



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

2016 年同济大学数学建模竞赛论文

选择题号: D

参赛报名号: 2016025260

所属学院: _____

参赛队员: 1. _____, _____, _____

2. _____, _____, _____

3. _____, _____, _____

“禁摩限电”效果综合分析问题

摘 要

本文主要定量分析了深圳市“禁摩限电”政策的合理性，统计了从政府机关搜集的各项数据，建立了机动车道车辆承载量模型、交通方式城市贡献率模型，利用 MATLAB、Excel 等软件，实现了对现有道路承载的“供需关系”以及摩托车、电动车和其它交通方式的城市贡献率对比分析的问题的求解，并提出了“禁摩限电”的可能实施方案，达到了“从现象看本质”的目的。

针对“禁摩限电”的原因，结合理论算法、直观分析法，建立第一个模型“车道车辆承载量”。利用 Excel 对大量的数据进行筛选，选取道路通行能力这一指标来计算机动车道车辆承载量，该指标的可量化性使得模型结果可以被直观分析。基于理论算法，根据不同道路等级、不同道路通行能力求解了车道设计承载量。以深圳市政府部门提供的数据，求得机动车道设计车辆承载量当量数为 3347144，而实际承载量当量数为 4183585，可知深圳市道路承载量的“供需关系”明显失衡，道路处于超载状态，故不加限制的满足所有人的出行方式要求是不现实的，也是难以为继的。

针对“禁摩限电”的原因，利用主成分分析法、层次分析法，建立第二个模型“交通方式城市贡献率”。为求解这个模型，从大量数据中筛选出本文用到的关于不同交通方式的详细数据，建立了 4 个指标：交通方式分担率、交通方式综合效率、交通方式安全系数、交通方式污染补偿成本。这 4 个指标分别反映了交通需求结构、交通工具的效率、交通工具的安全性、交通工具对环境的影响四个方面。利用主成分分析法把这四个指标转化为“城市贡献率”这一个指标体系，其中的参数——权重用层次分析方法求出，并用 MATLAB 软件计算权重比例和一致性检验。依据此模型求得摩托车、电动车的城市贡献率最少，分别为 0.096 和 0.140，由此得“禁摩限电”政策的提出和施行是有依据并且合理的。

针对“禁摩限电”的实施，利用比较分析方法，提出了一个可供政府参考的可行性方案，并利用模型二对方案实施前后进行对比分析，最后分析政策“禁摩限电”的效果。从减轻交通压力、改善生存环境、减少能源消耗、降低交通事故率等方面，来验证方案的合理性。

为论文问题所建的模型不带任何意识形态，具有较好的说服力和客观合理性，可用于决策者作为参考，也适于推广至其他决策方案的裁定。

关键词：禁摩限电 数据统计 直观分析法 主成分分析法 层次分析法

一、问题重述

为了让一项政策,如“禁摩限电”,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、问题分析

1、为论证“禁摩限电”这一政策的合理性,首先要建立模型对深圳市机动车道交通承载量进行评估,客观定量地分析深圳机动车道路交通资源总量的“供需关系”,得出现有的机动车交通资源已经超出可承受的范围之外这一结论,进而得出对交通方式进行限制的必要性。

2、为论证“禁摩限电”这一政策的合理性,通过分析1得出限制交通工具的必要性之后,要建立合理的指标,分析比较不同种类交通工具在同等情况下的交通方式城市贡献率。由于城市的迅速发展,交通方式多种多样,但本文研究的是城市道路交通问题,主要考虑机动车道上的交通工具,因此选取具有代表性的出行方式如公交车、私家车、出租车、摩托车、电动车进行比较分析。然后建立了以下四个指标,指标分别为交通方式分担率、交通方式综合效率、交通方式安全系数、交通方式污染补偿成本。第一个指标反映了深圳的交通需求结构,第二个指标反映了交通工具的效率,第三个指标反映了各种交通工具的安全性,第四个指标反映了交通工具对环境的影响。然后利用主成分分析法将这四个指标转化为一个综合指标,建立交通方式城市贡献率模型,其中,各指标的权重利用层次分析法求得。最后比较各个交通方式的城市贡献率,分析得出“禁摩限电”的合理依据。

3、通过分析1、2,结合深圳市实际情况,提出“禁摩限电”的可行方案,根据“禁摩限电”前后四个指标的变化,对深圳市政府推行该项政策的效果进行分析。

三、模型假设

- (1) 假设城市交通始终畅通;
- (2) 假设同一类型道路具有相同的车道数。
- (3) 假设高快速、主干道、次干道能代表全市道路通行能力。
- (4) 假设各类交通方式车型固定单一, 搭载乘客均为质量均匀的乘客;
- (5) 不考虑摩托车、电动三轮车在人行横道和非机动车道上行驶的情况;
- (6) 本文讨论的交通方式均为载客交通工具, 不考虑货车;
- (7) 本节讨论的交通方式均为深圳市内常用交通工具, 不考虑外来车辆的影响;
- (8) 本文讨论的交通方式仅限于公交车、私家车、出租车、摩托车、电动车五种类型, 不考虑地铁、轨道交通和城市专道轻轨;

四、符号说明

C_p ——无平交路段的设计通行能力

C ——城市贡献率

$P_{i,n}$ ——第 n 年 i 交通方式的出行分担率

α ——交通方式经济效率

δ ——交通方式运输效率

f ——交通方式能源消耗系数

y_{ij} —— i 年第 j 种交通事故人口死亡率

CTA ——人均能源消耗分量

CTB ——人均尾气排放分量

CTC ——人均噪声污染分量

P_{cu} ——标准车当量数

五、模型建立与求解

5.1 深圳市道路通行能力评估

5.1.1 背景知识

5.1.1.1 深圳市道路情况总览

深圳市道路属于棋盘式路网模式，整体上到“十二五”末，将形成“七横十三纵”的主干道棋盘式路网布局。截至 2012 年，深圳市各等级道路网总长约 6015 公里，道路面积达 10629 万平方米，人均道路面积为 10.1 平方米，如表 5-1 示。

年份	道路长度（公里）	道路面积（万平方米）	人均道路面积（平方米）
2008	5 849	8 630	9.0
2009	6 035	8 864	8.9
2010	6 184	8 941	8.6
2011	5 977	10 616	10.1
2012	6 015	10 629	10.1

表 5-1 深圳市道路长度、面积概况

深圳市道路可以划分为三个层次，每个层次所包含的道路类型以及道路所具有的功能特点均不相同，如表 5-2 所示。

表 5-2 深圳市路网情况

层次	道路类型	功能
第一层次	高快速路	高快速路网与国家路网、省干线路网的相互衔接，成为深圳市实现过境交通、城市内部长距离交通以及城市各组团之间的交通的快速通道。
第二层次	干线性主干道	主要用来集散高快速路交通，连接贯穿城区及辖区内的主要通道和承担较长距离交通。
第三层次	其他道路（主要包括普通主干道、次干道、支路）	主要具有区域性交通功能，兼有服务功能。

其中高快速路、主干道、次干道通车总里程达 2154 公里，次干道以上合计路网密度约 $2.396\text{km}/\text{km}^2$ ，如表 5-3 所示。

