

电磁式流量传感器 测量方法及理论

李雪菁 李恒宇 王 伟 花 钦◎著

非外售



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

电磁式流量传感器 测量方法及理论

李雪菁 李恒宇 王 伟 花 钦◎著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁式流量传感器测量方法及理论 / 李雪菁等著. —
杭州: 浙江大学出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-308-17424-4

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁流量计—电磁传感器—研究 IV. ①TH814

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 230907 号

电磁式流量传感器测量方法及理论

李雪菁 李恒宇 王 伟 花 钦 著

策划编辑 许佳颖
责任编辑 金佩雯 候鉴峰
封面设计 周 灵
出版发行 浙江大学出版社
(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)
(网址: <http://www.zjupress.com>)
排 版 杭州中大图文设计有限公司
印 刷 杭州杭新印务有限公司
开 本 710mm×1000mm 1/16
印 张 13
字 数 240 千
版 印 次 2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-308-17424-4
定 价 68.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行中心联系方式 (0571)88925591; <http://zjdxcbbs.tmall.com>

前 言

电磁流量计是一种利用电磁感应原理进行测量的仪表。它本身具有的测量精度高、量程比宽、管道压力损失小等特点,使它成为应用广泛的一类流量计,在流量仪表中的占比不断上升,在工农业生产中发挥着重要作用。传统电磁流量传感器内附有绝缘层,以防止短路。这种结构使电磁流量传感器的应用受到了一定的限制,比如绝缘层被腐蚀后影响传感器测量的精度;对于特殊流体如高温金属流体(NaK-78)的测量,也有局限性。近年来,随着工农业的飞速发展,对特殊性流体测量或者特殊场合下流量测量的需求不断增加。因此,特殊电磁流量传感器仪表研究成了学术界研究的热点之一。非绝缘管壁电磁流量传感器作为测量某些特殊流体的仪表,既具有典型绝缘管壁电磁流量传感器的优势,又解决了传感器结构上的不足。多年来,有关非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法的研究成果很少,基础理论体系尚未完善,限制了其在核工程及其他领域中的应用。基于上述背景,本书围绕非绝缘管壁电磁流量传感器基本理论中的两大核心问题,即权重函数及传感器测量特性展开研究。主要内容如下。

(1)总结非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法研究的相关理论。一方面,介绍了典型点电极绝缘管壁电磁流量传感器的基本测量方程、边界条件、权重函数理论及经典流场理论;另一方面,介绍了有关非绝缘管壁电磁流量传感器的一些研究成果,并对研究中存在的问题加以总结,为本书的研究打下基础。

(2)非绝缘管壁电磁流量传感器近似测量方程的研究。将非绝缘管壁电磁流量传感器的结构、物性与典型电磁流量传感器进行对比讨论。重点讨论了通过对典型绝缘管壁电磁流量传感器输出感应电动势进行折算,得到非绝缘管壁电磁流量传感器输出信号的一些问题。同时,提出非绝缘管壁电磁流量传感器的等效电路模型,即将管壁、流体简化为电阻来描述其与传感器输出信号的关系。这些工作为非绝缘管壁电磁流量传感器的近似分析提供了一个基本模型。

(3)对非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数的研究。从感应电动势的空间关系角度对比研究非绝缘管壁电磁流量传感器与典型绝缘管壁电磁流量传感器的边界条件。重点指出非绝缘管壁电磁流量传感器的求解域、边界条件的增加及边界条件的复杂性,因为它们给解析求解拉普拉斯方程带来了极大困难。在场论背景下采用“虚电流密度法”,获取管壁、流体的电特性与非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数分布的关系。进而基于虚电流密度在传感器内的分布特点,提出一种“贡献权/损耗权”的概念,从感应电动势的空间关系角度描述了非绝缘测量管壁对传感器输出电压的影响。结合上述研究成果,从数值仿真方面定量分析了管壁、流体的电特性对权重函数不均匀度的影响。为今后传感器的设计及实际工程应用提供了一种分析参考依据,在分析方法上最大限度地讨论了电磁流量传感器对流速分布不敏感的特点。这些工作为后续对传感器的分析方法研究做了铺垫。

