

信息化与工业化 两化融合

研究与应用丛书

流量传感器信号建模、 处理及实现

徐科军 著

 科学出版社

信息化与工业化两化融合研究与应用丛书

流量传感器信号建模、 处理及实现

徐科军 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

流量是过程检测中最为复杂的被测量之一。流量传感器的种类很多,应用相当广泛。本书以作者的科研工作为基础,以涡街流量传感器、科氏质量流量传感器和电磁流量传感器这三种流量传感器为研究对象,围绕信号建模、信号处理和系统实现这三项关键技术,介绍最新进展和应用成果。本书建立这些流量传感器的信号模型,描述其输入与输出关系,解释其本质特征;采用先进的数字技术处理流量传感器的输出信号,增强信息提取能力,提高性能指标,扩展其应用范围;用 DSP 和 MCU 研制实时处理系统,应用于工业现场的实际测量,取得很好效果。

本书可供从事自动化、仪器仪表、计算机应用、石油、化工、冶金、造纸等行业的工程技术人员,以及高等学校相关专业的教师、高年级本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

流量传感器信号建模、处理及实现/徐科军著. —北京:科学出版社,2011
(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-031470-3

I. 流… II. 徐… III. 流量计量-传感器 IV. ①TB937 ②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 109246 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:林青梅

责任印制:赵 博/封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张:20

印数:1—3 000

字数:386 000

定价:70.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》编委会

顾问委员会 戴汝为 孙优贤 李衍达 吴启迪 郑南宁 王天然
吴宏鑫 席裕庚 郭 雷 周 康 王常力 王飞跃

编委会主任 吴 澄 孙优贤

编委会副主任 柴天佑 吴宏鑫 席裕庚 褚 健 王飞跃 王成红

编委会秘书 张纪峰 卢建刚 姚庆爽

编委会委员（按姓氏笔画排序）

于海斌（中国科学院沈阳自动化研究所）	陈 杰（北京理工大学）
王 龙（北京大学）	陈 虹（吉林大学）
王化祥（天津大学）	范 铠（上海工业自动化仪表研究院）
王红卫（华中科技大学）	周东华（清华大学）
王耀南（湖南大学）	荣 冈（浙江大学）
卢建刚（浙江大学）	段广仁（哈尔滨工业大学）
朱群雄（北京化工大学）	俞 立（浙江工业大学）
乔 非（同济大学）	胥布工（华南理工大学）
刘 飞（江南大学）	姚庆爽（科学出版社）
刘德荣（中国科学院自动化研究所）	桂卫华（中南大学）
关新平（上海交通大学）	贾 磊（山东大学）
许晓鸣（上海理工大学）	贾英民（北京航空航天大学）
孙长银（东南大学）	钱 锋（华东理工大学）
孙彦广（冶金自动化研究设计院）	徐 昕（国防科学技术大学）
李少远（上海交通大学）	唐 涛（北京交通大学）
吴 敏（中南大学）	曹建福（西安交通大学）
邹 云（南京理工大学）	彭 瑜（上海工业自动化仪表研究院）
张化光（东北大学）	薛安克（杭州电子科技大学）
张纪峰（中科院数学与系统科学研究院）	

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

传统的工业化道路，在发展生产的同时付出了过量消耗资源的代价：产业革命 200 多年以来，占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化，在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的，而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程，从中国共产党的“十五大”提出“改造和提高传统产业，发展新兴产业和高技术产业，推进国民经济信息化”，到党的“十六大”提出“以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，再到党的“十七大”明确提出，坚持走中国特色新型工业化道路，大力推进信息化与工业化融合。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识不断深化。

工业信息化是“两化融合”主要内容，它的主要内容包括生产设备、过程、装置、企业的信息化，产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化，其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系，大幅度降低资源消耗；在保持经济高速增长和社会发展过程中，有效地解决发展与生态环境之间的矛盾，积极发展循环经济，这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求，特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里，实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路，也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此，中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》，旨在展示两化融合领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向；既注意横向的共性技术的应用研究，又注意纵向的行业技术的应用研究；既重视“两

化融合”的软件技术，也关注相关的硬件技术；特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后，衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A stylized handwritten signature in black ink, likely belonging to Sun Yizhang, the President of the Chinese Society of Automation.

