

H<sub>2</sub>

杨振中 著

# 氢燃料内燃机燃烧与 优化控制方法



科学出版社

# 氢燃料内燃机燃烧 与优化控制方法

杨振中 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是在总结国家自然科学基金等课题的研究进展和研究成果基础上,经作者多年整理完成的。本书系统讲述氢燃料内燃机与混合氢燃料内燃机的燃烧、排放特性及优化控制方法。全书共分6章,分别讲述氢能及氢燃料内燃机的技术水平,氢燃料内燃机的理论循环,氢燃料内燃机的双区燃烧模型,加氢混合燃料内燃机的燃烧与排放特性,氢燃料内燃机的混合气形成与燃烧,氢燃料内燃机燃烧过程的优化控制方法。

本书是国内第一本较为系统论述氢燃料内燃机的专著,主要供从事氢燃料内燃机、氢能动力应用、代用燃料气体发动机研究的博士、硕士研究生、高等学校相关专业的教师、相关科研院所和企业的有关科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

氢燃料内燃机燃烧与优化控制方法 / 杨振中著. —北京: 科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-035867-7

I. 氢… II. 杨… III. 氢燃料-内燃机-燃烧学 IV. TK407.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253175 号

责任编辑:姚庆爽 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 倩 / 封面设计:王 浩

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 203 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 前 言

能源和环境与人类的生存和发展密不可分。人类社会的发展对能源的依赖性日益增强,人类社会的前进对保护环境的期盼日益强烈。然而,能源紧张与环境恶化的脚步正在快步紧逼,留给人类的时间还有多久?人类还能够从容应对吗?在这场涉及全人类命运的赛跑中人类能够最终胜出吗?所幸能源和环境的重要性已经得到各国包括政界、学术界、企业界以及普通民众的广泛认同,人类已经为此付出了很大的努力,在一些领域也取得了长足的进步。然而,就总体而言,这些应对之策无论从它们的有效性与实用性,还是持续性与彻底性,均还难以令人从容乐观。为此,我们还需要继续付出更大的艰辛努力且希望取得巨大进步。

汽车为人类的发展与生活提供了巨大帮助的同时,也成为造成能源紧张与环境恶化的主要因素之一。汽车产量和保有量的迅速增加既是社会进步的表现以及人们生活的迫切需要,也对解决能源紧张与环境恶化问题提出了新的挑战。最近几年我国的汽车工业获得了快速发展,我国 2011 年汽车产销量双超 1840 万辆,再次刷新全球历史纪录。这使我们不得不在享受汽车带给我们生活便捷的同时,肩负起促进能源结构变革和降低大气污染的更多责任。

截至目前,在车辆动力能源利用多元化和清洁化方面的研究进展主要包含两个方面:一是采用新的动力单元;二是对传统内燃机的改造(重要内容是替代能源的研究)。前者包含对电动汽车、燃料电池汽车等开展研究,以混合动力作为折中和过渡;后者关于内燃机替代燃料方面,进行了天然气、液化石油气、二甲醚、氢等替代燃料的研究,或者以汽油-天然气双燃料、氢-汽油/柴油双燃料(或混合燃料)发动机作为折中和过渡。有些研究已经取得了令人欣慰的进展,但是,或是未能从根本上摆脱对化石燃料的依赖,或是大气排污问题解决的不够彻底。例如,目前热门的电动汽车由所谓的“清洁动力”驱动,其电能相当程度上依赖化石燃料(煤炭)提供;这种所谓的“清洁动力”没有从化石燃料中完全解放出来,只是排污地点的转移而非彻底消除。距离彻底解决车用能源短缺和车辆产生的大气排污问题的目标还很遥远。

氢资源丰富、来源多样,特别是具有永久再生性和所谓“零污染”的清洁性等特点。关于氢作为车用动力燃料的储存性、运输性和安全性等问题的研究也历时多年,规模化的储运也逐步向着可以实用的地步推进。特别是太阳能制氢描绘的蓝图可以使人们彻底摆脱地球中的能源困境。凡此种种,令人鼓舞。

氢作为内燃机的燃料具有良好的燃烧特性:氢燃料比所有化石燃料、化工燃料

和生物燃料的发热值都要高,仅低于核燃料,氢燃料的低热值是汽油的 2.7 倍;其点火能量约为汽油的 1/10,极易点燃,具有良好的启动性;其着火界限很宽,可实现稀薄燃烧;其火焰传播速度大约为汽油的 8 倍;氢的自燃温度较天然气和汽油都要高,有利于提高压缩比,提高氢内燃机的热效率等。

