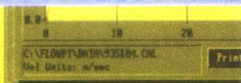
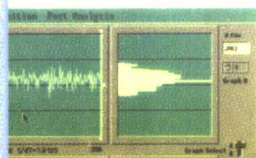
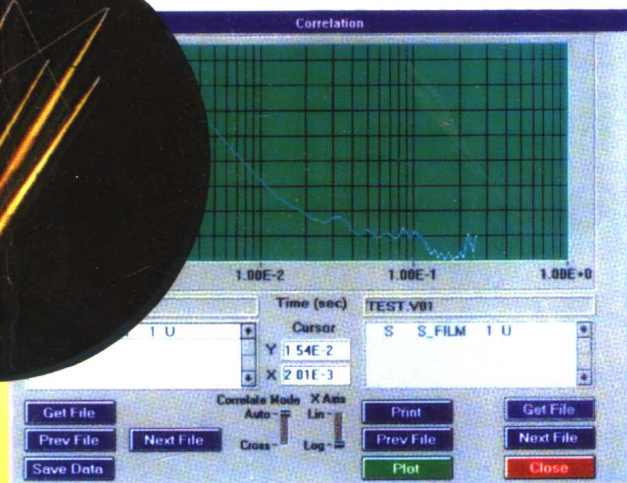
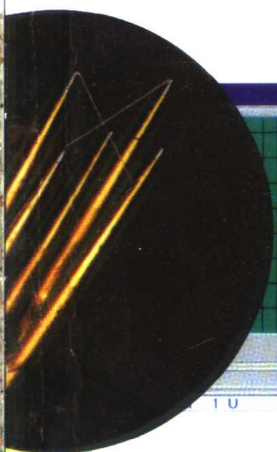




热线热膜流速计

盛森芝 徐月亭 袁辉靖 编著



热线热膜流速计

盛森芝 徐月亭 袁辉靖 编著

中国科学技术出版社

·北 京·

图书在版编目(CIP)数据

热线热膜流速计/盛森芝,徐月亭,袁辉靖编著.

—北京:中国科学技术出版社,2003.8

ISBN 7-5046-3644-4

I.热... II.①盛...②徐...③袁... III.热电偶
流速计:热膜流速计 IV.TH815

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 074309 号

中国科学技术出版社

北京市海淀区中关村南大街 16 号 邮政编码:100081

电话:62179148 62173865

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京中科印刷有限公司印刷

*

开本:850 毫米×1168 毫米 1/32 印张:4.75 字数:150

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

印数:3000 册 定价:15.00 元

序

◇小兵立大功；

◇小公司大成就；

◇北大人不怕数学；

◇我要把精力都放在流体技术研究上，希望在我有生之年，还能
为民族振兴做一点有益的事……。

◇……

这是我结识森芝十几年来，常萦回脑际的几句话。有的是我从森芝研究有关的报道里发现，有的是森芝自己的话语，无不令我印象深刻、无不令我感动不已。

十几年前，我以成功大学工学院院长和台湾力学学会理事长身份，去北京拜访大陆力学学会并访问中国科学院、北京大学、清华大学和北京航空航天大学等等。在中国科学院，我做了一场台湾高等工程教育和工业发展的报告，或许因为我是头一位来自台湾的学者关系吧！使北京学术界人士们好奇，纷纷前来参加，于是结识了森芝。之后在造访北大时，也特别到森芝的流体技术研究室参观，听取介绍，对一位常年从事工程教育的人来说，我很容易发现森芝是一位学术有基础、实务有经验以及研究工作有成就的学者。记得当时我就约他到台湾来访问和交流，没想到一拖就是十年，只不过这期间我们的联系不曾中断。

2001年12月，森芝夫妇来台访问，在成大报告现代流动量测技术十年来之新发展，充实之内容、生动之谈吐，使聆听师生受益良多。

森芝之现代流动测量技术书，预备分两册出版，嘱我为序，我

深感光荣。

上周有位韩国前科技部长来,说起他一次到美国加州理工学院访问,看到一间会议室墙壁上的杰出校友肖像,竟然大半是中国人,其中自然也包括流体力学、特别对湍流理论研究有开创性成果的周培源教授了!森芝是周先生高足,不仅承继了周先生对流力理论研究,更建立起流力实务应用技术和发展,有发明、有专利,甚至所做的发明和建立的技术,被形容为小兵立大功、小公司大成就……名师高足果然不凡。森芝从艰苦童年奋力向上,能有如今,应为年轻人楷模。谚语说:“有志者,事竟成”,相信森芝为民族振兴做贡献的希望,一定会实现成功。

