

上海市汽车燃油消耗因素的系统动力学研究

李哲丰, 严广乐

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 汽车燃油产生的尾气是造成空气污染的重要因素,有效控制汽车燃油消耗,可以降低空气污染水平.采用系统动力学的方法和 Vensim 仿真软件,并基于 2004—2014 年上海市城市交通的相关数据,构建出上海市汽车燃油消耗的系统动力学模型,利用控制变量法对道路管理水平、汽车限购政策触发条件以及报废率分别进行模拟仿真.分析仿真的结果后发现道路的管理水平与汽车燃油消耗成反比,把汽车限购政策的触发条件设置在 230~250 万辆之间,汽车报废率维持在 5.6%~5.8%,其产生的节能减排效果最为明显.最后基于现阶段上海市节能减排的要求,制定出上、中、下 3 套降低汽车燃油消耗的方案,为决策者的决策提供理论上的支持.

关键词: 系统动力学; 仿真; 汽车燃油消耗; 节能

中图分类号: U 491 **文献标志码:** A

Analysis on the Fuel Consumption of Automobile in Shanghai Based on System Dynamics

LI Zhefeng, YAN Guangle

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Fuel consumption of automobile is one of the factors that cause air pollution. It is very effective for our environment protection to control the fuel consumption of automobile. According to the theories and methods of system dynamics (SD) and with the help of Vensim software, a SD model for the fuel consumption of automobile in Shanghai was constructed based on the traffic data of Shanghai from 2004 to 2014. The road management level, automobile purchase policy and automobile scrap rate were simulated by the method of control variables. The results show that the road management level is inversely proportional to the fuel consumption of the car and it is most effective for reducing automobile fuel consumption to maintain the number of automobiles between 2.3 million and 2.5 million, and keep the scrap rate between 5.6% and 5.8%. Three schemes were formulated to reduce the fuel consumption of automobile based on the requirements of energy conservation and emission reduction in Shanghai, which provided a theoretical support for the policy makers.

Keywords: system dynamics; simulation; fuel consumption; energy conservation

收稿日期: 2016-02-28

基金项目: 上海市一流学科建设资助项目(S1201YLXK)

第一作者: 李哲丰(1991-),男,硕士研究生.研究方向:社会经济复杂系统. E-mail: peterleewell@sina.com

通信作者: 严广乐(1957-),男,教授.研究方向:社会经济系统、系统科学. E-mail: glyan2003@sina.cn

空气污染是人们当前面临的重大环境问题,汽车尾气的排放是引起这一问题的主要原因.相较于北方城市因燃煤和汽车尾气排放综合作用造成的空气污染,上海的空气污染主要来源于汽车的尾气排放^[1],而减少汽车尾气排放的最直接方法就是降低汽车的燃油消耗.当前减少汽车燃油消耗的研究主要集中在汽车发动机的设计改良^[2]、控制汽车保有量^[3]、道路拥挤程度对汽车燃油消耗的影响^[4]等方面.但影响汽车燃油消耗的因素是多方面的,单从一个角度去分析就与实际情况不相符,因此从宏观角度去研究影响汽车燃油消耗问题对于改善空气污染具有重要意义.系统动力学正是从宏观角度去探究解决问题的一个重要方法,所以本文将基于系统动力学的方法建立汽车燃油消耗相关模型,通过对模型的研究,给出影响汽车燃油消耗的相关因素,提出减少燃油消耗的相关措施,从而有效降低空气污染,并为相关的决策者提供理论依据.

1 国内外研究现状

国内对于汽车油耗的研究相较于国外起步较晚,主要是基于在静态环境下建立汽车燃油消耗的预测模型.赵志国等^[5]提出汽车的燃油消耗与环境、道路、驾驶水平有关;项乔军^[6]以发动机台架实验的数据为基础,建立了燃油消耗的预测模型;华智等^[7]根据道路在畅通条件下和拥堵条件下得到的数据,建立了燃油消耗的模型.

国外对于汽车油耗的研究多关注于汽车的硬件方面,主要是基于发动机改进和汽车外形的设计改进从而减少汽车的耗油量^[8].另一方面,由于20世纪发生过石油危机,在那段时间里,对于汽车耗油量的研究主要在于疏通交通、建设道路方面^[9].

