

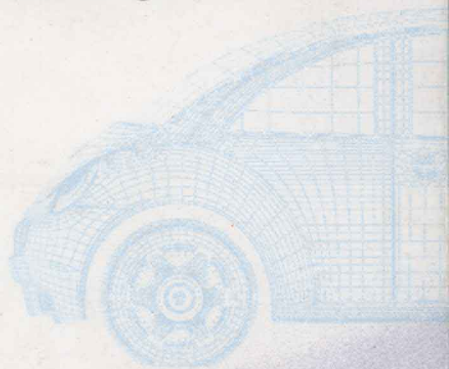


# 李骏博士

## 论文选集

LI JUN BOSHI LUNWEN XUANJI

▶ 李骏 等 著



人民交通出版社  
China Communications Press

# 李骏博士

## 论文选集

LI JUN BOSHI LUNWEN XUANJI

▶ 李骏 等 著

## 内 容 提 要

本论文选集共收编 20 世纪 80 年代以来作者在国内外科技期刊和重要国际学术会议上发表的论文 85 篇, 其内容主要包括汽车发动机技术发展综述、发动机产品设计与开发、发动机燃烧与排放控制、发动机供油系统、发动机工作过程分析、发动机电子控制技术、节能与新能源汽车等。

本书可供从事发动机研究开发的科研人员、工程技术人员及高等院校相关专业师生参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

李骏博士论文选集 / 李骏等著. —北京: 人民交通出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-114-08377-8

I. ①李… II. ①李… III. ①汽车 - 技术 - 文集  
IV. ①U46 - 53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 079153 号

书 名: 李骏博士论文选集

著 者: 李 骏 等

责任编辑: 王金霞

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969、59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市凯鑫彩色印刷有限公司

开 本: 880 × 1230 1/16

印 张: 36.5

字 数: 1033 千

版 次: 2010 年 8 月 第 1 版

印 次: 2010 年 8 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08377-8

印 数: 0001 - 1000 册

定 价: 80.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

## 编选说明

李骏同志 1982 年毕业于吉林工业大学（现吉林大学），1989 年获内燃机专业博士学位，同年到中国第一汽车集团公司技术中心（原长春汽车研究所）工作至今。

20 年光阴荏苒，李骏博士已经从一位青年科技工作者成长为中国汽车行业的科技领军人物，在他本人以诸多优异成果为中国汽车工业发展作出突出贡献的过程中，他还带出了一支掌握汽车核心开发技术且已达到国际水平的研发队伍，初步建立起“现代汽车产品研发与技术自主创新的工程体系”，闯出了一条开放式自主研发的道路，从产品与技术到设计方法与体系能力等多个方面，都缩短了中国汽车工业与世界先进水平的差距。20 年间，李骏博士致力于科技报国，刻苦钻研，埋头苦干，勇于创新，带领他的科研团队取得了一系列重大科技成果，同时他还善于总结推广，撰写并发表了大量的学术论文。

国内外公开发行的《汽车技术》杂志，是中国第一汽车集团公司技术中心和中国汽车工程学会共同主办的应用技术类期刊，其宗旨是以汽车及其发动机等零部件的设计、研究、试验、材料、工艺为报道对象，及时地为汽车行业提供具有较高学术价值和实用价值的新技术。

为适应国家与行业自主创新需求，《汽车技术》杂志编辑部以传播自主研发精神和推广自主创新技术为己任，从李骏博士及其团队 20 年间撰写的学术论文中精选出 85 篇代表作品，编撰了这本《李骏博士论文选集》，以期本书的出版能够对汽车行业的科技人员有所借鉴，能够对推动我国汽车工业发展有所贡献。

《汽车技术》杂志编辑部

2010 年 4 月

## 李骏博士主要工作成果简介

本论文选集作者李骏博士于1958年出生,1978年3月~1989年5月在吉林工业大学(现吉林大学)学习,先后获得内燃机专业学士、硕士和博士学位。

1989年6月~1998年7月,李骏博士在中国第一汽车集团公司长春汽车研究所工作,担任发动机研究室主任工程师、高级工程师,1992年负责吉林省科委课题“单缸柴油机电控喷油系统的研制”;1997年负责国家科技部“九五”重大技术攻关项目“车用柴油机电控喷油系统的研制与产品应用”,他是国内较早开展柴油机电控喷油系统技术研究的工程技术人员。

1998年7月~2005年2月,李骏博士在中国第一汽车集团公司长春汽车研究所工作,是研究员级高级工程师,任副总工程师、总工程师,主管发动机开发和基础科研工作。曾主持国家科技部“十五”863计划重大技术攻关项目“汽车动力总成嵌入式电控系统的研究”,也是国家科技部“十五”863重大技术攻关项目“解放牌混合动力城市客车的研究开发”的课题负责人,主持完成整车设计、电控柴油机、自动变速器、交流感应电动机、镍氢动力电池、整车控制器(VCU)的样品开发,研制出混合动力的动力总成台架试验系统和一辆混合动力城市客车。

