

电磁流量计干标定技术*

傅 新 胡 亮 谢海波 杨华勇

(浙江大学流体传动及控制国家重点实验室 杭州 310027)

摘要: 介绍电磁流量计干标定技术的研究现状及工业化应用前景, 阐述电磁流量计干标定原理。指出如何准确测量有效区域内各点磁场信息是电磁流量计干标定技术工业化应用的关键技术, 利用电磁流量计磁场的交变特性, 通过测量电磁感应所产生的其他物理量间接获取电磁流量计有效区域内磁场信息, 是解决此关键技术的有效途径, 并以此为基础重点分析了涡电场测量法与面权重函数法这两种新型干标定方法的测量原理、特点及实现方法。此项技术为我国开展电磁流量计干标定技术的研究及工业应用提供技术参考。

关键词: 电磁流量计 干标定 涡电场 权重函数

中图分类号: TH814.93

0 前言

电磁流量计作为一种高性能液体流量测量仪表, 具有测量精度高、量程宽、无压损和适合于大口径计量等独特优势, 其测量不受流体的密度、粘度、温度、压力以及一定范围内的电导率变化的影响^[1], 测量介质可以是粘性介质、浆液、悬浮液甚至多相流。经过近一个世纪的发展, 目前电磁流量计产品的计量精度已达到 $\pm 0.5\%$ 甚至更高, 口径范围由 3 mm 到 4 000 mm^[2], 其中直径 1 m 以上的大口径电磁流量计产品通常是高性能大口径液体流量计产品的首选。在水利工程、市政建设和环境保护等领域中, 这样的大口径电磁流量计具有非常广泛的应用。

目前, 电磁流量计普遍采用实流标定, 标定精度一般为 $\pm 0.2\%$ 。该标定方法的最大优点为可通过调整仪表内部设定系数来修正由于制造一致性差而引入的误差, 从而降低对产品制造一致性的要求, 因此被绝大多数电磁流量计厂家采用。但实流标定存在两个缺陷: ①大口径流量计实流标定装置制造价格昂贵, 标定成本极高。如: 实流标定 1.2 m 口径的仪表, 需要 250 kW 的水泵连续提供约 1.5 t/s 的流量, 标定时间约 2~4 h, 标定装置造价约 300 万英镑^[3]。②实流标定装置所产生的流场通常为理想流场, 而多数工业现场工况复杂, 流量计上、下游直管段长度往往难以达到要求, 从而使流量计的实际使用误差远远大于实流标定装置上所测出的误差。正因如此, 许多科学家热衷于研究权重磁场分

布的电磁流量计, 以期实现流速分布对测量精度的影响为零。此外, 现有实流标定装置的测量介质大多为水, 因此很难利用现有的实流标定装置对多相流、浆液、粘性介质等非常规介质进行标定, 在这类实流标定装置上进行模拟各种现场工况的流体运动学和动力学特性研究也十分困难。

基于以上原因, 流量计干标定技术作为一种无需实际流体便可实现流量计标定的技术, 一直被业界所推崇。超声波流量计、差压式流量计、涡街流量计、电磁流量计因其测量原理可追溯性好, 被认为是四种最适合干标定的流量计。但因干标定技术对相应流量计产品的一致性要求较高, 只有少数发达工业国家开展了相应研究。目前, 日本已成功实现涡街流量计干标定技术的工业化应用, 并建立了相应的工业标准《涡街流量计—流量测定方法》^[4]。在电磁流量计领域, 英国、俄罗斯两国的产品一致性较好, 因此其干标定方法研究也较为领先, 其中俄罗斯已成功实现电磁流量计干标定技术的工业化应用。我国在涡街流量计干标定技术上做过探索, 重庆工业自动化仪表研究所于 1990 年发布了《涡街流量计干标定研究报告》^[4], 是我国在此领域取得的宝贵成果。改革开放以来, 我国的电磁流量计产业得到了很好的发展, 电磁流量计厂家已从 20 世纪 80 年代的 4 家发展到目前的 30 多家^[2], 电磁流量计技术水平已接近发达国家, 制造水平的提高使不少厂家的产品一致性得到了本质性的改善。因此, 开展电磁流量计干标定技术推广与应用的时机已经成熟。

