

汽 / 车 / 先 / 进 / 技 / 术 / 译 / 丛

汽油车 近零排放技术

(美) Fuquan (Frank) zhao 编著
帅石金 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车先进技术译丛

汽油车近零排放技术

(美) Fuquan (Frank) Zhao 编著

帅石金 译

王健昕 审



机械工业出版社

本书作者 Fuquan(Frank)Zhao 和相关领域的专家对快速发展的近零排放汽油车的核心研发技术进行了广泛的探讨。本书针对日趋严格的排放法规,为读者提供了近零排放汽油车现代技术的发展概况。书中材料反映了全球汽车公司和研究机构合作研究的最新成果。本书是市场上第一本既涵盖基础理论,又包括实际应用的汽油车近零排放控制技术方面的参考书。

本书共 14 章,近 200 幅插图或照片,是世界各国从事汽油车研发工程师和管理人员必读的参考书,也可作为对先进汽油车排放技术感兴趣的技术人员的参考资料,并为他们提供相关的基础知识。

Technologies for near-Zero-emission gasoline-powered vehicles

Fuquan(Frank)Zhao

Original ISBN:978-0-7680-1461-7

Copyright 2007 @ SAE International

Authorized Simplified Chinese Edition is published by CMP.

All Rights Reserved.

本书中文简体版由美国 SAE International 出版社授权机械工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2009-1928

图书在版编目(CIP)数据

汽油车近零排放技术/(美)赵福全编著;帅石金译. —北京:机械工业出版社,2009.12

(汽车先进技术译丛)

Technologies for Near-Zero-Emission gasoline-powered vehicles SAE International

ISBN 978-7-111-28757-5

I. 汽… II. ①赵…②帅… III. 汽车排气-空气污染控制 IV. X734.201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 202741 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:赵爱宁 徐巍 责任编辑:刘焯

责任印制:王书来 封面设计:鞠杨

三河市宏达印刷有限公司印刷

2010 年 4 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·25.75 印张·379 千字

0001-3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-28757-5

定价:79.00 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

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

序 言

全球能源危机和环保压力的日益加剧，对传统发动机汽车排放技术提出了巨大的挑战。改善汽油车的排放水平，满足越来越严格的节能环保法规要求，多年来始终是汽车业界广泛关注的焦点之一。在这方面，世界各国已经做了大量的工作，并取得了突破性的进展。一些汽车厂商已经成功开发出了满足全世界最严格的排放法规，即美国加州部分零排放汽车（PZEV）法规的汽油车，这些车型的排放几近于零。而由此诞生的大量节能减排技术，也成功地延长了传统发动机的生命周期，证明了传统汽油车在满足日益苛刻的排放法规方面尚存巨大潜力。

近年来，随着经济的持续发展和能耗的迅猛增加，中国对节能环保的重视程度也在不断加强。有越来越多的专家、学者和工程师们，正在进行汽油车低排放技术的研究与产品开发。自 2000 年正式实施排放法规以来，不到十年时间，中国已实现了从国 I 到国 IV 的跨越式大发展。尽管如此，与美国、西欧、日本等发达国家和地区相比，中国的排放法规仍有差距，这是中国汽车业必须尽快解决的紧迫问题之一。

在这种情况下，我非常欣喜地看到自己编著的英文版《汽油车近零排放技术》能够及时地翻译成中文出版，从而可以更方便地为国人所用。本书全面描述了传统汽油车排放控制的核心技术，对于中国相关领域内的学术研究，工程设计和产品开发等，应有很大的指导意义和参考价值。

在此我要由衷地感谢担任本书翻译、审核工作的清华大学帅石金教授和王建昕教授，正是由于他们富有成效的工作和极高的专业水平，确保了这本学术专著能在较短时间内非常精准地翻译成中文。原书的专业名词都有非常恰当的翻译，全书语言准确清晰，这对于中文读者的理解和使用无疑是至关重要的。

