

储油罐的变位识别与罐容表标定

摘要

通常加油站都有若干个储存燃油的地下储油罐，并且一般都有与之配套的“油位计量管理系统”，通过预先标定好的罐容表，可得到罐内油位高度与储油量的变化关系。但许多储油罐使用一段时间以后，由于地基变形等原因，使罐体的位置发生纵向倾斜和横向偏转，从而导致罐容表发生改变。按照有关规定，需要定期对罐容表进行重新标定。因而建立储油罐变位后储油量与油高及变位参数（纵向倾斜 α 和横向偏转 β ）之间的一般关系，对罐体储油量的真实计算及加油站的经营管理具有重要意义。

对于问题一，本文先建立没有变位时的罐体储油量和油位高度的关系，将计算值与实际值进行比较，进行图形仿真和误差分析，从而检验模型的可靠性和准确性。对于发生纵向倾斜后的椭圆型储油罐，在油液面低于柱体右端最低点和高于左端最高点，及两者之间，储油量与油位高度有不同的关系式，因而我们分了三段积分处理，得出储油量与油位高度的函数关系式。用建立好的函数关系式计算出给定油位探针监测高度的储油量，和实际储油量进行图像曲线对比，并进行误差分析，从而验证建立的函数关系式的准确性。在用建立好的模型对变位和未变位的两种情况的储油量随探针监测油位高度变化的曲线进行对比并列表分析，从而得出罐体变位后同一监测高度，变位后罐容体的实际储油量比原先罐容表上标定的值小，并计算出罐体变位后油位高度间隔1cm的罐容表标定值。

对于问题二，本文利用几何关系，将横向偏转修正，以消除其对储油量的影响，将问题归结为只需要计算纵向偏转对储油量的影响，将储油量的计算分成三部分：圆柱体和左右球冠体，圆柱体可直接积分得到，球冠体通过柱面坐标变换，将二重积分转换为定积分，然后利用微分中值定理近似计算该定积分。三者相加得到整个储油量体积，且和问题一一样分为油液面低于圆柱体部分右端最低点和高于左端最高点，及两者之间三段，再整合为一个函数关系式。得出的计算值与实际数据比较，进行误差分析，从而用线性拟合的方法对函数关系式进行修正使其与实际值的误差更小。最后利用循环迭代并结合矩形套定理，逐步缩小范围，以确定偏转角 α 和 β ，以使误差在一定精度范围内符合实际值，最后将得到的偏转角 $\alpha = 2.1118^\circ$ ， $\beta = 2.5024^\circ$ 代入建立的函数关系式，用以模拟检验，得出结果与实际相符。之后我们给出了油位高度间隔为10cm的罐容表标定值。

最后，本文对模型进行了进一步的讨论和改进，对问题二建议制定出不同的 α 和 β 对应储油量体积增长的拐点的表，只要根据实际数据利用二阶差分近似求得拐点位置，只需查表即可得到 α 和 β 。

关键字：罐容体储油量 分段积分 微分中值定理 线性拟合 循环迭代

一、问题的背景

通常加油站都有若干个储存燃油的地下储油罐，并且一般都有与之配套的“油位计量管理系统”，采用流量计和油位计来测量进/出油量与罐内油位高度等数据，通过预先标定的罐容表（即罐内油位高度与储油量的对应关系）进行实时计算，以得到罐内油位高度和储油量的变化情况。

许多储油罐在使用一段时间后，由于地基变形等原因，使罐体的位置会发生纵向倾斜和横向偏转等变化（以下称为变位），从而导致罐容表发生改变。按照有关规定，需要定期对罐容表进行重新标定。

二、问题的提出与重述

由于地基变形等原因，使罐体的位置发生变位，从而导致罐容表不能显示实际的储油量，罐容表误差过大而不能正常使用，造成加油站油品虚假盈亏。这样，就给加油站经营管理带来一些问题。如造成加油站虚假盈亏，无法对油品数量进行正确的监控和管理，以及年底盘底或新旧站长变更时，无法进行正常的油品库存交接。因而需要对罐容表进行重新标定。图1是一种典型的储油罐尺寸及形状示意图，其主体为圆柱体，两端为球冠体。图2是其罐体纵向倾斜变位的示意图，图3是罐体横向偏转变位的截面示意图。

