内蒙古自治区地方计量技术规范

JJF（蒙）5004—2024

三维激光扫描仪法卧式金属罐容积校准规范

Calibration Specification for Volume of Horizontal Metal Tanks by Three-Dimensional Laser Scanner

2024-05-16 发布　　2024-07-01 实施

内蒙古自治区市场监督管理局 发布

三维激光扫描仪法卧式金属罐容积校准规范

Calibration Specification for Volume Of Horizontal Metal Tanks by Three-Dimensional Laser Scanner

JJF(蒙)5004—2024

归 口 单 位：内蒙古自治区市场监督管理局

主要起草单位：内蒙古自治区计量测试研究院

包头市检验检测中心

参加起草单位：乌海市检验检测中心

内蒙古电力（集团）有限责任公司物质供应分公司

本规范委托内蒙古自治区计量测试研究院负责解释

本规范主要起草人：

王拴奎（内蒙古自治区计量测试研究院）

耿洪燕（包头市检验检测中心）

蔡振超（内蒙古自治区计量测试研究院）

参加起草人：

薛慧萍（乌海市检验检测中心）

马志超（内蒙古电力（集团）有限责任公司物质供应分公司）

马丽娟（内蒙古自治区计量测试研究院）

李　昕（内蒙古自治区计量测试研究院）

目 录

引言……（Ⅱ）
1 范围……（1）
2 引用文件……（1）
3 术语和计量单位……（1）
3.1 术语……（1）
3.2 计量单位……（2）
4 概述……（2）
4.1 原理……（2）
4.2 结构……（2）
4.3 用途……（2）
5 计量特性……（3）
6 校准条件……（3）
6.1 环境条件……（3）
6.2 安全条件……（3）
6.3 校准所用设备……（3）
7 校准项目和校准方法……（3）
7.1 校准项目……（3）
7.2 校准方法……（3）
8 总容积计算……（7）
9 容积表的编制……（7）
10 校准结果……（7）
11 复校时间间隔……（8）
附录 A 水平扫描法……（9）
附录 B 数据处理……（13）
附录 C 容积测量结果不确定度评定示例……（29）
附录 D 校准记录参考格式（竖直扫描法）……（34）
附录 E 校准记录参考格式（水平扫描法）……（35）
附录 F 校准证书内页参考格式……（36）
附录 G 容积表参考格式……（37）
附录 H 三次均匀 B 样条插值算法……（38）

引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1009-2006《容量计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定的基础性系列规范，结合我国卧式金属罐容积计量行业状况和实际需要，根据实验情况编写而成。

本规范为首次发布。

三维激光扫描仪法卧式金属罐容积校准规范

1 范围

本规范适用于使用三维激光扫描仪法（光电几何测量法），容积（10～100）m^3的卧式金属罐容积校准。

2 引用文件

本规范引用以下文件：

JJG 266 卧式金属罐容量

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 术语和计量单位

3.1 术语

3.1.1 检尺点 reference point bottom

测量卧式金属罐内液位高度和圆筒高度的基准点。

3.1.2 检尺点内竖直径 inside vertical diameter at dip-hatch

从计量口检尺点测量的直圆筒的竖向内直径。

3.1.3 卧式金属罐内水平扫描圈面积 area of horizontal scanning circle in horizontal metal tank）

在卧式金属罐内，三维激光扫描仪沿水平方向扫描一圈，该水平圈所围平面的面积。

3.1.4 自动液位计 automatic level gauge

用于自动测量和显示卧式金属罐内所存液体相对于某固定参考（点）液位高度的仪器。自动液位计至少包括：一个液体液位传感器、一个变送器和一个指示装置。

3.1.5 三维激光扫描仪法 three-dimensional laser scanner

将三维激光扫描仪放入卧式金属罐内，在测量软件驱动下，自动测量卧式金属罐容积的光电几何测量法，包括竖直扫描法和水平扫描法，每种方法都能单独测量卧式金属罐容积。

3.1.6 竖直扫描法 vertical scanning method

三维激光扫描仪通过扫描测量卧式金属罐内直圆筒半径、罐内总长、封头（顶板）高度等确定卧式金属罐容积（见规范正文 7.2.1）。

3.1.7 水平扫描法 horizontal scanning method

根据卧式金属罐内确定的水平扫描圈数和相邻两个水平扫描圈平面间距离，三维激光

扫描仪从最下部的水平扫描圈开始扫描，扫描完毕后，依次向上扫描，直至扫描完所确定的全部水平扫描圈，利用水平扫描圈面积、相邻两个水平扫描圈平面间距离等确定卧式金属罐容积（见附录 A）。

3.2 计量单位

3.2.1 体积单位：升 L；立方米 m^3；

3.2.2 压力单位：百帕 hPa；千帕 kPa；

3.2.3 温度单位：摄氏度℃；

3.2.4 长度单位：毫米 mm。

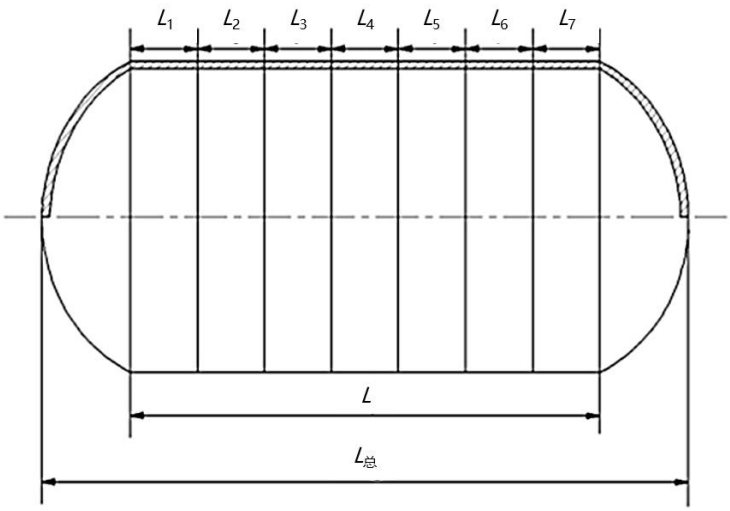
4 概述

4.1 原理

将三维激光扫描仪放入卧式金属罐（以下简称卧式罐）内，三维激光扫描仪扫描测量卧式罐直圆筒长度、直圆筒内半径、罐内总长、封头（顶板）高度等几何尺寸，通过计算得到卧式罐容积表。

4.2 结构

卧式罐是水平安装的圆筒形金属罐，由筒体、封头（顶板）、计量口、人孔、进出管线及其它附件组成。筒体为卧式圆筒形，由若干圈板焊接而成（见图 1）。



注：$L_1 \sim L_2$—筒体圈板宽度；L—筒体圈板宽度之和；$L_{总}$—卧式罐外总长。

图 1　卧式罐主结构图

4.3 用途

卧式罐广泛应用于石油化工等行业，是储存和计量液体体积的计量器具。

5 计量特性

卧式罐容积校准结果的相对扩展不确定度不大于 0.4%（总容积的 75%以上，k=2）。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：(5～40)℃；环境湿度：相对湿度不大于 85%。

6.2 安全条件

现场校准要执行被校准方的安全要求。

6.3 校准所用设备

校准所用设备见表 1。

表 1 校准所用设备

设备名称	测量范围	最大允许误差	备注
三维激光扫描仪	角度测量范围： （0～360）° 距离测量范围： (500～10000) mm	角度测量：±10″ 距离测量：± 1 mm	满足在爆炸性气体危险场所 0 区使用的防爆要求
测深钢卷尺	（0～5）m	±2.0 mm	
空盒气压表	(800～1060) hPa	±2 hPa	
温度计	（0～50）℃	±0.2℃	若使用数字温度计，最大允许误差为±0.2℃，并满足防爆要求
钢直尺	300 mm、1000 mm	±0.5 mm	
防爆灯具及其它	符合防爆场所使用要求		

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

卧式罐容积

7.2 校准方法

7.2.1 竖直扫描法

7.2.1.1 在卧式罐检尺点，用测深钢卷尺测量罐内竖直径、罐内余液液位高度；用钢直尺测量计量口至近端圆筒和封头连接处距离等。

7.2.1.2 按照三维激光扫描仪使用说明书，用数据线连接三维激光扫描仪和装有测量和计算软件的计算机，将三维激光扫描仪固定安放在专用测量支架上，通过人孔，由测量支架将三维激光扫描仪放在卧式罐内部，接近底部，若罐内有余液，要将三维激光扫描仪放在液面之上（不接触液面），尽可能放平，并在人孔口固定好测量支架。打开三位激光扫描仪和计算机开关，在测量软件内输入被测卧式罐的顶板类型、单位直线距离内的扫描点数（扫描点数等距离分布）等，由计算机驱动三维激光扫描仪自动扫描测量，三维激光扫描仪首先进行自动整平，整平后建立如图 2 或图 3 所示的三维直角坐标系，坐标原点是测站中心（坐标系的建立是随意的）。

