



---

# 内燃机

## 一维非定常流动

---

刘峥 张扬军 编著

---

清华大学出版社



---

# 内燃机

一维非定常流动

---

刘峥 张扬军 编著

---

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

内燃机气、液流体系统中的一维非定常流动对内燃机的性能影响很大。本书从应用基础理论与工程相结合的角度,对此作了全面论述。除理论阐明一维定常与非定常流动的基本原理与数值计算方法外,着重分析了由非定常流动激发的压力波的传播、特征线法原理以及各种类型的边界问题,并专题讨论了内燃机的空气系统(进、排气系统和增压系统)及柴油机高压燃油喷射系统内压力波传播所引起的各种工程实际问题。

本书是清华大学汽车工程系多年来从事内燃机一维非定常流动教学与科研工作的系统总结。本书既可用做汽车工程、动力机械与工程等专业的本科生和研究生热流体学加强课程的教材或教学参考书,也可供有关专业人员从事科研、开发工作时参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

内燃机一维非定常流动 / 刘峥,张扬军编著. —北京:清华大学出版社,2007.1  
ISBN 978-7-302-14041-2

I. 内… II. ①刘… ②张… III. 内燃机—非定常流动—研究 IV. TK407.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第124380号

责任编辑:曾 洁

责任校对:焦丽丽

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

[c-servicc@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-servicc@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:16.25

字 数:333千字

版 次:2007年1月第1版

印 次:2007年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-302-14041-2

印 数:1~3000

定 价:35.00元

---

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:016536-01

# 前 言

内燃机是一种热力动力机械,其空气系统(进、排气系统和增压系统)、柴油机高压燃油喷射和燃烧、冷却、热交换等热流体系统中,由持续的非定常流动所激发的压力波的传播,对整机及部件性能有重大影响。

热流体学是研究能源动力工程流动、传热及能量转换利用的一门应用基础学科,其理论基础为热力学、流体力学和传热学。内燃机热流体学主要研究内燃机流动、传热及能量转换利用,是当代内燃机工程重要的应用理论基础。清华大学汽车工程系长期从事内燃机热流体的教学与科研工作,对所涉及的一维非定常流动理论的重要性有较深切的体会。鉴于汽车及内燃机等专业的热流体课程学时的局限,讲授非定常流动的内容极其有限,有的学生对压力波都不甚了解,为此,清华大学汽车工程系多年来一直为内燃机方向的研究生和高年级本科生开设了“内燃机一维非定常流动”专业理论课程,结合长期科研工作的成果进行讲授,积累了一定的经验。本书正是在这样的背景下,由长期直接从事这方面教学、科研工作的教师进行编著的。它既可作为专业理论课程的教材,也是一本涉及较深入的专业内容的专著。

作为教材,必须注重理论的系统性和体系的完整性,既强调阐明基本的物理概念,又要求对计算原理和方法进行全面的介绍;作为专著,更要求对相关的问题作深入细致和有创意的分析,同时要求列举各种实际应用的典型例证。本书力求协调和兼顾这两方面的要求,在利于学生使用的同时,也可供从事内燃机性能和开发工作的专业技术人员参考。

本书针对热流体学集成应用的特点,将气流与液流的非定常流动问题在统一的体系中进行阐述,以适应当代内燃机工程研究工作的需要。此外,就作者从事教学和科研工作的体会,气流和液流的一维非定常流动问题,既有同一的理论基础和相似的分析方法,又各有特色。作为统一体的两个方面,读者在学习或应用中,可以相互比较、借鉴,有利于更全面、深入地掌握这门专业技术理论知识。

本书的前6章系统介绍了一维定常和非定常流动的基本原理和数值计算方法,着重分析了由非定常流动激发的压力波传播、特征线法原理以及各

种类型边界的解析方法。第7、8两章则专题分析了内燃机空气系统(包括进、排气系统和增压系统),以及柴油机高压燃油喷射系统内,由压力波传播所引起的各种工程实际问题,其中也包含了作者所在教研室的相关研究成果。