成功大学名誉教授

李克儼

2003.2.12

前 言

人类研究自然现象归根结底就是要去确定自然现象中质的关系和量的关系;而确定这种关系的过程往往又都是通过测量来进行的。

什么叫测量?简言之,测量就是比较,就是通过工作过程将一个被测量与一个标准量进行比较的认识过程。因此,测量是认识自然现象内在规律的基本方法、基本工具和基本过程。

门捷列夫曾经明确指出:“在自然界里,度量衡是主要的认识工具”,又说“科学始于测量”。雅可比也说过:“没有测量就没有任何精密科学,就没有任何应用科学,就没有任何实验。”又说:“新的测量方法标志着真正的进步”。先辈科学大师的这些至理名言,言简意赅地指明了测量技术对于发展科学技术,探索自然现象的重大意义,点出了测量科学工作者的重大责任,确定了测量工作的根本任务。

流动现象是自然界中存在的一种十分普遍的现象,她存在于人类社会的各个部门,各个学科、各个领域、各个行业。近代空气动力学、流体力学、水动力学、热力学、气象学、冶金学、燃烧学、材料学、农林科学以及航空航天工程、水利水电工程、热能工程、流体机械工程(包括内燃机、航空发动机、涡轮机、透平机、水轮机、风机、水泵、阀门、压缩机等)等都提出了一系列流动问题。这些流动问题归结起来有高速流、低速流、管道流、燃烧流、冲击流、旋转流、振荡流、涡流、湍流、大攻角流,多相流、非牛顿流等等。其中许多都是现代高新技术、国防科技中的复杂流动。认识这些流动现象就得对这些流动进行测量。正因为这样,流动测量这门学科从根本上来说就是一门跨行业、跨部门、跨学科的“三跨科学”,她具有极为广泛的应用前景。尤其是对发展我国的国防科技和国防工

业,具有极为重要的意义。

随着科学研究事业的不断发展,随着对各种流动现象研究的不断深入,对流动测量技术(包括方法和仪器)的要求也越来越高,希望能够适应单点向多点、单相向多相、平面向空间、稳态向瞬态、定性向定量的各种流动测量的需要。

为了满足这种需要,近百年来,特别是近十年来革新和发展了一系列新的流动测量技术。其中包括 1914 年发明的热线热膜风速计(简称 HWFA);1964 年发明的激光多普勒流速计(简称 LDV);1989 年诞生的相位多普勒粒子分析仪(简称 PDPA);1993 年诞生的测量瞬态流场的粒子成象速度场仪(PIV);1998 年诞生的声学多普勒水流仪(简称 ADV)等等。这些仪器和技术,原理各异,特色不同,性能有别,适用范围也不一样,但谁都不是一种能够对任何流动、任何场合都可以使用的“万能”流动测量仪器和技术。这就需要对这些仪器和技术的原理、特点、性能做一个全面的分析,以便根据实际问题和具体情况进行“量体裁衣”和“量材录用”,选择合适的测量技术和仪器,解决自己的实际问题。热线热膜风速计(HWFA)是建立在热对流方式为主的热交换原理基础上的,她反映了热力学理论和电子技术的发展状况,具有连续信号,便于进行谱分析和湍流测量,但方向性较差,且属于接触式测量,精度在 1% 的量级上。激光多普勒流速计(LDV)则是建立在多普勒频移原理基础上的,是通过测量频率来测量流动速度的,因此平均速度的测量精度较高,可达 0.1% 的量级,但她是非连续信号,不适用于谱分析,测出的湍流度也总比 HWFA 高,然而方向性却比 HWFA 好,能测量反相流,属于非接触式测量,不干扰流场。相位多普勒粒子分析仪(PDPA)也是建立在多普勒频移基础上的,是通过测量相位差来测量粒径,同时和 LDV 一样属于非接触测量,是通过测量频率来测量速度的,方向性和 LDV 一样,技术含量比 LDV 更高,操作比 LDV 复杂,适合于既要测量粒子速度,又要测量粒子粒径

