



装备科技译著出版基金

LDA应用方法

——激光多普勒风速仪在流体动力学中的应用

LDA Application Methods

Laser Doppler Anemometry
for Fluid Dynamics

[瑞士] 张正济 (Zh. Zhang) 著

周强 马护生 高丽敏 谭飞程 陈丽艳 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

LDA 应用方法

——激光多普勒风速仪在 流体动力学中的应用

LDA Application Methods
Laser Doppler Anemometry for Fluid Dynamics



[瑞士] 张正济 (Zh. Zhang) 著
周 强 马护生 高丽敏 谭飞程 陈丽艳 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2014-204号

图书在版编目(CIP)数据

LDA应用方法:激光多普勒风速仪在流体动力学中的应用/(瑞士)张正济著;周强等译. —北京:国防工业出版社,2016.2

书名原文:LDA Application Methods Laser

Doppler Anemometry for Fluid Dynamics

ISBN 978-7-118-10415-8

I. ①L… II. ①张… ②周… III. ①风速表—应用—流体动力学—研究 IV. ①O351.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第001903号

Translation from English language edition:

LDA Application Methods

by Zhengji Zhang

Copyright © 2010 Springer Berlin Heidelberg

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer 出版社授权国防工业出版社独家发行。

版权所有,侵权必究。

LDA应用方法

——激光多普勒风速仪在流体动力学中的应用

[瑞士]张正济(Zh. Zhang) 著

周 强 马护生 高丽敏 谭飞程 陈丽艳 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路23号 100048

经 售 新华书店

印 刷 三河市众誉天成印务有限公司印刷

开 本 710×1000 1/16

印 张 14¼

字 数 265千字

版 印 次 2016年2月第1版第1次印刷

印 数 1—2000册

定 价 72.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

译者序

激光多普勒测速技术(Laser Doppler Anemometry, LDA 或 Laser Doppler Velocimetry, LDV)是实验流体动力学中较为有效和精确的流体速度非接触式光学测量方法,在基础研究和工程技术两大领域均得到了广泛和成熟的应用。作为学科融合的应用技术,其具有较为明显的技术优势和缺陷。相对于传统的探针测量方法,其对流场的干扰较小,空间分辨能力较强;而相对于粒子成像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV),其采集频响高,三维空间速度矢量测量能力强,但也因单点测量方式而面临着大区域流场同步测量这一实验流体动力学技术需求所带来的技术挑战。应该看到,任一种特定的测量技术并非是万能的。在深入理解和系统掌握已有测量技术的基础上,针对特定情况选择采取适宜的技术和对策是至关重要的。

本书侧重于激光多普勒测速技术应用方法的介绍和讨论,突出了内容实用性和可操作性,是已出版的众多 LDA 技术专著中少见的版本。译者期望本书中文版能够为国内实验流体动力学和相关学科的同仁提供便利的参考和借鉴。本书第 1 章、第 6 章、第 8 章、第 12 章、第 13 章由马护生翻译;第 17 章、第 18 章和附录部分由高丽敏翻译;第 3 章~第 5 章、第 7 章、第 9 章、第 14 章~第 16 章由谭飞程和陈丽艳翻译;第 2 章、第 10 章、第 11 章和索引部分由周强翻译;周强、马护生、高丽敏和谭飞程共同承担本书译文的审阅校对工作。

本书中文版的顺利出版发行,离不开国防工业出版社的大力支持和帮助,译者在此表示衷心感谢。本书涉及多个学科,因译者学识所限,对于翻译错误或不当之处恳请读者不吝指正。

译者
2015. 10

前 言

随着激光技术的应用,用来研究和改进工程流动和流动过程的实验流体测量得到了快速的发展。相对于采用探针的传统测量手段,激光技术显然为非接触流动测量提供了最为有效和精确的测量工具。目前,用于流动测量的激光技术已经十分普遍,这主要是因为基于激光技术的应用随处可见。应用最为广泛的激光流动测量技术无疑是激光多普勒风速仪(Laser Doppler Anemometry, LDA)技术,亦即激光多普勒测速仪(Laser Doppler Velocimetry, LDV)和粒子成像测速仪(Particle Image Velocimetry, PIV)技术。PIV技术通过成像测量定量获得流动参数的分布,而LDA方法则更多地应用于所有流动现象的精细化诊断和流动参数的量化考核。本书拟解决的主要技术问题就是LDA方法。

