

HSDI柴油机雾化与排放特性 瞬态多维建模和数值研究

刘金武 易际明 著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

厦门理工学院学术专著出版基金资助

HSDI 柴油机雾化与排放特性 瞬态多维建模和数值研究

刘金武 易际明 著

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

HSDI 柴油机雾化与排放特性瞬态多维建模和数值研究 / 刘金武, 易际明著. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 1

ISBN 978 - 7 - 5640 - 1809 - 2

I. H… II. ①刘…②易… III. ①柴油机 - 雾化 - 瞬态状况 - 研究
②柴油机 - 排气 - 瞬态状况 - 研究 IV. TK421

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 200568 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 10.5

字 数 / 176 千字

版 次 / 2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 1000 册

定 价 / 28.00 元

责任校对 / 申玉琴

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

前 言

内燃机发出的功率占全世界所有动力装备总功率的 50% 以上, 为人类的进步做出了无法估量的贡献。内燃机在为人类造福的同时, 消耗了大量的能源, 造成越来越严重的污染: 汽车尾气排放、噪声、温室效应、酸雨、……随着人类对生活质量的日益重视, 人类对内燃机的创新和锲而不舍的研究是必然和必不可少的。科学合理地使用技术装备为人类造福是人类可持续发展的基本原则, 追求技术的完美是人类科学研究的永恒目标。本书的出版就是这一思想的体现。内燃机虽然应用广泛和技术成熟, 但是随着人类要求的提高, 评价指标的变化, 它越来越体现出不完美, 还存在进步的空间。为了提高内燃机的性能, 人类将研究的视线聚焦到了内燃机工作过程的每一个环节和细节。改善燃烧、进排气、增压、废气再循环、电喷、雾化、污染物形成和排放后处理等全都成为研究目标, 并取得了可喜的成果。研究手段采用了同时代能够采用的所有先进技术。多维模型仿真就是新技术在内燃机设计研究领域进行应用的典型范例。

柴油机工作过程的多维模型是近 20 年来伴随着内燃机技术、计算机技术、数值分析技术和流体动力学的发展而发展起来的工程模型。它包括缸内流体动力学多维模型, 基于流体动力学的雾化多维模型, 基于流体动力学的燃烧多维模型, 基于流体动力学的排放多维模型。多维模型是以计算机代码形式存在的计算机仿真工具, 也是一种新方法。多维模型计算的技术关键包括复杂空间三维动态网格理论和方法、缸内流体动力学偏微分方程组及其三维求解, 各种物理、化学子模型的三维建模与耦合方法, 后处理与可视化技术等方面内容。

在湖南省教育厅科研项目 (03C131) “内燃机燃烧过程的计算机仿真平台的二次开发”、湖南省自然科学基金项目 (02jjy4034) “基于敏捷制造的数据传递技术研究”、湖南省自然科学基金项目 (06JJ20018) “车用微粒捕集器复合再生过程气粒两相流动及燃烧数值模拟”和湖南省自然科学基金项目 (07JJ6077) “内燃机燃烧污染物形成历程数字化解析方法研究”的资助下, 笔者对 HSDI 柴油机雾化与排放瞬态多维模型的建模理论和技术进行了深入研究, 取得了多项研究突破, 研制了具有自主知识产权的内燃机工作过程瞬态多维模型计算机仿真代码。

在厦门理工学院学术专著出版基金资助下, 笔者依据多年的研究成果、硕

士和博士论文，撰写成为本书出版。主要目的是介绍多维模型建模的核心技术成果和应用案例，供内燃机专业的博士生、硕士生、本科生以及工程技术人员参考，希望能为我国内燃机设计研究水平的提高尽一份绵薄之力。

本书第1~5章由刘金武撰写，第6章由易际明撰写。

尽管笔者付出了努力，但囿于水平和精力所限，书中不当乃至错误之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

作者

2008. 10

摘 要

本书旨在研制用于内燃机设计和研究的计算机仿真优化工具,探索内燃机节能和降低有害排放的理论和方法。本书对于网格算法、多维建模、CAE/CAD 集成化、燃油雾化以及排放等 5 方面的研究进行详细的描述。

