


Y1811396
保密★2年



A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Master

The Development of High Duty Diesel Engine with CR System

School/Department: School of Automotive Studies
Discipline: Power Mechanical Engineering
Major: Vehicle Engineering
Candidate: Zou Long
Supervisor: Prof. Dong Yaoqing
Vice Supervisor: Prof., Senior Engineer Ji Liwei

Aug, 2007

学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

邵成

2007年8月30日

同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：



2007年8月30日

摘要

中重型车用柴油机排放在柴油车辆中占有十分重要的贡献度,而在柴油机的排放污染物中,主要包含氮氧化物(NO_x)、颗粒(PM)、碳氢化合物(HC)、一氧化碳(CO)这四种,且又以前两者为主。持续的降低中重型车用柴油机的排放对创建一个清洁的大气环境而言是一项艰巨而长期的任务。

按法规,我国中重型车用柴油机要在2008年之前全面实施国III排放,这就需要尽快在燃料喷射系统、燃烧系统、空气进气及增压系统、降低机油消耗、提高柴油品质及机外处理等几大方面实现重要突破,并应充分认识到:

- 1) 要加速燃料喷射系统的电控技术应用,积极加强与国外先进机构的技术合作,做好消化、吸收工作。重视自我开发能力的培养,最终全面掌握柴油机电控喷射系统的设计开发、研究和制造技术。
- 2) 要实施国III排放,高品质的低硫柴油燃料是一个重要前提。发动机工业需要与油料工业紧密配合,要重视低硫燃料的生产及质量的稳定控制。需要对油料工业进行用于炼油设备改造的投资。

柴油机采用电子控制燃料喷射系统是我国中重型车用发动机实现国III排放工作中要解决的首当其冲的问题。从长远来说,我国众多车用发动机将有可能采用多种形式的电控喷射系统,但开始阶段,共轨式电控喷射系统将首先会占主导地位。

本文较详实地讨论了为实现国III排放目标,对课题研究发动机的燃料喷射系统、燃烧系统、空气进气及增压系统、降低机油消耗、提高柴油品质等方面进行重要改进,最终使得课题研究发动机顺利达到课题开发目标、其排放水平也实现从国II到国III的升级。

关键词: 电控, 高压共轨, 柴油机, 国III, 排放

ABSTRACT

Too much influence with heavy duty vehicle engine while considering the emission level, so it's important work to decrease the actual emission of heavy duty vehicle engine.

In order to reach Chinese III emission regulation in China, that means more work should be done with less time.

With released Chinese III emission regulation, all heavy duty vehicle engines should satisfy the requirement of Chinese III before 2008, they have to improve the fuel injection system, combustion system, air intake system, after treat system, and try to decrease oil consumption. Anyway,

Most manufacturer must enhance to cooperate with advanced foreign RD group, especially in electrical control fuel injection system, so that to catch best technology to fit the requirement of emission regulation and market. At the same time, all of them will have to train more and more engineers to get ability to catch future.

On the other hand, emissions of engines with Chinese III application running with high sulfur fuel maybe can not reach the requirement. The engine manufacturers can not solve all problems obviously, so the fuel suppliers should take measurements soon.

It's necessary to use electrical fuel injection system for all heavy duty vehicle engines. There are three kinds of injection system for Chinese III engine, one is unit pump system(EUP), one is unit injection system(EUI), other is common rail system(CRS). All of them will be applied in Chinese market in future, but the CRS is favorite, the reason is that no need to modify current engine's main parts. It's obviously that will save much cost compared to match EUI or EUP in current product lines.

In the file, the written try to describe the method how to reach Chinese III, include: which fuel system is better, how to improve combustion system ,how to decrease oil consumption, how to improve air intake system, and so on.

Abstract

Key Words: Electrical control, High pressure, Common rail, Diesel engine

目录

第1章 引言.....	1
1.1 现状.....	1
1.1.1 喷油量控制及其特点.....	2
1.1.2 喷油正时控制及其特点.....	2
1.1.3 喷油压力控制及其特点.....	2
1.1.4 怠速控制及其特点.....	2
1.2 国III排放法规.....	3
1.3 课题研究目标.....	6
第2章 技术措施.....	9
2.1 燃油喷射系统的升级.....	9
2.1.1 电控高压燃油喷射系统.....	9
2.1.2 喷油嘴改进设计.....	10
2.1.3 燃油管路系统设计.....	11
2.2 四气门设计.....	12
2.3 进气涡流和燃烧系统优化.....	12
2.4 增压及空空中冷优化.....	14
2.5 进一步降低机油耗.....	15
2.6 柴油品质改善.....	16
第3章 电控高压燃油喷射系统.....	20
3.1 电控系统概述.....	20
3.1.1 对喷油量精确、灵活控制的能力.....	20
3.1.2 对喷油正时柔性控制的能力.....	21
3.1.3 对喷油压力灵活控制的能力.....	21

目录

3.1.4 对怠速进行反馈控制.....	21
3.1.5 其它特殊控制、通讯功能.....	21
3.2 电控单体泵系统	22
3.3 电控泵喷嘴系统	24
3.4 电控高压共轨系统	25
3.5 选定的燃油喷射系统规格	29
3.5.1 供油油量、供油压力.....	30
3.5.2 燃油喷射的响应时间.....	31
3.5.3 燃油滤清器规格.....	32
第4章 标定技术.....	34
4.1 标定概述及其流程	34
4.2 A、B、C 转速的计算.....	35
4.3 基本特性标定	37
4.3.1 喷油正时对排放和性能的敏感特性.....	37
4.3.2 喷油压力、中冷温度对排放和性能的敏感特性.....	38
4.3.3 燃烧系统零部件选型测试.....	38
4.4 排放和性能的综合标定	40
第5章 结论.....	43
5.1 课题研究结论	43
5.2 后续工作展望	44
致谢.....	46
参考文献.....	47
个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果	49

第1章 引言

1.1 现状

柴油机自从面世以来,已过百年,与汽油机相比,一直以其油耗低、功率大的主要特点长期在多个领域得到发展和应用,并在中重型汽车、工程机械、电站等领域占据主导地位,但同时,其振动大、噪音大、易冒黑烟的特征也成了柴油机推广中最大技术难题。目前,世界上重型车已成为可吸入颗粒和 NO_x 排放的主要污染源。在一些国家和地区,中重型车用柴油机排放在发动机对环境排放贡献度要达到70%左右。

自从80年代以来 HC 、 CO 、 NO_x 和颗粒物的排放量已经大大降低,满足当时所相应的排放法规的要求。从1985年至今, NO_x 排放量降低了72%,同期 CO 排放量降低了85%, HC 降低了81%,自1990年以来柴油机制造商将颗粒排放物降低了86%。这些成就是通过柴油机技术的不断改进取得的,如废气涡轮增压技术、中冷技术、四气门技术、EGR技术、燃烧室设计优化和高喷射压力技术^[1]。

目前,我国中重型载货车基本上都已实现柴油化,承担着我国公路货运的重要任务。近些年我国中重型载货车生产发展迅速,2005年新注册的中重型载货车量达到33.84万辆。2005年我国重型载货车的保有量达到168.07万辆,中型载货车的保有量达到236.66万辆。

近年来,在排放法规的推动下,我国中重型车用柴油机的技术水平已有了明显的提高,大多数过去国内自行开发的一些机型都已能达到国I或国II排放标准,并已成为我国发动机行业走自主开发道路的一个成功典范。

为了创造一个洁静的生活环境,我国于2005年发布了国III排放法规。提出在2008年开始全面执行国III排放法规,停止销售未达标排放车辆。

为解决这些顽疾,除不断对整机的结构设计不断加以优化外,更主要的还是需要对工作过程进行合理改善。而改善工作过程,最重要的工作就是改进燃油喷射系统,同时对燃烧系统零部件做相应的设计改进。

在传统的机械式燃油供给系统中,喷油泵起着控制燃油喷射压力、喷射正时、喷射量的作用,同时还控制着发动机的调速特性、怠速转速等,具体控制

内容及特点如下。

1.1.1 喷油量控制及其特点

喷油量大小由驾驶员通过油门拉动齿条控制，并且通过调速器的机械结构设计进行最高转速限制、最大供油量限制、增压压力限制。

但是由于属机械设定，主要考虑两点稳态工况，无法兼顾发动机各种不同工况下特点，特别是瞬态工况无法控制，如急加速冒烟控制等，且无法从机械上做到自动调节各缸喷油量平衡。

1.1.2 喷油正时控制及其特点

喷油正时由事先设计好型线的提前器决定，因而其提前角只随转速而线性变化，不能实现理想的变化规律。而为了达到超低的排放以及更加优异的燃油经济性，对喷油正时进行灵活非线性控制显然是必须的。

1.1.3 喷油压力控制及其特点

喷油压力也取决于事先设计好的柱塞规格，且随转速而线性变化，不可调。因而其低转速时喷油压力低，对发动机低速工况不利。

1.1.4 怠速控制及其特点

怠速转速由怠速弹簧控制，一旦设定，不可改变。由于这一设计特点，因而其怠速油量不能适应水温变化对怠速油量大小的要求、不能适应车辆附件功率变化要求。

显然，由于机械结构设计上的固有特点，始终不能实现对燃油喷射系统的柔性、高精度控制，从而难以使中重型柴油机满足国Ⅲ及以上法规的要求。

1.2 国III排放法规

中国的国III法规全称是《车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法（中国III、IV、V阶段）》，由国家环境保护总局与国家质量监督检验检疫总局联合于2005年5月30日发布，并于2007年1月1日起正式实施。

与国II排放法规相比，国III法规所允许的NO_x限值只有国II法规允许值的70%，PM限值也只有国II限值的67%，图1.1所示的是排放法规发展的趋势图。

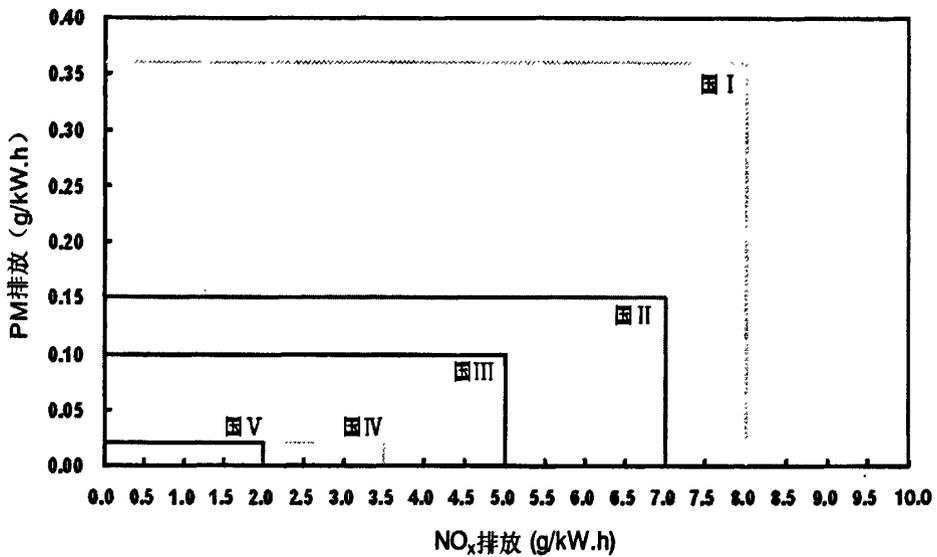


图 1.1 国家排放法规发展趋势图

在规定了排放限值的同时，法规还规定了具体的测量方法和测试规程，通常称之为ESC测试和ELR测试。ESC试验对一氧化碳、总碳氢化合物、氮氧化物和颗粒物排放水平进行稳态工况测试，而ELR试验则对不透光烟度^[2]进行瞬态工况测试。

ESC测试是一个稳态循环测试，包含13个稳态工况点的试验，每个试验工况点在进行排放量计算时用不同的权重系数，法规要求这13个测试点加权计算后的排放物不能超过规定限值，这13个测试点及其排放物计算时的加权重比例如图1.2所示。

