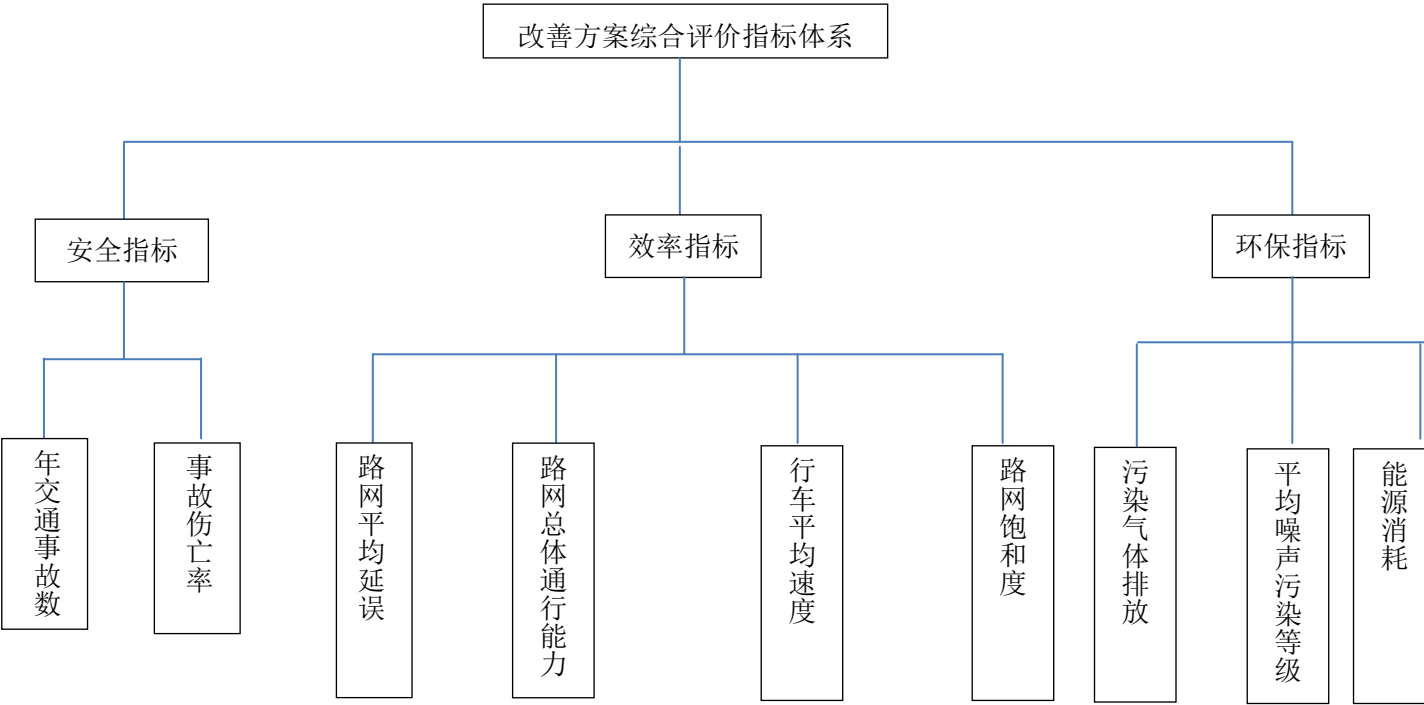
(1) 建立递阶层次结构模型

首先建立递阶层次结构模型，由目标层、准则层、方案层三个层次构成，这三个层次是指标体系的层次结构，模型示意图见图 1 所示。

目标层

准则层

方案层



(2) 权重的确定

利用层次分析法（AHP 法）建立起层次结构模型后，接下来计算出各层次指标的权重值。具体步骤如下：

A.构造两两比较判断矩阵

任何系统分析都以一定的信息为基础。AHP 的信息基础主要是人们对每一层次各因素的相对重要性给出的判断，这些判断用数值表示出来，写成矩阵形式就是判断矩阵。判断矩阵是 AHP 工作的出发点，构造判断矩阵是 AHP 的关键一步。判断矩阵表示针对上一层次某因素而言，本层次与之有关的各因素之间的相当重要性。假定 A 层中因素 A_k 与下一层次中因素 B_1, B_2, \dots, B_n 有联系，则构造的判断矩阵见图 2 所示。

构造的判断矩阵如图 2 所示：

A_k	B_1	B_2	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
\vdots	\vdots	\vdots	...	\vdots
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}

