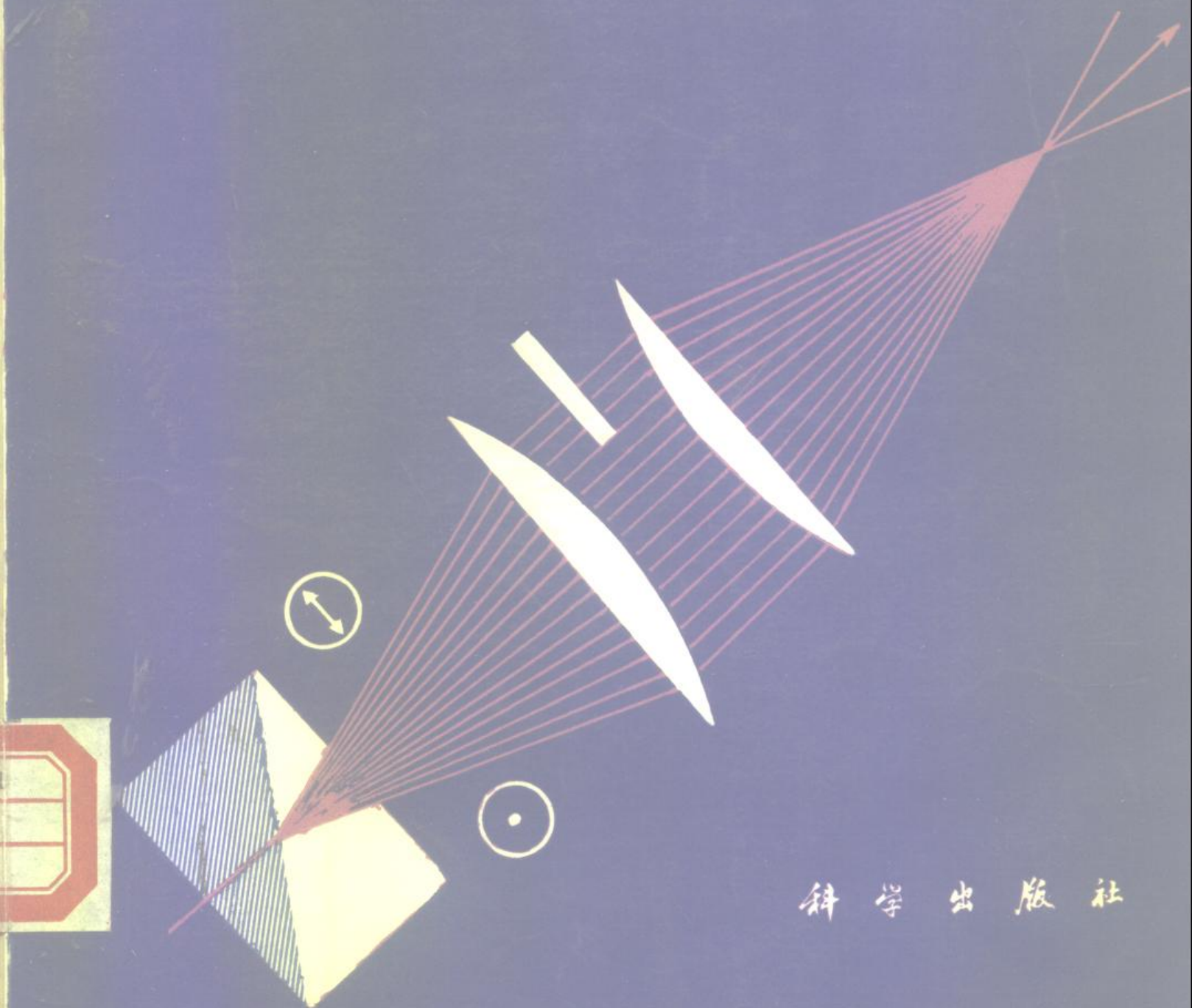


激光多普勒测速技术的 原理和实践

F. 杜斯特 A. 梅林 J.H. 怀特洛 著



科学出版社

2277
259

激光多普勒测速技术的 原理和实践

F. 杜斯特 A. 梅林 J. H. 怀特洛 著

沈 熊 许宏庆 周作元 译

王仕康 校

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

D583/35

内 容 简 介

本书作者在激光多普勒测速领域成绩卓著，在国际上享有较高声誉。本书总结了国际上激光多普勒测速技术的研究成果，内容丰富，重点突出，有许多独到的见解。

本书可供流体力学专业的高年级大学生、研究生、有关方面的研究人员和工程技术人员参考。

F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw
Principles and Practice of Laser-Doppler Anemometry
(Second Edition)
Academic Press, 1981

激光多普勒测速技术的 原理和实践

F. 杜斯特 A. 梅林 J. H. 怀特洛 著

沈 熊 许宏庆 周作元 译

王仕康 校

责任编辑 朴玉芬 杨 岭

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 2 月第 一 版 开本：787×1092 1/16

1992 年 2 月第一次印刷 印张：29

印数：1—2 200 字数：654 000

ISBN 7-03-002467 2/O · 461

定价：25.10 元

译 者 的 话

从我们萌发翻译本书英文原版的念头到它的中译本问世,时间已过去了十多年。在这期间,激光测速技术在我国得到了迅速的发展和广泛的应用,许多高等院校和研究机构已将其列为培养本科生和研究生的基本课程之一。虽然由于技术的进展,这一领域已经出现不少新的分支和研究成果,但本书仍然是一本有价值的参考书,它丰富的内容和精湛的论述对激光多普勒测速领域的教学和科研仍有不可替代的作用。