(4)基于有关非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数的分析结论,对该传感器的测量特性展开深入研究。从多物理场角度,选取非绝缘管壁电磁流量传感器模型,分析计算了测量管壁、流体的电特性对传感器输出信号及输出信号折算率的影响,并得到若干重要结论。同时,针对传感器制造过程中存在的信号引出点不对称及引出方式进行分析。得到了信号引出点不对称程度及引出凸台面积与传感器输出信号的关系。这些研究工作为后续传感器的分析设计与实验验证打下了基础。

(5)非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法的验证性实验与相关特性分析。基于实验室验证平台系统,设计了非绝缘管壁电磁流量传感器,并讨论了验证性实验装置及其工作流程概要。通过对比利用理论模型与验证性实验所获得的数据,验证了本书所提出分析方法的基本正确性。为今后将非绝缘管壁电磁流量传感器投入实际应用与相关基础研究提供了参考依据。

本书在出版过程中,得到了2015年上海市教育委员会专项经费项目——应用型试点专业人才培养方案建设(编号:Z 30001.15.015)、2016年上海市教育委员会民办高校(重点)科研项目——“数据工程”应用技术型人才培养模式研究(编号:2016-SHNGE-01ZD)的资助。同时,本课题在研究过程中得到了国家自然科学基金重点项目(编号:61233010)及国家杰出青年科学基金(编号:61525305)的大力支持。在此书的编写和出版过程中,很多专家们给予了支持及宝贵意见,在此向他们致以深深的谢意。

李雪菁

主要符号对照表

符 号	名 称	符 号	名 称
A	管道横截面积	$G(\cdot)$	格林函数(势函数)
A_g	磁钢端面积	G_w, G_f	管壁区域、流体区域的虚电 流势
B	磁感应强度	H	磁场强度
B_x, B_y, B_z	B 的 x, y, z 方向分量	H_m	磁钢内部磁场强度
B_m	磁钢内部磁通密度	I, I_w, I_f	虚电流及管壁、流体内虚电流
C	物体的比热容	j	电流密度矢量
d	管道内直径	j_e	虚电流密度
D	管道外直径	j_w, j_f	管壁区域、流体区域的虚电 流密度
D	电位移矢量		
e, e'	非绝缘管壁电磁流量 传感器信号引出点	k	非绝缘管壁电磁流量传感 器输出电压折算率
E	感应电动势	k_{44}, k_{45}	近似测量方程方法计算的 传感器输出电压折算率
f	磁势损失系数	$k_{耦合}$	权重函数与流场耦合计算 的传感器输出电压折算率
F_x, F_y, F_z	微元体上受到的力		
g	重力加速度		
G	虚电流势		

续表

符 号	名 称	符 号	名 称
$k_{\text{核}}$	管壁修正系数(文献[44])	t	时间
$k_{\text{流}}$	管壁修正系数(文献[45])	T	保守场
k_T	流体的传热系数	u	速度矢量
K	传感器系数	$\bar{u}$	平均速度矢量
l_g	磁场工作间隙长度	u_x, u_y, u_z	速度矢量在 x, y, z 方向的分量
L	1/2 传感器有效长度	U	传感器输出信号
m	流体质量	U_v	虚电势
n	与雷诺数有关的湍流参数	$U_{\sigma'}$	非绝缘管壁电磁流量传感器输出信号
N	计算贡献权比重选取截面个数	$U_{\text{绝缘}}$	管壁绝缘时传感器输出电压信号
p	流体微元体上的压力	$U_{\sigma' \text{ 对称}}$	信号引出点对称时传感器输出信号
q_m	质量流量	$U_{\sigma' \text{ 非对称}}$	信号引出点位置不对称时传感器输出信号
q_V	体积流量	$U_{\sigma' \text{ 凸台设计}}$	凸台设计时传感器输出信号
q_v	平均流量	u_{max}	流体最大流速
Q	体积流量	$\bar{v}$	流体平均流速
r_e	凸台半径	V	流体体积
r	测量管内半径	V'	磁钢体积
R	测量管外半径	δ	管壁厚度
R_l, R_w	流体、管壁等效电阻	W	权重函数
Re	流体雷诺数	W_l	贡献权
S_0	电极面积	W_w	损耗权
S_x, S_y, S_z	动量守恒方程中的广义源项	x, y	直角坐标
S_T	转换的热能部分	α	信号引出点不对称引起的输出电压损耗率
S_1, S_2	金属电极表面积		
S	截面积		

