

中图分类号: TG174

单位代码: 10425

学 号: S08100993



中國石油大學

硕士学位论文

China University of Petroleum Master Degree Thesis

管输原油腐蚀特性研究及管道剩余寿命预测软件开发

Research The Corrosion Factors of Oil in Pipeline and

Exploitation the Residual Life Prediction Software For Oil

Pipeline

学科专业: 材料科学与工程

研究方向: 材料电化学与能源材料

作者姓名: 任振甲

指导教师: 张 军 教授

二〇一一年四月

Research The Factors of Oil Corrosion and Exploitation the Residual Life Prediction Software For Oil Pipeline

A Thesis Submitted for the Degree of Master

Candidate: Ren ZhenJia

Supervisor: Prof. Zhang Jun

College of Physics Science & Technology
China University of Petroleum (East China)

关于学位论文的独创性声明

本人郑重声明：所提交的论文是本人在指导教师指导下独立进行研究工作所取得的成果，论文中有关资料和数据是实事求是的。尽我所知，除文中已经加以标注和致谢外，本论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人或他人为获得中国石油大学（华东）或其它教育机构的学位或学历证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对研究所做的任何贡献均已在论文中作出了明确的说明。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文作者签名：_____ 日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

本人完全同意中国石油大学（华东）有权使用本学位论文（包括但不限于其印刷版和电子版），使用方式包括但不限于：保留学位论文，按规定向国家有关部门（机构）送交学位论文，以学术交流为目的赠送和交换学位论文，允许学位论文被查阅、借阅和复印，将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文。

保密学位论文在解密后的使用授权同上。

学位论文作者签名：_____ 日期： 年 月 日

指导教师签名：_____ 日期： 年 月 日

摘 要

腐蚀一直以来都是困扰着管道工业发展的一个极其突出的问题。为了输送从偏僻地区开采的原油，世界各国修建了大量的输油管道，这些管道基本上都是埋设于地下的。管道在运行过程中不但会受到外界土壤的腐蚀而且还会受到输送原油中腐蚀介质的腐蚀。管道因腐蚀破坏不仅会造成巨大的经济损失以及能源浪费，还会对环境造成严重污染甚至威胁到人类的生命安全。对输油管道腐蚀因素进行分析并对管道剩余寿命预测是保证管道安全运营的重要手段，然而目前对管道腐蚀因素分析主要集中在管道的外腐蚀因素上，寿命预测也是基于管道外腐蚀缺陷来展开的，而对管道破坏同样较大的内壁腐蚀问题研究较少。

鉴于此，本文首先在实验室条件下模拟了输油管道内壁腐蚀的环境；建立了管道内腐蚀速率预测模型并对内腐蚀的主要影响因素进行了分析；最后同时考虑管道的内腐蚀和外腐蚀问题，建立了管道的剩余寿命预测模型，从管道内外两个方面展开寿命预测。通过研究，本文得到了如下结论：

采用失重实验方法测量了不同原油对金属管道的腐蚀速率，建立了 BP、GA 和 GA-BP 算法的三种人工神经网络模型，通过对比发现，三种网络模型的预测精度从高到低为：GA-BP>GA>BP；借助于神经网络节点删除规则，对影响原油腐蚀性的主要因素进行了筛选，并对筛选出来的主要因素进行了敏感性分析，发现对原油腐蚀性影响从高到低的因素分别为：原油中的 Fe 含量、硫含量、温度、流速、Na 含量、粘度、V 含量、Cu 含量、水含量；最后采用 visual studio C#集成开发环境，开发了一套基于 Win32 平台的管线腐蚀预测专家系统，实现了对管道内腐蚀速率及管道剩余寿命的预测。

关键词：管道腐蚀；人工神经网络；剩余寿命预测；专家系统

Research The Factors of Oil Corrosion and Exploitation the Residual Life Prediction Software For Oil Pipeline

Ren ZhenJia(Materials Science and Engineering)

Directed by Prof. Zhang Jun

Abstract

Corrosion is a very serious problem in pipeline industry. Because all the oil fields were in remote areas almost, in order to transport this oil a lot of pipeline were built in the world, and this pipeline were buried in the underground on the whole. Not only the outside factors of pipeline but also the corrosion medium in oil could corrode pipeline between it operated. On the one hand, pipeline was damaged would cause huge economic losses and waste of energy; on the other hand it also would cause serious pollution to the environment and even threaten human lives. Analysis the main corrosion factors and predicted residual life of pipeline is the important means of to ensure safe for pipeline. As we know the outside and inside of pipeline can be corrode, unfortunately is so far to analysis the corrosion factors and predicted residual life of pipeline are mainly in the outside of pipeline, actually interior of pipeline also has a very serious corrosion, but for this problem has no one to investigate.