中国自动化学会理事长

2010年11月

前 言

迄今为止,国内外出版过多本流量传感器和仪表方面的技术书,大多介绍各种流量传感器和仪表的工作原理、结构组成、调理电路、实验标定和应用注意事项。据作者所知,没有关于流量传感器信号建模、信号处理及系统实现和应用方面的书出版。作者从 20 世纪 90 年代初开始,带领课题组和研究生将新颖先进的信号建模和信号处理方法应用于多种流量仪表的研究,并采用 DSP 和 MCU 研制出工业界愿意采用的系统,极大地提高了现有流量仪表的性能,解决了一些工业界长期没有解决、又急切盼望解决的技术难题,取得较好的社会效益和经济效益。本书就是基于作者近二十年的科研工作积累,介绍信号建模和数字信号处理技术在流量传感器方面的成功应用实例。

本书共分 7 章。第 1 章介绍用概率分析方法描述涡街流量传感器幅值规律,用调频信号表征涡街流量传感器的数学模型,揭示涡街流量信号和振动噪声的不同频率特征。同时,本章还介绍了应用于涡街流量传感器输出信号处理的各种数字方法,如 FFT、自适应陷波滤波、小波变换等,并重点介绍了抗强振动干扰的数字信号处理方法。

第 2 章首先介绍基于 DSP 的数字式涡街流量计,其次介绍基于低功耗单片机的两线制数字式涡街流量计和电池供电的数字式涡街流量计。

第 3 章分别介绍科氏质量流量传感器的时不变和时变信号模型;介绍科氏质量流量传感器的各种数字信号处理方法,如基于 DFT 的方法、基于正交解调的方法、基于自适应陷波滤波与 SGA 的方法和基于自适应格型陷波滤波与负频率修正的 DTFT 方法;介绍针对微弯型科氏质量流量传感器输出信号的数字式过零检测方法;介绍针对复杂流量的信号处理方法。

第 4 章介绍科氏质量流量管时不变模型和时变模型的建立;介绍科氏质量流量计模拟驱动、半数字驱动和全数字驱动方法。

第 5 章介绍基于 DSP 的科氏质量流量变送器的硬件和软件研制,实时实现自适应格型陷波滤波与负频率修正的 DTFT 相结合的算法以及自适应格型陷波滤波与负频率修正的 SDTFT 相结合的算法;介绍算法从仿真到移植到 DSP 的流程,以及在实现过程中的软硬件关键技术;介绍信号处理系统的测试结果,整个流量计的水流量标定实验结果等。

第 6 章介绍在正弦励磁下,建立电磁流量传感器输出信号的模型,提出两步拟合方法,根据实验数据,建立信号模型,定量描述传感器输出电压与激励信号

和流量之间的关系；介绍基于正交解调的信号处理方法，利用信号模型的相位信息去调整解调信号的相位，最大限度地减小零点输出。

第7章介绍基于线性电源和基于高低压电源切换的两种方波励磁控制方案；采用方波对电磁流量计励磁，进行水流量和浆液流量的实验；针对水流量和浆液流量测量，建立电磁流量传感器输出信号的模型；分别提出基于梳状带通滤波和基于统计分析的信号重构的信号处理方法，并研制以 DSP 芯片 TMS320F2812 为核心的信号处理和控制系统，进行水流量和浆液流量测量的实验。