同时也要感谢为本书中文版出版做出贡献的所有朋友们，没有大家的通力合作，就没有本书的顺利付梓。

回国这几年，亲身经历了中国经济的高速发展，特别是汽车业前所未有的突飞猛进，也更切实感受到基础研究支撑经济发展的重要性和紧迫性。希望本书能够促进中国在汽油车节能排放方面的技术革新和产业进步，为中国抢占汽油机排放技术的战略制高点，提供强有力的支撑。

Fuquan (Frank) Zhao 赵福全
吉利控股集团

原 版 序

近年来，汽车工业界做出了很大努力开发近零排放汽油车，以适应日益严格的排放法规。一些汽车制造商已经成功地开发出近零排放汽油车投放市场，并通过了世界上最严格的排放法规，即美国加州部分零排放汽车（PZEV）法规的认证。伴随着这些开发的过程，是不断涌现的大量技术信息，以及人们不断增长的对这些基本过程的系统梳理和描述，对技术问题的真知灼见，以及对关键技术发展趋势和未来研发方向的识别。这些正是本书计划实现的主要目标。

本书涵盖了与近零排放汽油车开发和认证有关的主题，相关领域的专家应邀对快速发展的近零排放汽油车广泛的核心研发问题进行了论述。本书给出了这一领域读者希望了解的几乎所有主题，并对未来技术发展方向和研发需求进行了阐述。书中材料反映了全球汽车公司和研究机构合作研究的最新成果。这一领域的工程师和研发人员会发现，本书在优化近零排放汽油车系统、理解和分析试验数据等方面非常有参考价值。相关公司负责这一领域产品开发的管理人员，也会从各种子系统的优点和不足的清晰描述中，以及从目前近零排放技术全球最佳实践应用的讨论中受益匪浅。

本书分为14章，第1章到第4章层次清晰地给出了与汽油发动机起动和停机相关的复杂过程、混合气形成、未燃碳氢（UHC）形成，以及发动机冷起动特性。第5章到第7章详细描述了改善催化剂冷起动起燃特性的关键技术，如推迟点火、喷射二次空气、燃油品质和重整等。第8章对满足最严格排放法规，如PZEV法规的最新催化剂技术的开发进行了描述。第9章重点放在控制冷起动HC排放的HC捕集器开发上。第10章介绍了系统地模拟三效催化转化器的方法。第11章概述了最新用于控制蒸发排放的措施。第12章阐述了与开发低排放在线故障诊断（OBD）相关的问题。第13章对近零排放汽油车认证相关

的重要问题进行了全面的综述。第 14 章对近零排放汽油车系统目前的最佳实践应用进行了全面的总结，并使读者总体了解近零排放汽油车所有关键的零部件。

本书将为那些近期开始涉足本领域的人，或者那些已经对该领域有所了解但希望对某一问题能获得其他专家见解的人，或者那些只想简单了解一下近零排放汽油车最新技术发展的人，提供非常好的基础知识。工业界或学术界的人员可以从本书中获得快捷的图表学习材料。本书是一本有价值的近零排放汽油车发展相关技术的参考书。

在结束时，我要感谢所有章节的作者对该书成功编辑所做的专业奉献。我也要真诚感谢 SAE 国际部的 Martha Swiss 女士在出版该书时所给予的大力支持。最后，我要真心感谢我的妻子 Dannie 和我的儿子 James 在我准备该书过程中给予我的理解、耐心和鼓励，他们忍受了我利用周末和假期写书和编辑书，而这本应该是陪伴他们的时间，没有家庭对我持之以恒的支持，难以想象这本书的写作和编辑过程是一个快乐和富有成效的经历。

Fuquan (Frank) Zhao

2006 年 4 月 25 日

译者的话

进入 21 世纪，中国汽车工业呈现快速发展的势头，2009 年汽车产销量突破 1300 万辆，中国已成为全球第一大汽车生产国和第一大汽车市场。目前，我国汽车保有量中约 80% 是汽油车，而现有轿车中汽油车所占比例超过 99%，因此，汽油车的减排技术对缓解我国汽车交通污染、保护大气环境，具有十分重要的现实意义。