的场合。粒子成像速度场仪(PIV)是基于测量粒子散射光强来测量整体流动的瞬态流场的仪器,是一种多点(甚至几万点)测量的技术,并且是通过统计平均和相关技术来处理数据求得整个流动场的速度分布的,其技术含量很高,从本质上看是古老的模拟式流态显示技术的数字化发展,也可以看成是图像图形技术在流态显示中的应用,是流动测量技术中的一种新式武器,精度介于 HWFA 和 LDV 之间,但目前难以用于湍流细微结构的研究,也难以用于流动场的谱分析。声学多普勒水流仪目前只能用于水流测量,且只限于 2m/s 以下的速度范围,但能进行湍流研究,精度比 HWFA 高。

上述这些流动测量技术和仪器不是对立的,而且相互补充,互为校核的。

本书原名为《现代流速测量技术》,热线热膜流速计只是其中的一部分,后因工作需要,这部分必须提前出版,才把原书分两册出版。其中第一册单独命名为《热线热膜流速计》,第二册则命名为《流场激光诊断技术》,内容包括原书激光多普勒流速计,粒子成像速度场仪,相位多普勒粒子分析仪等内容。全书由我和徐月亭、袁辉靖三人合作撰写,由本人做统一协调和文字内容上的增删。

全书力图为从事流动测量研究的工作者提供一个对流动测量技术全局性的认识,提供一本既有理论深度又通俗易懂的读物。因此在撰写时,既注意深入浅出的原理说明,也注意引进必要的公式定律和数学方程,但在内容的叙述上力求避免烦琐的数学推导,而侧重于物理说明和实际应用描述。

盛森芝

2003 年 3 月 20 日

目 录

前 言

第一章 引言	(1)
一、什么叫热线热膜流速计(HWFA)	(1)
二、HWFA的优点和不足,与LDV、PIV的比较	(3)
三、HWFA的历史回顾	(6)
第二章 HWFA的基本原理	(9)
一、物理基础——热转换	(9)
二、无限长线热敏感元件和King's公式	(10)
三、有限长热线敏感元件和长度直径比	(11)
四、热线探针	(17)
五、热膜探针	(18)
六、HWFA的工作模式	(22)
第三章 HWFA的校准问题	(56)
一、为什么要进行校准	(56)
二、校准表达式	(58)
三、校准装置	(60)
第四章 各种量值的测量	(70)
一、时间平均速度的测量和探针的倾角效应	(70)
二、X探针和二维速度的测量	(74)
三、三维探针和三维速度的测量	(77)
四、湍流度的测量	(82)
五、四线探针、六线探针与涡量的测量	(85)
六、其他各种湍流量的测量	(93)

七、应用实例——自由射流再探	(101)
第五章 脉冲线流速计(PWA)	(110)
一、理想的 PWA 探针响应	(110)
二、PWA 探针对热脉冲的响应	(112)
三、PWA 探针的速度校准	(116)
四、探针几何形状和操作考虑	(118)
五、用 PWA 探针进行湍流测量	(119)
六、用 PWA 探针进行近壁测量	(121)
第六章 飞行热线流速计(FHA)	(124)
一、FHA 系统的基本原理	(124)
二、FHA 系统的三种不同的类型	(125)
三、相对速度的测量和流动速度的计算	(127)
四、布雷德福 FHA 系统简介	(130)
参考文献	(133)
立项证书	(139)
跋	

第一章 引言

一、什么叫热线热膜流速计(HWFA)

热线热膜流速计(hot wire/hot film anemometry 简称 HWFA)是利用热对流方程的解 $H = A + B\sqrt{U}$ 来测量流速的仪器。 $H = A + B\sqrt{U}$ 称之为 King 公式,是 King 在 1914 年求解热对流偏微分方程的解,其中 H 代表热耗散, A 和 B 为一定条件下的常数, U 为流速。

King 公式是假定无限长的圆柱体在无限大流场中发生强迫对流时的解,这在现实条件下是不可能实现的,既无无限大的流场,也没有无限长的圆柱体。作为一种近似,现实中只能用长度直径比大于等于某一个值的情形来实现。例如 $l/d \geq 300$ 时,我们就认为是一根长的圆柱体在相对很大的流场中了。所以具体的热线探针是如下图所示:

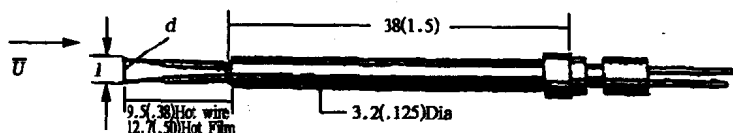


图 1 热线探针

一般来说 $l \cong 1.5\text{mm}$, $d \cong 5\mu\text{m}$, $l/d \cong 300$

从物理学角度来看热交换有四种形式,这就是热传导、热辐射、热对流,而热对流又分为强迫对流和自由对流两种。HWFA 利用的是强迫对流,所以一个热线探针在设计、制造和工艺上必须满

足强迫对流这个条件。

在排除其他热交换的条件下,加有电流的细而短的金属丝,在形成强迫对流的流动作用下,金属丝的温度会随流速而变,从而就会产生电讯号。由于电讯号和流速之间建立了一一对应的关系,因此测出这个电讯号就等于测出流速。

HWFA 在工作过程中是遵循热平衡原理的。这就是说,任何时候金属丝中由流速上升所耗散掉的热量应该等于金属丝电阻温度升高所产生的热量;反之,任何时候由流速降低所积累的热量应该等于金属丝电阻温度降低所损失的热量。在这个热平衡过程中必然要涉及流速、加热电流、金属丝电阻(或金属丝温度)三个基本量,它们之间存在着一定的固有联系。当加热电流保持恒定时,金属丝电阻和流速之间建立了确定的关系,利用这个关系形成 HW-FA 时,我们称之为恒流式流速计;当金属丝温度(或电阻)保持恒定时,金属丝电流和流速之间建立了确定的关系,利用这个关系形成 HWFA 时,我们称之为恒温式流速计。所以具体形成流速计时,有如下两种模式。

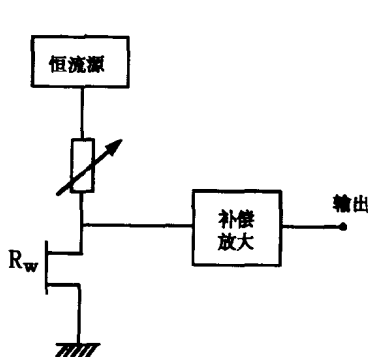


图2 恒流式流速计

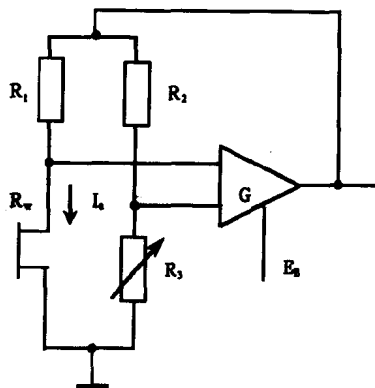


图3 恒温式流速计

二、HWFA 的优点和不足,与 LDV、PIV 的比较

一种测量技术或仪器的优点和不足是通过和某种相对标准做比较而认识的。

那么,什么是测量流动速度的理想技术呢?概括起来应有以下各条:

(1) 空间分辨率要高,有足够小的测量尺寸,能近似地代表空间某一点的速度。

(2) 时间分辨率要高,能测出足够高频率的流动速度的连续瞬变值。

(3) 背景噪声低,能测出很低的流动瞬变值。

(4) 通频带要宽,能反映足够宽频率范围的流速值。

(5) 能在较大的温度、密度组合范围内测出速度值。

(6) 能测量各个速度分量,其中包括反相流。

(7) 测量精度要高。

(8) 对流动干扰要小。

(9) 成本要低,价格要便宜。

(10) 操作简单、使用方便,易于推广应用。

如果按以上十条标准,把 HWFA 和 LDV(激光流速计)及 PIV(粒子成像速度场仪)做一个比较,则下表所示的结果。

三种流速测量仪的比较

比较项目	(11) HWFA	(12) LDV	PIV
空间分辨率	典型的热丝型敏感元件,直径为 $5\mu\text{m}$,长 2mm ;最小可达直径 $1\mu\text{m}$,长 0.2mm	典型的测量体积为 $50\mu\text{m} \times 5\mu\text{m}$ 。但如果测试点离镜头较远,则测量体积就较大;折射率若有改变就会引起入射光束漂移	$1\text{mm} \times 1\text{mm}$
时间分辨率	能反映足够高频率的连续瞬变信号,所获信号适合于作谱分析用	所测信号为离散值,很难反映高频连续瞬变信号	与 LDV 类似