与燃料电池汽车相比,氢内燃机也有许多优点:例如,燃料电池的技术门槛高,近期实用化仍有相当的难度,而氢内燃机在现有内燃机的基础上加以改造与调整,可以利用现有内燃机的技术和积累、成熟的经验,技术实现容易;氢内燃机可以利用现有内燃机的基础、市场化模式、维修经验与渠道,符合人们的消费习惯,推广相对容易;燃料电池造价与运行费用昂贵,很难与氢燃料发动机的造价和运行费用相比拟。

氢作为内燃机的燃料既有需要探索的理论问题,又有需要攻克的技术难题。例如,进气管供氢的发动机容易出现回火、早燃等异常燃烧;虽然氢的扩散速度快,有利于与空气实现混合,但与汽油或柴油相比,在等能量时,氢气所占的体积大得多;氢气的密度与空气密度差距很大(类似于水喷入重金属汞中难以扩散),如何使氢气与空气形成优质混合气,改善氢发动机的动力性、经济性及有害气体排放;氢的密度很小,导致功率下降较多,尽管当量比增加可以使得氢发动机功率增加,但是这将导致发生回火、早燃等异常燃烧的趋势增加;虽然氢具有宽广的着火范围,稀薄燃烧有助于抑制早燃和回火,但会使功率下降与燃烧不稳定等。回火与早燃等异常燃烧机理及互相转化机制、探索形成优质氢空气混合气的途径等是需要解决的科学问题,而异常燃烧与功率下降是需要攻克的技术问题,氢燃料内燃机有关的优化控制理论、方法与技术是需要发展的关键问题。

大约在 20 世纪 80 年代中期,以天津大学的李厚生先生、浙江大学的李径定先生等为代表的国内一些大学的教师和研究机构的科技人员开始了用氢作为内燃机燃料(主要是含氢混合燃料发动机)的探索。他们为此开展了广泛的国际合作与交流,或是利用访问学者的机会,出国研究交流,引进国外先进研究方法与技术;或是邀请在氢燃料内燃机研究处于世界前沿的德国和日本的科学家来华讲学,甚至聘请他们担任兼职(特聘)教授,开展合作研究。例如,本领域的著名科学家日本武藏工业大学的古滨庄一(Furuhama)先生就曾在 20 世纪 90 年代担任浙江大学客座教授。以两位李先生为代表的一批人是国内开展这一领域研究的先驱,为日后国内开展本领域的研究工作奠定了基础。21 世纪以来,相继又有华北水利水电学院、西安交通大学、北京理工大学、清华大学、北京交通大学、北京工业大学等单位(包括与有关企业合作)开展了纯氢或加氢混合燃料发动机的研究工作,推动了国内关于氢燃料内燃机研究的进展。

20 世纪 90 年代后期,作者在浙江大学攻读博士学位期间,参加到浙江大学李径定先生研究团队关于氢内燃机的研究工作中,在此期间,有机会接触到当时处于

国际这一领域最前列的古滨庄一先生的研究工作,他的研究工作持续、纵深、涉及面宽,令人肃然起敬。他们的远见卓识使作者获得许多启迪和收获,大大开阔了作者的学术视野。这几年的学习生涯也培养了作者从事氢燃料发动机研究工作的兴趣。借此机会,首先要向他们表示由衷敬意。

作者有幸访问了日本武藏工业大学(Musashi Institute of Technology),进一步加深了对氢燃料内燃机研究的了解,赴日本国家宇宙航空实验室(National Aerospace Laboratory of Japan,现称为宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA))做博士后期间,接触到了氢作为航天燃料的研究工作。回到华北水利水电学院后,作者持续开展了氢燃料发动机的研究工作,并于2010年,在美国西弗吉尼亚大学(West Virginia University)进修期间,开展了氢柴油混合燃料发动机方面的研究工作。

国内关于氢燃料内燃机研究的著作较少,除20世纪80年代由苏联人B. И. 赫麦罗夫著、王震华译的一本7万字的《氢发动机》外,尚未发现关于氢内燃机的中文书籍。在研究期间,常常为查阅不到这方面的资料而苦恼。作者希望能够总结一下氢内燃机的研究工作,编写一本小册子,较为全面的介绍氢发动机的最新研究进展,总结氢发动机燃烧、排放特性、优化控制方法等,既方便读者查阅,又能使读者较为全面地了解氢发动机的研究情况,激发国内更多的单位和个人投入到氢内燃机的研究行列中来。

