

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2025.02.001

燃气涡轮流量计非定点检测误差预测研究

张 琴^{1, 2}, 张 翰^{1, 2}, 李玮昊^{1, 2}, 翟楠希¹, 董新利¹

1.北京市燃气集团有限责任公司; 2.国家城镇燃气流量计量站

摘 要: 流量计的准确计量是保障对天然气贸易公平交接的关键技术, 其计量准确性可以通过检定进行判定, 检定所得的各流量点的示值误差是流量计计量准确性的定量表现, 是计量性能的重要判断依据之一。本文以燃气涡轮流量计为研究对象, 通过标准表比对法开展天然气实流检定实验, 分析了涡轮流量计的误差曲线特性, 并采用数值分析方法对非定点检测误差进行了预测分析, 线性内插法能较好地预测分界流量 (q_t) 以上非定点流量的示值误差, 位于低流量区的非定点流量无法通过线性内插较好地进行预测; 位于低流量区的非定点流量的示值误差可以通过多项式内插法 (如拉格朗日插值法) 进行预测, 预测偏差较线性内插法较小, 预测效果更佳。

关 键 词: 涡轮流量计; 实流检定; 误差曲线; 数值预测

1 引言

目前, 我国天然气贸易交接仍是采取体积计量方式, 通过流量计的测量完成贸易交接, 在城镇燃气行业, 大客户用户 (门站、电厂和供热厂等) 的交易气量占比较大, 在某些燃气公司, 几类大客户每年用气量可占公司总供气量的40%以上, 高达100亿 m^3 左右, 若该部分流量计计量精度偏差0.1%, 可能导致1 000万 m^3 气量的计量偏差, 对气量交接双方的经济利益影响重大。涉及大客户贸易交接所用流量计的准确性至关重要。

用于天然气计量的流量计种类较多, 包括涡轮流量计、超声流量计及腰轮流量计等。其中, 涡轮流量计由于其压力损失小、流量量程比宽、准确度高、抗振和抗脉动流性能好等特点, 在我国天然气领域得到

广泛应用, 尤其是大客户的气量交接中, 在天然气贸易计量中发挥着重要作用。涡轮流量计属于速度式流量计, 主要由涡轮、导流部件、前置放大器、感应线圈以及外壳等构成, 依据动量守恒定律进行计量, 当气体流经管道中安装的流量计时, 冲击涡轮的叶片, 使涡轮随之旋转。涡轮的旋转速度与气体的流速成正比关系, 从而可根据叶轮转速求得气体流速, 最终计算出通过管道的气体流量。

目前, 涡轮流量计的准确性通过离线周期检定进行保障, 按照国家计量检定规定, 周期检定时, 用户需将流量计从使用现场中拆卸, 运输至有检定能力的技术机构进行检定, 检定合格后, 流量计运输回使用现场, 重新安装调试后才能使用。检定工作依据现行检定规程JJG1037-2008《涡轮流量计检定规程》开展, 该检定规程要求流量计的检定应包含以下

[第一作者简介] 张琴, 硕士学历, 中级工程师, 主要负责计量及固定资产管理工作。

流量点: $q_{\min}$ 、 q_1 、 $0.4q_{\max}$ 、 $q_{\max}$; 对于准确度等级优于0.5%的流量计, 增加 $0.25q_{\max}$ 和 $0.7q_{\max}$ 两个流量点; 对于准确度等级优于0.5%, 且量程比大于20:1的流量计, 再增加一检定点, 其流量为 $0.1q_{\max}$, 每个流量点的检定次数应不少于3次, 对于准确度等级优于0.5级的流量计, 每个流量点的检定次数应不少于6次。城镇燃气行业大客户交接所用涡轮流量计多为准确度等级为1.0, 量程比大于20:1的流量计, 在检定过程中, 只需检定规程规定的4个流量点, 而非定点使用情况(检定点与被检流量计工作时的实际流量点不一致的情况)下的相对示值误差并未检定, 国内普遍采用线性内插法, 即通过相邻流量点及误差, 采用线性内插的方式计算得到相邻流量间的误差, 线性内插法计算所得的非定点示值误差准确性如何有待研究。

