



北京市地方计量技术规范

JJF (京) XXXX-XXXX

生产线立式储液罐的压力、流量参数 在线校准与核查计量技术规范

Metrological Specification for Online calibration and verification of
pressure and flow of production line vertical liquid tank

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

北京市市场监督管理局 发布

生产线立式储液罐的压力、 流量参数在线校准与核查 计量技术规范

JJF(京) XXXX-XXXX

Metrological Specification for Online calibration
and verification of pressure and flow of
production line vertical liquid tank

归口单位：北京市市场监督管理局

主要起草单位：北京市计量检测科学研究院

参加起草单位：

本规范委托XXXX负责解释

目 录

| | |
|--------------------|-------|
| 引 言..... | (III) |
| 1 范围..... | (1) |
| 2 引用文件..... | (1) |
| 3 名词术语..... | (1) |
| 4 概述..... | (1) |
| 5 计量特性..... | (2) |
| 6 校准条件..... | (2) |
| 6.1 环境条件..... | (2) |
| 6.2 测量标准..... | (2) |
| 7 校准与核查项目及其方法..... | (3) |
| 7.1 校准项目..... | (3) |
| 7.2 校准方法..... | (3) |
| 7.3 核查..... | (6) |
| 7.4 数据处理..... | (7) |
| 8 校准结果的表达..... | (10) |
| 9 复校时间间隔..... | (10) |
| 附录 A | (11) |
| 附录 B | (13) |
| 附录 C | (14) |
| 附录 D | (15) |
| 附录 E | (16) |
| 附录 F | (19) |
| 附录 G | (23) |

引 言

本规范旨在减少仪表拆卸的前提下，设计立式储液罐的液位与流量参数的溯源。确保上述参数能够通过完整的比较链与国家基准相连的同时，其不确定度满足日常生产需要；设计使用中检查方法，确保两次校准期间校准状态的可信度，减少由于仪器稳定性变化造成的结果偏差，最终提高计量工作效率和生产设备运转率。

本规范参照了国家计量技术规范 JJF1001—2011《通用计量术语及定义》，JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》以及 JJF1071—2010《国家计量校准规范编写规则》中规定的相关术语定义和编写规则。

本规范为首次发布。

生产线立式储液罐的压力、流量参数在线校准 与核查计量技术规范

1 范围

本方法适用于生产线上立式储液罐的压力式液位计与原料进出口端的质量流量计的校准与定期核查。

2 引用文件

GB/T 2421.1-2008 电工电子产品环境试验 概述和指南

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 名词术语

3.1 生产线立式储液罐 production line vertical liquid tank

安装在生产线上，且已经投入生产的立式储液罐。

4 概述

液体原料通过进料口与出料口进出储液罐时，管路上的质量流量计将流量信号输到远程终端上。液体原料通过进料口进入储液罐，随着进料增加，罐体底部的压力逐渐增加。罐体底部的压力传感器将罐体底部增加的压力反馈到控制终端上，经过换算终端显示储液罐内部的原料质量。流程如图 1 所示。

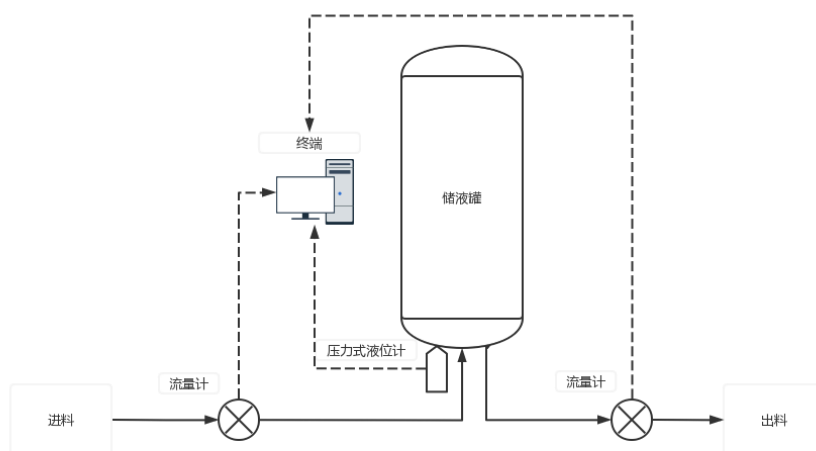


图1

图 1 测量单元原理框图

5 计量特性

罐体直径、压力式液位计和流量计最大允许误差见表 1。

表 1 最大允许误差

| 校准参数 | 技术要求 |
|------|-----------|
| 内直径 | ±0.3% 及以下 |
| 压力 | ±1%FS 及以下 |
| 流量 | ±3%FS 及以下 |