2005年2月~2009年11月,李骏博士担任一汽集团公司技术中心主任、一汽集团公司副总工程师,全面负责一汽集团公司技术中心自主产品的开发工作;主持国家科技部“十五”863重大专项项目“解放牌混合动力城市客车的研究开发”和“一汽混合动力汽车动力系统技术平台的研究开发”项目;负责解放军总装备部“战术MV3柴油机电控共轨喷油系统研发”演示验证重大项目。

李骏博士受聘担任吉林大学博士生导师、一汽博士后流动站博士后导师及北京理工大学、北京航空航天大学、天津大学、湖南大学的特聘教授,并担任中国汽车工程学会与中国内燃机工程学会常务理事、中国汽车标准化委员会副主任,以及国家科技部863计划“节能与新能源汽车”专家组专家。2009年10月,李骏博士荣誉当选为国际汽车工程师学会联合会(FISITA)2012~2014年主席,成为中国及发展中国家任此要职的第1人,此事被誉为是中国汽车工业发展史上里程碑式重要事件。

自1995年以来,李骏博士先后被国家经贸委、劳动部评为“全国青年岗位能手”;被国家机械部评为“青年科技专家”;2002年获国务院政府特殊津贴;2004年获长春市“五一”劳动奖章、吉林省“特等劳动模范”荣誉称号;2006年被评为全国劳动模范。李骏博士致力于科技报国,在汽车发动机基础技术研究和产品开发领域取得一系列重大科技成果,为中国汽车工业的发展作出了突出贡献。李骏博士的主要研究领域为汽车发动机产品设计开发、节能环保技术、动力总成电子控制技术、混合动力汽车设计开发、发动机与汽车产品开发系统工程方法等。李骏博士带领一汽技术中心在中型、重型高端柴油机设计、热力学模拟分析、发动机性能开发、发动机排放技术、发动机电子技术等方面的研究成果均达到世界先进水平,在国内外有重要的影响,共获得授权专利15项,发表论文92篇,指导硕士研究生28人,指导博士研究生18人,指导博士后研究生2人。本论文选集主要反映了李骏博士的研究成果,以及他带领的一汽技术中心团队(包括李骏博士指导的研究生)在以下三方面所进行的具有开拓性的研究工作。

### 一、开发自主发动机——解决自主汽车无“心脏”的问题

2000年,李骏博士作为技术总负责人主持国内第一个四气门、221~272kW(300~370马力)大功率、电控共轨、欧Ⅲ排放的8L CA6DL系列柴油机设计开发。该机的关键结构设计方案、影响油耗和排放的燃烧系统由李骏博士确定,产品经第三方德国TuV公司检测认证,主要性能指标达到或超

过了国际知名产品,大大缩短了我国柴油机与国际先进水平的差距,填补了国内自主品牌产品的空白。该机荣获首届中国国际货车节油大赛“最省油车型奖”、吉林省 2006 年科技进步一等奖和国家科技进步二等奖。该机 2004 年批量生产新增产值 75 亿元,新增利润 4.2 亿元。

2003 年,李骏博士主持一汽超级重型货车用 CA6DN 系列柴油机的自主设计开发,该机是中国第一台自主开发的最大排量(13~15L)车用系列四气门、294~382kW(400~520 马力)超大功率、电控共轨、欧Ⅲ排放柴油机。作为技术总负责,李骏博士提出“每缸一盖解决低周疲劳”、“高强度汽缸体结构解决振动噪声”、“低涡流高压喷油解决高效燃烧”等关键技术方案,形成多项专利和专有技术。2006 年该机投产下线,并通过集团和江苏省新产品鉴定,被确认为国内领先、国际先进的重型柴油机。

2005 年,李骏博士主持 11L 重型柴油机的设计开发,提出具有世界先进水平和超前理念的“三高三低技术——高爆发压力、高热负荷、高性能、低排放、低油耗、低 NVH”,大胆采用顶置凸轮轴(轿车发动机技术)、六缸一盖、双层水套缸盖、鼓面缸体、泄气发动机制动、电控共轨等一系列最新设计技术,该机油耗 187g/(kW·h)、欧Ⅳ排放、96dB(A)噪声、B10 寿命 100 万公里等技术指标达到世界先进水平。开发过程中自主创新的 W 形并行同步开发工程流程,将开发周期缩短到 34 个月,创重型柴油机开发效率最佳水平,该机于 2008 年 12 月批量投产。