本书第1章到第5章以及第7章由刘峥教授编写,第6章和第8章由张扬军教授编写,全书由刘峥教授主编。

本书的写作得到了高增压国防科技重点实验室基金的资助,在此表示衷心的感谢。

本书体系及取材主要基于作者多年来的教学与科研实践,不足及片面之处在所难免,恳切希望读者及同行不吝指正。来信请寄清华大学汽车工程系,邮编:100084。

作 者

2006年11月

# 本书所用主要符号表

$A$ ——截面积,声速的无量纲量	$h_y$ ——喷油嘴针阀升程
$A_A$ ——熵值的无量纲量	$h_f$ ——摩擦损失压头
$a$ ——声速	$h_{fl}$ ——沿程损失压头
$a_A$ ——熵值	$h_{l0}$ ——局部损失压头
$B$ ——系统物理量	$h_{tc}$ ——传热效率
$C$ ——中冷器热流量比	$I$ ——影响因素,极惯性矩
$C_d$ ——针阀弹簧刚度	$i$ ——多缸机缸数,接入同一谐振箱的气缸数
$C_{is}$ ——涡轮机的等熵速度	$K$ ——中冷器阻力系数,嘴端边界线负斜率
$c$ ——压力波峰面传播速度	$L, l$ ——管路长度
$c_v$ ——比定容热容	$Ma$ ——马赫数
$c_p$ ——比定压热容	$m$ ——质量,波动次数
$D$ ——当量水力直径,激波传播的相对速度(超声速)	$\dot{m}$ ——质量流量
$dp_R, dp_L$ ——右、左行压力单波	$\dot{m}_s$ ——比流量(密流)
$dv_R, dv_L$ ——右、左行速度单波	$N$ ——压力波在管内单程传播次数,压力波管内来回传播次数,传热单元数
$E$ ——物质弹性模量,气体总能量	$N_K$ ——不规则喷射临界点
$E_T$ ——截断误差	$n$ ——转速,曲轴转速
$e$ ——比能	$P$ ——功率,压力无量纲量
$F$ ——力,截面积	$P_s$ ——针阀弹簧预紧力
$F_l$ ——高压油管内截面积	$p$ ——压力,静压力
$f$ ——振动频率,管截面积,流体内摩擦系数,单喷孔截面积	$p_a$ ——环境压力,油泵低压腔压力,大气压力
$G$ ——流体内部比摩擦力(剪切力),气体流通质量	$p_c$ ——缸内压力,背压
$g$ ——误差放大系数	$p_0$ ——油管剩余压力,滞止压力,总压力
$H$ ——总焓	$p_s$ ——针阀开启压力
$H_0$ ——总压头	$p^*$ ——临界压力
$h$ ——比焓,升程	$Q$ ——对外交换热量
	$Q_g$ ——不可逆过程热量

- $q$ ——比热量, 累积循环喷油量, 循环喷油量  
 $q_p$ ——每循环理论供油量  
 $\dot{q}_A$ ——单位面积传热率  
 $\dot{q}_R$ ——比热辐射率  
 $R$ ——特种气体常数  
 $S$ ——总熵, 中冷端表面积  
 $S_f$ ——总熵流  
 $S_g$ ——总熵产  
 $s, s_f, s_g$ ——比熵; 比熵流; 比熵产  
 $T$ ——转矩, 温度  
 $T_a$ ——环境温度, 大气温度  
 $T_0$ ——初始温度, 滞止温度  
 $t$ ——时间  
 $u$ ——气体比热力学能  
 $V$ ——容积, 总容积, 速度的无量纲量  
 $V_B$ ——谐振箱容积  
 $V_h$ ——单缸排量  
 $v$ ——速度, 比容(积)  
 $v_c$ ——油管泵端回油速度  
 $v_l$ ——油管泵端供油速度  
 $v_0$ ——管内初始速度  
 $W$ ——对外做功量  
 $\dot{W}$ ——对外功率  
 $X$ ——长度的无量纲量  
 $Z$ ——时间的无量纲量  
 $\alpha$ ——流量系数, 直线斜率  
 $\beta$ ——变截面管段半锥角, 压缩性系数  
 $\gamma$ ——油嘴针阀波形稳定性判据  
 $\kappa$ ——等熵指数  
 $\Delta p_R, \Delta p_L$ ——右、左行积分压力单波  
 $\Delta v_R, \Delta v_L$ ——右、左行积分速度单波  
 $\Delta a_R, \Delta a_L$ ——右、左行积分声速单波  
 $\delta$ ——中心差分  
 $\vec{\delta}$ ——向前差分  
 $\overleftarrow{\delta}$ ——向后差分  
 $\varepsilon$ ——喷油系相邻循环剩余压力差比值  
 $\zeta$ ——流体局部阻力与动能的综合系数, 中冷器效率  
 $\eta_c$ ——压气机效率  
 $\eta_m$ ——涡轮增压器机械效率  
 $\eta_{TS}$ ——涡轮机效率  
 $\lambda$ ——沿程摩擦损失系数  
 $\lambda, \beta$ ——黎曼不变量  
 $\Lambda, B$ ——黎曼不变量的无量纲量  
 $\lambda_{in}, \lambda_{out}, \Lambda_{in}, \Lambda_{out}$ ——边界点的广义黎曼不变量及其无量纲量  
 $\lambda_I, \lambda_{II}, \Lambda_I, \Lambda_{II}$ ——管内的广义黎曼不变量及其无量纲量  
 $\xi$ ——质量流量系数, 局部阻力损失系数  
 $\xi_c$ ——内燃机文献中常用的质量流量系数  
 $\Pi = (p/p_c)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$ ——特定的声速无量纲量  
 $\rho$ ——密度  
 $\sigma_p$ ——总压恢复系数  
 $\tau$ ——剪应力  
 $\varphi$ ——转角  
 $\varphi_{CA}$ ——曲轴转角  
 $\varphi_t$ ——波动系数  
 $\phi$ ——孔管有效流通截面积比, 单位容积物理量, 通用变量  
 $\phi_c$ ——气缸充气系数(效率)  
 $\omega$ ——角频率
- 下 标
- $c$ ——缸内参数, 关闭状态  
 $0$ ——滞止及初始状态参数, 开启状态  
 $e$ ——排气及排气系统状态  
 $s$ ——进气及进气系统状态  
 $U$ ——上游管参数

