

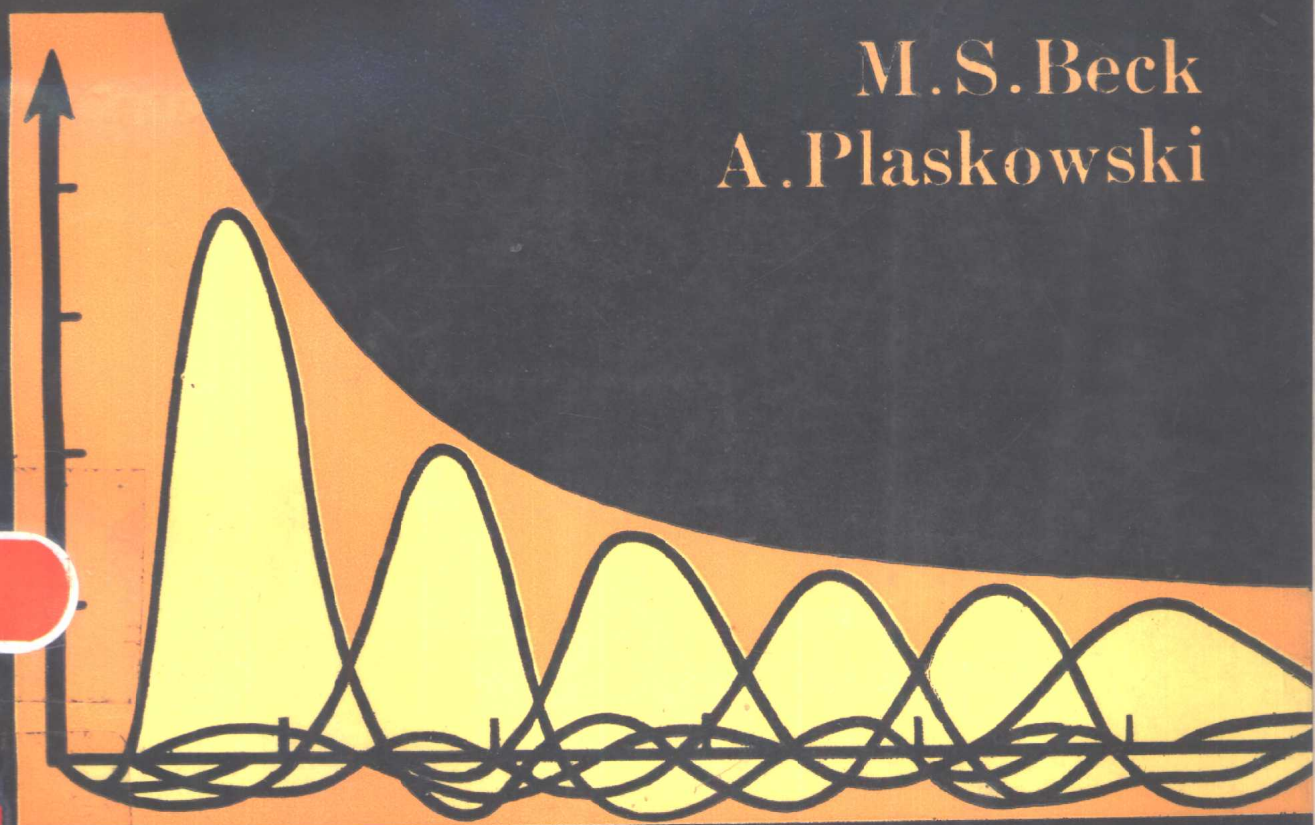
相关流量计的 设计与应用

徐 苓 安 译

Cross Correlation Flowmeters

Their Design
and Application

M.S.Beck
A.Plaskowski



天 津 大 学 出 版 社

相关流量计的设计与应用

M. S. Beck
A. Plaskowski 著

徐苓安 译

天津大学出版社

内 容 提 要

本书是对近廿年间新发展起来的相关流量测量技术的一个全面而又详尽的总结。是一本兼具学术性和工程实用性的专著。作者在回顾了相关流量计的发展历史,并扼要地叙述了与相关流量计设计有关的理论基础以后,花费了全书的四分之一的篇幅,详细地介绍了可能予以应用的各种敏感技术,着重讨论了几种较为实用的随机流动噪声检测用的传感器的设计原则。使读者在运用相关技术解决工程实际中遇到的单相流体或两相流体的流速测量问题时,能够作出比较正确的选择。在第四章,作者给出了几种在线实时流量测量用相关器的设计方案,并讨论了如何兼顾流量分辨率和流速测量范围,以及正确判别零流量等问题。在第五、六两章,作者根据许多研究工作者获得的大量实验标定结果,对相关流量计的系统特性和统计特性、各种现场安装条件对相关流量计性能的影响等,进行了深入的分析。最后,作者还简要地介绍了流动成象技术的基本概念。在本书的附录里,还列出了大量的极有参考价值的文献资料。

本书对从事流量测量技术及仪表的研究和使用的工程技术人员,特别是对那些需要解决两相流体或多相流体流动参数的检测问题的工程技术人员来说,是一本很有价值的参考书。它也是工业自动化仪表专业、检测技术及仪表专业和其他有关专业的大专、本科生及研究生的一本极好的参考教材。

(津)新登字012号

相关流量计的设计与应用

徐苓安 译

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本: 787×1092 毫米1/16 印张: 10 字数: 250 千字

1992年5月第一版

1992年5月第一次印刷

印数: 1—1500

ISBN7-5618-0362-1

TP·38

定价: 6.90 元

前 言

最近几年来,在加工工业和能源工业部门中,为了安全生产,节约能源,保证产品质量,提高操作效率和节省劳动力等目的,检测仪表的使用量一直在不断地增长。近期出现的过程计算机系统,增强了人们实现上述目的的能力,特别是增强了人们实现复杂控制和管理信息方面的能力。同时,对过程参数的测量需求也随之增加了。

流量测量是过程测量仪表的一个特别重要的方面。对于清洁的单相流体来说,那些利用已成熟的技术所构成的工业流量计,已经商品化许多年了。然而,在多组份流量计量这个重要而需求又日益增长的领域里,合适的流量仪表却是极为缺乏的。