本文将通过分析电磁流量计的测量原理, 阐明电磁流量计干标定的原理及困扰其实现工业化应用的关键技术, 分析解决这一关键技术的有效途径及基于这一思想的两种实现方法, 并对其技术特点进

* 国家科技攻关计划(2005DFBA0008)和国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2006CB705400)资助项目。20060604 收到初稿, 20061222 收到修改稿

行评述。

1 电磁流量计干标定原理及关键技术

1.1 电磁流量计测量原理

电磁流量计测量原理如图1所示,管道内流动的导电液体切割磁力线,将在两端电极间产生电势差 ΔU , ΔU 与磁通量密度 B 、液体流速 v 符合弗来明右手定则^[2]。只要管道内部流场理想、磁场稳定, ΔU 的大小与管道内介质平均流速成严格的线性关系,从而通过测量 ΔU 的大小可确定管道内介质流量。

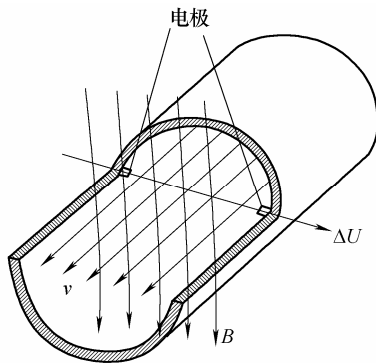


图1 电磁流量计测量原理

电磁流量计由一次传感器及二次仪表组成,二次仪表为一次传感器提供励磁电流,以通过一次传感器内的励磁线圈建立测量所需的磁场。一次传感器将介质实际流量转换为电极间电势差,由二次仪表将电极间电势差转换为显示流量。

1.2 实流标定技术

电磁流量计的实流标定通常分为整机标定与分离标定两种。整机标定即将一次传感器与二次仪表装成整机后在实流标定装置上进行标定,获取整机转换系数,修正仪表设定系数,完成标定;分离标定即将一次传感器与二次仪表分开标定,相应获取一次传感器的转换系数 K_{p1} 与二次仪表的转换系数 K_{p2} ,两者相乘得到整机转换系数,修正仪表设定系数,完成标定。 K_{p1} 与 K_{p2} 的含义如式(1)、(2)所示

$$K_{p1} = \frac{\Delta U}{Q_f} \quad (1)$$

$$K_{p2} = \frac{Q_d}{\Delta U} \quad (2)$$

式中 K_{p1} ——一次传感器转换系数

K_{p2} ——二次仪表转换系数

ΔU ——电极间电势差

Q_f ——介质实际流量

Q_d ——仪表显示流量

相对于整机标定,分离标定可实现电磁流量计的互换,因此被许多厂家所采用,但对产品的一致

性要求也相对提高。

1.3 干标定原理及关键技术

电磁流量计的干标定采用分离标定,与实流分离标定不同的是:其一次传感器转换系数的获取无需实际流量通过,而二次仪表转换系数的获取与目前许多国内厂家分离标定中采用的模拟器标定方法并无两样。因此,以下主要针对电磁流量计一次传感器的干标定技术展开论述。

通常由于被测介质的电导率不是很高(例如水和电解质),介质流动产生的二次磁场对测量管道内磁场的影响可以忽略,因此有效区域内任意一个介质微元切割磁力线在电极间产生的电势差可用式(3)表示

$$\Delta U_s = v \times B \cdot W \quad (3)$$

式中 v ——介质微元运动速度

B ——介质微元所在位置磁通量密度

W ——介质微元所在位置体权重函数,物理含义为:该介质微元切割磁力线所产生的感应电动势对两电极间的电位差所起的作用大小,其数值由几何位置、管道结构、电极距离与尺寸决定

ΔU_s ——单个介质微元切割磁力线所产生的电极间电势差

对 ΔU_s 在电磁流量计整个有效测量区域 τ 内积分,便可获得电极间电势差 ΔU ,如式(4)

$$\Delta U = \int_{\tau} v \times B \cdot W d\tau \quad (4)$$

由式(4)可知,若能获知电磁流量计有效区域 τ 内各点磁通量密度 B 与体权重函数 W ,无需实际介质便可求得各种流速分布下电极间电势差的大小,从而实现电磁流量计一次传感器的干标定。通常,体权重函数 W 表达式可利用Green函数 G 求解电磁流量计基本微分方程获得^[5],其数值只与几何位置、管道结构、电极距离与尺寸相关,只需测量管道结构、电极距离与尺寸便可获得整个有效区域内各点体权重函数的数值大小,但要准确获取有效区域内各点磁通量密度 B 显然不那么容易,利用探针逐点测量有效区域 τ 内三维磁场等方式已被证明无法满足干标定的高精度要求。因此,如何准确地获取有效区域内各点磁场信息便成为了困扰电磁流量计干标定技术应用的关键技术。