续表

比较项目	(11) HWFA	(12) LDV	PIV
背景噪声	背景噪声很低,背景湍流度一般仅为 0.005% ~ 0.003%	对于计数型处理器信噪比为 3dB,而目前的信号处理器信噪比可达 - 12dB,能测出比噪声振幅更低的信号。但 LDV 是靠粒子的多普勒信号来测量的,背景噪声仍比 HWFA 高	与 LDV 相当
通频带	测速频带较宽,最高可达 1MHz,但极低速度时自由对流起作用,故不适宜于极低速测量。在可压缩流中,HWFA 对恢复温度、马赫数及雷诺数都很敏感	测速频带较宽,最高多普勒频率已达 175MHz。高速流动中易于把数据换算成流速,但掺加合适的粒子存在技术困难。测量低速流动比 HWFA 好	使用频率较低,目前仅为 30Hz,不适合高频流场测试
对在一定温度、密度和组成成分中测量速度的能力	适应能力较宽。但由于热线对环境温度具有较好的敏感性,因而可以利用双线探针法分离速度和温度 在低密度流动中,热线热传导的比例较大,滑移流动的影响增大 可在高密度的金属流中使用	适应能力较宽。但在低密度流动中存在粒子跟随性问题,粒子浓度问题,及散射光强不足的问题 在高密度流中,由于可见度较低,致使测量难度增大	与 LDV 相类似
测量分量及反相流的能力	可测量一维、二维、三维分量。但由于传感器尺寸较大,难以提高空间分辨率 反相流难以测量	可测一维、二维速度分量,对三维气流速度也能比较理想地测量。但在液体中则只能采用单镜头模式,而单镜头模式光轴方向的精度很差。 利用频移装置可测量反相流	可测平面上的二维及三维速度,也能测反相流
测量精度	公认的平均速度测量精度为 1% ~ 3%。湍流度精度至今仍被认为是最信得过的,因为和湍流球的测量结果更接近	公认的平均速度测量精度为 0.1%,被用于平均速度的标定。湍流度所测结果高于 HWFA 的所测结果	介于 HWFA 和 LDV 之间,公认的精度可达 1%
对流动的干扰	接触式测量,对流动有干扰	非接触测量对流动不产生干扰	与 LDV 相同

续表

比较项目	(11) HWFA	(12) LDV	PIV
成本	成本较低, 价格比 LDV 便宜。同样一台三维 HWFA 其价格仅为 LDV 的三分之一	成本高, 价格比 HWFA 贵	与 LDV 类似
使用难易	传统的 HWFA, 调试麻烦, 每次使用都要标定和用前调节, 都要进行方波试验。近年来我国学者提出了预移相型 HWFA, 用前调节被革除, 方波试验被免去, 这就使 HWFA 的调试工作大为改观, 但仍需要进行标定	安装调试比较麻烦。但使用时比较简单, 操作也方便, 因为 LDV 不需标定	与 LDV 类似
速度测量范围	0 ~ 300m/s	0—超音速流, 最高可测到 $M = 5$	0—超音速流, 最高可测到 $M = 7$
刻度特性	$H = A + B \sqrt{U}$, H 为热耗散, A, B 为常数, U 为速度	$U = \lambda/2 \sin \alpha \cdot f_D$, f_D 为多普勒频率, α 为入射光之间的夹角, λ 为波长	$U = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1}$ $V = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{Y_2 - Y_1}{t_2 - t_1}$ X, Y 为坐标, t 为时间

从上述比较中, 我们看到 HWFA 空间和时间分辨率高; 通频带宽; 背景噪声低; 价格相对便宜; 信号连续, 能准确地对流场进行频谱分析; 适用于各种流场, 特别是在低速流和低湍流场研究中显示了较大的优越性。故至今为止仍是湍流研究和流动测量的经典仪器和得力工具。但 HWFA 属于接触式测量, 对流场存在着不可避免的干扰和破坏, 敏感元件容易断裂、破损和污染, 也难以精确地实现大面积瞬态流场的测试。LDV 属于非接触测量, 不会干扰和破坏流场, 精度比 HWFA 高, 且可以利用频移装置测量反相流, 同时在高速流、强湍流研究中显示了比 HWFA 更大的优越性。但 LDV 摄取的是离散的多普勒信号, 难以精确地对流场进行频谱分析, 价格昂贵, 背景噪声也较高, 在低速流和低湍流研究中并没有