2 误差曲线特性分析与预测

2.1 实验方案设计

涡轮流量计是速度式流量计的1种, 由涡轮、导流器、前置放大器、感应线圈和壳体等部件组成。它以动量守恒原理为基础, 当气体进入安装在管道上的气体流量计时, 流体通过整流器后冲击叶轮叶片, 流量计的叶轮受力旋转, 叶轮的旋转速度与气体流速成正比, 可根据叶轮转速求出气体流速, 从而计算得出通过管道的气体流量。运用磁电转换装置或者机械输出装置可将叶轮旋转数转化成电脉冲, 送入涡轮流量计的二次仪表进行计算和显示, 由单位时间电脉冲数和累计电脉冲数反映出被测流体介质的瞬时流量和累计流量。

依据涡轮流量计的检定规程, 相关技术机构需要对涡轮流量计的外观质量、随附文件、示值误差和重复性等方面进行检定。目前, 普遍采用气体流量标准表法来标定涡轮流量计, 这种方法通过在相同的时间段内让流体依次流过标准流量计和被检流量计, 对比两者的流量值来评估被检流量计的准确度。这种检定装置包括流体供应源、试验管道系统、标准流量计、流量控制阀以及其他辅助设备。由于其操作简便且检定成本较低, 逐渐获得了业界的广泛认可, 成为检定流量计的常用方法。

本文的实验即采用标准表法开展, 由于大客户用

气量较大, 进行气量交接时, 往往选择大口径流量计进行计量, DN150及以下的气体涡轮流量计极少用于大客户交接, 同时结合实验条件限制, 本文选用口径为DN200、DN250、DN300的3种涡轮流量计作为实验用被检流量计。首先将被检流量计安装到试验管路上, 按照检定规程的要求设置检定方案, 在检定方案的设计上, 流量检定点除了设置规程规定的4个流量点($q_{\min}$ 、 q_1 、 $0.4q_{\max}$ 、 $q_{\max}$)外, 还需在这4个流量点两两中间插入非定点流量, 即检定多个流量点, 包括规程要求的4点流量和规程未作要求的非定点流量, 每个流量点的检定次数不低于3次; 然后启动场站生产程序, 进行开阀、调流、稳流、稳温、稳压, 待流量、压力、温度稳定后, 启动检定程序开始检定; 最后记录每个流量点每一次对应的示值误差, 从而计算每个检定流量点的示值误差, 形成实验数据库。示值误差由被检流量计的一段时间内的累积流量值与标准流量计的累计流量值比较得出, 根据式(1)和(2)计算流量计的相对示值误差:

$$E_{ij} = \frac{V_{ij} - (V_s)_{ij}}{(V_s)_{ij}} \quad (1)$$

式中 E_{ij} 为第 i 个检定点第 j 次检定时被检流量计的相对示值误差, %; V_{ij} 为第 i 个检定点第 j 次检定时流量计显示的累积流量值, 单位为 m^3 ; $(V_s)_{ij}$ 为第 i 个检定点第 j 次检定时标准表换算到流量计处状态的累积流量值, 单位为 m^3 。

第 i 个检定点被检流量计的相对示值误差按式(2)计算:

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (2)$$

2.2 误差曲线定性分析

2.2.1 误差曲线趋势分析

以实验所得数据, 绘制相应的误差曲线, 根据实验方案, 该实验所得误差曲线分为两类: (1) 由4个规程规定的检定点所绘制的误差曲线; (2) 在4个检定点的基础上增加了非定点检定, 由多个检定点数据所绘制的误差曲线。实验结果如图1—图6所示, 由图1—图6可知: (1) DN200和DN250同一种型号的流量计误差曲线整体趋势变化相似, 随着流量的增大, 流量计的示值误差曲线呈现出下降趋势, $q_{\max}$ 点示值误差最负, 这意味着, 若这些流量计在接近满量程的

情况下使用时,则实际交接出去的气量比计量的气量多;(2) DN300同一种型号的流量计误差曲线整体趋势变化相似,在分界流量 q_L (以下简称 q_L)以下,随着流量的增大,流量计的示值误差曲线呈现出下降趋势, q_L 以上,误差曲线走势发生变化,随着流量的增大,流量计的示值误差曲线呈现出上升趋势;(3)流

量计的计量特性在 q_L 点附近存在较大波动,特别是低流量区(q_L 以下),误差曲线线性较差, $0.4q_{\max}$ 后的误差曲线线性较优,计量性能趋于稳定。

