



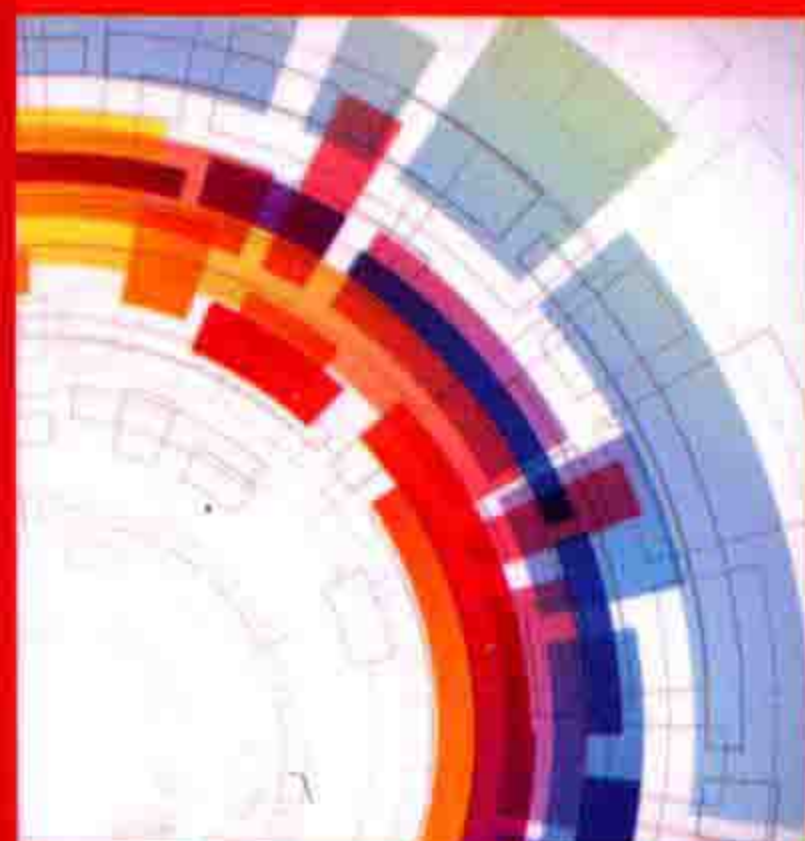
汽车先进技术译丛

· 汽车技术经典书系

第7分册

汽车测试分析技术

[日] 城井幸保 编著
潘公宇 范秦寅 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

译丛

日本汽车技术协会·汽车技术经典书系

汽车测试分析技术

[日] 城井幸保 编著

潘公宇 范秦寅 译



机械工业出版社

《汽车测试分析技术》是日本国内应用非常普遍的一本技术书籍，对发动机、振动噪声和舒适性、操纵稳定性、碰撞安全性、空气动力学特性、人机工程学特性等方面基本的测量分析技术的现状进行了介绍，进一步对包含了应用的最新技术及课题做了概要的介绍。其研究与实验方法贴近工程实际，非常值得国内技术人员阅读借鉴。

Translation from Japanese language edition: 自動車の計測解析技術，自動車技術会編集

Copyright © Originally published in Japan in 1996 by Asakura Publishing Company, Ltd.

Chinese translation rights arranged with Asakura Publishing Company, Ltd. through TOHAN CORPORATION, TOKYO.

All Rights Reserved.

版权所有，侵权必究。

This title is published in China by China Machine Press with license from Asakura Publishing Company, Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体版由 Asakura Publishing Company, Ltd. 授权机械工业出版社在中国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2015-0549。

图书在版编目（CIP）数据

汽车测试分析技术/（日）城井幸保编著；潘公宇，范秦寅译．—北京：机械工业出版社，2018.2

（汽车先进技术译丛．日本汽车技术协会汽车技术经典书系）

ISBN 978-7-111-58950-1

I. ①汽… II. ①城… ②潘… ③范… III. ①汽车-测试技术
IV. ①U467

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 008005 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：孙 鹏 责任编辑：孙 鹏

责任校对：樊钟英 责任印制：孙 炜

北京中兴印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·12.75 印张·300 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58950-1

定价：80.00 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

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

序

本丛书是日本汽车技术协会主编的汽车技术经典书系，书系共 12 册。本系列丛书旨在阐述汽车相关的焦点技术及其将来的发展趋势，由活跃在第一线的研究人员和技术人员编写。

日本汽车技术协会的主要责任是向读者提供最新技术课题所需要的必要信息，为此我们策划了本系列丛书的出版发行。本系列丛书的各分册中，相对于包罗万象的全面涉及，编者更倾向于有所取舍地选择相关内容，并在此主导思想下由各位执笔者自由地发表其主张和见解。因此，本系列丛书传递的将是汽车工程学、技术最前沿的热点话题。

本系列丛书的主题思想是无一遗漏地包含基础且普遍的事项，与本协会的“汽车工学手册”属于对立的两个极端，“汽车工学手册”每十年左右修订一次，以包含当代最新技术为指导思想不断地进行更新，而本系列丛书则侧重于这十年当中的技术进展。再者，本系列丛书的发行正值日本汽车技术协会创立 50 年之际，具有划时代的意义，将会为今后的汽车工学、技术，以及工业的发展发挥积极的作用。

在本系列丛书发行之际，我代表日本汽车技术协会向所有为本系列丛书提供协助的相关人员，以及各位执笔者所做出的努力和贡献表示衷心的感谢。

社团法人 日本汽车技术协会
汽车技术经典书系出版委员会
委员长 池上 询

编辑的话

本书是由日本汽车技术协会组织编写的“汽车技术经典书系”的第7分册《自動車の計測解析技術》翻译而来的。本丛书的特点是对汽车设计、测试、模拟、控制、生产等技术的细节描写深入而实用，所有作者均具备汽车开发一线的实际工作经验，尤其适合汽车设计、生产一线的工程师研读并应用于工程实践！本丛书虽然原版出版日期较早，但因为本丛书在编写时集聚了日本国内最优秀的专家，使本丛书具有极高的权威性，是日本汽车工程技术人员必读图书，故多次重印，目前仍然热销。非常希望这套丛书的引进出版能使读者从本丛书的阅读中受益！本丛书由曾在日本丰田公司工作的刘显臣先生推荐，也在此表示感谢！

本书由在日本取得博士学位并长期在日本工作，目前任教于江苏大学的潘公宇教授，以及大阪大学范秦寅教授联合翻译。其中，第2~4章、第6章由潘公宇教授翻译，第1章、第5章由范秦寅教授翻译。在此，对两位译者表示感谢！

日本汽车技术协会 “汽车技术经典书系” 出版委员会

编辑委员长	池上 询	京都大学工学部
副委员长	近森 顺	成蹊大学工学部
编辑委员	安部正人	神奈川工科大学工学部
	井上惠太	丰田汽车
	大沢 洋	日野汽车
	冈 克己	本田技术研究所
	小林敏雄	东京大学生产技术研究所
	城井幸保	三菱汽车
	芹野洋一	丰田汽车
	高波克治	五十铃工程技术有限公司
	迁村钦司	新 ANSYS 有限公司
	農沢隆秀	马自达汽车
	林 直义	本田技术研究所
	原 田宏	防卫大学校
	东出隼机	日产柴油发动机有限公司
	间瀬俊明	日产汽车
	柳瀬徹夫	日产汽车
	山川新二	工学院大学工学部

