

纹影与阴影技术

——透明介质中的可视化现象

Schlieren and Shadowgraph Techniques

——Visualizing Phenomena in Transparent Media

[美] 加里·塞特尔 (G.S. Settles) 著
叶继飞 文明 徐徐 等译



国防工业出版社
National Defense Industry Press



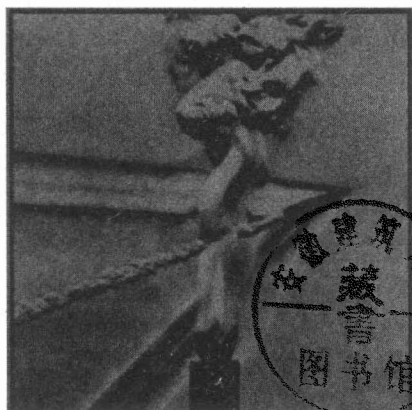
Springer

纹影与阴影技术

——透明介质中的可视化现象

Schlieren and Shadowgraph Techniques

——Visualizing Phenomena in Transparent Media



[美]加里·塞特尔(G. S. Settles) 著

叶继飞 文明 徐徐

李南雷 周伟静 范戎飞 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2015-078 号

图书在版编目 (CIP) 数据

纹影与阴影技术:透明介质中的可视化现象/(美)
加里·塞特尔(G. S. Settles)著;叶继飞等译. —北京:
国防工业出版社, 2018. 8

书名原文:Schlieren and Shadowgraph Techniques——
Visualizing Phenomena in Transparent Media
ISBN 978-7-118-11577-2

I. ①纹… II. ①加… ②叶… III. ①纹影显示
IV. ①O354

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 131718 号

Schlieren and Shadowgraph Techniques Transparent Media
by G. S. Settles
Copyright © 2001 Springer Berlin Heidelberg
Springer Berlin Heidelberg is part of Springer Science+Business Media
All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 4 印张 22¼ 字数 410 千字

2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 118.00 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

纹影与阴影技术是一种透明介质流场非接触光学测量技术,该技术可以用于观察透明介质不均匀运动现象,借此形成科学认识或辅助工程设计,其发展和应用对实验流体力学相关学科领域实验室科学研究和工程生产有很大帮助。本书是 G. S. Settles 教授等人著的“*Schlieren and Shadowgraph Techniques*”,系统地介绍了纹影与阴影技术及其应用方法,是迄今译者所知的关于纹影和阴影技术最为系统的、全面的学术专著。

纹影与阴影技术的出现可以追溯到 17 世纪,时至今日,技术本身并没有因为其历史久远而停止发展,相反地,各种新理论和新技术在不断拓展纹影与阴影技术的研究和应用领域。译者团队在研究激光与物质相互作用过程中经常用到纹影与阴影技术,针对高超声速流动中的复杂流动现象,研究了彩色纹影、聚焦纹影,以及定量纹影等方法的应用,多年实践积累形成了一些应用经验,在与领域内相关学者和研究人员交流时发现,在纹影与阴影技术领域,存在以下几个方面的需求。

(1) 工程应用需进一步推广。纹影与阴影技术虽历史久远,但国内有些工程和生产单位还没有进行应用,由于没有一部简洁明了、可操作性强的专业参考资料,导致工业部门对技术应用有所抵触,对成套技术设备依赖,而成套的纹影与阴影技术设备往往价格不菲,纹影与阴影技术真正在工程生产中发挥效用,还需在技术层面进一步普及和推广。

(2) 实验室研究需求迫切。实验室科研人员对纹影与阴影技术的需求应该是最为常见,也是最为迫切的,解决这一需求的关键是,科研人员对技术在了解、掌握的前提下灵活运用,构建适合于实验研究目的的测量装置。

(3) 教学素材的缺乏。译者团队一直从事一线教学活动,对纹影与阴影技术的教学需求非常了解,而苦于目前国内流动显示相关领域,有针对性的系统教材较少,纹影与阴影技术教学素材的缺乏是领域内教师的普遍困扰。

(4) 新技术发展的需要。随着光电技术的不断发展,纹影与阴影技术也在革新和进步,如新兴的彩色纹影、聚焦纹影、背景纹影等新技术,都是基于光源、光学器件,以及数字处理方法等相关技术发展,在总结已有技术系统的基础上,在更宽的技术视野内融入新技术,能够给技术革新带来新的灵感。