2.2.2 不同检定点确定的误差曲线特性对比

为了进一步对比分析由4点绘制的误差曲线和多点绘制的误差曲线的区别,本文在3种口径的涡轮流

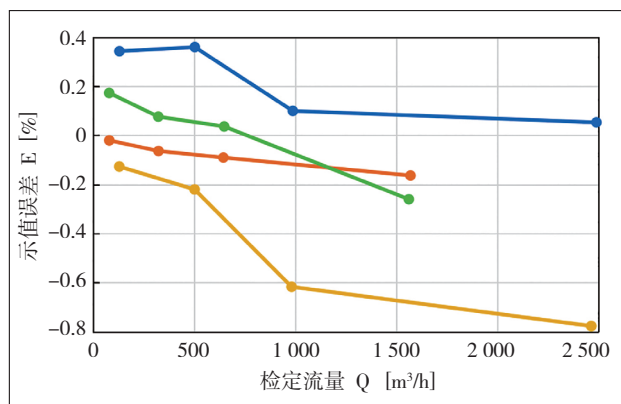


图1 4台DN200 4点误差曲线

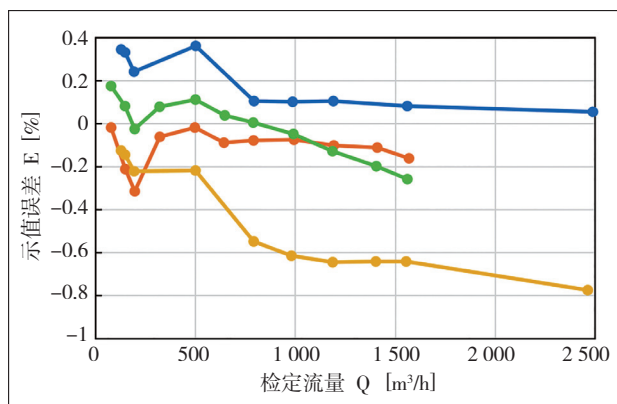


图2 4台DN200多点误差曲线

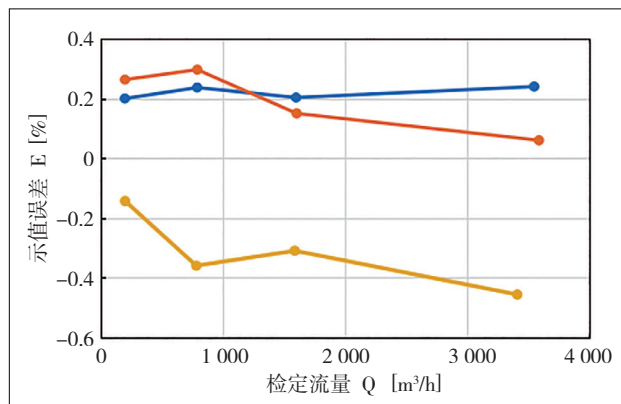


图3 3台DN250 4点误差曲线

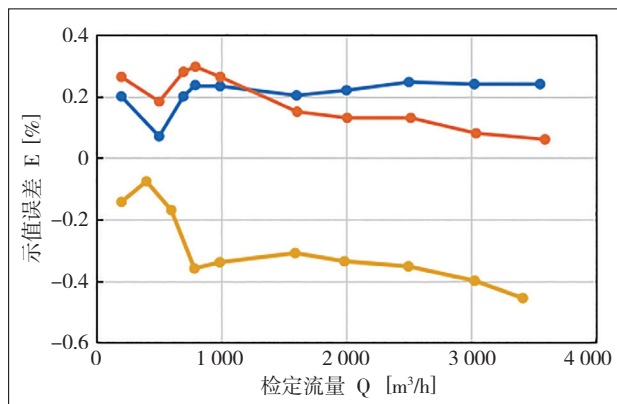


图4 3台DN250多点误差曲线

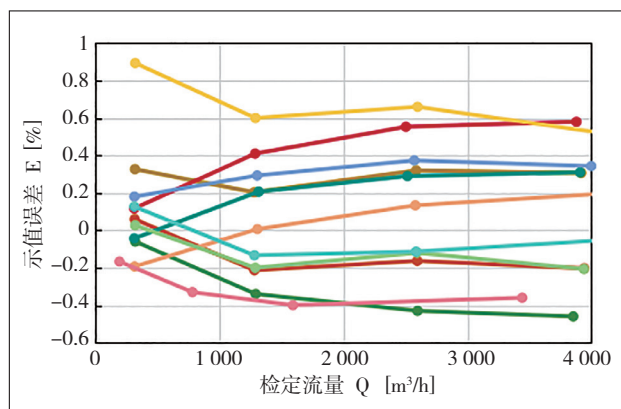


图5 11台DN300 4点误差曲线

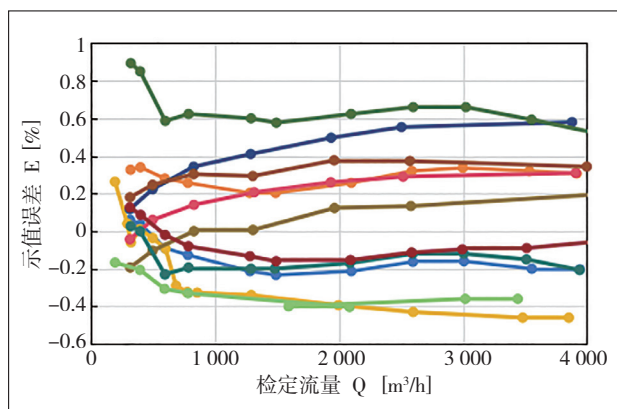


图6 11台DN300多点误差曲线

量计中,分别选择3台作为代表,将每台流量计的4点误差曲线和多点误差曲线进行对比。曲线对比见图7、图8和图9(实线为4个点绘制的误差曲线,虚线为多点绘制的误差曲线),可知:(1)对于同1台