从1979年起,本书的中译稿作为清华大学研究生和本科生激光测速课程的参考教材一直沿用至今。其间曾几经修改补充,特别是在1984年间得到了德国 Erlangen 大学 F. Durst 教授的积极支持。由他的研究生刘小稚女士校阅了初版译稿。英国帝国理工学院 J. H. Whitelaw 教授也对中译本的出版给予关心和支持。修改后的再版译稿是由天津大学王仕康教授校阅的,天津大学舒玮教授校阅了第十三章。

承担本书翻译的有沈熊(第一章至第五章)、许宏庆(第六章至第九章)和周作元(第十章至第十三章)。我们谨向关心本书中译本出版的国内外专家和同行们表示由衷的感谢。

沈 熊

许宏庆

周作元

1990年6月于清华大学

中译本序言

我们怀着极大的喜悦为我们的《激光多普勒测速技术的原理和实践》一书的中文版作序。此书已出版过两次英文版和一次德文版，考虑到在流体动力学研究方面中国在近期内所取得的进展，这次出中文版是适时的。

自从英文版再版以来，激光多普勒测速技术在它的应用范围方面又有了发展。有关的仪器现在已成为流体动力学实验室中普通的设备了，它能用于那些以前不可能获得速度信息的场合，我们渴望这一进展将继续下去，并尽力在我们的实验室中做到这一点。仪器本身在工作频率和易用性方面已得到改进，但是它的原理和补充知识还有待阐明。

我们很希望本书中文版能在应用激光多普勒测速技术方面对我们的同行有所帮助，我们还高兴地从最近的会议录中注意到中国在实验方面的飞速发展。

衷心感谢沈熊教授、刘小稚女士和其他有关人员为中译本所做的工作。他们在百忙之中完成了这项任务，对于这一重要贡献我们谨表深切的谢意。

F. 杜斯特

A. 梅林

J. H. 怀特洛

1990年5月

第二版序言

在本书的第二版中我们已作的改动考虑了两个方面的因素：首先，根据第一版读者的意见改写了某些内容，使表述更加清楚以符合读者的要求；其次，更新了一些章节的内容以便反映自本书初版问世以来的五年间激光多普勒测速技术的重要进展。

