

分 类 号: TP399
论文编号: 2018021888

密级: 公开

贵 州 大 学
2021 届硕士研究生学位论文

施工企业油罐油量精确计量方法的研究

学科专业: 计算机科学与技术
研究方向: 计算机应用技术
导 师: 姚凯学
研 究 生: 张万菊

中国 ▪ 贵州 ▪ 贵阳
2021 年 06 月

硕士学位论文答辩委员会名单

施工企业油罐油量精确计量方法的研究

答辩人：张万菊

答辩委员会委员：

贵州大学 李智：____教授____（主席）

贵州大学 李秦伟：____教授____

贵州大学 苟刚：____副教授____

贵州大学 杨静：____教授____

贵州师范大学 徐洪峰：____副教授____

答辩秘书：汪健 讲师

答辩时间：2021 年 06 月 02 日

答辩地点：博学楼 621

摘要

随着基础建设行业的不断发展，工地大型工程车及各类机器的巨大用油量，使得储油罐已成为许多工地不可或缺的工具之一。建筑工地地理位置的分散性和偏僻性，使得工地上储油罐在使用的过程中存在的计量不准确、实时性差、偷油、漏油、油料补添不及时等管理问题。在互联网发展迅速的今天，对储油罐建立实时监测系统，监测油罐中油量变化并实时自动记录可使这类问题得到很大程度上的解决。本文主要是通过分析储油罐在建筑工地实际使用过程中影响油量计量精度的因素，提高油料监测的精确度。

首先通过分析工地实际环境影响因素，设计了拉线式位移传感器作为储油罐油位高度的测量仪，并对传感器误差造成因素做了相关分析，设计了拉线传感器测量油位液面高度，并根据排绳技术设计了降低传感器内部绕线带来误差的卷筒和拉线轴向位移带来的误差补偿；其次通过储油罐几何形状，采用定积分的方式建立了油位高度与出油量数学模型，并分析因地基变形导致储油罐发生变位带来油位高度与出油量数学模型不准确的情况，建立了储油罐油位高度变化、变位角与出油量间的数学模型；然后通过模拟退火算法求解了油位高度变化、变位角和出油量中的最优变位角；最后在 ABAQUS 软件中，用 5kg 的球形石块分别以 50m/s 和 20m/s 的速度撞击储油罐，通过在撞击变形后的变形部位建立的节点路径分析，将变形曲面分为四个规则曲面，并利用最小二乘法和二阶空间曲面拟合变形曲面，建立油罐被撞击变形后的圆柱型储油罐油位高度变化与出油量数学模型的修正模型。

经采集实际数据和文献数据对比分析，本文的研究具有一定的理论分析和实际应用价值。

关键词：储油罐；变位识别；ABAQUS；拉线式位移传感器；撞击变形

ABSTRACT

With the continuous development of infrastructure construction industry, the oil storage tank has become one of the indispensable tools in many construction sites due to the huge amount of oil consumed by large construction vehicles and various machines. Due to the dispersive and remote location of construction sites, there are some management problems such as inaccurate measurement, poor real-time performance, oil theft, oil leakage, and untimely oil replenishing during the operation of oil storage tanks on construction sites. Today, with the rapid development of the Internet, the establishment of real-time monitoring system for oil storage tank, monitoring the change of oil in the tank and real-time automatic recording can make this kind of problem solved to a large extent. This paper mainly analyzes the factors that affect the measurement accuracy of oil quantity in the actual use of oil storage tanks in construction sites to improve the accuracy of oil monitoring.

First by analyzing the site actual environmental impact factors, design the guyed displacement sensor as oil tank oil level height measuring instrument, and has made the correlation analysis of sensor error caused by factors, design the thread the oil level sensor, liquid level height, and according to the internal winding rope technology designed to reduce sensor error drum and pull the spool to the displacement brought by error compensation; Followed by oil tank geometry, with the method of definite integral is established mathematical model of oil level height and the quantity of oil storage tanks caused by deformation of foundation and analysis in displacement with oil level height and the mathematical model of oil is not accurate, oil tank oil level height change, deflection Angle is established and the mathematical model between the oil; Then simulated annealing algorithm is used to solve the optimal displacement Angle of oil level height change, displacement Angle and oil output. Finally, in ABAQUS software, a 5kg spherical stone was used to impact the oil storage tank at a speed of 50m/s and 20m/s, respectively. Through the node path analysis established at the deformed part after impact, the deformed surface was divided into four regular surfaces, and the deformed surface was fitted by using the least square method and the second-order space surface. A modified model of the mathematical model for the change of oil level height and oil output of the cylinder storage tank after the tank is deformed by impact is established.

Through the comparison and analysis of actual data and literature data, the research of this paper has certain theoretical analysis and practical application value.

Key words: Oil tank, Displacements recognition, ABAQUS; Pull wire displacement sencor, Impact deformation

目 录

摘要	I
ABSTRACT	1
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 储油罐液位计计量方法研究现状.....	3
1.2.2 储油罐数学建模研究现状	3
1.2.3 储油罐变位模型修正方法研究现状.....	4
1.2.4 储油罐变形评估方法研究现状.....	4
1.3 主要研究内容	6
1.4 论文组织结构.....	7
1.5 本章小结.....	7
第二章 拉线式位移传感器误差分析与修正.....	9
2.1 常见储油罐液位测量方式	9
2.1.1 接触式液位计	9
2.1.2 非接触式液位计	10
2.2 拉线式位移传感器.....	11
2.2.1 拉线传感器工作原理	11
2.2.2 拉线传感器浮物设计	13
2.3 拉线位移传感器误差修正方法	14
2.3.1 安装因素误差修正方法	15
2.3.2 传感器因素导致误差修正方法.....	16
2.4 结果分析.....	19
2.5 本章小结.....	21
第三章 储油罐数学模型的建立	22
3.1 卧式圆柱型储油罐数学模型的建立.....	22
3.1.1 无倾斜圆柱型储油罐数学模型.....	22
3.1.2 纵向倾斜圆柱型储油罐数学模型.....	24

3.1.3 横向倾斜圆柱型储油罐数学模型.....	26
3.2 卧式椭圆柱型储油罐数学模型的建立.....	27
3.2.1 无变位椭圆柱型储油罐数学模型.....	27
3.2.2 纵向倾斜椭圆柱型储油罐数学模型.....	29
3.2.3 横向倾斜椭圆柱型储油罐数学模型.....	30
3.3 本章小结.....	30
第四章 储油罐变位模型修正	32
4.1 模拟退火算法基本理论	32
4.2 基于 SA 算法储油罐变位识别模型构建.....	36
4.3 实验结果及分析	37
4.4 本章小结.....	40
第五章 储油罐撞击变形分析	41
5.1 撞击物选择.....	41
5.2 ABAQUS 软件介绍	41
5.3 储油罐有限元划分	42
5.4 储油罐撞击仿真分析	44
5.4.1 变形云图分析	45
5.4.2 位移变化分析	45
5.5 撞击变形对油罐数学模型影响分析.....	47
5.6 本章小结.....	54
第六章 总结与展望.....	55
6.1 工作总结.....	55
6.2 展望	56
致谢	57
参考文献	58
附录	62
图版	63
原创性声明.....	65

第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

近几年来,为了满足社会经济发展的需要,我国公路、桥梁、高铁、高速等建设行业得到大力发展^[1]。在物联网发展迅速的今天,这样一些涉及到很多流程和数据记录的建筑施工工地,很多都还靠着人工记录或手动录入电脑的方式记录数据,比如工地上的油料、钢筋、设备和劳务等物料相关数据的记录。在人为操作的过程中,审批流程无法做到管控,这不仅会导致工作效率低和企业管理成本高,更重要的是在盘点库存物料的时候出现记录数据与实际数据对应不上而无法追查,导致无法跟踪和管控物料的去向。

通常,公路、桥梁、沙厂等的建筑施工工地都是在比较偏僻、远离城市及加油站的地方,而工地上使用的挖掘机、铲车、大卡车等大型工程车不仅耗油量相当大,而且不方便到加油站去加油。若将工程车直接开到加油站,不仅要浪费很多油料,还要浪费很多时间,耽误工地运转,导致成本增高。因此工地通常都会安装储油罐,使工程车可以在工地现场随时加油,提高工作效率,节约成本和提高经济效益。加油站油罐车对工地现场储油罐进行加油以及管理人员对工程车进行加油时,存在油罐车造假和管理员与工程车驾驶员勾结偷油的情况。要解决这些问题,需要采用信息化手段实时精确的监测储油罐中的油量,将储油罐油量及加油数据自动实时传到后台供实时查询、在线审批和跟踪。通过自动监测油罐中的油量,在油量发生异动的时候通过报警装置发出报警通知管理员,同时管理员可以根据需求提前订购油料或追踪油料去向,实现现代化的管理。

储油罐要实现现代化管理,实时监测并准确而有效的监测,正确选择测量工具和安装设备,准确测量油位高度和出油量等是必要前提^[2]。其次是建立储油罐数学模型,并对模型中参数误差做分析^[3],实现智能判断油位高度变化与出油量间是否处于合理匹配范围。工地现场储油罐在长期的使用过程中,由于地基变形的原因,导致罐体发生横向偏转或纵向倾斜,甚至是横向和纵向共同发生偏转,即发生变位^[4],或是因为物体的碰撞导致罐体发生形变都会导致储油罐监测精确度降低。罐体发生横向变位,对于卧式圆柱型储油罐,液面不会发生变化,但数

学模型会发生变化,对于卧式椭圆柱型储油罐则是液面会发生变化,都会导致油位高度与出油量或储油量间的数学模型发生变化^{[5][6]};对发生纵向偏转的情况,由于存在测量盲区及液位高度与罐体形状之间的不同对应关系^[7],使得剩余油体积计算不精确。

本课题的研究意义主要是解决工地实际应用中,储油罐的油位测量、发生变位以及撞击时储油量计量精度不准确的问题。一是通过工地储油罐使用环境及常用液位仪分析,设计适合工地储油罐使用到的液位计并分析误差造成原因。二是通过对未变位储油罐建立包括圆柱型储油罐和椭圆型储油罐的油位高度与出油量之间的数学模型,以及因地基导致储油罐发生变位情况下油位高度变化、变位角与出油量间的分段数学模型。三是通过算法矫正因地基变形导致油罐发生变位情况下数学模型的矫正。四是通过 ABAQUS 软件仿真储油罐被球形石块撞击变形,分析变形对模型的影响。为储油罐在工地上的实际应用中如何通过实测数据分段拟合出油位高度与出油量的数学模型,使模型根据不断累计的出油量和储油罐油位高度的实测数据自动修正出油位高度与储油量的数学模型提供理论,在实际使用过程中根据累计实测数据自动修正模型参数以提高精度,为储油量实时精准监控、审查、跟踪提供保障,提高施工领域油料管理效率,降低管理成本,预防偷油、空单进出、上传数据与实际数据不符合等情况。同时使用模型验证出油量,保证数据有效性。并分析所采用的油位高度测量工具,根据工地环境要求、成本要求及管理需求选择储油罐液位计并做误差分析,对拉线式位移传感器做改进,提高液位测量精度,为提高储油量计量精度提供必要保证。

通过分析建立储油罐数学模型并对影响计量精度的因素做分析,提高监测精度,为智能、精确的油料监测提供可靠且有效的数据,同时监听储油罐的状态并将数据传输到后台存储,最终通过已有的物料管理系统实现对油料的在线审批和去向跟踪。通过数字化、信息化、智能化建设,让油料的成本管控智慧化,实现降本节能,提质增效的管理目标。

1.2 国内外研究现状

在油品计量中,造成油罐计量误差的主要原因有:油罐容积标定误差、计量器具误差、计量操作误差、计量换算表等误差^[8]。针对液位计带来的误差,很多

学者提出通过正确的安装和研究并设计液位计来降低储油罐液位的测量误差；因地基变形导致模型不准确的情况，很多研究者通过对储油罐建立油位高度与储油量的数学模型，监测储油量与油位高度关系是否匹配，并通过最小二乘法、BP 神经网络及遗传算法等算法求解出因地基变形导致油罐变位的最优变位角，对模型做修正；针对油罐发生变形的情况，学者们主要是针对大型油罐，采用人工监测、三维激光扫描仪及全站仪等方式进行监测，并通过注水等方式对油罐进行复原，人工或全站仪这样的方式需要通过人为完成，具有间歇性。对工地上使用的小型储油罐来说，人工监测或三维激光扫描仪等方法成本过高，且不易建立实时监测系统。

1.2.1 储油罐液位计计量方法研究现状

油位高度是直接反应罐内储油量的重要参数之一。油罐液位测量方式按是否接触分为接触式和非接触式测量法，常见的接触式测量系统有人工检尺法、浮子式和浮筒型测量装置、伺服式液位仪、HTG 测量装置等，接触式测量系统的敏感软件与被测液体接触；非接触式测量系统有超声波液位仪、射线液位仪、震动液位仪、微波液位仪、激光雷达液位仪等，非接触式测量装置的敏感软件与被测液体不接触^{[9][10]}。传统的人工检尺计量在测量液位、温度、密度等存在着不同程度的系统误差^[11]。近年来，自动测量装置得到迅速发展，提高管理效率且降低人力成本，并保证数据有效性。对于工地所使用储油罐，液位计受粉尘严重、撞击情况常见、油罐压力等影响比较大，导致产生误差比较大，拟采用拉线式位移传感器自动测量液位高度。对拉线式位移传感器精度的提高，2013 年 Xiong Hua Guo 等通过分析传感器所采用的滚动弹簧和绳索的设计、计算和选择，设计了测量精度较高的传感器^[12]。2017 年王铮等提出了利用光栅测量仪器代替传统校准设备的新方法^[13]。2018 年朱浩等采用全站仪对拉线式位移传感器空间位置进行精确测量，并在 CAD 图中标识，找出理论高度与实际高度之间的换算关系，确定实际数值^[14]。

1.2.2 储油罐数学建模研究现状

储油罐作为存储或盛装油的主要设备，确定油罐储油量或出油量和液位计之间的数学关系对实际生产具有重要的意义和价值^[15]。对储油罐建模是储油量计

量的重要方式,模型的精确性及模型中参数的准确性是计量精确的前提。国内对储油罐建模及模型精度的提高提出了多种方法,1999 年,高炳军等推导了球形封头、椭圆封头、无折边球形封头和蝶形封头卧式容器不同液面高度下的体积计算公式,但对于储油罐发生倾斜带来的误差未做考虑^[16]。2001 年,孙宏达和关进波利用契比晓夫多项式逼近的方法,给出了椭圆截面储油罐油体积的近似计算方法^[17]。2011 年,窦霁虹等用数学建模的方法首先推导了无变位以及纵向倾斜时储油量与油位高度的函数关系,并设计了两种系统误差补偿方法--基于等效思想的 δ 值法和拟合法,其次,将球冠体部分的储油体积和系统误差统一为整体拟合成油位高度 h 的三次多项式,并应用最小二乘原理建立了同时具有纵向倾斜和横向偏转变位参数的非线性优化模型^[18]。2015 年,邱靖等利用定积分思想建立了储油量、油位高度与倾斜角间的数学模型^[19]。

1.2.3 储油罐变位模型修正方法研究现状

储油罐在长期的使用中,因地基发生变形而导致变位的情况是非常常见的,而对于工地这样相对恶劣的环境,储油罐有时候会被放置在疏松的地皮上,所以这样的现象更为明显。针对储油罐发生变位导致的油位高度与储油量不匹配的情况,2012 年,周斌等通过神经网络数学模型,对变位储油罐罐容表进行了重新标定,并利用扰动分析法对模型稳定性进行检验,实验结果表明,该方法降低了计量误差^[20]。2012 年,卢朝东采用流量计和液位变送器,对投入使用之前的椭圆型储油罐预先标定罐内油位高度与储油量的对应关系^[21]。2015 年,邱靖等针对所建立的储油罐数学模型,利用量子粒子群算法优化遗传算法中的交叉和变异算子求解了模型中的最优变位角,并对罐容表进行了重新标定,使模型的相对误差和运行时间都得到明显提高^[19]。JIEQIONG WU 采用插值法建立了油罐储油量与油位高度间的数学模型,并用遗传算法求解了变位参数^[22]。Zhou and H.Zeng 利用最小二乘法建立了位移参数辨识模型,并利用蒙特卡罗算法获得位移参数,利用过滤后的数据对油箱容量表进行了标定,提高储油罐在发生变位状态下储油量的测量精度^[23]。

1.2.4 储油罐变形评估方法研究现状

储油罐在工地上的长期使用过程中,遭遇各种物体撞击的可能性是非常大的,

某工地储油罐被撞击出坑的图如图 1-1 所示。从图 1-1 可以看到该储油罐被撞了两个坑，这样凹进去的坑不仅会导致本文所建立的油位高度变化、出油量与变位角的数学模型精度下降，对很多学者所建立的储油罐油位高度与储油量的关系模型同样会产生很大的影响。因此对储油罐被撞击变形后如何做修正对于储油罐数学模型是非常重要的。



图 1-1 被撞击油罐图

目前针对储油罐变形的监测主要是针对大型的储油罐，常见的监测方法有人工测量法、全站仪测量法及三维激光扫描法等。人工测量法主要是用皮尺、储罐变形测量尺等工具人工进行测量，测量工具极为普通，测量方法简单。全站仪测量法是通过全站型电子测速仪测量，电子全站仪集测距、角度测量、数据处理和记录于一身，可以实现自动测角、自动测距、自动计算和自动记录等功能^[24]。根据全站仪所测到的储油罐各点空间数据构建出储油罐整体的几何形态，从而判断储油罐的变形程度，全站仪的测量精度高且速度快。三维激光扫描法又被称为实景复刻技术，三维激光扫描仪利用激光测距原理，通过记录被测量物体表面的大量密集点的坐标、反射率以及纹理等信息，快速复建出被测物的三维模型^[25]。三维激光扫描仪通过扫描结果直接显示为点云数据，利用这些点云数据快速建立储油罐的三维可视化模型，监测形变量，这种方法省时省力。但三维激光扫描仪的

方法主要应用于大型储罐，是一种比较先进的变形检测方式。以上三种方法的检测都各具优势，但这些方法都主要用于大型储罐的检测，需要人工操作，且以上三种方式都只能是间歇性的测量。针对发生变形的储罐，2020 年石磊等通过建立储罐三维有限元模型进行数值模拟，采用特征值屈曲分析和非线性分析方法的研究了储罐的屈曲模态、临界屈曲载荷、屈曲后储罐应力水平，得出储罐屈曲模式为菱形曲面，并提出通过注水的方式对储罐进行修复^[26]。