In view of this, firstly we researched the corrosion of interior of pipeline by simulated corrosion environment in laboratory conditions; then established a pipeline corrosion rate prediction model and analyzed the main corrosion factors of internal pipeline ; finally taking into account the pipeline internal and external corrosion, a pipeline residual life prediction model was establishment. Through research, we obtained the following results:

Measured crude oil pipeline corrosion rate by weight loss experiments. Three different algorithm artificial neural network models (BP, GA and GA-BP) were established, compared the prediction accuracy by the three models we found that the precision was increased with the following order: GA-BP>GA>BP; we cutted down the factors influenced for crude oil corrosion rate, by means of a screening rule of input nodes in artificial neural network; then sensitivity analysis method was used to research factors influenced for crude oil corrosion rate obtained by screening rule, found the main corrosion factors influence to internal pipeline decreased with the following order: Fe content of crude oil> Sulphur content of crude oil>

temperature> velocity of flow> Na content of crude oil> viscosity of crude oil> V content of crude oil> Cu content of crude oil> water content of crude oil.

At last, we based on the Win32 platform, used visual studio C # integrated development environment exploit a pipeline corrosion prediction expert system, it can predict the residual life of pipeline.

Key words: pipeline corrosion; artificial neural network(ANN); residual life prediction; expert system

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 本文的研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状概述.....	2
1.3 本文的研究意义.....	5
1.4 本文主要研究内容.....	5
第二章 实验与理论方法介绍.....	7
2.1 前言.....	7
2.2 实验研究方法.....	7
2.2.1 原油的理化性质测量.....	7
2.2.2 失重法.....	9
2.3 理论研究方法.....	10
2.3.1 人工神经网络简介.....	10
2.3.2 BP神经网络基本原理.....	12
第三章 原油对管道的腐蚀特性研究.....	15
3.1 原油对管道腐蚀的实验研究.....	15
3.1.1 原油理化性质研究.....	15
3.1.2 失重法测量原油对管道的腐蚀速率.....	16
3.1.3 实验测量结果与讨论.....	18
3.2 人工神经网络预测原油对管道的腐蚀速率.....	22
3.2.1 BP神经网络模型的建立.....	23
3.2.2 GA神经网络模型的建立.....	27
3.2.3 GA-BP神经网络模型的建立.....	28
3.2.4 小结.....	30
3.3 影响原油腐蚀性的主要因素研究.....	32
3.4 本章小结.....	38
第四章 输油管道剩余寿命预测与预测软件开发.....	39

4.1 研究背景及意义.....	39
4.2 常用的管道剩余强度与剩余寿命预测方法.....	40
4.2.1 ASME/ANSI B31G 准则及其优缺点	41
4.2.2 API 579 准则	42
4.2.3 腐蚀管道评估的推荐作法(SY/T10048-2003).....	43
4.3 管道腐蚀剩余寿命预测模型的建立.....	43
4.3.1 腐蚀剩余寿命预测的原则	43
4.3.2 腐蚀剩余寿命预测的基本步骤	43
4.4 寿命预测软件开发.....	46
4.4.1 寿命预测软件研究现状	46
4.4.2 软件开发工具及语言介绍	47
4.4.3 腐蚀预测软件的总体设计	48
4.4.4 腐蚀预测软件功能的实现	49
4.5 结论.....	53
结 论.....	55
参 考 文 献.....	56
攻读硕士学位期间取得的学术成果.....	61
致 谢.....	62