互相关流量计无可争议地是适合于多相流测量的。而且,它还适用于在人们不易靠近的安装位置上,得到可靠的测量结果。测量核反应器热交换管道中的冷却流体的流量,就是一种情况的一个例子,这是相关技术首次应用于流量测量。虽然从技术上来说,那次测量是高度成功的,但是,由于那时(五十年代后期)在线相关器的价格昂贵,这一测量技术没有被采纳应用于生产过程。互相关流量计的基本原理是,仅仅测量扰动在沿流动方向被间隔开来的两点之间的通过时间。由于只测量时间,传感器就可以做得很简单,而且不需要进行标定。现在,由于数字式电子系统的价格低廉,测量扰动传递时间用的互相关器已经成为一种比较便宜的装置了。

自互相关流量测量技术一问世,我们,本书的作者们,就一直在关注着该技术的理论和它的实际应用。并且,时时在考虑将这种仪表的学术特色和工程设计特点同时写进一本书里,向人们提供有关实际工业问题解决途径的信息。

在过去的二十多年中,互相关流量测量一直是人们集中力量研究的一个课题。现在,已经有一些性能良好的工业用互相关流量计出现在市场上了。而且还可以不断地找到这种流量计的新应用领域。所以,本书必须兼顾以下三个方面的潜在读者们的需要:要求得到有关信号处理理论入门知识的学生;需要在相当深度上了解这种理论及其具体实现的高级研究工程师;对特殊应用的传感器及其安装特点等方面感兴趣的工业部门的仪表工程师们。因此,读者可以按照下面的说明,将他们的注意力集中在所选择的章节上。虽然,作者在本书中回顾了有关仪表、电子学和统计学的一些基本原理,但我们仍假定,读者们对上述各个方面都已经有了一个基本的了解。我们总的目的是,以简洁的形式为读者提供有关互相关流量计的现状,但又包含了足够多的信息和理论叙述。以使得学习该科目的学生,或新近开始从事互相关流量计研制的工程师,在没有参考其它书籍的情况下,能够对它有较彻底的了解。对那些打算探究互相关流量计解决工业问题的潜力,而且又具有适当背景知识的工程师来说,他们可以适当地省略第一章和第二章(历史背景和一般性理论),而把注意力集中在第三章(传感器)、第四章(相关器)和第六章(安装和实际应用结果)。从事比较有风险性开发项目的工程师可以发现,第五章将有助于了解流体动力学、传感器的设计以及它们对流量计精度的影响,了解这三者之间的复杂的相互作用。

第一章介绍了本书的主题,并叙述了统计方法和相关方法,如何从早期它们在测量和控制中的一般应用,发展到近期在互相关流量计研究中的应用。本章简要地回顾了互相关流量

计的研究和发展历史，还叙述了导致该种仪表成为市场产品的有关工业方面的工作。

第二章涉及到适合于互相关流量计设计用的基本理论和原理。扼要地叙述了随机数据分析的基本原理，并进一步叙述了互相关估计的统计误差的理论。随后，对互相关流量计所测量的流体的流动性质进行了系统的讨论，其中包括湍流流动过程的描述，流动过程模型化的方法，以及流动过程与互相关流动传感器的相互作用，等等。

对于一个具体的应用来说，传感器的正确选择对于测量的成功与否是至关重要的。在第三章中，我们叙述了迄今为止已被研究过的一些传感器的应用范围。应该说，这是本书最主要的一章。它包括了适用于互相关流量计的许多传感器的简要技术性能和它们的设计方法。

在第四章中，我们讨论了流量测量用互相关器的设计。虽然，从数学上来说互相关计算是简单的。但是，由于输入数据幅值量化的选择，以及适当的流量分辨率及流量测量范围的需要，流量测量用互相关器的设计却是复杂的。在这一章里，我们不去探究流量互相关器用的软件和硬件的详细内容，因为，这个问题以更一般的方式在有关的书中已经涉及到。数字电子学的有关技术正在迅速地发展。因此，我们将集中叙述流量测量用互相关器设计的一般原则。我们相信，这些设计原则可以应用于很多同类的硬件结构中去。

虽然，互相关流量测量是基于数字相关器中时间滞后的绝对测量。但是，如何将测得的时间滞后与系统中的真实流率精确地联系起来，这始终是一个值得深入研究的问题。在第五章中，我们讨论了互相关速度测量与平均流动速度及质量流量测量之间，在采用各种敏感技术和标定系统时，所进行的理论上和实际上的比较。我们将说明，互相关流量计的标定系数是如何根据系统的物理特征估计出来的。进而，考察了互相关流量计的统计精度。其中，传感器带宽与互相关流量计设计之间的内在关系，对统计精度有着特别重要的影响。另外，我们还考虑了离散事件检测现象的实际应用。在流量计测量稀疏分布的颗粒流动时，或者，在使用“离散的光子检测”技术时，都会遇到这种现象。

在第六章中，我们讨论了一些系统性的因素对流量计测量精度的影响。也讨论了传感器的具体安置方式以及为使流量计能给出最佳性能而作出的总体安排。在这一章中，也对流量标定装置的设计作了简要的叙述。特别说明了用于泥浆流和悬浮流这样一些“困难的”流体的标定装置。另外，本章还给出了相关流量计的一些实际标定结果。它们是在试验装置上，或者是在工业规模的装置上，在多种流量测量情况下得到的。

最后，在第七章中论及了互相关流量测量的可能的进一步发展趋势。它涉及到流动成像问题。流动成像是一种类似于医学层析成像的技术。它可能有助于解决在多组份流动中产生的困难问题。在多组份流动中，组份分布及流动廓形分布都是未知的和多变的。