注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（15~35）℃；环境湿度：（25~75）%RH

[电工电子产品环境试验 概述和指南（GB/T 2421.1-2008）]

6.1.2 当电测仪器设备对环境条件另有要求时，应满足其规定的要求。

注：如不能满足上述条件应考虑因此引入的不确定度。

6.2 测量标准

6.2.1 内直径测量标准器及配套设备

标准器及配套设备见表 1。

表 1 标准器及配套设备

| 序号 | 设备名称 | 测量范围 | 准确度等级或最大允许误差 | 用途 | 备注 |
|----|------|--|---|-------------|---|
| 1 | 钢卷尺 | (0~50) m (0~100) m (0~150) m (0~200) m (0~300) m | II 级 | 测量周长 | 钢卷尺检定证书必须有以米为间隔的修正值，使用时必须修正，围尺时的拉力必须与检定时拉力一致。 |
| 2 | 测厚仪 | (0~50) mm | ≤10mm, ±0.1mm; >10mm, ±(0.1mm+1%L) (L为测量厚度) | 测量厚度 | / |
| 3 | 拉力计 | (0~50) N | 最小分度值为1.96N | 测量围尺时钢卷尺的拉力 | / |

6.2.2 压力测量标准

压力测量标准器可选用数字压力计、活塞式压力计、标准压力发生器或其他符合要求的压力标准器对光纤光栅传感器进行校准。标准器允许误差绝对值不超过被校仪表最大允许误差绝对值的 1/3。

7 校准与核查项目及其方法

7.1 校准项目

校准项目包括内直径、压力、流量。

7.2 校准方法

7.2.1 通用技术要求

生产线立式储液罐外观应完整、无锈斑及裂痕，压力式液位计及其配套的流量计可以正常工作。

7.2.2 内直径校准

7.2.2.1 测量原理

生产线立式储液罐的罐体计算模型为竖直薄壁圆筒，测量圆筒的外直径、壁厚及高度，计算可得罐体内直径 V_1 ，如式（1）所示：

$$V_1 = \frac{\pi}{4} (d - \delta)^2 h \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中：

d —— 圆筒外直径，mm；

h —— 圆筒高度，mm；

δ —— 圆筒壁厚，mm。

如生产线立式储液罐罐内配有搅拌器、乳化机等附件时，罐的内直径 V 如式（2）所示：

$$V = V_1 + \Delta V_A \quad (2)$$

式中：

ΔV_A —— 罐内附件的体积， dm^3 ；

本规范核查方法中使用的罐体部分为储液罐的 1/4 至 3/4 处，在核查过程中，储液罐高度采用压力校准后由储液罐压力值换算为储液高度。

7.2.2.2 测量方法

7.2.2.2.1 生产线立式储液罐外直径测量

生产线立式储液罐外直径测量采用外围尺法。

1) 位置选取，储液罐高采用竣工图纸中的数据，围尺位置分别为：

第一条在储液罐高的 1/4 处；

第二条在储液罐高的 1/2 处；

第三条在储液罐高的 3/4 处；

如果不能在选定位置围尺，可以在靠近这一位置附近测量，但应远离水平焊缝

2) 按选定的围尺位置，在罐壁上用色笔每隔 (1.0~1.5) m 画出水平标记作为围尺轨迹，并清除围尺轨迹上的有影响测量结果的杂物，以保证测量时钢卷尺贴紧罐壁，用磁性表座或其他方法将钢卷尺的尺头固定，沿罐壁放尺，使尺带紧贴罐壁并大致围绕在围尺轨迹附近，用磁性表座固定 5min 左右，使尺带与罐壁达到温度平衡，以消除尺带与罐壁的温差所造成的测量误差。当罐壁的材质为非碳钢等其他材料时，应记录其罐壁温度、材质和线膨胀系数。

3) 在围尺轨迹上距离竖直焊缝或其他障碍物 300mm 外的地方，在上用钢针划一条垂直于围尺轨迹的细线作为围尺起点竖线，将钢卷尺的零刻度线与起点竖线重合，用磁性表座或其他方法固定尺带。在距磁性表座不超过 3m 处，使用夹尺器夹住尺带，并用拉力计给尺带施加与尺检定状态下相同的拉力，同时观察尺带零刻度与起点竖线是否发生位移。有位移时需增加磁性表座的数目，重新测量。无位移即以此点作为围尺起点。