主编

城井幸保

参编

桑原一成

塚本时宏

小野裕行

宫下哲郎

小野 明

北田泰造

鎌田慶宣

岸本博志

森田隆夫

佐佐木由夫

丹羽史泰

岡部绅一郎

御室哲志

藤田春男

中川邦夫

知名 宏

柳瀬徹夫

平松真知子

早野阳子

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

堀场制作所工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

大发汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

三菱汽车工业株式会社

日产汽车工业株式会社

日产汽车工业株式会社

日产汽车工业株式会社

前 言

最近，科学技术的发展，很多内容让人刮目相看，但是更应该看到作为基础的测量分析技术，看到它们达到的目前的高水平和普及率的影响。从测量技术的发展和其自身的自动化可以把汽车技术的发展看作是一种典型。理论研究和试验测量，相得益彰，互为比较，促进了发展。测量技术则可以证明设计的合理性，是产品向更高水准进行改良的桥梁和重要的手段。

计算机的发展代表了科学的进步，实现了测量技术的高度自动化，可处理大量信息，并改善了测量结果数据的质量。以前，要求技术人员有一定想象力和灵感的一些行业的测试，通过数值化、可视化，使得任何人都可以掌握，因而，原因和结果得到了证明，这些原因和结果又成为很多新的理论的展开的根据。

技术人员失去了想象力，原始数据无法充分灵活利用等问题也是事实。测量仿真技术应该也是为了理解物理现象的，埋头于庞大的试验测量和数据的分析观察，反而变得容易陷入失败。

测试技术的世界中，测试装置越来越先进了，就像变成了机械在指挥人了。因此，技术人员变得不重视把握物理现象的本质，容易犯只相信数据的错误。

今后的测量分析技术将更多地考虑和人有关的数据的测量分析。比如，噪声和振动，燃烧等的可视化，内部装饰的手感、气味等的数值化，人的疲劳和觉醒度等和人本身有关的数据的测量分析等，我们期待着这些和人类直接有关的测试分析技术的发展。

本书不可能将和汽车的开发所需的一切测量分析技术都编辑起来，作为代表性的内容选择了①发动机；②振动噪声和舒适性；③操纵稳定性；④碰撞安全性；⑤空气动力学特性；⑥人机工程学特性。关于各个项目，对于基本的测量分析技术的现状进行了介绍，进一步对包含了应用的最新技术及课题做了概要的介绍。

城井幸保

目 录

序

编辑的话

前言

第1章 发动机..... 1

1.1 流场的测试分析 1

1.1.1 可视化粒子流 1

1.1.2 激光多普勒流速计 (LDV) 2

(1) 总体流动的测试分析 4

(2) 湍流的测试分析 4

1.1.3 激光片照射法 7

(1) PIV 7

(2) PTV 9

(3) 三维 PTV 12

(4) 使用高速摄像机的 PIV 12

1.2 喷雾的测试分析..... 15

1.2.1 喷雾外形的观测 15

1.2.2 喷雾截面的观测
(激光片照射法) 15

1.2.3 局部测试分析 17

(1) 透射光衰减法 18

(2) 相位多普勒法 (PDPA) 20

1.3 混合气的测试分析..... 23

1.3.1 条纹摄影 23

1.3.2 四氯化钛测试分析法 24

1.3.3 红外线吸收法 25

1.3.4 雷利散射法 26

1.3.5 激光诱发荧光法 (LIF 法) 26

1.4 燃烧的测试分析..... 29

1.4.1 发动机压力曲线分析 29

(1) DSP 实时压力分析 29

(2) 柴油发动机副燃烧室的
压力曲线测试分析 30

(3) 自燃、爆燃 (敲缸) 的检测 30

1.4.2 火焰发光的测试分析 31

(1) 化学发光的观测 32

(2) 燃烧场流速的测试分析 33

(3) 光谱分析 34

(4) 点火前反应的检测 35

1.4.3 火焰截面的观测 35

1.4.4 炭烟颗粒的测试分析 36

(1) 二色法 36

(2) 炭烟的观测 38

1.4.5 CARS 法 39

1.5 排气的测试分析..... 40

1.5.1 测试分析方法 40

(1) 非分散型红外线吸收法 40

(2) 氢火焰离子化法 (FID 法) 41

(3) 化学发光法 (CLD 法) 42

(4) 磁气压法 42

(5) 傅里叶变换红外吸收法
(FTIR 法) 42

1.5.2 样本法 43

(1) 直接法 44

(2) 定容量样本法 (CVS 法) 45

(3) 颗粒污染物的测试分析 45

(4) 粉尘采集法 47

1.5.3 排气测试的应用 47

(1) 空燃比的测试 47

(2) EGR 率的测试分析 47

(3) 失火的测试 48

(4) 爆燃测试 48

(5) 排气流量的测试分析 49

(6) 发动机机油消耗率的测试分析 50

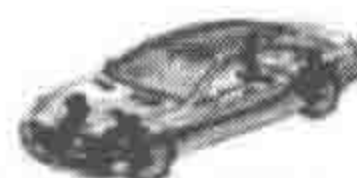
(7) 燃料输送的测试分析 50

参考文献 52

第2章 振动噪声和舒适性 57

2.1 振动噪声的测试分析..... 57

2.1.1 振动噪声的一般测试方法 57



(1) 振动测试仪器	57	(3) 激振模拟实验	72
(2) 噪声测试仪器	58	2.5 车辆部件的振动噪声	
(3) 噪声级的测试	58	测试分析	73
(4) 数据处理	59	2.5.1 动力总成振动噪声测试	73
2.1.2 频率分析	59	(1) 动力总成振动测试分析	73
(1) 傅里叶变换	59	(2) 动力总成噪声测试	75
(2) FIR 滤波处理	60	2.5.2 驱动系统扭转振动噪声	
(3) 跟踪分析	60	测试分析	77
(4) 倍频程分析	61	(1) 轰鸣声	77
(5) 时间-频率分析	61	(2) 啮合声	77
(6) 包络线分析	62	(3) 咔嚓声	78
(7) 倒频谱	62	2.5.3 进排气系统噪声测试分析	79
2.2 汽车振动噪声测试	62	(1) 进气噪声	79
2.2.1 激振试验	62	(2) 排气噪声	80
(1) 单点激振法	62	2.5.4 车身的振动噪声测试分析	81
(2) 多点激振法	63	(1) 车身的弯曲、扭转基本振动	81
(3) 扬声器激振法	63	(2) 板件的振动	83
2.2.2 激光全息振动测试法	63	(3) 车内空间的声学特性	83
2.2.3 激光多普勒振动测试法	65	2.5.5 悬架系统的振动噪声测试	84
2.2.4 声强测试法	65	(1) 传递函数合成法	84
2.2.5 声全息测试法	66	(2) 车轴振动激励	85
2.3 实验分析法	66	(3) 悬架 FE 模型的修正	85
2.3.1 振动噪声贡献度分析	66	(4) 车身传递函数测试	87
(1) 矢量合成法	66	(5) 合成的实施	87
(2) 标量相加法	67	(6) 结构变更的仿真	87
(3) 相关法	67	2.5.6 制动系统的振动噪声测试	87
2.3.2 实验模态分析	67	(1) 制动尖叫	87
(1) 曲线拟合法	68	(2) 制动抖动	88
(2) 系统同定法	68	2.6 车辆的振动舒适性测试分析	88
(3) 部分构造合成法	68	2.6.1 乘坐舒适性测试分析	88
(4) 传递函数合成法	68	(1) 激振试验和分析	88
2.4 振动噪声评价	69	(2) 越过突起试验分析	89
2.4.1 振动噪声评价指标	69	(3) 乘坐舒适性分析的动向	90
(1) 振动	69	2.6.2 车辆振动分析	91
(2) 噪声	69	(1) 怠速振动	91
2.4.2 主观评价实验法	71	(2) 加减速时冲击颤动	91
2.4.3 台架再现实验法	72	(3) 缠绕振动	92
(1) 底盘测控机实验	72	(4) 车身抖动	92
(2) 传动带式测控机实验	72	2.7 车辆噪声测试	92