表 5-3 深圳市道路网密度一览表

道路等级	长度（公里）	密度（公里/平方公里）
高快速路	357	0.39
主干道	999	0.11
次干道	798	0.89
合计	2154	2.39

5.1.1.2 道路通行能力的定义

为评估深圳市道路承载能力的“供需关系”，作者用道路通行能力来进行分析比较。道路通行能力是指在特定的交通条件、道路条件及人为度量标准下单位时间能通过的最大交通量。

而不同的交通工具的体积不一样，故在计算路段交通流量时是分车型的，一般城市道路以小客车为标准进行换算，本文所采取的换算系数如表 5-4 所示。

表 5-4 车辆换算系数

车型	小客	大型客车	大型货车	铰接车	摩托车	电动三轮车
换算系数 μ	1	2	2.5	3	0.4	0.6

根据道路方式的不同，又分为机动车道、非机动车道、人行道的通行能力，其中机动车道又根据道路等级划分为高快速路、主干道、次干道等等。

机动车道的通行能力大致可分为无平面交叉路口的路段通行能力，以及交叉路口的通行能力。路段的通行能力又可分为以下三类计算方法，

基本通行能力 C_B ：指道路与交通处于理想情况下，每一条车道在单位时间内能够通过的最大交通量。

可能通行能力 C_p ：指在通常的道路交通条件下，单位时间内通过道路一条道或某一断面的最大可能车辆数。

设计通行能力 C_L ：指道路交通的运行状态保持在某一设计的服务水平时，道路上某一路段的通行能力。

5.1.2 模型建立

由深圳市交通运输委员会公开报告得知，深圳 90% 的道路不设非机动车道，摩托车、电动车、汽车共用一条车道。且本模型仅需考虑机动车，故不考虑行人，因此本模型中道路通行能力即代表机动车道通行能力。

本文中采取设计通行能力作为统一标准进行计算、比较。

(1) 无平交路段的设计通行能力：

$$C_p = 3600/hc \text{ (pcu/h)}, \quad (1)$$

其中 hc 为连续小客车车流平均车头时距(s/pcu)。

$$C_L = \alpha_c \times \alpha_m \times C_p \text{ (pcu/h)}, \quad (2)$$

其中 α_c 表示道路分类系数，不同的道路的分类系数见下表 5-5：

表 5-5 道路分类系数			
道路分类	快速路	主干路	次干路
分类系数 α_c	0.75	0.80	0.85

其中 α_m 表示机动车道单向通行能力折减系数。不同车道数目的折减系数见下表 5-6：

表 5-6 单向通行能力折减系数				
单向车道数	一车道	二车道	三车道	四车道
折减系数 α_m	1.00	1.85	2.64	3.25

(2) 有平交路段的设计通行能力：

A、十字形交叉口

$$Q_{\text{非}} = Q_{\text{优}} \cdot e^{-\lambda\alpha} / (1 - e^{-\lambda\beta}) \quad (3)$$

式中：

$Q_{\text{非}}$ ——非优先通行次干道上可以通过的交通量(辆/h)， $\lambda = Q_{\text{优}}/3600$ (辆/s)；

α ——临界间隙时间 (s) (6~8s 或 5~7s)；

β ——次干道上车辆间的最小车头时距 (3s 或 5s)。

B、环形交叉口

$$Q_m = \left[354W \left(1 + \frac{e}{W} \right) \left(1 - \frac{P}{3} \right) \right] / \left(1 + \frac{W}{L} \right) \quad (4)$$

式中：

Q_m 为交织段上最大通行能力 (辆/h)，

为交织段长度 (m)，

W 为交织段宽度 (m)，

e 为环形道路口引道的平均宽度 (m)，

P 为交织段内交织车辆与全部车辆之比(%)。

5.1.3 模型求解

5.1.3.1 不考虑交叉口的情况

对全市的道路通行能力进行计算。

首先将公式①带入公式②，得到：

$$C_L = \alpha_c \times \alpha_m \times 3600/hc \quad (5)$$

依据表 5-5，表 5-6，并根据一般标准，对高快速路、主干道、次干道的 hc 值分别取：2~4(s/pcu)，3~5(s/pcu)，4~6(s/pcu)，然后计算得下图：

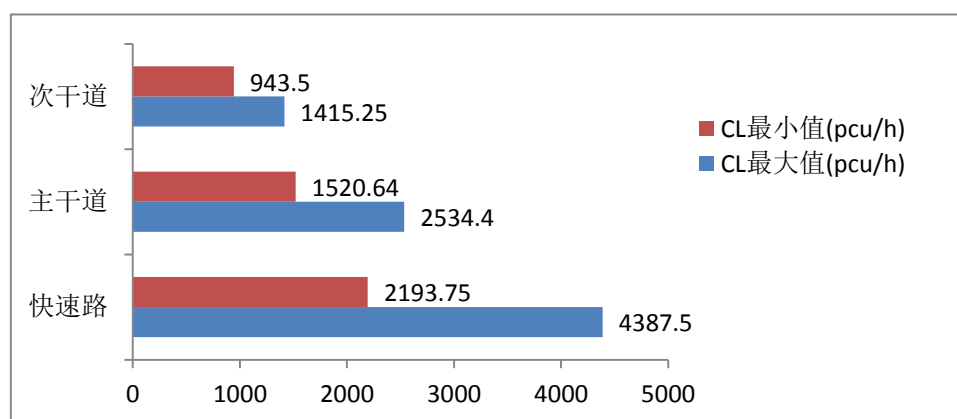


图 5-1 不同道路类型的设计通行能力

由表 5-3 得知快速路在三种道路中所占比重为 $b_1=0.166$ ，主干道为 $b_2=0.464$ ，次干道为 $b_3=0.370$ 。

$$\text{所以总道路平均设计通行能力 } \overline{S_{CL}} = \sum_{i=1}^3 \frac{(CL_{iMAX} - CL_{iMIN})}{2} * b_i \quad (6)$$

代入数据得 $\overline{S_{CL}}=2428$ (pcu/h)

$$\text{现定义全市道路车辆设计承载量 } N = \frac{R}{V} * \overline{S_{CL}} * T \text{ (pcu)} \quad (7)$$

其中： R ——道路总长 (km)

V ——车辆平均行驶速度 (km/h)

T ——双向道路车辆一天内周转次数

取 V 为城市道路平均行驶速度 $50km/h$ ， T 最大值为 $2*16=32$ ， R 由表 5-3 得知为 $2154km$ ，代入数据得：

$$N=3347144 \text{ (pcu)}$$

而由深圳交通运输委员会提供的数据可知，深圳现有主要类别车辆（2012年）数量如下表 5-7 所示，

表 5-7 深圳市主要车别数量

车别	私人汽车	出租车	公共汽电车	摩托车和电动车
数量 T (辆)	2123761	15973	14617	约 400 万

数据说明：据深圳市统计年鉴摩托车登记在册数量为 6018 台，电动车数据未进行统计。但据深圳市交警局长在南方日报所受采访[12]称深圳市近年来每年查处摩、电约 40 万，总数仍达近 400 万，考虑到实际情况，作者认为在此采取大数据进行对比说明更加符合实际。

下面计算利用表 5-4 车辆换算系数计算全市实际车辆承载量 N_1 ，

$$N_1 = \sum \mu * Y \quad (pcu) \tag{8}$$

代入数据得， $N_1=4183585 \text{ (pcu)}$

5.1.3.2 考虑交叉口的情况

交通承载力方面，考虑交叉口的情况显然不如不考虑交叉口的情况乐观，因此不考虑交叉口的计算结果更具说服力，此处略去了考虑交叉口的计算过程。

5.1.4 结果分析

由以上分析可知，深圳市实际道路车辆承载量 N_1 超出设计承载量 N 的百分率为：24.99%。说明深圳市道路交通“供小于求”，道路网已处于超负荷运转中，这一计算结果也与“深圳道路网密度居全国第一”相符，道路“超载”带来一系列问题如交通拥堵、违法犯罪率上升、城市形象受损。解决这些问题必须从源头上进行，其中一个方法便是限制居民的出行方式，限制交通工具的数量。摩托车和电动车的数量以近 400 万的数量高居第一，“禁摩限电”必然是当局要纳入考虑的一个措施，下面的模型将从交通工具的贡献率来对“禁摩限电”的必然性和合理性进行考量。

5.2 交通方式城市贡献率模型

5.2.1 指标 1 的建立

5.2.1.1 交通需求结构模型分析

交通需求是指出于各种目的的人和物在社会公共空间中以各种方式进行移动的要求，它具有需求时间和空间的不均匀性、需求目的的差异性、实现需求方式的可变性等特征。而城市中市民的交通出行需求又是最基本的交通需求。因此本文的交通需求主要指市民交通出行需求，不考虑货运需求。而交通出行需求结构的表征指标就是出行者期望选择不同交通方式的出行量比重，即方式分担率问题。因此本文基于交通方式分担率角度建立交通需求结构模型。