《氢燃料内燃机燃烧与优化控制方法》一书正是在这一时代与技术背景下撰写完成的。作者在书中较为全面地展示氢内燃机研究领域的多年进展与成果,希望能够全景式地介绍氢燃料发动机的理论循环,氢燃料发动机及含氢混合燃料发动机的混合气形成、燃烧与排放特性,氢燃料发动机的燃烧模型,氢燃料发动机燃烧过程的优化控制方法等。作者希望本书的出版能够为氢内燃机的发展做些微薄的贡献;希望能够对从事氢内燃机的研究人员有所帮助;也希望本书能有助于与国内同仁们共同推动氢内燃机的研究水平发展和技术进步。

本书是作者从事氢燃料内燃机15年研究工作的总结,作者感谢华北水利水电学院和浙江大学为本书研究工作提供的平台;感谢研究团队的王丽君教授,焦劲光、司爱国、段俊法副教授,郭树满、高玉国博士,刘海朝、孙永生等老师的研究工作对本书的支持;感谢我的研究生李士雷、贺满楼、祁儒明、郑俊强等卓有成效的工作以及王飞、田光旭、宋茂江、张庆波、连振中、徐学滢、杨光、路斌、楚朝阳、孟育博等付出的努力;本书还包含了王丽君博士学位论文的部分研究工作,本书编写过程中,她又对这部分内容进行了加工整理,在此一并表示感谢。

感谢日本国家宇宙航空实验室(National Aerospace Laboratory of Japan)、日本武藏工业大学(Musashi Institute of Technology)、美国西弗吉尼亚大学(West Virginia University)提供的从事本领域研究工作的机会,本书的部分内容涉及这

些研究工作。

此外,感谢国家自然科学基金委数次有关氢内燃机研究领域的项目资助,感谢中国博士后科学基金、清华大学汽车安全与节能国家重点实验室基金、河南省自然科学基金等项目以及河南省创新型科技团队等平台对作者从事本领域研究工作的支持,感谢浙江大学李径定先生的培养和指导。

杨振中

2012年9月

于华北水利水电学院

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 氢能及氢燃料内燃机的技术水平</b> .....	1
1.1 日益严重的大气污染与石油资源短缺 .....	1
1.1.1 汽车排污状况日趋严重,环境保护意识日益增强 .....	1
1.1.2 石油资源紧张加剧,清洁能源渐行渐近 .....	6
1.2 氢能源正在登上能源舞台.....	10
1.2.1 氢的特性.....	10
1.2.2 氢的制取.....	12
1.2.3 氢的储存与运输 .....	15
1.2.4 氢能利用.....	17
1.2.5 氢能源发展背景 .....	18
1.3 氢能源在车辆动力应用中方兴未艾.....	20
1.3.1 燃料电池技术与性能简介.....	20
1.3.2 燃料电池汽车发展历程及技术现状 .....	25
1.3.3 车用氢内燃机的发展历程.....	29
1.3.4 车用氢内燃机的技术状况.....	31
1.3.5 车用氢内燃机的优势与前景 .....	35
1.3.6 车用氢内燃机面临的挑战.....	36
1.3.7 车用氢内燃机的研究对策.....	37
参考文献 .....	38
<b>第 2 章 氢燃料内燃机的理论循环</b> .....	45
2.1 理论循环的基本假设.....	45
2.2 理论循环的计算分析.....	46
2.2.1 进气过程( $r-a$ 段).....	46
2.2.2 压缩过程( $a-c$ 段).....	47
2.2.3 燃烧过程( $c-z$ 段).....	48
2.2.4 膨胀过程( $z-b$ 段).....	48
2.2.5 热效率 $\eta_r$ .....	49
2.2.6 理论循环平均指示压力 .....	49
2.3 理论循环的计算结果.....	49