我们对在过去二十年中给予了我们以合作和帮助的人表示感谢。正是由于这些人们的帮助，才使得我们有可能写成此书。其中，最重要的集体性的帮助是布莱福德(Bradford)大学控制工程系(从1966年起我们就在该系工作，直到1980年为止)和曼彻斯特大学科技学院(UMIST)仪表系(从1980年起我们一直在该系工作着)的教师、研究人员和技术人员。我们要特别感谢M.G.米尔洛伊教授，M.A.布朗博士，J.卡特先生，R.菲尔博士，R.G.格林博士，R.M.亨利博士，G.J.列维伦博士，K.D.斯坦利博士和A.L.斯科特先生以及其他许多在本书中被引用了其成果的教师和博士生们。

在以往的研究工作中，我们对于能够和来自其他协会和大学的工程师们和科学家们密切合作，一直是感到荣幸和愉快的。其中，我们要特别提到加拿大电力局的R.S.弗雷蒙先生，

爱丁堡大学的J.R.乔登博士，康斯塔兹专科大学的R.马森教授，肯特公司(Brown Boveri Kent)的R.S.麦德洛克先生以及南澳大利亚技术学院的R.索恩博士等人，他们慷慨地对本书提出了大量的书面评论。我们还要感谢梯塞得(Teesside)百科大学的J.库塔德博士，J.E.弗尔登先生，克里斯琴·米柯尔逊研究所(CMI)和伯尔京大学的E.A.汉默教授，泰尔格特(Telgate)有限公司的R.约翰先生以及卡尔斯鲁厄大学的F.麦熙教授。在过去许多年中，他们一直和我们紧密地合作着。H.克鲁格博士为本书作者之一，(M.S.贝克)友好地提供了实验设备，使后者在执行曼彻斯特大学科技学院和德累斯顿大学之间的科技交流协议期间，得以写成本书的一部分内容。普拉斯柯夫斯基博士感谢波兰的一些机构和同事们对他完成相关流量测量研究工作，以及允许他访问联合王国方面所给予的支持和赞同。其中，W.马斯祖乌斯基博士对这个国际合作项目的实现作出了特殊的贡献。我们也要感谢在肯特公司(Brown Boveri Kent)、菲尔登电子公司(Fielden Electronics)、英国煤炭局(British Coal)、勋伯吉尔剑桥研究中心(Schlumberger Cambridge Centre)、浅海技术有限公司(STL)、泰勒仪表公司以及水研究中心(Water Research Centre)工作的其它同事们。他们对互相关流量计的工业应用所必须的研究和发展工作中采取了重要的步骤。

本书所叙述的大部分研究结果都是在科学及工程研究委员会(SERC)于1976年至1984年间给予的财政资助，特别是在“测量”这一发展项目下提供的财政资助取得的。此外，英国技术小组(British Technology Group)和若干工业组织也为这些研究工作提供了奖学金和实验设备等方面的资助。我们还要衷心地感谢我们的秘书乔伊丝·埃姬女士，她以熟练的技巧和巨大的热情帮助我们打印整理出正式的书稿。我们也感谢UMIST辅助小组的罗德·霍尔特先生在绘制本书图表方面所给予的协助。

我们希望能在不断地再版过程中改进和发展本书的内容。我们将非常感激读者们提出的对于本书的任何评论和建议。

M.S. 贝克

A.B. 普拉斯柯夫斯基

一九八六年于曼彻斯特

符 号 总 表

α	衰减系数	S^2	样本方差
α_s	散射衰减系数	$SD(\)$	() 的标准偏差
α_a	吸收衰减系数	$Sx(f)$	功率谱密度函数 (双边的, 即正负频率下的)
A	任意常数, 面积	t	时间变量
$b(\)$	() 的偏差	T	观测时间, 平均时间, 时间常数
B	带宽	T_u	湍流度
C	电容	$u(t)$	速度
$C_x(\tau)$	自协方差函数	$V_{ar}(\)$	() 的方差
$C_{xy}(\tau)$	互协方差函数	W	权重系数
$C_{xy}(f)$	单边共谱密度函数	W_n	组份 n 所占有的管道横截面积百分数
D	扩散系数	$x(t)$	与时间有关的变量
E	辐射吸收	$\bar{x}$	$x(t)$ 的样本均值
$E(\)$	() 的期望值	$X(f)$	$x(t)$ 的傅氏变换
f	频率	$y(t)$	与时间有关的变量
f_c	截止频率	$\bar{y}(t)$	$y(t)$ 的样本均值
F	傅立叶变换	$ (\) $	() 的绝对值
$G_x(f)$	功率谱密度函数 (单边的, 即, 正频率下的)	$(\hat{\ })$	() 的估计值
$G_{xy}(f)$	互谱密度函数 (单边的, 即, 正频率下的)	α	流量计系数
$h(\tau)$	权重函数 (单位脉冲响应函数)	$r^2(f)$	相干函数
$H(f)$	频率响应函数	$\delta(\)$	德尔塔 (delta) 函数
$H(\omega)$	传递函数	δ	采样间隔
I	辐射强度	ε	归一化标准误差
L	敏感器之间的距离, 源和接受器之间的间隔	ε^2	归一化方差
m	相关计算用的延时值的最大数目	θ	相位角
N	样本数目	$\theta_{xy}(f)$	$G_{xy}(f)$ 的幅角
$P(x)$	概率密度函数	μ	平均值, 动力粘度
$P(x, y)$	联合概率密度函数	ρ	相关系数, 密度
P	声压	$\rho(\tau)$	相关函数系数
Q	静电荷	σ	标准偏差
$Q_{xy}(f)$	重谱密度函数 (单边的)	σ^2	方差
R	电阻, 量程范围	τ	时间偏移量
R_s	雷诺数	$\phi(f)$	相位因子
$R_{xx}(\tau)$	自相关函数	ψ	根均方值
$R_{xy}(\tau)$	互相关函数	ψ^2	均方值
S	样本标准偏差, 拉普拉斯运算符, $S = j\omega$	ω	角频率