第十三章是特别需要更新的，因而对它进行了全面的改写。还对其他三个方面的内容进行了重要的修改，即光子相关、由多普勒信号测量粒子尺寸、由单次多普勒频率测量进行平均时导致的偏置。尤其是偏置，它一直是存在许多争议的课题，我们希望我们已经在澄清其现状方面作出了贡献。从历史上看，最广泛地对偏置进行的研究一直是同计数器处理信号联系在一起，我们的讨论放在相应的第九章中，其结论也适用于其他型式的信号处理器。第一章的历史回顾作了一些小改动。然而，我们并不打算按 1981 年的发展状况来改写，否则就要大范围地重写以后各章。

在修订过程中引用的参考文献与第一版的参考文献分开列出。在文中，第一版的参考文献和第二版新增列的参考文献分别用圆括号()和方括号[]来表示，括号中填写文献发表的年份。

我们想再次感谢在第一版序言中提到过的资助人，他们一直支持着我们的研究工作。我们还一直得到联邦防御技术与措施研究所、联邦科学技术部、美国国家航空航天管理局 Lewis 研究中心、Rolls Royce 公司、美国陆军和美国能源部的其他的支持。

F. 杜斯特

A. 梅林

J. H. 怀特洛

1981年5月

第一版序言

本书是作者在过去六年中对激光多普勒测速技术所进行的详尽的理论和实验研究的成果。这些研究旨在发展这门学科，使之成为研究流体流动的通用测量技术的基础。本书的目的是给流体力学研究人员、工业部门的工程师和高年级大学生提供基础知识，因此，读者只需要具备一般的光学、电子学、流体力学和有关的数学知识就够了。本书所涉及的范围是按以下要求来选择的：能够给那些打算进一步从事激光多普勒测速技术的研究者打下坚实的基础，同时也能给那些只想在他们特定的流动问题中应用激光多普勒测速技术的人提供足够全面的知识框架。

激光多普勒测速技术所基于的物理原理都可以用严格的数学方法加以证明。习惯于详尽数学推导的读者对本书中的处理可能会感到失望，因为我们不打算对所用的每个原理都给出严格的证明。然而，由于更加强调了对物理原理的理解以及将这些原理用于测量速度和速度相关量的方法，这种不严格性得到了弥补。

所以，本书的主要目的是为了传播应用激光多普勒方法测量瞬时速度的有关知识，更准确地说，是为了让读者了解本学科的原理和实践及其范围、精确性、易用性、造价和相关的特殊问题。对目的作此表述是明确的，但这还不够，在引论中还将通过指出本学科的重要性以及凭借作者对学科的深入了解对此作更详细的说明。

本书的形式有点特殊，在此加以说明。除第一章外，本书基本上取自帝国理工学院、Karlsruhe 大学和 Purdue 大学进修班用的讲义。为了听课者的方便，这些讲义是将讲课用的幻灯片复制后装订成册的。第二章至第十三章采用了方框形式，其中一些方框是对幻灯片的扩充和提高。每个方框后的正文是对方框中内容的解释和补充。引论一章采用了通常的形式，因它不易用同样方法处理。我们希望本书的形式会使读者感到方便和有帮助。在大多数情况下，方框便于快速浏览本页的内容，并有助于带有特定问题的读者得到可以利用的答案。打算只读某一章或通读全书的读者，会发现方框中的材料为他掌握该页更详细的材料作了思想准备。各章的内容安排将对读者有所帮助，在下面几段中予以说明。