4) 从围尺起点沿围尺轨迹按不超过 3m 的间隔，依次用夹尺器和拉力计沿罐壁的切线方向给尺带施加与尺检定状态下相同的拉力，用磁性表座或其他方法固定尺带，一直到起点，读数估读到 0.5mm。在测量过程中尺带上缘要始终和围尺轨迹对齐。每次围尺过程完毕时，应检查尺带零刻度线是否发生位移，如有位移需重新测量。

5) 距离第一次围尺起点 300mm 以上建立新起点，按步 3)、4) 进行第二次测量，两次测量结果应不大于表 1 规定的允差。

表 1 圆周长 (C) 测量允差

| | |
|------------------------------------|-----|
| $C \leq 100\text{m}$ | 3mm |
| $100\text{m} < C \leq 200\text{m}$ | 4mm |

| | |
|-------------------|-----|
| $C > 200\text{m}$ | 5mm |
|-------------------|-----|

6) 如果两次测量结果超过规定的允差, 需继续测量一直到连续两次测量结果符合规定的允差, 取两次测量的平均值即为该位置的圆周长。

7) 按 1) 中所选取的各位置逐一测量, 得出各位置的 $C_{1/4}$ 、 $C_{1/2}$ 、 $C_{3/4}$ 值。

7.2.2.2.2 储液罐厚度测量

用超声波测厚仪分别测量储液罐高的 $1/4$ 处、 $1/2$ 处、 $3/4$ 处的厚度, 测量位置可选取在测量外直径时围尺的标记点, 共选取 5 个测量位置, 精确到 0.1mm , 取平均值作为储液罐的厚度。当储液罐厚度无法测量或储液罐有隔层时, 可采用竣工图纸的数据。

7.2.2.2.3 罐内附件测量

罐内附件的尺寸一般采用竣工图纸标注的数据。

7.2.3 压力校准

7.2.3.1 测量原理

通过公式 (1) 计算得到液位 h 与液体体积 V 的函数关系; 将公式 (1) 结果带入流体静力学方程: $P = \rho gh$ 计算得到体积 V 与压力 P 的换算关系; 将结果带入质量、体积与密度换算关系 $m = \rho V$; 得到压力 P 与储罐内原料质量 m 的函数关系。

7.2.3.2 测量方法

将图 1 中压力式液位计与压力标准装置连接, 压力计校准点的数量一般不少于 5 个点选择内直径罐体内径均匀的量程段。

校准时, 通过压力发生器产生压力, 由满量程的 $1/4$ 处作为始点压力开始校准, 逐渐平稳加压到各个校准点, 直至满量程的 $3/4$; 然后由满量程的 $3/4$ 开始, 逐渐平稳降压到各校准点, 直至始点压力点, 每个校准点压力稳定后, 分别读取并记录标准器各点与起始点压力差和终端上各个点的质量与起始点质量之差, 此为一个循环。压力计应进行正反行程的一个循环校准。

7.2.4 流量校准

7.2.4.1 测量原理

以修正后的终端显示数据作为标准值, 采用累积流量作为示值对流量计进行校准。

7.2.4.2 测量方法

连接、开机、预热，按流量计说明书中指定的方法检查流量计参数的设置及零点校准。

开启立式储液罐物料输送装置，保证管道及被校流量计充满流体。

按 7.1.1.3.2 计算远程终端初始示值并记录被校流量计的初始示值（或清零），同时启动立式储液罐流体输送装置。完成一次输送作业后，记录远程终端显示和被校流量计的最终示值，以最终示值与初始示值之差作为一次试验远程终端和被校流量计的累计流量。

每个流量点的重复校准次数应不少于 3 次。

7.3 核查

核查参数包括压力、流量。

7.3.1 测量原理

在日常生产过程中，分别记录终端显示的质量值与流量计显示质量值将两个质量值进行比对，确定压力、流量测量结果是否可靠。

7.3.2 测量方法

分别使用连接在同一个储液罐上的流量计与压力传感器进行核查如图 1，使得一定量的流体原料经过流量计后，停留在储液罐中。此时流量计中显示的累计质量流量为 x_1 ，其测量结果不确定度为 U_1 ，终端中显示罐体内储存的原料质量为 x_2 ，其测量不确定度为 U_2 ，通过公式（3）判定核查结果。若满足公式（3）则核查结果满意，反之则不满意。

当核查结果不满意时，应重新进行项目 7.1.1.2 至 7.1.1.4 的校准。

$$|x_1 - x_2| \leq \sqrt{U_1^2 + U_2^2} \quad (3)$$

x_1 —— 流量计的累计质量流量，kg；

x_2 —— 终端中显示罐体内储存的原料质量，kg；

U_1 —— 流量计测量结果的扩展不确定度，kg；

U_2 —— 终端中显示罐体内储存原料质量的扩展不确定度，kg。

7.4 数据处理

7.4.1 生产线立式储液罐内直径

生产线立式储液罐各围尺位置点的外周长按式(4)计算:

$$C_i = \frac{C_{i1} + C_{i2}}{2} \quad (4)$$

式中:

- C_i —— 储液罐各围尺位置点的外周长平均值, mm;
 C_{i1} —— 储液罐各围尺位置点的外周长第一次测量值, mm;
 C_{i2} —— 储液罐各围尺位置点的外周长第二次测量值, mm;

生产线立式储液罐的外周长 C 为 3 个围尺位置测量的平均值, 如式(5)

$$C = \frac{\sum C_i}{3} \quad (5)$$

生产线立式储液罐各围尺位置点的壁厚按式(6)计算:

$$\delta = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5}{5} \quad (6)$$

式中:

- δ —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚平均值, mm;
 δ_1 —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚第一次测量值, mm;
 δ_2 —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚第二次测量值, mm;
 δ_3 —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚第三次测量值, mm;
 δ_4 —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚第四次测量值, mm;
 δ_5 —— 储液罐各围尺位置点位置壁厚第五次测量值, mm;

生产线立式储液罐的壁厚 δ 为 3 个围尺位置测量的平均值, 如式(7):

$$\delta = \frac{\sum \delta}{3} \quad (7)$$

生产线立式储液罐内直径 D 计算公式如式(8):

$$D = \frac{C}{\pi} - 2\delta \quad (8)$$

7.4.2 压力

将公式（1）结果带入流体静力学方程： $P = \rho gh$

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot \frac{P}{\rho g} \quad (9)$$

式中：

- d —— 储液罐的内直径，m；
- h —— 储液罐中液体的高度，m；
- ρ —— 储液罐中液体的密度， kg/m^3 ；
- g —— 使用地点重力加速度， m/s^2 ；
- P —— 液体自身重力产生的压强；Pa
- V —— 储液罐中液体的体积；Pa

将公式（9）结果带入质量、体积与密度换算关系 $m = \rho V$

$$m = \frac{\pi d^2 P}{4g} \quad (10)$$

式中：

- d —— 储液罐的内直径，m；
- h —— 储液罐中液体的高度，m；
- ρ —— 储液罐中液体的密度， kg/m^3 ；
- g —— 使用地点重力加速度， m/s^2 ；
- P —— 液体自身重力产生的压强；Pa
- m —— 储液罐中液体的质量；Pa

通过公式（10）推导的函数关系计算出标准压力 p_s 对应的理论质量值 m_s 将理论质量值与控制终端上显示的质量值 m 进行比较，带入公式（11）进行误差计算的到公式（12）。

$$\delta = \frac{m' - m_s}{m_s} \times 100\% \quad (11)$$

- δ —— 储液罐内原料质量的相对误差，%；
 m' —— 控制终端显示示值，kg；
 m_s —— 标准压力值 p_s 对应的理论质量，kg。

$$\delta = \left(\frac{4m'g}{\pi d^2 P_s} - 1 \right) \times 100\% \quad (12)$$

- δ —— 储液罐内原料质量的相对误差，%；
 m' —— 控制终端显示示值，kg；
 p_s —— 标准压力值 p_s ，Pa。
 P —— 液体自身重力产生的压强；Pa
 d —— 储液罐的内直径，m；
 g —— 使用地点重力加速度，m/s²；

7.4.3 流量

流量计单次校准按公式（13）进行误差计算：

$$E_{ij} = \frac{(Q_m)_{ij} - (Q_s)_{ij}}{(Q_s)_{ij}} \times 100\% \quad (13)$$

- E_{ij} —— 第 i 校准点第 j 次校准点相对示值误差，%；
 $(Q_m)_{ij}$ —— 第 i 校准点第 j 次校准流量计的累积质量流量，kg；
 $(Q_s)_{ij}$ —— 第 i 校准点第 j 次校准远程终端累积质量，kg。

流量计校准点相对示值误差按公式（14）进行计算：

$$E_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{ij} \quad (14)$$

- E_i —— 第 i 校准点相对示值误差，%；
 n —— 校准次数。

8 校准结果的表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；
 - h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
 - i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
 - j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
 - k) 校准环境的描述；
 - l) 各校准项目检查结果的说明；
 - m) 对校准规范的偏离的说明；
 - n) 校准证书签发人的签名、职务或等效标识；
 - o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
 - p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间的间隔是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，用户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议每年采用本规范 7.2 进行核查，若结果满意可适当延长复校时间间隔。若结果不满意，或设施整体结构变形、大修后或测量参数受到怀疑时，须重新进行校准。

