

汽车先进技术论坛丛书

QICHE XIANJIN JISHU LUNTAN CONGSHU

汽车尾气排放 分析及治理技术



门玉琢 夏犇 于海波 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

汽车先进技术论坛丛书

汽车尾气排放分析 及治理技术

门玉琢 夏 韩 于海波 著

机械工业出版社

本书针对汽车尾气排放控制与净化的问题,研究汽车尾气对霾形成的影响及其排放、扩散和迁移的时空动态特性。书中从汽车实际道路尾气排放测试入手,尝试建立单车排放模型。在此基础上,本书基于大型真菌富集机理,利用仿生技术,研究了控制尾气排放体积与浓度的时空动态分布,建立了汽车尾气净化系统,为交通管控提供优化方法,进而减少汽车尾气排放。

本书适合作为从事汽车尾气排放、城市大气环境等相关方面研究的人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车尾气排放分析及治理技术/门玉琢,夏韩,于海波著. —北京:机械工业出版社,2017.4

(汽车先进技术论坛丛书)

ISBN 978-7-111-56685-4

I. ①汽… II. ①门…②夏…③于… III. ①汽车排气污染—污染防治—研究 IV. ①X734.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 086838 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:赵海青 责任编辑:赵海青

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:路恩中

责任印制:李 昂

三河市国英印务有限公司印刷

2017 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·8.75 印张·143 千字

0 001—1 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-56685-4

定价:39.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

前言

汽车保有量的增加,是促使城市环境日益恶化的原因之一。在我国的一些大城市,汽车尾气排放在大气污染中所占的比重越来越大,雾霾越来越严重,为减少大气污染,控制汽车排放状况已成当务之急。而目前我国城市配套设施建设还相对落后,交通管理和控制措施尚不到位,交通的供需矛盾使汽车运行工况恶化,加重了排放污染。通过优化交通管控措施来改善车辆排放的方法在当前不改变道路交通设施的大条件下具有得天独厚的优点。该方法主要通过研究道路交通流中车辆的排放特点和影响车辆排放性能的制约因素,提供合理的交通管控措施,寻求交通运输的高效化和环保效益,其技术关键是交通流微观排放模型的研究和尾气排放体积与浓度的时空动态分布研究。

本书针对汽车尾气排放控制与净化的问题,研究汽车尾气对霾形成的影响及其排放、扩散和迁移的时空动态特性,分析了道路排放多重影响因素,搭建了车载排放测试系统,进行了城市实际道路典型车辆的车载排放测试,基于测试数据分析了影响道路排放的各种因素,尝试建立了单车排放模型。这些模型可方便、准确地预测城市道路交通流中车辆排放,亦可嵌入微观仿真软件,准确预测路段排放状况,优化交通管控措施,能对具体路段排放控制起到积极作用并可对智能交通系统进行评价。在此基础上,书中基于大型真菌富集机理,利用仿生技术,研究了控制尾气排放体积与浓度的时空动态分布,搭建了汽车尾气净化系统,为交通管控提供优化方案,进而减少汽车尾气排放。

本书由门玉琢、夏韡、于海波著。其中,第2、5、6章由门玉琢著,第3、4章由夏韡著,第1、7章由于海波著。

由于水平有限,书中错误之处难免,恳请广大读者批评指正。

著者

作者简介

门玉琢，工学博士。2011 年就职于长春工程学院机电学院，现任科研副院长，教授。长期坚持科学精神，潜心教学科研一线。先后获得吉林省拔尖创新人才、吉林省高校新世纪科学技术优秀人才、吉林省高校科研春苗人才等荣誉称号。



先后主持国家级、省级项目 10 余项，其中，主持国家自然科学基金项目 2 项，主持省发改委项目 1 项，主持吉林省科技厅项目 1 项，主持省教育厅项目 2 项，主持省社科项目 1 项；作为主要完成人完成国家自然科学基金项目 1 项、国家科技支撑计划项目 1 项、省科技厅项目 3 项、省教育厅项目 2 项。

作为第一完成人获吉林省科技进步三等奖 1 项、吉林省自然科学学术成果二等奖 3 项，作为主要完成人获吉林省科技进步二等奖 1 项、吉林省科技进步三等奖 1 项、长春市科技进步一等奖 1 项。