2.7.1 车内噪声	92	3.6.3 连续正弦波输入	110
(1) 行驶噪声	94	3.6.4 阶跃输入	111
(2) 轰鸣声	94	3.6.5 脉冲输入	111
(3) 发动机噪声评价	94	3.6.6 频域评价法	111
(4) 齿轮噪声	95	3.7 其他行驶实验	113
(5) 路面噪声、轮胎噪声	96	3.7.1 挂车牵引时的稳定性实验	113
(6) 怠速噪声	96	3.7.2 松手稳定性实验	113
(7) 其他噪声	97	3.7.3 主观评价和生理反应评价	113
2.7.2 车外噪声	97	3.8 室内行驶实验	114
(1) 怠速时车外噪声	97	3.8.1 用于运动性能的平带式	
(2) 车辆通过时的车外噪声	97	实验装置	114
参考文献	99	3.8.2 室内圆回转实验	115
第3章 操纵稳定性	100	(1) 水平面内的平衡	115
3.1 要素特性	100	(2) 侧倾方向的平衡	116
3.1.1 车辆质量特性	100	(3) 稳态转向实验的实行方法	116
3.1.2 悬架、转向系统的特性	100	(4) 横向力矩的测试	116
3.1.3 轮胎特性	102	3.8.3 其他应用	116
3.1.4 路面摩擦	103	3.9 侧翻实验	117
3.2 行驶实验的种类	103	3.9.1 静态侧翻稳定性指标	117
3.3 行驶实验测试	103	(1) TTR (倾斜表比率)	117
3.3.1 标准的实验条件	103	(2) SSF (静态稳定系数)	117
3.3.2 行驶轨迹的测试	104	(3) SPR (侧拉率)	117
3.3.3 车辆响应的测试	105	3.9.2 转向盘侧翻实验	117
3.3.4 转向角、力的测试	105	3.9.3 侧翻稳定性指标	118
3.4 直行稳定性实验	105	参考文献	118
3.4.1 偏向性实验	105	第4章 碰撞安全性	120
3.4.2 路面激励稳定性实验	106	4.1 乘员伤害值测试技术和	
3.4.3 横向风稳定性实验		分析软件	120
(横向位移的测试)	106	4.1.1 车载测试系统概要	120
3.4.4 横向稳定性实验		4.1.2 测试通道的精度	121
(传递特性的测试)	107	(1) 传感器和放大器的精度	121
3.4.5 制动稳定性实验	108	(2) AD 转换处理时的精度	122
3.4.6 直行操舵响应实验	108	(3) 滤波处理	122
3.5 圆周回转实验	109	(4) 测试系统校准	123
3.5.1 稳态转向实验	109	4.1.3 乘员伤害值测试分析软件	124
3.5.2 基于圆周回转的实验	109	(1) 数字滤波处理	124
3.6 过渡响应实验	110	(2) 合成加速度、HIC 等的计算	125
3.6.1 单一正弦波输入	110	(3) TTI、VC 的计算	127
3.6.2 随机输入	110	4.2 碰撞用假人	127



4.2.1 假人的种类	127	(1) 实车实验	149
(1) 正面碰撞假人	127	(2) 刮水器单体实验	150
(2) 侧面碰撞假人	128	(3) 基于 CFD 计算的刮水器	
4.2.2 假人校准实验的测试技术	130	浮起预测	150
(1) 头部落下实验	130	5.5 空气动力学噪声的测试分析 ...	150
(2) 臂式钟摆实验	131	5.5.1 空气动力学噪声的种类和	
(3) 钟摆冲击实验	134	发生机理	151
(4) 其他实验	137	5.5.2 测试目的和测试法的分类	152
参考文献	138	5.5.3 风洞实验	153
第5章 空气动力学特性	139	(1) 风洞实验和行驶实验	153
5.1 概要	139	(2) 风洞背景噪声的减降	154
5.2 风洞设备	139	(3) 缩尺模型风洞实验	155
5.2.1 风洞	139	5.5.4 测试方法	156
(1) 实车风洞	139	(1) 车厢内声场的测试分析	156
(2) 模型风洞	140	(2) 车厢外部声场的测试分析	157
5.2.2 附属设备	140	(3) 流场的测试分析	158
(1) 边界层控制装置	140	5.6 可视化测试分析	159
(2) 可动地面装置	141	5.6.1 可视化设备	159
(3) 天平	142	(1) 烟雾风洞	159
5.3 空气力和流场的测试分析	142	(2) 水槽	160
5.3.1 空气力的测试	142	5.6.2 空气流的可视化	160
5.3.2 流动的测试分析	143	(1) 烟线法	160
(1) 皮托管(空速静压管)	143	(2) 油液法	161
(2) 热线风速计	143	(3) 丝线法	161
(3) 激光流速计	144	(4) 粉末附着法	161
(4) 压力的测试分析	145	5.6.3 水流的可视化	162
5.4 空气动力学实用性能的		(1) 染料	162
测试分析	145	(2) 颗粒	162
5.4.1 污垢附着实验	145	(3) 氢气气泡	162
(1) 行驶实验的污垢附着的测试分析 ...	145	5.6.4 数值的可视化	163
(2) 洒水污垢附着的测试分析	146	(1) 流线法	163
(3) 利用 CFD 对污垢附着的预测	147	(2) 速度矢量法	163
5.4.2 通风性能实验	147	(3) 压力分布	164
(1) 冷却空气的测试分析	147	(4) 涡度分布	164
(2) 通风阻力的测试分析	148	(5) 其他应用	164
(3) 根据 CFD 进行通风性能的预测 ...	149	5.6.5 可视化图像处理	164
5.4.3 刮水器浮起的测试分析	149	(1) 图像处理过程	165



(2) 时刻相关法的图像处理和测试 ...	165	6.4.3 层级推测法	183
(3) 测试结果的例子	166	6.4.4 测定阈限的方法	183
参考文献	167	(1) 调整法	184
第6章 人机工程学特性	169	(2) 极限法	184
6.1 人类形态特性测试分析	169	(3) 上下法	184
6.2 人类动态特性测试分析技术 ...	171	(4) 恒常法	184
6.2.1 到达域和身体运动测试	171	6.4.5 比较法与视线测量	184
6.2.2 形态变形测试	173	6.5 主观评价技术	185
6.3 生理测试分析技术	174	6.5.1 汽车内饰材料气味评价实验 ...	186
6.3.1 运动者的清醒度评价法	175	(1) 主观评价	186
6.3.2 清醒度评价指标	176	(2) 设备分析	187
(1) 利用脑波判断清醒度	176	(3) 降低车内气味的对策	188
(2) 依据眼球运动判断清醒度	177	(4) 对气味的生理评价	188
(3) 依据心跳判断清醒度	179	6.5.2 感性评价法	189
(4) 依据皮肤电位判断清醒度	181	(1) 自由联想法	189
6.4 感觉知觉的测试分析技术	182	(2) 选择法、评定法	190
6.4.1 心理物理学测试方法	182	(3) SD 法	190
(1) 阈值的测量	183	(4) 心理物理尺度值与感性	
(2) PSE 的测量	183	评价值之间的关系	191
6.4.2 信号测试理论	183	参考文献	192