本书作者赵福全博士和其他多位发动机排放控制领域的相关专家，对快速发展的汽油车近零排放技术进行了广泛的探讨。书中材料反映了全球相关汽车公司和研究机构合作研究的最新成果，对从事汽车及发动机排放控制领域的相关科研和管理人员具有很好的参考价值。

在本书的翻译过程中，课题组的研究生田国弘、马骁、张凡、叶明辉、吴复甲、白云龙、沈义涛、陈文森、黄露、董红义、葛强强、陈龙飞、阳东波以及何旭博士后分别参与了第 1 章至第 14 章的翻译工作，在此表示衷心的感谢。此外，王建昕教授参与策划了本书的翻译出版工作，并对本书译稿进行了审阅，在此一并致谢。

帅石金
于清华园

目 录

序言

原版序

译者的话

第 1 章 汽油机起动及停机瞬态过程	1
1.1 引言	1
1.2 进气道喷射汽油机的停机过程	2
1.2.1 停机过程的一般特性	2
1.2.2 停机过程对碳氢排放的影响	3
1.3 进气道喷射汽油机的起动过程	4
1.3.1 起动初始条件	4
1.3.2 起动过程的一般特性	5
1.3.3 起动瞬态过程的混合气制备	9
1.3.4 起动瞬态过程的燃烧	18
1.3.5 起动瞬态过程的碳氢排放	18
1.4 缸内直喷火花点火汽油机的起动过程	20
1.5 小结	23
1.6 参考文献	23
第 2 章 混合气形成过程	27
2.1 引言	27
2.2 液体燃油与碳氢排放	28
2.3 燃油喷射硬件和控制	38
2.3.1 喷油器种类	38
2.3.2 喷油时刻	41

2.3.3 其他喷射参数	45
2.4 流场的影响	49
2.5 冷起动和暖机阶段改善混合气制备并减少液体燃油影响的策略	53
2.6 小结	58
2.7 参考文献	61
第3章 冷起动碳氢排放机理	73
3.1 引言	73
3.2 冷起动整机性能	74
3.2.1 所需燃油量	76
3.2.2 燃油计量	77
3.3 碳氢沉积机理	79
3.3.1 缝隙沉积	80
3.3.2 机油层和沉积物的吸附	82
3.3.3 液体燃油	84
3.3.4 淬熄层	88
3.3.5 部分燃烧	90
3.3.6 加浓空燃比运行	91
3.4 碳氢传输机理	91
3.4.1 热机状态下的传输机理	92
3.4.2 冷机状态下的传输机理	94
3.5 碳氢氧化	94
3.5.1 碳氢氧化机理	95
3.5.2 碳氢消耗率	97
3.5.3 火焰后碳氢消耗	99
3.6 小结	102
3.7 参考文献	103
第4章 发动机冷起动特性	110
4.1 引言	110

4.2	燃油喷射特性及燃油输送到缸内	112
4.2.1	燃油喷雾	113
4.2.2	湿壁	115
4.2.3	燃油输送到缸内	119
4.3	混合气分布及其与流动的相互作用	121
4.4	燃烧过程和污染物生成	129
4.5	小结	131
4.6	参考文献	133
第5章	推迟点火改善催化剂起燃特性	144
5.1	引言	144
5.2	改善起燃特性的标定措施	144
5.3	发动机推迟点火的工作状态	146
5.4	推迟点火更可靠运行的途径	149
5.4.1	增强进气充量运动	149
5.4.2	双火花塞点火	152
5.5	小结	154
5.6	参考文献	154
第6章	二次空气喷射改善催化剂起燃特性	158
6.1	引言	158
6.2	二次空气喷射的原理和系统布置	159
6.3	热氧化与催化氧化	162
6.4	温度和混合对促进热氧化过程的作用	165
6.5	发动机加浓和二次空气喷射量的要求	174
6.6	二次空气喷射控制和在线诊断	176
6.6.1	开环控制	176
6.6.2	闭环控制	177
6.6.3	用于反馈控制的传感器	178
6.7	二次空气喷射的其他应用考虑	179
6.7.1	二次空气喷射在V形发动机上的应用	179

