

张小章 著

流动的电磁感应测量 理论和方法

清华大学出版社

流动的电磁感应测量 理论和方法

张小章 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍流动的电磁感应测量基本原理和相关的理论研究,包括管道式电磁流量计、电磁流速仪、多相相对电磁流量计的影响和流场的电磁感应重建等。书中内容主要是作者的理论研究结果,也包括一些实验数据,以及一些国际上新的成果,书中还附有大量英文参考文献以及一些计算程序,可为该领域深入研究提供基础。

本书可供从事流动电磁感应测量领域的研究人员、相关仪表研制和应用的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

流动的电磁感应测量理论和方法/张小章著.--北京:清华大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-302-22712-0

I. ①流… II. ①张… III. ①电磁感应—电磁测量 IV. ①O441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 087174 号

责任编辑:石磊 赵从棉

责任校对:王淑云

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京铭成印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:153×235 印 张:9 字 数:148 千字

版 次:2010 年 8 月第 1 版 印 次:2010 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~1600

定 价:40.00 元

产品编号:036533-01

序

我很高兴地接受张小章教授的邀请,为他关于流动的电磁感应测量的书作序。

J. A. Shercliff 的《流动的电磁测量理论》是这一领域开创性的著作。我曾荣幸地在剑桥作为他的学生,从事电磁流动测量的研究。之后我又与 M. K. Bevir 博士, J. Hemp 博士有紧密的联系,他们的工作对于该技术的理论发展有着关键的作用。我还与 D. G. Wyatt 博士有过一些接触,他在实验方面对这一领域做出了很大贡献。

张教授曾在 Cranfield 的流体工程与仪器系进行过一年的研究,那时我刚刚离开该系的主任职位。在那里他与 Hemp 博士一起工作。他对电磁流量计理论曾做出有价值的工作,并加深了对这一领域的兴趣。我们俩之后在中国或英国又见了几次面,我还读了他的书稿(他为我把主要内容翻译成英文),并在他前来我工作的剑桥大学工程系作两周正式访问时对此书进行了讨论。

在 Shercliff 教授的重要研究之后,由以上提到的学者以及其他学者发表的研究使得该领域的理论和实验有了进一步的发展。近 50 年来,电磁流量计作为重要的工业应用的流量仪表之一也已成熟。张教授的著作及时地累积了近年来理论工作的进展。首先,这将使在这一领域的工业界和理论界的中国同行们受益,也许将来还可能出版英文的翻译本。

电磁流动测量技术方面还有许多工作可以做,也有很多问题可以继续研究。张教授的这本书提供了一个坚实的基础,使得将来的工作可以与现有发表的文献相联系。

R. C. Baker

2009 年 7 月于英国剑桥

Preface

I am very pleased to have been asked by Professor Zhang to write a preface to his book on electromagnetic flow measurement.

Professor J A Shercliff's book "The theory of electromagnetic flow-measurement" stands as the seminal work on the subject. I was privileged to study under Dr Shercliff as a student at Cambridge, where I undertook research into electromagnetic flow measurement, and I subsequently had close links with Dr M. K. Bevir and Dr J. Hemp whose work in the subject has been key to the development of the theory of the technology. I was also privileged to meet, on one or two occasions, Dr D. G. Wyatt, who made such important contributions, particularly in the experimental insights he brought to the technology.

Professor Zhang spent a year in Cranfield just after I ceased to be Head of the Department of Fluid Engineering and Instrumentation there, and worked closely with Dr Hemp. While there he developed his interest in the electromagnetic flow meter and has done some valuable work in the theory of the device. We have met on subsequent occasions both in the UK and in China, and I have been able to go through his book (which he kindly translated into English for me) and to discuss it with him during a two week period which he was able to spend as a Visitor to the Engineering Department at Cambridge University, where I was working.

Following Professor Shercliff's important research, published work by those mentioned above and others has developed the theory and experimental understanding of the meter. Its industrial position as one of the most important flowmeters in industrial use has grown over the past 50 years. Professor Zhang's contribution is timely in bringing together much of the recent theoretical developments. Initially this will be of great benefit to the Chinese flow measurement community both industrial and

academic, but perhaps at some time in the future an English translation will be published also.

There is still much to be done and many important strands to be followed up in this technology, and Professor Zhang's book should provide a firm basis for future developments in conjunction with the existing published work on the subject.