在近二十年的研究中，作者先后得到原机械工业部机械工业技术发展基金“基于 DSP 的振动原理流量计输出信号数字处理方法研究”，97JA2004，1998～2000 年；教育部首批高等学校骨干教师资助计划“基于小波变换的涡街流量计信号处理方法及系统的研究”，教技司 [2000] 65 号，2000～2002 年；合肥市重点科研项目“基于 DSP 的新型智能涡街流量计研制”，2004-1012，2004～2005 年；国家留学基金，2004834022，2005～2006 年；863 项目“基于多传感器数据融合的凝析天然气流量测量”，2007AA04Z180，2007～2009 年；863 重点项目“过程控制流量传感器及系统”，2008AA042207，2008～2010 年；863 项目“面向批料流/两相流测量的全数字式科氏质量流量变送器研制”，2009AA04Z128，2009～2011 年；国家自然科学基金“基于频率特征的涡街流量传感器抗强振动干扰方法研究与实现”，60474057，2011～2013 年，以及多个企业委托项目的资助，在此一并表示感谢。作者指导的多名研究生参与本书的研究工作，作出了重要贡献，所以，在每章的最后向他们表示感谢。国内一些大型和著名的流量仪表企业给我们提供了实验条件，在此表示感谢。

作 者

2011 年于合肥工业大学电气与自动化工程学院

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

前言

第 1 章 涡街流量传感器信号建模和信号处理方法	1
1.1 涡街流量计简介	1
1.2 涡街流量传感器信号建模	3
1.2.1 涡街流量信号模型	3
1.2.2 机械振动噪声信号模型	7
1.2.3 小结	10
1.3 涡街流量传感器信号处理方法	10
1.3.1 国内外研究现状	10
1.3.2 功率谱分析方法	12
1.3.3 自适应陷波滤波方法	16
1.3.4 小波变换方法	19
1.4 抗强振动干扰方法	29
1.4.1 基于单传感器的抗强干扰方法	29
1.4.2 基于双传感器的抗强干扰方法	36
参考文献	43
第 2 章 涡街流量传感器信号处理系统	46
2.1 基于 DSP 的数字信号处理系统	46
2.1.1 一体式系统	46
2.1.2 分体式系统	57
2.1.3 关键问题处理	61
2.1.4 实验结果	67
2.2 基于 MCU 的低功耗信号处理系统	69
2.2.1 频谱分析与带通滤波器相结合的系统	70
2.2.2 全 FFT 的信号处理系统	78
2.2.3 电池供电的信号处理系统	91
参考文献	101
第 3 章 科氏质量流量传感器信号建模与信号处理	103
3.1 科氏质量流量计简介	103

3.1.1	工作原理	103
3.1.2	组成	105
3.2	科氏质量流量传感器输出信号模型	107
3.2.1	输出信号特点	107
3.2.2	输出信号建模	109
3.3	科氏质量流量传感器信号处理方法	111
3.3.1	基于 DFT 的方法	111
3.3.2	基于正交解调的方法	114
3.3.3	基于数字锁相环的方法	120
3.3.4	基于自适应陷波滤波与 SGA 相结合的方法	126
3.3.5	基于自适应陷波滤波与负频率修正的 DTFT 相结合的方法	132
3.3.6	基于数字式过零检测方法	135
3.3.7	面向复杂流量的处理方法	139
	参考文献	148
第 4 章	科氏质量流量管建模与驱动方法	151
4.1	科氏质量流量管模型	151
4.1.1	时不变数学模型	151
4.1.2	时变数学模型	152
4.2	驱动方法	156
4.2.1	驱动系统原理	157
4.2.2	驱动信号	158
4.2.3	模拟驱动	160
4.2.4	半数字驱动方法	162
4.2.5	全数字驱动方法	165
	参考文献	172
第 5 章	科氏质量流量变送器	174
5.1	变送器方案	174
5.1.1	硬件功能框图	174
5.1.2	工作过程	175
5.2	变送器硬件	176
5.2.1	信号调理与采集	176
5.2.2	温度补偿	177
5.2.3	DSP 芯片	178
5.2.4	电源管理模块	180
5.2.5	模拟输出和脉冲输出模块	180