6.7.2 二次空气喷射在涡轮增压发动机上的应用	180
6.7.3 其他应用问题	181
6.8 小结	181
6.9 参考文献	182
第7章 燃油品质和燃油重整对冷起动碳氢排放和 催化剂起燃的影响	185
7.1 引言	185
7.2 汽油品质	186
7.2.1 组分	186
7.2.2 挥发性	188
7.2.3 驾驶性	190
7.2.4 重整汽油	192
7.3 燃油对 HC 排放的影响	193
7.4 在线燃油重整	197
7.4.1 水蒸气重整	199
7.4.2 部分氧化重整	201
7.4.3 自热重整	202
7.4.4 改善冷起动性能	203
7.4.5 改善催化剂起燃特性	204
7.4.6 醇类车辆的冷起动	205
7.5 在线燃油蒸馏	206
7.6 小结	209
7.7 参考文献	210
第8章 先进催化剂设计	217
8.1 引言	217
8.2 先进三效催化剂概念和设计	222
8.3 满足 PZEV 排放标准的催化剂系统设计原理	230
8.4 小结	238
8.5 参考文献	238

第 9 章 HC 捕集器	243
9.1 引言	243
9.2 HC 捕集器的作用机理	243
9.2.1 HC 捕集系统	243
9.2.2 捕集材料	244
9.3 控制捕集效率的因素	245
9.3.1 选择和开发捕集材料	247
9.3.2 选择和开发催化剂涂层	249
9.3.3 选择催化剂载体形状	249
9.4 提高系统效率的措施	250
9.4.1 主动控制系统	250
9.4.2 改善被动控制系统	253
9.5 小结	254
9.6 参考文献	254
第 10 章 三效催化转化器系统模拟	256
10.1 引言	256
10.2 模拟方法	257
10.2.1 基于单通道的一维模拟	257
10.2.2 多维模拟	259
10.3 化学反应机理	262
10.3.1 三步化学反应机理	262
10.3.2 四步化学反应机理	263
10.3.3 修正的四步化学反应机理	264
10.3.4 五步化学反应机理	264
10.3.5 六步化学反应机理	266
10.3.6 十三步化学反应机理	267
10.3.7 基于基元反应的多步化学反应机理	268
10.3.8 催化剂老化对反应机理的影响	269
10.4 储氧机理	270

10.4.1 简化的单步储氧能力机理	270
10.4.2 详细的九步储氧能力机理	271
10.5 传热和传质现象	272
10.6 入口流动分布	274
10.6.1 流动不均匀系数	277
10.6.2 提高流动均匀性	278
10.7 催化剂动态特性模拟	278
10.8 小结	284
10.9 数学术语	285
10.10 参考文献	288
10.11 本章附录	296
第 11 章 降低蒸发排放	299
11.1 引言	299
11.1.1 蒸发排放标准回顾	299
11.1.2 蒸发排放的种类	300
11.1.3 蒸发排放测试程序	300
11.2 蒸发排放控制系统的类型	302
11.3 降低蒸发排放	304
11.3.1 密封	304
11.3.2 连接件	305
11.3.3 材料	306
11.3.4 炭罐和发动机控制技术	307
11.4 小结	309
11.5 参考文献	310
第 12 章 在线故障诊断	312
12.1 引言	312
12.1.1 诊断监测器的排放失效阈值	313
12.1.2 诊断失效的合理认定	315
12.2 催化剂系统监测器	316