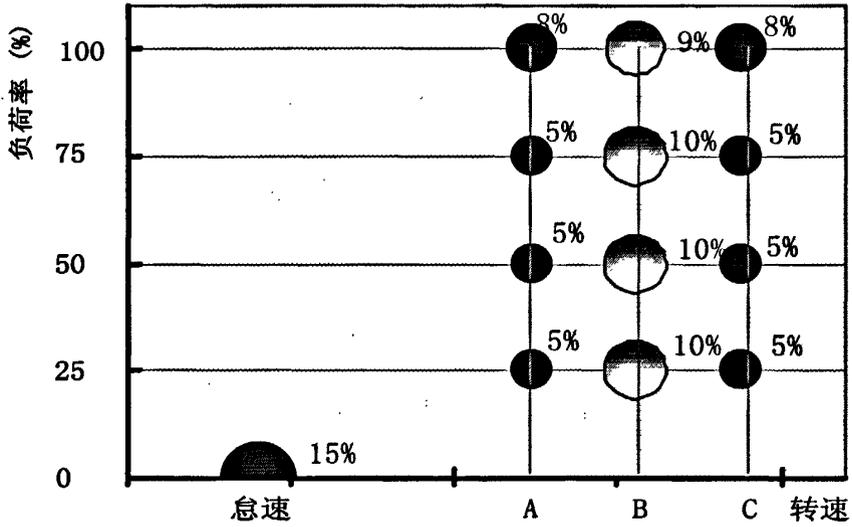


图 1.2 ESC 测试点及其排放物加权计算权重

根据排放法规测试的要求，ESC 测试中的 A、B、C 转速应该根据发动机的外特性进行计算而得，如图 1.3 所示，其中：

$$\text{转速 A} = n_{i0} + 25\%(n_{hi} - n_{i0})$$

$$\text{转速 B} = n_{i0} + 50\%(n_{hi} - n_{i0})$$

$$\text{转速 C} = n_{i0} + 75\%(n_{hi} - n_{i0})$$

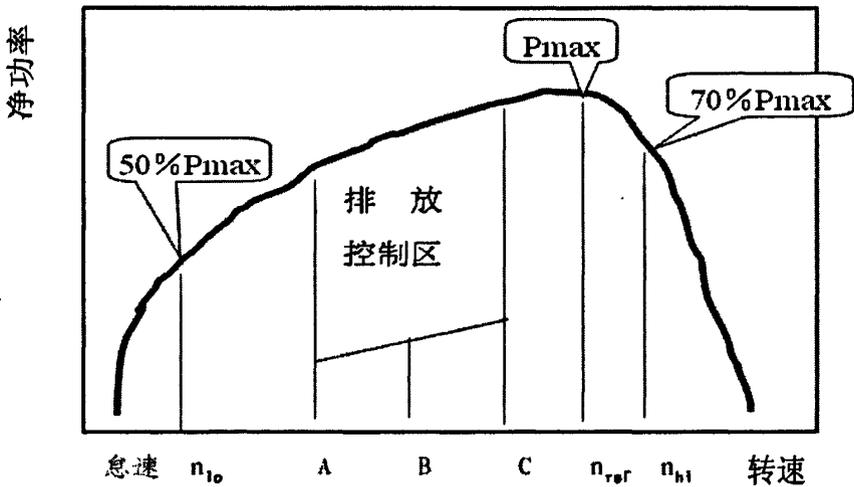


图 1.3 ESC 测试中 A、B、C 转速的确定

ELR 测试即负荷烟度试验，是在恒定转速下依次改变负荷的试验循环，其具体变化的循环方式如图 1.4 所示。

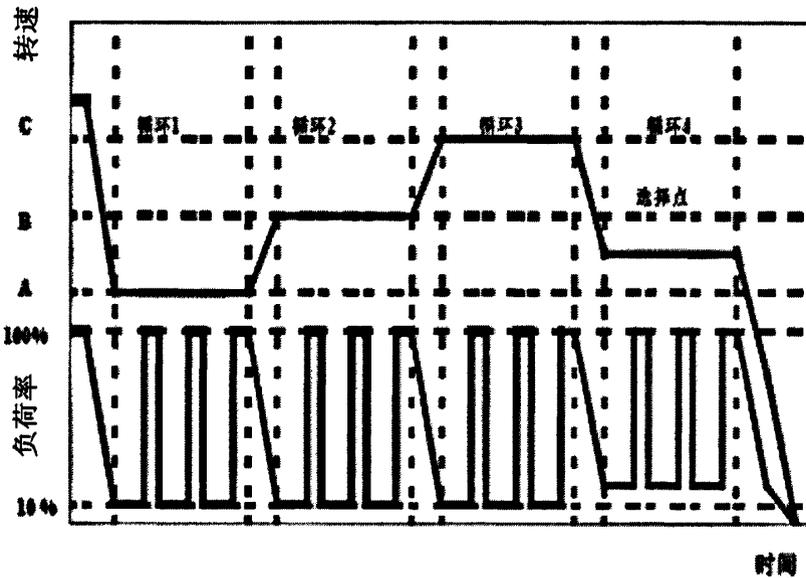


图 1.4 ELR 测试循环

与国 II 排放法规所规定的测试规程相比，在国 III 法规中，稳态工况排放控制点的工况与加权系数均有变化，调整后的排放控制区覆盖了车辆用柴油机的主要常用工况区，瞬态 ELR 突变负荷代替了国 II 法规中 ECER24 自由加速烟度测试，特别值得一提的是，由于国 III 阶段绝大多数的柴油机均采用了电控技术，为避免发动机控制系统仅仅对 13 个排放控制点进行控制的情况出现，法规特别规定要求随机检测（排放控制区内任意三点的 NO_x 浓度和认证机构所随机指定的一个转速下测试 ELR 烟度）。

按照国 III 法规，ESC 试验测得的一氧化碳、总碳氢化合物、氮氧化物和颗粒物的比质量限值，以及 ELR 试验测得的不透光烟度限值，都不应超出表 1.1 所示相应值。

按标准规定，2007 年 1 月 1 日起，实施国 III 阶段排放标准，凡不满足国 III 标准相应排放要求的新型发动机和新型汽车均不得予以型式核准，并且对于按国 III 标准批准型式核准的新型发动机和新型汽车，其生产一致性检查，自批准之日起执行。自 2008 年 1 月 1 日起，凡不满足国 III 标准相应排放要求的新车不

得销售、注册登记，不满足本标准相应阶段要求的新发动机不得销售和投入使用。

表 1.1 国Ⅲ法规规定的排放物限值

阶段	一氧化碳 (CO) g/kW.h	碳氢化合物 (HC) g/kW.h	氮氧化物 (NO _x) g/kW.h	颗粒物 (PM) g/kW.h	烟度 m ⁻¹
Ⅲ	2.1	0.66	5.0	0.10	0.8
Ⅳ	1.5	0.46	3.5	0.02	0.5
Ⅴ	1.5	0.46	2.0	0.02	0.5

1.3 课题研究目标

作为本文研究对象，原型机是一台 114 系列柴油机，排放为国 II 水平，其基本性能结构参数如表 1.2 所示：

表 1.2 本研究发动机原机主要技术参数

名称	符号	单位	
发动机型式	—	—	直列六缸、四冲程、水冷、直喷
进气方式	—	—	涡轮增压、空—空中冷
发火顺序	—	—	1-5-3-6-2-4
缸径×行程	D×S	mm	114×144
每缸进/排气门数	—	—	2
总排量	—	L	8.82
压缩比	e	—	18
标定转速	n	r/min	2200
标定功率	Ne	kW	235
标定工况燃油消耗率	be	g/kW.h	235
平均有效压力	Pe	MPa	1.45
活塞平均速度	Cm	m/s	10.56
强化系数	Pe·Cm	—	15.34
升功率	—	kW/L	26.64
最大扭矩	Memax	N·m	1250
最大扭矩转速	nMe	r/min	1400
全负荷最低燃油消耗率	bemin	g/kW.h	200
最低燃油消耗率	bmin	g/kW.h	200

第 1 章 引言

表 1.2 本研究发动机原机主要技术参数 (续表)

名 称	符 号	单 位	
扭矩适应性系数	K	—	1.22
800r/min 时扭矩	—	N.m	750
机油消耗率	—	boil/be	≤0.2%
最高燃烧压力	P _{max}	MPa	≤14
涡前最高排温	tr	℃	700
噪声	L _p	dB(A)	113
排放	—	—	国 II

考虑到该机型有升级到国 III 排放能力, 拟主要在燃油系统及燃烧系统上采取一定的改进措施, 以使得发动机完成排放升级的同时, 可以在功率、成本上都能满足市场的需求, 所确定的课题研究发动机目标技术规格如表 1.3 所示。

表 1.3 课题研究发动机目标性能参数

名 称	符 号	单 位	
发动机型式	—	—	直列六缸、四冲程、水冷、直喷
进气方式	—	—	涡轮增压、空—空中冷
发火顺序	—	—	1-5-3-6-2-4
缸径*行程	D×S	mm	114×144
每缸进/排气门数	—	—	2
总排量	—	L	8.82
压缩比	e	—	18
标定转速	n	r/min	2200
标定功率	N _e	kW	221
标定工况燃油消耗率	b _e	g/kW.h	215
平均有效压力	P _e	MPa	1.37
活塞平均速度	C _m	m/s	10.56
强化系数	P _e .C _m	—	14.43
升功率	—	kW/L	25.06
最大扭矩	M _{emax}	N.m	1250
最大扭矩转速	n _{Me}	r/min	1400
全负荷最低燃油消耗率	b _{emin}	g/kW.h	200
最低燃油消耗率	b _{min}	g/kW.h	198
扭矩适应性系数	K	—	1.3
800r/min 扭矩	—	N.m	800

第1章 引言

表 1.3 课题研究发动机目标性能参数 (续表)

名 称	符号	单 位	
机、柴油消耗率比	—	boil/be	≤0.2%
最高燃烧压力	P _{max}	MPa	14.5
涡前最高排温	tr	℃	700
噪声	L _p	dB(A)	100
排放	—	—	国III

第2章 技术措施

2.1 燃油喷射系统的升级

2.1.1 电控高压燃油喷射系统

根据国内外柴油机研究开发的一般经验，在不同的排放控制阶段需要采用不同的控制技术，如表 2.1 所示。

表 2.1 柴油机不同排放阶段所需要采取技术

控制手段 排放阶段	非直喷	直喷	直列泵	增压	中冷	高压喷射	电控	SCR	VGT	EGR	DFP
国 I	v	v	v	v							
国 II		v	v	v	v						
国 III		v		v	v	v	v				
国 IV		v		v	v	v	v	v(选)		v(选)	v(选)
国 V (暂定)		v		v	v	v	v	v	v	v	v

采用可灵活控制喷油的电控高压燃油喷射系统，实现喷射定时、喷油量、喷油压力的灵活控制，国 II 排放法规要求喷射压力达到 120MPa，为满足国 III 排放法规一般要求喷射压力达到 135MPa 以上。

为达到这一可控灵活的喷射要求，必须采用电子控制。目前国际上中重型车用柴油机电控喷射系统大多采用共轨式电控喷射系统、电控单体泵系统、电控泵喷嘴系统等几种不同型式，极少数的也有采用电控直列泵系统。

共轨式电控喷射系统的喷射压力一般控制在 160MPa 左右，电控泵喷嘴和电控单体泵系统的喷射压力一般控制在 180MPa 左右。电控直列泵系统的喷射压力为 135MPa 左右。

考虑到燃油系统的匹配选型是本课题研究工作中最为重要内容之一，在下

一章节中进行了专门的分析，并确定具体技术规格。

2.1.2 喷油嘴改进设计

喷油嘴向增加喷孔数、减小喷孔直径和采用最小的压力室容积和带锥形喷孔的方向变化^[3]。由于国III时采用电控喷射系统，喷射压力比国II时提高了一个档次，将普遍采用P系列喷油嘴，在适应国II排放要求的喷油嘴设计基础上，进一步增加喷孔数，减小喷孔直径。喷孔数将从国II时的5~6孔增加到6~8孔；喷孔孔径也将由国II时的 $\phi 0.20\sim 0.25\text{mm}$ 缩小到 $\phi 0.15\sim 0.20\text{mm}$ 左右。并将普遍采用小压力室容积，选用锥形小压力室或无压力室结构，以降低HC和PM排放。压力室和喷孔容积之和一般将控制在 0.4mm^3 以下。如一台缸径为115mm的重型车用柴油机，其所选用的喷孔参数为 $8\times \phi 0.16\text{mm}$ 。

目前，无压力室喷油嘴的生产成本要比小压力室喷油嘴高。对排量在0.5~1升/缸的小型发动机，由于循环油量小，压力室容积相对于循环油量的比例影响较大，一般应首先考虑采用无压力室喷油嘴。而对于排量>2升/缸的较大发动机，循环油量较大，压力室容积相对于循环油量的比例影响相对较小。一般可用小压力室喷油嘴。今后随着对颗粒排放的要求越来越严，也会趋向于使用无压力室。

图2.1所示为压力室容积向标准压力室→小形压力室→锥形压力室→无压力室的方向变化：

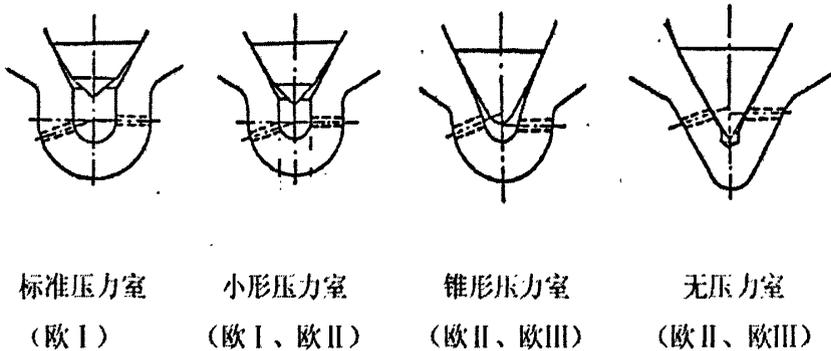


图 2.1 喷嘴压力室设计的改进

为提高喷油孔流量系数,近年来已开发出采用锥形喷油孔加液体研磨技术,已可使喷孔的流量系数由过去常规工艺时 0.7 左右提高到 0.9 以上,从而使喷孔尺寸缩小,而仍能保持相同的喷油量,为提高喷射压力、改进燃油雾化提供先决条件,如图 2.2^[4]所示。

	Sec 油嘴	VCO 油嘴	喷孔根部带 R	带锥的喷孔
				
喷射后滴减少	×	○	-	-
喷雾形成稳定性提高	○	×	-	-
流量系数提高	△	×	○	○
流量系数	0.75 左右	0.70 左右	0.9 以上	0.9 以上

◎:自由度大 ○:自由度小 △:自由度无 ×:不可 (○):要追加装置

图 2.2 不同工艺加工喷嘴对比

在本课题研究中,根据上述基本原则,初步选定了如表 2.2 所示的数种不同规格的喷油嘴进行试验研究^[5]。

表 2.2 本研究发动机喷油嘴选型

序号	孔数×孔径 (mm)	锥角 (deg)	流量 (cc/min)
1	6×Φ0.19	145	>1200
2	6×Φ0.19	150	>1200
3	6×Φ0.19	155	>1200
4	7×Φ0.17	150	>1200
5	7×Φ0.17	155	>1200
6	8×Φ0.16	150	>1200
7	8×Φ0.16	155	>1200

2.1.3 燃油管路系统设计

随着国Ⅲ排放对喷射压力的提高,对高压油管材质和加工精度的控制也更为严格。当油管压力约为 160MPa 时,应保证其管内表面的最大裂纹在 10 μm 以下,平均裂纹深度小于 5 μm,且内表面基本没有脱碳层,才能保证其足够

的可靠性。为达到上述要求，高压油管材料可采用酒井公司制造并提供的 USIT-SP VS1H^[6]。现代重载柴油机高压油管材质在不断改进，如美国 DDC 公司 60 型重载柴油机高压油管采用不锈钢管制造，图 2.3 反映了高压油管内表面所允许的缺陷深度与其所能够达到的最大燃油压力的关系。