目 录

前言	(1)
符号总表	(4)
第一章 绪论	(1)
1.1 测量和控制用的统计方法及互相关方法的发展和应用	(1)
1.2 流量测量用互相关方法的发展历史	(2)
1.3 互相关流量测量仪表的商品化发展	(6)
第二章 互相关流量计设计用的解析模型和物理模型	(8)
2.1 互相关流量计用的随机数据分析的基本原理	(8)
2.2 互相关估计的统计误差	(22)
2.3 互相关流量计的凝固图形模型	(25)
2.4 非凝固图形模型—扩散效应	(26)
2.5 管流的特性	(28)
2.6 流动图形—被输送相的非均匀分布的影响	(30)
第三章 敏感技术	(33)
3.1 引言	(33)
3.2 敏感技术概述	(34)
3.3 外部辐射的调制	(34)
3.4 利用流体发出辐射的敏感器	(51)
3.5 利用流体的电特性和热特性的敏感器	(53)
3.6 利用注入示踪标记物的互相关流量测量	(62)
3.7 结论	(65)
第四章 流量测量用互相关器	(66)
4.1 引言	(66)
4.2 计算互相关函数的方法	(68)
4.3 信号幅值量化	(70)
4.4 流量分辨率及流量变化范围	(72)
4.5 根据互相关函数确定流动速度的矩方法	(75)
4.6 互相关计算用的硬件和软件	(76)
第五章 互相关流量计的系统特性和统计特性	(82)
5.1 互相关流量测量与绝对流量测量之间的关系	(82)
5.2 互相关流量计的统计精度	(93)
第六章 安装和系统的影响	(103)
6.1 互相关流量计的概念化模型	(103)
6.2 互相关流量计的解析模型	(105)
6.3 特殊参数的影响	(112)

6.4 敏感场灵敏度	(116)
6.5 脉动流测量	(118)
6.6 流量标定装置	(118)
6.7 实际的标定结果	(121)
6.8 互相关流量计的现代工业应用举例	(128)
第七章 流动成像	(131)
7.1 引言	(131)
7.2 流动成像的基本原理	(131)
7.3 流动成像系统	(132)
7.4 结论	(135)
技术术语汇编	(136)
参考文献	(140)

第一章 绪 论

1.1 测量和控制用的统计方法及互相关方法的发展和应用

统计方法被引入自动控制系统设计的理论体系,主要是辛钦(Khinchin)、柯尔莫哥洛夫(Kolmogorov)以及维纳(Wiener)等人的研究结果。辛钦于1938年提出了有关的非阻尼稳定振荡的严格的数学理论。随机过程的相关理论就是在该理论的基础上发展起来的。辛钦理论突出的简明性在于,欠阻尼系统在不同的输入函数 $x(t)$ 作用下所产生输出响应都可以用同一个模型来描述。该输入函数可以用概率理论来描述,而系统的输出可以用它的概率分布及其时间历程予以描述。柯尔莫哥洛夫(1947年)对稳定的随机过程特别感兴趣。他采用过程的时间历程观测中得到的一组函数 $x(t)$,来描述一般化的时变过程。从概念上来说,这些函数都是具有一个连续频谱的非阻尼振荡。而以前的研究工作者都采用了离散的频率。柯尔莫哥洛夫(1947, 1954年)还提出了一种确定平稳随机过程最小均方误差的运算子的定义方法。该运算子可以使来自该过程的数据实行内插或外插。维纳在1949年所完成的研究工作的主要特点是,能以最佳的方式对承受随机的力函数作用的动态系统进行设计。当系统是由一个仅根据其统计特性确定的信号所激励时,维纳的技术使我们能找到一个积分方程,且通过求解该积分方程,确定出该系统的一组参数,使得该系统的均方误差达到最小值。

辛钦、柯尔莫哥洛夫和维纳等人的早期著述,曾激起许多研究工作者开发出一些响应各种形式的、随机输入的最佳动态系统综合的统计方法。下面,我们将叙述其中某些人的研究成果。

克拉默(Cramer, 1946年)研究了在平稳随机输入信号作用下,过程响应的描述方法。他建立起了包括离散数据情况和连续数据情况在内的一组方程,并用斯蒂尔吉斯(Stieltjes)积分将该两种情况联系起来。对早期的研究工作者来说,互相关方法并未显示它在经济上是合适的。因为,将数据相关起来所需要的计算机的价格太高。从五十年代后期起,计算机的价格大大降低了。特别是由于大规模集成电路的发展,对于互相关方法在工程问题中应用的增长,是一个很大的促进。不过,即使没有现代的一些计算方法,詹姆斯等人(James et al)在1947年,就根据对阵风以及飞机操纵这样的随机数据响应的分析,提出了伺服机构的设计方法。他们提出的方法,对于设计雷达跟踪系统和随动系统,都是非常有效的。它们构成了维纳(Wiener)所提出的更一般化的最佳化方法的特殊应用。吉勒等人(Gille et al, 1959)回顾了有关系统最佳化的大部分早期研究工作。并认为,最有效的应用例子就是牛顿等人(Newton et al)所获得的成果(他们在1957年出版了一本非常有用的书)。牛顿等人的特殊贡献在于,他们发展了一种可供各种实际应用的线性伺服机构设计用的最佳化理论。莱林和拜庭(Laning and Battin, 1956)叙述了一种特别适用于随机数据处理的技术。索洛多夫尼柯夫(Solodovnikov, 1966)则叙述了一些运用动态统计分析,综合自动控制回路的方法。在初期阶段,运用随机数据分析技术来设计系统,是和运用频谱技术来设计系统的研究工作分开进行的。不过,在多斯(Douce, 1963)的一本书中已经揭

示了系统的频率响应和随机数据的频谱响应之间的关系。贝达特和皮尔索 (Bendat and Piersel, 1966, 1980) 提出一种与之类似的方法。他们认为, 任何系统的输出信号可以被看作是随机输入信号经过低通滤波以后的表现形式。罗维 (Rowe, 1965) 特别注意将归一化脉冲响应和数据的相关函数与系统模型联系起来, 以确定系统及数据的频带宽度。普拉斯柯夫斯基 (Plaskowski) 在1965年编辑了一本有关系统动态参数辨识用特殊技术的书, 其中包括了统计方法的应用。大约就在这个时候, 人工产生的随机试验信号 (通常所谓的伪随机二进制序列) 的应用变得普遍起来。这种技术构成了他后来写的另一本书的基础 (Plaskowski, 1967)。

