

数字压力计不确定度的系统评定与计算

□李嘉莹 李铮 刘昭君

天津市产品质量监督检测技术研究院检测技术研究中心

【摘要】数字压力计作为一种核心压力测量器具，已广泛应用于工业生产、科学实验、计量检定等重要领域，其测量结果的准确性直接影响实验数据可靠性。测量不确定度作为测量结果准确性的重要参数，是判别测量结果有效性的重要依据。本文以0.1级、量程为(0~6) MPa的数字压力计作为被校对象，以0.02级、量程为(-0.08~7) MPa的数字压力计作为标准器，根据JJG 875-2019《数字压力计检定规程》的技术要求与JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的评定方法，进行数字压力计不确定度的评定分析。通过阐述压力计工作原理及测量方法、构建测量用数学模型、分析不确定度来源并进行测量评定，得出数字压力计的合成不确定度及扩展不确定度。本文所提出的不确定度评定的方法及流程，可为数字压力计的检定校准及质量控制提供技术依据，提升测量结果的可信度。

【关键词】数字压力计；不确定度评定；示值误差

文献标识码：A

文章编号：1003-1870 (2026) 04-0043-04

Systematic Evaluation and Calculation of Measurement Uncertainty for Digital Pressure Gauges

【Abstract】 As a core pressure measuring instrument, the digital pressure gauge is widely used in key fields such as industrial production, scientific experimentation, and metrological verification. The precision and accuracy of its measurement results directly affect the reliability of experimental data. Measurement uncertainty, as a key parameter of measurement accuracy, serves as a fundamental basis for judging the validity of measurement results. This paper takes a digital pressure gauge with an accuracy class of 0.1 and a measuring range of (0 to 6) MPa as the device under test, and a digital pressure gauge with an accuracy class of 0.02 and a measuring range of (-0.08 to 7) MPa as the reference standard. According to the technical requirements of the verification regulation JJG 875-2019 Digital Pressure Gauges and the evaluation method of JJF 1059.1-2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement, an evaluation analysis of the measurement uncertainty for the digital pressure gauge is conducted. By elaborating on the operating principle and measurement method of the pressure gauge, constructing a mathematical model for the measurement, analyzing the sources of measurement uncertainty, and performing the measurement evaluation, the combined standard uncertainty and the expanded uncertainty of the digital pressure gauge are obtained. The uncertainty evaluation method and procedure proposed in this paper can serve as a technical basis for the verification, calibration, and quality control of digital pressure gauges, thereby enhancing the reliability of measurement results.

【Keywords】 digital pressure gauge; evaluation of uncertainty; indication error

引言

现代工业飞速发展,无论是在石油化工、航空航天等重要领域,还是生物医药、供电供热等日常领域,压力作为一种关键参数,其测量准确性和精确度将对生产安全及产品质量产生巨大影响。数字压力计相比于传统压力表,准确度等级更高且读数更加直观方便,测量范围也有所提高,可适配更多应用场景。随着科学技术的不断进步,对各类仪器的测量精确度要求也日渐提升,高精度等级的数字压力计在实际应用场景中越发常见。其测量结果的准确性受到测量方法、测量仪器、测量环境以及测量手法等多重因素的影响,按照我国计量技术规范及国际计量委员会的要求,计量所得的测量结果都应具备不确定度说明,以表征测量结果的准确度。数字压力计作为测量压力的主要仪器,其测量不确定度有时会直接影响被检仪器量值传递的准确性和合格性。可见,对数字压力计进行测量不确定度的评定与分析,不仅能保证量值传递的准确性,更是评估测量质量的核心指标。

目前国内外相关领域已在数字压力计的不确定度评定与分析方面取得一定成果,但仍有部分成果并未依照最新版《数字压力计检定规程》进行分析研究,具有一定的落后性和局限性,进而影响评定结果的准确性。基于此种情况,本文将依照JJG 875-2019《数字压力计检定规程》与JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规范要求,系统性构建一种数字压力计不确定度评定分析体系,全面识别不确定分量来源,规范各分量量化方法,完整展示不确定度评定的全流程,为同类型仪表的计量检定工作提供规范化的参考方案。

1 数字压力计测量不确定度评定方案设计

1.1 数字压力计工作原理

数字压力计是一种可将被测压力信号转换为可测量电信号的电子设备,当被测压力作用于压力传感器的敏感元件时,将导致元件产生形变,此时传感器将按照压力的大小输出对应的模拟电信号。通过放大、滤波、A/D转换等处理后,将模拟信号转换为数字电信号,直接显示在仪表显示屏或配套设备上。根据读取数据方式,数字压力计可分为本地读取型和远程传输型。本文所选被校对象为0.1级本地