D——下游管参数, 流量壅塞(堵塞)时的参数	n——油嘴及嘴端参数
t——最小流通喉口处参数	cr——喉口为临界状态时的管内及边界参数
R——右行单波参数	pk——临界值
L——左行单波参数	ref——参考状态参数
T——涡轮增压及增压器参数	* (右上角标)——临界状态, 以熵值为参考状态的无量纲量
p——油泵及泵端参数	



# 目 录

本书所用主要符号表 .....	IX
-----------------	----

第 1 章 绪论 .....	1
----------------	---

1.1 研究内燃机一维非定常流动的意义 .....	1
1.2 内燃机一维非定常流研究概述 .....	3
1.2.1 气流研究领域 .....	3
1.2.2 液流研究领域 .....	5
1.3 解析内燃机流动的思路与方法 .....	7
1.3.1 明确所需求解的问题 .....	7
1.3.2 确定分析对象与方法 .....	7
1.3.3 解析思路与步骤 .....	9

第 2 章 热流体一维流动理论基础 .....	11
-------------------------	----

2.1 基本假设 .....	11
2.1.1 真实管流向一维流动的简化 .....	11
2.1.2 不同条件下物理模型的修正与处理 .....	13
2.2 基本方程通用式与输运方程 .....	13
2.2.1 定质量系统基本方程的通用表达式 .....	14
2.2.2 输运方程与开口系统基本方程通用表达式 .....	15
2.2.3 影响一维管流物理量变化率的因素 .....	16
2.3 连续方程 .....	19
2.4 动量及动量矩方程 .....	20
2.4.1 动量方程 .....	20
2.4.2 弯管中流线法向的动量方程 .....	23
2.4.3 动量矩方程 .....	25
2.5 能量方程与熵方程 .....	27
2.5.1 能量方程 .....	27

2.5.2	熵方程 .....	31
2.6	声速方程与激波方程 .....	31
2.6.1	流体的可压缩性与压力扰动的传播 .....	32
2.6.2	声速与声速方程 .....	34
2.6.3	激波与激波方程 .....	37
2.7	状态方程与气体状态参数间的换算关系 .....	39
2.7.1	理想气体的状态方程 .....	39
2.7.2	状态参数间的换算关系 .....	40
<b>第3章</b>	<b>可压缩一维定常流动 .....</b>	<b>43</b>
3.1	可压缩一维定常流基本方程组 .....	43
3.2	特征参数与质量流量系数 .....	45
3.2.1	滞止状态与滞止参数 .....	45
3.2.2	临界状态与临界参数 .....	46
3.2.3	最大速度状态 .....	48
3.2.4	用马赫数表示各种状态下的参数 .....	48
3.2.5	质量流量与质量流量系数 .....	50
3.3	绝热等熵管流 .....	53
3.3.1	绝热等熵定常管流的流动特征 .....	53
3.3.2	变截面管流动分析与喉口壅塞现象 .....	55
3.4	等截面绝热摩擦管流 .....	57
3.4.1	以马赫数表示的基本关系式及状态参数的变化规律 .....	57
3.4.2	最大管长及沿程气流参数的计算 .....	60
3.4.3	摩擦壅塞现象 .....	62
3.5	等截面无摩擦有热交换的定常管流 .....	64
3.5.1	以马赫数表示的基本关系式及状态参数的变化规律 .....	64
3.5.2	热交换管中的气流参数计算 .....	66
3.5.3	热壅塞与最大比加热量 .....	68
<b>第4章</b>	<b>可压缩一维非定常流动与特征线法 .....</b>	<b>70</b>
4.1	基本方程组及其解法 .....	70
4.1.1	偏微分方程组 .....	70
4.1.2	基本方程组转化为特征线方程组 .....	71
4.2	小扰动压力波在管内的传播 .....	73