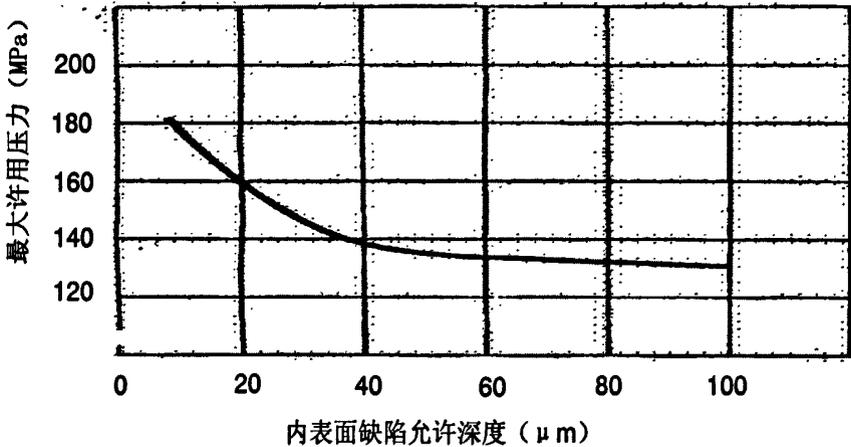


图 2.3 高压油管内径缺陷允许深度及其对应最大许用燃油压力

2.2 四气门设计

要达到国Ⅲ排放指标，绝大部分重载车用柴油机都要由原国Ⅱ排放时所采用的二气门结构改为四气门结构^[7]。采用四气门结构后，喷油嘴中心布置，而不再需要象国Ⅱ排放时那样采用偏心布置。由于喷油嘴中心布置后，喷射的油束可以与空气有更充分的混合，提高混合和燃烧效率。同时由于四气门结构一般可比同缸径的二气门结构发动机充气效率提高 15 % 左右，从而可使比油耗下降 4 % 左右。

在本课题研究中，由于边界条件限制，未能采用四气门结构，但通过其它燃烧系统方面的优化，还是使得发动机顺利达到了国Ⅲ排放水平。

2.3 进气涡流和燃烧系统的优化

由于采用高压燃油喷射系统，柴油机的燃油喷射压力独立于转速，低速情况下也可以达到较高的燃油喷射压力、最高可达 160MPa 以上，燃油颗粒的平均

直径进一步减小，喷雾质量得到进一步改善。因此对促进油气混合的涡流强度要求降低，故涡流比一般要比国 II 排放时下降 20% 左右，本研究中涡流比由 2.4 降低至 1.9 左右。同时，对燃烧室缩口内的涡流保持率也可以降低，燃烧室缩口直径比国 II 排放时有所扩大，进一步改进油气混合过程，燃烧室由国 II 阶段的典型缩口式燃烧室（图 2.4）改进为浅盆形燃烧室（图 2.5）。

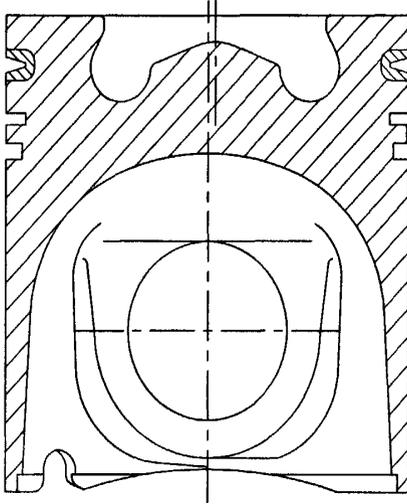


图 2.4 国 II 阶段的典型缩口式燃烧室

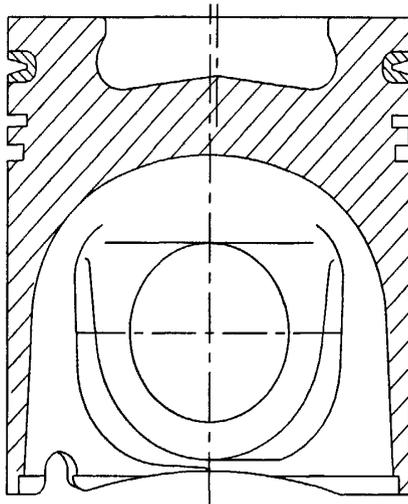


图 2.5 国 III 阶段的典型浅盆型燃烧室

2.4 增压及空空中冷优化

增压可提高柴油机过量空气系数，燃烧完全，有效抑制 PM 的产生。增压后燃油消耗率下降，CO 和 HC 也会进一步降低，同时增压使进气温度提高，使燃烧温度增加，致使增压后 NO_x 排放比非增压要高。对此可采用增压中冷^[8]的方法使进气温度降低，以控制 NO_x 的恶化。一般进气温度降低 1°C ，最高燃烧温度和排气温度可降低 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ，这显然有利于 NO_x 排放量的降低。

国Ⅲ排放发动机要采用涡轮增压及空—空中冷技术，以提高进气量、改善燃烧过程。采用空—空中冷方式比水—空中冷技术能有更高的冷却效率，使增压空气得到充分冷却，空气密度得到进一步提高，参与燃烧的过量空气系数得以提高。图 2.6 是一款类似机型在采用了增压中冷技术前后的发动机排放对比示意。

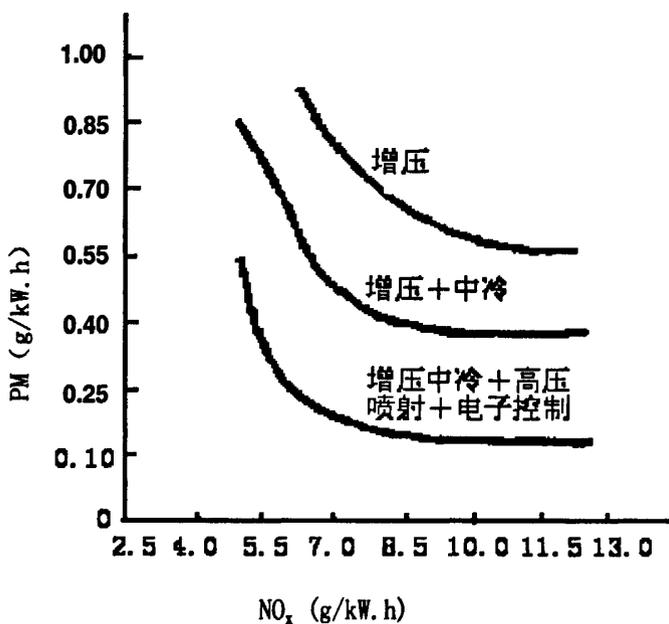


图 2.6 采用增压中冷前后的排放对比示意

经过对数款增压器特性的分析比较，选择了一款增压器用为本课题研究。该涡轮增压柴油机按速度特性运行时，在低工况时柴油机的运行线与喘振区有一定的安全距离，同时为了避免高速大负荷工况时增压比过高，采取了废气旁

通技术,使得在标定工况点运行时发动机爆压不超标。图 2.7 为本研究发动机所选配的增压器特性图。

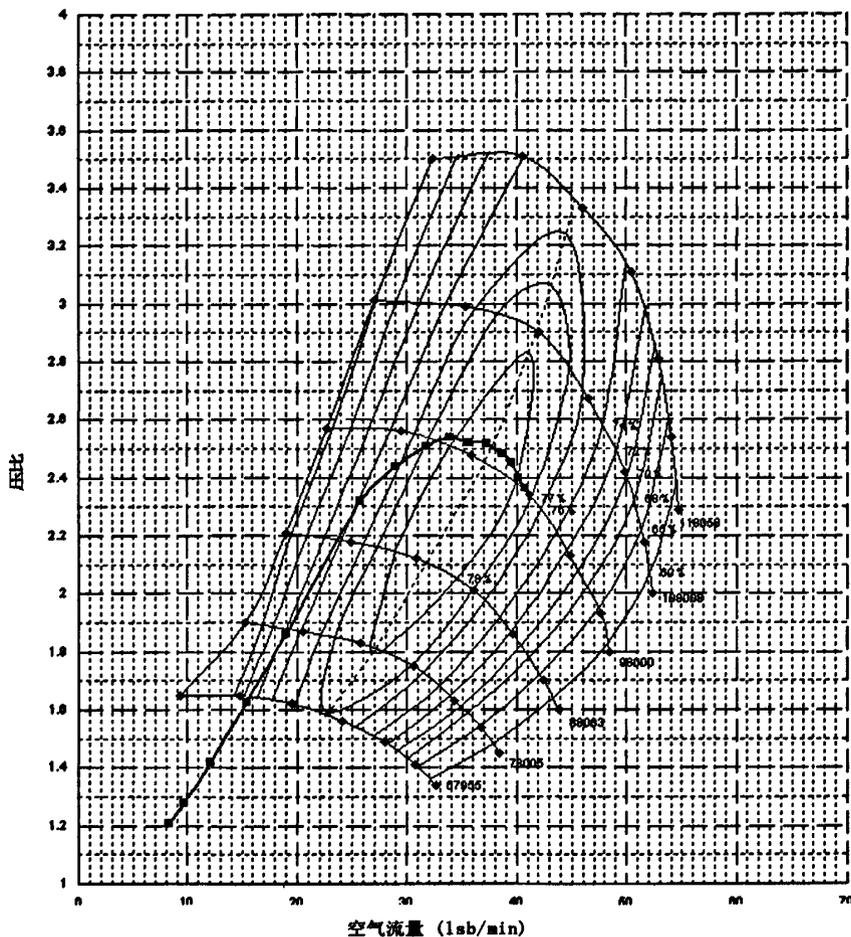


图 2.7 本研究发动机所选配的增压器特性图

2.5 进一步降低机油耗

由于柴油机的颗粒排放主要是由碳烟、硫酸盐及水分子和部分未完全燃烧的燃油和机油所产生的。前部分是有机不可溶部分,后部分是有机可溶部分。这四种成分的相对组成比例取决于发动机混合气燃烧状况、机油消耗、柴油含硫量。其中机油所形成的颗粒约占颗粒排放中的三分之一。所以进一步降低机油耗是实现国III排放中的重要一环。经验表明,将发动机额定工况时机油耗与

柴油耗的比值由国 II 时的 0.25% 以下控制到 0.2% 以下, 是达到国 III 颗粒排放的一个必要条件。

通常缸套表面引起的机油耗是主要原因, 机油通过活塞环窜入气缸内燃烧, 未燃尽部分随排气系统排出是机油耗损的主要原因, 约占机油耗损的 90% 以上。其中, 缸套变形是引起机油耗增大的主要因素, 其原因包括缸套变形; 缸套表面组织储油能力; 缸套、活塞环和环槽的磨损率; 缸套表面温度; 活塞环表面拉伤; 活塞环截面的结构、弹力及运动; 活塞侧向受力等。课题研究发动机测试表明其机油耗在 0.2g/kW.h 时, 性能及排放指标均能较好的满足开发要求。

为尽可能的降低机油耗率, 在设计中可以提高缸套、缸盖的刚度、铸造质量和加工精度, 通过降低缸套在发动机运转时的变形^[9], 以减少机油耗, 可以控制通过气门导管及增压器的机油泄漏来控制不正常的机油耗, 可以使用优质优化钢制活塞环, 提高活塞环弹力和刮油能力, 也可以通过进一步改进缸套生产中采用的多网纹小平台工艺, 形成浅槽形机油储油槽, 并特别关注缸套加工过程中的石墨暴露率。通过扫描电镜观察, 课题研究发动机缸套的珩磨表面没有明显的金属塑性流动, 这些措施能显著降低机油消耗量。

由于本研究中的原有机型的机油消耗已经采取了上述的相关措施, 包括提高机体缸盖刚度控制缸套六阶变形量(通过使用 V-INCOMETER 测量缸盖主螺栓拧紧后缸套轮廓, 并进行付立叶分析后得到缸套变形各阶数对应的变形量。)、改善缸套珩磨粗糙度、硬质钢环等措施, 在课题研究发动机中, 六阶变形量都小于 5 μ m, 这些措施的采用得以保证课题研究发动机机油耗达到开发目标要求。

2.6 柴油品质改善

柴油品质对发动机的影响主要包括两个方面, 一是对燃油喷射系统耐久性的影响, 另一是对发动机燃烧过程、性能、排放的影响。

美国从 1993 年重型车柴油机开始执行 EPA94 排放标准时, 其柴油的含硫量标准就控制为 500ppm, 欧洲于 2000 年开始执行欧 III 标准时, 其柴油的含硫量已控制到 350ppm。目前, 中国执行的柴油标准中燃油含硫量为 2000ppm, 2003 年 2 月, 已开始拟定新的城市用柴油标准 (GB/T9147-2003), 这份推荐性的标准规定含硫量应达到 500ppm。考虑到国内柴油供应工业的实际情况, 到目前为止,

实际上还不能达到 350ppm 的水平，并有相当的差距。

从柴油品质对发动机燃烧过程、性能、排放的影响来看，包括其燃油硫含量、十六烷值、总芳香烃含量、多环芳香烃含量。从对燃油系统耐久性方面的影响来看，有影响的因素包括：燃油润滑性指标 (HFRR)、柴油杂质与颗粒物含量、水含量、混合物。

由于柴油机颗粒排放中，有一部分是由未充分燃烧的燃油产生的。由于燃油中含有硫，在燃烧过程中，燃油中一小部分硫会转变成硫酸盐及水分子，所以柴油中含硫量对颗粒排放的影响较大。通过油品对排放的敏感性测试表明，高硫含量的燃油完全可能导致发动机排放超标。

为分析不同硫含量燃油对低排放柴油排放、性能的影响，在同类机型上选用了三种分别在 1620ppm (高硫燃油)、260ppm (国III燃油)、44ppm (低硫燃油) 的柴油进行测试，测试所得结果见图 2.8~图 2.12。