自LDA原理的首次成功应用以来,特别是近20年间,LDA技术已经发展成为高水平的流动测量标准方法。该技术被认为是关于流动的科学研究和工程应用中最为成功且应用最广的测量技术,先进的激光和计算机技术有力地推动了先进的LDA技术的发展。作为一种高效、可靠的测量技术,LDA方法不仅在机械工程领域,而且在化学、生物工程和其他领域充分地展示了应用的重要性。

值得注意的是,LDA技术持续发展至今,其进步主要集中于LDA的作用原理和相关软硬件的发展上。这些进步催生了标准的商业化LDA测试设备,使之更易获得并应用。绝大多数已出版的专著的主要篇幅集中于LDA方法基本原理的论述及其相关发展的介绍,只有少数专著关注和研究LDA光学设备与流体动力学的有机融合。相当一段时期内,LDA使用者缺少实际应用层面的技术支撑与具体参考。

本书之所以命名为《LDA应用方法》,就是阐述LDA光学设备与流体动力学有机统一的问题,讨论改善光学测量环境和提高测量精度的方法,不仅给出了简化测量过程和修正测量误差的指导原则,还提供了界定LDA使用中的限制条件和拓展其应用领域的指导方针。基于LDA近15年来的发展,本书作者试图总结上述相关方面的所有重要方法,并作为LDA使用者有益的实用参考。本书还包括了LDA技术所涉及的其他基础知识,以满足高等院校、研究机构和工业

界中不同应用背景 LDA 使用者的需要。此外,本书还有助于支撑 LDA 仪器设备及其软件的进一步发展。

本书作者衷心感谢心爱的妻子 Nan 多年来给予的精神支持和默默无闻的帮助,同时还感谢 Sulzer Markets & Technology 有限责任公司在 1990—2003 年期间对应用 LDA 开展流动测量研究的大力支持。

Zhengji Zhang 博士

2010 年 3 月于瑞士·因纳特基兴

目 录

第1章 引言	1
1.1 流动及流动测量	1
1.2 常规的流动测量方法	1
1.3 激光方法和激光多普勒风速仪(LDA)	2
1.3.1 LDA 基本原理和仪器的发展	3
1.3.2 LDA 应用方法的发展	4
1.4 针对性流动测量与合理的测量评估	6
1.5 本书的目的	7
第2章 关于工程湍流的描述	8
2.1 湍流流动特征	8
2.1.1 流动湍流的统计学知识	8
2.1.2 各向同性和各向异性湍流	10
2.2 雷诺湍流应力	11
第3章 LDA 原理和激光光学系统	13
3.1 光波及其传播	13
3.2 多普勒效应	15
3.3 两个平面光波的叠加	17
3.4 LDA 原理	19
3.5 光干涉条纹模型	21
3.6 确定流动方向的频移法	23
3.6.1 干涉条纹移动速度	24
3.7 高斯光束特性	25
3.7.1 高斯光束的几何特性	25
3.7.2 高斯光束的传输性能	27
3.8 测量体的尺寸	28

