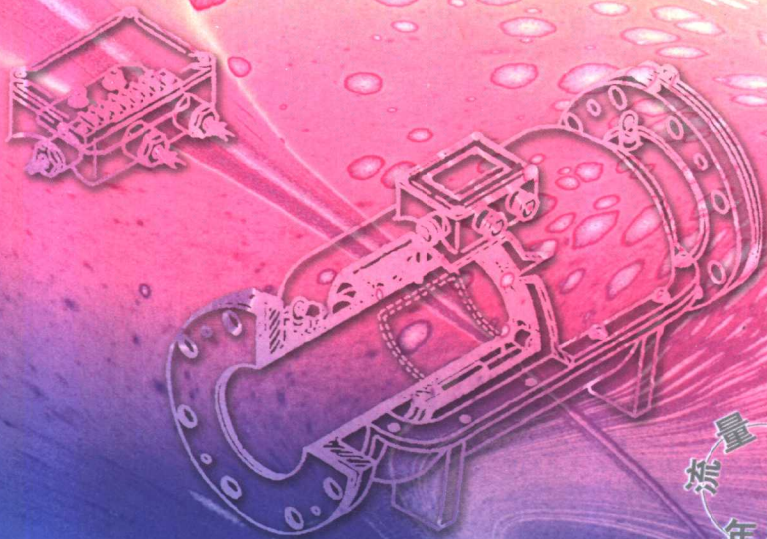


流量计应用指南

电磁流量计

蔡武昌 马中元 瞿国芳 王松良 编



流量仪表
年鉴

中国石化出版社

电磁流量计

蔡武昌 马中元 编
瞿国芳 王松良

中国石化出版社

内 容 提 要

本书专门介绍电磁流量计的基本知识。全书共分8章,内容涉及电磁流量计的测量原理、测量系统及构件、测量电路,以及电磁流量计的应用,选型、安装、调试及故障处理等。书中汇集了作者长期实践和开发的经验与成果,实用性强,可供工程技术人员及从事流量测量的有关工作人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

流量仪表年鉴. 电磁流量计/蔡武昌等编.
—北京:中国石化出版社,2004
ISBN 7-80164-487-5

I. 流… II. 蔡… III. 电磁流量计—指南
IV. TH814-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 126135 号

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

北京大地印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

850×1168 毫米 32 开本 14.5 印张 8 彩页 387 千字

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

京工商广临字 20040008 号

前 言

电磁流量计自 20 世纪 50 年代进入工业实用阶段以来，由于其性能优越，已在过程控制流量测量和储存交接贸易总量计量中被广泛采用。当前电磁流量计使用台数在流量仪表诸品种中居第三、第四的前列位置，并以高于流量仪表整体的增长率继续增长着。

经分析待测对象的流体特性、环境条件和对测量的要求，在品种繁多的流量仪表中选择电磁流量计后，还须详细了解各型号电磁流量计的性能特点和差异及如何在使用中充分发扬其长处。因此，购置仪表前的准备工作就显得十分重要，如对仪表性能选择、工程设计、安装布置等环节，都要充分论证并精心筹划。投入运行时具体安装调试出现的问题和日常运行发生的故障，要找寻原因，搜索和鉴别外界干扰源，排除故障，这类工作内容似乎应有一本相应的实用性专门书籍。

迄今我国已超过 30 万台电磁流量计制造、工程设计、现场调试和维护检修的实践经验。作者从事电磁流量计开发生产多年，日常工作中也常与工程设计和现场终端用户的同事们交流，磋商如何正确选择仪表，协同解决使用中出现的問題，从而对电磁流量计的应用技术也有一些认识，积累了若干第一手素材。我们感到在结合收集国内外发表资料的基础上，已经有条件编写本书，提供今后拟从事电磁流量计有关工作者参考。