第一,提出了内燃机缸内复杂空间动态网格的生成算法,研制了用于多维模型的前处理器。提出将缸内网格划分成动态区和静态区,分别进行网格计算的方案;对动态区的网格提出运动方向的网格增减方法;对于垂直气门,采用气缸截面网格的插入方法;对于斜置气门,采取动态网格的漂移计算等方法。

第二,改进内燃机 KIVA 仿真软件代码,进一步耦合柴油机缸内多种物理和化学子模型,构建内燃机工作过程分析的多维模型。提出双精度算法,创建基于 PC 计算机硬件的柴油机缸内工作过程多维模型分析仿真平台 ICFD-CN。实验表明:多维模型能够模拟缸内压力、缸内放热率和燃油消耗率,其变化趋势与实验吻合较好,数值误差小。在模拟缸内 NO_x 和 SOOT 排放时,其变化趋势与实验吻合较好。

第三,通过采用缸内性能等值线和深度缓存消影算法,提出基于内容、时间和空间 3 因素的多维模型计算结果提取和传递方法,提出 CAE/CAD 集成化数据传递的重要图形文件的设计方法,原创多维模型后处理可视化模块代码,设计图形文件无限和有限命名方法,研制了内燃机多维模型仿真可视化系统,实现了 HSDI 柴油机工作过程多维模型分析 CAE/CAD 集成化。

此外,提出了采用多维模型工具研究柴油机雾化和排放的方法。分析 HSDI 柴油机的雾化特性,获得了 1137 型柴油机燃烧时喷射燃油不同状态的时空分布规律,建立了 1137 型柴油机雾化特性与燃烧、排放以及柴油机经济性和动力性的联系。最后,获得了 1137 型柴油机 NO_x 和 SOOT 排放特性,给出了 1137 型柴油机 NO_x 和 SOOT 排放随时间和空间的变化规律、SOOT 的生成和氧化历程,获得了大量设计参数对于 NO_x 和 SOOT 排放特性的影响规律。

总之,本书的网格算法研究结果解决了 CAE 分析中关键的网格计算和耦合问题,在内燃机 CAE 分析和其他的数值计算应用领域都具有重要参考价值。多维建模研究结果对于内燃机设计和研究手段的现代化,对于我国节能和环保事业都是重要的科学支持。此外,对于计算机仿真、数值分析和计算流体动力学等学科走向应用也具有一定的推动作用。CAE/CAD 集成化研究结果不仅是

HSDI 柴油机的 CAE 分析的重要技术支持, 而且对于其他内燃机和其他工程领域的 CAE 技术、计算机应用的发展具有参考价值。

燃油雾化和排放研究结果不仅为提高柴油机燃油经济性和满足排放法规要求提供了策略和研究方法, 而且还对于其他排放物、其他燃料内燃机的雾化和排放研究同样具有重要作用。尤其是在特殊工况下的雾化和排放研究更能体现其价值, 运用它会大大地减少试验设备投资, 节约试验成本。

关键词: 柴油机; 直接喷射; 雾化; NO_x ; SOOT; 多维模型; 运动网格; CAE/CAD 集成化

Abstracts

The main purpose in this book is to develop a simulation tool for the design and research of internal combustion engine, and to explore the theory and method for improving fuel utilization and reducing the harmful emissions, to overcome the increasing energy sources shortage and environment pollution. The research included such 5 subprojects as grid arithmetic, multi-dimensional model, CAE/CAD integration, fuel atomization and the emissions of NO_x and SOOT.

Firstly, moving grid formation arithmetic of the complex in-cylinder space are presented, and the preprocessor for multidimensional model is developed. To obtain it, four steps were taken as follows: 1) a step was give in which the in-cylinder is divided into the moving and static zones for grid computation respectively. 2) The approach how to add or reduce grids in the moving direction of moving zones was presented. 3) A reshaping arithmetic was given to the grid computation in the section of in-cylinder. 4) An excursion arithmetic to the moving grid computation of in-cylinder with tilted valves was introduced.