深圳市客运交通结构如图 5-2 所示：

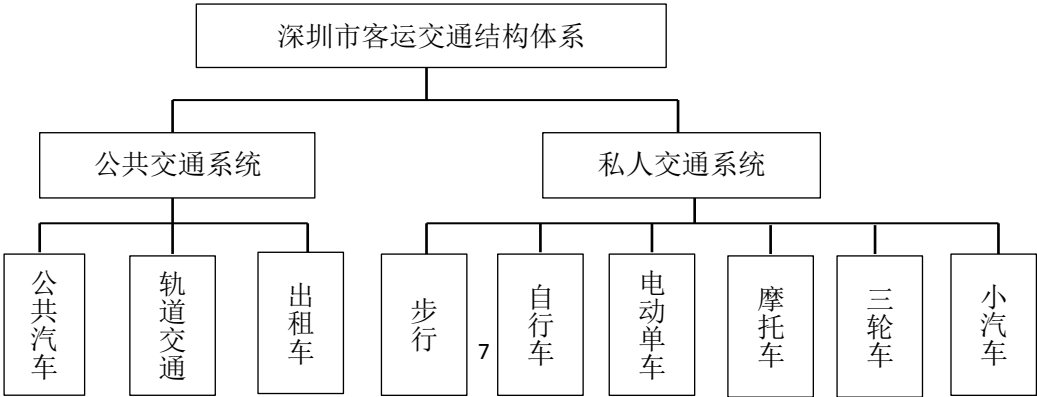


图 5-2 深圳市客运交通结构

5.2.1.2 交通需求结构模型假设

- (1) 假设交通需求只有居民出行需求，不考虑货运需求。
- (2) 假设各交通方式出行分担率与年份呈线性关系或指数关系。
- (3) 假设出租车占其他交通方式的 50%。

5.2.1.3 交通需求结构模型建立

$$P_{i,n} = \frac{L_{i,n}}{\sum_i L_{i,n}}$$

其中， $P_{i,n}$ 为第 n 年 i 交通方式的出行分担率；

$L_{i,n}$ 表示第 n 年 i 交通方式的日均出行总量，单位为万次。

各个交通方式的代码如下表所示：

表 5-8 交通方式代码

	自行车	公共 汽车	摩托车 电动车	步行	小汽车	出租 车
代码	B	P	M	F	C	T

5.1.2.4 求解交通需求结构模型

根据深圳市规划和国土资源委员会发布的资料^[4]，得到 1995、2000、2005、2010 年深圳全方式日均出行总量，并算出各交通方式的出行分担率，如表 5-9 和图 5-3 所示。

表 5-9 深圳各方式日均出行量（单位：万次）

年份	自行车	公共 汽车	摩托车 电动车	小汽车	步行	其他	日均出行总量
1995	190.93	115.61	58.68	47.30	375.74	87.58	875.84
2000	239.66	202.79	191.06	95.53	894.96	51.95	1675.96
2005	82.13	360.57	58.09	286.45	1105.74	110.17	2003.16
2010	196.13	528.30	69.60	610.55	1581.73	177.15	3163.46

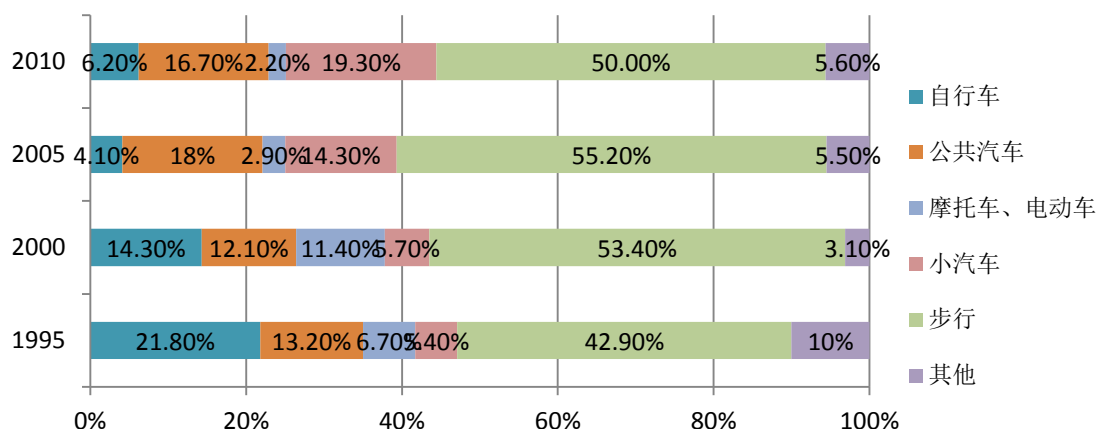
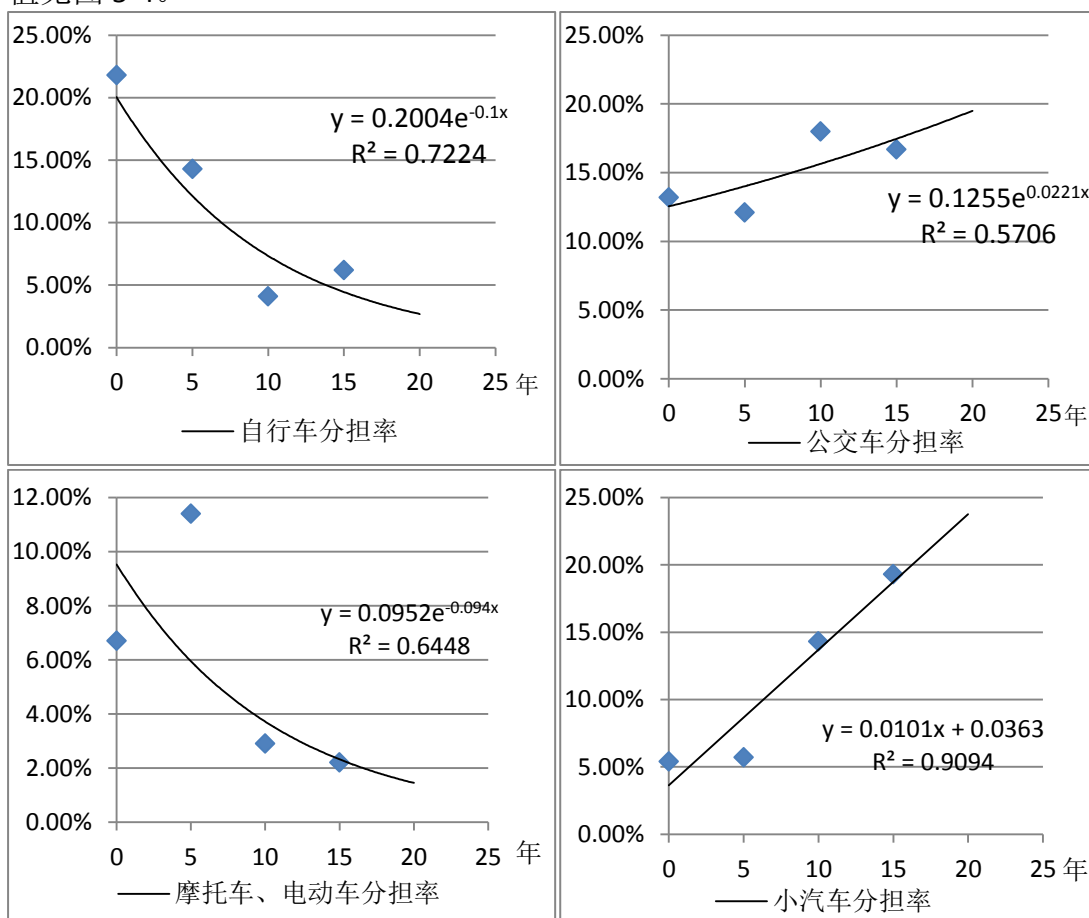