2.3.1	外部混合气形成方式的氢发动机理论循环的计算结果	49
2.3.2	内部混合气形成方式的氢发动机理论循环的计算结果	51
2.3.3	氢、甲烷和汽油理论循环参数的比较	52
	参考文献	53
<b>第3章</b>	<b>氢燃料内燃机的双区燃烧模型</b>	<b>54</b>
3.1	燃烧模型研究综述	54
3.1.1	燃烧模型分类	54
3.1.2	氢燃料发动机准维燃烧模型各模块	55
3.2	双区热力学模块	56
3.2.1	质量守恒方程	56
3.2.2	能量守恒方程	57
3.2.3	理想气体状态方程	58
3.2.4	未燃区的等熵压缩方程	59
3.2.5	压缩过程和膨胀过程	60
3.3	湍流火焰传播速度模块	61
3.3.1	氢燃料火焰的湍流燃烧速度 $S_T$ 的分析计算	61
3.3.2	已燃气体膨胀速度 $S_E$ 的计算	67
3.4	准维湍流卷吸燃烧模块	68
3.5	氢空气燃烧化学反应动力学模块	69
3.5.1	反应系统的化学动力学方程	69
3.5.2	氢空气混合气燃烧反应机理	70
3.5.3	燃烧过程的计算方法	71
3.6	传热损失计算模块	72
3.7	着火延迟期计算模块	73
3.8	热力学参数计算模块	75
3.8.1	气体组分热力学参数的计算	75
3.8.2	自由基组分热力学参数的计算	75
3.8.3	混合气热力参数的计算方法	76
3.9	几何计算模块	76
3.9.1	火焰前锋面积及燃烧体积的计算方法	76
3.9.2	几何运动参数的计算	79
3.10	燃烧模型的计算方法	79
	参考文献	80
<b>第4章</b>	<b>加氢混合燃料内燃机的燃烧与排放特性</b>	<b>83</b>
4.1	氢-汽油混合燃料发动机的燃烧与排放特性	83
4.1.1	试验装置	84

4.1.2 试验结果及分析 .....	85
4.2 氢-柴油混合燃料发动机的燃烧与排放特性 .....	89
4.2.1 着火 .....	89
4.2.2 输出功率 .....	90
4.2.3 热效率 .....	91
4.2.4 排放 .....	100
4.2.5 氢柴油混合燃料发动机燃烧中常出现的问题 .....	122
参考文献 .....	123
<b>第5章 氢燃料内燃机的混合气形成与燃烧</b> .....	<b>126</b>
5.1 外部混合气形成方式(进气管喷氢)的氢发动机燃烧特性 .....	126
5.2 内部混合气形成方式的氢发动机的燃烧特性 .....	130
5.2.1 进气行程期间将氢气喷入缸内的氢发动机的燃烧 .....	130
5.2.2 压缩行程期间将氢气喷入缸内的氢发动机的燃烧 .....	132
5.2.3 压缩比对氢发动机性能的影响 .....	133
5.2.4 喷氢器的喷孔数对氢发动机性能的影响 .....	134
5.2.5 喷射压力对氢发动机性能的影响 .....	135
5.2.6 喷氢正时对氢发动机性能的影响 .....	135
5.2.7 发动机转速和混合气浓度对氢发动机性能的影响 .....	136
5.2.8 点火方式对氢发动机性能的影响 .....	137
5.2.9 点火正时和喷射正时的关系对氢发动机性能的影响 .....	137
参考文献 .....	140
<b>第6章 氢燃料内燃机燃烧过程的优化控制方法</b> .....	<b>141</b>
6.1 内燃机的优化控制方法与技术概述 .....	141
6.2 基于燃烧过程基本微分方程的氢内燃机缸内状态参数描述 .....	142
6.2.1 双区热力学模块 .....	143
6.2.2 微分形式的质量守恒方程 .....	143
6.2.3 微分形式的能量守恒方程 .....	143
6.2.4 理想气体状态方程 .....	145
6.2.5 未燃区的能量方程 .....	145
6.3 氢内燃机燃烧控制系统的状态空间表达式 .....	148
6.3.1 氢发动机非线性燃烧系统的状态空间表达式 .....	148
6.3.2 氢发动机非线性燃烧系统的状态空间表达式的线性化 .....	153
6.3.3 氢发动机非线性燃烧系统的能控性 .....	156
6.3.4 氢发动机非线性燃烧系统的稳定性 .....	156

6.4 氢燃料发动机的最优控制模型 .....	157
6.4.1 最优控制模型 .....	157
6.4.2 模糊神经网络求解最优控制模型 .....	159
参考文献.....	160

# 第 1 章 氢能及氢燃料内燃机的技术水平

生态环境恶化和石油资源短缺是 21 世纪世界各国共同面临的两个重大问题,无论是世界各国政府、企业界,还是学术界正在比以往任何时候都清醒地意识到解决这两个重大问题的迫切性。寻找替代的清洁能源是人类所做出的必然选择。在世界范围内寻找“清洁能源”的持续升温中,氢能以其清洁、高效、可再生的持续性等特点受到广泛关注,正在登上 21 世纪能源舞台,并有望成为主角,人们对其发展前景充满了期待。