Secondly, a multi-dimensional model is built by coupling many sub models describing the physics and chemistry phenomena of in-cylinder into in-cylinder fluid dynamics code: KIVA, and by improving it. After presenting double precision arithmetic, a simulation tool: ICFD-CN is completed that runs on personal computer to analyze the in-cylinder process of internal combustion engine. The results from tests show that the in-cylinder pressure, the heat release ratio (HRR), and the brake specific fuel consumption (BSFC) were predicted, and a good agreement between predicted and measured data was gained by implementing the multi-dimensional model. In addition, the trend of the NO_x and SOOT emissions was predicted accurately according to the results by simulating.

Thirdly, a visualization system is developed for multi-dimensional simulation of internal combustion engine, and the postscript computation and visualization are implemented, so the CAE/CAD integration is realized by carrying out five efforts. After picking up and transferring approaches of the data were presented that was produced by simulation in the order of content-time-space, the contour and hide

grid were computed by applying special contour and hide arithmetic. The design means of a key graphic files was given for data transformation while the CAE/CAD integration is needed, and the code used for visualization as post scripting were developed. In addition, the infinite and finite name modles about graphic files were finished.

Moreover, a method is presented to analyze the atomization of spray and emissions by multi-dimensional simulating tool. By simulating the atomization behavior of spray in in-cylinder of 1137 type diesel engine, the distribution of spray in different state according to time and site is acquired, the numerical relation is founded among the atomization, combustion and emissions. Finally, after computing the emissions of 1137 type diesel engine by multidimensional model, the distribution of NO_x and SOOT in time and site, its formation and oxidation history, as well as the influence of a number of design parameters on it are also gained.

In conclusion, grid arithmetic in this book should be recommended in the CAE of engine and the numerical computing of other fields. The multidimensional model will be an available tool in the design and research of engine, and a valuable support to energy saving and environment protecting in china, as well as powerful driving force to such science field as computer simulation, numerical analyzing and computing fluid dynamics.

The results of third subproject will be not only an important support to the CAE of HSDI diesel engine, but also of other engine, other engineering field and computer application.

The results of the fourth and final subproject will become a valuable approaches and provide available strategy to promote fuel utilization and meet emissions standard. In addition, these methods will be applicable in the analyzing of other exhaust pollutant, and in research on atomization and emissions from other internal combustion engines. It should be especially recommended because of less investment of test facilities and low cost in the special operation conditions.

Key Words: Diesel engine; Direct injection; Atomization; NO_x; SOOT; Multi-dimensional model; Moving grid; CAE/CAD integration

目 录

第1章 绪论	1
1.1 课题的背景与意义	1
1.1.1 HSDI 柴油机雾化特性的研究意义	1
1.1.2 HSDI 柴油机排放特性的研究意义	2
1.1.3 HSDI 柴油机工作过程多维模型研究意义	2
1.2 HSDI 柴油机雾化特性的研究概况	3
1.2.1 高压涡流喷油器内部流动	3
1.2.2 射流的流体动力学行为	5
1.2.3 射流蒸发过程	7
1.2.4 射流碰壁过程	8
1.3 HSDI 柴油机排放特性的研究进展	10
1.3.1 喷射策略与 NO_x 和微粒排放	12
1.3.2 EGR 和增压与 NO_x 和微粒排放	15
1.3.3 同时减少 NO_x 和微粒	17
1.4 HSDI 柴油机工作过程多维模型现状	20
1.4.1 复杂空间三维动态网格生成技术	20
1.4.2 缸内流体动力学研究的多维模型	21
1.4.3 基于 CFD 的缸内雾化特性的多维模型	23
1.4.4 基于 CFD 的燃烧和排放特性的多维模型	25
1.5 课题来源与选题目的	26
1.6 本课题拟解决的关键问题	26
1.7 本课题的主要工作	27
第2章 HSDI 柴油机缸内复杂空间动态网格算法研究	29
2.1 本章引言	29
2.2 数值算法	31
2.2.1 算法基础	31
2.2.2 缸内动态网格算法	32