请你们用数学建模方法研究解决储油罐的变位识别与罐容表标定的问题。

(1) 为了掌握罐体变位后对罐容表的影响，利用如图4的小椭圆型储油罐（两端平头的椭圆柱体），分别对罐体无变位和倾斜角为 $\alpha = 4.1^\circ$ 的纵向变位两种情况做了实验，实验数据如附件1所示。请建立数学模型研究罐体变位后对罐容表的影响，并给出罐体变位后油位高度间隔为1cm的罐容表标定值。

(2) 对于图1所示的实际储油罐，试建立罐体变位后标定罐容表的数学模型，即罐内储油量与油位高度及变位参数（纵向倾斜角度 α 和横向偏转角度 β ）之间的一般关系。请利用罐体变位后在进/出油过程中的实际检测数据（附件2），根据你们所建立的数学模型确定变位参数，并给出罐体变位后油位高度间隔为10cm的罐容表标定值。进一步利用附件2中的实际检测数据来分析检验你们模型的正确性与方法的可靠性。

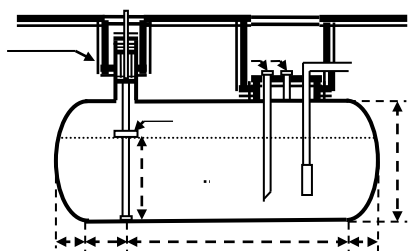


图1 储油罐正面示意图

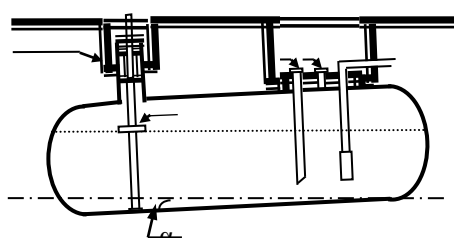


图2 储油罐纵向倾斜变位后示意图

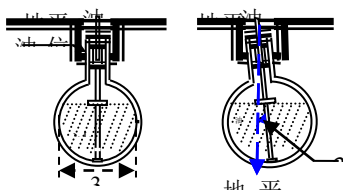


图3 储油罐界面示意图

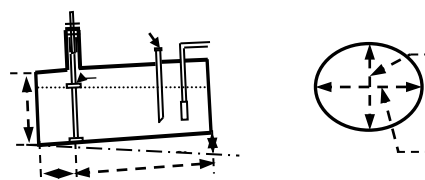


图4 小椭圆油罐截面示意图

三、 基本假设

1. 假设油浮子始终处于水平状态，并且油浮子的体积不记，视为质点；
2. 假设油位探针是固定的，不发生任何转动；
3. 忽略外界因素对储油罐内部的影响并排除储油罐的机械故障；
4. 假设油位不受温度、压力等因素的影响；
5. 假设油位探针检测液位控制灵敏，罐容表标定无误；
6. 假设储油罐容器壁光滑平整，没有凹凸现象；
7. 忽略储油罐内各器件所占的体积。