六十年代后期和七十年代初期, 有许多关于随机数据及统计方法应用的书籍出版。这些作者们的成果的精华被英克霍夫 (Egkhoff, 1974) 集中起来, 并发表在他的一本著作中。他指出, 统计技术研究的增长是由于以下四个方面的原因造成的:

- (i) 设计自动控制系统, 以提高过程的效率, 并将操作和维修费用减到最小的需要;
- (ii) 空间工业需要用简洁的统计方法来描述工程技术以及它们产品的飞行状况;
- (iii) 医学科学需要分析人类的行为和系统对动态信息的响应。这些信息常常是由随机数据组成的;
- (iv) 生物化学和生物技术的新兴领域需要对人口问题和生长问题进行动态随机分析。

到本世纪七十年代中期, 为运用随机数据分析用的基本体系, 以及为系统设计用的一些统计描述, 都已经被完整地确立起来了。在七十年代后期和八十年代中, 计算机价格的进一步降低, 保证了大量的应用问题可以采用早期所发展的方法予以解决。某些测量仪表, 特别是互相关流量计, 可以认为是随机数据辨识应用的特殊例子。这本书主要地着重于流量测量系统的描述和分析。

我们要提醒读者的是, “相关”这一术语有着各种各样的使用目的和意义。其范围包括从严密的统计描述, 到基于一些有限的非定量数据作出的评价。

在流体动力学中, 以下三种型式的“相关”是会遇到的:

- (i) 空——时相关, 它表示在空间中两点处, 在两个不同时刻测得的两个信号之间的关系。这个相关一般称之为“互相关”, 它是本书要讨论的主要内容;
- (ii) 自相关, 它描述在空间一点处, 在两个不同时刻测得的信号之间的关系;
- (iii) 空间相关, 它描述了空间中两点处, 在同一时刻测得的信号之间的关系。

1.2 流量测量用互相关方法的发展历史

本书的作者们对互相关流量测量感兴趣是始于这样一个时候, 当时, 他们主要是从事于应用伪随机二进制序列信号, 辨识一个二阶过程的动态特性。这项研究工作的一个简单的扩展是, 利用在热交换过程中产生的温度波动, 作为传递时间互相关流量计中的“标志”信号 (Beck & Plaskowski, 1967)。虽然, 泰勒 (Taylor, 1938, 1953, 1954) 和汤森德 (Townsend, 1947) 的工作或许也是重要的, 但是, 要确定互相关流量测量的真正起源是困难的。

测量某些扰动在系统中两点之间的传递时间的流量测量方法, 在五十年代就已是熟为人知的了。在这个领域中, 第一次独立发表文章的确切日期, 现在还不大清楚。但是, 某些作者, 例如, 柯佐博乌斯基 (Kozabowski, 1973) 和巴拉强 (Balachandran, 1979) 认

为, 第一篇叙述用互相关方法测量流动系统中两点之间的时间延迟的文章, 是由柯米亚 (Komiya, 1966) 发表的。比较详细的有关流体动力学方面的研究则是由法乌尔等人 (Favre et al, 1957) 给出的。在早期的研究工作中, 许多人都采用辐射性示踪物来实现时间延迟的测量。阿尔奎尔等人 (Alquire et al, 1970), 麦熙等人 (Mesch et al, 1974) 和列·奎立克等人 (Le Guennec et al, 1978) 都发表了他们的研究结果。早期文章的作者们, 例如, 卡辛瓦基和埃索比 (Kashiwagi and Isobe, 1968), 勃斯托普尔等人 (Boonstopel et al, 1968) 以及贝特利和坦森 (Bentley and Dawson, 1966) 等, 则未采用辐射示踪物。巴特菲尔德等人 (Batterfield et al) 在1961年发表的一篇论文中, 叙述了互相关方法在带钢速度测量中, 而不是在流动测量中的应用。他们的工作, 促使大家增加了对互相关在测量中应用的注意。人们日益期望能利用流体内部自然发生的扰动, 而不是从外界注入扰动 (这需要耗费能量) 来实现相关测量。我们认为, 有关自然的扰动在互相关流量测量中应用的最早的充分说明, 是由贝克和普拉斯格夫斯基 (Beck and Plaskowski, 1976) 给出的。他们拥有专利权的这项研究成果, 导致了在英格兰的百拉福德大学控制系, 随后, 又在英格兰的曼彻斯特大学科技学院仪器及分析科学系进行的一项主要的研究计划。

在1967年获得专利以后, 贝克于1969年在他的博士论文中提出了利用自然产生的流动噪声的互相关方法的基本理论。阿比依斯科拉 (Abeysekra, 1969) 发展了利用注入的温度扰动的互相关流量测量方法; 库塔德 (Coulthard, 1973) 将超声波传感器应用于液/气两相流的互相关流量测量; 列维伦 (Llewellyn, 1976) 采用光学传感器测量从火山口喷发出来的气体速度; 韦伯 (Webb, 1979) 也运用光学传感器测量了从炼钢炉喷出的高温气体的流率。格林 (Green, 1981) 研制了互相关流量测量用的电容传感器。超声波传感器, 由于它固有的非接触特性, 被认为是可用于互相关流量测量的有吸引力的一种传感器。渥姆德等人 (Wormald et al, 1973) 扩展了库塔德的早期工作。他们设计了适用于大直径管道的超声波相关流量测量系统。安 (Ong, 1975) 进一步将超声波传感器应用于管道中各种液体和泥浆流量的测量。史密斯 (Smith, 1979) 则将超声波传感器应用于单相气体流量测量。尽管超声波相关流量测量系统有吸引人之处, 然而, 在发展初期, 许多研究工作者常常受到如下问题的困扰, 即, 为了获得满意的互相关函数, 需要不断地调整所发射的超声波的频率。这个问题首先是由加拿大的弗雷蒙斯 (Flemons, 1977) 予以解决的。他在百拉福德大学研究小组的工作基础上, 设计了一个自动的正交选择系统, 以保证获得正的相关函数, 而无须手动地调节所发射的超声波频率。拜梯 (Battye, 1976) 发明了一个巧妙的闭环系统, 它可以自动地实现严格的相位控制。而不需要采用上述的正交分量选择系统。这就产生了一种工业上可以接受的测量仪表。拜梯还提出了一种理论体系, 运用流体力学和流量计的声学特性来解释他所研制的系统的工作原理。闭环系统的成功, 促使人们考虑采用“夹钳” (Clip-on) 系统的可能性。在某些应用场合, 特别是在低流速和低湍流信号的情况下, “夹钳”系统仍然会遇到前面所提出的相移问题。列奇 (Leach, 1975) 和瑞维提 (Trivedi, 1979) 证实了这个相移问题, 是由于在管壁内构成的驻波所引起的。他们还理解了这一问题, 打下了一个定量分析的基础。史密斯 (Smith, 1979) 又进一步发展了他们的成果。巴拉强 (Balachandran, 1979) 也在泥浆流量测量这种特殊应用条件下, 研究了相移及驻波问题。菲尔 (Fell, 1979) 将超声相关流量计扩展应用于双组份流体的测量。他研究了液/气混合流体的测量问题, 并考虑到了液相速度和气相速度之间的差别。爱尔·纳米 (Al-Naimi, 1980) 研究了互相关技术在液/液混合流体流量测量中的应用。贝克于1981年发表了一篇文章