图5-3 深圳1995、2000、2005、2010年交通方式分担率

我们根据深圳 1995-2010 年的数据预测 2015 年深圳的各交通方式分担率。假设各交通方式出行分担率与年份呈线性关系或指数关系，即

$$P_{i,n} = \alpha e^{\beta n} \text{ 或 } P_{i,n} = \alpha + \beta n。$$

分别对往年数据进行线性回归和指数回归，选取 R^2 相对较小且结果更符合实际的模型，根据得到模型预测深圳 2015 年各交通方式的分担率。具体模型和 R^2 值见图 5-4。



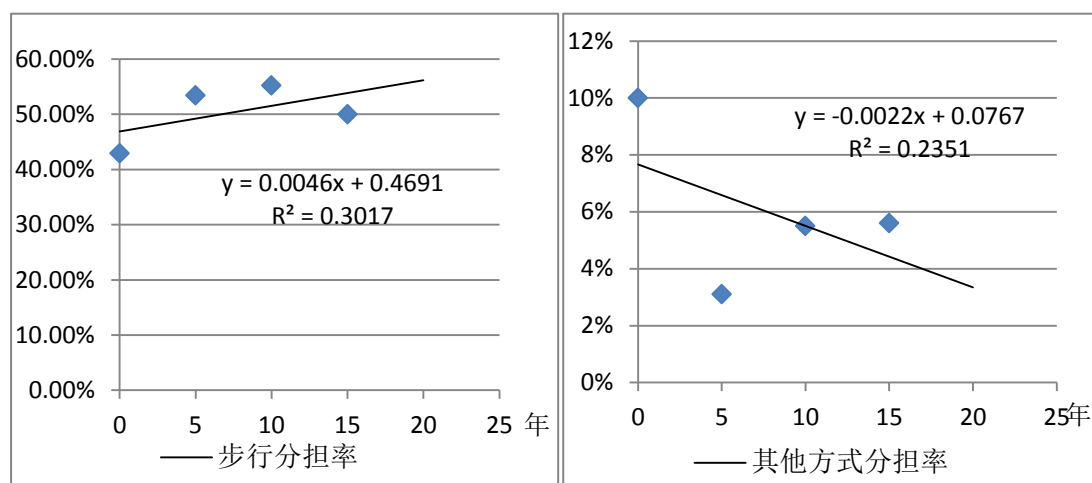


图 5-4 深圳市各方式的分担率模型

最终经模型测算得到的 2015 年深圳各交通方式的分担率，如表 5-10 所示。

表 5-10 深圳 2015 年各交通方式的分担率

	自行车	公共汽车	摩托车、电动车	小汽车	步行	其他	合计
2015	2.44%	17.58%	1.31%	21.45%	50.51%	6.71%	100.00%

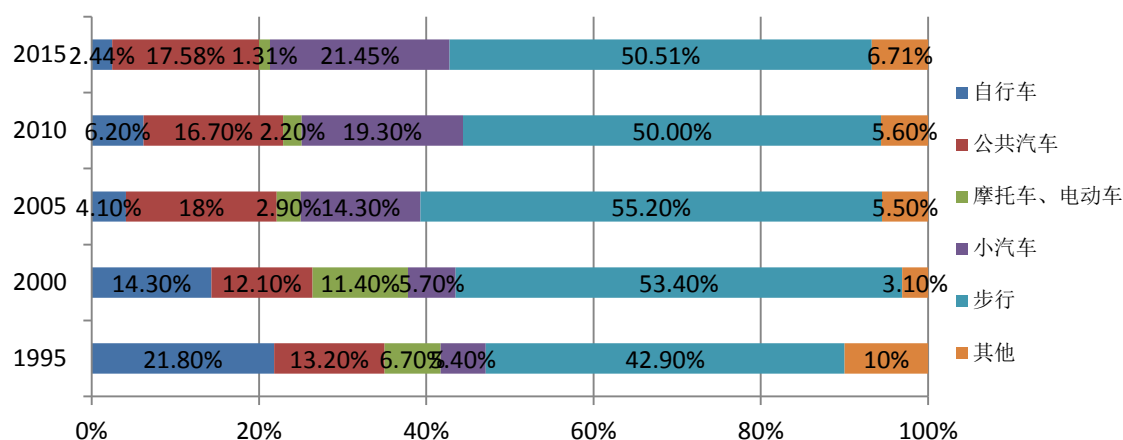


图5-5 深圳1995/2000/2005/2010/2015交通方式分担率

本文构建的交通需求结构模型是基于交通方式分担率。由于 1995 年至 2015 年的交通方式分担率差异较大，且早期的数据与现在的交通方式出行比例不符，因此本文选取最近一年即 2015 年深圳各交通方式的出行分担率作为交通需求结构的指标。由于本文研究的是城市道路交通问题，主要考虑的是在机动车道上行驶的交通工具（如公交车、小汽车、摩托车、出租车、自行车等），由于步行发生在人行道上，不会影响机动车道，所以这里不考虑步行和其他的交通方式。由此，我们得到新的交通需求结构，如下表。

自行车	公共汽车	摩托车电动车	小汽车	出租车
-----	------	--------	-----	-----

P_B	P_P	P_M	P_C	P_T
0.05	0.38	0.03	0.46	0.07

由图 5-5，深圳 1995、2000、2005、2010、2015 年的交通方式分担率的变化可以看出，总体水平上，交通出行需求结构中，小汽车所占的比重在迅速增长，公共汽车所占比重呈上升趋势，而摩托车和三轮车则呈下降趋势，而且下降速度较快，目前它的交通需求结构指标仅为 0.03。由此看来，深圳市民大大减少了使用摩托车、电动车出行的需求，出行者期望使用摩托车、电动车作为机动化出行方式的概率仅为 0.03。

5.2.2 指标 2 的建立

5.2.2.1 交通方式经济效率

经济效率是社会经济运行效率的简称，是指在一定的经济成本的基础上所能获得的经济收益。

在本文中，我们将要讨论各交通工具运输乘客的经济效率。

乘客使用交通工具即体现交通工具的价值，故可以用旅客运输量与平均每公里交通费用来计算经济收益。

$$\alpha = \frac{p \times q}{M}$$

式中：

p 代表平均小时乘客运输量，单位为人/小时；

q 代表平均每公里交通费用，单位为元/公里；

M 代表每公里投资额，单位为元/公里。

通过对现有数据的采集及估计，可以得到以下表格：

表 5-11

交通方式	轨道交通	常规公交车系统	出租车	自行车	摩托车	私家车	电动车
p	3-4	1-2	2.7	1	1.5	1.7	1.2
q	0.5	0.2	2.7	0.005	0.05	1	0.01
M	6-8	0.2-1	0.5	0.015	0.5	0.4	0.05
α	0.25	0.5	14.58	0.33	0.15	4.25	0.24

5.2.2.2 交通方式运输效率

所谓的运输效率指的是在单位时间内，交通工具每单位距离所能承载的乘客数。

$$\delta = \frac{\omega}{\chi}$$

式中：

δ 代表单位时间单位距离内交通工具的运输效率，单位为人/公里；

ω 代表平均每小时乘客运输量，单位为人/小时；

χ 代表平均每小时行驶公里数，单位为公里/小时。

通过对现有数据的采集，可以得到以下表格：

表 5-12

交通工具	轨道交通	常规公交车系统	出租车	自行车	摩托车	私家车	电动车
ω	30000-40000	10000-20000	2.7	1	1.5	1.7	1.2
χ	30-40	10-20	36	15	35	40	20
δ	1000	1000	0.75	0.067	0.042	0.0925	0.06

5.2.2.3 交通方式能源使用效率

(1) 交通工具能源消耗系数

单位：无量纲

定义：交通工具道路能源消耗的增长与出行需求增长之间的函数关系。

量化：
$$f = \sum_{k=1}^{n_1} \sum_{i=1}^{n_2} l_k \cdot q_k^i \cdot \eta_i(v_k^i)$$