## 1.1 日益严重的大气污染与石油资源短缺

### 1.1.1 汽车排污状况日趋严重,环境保护意识日益增强

汽车已经成为人类不可缺少的交通工具。近年来全球汽车保有量迅速增加,据统计:全世界 1970 年汽车保有量约 2.4 亿辆,1983 年达 4.7 亿辆左右,1996 年上升到 6.7 亿辆,2003 年保有量已超过 7 亿辆,其中约有 85% 分布在工业发达国家。2002 年,美国的汽车产量是 1200 万辆左右,日本的汽车产量达 1080 万辆左右。据引自 JAMA(日本汽车工业协会)《2006 年日本自动车工业》数据<sup>[1]</sup>,2004 年全世界汽车保有量已突破 8.5 亿辆大关,达到 8.5477 亿辆,平均每千人拥有汽车(汽车密度)约 131 辆。在世界总的汽车保有量中,乘用车和商用车合计 5.9084 亿辆。其中美国汽车保有量最多,超过 2.3042 亿辆;其次为日本,超过 0.7465 亿辆。按照美国人口普查局(Census Bureau)于 2004 年 12 月 28 日公布的美国最新人口统计资料<sup>[2]</sup>,在 2005 年 1 月 1 日,美国总人口数为 2 亿 9500 万人。因此,美国是 2004 年世界上每千人拥有汽车最多的国家,达到千人拥有汽车约 781 辆(即 781 辆/千人)。

从 1994 年到 2003 年十年间,我国私人汽车总量增长了 6 倍。1994 年我国汽车产量达到 135 万辆,其中轿车 25 万辆;民用汽车保有量为 940 万辆,其中私人汽车保有量为 205 万辆,占民用汽车保有总量的 21%;2002 年,汽车产销量高达 325 万,保有量达到 2200 万辆左右,2002 年中国汽车产量居世界第五名,与世界第四名法国仅有 13 万辆的差距;2002 年摩托车产量 1292.13 万辆,销量 1300.85 万辆,保有量超过 5000 万;另外农用运输车也高达数百万辆;2003 年全国民用汽车保有量约为 2400 万辆,其中私人汽车保有量 1200 万辆,占总保有量的 50%<sup>[3~7]</sup>。

2004 年,中国的民用汽车总保有量约为 2700 万辆<sup>[8]</sup>,按全国 13 亿人口计算,

则汽车密度为千人拥有汽车约 21 辆(即 21 辆/千人)。但若把农用车和摩托车等车辆也包括在内,则中国 2004 年的机动车总保有量就达到 1.07 亿辆,每千人拥有机动车 82 辆(即 82 辆/千人)。中新网 2009 年 7 月 6 日电称据公安部网站消息,截至 2009 年 6 月底,中国机动车保有量为 1.766 亿辆。其中,汽车 6963 万辆。机动车保有量呈较快增长趋势。汽车保有量占机动车总量的比重提高。不到 5 年时间,汽车保有量增加 2.58 倍<sup>[9]</sup>。

据新华社 2010 年 1 月 6 日报道(引自凤凰网汽车 2010 年 01 月 06 日),美国一家研究机构发布报告说,受经济衰退需求减少、美国人 2009 年报废的汽车比新购车还多。非营利机构“地球政策研究所”6 日发布的报告显示,美国民众 2009 年共报废汽车 1400 万辆,购买新车 1000 万辆,小汽车和轻负载卡车保有量由高峰时期的 2.5 亿辆跌至 2.46 亿辆。

世界汽车工业协会发布的世界汽车产量统计数据显示:2008 年全球汽车产量合计为 7053 万辆,受金融危机影响,比上年下降 3.7%。其中日本列第一位,全年产量为 1156 万辆,较上年下降 0.3%;中国列第二位,为 934.5 万辆,较上年增长 5.2%;美国年产量较上年大幅下降了 19.3%,以 870.5 万辆排在第三位。2009 年,世界汽车产量合计为 6099 万辆,比上年继续下降 13.5%。其中,乘用车产量为 4723 万辆,商用车产量为 1376 万辆。日本从 2008 年的世界第一大汽车生产国降至第二位,全年汽车产量为 793 万辆,同比减少 31.5%。中国上升至世界第一大汽车生产国,全年产量同比增长 48.3%,以 1379 万辆遥遥领先。美国汽车年产量下降 34.3%,以 571 万辆排在第三位<sup>[10]</sup>。