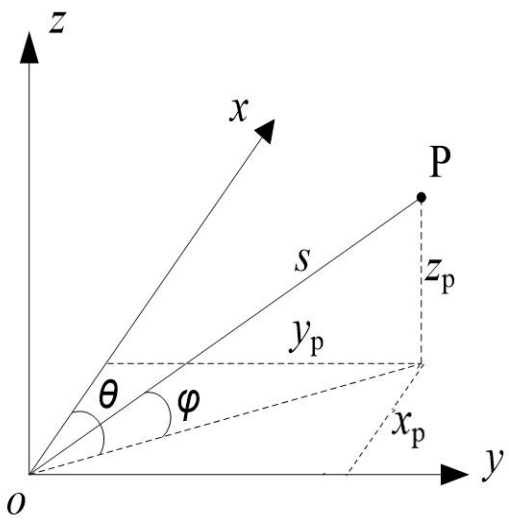


图 2　三维直角坐标系

在图 2 中，三维坐标按（1）式计算：

$$\begin{cases} x_p = s\cos\varphi\cos\theta \\ y_p = s\cos\varphi\sin\theta \\ z_p = s\sin\varphi \end{cases} \tag{1}$$

式中：

x_p、y_p、z_p---P 点（测量点）的三维坐标 mm；

s---P 点到坐标原点的直线距离 mm；

φ---线段 OP 与坐标平面 xoy 的夹角（线段 OP 在坐标平面 xoy 内的正投影与线段 OP 的夹角）°或 rad；

θ---线段 OP 在坐标平面 xoy 内的正投影与 x 轴的夹角°或 rad。

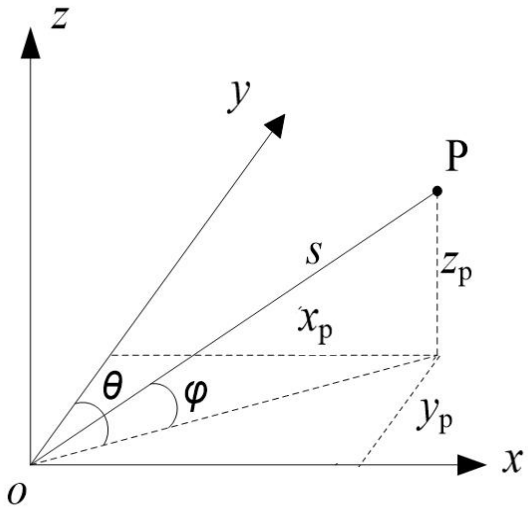


图 3　三维直角坐标系

在图 3 中，三维坐标按（2）式计算：

$$\begin{cases} x_p = s\cos\varphi\sin\theta \\ y_p = s\cos\varphi\cos\theta \\ z_p = s\sin\varphi \end{cases} \tag{2}$$

式中：

x_p、y_p、z_p---P 点（测量点）的三维坐标 mm；

s---P 点到坐标原点的直线距离 mm；

φ---线段 OP 与坐标平面 xoy 的夹角（线段 OP 在坐标平面 xoy 内的正投影与线段 OP 的夹角）° 或 rad；

θ---线段 OP 在坐标平面 xoy 内的正投影与 y 轴的夹角° 或 rad。

三维激光扫描仪测距时，测量距离按（3）式计算：

$$s = vt/2 \tag{3}$$

式中：

v---激光在空气中的传播速度 mm/s；

t---三维激光扫描仪计时器记录的同一激光信号由发射到被接收的时间 s。

7.2.1.3 扫描测量(见图 4)

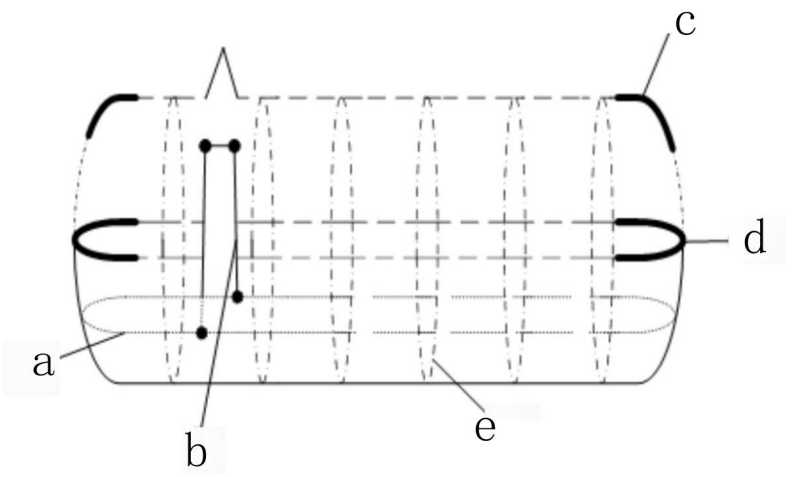


图 4　竖直扫描法扫描步骤

a)水平方向扫描一圈，确定罐体水平走向；

b)坐标原点在扫描平面内，垂直于罐体水平走向线扫描一圈，取该扫描圆圈上的四个点，这四点都在罐体上，确定扫描圆圈的近似半径和圆心坐标；

c)坐标原点在扫描平面内，扫描平面平行于罐体水平走向向量，并垂直于水平面扫描半圈多（能扫描到该扫描平面上罐体两端最远部位），确定封头位置和罐体的倾斜情况；

d)根据上述确定的扫描圆圈圆心位置，该圆心在扫描平面内，沿水平方向反复扫描，矫正封头位置；加强罐体两段最远部位的扫描，确定罐内总长；加强封头位置的扫描，确定封头高度及其它数据；

e)垂直于罐体水平走向线，在直圆筒长的 1/8、3/8、5/8、7/8 处（或设定的其它比例）扫描圆周，确定罐体各扫描圆周的半径和直径，完成第一次扫描测量；

f)在扫描测量过程中，遇到障碍物可以选择跳过该点，在测量完成后对该位置进行补点测量。

7.2.1.4 用三维激光扫描仪扫描测量的同时，用温度计测量卧式罐内的环境温度。

7.2.1.5 符合用户安全要求的卧式罐，校准人员用钢直尺、钢卷尺等进罐测量罐内附件体积和附件相对计量基准点的起始点和终点高度。罐内附件包括扶梯、加强板、加强筋和进出油管等。也可按施工图纸提供的钢材尺寸（或钢材质量），计算附件体积。

7.2.1.6 卧式罐应进行三次容积值测量，取其平均值，第二、三次的测量方法和第一次相同；后续校准进行二次。

7.2.1.7 三维激光扫描仪测量卧式罐直圆筒半径（含直圆筒伸长体）、罐内线段长度、罐倾斜角度，罐内直圆筒（含直圆筒伸长体）容积，顶板（封头）容积、附件体积等的计算方

法见附录 B。

7.2.2 水平扫描法（见附录 A)

8 总容积计算

罐底至罐内高度 H 处罐内总容积按（4）式计算：

$$V_{总} = V_{直} + V_{顶} - V_{附} \tag{4}$$

式中：

$V_{总}$---罐底至罐内高度 H 处罐内总容积 L；

$V_{直}$---罐底至罐内高度 H 处罐内直圆筒（含直圆筒伸长体）容积 L；

$V_{顶}$---罐底至罐内高度 H 处罐两端顶板（封头）总容积 L；

$V_{附}$---罐底至罐内高度 H 处罐内附件体积 L。

9 容积表的编制

9.1 容积表的高度最小分度可以是 mm 或 cm，容积最小分度为 L，容积表的起点高度一般为零点，但液位计有测量盲区时，容积表也可从液位计的最小高度作为容积表的起点，但该液位以下高度和本次校准液位计最高液位以上高度的容积值只作为参考，不作计量使用。

9.2 容积表可以使用计算机软件进行编制。软件可以使用内置于测量系统或测量仪内的软件，或独立的容积计算软件，软件的数学模型应符合本规范的计算要求。

9.3 容积校准结果不确定度评定示例见附录 C。

10 校准结果

校准结果应在校准证书或报告上反映。校准证书或报告应至少包括如下信息：

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) 证书或报告的唯一性标识（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，若与校准结果的有效性及应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

i) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

j) 校准环境的描述；

k) 校准结果及其测量不确定度的说明；

l) 对校准规范的偏离的说明；

m) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；

o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

11 复校时间间隔

复校时间间隔的长短是由卧式罐的使用情况、使用者以及卧式罐本身质量等诸因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。建议复校时间间隔一般不超过 4 年。