式中：

f 代表交通工具能源消耗系数

l_k 代表城市路网中第 k 条道路的长度

q_k^i 代表城市路网中第 k 条道路上第 i 中交通工具的交通流量

$\eta_i(v_k^i)$ 代表城市路网中第 k 条线路上第 i 中交通工具以 v_k^i 速度行驶时的能源消耗因子

n_2 代表整个城市中行驶的交通工具的种类数

n_1 代表城市路网道路总数

指标说明：交通工具的能源消耗是指城市交通队能源的消耗情况，能源消耗量反映了交通的能源投入。在满足一定的交通需求的前提下，能源消耗越少，交通工具的能源效率越高。

但由于此项指标缺乏足够数据进行量化分析，我们引入了另一度量能源消耗的指标。

(2) 交通工具平均能源消耗系数

定义：单位路程内，平均每人使用交通工具出行所消耗的能源

量化：
$$\lambda = \frac{\sigma}{g \cdot \rho}$$

式中：

σ 代表每小时能源消耗；

g 代表交通每小时行驶距离；

ρ 代表交通工具每小时载客量。

由于对每一种交通工具消耗的能源量化较为困难，我们将公共汽车的平均能

源消耗系数设为 1，然后对其他交通工具的平均能源消耗系数进行计算，得下表：

表 5-13

交通工具类别	自行车	摩托车	私家车	出租车	公交车	轨道交通	电动车
每人公里能源消耗	0	5.6	8.1	7.8	1	0.5	0.05

5.2.3 指标 3 的建立

5.2.3.1 交通方式安全评价模型分析

本文研究的是各种交通工具的特性，并针对每个特性给出一定的指标进行比较分析，而分析交通安全性的指标有许多不同的方法。鉴于所选取的交通工具(都是陆路交通，不存在如飞机一样里程数与其他交通工具差别极大的情况)，本文在此采用人口死亡率作为评价指标。

而人口死亡率是指人口死亡率加人口受伤率乘以比例系数 η_j 的积的总和。

$$y_{ij} = x_{ij} + \eta_j x_{ij}'$$

式中，

y_{ij} ：i 年第 j 种交通工具事故的人口死亡率（j=1, 2, 3 分别代表汽车，摩托车和自行车）；

x_{ij} ：i 年第 j 种交通工具事故的人口死亡率；

η_j ：第 j 种交通工具事故总的死亡人数与总的受伤人数的比例系数；

x_{ij}' ：i 年第 j 种交通工具事故的人口受伤率；

5.2.3.2 交通方式安全评价模型建立

利用人口死亡率，通过收集全国汽车，摩托车和自行车人的数量、各交通事故发生数量以及事故伤亡人数的数据，计算得出每年人口死亡率 y_{ij} ，再将每种交通工具的 y_{ij} 求平均得到 Y_j ，即

$$Y_j = \frac{\sum y_{ij}}{n}$$

根据本模型的建立思路，可以发现 y_{ij} 和 x_{ij} ， x_{ij}' 服从线性模型，呈正相关关系。而 y_{ij} 的值越大，交通工具的安全性就越低，呈负相关关系。

5.2.3.3 交通方式安全评价模型假设

基于建立的模型以及收集的数据，作出以下基本假设：

- (1) 没有伤亡的事故不计入事故数量中。
- (2) 收集的数据均为全国数据。
- (3) 所计算的交通方式包括汽车，摩托车、电动车和自行车。
- (4) 汽车包括公交车、出租车和私家车，由于三者事故发生上没有明确的区分，其安全系数都采用汽车的安全系数。
- (5) 由于不存在自行车数量的普查，利用人均自行车数量作为计算自行车数量的依据。

5.2.3.4 交通方式安全评价模型的求解

基于以上假设，通过收集中国统计年鉴^[7]中 2005 年到 2014 年三种交通工具的数量以及其事故的死亡人数和受伤人数，将数据代入模型中计算得到各个交通工具的人口死亡率 y_{ij} 和 Y_j ，如下表所示：

表 5-14 2005 年到 2014 年汽车、摩托车、自行车人口死亡率

各种交通工具人口死亡率（人/万辆）			
年份	汽车	摩托车、电动车	自行车
2005	90.4020	142.4565	0.0460
2006	55.4269	132.0205	0.0469
2007	43.8204	117.4252	0.0362
2008	32.4221	99.4638	0.0268
2009	22.6019	83.4657	0.0205
2010	16.8065	72.2320	0.0167
2011	13.2678	62.2330	0.0117
2012	10.5693	59.2826	0.0103
2013	8.4757	60.7696	0.0110
2014	7.1538	65.1869	0.0106
均值	30.0947	89.4536	0.0237

由于本文将人口死亡率作为安全系数，因此将死亡率的量纲（人/万辆）删去，作为安全系数，同时基于假设（4），得出下表：

表 5-15 各种交通工具的安全系数

	公交车	出租车	私家车	摩托车 电动车	自行车
安全系数	30.0947	30.0947	30.0947	89.4536	0.0237

5.2.4 指标 4 的建立

5.2.4.1 交通方式环境影响模型构建

公交车、私家车、出租车、摩托车、电动车等地面交通工具均会对环境产生或多或少的负面影响，由于环境污染涉及资源、能源、大气、噪声等多个方面的

各种因素，其量纲和单位均不相同，因此作者设置一个交通方式环境影响模型，该模型的核心指标是交通方式污染补偿成本（TCT），核心指标包含能源消耗分量（CTA）、尾气排放分量（CTB）、噪声污染分量（CTC）三个分项指标。

人均交通方式污染补偿成本（TCT）：为补偿某种交通工具单位距离载客产生的环境影响代价而付出的全部成本与交通工具搭载人数的比值，单位：元每人。

人均能源消耗分量（CTA）：为补偿某种交通工具单位距离载客产生的能源消耗代价而付出的全部成本与交通工具搭载人数的比值，单位：元每人。

人均尾气排放分量（CTB）：为补偿某种交通工具单位距离载客产生的尾气排放代价而付出的全部成本与交通工具搭载人数的比值，单位：元每人。

人均噪声污染分量（CTC）：为补偿某种交通工具单位距离载客产生的噪声代价而付出的全部成本与交通工具搭载人数的比值，单位：元每人。

5.2.4.2 交通方式环境影响模型假设

（1）本节讨论的交通工具均为地面道路交通工具，不考虑地铁、轨道交通和城市专道轻轨；

（2）本节讨论的交通工具均为载客交通工具，不考虑货车；

（3）本节讨论的交通工具均为（深圳）市域内常用交通工具，不考虑外来车辆的影响；

（4）本节讨论的地面交通工具仅限于公交车、私家车、出租车、摩托车、电动车五种类型；

（5）假设交通工具车型固定单一，搭载乘客均为质量均匀的乘客；

5.2.4.3 交通方式环境影响模型构建

（1）人均能源消耗分量（CTA）

$$CTAi = \frac{Ei * Pi}{Qi} \quad (\text{单位：元每人})$$

Ei 为第 i 种交通工具的百公里能源耗用量的平均值；

Pi 为耗用能源价格；

Qi 为该种交通工具平均载客量。

表 5-16 CTA 计算表

	耗用能源	Pi 能源价格	Ei	Qi	CTAi
公交车	柴油	5.29 元每升	29.41 升	50 人	3.111578
私家车	97#汽油	6.19 元每升	6.36 升	4 人	9.8421
出租车	93#汽油	5.72 元每升	6.36 升	4 人	9.0948
摩托车	90#汽油	5.31 元每升	2.5 升	3 人	4.425
电动车	电力	0.68 元每度	2.0 度	2 人	0.68