图 2 判断矩阵示意表

其中 b_{ij} 是对于 A_k 而言， B_i 对 B_j 的相对重要性,具体的数值如表一表示：

表 1		层次分析法标度量化表	
评价结果	得分	评价结果	得分
要素 S_i 比 S_j 极为重要	9	要素 S_i 比 S_j 极为次要	1/9
要素 S_i 比 S_j 重要得多	7	要素 S_i 比 S_j 次要得多	1/7
要素 S_i 比 S_j 重要	5	要素 S_i 比 S_j 次要	1/5
要素 S_i 比 S_j 稍重要	3	要素 S_i 比 S_j 稍次要	1/3
要素 S_i 比 S_j 一样重要	1	当需要取折中值时	取两相邻判断的中值

表 1 层次分析法标度量化表

B.层次单排序与一致性检验

此排序是指同一层次各元素对于上一层次中的某个元素的相对重要性进行排序, 计算各个比较矩阵的最大特征值及其对应的特征向量, 获得相应向量的权重, 其估算方法采用方根法。步骤如下:

第一步: 将比较判断矩阵中的每一行各个要素相乘得一新向量;

第二步: 将新向量的每个分量开 n 次方;

第三步: 将所得向量归一化即为权重向量。

为了检验矩阵的一致性, 需要计算它的一致性指标 CI , 具体步骤如下:

$$1. \lambda_{\max} = 1/n * \sum (AW)_i / W_i$$

$$2. CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

$$3. CR = CI / RI$$

显然, 当判断矩阵具有完全一致性时, $CI=0$ 。 $\lambda_{\max} - n$ 越大, CI 越大, 与之的一致性越差。为了检验判断矩阵是否具有满意的一致性, 需要见 CI 与平均随机一致性指标 RI 进行比较。对于 1~9 阶矩阵, RI 分别见表二所示:

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

表二 1~9 距阵的平均随机一致性指标

对于 1 阶、2 阶判断矩阵, RI 只是形式上的, 按照对判断矩阵所下的定义, 1 阶、2 阶判断矩阵总是完全一致的。当阶数大于 2 时, 判断矩阵的一致性指标 CI , 与同阶平均随机一致性的指标 RI 之比称为判断矩阵的随机一致性比例, 记为 CR 。当 $CR=CI/RI<0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性, 否则就需对判断矩阵进行调整。

通过以上方法, 我们求得的一级指标权重及兼容性分析结果见表 2 所示。

A	B1	B2	B3	W
B1	1	3	7	0.589
B2	1/3	1	5	0.339
B3	1/7	1/5	1	0.072
$\lambda_{\max}=3.068, CI=0.034$				
$CR=0.058<0.1$				

表 2 一级指标权重及兼容性分析结果

二级指标权重及兼容性分析结果如下:

“安全指标”的指标权重及兼容性分析结果如表 3 所示：

B1	C1	C2	W
C1	1	5	0.833
C2	1/5	1	0.167
$\lambda_{\max}=2, CI=0$			
$CR=0<0.1$			

表 3 “安全指标” 二级指标权重及兼容性分析

“效率指标”的指标权重及兼容性分析结果如表 4 所示：

B2	C1	C2	C3	C4	W
C1	1	1/3	1	3	0.188
C2	3	1	3	9	0.562
C3	1	1/3	1	3	0.188
C4	1/3	1/9	1/3	1	0.062
$\lambda_{\max}=4.102, CI=0.034$					
$CR=0.037<0.1$					

表 4 “效率指标” 二级指标权重及兼容性分析

“环保指标”的指标权重及兼容性分析结果如表 5 所示：

B3	C1	C2	C3	W
C1	1	7	5	0.493
C2	1/7	1	1/3	0.196
C3	1/5	3	1	0.311
$\lambda_{\max}=3.056, CI=0.033$				
$CR=0.056<0.1$				

表 5 “环保指标” 二级指标权重及兼容性分析

C.综合各层次要素权重排序的计算

除了计算每一层要素对上一层某要素的权重外，还需要计算方案层相对于目标层的相对重要性排序权值。将模型中的准则层与方案层通过计算而得到的权重分摊到方案层的各项指标，计算公式为：

$$C_j = \sum_{i=1}^n bic_j^i$$

我们得到改善方案的选择评价指标权重计算表如表 7 所示：

一级指标		二级指标		综合权重
安全指标	0.589	年交通事故数	0.833	0.491
		事故伤亡率	0.167	0.098
效率指标	0.339	路网平均延误	0.188	0.064
		路网总体通行能力	0.562	0.191
		行车平均速度	0.188	0.064
		路网饱和度	0.062	0.020
环保指标	0.072	污染气体排放	0.493	0.035
		平均噪声污染等级	0.196	0.014
		能源消耗	0.311	0.022