全书共分八章，第一章阐述流体和流量测量基础知识；第二章阐述电磁流量测量基本原理、电极信号的权

重电位分布规律、权重磁场分布、流速分布影响、磁场边缘效应对测量的影响；第三章阐明电磁流量传感器的构成和类型、励磁系统和磁路参数的设计、流量信号的特征和干扰信号；第四章阐述转换器典型系统组成、分述励磁电路、信号放大和变换电路、性能指标和测试方法；第五章综述电磁流量计的应用领域，选择电磁流量计时在仪表性能、流体特性、安装、环境条件、经济因素五个方面应考虑的要害；第六章讨论安装注意事项和投运前的调试工作；第七章有关故障分析和检查，描述五种常见故障现象(即无流量信号输出、输出晃动、零点不稳、流量测量值与应用参比值不符、输出信号趋满度值)的检查流程和方法；第八章论述电磁流量计的校准和可采用的现场比对方法；附录部分录有常用单位换算表 200 余种液体电导率和电极/衬里材料选择参考表等。

北京大学王竹溪教授和赵凯华教授 1975 年在开封曾有电磁流量计理论研究的油印讲稿《电磁流量计理论中的几个问题》，已请赵教授审阅后附于本书，供对电磁流量计理论有兴趣的读者参考。

本书可供从事生产和应用电磁流量计的工程师，尤其适合拟采用电磁流量计作工程设计的间接用户(工程公司和设计院)和终端直接用户在选择和应用时参考。本书也可作为大专院校师生教学参考书和工矿企业培训班教材。

本书由上海光华仪表厂蔡武昌、瞿国芳，开封市供水总公司马中元，上海光华·爱而美特仪器有限公司王松良撰写。其中第一至四章由马中元执笔；前言、第五

章、第七章的第一至六节及第八至九节、第八章第三节由蔡武昌执笔；第七章第七节由王松良执笔；第六章、第八章及其余部分由瞿国芳执笔；附录由蔡武昌汇编。全书由蔡武昌统稿。

本书编写过程中资料的选取和引用得到有关仪表制造厂和使用企业的支持和帮助，在此深致谢意。限于水平，书中存在不足之处和缺点错误，敬请读者批评指正，并预向提出批评和反馈意见的读者致意。

作者

2004年3月

目 录

前 言

第一章 绪论	(1)
第一节 流量测量的目的和意义	(1)
第二节 流量与电磁感应法的流量测量	(3)
第三节 液体的性质和流量的基本概念	(9)
第二章 电磁流量计的测量原理与理论	(25)
第一节 基本工作原理	(26)
第二节 基本微分方程与边界条件	(30)
第三节 权重函数的物理意义及其实际应用	(36)
第四节 流速分布的影响	(45)
第五节 磁场边缘效应对测量的影响	(47)
* 电磁流量计理论中的几个问题	(55)
第三章 电磁流量传感器	(73)
第一节 传感器的基本结构	(73)
第二节 励磁系统	(75)
第三节 测量管与衬里	(95)
第四节 电极—信号引出	(103)
第五节 不同类型的传感器及其发展	(114)
第六节 传感器产生的流量信号特征与干扰	(141)
第四章 转换器	(160)
第一节 集成运算放大器和负反馈技术的基本知识	(161)
第二节 转换器的典型系统构成	(173)
第三节 励磁电路	(187)
第四节 信号放大与变换电路	(196)
第五节 具有单片机的电路	(235)
第六节 性能指标与测试方法	(245)
第五章 应用和选择	(253)

第一节	电磁流量计的应用	(253)
第二节	选型考虑因素	(256)
第三节	仪表性能方面考虑要点	(257)
第四节	流体特性方面考虑要点	(269)
第五节	安装条件与使用考虑要点	(275)
第六节	环境条件考虑要点	(280)
第七节	经济方面的考虑	(281)
第六章	安装调试	(284)
第一节	仪表安装环境要求	(284)
第二节	仪表的安装	(285)
第三节	运行前的准备和调试	(304)
第七章	故障检查和分析	(306)
第一节	故障类型	(306)
第二节	故障现象和检查流程	(308)
第三节	无流量信号输出检查和采取措施	(310)
第四节	输出晃动检查和采取措施	(314)
第五节	零点不稳定检查和采取措施	(322)
第六节	流量测量值与应用参比值不符的检查和 采取措施	(327)
第七节	输出信号超满度值检查和采取措施	(333)
第八节	故障分析与案例	(338)
第九节	电磁流量计专项检测	(349)
第八章	电磁流量计的校准与比对	(353)
第一节	出厂校准和离线周期校准	(354)
第二节	现场比对	(366)
第三节	在线周期检定和检查	(368)
附录 A	单位换算表	(373)
附录 B	流量(m^3/h)—圆管平均流速(m/s)关系图	(380)
附录 C	附装异径管压力损失	(381)
附录 D	管道内常用流速值	(383)