四、 模型的主要符号变量说明

问题一的主要符号说明：

V ：无变位时椭圆形储油罐的储油量；

V_1 ：椭圆型储油罐变位后，底部部分覆盖时的储油量；

V_2 ：椭圆型储油罐变位后，底部覆盖顶部未覆盖时的储油量；

V_3 ：椭圆型储油罐变位后，底部覆盖顶部部分覆盖时的储油量；

$V_{\text{总}}$ ：椭圆型储油罐的总体积；

h ：探针监测到的油位高度；

Z_0 ：椭圆型储油罐变位后，底部部分覆盖时，油位与底部的相交线离左端的距离；

Z_1 ：椭圆型储油罐变位后，顶部部分覆盖时，油位与顶部的相交线离左端的距离；

问题二的主要符号说明：

V ：储油罐总体积

V_1 ：油罐圆柱体部分的体积

V_2 ：左端球冠体体积

V_3 ：右端球冠体体积

h_0 ：油位探针监测到的高度

h ：横向偏转修正后的高度

五、 问题的分析

题目中的第一问要求我们建立数学模型研究罐体变位后对罐容表的影响，并给出罐体变位后油位高度间隔为 1cm 的罐容表标定值。我们首先建立了无变位时小椭圆形储油量与油位高度的一般关系函数式，并用附件 1 中的数据检验模型的正确性，由此得到无变位情况下理论值与实际值的相对误差 A。由于小椭圆型储油罐纵向变形后，在油量少到低于油位探针最底端时和油量多于探针与椭圆柱体顶部的交点时，不能写出储油量与油位高度对应函数关系式，对这两种情况不做出具体的对应关系式。纵向变位后，在油液面低于柱体右端最低点和高于左端最高点，及两者之间，储油量与油位高度有不同的关系式，因而我们分了三段处理，得出储油量与油位高度的函数关系式。将油量理论值和实际值比较而得到相对误差 B，并和误差 A 进行比较，检验建立的函数关系式的正确性，并用所得的理论计算公式对变位前后储油量同一高度储油量进行比较，从而得出罐体变位后对罐容表的影响以及油位高度间隔为 1cm 的罐容表标定值。

第二问要求我们对图 1 所示的罐体建立变位后标定罐容表的数学模型，得出罐内储油量与油位高度及变位参数（纵向倾斜角度 α 和横向偏转角度 β ）

之间的一般关系式，并根据附件 2 的实际检测数据，用所建立的模型确定变位参数。由于横向偏转不会引起油液面的变化，只会影响油位探针测得的油位高度，所以我们对纵横向变位后的标定高度转换成只有纵向变位时的油位标定高度，设 h_0 为发生横向

偏转后的油位探针测得的高度， h 为转换成只有纵向偏转的油位探针测得的高度，由于探针必经过探针所在圆柱横截面的圆心，如图 5，有：

$$\frac{h-R}{h_0-R} = \cos \beta \Rightarrow h = R + (h_0 - R) \cdot \cos \beta, \quad \dots\dots\dots(1)$$

所以把研究储油量与油位高度及参数 α ， β 的函数关系转变为只研究储油量与油位高度及参数 α 的关系。则研究方法和问题一类似，也要分为

三段，①油液面低于圆柱体部分右端最低点，②油液面高于圆柱体部分左端最高点 和③介于两者之间的三段储油量和油位高度的关系式。其中对圆柱体部分和左右球冠体分别积分求油量体积，三部分油量体积相加得出三段储油量和油位高度的关系式，综合得出储油量与油位高度及变位参数的关系式 $V = V(h_0, \alpha, \beta)$ ，得出计算值，并与实际值比较，进行误差分析。然后运用线性拟合的方法对 V 进行修正，再利用附件 2 中的数据，用二分法原理，对 α ， β 划一个比较宽的范围，结合闭矩形套定理编程，求出附件 2 的数据所对应的参数 α ， β ，从而得出关系式 $V = V(h_0)$ 。由此可求出储油量的理论值，结合实际数据进行误差分析，验证函数关系式的可靠性，从而给出罐体变位后油位高度间隔为 10cm 的罐容表标定值。

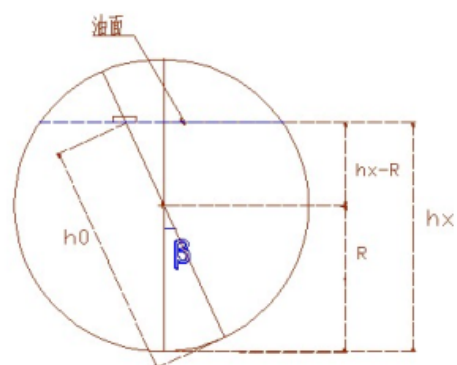


图 5

一、 问题一的模型建立与求解

由于对于特定的椭圆型储油罐，当其所处状态(变位或未变位)确定时，对于进油和出油的研究都一样，所以本问题只用进油这一情况进行分析。研究对于图 4 的小椭圆型储油罐，我们首先建立无变位时罐内储油量与油位高度的函数关系式。建立如图 6 所示的坐标系，设椭圆的长半轴为 a ，短半轴为 b ，得

椭圆方程： $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ，则： $x = \frac{a}{b} \sqrt{b^2 - y^2}$ ，设储油量的体积为 V ，椭圆

圆柱体的长度为 L ，油位高度为 h ，则：

$$V = \frac{a}{b} L \left[(h-b) \cdot \sqrt{h(2b-h)} + b^2 \cdot \arcsin\left(\frac{h}{b}-1\right) + \frac{\pi}{2} \cdot b^2 \right] \dots\dots\dots(2)$$