第4章	LDA 测量系统	30
4.1	硬件和光学系统构成	30
4.2	LDA 测量体的技术指标	32
第5章	LDA 测量中的基本数据处理方法	35
5.1	平均速度及速度脉动的直接数据处理	35
5.2	平均速度与速度脉动的加权条件	38
第6章	速度与湍流应力的线性变换	40
6.1	正交线性变换	40
6.1.1	速度变换	40
6.1.2	湍流应力变换	41
6.1.3	湍流应力的定向分布	42
6.2	非正交变换	46
6.2.1	速度变换	47
6.2.2	湍流应力变换	47
6.3	湍流应力的图形表示	49
6.3.1	湍流度分布的椭圆形式	49
6.3.2	湍流应力在莫尔应力圆中的表示	50
第7章	示踪粒子和粒子运动方程	52
7.1	流动粒子受到的实际作用力	53
7.1.1	黏性阻力	53
7.1.2	重力和升力	54
7.1.3	压力	54
7.1.4	附加质量产生的作用力	55
7.2	粒子运动方程	56
7.3	恒速直线流动中的粒子运动	56
7.4	喷管和扩散器内的粒子运动	57
7.4.1	喷管内的流动	59
7.4.2	扩散器内的流动	61
7.5	振荡流动中的粒子运动	62
7.5.1	Stokes 数较小时的粒子流动	66
7.5.2	Stokes 数较大时的粒子流动	67

第 8 章 零相关法(ZCM)	68
8.1 非同步 LDA 的剪切应力测量	68
8.2 零相关法基础	69
8.3 零相关法的拓展	71
8.3.1 非正交速度分量	71
8.3.2 三维流动湍流度	71
8.4 零相关法(ZCM)的限制及验证	72
第 9 章 双测量法(DMM)	75
9.1 分辨二次流的可能性	75
9.2 双测量法的基本形式	76
9.3 双测量法的坐标变换	80
9.4 双测量法的拓展	82
9.4.1 分量的直接测量	82
9.4.2 坐标变换的方法	85
第 10 章 三维速度对称测量法	87
第 11 章 非定常湍流	90
11.1 实际的非定常湍流	90
11.2 时间分辨的非定常湍流	92
11.2.1 最小二乘线性拟合	92
11.2.2 速度的线性趋势及其计算方法	93
11.2.3 时间相关的流动湍流度	95
11.3 相位分辨的非定常湍流	97
11.3.1 最小二乘线性拟合	98
11.3.2 速度的线性趋势及其计算方法	99
11.3.3 相位相关的流动湍流度	100
第 12 章 具有空间速度梯度的湍流	102
12.1 表观湍流度及其相关量	104
12.2 速度偏差的组合效应	107
12.2.1 平均速度	108
12.2.2 湍流法向应力	109

12.3	非均匀速度分布的求解方法	111
第13章	平面视窗后的同轴流动测量	113
13.1	条纹间距	113
13.2	测量体的移动	114
13.3	光学色散及其可忽略的影响	115
第14章	平面视窗后的离轴流动测量	116
14.1	离轴测量与速度变换	117
14.2	测量体的条纹间距与速度修正	118
14.3	光轴折射与测量体的定位	119
14.4	测量体的二维移动	120
14.5	像散及其在光学发散系统中的存在	122
14.6	聚焦激光束产生的散光	126
14.6.1	聚焦激光束的一次性折射	126
14.6.2	聚焦激光束的多重折射	130
14.7	测量体及其畸变	132
14.7.1	激光束的单次折射	133
14.7.2	激光束的多重折射	133
14.7.3	LDA 同轴对准时的像散	135
14.8	信号质量及其与透镜的相关性	135
14.8.1	信号质量与强度的恶化	135
14.8.2	信号质量与强度对透镜的依赖性	136
14.9	测量体构成中的误差敏感度	138
14.9.1	试验介质中的光束分离	138
14.9.2	多重折射后的光束分离	143
14.9.3	对 PDA 测量的潜在影响	143
14.10	像散的补偿方法	144
第15章	圆管中的流动测量	148
15.1	轴向速度测量	150
15.2	切向速度测量	152
15.2.1	基本几何关系	153
15.2.2	计算的简化	153
15.2.3	条纹间距及速度修正	154