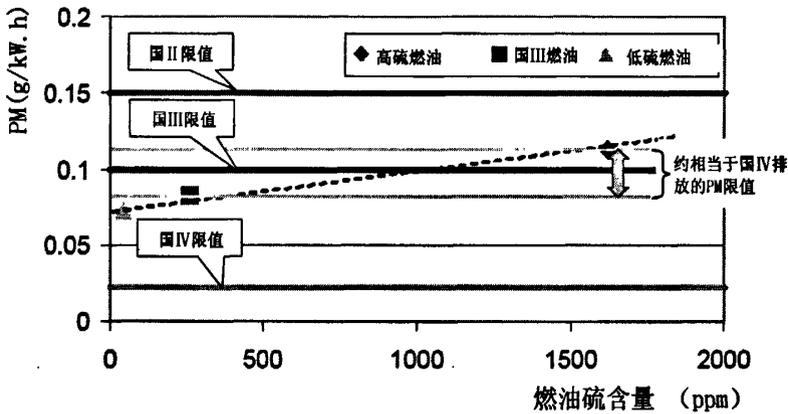


图 2.8 硫含量对 PM 排放的影响

测试结果表明，采用国III燃油可以达到国III排放法规所规定的颗粒排放要求，而高硫燃油的颗粒物排放明显超标。在测试样机上，由于硫含量差异所导致的发动机颗粒差异达到了 0.02g/kW.h，不但导致发动机排放超出国III限值，而且发现这一敏感值刚好相当于国IV法规所规定的 PM 限值。也即表明，在国IV阶段仅仅由于柴油含硫的超标就有可能使得发动机 PM 排放物总是不能达标。图 2.9 表明硫含量的高低基本对 NO_x 没有影响。图 2.10 表明硫含量的高低基本对 HC 排放没有影响。图 2.11 表明硫含量的高低基本对 CO 排放没有影响。图 2.12 表明低硫含量的燃油对发动机燃油消耗率略有改善。

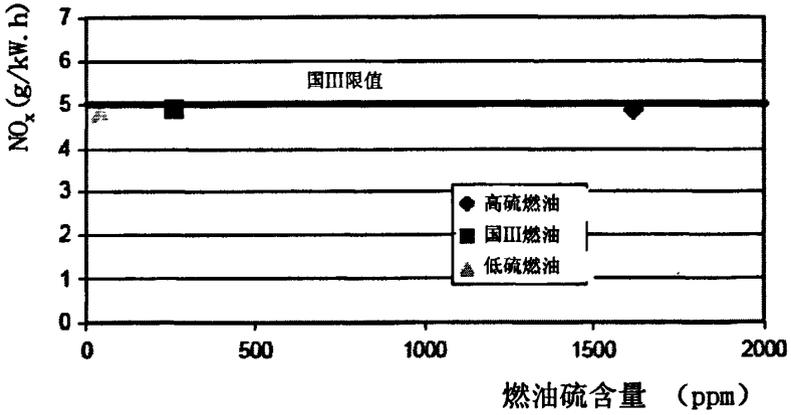


图 2.9 硫含量对 NO_x 排放物的影响

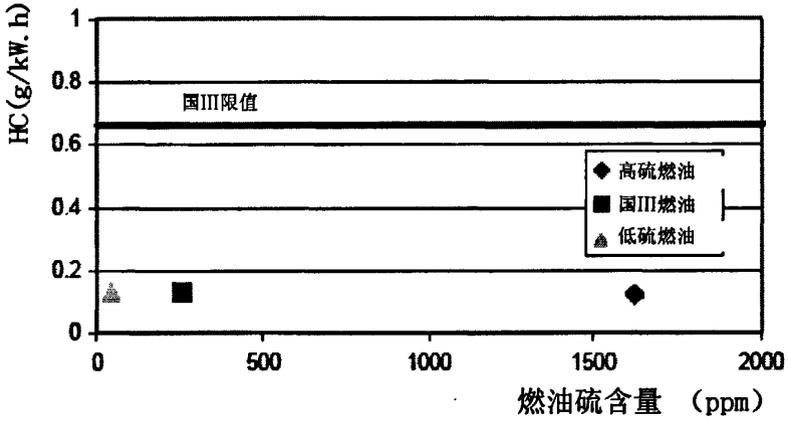


图 2.10 硫含量对 HC 排放物的影响

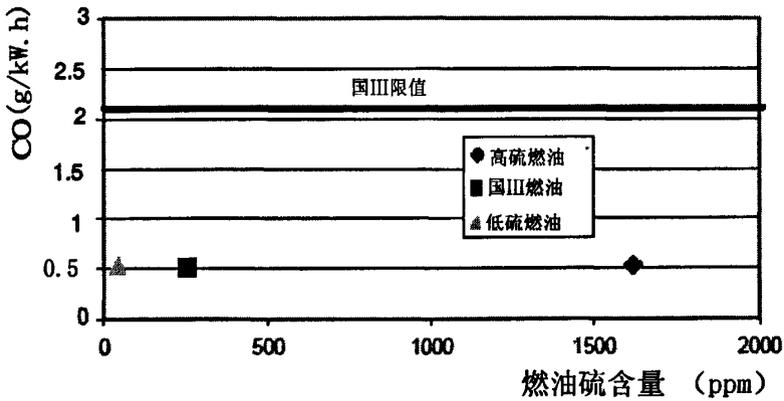


图 2.11 硫含量对 CO 排放物的影响

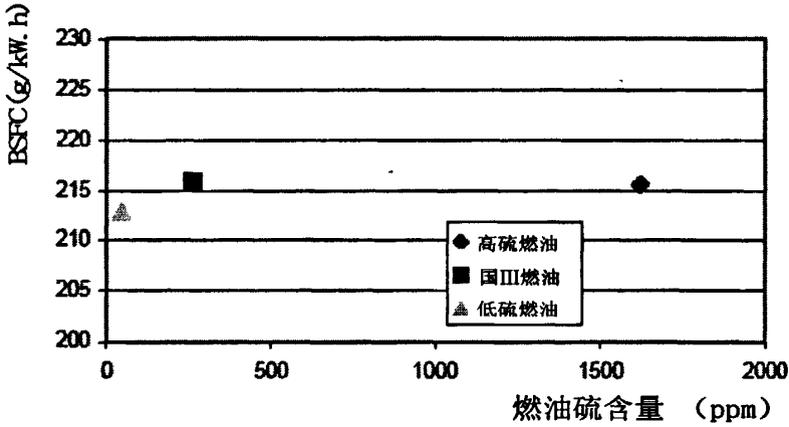


图 2.12 硫含量对燃油消耗率的影响

根据上述的分析测试，表明为满足国III法规的排放要求，合理的柴油硫含量应该在 350ppm 以下，为达到国IV排放法规的要求，其硫含量应该达到 50ppm 的水平（图 2.8）。

除了柴油的含硫量之外，十六烷值对燃烧过程也有着一定影响，是柴油品质的一个主要特征参数，十六烷值越大，燃烧过程进行得越好，但是 NO_x 的排放也会越大。根据经验，十六烷值应该不低于 51。总芳香烃含量越低越好，一般应该低于 25%，最好是能够低于 10%。多环芳香烃含量不应该大于 1%。

根据燃油喷射系统供应商对燃油系统耐久性方面的经验，在柴油润滑特性指标方面，其 HFRR 试验（高频往复机台架试验）的最大允许磨损值不应超过 460 μm；而为避免对燃油系统的磨损和侵蚀，柴油中水含量应该小于 200mg/kg，并且在燃油中没有自由水存在；杂质和颗粒物含量应小于 10mg/kg；并且不应该有混合物（如酒精）存在。

第3章 电控高压燃油喷射系统

3.1 电控系统概述

如前两个章节所述,为提高柴油机的排放和性能水平,必须要突破传统直列泵供油系统的固有缺陷。而为突破此缺陷,必然的选择路线就是采用电子控制的燃油喷射系统。

由于近年来迅猛发展的电子控制技术^{[10][11]},通过对相关的硬件和软件的设计优化,完全可以使得电控燃油喷射系统具备下述能力。

3.1.1 对喷油量精确、灵活控制的能力

在电控燃油喷射系统中,驾驶员通过踩踏电子油门反映其驾驶意图,ECU通过采集电子油门的电压信息从而判断驾驶员的需求,并据此供给发动机相应的燃油喷射量,通过对软件数据的设定,几乎可以调试出任意特性的发动机调速特性,满足不同行驶工况的需求,取得在两级式调速工况和全程式调速工况间的折衷。

在共轨系统和泵喷嘴系统中,对喷油量的控制主要是通过控制喷油器顶端电磁阀吸合的时间脉宽来进行控制的,电磁阀通电吸合后,喷油器内柱塞顶端上移,喷油过程开始,反之当电磁阀断电闭合后,喷油器内柱塞下行,喷油过程结束。在单体泵系统中,喷油量的控制则由安装在高压油泵出油阀处的电磁阀打开时间脉宽进行控制。

ECU还可以通过大气压力传感器、发动机出水温度传感器、转速传感器、进气温度传感器、进气压力传感器、燃油温度传感器,对环境温度、海拔高度、是否处于冷启动工况、是否达到最高转速限制等,自动与软件中预设值进行比较计算,从而决定对发动机如何进行油量补偿控制。

由于能够对任意工况的进气状况进行测量,从而控制系统能够完全根据进气量决定燃油喷射量,改善柴油机急加速工况下冒黑烟的情况。

由于对转速的精确测量,控制系统随时可以判断各缸工作不平衡的状况,并计算决定如何通过燃油喷射进行补偿。

3.1.2 对喷油正时柔性控制的能力

在电控共轨燃油喷射系统中,喷油正时决定于 ECU 何时控制喷油器顶端的电磁阀吸合时刻,电磁阀吸合,柱塞上升,燃油即开始喷射,电磁阀闭合,柱塞下降,则燃油喷射结束。喷油时刻可以在 ECU 的软件数据中灵活设置,完全独立于发动机转速的限制,可以在任何转速、负荷情况下运行最佳的喷油提前角。

3.1.3 对喷油压力柔性控制的能力

由于电控燃油喷射系统中,通常其供油泵可以不再承担喷油正时控制的功能,因而可以对油泵凸轮轴优化设计,使其能提供最大供油油量到油路中,同时通过油路上的油压传感器将实际油压及时反馈到 ECU,从而判断是否达到预设的喷射压力,若与设定压力值不一致,则 ECU 通过控制供油泵的柱塞回油量对油路压力进行调整。

由于上述控制方式,可以灵活对油泵供油压力进行柔性控制。

3.1.4 对怠速进行反馈控制

根据发动机特性或车辆驾驶特性的需要,可以在 ECU 内设定希望的怠速转速,ECU 会根据转速传感器所测得的实际转速与目标怠速转速的差异,对怠速供油量进行自动加减以快速达到怠速转速的稳定。当实际转速低于设定的怠速转速时,ECU 对喷油量自动进行增加,反之则自动降低,从而起到对怠速转速进行调整的目的。

考虑到发动机在不同环境下对怠速油量的需求不同,比如低温冷起动时发动机同样怠速转速所需的油量比常温下起动发动机后的怠速运转所需油量明显偏大,在电控系统中,ECU 可以通过水温传感器探知环境信息,从而自动对怠速喷油量进行增减,而此功能对机械泵系统几乎是不可能完成的。

3.1.5 其它特殊控制、通讯功能

经过与整车的 CAN 总线系统进行合理匹配,如 ABS/ASR/CAN 仪表等系统联合优化后,可以更好地发挥整车潜力,优化整车性能,并提高驾驶的舒适性、

可靠性。

电控系统一般都带有自诊断功能，在系统出现故障时不但可以通过不同的方式给司机、维修人员以直观的提示信息，同时还能够在故障时使得系统进入所预先设定的安全运行模式，如跛行功能。

对特殊工况进行特殊控制，比如经过高温、高原、高寒标定的整车即便行驶于普通地区与此类特殊地区之间，也无碍于整车性能、可靠性的发挥。

作为现代发动机开发的核心技术之一的电控高压燃油喷射技术，国际上主要分为三大路线，一是电控高压共轨系统、一是电控单体泵系统、一是电控泵喷嘴系统。

在中重型车用柴油机的电控燃油系统方面，国内市场上主流供应商包括日本电装（DENSO）公司、德国博世（BOSCH）公司以及美国德尔福（DELPHI）公司，且国内市场上基本没有柴油机制造厂家应用电控泵喷嘴系统这一技术路线。

其中，电装公司提供其高压共轨燃油喷射系统作为国Ⅲ发动机的解决方案，博世公司也提供电控高压共轨燃油喷射系统，虽然博世公司各种燃油系统都有成熟产品，德尔福公司主要提供电控单体泵系统。这些国外的电控及其标定系统的研究已经基本完备，具备实用性^{[12][13]}。

3.2 电控单体泵系统

作为在国内外都有着成熟应用的电控单体泵^{[14][15][16]}技术，其基本构成是：将油泵柱塞驱动与发动机配气机构所需凸轮轴整合为一体，包含在机体内部，从而实现油泵到喷油器的燃油管路最短化，发动机工作时则通过发动机周围安装众多的传感器以探察发动机状态，作为控制油泵电磁阀时间控制要求的输入信息，对燃油喷射量、喷射正时实行电子控制。其主要工作原理是通过电子系统对喷入气缸的喷油量、喷油正时进行精确、柔性的控制，以及通过油泵结构设计的优化进而实现对喷入气缸喷油压力的提高，从而改善发动机的燃烧过程，从而在有效降低发动机的排放水平以满足国Ⅲ排放法规的同时，还能够较大改善发动机的燃油经济性和噪声特性。图 3.1 所示为单体泵系统构成示意图，该系统已在欧美成功使用了多年，被公认为性能优越、稳定可靠的电控燃油喷射系统之一。