第1章 发 动 机

1.1 流场的测试分析

发动机中的流场，是在与活塞运动的同时，在形状和大小不断变化的封闭容积内，随时间和空间都发生很大变化的具有复杂结构的场。在进气行程开始，到压缩行程的前半程形成涡流（水平旋回流）和滚流（垂直旋回流）那样结构明确的流动，这种结构在发生燃烧的压缩行程的结尾开始崩溃，流场开始形成一种变动较大的总体流动和尺寸较大的涡团，以及稍后生成的湍流共存的复杂流场。因为，这些流场特性是支配混合气形成和燃烧过程的主要因素，所以，作为控制燃烧的实质性的手段，这些流场的各种各样的控制方法都得到了尝试。为此，准确把握复杂的流动特性极为重要，采用激光多普勒流速计和激光片照射的流场测量方法，得到了广泛利用。

1.1.1 可视化粒子流

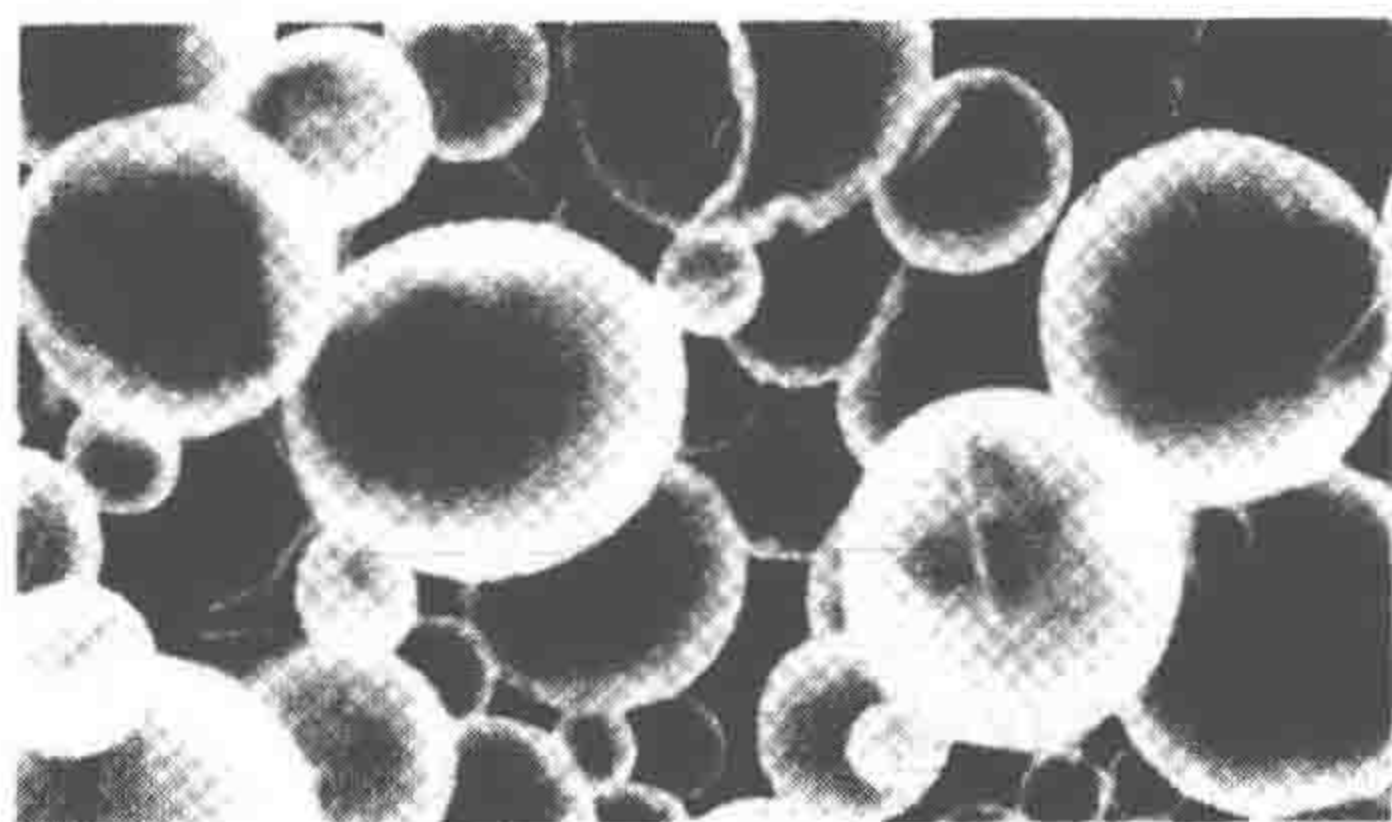
LDV 法、激光片照射法等都是向流体供给微小颗粒，根据追随流体运动的颗粒的散射光，得到有关速度的信息的方法。这些方法成为测量流动的主流的背景理由是，在发现的众多新颗粒中，对应测量目的，可以选择最适合自己测量方法的颗粒，从而实现精度较高的测量。

表 1-1 和图 1-1 中，列举了有代表性的可视化颗粒。测量流速时，对可视化颗粒的性能的要求可列举为，对于流动的反应灵敏度、散射光强等。为了满足这些要求，尽量选用粒径大、密度小的颗粒。但是，在决定了尺寸小到何种程度的流动作为测量对象时，就已经决定了颗粒的半径的上限。因此，根据测量对象以及测量目的，将各种颗粒分门别类进行使用，变得非常重要。