从上述文献可知,这些研究大多数都是基于静态系统的,而静态系统对于现实社会显然是不适用的.社会是一个开放的大系统,时时刻刻都在发生着变化,因此,要得到一个可信度较高的汽车燃油消耗模型,就需要从宏观、动态的角度去研究,而系统动力学就十分符合这一标准.

2 建立系统动力学模型

2.1 相关理论的介绍

系统动力学(system dynamics, SD)是由美国麻省理工学院教授Forrester在20世纪60年代创

立的,该方法注重系统内部结构和反馈机制,擅长处理长周期、高阶次、非线性、多变量、多反馈的复杂系统问题,自创立以来已在多领域得到广泛运用^[10].汽车耗油量的分析牵扯的关系众多,属于复杂系统的范畴,因此利用系统动力学研究该问题是合适的.

2.2 系统分析

2.2.1 任务调研与目标分析

近年来不断加重的空气污染导致每年的秋冬季节雾霾频发.北方的空气污染问题主要源于冬季供暖燃煤排放以及汽车尾气排放.上海作为南方城市,由于没有冬季集中供暖的传统,因此本地燃煤排放不是造成空气污染的主要原因,而汽车尾气就成了空气污染的主要来源.控制汽车尾气排放能够极大地减少空气污染问题,而建立汽车燃油消耗模型的意义就在于降低汽车油耗可以显著降低汽车尾气排放.通过对模型的分析,本文将提出减少燃油消耗的可行方法,从而降低汽车尾气对空气造成的污染.

2.2.2 边界划分

系统动力学分析的方法是基于系统内部各要素之间的关系进行研究的,假设这个系统的外部环境对系统内部各个要素没有影响,并且内部环境对外部环境也没有影响.因此要确定一个系统的边界,对这个边界内的变量进行研究,排除外部变量^[11].

通过阅读相关文献并结合实际情况发现,汽车的燃油消耗不单单与汽车的保有量有关,还与下述变量有直接关系,于是本文把这些变量设置为研究对象:汽车的需求量、汽车的报废量、一辆汽车平均行驶的里程、一辆汽车在路上平均消耗的时间、道路的拥挤程度、道路的管理水平、汽车限购的政策条件等水平量.

2.3 因果关系和系统动力学模型

系统内部各要素之间的因果关系的相互作用影响着系统的变化,而影响系统变化的因素主要有:汽车保有量、年报废量、平均燃油消耗、平均行驶时间、拥挤度、管理水平、行驶里程、年需求量、年增长率和政策条件.其因果关系图如图1所示.

由图1所示的因果关系图可以发现,影响汽车燃油总量的因素主要有:平均燃油消耗、汽车保有量和行驶里程这3个要素,因此本文将会围绕着这3个变量对模型进行研究.本动力学模型将以2004年为仿真的元年,模型中的相关数据也采用2004年上海市的相关数据.

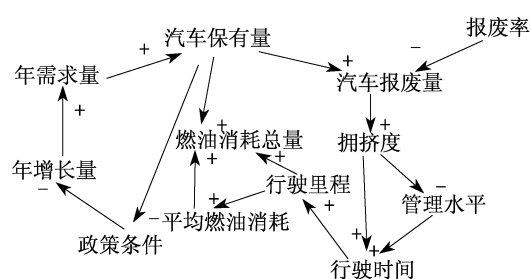


图1 燃油消耗因果图

Fig.1 Causality diagram of fuel consumption

通过对因果图的分析,可以获得对应的汽车燃油消耗系统动力学模型,如图2所示。

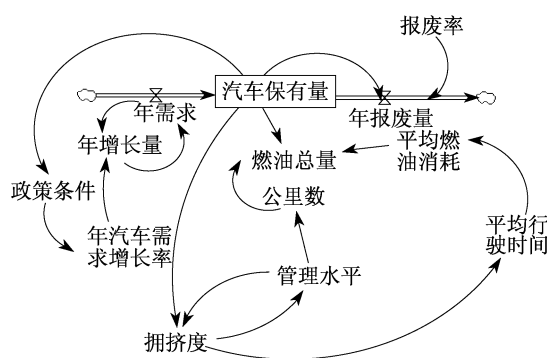


图2 汽车燃油消耗系统动力学模型

Fig.2 System dynamics flow diagram of fuel consumption

2.4 假设与模型方程

由于该模型是以上海市为例的,因此其中的一些变量就直接利用上海市的相关数据进行直接的输入,例如汽车的年增长率、汽车的年报废量、年需求量以及汽车保有量等,因此在后续的模型运行中,对于不同的城市,这些参数应当作出相应的变化。