被聘为国家二级创新方法工程师、国家一级创新方法培训师，作为创新导师获第二届和第三届全国创新方法大赛二等奖各 1 项。

近 5 年发表学术论文近 50 篇，其中 EI、SCI 检索 31 篇；于人民交通出版社出版学术专著 1 部、教材 1 部；以第一发明人授权专利 7 项。

夏韩，工学硕士。现任职于人民交通出版社股份有限公司，副编审。

于海波，工学博士。1998 年就职于中国第一汽车股份有限公司技术中心。

目 录

前言

作者简介

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 PM2.5 研究	3
1.2.2 尾气净化研究	5
1.2.3 尾气排放空气动力学研究	6
1.3 技术路线	7
第 2 章 汽车尾气对霾的形成研究	9
2.1 霾源解析	9
2.1.1 雾霾成因	9
2.1.2 PM2.5	10
2.2 汽车尾气污染物	12
2.2.1 尾气污染物主要成分及危害	12
2.2.2 影响尾气污染物的主要因素	12
2.3 尾气对霾的形成与贡献度分析	13
2.4 PM2.5 形成的动态过程	13
2.5 本章小结	15
第 3 章 城市道路车载排放试验及数据分析与处理	16
3.1 排放模型研究现状及发展趋势	16
3.1.1 排放测量方法	16
3.1.2 排放模型分类	18
3.1.3 国外排放模型发展状况	19
3.1.4 国内排放模型发展现状	23
3.1.5 排放模型发展趋势	24



3.2	车载排放实时测试系统构建	25
3.2.1	OEM-2100 便携式排放测量仪	25
3.2.2	尾气收集系统	27
3.2.3	发动机传感器组	29
3.2.4	车辆行驶状况监测系统	31
3.3	城市道路车载排放试验	33
3.3.1	道路排放试验方案设计	33
3.3.2	试验数据收集	34
3.3.3	试验数据预处理	37
3.3.4	试验数据计算和统计	41
3.4	轻型车排放率影响因素分析	42
3.4.1	行驶工况与排放率分析	42
3.4.2	不同时段排放状况比较	48
3.4.3	车速、加速度对排放率的影响分析	54
3.5	本章小结	59
第4章	轻型车排放率模型研究	60
4.1	排放率速度回归模型	60
4.2	典型工况下排放率模型	62
4.2.1	基于速度的巡航工况排放率模型	63
4.2.2	基于时间的怠速工况排放率模型	65
4.2.3	基于加速度的加速工况排放率模型	66
4.2.4	基于加速度的减速工况排放率模型	68
4.3	排放率速度加速度二元回归模型	70
4.4	神经网络排放率模型	73
4.5	模型比较及分析	78
4.6	本章小结	80
第5章	尾气排放时空动力学特性研究	81
5.1	尾气排放仿真试验理论	81
5.2	尾气排放仿真试验设计与优化	83
5.2.1	试验设计与优化理论	83
5.2.2	第一次试验优化设计	86

5.2.3	第二次试验优化设计	91
5.2.4	直接影响因素分析	95
第 6 章	尾气净化新技术	103
6.1	尾气净化技术国内外发展现状	103
6.1.1	国外进展	103
6.1.2	国内进展	107
6.2	仿生大型真菌富集机理的净化技术	111
6.2.1	大型真菌的富集机理	111
6.2.2	大型真菌富集特性的应用	112
6.2.3	大型真菌重金属富集研究亟待解决的问题	112
6.2.4	仿生净化技术方案	113
第 7 章	相关仿真软件应用案例	114
7.1	案例 1：汽车气动阻力计算 - Xflow 与 Star - CCM + 比较	114
7.2	案例 2：大桥墩与水流仿真计算	118
7.3	案例 3：基于 PIA _n O 的白车身轻量化多学科优化方法	121
参考文献		127

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

自 20 世纪 90 年代以来,我国汽车保有量迅速增加,平均年增长率达 15% 左右。据公安部交通管理局统计,截至 2015 年底,我国机动车保有量达 2.79 亿辆,其中传统能源汽车 1.72 亿辆,新能源汽车 58.32 万辆,而我国目前的机动车污染控制水平仅相当于发达国家 20 世纪 90 年代中后期的水平,大量机动车污染物集中在城市道路排放,使得一些大城市的空气质量恶化。环境保护部发布的《2015 年中国机动车污染防治年报》显示,我国机动车 2014 年排放污染物 4500 多万 t,已成为我国空气污染的重要来源。该年报还显示,高排放的“黄标车”目前仍占机动车总量的 6.8%,贡献了超过 45% 的氮氧化物、一氧化碳、碳氢化合物和 74.6% 的颗粒物,今后将加强机动车生产、使用、淘汰的全过程监管。