基于以上认识,形成了对 Settles 教授等人专著引进并翻译的想法,希望能为

国内相关领域教学与研究人员,提供一部便于查阅的、较为系统和实用的参考书。限于作者水平,书中难免存在不足之处,希望广大读者批评指正。

在翻译本书过程中,得到了中国人民解放军战略支援部队航天工程大学各级领导的大力支持,在此表示衷心感谢。同时,激光推进及其应用国家重点实验室的洪延姬、金星研究员给予了重要的指导,赵文涛、王广宇、李倩、吴洁、常浩等老师和王大鹏、刘昭然、祝超等博士生也付出了大量劳动,在此一并表示感谢。

译者
2018年1月

前言

此处用法语讲得最通^①。microskopie(显微术)与 telescopie(望远术)来自于法语中“strioscopie”和“ombroscopie”,介于二者之间即是纹影与阴影技术,英语单词为“schlieren”和“shadowgraph”。这些光学方法属于近亲,产生和发展都很相似,而且由相同的光学结构组成。介绍显微镜和望远镜的书籍数以千计,然而目前却没有一本介绍纹影和阴影成像的书,这正是我写此书的首要理由。

与显微镜和望远镜不一样的是,纹影和阴影仪器不能显示大小与距离的相关信息。然而,它们却能使我们看见很多不可见的,如空气、水以及玻璃这些透明介质中的不均匀性。平时,这些透明介质“幽灵”般地扭曲了我们的视线。

许多书都简要地介绍了这些技术,但是目前最完整、最先进的设备却鲜为人知。因此,我或许在此应该向 James Jeans 先生解释声明:书里绝大部分内容是 Schardin 工作的复述^[1,2],同时包括该技术在当前最新的发展情况^②。

本书阐述更多的是实用的指导与思维方法,而不是全面彻底的理论叙述(这需要单独一本书才能完成)。在西方国家,不像望远镜和显微镜,纹影和阴影系统需要组建,因此很难买到这些系统。尽管组装该系统并不难,但因缺少实验经验,结果往往不理想。因此,第7章介绍了一些实际操作经验,如挑选组件、组装以及调试。第8章介绍了怎样组装纹影系统。

本书以视觉为主题。仅在流体力学方面,书中就列举了大量各式各样的光学图像,读者可以从那些光学图像中清晰地看到各种控制方程的非线性以及多样化。其中一些研究者获得的实验结果(例如 Toepler^[3]、Mach 与 Salcher^[4]、Sabine^[5]、Cranz 与 Schardin^[6]以及 Brown 与 Roshko^[7])引发了整个研究领域的研究热情。所以,仅仅从字面上来呈现一个视觉主题是荒谬的,于是我尽最大努力寻找最好的纹影与阴影图像来辅助解释。同事们的支持以及我个人的幸运使我有幸获得了许多经典的图片,对这些图片的贡献者深表谢意。但即使是 Sir

① 纹影、阴影技术中有些英文词语最初来自于拉丁语,例如 striatus(条纹)、umbra(阴影),还有的来自希腊语 tēle(远)、micrós(小)、skopein(观察)。

② Springer 出版社已获准从 Schardin 1942 年的经典专著《纹影技术及其应用》^[2]中复制图像,我在若干问题中都是沿着 Schardin 的足迹,他的学识我难以匹敌。但他在德国战时的出版物在今天看来十分晦涩难懂。

Kenneth Clark^[8]也不得不承认,有些他十分欣赏的图片实在无从获得。

对于这样历史悠久的技术,人们对它仍非常陌生,这使我非常惊讶,也很希望通过这本书更正人们对其原理的误解。人们常把热敏成像法和一些超自然的现象,如把 Kirlian 摄影术以及关于人类灵魂的照片混淆为纹影与阴影技术。德国公众电视报道了几次我的纹影技术后,许多德国人都在向我询问这项“新”技术。甚至还有有人问我“Schlieren”这个单词对应的英文是什么。本书将会消除这些误解。

因此,我希望这本书既能为初学者提供纹影与阴影技术的基础知识,又能为专家提供关于这项技术的详细解决方案。同时也希望能建立不同学科领域之间的联系,以及综述这项技术的重要新进展。本书结尾预测了这项技术的发展方向。在书中,我尝试传递 Ernst Mach 所提倡的“研究的魅力与诗意”^[9]。