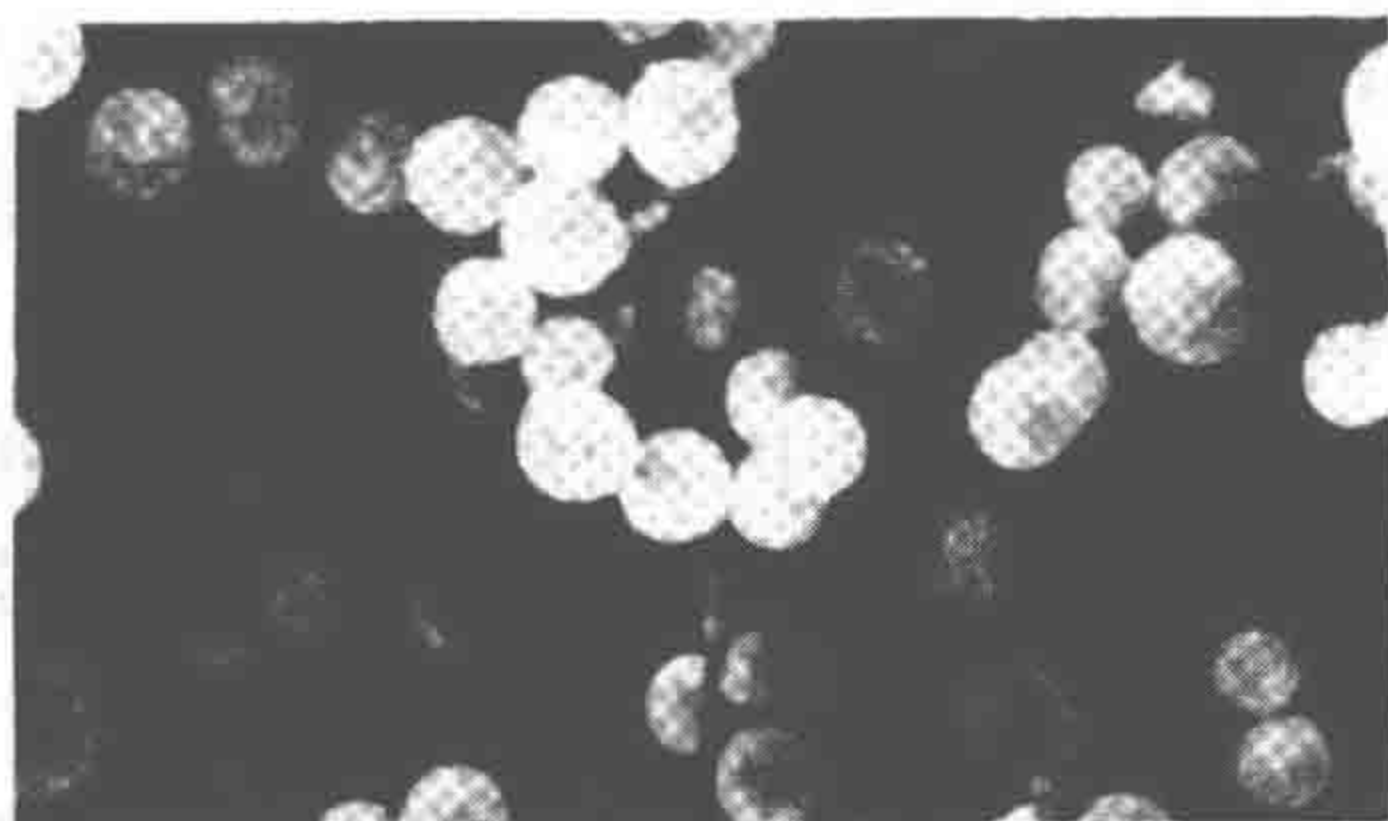
表 1-1 具有代表性的可视化粒子流参数

	粒子名	商品名 制造单位	平均粒径/ μm 粒径范围/ μm	密度 g/cm^3
中空微粒	玻璃微球	ニップセルK-135 日本シリカ工業	40 10 ~ 100	0.4
	树脂微球	エキスパンセル 日本フイライト	40 10 ~ 100	0.04
多孔微粒	聚酯微球	バイロン 東洋紡	任意 单分散	1.2
	硅石微球	MSF-30M リキッドガス	2.7 SD: 0.18	0.9
2 次凝聚微粒	白炭	ニップシルSS-50 日本シリカ工業	1.3 —	0.12
金属氧化物粉末微粒	二氧化钛	—	0.25 —	4.2
	氧化铝	—	0.2 —	4.0

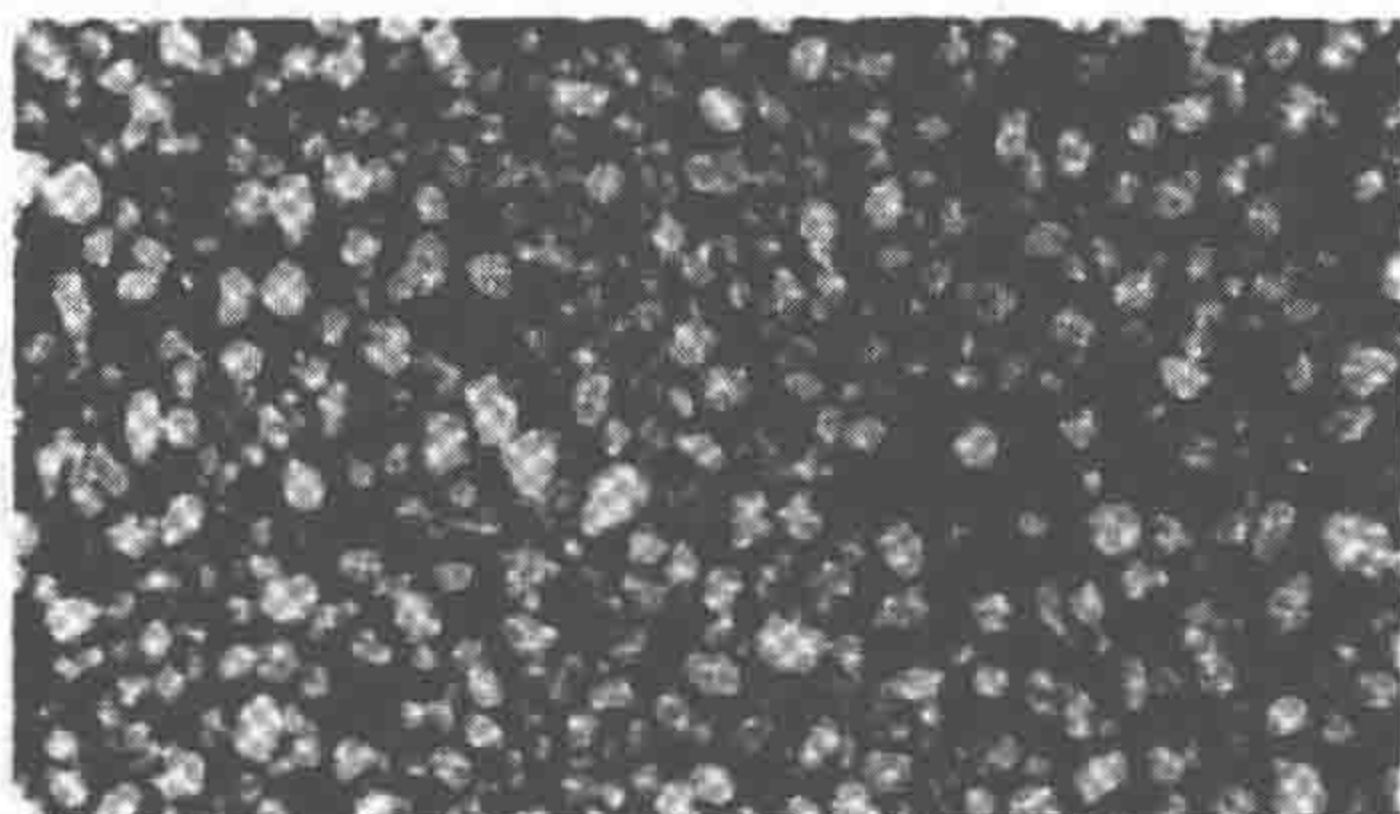
注：产品和制造厂家的名字保持日语原文，以便读者容易查找。



a) 树脂微球



b) 聚酯微球



c) 白炭颗粒

图 1-1 具有代表性的可视化粒子流

对总体流动进行测量时，较多使用粒径为几十 μm 的树脂微气球。当颗粒的半径在这个范围时，散射光强度与颗粒的半径的平方成正比，和氧化钛、氧化铝等传统颗粒相比，LDV 数据密度可提高到两位数附近。在使用激光片照射法的场合，大粒径的颗粒容易得到清晰的图像是其优势。

粒径为 $40\mu\text{m}$ ，密度为 $0.04\text{g}/\text{cm}^3$ 的树脂微气球，对于阶梯状的速度变化延迟时间常数是 $40\mu\text{s}$ ，对于正弦波形的流速变动显示了振幅响应 0.9 的追随响应频率为 2.5kHz ，对于总体流动响应及时。粒径的偏差虽然很大，因为微气球壁面的厚度是一定的，所以微气球具有直径越大密度越小的