现如今我国面临诸如一些城市总体规划和交通规划不完善、交通综合运输体系不健全、交通运输结构不合理、路网结构不科学、道路交通设施匮乏、公民交通法制意识淡薄等问题。据此公安部发布了《关于实施全国城市道路交通管理“畅通工程”的意见》,拟充分发挥公安和城市建设部门的职能作用,以提高城市道路交通管理水平为中心,集中力量解决影响城市道路交通畅通的突出问题,加快城市道路交通管理工作科学化、法制化、规范化建设的步伐,要为城市经济发展和社会进步提供良好的道路交通环境。但是,由于传统的城市规划方法是单一的面向交通的规划,没有考虑交通发展对环境的影响,而且对交通规划和控制措施是否合理的评价方法还没有一个准确的量化标准,因此我国大部分城市的交通设施和城市道路网并不能满足出行和环境的需要,这就导致了环境的日益恶化。造成这种现象不仅仅是因为我国城市的交通设施和路网落后,汽车保有量的增加也是其重要因素。同国外大城市相比,我国城市的机动车拥有量并不很大,但污染状况却相当严重,主要有两个原因:我国机动车排放控制水平差,机动车单车排放因子很大;城市配套设施建设相对落后,交通



管理和控制措施不利，交通的供需矛盾使机动车运行工况恶化，加重了车辆的排放。我国现在是一方面建设更多的公路，另一方面应用智能交通系统（ITS）等先进技术改善交通状况、提高通行能力。准确地监测机动车排放和评估各种交通改善策略，特别是对 ITS 的评估，都是重要的任务，都需要准确的排放模型。而建立排放模型，要求排放数据能够反映在动态运动（加速、减速、巡航）中车辆与车辆间以及车辆与控制管理系统间的相互作用。要想在不大改变交通基础设施的情况下大幅度提高交通网络的运行效率，则需要运用先进的技术来改善交通控制和管理。基于此可从交通路网排放评价的角度来改善交通控制，即通过建立交通流排放模型的方法来评价道路交通环境，为交通整体规划和控制提供必要依据，建立交通环境评价分析系统来分析评价特定区域的交通流排放状况。这相比于只考虑单车对环境的影响更为全面和准确，且对交通控制和规划是否合理提供了一个可靠的评价依据。车辆排放是交通规划中道路设施建设需考虑的主要因素之一。随着 ITS 技术的不断应用，使得对于应用了 ITS 技术和未应用 ITS 技术的能源和排放测量的有效性评价变得重要，然而，至今还没有成熟的有效性评价方法。环境保护已成为 21 世纪围绕交通运输业的重要研究课题，是交通运输实现可持续发展的必然要求。因此从不同角度研究车辆排放的影响因素、排放模型及寻求治理交通环境的途径、方法已成为交通运输工程学科领域的重要研究内容。

目前，我国频繁出现强度强、持续时间长、发生范围广的雾霾天气，这样的情况，历年来罕有出现。空气中的悬浮颗粒物肉眼是看不见的，但它们能降低空气的能见度，导致雾霾天气的产生。空气中不同大小的颗粒物都能降低能见度，不过，与粗颗粒物相比，细颗粒物（PM_{2.5}）降低能见度的能力更强，是雾霾天气能见度降低的主要原因。中国环境监测总站对 2015 年试点城市雾霾监测结果显示，发生雾霾天气时，PM₁₀ 及 PM_{2.5} 浓度明显增加，而且细颗粒物与能见度呈明显负相关关系（细颗粒物多，则能见度低；细颗粒物少，则能见度高），这表明雾霾天气状况与颗粒物浓度密切相关，颗粒物浓度增加是除了气象条件以外，雾霾产生的重要因素之一。

随着汽车工业的迅速发展，汽车保有量和行驶里程数的增加，汽车尾气已经成为大气污染的主要污染源。汽车尾气引起的大气污染问题日趋严重，统计数据显示，一辆轿车一年排出的有害废气比自身重量大 3 倍。英国空气洁净和环境保护协会曾发表研究报告称，与交通事故遇难者相比，英国每年死于空气