续表

符 号	名 称	符 号	名 称
γ_i	任一截面贡献权比重	σ_w	管壁电导率
γ	贡献权比重		作用在流体微元体表面上
δ	狄拉克(Delta)函数	τ	的黏性应力
ε	权重函数不均匀度	$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz},$	作用在微元体表面上的黏 性应力
ε_e	介电常数	$\tau_{yy}, \tau_{yz}, \tau_{yz},$	
μ	流体动力黏性系数	$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{xz}$	
	凸台设计引起的传感	τ	空间积分域
λ	器输出信号损耗率	ν	流体运动粘度
μ_0	空气磁导率		雷诺平均数值模拟(RANS)
μ	流体磁导率	φ	方程中通用变量
ρ	液体密度	ϕ	信号引出位置不对称角度
σ	物质电导率	Φ	磁通量
σ_i	流体电导率	∇	哈密顿(Hamilton)算子

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 国内外研究现状	2
1.1.1 高温金属流体测量仪表研究现状	2
1.1.2 电磁流量传感器分析方法研究现状	5
1.2 现有非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法面临的难点 及存在的问题	6
1.2.1 现有分析方法在理论研究方面的困难	6
1.2.2 现有分析方法在实验验证方面的困难	7
1.3 研究的主要内容及创新点	8
第 2 章 电磁流量传感器分析方法研究相关理论基础	11
2.1 流量与流量测量	11
2.1.1 基本概念	12
2.1.2 测量方法及仪表	13
2.1.3 流量传感器发展趋势	17
2.2 典型绝缘管壁电磁流量传感器基本理论	19
2.2.1 基本测量原理	19
2.2.2 测量方程及边界条件	20
2.3 电磁流量传感器权重函数理论	23

2.3.1	权重函数的定义及求解	24
2.3.2	权重函数的分布特性及物理意义	26
2.4	非绝缘管壁电磁流量传感器现有理论	27
2.4.1	非绝缘测量管概念	27
2.4.2	非绝缘管壁电磁流量传感器现有分析方法	28
2.5	满管条件下管道中流体流速分布规律	30
2.6	数值分析方法的相关理论	34
2.6.1	有限元分析法	34
2.6.2	多物理场耦合分析软件	36
2.6.3	计算流体力学研究方法概述	36
2.6.4	多核并行计算原理	38
2.6.5	控制方程的常用求解方法	39
2.7	本章小结	41
第3章	非绝缘管壁电磁流量传感器近似测量方程分析	42
3.1	非绝缘管壁电磁流量传感器结构特点	42
3.2	对非绝缘管壁电磁流量传感器近似测量方程的讨论	44
3.2.1	已有文献的近似测量方程分析	44
3.2.2	等效电路模型构建	46
3.3	近似测量方程的局限性及权重函数分析的必要性	49
3.4	本章小结	50
第4章	电磁流量传感器权重函数研究	51
4.1	基于权重场与虚电流密度法的权重函数的计算方法	52
4.2	非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数研究	56
4.2.1	传感器边界条件	56
4.2.2	传感器内虚电流密度分布	57
4.3	非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数仿真分析及特性研究	62
4.3.1	仿真算例模型的构建	62
4.3.2	管壁厚度与权重函数关系的分析研究	63
4.3.3	管壁及流体电导率与权重函数关系的分析研究	66
4.4	非绝缘管壁电磁流量传感器权重函数不均匀度研究	69
4.5	本章小结	71