附录 A

水平扫描法

A.1 校准前准备

a)确定卧式罐内残留液体体积，测量检尺点内竖直径、余液液位高度、罐内气温、计量口至最近直圆筒体和封头连接处的距离等；

c)确定罐内水平扫描圈数。一般，在同一个卧式罐内部水平扫描时，相邻两个水平扫描圈平面间距离（垂直步长）保持不变。

A.2 校准操作

a)参照 7.2.1.4 测量卧式罐内大气温度，7.2.1.2 将三维激光扫描仪放入卧式罐内，整平，并在测量软件内，输入水平扫描圈数、相邻水平扫描圈平面间距离和单位直线距离内扫描点数等，7.2.1.3 a)确定罐体走向，7.2.1.3 b)求出圆筒的近似半径和扫描圆圈的近似圆心坐标，7.2.1.3 c)确定罐体倾斜状况。

b)测量软件自动确定各水平扫描圈位置后，先扫描最下部的水平扫描圈，扫描完毕后，依次向上扫描，直至扫描完最上部的水平扫描圈（见图 A.1）。为了能够计算每个水平扫描圈面积，在每个水平扫描圈的扫描过程中，要确定如图 A.2 所示的 A_i、B_i、C_i和 D_i四点的三维坐标，测量坐标原点到这四点的距离，并要测量出$\angle A_iO_iB_i$、$\angle B_iO_iC_i$、$\angle C_iO_iD_i$和$\angle D_iO_iA_i$的大小。测量完成，从卧式罐中取出三维激光扫描仪。

c)卧式罐内附件体积测量参照 7.2.1.5，校准次数参照 7.2.1.6。

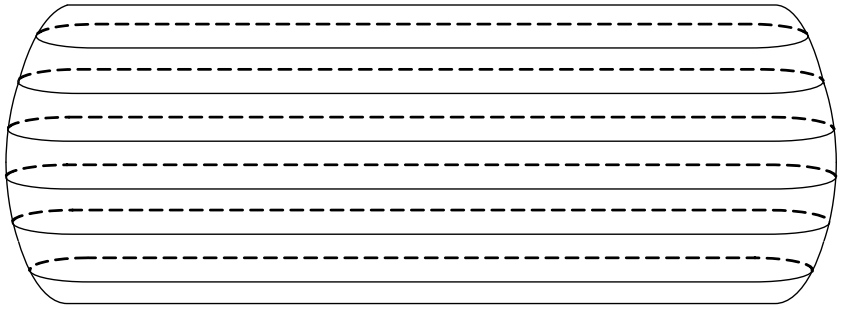
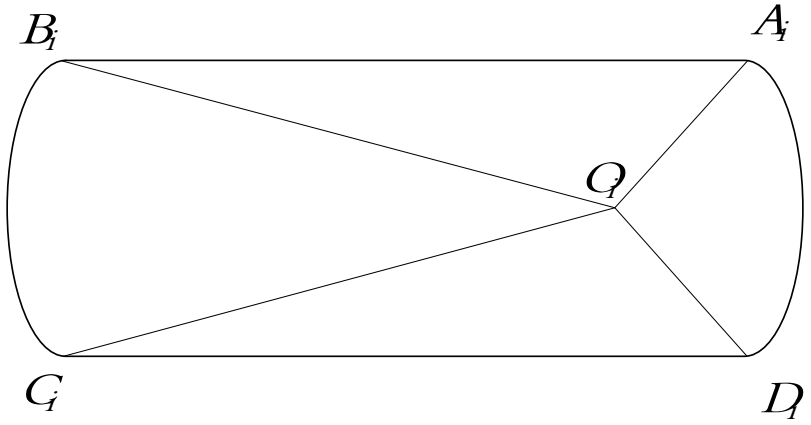


图 A.1　罐内水平扫描圈分布示意图



注：A_i、B_i、C_i、D_i分别是第 i 个水平扫描圈上的点；

O_i点是坐标原点在第 i 个水平扫描圈平面内的正投影点。

图 A.2　水平扫描圈形状

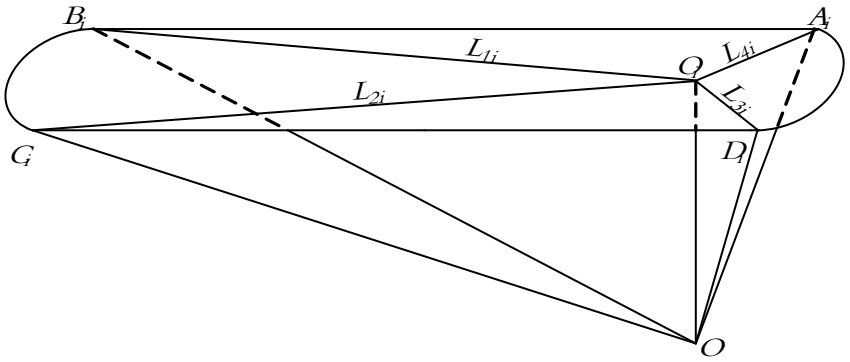
A.3 数据处理

三维激光扫描仪法卧式金属罐容积校准系统应具有符合本规范规定数学模型的容积计算软件，该容积计算软件应具有人工剔除离群值的功能，可自动生成校准数据记录及卧式罐容积表。

a)根据附录 B.1.8， 将用于容积计算的线段长度修正到 20℃下。

b)辅助计算

由图 A.3 可以得到：



注：O 点是坐标原点；

O_i点是坐标原点在第 i 个水平扫描圈平面内的正投影点。

图 A.3　水平扫描圈平面上的点与坐标原点的位置关系

$$L_{1i} = |O_iB_i| = \sqrt{OB_i^2 - OO_i^2}$$

$$L_{2i} = |O_iC_i| = \sqrt{OC_i^2 - OO_i^2}$$

$$L_{3i} = |O_iD_i| = \sqrt{OD_i^2 - OO_i^2}$$

$$L_{4i} = |O_iA_i| = \sqrt{OA_i^2 - OO_i^2}$$

式中：各线段的长度单位为毫米 mm 。

c)各高度处水平扫描圈面积计算公式见（A.1）式

由图 A.4 可以得到：

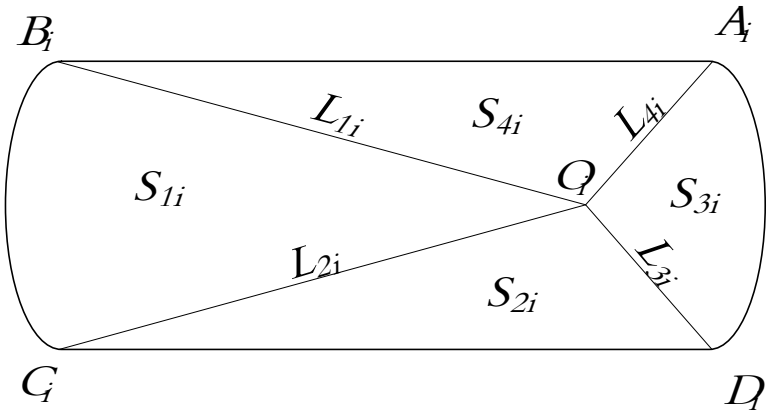


图 A.4　水平扫描圈面积构成

$$S_i = S_{1i} + S_{2i} + S_{3i} + S_{4i} \tag{A.1}$$

其中，$S_{1i} = \dfrac{(L_{1i} + l_{2i})^2 \angle B_iO_iC_i}{2}$

$$S_{2i} = \frac{L_{2i}L_{3i}\sin\angle C_iO_iD_i}{2}$$

$$S_{3i} = \frac{(L_{3i} + l_{4i})^2 \angle D_iO_iA_i}{2}$$

$$S_{4i} = \frac{L_{4i}L_{1i}\sin\angle B_iO_iA_i}{2}$$

式中：

S_i---第 i 个水平扫描圈面积 mm^2；

S_{1i}---扇形 $B_iO_iC_i$ 面积 mm^2；

S_{2i}---三角形 $C_iO_iD_i$ 面积 mm^2；

S_{3i}---扇形 $D_iO_iA_i$面积 mm^2；

S_{4i}---三角形 $A_iO_iB_i$面积 mm^2；

$\angle A_iO_iB_i$、$\angle C_iO_iB_i$、$\angle C_iO_iD_i$、$\angle A_iO_iD_i$的单位为弧度 rad。

d)测量区域累计容积计算公式见（A.2）式

$$V_2=\sum_{i=1}^{N-1}\Delta V_i=\sum_{i=1}^{N-1}\left[\frac{1}{3}\left(S_i+S_{i+1}+\sqrt{S_iS_{i+1}}\right)\Delta H\times10^{-6}\right] \tag{A.2}$$

式中：

V_2---测量区域累积容积 L；

S_i---第 i 个水平扫描圈面积 mm^2；

S_{i+1}---第 i+1 个水平扫描圈面积 mm^2；

N---测量区域的水平扫描圈个数；

ΔH---相邻两个水平扫描圈平面间距离（垂直步长）mm。

e)液位高度 h_i处卧式罐容积 V_{hi}（20℃）计算公式见（A.3）式

$$V_{hi}=V_1+V_2 \tag{A.3}$$

式中（20℃时）：

V_{hi}---液位高度 h_i处卧式罐容积 L；

V_1---测量区域最低点以下残留液体体积 L；

V_2---液位高度 h_i时测量区域累积容积 L。

A.4 容积表编制

利用罐底至水平扫描面的高度值 h_i和该高度值对应的卧式罐容积 V_{hi}，采用三次均匀 B 样条插值算法（见附录 H），编制相应高度（单位为 cm 或 mm）所对应的容积表（单位为 L）,其参考格式见附录 G。

附录 B

数据处理

B.1 基本数据

B.1.1 空间两点（如 A 点和 B 点）距离按（B.1）式计算：

$$|AB| = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2} \tag{B.1}$$

式中：

|AB|---A 点和 B 点之间的距离 mm；

x_A、y_A、z_A---A 点的三维坐标 mm；

x_B、y_B、z_B---B 点的三维坐标 mm。

B.1.2 扫描圆圈圆心坐标和半径按（B.2）式计算：

第一步：

$$\begin{cases} r_1 = \dfrac{1}{n}\sum\limits_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - a_0)^2 + (y_i - b_0)^2 + (z_i - c_0)^2} \\ a_1 = \dfrac{1}{n}\left[\sum\limits_{i=1}^{n} x_i - r_1\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - a_0)/d_i\right] \\ b_1 = \dfrac{1}{n}\left[\sum\limits_{i=1}^{n} y_i - r_1\sum\limits_{i=1}^{n}(y_i - b_0)/d_i\right] \\ c_1 = \dfrac{1}{n}\left[\sum\limits_{i=1}^{n} z_i - r_1\sum\limits_{i=1}^{n}(z_i - c_0)/d_i\right] \end{cases}$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - a_0)^2 + (y_i - b_0)^2 + (z_i - c_0)^2}$$