1.3 主要研究内容

本课题以某公司的实际项目为研究背景，根据实际应用需求，致力于研究提高储油罐油量精确计量的方法。本文首先通过分析常见液位计及工地储油罐测量需求，采用拉线传感器作为储油罐油位高度测量仪，并分析传感器在使用过程中误差的造成原因和修正方法。其次通过分析储油罐的几何模型建立了储油罐油位高度变化与出油量间的数学模型，并分析在实际使用过程中因地基变形导致储油罐发生变位和遭遇撞击的情况下如何校正模型以减小误差，通过以上研究最终达到系统整体计量误差的减小。

本文具体工作主要分为以下几方面：

1、对所采用的拉线传感器的结构及受力做分析，设计了使拉线测量一端能垂直下落并漂浮于储油罐内油面上的浮物；并通过分析拉线传感器在工地现场使用过程中影响精度的因素（粉尘和撞击等）及传感器自身误差的造成原因（绕线），做相关的设计以减小误差。

2、通过分析卧式圆柱型油罐和卧式椭圆型储油罐在未发生变位与发生横向变位或纵向变位，以及两个方向上都发生变位的情况下的几何模型，采用定积分的数学建模方式建立储油罐不同段油位高度变化、变位角与出油量之间的分段数学模型。

3、针对在实际使用过程中因地基变形导致储油罐数学模型不准确的情况，研究如何利用算法根据不断累计的出油量和油位高度的实测数据自动修正模型，减小模型误差。

4、通过 ABAQUS 软件仿真储油罐被球形石块以不同的速度撞击，获得不同变形程度的结果，并在 ABAQUS 的后处理模块中获取变形云图及变形后的数据，

分析储油罐因被撞击产生的变形部位对出油量的影响,建立变形对本文所建立的储油罐数学模型的影响模型。

1.4 论文组织结构

本文分为以下五个章节:

第一章:绪论;主要介绍了本论文的研究背景和研究意义、提高油罐计量精度的研究方法现状,包括液位计计量方法研究现状、储油罐数学建模研究现状、储油罐变位模型修正方法研究现状和储油罐变形对计量影响现状,最后介绍了本课题的主要研究内容。

第二章:通过分析常用储油罐液位计的优缺点,综合各方面因素选择工地现场液位测量仪-拉线式位移传感器,并对所选择的拉线式位移传感器在测量储油罐油位高度过程中的受力做分析,设计可以使拉线垂直下落于油面并漂浮于油面的浮物。最后对传感器的误差来源做分析并做研究相关矫正方法。

第三章:分别建立卧式圆柱型储油罐和卧式椭圆柱型储油罐在无变位情况下的油位高度与出油量数学模型,并分析油罐发生变位情况下储油罐的几何模型,建立了储油罐油位高度、变位角与出油量间的分段数学模型。

第四章:针对第三章中所建立的储油罐发生双向变位的情况下,造成储油罐分段数学模型不准确的情况,通过非线性最小二乘法建立变位参数辨识模型的目标函数,并采用模拟退火算法在 MATLAB 中求解变位角的最优解,最后利用 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题的实际测量数据及文献数据做对比验证。

第五章:通过 ABAQUS 软件对储油罐被球形石块撞击进行仿真,并分析撞击后储油罐的变形对油位高度及出油量数学模型的影响。

第六章:总结与展望,对本文的研究内容进行总结,并对研究工作的不足之处做进一步的展望。

1.5 本章小结

本章节首先对本课题研究背景和研究的意义进行了论述,简要介绍了在工地现场使用过程中储油罐存在的管理问题及储油罐计量提高的必要性;接着介绍了储油罐液位计的计量方法、储油罐数学建模方法、储油罐变位模型修正方

法及储油罐变形评估方法的研究现状；然后介绍了本文的主要研究内容；最后介绍了本文的组织结构。

第二章 拉线式位移传感器误差分析与修正

液位计所测量油位高度值作为测量储油罐油量的重要参数,液位计自身的误差和测量油位高度过程中带来的测量误差最终都会造成系统产生误差。本章节主要是通过分析常用液位计及工地实际环境和成本等问题,选择拉线式位移传感器作为工地现场储油罐油位高度的液位仪,并分析所采用液位计自身存在误差和在储油罐油位高度的测量中造成的误差的原因及修正方式。

2.1 常见储油罐液位测量方式

现有的物位液位测量仪器种类众多,且几乎都具有一定的优缺点及适用范围。综合目前的液位测量方式,常见的液位仪按照液位感应元件与被测液体是否存在接触,可分为接触型和非接触型两大类。常见的接触式液位计包括人工检尺、电容式液位计、浮子液位计和伺服式液位计等,常见的非接触式液位计有超声波液位仪和雷达液位计等。

2.1.1 接触式液位计

(1) 人工检尺

人工检尺测量精度高,可精确到毫米。人工检尺的每次测量必须至少进行两次测量,且两次测量的结果不得相差大于 $\pm 1\text{mm}$ 。人工检尺法的误差主要来源有人为操作带来的误差和测量仪器失准导致的误差,所以该检测法对工作人员的操作专业性要求非常高,且失准仪器需要送到专门地方做修正^[27]。人工检尺测量时间长、测量要求高且需要人工进行测量,难以实现实时的监测。

(2) 电容式液位计

电容式液位仪的核心是电容液位传感器,该传感器一般由标准电容、用于测量液体介电常数的测量电容及检测液位变化的比较电容等^[28]。电容式液位计通过介电常数与测量电容容量计算出液位。电容式液位计适用范围广、价格低、安装容易,但测量重复精度低且需要定期维修和重新标定,且工作寿命短。

(3) 浮子液位计

接触式测量以钢带浮子液位计为开端,通过各种方式提高测量浮子距离精确

度而演化到现代化的多种仪表。浮子受浮力作用浮在介质表面，液位的升降破坏了力的平衡，浮子跟随液面升降带动钢带运行，通过变速齿轮到有刻度的钢带上测量出液位值^[29]。浮子液位计精度在 4-10mm 间^[30]，安装复杂，由于机械部件多，很容易发生钢带卡死不动的情况，可靠性较低。

（4）伺服式液位仪

伺服式液位计是比较新型的液位计，基本原理同钢带式液位计，具有比较精确的力传感器和伺服系统，形成闭环调节系统，通过考虑钢带自身重力，精确地调节浮子高度以达到平衡浮力和重力，得到精确的当前液面到罐顶高度，以得到液位值。现代伺服油罐液位仪都有很高的精度，能够达到 1mm，满足轻量级测量要求。但采用的机械式测量装置在使用中产生的磨损会直接影响精度，需要定期维修和重新标定，测量的重复精度较低且安装困难价格较昂贵。

2.1.2 非接触式液位计

（1）超声波液位仪

超声波液位计由超声波换能器（探头）、信号处理模块和输出单元组成^[31]。探头通过发出高频脉冲声波，并接受被液体表面反射折回的反射回波，根据发射与接收的时间差，计算出传感器探头到被测量液体间的距离。测量精度易受温湿度、粉尘、被测物化学成分等因素的影响^[32]，而对于工地来说，粉尘严重是最为常见的现象。

（2）雷达液位计

雷达液位计是采用天线发射电磁波的形式，电磁波经被测液体被反射回后被雷达天线再次接收，通过发射与接收电磁波的时间差及电磁波传播速度计算出天线到液面的距离^[33]。雷达液位计的测量精度高，但价格昂贵，液位计需要设置的参数较多，故障排查困难。

（3）射线液位计

射线液位计是利用核辐射放出具有较强穿透能力的射线（如 γ 射线），射线穿过不同厚度的介质时有不同的衰减特性，利用射线的这种特性来测量液位高度。核辐射式液位计核辐射源有点式或狭长型结构，安装于油罐外面^[34]。射线液位计因其测量原理使得应用范围广，高温、腐蚀、毒性烟雾等恶劣环境均可使用，且射线液位计安装方便，测量精度高，有一定的应用场合，但价格非常昂贵。

2.2 拉线式位移传感器

如 2.1 节所述的几种常见液位计,某些液位计由于需要人工操作,所以无法实现实时监测。大多精度高的液位计则是存在价格昂贵、维修复杂及使用环境的限制等情况。而工地现场不仅地理位置偏远,且实际环境粉尘严重、撞击较易于出现和油料进出频繁(即液位计使用频繁),到专业部门维修极为不便。基于以上分析,采用外壳经过防腐处理且利用高柔韧性耐磨损复合钢丝作为伸缩绳的拉线式位移传感器测量储油罐的油位高度。拉线位移传感器具有便携性好、操作简单、测量范围大等优势。

2.2.1 拉线传感器工作原理

拉线位移传感器分为 2 个部分,机械部分和电子部分。拉线位移传感器充分结合了角度位移传感器和直线位移传感器的优点。在使用时,将传感器安装于固定位置,钢丝绳一端的重物通过钢丝绳和传感器内的弹簧作用在一个转盘上,钢丝绳通过弹簧缠绕于与旋转编码器连接的滚筒之上。当钢丝绳一端悬挂的重物发生移动时带动转盘旋转,将直线位移转化成角位移,从而改变滑动变阻器的电阻值。最终重物的位移变化以电压、电路或数字脉冲的方式输出,以计算出位移改变量。钢丝绳紧绕在多圈滚筒上,理论上每圈的行程相同,在整个测量范围内均为线性测量。

拉线位移传感器的信号输出方式分为模拟信号输出和数字信号输出。模拟信号可输出电压信号或电流信号,受传输距离的影响,传输距离越远造成误差越大。数字信号输出方式有方波脉冲信号或者格雷码信号,传输过程中不存在信号干扰,但存在数据丢失问题。通过输出的模拟信号或数字信号,最终计算出拉线传感器测量的液位高度。

拉线位移传感器应用广泛,包括运输、机器人、运动控制等。在直线导轨系统中有很好的应用,完全可以代替光栅尺,实现低成本且高精度的测量,且该位移传感器的测量范围广,可从几十毫米到十几米^[35]。

拉线式位移传感器结构简图如图 2-1 所示:

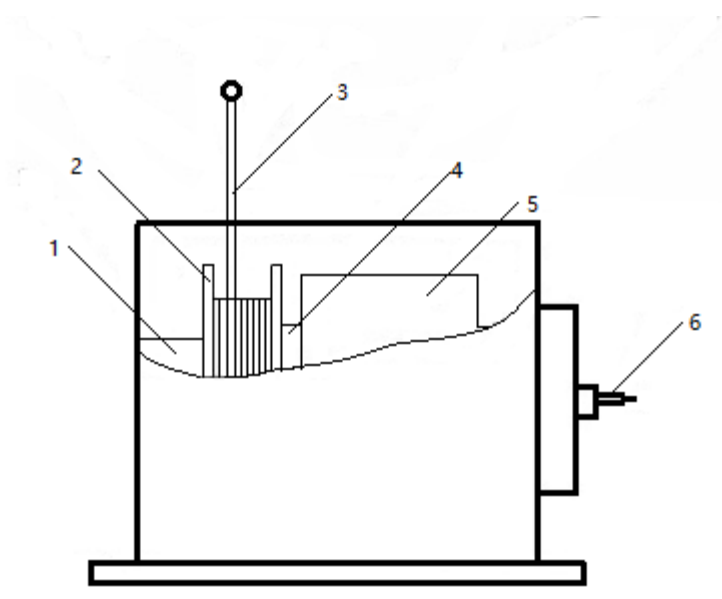


图 2-1 拉线式位移传感器结构简图

1-力平衡机构；2-轮毂；3-钢丝绳；4-传感元件；5-信号处理部件；6-电缆

工地常用卧式储油罐高度主要是 2400mm，所以本次设计中，拉线传感器按照满量程 $s = 2500\text{mm}$ ，拉力 $F_{\text{拉力}} = 3.5\text{N}$ ，脉冲输出为 3000 转，绕线为 10 圈，滑动变阻器的阻值为 10k，滑动变阻器的线性度为 0.2% 的标准设计，则每圈可以精确到 0.02 圈，即每圈可以精确到 $\pm 5\text{mm}$ ，线性精度为 FS 0.3%，则实际产品上的误差为：

$$\text{误差} = \text{量程} \times \text{精度}$$

即误差 $\text{error} = \text{FS} \times s = 7.5\text{mm}$ 。

拉线传感器测量油罐油位高度的等效模型如图 2-2 所示：

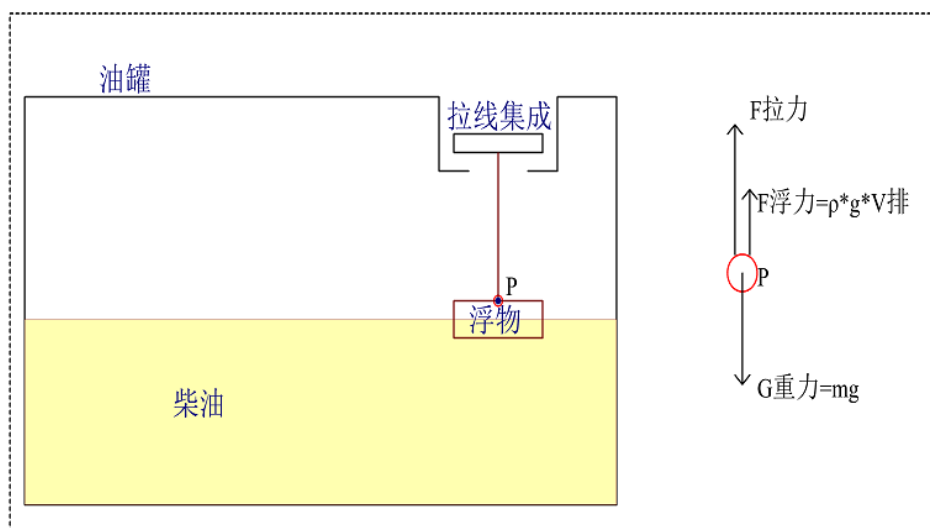


图 2-2 储油罐等效模型图

由于液体密度和拉线传感器拉力等因素，浮物与柴油间存在一个滞环带，这个滞环带决定了采集系统的误差。

2.2.2 拉线传感器浮物设计

(1) 浮物质量设定

由储油罐等效模型图可知，当浮物没有接触到液面时，拉线式位移传感器的悬浮物体与钢丝绳衔接处的 P 点受到钢丝绳的拉力 $F_{\text{拉力}}$ 和浮物的重力 G 的作用，此时应保证浮物垂直下落，即浮物的重量 G 应满足：

$$G = m_{\text{浮物}} * g > F_{\text{拉力}}$$

可得：

$$m_{\text{浮物}} = \rho_{\text{浮物}} V > \frac{F_{\text{拉力}}}{g} \quad (2-1)$$

按照拉力 $F_{\text{拉力}} = 3.5\text{N}$ 设计，则 $m_{\text{浮物}} > 0.35\text{kg}$ 。

当浮物接触到液面后，P 点受到钢丝绳的拉力 $F_{\text{拉力}}$ 、浮物的重力 G 和油的浮力 $F_{\text{浮力}}$ 的作用，当 P 点受到的力达到平衡时，即 P 点满足：

$$F_{\text{拉力}} + F_{\text{浮力}} = G \quad (2-2)$$

传感器内的转盘停止转动，滑动变阻器的阻值停留在一个固定的平衡值，根据滑动变阻器的阻值，计算出钢丝绳的位移和油位的高度 h 。

(2) 滞环带浮物材料选择

当浮物处于滞环带中时，浮物受到浮力的作用，当浮物所受到浮力、重力及拉力达到平衡时，浮物停止下落，此时为了使拉线传感器能够把线收回去并且浮物浮出液面， $F_{\text{浮力}} > 0.5\text{N}$ ，为了更好的体现出效果，按照 $F_{\text{浮力}} = 1\text{N}$ 设计。将这部分浮力等效为质量 M_2 的柴油产生的重力，则 $M_2 = 100\text{g}$ 。根据工地常用的柴油类型，将柴油密度按照 $\rho_{\text{密度}} = 0.83\text{kg/L}$ 计算。则浮力应满足：

$$F_{\text{浮力}} = \rho_{\text{柴油}} V_{\text{排}} g = M_2 g \quad (2-3)$$

得：

$$V_{\text{排}} = 0.12\text{L}$$

由上推导可得：

$$\rho_{\text{浮物}} < 0.35\text{kg} / 0.12\text{L} = 2.9\text{kg} / \text{L} \quad (2-4)$$

浮物要满足式 (2-4) 且不被柴油腐蚀, $\rho_{\text{铝}}=2.7\text{KG/L}$, 满足储油罐中的使用要求, 所以可选择铝型材料作为浮物材料。

(3) 滞环带浮物形状设计

由 (2) 可知, 浮物的体积应大于 0.12L , 滞环带按照 $h=6\text{mm}$ 设计, 做成圆盘型。则:

$$V_{\text{排}} = \pi r^2 h \quad (2-5)$$

由上述分析可知圆盘半径设计为 $r = 6\text{cm}$ 。

浮物实物拍摄图如图 2-3 所示:



图 2-3 浮物实拍图

2.3 拉线位移传感器误差修正方法

拉线传感器从设计、安装到使用过程中, 各种因素均可能对传感器造成误差。在工地的实际使用过程中, 造成误差的因素主要有:

(1) 安装因素造成的误差;

- (2) 传感器内部角位移传感器、钢丝绳的绕线方式等因素造成的误差；
- (3) 现场采集因素导致的误差。

2.3.1 安装因素误差修正方法

(1) 设置辅助安装设备

通过辅助装置降低因安装失误导致的误差，拉线传感器辅助装置有固定基座、牵引构造和固定螺栓等，实际安装如图 2-4 所示，通过固定基座安装传感器，并在首次安装时人工矫正传感器，降低因安装因素导致的误差。

(2) 安装位置选择

传感器的安装应尽量符合阿贝原理，即将标准线安放于被测线的延长线上，减少系统误差。如图 2-4 所示，拉线传感器安装位于储油罐顶部，拉线在浮物的作用下垂直下落于油面测量油位的高度。

(3) 设置防护装置

工地现场过量粉尘、撞击、积屑等严重，易造成钢丝绳不顺及钢丝绳破损的情况，导致钢丝绳受力发生变化，造成严重误差。通过增加防护罩可以避免粉尘和积屑的影响，如图 2-4 所示。



图 2-4 拉线传感器安装实拍图

2.3.2 传感器因素导致误差修正方法

(1) 绕线误差分析及误差补偿

根据 JJF 1305—2011《线位移传感器校准规范》，典型拉线位移传感器基本误差一般在 $\pm 0.05\% \sim \pm 0.5\%$ 之间^[36]。如图 2-1 所示，拉线位移传感器安装位于储油罐顶部位置，通过内部弹簧保证钢丝绳张力不变，并在浮物的重力作用下垂直到达油面，在油浮力的作用下弹簧收缩，拉线收回，带动内部轮毂转动，将钢丝绳位移量转化为轮毂角度转动量，输出与位移成比例的信号。