匹配上述重型柴油机的解放第 6 代货车新增产值 21.7 亿元,新增利润 1.06 亿元,获 2009 年中国汽车工业科技进步特等奖。

2005 年以来,李骏博士带领轿车发动机团队实施一汽轿车发动机产品换代开发,已经完成一汽天津夏利系列轿车 1.1~1.3L 4 气门国Ⅳ排放发动机的自主开发,一汽投资 14 亿元人民币于 2009 年在天津生产,一期年产量 20 万辆。

2006 年,李骏博士主持一汽红旗高级轿车 V12 汽油发动机自主开发,填补了国内空白,V12 汽油机具有 4 气门、全铝缸体和缸盖、可变进排气门开启、闭缸控制、双电脑(ECU)、国Ⅳ排放等当今轿车汽油机最先进技术,并自主开发出 V12 豪华发动机关键生产工艺和质量控制标准,首批 V12 发动机已用于新中国成立 60 周年国庆阅兵红旗检阅车。

经过近 10 年的基础科研工作后,李骏博士自 1998 年转入新发动机产品设计领域以来,他带领的团队几乎以每三年设计开发一个新发动机产品的速度,创造了我国汽车历史上自主设计新发动机产品最多和最快的奇迹。目前,一汽技术中心发动机团队正在全力以赴地开发一汽的 B 系列、C 系列、V6 系列和 V8 系列轿车发动机。

### 二、开发自主柴油机电控喷油系统——解决自主汽车无“大脑”的问题

在解决自主汽车无“心脏”的同时,李骏博士就认识到自主汽车无“大脑”即无自主知识产权的电子控制技术与产品的问题。“十五”期间他就开始货车动力总成嵌入式电控系统的开发,历经 5 年多时间,成功研发出具有自主知识产权的柴油机电控喷油(EUP)系统,申报国家发明专利两项,获国家实用新型专利 3 项,与湖南衡阳亚新科公司产业化结合,投资 2.5 亿元人民币全新建厂,形成国内第一个现代化大规模 EUP 产业化基地。该成果通过国家鉴定,并获 2009 年中国汽车工业科技进步一等奖。2006 年 7 月,该产品成功投放北京市场,与国外同类产品相比,成本降低 50% 以上,为一汽和全国汽车行业创造了巨大的经济效益,该技术打破国外垄断,有力地推动了国产货车的节能环保和机电一体化,且该系统可达到国Ⅲ和国Ⅳ排放法规,已经为一汽新增产值 10.14 亿元,新增利润 1.33 亿元。

### 三、主持当代新能源汽车前沿研发——混合动力技术与产品开发

早在“九五”期间,李骏博士就认识到混合动力汽车技术的重要性,并一直是一汽技术中心新能源汽车技术与产品开发的领军者,先后承担国家科技部“九五”、“十五”、“十一五”863 计划重大技术攻关项目,开发出油(柴油)电混合动力客车、气(CNG)电混合动力客车、具有美国专利的双电机

## 李骏博士主要工作成果简介

强混合动力 B 级轿车。“奔腾”混合动力轿车具有电动机耦合的 AMT、自主 1.5L 电控汽油机、镍氢动力电池、整车控制器(VCU)等领先技术,节油 41.5%,接近日本丰田普锐斯的节油水平。技术中心使一汽集团公司不但在新能源汽车技术与产品的研发方面一直处于领先水平,而且为一汽集团公司制订出新能源汽车的技术方案、技术路线和发展战略,目前已经建立起以汽车电子技术为核心的初步完整的新能源汽车研发体系。

中国第一汽车集团公司技术中心  
2009 年 11 月

## 目 录

**第一部分 发动机技术发展综述**

迎接 90 年代排放法规挑战的直喷式柴油机技术·····	(3)
目标与方式结合战略	
——简评美国“新一代汽车合作伙伴”计划及其实施情况·····	(10)
汽车动力总成节能环保先进技术分析·····	(14)

**第二部分 发动机产品设计与开发**

低排放中重型柴油机结构设计技术·····	(27)
一汽解放“奥威”重型系列柴油机的自主创新成果·····	(38)
重型货车用 CA6DN1 13L 柴油发动机的开发·····	(46)
CA6DF2 系列柴油机的开发·····	(60)

**第三部分 发动机燃烧与排放控制**

6110 型柴油机燃烧过程的优化试验研究(上)·····	(67)
6110 型柴油机燃烧过程的优化试验研究(下)·····	(75)
燃油系统参数对直喷式柴油机性能和排放的影响·····	(80)
低排放的直喷式柴油机燃烧室形状的研究·····	(84)
满足欧洲 I 排放法规的车用直喷式柴油机燃烧系统的研究·····	(89)
直喷式柴油机燃烧系统三维可视化设计·····	(94)
车用直喷式柴油机微粒排放与排气烟度、碳氢化合物排放的关系·····	(99)
降低直喷式柴油机 HC 排放的试验研究·····	(105)
降低车用直喷式柴油机有害排放污染物的试验研究·····	(109)
直喷式柴油机燃烧室计算机辅助设计·····	(116)
车用柴油机在不同增压系统下的燃烧过程·····	(123)
柴油机燃烧过程的分析诊断方法·····	(127)
直喷式柴油机 13 工况排放特征分析·····	(132)