15.3	径向速度测量	155
15.3.1	测量体的精确定位	155
15.3.2	激光束的交会角	159
15.3.3	条纹间距与速度修正	160
15.3.4	测量体的定向	160
15.3.5	径向速度的测定	161
15.3.6	方法说明	161
15.4	光学偏差和测量体的畸变	162
15.4.1	发射与接收光学组件的光学偏差	162
15.4.2	激光束腰部与测量体的位错	164
第16章	条纹畸变效应	169
16.1	条纹间距的纵向线性分布	170
16.2	条纹畸变数和表观平均速度	171
16.3	流动湍流度的过高估计	173
第17章	速度偏差效应	175
17.1	作为流动现象的速度偏差	175
17.2	速度偏差与动量流率	176
17.3	一维流动脉动中的速度偏差	178
17.4	二维和三维流动脉动中的速度偏差	181
17.4.1	平均速度中的速度偏差	182
17.4.2	湍流法向应力中的速度偏差	183
17.4.3	湍流剪切应力中的速度偏差	185
第18章	LDA 应用范例	187
18.1	水斗式水轮机的高速水注流	187
18.2	织机的经纱线速度测量	190
18.3	激光束频移的验证	192
附录 A	LDA 离轴对准及测量体积位移	194
A.1	子午面内的激光束	195
A.2	矢向面内的激光束	195
A.3	两者的结合	197
附录 B	偏角 δ 影响下的激光束取向	199

附录 C 雷诺应力矩阵(Reynolds Stress Matrix)的 坐标变换	201
符号表	203
参考文献	207
索引	211

1.1 流动及流动测量

在工业应用和科学研究中,流体流动经常被用来发挥多种多样的作用。通常,需要对那些热物理、流体工程以及化学与生化过程控制等相关的物理过程进行精确量化和优化,涉及流体动力学的物理过程尤其如此。不同工业应用中涉及的复杂流动,通常包含不同种类的湍流、三维流动和非定常流动、分离流和相对涡流、多相流等,一定程度上甚至还涉及非牛顿流体流动。依据应用领域和工艺规范,绝大多数流动都可以进一步借助流量、雷诺数、速度分布、湍流强度和其他相关流体动力学参数予以描述。以热换热器为例,雷诺数及其相关的流动状态对于该设备热交换效率至关重要。在解决空气动力学的流动问题时,绝大多数的流体动力学参数都与湍流边界层直接相关。显然,每种工程流动过程都可通过相应的流体动力学参数描述其独有的特性。所有这些流动中,湍流是最重要和最复杂的流动现象。

大多数工业流动和自然流动的复杂性,基于流体动力学的理论分析还不足以有效地量化不同种类的流动。即便采用了简化方法,也是如此。尽管现在计算流体动力学(CFD)广泛应用于复杂流动的评估和流动过程的改善,但其总体可靠性和适用性仍需提高,尤其需要通过实验加以验证。并且,流体数值模拟方法还不能对所关注的流动过程进行实时分析。基于上述原因,通常考虑实施以研究流动为目的的实验测量,并以此对相关流动过程进行优化。

1.2 常规的流动测量方法

流体动力学的常规流动测量方法基本上包括流体速度分布和压力分布的测量。局部流动测量中最常见的方法就是应用皮托管测量总压,采用普朗特管测量动态压力。由于此类压力探针测量时都需要浸入到流场中,流动因此会受到干扰。皮托管和普朗特管通常仅限于稳态流或准稳态流的测量,原则上不用于湍流或高频脉动流动的测量,这主要是因为探针的压力信号存在着延迟效应。

气体介质流动的压缩性或其他原因均会导致此类问题。同样,相关的速度变化不能以简捷的方式由压力脉动的测量值计算获得。另外,应时刻记住:此种压力探针既不能用于边界层的测量,也不能用于流线弯曲的流动。

一种更加适合进行湍流测量的方法就是热线风速仪(HWA)方法,该方法利用细热丝表面传热与流动速度之间的关系进行测量。热丝的直径只有几微米,通常由以铂或钨制成。如此细小的热丝确保了其对温度的快速响应,因而也就保证了热丝的电信号对局部流动速度脉动的响应。因此,该方法可以很好地用于大多数湍流测量,其中包含了对湍流边界层的测量。该方法的不足之处是,热丝必须在每次使用前进行校准。同时细小的热丝还要求流体中不能含有对热丝造成任何损伤的硬颗粒。相当多的流动阻力施加于热丝之上,因而该方法也不适用于高速水流。实际上,热线风速仪在气流测量中具有十分广泛的应用。