2.2.3 气缸截面网格算法	34
2.2.4 斜置气门顶面和底面运动区升程方向网格算法	36
2.2.5 节点漂移算法	38
2.3 结果与讨论	40
2.4 本章小结	43
第3章 基于多维模型的 HSDI 柴油机雾化研究	44
3.1 本章引言	44
3.2 雾化模型与公式	46
3.2.1 燃油在喷嘴孔内的流动模型	46
3.2.2 KH 模型	47
3.2.3 Taylor 类比破碎模型	48
3.2.4 油滴蒸发模型	49
3.2.5 射流碰壁模型	49
3.3 数值计算	50
3.4 结果与讨论	51
3.4.1 物理参数对于未燃油质量的影响	51
3.4.2 空燃比对于混和气分布的影响	57
3.4.3 转速对于混和气分布的影响	61
3.4.4 进气温度对于混和气分布的影响	64
3.5 本章小结	67
第4章 HSDI 柴油机缸内行为瞬态多维建模与验证	69
4.1 本章引言	69
4.2 多维模型与算法	72
4.2.1 多维模型体系结构	72
4.2.2 模型与公式	73
4.2.3 数值算法	78
4.3 实验与仿真	81
4.3.1 实验设置	81
4.3.2 实验方案	83
4.3.3 仿真方案	83
4.4 结果与讨论	84

4.5 本章小结	87
第5章 基于多维模型的 HSDI 柴油机排放研究	89
5.1 本章引言	89
5.2 排放模型与公式	91
5.2.1 Surovikin 碳烟生成模型	91
5.2.2 Nagle 碳烟氧化模型	93
5.2.3 Zel'dovich 氮氧化物生成模型	94
5.3 数值计算	95
5.4 结果与讨论	95
5.4.1 空燃比对 NO_x 和 SOOT 生成和氧化的影响	95
5.4.2 转速对 NO_x 和 SOOT 生成和氧化的影响	99
5.4.3 进气温度对 NO_x 和 SOOT 生成和氧化的影响	105
5.5 本章小结	110
第6章 柴油机多维模型 CAE/CAD 集成化技术研究	111
6.1 本章引言	111
6.2 数值算法	112
6.2.1 正轴测图的投影变换矩阵	112
6.2.2 正轴测图的消影算法	113
6.2.3 缸内性能等值线算法	115
6.2.4 基于 CAE/CAD 集成的数据提取与传递方法	116
6.3 结果与讨论	118
6.3.1 无限图形文件与有限图形文件生成	118
6.3.2 ICFD-CN 后处理可视化模块的程序结构	119
6.3.3 HSDI 柴油机缸内性能等值线图 and 网格消影图	120
6.4 本章小结	121
结论与展望	123
参考文献	125
致谢	139
附录 A 公开发表的相关学术论文目录	141
附录 B 内燃机缸内行为仿真平台 (ICFD-CN) 可视化模块代码	143

插图索引

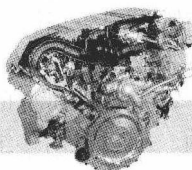
图 1.1	重载车发动机排放法规	11
图 1.2	NO_x 和 PM 优化的柴油机排放指标	12
图 2.1	活塞、气门运动示意图	31
图 2.2	减少网格算法示意图	33
图 2.3	气缸截面网格生成示意图	35
图 2.4	气门斜置时减少网格算法示意图	37
图 2.5	排气门运动平面动态网格分区	38
图 2.6	Z 向漂移算法示意图	39
图 2.7	X 向漂移算法示意图	39
图 2.8	XZ 漂移算法示意图	39
图 2.9	HSDI 柴油机 $y=0.0$ cm 平面缸内动态网格图	40
图 2.10	HSDI 柴油机 3D 网格消影图	41
图 2.11	$y=0.0$ cm 平面带垂直气门缸内动态网格图	41
图 2.12	带垂直气门缸内三维动态消影网格图	42
图 2.13	$y=1.95$ cm 平面带斜置气门缸内动态网格图	42
图 3.1	喷嘴孔内流动	46
图 3.2	射流破裂 KH 模型	47
图 3.3	油滴破裂的变形量判据	49
图 3.4	不同空燃比时未燃油量与喷油量的比较	51
图 3.5	C 类工况下缸内喷射过程模拟图	52
图 3.6	C 类工况下燃油喷射速率曲线	53
图 3.7	C 类工况下缸内流场分布矢量图	54
图 3.8	不同转速时未燃油量与喷油量的比较	55
图 3.9	不同进气温度时未燃油量与喷油量的比较	56
图 3.10	3 种空燃比时点火区燃油质量比较	57
图 3.11	C 类工况下等价率分布等值线图	58
图 3.12	C 类工况下燃油质量分数分布等值线图	59
图 3.13	3 种空燃比时浓混和气区燃油质量比较	60
图 3.14	4 种转速时点火区燃油质量比较	61