建议复校时间间隔最长不超过四年，使用特别频繁时应适当缩短。

附录 A

生产线立式储液罐的压力、流量参数在线校准原始记录格式

记录编号:

| | |
|------------------------------|-------|
| 委托单位: | 样品名称: |
| 制造厂: | 型号规格: |
| 环境 温度 °C 湿度 %RH | 出厂编号: |
| 校准地点: | 外观检查: |

主要计量标准器

| 名称 | 型号规格 | 最大允许误差/准确度等级/不确定度 | 仪器编号 | 证书编号及溯源单位 | 有效期 |
|----|------|-------------------|------|-----------|-----|
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

罐体内直径校准:

| 围尺位置 | 外周长 (mm) | | 外周长平均值 (mm) | 壁厚 (mm) | 壁厚平均值 (mm) | 内直径 (mm) | 测量不确定度 ($k=2$) |
|---------|----------|--|-------------|---------|------------|----------|------------------|
| | | | | | | | |
| 高 1/4 处 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 高 1/2 处 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| 高 3/4 处 | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

压力式液位计校准：

| 标准值压力值 (kPa) | 理论质量值 (kg) | 正行程终端显示 值 (kg) | 反行程终端显示 值 (kg) | 测量不确定度 ($k=2$) (kg) |
|-----------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

流量计校准：

| 标准值 | | 示值 | | | | |
|--------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------|-------------------|-----------------------------|
| 累积质量 (kg) | 平均累积 质量 (kg) | 累积流量 (kg) | 平均累积 流量 (kg) | 示值误差 (%) | 平均示值 误差 (%) | 测量不确定 度 ($k=2$) () |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

校准员：_____ 核验员：_____

校准日期：_____ 签发日期：_____

附录 B

校准证书内页格式

罐体内直径校准：

| 罐体序号 | 内直径 (mm) | 测量不确定度 ($k=2$) |
|------|-------------|---------------------|
| | | |

压力式液位计校准：

| 标准值压力值 (kPa) | 理论质量值 (kg) | 终端显示平均值 (kg) | 测量不确定度 ($k=2$) (kg) |
|-----------------|---------------|-----------------|--------------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

流量计校准：

| 标准值 | 示值 | | | |
|-----|----------------|----------------|------------|----------------------------|
| | 平均累积质量 (kg) | 平均累积流量 (kg) | 平均示值误差 (%) | 测量不确定度 ($k=2$) () |
| | | | | |
| | | | | |

复校时间间隔建议： 年

—— (以下空白) ——

附录 C

生产线立式储液罐的压力、流量参数在线核查原始记录格式

记录编号：

| | |
|--------------------------|-------|
| 委托单位： | 样品名称： |
| 制造厂： | 型号规格： |
| 环境 温度 ℃ 湿度 %RH | 出厂编号： |
| 核查地点： | 外观检查： |

| 压力式液位计显示质量 (kg) | 流量计显示质量 (kg) |
|-----------------|--------------|
| | |

附录 D

核查报告内页格式

| 流量计计算质量 (X_1) | 压力式液位计质量 (X_2) | $X = X_1 - X_2 $ | X 值是否小于等 于 $\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ | 结论 |
|-------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------------------|----|
| | | | | |
| 流量计计算质量扩 展不确定度 U_1 | 压力式液位计质量 扩展不确定度 U_2 | $\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ | | |
| | | | | |

附录E

立式金属罐内直径误差校准不确定度评定实例

E.1 数学模型

罐体内直径测量时的计算如式 (E 1) 所示。

$$D = \frac{C}{\pi} - 2\delta \quad (\text{E } 1)$$

式中：

D ——管道内直径，mm；

C ——管道周长，m；

δ ——管道壁厚，mm。

各输入量彼此独立不相关，合成标准不确定度按式 C 2 计算：

$$u_c^2(D) = c_1^2 u^2(C) + c_2^2 u^2(\delta) \quad (\text{E } 2)$$

E.2. 灵敏系数

L 的灵敏系数见式 C 3：

$$c_1 = \frac{\partial D}{\partial C} = \frac{1}{\pi} \quad (\text{E } 3)$$

δ 的灵敏系数见式 C 4：

$$c_2 = \frac{\partial D}{\partial \delta} = -2 \quad (\text{E } 4)$$

E.3 不确定度来源

测量不确定度主要来源是外周长测量时引入的不确定度和壁厚测量时引入的不确定度。

E.3.1 外周长测量时引入的不确定度

外周长测量时引入的不确定度包括外周长测量的重复性及标准器钢卷尺溯源引入的不确定度。

E.3.2 壁厚测量时引入的不确定度

壁厚测量时引入的不确定度包括包括壁厚测量的重复性及标准器测厚仪溯源引入的不确定度。当储液罐厚度无法测量或储液罐有隔层，壁厚采用竣工图纸的数据时，壁厚引入的不确定度需根据现场储液罐的工况条件考虑。