第 5 章 非绝缘管壁电磁流量传感器特性仿真研究	72
5.1 管壁厚度与传感器测量特性关系仿真研究	72
5.1.1 管壁厚度与传感器输出信号的关系	73
5.1.2 管壁厚度与传感器输出信号折算率的关系	75
5.1.3 多物理场耦合方法与近似测量方程方法的对比	80
5.2 管壁及流体电导率与传感器测量特性关系仿真研究	82
5.2.1 电导率与传感器输出信号的关系	82
5.2.2 电导率与传感器输出信号折算率的关系	84
5.2.3 多物理场耦合方法与近似测量方程方法的对比	89
5.3 非绝缘管壁电磁流量传感器制造中的一些问题	90
5.3.1 信号引出点位置对称性对输出信号的影响	90
5.3.2 信号引出点设计对输出信号的影响	93
5.4 本章小结	95
第 6 章 非绝缘管壁电磁流量传感器及验证实验设计	96
6.1 非绝缘管壁电磁流量传感器设计	97
6.2 液态金属测量验证实验设计	103
6.2.1 被测金属液体选择及励磁设计	103
6.2.2 验证实验过程设计	106
6.3 水循环系统下的验证实验及传感器设计	107
6.4 本章小结	111
第 7 章 非绝缘管壁电磁流量传感器验证实验及分析	112
7.1 液态金属测量验证实验装置及结果分析	113
7.1.1 转换器介绍	113
7.1.2 实验流程及结果分析	115
7.2 水循环系统下的验证实验装置及结果分析	117
7.2.1 验证实验装置介绍	117
7.2.2 实验结果及分析	137
7.3 本章小结	142
第 8 章 基于数据工程的传感器技术展望	143
8.1 工业过程大数据的研究现状	145

8.2	基于数据的方法分类	145
8.2.1	纯数据方法	145
8.2.2	数据与模型相结合的方法	147
8.3	基于数据的方法应用	148
8.4	过程控制与整定	149
8.5	非线性过程预测的研究现状	150
8.5.1	理论研究现状	150
8.5.2	应用模块分析	151
8.6	基于数据工程的电磁流量传感器技术的举例	153
8.6.1	节能减排中的应用	153
8.6.2	远程流量监测	155
8.6.3	层析成像中的应用	157
8.6.4	基于大数据的无线远传水情测报	163
8.6.5	基于数据挖掘技术的计算流体力学研究	164
8.6.6	电磁流量计结构优化中的研究	168
附 录	有限元仿真计算结果	177
参考文献		185
致 谢		193

第1章 绪 论

随着工农业生产的高速发展和人民生活水平的提高,人们对用水量和排水量的检测需求逐年增多。同时,一些困难流体或特殊流体的检测仪表也成为学术研究的热点问题之一。比如越来越多的国家和地区重视核能的发展,以期解决能源危机^[1-9]。核反应堆能安全运行的条件是对冷却剂的有效检测^[10-14]。有些冷却剂是高温金属流体,如高温的钠钾合金(NaK-78),其同时具有特殊物理及化学特性,譬如非透明性、高电导率、高温、钠与空气相遇发生剧烈化学反应等,测量困难^[15]。这类特殊冷却剂的应用场景对测量仪表提出了以下技术要求:耐高温、密封性好、抗辐照、耐腐蚀、体积小、结构简单、抗冲击性好等^[16-18]。传统点电极绝缘管壁电磁流量传感器的结构存在测量管耐高温性及固定电极与管壁密封性问题,不运用于以上场景。电磁式流量测量方式在测量导电性流体领域具有明显的优势,且具有无扰动、可耐腐蚀等特性,国际上普遍认为电磁流量传感器较其他类型仪表更适用于测量某些反应堆的冷却剂流量。非绝缘管壁电磁流量传感器在污水排放检测中也具有非常显著的优势,比如抗电极污染、抗噪、防止绝缘衬里污染而引起的测量误差等。非绝缘电磁流量传感器不但是一种新型电磁流量传感器,兼顾了典型电磁流量传感器的优势,同时还解决了典型电磁流量传感器结构上的不足。