因而,可读性也是本书的一个重要目标。例如,专业术语的缩写虽然能够节省一些空间,但是书中并不采用,专业术语不应成为阅读的阻碍。

几乎每本书都需要对所涵盖的内容进行艰难的取舍,因此本书对纹影和干涉测量之间的重叠领域只进行了简短的探究。此外,虽然几个有用的仪器使纹影光学更加具体化,但本书讨论仅限于成像方法而不讨论这些仪器。书中并没有引用成千上万的相关文献。第 10 章中介绍了定量测量的方法,但本书的重点在于对自然现象进行定性以及半定量的可视化,而这正是纹影和阴影技术所擅长的方面。

本书面向的是纹影和阴影技术的研究者,希望为他们提供综合性参考。另外,我希望那些对可视化非常感兴趣的人在本书中也能找到乐趣。纹影和阴影技术几乎涵盖了所有的科学和技术领域,虽然我的专业背景是流体动力学,但我试图对这项技术进行适当的发散。

虽然本书没有强调数学背景,但需要读者已经具备了几何光学、光学元件和微积分的知识,同时还有一些更高级的知识,如光学畸变、衍射理论和傅里叶光学。本书没有对这些知识背景进行详细回顾,因为其他优秀的教科书中均有介绍。附录 A 中介绍了少量关键的光学概念和推导过程以支持全书。

虽然早在 20 世纪 60 年代,当我还是一个青年的时候就开始接触纹影技术,然而直到 1983 年,我才有写这本书的打算。我向老朋友兼同事 Wolfgang Merz-kirch 提出了这一想法,他的鼓励促成了这本书的面世。

我首先要感谢三位朋友兼同事 Leonard Weinstein、Horst Herbrich 和 Peter Krehl 对我的真诚帮助,他们同样对非均质介质光学有着浓厚兴趣。20 世纪末 Weinstein 在这个领域的发明天赋是无与伦比的。Herbrich 的应用方法启发了我。Krehl 是一个有着史学天赋的科学家。

我还要感谢 Anatol Roshko,他富有洞察力地指出,一本关于纹影技术的书应当包括阴影技术。

Jack North 和 Felix Weinberg 是纹影成像研究者中我有幸结识的大师。Jack 在我写书时逝世,他的遗孀 Nella North 女士以及他的同事 Herbert Pearcey

和 Eric Rogers 给予了我极大的帮助。

Heather Ferree、Rossana Quinones 和 Thomas C. Hanson 利用第 8 章中的典型纹影系统获得了许多精美的图片,为全书绘制了插图。同时还要感谢宾州气体动力学实验室的工作人员 Lori Dodson 和 J. D. Miller 对我的支持。

Springer-Verlag 出版社的 E. Raufelder 女士和 H. Riedesel 博士协助了这个项目多年,我对他们的耐心表示感谢。

最后,感谢为本书做出了各种各样贡献的其他人:M. Abramowitz、R. C. Benson、P. Bradshaw、Y. D. Chashechkin、A. Davidhazy、J. M. Dewey、I. V. Ershov、H. Kleine、J. Kozlik、H. F. Lehr、W. H. McCallum、J. R. Meyer-Arendt、M. Raffel、J. Rienitz、P. Rheinberg、M. T. Settles、J. Srulijes、P. Steehouwer、J. K. Vandiver、A. A. Zheltovodov 以及我的父母 Charles H. 和 Stella M. Settles。

Gary S. Settles

2001 年 2 月于宾夕法尼亚州贝尔丰特



从左至右:作者、Leonard Weinstein 与 Horst Herbrich(1998 年 9 月拍摄于意大利):“世界纹影成像专家”(还没有人申请过这一头衔)。Liselotte Herbrich 供图。

作者简介

Gary. S. Settles, 生于 1949 年, 在田纳西州东部大烟山地区的一个农场里长大。Settles 对流体力学和光学很感兴趣, 十几岁时便开始动手实践: 设计的小型亚声速和超声速风洞结构在 1967 年的国际科学展览会上获奖。在美国海军军械实验室及美国国家航空航天局 (NASA) 艾姆斯研究中心的实习经历增加了 Settles 的工程与实验能力。在波音公司, Settles 有幸参加了波音 747 客机以及 SST 超声速运输机的空气动力学研究工作。