第一章的引论阐明了本书的课题，介绍了该课题与其他光学技术的关系，讨论了它与实际应用的联系以及对课题作了历史的回顾。

第二至五章讨论了激光多普勒测速技术中可能与光学元件有关的问题。因而，第二章提供了几何光学、物理光学和量子光学的背景材料，它们与诸如干涉、衍射、运动光源、多普勒效应以及光检测器等专题有关。第三章涉及光散射、光学法测量粒子速度的物理解释、激光多普勒测速技术原理的概述以及光学信号的可见度和信噪比。第四章评述了用于速度测量的光学装置，导出了激光多普勒测速仪的转换方程，并确定了用来定义测量控制体积的原则。第五章介绍了与光学元件性能指标有关的实用准则，同时讨论了用来改变光速频率和消除基底信号的技术。

第六至九章涉及处理多普勒信号电子装置。第六章中讨论了六种可能的方法，其

中的三种方法,即频率分析法、频率跟踪解调法和计数法,在七、八和九章中分别作了详细介绍。

第十和十一章讨论了散射粒子以及它们的特性、发生和测量等课题。前面几章已经考虑了粒子的速度,而这里对粒子的讨论提供了把粒子速度同流动速度联系起来所需要的信息。第十二章把从第二至十一章涉及的专题综合在一起,专门为希望自己设计激光多普勒测速仪的读者提供一些资料。第十三章是对过去用激光多普勒测速仪所做研究工作的评价,以期对读者在判断他们自己的研究是否可能成功时有所帮助。

为本书提供素材的研究工作得到了科学研究院、中央电力生产局、Harwell 原子能研究中心、英国心脏基金会、北大西洋公约组织、帝国理工学院机械工程系、大众汽车基金会、德意志研究基金会的部分支持;作者感谢所有的这些资助人,并且很高兴有机会借本书序言对他们的慷慨表示感激之情。帝国理工学院、Harwell 和从事特别研究项目 80 的许多同事在各个阶段给作者的工作许多帮助,特别是 R.J. Baker 博士、D.F.G. Durão 先生、M. Zaré 先生为这项研究工作做出了很大贡献。最后,作者衷心感谢 Oscar Vis 先生的贡献,他设计出的集成光学单元给作者系列试验取得成功打下了基础。

F. 杜斯特

A. 梅林

J. H. 怀特洛

1975年11月

目 录

译者的话

中译本序言

第二版序言

第一版序言

第一章 引论	1
1.1 光学技术的内在联系	2
1.2 与流体力学的关系	4
1.3 历史的回顾	7
第二章 光学原理	13
2.1 目的	13
2.2 几何光学基本定律	14
2.3 几何光学定律的应用: 全反射	15
2.4 两束光夹角的变化	16
2.5 光线通过平行壁面引起的位置变化	17
2.6 三层系统中位置的变化	18
2.7 光学界面造成的光波畸变	19
2.8 球面及其在成象系统中的应用	21
2.9 两个球面的处理	22
2.10 透镜及其设计参数	23
2.11 透镜系统及其解析处理	24
2.12 激光多普勒测速仪中的棱镜和棱镜系统	25
2.13 单色光波及其复数解析表达式	26
2.14 平面单色光波	27
2.15 光波性质的某些基本关系	28
2.16 采用复数符号的标量光波及其解析表达式	29
2.17 光波的强度	30
2.18 两个光波的干涉	31
2.19 条纹间距和条纹可见度	32
2.20 光波的时间相干性	33
2.21 光波的空间相干性	34
2.22 光波的衍射, 1	35
2.23 光波的衍射, 2	36
2.24 光栅和衍射现象	37
2.25 偏振, 1	38