2 干标定有效途径及两种实现方法

为了准确地获取有效区域内各点磁场信息,逐点测量的方式显然行不通。目前解决此关键技术

有效方法为：利用电磁流量计磁场的交变特性，通过测量电磁感应所产生的其他物理量间接获取电磁流量计有效区域内的磁场信息。这样，无需直接测取电磁流量计内部磁场，甚至无需求解体权重函数 W 便可实现电磁流量计的干标定。英国 HEMP^[3, 6] 提出的涡电场测量法与俄罗斯 VELT^[7-10] 提出的面权重函数法正是基于这种思想：前者通过检测由磁场交变产生的涡电场强度获取磁场信息，实现电磁流量计一次传感器转换系数的测量，无需测量有效区域内各点磁通量密度 B 与体权重函数 W ；后者利用按面权重函数等值线绕制的感应线圈与电磁流量计励磁线圈的互感效应获取磁场信息，实现电磁流量计一次传感器转换系数的测量，无需测量有效区域内各点磁通量密度 B 。

2.1 涡电场测量法

2.1.1 测量原理

涡电场法的理论基础为：电磁流量计测量过程中，交变的磁场将伴随产生涡电场，该电场不受流速分布的影响，通过测量电磁流量计电极所在位置涡电场强度测取一次传感器转换系数。当一次传感器管段内速度分布平坦时，对于正弦信号励磁磁场的一次传感器，有效区域内任意点的速度 v 、电势 U 以及涡电场强度在管段轴向方向的分量 E_z 具有如式(5)所示关系，对于矩形脉冲信号励磁磁场则如式(6)所示^[6]

$$\frac{U}{v} = -\frac{E_z}{i\omega} \tag{5}$$

式中 ω —— 正弦励磁信号角频率

$$\frac{1}{v} \frac{\partial U}{\partial t} = -E_z \tag{6}$$

由于目前电磁流量计普遍采用矩形脉冲信号励磁，本文只针对矩形脉冲信号励磁磁场展开讨论。

基于以上理论，若将电磁流量计一次传感器如图 2 所示竖立放置，管段内充满被测介质(例如水)，磁场交变时水中也将产生一个涡电场^[3]。

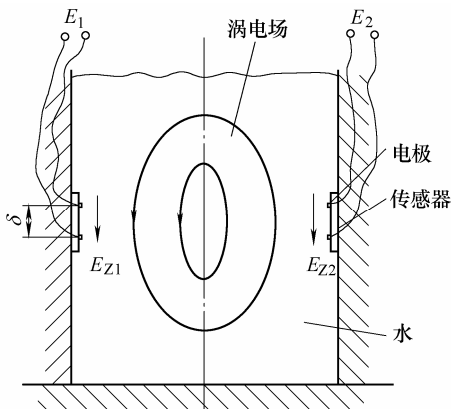


图 2 涡电场测量法原理

若在流量计两电极处各放入一个传感器，每个传感器由绝缘衬底及一对电极组成，每对电极间距离为 δ ，则传感器电极间将产生电势差 E_1 、 E_2 ，如式(7)、(8)所示^[3]

$$E_1 = E_{z1}\delta = \frac{1}{v} \frac{\partial U_1}{\partial t} \delta \tag{7}$$

$$E_2 = E_{z2}\delta = \frac{1}{v} \frac{\partial U_2}{\partial t} \delta \tag{8}$$