2009 年度的《中华人民共和国 2009 年国民经济和社会发展统计公报》显示<sup>[11]</sup>,截止到 2009 年末,全国民用汽车保有量已经达到 7619 万辆(包括三轮汽车和低速货车 1331 万辆),比 2008 年末增长 17.8%,其中民用轿车保有量 3136 万辆,增长 28.6%。公报显示,2009 年全国生产汽车 1379.5 万辆,比 2008 年增长 48.2%,其中轿车 748.5 万辆,增长 48.6%。而 2010 年度的《中华人民共和国 2010 年国民经济和社会发展统计公报》显示<sup>[12]</sup>,到 2010 年底,全国民用汽车保有量达到 9086 万辆(包括三轮汽车和低速货车 1284 万辆),比上年末增长 19.3%,其中私人汽车保有量 6539 万辆,增长 25.3%。民用轿车保有量 4029 万辆,增长 28.4%,其中私人轿车 3443 万辆,增长 32.2%。由此可见,三轮汽车和低速货车保有量呈现下降趋势,而民用轿车保有量增长趋势不减。工业和信息化部于 2012 年 1 月 19 日发布 2011 年中国汽车工业经济运行情况公告<sup>[13]</sup>,公告显示,2011 年,我国汽车市场实现了平稳增长,汽车产销量双超 1840 万辆,再次刷新全球历史纪录。平均每月产销突破 150 万辆,再次刷新全球历史纪录。汽车产业结构持续进行调整与优化,产业集中度继续提高,出口增长迅速,积极推进节能与新能源汽车。据中国汽车工业协会统计,我国 2011 年累计生产汽车 1841.89 万辆,同比增长

0.8%，销售汽车 1850.51 万辆，同比增长 2.5%；2011 年，乘用车产销分别完成 1448.53 万辆和 1447.24 万辆，同比分别增长 4.2% 和 5.2%。据新华社北京 1 月 10 日电<sup>[14]</sup>，记者从公安部交管局获悉，我国机动化发展迅猛，截至 2011 年底，全国机动车保有量为 2.25 亿辆，其中汽车 1.06 亿辆；近五年，我国机动车保有量保持较快增长速度，年均增量达 1591 万辆，2011 年全年增加 1773 万辆。2011 年，我国汽车、摩托车分别增加 1493 万辆、260 万辆，汽车保有量超过 1 亿辆。汽车占机动车的比率首次超过摩托车，我国机动车结构由摩托车为主向汽车为主转变。按照国家统计局公布的数据，2011 年年底，中国大陆总人口（不包括香港、澳门特别行政区和台湾省以及海外华侨人数）为 13.4735 亿人，则汽车密度上升为千人拥有汽车约 74 辆（即 74 辆/千人）。实际上，我国大城市的汽车密度要远远高于这一数据。例如，按照中广网（www.cnr.cn）广州 2012 年 6 月 30 日消息（记者周羽通讯员 穗交宣、黄少江），2012 年，广州实际人口超过 1600 万人，面临机动车高速增长严峻形势。至 2012 年 5 月，全市机动车保有量 240.5 万辆，其中中小客车 167 万辆。据此，截止到 2012 年 5 月，广州的汽车密度上升为千人拥有汽车约 150 辆（即 150 辆/千人），据此市政府决定从 2012 年 7 月 1 日起，实施中小客车总量调控，即对中小客车进行限购。至此，京沪穗三大城市均对中小客车实行限购政策。截止到 2011 年底，上海由于自 1994 年就已开始实施车辆总量控制，汽车拥有量仅约 195 万辆，汽车千人拥有量（83 辆）仅为北京（234 辆）的 35%。在京沪穗三大城市中，上海为最低，而北京为最高。

机动车持续快速增长，由此引起的汽车尾气污染也日趋严重。机动车排气污染已成为影响城市空气质量的主要因素之一，机动车尾气排放已成为 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源。有资料显示，现代城市大气污染主要来源于汽车尾气。在美国城区，43% 的非甲烷有机物，57% 的 NO 和 82% 的 CO 都是由汽车废气排放产生的，而全世界至少 20% 的 CO 排放量来源于汽车废气。法国环境健康安全理事会 2006 年的一份报告称，城市大气污染的一半以上源自汽车尾气排放，在法国，每年有 9000 多人被汽车尾气等造成的污染夺取生命，我国不仅汽车研究和水平与发达国家相比存在较大差距，而且排气污染控制技术落后较多，汽车排污情况严重。有资料表明，我国各大中型城市汽车尾气排放物造成空气污染也占到 50% 左右，2005 年我国机动车尾气排放在大城市大气污染中的分担率已达到了 70% 以上。世界银行估计，因空气污染导致的医疗成本增加以及工人患病丧失生产力使得中国 GDP 被抵消掉 5%。有关研究表明，汽车尾气成分非常复杂，有一百种以上，其主要污染物包括：一氧化碳（CO）、氮氧化物（NO<sub>x</sub>）、碳氢化合物（HC）、铅（Pb）、苯并芘（BaP）等。它们对环境的污染主要表现为产生温室效应，破坏臭氧层，产生酸雨、黑雨、光化学烟雾等现象。对人体的危害主要表现为损害呼吸系统，造成各种疾病，并且具有很强的致癌性<sup>[15,16]</sup>。