第二步：

$$\begin{cases} r_2 = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - a_1)^2 + (y_i - b_1)^2 + (z_i - c_1)^2} \\ a_2 = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i - r_2 \sum_{i=1}^{n}(x_i - a_1)/d_i\right] \\ b_2 = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i - r_2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - b_1)/d_i\right] \\ c_2 = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} z_i - r_2 \sum_{i=1}^{n}(z_i - c_1)/d_i\right] \end{cases} \tag{B.2}$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - a_1)^2 + (y_i - b_1)^2 + (z_i - c_1)^2}$$

……

第 m-1 步：

$$\begin{cases} r_{m-1} = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - a_{m-2})^2 + (y_i - b_{m-2})^2 + (z_i - c_{m-2})^2} \\ a_{m-1} = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i - r_{m-1} \sum_{i=1}^{n}(x_i - a_{m-2})/d_i\right] \\ b_{m-1} = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i - r_{m-1} \sum_{i=1}^{n}(y_i - b_{m-2})/d_i\right] \\ c_{m-1} = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} z_i - r_{m-1} \sum_{i=1}^{n}(z_i - c_{m-2})/d_i\right] \end{cases}$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - a_{m-2})^2 + (y_i - b_{m-2})^2 + (z_i - c_{m-2})^2}$$

第 m 步：

$$\begin{cases} r_m = \dfrac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sqrt{(x_i - a_{m-1})^2 + (y_i - b_{m-1})^2 + (z_i - c_{m-1})^2} \\ a_m = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} x_i - r_m \sum_{i=1}^{n}(x_i - a_{m-1})/d_i\right] \\ b_m = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} y_i - r_m \sum_{i=1}^{n}(y_i - b_{m-1})/d_i\right] \\ c_m = \dfrac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n} z_i - r_m \sum_{i=1}^{n}(z_i - c_{m-1})/d_i\right] \end{cases}$$

$$d_i = \sqrt{(x_i - a_{m-1})^2 + (y_i - b_{m-1})^2 + (z_i - c_{m-1})^2}$$

以上各式中：

x_i、y_i、z_i-----圆圈上第 i 个测量点的坐标 mm，i=1，2，・・・n；

a_0、b_0、c_0-----圆圈圆心坐标的初始值（一般设为 0、0、0）mm；

d_i-----圆圈上第 i 个测量点到圆心的距离 mm，i=1，2，・・・n；

n-----圆圈上测量点数；

$r_1 \sim r_m$----第一步到第 m 步圆圈半径计算结果 mm；

$a_1 \sim a_m$----第一步到第 m 步圆圈圆心坐标 x 的计算结果 mm；

$b_1 \sim b_m$----第一步到第 m 步圆圈圆心坐标 y 的计算结果 mm；

$c_1 \sim c_m$----第一步到第 m 步圆圈圆心坐标 z 的计算结果 mm。

当连续两次计算半径之差的绝对值 $|r_m - r_{m-1}| \leqslant 0.1$ mm 时，停止上述迭代计算，并以最后的半径计算结果 r_m 作为所求的圆圈半径，与此圆圈半径对应的 x_m、y_m 和 z_m 就是圆圈的圆心坐标。

B.1.3 罐体倾斜状态下，准确性受到影响的测得值，要对其进行倾斜修正；经倾斜修正后的直圆筒半径、长度等分别求其算术平均值,直圆筒的长度包括其伸长部分的长度。

B.1.4 顶板平均高度按（B.3）式计算：

$$h = (L_2 - L_1) / 2 \qquad (B.3)$$

式中：

h---顶板平均高度 mm；

L_2---罐体内总长 mm；

L_1---直圆筒长度 mm。

B.1.5 弧形顶辅助计算

a) 弧形顶球缺部分内半径 R_1 按（B.4）式计算：

$$R_1 = \frac{h^2 + R^2 - 2Rr}{2(h-r)} \tag{B.4}$$

式中：

R_1---弧形顶球缺部分内半径 mm；

r---过渡曲线体内半径 mm，由制造图纸获得或者拟合二次曲面求解得到；

R---直圆筒内半径 mm；

h---弧形顶内高 mm。

b)弧形顶过渡曲线体所对圆心角按（B.5）式计算：

$$\theta = \arcsin\left(\frac{R_1 - h}{R_1 - r}\right) \tag{B.5}$$

式中：

θ---弧形顶过渡曲线体所对圆心角 rad 或°；

R_1---弧形顶球缺部分内半径 mm；

r---过渡曲线体内半径 mm，由制造图纸获得或者拟合二次曲面求解得到；

h---弧形顶内高 mm。

B.1.6 罐体倾斜角按（B.6）式计算：

$$\beta = \arcsin\frac{|z_C - z_D|}{|CD|} \tag{B.6}$$

式中：

β---罐体倾斜角 rad 或°；

$|CD|$--- C 点和 D 点之间的距离，单位为 mm，C、D 点分别在上述 7.2.3 c)扫描直圆筒上，z 坐标最大点和最小点；

z_C、z_D---分别是 C 点和 D 点的 z 坐标 mm。

B.1.7 液高修正

当计量口检尺点内竖直径与直圆筒的平均直径不一致时，则在计算直圆筒部分容积时，应对检尺点处测出液高按（B.7）式进行修正：

$$H = H_1 + \Delta H_1 \tag{B.7}$$

式中：

H---修正后的计量高度 mm；

H_1---检尺点测出的液高 mm；

ΔH_1---液高修正值 mm；按(B.8)式计算：

$$\Delta H_1 = \frac{1}{2}(D_1 - D) \tag{B.8}$$

式中：

D_1---检尺点测出的内竖直径 mm；

D---直圆筒的平均内直径 mm。

B.1.8 线段长度修正

将三维激光扫描仪测量的线段长度按（B.9）式修正到到 20℃、一个大气压下。

$$D = \frac{D'}{1 - 0.95\times10^{-6}(t-20) + 0.37\times10^{-6}(p-101.325)} \tag{B.9}$$

式中：

D---修正后（20℃、一个大气压下）的线段长度 mm；

D'---修正前（环境温度 t，大气压强 p 时）的线段长度 mm；

t---测量时的环境温度℃；

p---测量时的大气压强 kPa。

忽略大气压强修正后，（B.9）式可写成：

$$D = \frac{D'}{1 - 0.95\times10^{-6}(t-20)}$$

也可采用其它修正公式对测量线段进行修正。

B.2 容积计算---罐体处于水平状态时

B.2.1 直圆筒（含直圆筒伸长体）容积

B.2.1.1 直圆筒部分容积计算公式见图 B.1 和（B.10）式

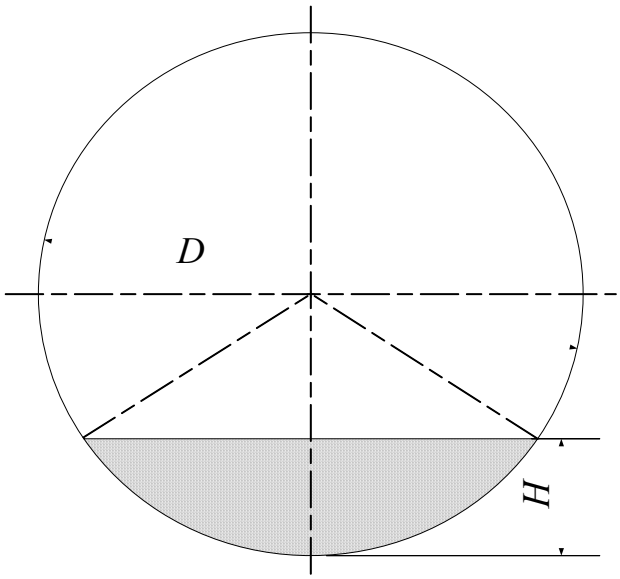


图 B.1 直圆筒容积计算示意图

$$V_{1H}=\frac{L_1}{4}\left[2(2H-D)\sqrt{DH-H^2}+D^2\arccos\left(1-\frac{2H}{D}\right)\right]\times10^{-6}$$

$$=L_1\left[(H-R)\sqrt{2RH-H^2}+R^2\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]\times10^{-6} \qquad (B.10)$$

式中：

V_{1H}---直圆筒在计算高度为 H 时的部分总容积 L；

D---直圆筒的平均内直径 mm；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

L_1---直圆筒的总长（含其伸长体长度）mm；

H---计算高度 mm。

B.2.1.2 直圆筒总容积按（B.11）式计算

$$V_1=\frac{\pi D^2L_1}{4}\times10^{-6}=\pi R^2L_1\times10^{-6} \qquad (B.11)$$

式中：

V_1---直圆筒部分的总容积 L；

D---直圆筒的平均内直径 mm；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

L_1---直圆筒的总长（含其伸长体长度）mm。

B.2.2 顶板部分容积

B.2.2.1 球缺顶

a）部分容积计算公式见（B.12）式

$$V_{2H} = 2R_1^2\{\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\times\left[\left(\frac{R}{R_1}\right)^2\left(\frac{h}{R_1}-1\right)-\frac{2}{3}\left(1-\frac{h}{R_1}\right)^3+\frac{2}{3}\right]+$$
$$\frac{(R-H)\times\sqrt{2RH-H^2}}{R_1^2}\times\left[\frac{1}{120}\left(\frac{R}{R_1}\right)^4+\frac{1}{12}\left(\frac{R}{R_1}\right)^2-\left(\frac{h}{R_1}\right)\right]+$$
$$\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\times\left(1-\frac{H}{R}\right)^3\times\left[\frac{1}{6}\left(\frac{R}{R_1}\right)+\frac{1}{90}\left(\frac{R}{R_1}\right)^6\right]+$$
$$\frac{1}{45}\left(\frac{R}{R_1}\right)^6\times\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\times\left(1-\frac{H}{R}\right)^5+\cdots\}\times10^{-6} \qquad (B.12)$$