污染的人要多出 10 倍。因此,有效地控制汽车尾气,治理大气污染,是全人类亟须解决的问题之一。研究表明,持续雾霾的集中爆发是汽车尾气、工业废气等 PM_{2.5} 微小颗粒长期污染积累的结果,其中汽车尾气是空气中 PM_{2.5} 的主要来源之一。最新的数据显示,雾霾颗粒中机动车尾气占 30% ~ 40%。

本书拟针对汽车尾气排放控制与净化的问题,研究汽车尾气对霾形成的影响及其排放、扩散和迁移的时空动态特性。在此基础上,基于大型真菌富集机理,利用仿生技术,控制尾气排放体积与浓度的时空动态分布,搭建汽车尾气净化系统,对于控制汽车尾气污染物排放,缓解并治理雾霾天气,都有十分重要的意义。

1.2 国内外研究现状

针对本书的研究内容和研究目的,从尾气净化研究和大型真菌的富集机理两个方面展开国内外研究现状的叙述。

1.2.1 PM_{2.5} 研究

国外许多国家对空气中颗粒物的研究工作开展得较早。美国对可吸入颗粒物的研究始于 20 世纪 80 年代初,美国国家环境保护局(EPA)于 1985 年将原颗粒物指示物总悬浮颗粒物(TSP)项目修改为 PM₁₀。美国环境保护局在 1997 年又提议修改美国国家大气质量标准,规定了 PM_{2.5} 的最高限值。加拿大、西班牙等欧美其他国家也在 PM_{2.5} 研究方面做了大量的工作。

中国的气溶胶细粒子研究方面起步较晚,近年来,随着国内对 PM_{2.5} 的研究工作越来越重视,关于 PM_{2.5} 的观测特征以及成分和来源分析的研究越来越多。刘辉等在北京城区清华大学和郊区密云水库开展大气颗粒物观测,采集了 PM_{2.5} 样品共 180 个,分析表明污染源排放(工业、机动车)为 PM_{2.5} 的主要来源。陶俊等在成都城区每天采集 PM_{2.5} 样品,然后对样品进行 8 种碳组分、水溶性有机碳、左旋葡聚糖及水溶性离子分析,初步探讨了碳气溶胶的来源,因子分析结果表明 PM_{2.5} 来源于生物质燃烧排放、燃煤排放与机动车排放。木拉提等分析北京和内蒙古阿拉善盟两地沙尘天气期间大气颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度的变化及其部分元素浓度的变化特征,研究发现,污染元素 Pb、As 容易在粒径较小的 PM_{2.5} 中聚集,并且主要受人为活动的影响。田芳等在天津市塘沽区布设 3 个采样点,共采集 12 个 PM_{2.5} 样品,测定其中 16 种优控 PAHs 的



含量,研究细微颗粒物 PM2.5 中 PAHs 的分布特征及来源,通过化合物之间的相对比值分析得出,市区点的 PAHs 污染主要源于汽车尾气、煤的燃烧、人为活动和工业污染,工业点的 PAHs 污染主要源于交通和燃煤的综合作用。何宗健等调查夏季南昌市大气颗粒物 PM10、PM2.5 的污染水平,在南昌市 5 个典型城市功能区采集了 80 个样品。分析表明,南昌市 PM10 和 PM2.5 污染很严重,在空间分布上,夏季 5 个采样点的污染情况基本为:交通干线 > 工业区 > 商业混合区 > 居住区 > 远郊区。王娟等利用气相色谱—质谱技术分析了秋季鄂尔多斯市居民区、工业区和清洁区 5 个采样点大气 PM2.5、PM10 中正构烷烃组分,通过与中国其他大中型城市对比发现,中国大部分城市市区大气 PM2.5、PM10 中正构烷烃主要来自于汽车尾气与人为污染排放。刘刚研究杭州市大气 PM2.5 中重金属和碳、氮、氢的污染状况得出,碳是杭州市大气 PM2.5 的重要组成部分,氮、氢分别主要以无机氮和有机氢的形式存在,Zn、Pb、Cu、Mn 是主要重金属污染源。赖森潮等调查广州市居民室内空气中 PM2.5 的污染特征并探讨其污染来源得出,室内污染源(烹饪、吸烟等),室外污染源(机动车排放)等对室内的 PM2.5 浓度水平的影响较大。黄鹂鸣等初步调查南京市空气中 PM10、PM2.5 的污染水平,结果表明,南京市 PM10、PM2.5 的污染很严重,而且对人体健康危害更大的 PM2.5 占颗粒物的大部分,主要来源于机动车排放。在环境保护工作中,加强对 PM2.5 的全面、系统监测,调整产业结构和布局,提高能源效率、发展洁净能源,防治机动车排气污染以及有利的政策保障,都能有效地控制和降低大气中的 PM2.5 浓度。