大气污染日趋严重,已成为公众备受关注的公害之一,同时也引起世界各国政治家们的高度关注。1972年6月5日,联合国人类环境会议于瑞典斯德哥尔摩召开,决定此后每年的6月5日作为“世界环境日”。1992年6月,在巴西里约热内卢召开了联合国环境与发展大会,全球170多个国家和地区首脑共商对策,发表了《21世纪议程》,以协调经济发展和环境保护。虽然没有兑现各国政府必须将国民生产总值的0.58%用于环境保护的承诺,且CO<sub>2</sub>排放量仍在增加。但毕竟有其积极的意义,使人们认识到发展经济不能以牺牲环境为代价。更有有识之士提出了环境保护应放在优于经济发展的战略地位来认识。1997年11月在日本京都举行的全球气候变化高峰会议中,与会的各国政府代表一致认为,全球气候变暖已成为一个严重的环境问题。会议发表了著名的《京都议定书》,《京都议定书》作为人类历史上首次限制温室气体排放的联合宣言在2005年2月16日已正式生效,发达国家承诺:从2008年到2012年必须完成的削减目标是:与1990年相比,欧盟削减8%、美国削减7%、日本削减6%、加拿大削减6%、东欧各国削减5%~8%;发展中国家则没有减排义务。近年以来,环境问题作为重要的议题几乎每次都被列入每年的西方八国首脑会议。

据新华社报道,2009年9月22日,联合国气候变化峰会在纽约联合国总部举行,这次峰会旨在为12月在丹麦哥本哈根召开的联合国气候变化大会凝聚政治共识,注入政治推动力。中国国家主席胡锦涛在这次峰会开幕式上宣布了应对气候变化的“中国主张”和行动计划。勾勒出了中国在生态文明建设中应对气候变化的蓝图,强调承担与中国发展阶段相适应的责任,采取与中国实际能力相称的行动,摆脱发展中国家“先污染、后治理”的老路,中国承诺争取到2020年时单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年有显著下降;争取到2020年非化石能源占一次能源消费比重达到15%左右;争取到2020年森林面积比2005年增加4000万公顷;积极发展低碳经济和循环经济。胡锦涛主席提出量化的减排目标被国际社会认为是中国加入应对气候变化的“主流阵营”的标志。国际社会认为“中国变了”,中国提出的2020年减排目标具有里程碑的意义。联合国官员盛赞中方提出的减排计划与制定出量化的减排目标,认为中国的计划极具雄心,将使中国的排放量大幅减少,“让中国变成处理全球气候变化问题的领导者”。中国加入主流阵营,并将发挥独特作用,使得解决气候变暖的全球行动更符合发展中国家的利益和诉求,使发达国家和发展中国家承担“共同但又有区别”的责任。中国由此成为应对全球暖化的先锋。在过去十多年,欧盟和日本是应对全球气候变暖的“世界领袖”。在他们的主导下,制定出了量化的碳减排国际条约——《京都议定书》。美国总统奥巴马在讲话中表示,发达国家在20世纪对气候造成了更多的损害,对此依然负有首要责任,应该在应对气候变化中继续发挥带头作用。发达国家有责任为发展中国家提供技术和资金支持,帮助他们适应气候变化的影响。发达国家应该通过分享技

术,帮助发展中国家跨越高污染能源技术阶段,减少危险性气体排放。我们面临的挑战非常紧迫。但是,作为在全球所有的二氧化碳、甲烷和其他工业温室气体排放量中占大约40%的世界上最发达国家的美国,却迟迟不签订《京都议定书》,引起各国的不满<sup>[17,18]</sup>。