读取型数字压力计,测量范围为(0~6) MPa,具备测量准确度高、响应速度快、读数便捷误差较小等优点,适用于各类工业测量和高精度测量场景。

1.2 测量方法

(1) 压力计应在校准环境条件下放置2h后方可进行校准。

(2) 根据压力计实际使用工作介质选取校准用工作介质,当压力计明确要求禁油时,应采取禁油措施。

(3) 校准前应采用人工干预的方法调整校准装置或压力计,确保两者的受压点在同一水平面上。

(4) 校准点的选取及校准循环次数、准确度等级为0.05级及以上的压力计,校准点不少于10点(含零点)。准确度等级为0.1级及以下的压力计校准点不少于5点(含零点),所选取的校准点应较均匀地分布在全量程范围内。准确度等级为0.05级及以上的压力计,升压、降压校准循环次数为2次;0.1级及以下的压力计,校准循环次数为1次。

(5) 示值校准前应做1~2次升压或疏空试验。校准中升压或疏空和降压应平稳,避免有冲击和过压现象。

(6) 采用直接比较法校准数字压力计。在规定的条件下,将数字压力计安装在计量标准装置上,密封无泄漏。当整个加压系统平衡时,分别读取计量标准器和数字压力计的示值,数字压力计的压力值与计量标准器的压力值之差即为数字压力计的示值误差。在各校准点上应等待压力值稳定后再读数。

1.3 构建测量模型

根据JJG 875-2019《数字压力计检定规程》中对核心参数的定义,建立数字压力计示值误差 ΔP 数学模型:

$$\Delta P = P_i - P_s$$

其中, ΔP 为被检压力计的示值误差(MPa); P_i 为被检压力计各点的正、反行程示值(MPa); P_s 为标准器示值(MPa)。

1.4 不确定度来源分析

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》规范要求及构建的测量模型,可将数字压力计示值误差测量不确定度来源分为以下4类:

(1) 标准器引入的不确定度 $u(P_{s1})$:由标准器自

身的示值误差、重复性误差等引起的系统误差，可根据标准器溯源证书确定。

(2) 被检数字压力计测量重复性引入的不确定度 $u(P_{x1})$ ：指在相同测量环境下，对被检压力计同一测量点进行多次重复测量所得的不确定度，属于A类不确定度分量。

(3) 被检数字压力计分辨率引入的不确定度 $u(P_{x2})$ ：由被检压力计最小显示分度值（即分辨率）引起的示值估读误差所产生的不确定度，按B类方法进行评定。

(4) 其他潜在不确定来源 $u(P_{other})$ ：由于人员读数误差、环境温度波动、工作介质高度差或压力源输出稳定性等原因所引入的不确定度。

2 标准不确定度评定

2.1 A类标准不确定度分量评定（测量重复性）

测量重复性引起的不确定度可通过在相同测量条件下，对数字压力计各被校点进行多次重复测量获得。本文使用0.02级数字压力计作为标准器，对0.1级被校数字压力计各测量点进行6次正、反行程共12次测量，测量值如表1所示。

表1 测量结果

校准点 MPa	测量状态	第1次 MPa	第2次 MPa	第3次 MPa	第4次 MPa	第5次 MPa	第6次 MPa
0	正行程	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	反行程	0.0001	0.0000	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001
1.5	正行程	1.4997	1.4997	1.4997	1.4996	1.4997	1.4996
	反行程	1.4998	1.4998	1.4998	1.4998	1.4997	1.4997
3	正行程	2.9995	2.9995	2.9995	2.9994	2.9994	2.9994
	反行程	2.9996	2.9996	2.9996	2.9995	2.9995	2.9995
4.5	正行程	3.9991	3.9991	3.9991	3.9990	3.9990	3.9991
	反行程	3.9992	3.9992	3.9992	3.9991	3.9991	3.9991
6	正行程	5.9985	5.9985	5.9985	5.9984	5.9984	5.9985
	反行程	5.9986	5.9985	5.9985	5.9985	5.9985	5.9986

根据贝塞尔公式 $S_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12}(x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ 计算出各测量点的单次实验标准偏差，实际测量以正反行程各1次（共2次）的测量结果平均值作为测量结果，则平均值的标准偏差为 $\bar{S} = \frac{S_i}{\sqrt{2}}$ 。为保证所有测量点的不确定度都被包含，选取各测量点中标准偏差最大值进行下一步计算，则由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u(P_{x1}) = \bar{S} = \frac{S_i}{\sqrt{2}} = 0.00010\text{MPa}$$