参数设定:

a. 假定政策条件只与汽车的数量有关,当汽车的保有量超过事先界定的数量时,便会触发限购政策,对汽车的需求量和增长率进行控制,在本模型中,初定的限购数量为230万辆。

b. 本模型的仿真元年是2004年,因此在设定汽车保有量初始值时,根据上海市统计年鉴的统计显示,把汽车的初始保有量设置为202.85万辆,第一年的需求设置为2005年与2004年汽车保有量的差值。

c. 根据上海市统计年鉴,分析2004—2014年的上海市汽车保有量,可以发现这10年中,上海市汽车保有量的年增长率约为8%,因此在相关数据的使用中,汽车需求量的年增长率即为该数值。

d. 本文在决策时以减少燃油消耗为主要标准,

暂未考虑经济因素。

e. 巴黎气候大会在2015年12月份刚刚结束,大会通过的气候公约显示,到2050年全球的碳排放量要减少50%。因此本文在政策讨论时以在现有基础上减少50%的燃油消耗作为上等决策目标,35%作为中等决策目标,20%作为基本决策目标。

部分方程示例:

报废率 = 0.048; 平均行驶时间 = $24 \times \text{拥挤度} + 72$; 年需求量 = $\text{INTEG}(\text{年增长量}, 25)$; 汽车保有量 = $\text{INTEG}(+ \text{年需求量} - \text{年报废量}, 202.85)$; 政策条件 = $\text{IF THEN ELSE}(\text{汽车保有量} > 230, 1, 0)$; 拥挤度 = $\ln(\text{汽车保有量}/50)$ 。因模型方程较多故不一一举例,该模型考虑了影响汽车燃油消耗的主要因素,可动态演示目标变量的长期发展情况。

2.5 系统模型试验

由于无法获得上海市汽车燃油总量的真实数据,故本文选取上海市2004—2014年汽车保有量的数据对模型的可靠性进行检验。仿真的具体结果如表1所示,其中Step 1, Step 2和Step 3,分别代表仿真时选取的步长为一年、半年和一个季度。

表1 汽车保有量模型仿真结果表

Tab.1 Simulation results by the model of automobile capacity

万辆

年份	Step 1	Step 2	Step 3
2004	202.850	202.850	202.850
2005	212.003	212.276	212.417
2006	222.247	222.829	223.130
2007	233.653	234.585	235.068
2008	246.300	247.024	246.827
2009	257.863	258.403	257.578
2010	268.402	268.784	267.378
2011	277.978	278.221	276.281
2012	286.645	286.770	284.337
2013	295.446	295.432	292.527
2014	302.493	302.430	299.107

对模型选取不同步长(1;0.5;0.25)进行仿真检验,1;0.5;0.25分别代表仿真的时间量纲为一年、半年和一个季。从图3(见下页)中可知仿真的数据基本稳定,所建立的模型参数敏感性较弱,反映了该系统的复杂性,因此该模型基本可行,具备鲁棒性。

对比上海市2004—2014年汽车实际保有量与仿真的数据结果后可知,相对误差在可接受的范围内,模型预测的结果与实际结果基本相似,如表2所示(见下页),证明模型可行。

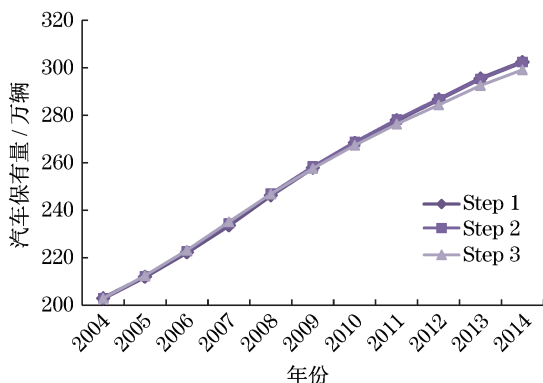


图3 模型稳定性分析

Fig.3 Stability analysis of the model

表2 预测数据与实际数据比较^[12]

Tab.2 Comparison between the results of simulation and reality

年份	实际汽车保有量/万辆	仿真汽车保有量/万辆	误差/%
2004	202.85	202.850	0.00
2005	221.74	212.003	-4.39
2006	238.13	222.247	-6.67
2007	253.60	233.653	-7.87
2008	261.50	246.300	-5.81
2009	285.00	257.863	-9.52
2010	309.70	268.402	-13.34
2011	329.17	277.978	-15.55
2012	260.90	286.645	9.87
2013	282.46	295.446	4.60
2014	304.45	302.493	-0.66

3 模型使用

3.1 控制汽车保有量政策

首先,对汽车的保有量进行控制,对于模型中的“政策条件”参数进行控制,改变触发“控制政策”的汽车数量.假设以2014年的汽车保有量作为触发条件,以20万辆汽车为差量进行仿真,得到相应的汽车燃油消耗量 Q ,得到图4的结果.

