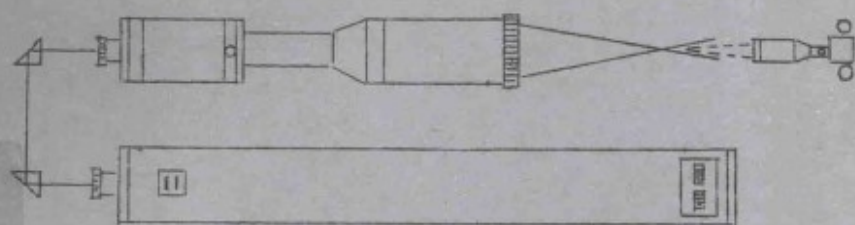


二维激光多卜勒流速 测量分析系统和它的应用



三机部三〇四所编印

一九八二年二月 北京

内部交流

编者 的话

自从一九七九年六月进口丹麦DISA公司二维激光多卜勒流速测量分析系统以来，在部内外兄弟单位的协助和指导下，由验收筹备、试验调整直到投入正式试验使用近两年多来，通过和有关单位的协同试验与交流，初步感到有必要在技术上作一小结，以便于进一步的相互交流与相互提高。

由于经验和水平的欠缺，再加上时间短促，缺点错误在所难免，欢迎指正，以利今后改进。

清华大学力学系LDA组、科学院力学所LDA组、北京大学流体风洞试验室、七机部七〇一所、三机部六〇六所、西北工业大学七系第七研究室、石油勘探开发院LDA组等兄弟单位在不同程度上都给了我们很多帮助，在此谨致衷心谢意。

目 录

- 1)、DISA二维激光多卜勒流速测量分析系统
及其应用 程元中、张五月、郭映泉----- (3)
- 2)、二维LDA系统中 Δr^+ 激光斑的分析、使用
与维护 郭映泉、张五月、程元中----- (19)
- 3)、二维激光多卜勒风速仪的光学系统
刘采彦----- (38)
- 4)、LDA系统中计数式信号处理电路的接通效应
及其跟踪速率 程元中、张五月、郭映泉----- (49)
- 5)、流速失零的处理程序
张五月、郭映泉、程元中----- (65)
- 6)、二维激光多卜勒流速仪光学参数的测量和计
算 刘采彦、程元中----- (77)
- 7)、一种测量脉冲流率和累积流率的LDV信号
处理系统 程元中、诸国林----- (89)
- 8)、激光多卜勒测速仪在涡轮机槽内流场测试中
的应用 程元中、张五月、郭映泉
郭彦强、任守政、----- (99)
- 9)、频移应用参考程序
张五月、郭映泉、程元中----- (109)

编者 的话

自从一九七九年六月进口丹麦DISA公司二维激光多卜勒流速测量分析系统以来，在部内外兄弟单位的协助和指导下，由验收筹备、试验调整直到投入正式试验使用近两年多来，通过和有关单位的协同试验与交流，初步感到有必要在技术上作一小结，以便于进一步的相互交流与相互提高。

由于经验和水平的欠缺，再加上时间短促，缺点错误在所难免，欢迎指正，以利今后改进。

清华大学力学系LDA组、科学院力学所LDA组、北京大流体风洞试验室、七机部七〇一所、三机部六〇六所、西北工业大学七系第七研究室、石油勘探开发院LDA组等兄弟单位在不同程度上都给了我们很多帮助，在此谨致衷心谢意。

目 录

- 1)、DISA二维激光多卜勒流速测量分析系统
及其应用 程元中、张五月、郭映泉----- (3)
- 2)、二维LDA系统中 Δr^+ 激光口的分析、使用
与维护 郭映泉、张五月、程元中----- (19)
- 3)、二维激光多卜勒风速仪的光学系统
刘采彦----- (38)
- 4)、LDA系统中计数式信号处理口的带通效应
及其跟踪速率 程元中、张五月、郭映泉----- (49)
- 5)、流速失零的处理程序
张五月、郭映泉、程元中----- (65)
- 6)、二维激光多卜勒流速仪光学参数的测量和计
算 刘采彦、程元中----- (77)
- 7)、一种测量脉冲流量和累积流量的LDV信号
处理系统 程元中、诸国林----- (89)
- 8)、激光多卜勒测速仪在湍流机槽内流场测试中
的应用 程元中、张五月、郭映泉
郭梦熊、任好政、----- (99)
- 9)、频移应用参考程序
张五月、郭映泉、程元中----- (109)