式中 U_1, U_2 —— 传感器所在位置，即流量计电极所在位置的电势

E_{z1}, E_{z2} —— 传感器所在位置，即流量计电极所在位置的涡电场强度

磁通量密度 B 、流量计电极间电势差 ΔU 及涡电场传感器电极间电压 E_1 、 E_2 的信号示意图如图 3 所示^[3]。

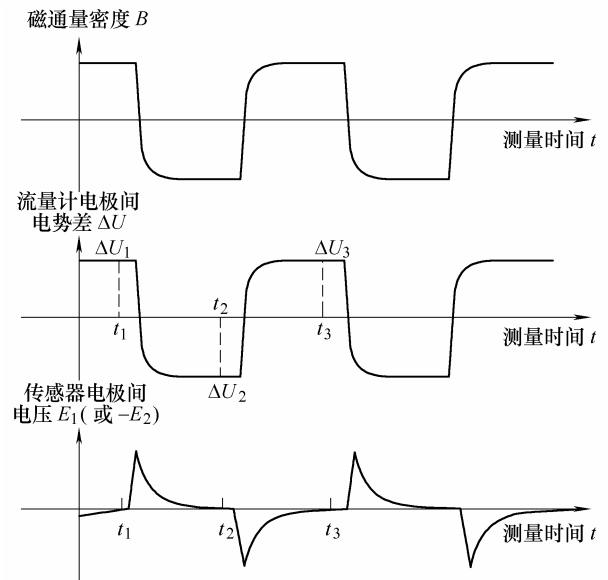


图 3 信号示意图

为了去除低频噪声信号的影响，二次仪表常测取 $(\Delta U_1 - \Delta U_2) - (\Delta U_2 - \Delta U_3)$ 转换为显示流量，而非简单地测取 $(\Delta U_1 - \Delta U_2)$ 或 ΔU_1 ^[3]，因此一次传感器的转换系数 K_{p1} 如式(9)所示

$$K_{p1} = \frac{(\Delta U_1 - \Delta U_2) - (\Delta U_2 - \Delta U_3)}{\frac{\pi}{4} D^2 v} \tag{9}$$

式中 ΔU_1 —— 正半周期上测量时刻为 t_1 时，流量计电极间电势差

ΔU_2 —— 负半周期上测量时刻为 t_2 时，流量计电极间电势差

ΔU_3 —— 正半周期上测量时刻为 t_3 时，流量计电极间电势差

v —— 介质平坦流速

D —— 测量管段内径

联立式(7)~(9)便可得到由涡电场传感器电极间输出电压 E_1 、 E_2 获得的电磁流量计一次传感器转换系数 K_{p1} 的计算式，如式(10)

$$K_{p1} = \frac{4}{\pi D^2} \times \frac{1}{\delta} \left[\int_{t_1}^{t_2} (E_1 - E_2) dt - \int_{t_2}^{t_3} (E_1 - E_2) dt \right] \tag{10}$$

从式(10)不难发现，只要测取测量管段内径，并对传感器引出的电压信号进行积分便可得到一次传感器的转换系数，从而实现电磁流量计一次传感器的干标定。

2.1.2 技术特点

涡电场检测法可在无需求解复杂的体权重函数，且无需逐点检测有效区域内各点磁通量密度的情况下，实现电磁流量计一次传感器的干标定。需测量参数相对较少，主要误差源^[3]为：①由于传感器电极间距离 δ 无法做到无穷小，而涡电场强度在管段轴方面的分量 E_z 沿着管段轴方向并非处处相等，因此将引入误差。②传感器电极本身的轴向宽度将增加电极间距离 δ 的不确定性，加大 δ 所引入的误差。③传感器厚度引入的误差。④传感器电极及引线等构成回路引入噪声磁通而带来的误差。根据 HEMP 的理论计算，对以上误差源进行理论修正后，此方法的基本误差可做到小于 $\pm 0.2\%$ ，符合干标定的精度要求。

此方法理论模型基于一次传感器管段内速度分布平坦的假设，而无法对非理想流场情况下的一次传感器精度进行检测。但在实流标定装置中，由于有上、下游直管段的保证，一次传感器管段内的流场为完全发展，速度分布趋于平坦，大口径电磁流量计在理想状态下的速度分布更是如此。因此此方法可避免实流标定装置的高成本，降低大口径电磁流量计的标定成本，但无法克服实流标定的第二个缺点。此外，在标定对象为小口径电磁流量计时，由于传感器及其电极尺寸的限制，测量精度将难以保证，因此此方法只适用于较大口径电磁流量计。