常用拉线式位移传感器的钢丝绳工作原理图如图 2-5 所示：

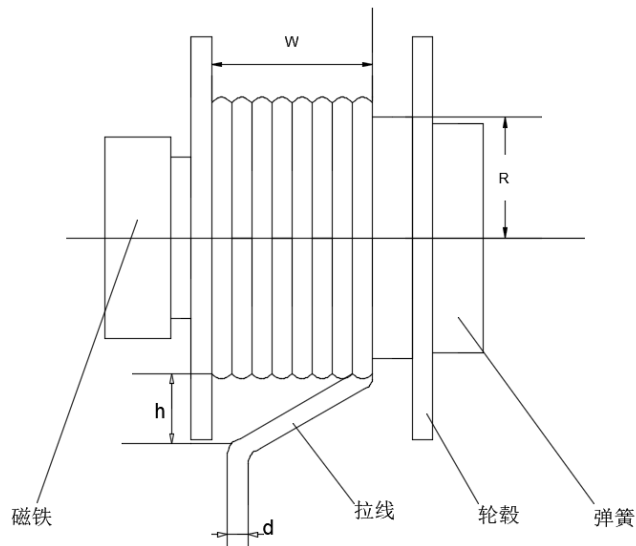


图 2-5 拉线传感器位移原理图

图 2-5 中卷线筒半径为 R ；钢丝绳直径为 d ；单圈绕线长度为 l ； h 为卷线筒下沿至拉线盒出口的距离；绕线轴向匝数为 p ，卷线筒钢丝绳排列宽度为 w 。根据传感器位移原理图可知，单圈绕线的长度与卷线筒半径和钢丝绳直径的关系计算公式为：

$$l = \sqrt{(2\pi R)^2 + d^2} \quad (2-6)$$

在理想状态下，钢丝绳在绕线的过程中在轴向上排列整齐，此时绕线的排列会产生轴向的移动，轴向移动误差为：

$$\sigma = \sqrt{h^2 + w^2} - h \quad (2-7)$$

则单圈绕线长度的轴向误差补偿公式为：

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma}{p} \quad (2-8)$$

根据拉线传感器的测量原理可知，传感器的测量长度与旋转角度值间的公式为：

$$s(\theta) = \frac{\theta - \theta_0}{360} (l + \Delta\sigma) \quad (2-9)$$

其中， θ_0 为测量前的初始角度值， θ 为测量结束时的最终角度值。

在实际的使用过程中，拉线传感器内的卷线筒在卷线过程中会发生重叠，且不会规整排列到卷线筒上，此时会带来绕线误差，如图 2-6 所示。

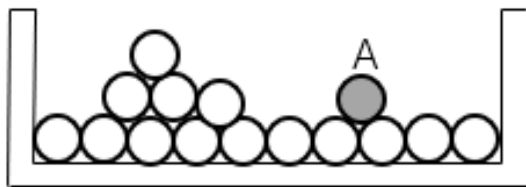


图 2-6 钢丝绳重叠排列

当钢丝绳发生重叠时，钢丝绳从卷线筒上的不同重叠层拉出，所造成的误差不同。当重叠一圈时，如图 2-6 中的线圈 A，此时钢丝绳绕卷线筒一圈，相当于卷线筒的半径变为：

$$r = R + \frac{\sqrt{3}}{2}d \quad (2-10)$$

故而发生绕线重叠一圈时，单圈绕线的长度 l' 与卷线筒半径和钢丝绳直径的关系计算公式为：

$$l' = \sqrt{(2\pi r)^2 + d^2} \quad (2-11)$$

重叠一圈造成的最大误差为：

$$\Delta l = l' - l \quad (2-12)$$

若按满量程为 2500mm，绕线 10 圈，钢丝绳直径为 0.7mm，则重叠一圈的最大误差为 $\pm 2\text{mm}$ 。轴向移动导致的误差小于重叠一圈导致的误差，且轴向移动的误差可通过误差补偿减小。

（2）绕线误差修正方法

a. 绕线卷筒分析

到目前为止，卷筒按表面的形式，有光面卷筒、螺旋绳卷槽卷筒和折线绳槽卷筒。光面卷筒表面光滑，不为钢丝绳加工导向跳槽，钢丝绳在缠绕第一圈时，由于相邻钢丝绳间的互相推挤，造成第一层钢丝绳排列不整齐^[37]。此时钢丝绳与卷筒间的接触为表面与线间的接触，导致钢丝绳局部应力较大，钢丝绳圈间的挤压大，钢丝绳寿命变短。螺旋绳槽卷筒则是加工有对钢丝绳具有导向作用的螺旋槽，且钢丝绳与槽是面接触，减小了钢丝绳圈间的挤压力，使得钢丝绳的寿命得到延长且绳间排列整齐不易出现乱绳。折线绳槽卷筒与螺旋绳槽相似，将螺旋绳槽分为四个段，两段平行区和两段过渡区，该种类的卷筒导向性好，钢丝绳寿命得到很好的延长，但成本过高。

常用拉线传感器采用光面卷筒作为绕线卷筒，为了减小设备的尺寸，卷筒直径设计得相对小，绕线量会变大，此时在重物的拉力作用下，绕线可能存在多圈重叠，产生更大绕线重叠误差，且重叠绕线时，钢丝绳间存在挤压，使得钢丝绳寿命降低。

b.卷筒设计

根据工地常用卧式储油罐的罐高，可采用螺旋槽卷筒单层排线，在螺旋槽的向导作用下，避免排线乱序，单层避免排线发生重叠。

卷筒名义直径为卷筒上钢丝绳中心起的卷筒直径^[38]，卷筒直径的大小与钢丝绳寿命相关，根据规范卷筒的名义直径 D 应满足：

$$D \geq ed$$

其中 D 的取值应圆整， e 为系数；

绳槽节距采用标准槽，即应满足：

$$t = d + (2 \sim 4)mm$$

绳槽深度采用标准槽，即应满足：

$$C = (0.25 \sim 0.4)d$$

绳槽半径 r_0 应满足：

$$r_0 = (0.53 \sim 0.6)d$$

使用螺旋槽在卷线时，拉线的位移原理图如图（2-7）所示：

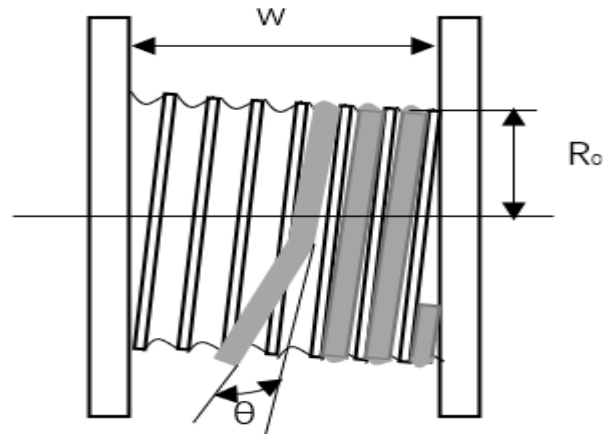


图 2-7 螺旋槽卷线位移原理图

根据螺旋槽卷线位移原理图可知，单圈绕线的长度 l_0 与卷线筒的半径和钢丝绳直径的关系计算公式为：

$$l_0 = \sqrt{(2\pi R_0)^2 + t^2} \quad (2-13)$$

设置拉线式位移传感器的满量程为 $s=2500\text{mm}$ ，钢丝绳直径为 $d=0.7\text{mm}$ ，螺旋槽设置为 $n=10$ 圈。螺旋槽卷筒尺寸设计如表 2-1 所示：

表 2-1 螺旋槽尺寸设计表

绳槽节距 t/mm	绳槽深度 C/mm	绳槽半径 r_0/mm	卷筒半径 R_0/mm
2.7	0.21	0.371	41.1

2.4 结果分析

分别将光滑面卷筒拉线位移传感器和本文设计的螺旋槽卷筒拉线位移传感器安装于同一个油罐，在工地现场采集储油罐液位高度处于 400mm、600mm、800mm、1000mm、1200mm、1400mm、1600mm 和 1750mm 处的数据，传感器液位高度读数及误差部分数据如表 2-2 所示：

表 2-2 拉线传感器部分实际采集数据表

实际读数/mm	光面卷筒读数/mm	$\Delta h_0/\text{mm}$	螺旋槽卷筒读数/mm	$\Delta h_1/\text{mm}$
400	394.4	5.6	396.2	3.8
	396.9	3.1	401.3	-1.3
	398.1	1.9	397.6	2.4
600	599.7	0.3	601.1	-1.1

表 2-2 (续)

实际读数/mm	光面卷筒读数/mm	Δh_0 /mm	螺旋槽卷筒读数/mm	Δh_1 /mm
600	594.9	5.1	598.3	1.7
	597.3	2.7	599.6	0.4
800	799.3	0.7	801.8	-1.8
	795.7	4.3	798.9	1.1
	794.5	5.5	797.1	2.9
1000	1000.7	0.70	1000.7	0.30
	997.1	2.90	999.5	1.50
	999.5	0.50	1003.1	-2.10
1200	1200.9	-0.9	1199.7	0.3
	1202.1	-2.1	1201.7	-1.7
	1198.5	1.5	1200.9	-0.9
1400	1401.1	1.1	1401.3	-1.3
	1398.7	1.3	1400.1	-0.1
	1397.5	2.5	1398.9	1.1
1600	1601.3	-1.3	1602.1	-2.1
	1602.5	2.5	1597.9	2.1
	1603.7	-3.7	1601.5	-1.5
1750	1746.0	4	1748.6	1.4
	1744.8	5.2	1746.3	3.7
	1747.2	2.8	1745.4	4.6

分别在油位高度位于 400mm、600mm 和 1750mm 处采集 20 组数据，在 800mm、1000mm、1200mm、1400mm、1600mm 采集 90 组数据，并计算光面卷筒和槽面卷筒的均方根误差，结果如表 2-3 所示：

表 2-3 光面卷筒与槽面卷筒实测数据均方跟误差数据表

油罐高/mm	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1750
光面卷筒	4.27	2.45	2.89	2.33	3.06	2.25	2.25	1.89
槽面卷筒	3.65	2.09	2.13	1.89	2.47	1.93	1.82	1.35

根据表 2-3 可知, 槽面卷筒分别在油罐高位于 400mm、600mm、800mm、1000mm、1200mm、1400mm、1600mm 和 1750mm 的均方根误差比光面卷筒小。实际测量结果显示误差得到减小。

2.5 本章小结

本章通过分析常见液位计的优缺点, 综合成本、工地环境因素等各项因素及能建立实时监测油位变化系统的要求, 选择使用拉线式位移传感器作为工地储油罐的液位计。根据传感器在储油罐中的使用, 设计了使拉线传感器垂直下落到油面并漂浮于油面的浮物。通过分析拉线传感器在工地使用过程中误差产生的原因, 设置辅助设备安装和防护传感器, 降低安装过程带来的误差和传感器使用寿命及避免长期使用过程中精度的容易降低。通过分析拉线的位移原理, 对拉线轴向误差做补偿, 并通过分析绕线过程中拉线重叠的原因及造成的误差, 设计了螺旋槽卷筒作为拉线传感器的卷线盘, 并在工地现场采集油罐高位于 400mm、600mm、800mm、1000mm、1200mm、1400mm、1600mm 和 1750mm 处的油位高, 最后通过均方根误差评判本章的设计在实际使用过程中的实用性, 测试证明, 本章的设计在储油罐油位高度的测量中有所提高。

第三章 储油罐数学模型的建立

目前工地上使用最为广泛的储油罐是圆柱型和椭圆柱型卧式储油罐。本文通过对使用最为广泛的卧式圆柱型和卧式椭圆柱型储油罐的分析,根据发生纵向和横向倾斜变位的油罐几何形状及油面关系,采用定积分的方式建立水平卧立储油罐的油位高度变化、出油量之间的数学模型,并建立发生变位(倾斜)后的储油罐的油位高度变化、变位角和出油量之间的分段数学模型。

3.1 卧式圆柱型储油罐数学模型的建立

3.1.1 无倾斜圆柱型储油罐数学模型

两端有封头的卧式圆柱型储油罐水平卧立,液位计采用拉线式位移传感器安装于油罐顶部,油液面高度为 h , 储油罐柱体半径为 R , 储油罐沿 Y 轴的高度为 $2R$, 储油罐柱体部分横截面面积为 $S_{\text{横}}$, 储油罐油位高度从 h_1 下降到 h_2 时的出油量分为两侧球冠体出油和柱体部分出油。储油罐水平卧立时,左侧球冠体部分出油与右侧球冠体相同,如图 3-1 所示。

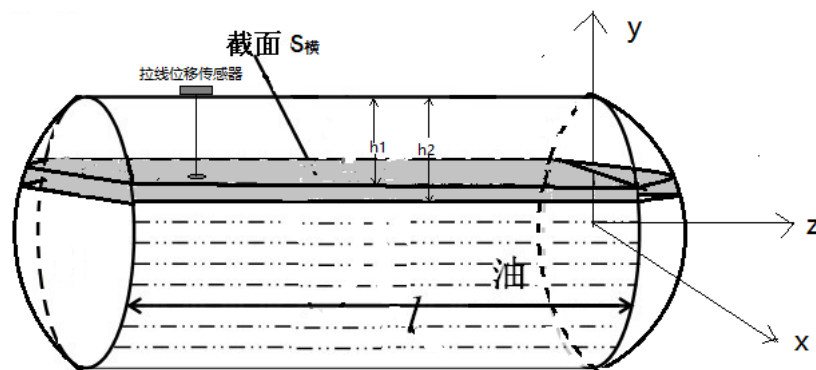


图 3-1 卧式圆柱型储油罐油位变化出油图

即油位高度从 h_1 下降到 h_2 的理论出油量为:

$$\begin{aligned}\Delta V &= \Delta V_{\text{圆柱}} + \Delta V_{\text{左冠}} + \Delta V_{\text{右冠}} \\ &= \Delta V_{\text{圆柱}} + 2\Delta V_{\text{冠}}\end{aligned}\quad (3-1)$$

油罐垂直截面油面平面直角坐标系如图 3-2 所示:

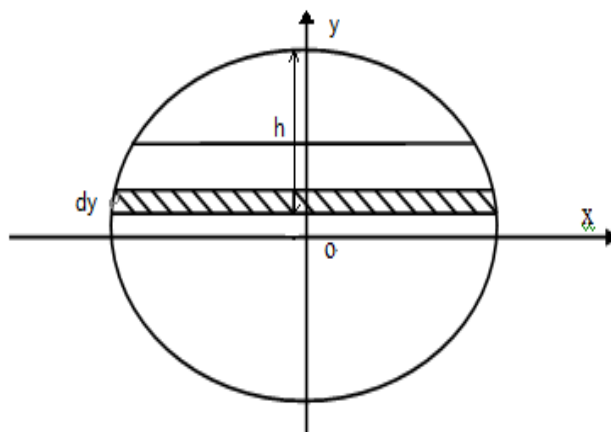


图 3-2 圆柱型油罐横截面坐标示意图

由图 3-2 可知：

$$S_{\text{横}} = l \cdot 2x \quad (3-2)$$

储油罐纵向截面曲线方程为：

$$x^2 + y^2 = R^2 \quad (3-3)$$

可得：

$$x = \sqrt{R^2 - y^2} \quad (3-4)$$

所以：

$$S_{\text{横}} = 2l\sqrt{R^2 - y^2} \quad (3-5)$$

油位高度从 y_1 下降到 y_2 的油体积 $\Delta V_{\text{柱}}$ 为：

$$\Delta V_{\text{圆柱}} = 2l \cdot \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{R^2 - y^2} dy \quad (3-6)$$

卧式圆柱型储油罐两端的球冠体为球体被平面切割后剩下的部分，球冠体被截面到半球顶部为球冠体高 H ，油位高为 h ，建立空间直角坐标如图 3-3 所示。

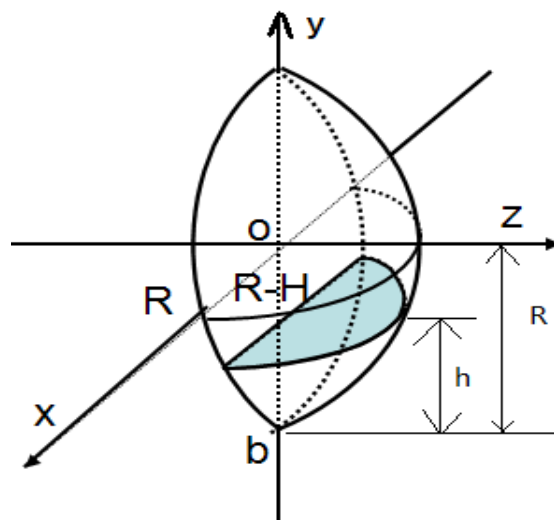


图 3-3 圆柱型储油罐球冠体坐标示意图

球冠体的球半径为 r ，知球冠体所在球的球心坐标为 $(0,0,H-r)$ ，可得球面方程为：

$$x^2 + y^2 + (z + r - H)^2 = r^2$$

得：

$$z = \sqrt{r^2 - x^2 - y^2} - r + H \quad (3-7)$$

由图 3-3 可得截面的圆方程为：

$$R^2 + (r - H)^2 = r^2$$

得：

$$r = \frac{R^2 + H^2}{2H} \quad (3-8)$$

球冠体部分油位高度从 y_1 下降到 y_2 的油体积 $\Delta V_{\text{冠}}$ 为：

$$\Delta V_{\text{球冠体}} = \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} dx \int_0^{\sqrt{r^2 - x^2} - r + H} dz \quad (3-9)$$

故储油罐油位高度从 y_1 下降到 y_2 的出油量 ΔV 为：

$$\begin{aligned} \Delta V &= \Delta V_{\text{柱}} + 2 \Delta V_{\text{冠}} \\ &= 2l \cdot \int_{y_1}^{y_2} \sqrt{R^2 - y^2} dy + 2 \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{-\sqrt{R^2 - y^2}}^{\sqrt{R^2 - y^2}} dx \int_0^{\sqrt{r^2 - x^2} - r + H} dz \end{aligned} \quad (3-10)$$

3.1.2 纵向倾斜圆柱型储油罐数学模型

储油罐柱体切面圆的半径为 R ，拉线式位移传感器到左侧球冠体的距离为 l_1 ，到右侧球冠体的距离为 l_2 。根据储油罐发生纵向倾斜 α 角后的几何形状及不同油位高度下油面的形状，对储油罐按拉线式位移传感器所在方向做分段处理，分段和坐标示意图如图 3-4 所示。