式中：

V_{2H}---计算高度为 H 时两端球缺体的部分容积 L；

R_1---球缺顶平均内半径 mm，由制造图纸获得或者拟合二次曲面求解得到；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---球缺顶平均内高 mm；

H---计算高度 mm。

b)总容积计算公式见（B.13）式

$$V_2=\frac{\pi h}{3}(3R^2+h^2)\times10^{-6} \qquad (B.13)$$

式中：

V_2---两端球缺顶总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---球缺顶平均内高 mm。

B.2.2.2 半椭球顶

a)部分容积计算公式见（B.14）式

$$V_{3H}=\pi hH^2\left(1-\frac{H}{3R}\right)\times10^{-6} \qquad (B.14)$$

式中：

V_{3H}---计算高度为 H 时两端半椭球顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---半椭球顶平均内高 mm；

H---计算高度 mm。

b)总容积计算公式见（B.15）式

$$V_3 = \frac{4\pi R^2 h}{3} \times 10^{-6} \tag{B.15}$$

式中：

V_3---两端半椭球顶总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---半椭球顶平均内高 mm。

B.2.2.3　圆锥顶

a)部分容积计算公式见（B.16 和 B.17）式

当 $0 \le H \le R$ 时

$$V_{4H} = \frac{2hR^2}{3}\left\{\arcsin\left[\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H}{R} - 1\right)\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R + \sqrt{2RH - H^2}}{R - H}\right)\right\} \times 10^{-6} \tag{B.16}$$

当 $R < H \le 2R$ 时

$$V_{4H} = \frac{2hR^2}{3}\left\{\pi - \arcsin\left[\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2}\right] + 2\left[\frac{H}{R} - 1\right]\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R + \sqrt{2RH - H^2}}{H - R}\right)\right\} \times 10^{-6} \tag{B.17}$$

式中：

V_{4H}---计算高度为 H 时两端圆锥顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---圆锥顶平均内高 mm；

H---计算高度 mm。

b)总容积计算公式见（B.18）式

$$V_4 = \frac{2\pi R^2 h}{3} \times 10^{-6} \qquad (B.18)$$

式中：

V_4---两端圆锥顶总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---圆锥顶平均内高 mm。

B.2.2.4 弧形顶

弧形顶的部分容积为球缺、半弓形和矩形围绕中心轴的旋转体的容积之和。本规范中，矩形旋转体的容积并入直圆筒容积计算，弧形顶容积只计算球缺和半弓形旋转体容积之和。

由图 B.2 可以得到：

$$\cos\theta = \frac{R-r}{R_1-r}$$

$$x_1 = r\sin\theta$$

$$x_2 = R_1 - (R_1 - r)\sin\theta$$

$$x = f(H)$$

a)单个弧形顶部分容积计算公式见（B.19）式

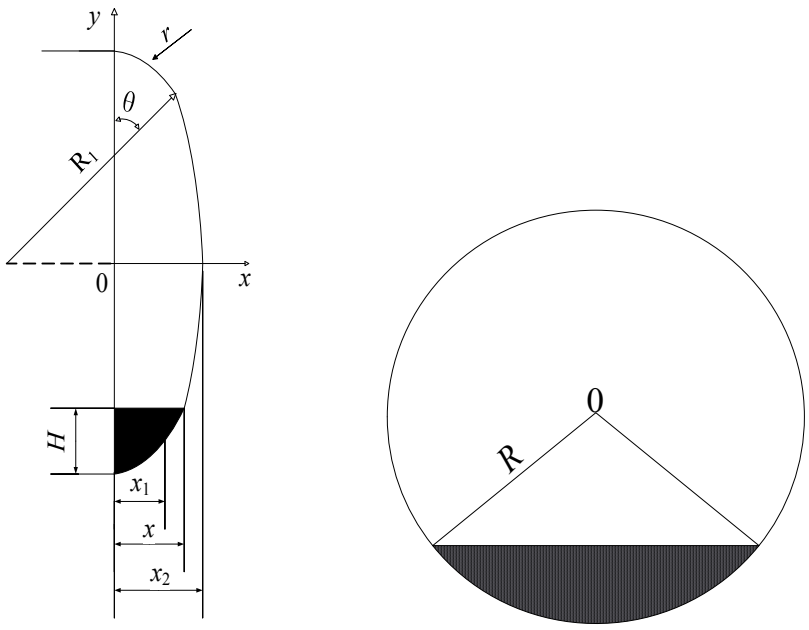
$$V_{5H} = \int_0^x A(x)dx = \int_0^{f(H)} \frac{R^2 \times (\alpha - \sin\alpha)}{2} dx \qquad (B.19)$$

式中：

当 0≤x≤rcosθ时， $R_x = (R-r) + \sqrt{r^2 - x^2}$；

当 $r(1-\cos\theta) \leqslant x \leqslant h$ 时， $R_x = \sqrt{R_1^2 - (R_1 - h + x)^2}$；

$$\alpha = 2\arccos\left(\frac{R-H}{R}\right)$$



R_1---弧形顶球缺部分内半径；　r---过渡曲线体内半径；

R---直圆筒的平均内半径；θ---过渡曲线体所对的圆心角。

图 B.2　弧形顶容积计算示意图

b)总容积计算公式见（B.20）式

$$V_5 = 2\int_0^h A_H(x)dx = 2\left(\int_0^{r\sin\theta} \pi R_x^{\,2}dx + \int_{r\sin\theta}^{h} \pi R_x^{\,2}dx\right)$$

$$= \pi\left[h\left(R^2 - 2Rr + 2r^2 + \frac{1}{3}h^2\right) + r\sin\theta\left(R^2 - 2Rr + 2r^2 - h^2\right)\right.$$

$$\left. + 2\left(h\cos\theta + r\theta\right)\left(R - r\right)r\right] \times 10^{-6} \qquad \text{（B.20）}$$

式中：

V_5---两端弧形顶总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

h---弧形顶平均内高 mm；

R_1---弧形顶球缺部分内半径 mm；

θ---过渡曲线体所对圆心角 rad 或°；

r---弧形顶过渡曲线体内半径 mm，由制造图纸获得或者拟合二次曲面求解得到。

B.2.2.5 圆台顶

圆台顶可看作是大圆锥剪掉一个小圆锥后得到。其大圆锥的内半径为 R，小圆锥的内半径为 r，内高为 h，且具有以下关系式，见（B.21）式和（B.22）式：

$$h_D = hR/(R-r) \tag{B.21}$$

$$h_d = hr/(R-r) \tag{B.22}$$

式中：

h_D---以直圆筒平均内半径 R 为半径的大圆锥平均内高 mm；

h_d---以 r 为内半径的小圆锥的平均内高 mm。

a)部分容积计算公式见（B.23、B.24、B.25、B.26）式

当 $0 \le H \le (R-r)$ 时

$$V_{6H} = \frac{2h_D R^2}{3}\left\{\arcsin\left[\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H}{R}-1\right)\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2} + \left(1-\frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R+\sqrt{2RH-H^2}}{R-H}\right)\right\} \times 10^{-6} \tag{B.23}$$

式中：

V_{6H}---计算高度为 H 时两端圆台顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

H---计算高度 mm。

当 $(R-r) < H \le R$ 时

$$V_{6H} = \frac{2h_D R^2}{3}\left\{\arcsin\left[\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H}{R}-1\right)\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2} + \left(1-\frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R+\sqrt{2RH-H^2}}{R-H}\right)\right\} \times 10^{-6}$$

$$- \frac{2h_d r^2}{3}\left\{\arcsin\left[\sqrt{\frac{2H_1}{r}-\left(\frac{H_1}{r}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H_1}{r}-1\right)\sqrt{\frac{2H_1}{r}-\left(\frac{H_1}{r}\right)^2} + \right.$$

$$\left(1-\frac{H_1}{r}\right)^2 \ln\left(\frac{R+\sqrt{2rH_1-H_1^2}}{r-H_1}\right)\Bigg\}\times 10^{-6} \qquad (B.24)$$

式中：

V_{6H}---计算高度为 H 时两端圆台顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

r---圆台顶端小圆平均内半径 mm；

H---计算高度 mm，$H_1 = H-(R-r)$。

当 $R<H\le R+r$ 时

$$V_{6H} = \frac{2h_D R^2}{3}\left\{\pi - \arcsin\left[\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H}{R}-1\right)\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right.$$

$$\left. + \left(1-\frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R+\sqrt{2RH-H^2}}{H-R}\right)\right\}\times 10^{-6}$$

$$-\frac{2h_d r^2}{3}\left\{\pi - \arcsin\left[\sqrt{\frac{2H_1}{r}-\left(\frac{H_1}{r}\right)^2}\right] + 2\left(\frac{H_1}{r}-1\right)\sqrt{\frac{2H_1}{r}-\left(\frac{H_1}{r}\right)^2} + \right.$$

$$\left.\left(1-\frac{H_1}{r}\right)^2 \ln\left(\frac{r+\sqrt{2rH_1-H_1^2}}{H_1-r}\right)\right\}\times 10^{-6} \qquad (B.25)$$