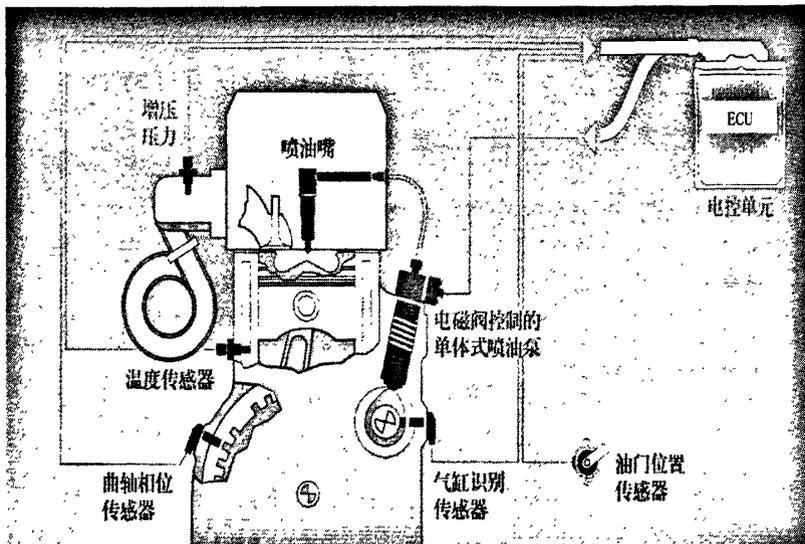


图 3.1 电控单体泵系统示意图

电控单体泵燃油喷射系统主要包括一个带有出油控制阀的高压油泵、机械喷油器，连接所需的燃油管路、滤清系统。其技术的主要特征是在发动机机体上集成喷油泵的功能，并通过在油泵上加装电磁阀控制其出油时间、油量，从而达到燃油喷射优化的目的。其油泵与发动机凸轮轴共用一根凸轮轴，从而在结构上使其最大程度得到简化，并缩短了油泵出油口到喷油器的管路距离。由于在油泵的出油口加装的能够精确进行燃油计量、时间控制的电磁阀，因而定时能够对喷油正时和喷油量进行较为精确的控制，有利于燃烧过程的优化。由于其油泵提升压力原理与直列泵类似，所以其喷油规律为“三角形”的前缓后急的特征，一定程度上有利于燃烧过程的优化。尽管最高压力可达到 180MPa~200MPa，但压力随发动机转速下降而降低，低转速区域压力较低，因而不利于柴油机低速性能的提高。但由于其喷油器的喷油开启方式仍是依靠弹簧压力控制，不可能进行多次喷射，如果进入国IV阶段，可能需重新换用新燃油系统（国IV一般需要使用催化器，并要求喷油器具有需多次喷射能力）。

同时，在国内产品应用中，考虑到重新设计发动机机体需要对现有的发动机机体重新铸造，加工生产线变动较大，为控制成本，一般都采用外挂箱式单体泵，而这种设计，很难避免较大的驱动扭矩及噪声^[17]，如图 3.2 所示。

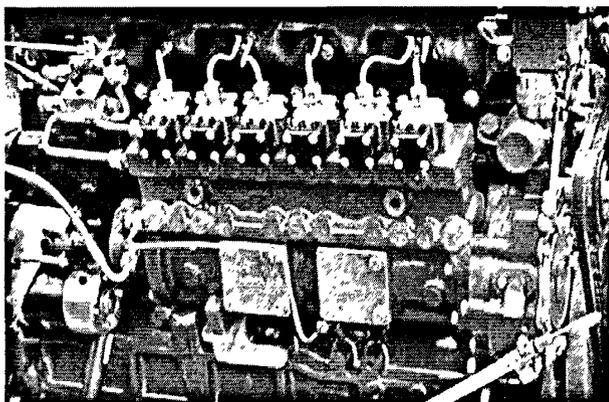


图 3.2 外挂式单体泵系统

总的来说，电控单体泵系能够满足国Ⅲ排放控制阶段发动机对燃油系统的要求，但是对国Ⅳ以后发动机的开发升级存在较大困难。部分单体泵技术通过将机械喷油器改进为电磁阀喷油器后，也能够实现多次喷射，但由于对喷油器实行二次电子控制，结构较为复杂。

3.3 电控泵喷嘴系统

电控泵喷嘴技术是将燃油压力提升、正时、油量控制的全部功能都集成起来安装到发动机气缸盖上的一种方式。

该系统主要设计原理是通过气缸盖顶端的顶置凸轮轴直接驱动电控泵喷嘴产生高压，图 3.3 为电控泵喷嘴系统示意图。由于没有了额外的高压燃油管路，消除了管路压力损失，避免了管路泄漏的可能，并由于燃油增压与喷射装置的一体化，可以在短时间内高效、高压地完成燃油喷射，且对其喷油量、喷油压力、喷油正时进行灵活控制，电控泵喷嘴系统的喷油压力可超过共轨系统和单体泵系统所能够达到的水平。

但是这种结构需要发动机进行缸盖顶置凸轮轴的结构设计，加大缸盖的刚度、强度。按国外产品经验，采用该设计的发动机，气缸内能够承受的最大爆发压力一般需要达到 20MPa，其优势是可以形成更高的喷射压力，并直接过渡到

国IV、国V产品中，当然其整机也一般都具备进行满足国IV、国V排放升级的潜力。但由于其设计要求顶置凸轮轴，需要改变驱动凸轮轴的传动系，结构设计变动较大，而且对缸盖的刚度设计要求较高，国内到目前为止还没有此种系统的实际应用。

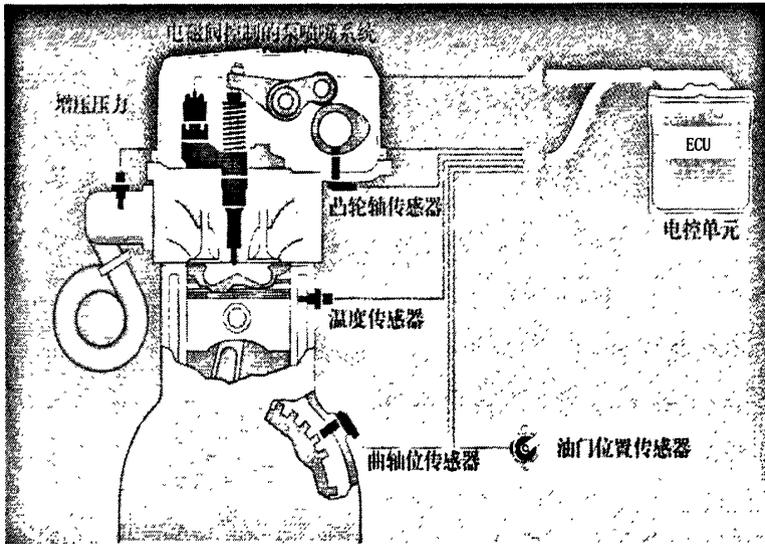


图 3.3 电控泵喷嘴系统示意图

3.4 电控高压共轨系统

有关共轨式喷射系统概念的提出已有很长时间，早在 1913 年瑞士苏黎世大学的 Vickers 首先提出这一设想并形成专利。20 世纪 60 年代后半期，瑞士的 Hiber 教授开发成功柴油机电控共轨系统的“原型”。其后，以瑞士工业大学的 Ganser 教授为中心对电控共轨系统进行了一系列研究。20 世纪 90 年代初，Fiat 公司在都灵市 Orbassano 的其它几个子公司一起开发研制了一个完整的高压共轨式喷射系统。

1993 年 6 月由德国 Bosch 公司收购菲亚特公司电控共轨系统的技术，开发电控共轨式燃油系统，承担共轨式电控喷射系统的最终开发和生产准备，并于 1997 年年末，开始批量生产轿车柴油机用电控高压共轨系统。

在日本,上世纪九十年代,电装公司和丰田汽车公司共同研制开发了ECD-U2型电控共轨系统^[10],并于1995年末,将ECD-U2型电控高压共轨系统成功地应用于卡车柴油机,开始批量生产,从此开创了柴油机电控共轨燃油系统的新时代。

到目前为止,共轨式电控喷射系统已在轿车和中重型卡车的柴油机上都得到批量应用。

作为国内当前大多数国Ⅲ柴油机开发厂家选择的电控高压共轨技术,其基本系统构成如图3.4所示。

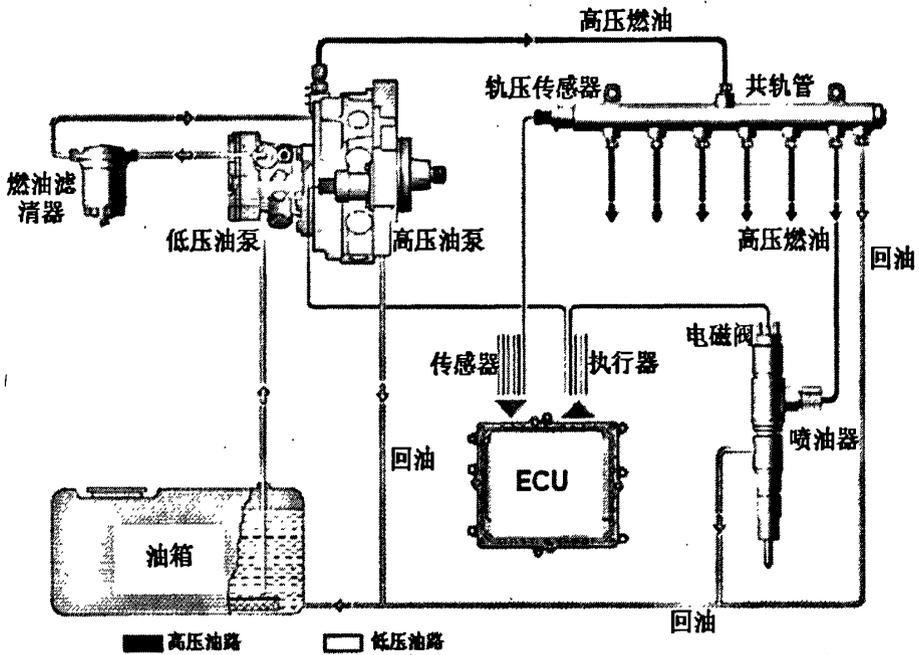


图 3.4 电控高压共轨系统构成示意图

在共轨系统中,通过增设具有一定蓄压腔容积以用来存储高压燃油的共轨管,由高压油泵直接将发动机运行所需要的合理油量压入共轨管内,电子控制单元通过在发动机周围所安装众多传感器以探察发动机工作状态,并根据预先标定好的数据对燃油喷射过程全部实行电子精确控制,其主要的直接控制对象包括油泵和喷油器,通过控制高压油泵出油阀端的电磁阀可以控制进入共轨管内燃油量,从而达到控制共轨管内燃油压力的效果,通过控制喷油器顶端电磁阀的吸合过程可以控制喷油器的喷油时刻与喷油油量,并且只要喷油器电磁阀

的响应足够快，可以在一个工作循环中进行多次燃油喷射。

根据本研究的发动机上取得经验，柴油机燃油的多次喷射控制对柴油机燃烧过程有显著影响，包括对排放、噪声都有着不同的影响区域，其不同的喷射阶段对发动机排放和性能的影响，如图 3.5 所示。

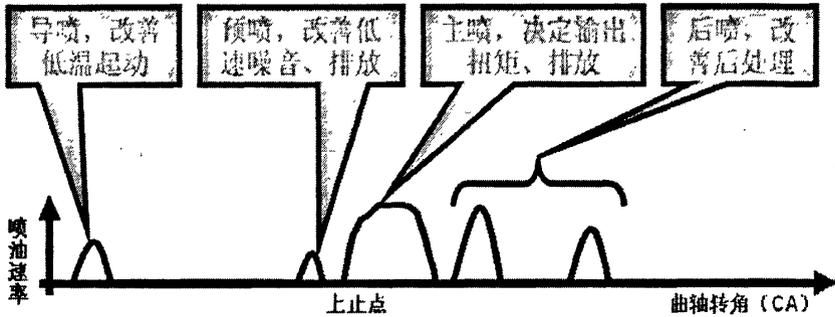


图 3.5 多次喷射对本研究柴油机排放和性能的影响示意图

进一步对图 3.5 中提及的预喷进行分析发现，之所以预喷能够对柴油机的 NO_x 排放和噪声起到改善作用，是由于预喷的少量燃油起到了改善燃油预混合的作用，使得缸内燃烧过程变得更加柔和，具体表现就是柴油机的放热率尖峰明显受到改善，放热率过快显然会导致过高的 NO_x 和较高的燃烧噪声，具体如图 3.6 所示。

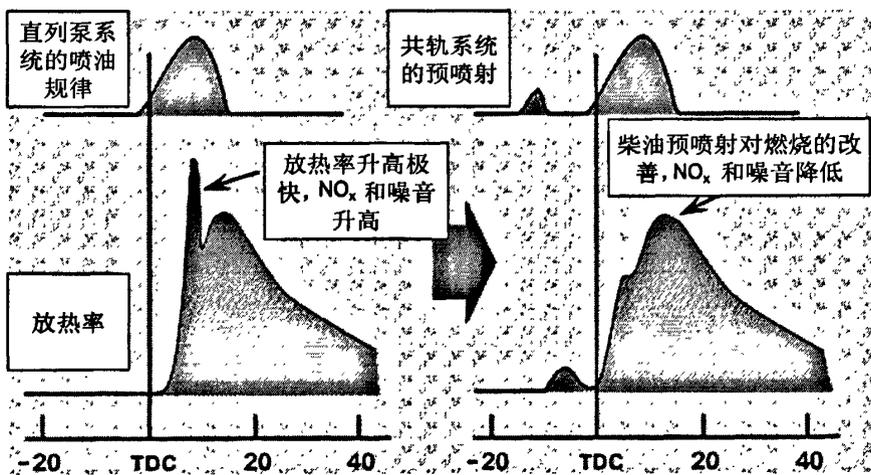


图 3.6 预喷射对 NO_x 和噪声特性的影响

众所周知，直列泵低速性能差的一个重要原因就是在于其低速时喷油压力低，而直列泵柴油机的喷油压力和发动机转速是线性相关，其设计原理决定其低速不能实现高喷射压力。而通过共轨系统的设计，可以保证发动机即使在低转速情况下，也可以得到较高的燃油喷射压力，根据本研究发动机的经验，在发动机低转速阶段可以轻易的达到 100MPa 的燃油喷射压力，而这一压力在直列泵柴油机系统上几乎不可能达到。由于低速阶段燃油压力的改善，从而在低速阶段低进气涡流的情况下实现更好的柴油雾化，改善燃烧，进而克服直列泵柴油机低速性能差、易冒烟的问题。图 3.7 简要示意了本研究试验机所匹配的共轨系统所能够达到的喷射压力与转速关系。