在田纳西州大学, Settles 获得了美国铝业基金会奖学金, 1971 年获得航空航天专业理学学士学位。在普林斯顿大学, 在国家科学基金会实习津贴的支持下, Settles 师从 Seymour Bogdonoff 教授, 开展了激波/边界层相互作用关系的相关研究, 并在 1976 年获得了博士学位。其后三年, Settles 在普林斯顿流动研究公司的燃烧实验部门作为高级研究员, 牵头研究了高效节能泵相关的国家项目。随后, Settles 成为了普林斯顿大学机械与航空航天工程部门的一名研究人员, 并在该部门的气体动力学实验室进行研究与管理工作。

1983 年, Settles 被聘为宾州州立大学机械工程系副教授, 并成立了宾州州立大学气体动力学实验室。1989 年, Settles 荣升为正教授。宾州州立大学气体动力学实验室在高速粘性与非粘性交互以及光学流场诊断方面做出了突出贡献。Settles 和他的学生在该领域所取得的成果获得了宾州州立大学工程学会 1986 年的杰出研究奖以及 1992 年的首席研究员奖励。

Settles 所研究的具有强烈视觉及艺术特性的光学流动显示已经在电影、电视纪录片、博物馆展览、书籍、百科全书和杂志上得以广泛使用, 例如, 获奖电影《寻找解决方案》、哥伦比亚广播公司科学系列片《宇宙》、美国全国广播公司的《今日秀》、美国有线电视新闻网的《科学新闻》、德国公共电视台的系列片《科学意象》、学习频道系列片《人体探索》以及 3-D 科幻电影《隐藏的维度》。Settles 多次被邀请到美国、欧洲、俄罗斯、中国以及日本讲座。

从 1992 年开始, 宾州州立大学气体动力学实验室将研究重点从气体动力学、喷嘴和流动可视化领域转向了包括表面工程、材料加工、流变学和航空安全等“非传统”问题, 并取得一些发明成果, 如世界上最大的室内光学流动显示系统、新的基于人体热羽流的航空安检门。

在宾州州立大学, Settles 教授培养了 14 位博士及多名硕士。目前, Settles 讲授学时为两学期的可压缩流动课程。工作之余, Settles 喜欢油画与古典音乐, 以此来舒缓压力。

1657 年, Settle/Suttle 家族从约克郡 (英国英格兰原郡名) 移民到维吉尼亚州^[10]。

符号说明

“你好,小朋友。你的狗叫什么名字?”

“我不知道。我们叫他 Rover。”

Stafford Beer

本书全文都采用公制单位。距离单位采用米、厘米、毫米和微米。特殊光学公制单位的情况具体参看 A.1 节。为了尽可能保持符号的一致性,参看的最新的文献有[1, 2, 98, 102, 110]。

a	刀口平面的栅格常数,声学速度(m/s)
a	刀口平面未受阻挡的光源像的高度
Δa	受折射影响 a 的改变量
A	振幅函数;纹影物镜的通光孔径
B	亮度 cd/m^2 ;栅格宽度常数
b, h	光源狭缝的宽度和高度
c	常数;光速
C	常数
d	纹影测试区的宽度;模糊的圆直径
D	纹影系统通光孔径(测试区直径);光源直径
e	自然对数底;栅格宽度常数
f	焦距
f/no	透镜或反射镜的焦距与通光孔径之比,如 f/D
f', f_2	第二透镜或反射镜的焦距
F	傅里叶变换;聚焦长度的坐标
g, h	长度; g 也表示重力加速度常数
E, I	观察屏上的照度(lx)
ΔE	屏上的照度变化(lx)
E^*	间接的或多余的照度成分, lx
j	虚部系数
k	常数;格拉斯通-戴尔常数
l, l	长度
L	沿 z 轴的光路长度或纹影被测对象长度;表示透镜
m	成像放大倍数
M	马赫数

n	折射率
p	静压(kPa);表示偏振镜
r, θ, φ	球坐标(r 为半径)
R	纹影系统的毫米的光线偏差范围或角秒的偏差角度

特定气体常数和透镜光圈角度倒数

$R_{a,d,ph}$	像差,衍射和相片的精度限制
S	灵敏度;表示纹影对象
s	距离坐标
T	温度(K);传递函数
t	时间(s);长度坐标,如厚度
u, v	傅里叶平面垂直光轴的坐标
V	速度(m/s)
w	宽度坐标;边界条件,沃拉斯顿棱镜
x, y, z	光传播方向沿着光轴方向为 z 轴正向的右手笛卡儿坐标系