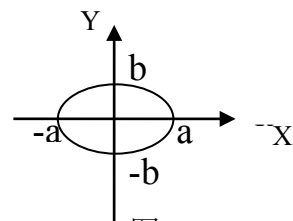


图 6

其中 $a=1.78/2=0.89\text{m}$ ， $b=1.2/2=0.6\text{m}$ ， $L=2.45\text{m}$ 。把附件 1 工作表“无变位进油”中的油位高度一栏的高度值代入(2)式，计算出储油量的理论值，计算 MATLAB 程序见附件一 (part1)，实际值与理论计算值随油位高度变化的图像见图 7。

从图 7 可以看出实际值和理论计算值的曲线吻合的比较好。又将对应高度的实际值与计算值列入 excel 表中并计算理论计算的储油量与实际储油量的差值，并算出理论计算的储油量对实际储油量的相对误差。其计算结果见附件二 (sheet1)，现截取其中十行见下表一。从附件二 (sheet1) 中的计算结果可以看出，对于同一油面高度，理论计算的储油量对实际储油量的相对误差 = $\frac{\text{理论计算值} - \text{实际值}}{\text{实际值}}$ ，其相对误差的最大值为

3.4917316%，最小值为 3.486559%，总体平均误差为 3.4883831%，近似为 3.488%，说明无变位情况下计算值和实际值的相差比例可以看成常数。图和表的结果说明了理论公式的科学性，同时也说明了积分求理论公式这种方法的合理性。从而得出了未变位时小椭圆罐的罐容表每隔 1cm 的标定值，程序见附件一 (part2)，结果见附件二 (sheet2)，表二给出了罐容表的部分理论标定值。而计算所得的相对误差结果可以为椭圆型储油罐变位后罐容表的重新标定提供参考依据。