附录 E	液体电导率一览表	(384)
附录 F	电极和衬里耐腐蚀材料选择一览表	(394)
附录 G	外壳防护等级(IP 代码)	(417)
附录 M	电磁流量计国家标准选录	(418)

第一章 绪 论

第一节 流量测量的目的和意义

流量与温度、压力、物位等的测量同为热工量测量，是工农业生产过程控制中的重要的测定参数之一。流量测量与人们的日常生活有着密不可分的关系。因此，作为流量测量的流量计，应用范围很广。其应用遍及钢铁、冶金、给水、排水、石油、化工、食品、医疗、环保、航空、航海、航天、农业灌溉等部门。

然而，就流体流动量的检测而言，要比温度、压力等其他参量检测困难得多。其原因在于，流量这个参数受输送流体的工作条件如压力、温度、流动状态、流体的种类、形状等参数的影响。要达到正确测量的目的，必须采用不同的测量仪表和不同的补偿措施。这就是说，流量计的种类和品种是十分繁多的。例如，考虑到测量不同的流体状态，则有气体、水、蒸汽、油等不同的流量计。同样是液体测量，使用的流量计也有不同。譬如，使用电磁流量计可测量导电液体流量，但随着流体导电性质不同，液态金属流量测量需要使用直流磁场或者低频励磁的电磁流量计；低电导率流体测量要用电容型电磁流量计等等。因此，研究和使用的流量计相对于其他测量仪表要困难得多。只有结合具体测量的流体对象和测量的目的，针对性地选择适当的流量计，才能合理、经济、可靠、准确地进行有效的流量测量。

就流量测量的目的和意义而言，使用流量计测量的一个目的是在生产过程中给管理者或控制系统提供流量参量的准确数值，以便做出合理地判断与调节，达到优良的控制，提高产品的质量与产量。譬如化工生产原料的配比、制水与污水处理的加药、石油采油高压注水、钢铁的高炉检漏、连铸连轧等，是提高劳动生

产率、提高产品质量的有效手段，也是降低工人劳动强度、改善工人劳动条件的有效措施。同时，为企业管理者提供在生产过程中降低成本、降低能耗和提高设备的使用寿命等科学的、可靠的数据。所以说，应用流量仪表测量流量是提高企业科学管理水平和极大发挥经济效益和社会效益的有力措施。流量测量的这一目的称之为“监控目的”。

流量测量的另一目的是从经济利益出发，为供需双方计量交接贸易的流体总量提供合理的贸易结算数值。利用流量计连续累积一段时间内的总量值，为贸易结算和总量控制提供科学的、可靠的流体总体积或总质量，我们称为“计量目的”。油、蒸汽、水、热量等产品和资源作为商品买卖，通过流量计能够为供需双方提供交易的依据。对于一个生产企业内部使用的资源和能源分配和管理，流量计量也是必不可少的手段。在节约资源和能源越来越为人们重视的今天，流量计量能够为企业带来巨大的经济效益和社会效益。同时，在当今社会人们对赖以生存的地球、环境保护与污染治理意识日益加强。世界各国都把工业生产排放的污染气体、污水总量作为控制目标，由流量计给出科学的、可靠的总量数据，从而有效地对排放口进行管理与控制。

在许多场合下，“监控目的”与“计量目的”会同时出现。譬如，土木施工中浇注水泥浆，使用流量计测量水泥浆流量不仅可以控制浇灌速度，保证浇灌质量，而且可以根据计算要求，通过流量计控制浇注的水泥总量，既保证了浇注浇灌质量，又不浪费水泥浆。再如，使用流量计可以快速、准确地完成饮料生产自动装袋、装罐，不仅保证所装袋、罐饮料的质量，而且提高了工作效率，减小了工人的劳动强度。