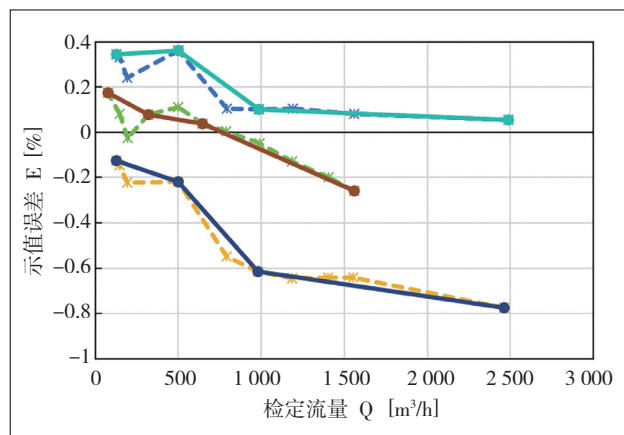


图7 3台DN200 4点和多点误差曲线对比图

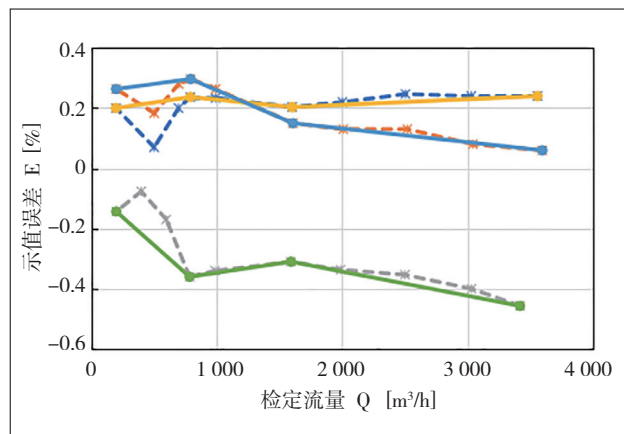


图8 3台DN250 4点和多点误差曲线对比图

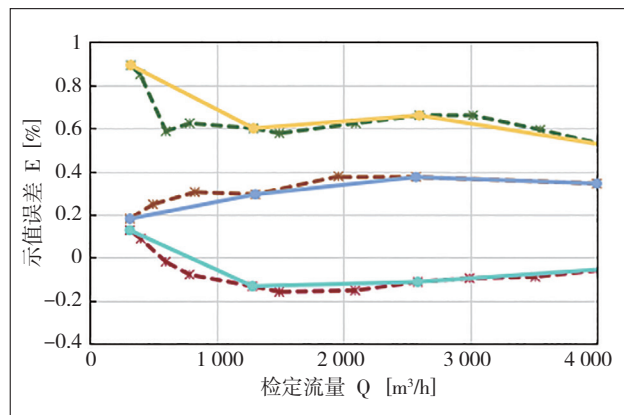


图9 3台DN300 4点和多点误差曲线对比图

涡轮流量计,4个检定点数据生成的曲线与多个检定点数据生成的曲线存在差异,主要表现在 q_t 点附近, $0.4q_{max}$ 后的曲线基本一致,符合性极高,流量计的计量性能在 q_t 点附近会发生较大变化;(2)4点误差曲线和多点误差曲线在低流量区符合性较差, q_{min} 和 q_t 两点绘制的误差曲线难以准确地反应流量计在低流量区的计量特性;(3)从 q_t 点后,4点误差曲线和多点误差曲线的符合性逐渐变高, q_t 与 $0.4q_{max}$ 两点绘制的误差曲线与加密检定生成的误差曲线趋势较相似,而 $0.4q_{max}$ 后误差曲线符合性最高,曲线基本能完成重合。

2.3 非定点示值误差预测

2.3.1 线性内插预测

本节采用目前国内普遍应用的线性内插法对非定点流量的示值误差进行预测,以上述DN200、DN250和DN300的3台涡轮流量计为对象,基于规程规定的4个检定点数据,采用线性内插法预测非定点流量的示值误差,预测结果见图10、图11和图12。由图10—图12可知,无论流量计口径大小,示值误差的线性预测偏差表现出在低流量区最大,随着流量的增大,特别是在 $0.4q_{max} \sim q_{max}$ 区间内,线性预测的偏差逐渐变小,效果最好。