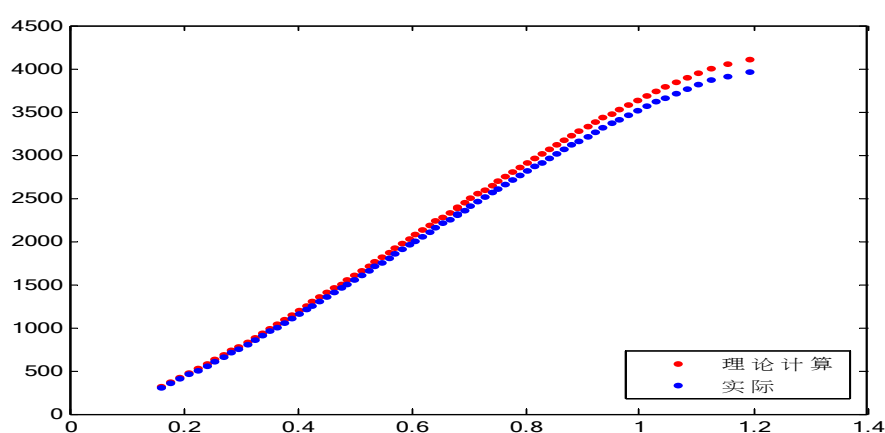


图 7

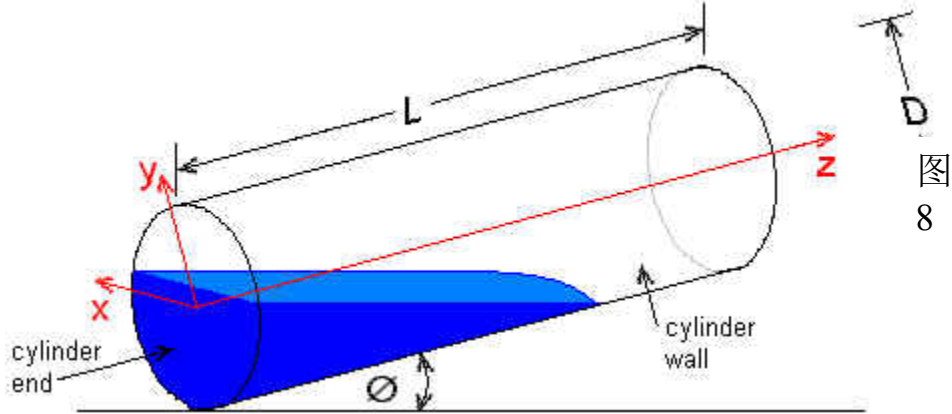
表一

油位高度/mm	理论计算 储油量/L	实际储油 量/L	理论值-实 际值/L	(理论值-实际值)/实 际值
159.02	322.8826	312	10.8826	0.034880128
176.14	374.633	362	12.633	0.03489779
192.59	426.3649	412	14.3649	0.034866262
208.50	478.1318	462	16.1318	0.034917316
223.93	529.8519	512	17.8519	0.034866992
238.97	581.6058	562	19.6058	0.034885765
253.66	633.352	612	21.352	0.034888889
268.04	685.081	662	23.081	0.034865559
282.16	736.8468	712	24.8468	0.034897191
296.03	788.5777	762	26.5777	0.034878871

表二

油位高度/m	理论计算 储油量/L	油位高度/m	理论计算 储油量/L	油位高度/m	理论计算 储油量/L	油位高度/m	理论计算 储油量/L
0.1	163.59	0.4	1199.31	0.7	2489.15	1	3659.88
0.2	450.27	0.5	1621.00	0.8	2910.84	1.1	3946.55
0.3	803.54	0.6	2055.07	0.9	3306.61	1.2	4110.15

椭球型储油罐发生倾角为 $\alpha=4.1^\circ$ 纵向变位后，在油液面低于柱体右端最低点和高于左端最高点，及两者之间，储油量与油位高度有不同的关系式，因而我们分了三段处理，得出储油量与油位高度的函数关系式（坐标系见图8）：



由以上数据可得 $x = \frac{1.78}{2} \sqrt{1 - \frac{y^2}{(\frac{1.2}{2})^2}}$,

(1). 在油液面低于柱体右端最低点时，设 Z_0 为柱体底部部分覆盖时，油位与底部的相交线离柱体左端的距离，由题中图4可知 $Z_0 \leq 0.4\text{m}$ 时，油位探针不能检测到油，所以此时油位探针检测到的油位高度 h 值为： $h=0$ 。又柱体长度 $L=2.45\text{m}$ ，所以对于 $0.4 < Z_0 < 2.45$ ，对于 Z 处的油截面有 $y \in [-0.6, (Z_0 - Z) \cdot \tan \alpha - 0.6]$ ，由此导出：

$$V_1 = \int_0^{z_0} dz \int_{-0.6}^{(z_0 - z) \cdot \tan \alpha - 0.6} 2gx dy$$

$$\text{即： } V_1 = \int_0^{z_0} dz \int_{-0.6}^{(z_0 - z) \cdot \tan \alpha - 0.6} 2g \frac{1.78}{2} \sqrt{1 - \frac{y^2}{(\frac{1.2}{2})^2}} dy \quad (0.4 < Z_0 < 2.45) \dots\dots(3)$$

此时：

$$h = z_0 \tan \alpha - 0.4 \cdot \tan \alpha = z_0 \tan \alpha - 0.0287$$

从而得到 h 的范围为： $(0, 2.45 \tan \alpha - 0.0287)$ ，即： $h \in (0, 0.1469)$ 。

(2). 在油液面高于柱体右端最低点和低于柱体左端最高点时，

$$y|_{z=0} = h + 0.4 \cdot \tan \alpha - 0.6$$

所以，对于 Z 处的油截面有 y 的积分上限为：

$$y_{\text{上限}} = y|_{z=0} - z \tan \alpha = h + 0.4 \cdot \tan \alpha - z \tan \alpha - 0.6$$

则这种情况下储油量与油位探针监测到的油位高度的关系式为：

$$\begin{aligned}
V_2 &= \int_0^{2.45} dz \int_{-0.6}^{h+0.4 \cdot \tan \alpha - z \tan \alpha - 0.6} 2 \cdot x dy \\
&= \int_0^{2.45} dz \int_{-0.6}^{h+0.4 \cdot \tan \alpha - z \tan \alpha - 0.6} 2 \cdot \frac{1.78}{2} \sqrt{1 - \frac{y^2}{(\frac{1.2}{2})^2}} dy \dots(4)
\end{aligned}$$

此时 h 的范围为 $2.45 \cdot \tan \alpha - 0.4 \cdot \tan \alpha \leq h \leq 1.2 - 0.4 \tan \alpha$ ，即
 $0.1469\text{m} \leq h \leq 1.1713\text{m}$