倾向，从而抑制了由于粒径引起的响应的偏差。

测试分析湍流特性的时候，对于可视化颗粒特性要求更加严格，需要对数百千赫附近的频率能够及时准确地响应，对于 $100\mu\text{m}$ 规模的湍流，要求微球粒径在数 μm 以下。为了符合这些条件，可考虑使用二次冷凝颗粒的白色碳。

在流速测试分析中，保持颗粒在时间、空间中的均匀分布非常重要。另外，对于颗粒密度要求能够自由控制。图 1-2 是能够满足这种要求的颗粒供给装置的一个例子。装置结构是，把恒温槽里干燥好的颗粒，由空气泵驱动，穿过开孔的平板，间歇性地落下，分布到向上方流动的离子化空气中，进一步引导到回旋加速器中，最后供应到对应装置里。由于颗粒在回旋加速器内将滞留充分的时间，能够使颗粒密度分布达到均匀。颗粒密度的控制，则由调节多孔平板的重复往返运动的频率进行控制。

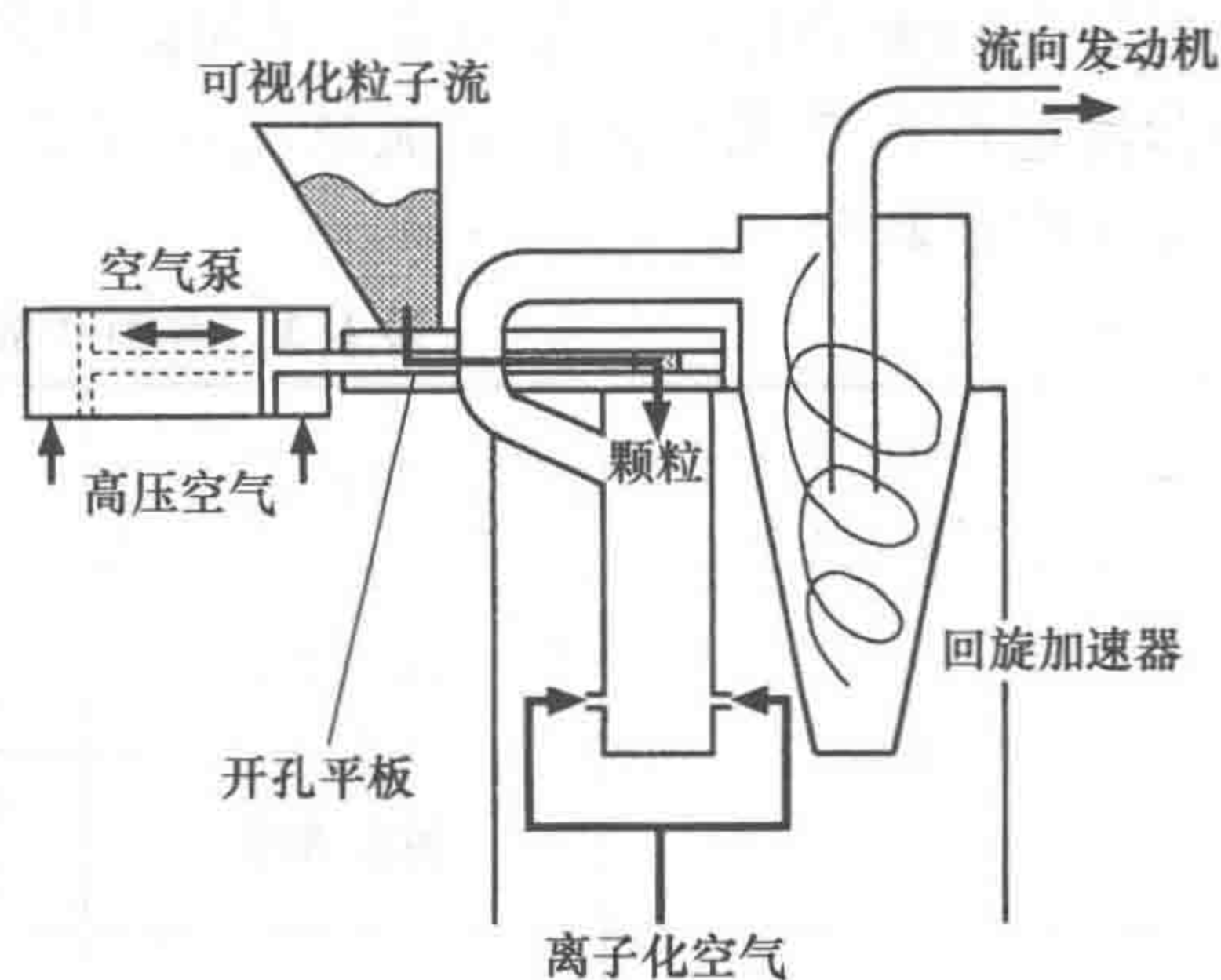


图 1-2 提供可视化粒子流的装置

1.1.2 激光多普勒流速计 (LDV)

利用激光多普勒流速计 (LDV: Laser Dopplar Velocimetry)，可以在比较开阔的空间中进行局部性的非接触流速测量，所以，为了调查清楚发动机内流动的特性，上述装置的利用有了极快的进步。

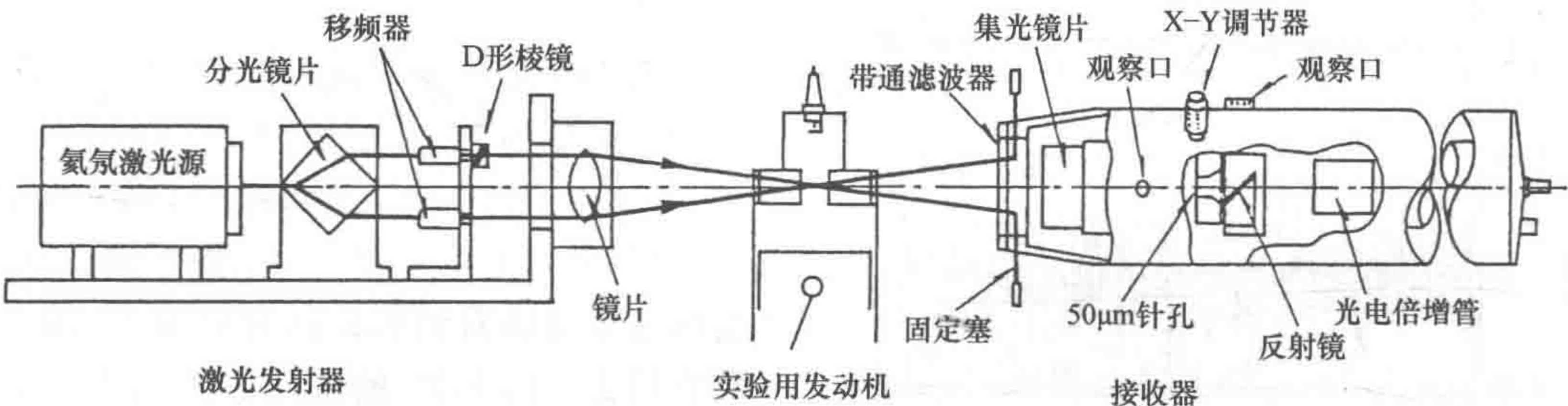
颗粒通过两束激光的交点会产生散射光，LDV 装置对散射光进行干涉，得到脉冲串信号。而这个脉冲串信号的频率数（多普勒频率）是和流速成比例的。LDV 就是基于以上原理进行测量的。也就是说，多普勒频率数 f_D 可以根据以下算式得到。