5.3 变送器软件	182
5.3.1 系统功能与 DSP 资源分配	182
5.3.2 软件总体框图	183
5.3.3 主监控程序	183
5.3.4 初始化模块	185
5.3.5 中断模块	185
5.3.6 信号采集模块	187
5.3.7 算法模块	190
5.3.8 输出模块	198
5.3.9 人机接口	202
5.3.10 看门狗模块	207
5.3.11 保证算法精度措施	208
5.4 实验测试	211
5.4.1 电信号测试	212
5.4.2 实验标定	218
参考文献	224
第 6 章 正弦励磁下电磁流量传感器信号建模和信号处理	226
6.1 电磁流量计工作原理与传感器信号模型	226
6.2 两步参数辨识方法	229
6.3 实验建模及模型验证	230
6.3.1 实验	230
6.3.2 模型辨识	231
6.3.3 模型验证	232
6.3.4 小结	235
6.4 正交解调信号处理方法	236
6.4.1 信号处理方法基本原理	237
6.4.2 实验结果	238
参考文献	240
第 7 章 方波励磁下电磁流量传感器信号建模和信号处理	241
7.1 方波励磁系统	241
7.1.1 励磁控制方案与原理	242
7.1.2 基于线性电源的励磁恒流控制系统	244
7.1.3 基于高低压电源切换的双环恒流励磁控制系统	249
7.2 电磁流量传感器信号建模	254
7.2.1 定性分析	254

7.2.2	信号构造	261
7.2.3	实验研究	262
7.2.4	统计建模	264
7.3	电磁流量传感器信号处理	275
7.3.1	梳状带通滤波方法	275
7.3.2	浆液处理算法	278
7.4	基于 DSP 的数字信号处理系统	282
7.4.1	系统设计方案	282
7.4.2	系统硬件研制	283
7.4.3	系统软件设计	287
7.4.4	上位机监控软件设计	290
7.5	实验研究	295
7.5.1	流速模拟器标定实验	296
7.5.2	水流量标定实验	298
7.5.3	浆液流量测量实验	301
7.5.4	小结	305
参考文献		305

第 1 章 涡街流量传感器信号建模和信号处理方法

为了从含有噪声的信号中提取有用的流量信息，本章采用概率分析方法描述涡街流量传感器输出信号幅值变化的规律，用调频信号表征涡街流量传感器输出信号的数学模型，揭示涡街流量信号和管道振动噪声的不同频率特征。将多种数字信号处理方法应用于涡街流量传感器输出信号，如 FFT、自适应陷波滤波和小波变换等。根据流量信号与振动噪声不同的特征，提出抗强振动干扰的数字信号处理方法。

1.1 涡街流量计简介

涡街流量计 (vortex flowmeter) 是基于卡门“涡街”原理工作的流量计。在流体管道中插入一定形状的漩涡发生体，当流体绕过发生体后，在发生体两侧会交替产生规则的漩涡，如图 1-1-1 所示，当满足一定条件时，产生的漩涡是稳定的。在一定的雷诺数范围内，稳定的卡门涡街的漩涡脱落频率与流速成正比。卡门在理论上已经证明：若涡街两列之间的距离为 h ，同列两个漩涡之间的距离为 l ，当两者之间关系满足

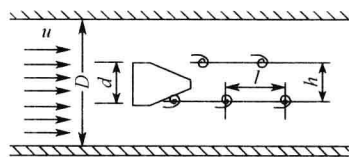


图 1-1-1 漩涡形成示意图

$$h/l = 0.281 \quad (1-1-1)$$

时，所产生的涡街是稳定的。

假定在漩涡发生体上游的来源是无旋、稳定的流动，当流体以流速 u 流动时，涡街将以一个稳定的速度 u_r 向上游运动，则相对于漩涡发生体，涡街的实际向下游运动速度为 $u - u_r$ 。如果单列漩涡的产生频率为每秒 f 个漩涡，那么，流速与频率的关系为

$$u - u_r = fl \quad (1-1-2)$$

通过实验来确定来流速度 u 与涡街上行速度 u_r 之间的关系，确定漩涡发生体直径 d 与涡街宽度 h 之间的关系，有

$$h = 1.3d \quad (1-1-3)$$

$$u_r = 0.14u \quad (1-1-4)$$

将式 (1-1-1) ~ 式 (1-1-4) 联立，可得

$$f = \frac{u - u_r}{l} = \frac{u(1 - 0.14)}{h/0.281} = \frac{0.86 \times 0.281u}{1.3d} \approx 0.2 \frac{u}{d} \quad (1-1-5)$$