显示其更大优越性。所以这两种仪器各有特色,具有互补性。

若拿 HWFA 与近几年出现的 PIV(粒子成象速度场仪)作比较,其主要特点方面与 LDV 相类似。所不同的是,PIV 是一种瞬态流场测试仪器,在多点测量和流场显示方面具有很大的优越性,可以认为是数字化的流场显示技术,必将对流场研究和流动测量产生巨大的推动作用。但是至今为止她的数据采集器的使用频率,也只有 30Hz,在反应流场频率成分上,实在是先天不足,后天难补,根本无法和热线热膜一比高低。在湍流研究领域,不少学者仍然持有不同的看法,认为目前 PIV 的发展状况,还难以代替 HWFA 的作用,今后也恐怕难以从根本上改变这种状态。这就说明,一种新技术、新仪器的发明,并不一定命定地要淘汰老技术、老仪器,更为现实的做法是发挥各种仪器的所长,以便取长补短、相辅相成,共同促进流动研究的发展。

三、HWFA 的历史回顾

HWFA 的理论基础诞生于 1914 年。在这一年,克英(King)推导了无限长线在无限大流场中的热对流方程,并且给出了解。前已指出这个解就是著名的克英公式 $H = A + B \sqrt{U}$ 。这就奠定了 HWFA 的理论基础。有了这个基础,人们就致力于实现对平均速度的测量,其中包括对 V 型和 X 型探针型式的研究,以及对“恒温”和“恒流”两种工作模式的探讨。对于这一阶段,1934 年雷查得逊(Richardson)有过较为详尽的描述。

1929 年德累顿(Dryden)和泼来涅尔(Planiol)把平均速度的测量推进到脉动速度和湍流度的测量。他们首先确定了恒流工作条件下的热滞后效应,并且发展了热滞后的电子补偿原理,从实践上实现了电子补偿线路,这就为后 20 年中恒流流速计的发展打下了坚实的基础。但是由于恒流流速计的热滞后效应大,电子补偿困难多,难以适应热膜技术的使用需要。特别是补偿本身还必须随

流速而变,致使实际使用上存在着诸多不便,因而恒流流速计的发展实际上困难重重,发展速度减慢。

1934年择娄(Ziegler)第一个制成了恒温流速计。这使 HWFA 的发展进入了一个新的发展时期。但是恒温流速计的真正发展是在 50 年代电子技术获得发展以后。不过这只是外部条件,恒温流速计之所以能够获得迅速发展的内在原因是热滞后效应小,反应迅速,频率响应也较宽。目前已经出现了频率响应超过 1MHz 的恒温流速计,完全能够满足流体流动中各种频率成分的测量需要。进入 20 世纪 60 年代以后,许多学者对恒温流速计的动态响应问题作了一系列研究,并且提出了频率响应实现最佳化的理论和实际的方波试验调节方法。这方面的工作首先要推夫累摩斯(Frey-muth)、戴维斯(Davis)、佩雷(Perry)、沃德(Wood)、贝耳焦斯(Bel-jars)及费格松(Fingerson)等人。其中 1969 年夫累摩斯和费格松的工作达到了较为完整的地步,形成了一套理论和调节方法。

与此同时,热线技术的另一个发展就是对各种专门量的测量应用。首先是对温度、密度和浓度的测量,因为热线的“制冷”效应并非仅仅与速度有关,而是质量流量的函数。其次是对极低速度的测量,因为极低速度是农业科学、气象科学、劳动保护科学、环境保护科学、人工小环境科学中极为重要的研究对象。而极低速度情况下,自由对流会干扰热线的正常工作,所以这方面的工作既吸引人,又很难令人满意。再其次就是在可压缩流、超音速流、金属流、两相流、涡流中的应用研究。

进入 20 世纪 80 年代中后期,数字处理技术、计算机技术的迅速发展,极大地扩展了 HWFA 的信号分析能力。关联、频谱、振幅概率密度分布、高阶矩等量都能很容易地得到,HWFA 具有连续测量信号的特点得到了充分的利用。

但是,建立在 Freymuth 理论上 HWFA 仍然调节麻烦,使用不便,难于推广应用。1991 年以北京大学盛森芝教授为首的研究