式中：

V_{6H}---计算高度为 H 时两端圆台顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

r---圆台顶端小圆平均内半径 mm；

H---计算高度 mm，$H_1 = H-(R-r)$。

当 $R+r<H\le 2R$ 时

$$V_{6H} = \left\{\frac{2h_D R^2}{3}\left[\pi - \arcsin\left(\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right) + 2\left(\frac{H}{R}-1\right)\sqrt{\frac{2H}{R}-\left(\frac{H}{R}\right)^2}\right.\right.$$

$$\left.\left. - \left(1-\frac{H}{R}\right)^3 \ln\left(\frac{R+\sqrt{2RH-H^2}}{H-R}\right)\right] - \frac{2\pi h_d r^2}{3}\right\}\times 10^{-6} \qquad (B.26)$$

式中：

V_{6H}---计算高度为 H 时两端圆台顶的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

r---圆台顶端小圆平均内半径 mm；

H---计算高度 mm。

b)总容积计算公式见（B.27）式

$$V_6 = \frac{2\pi(R^2 + Rr + r^2)h}{3} \times 10^{-6} \qquad (B.27)$$

式中：

V_{6H}---两端圆台顶总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

r---圆台顶端小圆平均内半径 mm；

h---圆台顶平均内高 mm。

B.3 容积计算---处于倾斜状态时

B.3.1 直圆筒（含伸长筒体）容积（计算示意图见图 B.3）

B.3.1.1 部分容积计算公式见（B.28、B.29、B.30）式

当 $0 \leqslant H_G \leqslant L_1 \tan\beta$ 时

$$V_{1H} = \frac{R^3}{\tan\beta}\left\{\frac{1}{3}\left[3 - \frac{2H_G}{R} + \left(\frac{H_G}{R}\right)^2\right]\sqrt{\frac{2H_G}{R} - \left(\frac{H_G}{R}\right)^2} - \left(1 - \frac{H_G}{R}\right)\arccos\left(1 - \frac{H_G}{R}\right)\right\} \times 10^{-6} \qquad (B.28)$$

式中：

V_{1H}---直圆筒在高端高度为 H_G 时的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

H_G---高端液高 mm；

β---罐体倾斜角 rad 或°。

当 $L_1 \tan\beta < H \leq 2R$ 时

$$V_{1H} = \frac{R^3}{\tan\beta}\left\{\frac{1}{3}\left[3 - \frac{2H}{R} + \left(\frac{H}{R}\right)^2\right]\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2} - \left(1 - \frac{H}{R}\right)\arccos\left(1 - \frac{H}{R}\right)\right.$$

$$\left. - \frac{1}{3}\left[3 - \frac{2H}{R} + \left(\frac{H}{R}\right)^2\right]\sqrt{\frac{2H}{R} - \left(\frac{H}{R}\right)^2} + \left(1 - \frac{H}{R}\right)\arccos\left(1 - \frac{H}{R}\right)\right\} \times 10^{-6} \qquad (B.29)$$

式中：

V_{1H}---直圆筒在高端高度为 H_G 时的部分容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

H_G---高端液高 mm；

H_D---低端液高 mm，$H_D = H_G - L1\tan\beta$；

β---罐体倾斜角 rad 或°。

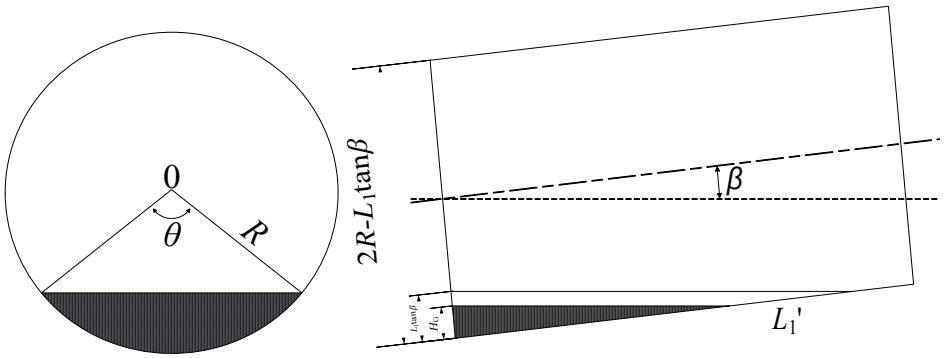


图 B.3　倾斜状态正直圆筒部分容积计算示意图

当 $H_G > 2R$ 时

$$V_{1H} = V_1 - \frac{R^3}{\tan\beta}\left\{\frac{1}{3}\left[3 - \frac{2H_K}{R} + \left(\frac{H_K}{R}\right)^2\right]\sqrt{\frac{2H_K}{R} - \left(\frac{H_K}{R}\right)^2} - \left(1 - \frac{H_K}{R}\right)\arccos\left(1 - \frac{H_K}{R}\right)\right\} \times 10^{-6} \qquad (B.30)$$

式中：

V_{1H}---直圆筒在高端高度为 H_G 时的部分容积 L；

V_1---直圆筒总容积 L；

R---直圆筒的平均内半径 mm；

H_K---低端液面空高 mm，$H_K = 2R - H_G$；

β---罐体倾斜角 rad 或°。

B.3.1.2 利用计量口所测液位高度计算部分容积时，高端液高和计量口处所测液位高度的换算关系见（B.31）式和（B.32）式：

当当计量口在倾斜的高端时

$$H_J = H_G\cos\beta + D\sin\beta\tan\beta - (L_1 - a)\sin\beta \qquad (B.31)$$

当计量口在倾斜的低端时

$$H_J = H_G \cos\beta + D\tan\beta\sin\beta - a\sin\beta \qquad (B.32)$$

（B.31）式和（B.32）式中：

H_J---测深钢卷尺在计量口所测的液位高度 mm；

H_G---卧式罐内高端液高 mm（见图 B.3）；

D---直圆筒的平均内直径 mm；

a---计量口至最近直圆筒体和封头连接处的距离 mm（见图 B.4）；

L_1---直圆筒内总长 mm；

β---罐体倾斜角 rad 或°。

图 B.4　卧式金属罐计量口（人口）位置示意图

B.3.1.3 总容积计算

与卧式罐处于水平状态时计算相同。

B.3.2 顶板容积

B.3.2.1 部分容积计算

对球缺顶、弧形顶、半椭球顶的部分容积，在使用（B.33）式对液高进行修正后，仍可使用水平状态下的部分容积计算公式。

$$\Delta H = \frac{4h\sin\beta}{3\pi}\sqrt{\frac{2H_G}{R} - \left(\frac{H_G}{R}\right)^2} \qquad (B.33)$$

式中：

ΔH---倾斜时的液高修正值 mm，液面高端取“+”，液面低端取“-”；

H_G---高端液高 mm；

h---顶板内高 mm。

R---直圆筒的平均内半径 mm；

β---罐体倾斜角 rad 或°。

B.3.2.2 总容积计算

使用水平状态下各顶板的总容积计算公式计算。

B.4 附件体积计算

罐内扶梯、加强圈等，可视为至上而下均匀分布，按实测数据计算其体积，也可按施工图纸（外测时）提供的钢材质量（钢材尺寸）计算其体积。附件体积要在相应部位的部分容积内扣除。附件体积计算公式见（B.34）式：

$$V_7 = \frac{m}{p} \tag{B.34}$$

式中：

V_7---附件体积 L；

m---附件质量 kg；

ρ---附件密度 kg/L。

对于罐底设有一个凹陷部分作为沉降分离设施的卧式罐，其凹陷部分的容积可作为罐底计量基准点以下“死量”编入容积表中。

附录 C

容积测量结果不确定度评定示例

C.1 校准方法

用三维激光扫描仪测量卧式罐直圆筒（含直圆筒伸长体）长度、罐内总长、直圆筒内直径等，用测深钢卷尺测量罐内容积计算高度，通过计算得到卧式罐容积。

C.2 校准所用设备

C.2.1 三维激光扫描仪，距离测量范围：（500～10000）mm，MPE=±1 mm；角度测量范围：（0～360）°，MPE=±10″；出厂编号：151115，生产厂家：徕卡。

C.2.2 测深钢卷尺,测量范围：（0～30）m，MPE=±2.0 mm，出厂编号：0229，生产厂家：青县计量仪表有限责任公司。

C.2.3 便携式电子温度计，测量范围：（-10～35）℃,U=0.2℃（k=2），出厂编号：51-54 SeriesⅡ，生产厂家：FLUKE。

C.3 被校卧式罐

标称容积 20000 L，顶板类型为半椭球顶，附件体积小，忽略不计，罐内无残留液体，罐倾斜忽略不计。

C.4 测量模型

$$V = V_{直} + V_{顶}$$

其中：

$$V_{直} = L_1\left[(H-R)\sqrt{2RH-H^2} + R^2\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]\times10^{-6}$$

$$V_{顶} = \pi h H^2\left(1-\frac{H}{3R}\right)\times10^{-6}$$

所以，$V = L_1\left[(H-R)\sqrt{2RH-H^2} + R^2\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]\times10^{-6} + \pi h H^2\left(1-\frac{H}{3R}\right)\times10^{-6}$