（2）人均尾气排放分量（CTB）

$$CTBi = \frac{\sum_{k=1}^n PBk * NBk}{Qi} \quad (\text{单位：元每人})$$

PBk:表示第 k 种污染物单位修复成本；

NBk:表示第 i 种交通工具第 k 种污染物的排放数量；

Qi 为第 i 种交通工具平均载客量。

本文了解到交通工具排放的尾气主要成分是氮氧化物、一氧化碳、碳氢化物等，因此主要选取三种尾气成分考虑 PBk 指标。

表 5-17 PBk 查询表

污染物	PBk
氮氧化物	0.37
一氧化碳	0.35
碳氢化物	0.34

表 5-18 NBk 查询表

	氮氧化物	一氧化碳	碳氢化物
公交车	827.16 克	413.58 克	126.83 克
私家车	183.87 克	87.14 克	43.35 克
出租车	153.34 克	80.17 克	38.95 克
摩托车	81.16 克	39.97 克	11.11 克
电动车	—	—	—

表 5-19 CTB 计算表

	氮氧化物	一氧化碳	碳氢化物	Qi	CTBi
公交车	306.0492	144.7530	43.1222	50	9.878
私家车	68.0319	30.4990	14.7390	4	28.317
出租车	56.7358	28.0595	13.2430	4	24.510
摩托车	30.0292	13.9895	3.7774	3	15.932
电动车	—	—	—	2	0

(3) 噪声污染分量 (CTC)

$$CTCi = \frac{DBi \cdot ad}{Qi} \quad (\text{单位: 元每人})$$

DBi 为第 i 种交通工具的一般噪音指数 (单位: 分贝);

ad 为噪音成本转换常数, 假设为 1;

Qi: 表示第 i 种交通工具的平均载客数量;

表 5-20 CTC 计算表

	DBi	Qi	CTCi
公交车	100	50	2
私家车	60	4	15
出租车	75	4	18.75
摩托车	95	3	31.67
电动车	52	2	26

(4) 交通方式各环境影响因子汇总

表 5-21 交通工具环境影响模型指标汇总表

	CTA	CTB	CTC
公交车	3.111578	9.878	2
私家车	9.8421	28.317	15
出租车	9.0948	24.510	18.75

摩托车	4.425	15.932	31.67
电动车	0.68	0	26

5.2.5 交通方式城市贡献率模型的求解

交通工方式城市贡献率评定指标体系

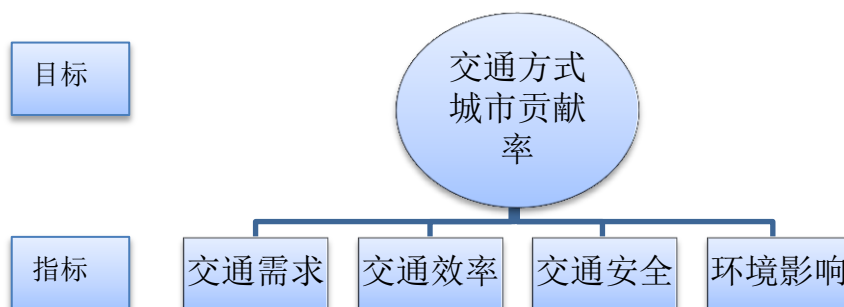


图 5-5 交通方式城市贡献率评价指标体系

5.2.5.1 模型的建立与计算

本文中依据主成分分析法确定了影响交通工具社会贡献率的四个指标：交通方式分担率、交通方式综合效率、交通方式安全系数、交通方式污染补偿成本，且已在前文中给出相应模型和算法。现将通过数据分析出的这四个指标转化为交通方式城市贡献率 C 这一个指标，设待评估对象集为 $Q(R1, R2, \dots, Rn)$ ，以 A_i 为下图中的指标 $X_i (X_1, X_2, X_3, X_4)$ 的权重，在这里权重是针对贡献率而言，在整体评价中相对重要的程度，目的是从若干个评价指标中分出轻重来，一组评价指标体系相对应的权重成了权重体系： X_{ij} 为第 j 评估对象对应于指标 X_i 值的功效系数值 ($i=1,2,3,4; j=1,2, \dots, n$)。则可以算出所选主要机动车道交通方式城市贡献率。

权重的求解采用层次分析法，层次分析是一种广泛应用于方案评价的方法，很多研究用之来分析指标及指标权重的变化对评价结果的影响，从而在评价方法稳定性判断、政策模拟、权重赋值优化、指标选取等领域发挥重要作用。

根据图 5-5 中设计的贡献率评价指标体系，来确定因素集。目标层为交通工具贡献率，指标层即为包含交通需求、交通效率、安全系数、环境影响四个贡献率评价的一级指标。

运用层次分析法中判断矩阵的间接给出方法，令需求子账户为 $A1$ 、效率子账户为 $A2$ 、安全子账户为 $A3$ 、环保子账户为 $A4$ 。

用三标度 (0, 1, 2,) 数值来判断同一层次上的各元素的重要关系，即若甲元素比乙元素重要，则用 2 表示，若甲元素和乙元素同样重要，则用 1 来表示，若甲元素没有乙元素重要，则用 0 表示^[8]。受到马斯洛需求理论的启发按生理需求、安全需求、效率需求、环保需求重要性先后排序，然后选取其中某两个元素给出所谓基点重要程度的标度，可建立四个子账户的三标度比较矩阵如下表所示。

表 5-22 四个指标的三标度比较矩阵

	$A1$	$A2$	$A3$	$A4$	r
--	------	------	------	------	-----

<i>A1</i>	1	2	2	2	7
<i>A2</i>	0	1	0	2	3
<i>A3</i>	0	2	1	2	5
<i>A4</i>	0	0	0	1	1

以此基点为依据, 利用下列数学变换式将三标度比较矩阵转换成间接判断矩阵。

$$b_{ij} = \begin{cases} \frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} (b_m - 1) + 1 & r_i - r_j \geq 0 \\ 1 / \left[\frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}} (b_m - 1) + 1 \right] & r_i - r_j < 0 \end{cases}$$

式中: $r_i = \sum_{j=1}^n c_{ij}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为各元素的重要性程度排序指数;

r_{\max} 表示最大的排序指数;

r_{\min} 表示最小的排序指数;

$b_m (> 1)$ 为基点的相对重要性程度。

转换成间接判断矩阵如下表所示:

表 5-23 四指标的三标度判断矩阵

<i>E</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>A3</i>	<i>A4</i>
<i>A1</i>	1	5	3	7
<i>A2</i>	1/5	1	1/3	3
<i>A3</i>	1/3	3	1	5
<i>A4</i>	1/7	1/3	1/5	1

通过 MATLAB 进行一致性检验 (见附录) 得 $CI=0.043 < 0.1$, 则可证明上述判断矩阵合理。

再根据判断矩阵运用 MATLAB 求解, 得四个指标权重如下:

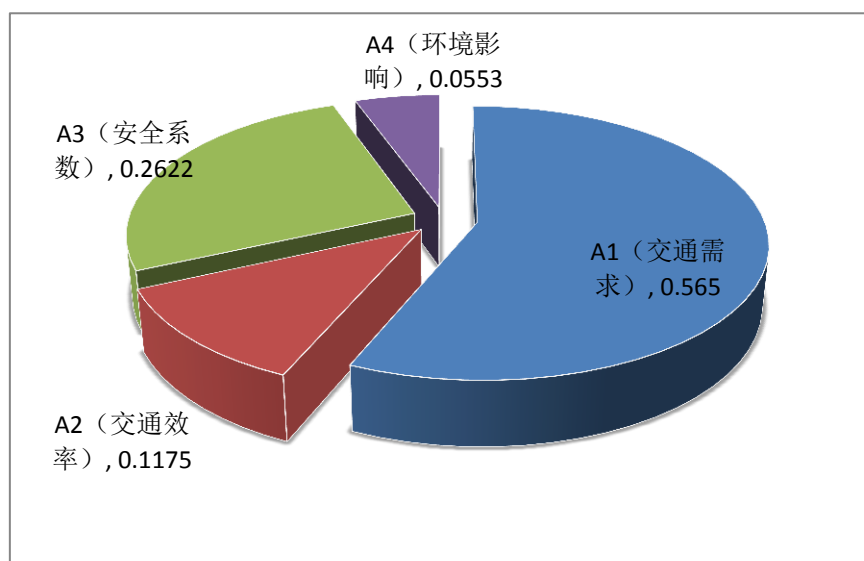


图 5-6 四指标换算过后的权重图

表 5-24 交通方式城市贡献率综合评价体系

指标		权重	指标值	功效系数
交通需求		0.565	0.4~0.5	1
			0.3~0.4	0.8
			0.2~0.3	0.5
			0.1~0.2	0.3
			0.05~0.1	0.2
			0~0.05	0.1
交通效率	a) 经济效率	0.1175	10~15	1
			5~10	0.8
			1~5	0.6
			0.2~0.5	0.3
			0~0.2	0.1
	b) 运输效率		>10	1
			1~10	0.7
			0.1~1.0	0.5
			0.08~0.1	0.4
			0.05~0.08	0.2
			0~0.05	0.1
			c) 能源使用效率	0~1
	1~3			0.8
	3~6			0.5
	6~9			0.2
	交通安全		0.2622	0~5
5~10				0.5