目前仍有很多其他方法适用于实用的流动测量,其中大多数方法均要求所研究的流场必须是预先设计的,以方便探针进入流场。另一种众所周知的无干扰测量方法是利用超声波,其在管流测量中有广泛的应用,其原因在于机械介入或光学的测量方法均不适用于管流流动。

1.3 激光方法和激光多普勒风速仪(LDA)

面向流动研究的现代测量技术无可争辩地以激光技术的应用作为显著的标志。显然,激光方法在流场信息的获得及其准确度方面均显示出深远而广泛的应用前景。一方面,在需要高准确度测量和应用特定流动参数加以量化的流场中,常规的流动测量方法(参见1.2节),将会被激光方法所取代;另一方面,激光方法标准化提高了激光技术应用的便捷性,这种重大的技术进步极大地拓展了流动测量的应用领域。进入实际应用的著名激光方法就包括适于流场测量的粒子成像测速仪(PIV)和用于局部流速测量的激光多普勒风速仪(LDA),后者也可称为激光多普勒测速仪(LDV),原则上,上述两种激光测量方法可相互补充。

PIV技术是利用激光片光照射预先播布并悬浮在流场中的示踪粒子,通过测量由激光片光照射形成的可视化流场图像中示踪粒子的位移,定量测定可视化流场区域的流速分布。上述工作借助于高效的数值处理软件和高速计算机来实现,目前软件和计算机的技术已达到很高的水平。PIV测量方法有助于包含流动分离和相对涡流的流型流谱的确认。与诸如烟流法等常规流动显示方法相比,PIV方法可附带提供定量的流动信息。值得一提的是,这种PIV测量方法的优势目前尚未得到充分的应用。众所周知,虽然流动测量仅用来为深入分析提供相关数据,但却是流动研究的先决条件。在众多的应用实例中,由PIV方法测量所得定量的流动速度几乎不能用来显示流型流谱。就绝大部分而言,基于

由 PIV 得到的定量数据也不能完成透彻和详尽的深入分析。因此,与诸如烟流法或彩色法等简便的流动显示技术相比,由 PIV 测量描述的流型流谱并不能提供更多和更有用的流动信息。这种功能的比较暗示流动研究不能仅仅局限于流动测量层面。关于这方面更多的讨论将在 1.4 节中展开。

激光多普勒风速仪(LDA)的功能及其应用方法构成了本书的主题,该方法或许是流动和流体动力学方面实验研究最为有效和应用最广的非接触测量方法,其代表了高准确度光学测量技术的发展水平。自从 1964 年由 Yeh 和 Cummins 在首次采用 LDA 方法以来,该技术得到持续发展和扩展,使得目前已成为在工业领域和模型流动研究中进行流动测量的标准仪器。LDA 技术的基本发展包括软件和硬件技术的渐进式发展,主要得益于激光和计算机技术的持续进步。总体上,LDA 技术主要包括如下两个领域方向,即 LDA 原理和 LDA 应用。

自 20 世纪 90 年代以来,LDA 的应用已取得了重要成果,LDA 方法因而显示出越来越广阔的应用范围。为了与越来越多的 LDA 用户更好地交流应用经验,许多诸如欧洲激光风速仪协会(European Association for Laser Anemometry, EALA, 现已不再活跃)和德国激光风速仪协会(Germany Association for Laser Anemometry, GALA)等区域性和全球化的专业协会组织纷纷成立。