也可将式 (1-1-5) 写成

$$Sr = \frac{fd}{u} \approx 0.2$$

式中, Sr 为斯特劳哈尔数。由实验可知, 在雷诺数 Re 为 $3 \times 10^2 \sim 2 \times 10^5$ 的范围内, 流体速度 u 与漩涡脱落频率的关系是确定的。对于圆柱形漩涡发生体, 斯特劳哈尔数 Sr 为常数, 大约为 0.2。因此, 在流体流动情况满足一定条件时, 测得漩涡脱落频率, 就可以得到流体的速度, 从而得到流体的体积流量。

当涡街在漩涡发生体下游形成之后, 它一方面以 $u - u_r$ 的速度平行于轴线运动, 另一方面还在与轴线垂直的方向上振动, 这说明流体在产生漩涡的同时还受到一个垂直方向上的力的作用。假定来流是无旋的, 根据汤姆生定理, 漩涡发生体右 (或左) 下方产生一个漩涡以后, 必须在其他地方产生一个相反的环量, 以使合环量为零。根据茹科夫斯基的升力定理, 由于这个环量的存在, 会在漩涡发生体上产生一个升力, 该升力垂直于来流方向。假设作用在漩涡发生体每单位长度上的升力为 L , 有

$$L = K_0 \rho d u^2 \quad (1-1-6)$$

式中, K_0 为系数; ρ 为流体密度。由于漩涡在漩涡发生体两侧交替发生, 且旋转方向相反, 故作用在发生体上的力也是交替变化的。而流体则受到发生体的反作用力, 产生垂直于轴线方向的振动。从上述分析可以知道, 交替地作用在漩涡发生体上的升力的频率就是漩涡的脱落频率。通过检测该升力的变化频率, 就可以得到漩涡的脱落频率, 从而得到流体的流速值。

设圆柱体处的流通面积为 A , 管道内径为 D , 圆柱体直径为 d , 当 $d/D < 0.3$ 时, 流通面积 A 可表示为

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - 1.25 \frac{d}{D} \right) \quad (1-1-7)$$

实际中的测量是为了得到体积流量, 在得到涡街流体频率后, 要根据式 (1-1-8) 将频率转化为体积流量。

$$q_v = Au = \frac{\pi D^2}{4} \left(1 - 1.25 \frac{d}{D} \right) \frac{d}{Sr} f = Kf \quad (1-1-8)$$

式中, q_v 为体积流量; K 为仪表系数, 通过实验标定求得。

涡街流量计的特点是可以测量液体、气体和蒸汽流量, 测量介质的种类多; 输出为频率量, 便于处理。所以, 其较为广泛地应用于流程工业的流量测量。但是, 在应用中存在两个问题: 一是量程比受限, 不能测量小流量。在生产现场, 由于工艺方面的要求, 很多管道内的流量是比较小的, 即在现场不得不测量小流量。二是易受现场各种干扰的影响, 特别是管道振动干扰的影响, 导致测量误差

增大,有时甚至无法正常工作。由于干扰的影响,导致小流量信号被淹没。通常把干扰分为三类:一类是电磁干扰,这可以通过很好的屏蔽和适当的接地来消除;二是流场不稳定干扰,这可以通过在流量传感器的前面加长的直管段来部分消除;三是管道振动干扰(又称机械振动干扰),这来自于与管道相连的电机、阀门和泵等设备,这些设备工作时,将振动通过管道传递给传感器,对传感器的影响最大。为了能够从含有噪声的信号中提取真正的流量信息,国内外专家将各种数字信号处理方法应用于涡街流量传感器输出信号的处理。为了提供理论依据以评价信号处理方法的优劣,也为了寻找特征以区别流量信号和干扰信号,有必要建立较为准确的涡街流量传感器输出信号的数学模型。