EGR Response in a Turbo-charged and After-cooled D. I. Diesel Engine and Its Effects on Smoke Opacity .....	(138)
Impact Theory Based Total Cylinder Sampling System and its Application .....	(148)
EGR 和 VNT 的匹配对增压柴油机排放的影响 .....	(162)
废气再循环降低增压柴油机排放的试验研究 .....	(168)
车用增压柴油机 EGR 下排放特性 .....	(173)
车用柴油机冷 EGR 系统的试验研究 .....	(176)
CA498 车用柴油机 EGR 的试验研究 .....	(181)
CA6DE1-21K 柴油机瞬态工况下的烟度排放特性 .....	(188)
CA6DE1-21K 柴油机瞬态工况 NO <sub>x</sub> 的排放特性 .....	(194)
用喷气式可变涡流进气系统改善柴油机的排放性能 .....	(199)
低排放柴油机的机油消耗量控制技术研究 .....	(204)
Influence of Injection Direction on Temperature Distribution in Combustion Chamber of Direct Injection Diesel Engines .....	(208)
Combustion and Hydrocarbon(HC) Emissions from a Spark-Ignition Engine Fueled with Gasoline and Methanol during Cold Start .....	(214)

#### 第四部分 发动机供油系统

应用电子调速器改善柴油机怠速质量的研究 .....	(227)
柴油机喷油微机控制系统 .....	(233)
高压共轨系统限压阀试验研究 .....	(237)
基于电流型 PWM 控制的共轨喷油器高速电磁阀驱动开发 .....	(241)
一种新型高压共轨喷油器高速电磁阀驱动模块研究与开发 .....	(247)
高压共轨系统压力采样及其故障模式研究 .....	(252)
柴油机冷起动过程喷油系统的控制模式 .....	(258)
直喷式柴油机高压喷射特性的研究 .....	(263)
高压喷射及其对直喷式柴油机性能的影响 .....	(268)
车用磁电式执行器的自适应模糊控制研究 .....	(273)
磁电式高压共轨转速传感器研制 .....	(279)
非接触式加速踏板传感器的设计 .....	(285)
Improvements on the Start Performance of Diesel Engine by Fuel Control Strategy Optimization and Heating Measures .....	(290)

#### 第五部分 发动机工作过程分析

6110A 型柴油机绝热性能的预测 .....	(305)
螺旋进气道气门口处流速分布的研究 .....	(314)
柴油机进气过程汽缸内流场的模拟研究 .....	(321)
四气门柴油机汽缸内气流运动的实验研究 .....	(328)
复合增压系统结构参数对车用柴油机进气过程的影响 .....	(333)
车用柴油机谐振涡轮复合增压系统的研究 .....	(338)

车用柴油机复合增压系统的模拟计算及验证 .....	(343)
曲轴动态应力模拟及多轴疲劳计算 .....	(348)

## 第六部分 发动机电子控制技术

车用直喷式柴油机可变预行程泵电控系统研究 .....	(355)
柴油机可变预行程泵电控系统的匹配标定 .....	(361)
车用柴油机电子调速器的模糊控制研究 .....	(366)
汽车电控系统开发流程研究 .....	(372)
车用柴油机电控系统电子控制单元的开发 .....	(377)
柴油机电控喷油系统标定 .....	(381)
电控柴油机的标定和性能优化 .....	(387)
车用柴油机电控喷油系统齿条位移反馈控制研究 .....	(393)
国外车用柴油机电控技术的现状与发展 .....	(397)
电控柴油机 ECU 编程设备研究与开发 .....	(407)

## 第七部分 节能与新能源汽车

混合动力汽车节油机理研究 .....	(419)
混合动力汽车多途径节能定量研究 .....	(423)
CA6100 SH8 并联混合动力客车制动能量再生系统开发 .....	(432)
CA6100 SH8 并联混合动力客车工作模式与功率分配研究 .....	(436)
并联混合动力汽车控制策略与仿真分析研究 .....	(443)
北京城市公交客车循环工况开发 .....	(452)
城市混合动力客车功能样车的典型模式调试及动态过程分析 .....	(457)
基于 ADVISOR2002 混合动力汽车控制策略模块开发 .....	(462)
混合动力汽车性能仿真软件的可用性仿真验证 .....	(467)
电控喷射稀燃天然气发动机的开发 .....	(476)
过量空气系数对天然气发动机燃烧及排放的影响 .....	(484)
天然气发动机低速小负荷机油消耗量控制技术的研究 .....	(490)
电控多点喷射天然气发动机的开发 .....	(495)
喷油泵各缸喷油量不均匀度对发动机燃烧及排放的影响 .....	(503)
喷油泵的标定对双燃料发动机燃烧循环变动及排放的影响 .....	(509)
GA6110ZLA5N2 柴油/天然气双燃料发动机的开发 .....	(514)
欧Ⅲ排放法规在中国城市公共汽车上应用的合理性研究 .....	(520)
汽油直喷发动机部分负荷工作特性的研究 .....	(525)
Performance and Hydrocarbon(HC) Emissions from a Spark-Ignition Liquefied Petroleum Gas(LPG) Engine during Cold Start .....	(531)
Effect of Preheating on Firing Behavior of a Spark-Ignition Methanol-Fueled Engine during Cold Start .....	(541)
Emissions of Formaldehyde and Unburned Methanol from a Spark-Ignition Methanol Engine during Cold Start .....	(552)