符号

α	孔径角度,弧度
β	光损失系数
β_T	热膨胀系数(K^{-1})
γ	照相胶片特征曲线的斜率
δ	表面倾斜角度($^\circ$);纹影对象小特征直径和模糊直径
Δ	某量的增量或改变量
ε	光线由纹影形成的偏折角度,rad 或角秒
ϕ, φ	相函数;聚焦纹影成像点贡献光线对的数目,或角度坐标
λ	光波长,通常用微米
μ	流体粘度($(N \cdot s)/m^2$)
θ	垂直于光轴平面的方位角($^\circ$);Z型纹影系统中的转角和轴向偏转角
ρ	密度(kg/m^3)
ξ	常数

下标

0	背景或基线值
1	第一纹影透镜或反射镜
2	第二纹影透镜或反射镜
3	聚焦透镜
b, u	模糊,不锐利
max	最大
min	最小
ref	参考值

X

目录

第 1 章 历史背景	001
1.1 17 世纪	001
1.2 18 世纪	004
1.3 19 世纪	006
1.4 20 世纪	016
第 2 章 基本概念	025
2.1 非均匀介质中光的传播	025
2.2 纹影的定义	027
2.3 纹影与阴影方法的区别	028
2.4 直接阴影法	029
2.5 经典透镜型纹影系统	031
2.5.1 点光源	031
2.5.2 扩展光源	033
2.6 纹影图像	035
第 3 章 Toepler 纹影技术	037
3.1 透镜型与反射型纹影系统	037
3.1.1 透镜系统	038
3.1.2 反射型系统	039
3.2 灵敏度	045
3.2.1 定义与几何原理	045
3.2.2 灵敏度举例	048
3.2.3 灵敏度的极限	051
3.2.4 后处理提升灵敏度	053
3.3 测量范围	056
3.3.1 测量范围的定义	056

3.3.2	测量范围的调节	057
3.4	灵敏度和范围的估算	058
3.5	分辨能力	060
3.6	衍射效应	061
3.6.1	测试区不透明边缘产生的衍射晕	061
3.6.2	刀口边缘的衍射	063
3.7	放大倍率与景深	067
3.7.1	成像放大倍率与聚焦透镜	067
3.7.2	景深	068
第4章 大视场与聚焦纹影方法		070
4.1	大型单/双反射镜系统	070
4.1.1	大型纹影镜的可用性	070
4.1.2	大型反射镜系统实例	071
4.1.3	宾州州立大学的 1m 重合纹影系统	072
4.2	大尺寸光源传统纹影系统	073
4.3	透镜与栅格技术	076
4.3.1	简单背景畸变	076
4.3.2	背景栅格畸变	077
4.3.3	大型彩色栅格背景	079
4.3.4	现代聚焦与大视场纹影系统	080
4.3.5	宾州州立大学的全尺寸纹影系统	088
4.4	大视场扫描纹影系统	094
4.4.1	针对移动对象的扫描纹影系统	094
4.4.2	基于扫描光源与刀口的纹影技术	096
4.5	莫尔条纹干涉法	098
4.6	全息层析纹影	099
第5章 特种纹影技术		100
5.1	专用纹影刀口	100
5.1.1	梯度滤光片	100
5.1.2	指数刀口与光源滤光片	103
5.1.3	光源和刀口处的匹配空间滤光片	104
5.1.4	相位对比	107
5.1.5	光致变色与光折变刀口	109

5.2	彩色纹影方法	110
5.2.1	引入色彩的原因	110
5.2.2	单色纹影到彩色纹影的转换	110
5.2.3	分类彩色纹影技术	111
5.2.4	最新进展	115
5.3	立体纹影	116
5.4	纹影干涉	118
5.4.1	Wollaston 棱镜剪切干涉仪	119
5.4.2	基于衍射的纹影干涉仪	121
5.5	计算机仿真纹影	122
5.6	各种专业技术	123
5.6.1	谐振折射率与声音可视化	123
5.6.2	变形纹影系统	124
5.6.3	纹影数据示踪	124
5.6.4	双视纹影	125
5.6.5	浸泡方法	126
5.6.6	红外纹影	126
第6章	阴影技术	128
6.1	背景	128
6.1.1	发展历史	128
6.1.2	阴影技术的作用	129
6.1.3	优势与局限	129
6.2	直接阴影成像	132
6.2.1	发散光的直接阴影法	132
6.2.2	在平行光中的直接阴影成像	136
6.3	聚焦阴影技术	139
6.3.1	操作原理	139
6.3.2	历史背景与术语	139
6.3.3	优势与局限	140
6.3.4	放大倍率、光照度与虚拟阴影效果	141
6.3.5	弹道射程中的聚焦阴影技术	141
6.4	特殊阴影成像技术	142
6.4.1	大型阴影成像	142
6.4.2	微观、立体与全息阴影图像	143