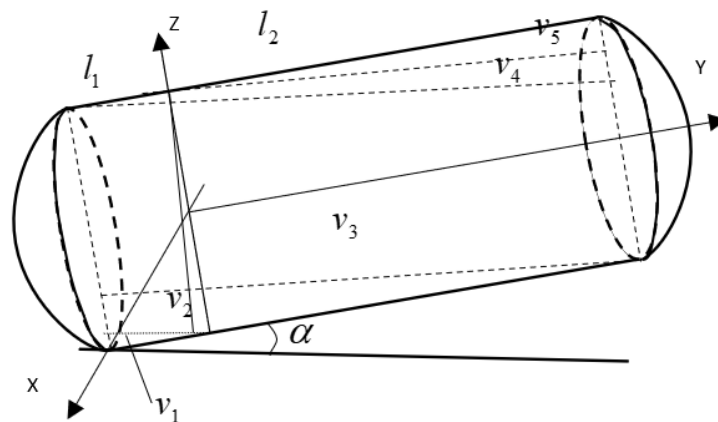


图 3-4 卧式圆柱型储油罐纵向倾斜 α 角分段示意图

油位高度从 h_1 (油位高度为从罐底沿 Z 轴正方向到油面的距离) 下降到 h_0 的体积变化即为储油罐从 h_1 下降到 h_0 的出油量, 为:

$$\Delta V = \Delta v_{\text{左冠}} + \Delta v_{\text{柱体}} + \Delta v_{\text{右冠}} \quad (3-11)$$

油位高度为 h , 油平面 $z(y)$ 满足关系:

$$z(y, h) = -y \tan \alpha + h - R \quad (3-12)$$

拉线式位移传感器测量的油位值为从罐顶沿拉线式位移传感器到液面的距离 m , 油位高度与拉线式位移传感器所测量油位高度间的关系为:

$$h = 2R - m / \cos \alpha \quad (3-13)$$

当油平面处于 V_1 内时, 证明此时油量极度少, 会造成无法给工程设备加油, 应当向管理员提示储油罐需要添油。当油平面处于区域内时, 油会从拉线式位移传感器出溢出, 故不可能让油位高度到 V_5 。且油平面处于区域 V_1 和 V_5 内时, 油位高度超出拉线式位移传感器的测量范围, 出油量与油位高度变化关系无效, 因此忽略这两个区域内的油位变化和出油量关系。

(1) 柱体部分出油量计算

储油罐柱体部分 V_2 、 V_3 、 V_4 区域内油位高度从 h_1 下降到 h_0 的出油量分别为:

当 $0 \leq h \leq l_2 \tan \alpha$ 时, 即油位高度处于 V_2 内。

$$v_2 = \int_{-l_1}^{h_0/\tan \alpha} dy \int_{z(y, h_0)}^{z(y, h_1)} 2\sqrt{R^2 - z^2} dz + \int_{h_0/\tan \alpha}^{h_1/\tan \alpha} dy \int_{-R}^{z(y, h_1)} 2\sqrt{R^2 - z^2} dz \quad (3-14)$$

当 $l_2 \tan \alpha \leq h \leq 2R - l_1 \tan \alpha$ 时, 即油位高度处于 V_3 内。

$$v_3 = \int_{-l_1}^{l_2} dy \int_{z(y, h_0)}^{z(y, h_1)} 2\sqrt{R^2 - z^2} dz \quad (3-15)$$

当 $2R - l_1 \tan \alpha \leq h \leq 2R$ 时, 即油位高度处于 V_4 内。

$$v_4 = \int_{(h_0-2R)/\tan \alpha}^{(h_1-2R)/\tan \alpha} dy \int_{z(y, h_0)}^R 2\sqrt{R^2 - z^2} dz + \int_{h_0/\tan \alpha}^{l_2} dy \int_{z(y, h_0)}^{z(y, h_1)} dz \quad (3-16)$$

(2) 球冠体部分出油量计算

储油罐两端的球冠体高为 H , 球冠体所在球的半径为 r 。当储油罐纵向倾斜 α 角时, 左侧部分的球冠体油位变化与对应的油平面以及坐标示意图如图 3-5 所

示。

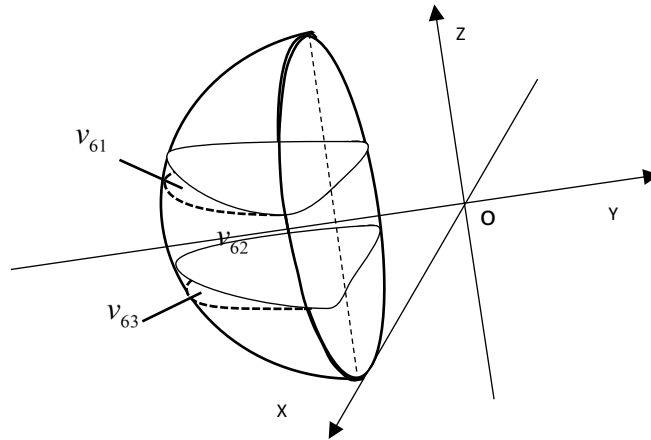


图 3-5 左侧球冠体油位对应油平面图

由图 3-5 可知，左侧球冠体油位高度从 h_1 下降到 h_0 的理论出油量 $\Delta v_{\text{左}}$ 为：

$$\Delta v_{\text{左}} = v_{61} + v_{62} - v_{63} \approx v_{62} \quad (3-17)$$

其中， V_{62} 为两虚平面间的出油，实际出油为两实平面间， V_{62} 出油为：

$$v_{62} = \int_{z(-l_1, h_0)}^{z(-l_1, h_1)} dz \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2}} 2y dx \quad (3-18)$$

同理，当油位高度从 h_1 下降到 h_0 时，右侧球冠体的理论出油量为：

$$\Delta v_{\text{右}} = \int_{z(l_2, h_0)}^{z(l_2, h_1)} dz \int_0^{\sqrt{R^2 - z^2}} 2y dx \quad (3-19)$$

其中公式(3-16)、(3-17)中的 y 为：

$$y = \left(\sqrt{r^2 - x^2 - z^2} + H - r \right) \quad (3-20)$$

3.1.3 横向倾斜圆柱型储油罐数学模型

根据卧式圆柱型储油罐的几何形状可知，储油罐发生横向倾斜时，油平面形状和油位高度均无变化^[23]，但倾斜前后的油位高度变化值与对应的出油量关系不同。储油罐横向倾斜 β 角后，储油罐内拉线式位移传感器的位置及测量油位高度测量如图 3-6 所示。

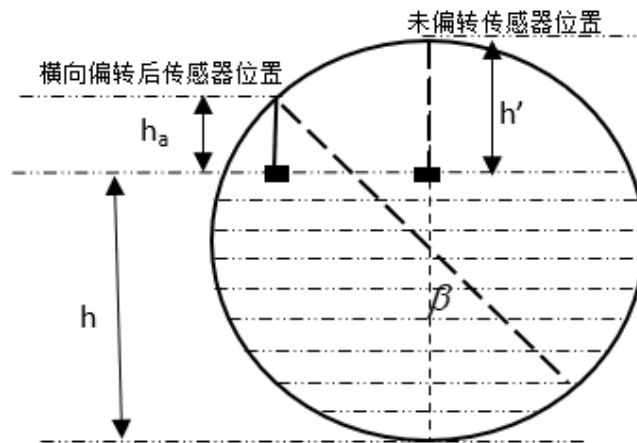


图 3-6 储油罐横向倾斜后油平面及拉线式位移传感器测量图

发生横向倾斜后，拉线式位移传感器所测得的油位高度 h_a 与未倾斜油位高度 h' 和 h 的关系为：

$$h = R + R \cos \beta - h_a \quad (3-21)$$

将公式 (3-21) 带入公式 (3-10) 中，校正横向倾斜带来的误差，便可以得到发生横向偏转后的卧式圆柱型储油罐油位从 h_1 下降到 h_0 时，油位度变化、变位角与出油量间的数学模型。

将公式 (3-21) 带入发生纵向倾斜后的圆柱型储油罐油位高度变化、变位角与出油量间的数学模型，便可以得到同时发生横向与纵向倾斜后的油位高度变化、变位角与出油量间的数学模型。

3.2 卧式椭圆柱型储油罐数学模型的建立

3.2.1 无变位椭圆柱型储油罐数学模型

两端无封头的椭圆柱型储油罐水平卧立，液位计安装位于储油罐顶部，距离左侧管壁长为 l_1 ，距离右侧管壁长为 l_2 ，储油罐椭圆截面长半轴为 a ，短半轴长为 b ，油位高度从 h_1 下降到 h_0 的油面变化及油罐坐标示意图如图 3-7 所示。

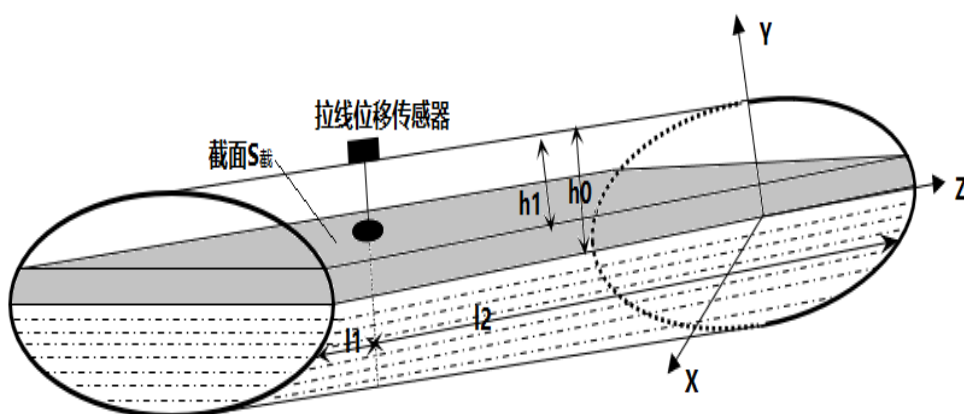


图 3-7 卧式椭圆柱型储油罐油位变化出油图

油位高度从 h_1 下降到 h_0 的油面沿 YOZ 的截面直角坐标系如图 3-8 所示。

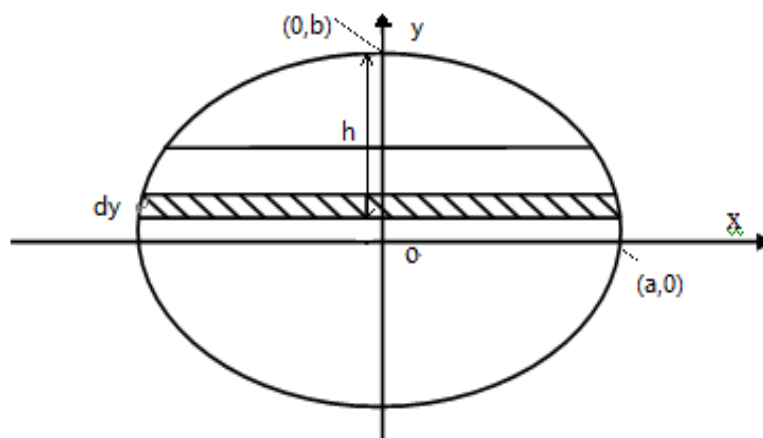


图 3-8 椭圆柱型油罐柱体横截面坐标示意图

截面的曲线方程为：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3-22)$$

得

$$x = a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} \quad (3-23)$$

故

卧式椭圆柱型储油罐油位高度从 h_1 下降到 h_0 时，柱体部分的理论出油量为：

$$\Delta V_{\text{椭圆柱}} = 2al \int_{h_0}^{h_1} \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dy \quad (3-24)$$

3.2.2 纵向倾斜椭圆柱型储油罐数学模型

当储油罐发生纵向倾斜 α 角, 如图 3-9 所示, 根据实际情况可知, 油位高度处于 v_1 和 v_5 区域的情况是当油极少或向油罐注入油很满的情况, 这样的情况非常少, 且可以通过监测提示, 故不考虑该两个区域内的出油量情况, 主要考虑油位高度变化处于 v_2 、 v_3 、 v_4 内的变化情况。

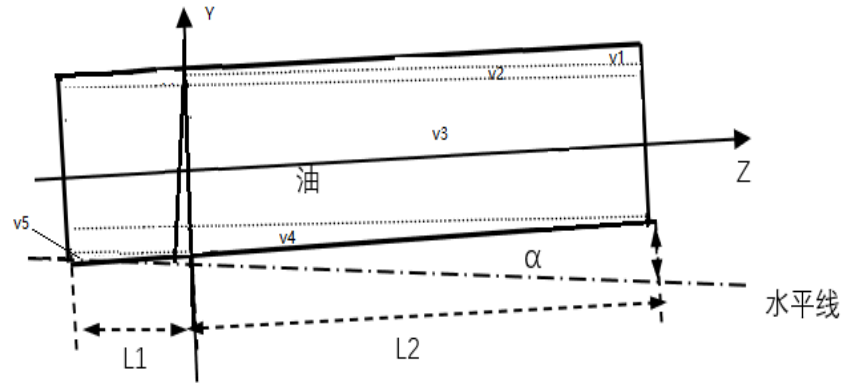


图 3-9 椭圆柱型储油罐纵向倾斜 α 角示意图

油位高度为 h (油位高度为从罐底向 Y 轴正方向的高度), 油平面 $y(z)$ 满足关系:

$$y(z) = -z \tan \alpha + h - b \quad (3-25)$$

拉线式位移传感器测量的油位值为从罐顶沿拉线式位移传感器到液面的距离 m , 油位高度与拉线式位移传感器所测量油位高度间的关系为:

$$h = 2a - m / \cos \alpha \quad (3-26)$$

当油位高度处于 v_2 、 v_3 、 v_4 区域内时, 油位高度从 h_1 下降到 h_0 , 油位高度变化、出油量与倾斜角之间的数学模型为:

当 $0 \leq h \leq l_2 \tan \alpha$ 时, 即油位在区域 v_4 内。

$$v_2 = \int_{-l_1}^{h_0/\tan \alpha} dy \int_{y(z, h_0)}^{y(z, h_1)} 2a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dz + \int_{h_0/\tan \alpha}^{h_1/\tan \alpha} dy \int_{-b}^{y(z, h_1)} 2a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dz \quad (3-27)$$

当 $l_2 \tan \alpha \leq h \leq 2b - l_1 \tan \alpha$ 时, 即油位在区域 v_3 内。

$$v_3 = \int_{-l_1}^{l_2} dy \int_{y(z, h_0)}^{y(z, h_1)} 2a \sqrt{1 - \frac{y^2}{b^2}} dz \quad (3-28)$$

当 $2b - l_1 \tan \alpha \leq h \leq 2b$ 时, 即油位在区域 v_4 内。

$$v_4 = \int_{(h_0-2b)/\tan\alpha}^{(h_1-2b)/\tan\alpha} dy \int_{y(z,h_0)}^b 2a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}} dz + \int_{(2b-h)/\tan\alpha}^{l_2} dy \int_{y(z,h_0)}^{y(z,h_1)} 2a\sqrt{1-\frac{y^2}{b^2}} dz \quad (3-29)$$

3.2.3 横向倾斜椭圆柱型储油罐数学模型

当卧式椭圆柱型储油罐发生横向倾斜，倾斜角为 β 时，出油截面及坐标示意图如图 3-10 所示。

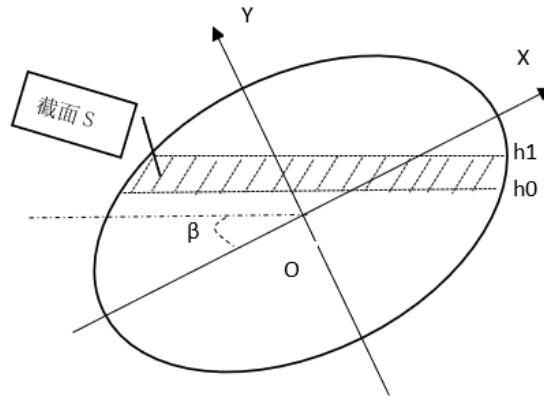


图 3-10 椭圆柱型储油罐横向倾斜 β 角示意图

任意油位高度的油平面可表示为：

$$y = h - b - x \tan \beta \quad (3-30)$$

发生横向倾斜后，从储油罐底部到液面沿 Z 轴方向的距离 h 与拉线式位移传感器所测得的油位高度值 h_a 的关系为：

$$h = 2b - h_a / \cos \beta \quad (3-31)$$

采用 Python 可通过公式 (3-22)、(3-31) 计算出油面与椭圆曲线交点的坐标 (x_{A1}, y_{B1}) 、 (x_{A2}, y_{B2}) ，通过交点坐标可计算出油面从左侧管壁到右侧的距离 l 。当油位高度从 h_1 下降到 h_0 时油截面 S 可表示为：

$$s = \int_{h_0}^{h_1} l dy \quad (3-32)$$

当油位高度从 h_1 下降到 h_0 时油截面 S 可表示为：

$$\Delta V = \int_{-l_1}^{l_2} dz \int_{h_0}^{h_1} l dy \quad (3-33)$$

3.3 本章小结

本章通过对工地使用最为广泛的储油罐，包括两端有封头的卧式圆柱型储油

罐和两端无封头的卧式椭圆柱型储油罐的几何分析,建立了储油罐油位高变化与出油量间的数学模型。并通过分析卧式圆柱型储油罐在工地长期的实际使用过程中,因地基变形导致的储油罐发生横向倾斜、纵向倾斜甚至横向与纵向倾斜同时发生的情况下储油罐的几何形状,建立了油位高度变化、变位角以及出油量间的分段数学模型。通过分析卧式椭圆柱型储油罐发生倾斜情况下的几何形状,建立了储油罐发生纵向倾斜情况下的油位高度变化、变位角以及出油量间的分段数学模型。通过分析发生横向倾斜的情况下,建立了发生横向倾斜情况下的油位高度变化、变位角以及出油量间的数学模型。为储油罐出油量与油位高度变化是否一致提供必要的参考及实现实时智能监测提供数学模型,避免出现油量管理过程中存在的有油位变化却无工程设备加油(即偷油、漏油)的情况。

第四章 储油罐变位模型修正

为了对储油罐在长期的使用过程中因地基变形,导致储油罐发生变位(横向倾斜或纵向倾斜),从而致使储油罐油位高度变化与出油量关系发生变化的情况校正,第二章中根据储油罐发生变位后的几何形状及拉线式位移传感器测量值的变化,建立了发生变位后油位高度变化、变位角与出油量间的分段数学模型。本章利用模拟退火算法,对储油罐同时发生横向倾斜与纵向倾斜时,如何求解模型中的最优角变位角进行了研究。并利用 2010 年全国大学生建模竞赛 A 题的实测数据^[39],以及第二章中所建立的卧式圆柱型储油罐的分段数学模型,通过模拟退火算法求解最优变位角。在本章最后通过与文献数据做对比,验证了模型的正确性及采用模拟退火算法求解该模型的最优变位角的方法具有可行性。

4.1 模拟退火算法基本理论

最优化问题分为函数优化与组合优化两大类问题,本文所建储油罐模型对象所采集的数据是离散状态,故而采用典型的组合优化方法对模型中参数进行求解研究。常见的最优解搜索方法分为穷举、随机和启发式,穷举法是通过在解空间中对所有解逐个列举判断,最终找到最适合的答案,该方法得到的结果是最正确的,但会做很多无用功,解空间大的情况下可能会造成时间的崩溃。启发式算法是在求解问题的过程中,利用过去的经验,选择已经行之有效的方法,而不是再次以系统的确定步骤去寻求解。随机算法是在算法的某个步骤中,使用随机函数来产生随机种子,而该随机种子被运用到算法的步骤选择或数据处理中,直接或间接的影响算法执行的流程或执行的结果。