Roger C Baker

July 2009

Cambridge, England

致 谢

在剑桥大学 Wolfson 学院可以听到隐约的钟声,这是一个宁静的做学问的地方。这次 Baker 教授邀请我来剑桥作短期访问,使我有机会在这里为这本书做收尾工作。

电磁流动测量理论源于剑桥大学。当年三一学院的 Shercliff 博士有许多开创性的工作,最有标志性的还是他 1962 年完成的书。这本书已经成为全世界这一领域的学者必读的著作。Shercliff 的研究多在液态金属流动测量方面。Baker 教授当时是他的博士生,那时试验中曾大量与水银打交道,条件很恶劣。我在博士论文期间与 Baker 教授有通信来往,当时我的论文就是电磁流量计理论。他还亲自为我写推荐信寻求资助,使我后来得到英国皇家学会基金到 Cranfield 进行电磁流速仪的研究。在那里我与 Hemp 博士有很密切的合作,这次我还专程去牛津听取他关于本书的意见。Hemp 博士从牛津取得博士学位后与 Wyatt 博士一起从事血液电磁流量计的研究;Wyatt 手下还有 Bevir 博士,他之前在 Shercliff 指导下得到了电磁流量计积分公式,这一公式一直被研究者应用。我与 Bevir 博士有些通信,他谈了当年研究的一些历史。我有幸在剑桥读了他的博士论文。

所以,今天在这里完成本书的最后一阶段有着特别的意义。

我从 1986 年开始从事电磁流动测量研究,之前读了一些文章,了解到这一领域有好几篇博士论文。当我和导师郭子中教授谈到我研究的题目时(郭子中教授也是剑桥博士),我建议了这个方向,并得到他的允许。

除了对以上各位表示感谢外,我还要感谢许多人和单位。

我的硕士导师龚家彪教授,他是我国流量测量的先驱者之一,是他引领我进入这个领域。上海光华仪表厂前总工蔡武昌,他为我当年博士论文的实验提供条件,而他本人则是我国电磁流量计研究的前辈。开封仪表厂的前工程师马中元,他在电磁流量计方面有着很好的经验并且一直怀着不懈的热情;他早年还为我提供过王竹溪教授的文章。英国皇家学会为我提供基金,使我在博士论文完成后,又在英国继续这方向的研究。在 Cranfield

大学流体工程与仪器系主任的 Sanderson 教授,他为我当年第一次出国工作和生活提供了帮助,之后我们还有来往,包括重点讨论流场重建问题。我要感谢我所有家人的鼓励和支持。

清华大学、Cranfield 大学、剑桥大学、河海大学、南京航空航天大学都提供过资助或条件,使我分出一部分时间继续从事电磁流动测量的研究。我的学生们在调研、计算和实验方面都给予了我很大的支持。在此,一并表示感谢。

张小章

2009 年 7 月 30 日

于剑桥大学 Wolfson 学院 R211 房

符号对照表

$U_1 - U_2$	电磁流量计电极 1、2 之间的感应电势差
B	磁感应强度
j_v	虚电流密度矢量
V	流体速度
W	矢量权函数
W_i	直线流权函数
R	管道式电磁流量计测量管内半径
R_1	管道式电磁流量计线圈外壳内壁半径
Q_v	通过管道的体积流率(量)
F	磁标势
G	虚电流势
S	电磁流量计的敏感度
ϵ_1	与绝对值有关的权函数不均匀度
ϵ_2	与平方有关的权函数不均匀度
$J_m(\mu r)$	第一类 Bessel 函数
$I_m(nr)$	第一类修正 Bessel 函数,或虚宗量 Bessel 函数
$K_m(\mu r)$	虚宗量 Hankle 函数
$P_l^m(\cos\theta)$	球函数,又称 Legendre 函数
δ	Delta 函数
(r, θ, z)	柱坐标
(x, y, z)	直角坐标
e_1, e_2 或 e_+, e_-	电极 1 和电极 2
μ	流体磁导率,这里等于真空磁导率
σ	流体电导率
ϵ	介电常数
D	电位移矢量
H	磁场强度
∇	Hamilton 算子