从图4可发现随着汽车限购的触发条件不断降低,燃油减排效果先变大后减小,其变化是非线性的,触发条件控制在230~250万辆区间,减排效果最明显.并且在仿真中发现控制的差值在10万辆以内,燃油消耗的下降量没有明显改变.

3.2 控制报废率政策

报废率的变化对燃油消耗有很大影响,特别地,年代越久的汽车单位距离的燃油消耗越大.数据显示上海市的汽车报废率为4.8%,故在此次仿真中

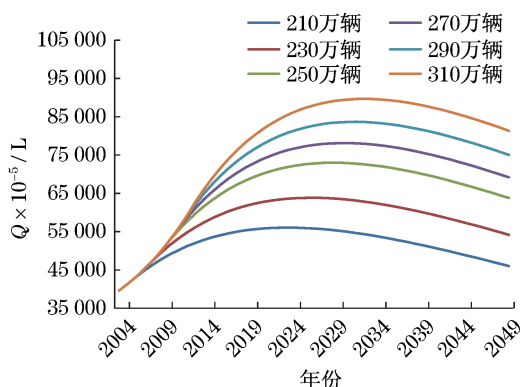


图4 不同限购条件触发数量下的燃油消耗

Fig.4 Fuel consumption under different automobile purchase policies

以4.8%为基础,以0.2%递增进行仿真,最终使报废率达到6%,汽车的限购政策维持在310万辆,大致为2014年的汽车保有量水平,得到图5数据.

从图5中分析发现报废率在5.2%~5.4%之间时汽车的燃油消耗不降反升,因此这个数值的报废率是不合理的,并且随着报废率的上升,燃油消耗降低的数量越不明显.

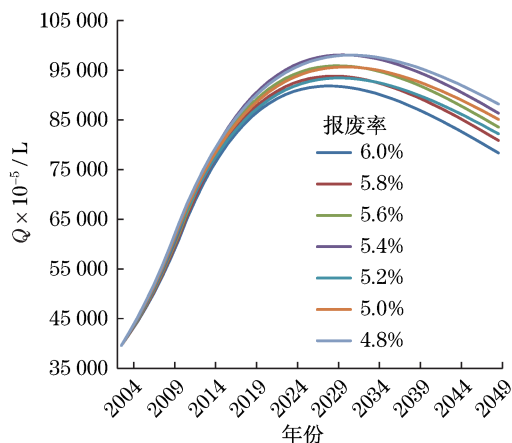


图5 不同报废率条件下的燃油消耗

Fig.5 Fuel consumption under different scrap rates

3.3 控制拥挤度

加强道路疏通管理,建设更多道路也是减少汽车尾气排放的一个重要措施,保持汽车限购触发量为310万辆,报废率为4.8%进行仿真,得到图6的结果.

从图6分析可以看出随着拥挤度的降低,汽车燃油消耗的降低效果明显,越通畅的道路对于降低汽车燃油消耗的效果越明显.

3.4 政策分析

在现有条件下,到2050年上海的汽车燃油消耗为 $74\,752.6 \times 10^5$ L,那么按照上等、中等和基本政策所需要的燃油消耗量分别为 $37\,376.3 \times 10^5$ L,