第一章 绪论

1.1 本文的研究背景

管道运输是继铁路、公路、水运和航空之后的第五大运输方式^[1],与其他四种运输方式相比,管道运输具有自身的独特优势^[2]:首先,在建设成本上,管道运输投资比铁路、公路和航空要少^[2-3];其次,在运输成本上,交通运输协会曾统计,如果沿成品油主要流向建设一条长7000公里的输油管道,那么每年就可以节约运输成本达数十亿元^[4];再次,从运输安全角度,对运输具有易燃特性的石油天然气来说,使用汽车、火车等运输方式具有很大的危险性,国外称之为“活动炸弹”^[4-5],相比于其他运输方式,而管道运输更有着安全、密闭等特点,是一种最为理想的运输方式。使用管道运输不仅可以提高运输量,降低运输成本,还具有连续、安全、高效、快捷、投资少等优点^[6]。因此,管道运输越来越受到世界各国的重视,世界上主要的工业国家相继建设了:阿拉斯加原油管道、科洛尼尔成品油管道、阿拉斯加天然气输送系统、阿意输气管道和乌连戈依—中央输气管道等多条长距离、大口径的著名管道^[5,7]。

我国的管道建设事业起步较晚,但是发展非常迅速。据统计从建国初期开始,经过50多年的发展我国油气管道运输业得到了长足进步^[6,8],油气管道总里程已从1958年的0.02万千米增加到2008年的近6万公里^[9]。随着我国经济建设的飞速进步促使我国对能源需求的日益加大,拉动了我国石油和天然气行业快速发展,使我国迎来了油气管道建设的高潮。尤其是自“九五”以来,一方面随着国内的塔里木、吐哈、四川盆地和鄂尔多斯盆地等油气田产量的快速增加^[10],另一方面我国加大了对国外油气的进口,我国的油气管道建设进入了一个快速发展的高峰期^[11]。1995-2008年全国油气管道总里程年均增加约4000公里,2003-2008年油气管道总里程年均增加量更是达到了5000公里以上^[7]。尤其是最近几年,随着西气东输、川气东送、西气东输二线以及西部原油管道等关系着国家能源战略的特大型工程的完成,逐步形成了覆盖全国范围的油气管网系统,管道运输在我国的运输系统中将发挥着越来越重要的作用^[7]。

由于我国油气田多数处于盐碱沼泽地带,属于具有较强腐蚀性的土壤环境^[12],管道将会受到包括土壤腐蚀、细菌腐蚀和杂散电流腐蚀等外界腐蚀因素的腐蚀破坏^[13]。同时管道输送的油气介质往往具有较强的腐蚀性,同样能够对管道的内壁形成较严重的腐蚀^[14]。近年因腐蚀造成管道失效的事故屡见报端,管道穿孔、泄露不仅会造成能源的浪费

还会使正常的生产运营被迫终止,而且更重要的是油气管道泄露出的有害物质会造成环境污染,损害人类和生物的健康,破坏生态的平衡^[15]。尤其我国的很大一部分管道建设于20世纪70年代,这些管道已经接近了设计寿命,管道因腐蚀、材质老化、人为因素破坏或外界不可抗力因素作用,使得管道处于风险多发期^[16]。同时随着人类对环境污染问题越来越重视,如何保证管道的安全运营,尽量减少管道泄露事故的发生将是今后的研究热点。

对管道腐蚀因素进行分析,对管道腐蚀发展趋势进行预测,并回答管道安全运行剩余寿命的问题,将会对保证管道的安全起到积极的意义。

1.2 国内外研究现状概述

腐蚀一直以来都是困扰着石油天然气行业发展的一个极为突出的问题,我国的大多数石油天然气资源处于偏僻、荒凉的地区,而要将它们输送到人口密集、工业发达的地区,需要修建成千上万公里的管道^[17]。为了尽量减少人为等外界因素的破坏,大多数管道是埋于地下的。由于土壤中含有水分、空气、酸、碱、水溶性矿物盐及微生物,这些因素都会使金属管道发生外壁腐蚀^[18]。同时,管道输送的石油天然气等含有腐蚀性的介质,对管道的内壁也会造成较严重的腐蚀^[19]。国外有人统计表明,每年因为腐蚀而失效的金属材料,约相当于全年金属产量的20~40%,全世界范围内每年因腐蚀而损耗的金属达到了1亿吨以上^[20]。金属管道腐蚀会导致管道的破坏从而引发事故,例如有毒气体泄漏、爆炸、火灾等,不仅会造成经济损失以及资源浪费,还会对环境造成严重破坏、威胁生态平衡,有时甚至会伤及生命^[21]。