表 7 改善方案的选择评价指标权重计算结果

6. 3. 2. 模糊综合评价模型的构建

因涉及的评价因素很多，共建立了 3 个一级评价指标及 9 个二级评价指标，为了尽量考虑到前面评价因素，在此采用二级模糊综合评价模型，模型的具体实施步骤如下：

(1)明确被评价对象集 $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_k\}$ ，其中 k 为被评价的改善方案的个数，通常要对 Y 中的对象逐一进行模糊综合评价，选择最佳的改善方案。

(2)确定评价指标体系，本文中一级评价指标为 $A = \{a_1, a_2, a_3\}$ ，二级评价指标为 $a_1 = \{a_{11}, a_{12}\}$, $a_2 = \{a_{21}, \dots, a_{24}\}$, $a_3 = \{a_{31}, a_{33}\}$ 。

(3)建立评语集 V 及分值集 F

评价等级一般不宜划分过细或者过粗，通常可以划分为 5 到 7 等级，这里对运输模式的评价划分为 5 个等级，即 $V = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) = (\text{优}, \text{良}, \text{中}, \text{一般}, \text{差})$ ，并赋予对应的分值，构成分值集 $F = (100, 80, 60, 40, 20)$ 。

(4)确定各层评价指标的权重分配 $W = \{w_i\}$ 和 $W_i = \{w_{ij}\}$ ，根据各因素在评价指标体系中所起的作用大小和相对重要程度的不同，邀请专家组评价小组，根据各指标之间的相关重要性构成判断矩阵，运用 AHP 法确定各层评价指标集的权数，一级评价指标的权重向量为 $W = (w_1, w_2, w_3)$ ，二级评价指标权重向量为 $W_i = (w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{il})$, l 为第 a_i 个一级指标所包含的二级指标的个数。

(5)第一级评判

由于指标 a_{ij} 的模糊性，不能得出隶属度的具体数据，故通过专家调查法得到 a_{ij} 隶属于等级 m 的隶属度。现在假设聘请 10 位专家组成评估小组进行评价，为了统计上的方便，则隶属度 r_{ij} 可用 10 位专家中有几位赞同该因素被评为某个评估等级的方法来表示。其隶属度

$$r_{ij}^m = d_{ij}^m / d$$

式中：

d_{ij} 表述做出 a_{ij} 指标属于等级 m 的评价的专家人数， d 表示参加评价的专家人数。由此可以得到模糊矩阵：

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i1}^1 & r_{i1}^2 & \dots & r_{i1}^m \\ r_{i2}^1 & r_{i2}^2 & \dots & r_{i2}^m \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{ij}^1 & r_{ij}^2 & \dots & r_{ij}^m \end{pmatrix}$$

(6)对 a_i 进行二阶模糊判断

对 a_i 进行综合评判可得：

$$B_i = (W \bullet R_i) = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im})$$

将 B_i 归一化后获得总评价矩阵：

$$B = (B_1, B_2, \dots, B_n)^T$$

(7)综合评价

预算下式可求得最终综合评价结果：

$$C = W \bullet B$$

(8) 计算各运输模式的综合得分：

$$S = C \times F^T$$

将得分按照大小排序，S 值大者为好。

我们请学院的 5 位各方向教授组成评估小组，结合评价标准的 9 个因素首先对当前“一刀切”模式的管理方案进行评价，并根据评价结果得出模糊评价关系矩阵 R1。评估小组对该方案的打分结果见表 8 所示：

一级指标 权重	二级指标	评估小组评价					二级指标 权重
		优	良	中	一般	差	
安全指标 0.589	年交通事故数	4	1	0	0	0	0.833
	事故伤亡率	3	2	0	0	0	0.167
效率指标 0.339	路网平均延误	0	0	3	1	1	0.188
	路网总体通行能力	0	2	2	1	0	0.562
	行车平均速度	0	0	2	1	2	0.188
	路网饱和度	0	0	3	1	1	0.062
环保指标 0.072	污染气体排放	3	2	0	0	0	0.493
	平均噪声污染等级	4	1	0	0	0	0.196
	能源消耗	1	3	1	0	0	0.311