电磁流量传感器的分析方法研究是开发该技术的重要理论基石,也是仪表产业化技术的基本依据。典型点电极绝缘管壁电磁流量传感器结构相对简单,边界固定,且基础理论已经非常成熟,传感器能提供较高精度的测量数据。因此,典型电磁流量传感器广泛应用于各类工业场合。非绝缘管壁电磁

流量传感器具有特殊的结构及物性特点,即管壁具有一定范围的电导率和信号拾取点位置在管壁外侧,模型与经典模型相比具有显著差异,因此,传统理论不完全适用。与典型电磁流量传感器相比,非绝缘管壁电磁流量传感器在理论研究上存在较大难度,所查到的文献成果也相当有限,难以适应当今非绝缘管壁电磁流量传感器测量的发展需求。因此,较完善的非绝缘管壁电磁流量传感器分析方法的研究,特别是关于其权重函数理论以及传感器测量管壁、流体的电特性对传感器测量特性影响的基础理论研究,既是该类型传感器技术发展所需要的重要理论基础,同时也将极大地带动我国相关仪表产业技术的发展。

1.1 国内外研究现状

1.1.1 高温金属流体测量仪表研究现状

为了保证对高温金属液体(如 NaK-78)的有效检测,近年来国内外的学者对此进行了积极探索。

现行的流速测量方法中的激光多普勒测速^[19]、粒子图像测速^[20]、纹影法测速^[21]、干涉法测速^[22]等是针对透明流体进行测量的,而钠钾合金冷却剂是非透明流体,且有特定条件(如辐照)的限制,以上方法不可行。冷却剂测量设备要满足抗高温、抗化学腐蚀等技术要求,热线/热膜法^[23]、电势探针法^[24]、光学探针法^[25]等因设备结构尺寸及接触式测量方式的限制,很难被改进以对冷却剂进行无干扰、高精度的测量。瑞士 Signal-processing 公司的超声多普勒测速仪(Ultrasonic Doppler Velocimetry)^[26]可以对采集到的信号进行处理、显示、分析,同时配备各种频率的探头和数据分析系统,但是这些探头都是普通压电传感器,受高温、腐蚀等限制,短时间可适用的最高温度为 230℃,长时间可适用的最高温度为 150℃,无法承受冷却剂堆芯入口温度 400~450℃、出口温度 550~600℃ 的使用环境。孙强等^[27]提出了一种称重法来测量高温金属流体,虽然可以实现对 600℃ 以上高温液体流量的检测,但测量时需要开一个孔,使金属液体流出来获得其重量,进而得到被测液体的流速。由于钠是非常活泼的金属,泄漏出来的钠会与空气和水发生剧烈的化学反应,放出大量的热,并产生对人和设备有较大损害的气溶胶,因此这

种称重法不能应用到 NaK-78 的流量测量中。

超声波传感器^[28-30]受其自身结构及所测流体流速的限制,还不能较好地应用于高温 NaK-78 的测量。德国专利 DE102007027391B3^[31]和 DE102007027392B3^[32],美国专利 US20100218608^[33]、US20100218617^[34]和国际专利 WO2008152031A2^[35]公开了一类适用于测量高温液态金属流速的超声波传感器,但其附有的 100~800mm 的波导管在应用中受到尺寸结构的限制。汪卫华^[36]的专利 201210090901.5 提出了一种超声波传感器用于液态金属测量,该传感器虽可以实现对 230~800℃ 冷却剂的测量,但是对所测液体的流速有限制(最大流速 1m/s)。还有其他的堆芯仪表,如由 Lehde 等^[37]取得的专利中介绍的涡流流量计,由于涡流感应的磁场取决于一次线圈内的电流、流体流速和安装线圈盒体的电导及形状,其在原理上即存在着对管道流速分布十分敏感的问题。

目前国内已有一些测量的方法。查美生^[38]在常规工业涡轮流量计的基础上,研制了一种可以测量高温金属冷却剂的涡轮流量计。这种涡轮流量计对空间有一定的要求。凌星^[39]介绍了一种利用压差式流量计测量冷却剂流量的方法。该方法是通过测量不同环路的温差等值进而得到冷却剂的流量的,然而该方法中的设备在安装时容易受到空间几何尺寸的限制。