2.2 B类标准不确定度分量评定

(1) 标准器引入的不确定度：本文使用的标准器为0.02级、测量范围(-0.08~7)MPa的数字压力计，其最大允许误差为 $0.02\% \times 7\text{MPa} = 0.0014\text{MPa}$ ，最大允许误差按均匀分布处理，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，按B类方法进行评定。可得由标准器引入的不确定度为：

$$u(P_{s1}) = \frac{0.0014}{\sqrt{3}} = 0.00081\text{MPa}$$

(2) 被校数字压力计分辨率引入的不确定度：被校数字压力计的分辨力为0.0001MPa，即最小读数单位为0.0001MPa。对于数字显示仪器，分辨力引入的误差半宽 $a = \text{分辨力}/2 = 0.00005\text{MPa}$ ，误差服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，因此：

$$u(P_{x2}) = \frac{0.00005\text{MPa}}{\sqrt{3}} = 0.00003\text{MPa}$$

(3) 其他潜在不确定来源：经多次实验分析，在整个实验过程中可通过严格控制实验环境温度、稳定压力输入源、保持被检数字压力计与标准器压力输入端口在同一水平面上等方法来减少潜在不确定对测量结果的影响。人员读数时在数显屏上直接读取到无估读的准确数据，避免了估读产生的误差。综上所述，这些潜在来源对测量结果影响较小，可忽略不计。

$$u(P_{other}) = 0$$

2.3 不确定度分量汇总

汇总各类标准不确定度分量如表2所示。其中被校数字压力计的示值对应的标准不确定度，由分量被校数字压力计测量重复性 $u(P_{x1})$ 和被校数字压力计

分辨力 $u(P_{x2})$ 合成所得，可知两者相互独立，则示值 P_x 所对应的标准不确定度计算如下：

$$u(P_x) = \sqrt{u^2(P_{x1}) + u^2(P_{x2})} = 0.00010 \text{ MPa}$$

表2 标准不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	评定方法	标准不确定度/MPa
1	被校数字压力计测量重复性 $u(P_{x1})$	A类	0.00010
2	被校数字压力计分辨力 $u(P_{x2})$	B类	0.00003
3	被校数字压力计示值总不确定度 $u(P_x)$	——	0.00010
4	标准器引入的不确定度 $u(P_{s1})$	B类	0.00081
5	其他潜在不确定来源 $u(P_{other})$	B类	忽略不计

3 合成标准不确定度计算与扩展不确定度计算

3.1 合成标准不确定度

各分量相互独立，合成标准不确定度采用方和根法计算，带入表2中各不确定度分量数值，其他潜在不确定来源忽略不计，可得：

$$u_c(\Delta P) = \sqrt{u^2(P_x) + u^2(P_{s1})} = 0.00082 \text{ MPa}$$

3.2 扩展不确定度

依照JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》规范要求，选取包含因子 $k=2$ （包含概率 $p \approx 95\%$ ），可得扩展不确定度公式 $U=k \cdot u_c(\Delta P)$ 。带入3.1所得数据：

$$U = k \cdot u_c(\Delta P) = 2 \times 0.00082 \text{ MPa} = 0.0017 \text{ MPa}$$

$$U_{rel} = \frac{0.0017 \text{ MPa}}{6 \text{ MPa}} = 0.03\%$$

4 评定结果论证

根据JJG 875—2019《数字压力计检定规程》要求：检定时，标准器的测量范围应大于或等于被校压力计的测量范围，标准器的最大允许误差绝对值应不大于被校压力计最大允许误差绝对值的1/3。已知本次试验中的标准器等级为0.02级，测量范围(-0.08~7)MPa，最大允许误差为 $7 \text{ MPa} \times 0.02\% = 0.0014 \text{ MPa}$ 。被校对象等级为0.1级、测量范围(0~6)MPa，最大允差为 $6 \text{ MPa} \times 0.1\% = 0.006 \text{ MPa}$ 。即可得标准器最大允差绝对值0.0014MPa，小于被校对象最大允许误差绝对值0.006MPa的1/3：

$$0.0014 \text{ MPa} < \frac{1}{3} \times 0.006 \text{ MPa} = 0.002 \text{ MPa}$$

满足检定规程对标准器的要求，证明了：本次测量评定过程的合理性与科学性，确保了评定结果的可靠性。

5 结论

本文严格依据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和JJG 875—2019《数字压力计检定规程》，以等级为0.1级、测量范围(0~6)MPa的数字压力计作为被检对象，以等级为0.02级、测量范围(-0.08~7)MPa的数字压力计作为标准器，展开系统性的测量结果不确定度评定研究，识别并分析了4类测量过程中的不确定度来源，包括被检数字压力计测量重复性、被检数字压力计分辨力、标准器引入的不确定度以及其他潜在不确定来源，通过建立数学模型，对各项不确定度进行相应的A类和B类评定，得到数字压力计示值误差的合成不确定度为0.00082MPa，扩展不确定度为0.0017MPa（ $k=2$ ），完全满足JJG 875—2019《数字压力计检定规程》要求。本文所建立的评定方法严格遵循各项技术要求，具备一定的可操作性和通用性，可拓展用于不同等级、不同量程的各类数字压力计，为进一步研究提供了技术参考。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S]（现行有效）. 北京：中国计量出版社，2012.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 875—2019 数字压力计检定规程[S]（现行有效）. 北京：中国计量出版社，2019.

作者简介

李嘉莹，硕士研究生，助理工程师，国家二级注册计量师。主要研究方向：力学计量，热工计量，智能计量与数字化校准。