埋地输油管道因为常年埋设于地下,会同时受到管道外腐蚀与内腐蚀的双重影响。土壤环境对管线的外腐蚀有至关重要的影响,可以说研究长输管线的外腐蚀问题,主要就是研究其与土壤接触的腐蚀问题^[8]。国外很多研究机构都对管道的土壤腐蚀问题进行了研究,例如美国国家标准委员从20世纪20年代起就开始了土壤腐蚀的研究;上个世纪三十年代,前苏联也开始了对地下金属材料的腐蚀研究工作^[22];英国早期也进行过大量的土壤腐蚀性实验并获得了一系列的研究成果^[23]。目前普遍认为的观点是:与管道外腐蚀有关的土壤性质主要包括土壤含水量、土壤孔隙度(透气性)、土壤酸碱度、土壤电阻率和土壤的含盐量等^[24-26]。

然而与输油管道外腐蚀相比,管道因原油造成的内壁腐蚀问题目前还很少有人关注。事实上,管道因内壁腐蚀同样能够引起管道的失效,造成巨大的财产损失和严重的

环境破坏,因此输油管道由于输送原油造成的腐蚀应该引起我们的重视。

引起输油管道内腐蚀的主要原因为输送的原油中有硫类等腐蚀性介质的存在^[27]。最早从上个世纪初开始国外就开展了原油硫腐蚀的研究工作,提出了不同的硫腐蚀的测定方法并给出了一些腐蚀速率与原油硫含量的关联^[28-33]。随着我国大量进口高含硫量的中东原油,硫腐蚀的严重性在国内也逐步显现出来,受到了国内研究者的重视^[34]。研究表明,在不同的输送环境中硫腐蚀的程度是不同的,影响硫腐蚀的因素多种多样^[35],比如:温度、流速以及单质硫含量等的存在都会对原油的硫腐蚀产生影响^[36-38]。此外原油中的各种氯化物、原油盐含量、原油金属含量以及有机酸及 O_2 等气体杂质等,都对原油的腐蚀性产生显著影响^[39-40]。

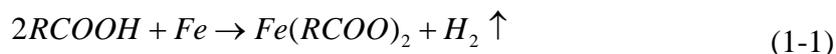
B.W.Neumaier 等人研究表明:在通常情况下,随着温度的升高,原油对金属的腐蚀速度是加快的。同时较高的温度下活性硫对金属的腐蚀性表现得比较敏感。在较低的温度范围内,原油中硫含量的微小变化对金属的腐蚀速率影响并不显著;而在高温范围内,硫含量的微小增对金属的腐蚀速率将会有较大的影响。这主要是因为:当温度升高时,本来活性不大的硫化物会随着温度的升高活性逐渐增大,硫化物活性增大对金属的腐蚀就会更为严重。而 Edward.H.Tandy 实验表明,一开始原油中的硫对金属的腐蚀速度随温度的升高而增大,而当温度达到 540°C 左右时腐蚀速率达到最大值,然后腐蚀速率又随着温度的继续升高而减小。这是因为:原油中含有有机硫化物,在较高的温度条件下有机硫化物能够受热分解,在 540°C 时有机硫化物分解得到的 H_2S 浓度达到最大值,因而腐蚀速度也最大。

液相流态是影响腐蚀的另一个重要因素。动态腐蚀实验可以证实,静态腐蚀试样的腐蚀速率低于动态腐蚀试样,且静态腐蚀较均匀,而动态腐蚀试样存在严重的局部腐蚀。这是因为:试样表面附着力低的腐蚀产物膜容易被流动的介质冲刷掉,它不仅能够破坏金属表面形成的腐蚀产物膜,而且可以加速腐蚀介质向金属表面的扩散,使更多的腐蚀介质与金属发生作用,因此动态腐蚀的腐蚀产物膜较静态腐蚀试样的薄。