模拟退火算法 SA(Simulated Annealing)属于随机全局搜索优化算法,算法思想最早是由 Metropolis 等人提出来的,1983 年由 Kirkpatrick 等将其优化^[40]。该算法是一种基于蒙特卡洛迭代求解策略的随机寻优算法,算法来源于物理学中固体物质的退火过程与组合优化间的相似性^[41]。SA 算法是在某一初温下,伴随着温度参数的不断下降,利用具有概率突跳性的 Metropolis 准则在解空间中随机搜索,在局部最优解时以一定概率接受新解并跳出局部最优解,最终使搜寻的解趋于全局最优^[42]。“退火”一词是来源于物理学的名词,采用模拟固体加温、等温

和冷却三个阶段^[43]:

(1) 加温过程。对固体实行加热, 增强粒子热运动, 使粒子偏离平衡的位置, 到温度足够高后, 固体会熔解成为液体, 熔解过程中随着温度的升高, 系统能量也会增大, 进而消除系统原本可能存在的非均匀态, 使接下来要进行的冷却过程可以以某一平衡态作为起点。

(2) 等温过程。从物理学的角度, 我们可以知道一个与周围环境不断交换热量而自身温度却不变的封闭系统, 系统状态的这种自发变化总是朝着自由能减少的方向在进行, 当自由能达到最小状态时, 这个系统便会达到平衡态。

(3) 冷却过程。通过降温实现退火, 使得系统能量逐渐下降, 粒子的热运动不断减弱并逐渐变得有序, 从而得到低能的晶体结构。

相较于爬山算法, 模拟退火算法在某个局部空间中搜索到一个最优值后, 并不会立刻停止迭代, 而是以 Metropolis 准则跳转到另一个区域继续搜寻解, 以更大概率找到全局最优解。而相较于蒙特卡洛法, 固体在恒温下达到热平衡的过程是可以用 Monte Carlo 方法模拟的, 且蒙特卡洛算法更简单, 但需大量采样才会得到比较精确的结果, 计算量很大。SA 算法在模拟物理学中固体退火的过程, 采样时着重选取有重要贡献的状态, 可较快达到较好的结果, 在计算量上比蒙特卡洛算法显著减少。

SA 算法主要由两部分组成, Metropolis 准则和退火过程。前者让算法在局部最优的时候可以跳出局部最优并接受新状态。具体而言: 在某一温度 t 下, 在当前状态 $X(n)$ 基础下根据某一指标(梯度下降)产生新状态 $X(n+1)$, 两个状态对应的能量分别为 E_n 和 E_{n+1} , 若 $E_n < E_{n+1}$, 则将新状态 $X(n+1)$ 接受为当前状态; 否则系统能量变大, 此算法并不会直接抛弃新状态 $X(n+1)$ (容易陷入局部最优), 而是产生一个 $N[0,1]$ 的随机数 r , 若满足 $r < p$ (p 为接受概率), 则接受新状态, 否则保持原状态。接受概率 p 为:

$$p = \begin{cases} 1, & E_{n+1} < E_n \\ \exp[-(E_{n+1} - E_n)/kt], & E_{n+1} \geq E_n \end{cases} \quad (4-1)$$

公式 (4-1) 中 k 是玻尔兹曼常数。在温度比较高的情况下, 会跳到与自身当前的能量差值较大的新状态; 反之, 跳到与自身当前能量差较小的新状态下。算法的每一轮迭代更新就是产生新解, 并计算当前解与新解的能量(目标函数值), 根据当前解与新解的能量状态, 确定是否接受新解作为当前解。如图 4-1 所示,

假设 A 为开始状态，随着算法的迭代，搜索到局部最优解的状态 B，发现 B 状态比 A 状态能量低，转移至状态 B。再进行下一步迭代更新的时候，发现能量上升，如果按照梯度下降的方式，则不允许继续前进，而模拟退火算法会以一定的概率跳出当前这个坑，如果跳出当前坑，则算法会经过迭代搜索到局部最优解的状态 C。如果能再次跳出状态 C 的坑，那么算法就能搜索到全局最优解的状态 D，所以接受概率的设计非常重要。

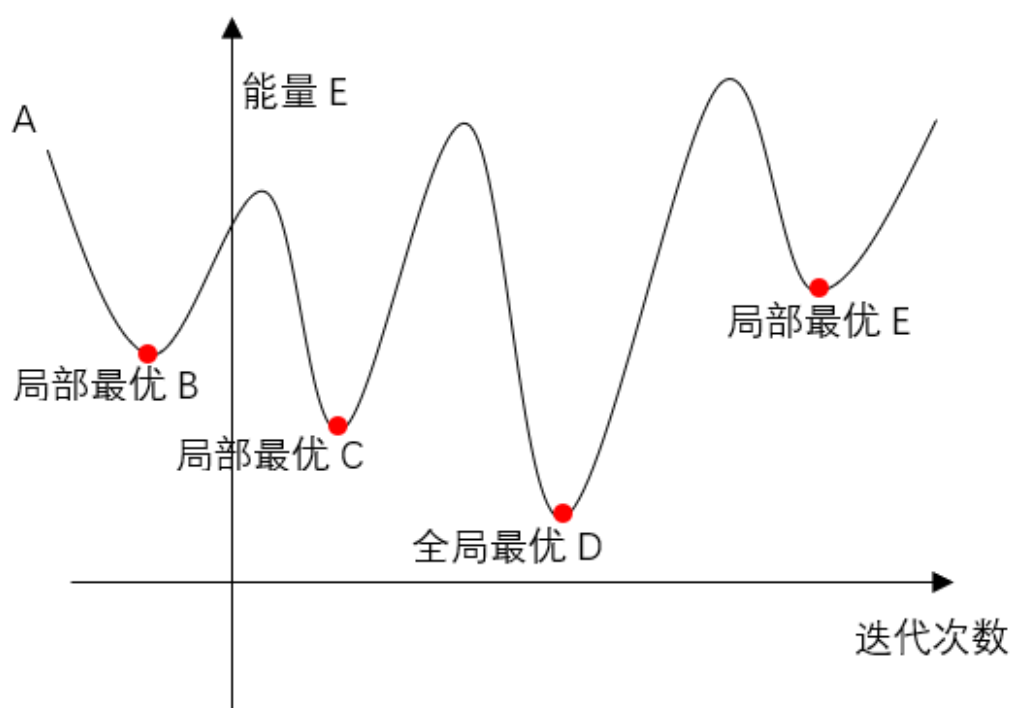


图 4-1 模拟退火算法寻优过程图

SA 算法一般步骤描述如下：

(1) 给定初始温度 $t = t_0$ ，并从目标函数 f 中随机产生一个可行初始状态（即初始解，算法迭代起始点） $x = x_0$ ，令 $s = 1$ ；

(2) Repeat:

(2.1) Repeat:

(2.1.1) 随机产生可行新状态 $x_j = \text{Generate}(x)$;

(2.1.2) 计算目标函数值增量 $\Delta f = f(x_j) - f(x)$;

(2.1.3) 根据 Metropolis 准则判断是否接受新解，if $\min[1, \exp(-\Delta f/t_s)] \geq \text{random}[0,1]$ $x = x_j$;

(2.1.3) Until 抽样满足抽样稳定准则;

(2.2) 退温 $t_{k+1} = \text{update}(t_k)$, 并令 $k = k+1$;

(3) Until 满足算法终止条件;

(4) 输出搜索结果。

上述 SA 算法流程图如图 4-2 所示:

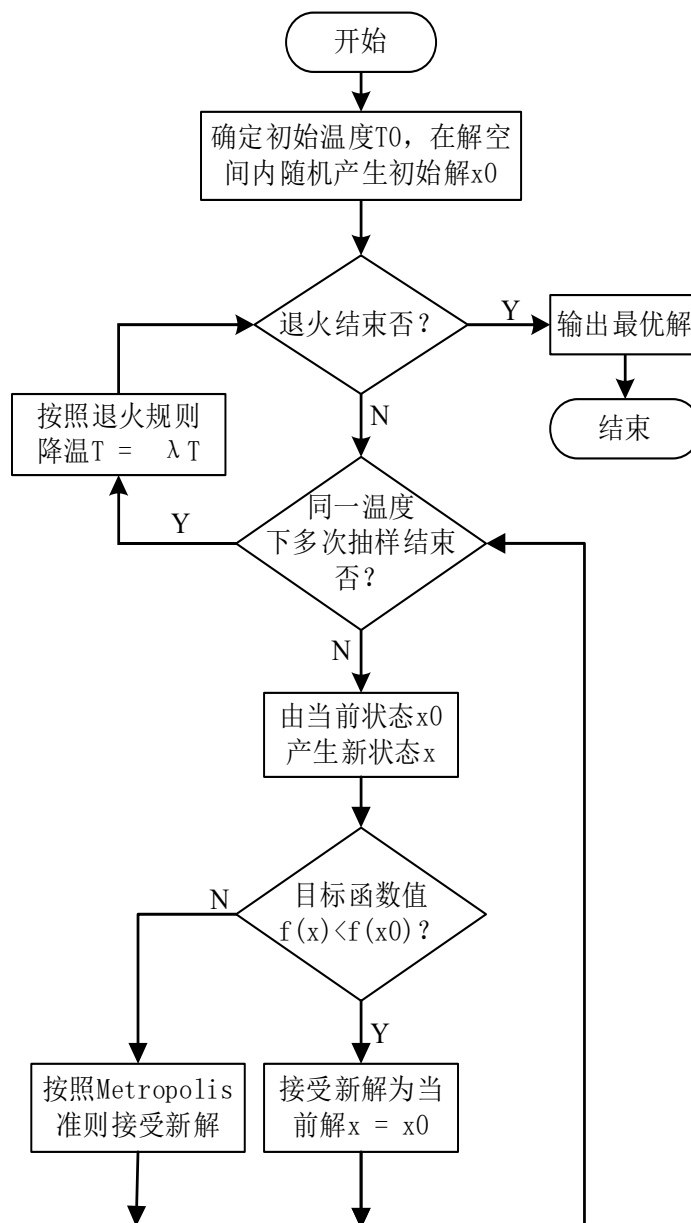


图 4-2 模拟退火算法流程图

模拟退火算法具有较高质量的实验性, 且通用易实现, 但算法要求较高的初始温度和较低的终止温度。

4.2 基于 SA 算法储油罐变位识别模型构建

模拟退火算法从流程上看,主要包括三函数两准则,三函数即是状态产生函数、状态接受函数、温度更新函数,两准则即是内层循环终止准则和外层循环终止准则^[44],这些环节的设定对算法的性能有很大的影响。例如状态产生函数的设定,函数所产生的值应当是尽可能保证遍布全部解空间;初始温度的设定过于太大,会使算法迭代时间太长,若设定过于太小,会使算法解空间搜索次数过少,找不到全局最优解,即是 T_0 越大,算法迭代的次数就越多,得到最优解的概率就越大,但运行时间会变长,而这些参数的设定还没有比较成熟的指导理论,在不同的问题下会有所不同。

设定卧式圆柱型储油罐第 k 次出油前的油位高度为 h_k , 出油后的油位高度为 h_{k+1} , 对横向倾斜做矫正后的油位高度为 h' , 实际出油量为 ΔV_k , 理论出油量为 $\Delta V_k(h'_k, h'_{k+1}, \alpha, \beta)$ 。采用非线性最小二乘法建立模拟退火算法中的目标函数为:

$$\begin{aligned} f(x) &= \min F \\ &= \min \sum_{i=1}^n \left(\Delta v_k - \Delta v'_k(h'_k, h'_{k+1}, \alpha, \beta) \right)^2 \end{aligned} \quad (4-2)$$

(1) 初始温度的设定。初温的设定常见方法有^[45]:

法一: 均匀产生一组初始解, 计算对应目标函数值并求出方差作为初温。

法二: 随机产生一组初始解, 求出每两种解间目标函数值的差值, 计算出 $\Delta \max$, 则初始温度 T_0 计算方法如公式 (4-3) 所示。

$$T_0 = -\frac{\Delta \max}{Pr} \quad (4-3)$$

公式 (4-2) 中 Pr 为接受概率的初始值。

(2) 退火速率。即是温度下降速率, 温度衰减过快, 则在同一温度下的抽样可能不够充分, 搜索性能会降低, 但若下降速率过慢, 则会导致迭代次数过多, 算法运行时间过长。常见的退火速率函数有两种。

a. 指数式下降方式:

$$T(k+1) = \lambda T(k), k = 1, 2, 3, \dots \quad (4-4)$$

上式中, k 是小于 1 的正数, 一般取值在 0.8 到 0.99 间, 使得每一温度下,

都有比较充分的采样^[46]。

b.其他下降方式:

$$T(k) = \frac{T_0}{\log(1+k)} \quad (4-5)$$

$$T(k) = \frac{T_0}{1+k} \quad (4-6)$$

(3) 状态产生函数的流程描述如下:

a.随机产生两个 $N(0,1)$ 的随机数 m_0 和 m_1 ;

b.计算温度降温速率:

$$z_i = m_i / \sqrt{m_0^2 + m_1^2} \quad (4-7)$$

c.根据解 x_0 产生新解 x_1 :

$$x_1 = x_0 + z * T \quad (4-8)$$

d.新解有效性检查, 若新解无效, 则在解空间内随机产生新解。

求解储油罐的最优变位角, 即是求解使目标函数 $f(x)$ 函数值最小的 α 角和 β 角。解空间为倾斜角的度数, 根据实际使用过程中的情况, 若倾斜太大, 应当通知管理员做及时的处理, 横向倾斜角 α 与纵向倾斜角 β 在式子 (4-9) 的范围内做搜寻, 若超出, 则可通过后台处理提醒。

$$x = \begin{cases} 0^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ \\ 0^\circ \leq \beta \leq 15^\circ \end{cases} \quad (4-9)$$

4.3 实验结果及分析

本节通过公开数据集、MATLAB、非线性最小二乘法和模拟退火算法求解模型最优变位角。对发生变位后的出油量数学模型做矫正。

(1) 实验环境

通过 MATLAB 编程实现模拟退火算法求解卧式圆柱型储油罐的最优变位角, 并通过数据验证矫正后模型的正确性。MATLAB 是由美国 MathWorks 公司开发的与 Mathematica、Maple 并称三大数学软件之一的数学软件, 集成了算法开发、图像处理、控制系统、数据分析及数据计算等强大功能为一体的大型软件, 为众多科学领域提供了便利。

(2) 数据来源

采用 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题附件 2 中的储油罐发生变位后的实测数据^[47]，检验本文基于模拟退火算法所构建的储油罐变位出油量分段数学模型的正确性。

(3) 实验结果及分析

通过随机产生一组初始解，计算目标函数 (4-2) 的函数值并求出方差作为初始温度，即初始温度产生的方法一产生本次实验的初始温度。退火速率 λ 取值为 0.95，外层循环结束条件为循环迭代 500 次，内层循环抽样稳定准则为循环迭代 50 次。随机选择文献[47]附件 2 中的 400 组实测出油量及油位高度变化的数据对模型做变位识别。退火适应度进化曲线如图 4-3 所示。

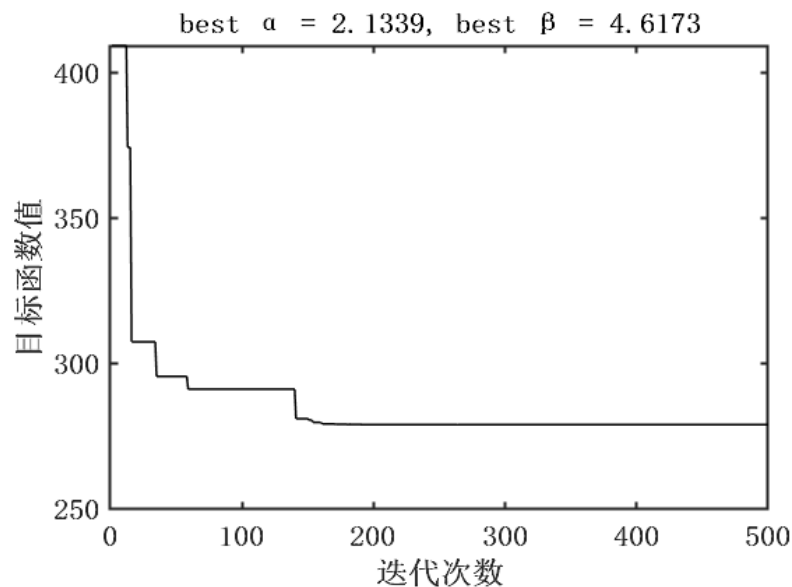


图 4-3 退火进化曲线图

由图 4-3 可知，模拟退火算法输出的模型最优解，即储油罐的最优变位角为 $\alpha = 2.1339$ ， $\beta = 4.6173$ 。与文献[18]采用步长为 0.01° 的搜索算法及文献[48]中遗传算法和最小二乘法标定模型的结果进行比较分析，如表 4-1 所示。

表 4-1 油罐变位后不同变位模型实验结果比较

模型	$\alpha / (^\circ)$	$\beta / (^\circ)$
搜索算法	4.4	4.9
最小二乘法	2.64	3.82
遗传算法	2.14	3.65
模拟退火算法	2.13	4.61

本文基于模拟退火算法的储油罐变位识别模型所得到的最优 α 与 β 值, 相较于 0.01° 搜索步长的搜索算法和最小二乘法, 与 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题评审要点的值更接近, 与遗传算法相近, 说明了该标定模型是有效可行的及所求解最优解的有效性。

将图 4-3 所示的模拟退火算法求解出的最优变位角带入倾斜储油罐出油量分段数学模型做矫正, 并从文献[47]附件 2 中的剩余实测数据中随机选择 100 组数据带入矫正后的储油罐出油量分段数学模型中, 计算出油位高度从 h_1 下降到 h_0 时的理论出油量。储油罐出油量分段数学模型经变位识别后模型的理论出油量与加油机显示的实际出油量对比结果如图 4-4 所示。