第八部分 专利产品

电子控制喷油器 ..... (567)

电子控制喷油系统 ..... (567)

单体泵式合成直列泵 ..... (568)

单缸一盖双层水套 ..... (568)

一种新型的混合动力汽车动力总成 ..... (569)

轻度混合单轴并联混合动力总成 ..... (569)

前置式并联混合动力汽车电动机主动同步换挡方法 ..... (570)

混合动力汽车动力合成装置 ..... (570)

内部废气再循环的凸轮轴结构 ..... (571)

活塞的开式内冷油道 ..... (571)

# 第一部分

# 发动机技术发展综述

FADONGJI JISHU FAZHAN ZONGSHU



# 迎接 90 年代排放法规挑战的直喷式柴油机技术

李 骏, 徐 波, 王璟琳  
(长春汽车研究所)

**摘 要:**针对 90 年代世界范围内的严格的排放法规, 本文论述了在直喷式柴油机上将采取的基本策略和一些具体的技术措施。

**关键词:**直喷式柴油机; 排放; 法规; 技术措施

近年来, 对于高速直喷式柴油机技术的研究, 一直集中在低油耗、低排放、低噪声、高比功率和高可靠性等几个方面。这些方面的技术要求及其发展, 决定了柴油机技术的发展趋势。目前, 由于环保法规不断严格, 使得低排污量的要求占据了主导地位; 同时, 由于石油资源日益减少, 燃油经济性问题仍将在柴油机技术发展目标中保持其突出位置。这两方面的要求, 构成了 20 世纪 90 年代直喷式柴油机技术发展的新趋向, 即目标是开发研制高效率、低污染的直喷式柴油机。

## 1 未来排放法规的挑战

目前, 一个世界范围内强化柴油机排放法规的趋势已经形成。美国自 1970 年对柴油机气体排放量作出规定以来, 1988 年又制定了柴油机微粒排放法规。而 1991~1994 年载货车用柴油机新排放法规的出现, 使其对排放的限制更加严格(见图 1)。同时, 由于采用了瞬态循环(见图 2)检测方法, 使得排放检测方法也变得更加苛刻。在该方法中, 每个循环时间为 20min, 其中冷循环占 1/7, 热循环占 6/7, 由计算机控制工况变化。