4.2.1	压力单波在管内的传播 .....	73
4.2.2	压力单波的分类 .....	74
4.2.3	非定常管流中压力波的合成、分解与反射 .....	77
4.2.4	压力单波的微分值与积分值 .....	80
4.3	微波的解析解与特征线解原理 .....	81
4.3.1	微波管流的解析解 .....	81
4.3.2	微波管流的特征线解 .....	83
4.3.3	解析解与特征线解的对比 .....	87
4.4	有限小扰动波的特征线解原理 .....	88
4.4.1	气体绝热均熵管流有限小扰动波的特征线解 .....	88
4.4.2	广义非定常管流有限小扰动波的特征线解 .....	92
4.5	特征线数值解与黎曼不变量 .....	95
4.5.1	黎曼不变量 .....	96
4.5.2	特征线的数值解 .....	98
4.5.3	微波管流的黎曼不变量 .....	99
<b>第5章</b>	<b>边界与边界条件方程 .....</b>	<b>101</b>
5.1	边界分类及变量与方程的无量纲化 .....	101
5.1.1	边界的分类 .....	101
5.1.2	变量与方程的无量纲化 .....	103
5.2	封闭端与开口端 .....	106
5.2.1	封闭端(等速端) .....	106
5.2.2	出流开口端(出流等压端) .....	108
5.2.3	入流开口端 .....	110
5.3	孔口出流端 .....	113
5.3.1	液流的孔口出流端 .....	113
5.3.2	气流的孔口出流端 .....	114
5.4	孔口入流端 .....	119
5.4.1	液流的孔口入流端 .....	120
5.4.2	气流的孔口入流端 .....	120
5.5	完全边界图与边管联合求解 .....	128
5.5.1	广义黎曼不变量 .....	128
5.5.2	完全边界图 .....	130
5.5.3	边管联合求解 .....	131

5.6	共同边界流与多管接头 .....	132
5.6.1	共同边界流的处理方法 .....	132
5.6.2	多管接头的边界问题 .....	134
5.7	管内熵间断面 .....	142
5.7.1	压力波在熵间断面上的反射与透射 .....	142
5.7.2	反射、透射现象的物理实质 .....	144
<b>第6章</b>	<b>可压缩一维非定常流动有限差分法 .....</b>	<b>146</b>
6.1	有限差分法的基本步骤 .....	146
6.1.1	建立数学模型 .....	147
6.1.2	网格划分及方程离散化 .....	147
6.1.3	差分方程的建立 .....	148
6.2	有限差分近似理论 .....	151
6.2.1	收敛性 .....	151
6.2.2	相容性 .....	152
6.2.3	稳定性 .....	152
6.2.4	收敛性与稳定性的关系 .....	153
6.2.5	稳定性的傅里叶分析法 .....	154
6.3	方程的数学性质与定解条件 .....	155
6.3.1	方程的数学性质 .....	155
6.3.2	依赖域与影响域 .....	156
6.3.3	方程的定解条件 .....	158
6.4	常用差分格式 .....	160
6.4.1	迎风格式 .....	160
6.4.2	Lax-Friedrichs 格式 .....	160
6.4.3	双曲型方程的 C. F. L 条件 .....	162
6.4.4	跳步格式 .....	163
6.4.5	Lax-Wendroff 格式 .....	163
6.4.6	利用特征线构造差分格式 .....	165
6.4.7	隐式差分格式 .....	166
<b>第7章</b>	<b>内燃机燃油喷射系统非定常流动 .....</b>	<b>168</b>
7.1	柴油机高压燃油喷射系统及其压力波特征线图解法 .....	168
7.1.1	简化物理模型 .....	168