表 8 现行方案的评估小组打分表

由表 8 得出现行方案评价的关系矩阵 R1，依据评价向量计算公算出现行“一刀切”方案对应的评价向量 $C1=(0.489 \ 0.244 \ 0.157 \ 0.068 \ 0.042)$ 。

采用百分制对运输模式进行综合评分。首先对评价等级进行赋值，优为 100 分,良为 80 分，中为 60 分，一般为 40 分，差为 20 分，即为 $F=(100,80,60,40,20)$ 。

因此现行方案评分为 $S1=C1 \times F^T=81.4$

然后，我们对改进后的管理方案进行评价，并根据评价结果得出模糊评价关系矩阵 R2。评估小组对该方案的打分结果见表 9 所示：

一级指标 权重	二级指标	评估小组评价					二级指标 权重
		优	良	中	一般	差	
安全指标 0.589	年交通事故数	3	2	0	0	0	0.833
	事故伤亡率	3	2	0	0	0	0.167
效率指标 0.339	路网平均延误	3	2	0	0	0	0.188
	路网总体通行能力	1	3	1	0	0	0.562

环保指标 0.072	行车平均速度	2	3	0	0	0	0.188
	路网饱和度	3	1	1	0	0	0.062
	污染气体排放	2	3	0	0	0	0.493
	平均噪声污染等级	4	1	0	0	0	0.196
	能源消耗	3	1	1	0	0	0.311

表 9 改进方案的评估小组打分表

由表 9 得出现行方案评价的关系矩阵 R_2 ，依据评价向量计算算出改进后的方案对应的评价向量 $C_2=(0.546\ 0.421\ 0.029\ 0\ 0)$ 。

采用百分制对运输模式进行综合评分。首先对评价等级进行赋值，优为 100 分,良为 80 分，中为 60 分，一般为 40 分，差为 20 分，即为 $F=(100,80,60,40,20)$ 。

因此现行方案评分为 $S_1=C_2 \times F^T=90.02$,较现方案改善 10.59%。

6.3.3. 改善方案选择评价模型的验证

加权相对偏差距离最小法介绍的思路是通过描述被评价事物的多个指标来进行,在这个过程中,如果可以确定一个最优样本点,或者最劣样本点,或者是一个目标样本集合,那么过程计算被评价对象的指标到目标样本集合的距离,就可以确定它的优劣程度:距最小样本点或者目标样本点距离越近越好,距最劣样本点越远越好。基于加权相对偏差距离最小方法的特点,本节将采用此种方法对我们提出的改进方案和原有方案的评价模型进行验证,具体操作步骤如下:

- 1.确定目标“禁摩限电”方案集合 $A=(a_1,a_2,\dots,a_n)$ 。这里只对现行方案和我们的提出的改进方案进行评价,即 $A=(\text{现有}, \text{改进})$
- 2.确定支付矩阵,其中, a_1,a_2,\dots,a_n 为各种方案, C_1,C_2,\dots,C_m 为评价指标, C_{ij} 为第 i 个方案运输模式的第 j 项指标值($i=1,2,\dots,n, j=1,2,\dots,m$)。对定量指标由各运输模式有关数据整理得到,对定性指标,专家评价法得到。对评价指标赋值得到支付矩阵如表 10:

评价指标	现行方案	改进方案
C1 年交通事故数(五分制)	4.8	4.6
C2 事故伤亡率(五分制)	4.6	4.6
C3 路网平均延误(五分制)	2.4	4.6
C4 路网总体通行能力(五分制)	3.2	4.0
C5 行车平均速度(五分制)	2.0	4.4
C6 路网饱和度(五分制)	2.4	4.4
C7 污染气体排放(五分制)	4.6	4.4
C8 平均噪声污染等级(五分制)	4.8	4.8
C9 能源消耗(五分制)	4.0	4.4

表 10 现行方案和改进方案的支付矩阵

- 3.确定相对偏差矩阵 $[X_{ij}]_{mn}$,其中,

$$X_{ij} = \frac{|C_j^* - C_{ij}|}{C_{j\max} - C_{j\min}}, (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 种运输模式对应的第 j 个指标的偏差

$$C_{j\max} = \max(C_{j1}C_{j2} \cdots C_{jm}), C_{j\min} = \min(C_{j1}C_{j2} \cdots C_{jm})$$

当 C_j 为正指标时, $C_j^* = C_{j\max}$;