DISA 二维激光多卜勒流速

测量分析系统及其应用

五室 80402 课题

程元中 张五月 郭映泉

一、前 言

激光技术是六十年代开始发展起来的一门新型应用技术学科，它的出现又进一步促进了其它各个学科的发展。由于激光具有极高的相干性和方向性，因此在精密测量和远距离测量控制等方面都得到了极其广泛的用途。激光多卜勒流速测量技术就是在这样的背景下根据光学多卜勒效应而设计产生的。自 1964 年 Yeh 和 Cummins 研制成激光流速仪的第一台样机以来⁽¹⁾，激光多卜勒测速 (LDV) 技术以惊人的速度飞速发展，1969 年已经出现了能交付实际应用的光学信号处理系统，之后 LDV 技术在紊流测量、超音速流动、机翼涡流测量等流体力学领域获得了广泛应用，截至 1975 年在丹麦哥本哈根召开了激光多卜勒测速技术的专题讨论会，会上讨论了 LDV 技术的测量精度⁽³⁾⁽⁴⁾及其应用中的一系列问题。⁽²⁾自一九七〇年后市场上已出现美、英、丹、西德等国厂商的科仪器商号，据资料可见的有：

表一

国别、型号	测速范围	精度	频率范围
(美) TSI 1090	1 mm/s - 500 m/s		2 KHz - 50 MHz
(英) 剑桥物理科仪公司	100 μ /s - 100 m/s	$\pm 0.5\%$	100 - 10 M (Hz)
(丹麦) DISA 55L I 型	3 mm/s - 300 m/s	1 %	2.25 K - 15 M (Hz)
55L II 型 (带声光调制口, 0 - 50 MHz)			
	3 mm/s - 300 m/s	1 %	2.25 K - 15 M (Hz)
55L + 55N 20 (可配 PDP 11/03 计算机)		1 %	1 K - 10 M (Hz)
55L 90a	2 mm/s - 2000 m/s	1 - 2.5 %	1 K - 100 M (Hz)
(配 PDP 11/03 计算机可作流态分析)			
(奥地利) BBC	5.5 mm/s - 337 m/s	0.1 %	5 K - 16 M (Hz)
(西德) 勃拉特绝维里康采恩实验室			
	1 m/s - 1000 m/s		
(日) 科学工作株式会社	不详		2.5 Hz - 20 MHz

为什么 LDV 技术会获得如此快的发展呢？因为和传统的毕托管、热线、热膜流速仪相比，它具有下面六大优点：

- 1)、它是无接触测量，因此不干扰流场，不受介质环境的影响和限制；
- 2)、线性好，多卜勒频移与流速成简单的线性关系，便于标度，精度不受非线性影响；
- 3)、方向灵敏度好，便于对流场进行多维测量；
- 4)、测量范围大，能从几毫米/秒到数千米/秒，这是其它流速仪所无法比的；
- 5)、空间分辨率高，可测直径为几十微米的空间点的速度，这对测边介层，湍层，狭窄通道的流动速度非常有利。

6)、动态响应快,信号以光速传输,配合适当的处理即可进行实时测旁,是研究湍流及瞬时流动状态的极好手段。)

L D V技术应用上的最大局限性,就是它要求介质中有散射微粒并要求介质及管道测旁段要透明。

应该指出:L D V技术不仅可测流体速度,也可用于测固体表面运动速度,因而也即可测旁、分析振动。此外还可以用于分析测旁微粒的大小等参数。^[2]

二. DISA 二维LDA系统的组成、工作原理

由表一可看出丹麦DISA公司生产的激光多卜勒风速仪(LDA)型号的更新速度是很快的,从1972年在我国第一次展出55LI型产品到1979年我所进口二维LDA系统总共七年中,其产品已发展到第三代,由电子信号模拟处理到数字处理到计算机控制并进行数据的统计处理,使原来的流速显示仪(无数字显示)进到流速的数字显示和方向显示进到由计算机软件控制并打印出数据处理分析结果,从而构成了一个可以称之为“流态分析”(不只是流速显示)的测旁分析系统。由于采用了PDP 11/03小型计算机并提供了相应的数据分析程序,使整个LDA系统的功能发生了质的飞跃。它几乎可以对流速的瞬时值进行采样,储存并按需要打出所需的某些采样值;它可根据程序对采样值进行数据的统计分析并打印出分析结果。