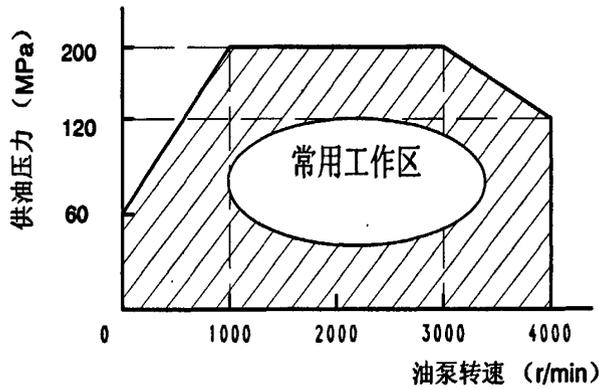


图 3.7 共轨系统燃油压力供给能力

由于以上的产品设计特性及易于匹配的特点^[19]，共轨系统被选定为本研究发动机所采用的燃油喷射系统。并且，从目前国内厂家应用来看，共轨系统也是当前国内大多数发动机厂家选定的面向未来低排放发动机的燃油喷射系统，不但应用在国 III 产品上，而且将延续到国 IV、国 V 系列产品上。

在本研究发动机上，在没有对发动机主体零部件作大规模变更设计的前提下，完成了共轨系统的匹配设计，完全可以和原有产品进行共线生产，证明了共轨系统与原有系统的良好兼容性。图 3.8 表明了共轨系统在本研究发动机上的布置外形图（左上）以及 G2 型电控喷油器（右上）、共轨（左下）、HP0 型高压油泵（右下）。可以看出，其油泵与直列泵相比，由 6 缸缩短为 2 缸，通过在油泵试验台上对 HP0 型电控高压油泵和 NB 型直列泵的测试，在同等输出供油压力、供油量情况下，HP0 型电控高压油泵驱动力矩、泵端噪声都显著降低。

另外，该系统也已经在日本和美国成功使用了多年，被公认为性能优越、稳定可靠的电控燃油喷射系统。

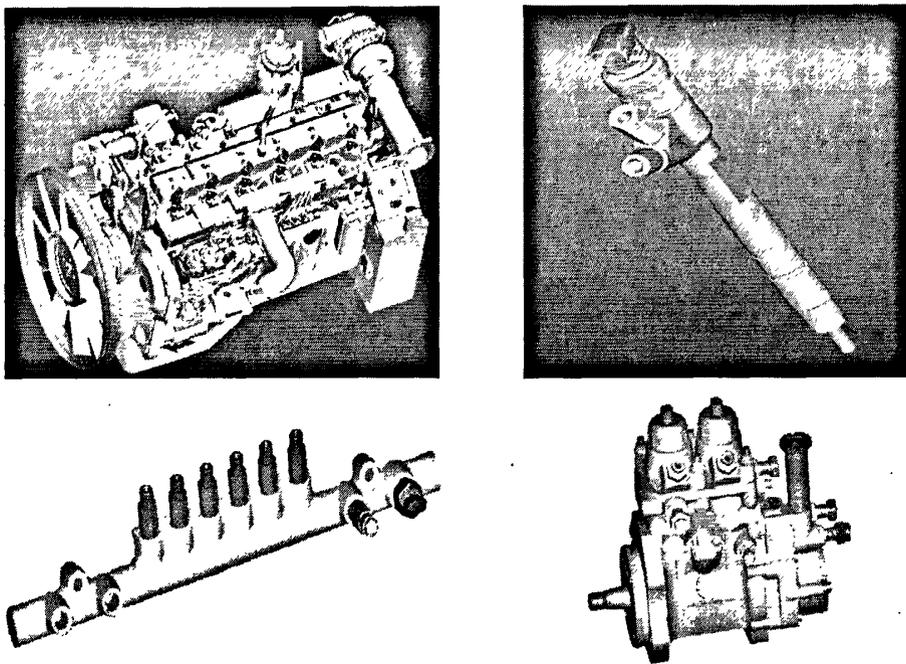


图 3.8 ECD-U2 电控高压共轨燃油喷射系统

3.5 选定的燃油喷射系统规格

在确定了燃油系统为共轨系统后，按本研究发动机的目标性能要求，对其系统能力进行能力需求评估计算。

为便于描述，此处定义 P 为功率 (kW)； g_e 为比油耗 (g/kW.h)； N_p 为油泵转速 (r/min)； ρ 为燃油密度 (g/mm³)； M 为扭矩 (N.m)； N_e 为发动机转速 (r/min)； Q_1 为标定工况下喷油器每工作循环喷油量 (mm³/st)； Q_2 为为最大扭矩工况下喷油器每工作循环喷油量 (mm³/st)； Q_3 为低速大扭矩工况下喷油器每工作循环喷油量 (mm³/st)；

3.5.1 供油油量、供油压力

对于达到国III排放标准的柴油机而言,由于其标定转速不在其排放控制区以内,因而其可能的最大喷射压力一般都在标定点工况(参照图 1.3 及 A、B、C 的转速计算规定),以便达到最佳的油气混合效果,从而改善其燃油消耗率。与其燃烧规律对应,其喷射压力一般在 160MPa 以下,而其标定点的喷油量则可以由以下公式估算:

$$\begin{aligned} Q_1 &= P \times g_e / (60 \times N_p \times 6 \times \rho) \\ &= 235 \times 220 / (60 \times 1100 \times 6 \times 0.00083) \\ &= 157 \text{ mm}^3 / \text{st} \end{aligned}$$

其中,标定点油耗率引用一般该工作范围柴油机的常规燃油消耗率。

最大扭矩点的供油量、供油压力:

$$\begin{aligned} Q_2 &= M \times N_e / 9550 \times g_e / (60 \times N_p \times 6 \times \rho) \\ &= 1250 \times 1400 / 9550 \times 200 / (60 \times 700 \times 6 \times 0.00083) \\ &= 175 \text{ mm}^3 / \text{st} \end{aligned}$$

考虑到最大扭矩点一般都处在柴油机的排放控制区内,在该工况下为保证发动机的 NO_x 和颗粒物排放能够在法规限定值以内,通常要采取限制其喷射压力、喷油提前角的措施,根据经验,其喷油压力一般在 120MPa 以下。

低速扭矩点所需供油量、供油压力:

$$\begin{aligned} Q_3 &= M \times N_e / 9550 \times g_e / (60 \times N_p \times 6 \times \rho) \\ &= 7508 \times 00 / 9550 \times 220 / (60 \times 400 \times 6 \times 0.00083) \\ &= 116 \text{ mm}^3 / \text{st} \end{aligned}$$

根据经验,该点供油压力不会超过 100MPa。

在怠速点,要求供油系统能够提供维持发动机运转所需的最小燃油量,由于通过电控供油系统自身的 PID 反馈模式计算,柴油机可以维持在任何设定的怠速转速下进行稳定运转。

初步选定电装公司 HP0 泵作为该型柴油机开发用电控泵,图 3.9 为该高压油泵的供油量特性。

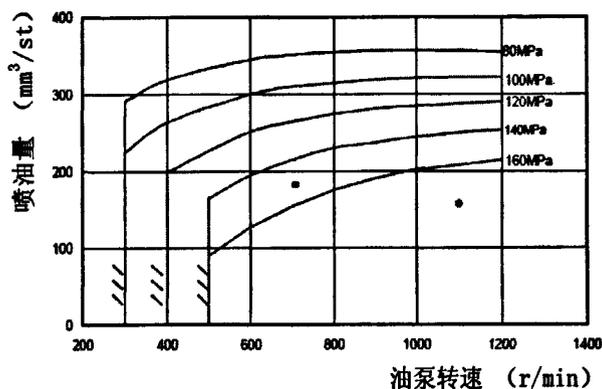


图 3.9 电装公司推荐的 ECD-U2 系统的供油压力、油量特性

3.5.2 燃油喷射的响应时间

对电控供油系统来说，其燃油喷射受到电磁阀控制，其对电磁阀的响应时间^[20]要求往往取决于发动机最小喷射量的要求，否则很可能造成数次喷射之间没有真正断开。

在标定工况下，发动机每一工作循环时间为：

$$T_1 = 60 / (2200 / 2) = 0.0545\text{s} = 54.5\text{ms}$$

根据测试结果及经验，通常的喷油持续期在 $25 \sim 36^\circ \text{CA}$ 左右，在标定工况下所要求的燃油喷射持续时间：

$$T_2 = T_1 * 30 / 720 * 1000 \approx 2\text{ms}$$

为满足喷油器多次喷射的正常响应能力要求，喷油器的电磁阀控制最小响应时间约在相当于喷油持续期的五分之一左右，即：

$$T_3 = T_2 * 1 / 5 \approx 0.4\text{ms}$$

按照上述从燃烧角度分析，确定了喷油器的要求响应时间，并初步选定电装公司产的 G2 型电控喷油器。图 3.10 为电装公司提供的 G2 型电控喷油器^[21]，该喷油器驱动装置为高速电磁阀，喷油最短响应时间间隔为 0.4ms。

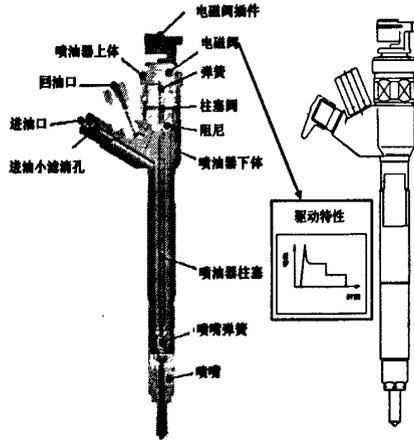


图 3.10 电装公司提供的 G2 型电控喷油器

3.5.3 燃油滤清器规格

根据发动机额定功率及其一般油耗指标，初步确定燃油系统小时最大供油量： $Q_1 = P \times g_e / \rho \times 1000 = 221 \times 220 / 830 \times 1000 \approx 59 \text{ (L/h)}$

考虑到上述 Q_1 是发动机理论上每小时所需最大油量，考虑到喷油器、油泵的正常泄漏回油，以及燃油滤清器工作能力潜力要求，选定基本的系统滤清器规格：

$$Q_{\text{filter}} = Q_1 \times 6 \approx 360 \text{ (L/h)}$$

图 3.11 所示为课题研究发动机所采用的燃油滤清器。该滤清器满足 ECD-U2 系统对燃油滤清品质的要求，对 $<5 \mu\text{m}$ 的颗粒过滤效率 $>98\%$ ，流量 $>6\text{L/min}$ 。由于滤清器使用中可能出现堵塞情况，要求在精滤器上设计有溢流阀，其规格应该根据燃油管路的压力特性来确定。

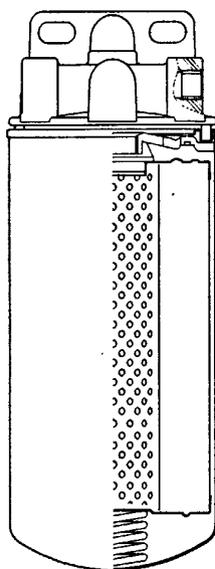


图 3.11 课题研究发动机所采用的燃油滤清器

第4章 标定技术

4.1 标定概述及其流程

在整个电控国Ⅲ柴油机开发的过程中，标定^{[22][23]}工作占有重要意义，决定了最终的产品性能状态。

标定工作分发动机台架标定、整车标定。台架标定主要标定发动机性能与排放，车辆标定主要标定行驶特性参数。结合课题研究内容，本章主要介绍对发动机的台架标定。

电控柴油机标定系统主要依赖于电子控制的燃油喷射系统，标定过程中，需要对各电子系统特性参数进行标定；发动机工作过程中的燃油喷射系统各个控制参数进行标定；以及对其它由发动机 ECU 控制的执行机构的工作参数进行标定。

总的来说，电控柴油机的标定是在现有发动机结构及燃烧系统硬件基础上，最大限度地发挥其性能与排放潜力，使其满足产品的市场需求。电控柴油机的标定内容涵盖了发动机在各种工况下使用特性的标定，比如常规环境下性能、特殊气候或环境下的补偿控制、故障状态下的系统安全模式等等，以一种类似于枚举的方式对发动机的各种工况进行特性标定。

标定过程^[24]包括发动机的基本性能标定、排放标定、整车电器电子特性标定、整车行驶特性标定、高温标定、高寒标定、高原标定、故障模式标定等等。

合适的标定能够在发动机发挥最佳潜力的同时，对发动机作出最好的保护，并提升车辆的驾驶舒适性、操控性。然而需要强调的是，设计或匹配状态不好的发动机即便进行最大的标定改善，仍然是不能够突破其固有硬件特性的，比如一辆热平衡设计不合理的整车与柴油机，虽然合理的标定可以保护发动机避免进入过热状态，但其付出的额外代价是对发动机与整车动力特性的超额牺牲。

不合理的标定（即便是优异的整车、发动机组装在一起），也会导致糟糕的使用效果，包括动力性和经济性、甚至会造成车辆或发动机使用过程中不可预测的风险出现。

在国Ⅲ发动机开发的台架标定工作中，可以简单分为三个阶段。首先要根

据外特性需求计算发动机的 A、B、C 转速（参照图 1.3 中 A、B、C 的计算规程），从而区分哪些运行工况区是排放控制区、哪些是非控制区。其次才是对发动机基本性能进行标定，使其能够达到开发目标的基本外特性指标。最后也是最复杂、仔细的是进行排放和性能的综合标定，这个工作通常需要结合发动机燃烧系统硬件的选型进行。

4.2 A、B、C 转速的计算

首先根据开发目标，在外特性上标出 2200r/min、1400r/min、800r/min 的扭矩和功率点。在本课题中，这三点所对应的功率、扭矩分别如表 4.1 所示。