E.4 校准结果不确定评定实例

E.4.1 外周长测量时引入的不确定度分量 $u(C)$

管道周长采用 II 级卷尺测得，误差为 $\Delta = \pm(0.3 + 2 \times 10^{-4} C) \text{mm}$ （其中 C 为四舍五入后的整数米，被测长度小于 1m 时为 1），三个围尺点的周长分别为 5405.2mm、5402.6mm、5392.2mm，平均值为 $C=5400.0\text{mm}$ 。

测量重复性引入的不确定度为（极差法，极差系数 1.69）：

$$u_1(C) = \frac{(5405.6 - 5392.2)}{1.69} = 7.69 \text{mm}$$

钢卷尺标准器引入的误差为 $\pm 1.3\text{mm}$ ，则：

$$u_2(C) = \frac{1.3}{\sqrt{3}} = 0.75 \text{mm}$$

现场测量条件对周长测量影响的误差预估不超过 10mm，则：

$$u_3(C) = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 2.89 \text{mm}$$

$u_1(C)$ 及 $u_2(C)$ 两者取最大值与 $u_3(C)$ 合成作为管道周长测量引入的不确定度：

$$u(C) = \sqrt{(7.69)^2 + (2.89)^2} = 8.22 \text{mm}$$

E.4.1 壁厚测量时引入的不确定度分量 $u(\delta)$

由于现场储液罐有外层、保温层及内层，无法测量壁厚，根据竣工图纸，外层厚 3mm，保温层厚 10mm，内层厚 2mm，储液罐总厚度为 15mm。

现场储液罐内外层均为不锈钢材质，外层无锈蚀情况，内层维护良好，定时清洗，现场工况对壁厚的影响预估不超过 1.0mm，则：

$$u(\delta) = \frac{1.0}{2\sqrt{3}} = 0.29 \text{mm}$$

E.5 合成标准不确定度

E.5.1 标准不确定度一览表

见表 C-1：

表 C-1 标准不确定度一览表

| 序号 | 符号 | 来源 | 标准不确定度 | 灵敏系数 | $ c(x_i) u(x_i)$ |
|----|--------|-----------------|--------|-----------------|------------------|
| 1 | $u(C)$ | 外周长测量时引入的不确定度分量 | 8.22mm | $\frac{1}{\pi}$ | 2.62mm |

| | | | | | |
|--|-------------|----------------|--------|----|-------|
| 2 | $u(\delta)$ | 壁厚测量时引入的不确定度分量 | 0.29mm | -2 | -0.58 |
| 合成标准不确定度: $u_c(D)=2.7\text{mm}$, 扩展不确定度: $U=5.4\text{mm}$ ($k=2$) | | | | | |

E. 4. 1. 3. 2 合成标准不确定度 $u_c(D)$

合成标准不确定度 $u_c(D)$:

$$\begin{aligned}
 u_c(D) &= \sqrt{c_1^2 u(C)^2 + c_2^2 u(\delta)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{1}{\pi}\right)^2 (8.22)^2 + (-2)^2 (0.29)^2} \\
 &= 2.7\text{mm}
 \end{aligned}$$

E. 4. 1. 4 校准结果的扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则储液罐内径校准结果的扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c(D) = 2 \cdot 2.7 = 5.4\text{mm} \quad (k=2)$$

附录F

生产线立式储液罐压力误差校准不确定度评定实例

F.1 概述

F.1.1 测量方法:

压力式液位计与压力标准装置连接, 压力计校准点的数量一般不少于 5 个点选择内直径罐体内径均匀的量程段。

校准时, 通过压力发生器产生压力, 由满量程的 1/4 处作为始点压力开始校准, 逐渐平稳加压到各个校准点, 直至满量程的 3/4; 然后由满量程的 3/4 开始, 逐渐平稳降压到各校准点, 直至始点压力点, 每个校准点压力稳定后, 分别读取并记录标准器各点与起始点压力差和终端上各个点的质量与起始点质量之差, 此为一个循环。压力计应进行正反行程的一个循环校准。

F.2 数学模型

$$\delta = m' - m_s \quad (\text{F.1})$$

式中:

δ —— 储液罐内原料质量的相对误差, %;

m' —— 控制终端显示示值, kg;

m_s —— 标准压力值 p_s 对应的理论质量, kg。

$$\delta = m' - \frac{\pi d^2 P_s}{4g} \quad (\text{F.2})$$

δ —— 储液罐内原料质量的相对误差, %;

m' —— 控制终端显示示值, kg;

p_s —— 标准压力值 p_s , Pa。

P —— 液体自身重力产生的压强; Pa

d —— 储液罐的内直径, m;

F.3 不确定度来源

F. 3. 1 被校压力变送器示值 m' 引入的标准不确定度 $u(m')$

F. 3. 2 标准装置理论质量值 m_s 引入的标准不确定度 $u(m_s)$;

F. 3. 2. 1 立式储液罐内直径 d 引入的标准不确定度 $u(d)$;

F. 3. 2. 2 标准器示值 p_s 引入的标准不确定度 $u(p_s)$;

F. 3. 2. 3 力加速度 g 引入的标准不确定度 $u(g)$;

F. 4 标准不确定度评定

F. 4. 1 被校压力变送器示值 m' 引入的标准不确定度 $u(m')$

F. 4. 1. 1 被校压力变送器示值重复性引入的不确定度 $u_1(m')$

在名义值 20 kPa 升压进行 5 次测量，测量结果后见表 F. 1

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 升压 | 5140kg | 5140kg | 5140kg | 5140kg | 5150kg |
| 降压 | 5150kg | 5140kg | 5140kg | 5140kg | 5150kg |

表 F. 1

算数平均值为：

$$\bar{m}' = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n m'_i \right) = 5143 \text{ kg}$$

采用贝塞尔公式计算单次测量标准偏差测量结果重复性引入的不确定度为：

$$u_1(m') = s(m') = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (m'_i - \bar{m}')^2} = 5 \text{ kg}$$

F. 4. 1. 2 被校压力变送器分辨力引入的不确定度 $u_2(m')$

终端显示质量分辨力为 10kg，按均匀分布计算，取 $k = \sqrt{3}$ ，其引入的不确定度为：

$$u_2(m') = \frac{10}{2\sqrt{3}} = 3 \text{ kg}$$

F. 4. 1. 3 压力变送器标准不确定度 $u(m')$

在标准值 20kPa， $u_1(m') > u_2(m')$ ，所以 $u(m') = u_1(m')$ ；

对公式 (F.2) 求偏导，得 $u(\bar{p})$ 的灵敏度系数： $c(m') = 1$

F.4.2 标准器的压力值 p_s 对应的理论质量引入的标准不确定度 $u(m_s)$

F.4.2.1 立式储液罐内直径 d 引入的标准不确定度 $u(d)$

立式储液罐内直径的扩展不确定度为： $U = 5.4\text{mm}$ ($k=2$)，其引入的不确定度为：

$$u(d) = \frac{a}{k} = 0.0027\text{m}$$

对公式 (F.2) 求偏导，得 $u(d)$ 的灵敏度系数：

$$c(d) = -\frac{\pi d P_s}{2g} = 5512 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$$

F.4.2.2 标准器示值 p_s 引入的标准不确定度 $u(p_s)$

标准器为 0.02 数字压力计，其测量范围为 (-100~100) kPa；最大允许误差为： $\Delta = \pm 0.02\% \times 200\text{kPa} = \pm 0.04\text{kPa}$ ，则 $a = 0.04\text{kPa}$ ，按均匀分布计算 $k = \sqrt{3}$ ，其引入的不确定度为：

$$u(p_s) = \frac{a}{k} = 23 \text{ Pa}$$

对公式 (F.2) 求偏导，得 $u(p_s)$ 的灵敏度系数：

$$c(p_s) = -\frac{\pi d^2}{4g} = -0.2369 \text{ m} \cdot \text{s}^2$$

F.4.2.3 力加速度 g 引入的标准不确定度 $u(g)$ ；

北京重力加速度 $g = (9.8015 \pm 0.0002) \text{ m/s}^2$ ，按均匀分布计算，取 $k = \sqrt{3}$ ，其引入的不确定度为：

$$u(g) = \frac{a}{k} = \frac{0.0002}{\sqrt{3}} = 0.000115\text{m/s}^2$$

对公式 (1) 求偏导，得 $u(g)$ 的灵敏度系数：

$$c(g) = \frac{\pi d^2 P_s}{4g^2} = 281.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$$