(3). 在油液面最高点高于柱体左端最高点时，设 Z_1 为顶部部分覆盖时，油位与柱体顶部的相交线离柱体左端的距离，因为在 $Z_1 > 0.4\text{m}$ 时，油位探针不能监测到储油量的值，此处不予考虑，所以 $Z_1 < 0.4\text{m}$ 。因有：

$$\tan \alpha = \frac{\Delta y_1}{0.4 - Z_1} \Rightarrow \Delta y_1 = (0.4 - Z_1) \cdot \tan \alpha \quad (\Delta y_1 \text{ 为油位离柱体顶部的距离})，则：$$

$$h = 1.2 - \Delta y_1 = 1.2 - (0.4 - Z_1) \cdot \tan \alpha$$

对于 Z 处的油截面：

$$\tan \alpha = \frac{\Delta y_2}{Z - Z_1} \Rightarrow \Delta y_2 = (Z - Z_1) \cdot \tan \alpha \quad (\Delta y_2 \text{ 为 } Z \text{ 处油位离柱体顶部的距离})，所以可$$

得 y 的积分下限为：

$$y_{\text{下限}} = 1.2 - \Delta y_2 - 0.6 = 1.2 - (Z - Z_1) \cdot \tan \alpha - 0.6 = 0.6 - 0.07168 \cdot (Z - Z_1)$$

由上可得此时储油量的表达式：

$$\begin{aligned}
V_3 &= V_{\text{总}} - \int_{Z_1}^{2.45} dz \int_{y_{\text{下限}}}^{0.6} 2 \cdot x dy \\
&= V_{\text{总}} - \int_{Z_1}^{2.45} dz \int_{y_{\text{下限}}}^{0.6} 2 \cdot \frac{1.78}{2} \sqrt{1 - \frac{y^2}{(\frac{1.2}{2})^2}} dy
\end{aligned}$$

式中 $V_{\text{总}}$ 为圆柱体的总体积，即：

$$V_{\text{总}} = \pi a b L = \pi \times 0.89 \times 0.6 \times 2.45 = 4.11\text{m}^3$$

$$\text{所以 } V_3 = 4.11 - \int_{Z_1}^{2.45} dz \int_{0.6 - 0.07168 \cdot (Z - Z_1)}^{0.6} 1.78 \sqrt{1 - \frac{y^2}{0.36}} dy \dots\dots(5)$$

此处 $0 < Z_1 < 0.4$ ， $1.2 - 0.4 \tan \alpha < h < 1.2$ ，即 $1.1713\text{m} < h < 1.2\text{m}$ 。

以上将圆柱体倾斜纵向变位时储油量与油位高度的关系分为三段进行考虑，得出了储油量与测得的油位高度的关系式(3)、(4)、(5)。而题目中附件 1 的工作表“

倾斜变位进油”油位高度一栏油位高度的范围为：411.29mm ≤ h ≤ 1035.36mm，工作表“倾斜变位出油”油位高度一栏油位高度的范围为：411.73mm ≤ h ≤ 1020.65mm，所以对附件 1 中的数据只需用函数关系式(4)：

$$V_2 = \int_0^{2.45} dz \int_{-0.6}^{h+0.4 \cdot \tan \alpha - z \tan \alpha - 0.6} 2 \cdot x dy$$

$$= \int_0^{2.45} dz \int_{-0.6}^{h+0.4 \cdot \tan \alpha - z \tan \alpha - 0.6} 2 \cdot \frac{1.78}{2} \sqrt{1 - \frac{y^2}{(\frac{1.2}{2})^2}} dy \quad (0.1469m$$

≤ h ≤ 1.1713m)。

首先建立对应于(4)式的体积积分函数 V=tuo (h, α)，程序见附件三。把附件一工作表“倾斜变位进油”油位高度一栏的数据代入公式(4)计算，得出储油量的理论计算值，其计算的 MATLAB 程序见附件四。在加油过程中，理论值和实际值随高度变化的图像见图 9。