表 4.1 课题发动机部分转速及其目标扭矩

转速 (r/min)	800	1400	2200
功率 (kW)	67	183	221
扭矩 (N.m)	800	1250	959

其次将外特性的扭矩和功率曲线进行平顺过渡的数据处理，处理后的外特性功率、扭矩曲线如图 4.1 所示。

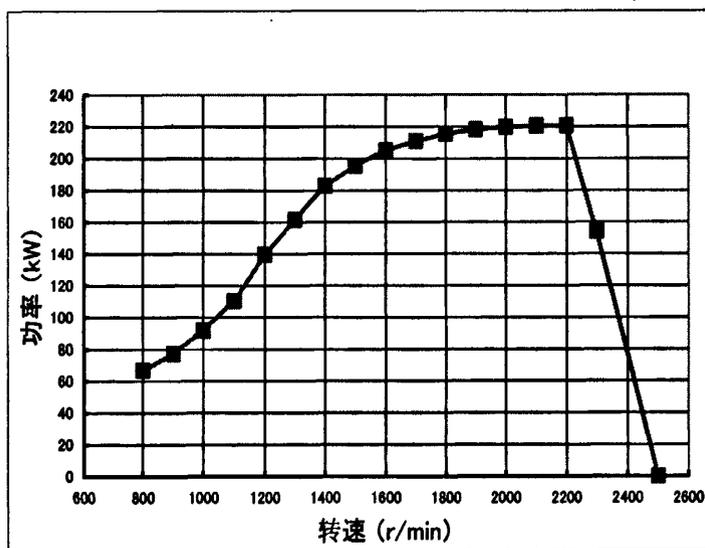


图 4.1 本研究发动机外特性功率曲线

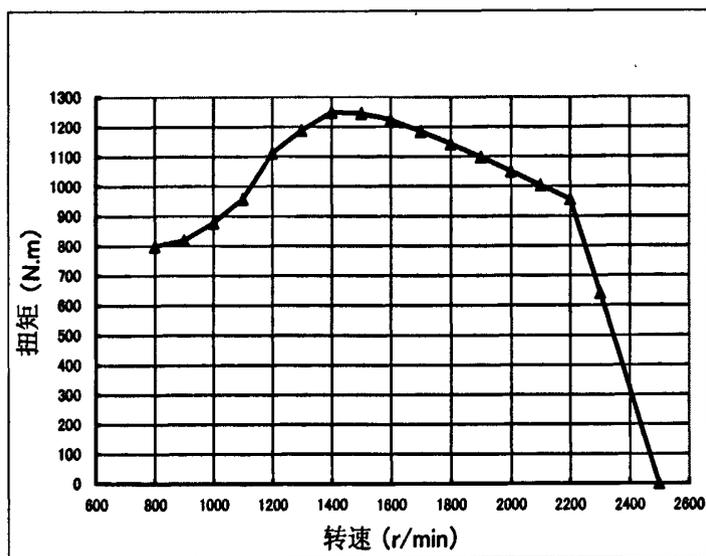


图 4.2 本研究发动机外特性扭矩特性

图中各转速点所对应功率、扭矩分别如表 4.2 所示。

表 4.2 本研究发动机外特性参数

转速 (r/min)	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2300	2500
扭矩 (N.m)	799	878	1112	1249	1225	1143	1050	958	641	0
功率 (kW)	67	92	140	183	205	215	220	221	154	0

表中：

$$n_{ref} = 2200 \text{ r/min}$$

$$n_{hi} = 2300 \text{ r/min (该点处功率为标定功率的 70\%)}$$

$$n_{lo} = 1100 \text{ r/min (该点处功率为标定功率的 50\%)}$$

据此，对 A、B、C 转速进行计算，结果如下：

$$\text{转速 A} = n_{lo} + 25\%(n_{hi} - n_{lo}) = 1400 \text{ r/min}$$

$$\text{转速 B} = n_{lo} + 50\%(n_{hi} - n_{lo}) = 1700 \text{ r/min}$$

$$\text{转速 C} = n_{lo} + 75\%(n_{hi} - n_{lo}) = 2000 \text{ r/min}$$

即本课题研究的发动机排放控制区转速在 1400r/min 到 2000r/min 之间，且其排放控制中的怠速转速为 700r/min。

4.3 基本特性标定

在确定了发动机的排放控制区范围后，按照发动机外特性的功率和扭矩要求，初步进行发动机的特性调试，包括发动机对喷油压力和喷油正时的敏感特性分析，也包括发动机在不同燃烧系统硬件组合下的性能表现。

4.3.1 喷油正时对排放和性能的敏感特性

对发动机喷油压力和喷油正时敏感特性分析包括全部排放控制转速范围内的不同负荷点。

图 4.3~4.5 是以某一转速 100% 负荷点的喷油正时特性测试案例，对每一测试点包括对其油耗、烟度、氮氧化物、一氧化碳、碳氢化物受喷油正时的影响进行分析。

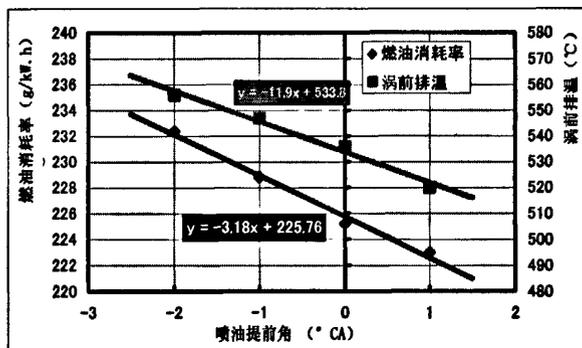


图 4.3 喷油正时对燃油消耗率、涡前排温的影响

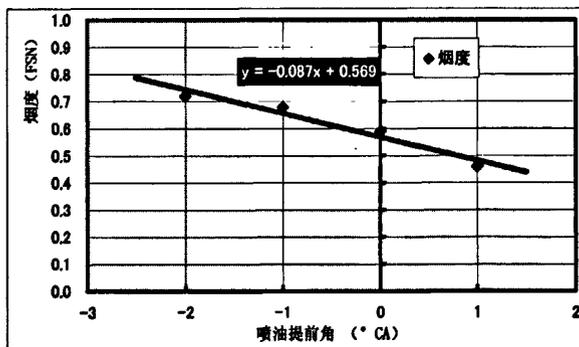


图 4.4 喷油正时对烟度的影响

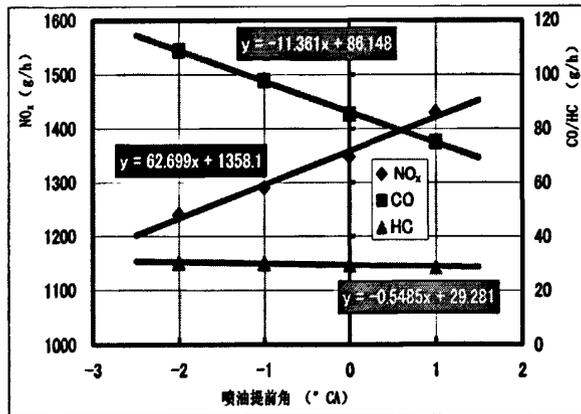


图 4.5 喷油正时对 NO_x、CO、HC 排放的影响

通过上述三个趋势图可以看出，在该负荷点上，随着提前角的增大，油耗、烟度、一氧化碳显著获得降低，碳氢化物变化不大，而氮氧化物快速增加。这一分析结果符合一般发动机的运行规律，这一规律及其具体参数可以作为后述标定的参数指导。

4.3.2 喷油压力、中冷温度对排放和性能的敏感特性

再就发动机喷油压力特性及中冷温度对发动机排放和性能的影响进行分析测试，研究方法与对正时特性分析方法一样。通过这些试验，可以完成发动机对喷油正时和喷油压力的敏感性测试，并总结出其对排放和性能影响的一般规律，从而基本确定发动机正常工作对中冷器的合理要求。研究认为对本研究机型来说，在环境温度 25℃ 的情况下，在标定点中冷后的进气温度应该控制在 45℃，而最大扭矩点时中冷后温度则应该控制在 40℃，按此形成的中冷温度控制 MAP 的要求显然是能够在实际运行中达到的。

4.3.3 燃烧系统零部件选型测试

完成上述敏感性测试分析后，再逐次对燃烧系统零部件进行选型试验，通常包括对增压器、喷油嘴、喷油器垫片厚度、缸盖涡流比、活塞形状等的选型测试，通过对这些燃烧系统的关键零部件的分析测试，可以最终选定出最为合适的配置组合，以同时满足本研究发动机对排放和性能兼顾的要求。

下面以对发动机缸盖涡流比的测试为例进行分析，见图 4.6 所示。

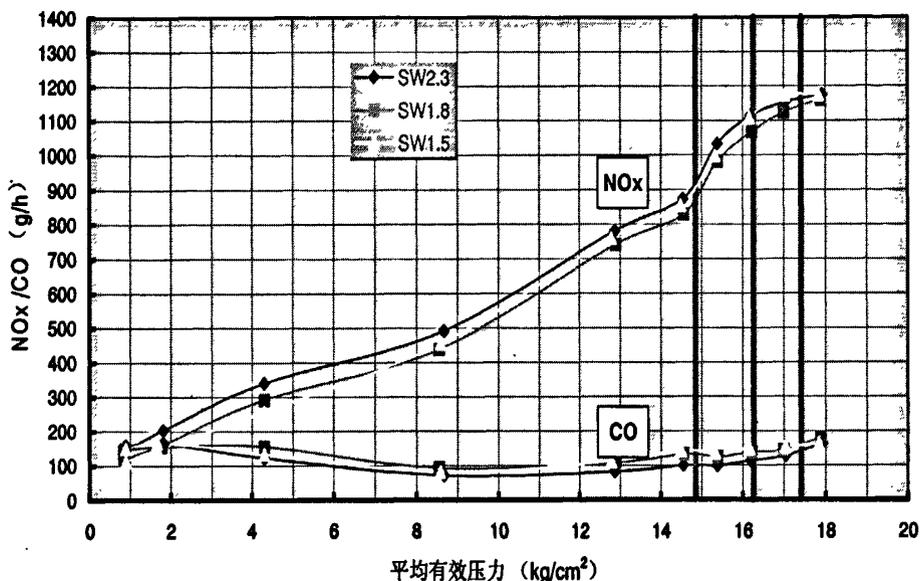


图 4.6 涡流比对 NO_x 排放的影响

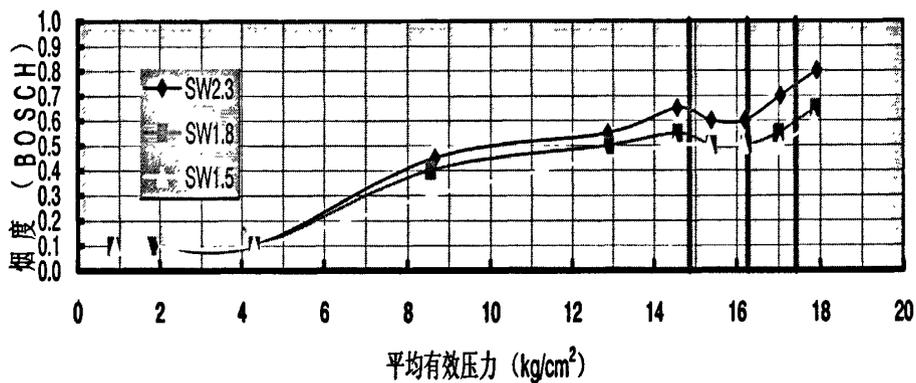


图 4.7 涡流比对烟度的影响

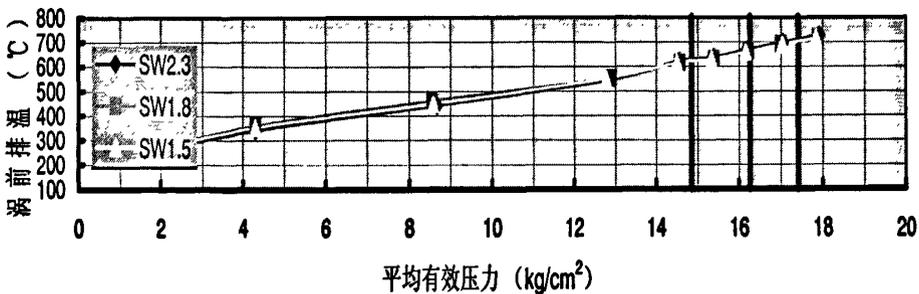


图 4.8 涡流比对涡前排温的影响

第 4 章 标定技术

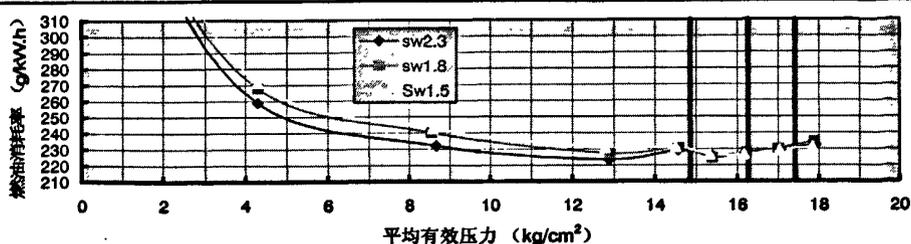


图 4.9 涡流比对燃油耗率的影响

4.4 排放和性能的综合标定

在完成发动机的基本特性的标定之后，可以进行以完善最终发动机排放和性能为目的的 MAP 标定，包括发动机燃油喷射量 MAP 的标定、喷射正时 MAP 的标定、喷射压力 MAP 的标定。

其方法是，首先需要确定排放控制的十三个工况点的具体功率、扭矩值。其次，结合先前对喷油正时、喷油压力等特性研究的结果，对每一个工况点的排放进行最终优化，其目标是将每一工况点的 NO_x 排放测量值达到 5g/kW.h 以下。这样，基本可以保证在加权处理后的总排放量也在法规限制值之内。但是考虑到每个排放点在加权计算中的权重不同，所以在实际标定时可对权重大的排放控制点应留有更多的排放裕量，而对权重小的排放点可根据发动机工作特性作适当放宽，但仍然应该根据实际产品经验数据，考虑正式的法规测试中随机抽测 NO_x 的要求，要避免出现仅有十三个控制点加权排放达标，而抽查点排放超标的情况出现。表 4.3 为对某一工况点进行最终标定时所列出的范例。