1.2 涡街流量传感器信号建模

人们通常采用正弦波加随机噪声来简单描述涡街流量传感器的输出信号,这与实际情况有一定差距。涡街流量传感器输出信号主要由涡街流量信号、管道振动噪声和其他的一些随机噪声组成。由于采用数字信号处理方法计算传感器输出信号的频率,所以,随机噪声对测量结果的影响并不大,主要是管道振动会造成测量误差。文献[1]给出了涡街流量传感器输出信号幅值和频率的变化规律,但是,没有描述涡街传感器输出信号幅值的自然衰减现象,也没有给出流量信号与干扰噪声不同的频率特征。为此,本书依据涡街流量传感器的工作原理,建立由涡街流量信号和管道机械振动噪声组成的涡街流量传感器输出信号模型。采用调频信号的形式,描述涡街流量信号模型;再根据实验数据,采用概率密度分析方法,确定其幅值的随机变化规律。并采用频谱分析方法,确定流量信号与干扰噪声的频率特征。

1.2.1 涡街流量信号模型

1. 机理分析

理想情况下,流场是稳定的,涡街流量信号是规则的正弦波,其频率反映管道中流体的流速。但是,在实际中,由于管道内流动介质的紊流、脉动以及流场的不稳定对漩涡发生体施加了不规则的附加作用,使得涡街流量信号不再是规则的正弦波,其幅值和频率也不再恒定。

设涡街流量信号的瞬时幅值为 $A(t)$, 瞬时频率为 $f(t)$ 。由于实际中流场的不稳定,使得瞬时频率在理想频率的左右摆动,因此, $f(t)$ 可表示为 $f(t) = f_c + \frac{km(t)}{2\pi}$, 其中, f_c 为涡街信号的理想频率, $\frac{km(t)}{2\pi}$ (k 为常数) 为瞬时频率与

理想频率的差值。瞬时角频率 $\omega(t)$ 为 $\omega(t) = 2\pi f_c + 2\pi \frac{km(t)}{2\pi} = \omega_c + km(t)$ 。由于瞬时相位是瞬时角频率对时间的积分，而 ω_c 为常数，对时间的积分为 $\omega_c t$ ， $km(t)$ 是时间 t 的函数，对时间的积分为 $k \int_0^t m(\lambda) d\lambda$ ，因此瞬时相位 $\phi(t)$ 表示为 $\phi(t) = \omega_c t + k \int_0^t m(\lambda) d\lambda$ 。则涡街流量信号模型可表示为

$$V(t) = A(t) \cos(\phi(t)) = A(t) \cos(\omega_c t + k \int_0^t m(\lambda) d\lambda) \quad (1-2-1)$$

式中， $A(t)$ 为涡街信号的瞬时幅值； $\frac{km(t)}{2\pi}$ 为涡街信号的瞬时频率与理想频率的差值。本书将基于实验数据，通过概率分析得出 $A(t)$ 的表达式，再通过频谱分析，得出 $m(t)$ 的表达式。

2. 实验

针对国内三家公司的三个涡街流量传感器：A 公司 40mm 口径的、B 公司 50mm 口径的和 C 公司 40mm 口径的流量传感器，配以作者课题组自制的电荷放大器和基于 dsPIC 的数字信号处理系统。对每个流量传感器固定 4 个气体流量点，流量大小由数字信号处理系统输出的频率来表示；用 dSPACE 数据采集系统，从电荷放大器输出端采集涡街传感器的输出数据。采样频率均为 10000Hz，采样时间均为 60s，采样点数均为 600000 点。给出 A 公司的涡街流量传感器输出信号波形，如图 1-2-1 所示。为了表示清楚，只显示了 600000 点中的一部分。可见，当流量基本不变时，涡街流量传感器输出信号的频率、幅值均不是恒定的，尤其是幅值的变化较大，在有些时候，幅值会变得很小，这就是所谓的涡街信号自然衰减现象，它是涡街本身固有的一种现象。