目前关于 PM2.5 所开展的数值模拟与动态分析工作还是比较少的。周丽运用统计分析和气象统计预报的方法,使用北京白石桥地区的污染物观测资料和同期北京地区的气象观测资料,对影响大气污染的气象因子进行了综合分析,并分别建立了气溶胶 PM2.5 粒子浓度与气体污染物、气象要素场的两类统计相关拟合模型。费建芳等利用多尺度空气质量模式系统 (Models - 3/CMAQ) 对北京及周边地区发生的一次大雾天气进行数值模拟,分析了大雾天气下 PM2.5 二次无机粒子的演变及其影响。

中国关于 PM2.5 的研究工作起步较晚,与欧美等发达国家差距较大,所开展的研究都是局部性的和试探性的,集中在北京、广州等少数大城市,严重缺乏系统性和连续性。所做的研究工作也主要集中在资料的统计分析、影响因素分析等,缺乏霾源解析研究,PM2.5 的动态形成过程分析,以及霾源形成



PM_{2.5} 的时间、空间、体积、浓度与环境关联的边界条件。因此,需要大力开展污染物形成、变化的机理、动态模拟等研究工作,为净化大气环境提供基础。

1.2.2 尾气净化研究

目前,发达国家主要是通过贵金属(Pt-Rh)三元催化剂解决汽车尾气对环境造成的污染。国内高档汽车配备的尾气净化贵金属催化剂均来自国外。全球汽车尾气净化催化剂生产商主要有丰田、巴斯夫、庄信万丰和优美科等。庄信万丰和巴斯夫公司在去除柴油发动机产生的有害尾气方面有较多的研发投入,包括稀薄燃烧或者天然气为燃料的柴油发动机的车辆,开发的催化剂组分包括氧化物、氢氧化物、碱土金属、镧系金属及稀土氧化物等,开发的分子筛包括离子交换的铜和离子交换的铂。巴斯夫公司为满足日益严格的排放法规,例如欧VI标准,开始提高三元催化转化器的催化活性和颗粒捕集功能,设计了一个或多个气体传感器和车载诊断排放处理系统,日本也在研发类似的NO_x排放监测系统。

我国控制汽车尾气污染的主要技术是在排气系统上安装催化转化装置,国内的学者和研究人员已经研究和正在研究的技术有贵金属催化技术、贵金属-非贵金属混合催化技术、纳米稀土材料催化技术、低温等离子体技术、超临界技术等汽车尾气净化处理技术。如:江苏威孚力达催化净化器有限责任公司自主研发的国III排放标准汽车尾气纳米稀土催化剂,成功在国内多种车型上通过了国III匹配试验,产品综合性能处于国内领先地位;中国科学技术大学研制的具有氧化和还原活性的催化剂,是以少量贵金属Pt,加入过渡金属氧化物及稀土化合物如CuO和La₂O₃为基本配方,对含铅汽油有很好的净化作用;中国科学院大连化学物理研究所研制的非贵金属蜂窝陶瓷催化剂,具有双层孔结构,改性的Al₂O₃作为催化剂载体,催化剂的活性是Fe的氧化物及由Co、Ni、Mn、Cu、Cr元素的氧化物和稀土Ce或含有Ce元素>35%的混合稀土元素的氧化物,该催化剂耐热稳定性好,氧化铝涂层不易脱落,即使在较高温度的使用条件下催化剂也具有较长的寿命。

催化技术是国内外公认的汽车尾气净化的主流技术,但催化技术存在着致命的弱点,如催化剂和汽车不容易匹配、贵金属催化剂价格昂贵、催化剂“中毒”不好解决、必须采用无铅汽油及空燃比要求非常精确等问题,已不能满足人们对汽车尾气排放的高标准要求。



随着技术迅速发展,汽车尾气净化技术已从昂贵的化学催化剂向催化活性高、专一高效的生物协同净化技术发展。如,大型真菌可用作重金属污染监测的指示物,灵芝可以作为生物指示剂,用来检测空气中的铯(Cs)污染,毛头鬼伞可作为环境中铅污染的指示物。同时,利用大型真菌体对重金属的富集和超富集能力进行协同仿生研究,开发出一种具备高效安全、满足复杂行车工况、净化彻底、无二次污染等优势的新产品,可弥补目前汽车尾气净化技术的不足。