2.26	偏振, 2	39
2.27	偏振, 3	40
2.28	起偏器和检偏器	41
2.29	偏振棱镜	42
2.30	用偏振光束观察光的干涉	43
2.31	光散射, 1	44
2.32	光散射, 2	45
2.33	粒子的光散射和偏振效应	46
2.34	运动的光源;多普勒效应, 1	47
2.35	运动的光检测器;多普勒效应, 2	48
2.36	利用多普勒效应测量速度的原理, 1	49
2.37	利用多普勒效应测量速度的原理, 2	50
2.38	光检测器: 工作原理	51
2.39	用作光检测器的光电二极管	52
2.40	光电二极管的噪声	53
2.41	光电倍增管	54
2.42	光电倍增管的噪声	55
2.43	结论和本章要点, 1	56
2.44	结论和本章要点, 2	57
第三章	散射现象和光学系统	58
3.1	目的	58
3.2	单个粒子的光散射, 1	59
3.3	单个粒子的光散射, 2	60
3.4	单个粒子的光散射, 3	61
3.5	单个粒子的光散射, 4	62
3.6	光散射的积分参数	63
3.7	单个粒子的光散射, 5	64
3.8	静止粒子的光散射, 1	65
3.9	静止粒子的光散射, 2	66
3.10	单个粒子的光散射分析, 1	67
3.11	单个粒子的光散射分析, 2	68
3.12	多粒子和多光束的光散射分析, 1	69
3.13	多粒子和多光束的光散射分析, 2	70
3.14	多粒子和多光束的光散射分析, 3	71
3.15	多粒子和多光束的光散射分析, 4	72
3.16	多粒子和多光束的光散射分析, 5	73
3.17	多粒子和多光束的光散射分析, 6	74
3.18	由两个粒子散射光造成的圆形干涉图形	75
3.19	由两个粒子散射光造成的线状干涉图形	76

3.20	利用干涉效应的速度测量	77
3.21	光探测器信号的时间相依性	78
3.22	两个粒子被一束光照射得到的激光多普勒信号	79
3.23	两个粒子被一束光照射得到的多普勒信号的实验验证	80
3.24	一个粒子被两束光照射得到的多普勒信号	81
3.25	一个粒子被两束光照射得到的激光多普勒信号的实验验证	82
3.26	两个粒子被不同光束照射得到的激光多普勒信号	83
3.27	粒子被不同光束照射产生的多普勒信号的实验验证	84
3.28	一个运动粒子的散射光与参考光相干涉产生的多普勒信号	85
3.29	“双光束测速计”的基本光学布置	86
3.30	“参考光测速计”的基本光学布置	87
3.31	“双散射光测速计”的基本光学布置	88
3.32	空间光强变化造成的信噪比变化	89
3.33	粒子尺寸对信号品质和信号强度的影响	90
3.34	不同尺寸粒子的信号品质和信号强度	91
3.35	信噪比的空间分布	92
3.36	多频信号造成的信号品质下降	93
3.37	用于双光束测速计的光收集系统	94
3.38	结论和本章要点, 1	95
3.39	结论和本章要点, 2	96
第四章	激光多普勒测速的基本原理	97
4.1	目的	97
4.2	激光多普勒测速仪的光学装置, 1	98
4.3	激光多普勒测速仪的光学装置, 2	99
4.4	激光多普勒测速仪的光学装置, 3	100
4.5	激光多普勒测速仪的光学装置, 4	101
4.6	激光多普勒测速仪的光学结构, 5	102
4.7	激光多普勒测速仪的光学结构, 6	103
4.8	激光多普勒测速仪的光学结构, 7	104
4.9	激光多普勒测速仪的光学结构, 8	105
4.10	激光多普勒测速仪的光学结构, 9	106
4.11	激光多普勒测速仪的光学结构, 10	107
4.12	激光多普勒测速仪的光学结构, 11	108
4.13	测速仪信号的多普勒模型	109
4.14	激光多普勒信号的条纹模型	110
4.15	采用固定波图形的激光多普勒信号模型	111
4.16	用光程差随时间变化解释信号频率的模型	112
4.17	信号品质与粒子尺寸关系的启发式解释	113
4.18	信号品质与粒子尺寸的关系	114