			10~20	0.2
			20~40	0.1
			40~80	0.05
			>80	0.01
交通环境 影响	a) CTA	0.0553	0~1	1
			1~3.5	0.7
			3.5~6	0.5
			6~9	0.3
			9.5~10	0.1
	b) CTB		0~5	1
			5~15	0.6
			15~20	0.4
			20~25	0.3
			25~30	0.1
	c) CTC		0~5	1
			5~20	0.75
			20~25	0.5
			25~35	0.3
35~40		0.2		

因本模型仅考虑机动车道上的主要交通工具方式，即摩托车、电动车、私家车、公交车、出租车，故在综合模型的建立中对各个指标的分析 and 计算可以得出下表：

表 5-25 各个指标的分析

功效系数	摩托车	电动车	私家车	公交车	出租车	权重
A1：交通需求	0.1	0.1	1	0.8	0.2	0.565
经济效率	0.1	0.3	0.6	0.3	1	
运输效率	0.1	0.2	0.5	1	0.5	
能源使用效率	0.5	1	0.2	0.8	0.2	
A2：交通效率	0.16	0.37	0.40	0.64	0.47	0.1175
A3：交通安全	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1	0.2622
CTA	0.5	1	0.1	0.7	0.1	
CTB	0.4	1	0.1	0.6	0.3	
CTC	0.2	0.3	0.75	1	0.75	
A4：环境影响	0.35	0.70	0.17	0.75	0.29	0.0533

计算得出机动车道主要交通工具的城市贡献率 C：

表 5-26 不同交通工具的城市贡献率 C

	摩托车	电动车	私家车	公交车	出租车
城市贡献率 C	0.096	0.140	0.647	0.593	0.210

画出城市贡献率百分比饼状图来更直观的分析比较，如下图：

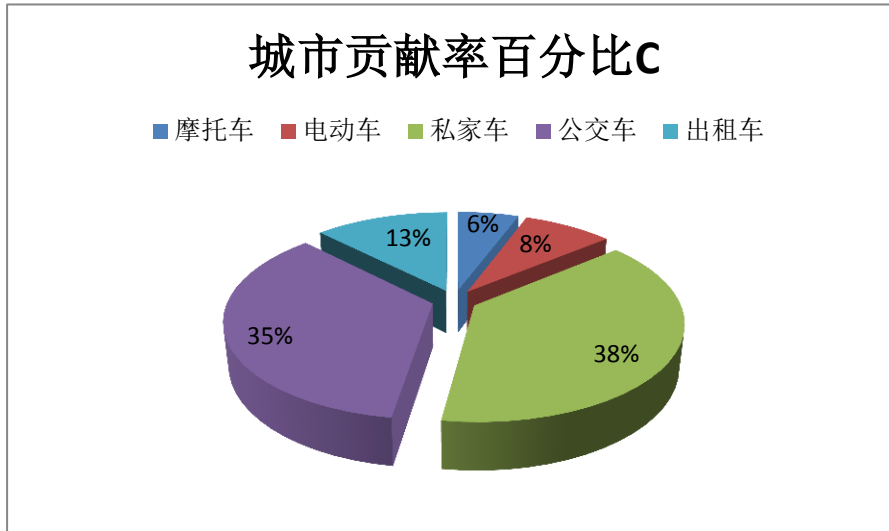


图 5-7 城市贡献率百分比饼状图

5.2.5.2 结果分析

通过上述结果可以看到，在公交车、私家车、出租车、摩托车、电动车五种交通工具中，私家车和公交车对于城市公共交通的整体贡献率最高，而摩托车的贡献率只有 6% 左右。因此深圳市政府颁布“禁摩限电”的政策是必要的、科学的、正确的。

随着人们生活水平的提高，越来越多的人开始偏好私家车出行，小汽车需求量的比重在迅速增长，而深圳作为中国改革开放的窗口，其城市公共交通设施日益完善，因此市民选择公共交通出行的比重也在逐渐增加，公共汽车需求比例呈上升趋势。并且数据显示摩托车和三轮车的需求量则呈下降趋势，而且下降速度较快，目前的摩托车的交通需求率处于低水平状态。

从交通效率来看，公交车由于具有较大的运载能力和载客数量，因此公交车的交通效率远高于仅仅搭载两三人的摩托车和电动车。摩托车和电动车的交通效率低下必然导致其走向被禁止和淘汰的结果。

摩托车和电动车公共安全事故频发，交通事故人口死亡率较高，极大地威胁着驾驶者和行人的行驶安全，对于深圳这种人口密集的大都市而言，道路安全更是一个不可小觑的事情。因此，“禁摩限电”措施在深圳推行是十分有必要的。

摩托车是燃烧化石燃料的交通工具，其排放的尾气会对环境产生极大的破坏。由于摩托车载客数量少，人均耗用能源成本大，人均环境修复成本高，因此，摩托车对于环保的极大危害导致其必须被禁止。

综上所述，摩托车在交通需求、交通效率、安全、环保等四个方面都表现不好，深圳市政府推行“禁摩限电”的政策是必要、科学、正确的。

5.3 可行性方案

深圳 90% 的道路不设非机动车道，摩托车、电动车、汽车共用一条车道，道路交通资源是有限的，供需关系紧张。由模型一得到深圳市道路车辆设计承载量为 3347144 当量数，而全市实际车辆承载量为 4183585 当量数，实际车辆远大于道路的承载能力，因此交通供给已经无法满足日益增长的交通需求。在治理交通

拥堵方面,有一个著名的理论:当斯定律。即如果政府对城市交通缺乏有效管理,道路供给增长再快,也赶不上人们的交通需求。美国上世纪六十年代,该定律已经得到了很好的验证:无论如何大量兴建道路,到最后却发现都满足不了人们的出行需要。^[1]因此,政府应该对一个城市进行交通需求管理。面对交通拥堵、交通事故频发、环境恶化、能源紧缺等一系列严重的社会问题,政府需要控制需求,限制机动车数量。

在各种机动车中,摩托车、电动车的城市贡献率最低,在交通需求、交通效率、安全、环境影响等方面都远远比不上其他交通方式。而且摩托车、电动三轮车存在在市中心聚集非法拉客违法行为,对交通秩序和交通安全有很大的负面影响,因此我们必须控制摩托车和电动车的使用。

我们对此提出一个“禁摩限电”方案:由于摩托车存在严重安全隐患、破坏交通秩序、污染严重等原因,禁止摩托车上路和停止发放摩托车牌照。就电动车来说,因为目前电动三轮车属于违规改装的机动车,以运营载客为主或以送货载物为目的,占体积大,影响正常车辆的行驶,并且行驶速度、排放等指标没有达到国家规定的标准,因此禁止非法拼装、改装等违规电动三轮车上路行驶、停止发放这类电动三轮车的牌照。对于电动自行车,进行限速管理,限制电动自行车行驶速度不能超过 20km/h。实行源头管理,人为加大摩托车、电动车拥有与出行成本,实现摩托车、电动车保有量和出行量的减少。