当 C_j 为负指标时, $C_j^* = C_{j\min}$ 。

据此建立可选择的“禁摩限电”方案的偏差矩阵, 见表 12 所示:

评价指标	现行方案	改进方案
C1 年交通事故数 (五分制)	0	1
C2 事故伤亡率 (五分制)	0	0
C3 路网平均延误 (五分制)	1	0
C4 路网总体通行能力 (五分制)	1	0
C5 行车平均速度 (五分制)	1	0
C6 路网饱和度 (五分制)	1	0
C7 污染气体排放 (五分制)	0	1
C8 平均噪声污染等级 (五分制)	0	0
C9 能源消耗 (五分制)	1	0

4. 确定评价指标体系中的指标权重矩阵 W

此处直接采用上文利用 AHP 法确认的权重 W 。

$W=(0.491 \ 0.098 \ 0.064 \ 0.191 \ 0.064 \ 0.02 \ 0.035 \ 0.014 \ 0.022)$

5. “禁摩限电”方案的选择

计算目标方案的指标向量 C_m 与 2 种方案中 9 个指标的标准向量 $C^*=(C_1^*C_2^*\cdots C_n^*)$ 之间的加权相对偏差距离。

$$D_i = \sqrt{\sum_{j=1}^m (W \bullet X_{ij})^2}, \text{其中, } j=1, 2, 3 \cdots m$$

由此可以得出 2 种方案的加权相对偏差距离 $D_1=0.492 \ D_2=0.213$

加权相对偏差距离最小的方法原理为, 结果最小者为最优, 所以通过此方法得出改进方案为最优。两种方法结论的一致性, 也可以看出, 本文建立的指标体系具是合理并有效的。

七. 总结与感悟

7. 1方案的优点:

- 应用流体力学理论、车流波动理论的相关知识建立模型, 并且应用多个参数加以简化, 使问题更加容易切入和理解;
- 基于2010-2014年深圳市综合交通调查数据及相关实时交通政策进行了未来2-3年的交通量预测, 便于更好的把握深圳市的交通发展趋势, 从而能够更加深刻全面的理解“禁摩限电”政策;
- 通过模糊综合评判法对现行的“禁摩限电”政策效果和所提出的可行方案进行评价, 使结果更加直观, 同时增强了方案的完整性和实用性。
- 根据效用理论对“禁摩限电”政策实施后, 使用摩托车、电动车出行的转移情况进行了具体研究, 有利于确定其余各种方式将要承担的交通流压力;
- 在建立模型的同时, 不仅局限于“禁摩限电”政策本身, 还从公共交通的角度出

发，使方案层次感和立体化程度更加明显，与未来交通发展的趋势相契合。

f) 本方案的研究过程与传统的数学建模有一定的差异，可以说是一次数学建模思想在实际交通领域的应用，为今后相类似的研究提供了新的方向。

7.2方案的缺点：

a) “禁摩限电”政策实施时间短，缺乏相关统计数据，很难精细化研究模型中各函数表达式的系数，导致模型在理论化层面的优势未能充分体现。

b) 由于安全与环境方面的指标定量研究难度较高，所以模型更多的是从效率角度分析，不免缺乏对人本思想和生态效益的考虑，在这方面有待改进，

c) 本方案所设置的参数较多，导致人工计算复杂。

八. 参考文献

[1]任福田，美国道路通行能力手册中国建筑工业出版社，1991

[2] Liu Guoxin. A Fluid Model for Bicycle Traffic Flow at A Signalized Intersection. Proceedings of the International Symposium on Non-motorized Transportation Beijing, May23-25, 1994:151~160

[3] Mc Henry,S. and M. Wallace. Evaluation of Wide Curb Lanes as Shared Lane Bicycle Facilities. Report FHWA/MD-85/06, Maryland Department of Transportation, 1985

[4] 2010年居民出行调查与分析报告，深圳市发展和改革委员会 深圳市交通运输委员会，2014

[5] 2010年深圳市综合交通年度报告，深圳市发展和改革委员会 深圳市交通运输委员会，2014

[6] 2014年度深圳市居民出行特征抽样调查报告，深圳市规划和国土资源委员会 深圳市规划国土发展研究中心，2015

[7] 2014 深圳市客运交通规划基础数据普查(最终版)，深圳市交通运输委员会，2014

特别说明：其中编号为 4-7 的 4 篇文献为我们本次建模的数据来源。