4.19	信号品质与粒子浓度的关系, 1	115
4.20	信号品质与粒子浓度的关系, 2	116
4.21	激光多普勒测速仪系统的方框图	117
4.22	光源的选择, 相干要求, 1	118
4.23	光源的选择, 相干要求, 2	119
4.24	光源的选择, 相干要求, 3	120
4.25	光源的选择, 功率要求, 1	121
4.26	光源的选择, 功率要求, 2	122
4.27	高斯光束的主要特性	123
4.28	高斯光束的聚焦	124
4.29	高斯光束与激光多普勒测速仪性能	126
4.30	几何参数的影响, 1	127
4.31	几何参数的影响, 2	128
4.32	几何参数的影响, 3	129
4.33	几何参数的影响, 4	130
4.34	几何参数的影响, 5	131
4.35	几何参数的影响, 6	132
4.36	本章要点, 1	133
4.37	本章要点, 2	134
第五章	光学系统的元件	135
5.1	目的	135
5.2	光源的选择, 1	136
5.3	光源的选择, 2	137
5.4	光源的选择, 3	138
5.5	集成光学单元, 1	139
5.6	集成光学单元, 2	140
5.7	集成光学单元, 3	141
5.8	集成光学单元, 4	142
5.9	光学元件的选择	143
5.10	光检测器的选择, 1	144
5.11	光检测器的选择, 2	145
5.12	光线的频移, 1	146
5.13	光线的频移, 2	147
5.14	光线的频移, 3	148
5.15	光线的频移, 4	149
5.16	光线的频移, 5	150
5.17	光线的频移, 6	151
5.18	光线的频移, 7	152
5.19	光线的频移, 8	153

5.20	基座信号的消除, 1	154
5.21	基座信号的消除, 2	155
5.22	频移和基座消除的结合	156
5.23	结论	157
第六章	信号处理引论	158
6.1	目的	158
6.2	电信号的特性, 1	159
6.3	电信号的特性, 2	160
6.4	电信号的特性, 3	161
6.5	电信号的特性, 4	162
6.6	对信号处理系统的要求	163
6.7	频率分析法, 1	164
6.8	频率分析法, 2	165
6.9	频率跟踪法, 1	166
6.10	频率跟踪法, 2	167
6.11	计数法, 1	168
6.12	计数法, 2	169
6.13	滤波器库, 1	170
6.14	滤波器库, 2	171
6.15	滤波器库, 3	172
6.16	光子相关频谱法, 1	173
6.17	光子相关频谱法, 2	174
6.18	光子相关频谱法, 3	175
6.19	光子相关频谱法, 4	176
6.20	光子相关频谱法, 5	178
6.21	光学频率分析法, 1	180
6.22	光学频率分析法, 2	181
6.23	光学频率分析法, 3	182
6.24	本章要点	183
第七章	频率分析法信号处理	184
7.1	目的	184
7.2	频谱分析法: 对象	185
7.3	散射光的频谱	186
7.4	工作原理, 1	187
7.5	工作原理, 2	188
7.6	工作原理, 3	189
7.7	工作原理, 4	190
7.8	工作原理, 5	191
7.9	计数/采样: 频谱分析, 1	192