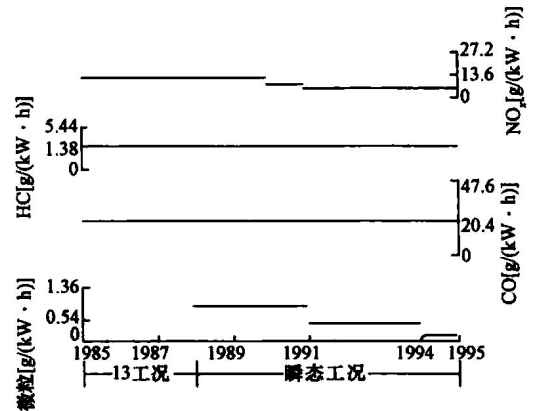


图 1 美国柴油机排放法规

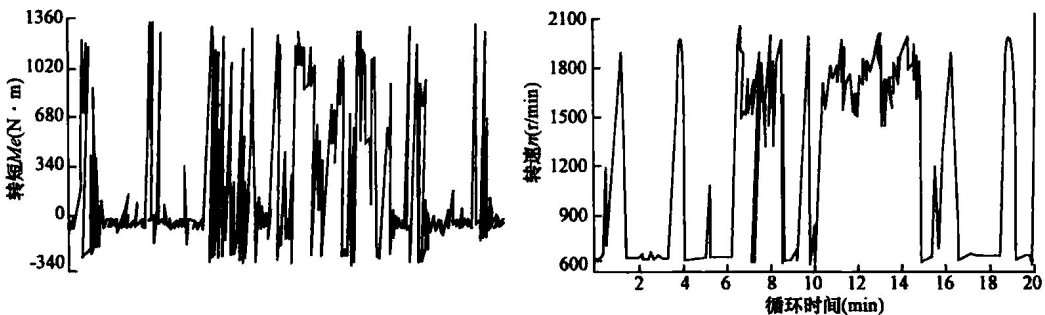


图 2 美国柴油机排放瞬态循环工况

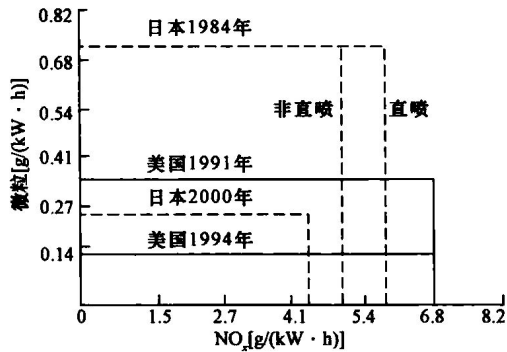


图3 美国、日本排放法规的对比情况

在欧洲,对柴油机排放限制最严的国家是瑞士。其1991年对HC、NO<sub>x</sub>和微粒排放的具体限值分别为1.23g/(kW·h)、9g/(kW·h)和0.7g/(kW·h)。德国和奥地利已经采用1988年的美国柴油机排放法规,并且有可能随同美国一起采用1991~1994年美国柴油机排放法规。日本的柴油机排放法规也相当严格,且有接近美国排放法规的趋势(见图3)。

## 2 迎接未来挑战的基本策略

由于1991~1994年美国柴油机的排放法规如此严格,使得控制排放成了20世纪90年代柴油机技术发展的核心问题。正如英国里卡多公司指出的:排放法规的强化,已经改变了柴油机技术多年来逐渐进化的过程,传统的设计思想和原则以及组织工作过程的策略与方法,正在发生巨大的变革。要达到高效率、低污染的目标,需要研究发动机燃烧过程和控制排放的新方法。

就减少NO<sub>x</sub>排放而言,基本对策<sup>[1]</sup>为:

- (1)降低进气温度;
- (2)减少预燃期内燃烧的燃油量;
- (3)优化燃烧室内的气流运动。

减少微粒排放量的基本方法为:提高燃油雾化质量,在燃烧室内合理分布燃油,增加进气充量,加快燃油与空气的混合,减少机油消耗,降低燃油含硫量。

总之,基本的机内净化原则是在较低的燃烧温度下使燃料完全燃烧。通过改善燃烧过程,可以达到美国1991年排放法规的限值要求,这可能是机内净化所能达到的最大限度。然而,正如英国里卡多公司指出的那样,现在还看不到不采用燃烧系统以外的措施就能达到1994年美国排放法规的可能性,未来的柴油机采用排气后处理措施是不可避免的。

## 3 取得未来挑战胜利的具体措施

为争取上述对策的实现,目前的主要工作正集中在下述控制排放的实用技术上。

### 3.1 喷油系统的改进

#### 3.1.1 改变喷油规律

为控制排放,对喷油规律提出了两个新的要求:

(1)减少着火延迟期内的喷油量,在随后的主喷油期内相应增大喷油量,缩短扩散燃烧期。

(2)随着转速和负荷的增加,应增大主喷油期内喷油率的丰满度,使额定负荷时的喷油率由三角形变成四方形(见图4)<sup>[2]</sup>。

新型的具有可变预行程特性的喷油泵已经实现了第(1)个要求。这种喷油泵的溢油口和进油口是分开的,能够加大溢油口孔径,实现快速溢油,从而使最大峰值喷油压力迟后、后期喷油率增大。目前的喷油系统还不能实现第(2)个要求,NO<sub>x</sub>排放限值的进一步强化将迫使人们开发具有喷油率分段变形特性的喷油系统,这种喷油系统将不考虑喷油嘴孔的节流效应。

#### 3.1.2 改进喷油嘴结构

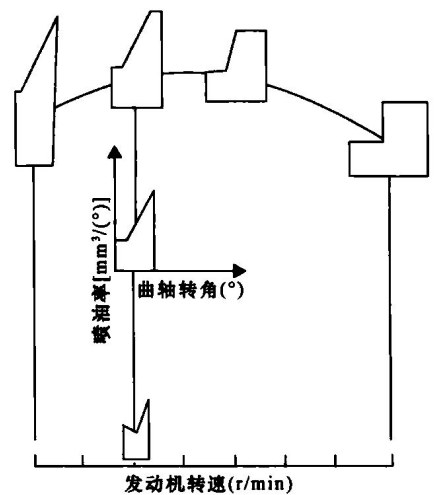


图4 喷油率最佳变化规律

喷油嘴头部形式对 HC 排放量和未燃燃油中可溶性微粒排放量的影响很大。对于普通喷油嘴,其压力室内的燃油,常常在喷射结束时,甚至是在燃烧结束后,仍有一部分滴入汽缸内。这部分燃油不再燃烧,而成为 HC 排放出去。因此,要使喷油嘴的压力室容积趋于最小以至没有,这可以用 VCO 喷油嘴(针阀关闭喷油嘴孔式喷油嘴)来实现。VCO 喷油嘴结构及其对排放和比油耗的影响如图 5 所示。