式中：

V---罐内计量高度 H时，卧式罐内容积 L；

$V_{直}$---罐内计量高度 H时，直圆筒（包括伸长体）内容积 L；

$V_{顶}$---罐内计量高度 H时，两端顶板总容积 L；

L_1---直圆筒（包括伸长体）的长度 mm；

R---直圆筒（包括伸长体）的平均内半径 mm；

H---罐内计量高度 mm；

h---两端顶板平均高度 mm。

C.5 灵敏系数

$$c_1=\frac{\partial V}{\partial L_1}=\left[(H-R)\sqrt{2RH-H^2}+R^2\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]\times10^{-6}$$

当 $H<R$ 时

$$c_2=\frac{\partial V}{\partial H}=\left[2L_1\sqrt{2RH-H^2}+\left(2\pi hH-\frac{\pi hH^2}{R}\right)\right]\times10^{-6}$$

当 $H=R$ 时

$$c_2=\frac{\partial V}{\partial H}=\frac{4}{3}\pi hH\times10^{-6}$$

当 $R<H<2R$

$$c_2=\frac{\partial V}{\partial H}=\left[2L_1\sqrt{2RH-H^2}+\left(2\pi hH-\frac{\pi hH^2}{R}\right)\right]\times10^{-6}$$

当 $R>H$ 时

$$c_3=\frac{\partial V}{\partial R}=\left\{L_1\left[\frac{2H^2-4HR}{\sqrt{2RH-H^2}}+2R\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]+\frac{\pi hH^3}{3R^2}\right\}\times10^{-6}$$

当 $R=H$ 时

$$c_3=\frac{\partial V}{\partial R}=\left(\pi RL_1+\frac{\pi hH^3}{3R^2}\right)\times10^{-6}$$

当 $R<H$ 时

$$c_3=\frac{\partial V}{\partial R}=\left\{L_1\left[\frac{2H^2-4HR}{\sqrt{2RH-H^2}}+2\pi R-2R\arccos\left(\frac{H}{R}-1\right)\right]+\frac{\pi hH^3}{3R^2}\right\}\times10^{-6}$$

$$c_4=\frac{\partial V}{\partial h}=\pi H^2\left(1-\frac{H}{3R}\right)\times10^{-6}$$

20℃时，R=1119.492 mm，D=2238.986 mm，L_1=4541.971 mm，L_2=5458.540 mm，h=458.164 mm，H=2000.154 mm，上述灵敏系数计算结果如下：

$$c_1=\frac{\partial V}{\partial L_1}=\left[(H-R)\sqrt{2RH-H^2}+R^2\arccos\left(1-\frac{H}{R}\right)\right]\times10^{-6}=3.7120\ \text{L/mm}$$

$$c_2=\frac{\partial V}{\partial H}=\left[2L_1\sqrt{2RH-H^2}+\left(2\pi hH-\frac{\pi hH^2}{R}\right)\right]\times10^{-6}$$

$$=6.8923\ \text{L/mm}$$

$$c_3=\frac{\partial V}{\partial R}=\left\{L_1\left[\frac{2H^2-4HR}{\sqrt{2RH-H^2}}+2\pi R-2R\arccos\left(\frac{H}{R}-1\right)\right]+\frac{\pi hH^3}{3R^2}\right\}\times10^{-6}$$

$$=21.9484\ \text{L/mm}$$

$$c_4=\frac{\partial V}{\partial h}=\pi H^2\left(1-\frac{H}{3R}\right)\times10^{-6}=5.0806\ \text{L/mm}$$

C.6 输入量标准不确定度评定

利用表 C.1 的数据对输入量的标准不确定度进行评定。

表 C.1　换算成 20℃时的卧式罐容积测量数据及容积计算结果

测量序号	1	2	3	平均值
直圆筒内半径 R_i /mm	1118.993	1119.993	1119.493	1119.492
直圆筒内直径 D_i /mm	2237.986	2239.986	2238.986	2238.986
直圆筒长度 L_{1i} /mm	4541.971	4542.972	4540.972	4541.971
罐内总长 L_{2i} /mm	5458.207	5461.207	5456.207	5458.540
两端封头平均高度 h_i mm	457.998	458.998	457.498	458.164
罐底至罐内计量高度 H=2000.154 mm 处罐内容积 /L	19175.6553	19206.4025	19180.3774	19187.4717

C.6.1 输入量标准不确定度的 A 类评定

三维激光扫描仪对卧式罐内容积进行 3 次测量，罐内计量高度 H=2000.154 mm 时，3 次测量的罐内容积分别是 19175.6553 L、19206.4025 L、19180.3774 L，采用极差法评定罐

内容积测量不确定度，极差系数 c_3=1.69,$u_A(V)$=(19206.4025-19175.6553) L/($\sqrt{3}$ c_3)=10.5044 L。

C.6.2 输入量标准不确定度的B类评定

C.6.2.1 输入量 L_1 和 L_2 的标准不确定度 $u(L_1)$和 $u(L_2)$的评定

三维激光扫描仪和钢卷尺测量同一卧式罐的罐内总长和直圆筒长度，差值一般不超过10 mm，呈均匀分布，$k=\sqrt{3}$， $u(L_1)= u(L_2)$=10 mm/$\sqrt{3}$=5.7737 mm。

C.6.2.2 输入量 H 的标准不确定度 $u(H)$的评定

由测深钢卷尺的检定证书可知：MPE= ± 2.0 mm,呈均匀分布，$k=\sqrt{3}$，$u(H)$=2.0 mm/$\sqrt{3}$=1.1547 mm 。

C.6.2.3 输入量 R 的标准不确定度 $u(R)$的评定

三维激光扫描仪和套管尺测量同一卧式罐的直圆筒内半径，差值一般不超过0.5 mm，呈均匀分布，$k=\sqrt{3}$， $u(R)$=0.5 mm × 1/$\sqrt{3}$=0.2887 mm。

C.6.2.4 输入量 h 的标准不确定度 $u(h)$的评定

$h=(L_2-L_1)/2$,由上文可知， $u(L_1)= u(L_2)$=5.7737 mm，分量灵敏系数 $c(L_1)=-0.5$,$c(L_2)=0.5$,L_1 和 L_2 相互独立，$u(h)=\{[c(L_1)\times u(L_1)]^2+[c(L_2)\times u(L_2)]^2\}^{1/2}$=4.0820 mm。

C.6.2.5 使用B类评定方法的标准不确定度合成

各输入量相互独立，B类评定方法的合成标准不确定度为：

$u_B(V)=\{[c_1\ u(L_1)]^2+[c_2\ u(H)]^2+[c_3\ u(R)]^2+[c_4\ u(h)]^2\}^{1/2}$=31.5107 L。

C.6.2.6 使用B类评定方法的标准不确定度汇总表（表C.2）

表C.2 使用B类评定方法的标准不确定度汇总表

标准不确定度分量 $u(x_i)$	不确定度来源	标准不确定度值 $u(x_i)$的值	灵敏系数 c_i	合成标准不确定度 $\lvert c_i \rvert u(x_i)$
$u(L_1)$	三维激光扫描仪直圆筒长度测量	5.7737 mm	3.7120 L/mm	21.4320 L
$u(H)$	测深钢卷尺罐内计量高度测量	1.1547 mm	6.8923 L/mm	7.9585 L
$u(R)$	三维激光扫描仪直圆筒半径测量	0.2887 mm	21.9484 L/mm	6.3365 L
$u(h)$	三维激光扫描仪顶板高度测量	4.0820 mm	5.0806 L/mm	20.7390 L

C.7 合成标准不确定度（罐内计量高度 H=2000.013mm）

$$u_c(V)=\{[u_B(V)]^2+[u_A(V)]^2\}^{1/2}=33.2155\ \mathrm{L}$$

C.8 扩展不确定度（罐内计量高度 H=2000.013mm）

取包含因子 k=2,被校卧式罐容积测量的扩展不确定度：

$$U=33.2149\ \mathrm{L}\times 2=66.43\ \mathrm{L}$$

3 次容积测量的平均值 $\overline{V}$ =19187.4717 L，用相对扩展不确定度表示：

$$U_r=U/\overline{V}\times 100\ \%=0.35\%\qquad (k=2)$$

附录 D

校准记录参考格式（竖直扫描法）

记录编号：

<table>
<tr><td colspan="6">委托方名称：</td></tr>
<tr><td colspan="6">委托方地址：</td></tr>
<tr><td>器具名称</td><td colspan="2"></td><td>型号/规格</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>出厂编号</td><td colspan="2"></td><td>生产厂家</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>罐　　号</td><td colspan="2"></td><td>盛入介质</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6">校准使用的主要计量标准器</td></tr>
<tr><td colspan="2">名称</td><td>测量范围</td><td colspan="2">不确定度或最大允许误差或准确度等级</td><td>证书有效期</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td>技术依据</td><td colspan="2"></td><td colspan="2">校准日期</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">罐内残留液体体积/L</td><td></td><td colspan="2">液位高度/mm</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">检尺点内竖直径/mm</td><td></td><td colspan="2">参照高度/mm</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">校准时环境温度/℃</td><td></td><td colspan="2">校准时环境湿度/%</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">校准数据及结果</td></tr>
<tr><td>序号 i</td><td>罐内环境温度 t_i/℃</td><td>直圆筒半径 R_i'/mm</td><td>直圆筒长度 L_{1i}'/mm</td><td>罐总长 L_{2i}'/mm</td><td>顶板高度 h_i'/mm</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>其它校准数据</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="6">20℃时校准总容积：</td></tr>
<tr><td colspan="6">20℃时校准总容积的不确定度：</td></tr>
</table>