2.2 面权重函数法

2.2.1 测量原理

面权重函数法的理论基础是：按照电磁流量计一次传感器有效区域内的某一表面磁场的分布特性来恢复整个有效区域内空间磁场的特性^[7]。

因电磁流量计的测量通道内除励磁线圈产生的磁场外没有其他外界磁场源，因此磁场可由标量磁势来描述，可用通道表面上的标量磁位势单值地确定整个有效区域内的标量磁位势。在半径为 r 的通道内定义圆柱坐标系如下：一次传感器通道中心轴为 z 坐标，半径方向为 ρ 坐标，以电极所在位置为

起点逆时针方向为 θ 坐标，电极所在位置坐标为 $(z=0; \rho=r; \theta=\pm\pi)$ 。相应地，电极间电势差 ΔU 可用式(11)来表示^[8]

$$\Delta U = \int_S B_n W_n(z, \theta) dS \tag{11}$$

式中 $W_n(z, \theta)$ ——面权重函数

B_n ——磁通量密度的 S 面法向分量

S 取通道表面时， $W_n(z, \theta)$ 的表达式为^[8]

$$W_n(z, \theta) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-ikz) dk \sum_{\substack{\rho=0 \\ n=2\rho-1}}^{\infty} \frac{b_n(k)}{kI'_n(kr)} \cos n\theta \tag{12}$$

$$b_n(k) = \int dV \left[\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial G}{\partial z} v_\rho - \frac{\partial G}{\partial \rho} v_z \right) nI_n(k\rho) \sin n\theta + \left(\frac{\partial G}{\partial z} v_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial G}{\partial \theta} v_z \right) kI'_n(k\rho) \cos n\theta + \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial G}{\partial \theta} v_\rho - \frac{\partial G}{\partial \rho} v_\theta \right) ikI_n(k\rho) \cos n\theta \right] \exp(ikz) \tag{13}$$

式中 I_n ——Bessel 函数

I'_n ——Bessel 函数导数

G ——Green 函数

v_z ——流速 v 在 z 坐标方向上的分量

v_ρ ——流速 v 在 ρ 坐标方向上的分量

v_θ ——流速 v 在 θ 坐标方向上的分量

从式(12)不难看出，面权重函数 $W_n(z, \theta)$ 除了与体权重函数一样由几何位置、管道结构、电极距离与尺寸决定外，还包含了各点的流速分布信息。我国从俄罗斯引进的“POTOK”装置中， $W_n(z, \theta)$ 被用于按其等值线绕制线圈作为一次传感器干标定所用的 MFC 传感器。按照其操作手册，测量时以电极所在位置为参考点，将 MFC 传感器对称地放入通道中，如图 4 所示。