我们研究在实施“禁摩限电”方案后,需求、效率、安全、环境四大指标的数据变化(指标的求解方法同模型二)。

5.3.1 交通需求指标

假设“禁摩限电”后,摩托车、电动车的出行量减少 45%,小汽车的出行量增加 10%,根据之前各方式的出行量进行计算,得到禁摩限电后深圳各交通方式的分担率,见表 5-3-1-1。

表 5-27 禁摩限电后深圳各交通方式的分担率

自行车	公共汽车	摩托车、电动车	小汽车	步行	其他	合计
2.40%	17.31%	0.73%	23.23%	49.72%	6.61%	100.00%

依据之前的假设,即出租车占其他交通方式的 50%,不考虑步行和其他的交通方式,计算得到交通需求结构指标,见表 5-28。

表 5-28 禁摩限电后交通需求结构

自行车	公共汽车	摩托车、电动车	小汽车	出租车
P_B	P_P	P_M	P_C	P_T
0.05	0.37	0.02	0.49	0.07

5.3.2 交通效率指标

假设“禁摩限电”后,各交通方式的经济效率、运输效率、能源消耗系数均不变,见表 5-29。

表 5-29 禁摩限电后交通方式效率指标

交通方式	轨道交通	公交车	出租车	自行车	摩托车	私家车	电动车
经济效率	0.25	0.5	14.58	0.33	0.15	4.25	0.24

运输效率	1000	1000	0.75	0.067	0.042	0.0925	0.06
能源消耗系数	0	1	7.8	0	5.6	7.8	0.05

5.3.3 安全指标

假设“禁摩限电”后，摩托车、电动车的人口死亡率降低 70%，其他交通方式的死亡率不变，根据之前的数据计算得到禁摩限电后深圳各交通方式的安全系数，见表 5-30。

表 5-30 禁摩限电后各种交通工具的安全系数

公交车	出租车	私家车	摩托车、电动车	自行车
30.0947	30.0947	30.0947	26.83608	0.0237

5.3.4 环境指标

假设“禁摩限电”后，各交通方式对环境的影响不变，见表 5-31

表 5-31 交通工具环境影响模型指标汇总表

	公交车	私家车	出租车	摩托车	电动车
CTA	3.111578	9.8421	9.0948	4.425	0.68
CTB	9.878	28.317	24.51	15.932	0
CTC	2	15	18.75	31.67	26

5.3.5 “禁摩限电”后的效果分析

从“禁摩限电”前后的需求、效率、安全、环境四大指标的数据，从环境影响指标，我们可以发现摩托车的环境指标最差，对环境污染最严重。实施禁摩以后，摩托车数量骤减，大大降低了尾气排放量，对深圳环境将会有所改善。从安全指标我们也可以发现摩托车、电动车的安全性最差，实施“禁摩限电”后，交通事故总数将会大大减少，交通秩序得到改善。从交通出行需求结构指标来看，居民对摩托车和电动车的需求本身就不大，“禁摩限电”不会太大程度上影响人们的出行，不会造成社会动荡这一类的问题。从效率指标来看，摩托车、电动车的各个效率指标都小于私家车的效率，“禁摩限电”后，全交通方式的运输效率将会提升。总体上看，“禁摩限电”后，可以减轻交通压力、改善生存环境、减少能源消耗、降低交通事故率。

六、模型的评价和推广

6.1 道路通行能力模型评价

道路通行能力模型是作者为评估深圳市的机动车道路的交通承载能力所建立的模型。道路通行能力是指在特定交通条件、道路条件下及人为度量标准下单位时间内能通过的最大交通量。在交通规划过程中，通行能力参数在对做好的方案的评价中起到重要作用。

6.2 层次分析法评价

层次分析法将与决策相关的元素分解成目标、准则、方案等层次，在此基础上进行定性和定量分析。

为了得出限制交通工具的必要性，在本文中，本文建立了四个指标，分别为交通方式分担率、交通方式综合效率、交通方式安全系数、交通方式污染补偿成本。通过对这四个指标元素建立交通方式城市贡献率模型，利用层次分析法，比较不同交通方式的贡献指数，最后得出“禁摩限电”的合理依据。

6.3 层次分析法优点

把研究对象看作一个系统进行分析，按照分解、比较判断的综合思维方式，进行最后决策。层次分析法系统的思想在于不断割断各个因素对结果的影响，对于影响交通工具的四个因素的每一层权重设置最后都影响到结果。在每个层次中对每个因素的分析都是量化的，非常清晰明确。

6.4 层次分析法缺点

1. 层次分析法的作用是从备选方案中选择较优者，这也说明了这种方法缺乏创新性。其使得决策者只能从原有方案中选取最佳方案，而不能为决策者提供解决问题的新方案。

2. 定量数据较少，定性成分较多。比较和判断的过程较为粗糙不能用于精度要求高的决策问题。层次分析法只能算是一种定性和定量相结合的方法，不易令人信服。

3. 当指标过多时，数据统计量大，权重难以确定。如果指标增加，那就意味着要构建层次更深、数量更多、规模更庞大的判断矩阵，那么对于指标进行两两比较重要程度的过程容易出现困难。

6.5 层次分析法推广

层次分析法还可以运用于能源问题分析、地区经济发展方案比较等，尤其是投入产出分析、资源分配、方案选择及评比等方面。

七、参考文献

- [1]机动车保有量达 300 万辆城市治堵准备好了吗？深圳特区报，2014.9.23,B12
- [2]李冬梅，道路通行能力的计算方法，河南大学学报，2002
- [3]汽车的社会成本与大气污染治理，李春利，汽车安全与节能学报，2013
- [4]深圳市规划和国土资源委员会，深圳市步行和自行车交通系统规划及设计导则[R]，深圳市规划国土发展研究中心，2012
- [5]深圳市统计年鉴，2013，2014，2015
- [6]中国城市建设统计年鉴，2013
- [7]中国统计年鉴，2005-2014
- [8]左军，层次分析法中判断矩阵的间接给出法，系统工程，1988
- [9]陈家贤，汽车百公里油耗计算表，
http://wenku.baidu.com/link?url=rA6Y4Gf-ILOitQDDhCKO5TNAknhEnYv-N349xn9dycZXaK_KOvsGPzy4cGShKJdaAGAkxbpthSO5CNo0mL7-3jhrGYHWJeiY3D-oO80rPSu 2016.5.4
- [10]中国南方电网，深圳市电价价目表，
<http://sz.bendibao.com/cyfw/200764/fw24591.asp> 2016.5.4
- [11]易车网，深圳今日油价，

https://www.baidu.com/s?ie=utf-8&f=8&rsv_bp=1&rsv_idx=2&tn=baiduhome_pg&wd=%E6%B7%B1%E5%9C%B3%E6%B2%B9%E4%BB%B7&rsv_spt=1&oq=%E6%91%A9%E6%89%98%E8%BD%A6%E7%99%BE%E5%85%AC%E9%87%8C%E8%80%97%E6%B2%B9&rsv_pq=9239220000063b3e&rsv_t=c30bGg4OzKp%2Bg5nQxg4QeeWc5A91Vts7q6uqxeev0YgswgeUgB1BAnKiljZoFnPARqFy&rsv_enter=1&inputT=2392&rsv_sug3=24&rsv_sug1=13&rsv_sug7=100&rsv_sug2=0&rsv_sug4=3187&rsv_sug=1 2016.5.4

[12]南方日报, 深圳电动自行车 暴增至 400 万辆,

<http://news.163.com/15/0721/06/AV1F6DU700014AED.html>

附 录

MATLAB 层次分析法一致性检验与判断矩阵的求解

```
a=[ 1 5 3 7
    1/5 1 1/3 3
    1/3 3 1 5
    1/7 1/3 1/5 1 ];
n1=4;
ri=[0,0,0.58,0.90,1.12,1.24,1.32,1.41,1.45];
[x,y]=eig(a);
lamda=max(diag(y))
num=find(diag(y)==lamda);
w0=x(:,num)/sum(x(:,num))
cr0=(lamda-n1)/(n1-1)/ri(n1)
```