7.10	计数/采样: 频谱分析, 2	193
7.11	实际操作, 1	195
7.12	实际操作, 2	196
7.13	实际操作, 3	197
7.14	多普勒频谱的统计理论	198
7.15	频谱分析仪输出的处理, 1	199
7.16	频谱分析仪输出的处理, 2	200
7.17	高湍流流动中的问题, 1	201
7.18	高湍流流动中的问题, 2	202
7.19	非均匀粒子浓度问题	203
7.20	频谱分析法的优点	204
7.21	频谱分析法的缺点	205
7.22	一些现有的频谱分析仪	206
7.23	加宽的修正, 1	207
7.24	加宽的修正, 2	208
7.25	有限渡越时间加宽, 1	209
7.26	有限渡越时间加宽, 2	210
7.27	有限渡越时间加宽, 3	211
7.28	由于速度脉动引起的加宽	212
7.29	速度梯度加宽, 1	213
7.30	速度梯度加宽, 2	214
7.31	仪器加宽	215
7.32	加宽修正的估算	216
7.33	本章要点	217
第八章	频率跟踪解调法信号处理	218
8.1	目的	218
8.2	频率跟踪法: 对象	219
8.3	工作原理, 1: 补偿外差跟踪器	220
8.4	工作原理, 2: 压控振荡器	221
8.5	工作原理, 3: 鉴频器	222
8.6	工作原理, 4: 鉴相器	223
8.7	工作原理, 5: 锁相环路	224
8.8	工作原理, 6: 自差式跟踪器	225
8.9	实际操作, 1	226
8.10	实际操作, 2	227
8.11	输出的处理	228
8.12	频率跟踪法的优点	229
8.13	频率跟踪法的局限性	230
8.14	脱落限制	231

8.15	脱落和捕获范围的限制	232
8.16	动态响应限制	233
8.17	跟踪范围的限制	234
8.18	转换速率的限制	235
8.19	最佳跟踪	236
8.20	一些频率跟踪器	237
8.21	加宽修正	238
8.22	有限渡越时间的加宽, 1	239
8.23	有限渡越时间的加宽, 2	240
8.24	湍流和模糊频谱, 1	241
8.25	湍流和模糊频谱, 2	242
8.26	湍流和模糊频谱, 3	243
8.27	本章要点	244
第九章	计数法信号处理	245
9.1	目的	245
9.2	多普勒频率测量, 1: 误差来源	246
9.3	多普勒频率测量, 2: 有限持续时间加宽	247
9.4	多普勒频率测量, 3: 多普勒信号的解析描述	248
9.5	多普勒频率测量, 4: 有限带宽滤波器的影响	249
9.6	多普勒频率测量, 5: 有限带宽滤波器的影响	251
9.7	多普勒频率测量, 6: 噪声源	253
9.8	用计数技术测量频率, 1	254
9.9	用计数技术测量频率, 2: 噪声的影响	255
9.10	用计数技术测量频率, 3: 由于有限时间分辨率引起的计时误差	256
9.11	用计数技术测量频率, 4: 固定闸门计数引起的计数模糊误差	257
9.12	用计数技术测量频率, 5: 固定闸门计数引起的计时误差	258
9.13	频率计数器的工作原理, 1	259
9.14	频率计数器的工作原理, 2: 幅值鉴别	260
9.15	频率计数器的工作原理, 3: 周期测量的触发电平	261
9.16	频率计数器的工作原理, 4: 峰值检测器	262
9.17	频率计数器的工作原理, 5: 由于噪声造成的额外过零点	263
9.18	信号闪烁中明显的周期变化	264
9.19	激光多普勒测速仪的时间分辨率	265
9.20	信号基座的消除, 1	266
9.21	信号基座的消除, 2: 高通滤波	267
9.22	信号基座的消除, 3: 频移法	268
9.23	激光多普勒周期计时系统, 1: 基本部件	269
9.24	激光多普勒周期计时系统, 2: 输入级	270
9.25	激光多普勒周期计时系统, 3: 幅值鉴别器和过零点检测器	271