对于“监控目的”的流量计，要求以测量可靠、稳定为主，测量精度为次要。而对“计量目的”的流量计，不仅要求测量稳定、可靠，对测量精度的要求也很高。因此，对于同样能够测量流体的流量计，有些只适用于“监控目的”用，有些可以适用于“计量目的”。譬如，容积式流量计多用作“计量目的”，面积式转子流

量计多用作“监控目的”。本书讨论的电磁流量计是既可以用作“监控目的”，又可以用作“计量目的”的流量计。

第二节 流量与电磁感应法的流量测量

一、流量的定义

流体在任何形状、一定面积的截面内流动，流过该截面的体积或质量对时间的比值称为流量。用流过的体积与时间的比值来表示流量时，称为体积流量(或容积流量)。用流过的质量与时间的比值来表示流量时，称为质量流量。

流量的测量对象是管路、渠道和河流中的流体。所谓流体流量，就是指流过一定截面的管路、渠道或河流的流量。当流体的速度遍及整个截面，均为相同状态时，令流速为 v ，则截面 A 内所流动的体积流量 q_V ，由下式表示：

$$q_V = v \cdot A \quad (1-1)$$

若遍及整个截面的流速并非均匀，就其微小截面 dA 讨论时，则此截面内所流动的体积流量 dq_V ，由下式表示；

$$dq_V = v \cdot dA \quad (1-2)$$

因此，体积流量 q_V 就是对公式(1-1)在截面 A 范围内的积分求得。于是，可得

$$q_V = \int_A v dA \quad (1-3)$$

当公式(1-3)用截面内的平均流速 \bar{v} 表示时，又可以下面公式表示体积流量 q_V ：

$$q_V = \bar{v} \cdot A \quad (1-4)$$

质量流量可用 q_m 表示，质量流量与体积流量的关系是：

$$q_m = \rho \cdot q_V \quad (1-5)$$

体积流量常见的单位有：米³/秒(m³/s)、米³/小时(m³/h)、米³/天(m³/d)和升/秒(L/s)、升/分(L/min)等。质量流量的单位

有千克/秒(kg/s)、千克/分(kg/min)、千克/小时(kg/h)和克/秒(g/s)、克/分钟(g/min)等。

在一段时间内, 流体流过一定截面的管路、渠道或河流的流量, 称作累积流量或流体总量。累积流量可通过流量对时间的积分求得:

$$Q = \int_t q_v dt \quad (1-6)$$

$$M = \int_t q_m dt \quad (1-7)$$

式中 Q ——累积体积流量, m^3 、L;

M ——累积质量流量, kg、g。

这里需要说明一点, 流量是一个动态量, 表示一定截面的管路、渠道或河流的瞬时值。累积流量是在一段时间内, 流体流过一定截面的管路、渠道或河流的总量值。正如前述, 瞬时流量是工农业生产工艺流程中需要控制和调节的重要参数。累积流量则是有关流体的贸易、分配、交接、供应等商业性活动中必知的参数之一, 它是价格、结算和收费的依据。

用于测量流量的仪器设备称流量计。现代许多流量计既可以用来测量瞬时流量, 又可以用来测量累积流量。譬如, 电磁流量计就是这种可以测量瞬时流量和累积流量的流量计。

二、电磁感应法的流量测量

1. 电磁流量计的发展

利用电磁感应原理测量流量是众多流量测量方法中最普遍的方法之一。它能够测量多种形状流道内导电液体的流速和流量, 是法拉第电磁感应定律的应用。

电磁感应定律是 1831 年英国物理学家法拉第发现的。法拉第电磁感应定律讲: 当导体在磁场中作切割磁力线运动时, 在导体两端就会感应一个与磁场方向和导体运动方向相互垂直的感应电动势。感应电动势的大小与磁感应强度和运动速度成正比。

1832年法拉第在泰晤士河滑铁卢桥的两岸，选择与水流方向垂直的地磁场方向的地方，放下两个金属棒当作电极来测量河水的流速。这是世界上第一次电磁流量计的试验。但是，由于电化学反应、热电效应等原因，测出的信号是虚假的，并且流速信号被河床短路。加上当时的测量条件限制，所以他失败了。有幸的是，他在1851年见到了Wollaston等人利用电磁感应法测量英吉利海峡潮汐试验的成功。