图 3.15	4 种转速时浓混和气区燃油质量比较	63
图 3.16	3 种进气温度时点火区燃油质量比较	64
图 3.17	3 种进气温度时浓混和气区燃油质量比较	66
图 4.1	多维模型 ICFD-CN 体系结构	72
图 4.2	多维模型 ICFD-CN 程序结构	73
图 4.3	实验设置示意图	81
图 4.4	全流稀释系统	82
图 4.5	缸内压力计算值与测量值的比较	84
图 4.6	缸内放热率计算值与测量值的比较	85
图 4.7	缸内 NO_x -SOOT 曲线计算值与测量值的比较	86
图 4.8	缸内 NO_x -BSFC 曲线计算值与测量值的比较	87
图 5.1	Surovikin 模型碳烟生成过程示意图	91
图 5.2	不同空燃比对应的 SOOT- NO_x 曲线	96
图 5.3	C 类工况下不同时刻 NO_x 质量分数分布等值线图	97
图 5.4	不同空燃比时 SOOT 生成历程的变化	98
图 5.5	C 类工况下不同时刻缸内温度分布等值线图	99
图 5.6	C 类工况下 SOOT 质量分数分布等值线图 (平均喷射角为 62.5°)	100
图 5.7	C 类工况下 SOOT 质量分数分布等值线图 (平均喷射角为 125°)	100
图 5.8	不同空燃比时缸内温度的变化	101
图 5.9	不同转速对应的 SOOT- NO_x 曲线	102
图 5.10	不同转速时 SOOT 生成历程的变化	103
图 5.11	不同转速时缸内温度的变化	105
图 5.12	不同进气温度对应的 SOOT- NO_x 曲线	106
图 5.13	不同进气温度时 SOOT 生成历程的变化	108
图 5.14	不同进气温度时缸内温度的变化	109
图 6.1	射线 R 与网格相交于 p_1 和 p_2 点	114
图 6.2	基于 CAE/CAD 集成的数据提取与传递的逻辑结构图	117
图 6.3	图形文件生成的两种模式比较	119
图 6.4	仿真平台可视化模块结构	120
图 6.5	三维动态网格消影图	121
图 6.6	$y=0.0\text{ cm}$ 平面内射流分布和等价率等值线图	121

附表索引

表 3.1	HSDI 柴油机雾化和排放特性数值研究方案	50
表 4.1	发动机参数	82
表 4.2	实验方案	83
表 4.3	初始条件和边界条件	83
表 5.1	Nagle 碳烟氧化模型反应率系数	93
表 5.2	反应率系数计算常数	94
表 6.1	多维模型的计算结果数据库内容	116

第1章



绪 论

1.1 课题的背景与意义

内燃机作为现代社会重要的动力装备,它所发出的功率占全世界所有动力装备总功率的50%以上。随着经济的发展,汽车保有量持续增长。根据估计,2010年以前世界机动车的保有量可能达到8.16亿辆,中国到2010年汽车年产量将突破1 000万辆,到时中国机动车保有量可能突破7 000万辆。内燃机消耗的燃料占石油燃料的60%以上,此外,它也是世界上最大的环境污染源之一,所排放的有毒废气约占工业废气的50%左右。因此,面对节约能源和环境保护的社会责任,面对内燃机使用者和法规制定者对其性能提出的愈来愈严格的要求,内燃机研究者们必须在提高内燃机的经济性、动力性、降低排放污染和噪声方面做出努力。尤其是节能和降低污染物排放已成为本书内燃机研究的主要背景^[1]。