章,对六十年代和七十年代期间互相关流量计学术和技术方面所取得的进展,作了一个概括的介绍。

除了火山喷出物的流量测量外,上面所提到了研究工作都涉及到封闭管道内流体的测量。卡格兹契(Kaghazchi, 1979)研究了测量开渠中液体流量的互相关方法。卡格兹契等人(Kaghazchi et al, 1978)在一篇文章中谈到了互相关方法在明渠污水测量中的应用。在他们设计的系统中,用光学传感器检测污水表面的涟漪,再配上第三个传感器,就可以在测量流体表面流速的同时,通过三角测量方法,确定出明渠内流体液面的高度,从而可获得流体的体积流率。

随着新的仪器及分析科学系于1980年在曼彻斯特大学科技学院(UMIST)的创立,汉默(Hammer, 1983)在该系开展了对油/气/水混合物中三种组份的流量测量问题的研究。他研制成功了一种运用电容传感器测量所有三种组份的流量的系统。汉默的这项工作,在挪威的库里斯琴·米可尔逊研究所(CMI)得到了继续。该研究所的狄克斯廷等人(Dykesteen et al, 1983)也研究了一种测量油/气/水三组份流体的阻抗方法。徐等人(Xu et al, 1986)研究了测量多组份流体中各组份流速的方法。

在1985年,UMIST的研究小组考察了工业上对多组份流体的测量要求。他们发现,在许多应用场合下,被测流体中组份的空间分布是未知的而且是可变的,而原来使用的传感器几乎都具有一个不可变的非均匀的敏感场。并且,它们只是在被测组份的一种相当恒定的空间分布情况下,才可能被精确地予以标定。因而,在实际应用中传感器的精度会被降低。这个分析导致了一个关于“流动成像”(flow imaging)的雄心勃勃的研究计划的出现。

“流动成像”的内容是,在测量管道的周围采用了许多敏感传感器,和一个图像重建计算机相配合,提供出有关组份流量测量的精确信息。在本书第七章叙述了这个新的研究内容。许多新的专门应用于流动成像的传感器已在UMIST设计出来了。徐(Xu, 1986),格莱古里(Gregory, 1987),黄(Huang, 1986)和斯托特(Stott, 1987)以及格林和泰勒(1986)等人分别对超声波传感器、电动力学传感器、电容传感器以及光学传感器和电导式传感器的设计作出了说明。

贝克等人(1985)在一篇短文中提出了实现流动成像的概念性的办法。欧腾勃修和弗里士(Olatunbosun and Frith, 1985)在一篇文章中叙述一种利用伽玛射线康普敦散射效应构成的流动成像系统。随后,欧腾勃修(1986)又在同样题目的博士论文中对该系统进行了说明。流动成像涉及到繁重的计算工作量。虽然,阵列处理计算机对于完成这种任务来说应该是合适的。作为一种替代的办法,狄金(Dickin, 1987)和林德斯托姆(Lindstrom, 1987)分别研究了光学的信号处理方法和光学和数字或混合的处理方法。

与流量测量系统设计及传感器的研究工作开展的同时,一些研究工作者集中研究了流量测量用相关器的设计。海依斯(Hayes, 1975)考虑了被相关信号的幅值量化的影响,并说明了两点差值算法的使用;索恩(Thorn, 1979)叙述了一种用最少的集成电路硬件构成的数字式互相关器。爱·切拉比(Al·chalabi, 1980)、赛义德(Said, 1982)和阿苏威伦(Alsuwailem, 1986)等人叙述了一种计算效率高的互相关算法。它是在亨利(Henry, 1979)发展的技术基础上实现的。菲尔(Fell, 1982)叙述了一种减少互相关流量测量中计算工作量的“跳跃”算法。塔拉玛斯(Talamas, 1978)则考虑了互相关流量计在流量控制回路中应用的有关特殊问题。

在七十年代初期,人们对于精巧的微电子装置在互相关器中应用的潜力进行了研究。乔

登和贝克 (Jordan and Beck, 1972) 在一篇短文中对这种技术进行了简要的说明。乔登在爱丁堡大学电机工程系进一步发展了这一技术, 并在1979年研制成功一种互相关用的微电子电路。随后, 乔登的成果又被门罗克 (Manook, 1981) 进一步发展了。门罗克在他的博士论文中叙述了将互相关集成电路芯片组合成为一台完整仪表的具体安排。最近, 齐阿里·沙伯斯塔里 (Kiani-Shabestari, 1983) 在他的博士论文中叙述了一种可靠的峰值搜索式相关器。

卡尔斯鲁尔大学也对互相关流量测量方法, 特别是对基本的流体力学方面和互相关器的设计方面进行了深入的研究。这些研究成果都发表在道彻尔和麦熙 (Dancher and Mesch, 1970)、麦熙等人 (Mesch et al, 1974) 以及布劳恩 (Braun, 1984) 的著作中。