$$f_D = 2v\sin\theta/\lambda \tag{1.1}$$

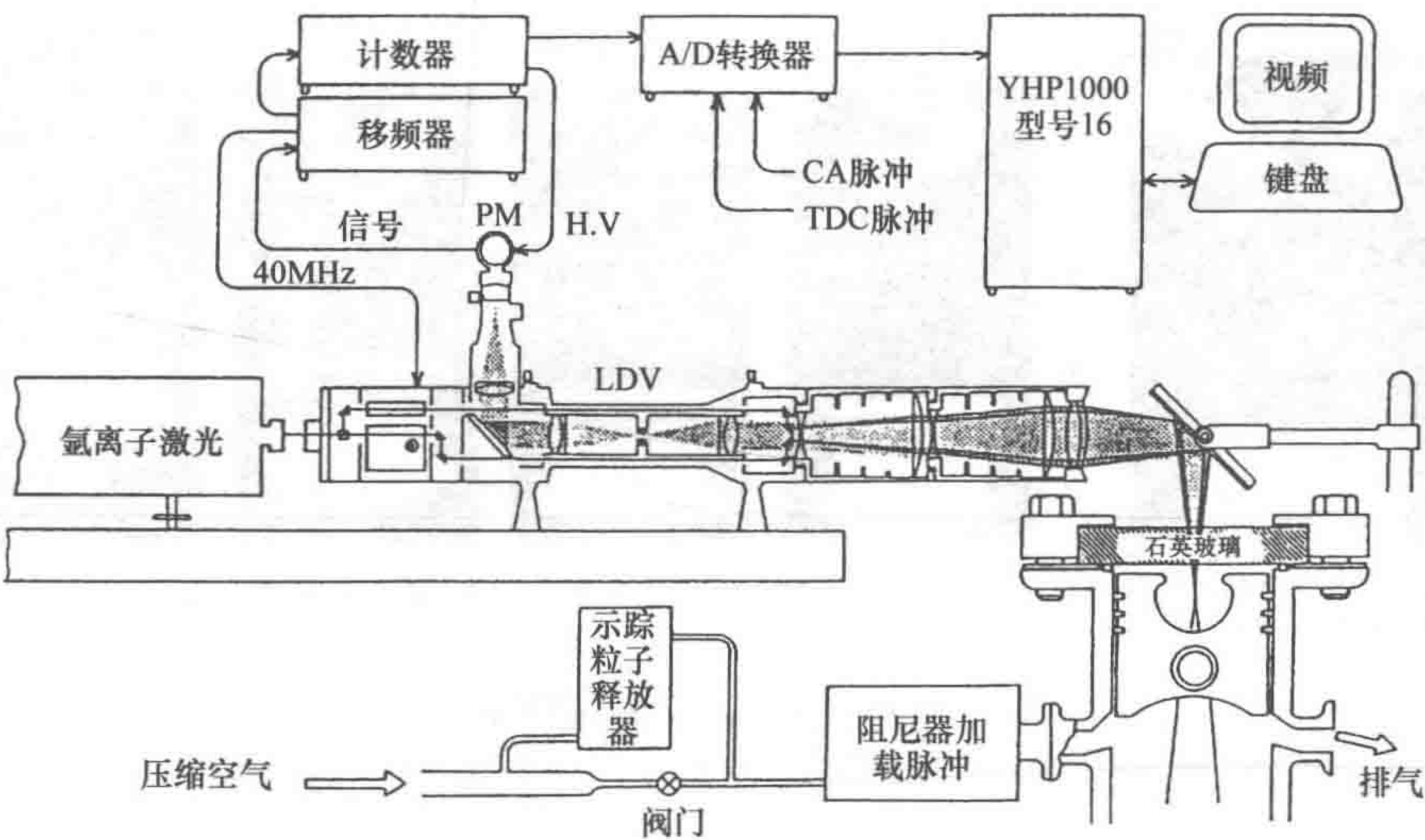
式中， v 是颗粒速度； θ 是激光束交叉半角； λ 是激光波长。

根据 LDV 散射光的检测方向，可以大致分为前方散射式和后方散射式（图 1-3）。

前方散射式 LDV 信号强度大，可测量高密度数据，所以可适用于湍流的测量。但是，用于发动机内流动测量时，由于需要方向相对的两个测量窗口，大多数情况下测量范围受到一定限制。另一方面，后方散射式 LDV 在数据密度大小这一点上，性能较前方散射式差，然而，测量窗只需要一个，有自由度较高的优点。另外，激光发出系统和信号接收系统一体化，激光轴的位置调整方便简单。在较大空间中需要多点测量的总体流动的横贯测量，这种方式效率较高。



a) 前方散射式LDV^[1)]

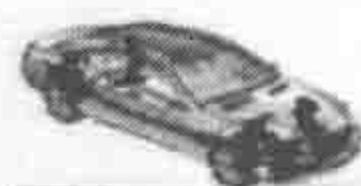


b) 后方散射式LDV

图 1-3 具有代表性的 LDV 光学系统

LDV 被确立为一般的测量方法有 10 年以上了，其间试图通过信号处理方法和光学

系统的改善，提高测量密度的尝试不断得到实施。特别是，随着计算元件高速化，实时



的FFT (Fast Fourier Transform) 处理成为可能, FFT 进行信号处理的方法在实际应用中, 大大改善了测量极限的 S/N 之比数。图 1-4 中, 比较了 FFT 法和以前的周期计数法的脉冲串信号的测量极限。和周期计数法的 S/N 比的 6dB 界限相比, FFT 法可以测到 2dB 为止的信号。以前, 由于壁面附近发生的散射光的强度较高, 壁附近的测量变得较为困难, 如果使用 FFT 法, 再根据