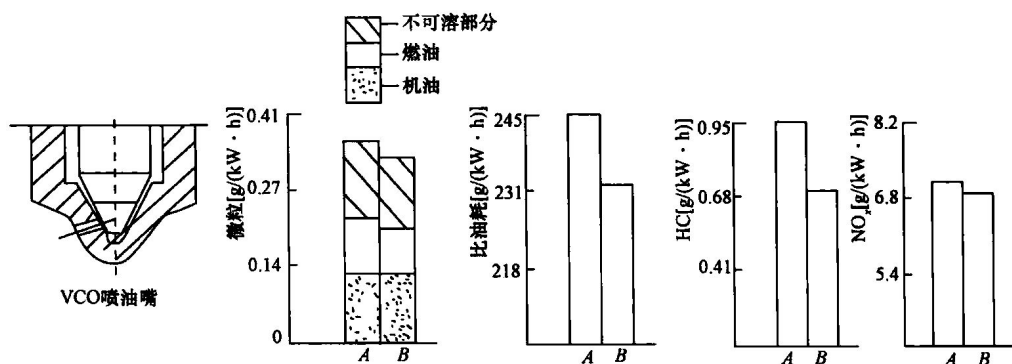


图 5 VCO 喷油嘴结构及其对排放和燃油消耗率的影响  
A-SAC 喷油嘴;B-VCO 喷油嘴

图 6 表明了减小喷油嘴孔径对控制排放的影响。由于等压出油阀成功地取代了传统的等容出油阀,使目前泵—管—嘴喷油系统所允许使用的最小喷油嘴孔总面积已经达到  $0.2mm^2$ <sup>[3]</sup>。另外,为了保证良好的雾化质量,还要求喷油嘴孔长度小于 1mm。

### 3.1.3 延迟喷油定时

解决 NO<sub>x</sub> 排放问题的一项有效措施,是延迟喷油定时。因此,20 世纪 90 年代柴油机的喷油定时,不再以燃油经济性为准来确定,而是按 NO<sub>x</sub> 的排放限值来调整。但是,延迟喷油定时必然会使发动机输出功率降低,微粒排放增加,燃油经济性和起动性能恶化。解决这一矛盾的措施是提高喷油压力和喷油速率。高压喷射的作用是增加油束中的空气量,提高了空气的利用率,使燃烧更迅速、完全。对于单缸排量 1~2L 的柴油机,其喷油压力(嘴端)应大于 100MPa。目前,泵—管—嘴系统的最高喷油压力已达到 120~150MPa。Mak 公司的研究<sup>[4]</sup>表明,在喷油持续期保持不变时,若喷射的燃油粒度减小 5%,则燃油消耗率下降  $1g/(kW \cdot h)$ ;在喷油压力保持一定时,若喷油持续期缩短 10%,则燃油消耗率下降  $1g/(kW \cdot h)$ 。

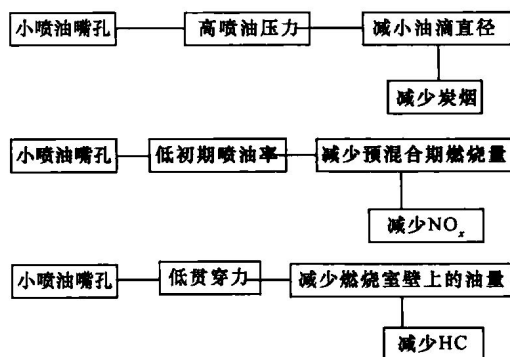


图 6 减小喷油嘴孔径对排放的影响

发动机排放量和燃油经济性对喷油定时的变化极为敏感。因此,未来低排放量柴油机的喷油始点必须严格控制在所限定的范围内,与最佳喷油定时的最大允许偏差为  $\pm 1^\circ$  曲轴转角<sup>[2]</sup>。柴油机排放的瞬态检测法规要求其供油系统能按转速、负荷、环境条件、冷却液和机油温度等因素的变化快速而准确地控制喷油量。这些要求是传统的机械式离心喷油定时器和调速器所无法满足的。因此,近年来开展了柴油机电控喷油系统(见图 7)的研究。目前,电控喷油系统已成为控制柴油机排放的一项重要措施,它被称为是柴油机技术水平的第三次飞跃。特别是具有可变柱塞预行程控制功能(见图 8)的新型电控喷油泵,具有在发动机低速时能提高供油压力,增加供油率;在发动机高速时能降低供油率,防止供油压力过高的优点。因此,使得采用可变预行程电控喷油泵的柴油机的 CO、HC 和微粒排放均减少,尤其是微粒排放比采用传统直列泵的柴油机下降了 27%。