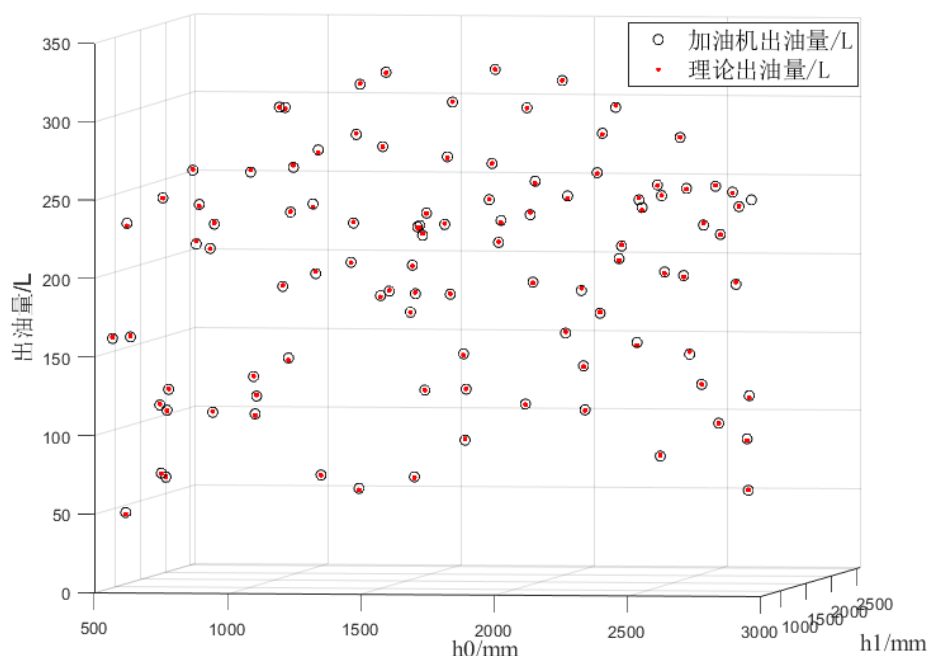


图 4-4 变位识别模型理论出油量和加油机实际出油量对比图

从图 4-4 可以看出, 本文所建立的储油罐油位高度变化、倾斜角与出油量间的关系模型经变位识别后, 模型的理论出油量与实测数据中加油机的实际出油量基本重合。计算本文模型经变位识别后的模型出油量与实测加油机出油量相对误差如表 4-2 所示:

表 4-2 基于 SA 算法的理论出油量与实测加油机出油量部分结果

油位高度 h_0/mm	油位高度 h_1/mm	加油机出油量/L	模型出油量/L	相对误差
2063.17	2067.14	103.92	104.36	0.0042
2058.14	2063.17	131.94	132.40	0.0035
2051.30	2058.14	181.74	180.35	-0.0077

表 4-2 (续)

油位高度 h_0/mm	油位高度 h_1/mm	加油机出油量/L	模型出油量/L	相对误差
1889.27	1897.67	231.42	229.93	-0.0065
1878.40	1889.27	297.79	298.04	0.0009
1683.87	1687.01	88.98	88.10	-0.0098
1540.79	1548.82	224.72	226.01	0.0057
1532.79	1540.79	224.46	225.13	0.0030
1526.30	1532.79	183.46	182.61	-0.0046
1523.95	1526.30	65.53	66.11	0.0089
1516.81	1523.95	200.46	200.85	0.0019
1510.73	1516.81	170.84	170.99	0.0009
1443.93	1450.53	185.56	184.99	-0.0031
1432.35	1443.93	323.97	324.35	0.0012
1422.45	1432.35	277.01	277.07	0.0002
1415.93	1422.45	181.51	182.35	0.0046

由表 4-2 可知, 模型出油量与加油机实测出油量的相对误差达到 0.01 内, 说明本文所建立的储油罐油位高度变化、倾斜角与出油量间的分段数学模型的可以很好的反应油罐出油的准确性, 对工地上存在的偷油和漏油的监测可以提供有效的监数据。

4.4 本章小结

本章对第二章建立的发生变位后的储油罐油位高度变化量、变位角和出油量之间的分段数学模型, 采用非线性最小二乘法构建了求解该模型最优变位角的目标函数, 并利用模拟退火算法和 MATLAB 寻找模型中的最优倾斜角。从 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题附件 2 中随机选择 400 组数据求解出最优变位角, 实验结果与 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题评审要点的值非常接近, 证明该模型参数辨识方法的有效性和正确性。并用剩下的 100 数据对矫正后的数学模型做检验, 通过与实测数据中加油机出油量的对比, 证明了本文建立的数学模型可以更好的反应油位变化和出油量的关系, 对于工地上防止偷油、漏油以及监测油量变化是否正常的情况可以提供有效的数据支撑。

第五章 储油罐撞击变形分析

为了进一步提高储油罐计量的准确度，本章通过 ABAQUS 软件对储油罐进行有限元分析，并通过实际情况分析，选择用球形石块以不同的速度撞击储油罐。在 ABAQUS 的后处理模型中获取撞击变形后的位移云图及变形曲面数据，修正撞击变形对第三章中所建立的储油罐油位高度变化与出油量间的数学模型的影响。

5.1 撞击物选择

工地常见撞击物有多种，本文选择典型的石块作为撞击物体，获取撞击后的变形程度以及仿真数据，分析撞击对储油罐数学模型的影响。石块形状随机性十分显著，Fityus 等对澳大利亚 NewSouthWales 山区落石形状的特征进行了非常详细的统计与分析，将落石形状分为了五大类，即球形、圆盘形、圆柱形、圆锥形和多棱角形^[49]，而这五大类又可以划分为 21 个小类。石块形状对撞击影响的考虑是十分必要的，撞击部位形状的不同，会使撞击产生不同的效果。有学者根据落石冲击的试验总结发现，当前落石的典型形状包括球形、锥形以及平头三种形状。有学者通过分析落石冲击的试验总结发现，落石冲击垫层的主要影响因素有落石的质量、落石的形状以及冲击的速度^[50]。

本文主要通过研究典型球形石块，包括球形石块以不同速度撞击油罐时产生的撞击形状以及撞击后的曲面做分析，分析在实时监测中，如何通过油位高度与出油量的改变，修正本文第三章所建立的储油罐数学模型。

5.2 ABAQUS 软件介绍

本文使用 ABAQUS 软件对储油罐进行有限元建模，并对油罐做撞击仿真。ABAQUS 软件是由美国 ABAQUS 公司开发的世界有名的有限元分析软件，可以通过建模和求解，对问题进行有限元分析，是一个功能非常强大的有限元软件，不仅可以进行简单的线弹性问题分析计算，还可以对接触条件变化的非线性组合等许多问题进行分析计算，但 ABAQUS 软件主要是进行非线性有限元模拟分析计算。

ABAQUS 有三个主求解器模块, ABAQUS/standard 模块、ABAQUS/Explicit 模块和 ABAQUS/CFD 模块及 ABAQUS/CAE 模块(人机交互的前后处理模块)。其中 ABAQUS/standard 模块是一个通用的分析模块, 能求解广泛的线性及非线性问题, 包括结构的静态、动态和热等, 采用自动控制技术对同时发生作业的几何、材料和接触非线性进行处理。ABAQUS/Explicit 模块利用对事物的显示积分求解动态有限元方程。ABAQUS/CAE 模块为 ABAQUS 求解器提供快速的交互式的前后处理环境, 将建模、分析、作业管理及结果评估为一体, 该模块主要包含 Part、Property、Assembly、Step、Interaction、Load、Mesh、Job 和 Visualization 小模块。Part (部件) 用来建立生成单个部件; Property (特性) 对部件材料进行定义, 并将材料赋予部件; Assembly (装配) 将 Part 所建的部件装配成整体; Step (分析步) 为描述模拟历程提供方便的途径来体现模型中的变化; Interaction (相互作用) 定义模型的连接与接触特性; Load (载荷) 对模型施加载荷和转矩; Mesh (网格) 对部件划分有限元网格; Job (作业) 实现分析计算, 可以交互式的提交作业和监控分析过程; Visualization (可视化) 提供有限元模型和分析结果的图形。

ABAQUS 软件仿真分析过程可分为以下三个阶段:

(1) 建模阶段(前处理)。根据实际形状及实际条件对被仿真对象建立有限元分析模型, 为有限元数值计算提供必要输入数据。

(2) 计算阶段(分析过程)。该阶段主要是完成有限元方法相关的计算, 由于运算量巨大, 该过程的工作有有限元分析软件控制并自动完成。

(3) 后处理阶段。该阶段主要是对计算输出结果进行必要的处理, 并按照一定方式显示或打印出来, 以便于后续的分析及改进, 这是进行有限元分析的目的所在。

5.3 储油罐有限元划分

有限元法是一种有效的解决数学问题的方法, 在科学研究与工程中都有广泛的应用。其基本的求解思想是把结构的求解域划分为有限个不重叠的子域, 并把子域与边界节点连接为新组合体。在满足收敛条件的情况下, 对子域做近似解的求解, 子域的划分越细, 组合体的近似解就越符合实际的情况。在 ABAQUS 中, 根据储油罐的实际形状, 对油罐进行建模, 并划分网格, 为撞击产生形变对油罐

模型的影响分析做准备。

(1) 选择模型单元类型：ABAQUS 软件中有刚性体单元、实体单元、壳单元、膜单元等不同类型的单元，根据储油罐被物体撞击的实际情况，在建立模型的过程中储油罐选择壳单元。

(2) 创建部件：在球形石块撞击壳体储油罐的过程中，壳体储油罐的变形远大于球形石块，因此球形石块创建为刚体。ABAQUS 中刚体部件有解析刚体和离散刚体，解析刚体主要是用直线圆弧等简单的几何曲线构成，易于建模，而离散刚体主要是用形状复杂的几何体构建。离散刚体需要划分网格，而解析刚体则不需要。因此储油罐设置为三维可变形壳体，壳体厚度为 8mm，撞击石块设置为三维离散刚体实体。

(3) 材料属性：金属储油罐是采用钢板材料焊接而成的容器，普通金属油罐采用的是 Q235-AF 平板沸腾钢，寒冷地区采用的是 Q235-A 平炉镇静钢。仿真采用 Q235-AF 的钢材料，Q235-AF 的材料属性如表 5-1 所示。

表 5-1 Q235-AF 钢材料属性表

材料名	弹性模量 (N/m ²)	质量密度 (kg/m ³)	泊松比	屈服强度 (N/m ²)
Q235-AF	2.08E+11	7.86E+03	0.277	235

(4) 部件装配：通过装配部件步骤将创建的部件组合成为一个整体，并通过平移、选择以及线性矩阵等方法将部件排列为所需整体。在油罐模型建立中，将油罐部件和撞击石块装配成一个整体，并将球形石块移动至油罐中部，分析球形石块撞击储油罐中部时的影响。

(5) 相互作用：在建立的有限元石块模型上表面中心位置处建立一个参考点，同时对参考点设置质量，并定义石块与油罐接触为表面接触。

(6) 分析步：在分析步中创建输出数据为空间位移数据。

(7) 载荷：常见的载荷有多种，比如动量和力等，本文对球形石块定义的载荷是速度。通过给球形石块定义的参考点施加一个朝向撞击储油罐的速度，并设置球形石块各向转动惯量为 0。储油罐模型载荷及边界条件设置如图 5-1 所示：

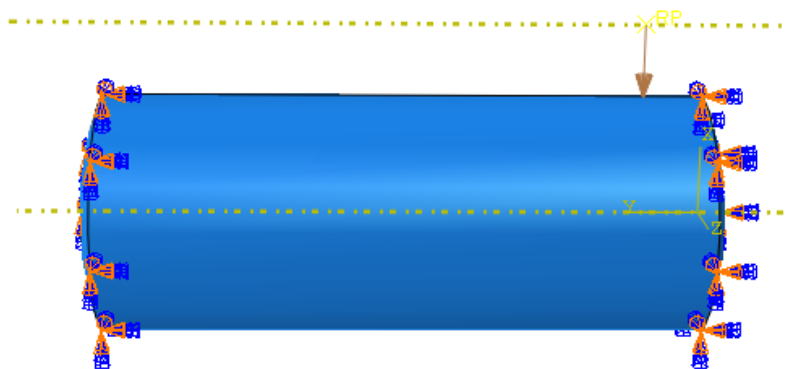


图 5-1 储油罐模型载荷边界条件设置图

(8) 有限元模型：在储油罐被撞击的模拟过程中，油罐存在较大弯曲，并且存在接触，所以网格单元类型选择一阶非协调单元，即 C3D8I。全局近似布局尺寸设置为 1，即按照油罐尺寸布种子划分网格。全局近似布局种子越小，网格划分越细，网格数量越多，计算量越大。油罐网格划分如图 5-2 所示：

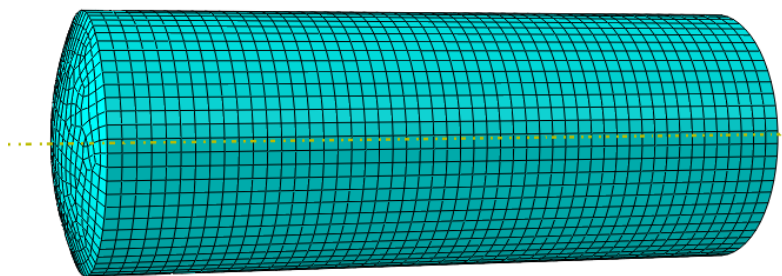


图 5-2 储油罐有限元模型

球形石块的网格划分如图 5-3 所示：

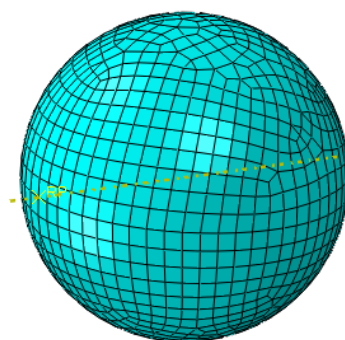


图 5-3 球形石块有限元模型

5.4 储油罐撞击仿真分析

本节分析球形石块以 50m/s 的速度撞击储油罐模型仿真，通过分析撞击部位

的变形、位移，分析变形模型，为后面对储油罐数学模型的影响分析做准备。

5.4.1 变形云图分析

用球形石块撞击储油罐中部的位置，在 0.1s 时的变形和位移结果如图 5-4 所示。图 5-4 中的图 a 球形石块的质量为 5kg 且速度为 50m/s，储油罐被撞击位置的最大位移是 48.05cm；图 5-4 中的图 b 球形石块的质量亦为 5kg，速度为 20m/s，被撞击位置的最大位移是 1.008cm。其中坐标系 XOY 面为油罐底面，Z 轴正方向为油罐高方向。

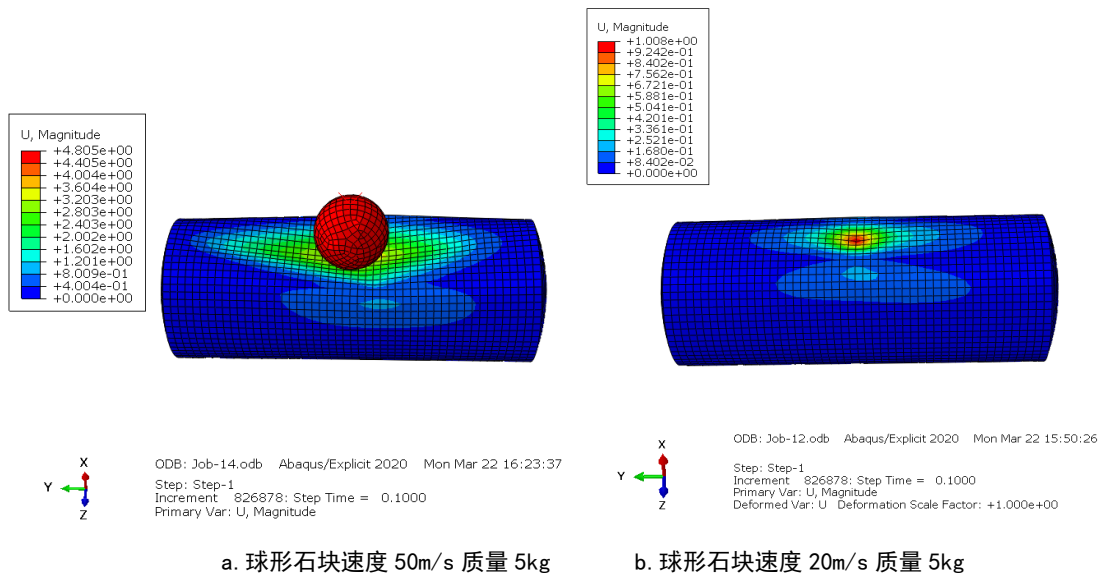


图 5-4 球形石块撞击油罐中部位置位移云图

从图 5-4 可以看出质量 5kg 的球形石块分别以 50m/s 和 20m/s 的速度撞击 Q235-AF 钢材料的储油罐，撞击部位整体凹进去。对于某一高度（确定的 Z 轴值，即是某一油位高度），变形后的曲面整体都是以撞击中部隔开。

5.4.2 位移变化分析

在 ABAQUS 的后处理模块中，分别利用 Path 在质量为 5kg 的球形石块以 50m/s 的速度撞击储油罐的变形部位创建所有横向节点路径和积分点多的纵向节点路径，并在 Visualization 中显示，横向节点路径创建如图 5-5 中图 a 所示，纵向节点路径创建如图 5-5 中图 b 所以。

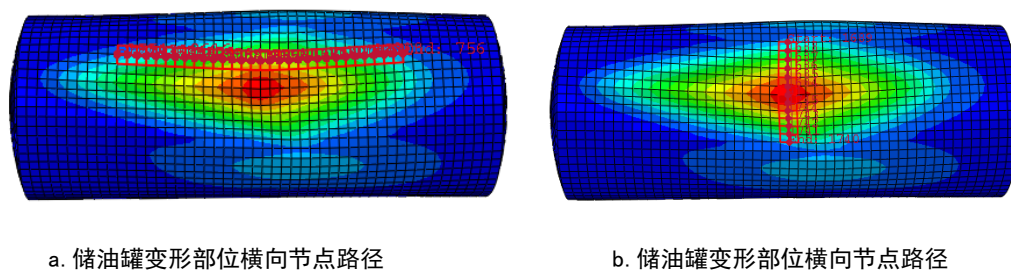


图 5-5 储油罐变形部位节点路径

对所创建的所以横向节点路径,在 XYData 中绘制出变形后位移曲线如图 5-6 所示。从图 5-6 可以看出,关于被撞击部位中线对称的两条横向节点路径位移曲线几乎一致。且曲线的光滑程度与网格的划分有关,网格划分越精细,变形越接近真实效果,数据节点越多且积分节点越密集。