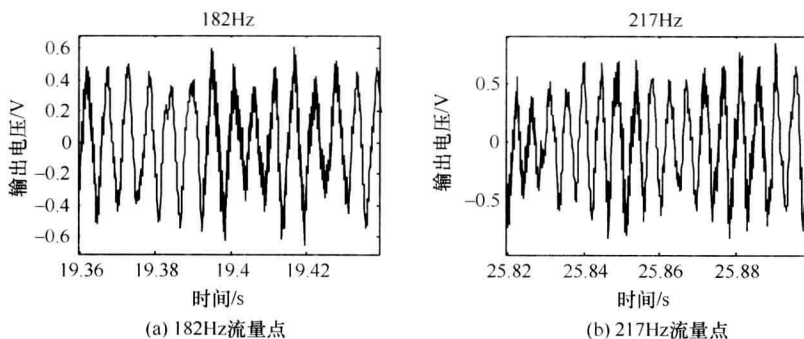


图 1-2-1 A 公司涡街流量传感器输出信号波形

3. 数据预处理

由于要建立的是涡街信号模型,即由流量产生的传感器的输出信号模型,而根据涡街流量计的工作原理,流量与涡街频率成正比。所以,首先要通过频谱分析,确定涡街信号的频率;然后,再根据这个频率,设计带通滤波器,将其他的干扰信号排除掉,为建立涡街信号模型做好准备。

1) 频谱分析

为了确定涡街信号的主要频率,首先要进行频谱分析。采用 Welch 方法,每段采样数据为 8192 点,取 32 段,50%重叠,功率谱密度为

$$P(k) = \frac{1}{K} \sum_{r=0}^{K-1} P_r(k) \quad (1-2-2)$$

其中,

$$P_r(k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \right|^2 \quad (1-2-3)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$; K 为分段数; N 为各段的点数; $x(n)$ 为离散信号; $P_r(k)$ 为各段的功率谱密度; $P(k)$ 为信号的平均功率谱密度。

2) 滤波

在分析幅值的概率密度函数之前,先对原信号进行滤波,以排除其他噪声的干扰,更准确地反映信号幅值的变化规律。采用过渡带较陡的 10 阶巴特沃斯带通滤波器进行滤波,其带宽为 50~300Hz。

4. 幅值概率密度分析

涡街信号幅值的变化具有很大的随机性,为此,对其进行概率密度的分析。对经过滤波后的涡街流量传感器输出信号求峰值,取其中的正峰值。设最大值为 $A_{\max}$, 最小值为 $A_{\min}$ 。将整个幅值范围 $[A_{\min}, A_{\max}]$ 分成 30 段的等宽度区间,求出各区间的数据个数,除以分组的宽度与采样点数之积,再画出其直方图。可见,涡街信号幅值分布的概率密度函数类似于正态分布。利用 Matlab 的 Cftool 工具箱,对正态分布函数进行参数拟合,再将其与实际结果进行比较,如图 1-2-2 所示。

可见,涡街流量信号的幅值分布不是单纯的正态分布。这是由于涡街信号本身存在固有的漩涡信号衰落现象,即某段短时间内信号幅度突然剧烈下降甚至停振的现象,这使比均值小的幅值出现的概率有所增加。通过分析,认为信号幅值 $A(t)$ 的概率密度函数 $f(x)$ 应为混合高斯模型:

$$f(x) = \alpha \frac{e^{-\frac{(x-\mu_1)^2}{2\sigma_1^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} + (1-\alpha) \frac{e^{-\frac{(x-\mu_2)^2}{2\sigma_2^2}}}{\sqrt{2\pi}\sigma_2}, \quad 0 < x < +\infty \quad (1-2-4)$$