从图 9 可以看出理论计算值和实际值的吻合效果很好。同时，将对应高度的实际值与计算值列入 excel 表中并计算理论计算的储油量与实际储油量的差值，并算出理论计算的储油量对实际储油量的相对误差。其计算结果见附件五，现截取其中一部分，见下表三。从下表三和附件五知相对误差有一个波动范围，相对误差的最大值为 4.587221%，最小值为 1.2719502%，平均误差值为 3.2303292%。此处的平均误差与椭圆型储油罐无变位时的平均误差值 3.4883831%很接近，这说明从整体上看，理论计算值与实际值产生的误差是一样的，即产生误差的原因是一样的。纵向变位后，从附件五的误差数值和油位高度可以看出误差数值随油位高度呈现出先升后降的趋势，这可能是由于椭圆型储油罐发生纵向变位后，沿 Z 轴各处液位深度不一致及油罐壁厚各处不完全均匀引起的。

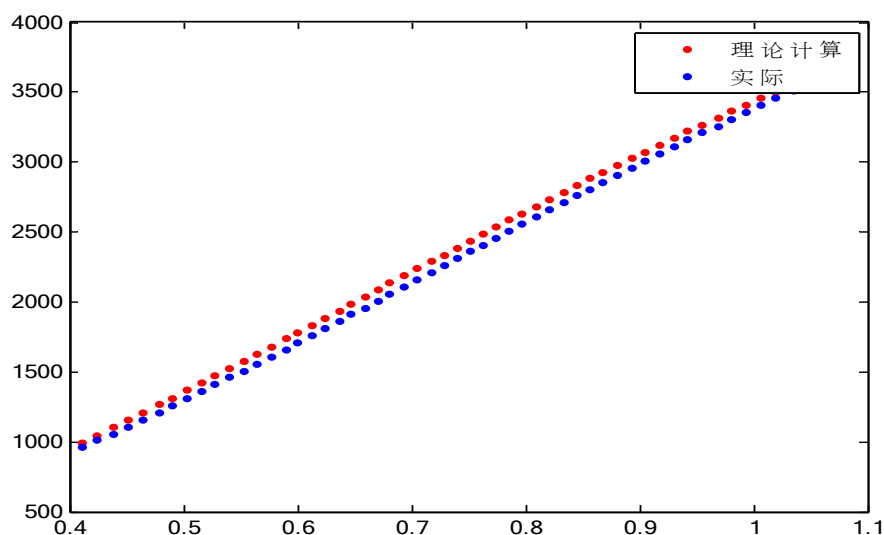


图 9

表三

油位高度/mm	理论计算 储油量/L	实际储 油量/L	理论计算值 -实际值	(理论计算值- 实际值)/实际值
411.29	999.1649	962.86	36.3049	0.037705274
423.45	1047.449	1012.86	34.589	0.034149833
438.33	1107.165	1062.86	44.3048	0.041684512
450.54	1156.651	1112.86	43.7907	0.039349694
463.9	1211.263	1162.86	48.4033	0.041624357
892.92	3033.33	2962.73	70.6004	0.023829509
904.34	3078.76	3012.73	66.0302	0.021917065
917.34	3129.949	3062.73	67.2191	0.021947446
929.9	3178.84	3112.73	66.1103	0.021238688
941.42	3223.165	3162.73	60.4353	0.019108587
954.6	3273.233	3212.73	60.5032	0.018832333
968.09	3323.724	3262.73	60.9942	0.018694222
980.14	3368.141	3312.73	55.411	0.016726688

从以上对结果的分析可以知道,以上建立的函数关系式可以用来对罐体变位后储油量的计算。可用以上公式(3)、(4)、(5)对罐容体进行重新标定。在 $h \in (150, 1160)$ 时,对变位和没有变位时同一高度的储油量比较的图 10, Matlab 程见附件六。由图 10 可以看出变后油位探针监测同一油位高度时,变位前的储油量大于变位后的储油量。所以需要重新对罐容表进行重新标定。

首先建立对应于(3)式的体积积分函数 $V_1 = \text{tuo1}(h, \alpha)$ (见附件七)和(5)式的体积积分函数 $V_3 = \text{tuo3}(h, \alpha)$ (见附件八),再分别编写程序算出 $h \in (0, 0.1469)$ 对应的 V_1 值, $0.1469\text{m} \leq h \leq 1.1713\text{m}$ 对应的 V_2 值 (V_2 和附件三中的 V 等价), $1.1713\text{m} < h < 1.2\text{m}$ 对应的 V_3 的值,程序见附件九。从而得出罐体变位后油位高度间隔为 1cm 的罐容表标定值,标定值见表四。