《联合国气候变化框架公约》缔约方第15次会议于2009年12月7日~18日在丹麦首都哥本哈根召开。192个国家的政府首脑和环境部长们在哥本哈根召开联合国气候会议,商讨《京都议定书》一期承诺到期后的后续方案,就未来应对气候变化的全球行动签署新的协议。这是继《京都议定书》后又一具有划时代意义的全球气候协议书,毫无疑问,对地球今后的气候变化走向产生决定性的影响。这是一次被喻为“拯救人类的最后一次机会”的会议<sup>[19]</sup>。出席本次大会的中国代表团团长、中国国家发展和改革委员会副主任解振华说,中国推动本次会议取得进展的一个最重要举措,就是提出了控制单位国内生产总值(GDP)二氧化碳排放行动目标。中国政府宣布了2020年单位GDP二氧化碳排放比2005年下降40%到45%的目标。12月18日,中国国务院总理温家宝出席哥本哈根出席联合国气候变化大会领导人会议,他在发表讲话时表示,中国在发展的过程中高度重视气候变化问题,为应对气候变化作出了不懈努力和积极贡献。温家宝说,中国正处于工业化、城镇化快速发展的关键阶段,能源结构以煤为主,降低排放存在特殊困难,但仍始终把应对气候变化作为重要战略任务。中国是最早制定实施《应对气候变化国家方案》的发展中国家,也是近年来节能减排力度最大的国家。截至今年上半年,中国单位国内生产总值能耗比2005年降低13%,相当于少排放8亿吨二氧化碳。温家宝在会上阐述了中国政府的主张,指出《联合国气候变化框架公约》和《京都议定书》是国际合作应对气候变化的法律基础和行动指南,必须加倍珍惜、巩固发展。“共同但有区别的责任”原则是国际合作应对气候变化的核心和基石,应当始终坚持。确定减缓温室气体排放的目标是中国根据国情采取的自主行动,不附加任何条件,不与任何国家的减排目标挂钩。2010年3月9日,中国致信联合国气候变化秘书处表示批准《哥本哈根协议》(Copenhagen Accord),成为最新一个批准该协议的重要经济体。对这份在2009年12月联合国气候大会上达成的不具有法律约束力的协议《哥本哈根协议》的批准。中国政府展示了一个向国际社会负责任的大国形象。作为一个负责任的大国,中国的态度是严肃的,为推动本次哥本哈根联合国气候变化大会取得进展付出了巨大努力。作为一个发展中的大国,中国近年在节能减排方面采取了一系列重大举措,为全球应对气候变化作出了巨大贡献。

为了缓解日趋严重的大气污染,各国纷纷制定相应的排放标准和法规,具有广泛影响力的欧洲排放标准已经在短短几年更新了四次。表1-1、表1-2分别为欧洲轻型车排气排放物限值与欧洲重型车用柴油机排气排放物限值。



表 1-1 欧洲轻型车排气排放物限值

单位: g/km

法规	汽油车			柴油车			
	CO	HC	NO <sub>x</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	微粒
欧 I	2.72	0.97	—	2.72	0.97	—	0.14
欧 II	2.2	0.50	—	2.2	0.50	—	0.08
欧 III	2.3	0.2	0.15	0.64	0.56	0.50	0.05
欧 IV	1.0	0.1	0.08	0.50	0.30		0.025

表 1-2 欧洲重型车用柴油机排气排放物限值

单位: g/(kW·h)

法规	欧 I	欧 II	欧 III	欧 IV
CO	4.5	4.0	2.1	5.45
HC	1.1	1.1	0.66	—
NMHC <sup>①</sup>	—	—	—	0.78
CH <sub>4</sub>	—	—	—	1.6
NO <sub>x</sub>	8.0	7.0	5.0	5.0
微粒	0.36	0.15	0.1	0.21

① NMHC 为非甲烷总烃,即除甲烷以外的碳氢化合物总量。

自 2008 年 3 月 1 日起,北京市分两个阶段实施新的机动车排放标准,正式与欧洲发达国家接轨,执行与欧 IV 标准相当的国 IV 标准,未达到标准的新车将停止销售和注册。

### 1.1.2 石油资源紧张加剧,清洁能源渐行渐近

能源与人类社会息息相关,目前世界上的主要能源来自化石燃料,它主要包括石油、煤和天然气等。经过地球千百万年深度积累形成的这种化石燃料是一种非再生的能源,其储量有限。人们对化石燃料长期依赖,经济发展对能源需求则不断增长。近年以来,全世界石油需求持续增长,几乎每隔 10 年就翻一番。这必然加剧世界能源的短缺与供应紧张。1973 年中东石油主产国对一些发达国家采取石油禁运,使这些被禁运的国家出现了所谓“能源危机”,同时也对一些石油和煤炭资源缺乏,能源依赖进口的国家造成很大的冲击。近年,全球的石油供应,形势不仅没有缓解,而且愈加紧张。10 年内油价从每桶 10 美元蹿升至 140 美元,仅在 2008 年的短短 6 个月间,石油的期货价格便从 1 月份的 100 美元飙涨至 7 月份的 140 美元。进入 2012 年,国际原油价格始终在 120 美元上下徘徊。这在某种程度上是人们深感石油资源的不足,以及对未来石油资源的担忧所致。《美国向氢经济过渡的 2030 年远景展望报告》认为,石油资源可能在 25~30 年后就将枯竭。即使包括