分析可知:(1)3台DN200流量计预测偏差在 $-0.06\% \sim 0.15\%$ 之间,其中预测偏差最大值对应的流量点分别是 $194\text{m}^3/\text{h}$ 、 $195\text{m}^3/\text{h}$ 、 $198\text{m}^3/\text{h}$,偏差最小值对应的流量点分别是 $1561\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1188\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1187\text{m}^3/\text{h}$;

(2)3台DN250的流量计预测偏差在 $-0.14\% \sim 0.15\%$ 之间,其中预测偏差最大值对应的流量点分别是 $502\text{m}^3/\text{h}$ 、 $503\text{m}^3/\text{h}$ 、 $399\text{m}^3/\text{h}$,偏差最小值对应的流量点分别是 $990\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2007\text{m}^3/\text{h}$ 、 $987\text{m}^3/\text{h}$;(3)3台DN300的流量计预测偏差在 $-0.15\% \sim 0.22\%$ 之间,其中预测偏差最大值对应的流量点分别是 $830\text{m}^3/\text{h}$ 、 $602\text{m}^3/\text{h}$ 、 $788\text{m}^3/\text{h}$,偏差最小值对应的流量点分别是 $1962\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2099\text{m}^3/\text{h}$ 、 $2995\text{m}^3/\text{h}$ 。预测偏差最大的情况均出现于低流量区。

由此可以发现,预测偏差的程度主要取决于每台涡轮流量计自身的误差曲线,当曲线趋势变化缓慢,对非定点流量点预测偏差的影响也就变小。低流量区的线性预测偏差最大,预测效果最差,这是由于示值误差在低流量区发生显著变化,线性较差,线性内插带来较大的误差。