1.2.3 尾气排放空气动力学研究

汽车尾气排放空气动力学特性研究一般与环境污染联合考虑,国内外都进行了大量的数值研究。

日本机械学会于20世纪70年代开发出APPS模式,APPS模式以城市峡谷型街道为研究对象,含有处理峡谷内汽车尾气浓度分布和处理道路交叉点周围浓度分布的子模式。风速场从动量守恒方程中除去压力项后,置换成涡度和气流函数求解,以得到的风速分布为基础进行污染物质的扩散计算。APPS-LDM是一个将道路周围处理为三维的模式,该模式将风速主流方向成分以及垂直成分作为高度的函数给出,再用差分法进行扩散计算。后来日本汽车研究所开发的3ARI-APPS模式是APPS-LDM的修改版,均为三维扩散模式。

美国国家环境保护局开发出ROADWAY模式。ROADWAY模式是由Eskridge等人开发的,该模式一般适用于高速路或城市开阔型道路,它采用有限差分方法对对流-扩散方程在梯度输送理论假设下的形式进行数值求解,计算比较简单,只是在扩散系数的确定方面,综合考虑了环境大气湍流、机动车运动时引起的湍流和 NO_x 的化学反应。

进入20世纪90年代,Okamoto等人发展了一个二维数值模式,包括风场子模式和扩散子模式两个部分,而后者采用了蒙特卡罗的粒子模拟方法。该模式用于垂直风向时情况较好,根据在东京三条繁华街道的模拟数值与实测数据的比较,模拟效果要优于APPS模式。而Park等人则采用时间分裂法,在不考虑化学反应的情况下对Kyongin地区秋季西南风盛行时的 SO_2 扩散问题进行了数值模拟求解。

Sini等人为了模拟城市天空范围内小尺度大气气流,根据近地层经典假设和湍流模型,建立了数值模式。该模式采用非一致二维网格。应用这个模式在连接无限长街道峡谷的情况下,对街道内和屋顶上大气层界面的污染物迁移和垂



直方向上的交换进行了研究。该研究不仅考虑了建筑物屋顶上表面层气流的影响,还考虑了街道内重复循环气流的结构影响。研究表明,街道的不均匀加热能较大地影响气流的传输和交换污染物的容量。

在国内,蒋维楣等人则是将湍流流动与扩散模拟相结合,进行了大量的模拟实验研究。尤其是对北京市一个居民小区建立了气象与污染扩散数值模式,该模式的控制方程组由连续方程、动量方程、状态方程、热力学方程和浓度方程五个方程组成,并采用 $k-\varepsilon$ 闭合方案,即在上述方程中加入了湍能和耗散率传输方程。王珏等人以梯度理论为基础,根据城市大气污染和扩散的特点,建立了一种城市汽车排气污染扩散模型。在该模型中考虑了道路的分布、道路中汽车的车流率、各种车型污染物的排放率以及逆温层的影响等气象条件因素,并利用此模型对上海市区的汽车排气大气污染情况进行了二维仿真。

从上述的分析可以看出,大量的研究工作集中在结合街道、交叉口等城市环境,建立尾气排放模型并进行数值模拟。但这些模型与尾气排放的实际情况始终存在较大差异,利用这些模型无法分析尾气在汽车后部区域内的扩散动态。针对目前的研究情况,主要缺乏考虑多变且复杂的影响尾气排放的环境因素,并对其进行参数研究。总之,对汽车尾气排放进行仿真分析,要真实地反映出汽车尾气排放的分布情况,需要采取不同于传统求解 NS 方程的基于网格的解决方法,这是研究汽车尾气排放动力学特性问题的一个发展方向。