∇^2	Laplace 算子
S_1, S_2	良导体制成的电极表面
U_V	虚拟电势
P	流体压强
τ	空间体积
ρ	流体密度
ν	流体运动粘度
a_{mn}, b_{pq}	级数系数
B_0	特征磁感应强度
$V_z(r, \theta)$	直线流流速分布
$V_\theta(r, \theta, z)$	纯粹旋涡流速度分布
$V(r)$	轴对称直线流流速分布
V_1, V_2	非均匀流的不同流速
$W_z(r, \theta, z)$	矢量权函数在 z 方向的分量
$Re = \frac{2R \bar{V}}{\nu}$	Reynolds 数
h	非满管流动液面总深度, 或偏心孔板过流部分高度
l	管道式电磁流量计半长度
l_0	大电极 1/2 电极长度
θ_0	大电极 1/2 电极包含角, 或两对点电极时电极 1/2 夹角
θ_e	非满管电磁流量计液面角位置
θ_1, θ_2	流动区域的角位置
α	纯粹旋涡流衰减常数
λ_1	用幂次逼近轴对称流时的系数
$C_m(r)$	直线流级数展开系数
W^*	乘上幂次流速分布以后新的权函数
$G^{(2\mu)}$	迭代中的虚电流势
G_0	迭代求解虚电流时用的初始值
G^*	虚电流真实值和初始值之差
(x_0, y_0)	非满管流动液面与管壁交点坐标
(θ_0, z_0)	大电极脱落时的中心位置

$(\Delta\theta, \Delta z)$	大电极脱落时的脱落面积
R	流速仪圆柱半径
a_1	流速仪线圈半径
a	1/2 电极距离
z_0	线圈与流速仪端部的距离
L_1	流速仪探头端部与对面管壁的距离
L_2	流速仪探头端部与背后管壁的距离
R_2	迭代用求解域外半径
G_1, G_2	迭代时不同区域的虚电流势
ϕ	流场 $\mathbf{V}$ 的势
ϕ_∞	均匀流场的势
ϕ^*	实际流场势与均匀流场势之差
$\mathbf{r}^*$	线圈某一线段到空间一点的矢量
$\mathbf{A}$	磁感应强度 $\mathbf{B}$ 的矢量势
A_r, A_θ, A_z	磁矢量势的三个分量
$\mathbf{J}$	流过线圈的电流密度矢量
j_θ	电流密度周向分量
I	流过线圈的电流
a	圆形气泡半径, 或 1/2 管道宽度
b	1/2 管道长度
a_0, b_0	矩形气泡情况下分别为 1/2 气泡宽度和 1/2 气泡长度
r_0	球形气泡下为球半径
Q_L	液相体积流率
$S_{\text{水}}$	电磁流量计对于液相的敏感度
$S_{\text{两相}}$	电磁流量计对于液相和气相的总敏感度
L	圆形气泡的偏心距, 或矩形气泡与电极连线的最小距离
α	气相横截面积与管道横截面积之比
θ_e	气泡中心和管道中心连线与电极连线之间的夹角

$\epsilon_0, \epsilon_{\min}, \epsilon_{\max}$	采用 ϵ_1 表达式研究偏心气泡影响。分别为气泡在管道中心情况(基本不均匀度)、同一气泡偏离中心位置不均匀度的最小值和最大值
ϵ_3	存在矩形气泡和没有气泡两种情况下权函数的变化
ϵ_4	由于矩形气泡的存在权函数的不对称程度
ϵ_5	球形气泡引起权函数非均匀度的变化
$(j_V)_x$	虚电流矢量在电极连线(x 方向)的分量
(x_0, y_0, z_0)	球形气泡在直角坐标系中的位置
R_1, R_2, R_3	多个气泡情况下气泡的半径
$(x_{01}, y_{01}), (x_{02}, y_{02}), (x_{03}, y_{03})$	多个气泡情况下气泡在管道横截面中的位置
$[S_i]$	信号矢量
$[W_{ij}]$	权函数矩阵
$[V_j \Delta A_{ij}]$	流率矢量
$[W_{ij}]^+$	权函数矩阵的广义逆矩阵
$[W_{ij}^*]$	用阈值处理后的权函数矩阵
$[W_{ij}^*]^T$	$[W_{ij}^*]$ 的转置矩阵
θ_1, θ_2	点电极角位置
θ_3, θ_4	单个线圈的角位置, $\theta_4 - \theta_3$ 为线圈覆盖角
$J_0(x_m r)$	流速展开时用到的零阶 Bessel 函数
V_0	最大流速