到了1917年，史密斯和斯皮雷安获得了应用电磁感应的原理制造船舶测速仪的专利，并推荐使用交流励磁来克服水的极化影响，从而开辟了电磁流速计在海洋学上的应用。

1930年，威廉斯将硫酸铜溶液在置于直流磁场中的一个不导电圆管内流动，检测圆管两电极间的直流电压与流速成正比，这种装置成为一种简单的电磁流量计。威廉斯第一次用数学上的方法分析圆管内流速分布对测量的影响，提出了以管中心轴为对称的流速分布不影响电磁流量计测量精度的理论。尽管他的分析在数学上有错误，但自此有了电磁流量计的基础理论。

1932年前后，根据Fabre的建议，生物学家Williams、A.柯林利用电磁流量计测量和记录瞬时的动脉血液流量获得了成功。

第二次世界大战以后，原子能工业有了迅猛的发展，因而能够测量液态金属的永磁，使电磁流量计得以发展和应用。但是，由于当时电子技术尚还落后，它的使用领域还不能扩大到一般工业中去。

1950年，荷兰人首先在挖泥船上使用电磁流量计测量泥浆流量。后来电磁流量计在美国的一般工业生产中得到了应用。1955年日本的北辰电机和横河电机分别引进美国Fischer & Porter公司和Foxboro公司的电磁流量计产品，经过不断地消化、吸收和改进，其电磁流量计很快进入世界先进行列。1955年前后，前苏联、英国、德国也成功地生产出电磁流量计。

20世纪60年代初，希克里夫(J.A. Shercliff)在柯林(A. Kolin)等前人无限长均匀磁场的电磁流量计的数学解析基础上，完成了

有限长均匀磁场下等流速情况的数学解析，并用权重函数的理论揭示了产生感应电动势的微观特性，使得电磁流量计有了系统的基础理论。同时，在电子工业飞速发展和工业自动化程度不断提高的条件下，电磁流量计逐渐完善、成熟起来，发展成为一种性能优良的流量仪表，在工业中得到了广泛的应用。

20 世纪 60 年代后期到 70 年代中期，随着对三维权重函数的深入研究，出现了权重分布磁场的电磁流量计，使得有限的磁场长度大大缩短，并在一定程度上改善了测量对流速的不敏感性。同时，也有利于流量计制造简化与降低成本。三维权重函数的研究成果，对这一时期电磁流量计的发展有重大的指导意义。由于这一时期集成电路的迅速发展和世界能源危机对流量测量仪表提出的更高性能要求，出现了低频矩形波励磁的新技术。低频矩形波励磁电磁流量计，集中了交流励磁流量计能抑制直流磁场信号中的极化干扰和降低交流磁场流量计中信号所含电磁感应于扰信号成分两方面的优点，提高了流量计的零点稳定性、灵敏度和测量精度，降低了功率消耗，解决了互换性等问题，形成了电磁流量计发展的一次高潮。

20 世纪 80 年代以来，微电子技术和计算机技术的迅猛发展，使电磁流量计制造技术更加成熟和完善，其应用领域更加扩大。当代的电磁流量计采用单片机技术，用数字的处理方法等措施使电磁流量计的测量精度和性能不断提高，并可充分利用计算机具有信息贮存、分时处理、运算和控制能力的优势。因此，比较容易实现了双向测量、空管检测、多量程自动切换、人机对话、与上位机通讯、自诊断等附加功能。新一代具有 HART 协议及其他现场总线的电磁流量计更为用户实现全新的现场总线生产控制与管理提供了条件。所以，一体型、两线制、防爆型、高压型、具有通讯功能的电磁流量计在化工、石油、钢铁、冶金等工业生产过程自动控制中越来越受欢迎。

使用领域的扩大，出现了应用电磁感应法的各种新型导电液体流量测量仪表和系统，譬如能测量低电导率的电容式电磁流量计、

用于测量自流排水的非满管电磁流量计、用于明渠测量的潜水电磁流量计、使用能测量明渠和大口径管道点流速的电磁流速计与插入电磁流量计以及组成电磁流速—水位法的明渠测量系统等。