6.4.3	计算机阴影成像	144
6.4.4	锥形阴影成像	145
第7章 实际问题		147
7.1	光学组件	147
7.1.1	光源	147
7.1.2	反射镜	152
7.1.3	纹影刀口和光源滤光片	152
7.1.4	聚光透镜和光源狭缝	154
7.1.5	所需的光学质量	156
7.2	设备制造、校准和操作	157
7.2.1	使用光线跟踪代码进行纹影系统设计	157
7.2.2	制作装置	158
7.2.3	搭建、校准、调整	159
7.2.4	振动和机械稳定性	162
7.2.5	杂散光、自发光和二次成像	163
7.2.6	周围气流的干扰	164
7.3	纹影图像与阴影图像的捕捉	165
7.3.1	摄影与录影	165
7.3.2	录像	168
7.3.3	高速摄影	169
7.3.4	前照明	172
7.4	商业和便携式纹影仪	174
7.4.1	苏联仪器	174
7.4.2	西方设备	177
7.4.3	便携式纹影仪	177
第8章 构建简单的纹影和阴影系统		179
8.1	纹影系统设计	179
8.2	成本决定	180
8.3	安装位置选择	182
8.4	光路调节	183
8.5	问题排除	183
8.6	纹影图像或阴影记录	185
8.7	结论	186

第9章 应用	187
9.1 固体中现象	187
9.1.1 玻璃技术	187
9.1.2 聚合物薄膜特性	189
9.1.3 断裂力学和终端弹道学	189
9.1.4 表面镜面反射	191
9.2 液体中的现象	191
9.2.1 液体对流传热	191
9.2.2 液体表面波	193
9.2.3 液雾化和喷雾剂	194
9.2.4 超声速	194
9.2.5 水洞试验和终端弹道	195
9.3 气体中的现象	196
9.3.1 农业气流	196
9.3.2 航空光学	197
9.3.3 建筑声学	197
9.3.4 边界层	198
9.3.5 气体对流传热	199
9.3.6 暖气、通风和空调	200
9.3.7 气体泄漏检测	203
9.3.8 电击穿放电	203
9.3.9 爆炸、爆轰、冲击波、冲击和管	204
9.3.10 弹道	205
9.3.11 气体动力学和高速风洞试验	207
9.3.12 超声速喷气机和喷气噪声	209
9.3.13 涡轮机和旋翼机	210
9.4 其他应用	210
9.4.1 艺术和音乐	210
9.4.2 生物医学应用	213
9.4.3 燃烧	216
9.4.4 地球物理	217
9.4.5 工业应用	218
9.4.6 材料加工	219
9.4.7 显微镜	221

9.4.8	光学处理	224
9.4.9	光学镜片测试	224
9.4.10	室外纹影成像与阴影成像	225
9.4.11	等离子体动力学	230
9.4.12	光电子管电视投影	230
9.4.13	湍流	231
第 10 章 定量评价		233
10.1	分光法定量纹影评价	234
10.1.1	绝对光度法	235
10.1.2	标准光度法	236
10.2	栅格刀口方法	237
10.2.1	焦格	238
10.2.2	散焦栅格	240
10.2.3	散焦细丝刀口	241
10.3	定量图像测速	242
10.3.1	背景	242
10.3.2	多重曝光涡流与激波速度	243
10.3.3	纹影图像相关测速	243
10.3.4	聚焦纹影偏折	244
10.3.5	背景纹影系统	245
10.4	定量的阴影	246
10.4.1	$\partial^2 n / \partial y^2 \sin^2 \theta$ 二重积分	246
10.4.2	湍流研究	246
10.4.3	冲击波强度的定量分析	246
10.4.4	栅格阴影成像方法	246
第 11 章 总结与展望		248
11.1	总结	248
11.1.1	不科学的一些认知	248
11.1.2	其他教训	249
11.1.3	历史发展的进一步评论	249
11.1.4	图像和可视化的进一步评论	250
11.1.5	重新焕发活力	251
11.2	展望:未来的问题	252