1.3.1 LDA 基本原理和仪器的发展

自 1964 年 Yeh 和 Cummins 首次成功应用 LDA 测量方法以来,LDA 技术得到了持续的发展。技术的进展主要集中于 LDA 系统光电性能的增强以及相关软硬件的技术改进。技术的进步使得 LDA 系统成为成熟而重要的商业化测量仪器。本书的目的并非是回顾 LDA 的发展历史。关于更多 LDA 发展相关的信息,有兴趣的读者可参考 Durst 等人早期的技术专著(1981),也可参考 Albrecht 等人近期的著作(2003)。

LDA 原理的发展也包括与 LDA 应用密切相关的并会直接影响 LDA 测量精度的各种光学与流动相关性研究。相应的影响因素是已知的,如 LDA 测量体条纹变形效应、速度与角偏差效应、时间和空间速度梯度效应等。鉴于此类影响因素在 LDA 测量中的重要性,相应的广泛研究很早就开始了,现归纳如下:

(1) 速度偏差效应。速度偏差效应源自 LDA 测量中的速度采样速率并非等时间间隔,而是取决于速度本身。具体讲,高流动速度具有相对于低流动速度更快的采样速率。该效应通常存在于具有速度脉动的非定常流和湍流中。由于速度偏差效应与流动速度的相关性,速度偏差效应实质上是一种流动现象。该现象于 1973 年首先由 McLaughlin 和 Tiederman 发现,随后被众多研究者广泛研究(Buchhave 1975, Erdmann 和 Tropea 1981)。对应的研究主要集中在对相关测量结果的修正。Nobach(1998)基于数值计算方法较为全面地描述了三维湍流速度偏差误差的特征。Zhang(2000, 2002)给出了速度为零到无穷范围内三

维湍流及其与湍流强度相关性的全面分析和详细描述。需要说明的是,速度偏差并非总是表现为测量误差。此观点将在本书第 17 章给出全面的描述。

(2) 条纹畸变。作为光学现象,LDA 测量体中的条纹畸变主要是由不当光路布局或由介质界面处激光束非对称折射引起的。Hanson(1973,1975)仔细测定了不当光路布局引起的测量体条纹畸变程度。Miles 和 Witze(1994,1996)采用放大图像的方法,以实例显示了 LDA 应用中测量体条纹畸变模式。Zhang(1995),Zhang 与 Eisele(1995a,b)证实由激光束折射引起的 LDA 测量体条纹畸变属于像散效应。条纹畸变描述了激光束在斜平面表面或圆管表面产生折射时存在的极其重要现象(Zhang 2004a,2004b)。LDA 测量体中各种条纹畸变均可导致测量的准确度恶化。举例来说,测量误差多被解释为对所有湍流相关物理量的过高估计。因为此原因,相关的影响也被称为湍流测量中的加宽效应(Hanson 1973)。Zhang 和 Eisele(1997,1998c)围绕测量体条纹线性畸变进行了条纹畸变效应对流动测量准确度影响的定量评估。目前,还不能很好地给出关于其他类型测量体条纹畸变效应的评估。

(3) 空间速度梯度效应。对于像湍流边界层流动那样的具有空间速度梯度的流动,LDA 测量在平均速度和脉动速度两个方面均存在着误差。误差来源于 LDA 测量体长度范围内速度的不均匀分布。鉴于标准的 LDA 光学器件尚不能解析测量体内的速度分布,因而平均速度、尤其是湍流相关物理量均存在着误差。Durst 等(1996,1998)已经开始并正在进行相关的研究工作。实际上,由于相应的速度偏差效应,LDA 测量体内空间速度梯度的存在也会导致测量结果表征上的模糊性。

(4) 非定常流动测量。强迫非定常湍流流动中,流动脉动包括因周期性流动引起的强迫速度变化和因流动湍流导致的随机速度脉动。为能够基于 LDA 测量来评估此类流动,必须进行适当的数据处理。通常,数据处理是指从合成脉动中解析出随机速度脉动的方法。Zhang 等(1996,1997)和 Jakoby 等(1996)进行了关于此种评估方法的相应研究工作。