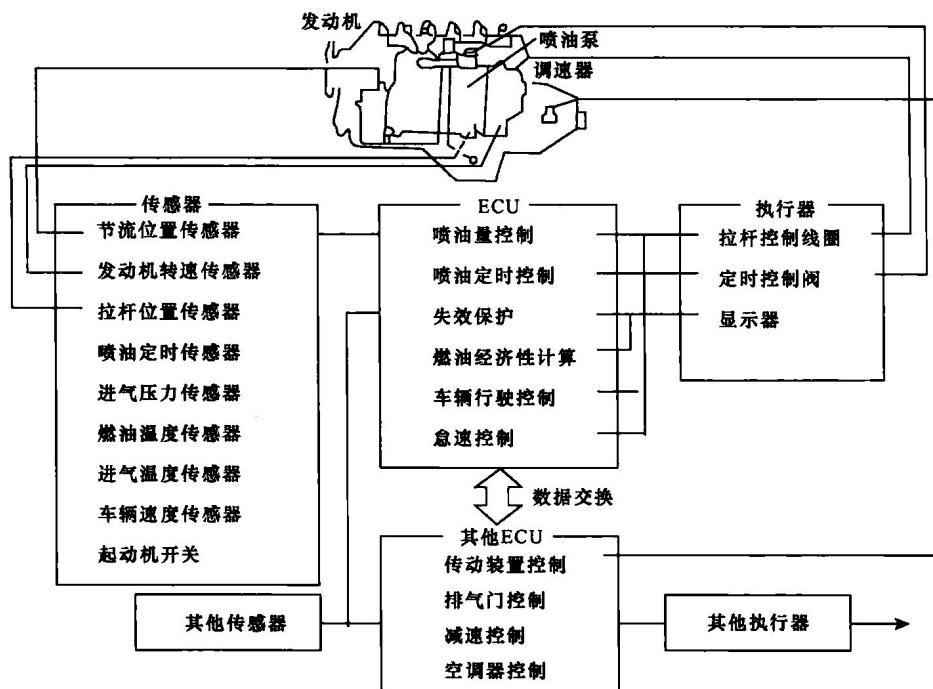


图7 电控喷油系统图

### 3.2 进气系统的改进

#### 3.2.1 采用谐振进气系统

一般的惯性充气系统只能在发动机某一较窄的工况范围内生效,而可变谐振进气系统(见图9a))<sup>[5]</sup>可在全负荷和部分负荷的整个转速范围内调节进气量(见图9b))。全负荷需要较多的过量空气,此时可变谐振系统汽车技术按图9b)中1和3的状态工作,而部分负荷则按图9b)中2和4的状态工作。

图10所示表明了可变谐振进气系统对发动机性能的影响。

#### 3.2.2 采用可变涡流进气系统

传统直喷式柴油机的涡流比会使发动机初始燃烧阶段

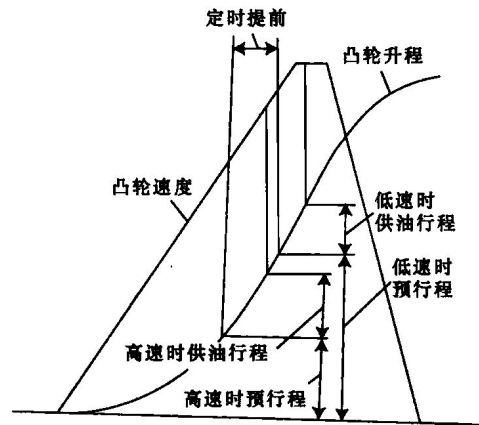
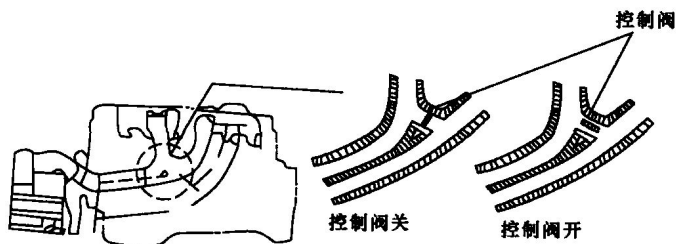
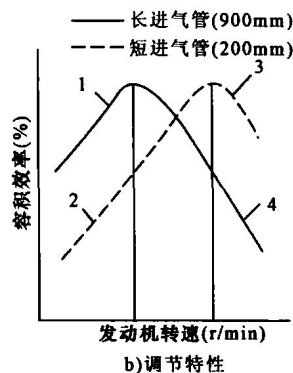


图8 可变预行程控制功能原理图



a) 进气系统



b) 调节特性

图9 可调谐振进气系统及其与进气效率的关系