虽然, 关于互相关流量计的研究的高峰期是发生在七十年代和八十年代。然而, 其流体力学方面的理论基础却是在五、六十年代期间由泰勒 (Taylor, 1953, 1954)、辛茨 (Hinze, 1975) 和索 (Soo, 1967) 等人建立的。泰勒 (1953) 考虑了层流和湍流的问题, 并以简单而又精巧的实验奠定了这些系统的误差分析的基础。贝特利和唐逊 (Bentley and Dawson, 1966) 将这些方法应用于热交换管束中的流动测量。他们指出, 如果管束中流体的流动是稳定的, 且可以采用较长的数据平均时间, 那么, 基于窄带滤波后信息的相位滞后的测量, 流体内部自然发生的随机温度波动的传递时间可以给出精确的流量测量结果。

辛茨 (Hinze, 1959) 运用频谱解释了单相流体流动的动力学特性。柯米亚 (Komiya, 1966) 将互相关方法应用于流动蒸汽中的湍流研究。他用热风速计测量快速的速度波动。索 (Soo, 1967) 采用照相方法测量湍流过程。照相方法使用起来是不方便的, 而热线风速计又太脆弱。然而, 在七十年代后期, 激光风速计的出现使得基本的流体力学研究得到迅速地发展。迄今, 已经发表了许多关于使用激光风速计实现湍流和流体动力学测量的论文。

互相关技术在工业中的早期应用, 许多都是出现在核工业部门。这是由于测量核反应器管道中的流动是非常必要的缘故。因为, 如果管道中出现“断流”就会导致过热, 随之就会发生危险。特尔迈特 (Termoat, 1970) 叙述了互相关法在核反应器中的主要应用区域。而在此之前, 阿西通和贝特利 (Ashton and Bentley, 1968) 提出了计算互相关的简化算法。该算法只需用最小的计算机容量和计算时间。在此以后的许多年中, 核工业部门一直在研究互相关流量计的各种应用。匈牙利布达佩斯物理研究所的哈吉泰等人 (Hargitai et al) 在1983年发表的论文中, 叙述了利用氮同位素的传递时间分析, 实现冷却水流量测量的方法。在能源领域中的有关计划是中央电力局 (CEGB, 1965) 和联合王国原子能管理局 (UKAEA, 1964) 的专利。CEGB (1965) 利用空间两点处的检测器测量等离子体的速度, 而 UKAEA (1964) 则利用温度波动的互相关实现反应器冷却水流的测量。在八十年代早期, 互相关流量计在非核工业中的应用就走向商品化发展阶段了。毫无疑问, 在学术论文和博士论文中发表的有关相关技术的大量信息还可追溯到更早的年代。不过, 导致适用的互相关器成功地走向商品化的启迪性研究工作是以下几位研究工作者完成的: 维特曼 (Veltman, 1966) 设计了一个只需最少电子器件的极性相关器; 马森等人 (Massen et al, 1984) 研制了一种通用型微机控制的互相关器, 该相关器采用“菜单”编排以易于实现参数设定, 凯奇 (Keech, 1982) 研制了一种与超声传感器配合使用的互相关器; 里宾格和施开莱德 (Rippinger and Schneider, 1985) 设计了一种以微型计算机为基础的互相关器, 它可以自行设定参数, 以自动适应测量情况变化的需要。

1.3 互相关流量测量仪表的商品化发展

和互相关流量计的研究工作比较起来,互相关流量计的生产、销售的发展,一直是比较缓慢的。只是到了八十年代中期,才呈现出了增长的势头。这主要是因为,在七十年代后期便宜的数字式微电子系统可以得到以前,互相关器的价格是非常昂贵的。另外,也是由于对互相关流量计的需求,一直是和“困难”流体的测量问题联系在一起的。对于“清洁”流体的流量测量来说,已经有了很多好的流量计可以使用。而测量“困难”流体的需求是在七十年代后期才增加起来的。这是由于,为了环境控制,需要测量固体污染物质。另外,也预见到正在发展中的生物技术工业,以及在其他一些冶炼厂中,会产生对“困难”流体进行测量的需要。也许,对互相关流量计商品化的最大推动力是,在七十年代,人们对能源储备和生产过程效率需求的共同认识,使人们增加了对过程参数的测量,特别是对流量参数测量的注意。

互相关流量计的发展和销售有着一部多少使人迷惑的历史。在本章中早已提到过,作为百拉福德大学研究工作的一个结果,英国工业小组(British Technology Group)在六十年代后期就拿到了互相关流量计的专利。泰勒仪表公司得到了这些专利生产的许可证。泰勒公司的计划是在人们充分认识到测量困难流体流量的需要以前就开始了。所以,他们合力设计的是测量清洁流体流量用的互相关流量计。这种流量计的设计是成功的。但同时发展起来的其它一些测量清洁流体的流量计(电磁流量计,漩涡流量计,等等),都具有较低的价格。这就意味着,从价格效益上来说,互相关流量计不可能是上述流量计的替代品。然而,在七十年代中,互相关流量计开始了许多其它的商品化发展。随着人们认识到传统的流量计在测量困难流体时不能正常地工作,困难流体的流量测量就是互相关流量计最值得予以商品化的领域。

欧洲控制公司(Eur-Contrelo)制造了一种使用光学传感器(见第3章§3.3.3.5)测量纸浆用的互相关流量计。它是基于瑞典微波研究所的研究成果制造出来的。梯尔格特仪表公司(Tealgate Instruments)制成了互相关流量计用的电容式和电动力学式两种流动噪声传感器(§3.5)。在七十年代后期和八十年代初期,这些传感器已经售出了几百台,用于测量从喷射打磨机械的喷嘴中喷出的固体颗粒浓度。在八十年代中期,梯尔格特公司又售出了一种用于测量固体流动速度的互相关器。由于固体浓度可以用电容传感器进行测量,固体的流动速度可以用互相关器进行测量,因而梯尔格特公司就能够测量出两相流体中的组份的质量流率。由于喷射打磨设备的制造商们参与的一项合作发展计划(Green et al, 1986, Taybor, 1986),导致八十年代中期出售的喷射打磨机器上都配备了喷射流体中颗粒浓度和速度的监测系统。在喷射打磨机器中,这些颗粒是用来在工件表面上实现打磨操作的。比较特殊的是,瓦库—布拉斯特有限公司(Vacu-Blast Limited)研制了一种与干式喷射打磨机器配套使用的监测系统,而磨料发展有限公司(Abrasive Developments Limited)则制造了一种与湿式喷射打磨机器配套的系统。值得注意的是,商品化的喷射打磨机器用的监测系统之所以得以成功地实现,是因为高磨蚀性材料不可能用任何其它的仪表进行测量。而喷射打磨机器比较大的销售量就意味着,研究和开发这些设备所需的专用仪表,就可以在一个合适的成本/效益比的基础上进行。加拿大通用电力公司(Canadian General Electric)对超声波互相关流量计的应用作出了主要的贡献(Flemons et al, 1979,