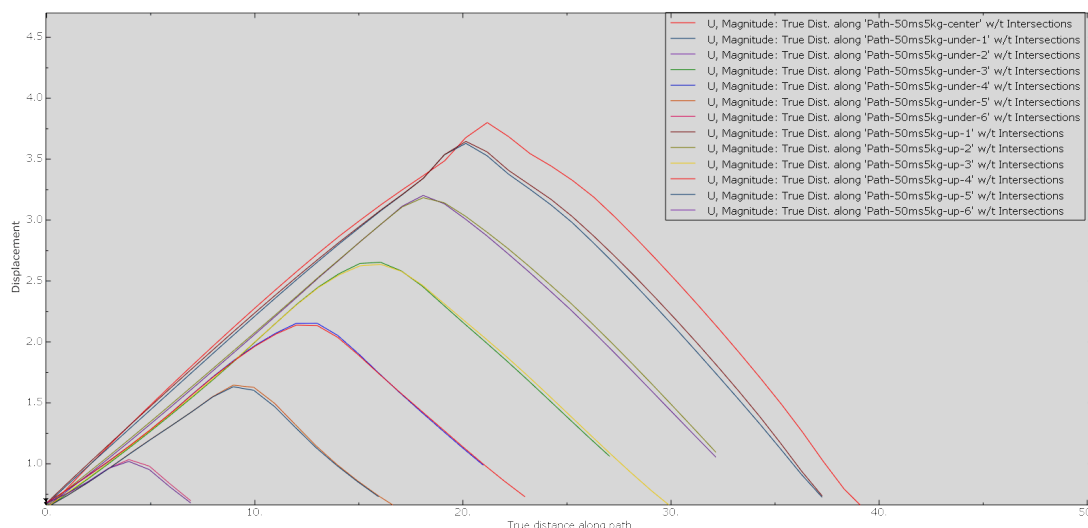


图 5-6 储油罐撞击部位横向节点路径位移曲线图

同样,对所创建的纵向节点路径,在 XYData 中绘制出节点路径的变形位移曲线如图 5-7 所示。从图 5-7 可以看出,被撞击变形部位距离中线越远,最大位移越小,且纵向节点路径位移曲线相似。

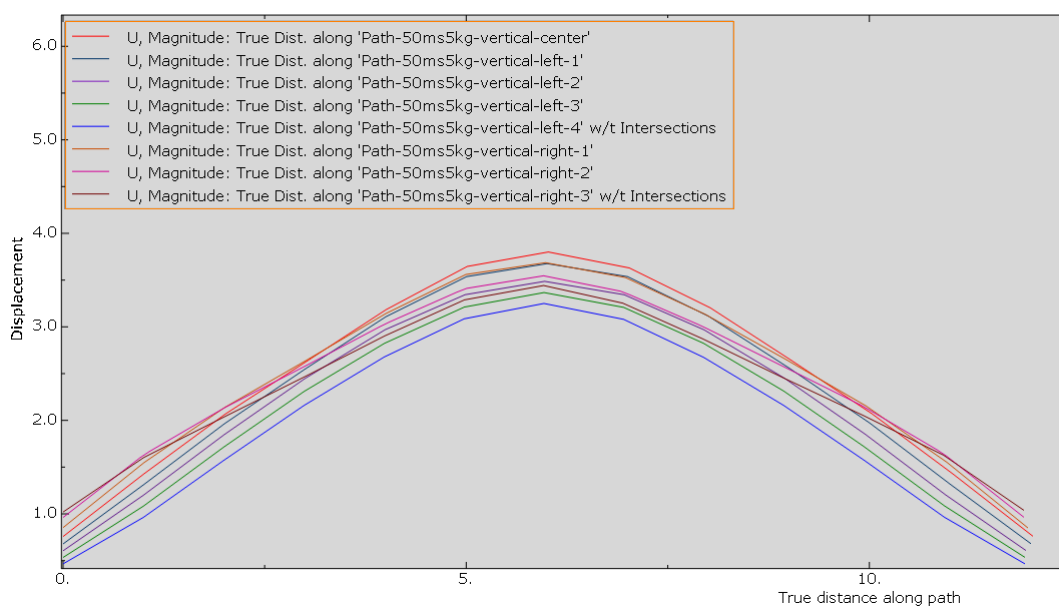


图 5-7 储油罐撞击部位纵向节点路径位移曲线图

5.5 撞击变形对油罐数学模型影响分析

(1) 变形节点路径分析

根据第二章中出油量数学模型可知,油位高度从 h_1 下降到 h_0 时,出油量为从 h_1 到 h_0 的体积积分,由此可见撞击变形对第二章中所建立的出油量数学模型的影响即为变形对该 h_1 到 h_0 积分区域内的影响。若选择沿撞击轴即 X 轴的体积影响,则主要考虑变形前某一点与变形后往 X 方向被撞击进去的量。在 ABAQUS 后处理模块中,获取纵向中线节点路径变形后的坐标,如表 5-2 所示:

表 5-2 储油罐撞击形变纵向中线路径坐标

Node ID	Original Coords			Deformed Coords		
坐标	X	Y	Z	X	Y	Z
1689	8.26239	25	-5.6332	7.53678	25.0017	-5.85139
1688	8.78222	25	-4.78254	7.35605	25.0176	-4.86402
1687	9.21476	25	-3.88435	7.15054	25.0339	-3.88264
1686	9.55573	25	-2.94755	6.93249	25.047	-2.90571
1685	9.80172	25	-1.98146	6.61847	25.062	-1.95813
1684	9.95031	25	-0.996	6.30502	25.0677	-1.00186
91	10	25	0	6.2002	25.0668	-0.00108

表 5-2 (续)

Node ID	Original Coords			Deformed Coords		
坐标	X	Y	Z	X	Y	Z
1745	9.95031	25	0.996	6.32115	25.0674	0.996
1744	9.80172	25	1.98146	6.59972	25.0644	1.96222
1743	9.55573	25	2.94755	6.91243	25.0486	2.91167
1742	9.21476	25	3.88435	7.14269	25.034	3.88584
1741	8.78222	25	4.78254	7.35507	25.0168	4.86593
1740	8.26239	25	5.6332	7.53933	25.0006	5.85257

从表 5-2 可以看出,球形石块沿 X 负方向撞击储油罐,主要造成 X 方向与 Z 方向上的变化,Y 方向上的变化非常小。将所建立的纵向路径沿中线分为两部分,其中距离坐标原点近的为下半,距离坐标原点远的为上半。利用一元二次函数拟合出变形后的 Y 与 Z 的关系,并使用 R^2 作为拟合效果判断标准。 R^2 是衡量方程整体的拟合程度, R^2 的取值范围为 0 到 1,该值越接近 1,说明拟合程度越好;反之, R^2 值越小,说明相关度越低,拟合的就程度越差^[51]。拟合曲线如图 5-8 所示:

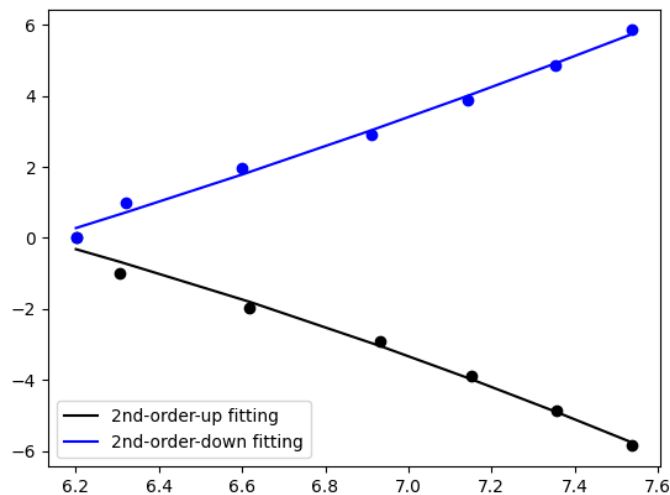


图 5-8 纵向节点路径拟合图

表 5-3 撞击变形后储油罐纵向节点路径拟合结果

节点路径	拟合曲线表达式	R^2
上半	$z = -0.5682x^2 + 3.739x - 1.66$	0.9897
下半	$z = 0.3332x^2 - 0.4974x - 9.448$	0.9914

R^2 为度量拟合优度统计量的可决系数（亦称为确定系数）， R^2 越接近 1，表明拟合程度越好，由表 5-3 可知，用一元二次函数将撞击变形部位分为两部分拟合，拟合的结果明显很好。根据拟合的曲线图和拟合曲线表达式可知，用一元二次函数分段拟合变形的纵向节点路径比用一元二次函数直接拟合整条纵向节点路径好。

（2）撞击变形曲面分析

将储油罐被球形石块撞击变形后的曲面以撞击中部分为四个曲面，将曲面看做是离散化空间曲面，并通过拟合获得该曲面的数学方程式。曲面拟合主要分为规则的曲面拟合及不规则的曲面拟合，实际应用过程中，大部分都是由各个规则的曲面拼接而成，比如本文中被撞击后的变形曲面，整体上为四个规则曲面（仿真中，曲面的光滑度与网格的划分相关）。常见的曲面拟合有拉格朗日插值法^[52]、最小二乘法^[53]、移动最小二乘法（Moving Least-Squares, MLS）^[54]、样条插值法^{[55][56]}等。在常见的拟合算法中，无论是线性或者非线性的拟合，最小二乘法（Least Squares，又称最小平方方法）都是算法基础，该算法是通过最小化平方和去匹配数据点的最优函数，并可以求得与实际数据的误差平方和最小的未知数据。该算法是在 1975 年由高斯提出，它的基本原理是实际观察值和理论值（模型计算值）的误差平方和最小^[57]。

本小节利用最小二乘法根据变形后节点坐标，采用高阶曲面对本文的变形曲面进行拟合，估计撞击变形曲面的参数，从而获得变形后的曲面数学模型。将撞击形变后的曲面看作三维空间曲面，通过 ABAQUS 的后处理获得 N 个变形后的坐标值，采用二阶曲面拟合，并输出曲面方程。二阶曲面的参数表达式为：

$$g(x, y) = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 \quad (5-1)$$

最小二乘法就是，对于给定 N 个数据点，选择参数 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 ，使得全体观测的残差平方和达到最小，用数学公式表示二阶曲面与撞击变形曲面 $f(x, y)$ 的残差平方和为：

$$E = \min \sum e_i^2 = \sum [g(x, y) - f(x, y)]^2 \quad (5-2)$$

使公式 (5-2) 的值达到最小时，所对应的数学模型是最接近被拟合曲面的模型，根据微积分求极限原则可知，表达式应满足：

$$\frac{\partial E}{\partial a_1} = \frac{\partial E}{\partial a_2} = \frac{\partial E}{\partial a_3} = \frac{\partial E}{\partial a_4} = \frac{\partial E}{\partial a_5} = \frac{\partial E}{\partial a_6} = 0 \quad (5-3)$$

即应满足:

$$\begin{cases} \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] x^2 = 0, \\ \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] y^2 = 0, \\ \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] xy = 0, \\ \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] x = 0, \\ \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] y = 0, \\ \sum [a_1 x^2 + a_2 y^2 + a_3 xy + a_4 x + a_5 y + a_6 - f(x, y)] = 0. \end{cases} \quad (5-4)$$

式 (5-4) 写成矩阵形式为:

$$BA = F \quad (5-5)$$

式 (5-5) 中:

$$A = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \sum f(x, y) x^2 \\ \sum f(x, y) y^2 \\ \sum f(x, y) xy \\ \sum f(x, y) x \\ \sum f(x, y) y \\ \sum f(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{zx^2} \\ \overline{zy^2} \\ \overline{zxy} \\ \overline{zx} \\ \overline{zy} \\ \overline{z} \end{bmatrix} \quad (5-6)$$

$$B = \begin{bmatrix} \overline{x^4} & \overline{x^2 y^2} & \overline{x^3 y} & \overline{x^3} & \overline{x^2 y} & \overline{x^2} \\ \overline{x^2 y^2} & \overline{y^4} & \overline{xy^3} & \overline{xy^2} & \overline{y^3} & \overline{y^2} \\ \overline{x^3 y} & \overline{xy^3} & \overline{x^2 y^2} & \overline{x^2 y} & \overline{xy^2} & \overline{xy} \\ \overline{x^3} & \overline{xy^2} & \overline{x^2 y} & \overline{x^2} & \overline{xy} & \overline{x} \\ \overline{x^2 y} & \overline{y^3} & \overline{xy^2} & \overline{xy} & \overline{y^2} & \overline{y} \\ \overline{x^2} & \overline{y^2} & \overline{xy} & \overline{x} & \overline{y} & \overline{\frac{1}{N}} \end{bmatrix} \quad (5-7)$$

其中,

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i, \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i, \overline{xy} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i, \\ \overline{xz} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i z_i, \overline{yz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i z_i, \overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2, \overline{y^2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2, \\ \overline{x^3} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^3, \overline{y^3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^3, \overline{x^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^4, \overline{y^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^4, \\ \overline{xy^2} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i^2, \overline{xy^3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i^3, \overline{x^2 y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i, \\ \overline{x^2 y^2} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2, \overline{x^3 y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^3 y_i, \overline{x^2 z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 z_i, \\ \overline{zy^2} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 z_i, \overline{xz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i z_i, \overline{yz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i z_i, \overline{xyz} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i y_i z_i\end{aligned}$$

由公式 (5-4) 和 (5-5) 可知系数矩阵为:

$$A = B^{-1}F \quad (5-8)$$

在 ABAQUS 的后处理模块中在变形后的模型中建立四分之一变形曲面的数据点集, 并提取出变形后的坐标数据, 部分数据如表 5-4 所示:

表 5-4 四分之一变形曲面坐标值

Node ID	Orig. Coords			Def. Coords		
坐标	X	Y	Z	X	Y	Z
91	10	25	0	6.2002	25.0668	-1.08E-03
92	10	26	0	6.32515	26.0962	-5.95E-04
93	10	27	0	6.51458	27.0888	3.78E-04
94	10	28	0	6.63478	28.0971	4.00E-04
95	10	29	0	6.75153	29.1004	5.03E-04
96	10	30	0	6.87243	30.1023	4.19E-04
97	10	31	0	7.00044	31.1025	2.69E-04
98	10	32	0	7.13141	32.1017	1.22E-04
99	10	33	0	7.27168	33.099	-1.76E-05
100	10	34	0	7.41653	34.0947	-1.28E-04
101	10	35	0	7.56522	35.0892	-1.52E-04

表 5-4 (续)

Node ID	Orig. Coords			Def. Coords		
坐标	X	Y	Z	X	Y	Z
102	10	36	0	7.71651	36.083	-1.01E-04
103	10	37	0	7.87073	37.0762	2.06E-05
104	10	38	0	8.02757	38.0686	1.90E-04
105	10	39	0	8.18685	39.0606	3.32E-04
106	10	40	0	8.34838	40.052	4.50E-04
107	10	41	0	8.51217	41.0429	5.14E-04
108	10	42	0	8.67841	42.0334	5.89E-04
109	10	43	0	8.84702	43.0235	7.34E-04
110	10	44	0	9.01811	44.0132	9.10E-04
111	10	45	0	9.19691	45.0021	8.86E-04
112	10	46	0	9.37529	45.9922	8.49E-04
1740	8.26239	25	5.6332	7.53933	25.0006	5.85257
1741	8.78222	25	4.78254	7.35507	25.0168	4.86593
1742	9.21476	25	3.88435	7.14269	25.034	3.88584

利用二阶曲面和最小二乘法拟合表 5-4 所对应的四分之一曲面，拟合结果如图 5-9 所示：

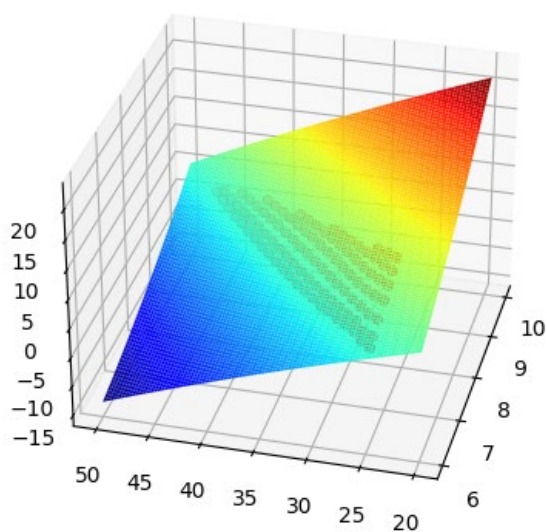
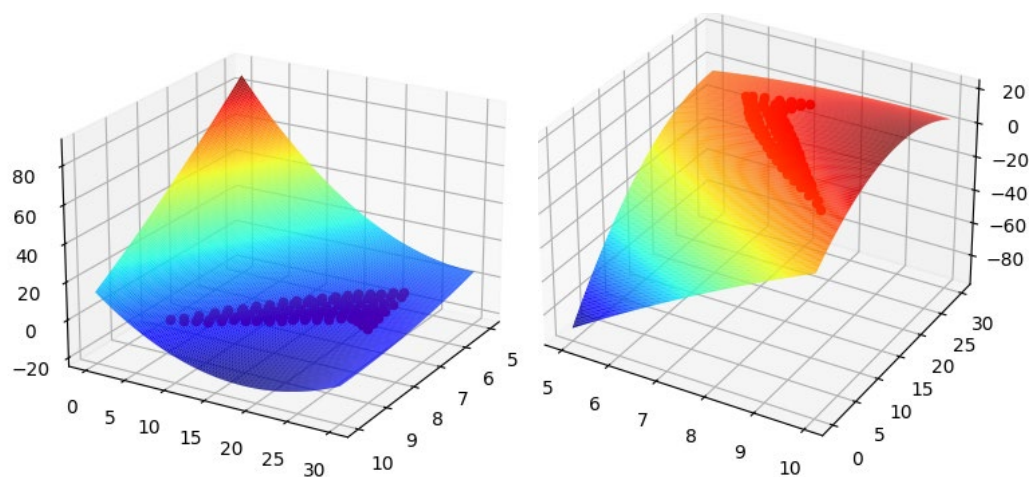


图 5-9 变形曲面拟合图

输出变形曲面方程为：

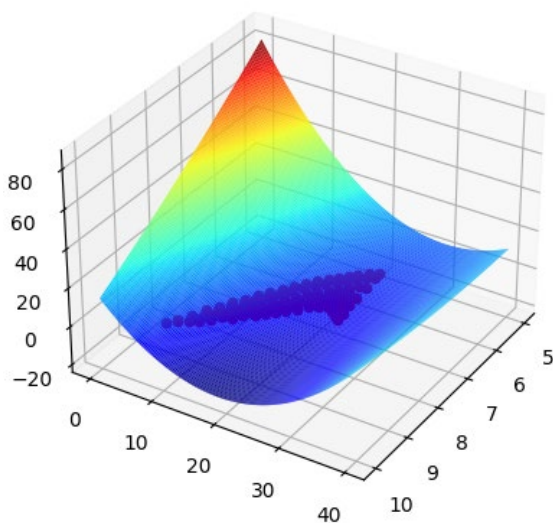
$$z = 0.278x^2 - 0.043xy - 0.002y^2 + 1.351x - 0.091y - 0.022 \quad (5-9)$$