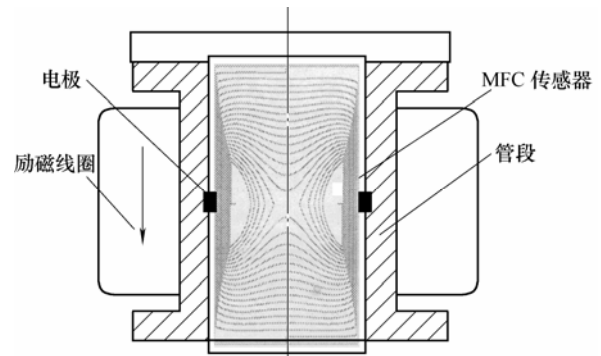


图4 面权重函数法测量原理

由于流量计励磁线圈与 MFC 传感器中线圈的互感作用，流量计磁场交变时，MFC 传感器将有电压信号输出，如图 5 所示^[9]。

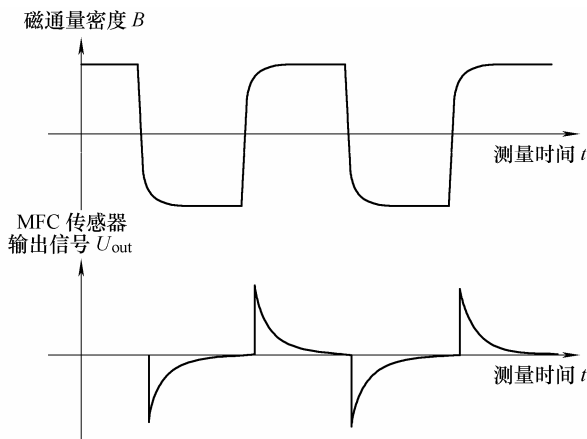


图 5 信号示意图

图 5 中 MFC 传感器输出信号 U_{out} 与一次传感器转换系数存在如下关系

$$K_{pl} = \frac{\Delta U}{Q_f} = K \int dt U_{out} \quad (14)$$

式中 K ——修正系数

式(14)中的积分运算由辅助电路完成,修正系数 K 可通过干湿标定对比试验获得,即以 N (具体数值由产品一致性决定)台已经过实流标定的一次传感器为样本进行干标定,通过实流标定数据与干标定数据的对比,获取干标定所需 K 的确切值。经过对比试验修正后的干标定装置可用于对与样本同口径的其他一次传感器进行干标定。

2.2.2 技术特点

面权重函数法无需逐点测量有效区域内各点磁通量密度,但需求解复杂的面权重函数 $W_n(z, \theta)$ 。该方法主要测量参数为管道结构、电极距离与尺寸,因此其主要误差源自于这些量的测量以及 MFC 传感器的制造误差。经 VELT 理论计算,该方法基本误差可控制在 $\pm 0.2\%$ 以内,符合电磁流量计干标定的精度要求。VELT 以上述理论为依据,制造了用于工业应用的电磁流量计及电磁热量表干标定装置“POTOK”,在全俄各电磁流量计企业中得到了广泛的应用。“POTOK”目前已有 8 个系列,测量口径从 25 mm 到 4 000 mm,最高精度达到 $\pm 0.2\%$ ^[10]。

由于面权重函数法的 MFC 传感器根据面权重函数 $W_n(z, \theta)$ 的等值线制得,而 $W_n(z, \theta)$ 包含了流速分布等流场信息,因此可根据实际流场制作不同 MFC 传感器,从而完成不同流场情况下的一次传感器干标定。装置亦可用于浆液、粘性介质及流体的运动学和动力学特性研究,甚至多相流对电磁流量计测量精度影响的研究,弥补了之前指出的实流标定的两大缺陷,具有较大的学术意义与实用价值。但装置使用前需要干湿标定对比试验进行修正,从

我国引进的“POTOK”装置来看,对比试验工作量较大。

3 结论

相对于目前普遍应用的实流标定技术,干标定技术在降低成本、模拟不同流场和介质方面具有独特的优势,工业化应用前景广阔。如何准确地获取有效区域内各点磁场信息是干标定技术实现工业化应用的关键所在。利用电磁流量计磁场的交变特性,测量电磁感应所产生的其他物理量间接获取电磁流量计有效区域内磁场信息,是实现干标定的有效方法,在此基础上,分析了基于这一方法的涡电场测量法与面权重函数法的测量原理、特点及实现方法。分析表明,涡电场测量法无需求解复杂的体权重函数和逐点检测有效区域内各点的磁通量密度,但它只能模拟速度分布平坦的流场情况,无法对非理想流场情况下的电磁流量计进行标定;面权重函数法可避免逐点检测有效区域内各点的磁通量密度,能实现各种流场环境的模拟,克服了实流标定的两大缺点,但需要用干湿标定对比试验进行修正,对比试验工作量较大。

参 考 文 献

- [1] 蔡武昌,应启夏. 新型流量检测仪表[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 蔡武昌,马中元,瞿国芳,等. 电磁流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [3] HEMP J. A technique for low cost calibration of large electromagnetic flowmeters[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2001, 12(2): 123-134.
- [4] 姜仲霞,姜川涛,刘桂芳. 涡街流量计[M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [5] SHERCLIFF J A. The theory of electromagnetic flow-measurement[M]. London: Cambridge University Press, 1962.
- [6] HEMP J. Theory of eddy currents in electromagnetic flowmeters[J]. J. Phys., 1991, 24(3): 244-251.
- [7] VELT I D. Metrological support to domestic heat meters[J]. Measurement Techniques, 2002, 45(12): 1 282-1 285.
- [8] ВЕЛЪТ И Д, ЗВЕНИГОРОДСКИЙ Э Г, МИХОЙЛОВА Ю В. Т.д. К вопросу о беспроливном способе экспериментального исследования электромагнитных расходомеров[J]. Магнитная Гидродинамика, 1976, 3: 131-136.

(下转第 36 页)