目 录

第 1 章 研究的历史和发展	1
参考文献	4
第 2 章 电磁流量计的基本方程及求解方法	7
2.1 基本方程	7
2.2 边界条件及求解方法	10
参考文献	16
第 3 章 管道式电磁流量计的特性	17
3.1 基本概念和定义	17
3.2 直线流权函数的表达式	20
3.3 电极形状对权函数分布的影响	22
3.4 磁场分布的影响	28
3.5 流速分布的影响	31
3.6 均匀磁场电磁流量计的一些特性	38
3.7 非满管流电磁流量计	46
3.8 设计、制造和使用中的一些问题	48
参考文献	51
第 4 章 电磁流速仪的特性	54
4.1 引言	54
4.2 电磁流速仪虚电流的计算	55
4.3 关于边界条件对虚电流分布影响的讨论	61
4.4 电磁流速仪探头附近流场的分布	62
4.5 磁场分布的计算	64

4.6 电磁流速仪的敏感度	67
4.7 计算例子	69
4.8 结论	70
参考文献	70
第5章 两相流的影响	72
5.1 引言	72
5.2 气泡在管道横截面不同位置的影响	73
5.3 气泡在管道不同轴向位置时的影响	82
5.4 三维模型	85
5.5 存在多个气泡时虚电流势的分布	90
参考文献	93
第6章 流场重建	94
6.1 引言	94
6.2 实现流场重建的两种方法	94
6.3 重建实例	96
6.4 结束语	107
参考文献	108
附录A 电磁流量计理论研究中的部分重要贡献者	109
附录B 有关的特殊函数及特性	111
附录C “交替迭代逼近实际边界”法	113
附录D 关于权函数对称性与不均匀度关系的推导	116
附录E 计算程序与说明	120
名词索引	125

第 1 章

研究的历史和发展

电磁流量计是一种测量导电流体体积流率的感应式仪表。根据 Faraday 电磁感应定律,一根在磁场中做切割磁力线运动的金属导体,会在其两端产生感应电动势,这一现象对于导电流体同样适用。这就是制成电磁流量计最根本的理论依据。

与其他流量仪表比较,电磁流量计具有不受被测流体密度、粘度等参数影响,测量过程流体无压力损失,响应速度快,精度高等突出优点。

电磁流量计发展到今天已有广泛的产品选择,它大约占有流量仪表的 10%~15%。据中国仪表网的报道,认为我国 2008 年电磁流量计市场约为 8000 万美元,这个数字大约占世界同一市场的 1/10。

在中国大约有几十家制造电磁流量计的单位,包括老牌的国营厂(如光华仪表厂、开封仪表厂等),也包括从国营大厂派生出来的公司,或者是新兴的公司。国外著名的公司几乎都已进入中国,或直接销售电磁流量计,或与中国企业合资。除此之外,还有少数研发公司、科研单位和大专院校加入电磁流量计的研发行列。我国对电磁流量计的研究和制造涵盖了纯粹的加工型(如根据某种渠道得到的图纸和电路,或根据国外公司图纸要求进行加工前端部分),到自己研发整机。但不可否认,有些工厂还处于较低的开发水平。

对电磁流量计的研究可追溯到 19 世纪。Faraday 在 1831 年发现电磁感应定律后,第二年就试图测量 Thames 河的流动在地磁下的感应电压,但没有成功^[1]。到了 1930 年 Williams 才应用电磁感应的方法来测量管内的流率^[2]。后来,Thürlemann 从数学上证明了均匀磁场下轴对称流动产生的输出信号正比于平均流速^[3]。1962 年, Shercliff 发表了关于电磁流量计理论的第一本完整著作^[4],书中总结了前人在这方面工作的大量文献,并奠

定了电磁流量计的基本理论。Shercliff 还首先提出权函数的概念,用以反映电极所在平面上不同点处流速对仪表输出信号的贡献。在此之后的近 10 年中,理论工作者的研究主要在电磁流量计的二维分析方面,如 Baker^[5]、Smyth^[6]和 Bevir^[7]、Engl^[8]等用复变函数映射和 Green 定律等求出圆管和矩形管下不同电极电磁流量计的权函数和输出信号。1970 年,Bevir^[9]首先引入了虚电流,从而提出了矢量权函数的概念;同时,他还证明了在三维情况下,要做到理想电磁流量计(即输出信号正比于流速)的充要条件是矢量权函数的旋度为零。从此,人们对电磁流量计特性的研究更多集中在三维分析上,因为这是解决电磁流量计小型化的必经之道,如 Hemp^[10]、Engl^[11]、Al-Khazraji 和 Baker^[12]、Cox 和 Wyatt^[13]等人的工作。随着电磁流量计理论研究的不断成熟,人们开始期望能对产品进行干标定(即不通过实流即可标定仪表系数)。1981 年 Bevir 等人发表文章^[14]指出,对点电极电磁流量计,可期望通过测量磁场边界条件的方法来预测其信号输出。后来 O'sullivan 等^[15]又把这种方法推广到多对点电极和非接触式大电极情况。由于他们的方法实质上都是以点电极为基础解逼近磁场和有限尺寸电极,因而使得计算量和收敛性方面不尽令人满意。另外,他们给出的方法不能解决混合边界值问题。Hemp 和 Versteeg^[16]提出用双 Fourier(傅里叶)级数来展开虚电流势和磁标势,使得对电磁流量计权函数的计算量大为减小。以这一基础性工作为出发点,进一步求出各种电极和线圈形状下的 Fourier 系数,就可能得到电磁流量计权函数比较简洁的表达式。Zhang 1989 年的文章中,提出了一种半解析方法,可以求解许多虚电流分布问题^[29]。