整个系统可分成三大部分:(图一)

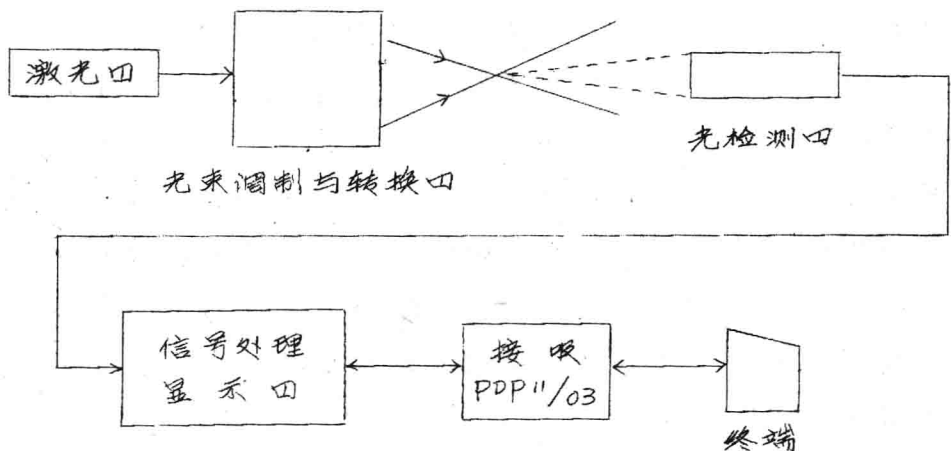
1)、光学探测部分

~ 6 ~

它包括氩离子激光口（最大输出功率为5瓦），光束调制口与转换口及光检测口。氩离子激光口是一种大功率气体激光口，其功率可以从五、六十毫瓦连续调节到最大功率5瓦，用它可获得一定强度的多色激光束。调制口（声光调制口即布雷格盒）可以对光速进行调制使之输出光频偏离光频 $+40\text{ MHz}$ 或 -40 MHz 。当被测点流动方向需要辨别其正负时，需要这种称为光频移的调制技术。^[6] 频移技术的引入使LDA技术由速度值的测量跃为速度矢量的测量。光束转换口可以将激光束进行分束、分色，使之由一束光变为三束光：三、束及三束混合光，然后会聚相交于被测点处。^[7] 当跟随流体同步运动的特征微粒通过被测点时，其散射光由光检测口（即光电倍增管或光电二极管）接收，根据光的多卜勒效应及光外差原理，^[5] 在光检测口中完成光学混频和检波（在某些检测口中还带有前置放大），将光信息转换为电信息，并送入电子处理口。

2)、信号处理与显示口部分

由光检测口送来的含有多卜勒速度信息的微弱信号是一种



〔图一〕 二维LDA系统框图

带有频率调制和幅度调制并夹杂有噪音的随机信号，对于这种信号的频率当然不能用一般的频率计，它首先必须在信号处理口中进行模拟处理（如频率跟踪口）或数字处理（如计数口或处理口），把有用信息有效地提取出来，然后通过内部微处理机进行平均值计称，再在显示口上进行数字显示（m/s）。

DISA公司生产的信号处理口分两类：一是频率跟踪型的；一是计数型的。前者又分成两种，一是频率反馈环路（即FMFB系统^[8]），另一种是锁相环路^[9]，频率反馈式跟踪口乃是DISA公司的较早产品（I型和II型LDA系统中均用这种处理口），这是一种有差反馈环路，故在量程两端均会带来较大误差，并且压控振荡口的输出也不便直接用作流速信息，而锁相环路跟踪口则是无差反馈环路，其压控振荡口输出在环路锁定时其频率与信号频率相等，便于直接进行数字处理，由于环路的特点（无虚频问题），便于设计自动搜索电路，实现自动搜索跟踪。这种跟踪口是DISA自称的第三代产品。

计数型处理口是基于电子秒表的原理对若干个多卜勒信号周期用高频时钟（500 MHz 或 1000 MHz）对其进行计时，并用四个有效化电路来除去非多卜勒信号或不合格的信号，以保证测量的准确性与真实性。^[10]