另外三个曲面拟合结果如图 5-10 所示：



变形曲面 a

变形曲面 b



变形曲面 c

图 5-10 变形曲面拟合结果图

输出变形曲面公式如表 5-5 所示：

变形曲面	曲面拟合表达式
变形曲面 a	$z = 0.435x^2 + 0.421xy + 0.090y^2 - 21.05x - 7.530y + 180.2$
变形曲面 b	$z = -0.469x^2 - 0.456xy - 0.092y^2 + 22.39x + 7.944y - 190.4$
变形曲面 c	$z = 0.388x^2 + 0.393xy + 0.085y^2 - 19.68x - 7.129y + 170.7$

(3) 撞击变形对储油罐出油量数学模型影响分析

根据卧式圆柱型储油罐柱体部分的公式 (2-3) 和公式 (5-9) 求解出储油罐关于 x 的表达式为:

$$x = \sqrt{z^2 - R^2} \quad (5-10)$$

油位高度从 h_1 下降到 h_0 时, 图 5-8 对应撞击变形部位对储油罐出油量影响为:

$$error = \int_{h_0}^{h_1} dz \int_{l/2}^{g(z)} [\sqrt{z^2 - R^2} - f(x, z)] dy \quad (5-11)$$

其中 $f(x, z)$ 是关于公式 (5-9) 的关系式, $g(z)$ 是关于公式 (5-9) 和 (5-10) 的关系式。

5.6 本章小结

本章通过 ABAQUS 软件, 采用 5kg 的球形石块以 50m/s 和 20m/s 的速度撞击卧式圆柱型储油罐, 得到撞击变形的位移云图。并通过分析变形部位的形状, 建立了被 5kg 的球形石块以 50m/s 的速度撞击变形后变形部位的横向及纵向节点路径, 获得节点路径的位移曲线。根据储油罐被撞击发生变形后的变形曲面, 用一元二次方程对纵向节点路径拟合, 并通过对拟合结果的分析, 将形变曲面分为了四个规则曲面, 通过拟合曲面, 分析了储油罐被球形石块撞击发生变形后对本文的储油罐出油量数学建模的影响。

第六章 总结与展望

6.1 工作总结

我国储油罐数量众多且存放地理位置较为分散,尤其是近几年来,为了满足社会经济发展的需要,我国公路、桥梁、高速路等施工建设行业得到大力发展。这些修建工地地理位置通常都比较分散且偏僻,工地大型工程车不方便到加油站加油,会造成过多成本且耗时,所以工地安装储油罐是非常必要的。而工地安装储油罐会带来一系列的管理问题,如偷油、漏油、空单进出和油料补添不及时等。在互联网发展迅速的今天,对工地上的储油罐建立实时监测可使这类问题得到一定程度上的解决,并且可以防止人为的数据造假。工地现场储油罐的监测过程中,液位计的测量精度和储油罐遭受撞击及地基变形导致油罐发生横向变位或纵向变位的情况都会导致监测的准确性降低。

针对储油罐监测过程中造成监测准确性降低的问题,本文对监测过程中出现误差的原因进行了分析研究。本文的主要工作内容概括如下:

(1) 分析了常见液位计的优势及劣势,综合常见液位计的成本、维护及工地环境等因素,选择拉线传感器测量储油罐的油位高度。根据拉线传感器的测量方式,设计了使拉线能垂直下落到油面测量油位高度的浮物;分析拉线传感器在安装及长期使用过程中造成误差的原因及防护措施;根据拉线位移原理及排绳技术,设计了螺旋槽卷筒作为拉线传感器的卷线筒,降低拉线的绕线带来的重叠误差,最后在工地现场采集数据并分析了方法的可用性。

(2) 通过分析卧式储油罐的几何形状,采用定积分的方式建立了卧式圆柱型储油罐和椭圆柱型储油罐油位高度与出油量的数学模型,并根据发生横向变位、纵向变位或横纵双向变位情况下储油罐的几何形状,建立了储油罐油位高度变化、变位角与出油量间的分段数学模型,为监测油量变化提供数学模型。

(3) 在上述工作的基础上,分析了模拟退火算法的工作原理,并采用非线性最小二乘法建立了储油罐油位高度变化、出油量与变位角间分段数学模型的退火算法目标函数。最后从 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题实测数据中随机选择 400 组数据求解出模型最优变位角。最后通过与文献方法对比及用剩下的数据对矫正后的数学模型做检验,证明了该模型参数辨识方法的正确性。

(4) 通过分析储油罐使用环境及常见撞击物, 采用 5kg 的球形石块以 50m/s 和 20m/s 的速度撞击储油罐, 并在 ABAQUS 软件中进行仿真。通过 ABAQUS 的后处理, 获得储油罐变形云图、位移曲线及储油罐被撞击变形后变形部位的坐标。通过变形节点路径分析, 将变形曲面分为四个曲面并采用二阶曲面通过非线性最小二乘法拟合曲面, 获得曲面方程, 并建立了储油罐撞击变形对油位高度变化、出油量的数学影响模型。

6.2 展望

本文涉及的内容较多, 但由于时间和实验室资源及项目要求等因素, 还有很多需要改进和进一步完善的, 具体工作展望如下:

(1) 造成拉线式位移传感器测量误差的因素众多, 本文只对传感器的拉线带来的绕线误差(轴向误差和重叠)及安装和使用过程中的误差做了分析和补偿, 实际上, 拉线传感器内部角位移传感器以及数据在输出过程中均会造成误差, 如果对这些因素做进一步分析, 油位高度的测量精度会得到一定的提升。

(2) 温度会影响油的密度, 从而影响油的体积, 虽然温度骤降几乎不存在且造成油位高度变化不会特别大, 但会造成油位高度发生变化而没有油进出的情况, 还可以进一步做研究分析。

(3) 在求解最优变位角时, 初始值的设置采用的是通过随机产生一组初始解, 计算目标函数的函数值并求出方差作为初始温度。还可以进一步研究地基发生的沉降, 设置更贴近真实值的初始值。

(4) 储油罐撞击变形仿真分析中, 只分析了球形石块撞击油罐中部的情况, 且只是一次撞击, 工地实际环境中, 油罐可能在同一个位置被连续撞击, 如图 1-1 所示的情况。可以进一步研究工地的其他常见撞击物的形状, 如楔形、平头形等撞击油罐相邻位置, 分析撞击变形对出油量的影响。

致谢

光阴似箭，逝水流年，求学三载，历历眼前。在贵州大学的三年硕士研究生已步入尾声，回首这三年的走过的路，感触良多。在这三年的学习中，学习上走过很多的弯路，虽然遇到很多困难与险阻，但在不断克服困难的同时也给我自己带来了许多宝贵的经验财富，收获了很多，也成长了很多。三年的进步与成长，离不开我的母校和导师的培养，也离不开同学、父母、朋友的帮助与关心。

师者，所以传道授业解惑也。在这里，衷心感谢我的导师 Y 教授，他以他渊博的知识和严谨的学术风格影响着我，并以他丰富的资源给予我学位课题研究的项目依托。同时在项目开发阶段和论文撰写中处处碰壁的时候 Y 老师都在不断给予我指导和帮助，在我课题遇到困境无法前进的时候，不辞辛苦的为我答疑解惑扩宽思路，在帮我解决困难的同时教会我解决问题的思路。论文从最初的选题到资料收集、再到开题及项目的开展，最后到我撰写论文的整过程中，都离不开我的导师 Y 老师的帮助和指导。老师既是良师，亦是益友，更如同父亲一般，在我整个研究生的学习生活中，我的导师 Y 老师都给予了我最有力的帮助与指导。同时也衷心的感谢 H 教授，H 老师在我的研究生生活中同样给予了我很大的帮助和悉心的指导，在我的助教学习中，H 老师在如何写合格的文档上给予了我很大的指导，并且 H 老师严谨的教学态度以及恪尽职守的职业精神也感染着我，让我学会了很多。对所有给予我指导以及帮助的老师表示由衷的感谢。同样也感谢 X 公司在我科研期间提供的支持与帮助。在未来的日子里，我会倍加努力的工作和学习，不辜负我导师的栽培和教诲。

衷心的感谢我的父母以及家人，感谢他们在我学业、生活上和精神上给予的支持、理解与鼓励，一直做我坚强的后盾，不管遇到什么问题，都让我不惧风雨，勇往直前。感谢我的师兄师姐、师弟师妹们给予我生活上和科研上的关心与帮助，感谢大家共同营造的融洽相处的美好实验室氛围，特别感谢他们在这三年里面的陪伴。祝愿每个人都能前程似锦，也祝愿大家在今后的科研及生活中顺顺利利。

感谢各位老师百忙之中抽出宝贵的时间来评审我的毕业论文，非常感谢各位老师对我的毕业论文提出的评审意见，你们的每一次建议都是我努力的方向！

最后，感谢所有给予我帮助、支持和关心的人！

参考文献

- [1] 常庆喜. 浅谈我国道桥建设的现状及对道桥发展的建议[J]. 科协论坛(下半月), 2007(10): 205.
- [2] 马国庆. 油品计量误差分析[J]. 化工管理, 2019(29): 48-49.
- [3] 胡庆波. 储油罐计量系统误差分析及对策[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(05): 59-60.
- [4] 乔超, 杨皎琼. 一种椭圆型储油罐双向变位罐容表计算方法[J]. 现代计算机(专业版), 2010(12): 9-11.
- [5] 谢俊鹏, 廖大成, 熊杰, 马翠. 储油罐变位识别与罐容表标定的积分应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2012, 26(07): 115-122.
- [6] 于永志, 申婷婷, 周克元. 储油罐变位识别与罐容表标定的数学建模[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2011, 29(05): 775-777.
- [7] 贾跃, 刘远征, 车秉正, 吴子龙. 储油罐的变位识别与罐容表标定的建模求解[J]. 电子世界, 2017(10): 7-9.
- [8] 王丹. 油品计量误差原因分析[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2010(10): 304.
- [9] 王鹏飞, 李著信, 方雪. 几种常见油罐液位计的性能特点及选用[J]. 重庆工业高等专科学校学报, 2004(01): 31-32+45.
- [10] 任开春, 涂亚庆. 大罐液位仪的现状和发展趋势[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(04): 6-9.
- [11] 易思安. 成品油油罐混合法计量精度优化研究[J]. 中国管理信息化, 2017, 20(15): 191-194.
- [12] Hui Xian Han, Xiong Hua Guo. Design and Calculation of a Cable Type of Displacement Sensor[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 2911.
- [13] 王铮, 胡荣, 叶敏. 一种新的拉线式位移传感器校准方法及装置[J]. 计测技术, 2017, 37(S1): 23-27.
- [14] 朱浩, 刘昂, 朱慈祥. 变坡同步顶升监控项目中拉线式位移传感器数据修正方法[J]. 工程技术研究, 2018(04): 119-120.
- [15] 李泽君. 倾斜椭圆截面储油罐罐容研究[J]. 工程与试验, 2011, 51(02): 38-40.
- [16] 高炳军. 各种封头的卧式容器不同液面高度体积计算[J]. 石油化工设备, 1999.07: 24-26.

- [17] 孙宏达, 关进波. 用逼近法计算横截面为椭圆形(圆形)储油罐的储油体积[J]. 管道技术与设备, 2001(03): 29-31.
- [18] 窦霁虹, 梅钰, 陈振勋, 王莉莉. 储油罐的变位识别与罐容表标定模型[J]. 纯粹数学与应用数学, 2011, 27(06): 829-840
- [19] 邱靖, 吴瑞武, 彭莞云, 于学媛. 基于量子粒子群算法优化遗传算法的卧式储油罐变位识别模型研究[J]. 石油化工设备, 2015, 44(05): 36-39.
- [20] 李彬, 周斌, 李国平. 基于神经网络的变位储油罐罐容表标定[J]. 中原工学院学报, 2012, 23(04): 53-56.
- [21] 卢朝东. 加油站储油罐容表自动标定与测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(06): 1486-1488.
- [22] J. Wu, J. P. Li, M. Huang and J. Du. The intelligent simulation of oil tank based on genetic algorithm[C]. International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, 2013, 320-322.
- [23] Q. Zhou and H. Zeng. Online detection of storage capacity in oil tank displacement[C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing, 2013, 1-4.
- [24] 王丛香, 王永国, 王丛光. 全站仪在测量中的应用[J]. 黑龙江水利, 2004(2): 37-37.
- [25] 贾璇. 储罐变形光纤光栅监测技术研究与应用[D]. 中国石油大学(北京), 2019.
- [26] 石磊, 奚旺, 赵亚通, 单克. 基于有限元和三维激光扫描技术的储罐变形检测与评估[J]. 安全、健康和环境, 2020, 20(12): 10-14.
- [27] 张晶宇. 油罐人工检尺计量误差的优化措施探析[J]. 科技与创新, 2017(03): 68-69.
- [28] 任开春, 涂亚庆. 大罐液位仪的现状和发展趋势[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(04): 6-9.
- [29] 吴科学. 浮子式液位计在储罐计量中的应用与维修[J]. 计量技术, 2018(03): 62-63.
- [30] 温丽萍. 储油罐油量液位测量与控制研究[D]. 河南科技大学, 2019.
- [31] 仝卫国, 庞雪纯, 李芝翔, 侯哲, 王鹏. 基于超声波液位计的标准流量计量方法[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(04): 44-49.
- [32] 马伟. 超声波液位计的误差分析与校正[J]. 电子科技, 2011, 24(04): 107-109.
- [33] 孙宇. 雷达液位计的校准分析[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2020(03): 27-28+31.
- [34] 任开春, 涂亚庆. 大罐液位仪的现状和发展趋势[J]. 自动化与仪器仪表, 2002(04): 6-9.
- [35] 伍沛刚, 张鹏, 周献琦. 拉线式位移传感器误差来源的初步分析[J]. 工业计量, 2014, 24(01): 61-62.

- [36] 但斌斌, 周鼎, 王光清, 林又红. 钢丝绳缠绕卷筒的计算原理及其应用[J]. 湖北工学院学报, 2003(02): 75-76+84.
- [37] 孙彩虹, 马利, 任远. 起重机卷筒的双折线多层缠绕[J]. 起重运输机械, 2017(02): 80-81+97.
- [38] 宋今朝. 卷筒的结构设计[J]. 中国新通信, 2015, 17(06): 96.
- [39] 聂柏松, 孙继斌, 张丽. 2010 年全国大学生数学建模竞赛 A 题的研究[EB/OL]. 中国科技论文在线, 2010, 12-1244.
- [40] 程家根. 基于机器学习的网络安全态势感知模型研究与实现[D]. 南京邮电大学, 2020.
- [41] 王凌. 智能优化算法及其应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2001: 17-33.
- [42] 唐煜, 曹小鹏, 张莹. 基于模拟退火和历史存档融合的风驱动优化算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(06): 234-240+258.
- [43] 袁汪凰, 游晓明, 刘升, 朱艳. 求解 TSP 问题的自适应模拟退火蚁群算法[J]. 计算机应用与软件, 2018, 35(02): 261-266.
- [44] 孙丽萍, 李佳琪, 张希萌, 何睿. 基于 PSO-SA 算法的优化排料研究[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(01): 325-329.
- [45] 邹博. 基于融合特征的说话人识别技术研究[D]. 南京邮电大学, 2020.
- [46] 袁霄翔. 基于智能优化算法的物流无人机资源调度研究[D]. 南京邮电大学, 2020.
- [47] 中国工业与应用数学学会. 2010 年全国大学生数学建模竞赛试题[EB/OL]. (2010-09-17). http://www.mcm.edu.cn/html_cn/node/d5ae730f57dea3208cae73f7635aece8.html.
- [48] 孙妮妮, 盛兴平, 黄映雪. 基于遗传 BP 网络的变位储油罐识别模型[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(14): 264-266+270.
- [49] S.G. Fityus, A. Giacomini, O. Buzzi. The significance of geology for the morphology of potentially unstable rocks[J]. Engineering Geology, 2013, 162.
- [50] 闫鹏, 方秦, 张锦华, 张亚栋, 陈力, 范俊余. 不同典型形状落石冲击砂垫层试验与量纲分析[J/OL]. 爆炸与冲击: 1-18[2021-04-17].
- [51] 孟亚茹. 农业云平台下基于环境的蔬菜生长周期预测模型的研究与应用[D]. 贵州大学, 2019.
- [52] 闫光, 石章林. 一种简便有效的曲面拟合方法及其成像技术[J]. 工程图学学报, 1993(01): 76-81.
- [53] 孙培芪. 基于整体最小二乘的三维点云规则曲面拟合算法研究[D]. 合肥工业大学, 2020.

- [54] 曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2004(01): 84-89.
- [55] 毛明志, 胡日章. 散乱数据曲面拟合及软件[J]. 计算物理, 2001(05): 435-438.
- [56] 彭芳瑜, 周云飞, 周济. 基于插值与逼近的复杂曲面拟合[J]. 工程图学学报, 2002(04): 87-96.
- [57] 熊小芳. 基于最小二乘法原理预测西安地裂场地沉降曲线[D]. 长安大学, 2010.

附录

本人在研究生期间参与的科研项目：

参与某公司油料管理系统项目

本人在研究生期间的科研成果：

论文：以第一作者于中文核心期刊《计算机软件与应用》发表《基于模拟退火算法的储油罐变位识别》

图版

图 1-1 被撞击油罐图	5
图 2-1 拉线式位移传感器结构简图	12
图 2-2 储油罐等效模型图	12
图 2-3 浮物实拍图	14
图 2-4 拉线传感器安装实拍图	15
图 2-5 拉线传感器位移原理图	16
图 2-6 钢丝绳重叠排列	17
图 2-7 螺旋槽卷线位移原理图	19
图 3-1 卧式圆柱型储油罐油位变化出油图	22
图 3-2 圆柱型油罐横截面坐标示意图	23
图 3-3 圆柱型储油罐球冠体坐标示意图	23
图 3-4 卧式圆柱型储油罐纵向倾斜 A 角分段示意图	24
图 3-5 左侧球冠体油位对应油平面图	26
图 3-6 储油罐横向倾斜后油平面及拉线式位移传感器测量图	27
图 3-7 卧式椭圆柱型储油罐油位变化出油图	28
图 3-8 椭圆柱型油罐柱体横截面坐标示意图	28
图 3-9 椭圆柱型储油罐纵向倾斜 A 角示意图	29
图 3-10 椭圆柱型储油罐横向倾斜 B 角示意图	30
图 4-1 模拟退火算法寻优过程图	34
图 4-2 模拟退火算法流程图	35
图 4-3 退火进化曲线图	38
图 4-4 变位识别模型理论出油量和加油机实际出油量对比图	39
图 5-1 储油罐模型载荷边界条件设置图	44
图 5-2 储油罐有限元模型	44
图 5-3 球形石块有限元模型	44
图 5-4 球形石块撞击油罐中部位置位移云图	45
图 5-5 储油罐变形部位节点路径	46
图 5-6 储油罐撞击部位横向节点路径位移曲线图	46

图 5-7 储油罐撞击部位纵向节点路径位移曲线图	47
图 5-8 纵向节点路径拟合图	48
图 5-9 变形曲面拟合图	52
图 5-10 变形曲面拟合结果图	53