1.3 技术路线

本书的技术路线如图 1-1 所示。

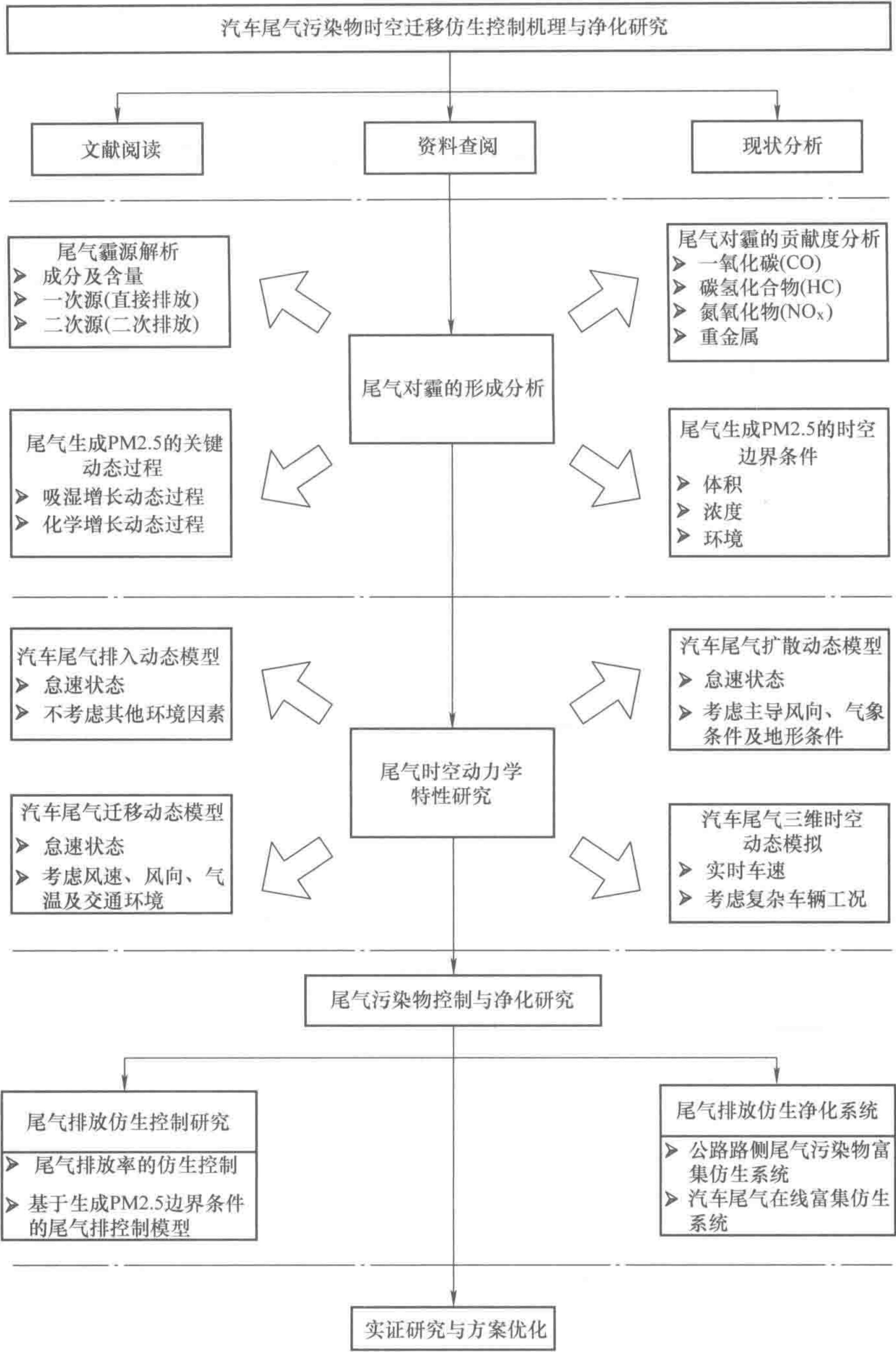
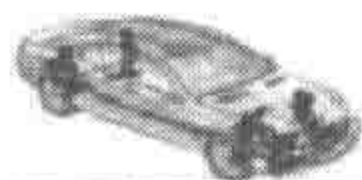


图 1-1 技术路线

第2章 汽车尾气对霾的形成研究

2.1 霾源解析

霾是由空气中的灰尘、硫酸、硝酸、有机碳氢化合物等粒子组成的。它能使大气浑浊并导致能见度恶化，当水平能见度小于 10000m 时，将这种非水成物组成的气溶胶系统造成的视程障碍称为霾（Haze）或灰霾（Dust-haze）。

雾霾主要由二氧化硫、氮氧化物和可吸入颗粒物这三项组成，它们与雾气结合在一起，让天空变得阴沉灰暗。颗粒物的英文缩写为 PM，细颗粒物（PM_{2.5}），是指直径小于等于 2.5μm 的污染物颗粒。这种颗粒物本身既是一种污染物，又是重金属、多环芳烃等有毒物质的载体。