我所进口的信号处理口有两种：锁相环路频率跟踪口55N20和计数型信号处理口55L90a。前者适用于粒子浓度较大，速度较低（我们认为百米/秒以下较合适）的流速测量，后者适用于稀少粒子和较高速度（我所验收试验中达六、七百米/秒，据丹方说已实测到1000米/秒以上）的流场测量，并且其软件配备也较全。

3)、数据处理部分

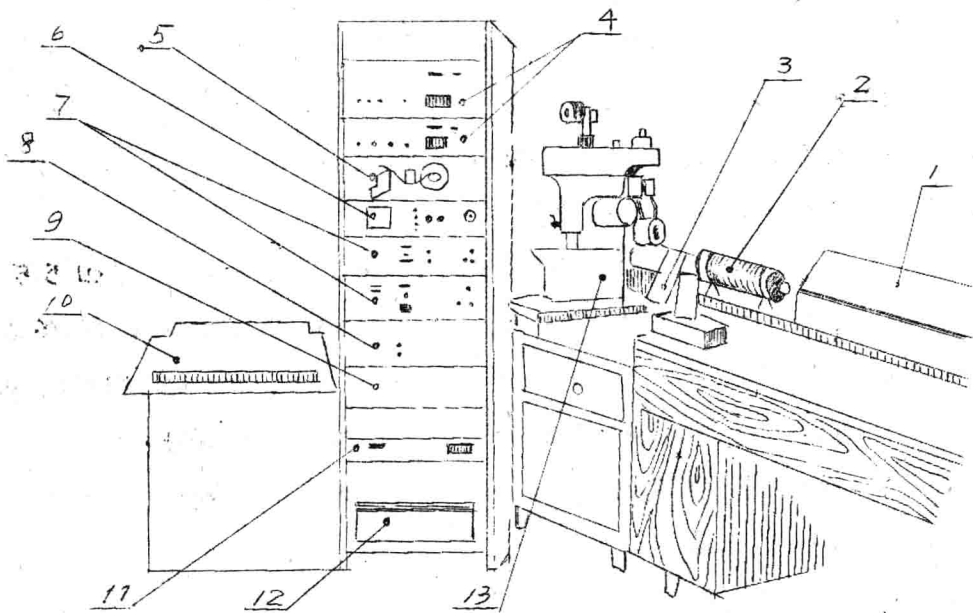
它主要由测试仪口接口和计称机系统（包括PDP11/03计

称机、纸带输入机、磁盘驱动器和终端打印机及相应的软件)组成。除测试仪的接口(57G20)和应用程序外,其余的设备均为美国DEC公司产品。其主要应用程序有采样值列表程序、直方图设计称量四价矩的程序、自相关计称程序和互相关计称程序,后三者均为对随机采样值的统计处理程序。〔1〕

测试仪口(处理口)在每次有效采样后,一方面将数据送入内部平均速度计称机进行均值计称,另一方面又把各采样值通过接口送到外部计称机(即DDP11/03)系统,然后根据所述程序的功能进行统计处理,最后将处理结果在终端打印出来。

系统程序分配在两种介质上:纸带和软磁盘,DISA公司既进口时没提供我们可实用的磁盘系统应用程序,通过与兄弟单位交流,我们已复制了一些可用的程序,现正在应用中。

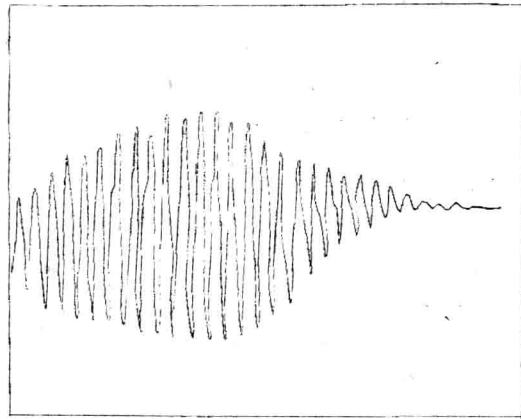
图二为系统(LDA)的实物照意,它直观地表示了整个LDA系统的组成。



图二、二维LDA系统

- | | |
|----------------|--------------|
| 1 — 氦离子激光口 | 2 — 光学调制、转接口 |
| 3 — 光检测口 | 4 — 频率跟踪口 |
| 5 — 磁带输入机 | 6 — 存储示波口 |
| 7 — 计数或处理口 | 8 — 频移口 |
| 9 — 接口 | 10 — 终端打印机 |
| 11 — PDP 11/03 | 12 — 磁盘驱动口 |
| 13 — 被测对象 | |