§ 3.3.2.1)。他们研制成功了一种测量核电厂中重水流率的超声互相关流量计。在 § 6.7.2 中介绍了加拿大电力公司的互相关流量计的某些实验结果。

上面提到的这些项目，常常是由一些较小的仪器制造商和使用者完成的。然而，一些大的公司也着手进行了一些导致互相关流量计商品化的研究发展计划。恩斯豪斯公司 (Endress & Hauser) 开发了一种通用型流量测量用互相关器 (Massen et al, 1982)，和一种价格较低的“从动式”互相关器。后者是采用一个可编程的只读存储器构成一个系统，其参数是事先在通用型互相关器上设定调整好了的。在八十年代中期，³布朗-勃维利-肯特公司 (Brown Boveri, Kent) 从事一种超声互相关流量计的商品化工作 (Keech, § 3.3.2.1)。疏浚机中砂/水混合物流量的测量和石油/天然气混合物流量的测量，是这种互相关流量计早期应用的例子 (Couthard et al, 1983)。TRW 公司于 1980 年前后在市场上出售了一种单芯片式的互相关器 (TDC 1023)。为使该相关器应用于流量测量系统，还需要相当数量的外围电路。目前，在这个方面还没有显示出有什么发展，这可能是因为潜在的使用者需要的是一个包括传感器在内的完整的系统的缘故。

读者将会觉察到，在本书编写期间，互相关流量测量的商品化还是处于它的幼年时代。然而随着微电子器件价格的降低，环境工程应用中困难流体流量测量需求的增长，处理固体物料系统的节能计划的增加，以及勘察大陆缘中含有天然气和水的石油资源需要的增加，再加上新产生的生物技术工业的增长，对困难流体流量进行测量的需求将会增加。因此，我们需要加深对于互相关流量计的原理、设计以及其应用潜力的理解。本书的以下各章内容将会满足这方面的需要。

第二章 互相关流量计设计用的解析模型和物理模型

2.1 互相关流量计采用的随机数据分析的基本原理

由于互相关流量计涉及到随机信号的传递时间分析, 彻底了解该流量计的设计方法, 就需要具有随机数据分析的基本原理方面的知识。在这一章中, 我们将说明随机数据分析的基本内容, 叙述所使用的基本术语, 并给出若干数学结果及关系式, 但并不研究它们的来源。关于随机数据分析的更为完整的论述, 建议读者参阅一本有关该课题的优秀教科书 (Bendat and Piersol, 1966, 1980)。这本书对我们作者也曾有过指导作用。在叙述本章内容时, 我们假定读者熟悉各种统计术语的使用。不过, 在本书的结尾部分给出的统计术语汇编, 对读者使用这些术语可能还是会有所帮助的。

2.1.1 随机数据的参数及表示方法

表征一个随机物理现象的数据, 是不可能用数学公式来描述的。因为, 对随机物理现象每一次观测结果都将是唯一的。也就是说, 给出任何一个观测结果 (见图2.1的例子) 都只能是可能发生的若干个结果中一个。

表征一个随机现象的单个时间历程, 被称作该随机过程的一个样本函数。或者, 当观察时间间隔是有限的時候, 被称之为一个样本记录。一个随机现象可能产生的全部样本函数的集合, 被称之为随机过程或统计过程。

与流动有关的过程, 例如, 大气湍流 (它导致水蒸汽滴生长成为随机形状的云层) 和管流中同样的湍流现象, 都是随机过程的例子。

稳定的随机过程是随机过程的一种特殊形式。对一个随机过程来说, 如果在一个时间间隔内所观察到的统计特性, 会在任何其它的时间间隔内出现, 则称该随机过程是稳定的。因此, 从统计概念上来说, 一个稳定的随机过程是和时间无关的。对于流动系统, 人们可以认为, 恒定体积流率下的统计特性将相应于一个稳定随机过程所具有的那些特征。反之, 如果体积流率随时间而变化, 则该系统在一个时间间隔内的统计特性将不同于另一个时间间隔内的统计特性。因而, 该流动过程是不稳定的。

上面所提到的, 在流量测量中产生的时间概念上的稳定和不稳定的随机过程, 在空间概念上也同样存在。例如, 考虑沿管道轴线彼此相隔开的三个传感器 T_1 、 T_2 和 T_3 处的随机湍流现象 (见图2.2), 如果流动是充分发展的, 则在这三个点上湍流的统计特性将是相同的。

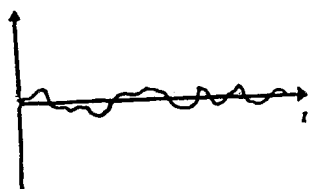


图2.1 随机数据 $x(t)$ 的时间历程

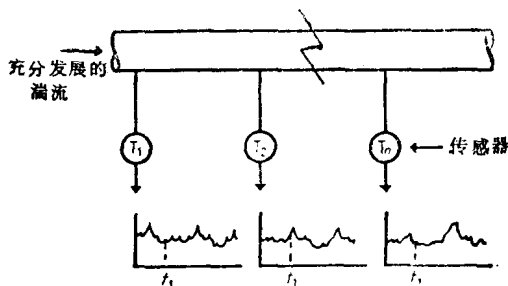


图 2.2 各态经历随机过程例题