基于 NaK-78 的高电导率特点,可利用流体的电磁特性制造测量仪表^[40]。电磁流量传感器是根据法拉第电磁感应定律制成的一种流量测量传感器。当导电液体在磁场区域做切割磁力线运动时,在测量电极上会产生感应电动势,其大小与磁感应强度、传感器直径以及流体流速成正比,而流体流量又与该感应电动势之间存在映射关系,因而目前已有的电磁流量计技术在原理与方法上可以对导电流体进行高精度流量测量。

电磁流量传感器较其他仪表具有如下若干优点^[41-43]:测量范围宽;信号实时性好,响应速度快,可实现动态测量;流体密度或温度适当变化不会引入显著误差;温度、流量发生瞬时变化时,传感器不易损坏等。以上这些独特的优势使得电磁流量传感器在反应堆这样的环境下工作的可靠性比其他类型的仪表要高。

但是,若把典型电磁流量传感器当作 NaK-78 测量仪表,其结构有如下难以克服的不足之处。

①电磁流量传感器的测量管壁为绝缘材料或者内附一层绝缘衬里,通常选用聚四氟乙烯或陶瓷。但因为冷却剂的温度高于 500℃,出口温度有时可高达 600℃,聚四氟乙烯不能承受这么高的温度,所以存在管壁材料耐高温问题。

②电磁流量传感器的电极是穿过绝缘测量管壁(或衬里)与流体接触的。在测量冷却剂流速时,存在电极与四氟乙烯或陶瓷绝缘层的密封问题。钠与空气接触会发生剧烈的化学反应,而且密封不好也会造成冷却剂的泄漏甚至会导致反应堆泄漏事件的发生。

文献[44]介绍了利用不锈钢管壁电磁流量传感器实现 NaK-78 流量的测量。不锈钢的测量管壁解决了电磁流量传感器测量管壁的耐高温及电极密封问题。文献[45]记载了电磁血流传感器,其具有类似传感器的结构特点:测量管壁不是绝缘材料,电极置于管壁外侧。2005 年有专利提到“非绝缘测量管”的概念^[46]。所谓“非绝缘”,表明测量管材料的电特性是一个相对概念,即测量管阻抗相对于被测流体要足够大,同时相对于信号测量放大器的输入阻抗要足够小,这样可以保证传感器的测量精度。非绝缘管壁电磁流量传感器基本结构如图 1-1 所示。

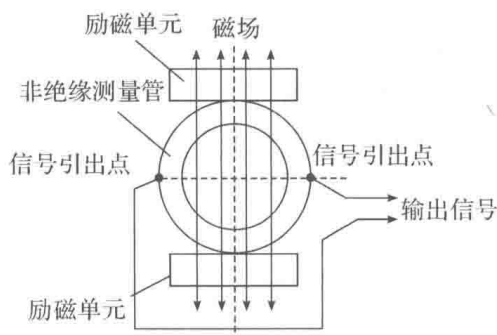


图 1-1 非绝缘管壁电磁流量传感器基本结构

如图 1-1 所示,该传感器的测量管具有一定的电导率,因此无须与流体接触的固定电极,而可以通过管壁外侧的信号引出点将流速信号反映出来。由于非绝缘管壁电磁流量传感器特有的结构,其较典型点电极绝缘管壁电磁流量传感器可更好地作为钠冷快堆的堆芯仪表,具体原因如下。

①非绝缘的测量管壁是具有一定范围的电导率的材料。非绝缘测量管扩大了材料选择范围,可以选择耐高温的非绝缘材料,为实现电磁流量传感器测量管壁耐高温问题提供了一个有效解决途径。

②没有内置电极,传感器信号通过置于管壁外侧的信号引出点输出。引出点不与被测流体发生接触,解决了信号引出点与管壁之间的密封问题。

不锈钢管壁电磁流量传感器及电磁血流传感器均属于非绝缘管壁电磁流量传感器。然而,目前很少有关于这类电磁流量传感器的基本理论研究报道,非绝缘管壁电磁流量传感器在设计制造中缺少相关分析方法。