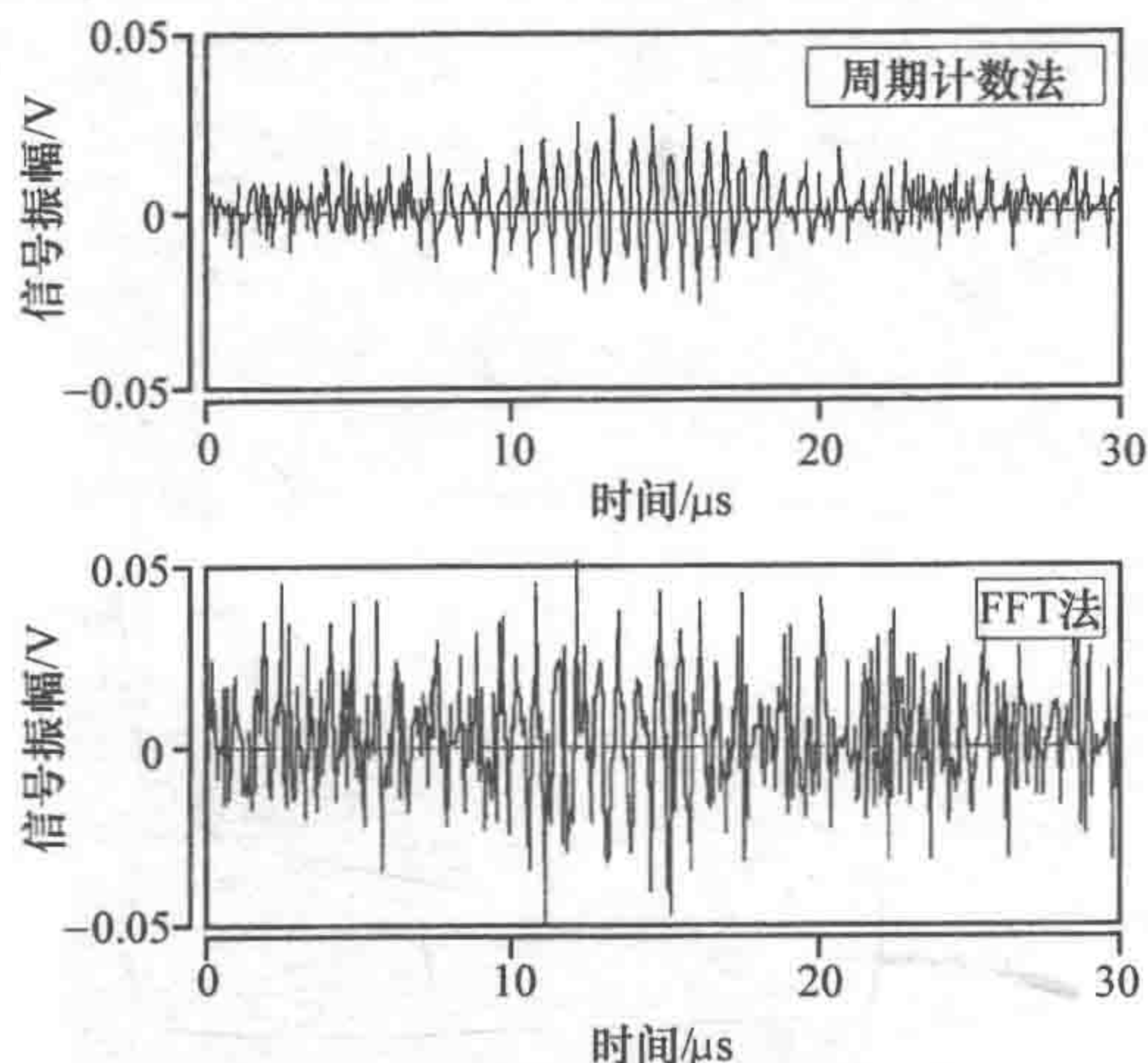


图 1-4 周期计数法和 FFT 法的脉冲串信号测量极限

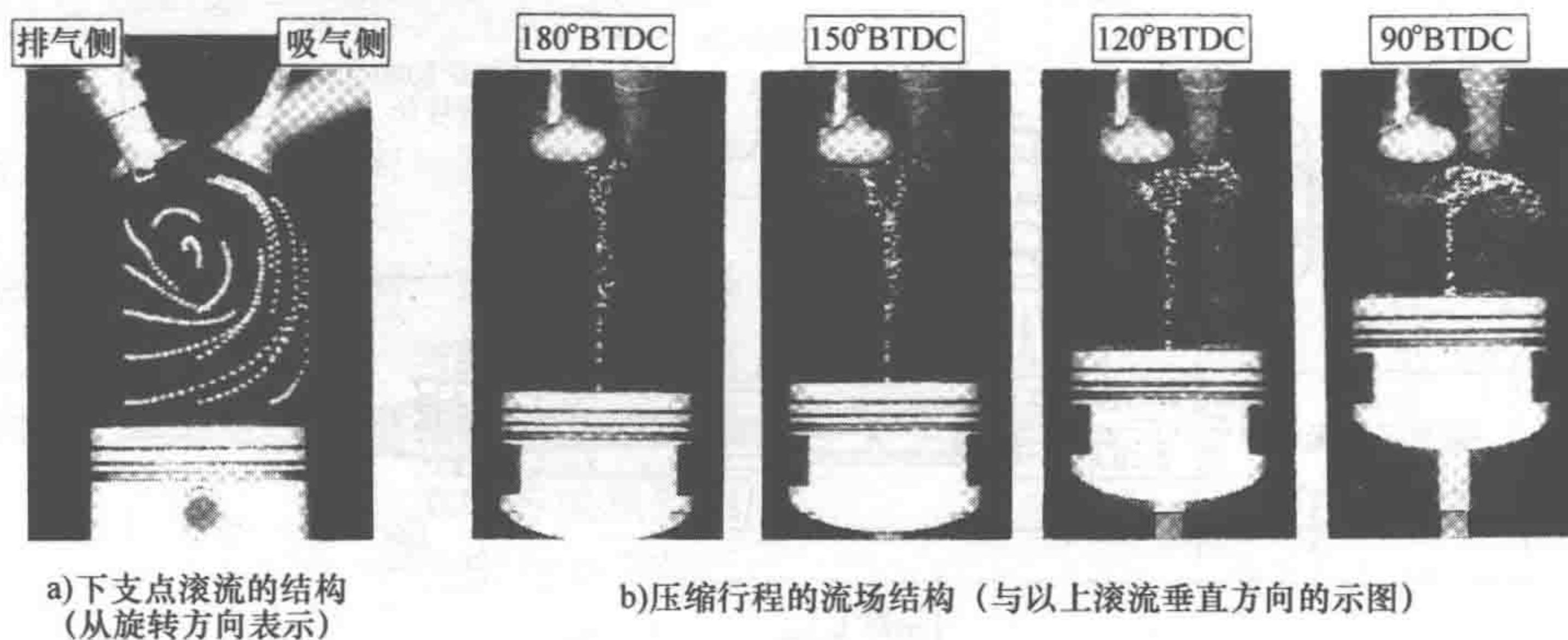


图 1-5 滚流的三维结构图

根据颗粒轨迹法表示, 1000r/min, WOT, 电动机带动

这个方法, 由于是采用多循环的测量结果, 综合平均求出其流场结构的, 压缩行程的后半程, 总体流动崩溃后, 流场局部变动以及各循环之间的变动变大时, 就不能够得到充分的分析数据了。

需要采用大粒径的颗粒, 壁面距离 1mm 范围以内的空间的测量也是可行的。

(1) 总体流动的测试分析

对于结构较明确的流动, 实施高精度的定量测量, 进而进行分析的场合, 应用后方散射式 LDV, 进行多循环多点测量, 基于这些结果取循环平均值, 构成流场的方法较为有效。这时, 后方散射式 LDV 数据密度较低, 对多次循环数据每当其出现时进行采样的方法比较合理。也就是说, 需要和信号处理器的颗粒认识信号同步, 在记录流速数据的同时, 同步记录当时的曲轴角度数、第几循环等。

图 1-5 是根据气缸内的 64 个测量点得到的结果构成的滚流的三维结构图。图 1-5a 为滚流的旋转轴的视线方向的示图, 图 1-5b 为以上垂直方向的示图。图 1-5a 中为从这里能够看到的旋回方向的流速成分, 和它相比, 图 1-5b 的轴向的流速成分变得几乎没有了, 从而可以知道, 这就是气缸滚流的特征。

(2) 湍流的测试分析

图 1-6 所示为采用后方散射式 LDV 得到的 200 循环的组合数据 (上) 和根据前方散射方法得到的周期分离数据的 20 循环的叠加结果 (下)。两者都是在火花塞附近