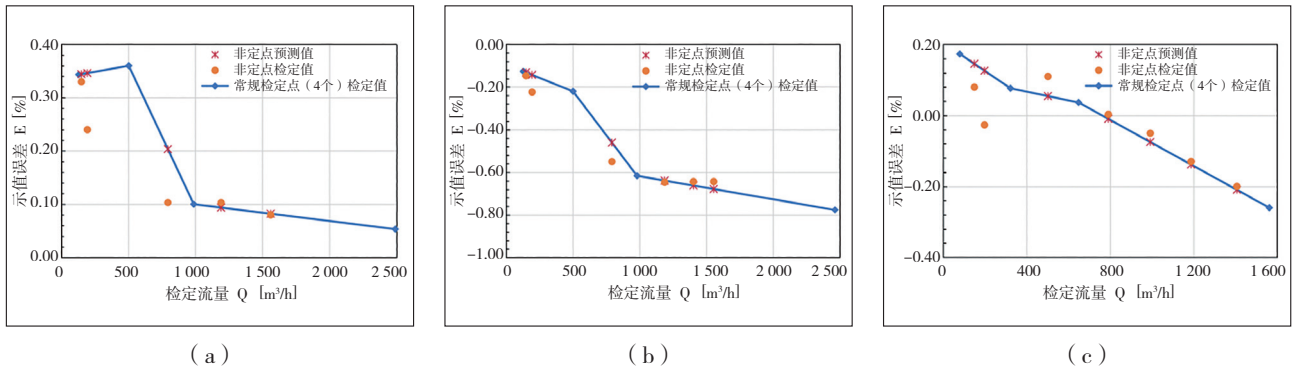


图10 DN200线性预测对比

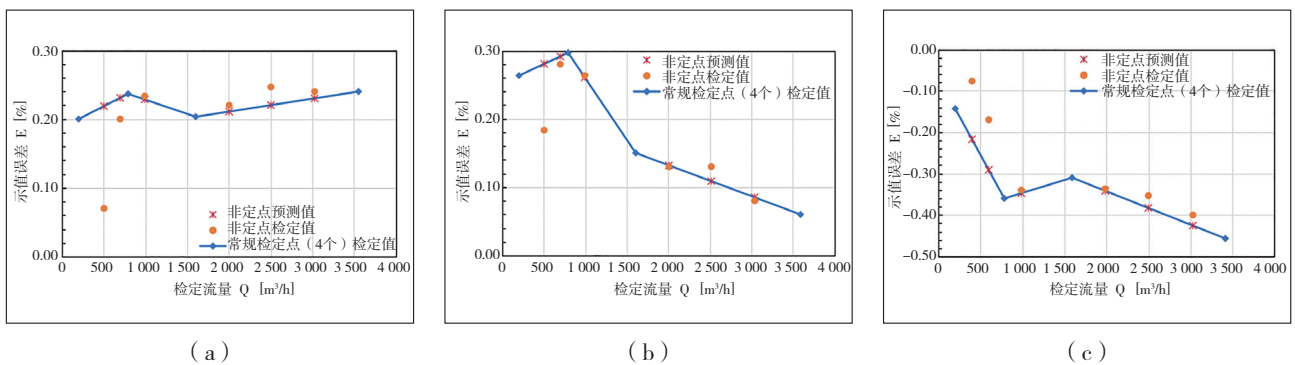


图11 DN250线性预测对比

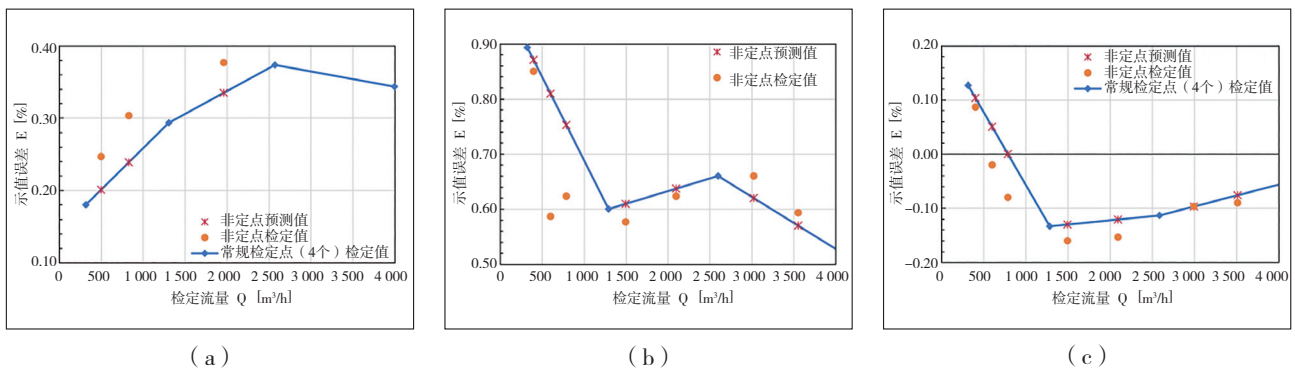


图12 DN300线性预测对比

2.3.2 拉格朗日插值预测

由于流量计在低流量区的误差曲线线性较差,无法通过线性内插较好地预测位于低流量区的非定点流量的示值误差,本节根据实验所得的低流量区流量的示值误差,采用多项式插值方法对低流量区的非定点流量进行预测,以期提升预测效果。