与此同时,Baker^[17]、Kuromori 等^[18]用数值计算为基础来求解电磁流量计基本方程。数值方法对于较复杂边界条件当然显示出优越性,但在用来分析电磁流量计特性和计算量等方面却是弱项。

另一位值得介绍的是 D. G. Wyatt 博士,他于 20 世纪 50 年代就在牛津大学开始了电磁流量计的研究,主要应用背景是血液流动,在理论和实验方面都很有建树^[22,23]。这是一个可能比工业流动测量还要复杂的问题,不过现在大多数情况下已经采用超声的方法。但是,有关血液流电磁感应测量的研究结果,如管壁的导电率、电极的表面情况和脉动流等,仍然还可以为比较复杂的工业流测量所借鉴。

我国的物理学家王竹溪在“文革”期间曾经协助开封仪表厂进行电磁流量计研究,他在“电磁流量计理论的几个问题”中论述了长筒和短筒电磁流

量计的权重函数的求解。不过,这篇文章只是发表在1975年开封仪表厂内部的《开仪通信》上。这篇文章的详细内容见蔡武昌等合编的《电磁流量计》第2章^[21]。

可以看到,对电磁流量计特性的研究已经从二维分析发展到三维分析,已进入到对不同电极和磁场的适用性越来越强的数学模型阶段。

如果具有更加完善的数学模型,那么人们在研究过程中可以更好地预测所设计的产品。结果是节约了各种资源以及得到更加完美的产品,比如更高的测量精度、更紧凑的仪表结构和更加智能化,等等。研究新的应用往往也需要好的理论作支持,比如完全不同于常规电磁流量计的仪器,或者非常复杂流动条件下的测量。

关于电磁流量计目前可以得到的有两本外文书和两本中文书,分别是1962年出版的 Shercliff 的 *The theory of electromagnetic flow-measurement*^[4],1974年出版的 Schömmartz 的 *Induktive Stromungsmessung*^[19],1981年出版的黄宝森等的《电磁流量计》^[20]和2004年出版的蔡武昌、马中元等的《电磁流量计》^[21]。Bevir 还向我介绍了一本前苏联学者 Kursunskii 的著作,他做了一些翻译^[28]。可能还会有关于电磁流量计的书籍,比如日本在这方面很有研究,应该有所著作。Shecliff 的著作是开山之作,给出了许多方面的理论基础以及二维研究结果;Schömmartz 的著作有较多篇幅叙述流速仪和后置电子线路;而国内的著作则还总结了我们自己研究的经验。

一个产品从构思到成熟上市集成了多方面的知识和资源,理论基础是其中的一部分。由于作者的经验基本限于理论研究,所以本书也以此为主。书中主要内容是作者自20世纪80年代以来研究的结果,也包括了70年代以来国际上电磁流量计及相关理论的研究,尤其是三维理论的研究。另外,本书中有些问题的探讨是比较超前的,比如关于多相流和流场重建^[30],这更多的是理论上的兴趣。然而,作者十分清楚解决实际问题的重要性,因此书中给出一些例子,力图使本书在这些方面有所作用。

本书内容没有涉及电磁流量计在液态金属和非导电流体方面的应用。液态金属的测量存在流动受磁场干扰问题,这方面的研究可以参考 Shercliff 的著作^[4]。而非导电流体的测量需要很高频率的磁场和考虑流体携带电荷问题,这将带来很多其他技术上的困难。Hemp 等人有比较完整的研究^[24~27]。

本章主要介绍电磁流量计理论研究的发展历史,内容比较简要,但这一章为读者提供了一系列理论研究进程中的重要参考文献。相信读者读完这