12.2.1	理论和应用及法规含义	316
12.2.2	催化剂监测器的工作	317
12.3	综合零部件监测器	318
12.4	降低冷起动排放控制策略监测器	318
12.5	发动机失火监测器	319
12.5.1	理论和应用及法规含义	319
12.5.2	失火监测器的工作	319
12.6	蒸发系统监测器	320
12.6.1	理论和应用及法规含义	320
12.6.2	基于初始真空衰减的泄漏检测方法	320
12.6.3	正压力衰减泄漏检测	321
12.6.4	基于自然真空的泄漏检测	323
12.7	废气再循环系统监测器	323
12.8	燃油系统监测器	324
12.8.1	理论和应用及法规含义	324
12.8.2	燃油系统监测器的工作	324
12.9	氧传感器监测器	326
12.9.1	理论和应用及法规含义	326
12.9.2	氧传感器监测器的工作	326
12.10	二次空气系统监测器	327
12.11	可变气门正时/控制系统监测器	327
12.12	实车性能跟踪	328
12.13	小结	329
12.14	参考文献	330
第13章	排放测试	331
13.1	引言	331
13.2	废气排放	332
13.3	定容采样器	333
13.3.1	稀释空气	334
13.3.2	排气稀释	336

13.3.3	稀释比(因子)优化	337
13.3.4	气袋采样	338
13.3.5	气袋材料	339
13.3.6	流量测量和控制	342
13.3.7	从气袋到分析仪的样气传输	343
13.4	气袋微型稀释器	345
13.4.1	气袋微型稀释器的稀释气	348
13.4.2	氧气干扰	353
13.4.3	采样系统模拟性能	356
13.4.4	气袋微型稀释器的差异	356
13.4.5	系统校准	357
13.5	分析仪精度	358
13.5.1	标气要求	358
13.5.2	设备和系统零部件	359
13.6	小结	360
13.7	参考文献	360
第 14 章	近零排放汽油动力车辆系统	366
14.1	引言	366
14.2	近零排放汽油动力车辆系统的要求	366
14.3	宝马部分零排放车辆系统	368
14.4	福特部分零排放车辆系统	369
14.5	本田超清洁汽油动力车辆系统	371
14.6	日产部分零排放车辆系统	375
14.7	丰田部分零排放车辆系统	380
14.8	丰田超清洁混合动力系统	385
14.9	小结	387
14.10	参考文献	388
附录	英文缩写词	390

第 1 章 汽油机起动及停机瞬态过程

Wai K, Cheng

麻省理工学院

1.1 引言

起动和停机是发动机非常重要的瞬态过程，对整车排放有着至关重要的影响。冷起动时，催化剂在起燃之前不起作用。由于现今的催化剂完全起燃后的转化效率能够达到 90% 以上，所以起动过程的排放占整个排放的比例相当大。随着排放法规加严，碳氢（HC）排放最受关注。降低起动排放的技术包括开发快速起燃的催化剂和 HC 捕集器，开发能够快速起燃的发动机控制策略，以及降低起动过程中催化剂之前排放的方法 [Nishizawa et al. (2001); Kidokoro et al. (2003)]。由于起动过程中发动机状态存在诸多不确定性（例如，上一次停机时发动机内残余的油量，活塞起动时的位置，汽油品质等），因此，精确控制发动机运行非常困难。另外，低温时的环境温度也不利于混合气制备。再者，发动机在该过程中还应该保持平稳运行。为了更好地理解起动过程，以及改善该过程的排放性能，人们已经开展了许多研究工作。

发动机停机过程对排放的影响很大程度在于它对下一次起动过程的影响。正如本章 1.2.2 节将要讨论的，通常情况下，排气后处理系统的体积要大到能够捕集发动机在停机过程的几个循环所排出的有害物体积。这些捕集到的有害物在下一次起动时将会被排出，如果催化转化器还处于冷态，那么这些有害物排放就会造成很大的污染。对于进气道喷射（PFI）发动机，数量可观的燃油还会滞留在缸内和进气道中，这些燃油将影响下一次起动过程和它的排放。

在发动机的起动和停机过程中涉及到许多物理化学过程，如混