指出一点，示波口虽不参与信号传递和处理，但它却是测试过程必不可少的一个监视设备。



图三 典型的多卜勒信号

图三为利用系统中的 5441 存储示波口拍下的多卜勒波形，它反映了粒子经过高斯强度分布的光束测光点所得到的流速信息。

三、系统的功能

- 1)、一维或二维速度矢量瞬时值及平均值的测量与显示记录

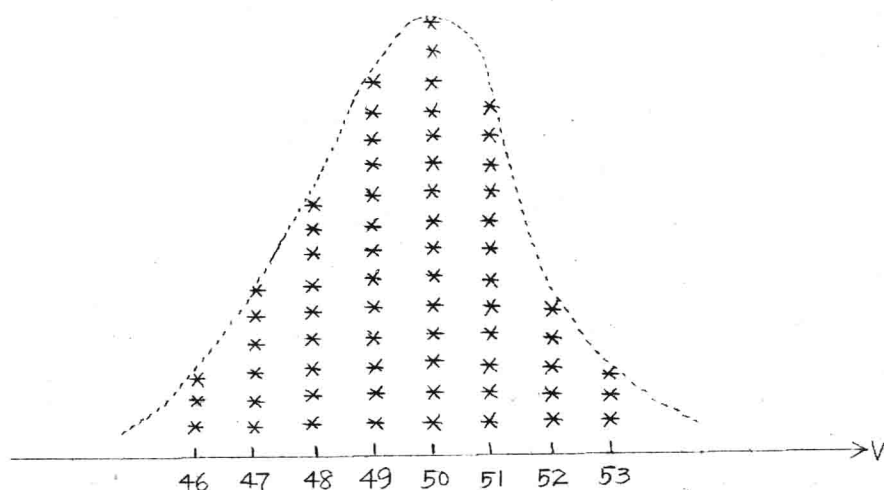
录：

由于采用了双色三束光、光调制及计算机技术，整个测试系统不仅可以对速度进行数字显示（平均值），而且可以将速度矢量瞬时值由终端打印输出，还可对所测的某一部分连续采样值进行平均并打印出结果。为了求得所需方向的速度分量及合成，我们自编了一处理程序，对所测值进行计算并打印出所需的速度分量、合成速度值及合成速度的方向。

2)、直方图

在流体研究中有时不仅需要打印瞬时值和平均值，还需要对所有采样值进行速度值分布频率的统计处理，以便直观地看出在所有采样值中，各种速度值出现的次数，从而进一步研究其分布规律与流态的关系。

本系统中的直方图程序可以由终端打印出一个直观的速度分布图，如图四所示。图四中的*号表示对应的速度值的一个采样，故*总数就表示共出现的次数。



图四. 直方图一例

3)、计称特征统计值

由于湍流测量中流速实际上是一个随机波动的参数，为了研究流态的特征，就需要计称其随机波动的特征值。

运行所给的统计计称程序就可打印出随机采样值的一阶统计矩及二至四阶中心矩，这些参数反映了流体中流动的紊乱程度（湍流度）及其随机波动的离散状态。实际上，一阶统计矩就是其期望值 $\bar{v}$ ，二阶中心矩就是其方差 Δv^2 ，而 $\sqrt{\Delta v^2}/\bar{v}$ 就是相应当地速度的湍流度，当然，我们还应考虑测量方法带来的一些影响。

4)、计称自相关与互相关值

当要研究流体湍流流动中更深入的一些参数（如湍流功率谱、湍流长度及雷诺剪应力等）时，就要将采样数据进行相关分析。目前这方面的资料报导较少，国内有关开展这方面的定势分析研究更少。可能的原因是过去缺乏这方面的研究手段，另外对 LDA 技术在湍流方面的应用尚属探索阶段，国内外的学者都有持不同观点的争论。但总的来看，LDA 技术在流体力学上的应用，特别是在一项被称为测量难点的湍流测量上的应用，仍属探索的上升阶段，随着研究的深入和一些难点的突破，LDA 技术在流体力学上的应用将会有更飞跃的发展。