表 4.3 最终 MAP 标定

转速 (r/min)	功率 (kW)	扭矩 (N.m)	喷油 正时 (° CA)	喷油 压力 (MPa)	喷油 量 (mm³/s t)	NO _x (g/kW .h)	烟度 (BSU)	比油 耗 (g/kW .h)	涡前 排温 (°C)	中冷 后温 度 (°C)
1700	147	824	-4	*	130	5.3	0.5	*	543	43
1700	147	825	-3	*	122	6.0	0.3	*	510	43
1700	147	825	-2	*	127	4.8	0.5	*	530	43
1700	147	826	-1	*	126	5.1	0.4	*	523	43
1700	147	824	0	*	127	5.0	0.4	*	527	43
1700	147	825	1	*	127	5.2	0.4	*	525	43
1700	147	824	2	*	128	5.0	0.5	*	528	43

根据对主要排放控制点标定的结果，以及发动机的性能和排放的特性，最终完成图 4.10~4.12 所示的本研究发动机的喷油正时 MAP 图谱、喷油压力 MAP 图谱和喷油量控制 MAP 图谱。

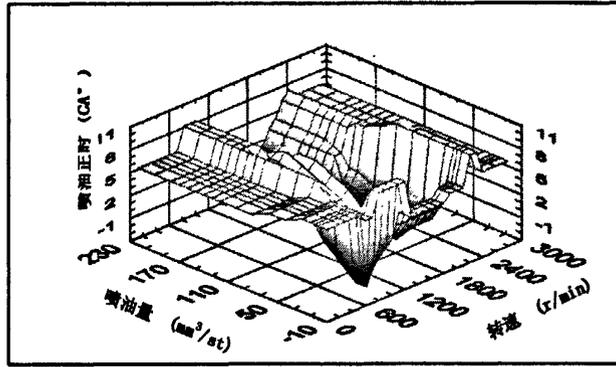


图 4.10 喷油正时 MAP 图谱

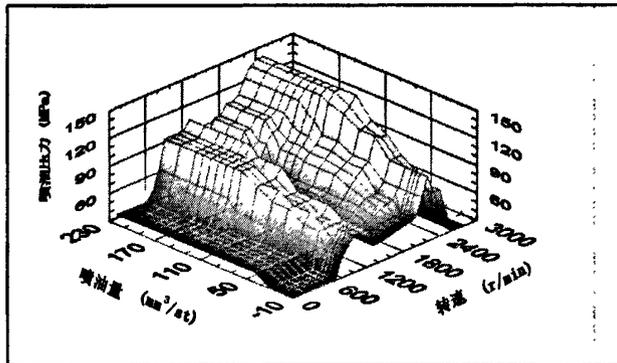


图 4.11 喷油压力 MAP 图谱

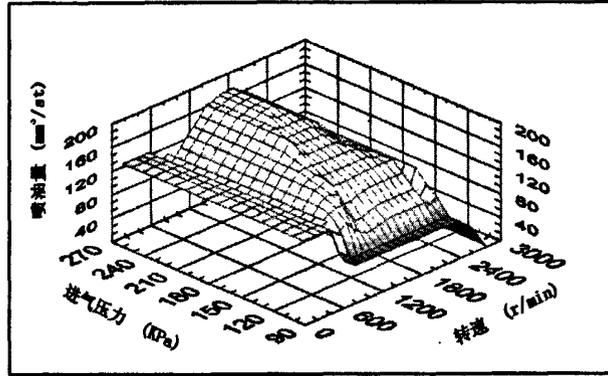


图 4.12 喷油油量 MAP 图谱

第5章 结论

5.1 课题研究结论

本文着眼于实践角度,对当前市场上主流的大功率低排放车用发动机开发技术作了初步探讨,提出了开发该类机型的适合中国国情的一套技术路线。运用该技术路线,成功地使本研究发动机各方面技术指标均达到了实施欧Ⅲ排放的设计要求。

通过采用先进的电控高压共轨技术,再结合对发动机本体燃烧系统的改进设计、机油耗控制,已经基本可以将国Ⅱ为基础的柴油机升级改造达到国Ⅲ排放水平。

总的来说:

燃油系统实现电控化、高压化是柴油机达到国Ⅲ排放要求的必要手段之一。

燃烧系统的改进设计,特别是低涡流比系统设计对 NO_x 的降低有显著作用,尤其是在柴油机从国Ⅱ到国Ⅲ排放升级的过程中。

增压中冷系统对柴油机整机排放、油耗的贡献依然重要,尤其是中冷能力的控制要通过中冷系统的合理设计来达到。

机油耗对排放中颗粒物的贡献比例增大,因而务必采取合理低机油耗措施对其进行控制。

燃油品质,特别是硫含量对整机排放影响不可小视,一台完全达到国Ⅲ排放法规要求的柴油机,如果使用不合标准的含硫柴油,其排放完全可能超标。

实践中,由于上述低排放柴油机的开发,由于其涵盖的技术领域不但包括柴油机的性能和结构的改进开发设计,同时还将电子控制技术引入柴油机工作控制中,因而使得传统的机械控制的柴油机出现一次比较大的技术革新,通过实际的产品开发,各个厂家都会建立起一支新型的技术团队。

当然,由于新技术的引入,不可避免的对原有产品体系要进行一定程度调整,比如售后服务工作,考虑到传统的柴油机售后服务人员难以对电控系统进行深入掌握,因而必须开发相应的专业的故障诊断工具给服务部门,使其可以通过便携式工具高效快速的对电控系统出现的故障进行处理解决。

5.2 后续工作展望

正如环境保护的话题从来就不曾停止一样，排放法规对柴油机排放的要求也是不断变得更加严格。

成功使得柴油机排放水平满足国家最新颁布的国III排放法规，并不意味着柴油机生产制造企业可以停下脚步，相反，马上就需要投入到更低排放的柴油机研发中，为2010年国家国IV排放法规的实施作准备。

按照一般柴油机排放升级开发的技术研究，为使得柴油机达到国IV排放水平，一般有两条不同的技术路线^[26]，如图5.1所示：

一、SCR路线：先通过优化燃烧以使得颗粒排放物（PM）达到国IV标准，再通过使用选择性催化还原SCR系统来降低因燃烧优化而产生的NO_x排放。其国外代表厂商主要集中在欧洲，如戴姆勒-克莱斯勒、VOLVO、DAF、IVECO等。

二、EGR + DPF路线：即先通过废气再循环降低排放中NO_x的成份，再用颗粒物捕集器捕集因使用EGR而略有增加的颗粒物，从而达到同时降低NO_x和PM的效果。其国外的主要代表厂商：SCANIA、MAN等。

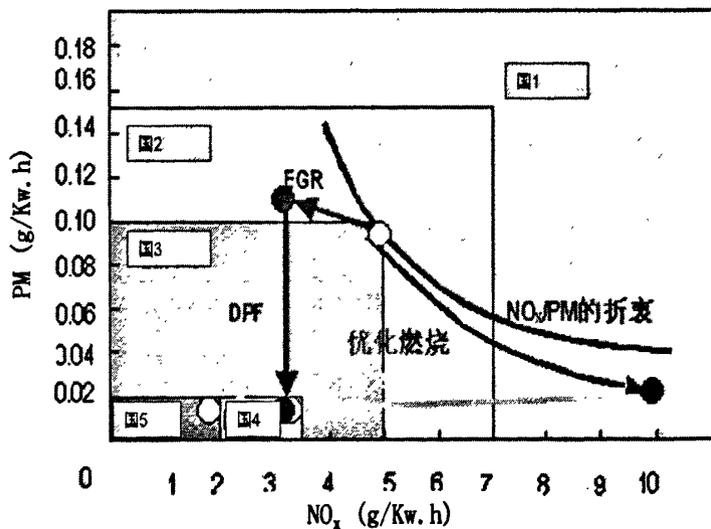


图 5.1 达到国IV排放法规可选择的技术路线

深入的技术研究工作尚未正式展开，已经能够感觉到国IV排放法规对柴油机带来的又一技术挑战，在这条技术的道路上，或许永无止境，一项课题的结

束往往意味着更大的挑战的开始。

致谢

课题研究中积累的大量的技术数据以及包含着董尧清教授殷切希望的指导意见、参考材料、建议阅读论文清单，在这一刻已经浓缩到这一份论文之中，不禁感慨不已。

正如技术研究工作中，一个目标的实现往往意味着更高难度的挑战即将开始一样，本课题研究的结束形式上意味着这一段在同济求学的结束。但对我来讲，在同济求学期间所感受到的课题研究的良好氛围，已经使得我深深感受到沉浸其中时书香的乐趣，也自然期待着今后能够有更多的机会向学校师长学习。

最后，再次对我在同济大学读书期间给我帮助甚多的指导教师董尧清教授、陈洁老师、高申兰老师，以及其它所有授课、管理的老师们的衷心感谢！

邹龙

2007年7月

参考文献

- [1] 胡林峰. 柴油机喷射系统的现状及发展潜力(上). 现代车用动力, 2004(3):4~6
- [2] 包帅善. 柴油机烟度排放测试技术的发展. 柴油机设计与制造, 2006(2):1~4
- [3] D.POTZ, W.CHRIST, B.DITTUS. 柴油机喷油嘴是喷油系统与燃烧室之间的关键接口. 现代车用动力, 2004(4):11~15
- [4] 伊藤悟, 岡本研二, 松井宏次. 柴油机燃料喷射装置的最新动向. 内燃机燃料喷射和控制, 2000(4), 3~9
- [5] 董尧清, 朱朋, 顾萌君, 等. 共轨喷射系统喷孔参数对柴油机性能影响的模拟预估. 见: 中国汽车工程学会汽车发动机分会主编. 2006年APC联合学术年会论文集. 丹阳: 2004: 83~87
- [6] 李勇, 郑国世, 高峻, 等. L发动机用高压油管设计开发. 见: 中国汽车工程学会汽车发动机分会主编. 2006年APC联合学术年会论文集. 丹阳: 2004: 1~8
- [7] 加藤雅彦, 松沼厚, 松本俊司. 适应1998USA排放法规的M/D柴油机的开发. 国外内燃机, 1999(6), 15~21
- [8] 陈少华. 低速大扭矩船用柴油机与增压器的匹配试验研究. 柴油机设计与制造, 2007(1), 23~25
- [9] 蒋文虎. 发动机缸筒变形测试分析. 见: 中国汽车工程学会汽车发动机分会主编. 2006年APC联合学术年会论文集. 丹阳: 2004: 31~39
- [10] 徐家龙(中国), 藤泽英也(日本). 柴油机电控喷油技术. 内燃机燃油喷射和控制, 2001(1): 4~13
- [11] 宋军, 乔信起, 黄震. 柴油机电控喷射系统现状. 车用发动机, 2003(3):6~10
- [12] Guerrassi N, Dupraz P, A common rail injection system for high speed direct injection diesel engines [C]. SAE 980803.
- [13] Su W H, Wang Y, Shi S X, et al. PAIRCUI—a new pressure accumulative, injection rate controllable unit injector for diesel fuel system [C]. SAE 971680.
- [14] 孔峰, 宋希庚, 张育华等. 增压中冷电控单体泵柴油机的平均值模型. 内燃机工程, 2006 Vol. 27(5), 20~23
- [15] Isermann R, Sinsel S, Schaffnit J. Modeling and real time simulation of diesel engines for control design[C]. SAE 980796.
- [16] Kao M, Moskwa J J. Turbocharged diesel engine modeling for nonlinear engine control and state estimation [J]. Transaction of SAE, 1995. 117(1): 20~30
- [17] 黄兴华, 王术新. MTU新型柴油机的电控系统. 移动电源与车辆, 2003(3):25~27
- [18] F. Muroyama等三人(日本). 日本电装公司用于柴油机的电控系统. 柴油机电控系统, 1991(1):1~9
- [19] 胡林峰. 柴油机喷射系统的现状及发展潜力(下). 现代车用动力, 2004(4):1~5
- [20] 索海韬, 张宗杰, 王雪怀. 柴油机电控喷油系统高速电磁阀的动态特性. 华中理工大学学报, 1998(5): 66~68
- [21] 徐家龙, 藤泽英也. 电装公司的电控喷油器. 现代车用动力, 2003(4): 7~17
- [22] 霍宏煜, 刘撰俊, 李骏, 等. 柴油机电控系统标定. 汽车工程, 1999(2): 97~102
- [23] 黄镇平. 电控柴油机标定系统的研究. 内燃机工程, 2002(5):76~78

参考文献

- [24] 李学民, 于秀敏, 高跃, 等. 电控柴油机起动工况的标定匹配研究. 车用发动机, 2004(4):15~19
- [25] 董尧清, 吴乐欣, 刘永祥, 等. 我国中重型车用柴油机实施欧IV排放技术路线的思考. 见: 中国汽车工程学会汽车发动机分会主编. 2006年APC联合学术年会. 丹阳: 2004: 76~82

个人简历 在读期间发表的学术论文与研究成果

个人简历:

邹龙, 男, 1977 年 12 月生。

2000 年 7 月毕业于南京理工大学 汽车工程专业 获学士学位。

2004 年 9 月入同济大学读硕士研究生。

已发表论文:

- [1] 邹 龙(第一作者),“高压共轨与单体泵燃油喷射系统分析”, 柴油机设计与制造, 2007. 3
- [2] 邹 龙(第四作者),“共轨喷射系统参数对柴油机性能影响的模拟计算”,《车用发动机》
2006(5), 23-25, 30
- [3] 邹 龙(第四作者),“使用 Boost 软件研究共轨喷射系统参数对柴油机性能的影响”,
《AVL 中国先进模拟技术 2006 年用户大会论文集》, 2006.4.28 桂林, 185-188
- [4] 邹 龙(第四作者),“车用电控柴油机配气机构性能的仿真优化研究”,《现代车用动力》
2007 (1), 36-39
- [5] 邹 龙(第四作者),“提高柴油机高压共轨系统高压泵泵油能力的研究”,《内燃机工程》
2006 (5), 11-15

待发表论文:

- [1] 邹 龙(第四作者),“柴油机高压共轨喷油器主要参数对喷油规律影响的仿真研究”,
中国内燃机学会 2007 年全国学术年会, 2007. 10