1.1.1 HSDI 柴油机雾化特性的研究意义

HSDI (High Speed Direct Injection) 柴油机是高速直接喷射柴油机。按混合气准备方式的分类方法,它是缸内直接喷射类柴油机中的一种。HSDI 柴油机燃油在电控高压下喷射进入气缸燃烧做功。由于喷射策略灵活,燃烧过程易于控制,HSDI 柴油机在碳烟和微粒排放控制方面具有优良的性能。柴油机的雾化特性是指喷射柴油射流在缸内受到流场影响所表现的行为特征。这种特征主要指射流破裂所获得的油滴尺寸、数量和分布,它与喷嘴内部的流动、蒸发和碰壁相互联系,共同决定喷射燃油在缸内的时空分布,决定柴油机的点火、燃烧和排放,以及动力性和经济性。

微粒、NO_x 以及发动机噪声紧密地决定于燃烧过程。因此,为了改善燃烧过程,精确地控制燃油喷射量和射流形成是非常重要的。采用增加喷射压力和

减少喷嘴直径的技术就是为了使燃油雾化和燃油-空气混合更加理想,达到减少微粒排放的目的。

雾化特性研究的主要目的是采用一定的手段,研究各种参数对雾化效果的影响。本书采用多维模型工具来进行雾化研究。研究喷嘴直径、喷射角度、喷射参数、喷射模式、发动机几何和物理参数、初始和边界条件对柴油的缸内雾化特性的影响。与光学发动机的台架试验相比,它能够缩短研究周期、节约研究费用、减少试验设备的投入;与定体积容器的雾化试验比较,它更全面地反映柴油在缸内的雾化条件和特性;另外,还能够研究特殊条件下的雾化特性(高温和低温环境、高空燃比、增压和 EGR 等),尤其在低负荷的工况下,不同喷射模式的雾化特性研究和在燃烧以及不燃烧情况下的雾化特性研究。

1.1.2 HSDI 柴油机排放特性的研究意义

HSDI 柴油机排放特性指喷射燃油经过化学反应放热做功的同时,转化为其他化学物质的过程。柴油机的排放特性、动力性和经济性决定柴油机的市场受欢迎程度。可以说排放特性、动力性和经济性共同决定柴油机的生命。而排放特性实际上也对人类生存环境产生极大的影响。排放特性的研究成果不仅具有重要的经济价值,更重要的是具有社会价值。

排放特性研究越来越受到社会的关注和内燃机研究者的重视。本书采用多维模型的方法,对 HSDI 柴油机的排放特性进行研究,其研究重点放在 NO_x 和 SOOT 的排放,以及 SOOT 的生成和氧化机理方面。通过发挥多维模型工具的优越性,对于排放特性进行全面的、动态的、三维的和在特殊工况下的研究,寻找各种客观因素对排放特性的影响规律和机理,为柴油机和燃油喷射系统的设计提供指导性的资料,为排放法规的达标提供技术支持。长远地看,能够为排放法规的制订和执行提供科学技术帮助,为改善人类的居住环境作出贡献。

1.1.3 HSDI 柴油机工作过程多维模型研究意义

柴油机工作过程是指其将燃油的热能转化为机械能的过程。柴油机工作过程包括燃油在喷嘴内部的流动、射流的破裂、蒸发、碰壁、混合气的点火、燃烧和排放,其中伴随着传热和传质、空气运动和湍流变化、进气温度、进气压力和成份等初始条件的变化^[2]。总之,柴油机的工作过程是发生在高温高压环境下复杂的、湍流的、三维的、多相的、流动的物理和化学过程。研究柴油机工作过程的多维模型是考虑了大量的影响柴油机化学能向机械能转化的因素的,由大量的数学关系联系在一起的,以计算机代码为形式的集成模型。主要