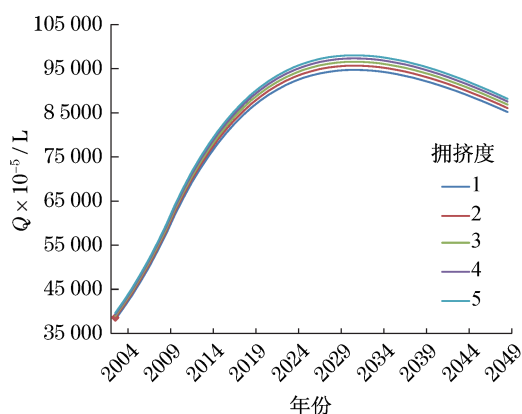


图6 不同拥挤度情况下的燃油消耗

Fig.6 Fuel consumption under different road management levels

48 589.19 $\times 10^5$ L, 59 802.08 $\times 10^5$ L, 对所需的目标值分别进行仿真。

为了减少燃油消耗量 50%, 在本文叙述的数据条件下, 得到 2050 年最低的燃油消耗量为 45 309.9 $\times 10^5$ L. 由于现有的道路通畅程度和控制汽车购买的政策条件已经不太容易修改, 因此唯一的办法就是提高汽车的报废率. 但通过不断改变报废率的数值, 仍然无法达到降低燃油消耗 50% 的目标, 可见这样的一个目标就现有的技术条件和道路管理水平是难以实现的。

接着对减少燃油消耗量 35% 进行仿真, 把汽车限购的触发条件设置在 220 万辆, 报废率设置为 6%, 道路管理水平设置为 $\ln(\text{汽车保有量}/35)$ 的情况下可以实现这样一个目标, 从仿真的结果来看燃油的消耗将在 2033 年达到峰值, 随后逐年降低, 并且在 2050 年没有再度增长的趋势。

最后对减少燃油消耗量 20% 进行仿真, 把汽车限购触发条件设置为 250 万辆, 报废率设置为 5.8%, 道路管理水平设置为 $\ln(\text{汽车保有量}/35)$ 的情况下可以实现这样一个目标, 燃油消耗的峰值仍然在 2033 年, 随后逐年降低, 并且在 2050 年没有再度增长的趋势。

从上述的政策仿真来看, 2033 年上海的燃油消耗值将达到峰值, 随之而来的污染问题也将达到最大, 为了平稳度过这个峰值, 加强管控, 提高道路管理水平尤为关键, 而控制汽车限购的触发条件则不利于汽车工业的发展, 应该慎重考虑。

4 结束语

本文通过建立汽车燃油消耗模型, 分析影响汽

车燃油消耗的各个因素, 把这些因素设为变量, 赋予不同的值就可以发现各因素对于减少燃油消耗作用的大小, 选择效果最明显的因素对其进行优化, 有利于减少汽车燃油消耗. 汽车尾气的排放作为上海空气污染的重要因素, 此模型的提出对于从源头上治理空气污染问题具有实际意义. 同时, 上述 3 项措施实施的经济效益本文暂时没有涉及, 在今后的实际实施中, 可以根据相关的条件, 得到一个经济效益最高的方案。

参考文献:

- [1] 梁朝晖. 上海市碳排放的历史特征与远期趋势分析[J]. 上海经济研究, 2009(7): 79-87.
- [2] 陈正江. 汽车动力传动系统优化设计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [3] 樊洁, 严广乐. 基于系统动力学的北京市私家车总量仿真与控制[J]. 公路交通科技, 2009, 26(12): 120-125.
- [4] 杜春燕, 周溪召, 智路平. 基于系统动力学的交叉口通行能力测算模型的仿真与分析[J]. 上海理工大学学报, 2014, 36(5): 449-455.
- [5] 赵志国, 王生昌. 浅析影响汽车燃油消耗的外界因素[J]. 物流技术与应用(货运车辆), 2008(2): 52-54.
- [6] 项乔君. 城市交通系统汽车燃油消耗研究[D]. 南京: 东南大学, 2000.
- [7] 华智, 李朝阳. 城市交通系统汽车燃油消耗宏观预测方法——以苏州为例[J]. 交通运输工程与信息学报, 2009, 7(4): 102-108.
- [8] DELORME A, VIJAYAGOPAL R, KARBOWSKI D, et al. Impact of advanced technologies on medium-duty trucks fuel efficiency[R]. New York: SAE International, 2010.
- [9] Committee to assess fuel economy technologies for medium and heavy-duty vehicles, Board on energy and environmental systems, National research council, et al. Technologies and approaches to reducing the fuel consumption of medium-and heavy-duty vehicles[M]. Washington: The National Academies Press, 2010.
- [10] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2009.
- [11] 陈成鲜, 严广乐. 我国水资源可持续发展系统动力学模型研究[J]. 上海理工大学学报, 2000, 22(2): 154-159.
- [12] 王建平, 朱章海. 上海统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.

(编辑: 丁红艺)