校准员：　　核验员：

附录 E

校准记录参考格式（水平扫描法）

记录编号：

<table>
<tr><td colspan="6">委托方名称：</td></tr>
<tr><td colspan="6">委托方地址：</td></tr>
<tr><td>器具名称</td><td colspan="2"></td><td>型号/规格</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>出厂编号</td><td colspan="2"></td><td>生产厂家</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>罐　　号</td><td colspan="2"></td><td>盛入介质</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6">校准使用的主要计量标准器</td></tr>
<tr><td colspan="2">名称</td><td>测量范围</td><td colspan="2">不确定度或最大允许
误差或准确度等级</td><td>证书有效期</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td></td><td colspan="2"></td><td></td></tr>
<tr><td>技术依据</td><td colspan="2"></td><td>校准日期</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">罐内残留液体体积/L</td><td></td><td>液位高度/mm</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">检尺点内竖直径/mm</td><td></td><td>参照高度/mm</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>校准时环境
温度/℃</td><td></td><td>校准时环境
湿度/%</td><td></td><td>校准时罐内
环境温度/℃</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">换算成 20℃时校准数据及结果</td></tr>
<tr><td colspan="2">水平扫描圈序号 i</td><td colspan="2">水平扫描圈面积 S_i/L</td><td colspan="2">垂直步长 ΔH_i/mm</td></tr>
<tr><td colspan="2">1</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">2</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">3</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">· · ·</td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="6">20℃校准总容积：</td></tr>
<tr><td colspan="6">20℃校准总容积的不确定度：</td></tr>
</table>

校准员：　　核验员：

附录 F

校准证书内页参考格式

校准结果及说明

F.1 校准结果

校准总容积：

总容积的测量结果不确定度：

F.2 说明：

F.2.1 附容积表共　　页。

F.2.2 本容积表所示为 20℃时的容积，在罐壁温度 t_s 时，可按(F.1)式进行换算：

$$V_t = V_{20}[1+2a(t_s-20)] \tag{F.1}$$

式中：V_t——罐壁温度 t_s 时的容积 m^3；

V_{20}——容积表所示的容积 m^3；

t_s——罐壁的平均温度℃；

a——罐材料的线膨胀系数 1/℃。

F.2.3 罐壁的温度 t_s 可由(F.2)式计算：

$$t_s=(7t_L+t_A)/8 \tag{F.2}$$

式中：t_s——罐壁温度℃；

t_L——罐内液体温度℃；

t_A——罐外四周空气温度的平均值℃。

对于带有绝热层壳壁的油罐（保温罐），可采用 $t_s=t_L$。

F.2.4 罐内液体温度 t_L 时，罐内液位高度修正由（F.3）式计算：

$$h_t = h_{20}[1 + a_c(t_L - 20)] \tag{F.3}$$

式中：h_t——温度修正后的罐内液位高度 mm；

h_{20}——20℃时测深钢卷尺的示值 mm；

t_L——罐内液体温度℃；

a_c——测深钢卷尺的线膨胀系数$℃^{-1}$。

F.2.5 建议复校时间间隔不超过 4 年，由于复校时间间隔的长短是由卧式罐的使用情况、使用者、卧式罐本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 G

容积表参考格式

液位高度/mm	容积值/L	液位高度/mm	容积值/L

附录 H

三次均匀 B 样条插值算法

三次均匀 B 样条插值算法需要较少的计算和存储空间，比较稳定；而且与低次多项式相比，可以灵活模拟任意曲线形状。

H.1、三次均匀 B 样条分段插值方程

任意给定 n 个互不重合的测量点列（又称型值点列）｛ $Q_i(h_i,v_i)$ i=1,2,3,・・・n-1｝，可以利用三次均匀 B 样条插值方法插值一条分段连续的 B 样条曲线。公式（H.1）为第 i 段的 B 样条插值方程。

$$s_i(t) = \frac{1}{6}\begin{pmatrix}1 & t & t^2 & t^3\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1 & 4 & 1 & 0\\ -3 & 0 & 3 & 0\\ 3 & -6 & 3 & 0\\ -1 & 3 & -3 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}P_{i-1}\\ P_i\\ P_{i+1}\\ P_{i+2}\end{pmatrix} \qquad \text{(H.1)}$$

式中：i=1,2,3,・・・,n-1 ；

t——参数，0≤t≤1；

P_{i-1}、P_i、P_{i+1}、P_{i+2}——插值曲线的控制点；每个控制点 P_i 有两个坐标 s_i 和 t_i，记作 $P_i(s_i,t_i)$，s_i（横坐标）代表第 i 个控制点的罐内液位高度,单位为 mm；t_i（纵坐标）代表 20℃时，第 i 个控制点的罐内液体体积,单位为 L。

每个测量点 Q_i 有两个坐标 h_i 和 v_i，记作 $Q_i(h_i,v_i)$，h_i（横坐标）代表第 i 个测量点的罐内液位高度,单位为 mm；v_i（纵坐标）代表 20℃时，第 i 个测量点的罐内液体体积,单位为 L。

H.2、用测量点坐标反算控制点坐标

测量点和控制点有下列关系见（H.2）式：

$$P_{i-1} + 4P_i + P_{i+1} = 6Q \qquad \text{（H.2）}$$

具体展开是：

$$P_0 + 4P_1 + P_2 = 6Q$$
$$P_1 + 4P_2 + P_3 = 6Q$$
$$P_2 + 4P_3 + P_4 = 6Q$$
$$\cdots\cdots$$
$$P_{n-1} + 4P_n + P_{n+1} = 6Q$$

共 n 个方程，（n+2）个未知数，需补充两个边界条件方程才能求解；根据卧式罐的

结构特点，补充边界条件方程（H.3）式和（H.4）式，（H.5）式是用测量点反算控制点的矩阵方程。

$$2P_0 - 5P_1 + 4P_2 - P_3 = 0 \tag{H.3}$$

$$2P_{n+1} - 5P_n + 4P_{n-1} - P_{n-2} = 0 \tag{H.4}$$

$$\begin{pmatrix} 2 & -5 & 4 & -1 & & & & \\ 1 & 4 & 1 & & & & & \\ & 1 & 4 & 1 & & & & \\ & & 1 & 4 & 1 & & & \\ & & & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ & & & & 1 & 4 & 1 & \\ & & & & & 1 & 4 & 1 \\ & & & & -1 & 4 & -5 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \\ P_{n+1} \end{pmatrix} = 6 \begin{pmatrix} 0 \\ Q \\ Q \\ Q \\ \vdots \\ Q_{-1} \\ Q \\ 0 \end{pmatrix} \tag{H.5}$$

(H.5)式可简写为 $AP = 6Q$,A 为（n+2）×(n+2)维的系数矩阵，除对角线附近为非零元素外，其余矩阵元素均为零，其中：

P为（n+2）维控制点列，$P = \left(P_0\ P_1\ P_2 \cdots P_{n-1}\ P_n\ P_{n+1}\right)^{\mathrm{T}}$；

Q为（n+2）维测量点列，$Q = \left(0\ Q\ Q \cdots Q_{-1}\ Q\ 0\right)^{\mathrm{T}}$。

将测量点列 $Q_i(h_i,\ v_i)(i=1,\ 2,\ 3,\ \ldots\ n-1)$的横、纵坐标分别代入矩阵方程（H.5）式，可分别求得曲线控制点列的横纵坐标 s_i和 $t_i\{i=1,2,3,\ \ldots n-1\}$。

例：测量数据点 Q_0（25O mm，2002 L）、Q_1（55O mm，6531 L）、Q_2（85O mm，12285 L）、Q_3（115O mm，18708 L）、Q_4（145O mm，25475 L）、Q_5（175O mm，32170 L）、Q_6（2050 mm，38455 L）、Q_7（235O mm，43954 L）、Q_8（265O mm，48340 L）。将这些测量点列的横坐标代入式（H.5），得到如下的 11×11 维矩阵方程，即式（H.6）。

$$\begin{bmatrix} 2 & -5 & 4 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 4 & -5 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \\ s_5 \\ s_6 \\ s_7 \\ s_8 \\ s_9 \\ s_{10} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} 0 \\ 250 \\ 550 \\ 850 \\ 1150 \\ 1450 \\ 1750 \\ 2050 \\ 2350 \\ 2650 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{H.6}$$

求解该方程，可求得控制点列的横坐标序列：

S=[-50　250　550　850　1150　1450　1750　2050　2350　2650　2950]^{T}

同理，可求得控制点列的纵坐标序列：

T=[-1768 1876 6278 12198 18639 25494 32237 38580 44174 48450 52067]^{T}

则 11 个控制点坐标分别为 P_0（-50，-1768）、P_1（250，1876）、P_2（550，6278）、P_3（850，12198）、P_4（1150，18639）、P_5（1450，25494）、P_6（1750，32237）、P_7（2050，38580）、P_8（2350，44174）、P_9（2650，48450）、P_{10}（2950，52067）。将该控制点列分别代入（H.1）式，即可得到一条分段连续的均匀三次 B 样条曲线。要计算曲线上任意一点的横、纵坐标时，只需将控制点列的横、纵坐标和参数 t 的值代入（H.1）式即可。