9.26	多普勒周期计时系统,4: 时钟频率选择	272
9.27	激光多普勒周期计时系统,5: 输出逻辑电路	273
9.28	采用周期计时系统的测量	274
9.29	通用的计数系统	275
9.30	激光多普勒信号的信息量	276
9.31	时平均特性,1: 和粒子平均特性的关系	277
9.32	时平均特性,2: 连续信号	278
9.33	时平均特性,3: 测量体的影响	280
9.34	时平均特性,4: 数据采集和时间尺度	282
9.35	时平均特性,5: 幅值影响	283
9.36	时平均特性,6: 建议的采样技术	284
9.37	空间变化的粒子浓度	285
9.38	结论和本章要点	286
第十章	散射粒子: 主要特性	287
10.1	目的	287
10.2	对作为光散射体的悬浮粒子的要求	288
10.3	对散射粒子性质的要求	289
10.4	悬浮粒子的流动特性	290
10.5	粒子的运动方程,1	291
10.6	粒子的运动方程,2	292
10.7	粒子的运动方程,3: Hjelmfelt 和 Mockros 推导的解	293
10.8	粒子尺寸范围,1: Hjelmfelt 和 Mockros 所用的方法	294
10.9	粒子运动方程,4: Chao 导出的解	295
10.10	粒子尺寸范围,2: Chao 用的方法	296
10.11	粒子运动方程,5: Al-Taweel 求得的解	297
10.12	离心力场中粒子的运动	298
10.13	高速流中粒子的运动	299
10.14	布朗运动引起的多普勒频谱加宽	300
10.15	粒子浓度的限制	301
10.16	利用测速仪的信号测量粒子浓度	302
10.17	粒子浓度和湍流频率的分辨率	303
10.18	悬浮体的凝聚	304
10.19	粒子间的静电效应	305
10.20	作用在粒子上的其他力	306
10.21	自然存在的散射粒子	307
10.22	使用悬浮体时健康方面的问题	308
10.23	本章要点	309
第十一章	散射粒子: 发生和测量	310
11.1	目的	310

11.2	液流中的播粒	311
11.3	悬浮体产生方法	312
11.4	雾化: 鼓风和超声雾化器	313
11.5	雾化: 压力和旋转雾化器	314
11.6	粉状物的流化	315
11.7	凝结: 发生器的设计基础	316
11.8	凝结: 发生器的比较	317
11.9	燃烧和化学反应	318
11.10	悬浮体发生器: 摘要	319
11.11	用于激光多普勒测速的典型播粒材料	320
11.12	粒子尺寸测量: 引言, 1	321
11.13	粒子尺寸测量: 引言, 2	322
11.14	粒子的收集	323
11.15	光学法测量粒子的尺寸: 引言	324
11.16	衰减测量: 均匀分布的悬浮体	325
11.17	衰减测量: 非均匀分布的悬浮体	326
11.18	散射测量: 均匀分布的悬浮体	327
11.19	散射方法: 非均匀分布的悬浮体	328
11.20	光学粒子计数器	329
11.21	利用测速仪信号测量粒子尺寸, 1	330
11.22	利用测速仪信号测量粒子尺寸, 2	331
11.23	利用测速仪信号测量粒子尺寸, 3	332
11.24	利用测速仪信号测量粒子尺寸, 4	333
11.25	本章要点	334
第十二章	专用激光多普勒测速仪	335
12.1	目的	335
12.2	在低粒子浓度流动中的测量, 1	336
12.3	在低粒子浓度流动中的测量, 2: 产生合适的散射粒子	337
12.4	在低粒子浓度流动中的测量, 3: 用于双光束测速仪的光学棱镜	338
12.5	在低粒子浓度流动中的测量, 4: 光学系统的布置	339
12.6	在低粒子浓度流动中的测量, 5: 光学系统的布置	340
12.7	在低粒子浓度流动中的测量, 6: 组件式光学系统	341
12.8	在低粒子浓度流动中的测量, 7: 信号处理装置	342
12.9	在低粒子浓度流动中的测量, 8: 所需的粒子浓度	343
12.10	在高粒子浓度流动中的测量, 1: 光学系统的布置	344
12.11	在高粒子浓度流动中的测量, 2: 光学系统的布置	345
12.12	在高粒子浓度流动中的测量, 3: 用于参考光测量的组件式光学系统	346
12.13	在高粒子浓度流动中的测量, 4: 信号处理装置	347
12.14	在高湍流度流动中的测量, 1: 由于方向模糊而产生的误差	348