F.4.2.4 理论质量引入的标准不确定度 $u(m_s)$ 合成

$$u(m_s) = \sqrt{|c(d) \times u(d)|^2 + |c(p_s) \times u(p_s)|^2 + |c(g) \times u(g)|^2} = 15.8 \text{ kg}$$

F.5 合成不确定度计算

表F.2 标准不确定度分量汇总一览表

| 标准不确定度分量 | 不确定度来源 | 标准不确定度 $u(x_i)$ | 灵敏度系数绝对值 $ c(x_i) $ | 标准不确定度 $u(y_i) = c_i \times u_i$ |
|--------------------|----------|--------------------------------------|---|------------------------------------|
| $u(m')$ | 被校压力传感器 | / | 1 | 5 kg |
| $u_1(m')$ | 重复性 | 5 kg | / | |
| $u_2(m')$ | 分辨力 | 3 kg | / | |
| $u(m_s)$ | 标准器理论值 | / | 1 | 15.8 kg |
| $u(d)$ | 立式储液罐内直径 | 0.0027 m | $5512 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ | 14.9 kg |
| $u(P_s)$ | 标准器示值 | 23 Pa | $0.2369 \text{ m} \cdot \text{s}^2$ | 5.5 kg |
| $u(g)$ | 重力加速度 | $0.00115 \text{ m} \cdot \text{s}^2$ | $281.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2$ | 0.3 kg |
| 合成标准不确定度 $u_c(m')$ | 16.7 kg | | | |

表 F.2

F.6 扩展不确定度的评定

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 16.7 \text{ kg} \approx 0.03T \quad (k=2)$$

附录G

立式金属罐容量表误差校准不确定度评定实例

G.1 概述

G.1.1 校准方法

开机、预热，按流量计说明书中指定的方法检查流量计参数的设置及零点校准。

开启立式储液罐物料输送装置，保证管道及被校流量计充满流体。

按规范 7.1.1.3.2 计算远程终端初始示值并记录被校流量计的初始示值（或清零），同时启动立式储液罐流体输送装置。完成一次输送作业后，记录远程终端显示和被校流量计的最终示值，以最终示值与初始示值之差作为一次试验远程终端和被校流量计的累计质量流量。

G.1.2 被校对象

科里奥利质量流量计 口径为 DN80

G.2 数学模型

$$E = \frac{Q_m - Q_s}{Q_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

E —— 校准时流量计的相对示值误差，%；

Q_m —— 流量计的累积质量流量，kg；

Q_s —— 远程终端累积质量，kg。

G.3 不确定度传播律

由以上数学模型可知，示值误差 E 的不确定度传播律为：

$$u(E) = \sqrt{c_r^2(Q_m)u_r^2(Q_m) + c_r^2(Q_s)u_r^2(Q_s)}$$

G.4 不确定度分量及评定

G.4.1 流量计的累积质量流量 Q_m 引入的不确定度分量

被校流量计的累积质量流量 Q_m 引入的不确定度来源于被校流量计的重复性和

分辨力，由于现场试验结果被校流量计重复性较差，因此取重复性引入的不确定度作为被校流量计的累积质量流量 Q_m 的不确定度分量。

按 G.1.1 校准方法对流量计进行校准，连续测量 6 次，重复性用贝塞尔公式计算，测量数据如表 1 所示：

表 1 流量计测量数据

| 序号 | 远程终端累计值 (kg) | 流量计累积值 (kg) | 误差 (%) | 示值误差 (%) | 重复性 (%) |
|----|--------------|-------------|--------|----------|---------|
| 1 | 4750 | 4570 | -3.79 | -3.71 | 0.77 |
| 2 | 4740 | 4534 | -4.35 | | |
| 3 | 4750 | 4587 | -3.43 | | |
| 4 | 4740 | 4512 | -4.81 | | |
| 5 | 4750 | 4604 | -3.07 | | |
| 6 | 4750 | 4617 | -2.80 | | |

实际校准中校准次数为 3 次，取 3 次误差平均值作为该次的示值误差，故重复性引入不确定度分量为：

$$u_1(Q_m) = u_r(Q_m) = \frac{0.77\%}{\sqrt{3}} = 0.444\%$$

$$c_r(Q_m) = 1$$

G.4.2 远程终端累积质量 Q_s 引入的不确定度分量

根据远程终端校准结果，其扩展不确定度为 30 kg ($k=2$)，远程终端量程为为 7500kg，故远程终端累积质量引入的不确定度分量为：

$$u_r(Q_s) = \frac{30}{2 \times 7500} \times 100\% = 0.200\%$$

$$c_r(Q_s) = -1$$

G.5 合成标准不确定度计算

不确定分量一览表及合成标准不确定度如表 2 所示：