5)、其它功能

LDA 技术是基于光学多卜勒原理而发展起来的，因此对于能产生多卜勒效应的物理过程是有可能利用 LDA 技术来测量的，如固体表面的运动速度，振动等。事实上现在 DISA 公司已有商品 LDA 测振仪，它在光学系统上作了一些变更，而接受和信号处理部分基本与一般 LDA 系统中的信号处理部分相同。激光多卜勒测振当然具有非接触测量的一般优点，几年前国外就有利用 LDV（激光多卜勒测速）法测叶片振型的

报道。激光多卜勒测速与测振在导航技术中有着广阔的应用前景。

LDA技术的信号来源是粒子的散射，因此通过对接收到的多卜勒信号的分析，可间接对粒子大小及浓度进行测旁，在资料[2]中（共700多页）粒子及块测旁方面的文献就佔了约80页之多，粒子的测旁在LDA应用中佔着很重要的地位。

四、几个问题的讨论

1)、仪口的使用、调歪问题

LDA技术是一门多科性的综合技术，它要求机械、光学、流体力学、电子学及近代信息论、计算机技术等许多门学科有机配合，因此整个系统的使用、调歪也就不象一般测试仪口那样，只要把测试笔或探针与被测对象的适当部位一接触，指示口就可读出正确的被测值。它不仅要求使用者熟悉系统的一般操作，而且还要求操作者有一定的实验技术和分析能力，否则即使读出或打印出数据，也不一定是正确的。比如，若只是简单地搬用说明书给出的光学参数，那你就不能测得准确的数据，而误差可达 $\pm 1\%$ 甚至更大（这个数值已可与仪口的精度相比拟）。再如，若仪口通带选择不当或频移速用不当，甚至可测出很荒唐的数据。要调歪使用好整个LDA系统，必须对系统及被测对象都要有一定深度的了解。通过一段时间的使用，我们还体会到，逐步学会对系统的维护与修理是非常必要的，否则就很可能因一点故障而停机待修，“望洋兴叹”，从而使我们的工作无法正常进行，我们还必须在这方面继续努力。

2)、精度问题

要分析LDV测试的精度可以象分析一般测试系统精度那样从测试仪口的精度及测试方法本身会带来的误差这两方面着手。比如用热电偶测飞机某部件的温度，这时不尤要考虑一次

仪表、二次仪表的精度，而且严格地说还要考虑一次元件与被测对象间热交换状态的变化对整个测量所带来的影响，后者是测试方法本身所带来的，也是不可避免的。在 LDA 测试中，虽然不用间接通过中间物理量来转换，而可直接从频率信息中得到流速信息，故与被测介质的物理参数无直接关系。但这决不是说 LDA 测试中，测试方法本身就不会带来误差，相反地，正是这个误差的存在使整个 LDA 测量中的精度分析变得更加复杂。

a)、光学几何参数对测量的影响

在双光束 LDA 系统中速度可表为：[15][16]

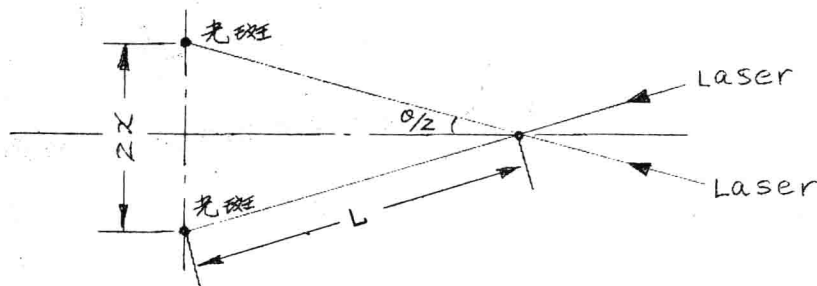
$$V = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \cdot f_D \quad (1)$$

若通过测光斑距离的方法来测 θ ，则有：

$$V = \frac{\lambda L}{2x} f_D = C \cdot f_D \quad (2)$$

这里：

$$C = \frac{\lambda}{2 \sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\lambda L}{2x} \quad (\text{图五}) \quad (3)$$



图五 用测光斑距离法求光束夹角 θ

上面式中：