城市有毒颗粒物主要来源是汽车尾气，图 2-1、图 2-2 为 2015 年北京环保局霾源解析结果。使用柴油的车辆是排放细颗粒物的“重犯”。使用汽油的小型车虽然排放的是气态污染物，比如氮氧化物等，但碰上雾天，也很容易转化为二次颗粒污染物，加重雾霾。

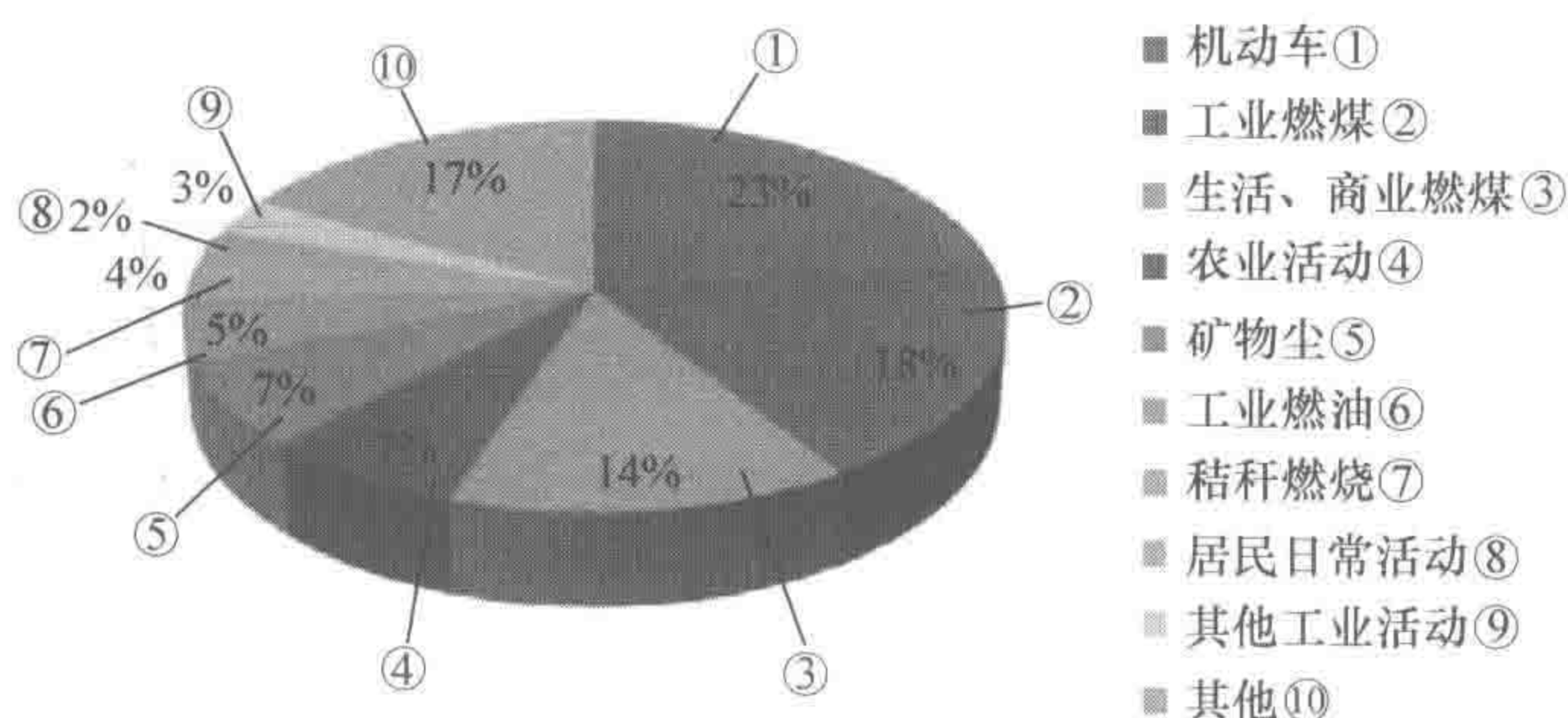


图 2-1 霾源解析

2.1.1 雾霾成因

一是水平方向静风现象的增多。随着城市建设的迅速发展，大楼越建越高，增大了地面摩擦系数，使风流经城区时明显减弱。静风现象增多，不利于大气