我国早在 20 世纪 50 年代末就开始研制电磁流量计，60 年代初上海光华仪表厂开始向社会提供产品。1967 年由上海工业自动化仪表研究所、上海光华仪表厂、开封仪表厂、天津市自动化仪表三厂等参加，在上海工业自动化仪表研究所组织了全国电磁流量计统一设计。尽管时间不长，大家集思广益，提高了对电磁流量计的认识，在不到一年的时间设计开发出系列的国产产品。更重要的是这次全国电磁流量计统一设计为我国电磁流量计后来的发展打下基础，培养了人才。

20 世纪 70 年代中期，受先进工业国对电磁流量计的影响，我国电磁流量计理论的研究也进入了高潮。1975 年 6 月，著名物理学家、北京大学王竹溪教授和赵凯华教授受开封仪表厂之邀，对电磁流量计权重函数理论进行了严谨的数学解析，并授业讲演，带动了华中工学院、东北工学院、上海交通大学等众多高校积极参与电磁流量计理论的研究，并开发出我国的权重分布磁场电磁流量计产品。

我国的电磁流量计是较早、较成功地走引进国外先进技术以及和国外先进企业合资的改革之路的高科技产品之一。这不仅使电磁流量计骨干生产企业得以迅速发展，而且带动了其他生产电磁流量计的中小型企业的技术进步。目前，我国生产电磁流量计基本是以低频矩形波励磁为主，逐步进入权重磁场和智能化流量计时代。产品口径系列由 3mm 到 3000mm，测量精度在 $\pm 0.3\%R$ 或 $\pm 1\%FS$ 范围。生产厂家由 20 世纪 80 年代初期的 4 家发展到目前大约 30 多家；产量由年产不足千套到今天已年产近三万套。无论制造技术水平、开发能力还是市场发展，我国的电磁流量计与世界先进水平的距离在迅速地缩小。

我国 1980 年制定了电磁流量计行业标准。随着技术发展和进步，1999 年又进行了修订，等同采用 ISO 国际标准(ISO 9104:

1991 和 ISO 6817: 1992)的国家标准: GB/T 18659—2002 [封闭管道中导电液体流量的测量 电磁流量计的性能评定方法]和 GB/T 18660—2002 [封闭管道中导电液体流量的测量 电磁流量计的使用方法]已经颁布。使得今后我国的电磁流量计能够与国际接轨,为发展我国的电磁流量计创造了条件。

2. 电磁流量计的特点

电磁流量计由传感器和转换器组成。由于原理和结构的特点,传感器具有以下主要优点:

(1) 结构简单,无活动部件和阻碍被测介质流动的扰动件或节流件,不会发生管道堵塞、磨损等问题。因此,电磁流量计特别适用于测量液、固两相介质,譬如带有悬浮物、固体颗粒、纤维或粘度较大的导电性浆液。可用来测量污水、泥浆、矿浆、纸浆、化学纤维浆等介质的流量。由于测量管是直通管,不会残留介质,并便于清洗和消毒,因此也特别适合于食品和制药工业,用来测量玉米浆、果汁、酒液、药浆和血液等特殊介质的流量。

由于没有节流件,被测介质在传感器测量管内流动时,几乎无压力损失,仅消耗 10~20W 的电功率,这点与有节流的差压式流量计相比,其节能效果十分突出。以管径 $d = 1\text{m}$,流量 $q_v = 6000\text{m}^3/\text{h}$ 的管路为例,当采用文丘里管,配 40kPa 的差压变送器时,其永久性压力损失造成额外消耗泵的功率约为 10kW;当使用孔板流量计,配 40kPa 的差压变送器,额外消耗泵的功率约为 32kW。对于在节能要求越来越迫切的今天,节能被人们重视,节能成为电磁流量计发展的一大优势。

(2) 电磁流量计是一种测量体积流量的仪表,其测量不受流体的密度、温度、压力、粘度、雷诺数以及在一定范围内电导率变化的影响。电磁流量计只需用水作为试验介质进行标定,而不需要作附加修正就可用来测量其它导电性液体。这是其他流量计所不具备的优点。

(3) 电磁流量计测量范围很大。同一口径传感器,满量程流速在 0.3~15m/s 范围内任意设定,即上限范围度(rangeability)为