综合图形和表格可以看出,在误差允许的范围内,该模型计算得到的结果具有可行性,进而可以说明该模型是正确可靠的。从而问题一得到解决。

表四

油位高度/m	储油量/L	油位高度/m	储油量/L	油位高度/m	储油量/L	油位高度/m	储油量/L
0.00	1.6744	0.30	595.2452	0.60	1798.524	0.90	3072.427
0.01	3.531	0.31	630.1462	0.61	1841.797	0.91	3112.001
0.02	6.2635	0.32	665.5808	0.62	1885.131	0.92	3151.234
0.03	9.9748	0.33	701.5256	0.63	1928.513	0.93	3190.11
0.04	14.7563	0.34	737.9584	0.64	1971.931	0.94	3228.612
0.05	20.6908	0.35	774.8577	0.65	2015.372	0.95	3266.722
0.06	27.8542	0.36	812.203	0.66	2058.824	0.96	3304.421
0.07	36.3163	0.37	849.9747	0.67	2102.275	0.97	3341.691
0.08	46.1424	0.38	888.1537	0.68	2145.713	0.98	3378.511
0.09	57.3935	0.39	926.7217	0.69	2189.126	0.99	3414.862

0.10	70.127	0.40	965.6608	0.70	2232.5	1.00	3450.72
0.11	84.3968	0.41	1004.954	0.71	2275.824	1.01	3486.064
0.12	100.2541	0.42	1044.584	0.72	2319.086	1.02	3520.87
0.13	117.7475	0.43	1084.535	0.73	2362.273	1.03	3555.114
0.14	136.923	0.44	1124.791	0.74	2405.372	1.04	3588.769
0.15	157.8184	0.45	1165.336	0.75	2448.372	1.05	3621.808
0.16	180.2591	0.46	1206.155	0.76	2491.259	1.06	3654.2
0.17	203.9994	0.47	1247.234	0.77	2534.02	1.07	3685.915
0.18	228.9066	0.48	1288.557	0.78	2576.643	1.08	3716.918
0.19	254.8849	0.49	1330.111	0.79	2619.115	1.09	3747.171
0.20	281.8577	0.50	1371.881	0.80	2661.423	1.10	3776.636
0.21	309.7608	0.51	1413.854	0.81	2703.552	1.11	3805.266
0.22	338.5387	0.52	1456.015	0.82	2745.491	1.12	3833.013
0.23	368.1426	0.53	1498.352	0.83	2787.225	1.13	3859.819
0.24	398.5285	0.54	1540.851	0.84	2828.74	1.14	3885.618
0.25	429.6567	0.55	1583.499	0.85	2870.022	1.15	3910.332
0.26	461.4906	0.56	1626.283	0.86	2911.057	1.16	3933.859
0.27	493.9967	0.57	1669.19	0.87	2951.83	1.17	3956.056
0.28	527.1438	0.58	1712.208	0.88	2992.326	1.18	3976.51
0.29	560.9024	0.59	1755.323	0.89	3032.531	1.19	3995.392
						1.20	4012.599

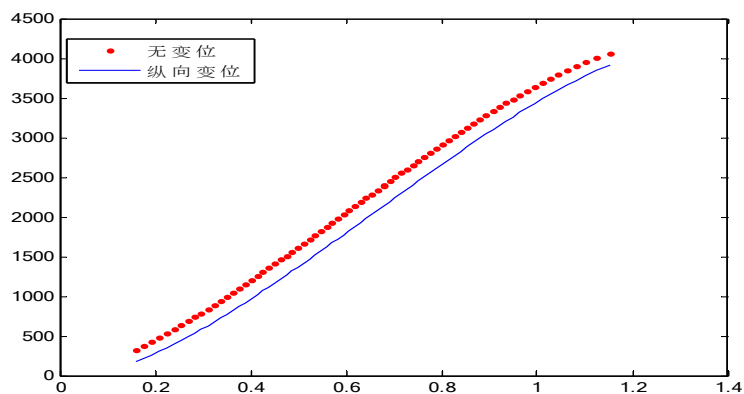


图 10

六、 问题二的模型建立与求解

1. 体积公式推导

由以上问题分析(1)式可得: 发生纵向偏转和横向偏转时的油位探针监测高度 h_0 转换为只有纵向变位时的油位探针监测高度 h , 有:

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/858044040135007005>