1.3.2 LDA 应用方法的发展

随着基本原理和软硬件的发展,LDA 测量方法已成为面向流动研究,特别是复杂湍流流动的非常有效的光学测量技术。与此相对应,LDA 仪器设备已发展为成熟的商用产品,并得到了广泛应用。为此,虽然 LDA 应用技术还十分复杂,但普遍认为其不失为可直接用于流场测量的有效手段。

从 LDA 应用实际和经验角度,关于 LDA 基本原理和相关仪器功能的认知并不能完全保证对所有类型流动测量的正确性,这是因为流动本身、流动结构及其相关光学特性的多样性缘故。这种观点是客观和真实的,众所周知,示踪粒子直径、速度偏差和条纹畸变均能较大程度上影响测量准确性。尽管有无数 LDA

在几乎所有流场中应用的实例,但是,几乎没有在改进 LDA 应用的光学条件并以此提高测量精准度、简化测量流程并修正测量误差、摸清 LDA 技术的应用极限并扩展应用范围方面取得实质性进展。除所关注的速度偏差和条纹畸变之外,LDA 方法的实际应用实际上还受到诸多会招致麻烦的且部分原因不明的光学现象的影响。对于内部流动测量而言,LDA 应用中最显著的干扰因素就与激光束的折射相关。为抑制该情形下光学像差的发生,抑或采用到折射率指数匹配法。然而,该方法仅仅是一种被动解决途径,实际上并非总是适用的。如果激光束折射发生在诸如圆管那样的曲面上,激光束折射问题将加剧。显然,LDA 技术的应用及其优化仍需进一步发展。

(1) 光学像差和像散。LDA 应用中,光学像差普遍存在于内流测量中,这是因为激光束必须穿过至少一个光学窗,就此会经历折射。最显著的光学像差被证实为是像散,在最糟糕的情况下会引起测量的完全中断(Zhang 1995, Zhang 和 Eisele 1995a, b)。如果 LDA 系统的光轴偏离了轴线,亦即 LDA 光轴与光学窗的法线方向不一致,那么上述现象及其对信号质量和信号速率的干扰就会变得非常严重。一些 LDA 用户或许经历过这样的情况,即在上述光学配置下,无法接收到相关信号,或接受的信号质量很差。信号消失源于激光束在经过空气/玻璃和玻璃/气流界面的折射后无法会聚于一点;信号质量变差的主要原因在于激光束会聚质量差和光学接收装置的接收孔径变差。关于像散的另一问题就是引起测量误差的测量体条纹畸变(Zhang 和 Eisele 1996b)。LDA 测量中有像散效应的详细描述和正确采用修正方法准则可参考所提及的相关文献。为将散光效应的影响降至最低,配置光学接收装置的方法可见文献(Zhang 和 Eisele 1996a, 1998b)的相关内容。

(2) 圆管中的三维流动测量。关于 LDA 测量的另一个最普遍例子就是圆管内流动的测量。此种情况下,与激光束折射相关的光学像差远比平面测量更加复杂和严重。实际上,在没有任何帮助的前提下测量不可能进行,要么进行流动的折射率匹配,要么精确计算流场内激光束的交会点。折射率匹配并非每次都成功,为此必须对管道流动进行直接测量。于是,如此条件下,许多使用者或许将会遇到捕获高质量信号的巨大困难。一些用户尽力尝试同时在管壁和流场内部追踪激光束(Boadway 和 Karahan 1981)。实际上,光学接收装置内的光学像差及其对信号强度和质量所对应的最为严重的影响常被忽略。正如 Zhang (2004a, b)所描述的那样,直接流动测量的光学性能可通过将圆管外表面构造造成平面方法得到极大的改善(图 1.1)。这不仅有助于同时降低激光束发射和接收装置的光学像差,而且有利于简化流场内测量所有三个速度分量的激光束交会计算。

(3) 双测量法(DMM)。众所周知,LDA 所实施的是对速度分量的测量。正因如此,有时在准确测定某一速度分量(即二次流的一个速度分量)时会面临困