目前,常用的多项式插值有拉格朗日插值、埃米尔特插值和牛顿插值等,其中,拉格朗日插值仅需

1组离散数据点,不需要额外的导数信息,适用于任何数量的点,能够构建出一个精确契合给定数据点的多项式模型,有效捕捉区域内复杂的非线性变化,对数据点间的随机波动应对稳健。因此,本文选择拉格朗日插值法对低流量区的非定点流量进行示值误差预测,通过MATLAB编程实现,并将其预测值和线性内插法的预测值进行对比,对比结果见表1。

由表可知,拉格朗日插值法的预测偏差比线性内

表1 拉格朗日插值预测对比

流量计规格	非定点流量 (m³/h)	检定值 (%)	线性内插预测		拉格朗日插值预测	
			预测值 (%)	偏差 (%)	预测值 (%)	偏差 (%)
DN200	194.94	0.240 0	0.346 2	-0.106 2	0.311 7	-0.071 7
	195.54	-0.223 3	-0.143 1	-0.080 2	-0.185 8	-0.037 5
	198.30	-0.026 7	0.126 2	-0.152 9	0.046 2	-0.072 9
DN250	502.18	0.070 0	0.218 8	-0.148 8	0.161 5	-0.091 5
	503.02	0.183 3	0.280 4	-0.097 1	0.259 4	-0.076 1
	599.09	-0.170 0	-0.291 2	0.121 2	-0.091 5	-0.078 5
DN300	830.43	0.303 3	0.238 7	0.064 6	0.314 4	-0.011 1
	602.03	0.586 7	0.809 4	-0.222 7	0.565 9	0.020 7
	788.40	-0.080 0	0.000 0	-0.080 0	-0.111 7	0.031 7

插法的预测偏差小，在低流量区，由于误差曲线的非线性，采用拉格朗日插值法进行非定点流量示值误差预测效果更佳。

3 结论与建议

3.1 结论

本文以涡轮流量计为研究对象，通过开展检定实验，获得流量点—示值误差的数据，对这些数据进行统计分析发现，涡轮流量计的误差曲线特性在 q_L 附近会发生显著变化，低流量区的误差曲线线性最差，随着流量的增大，线性逐渐变优， q_L ~ $0.4q_{max}$ 间的误差曲线线性明显优于低流量区的曲线， $0.4q_{max}$ 后的误差曲线线性最优。

在实验数据定性分析的基础上，对非定点流量的示值误差进行预测，预测结果显示：线性内插法能较好地预测 q_L 以上非定点流量的示值误差，位于低流量区的非定点流量无法通过线性内插较好地进行预测；位于低流量区的非定点流量的示值误差可以通过多项式内插法（如拉格朗日插值法）进行预测，预测偏差较线性内插法较小，预测效果更佳。

3.2 建议

为了更加准确地反映流量计的计量性能，建议在实际检定规程中，加密检定流量点，特别是 q_L 附近的流量点，从而提高误差曲线的准确性。若需要根据有

限的流量点的示值误差对其他流量点的示值误差进行预测时，位于高流量区的流量点可以通过线性内插进行预测，而低流量区的示值误差则建议在加点检定的基础上，通过多项式内插法（如拉格朗日插值法）进行预测。

参考文献

[1]JJG 1037-2008涡轮流量计检定规程[S].北京:中国计量出版社,2008.

[2]蔡兆生.涡轮流量计和腰轮流量计检定周期内仪表系数变化分析[J].中国计量,2024(8):113-117.

[3]李晓宇,刘敦利.气体涡轮和腰轮流量计在比对过程中的计量性能分析[J].计量技术,2014(8):60-63.

[4]郑建梅,梁永超,张伟伟,等.对气体涡轮流量计仪表系数稳定性的分析[J].城市燃气,2007,38(6):9-11

[5]孙晓云.涡轮流量计检定结果不确定度评定[J].计量与测试技术,2019,46(10):132-134.

[6]王玉龙.若干工况条件下涡轮流量计性能的研究[D].上海工程技术大学,2016.

[7]朱丽娜.探讨气体涡轮流量计精度影响因素及检定方法[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(10):20.

[8]程亚杰,滕文盛.标准表法在液体流量计检定中的应用[J].工业计量,2003,(01):23-24.

[9]徐英华.流量计量基础知识系列讲座第五讲流量计的检定(一)[J].中国计量,2014,(10):112-115.