7.1.2	高压油路的简易特征线图解法	173
7.2	二次喷油与气穴	177
7.2.1	产生二次喷油及气穴的机理分析	178
7.2.2	减缓二次喷油与气穴的技术措施	180
7.3	波动喷射及针阀的波形区划	184
7.3.1	针阀产生波动的原因	184
7.3.2	波形区划原理	186
7.4	不规则喷射	188
7.4.1	喷射稳定性原理及其判断准则	189
7.4.2	循环喷油量随剩余压力的变化规律	192
7.4.3	不规则喷射区区划	194
<b>第8章</b>	<b>内燃机空气系统非定常流动</b>	<b>199</b>
8.1	动态效应与进、排气干扰	200
8.1.1	多缸机各缸充气的不均匀性	200
8.1.2	多缸机各缸的排气干扰	202
8.2	动态效应与谐波增压	204
8.2.1	两种不同的谐振模式	204
8.2.2	歧管系统的动态效应与谐振机理	205
8.2.3	整体系统的动态效应与谐振机理	210
8.2.4	多缸机动态效应应用及可变进气系统	211
8.3	内燃机涡轮增压	213
8.3.1	增压内燃机空气系统非定常流动计算	213
8.3.2	涡轮边界条件	215
8.3.3	压气机边界条件	217
8.3.4	内燃机涡轮增压的匹配计算	221
8.4	内燃机增压中冷	226
8.4.1	中冷器效率	226
8.4.2	中冷器边界条件	228
8.4.3	内燃机增压中冷匹配计算	229
8.5	气波增压器	231
8.5.1	结构原理	231
8.5.2	工作过程分析	232

附录 A 一维流动输运方程的推导.....	235
附录 B 以马赫数表达的基本方程的推导 .....	237
附录 C 广义非定常管流三变量特征线方程组的推导 .....	239
主要参考文献 .....	242

## 绪 论

### 1.1 研究内燃机一维非定常流动的意义

内燃机是一种进行热功转换的能源动力机械。内燃机工作介质的流动和传热及能量转换过程密不可分。内燃机流动、传热及能量转换利用的研究属于内燃机热流体学的研究范畴。

内燃机具有众多的热流体工作系统,除进气换气系统、排气换气系统、增压系统、混合气形成及燃烧系统、燃料供给与喷射系统等主体的热流体系统之外,它还配置有水、气冷却和机油润滑等辅助热流体系统。随着对内燃机节能、环保要求的不断提高,上述各系统中,又不断增添了诸如排气再循环(EGR)、催化转化、消声防噪以及增压中冷等子系统。从总体上看,内燃机热流体系统的流动对内燃机工作特性、性能指标以及结构设计都有重大的影响。

内燃机的热流体工作系统大多为管流系统。管流是内燃机热流体学范畴中的一个很重要的分支,在工程应用中经常被简化为一维流动进行处理。因此,一维流动是内燃机热流体学所涉及的极广泛而重要的对象。

内燃机热流体系统按工质类别有气流与液流之分;按工质特性有可压缩流与不可压缩流之分;按工质流动状态又有定常流与非定常流之别。内燃机的一维管流若为气流,如进、排气流,则多按可压缩流处理;若为液流,如冷却水流和润滑油流,则多按不可压缩流处理;但是作为对柴油机性能有重大影响的高压燃油喷射管流,由于非定常瞬态工作和高压(最高喷射油压可达 200 MPa 以上)的特点,又必须按可压缩流处理。可见,内燃机的一维流动研究中,可压缩流居于主导地位。

值得注意的是,内燃机中的流动大都具有非非常的特性。内燃机工作过程就是曲柄连杆机构往复运动和瞬间着火燃烧所引起的一种循环非非常的动态过程。与此直接关联的可压缩进、排气流和燃油喷射高压油流等都保持着持续的非定常流动状态。众所周知,可压缩非定常管流的显著特点,就是管路中不可避免地伴随有压力波传播、合成、分解、反射和透射等现象,使得管路时时处处状态不断地变化。内燃机可压缩一维非定常流压

力波动所引起的状态变化,对相应的热流体系统的特性,从而对内燃机的多种性能,都有着极为深刻和广泛的影响。

下述列举的多个内燃机设计、研究领域的内容,都与可压缩非定常流特性紧密关联。在研究和解决这些问题时,管内的压力波动特性大都起到主导和关键的作用。

### 1. 内燃机空气管理研究领域

换气过程及进、排气系统的研究、设计方面:

(1) 利用管系的压力波动态效应,提高循环充气量和排气量,进行换气系统的参数合理匹配。

(2) 应用压力波的调谐作用实现惯性增压,增强内燃机的低速转矩和动力性能。

(3) 合理匹配和设计换气系统,解决多缸机各缸充气量、排气量、残余废气量和排温的不均衡问题;利用进、排气压力波,改善二冲程内燃机的扫气过程。

(4) 合理设计换气系统,降低和改善由于压力波动激发的振动和进、排气噪声。

(5) 在换气系统中加装排气再循环(EGR)、催化转化以及微粒捕捉器等子系统,进一步利用管网的压力波来降低各种有害排放物。

内燃机增压系统的设计、研究方面:

(1) 排气管中的压力波特性是脉冲增压方式的重要理论依据。利用管系中的压力波传播规律,可以确定脉冲增压具体方案;选择涡轮流通截面;计算能量传递效率;进行脉冲转换器和排气管网的匹配与设计。

(2) 研究进气压力波动对压气机喘振、压气机和涡轮效率等的影响。

(3) 研究非定常压力波对高温排气能量传递与利用的影响。

(4) 利用压力波特性和气波增压等新型增压原理和性能研究,开发相应的新型增压装置。

内燃机缸内气体流动及动态特性研究方面:

(1) 研究燃烧室内压力波和爆震波对燃烧性能和燃烧噪声的影响。

(2) 研究动态工况下内燃机的动力性、经济性和排放特性,基于系统整体进行相应的流动控制与优化研究。

### 2. 内燃机燃料供给研究领域

非定常流动对于柴油机高压燃油喷射系统的性能与参数合理匹配研究极为重要。

(1) 以可压缩一维非定常流原理为基础,分析燃油喷射过程及其对柴油机性能的影响。

(2) 应用压力波传播原理分析喷油规律、喷油压力等参数的变化特性,为系统参数的合理匹配提供理论依据。



(3) 分析因管内压力波动引发的各种异常喷射现象——二次喷油、气穴、波动喷射、不规则喷射等的产生机理,提出技术上的缓解措施。

(4) 研究喷油系统高压工作元件和油管因压力波动而产生的穴蚀损坏问题,提供设计和材料选用的依据。

### 3. 内燃机热管理研究领域

(1) 应用压力波和工质传热的联合作用,设计和改善增压中冷装置的结构与性能。

(2) 研究非正常工况下内燃机的热平衡及传热特性、内燃机冷启动及排放控制问题。

(3) 研究各种动态条件下冷却系统水套及管路中的压力波水锤效应及穴蚀破坏问题。

从上述列举的各项内容中不难理解,研究和掌握可压缩非定常流,特别是一维非定常流的原理和规律,对内燃机的性能研究和开发设计都有极为重要的意义。一维非定常流动已成为内燃机热流体学中不可缺少的重要组成部分。

当前,随着科技的飞速发展、对内燃机性能要求的不断提高以及计算机的普及应用,使得复杂的动态计算和综合优化不再成为研究工作的障碍,基于动态过程和总能系统的内燃机燃料、空气及热管理的研究,已成为内燃机性能研究的重要组成部分。作为内燃机动态过程理论基础的非定常流动力学的重要性日愈显现。深入学习非定常流动力学原理,了解和掌握其在内燃机中的应用特点和规律,已逐渐成为内燃机性能研究的技术人员和相关专业教学工作者的共识。

## 1.2 内燃机一维非定常流研究概述

### 1.2.1 气流研究领域

内燃机的进、排气换气过程决定了汽缸充气量的多少;多缸机各缸换气的均匀性,是决定内燃机性能优劣的关键因素之一;而内燃机增压又一直是提高内燃机性能的主要手段,所以内燃机中,最先在这些气动领域开展非定常流特性研究是不言而喻的。

流体动力学中早已阐明了非定常流场中压力波传播的原理,并推导了计算流场状态参数的偏微分基本方程组。但直到1885年黎曼(Riemann)提出求解双曲型偏微分方程的特征线原理与解法之后,非定常流的工业应用研究才得以开始。

早在20世纪初,瑞利(Rayleigh)就考察了有限波应用的基本领域;厄恩肖(Earnshaw)提出了有限波沿管内单向运动的解法。20世纪40年代,班尼斯特(Bannister)和马克洛(Mucklow)推演出了一种可计算管内有限波相互影响的非定常流