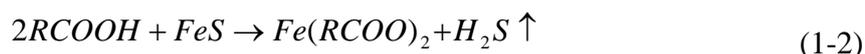
元素硫在原油中的含量很少,主要分布在 $100^\circ\text{C}\sim 275^\circ\text{C}$ 馏分范围内,元素硫能与某些烃类反应,生成新的硫化物和硫化氢等。在 H_2 存在的条件下,元素硫具有更强的侵蚀性。如 230°C 时,硫蒸气对钢体的腐蚀不很明显,但在氢气环境中,却能与 Fe 较快的反应造成严重的腐蚀,此时的腐蚀程度要比相同条件下 H_2S 的腐蚀严重数倍。这是因为金属表面具有催化活性,元素硫和 H_2 经催化作用在金属表面形成高浓度的 H_2S ,因此腐蚀性也更强。

原油中的氯化物可分为两类：一类是有机氯化物，多是在采油过程中混入的，其量极微，腐蚀作用很小，所以人们常予以忽略；第二类氯化物是无机氯化物，溶于原油微量水中，多以氯化钠、氯化钙、氯化镁三种化合物状态存在。各种原油的氯化物组成变化很大，同一原油有时也有不同。但总体来说三种氯化物的含量是：NaCl 最多，CaCl₂ 次之，而 MgCl₂ 为最少。氯化钠(NaCl)不易受热水解(加热到 300℃不水解)，而 CaCl₂ 和 MgCl₂ 含量虽少却都易受热水解，原油中的酸性物质(如环烷酸)和某些重金属化合物，对氯化物的水解有促进作用。CaCl₂ 和 MgCl₂ 受热水解后能够生成 HCl，HCl 对金属具有非常强烈的腐蚀作用。

石油酸是原油中的酸性氧化物，其特点是其分子中都含有羧基(-COOH)官能团，可以与金属反应，因此具有腐蚀性。且其烃基可以是烷基、环烷基或芳基，因此石油酸又可分为环烷酸和脂肪酸，其中环烷酸类为最多，脂肪族羧酸则很少。环烷酸是原油中最重要的酸性含氧化合物，其化学性质与脂肪酸相似，是典型的一元羧酸，具有普通有机羧酸的全部化学性质，其含量约占总酸性物质的 90%左右，但随原油来源的不同其变化也比较大。在高温下，环烷酸可直接与铁作用，生成环烷酸铁。反应式为：



环烷酸还可与钢铁设备上生成的保护膜 FeS 发生作用，将保护膜破坏，生成环烷酸铁及硫化氢：



总之，原油腐蚀是一个及其复杂的过程，目前人们对原油腐蚀的具体过程和各种影响因素的作用规律还没有形成深入、系统的认识，尚存在大量亟待解决的问题^[26,41]。

为了实时掌握管道的状态，保证管道安全运行，近年来，国际上对管道腐蚀剩余寿命的预测越来越关注^[42-44]。国内外的腐蚀与防护研究人员考虑不同的腐蚀类型，建立了大量的腐蚀速率、腐蚀剩余寿命预测模型和专家系统^[45]，如 Kvemvodlo 等人开发的 Corrolnie 程序可以用来评价大口径输送管内多相流的腐蚀情况^[46]；AndesneTR 等人建立的管道内壁腐蚀速率预测模型，能很好地预测管道的腐蚀速率^[47]；1991 年，DeWaard 和 Millina 建立了“最坏情况”下的腐蚀速率预测模型^[48]。我国对油气管道腐蚀剩余寿命预测的研究起步较晚，廖柯熹等人借助于人工神经网络方法(ANN)建立了腐蚀管道剩余寿命预测模型和油气管道疲劳寿命的仿真系统^[49]；方芳等人采用实验室挂片模拟的方法给出了管道疲劳裂纹缺陷的管道剩余寿命评估方法；黄新杰和姚建军等人建立了管道

电化学腐蚀模型，对管道剩余寿命进行评估^[50]。

但总的来看，目前油气管道腐蚀预测方面的研究还存在着很多不足^[51-52]，主要表现为：一是寿命预测缺乏系统性，没有建立起规范性的研究准则，并且都是在实验室条件下的研究，应用效果并没有得到实际的检验；二是已有的预测模型本身存在缺陷，大部分是只考虑单一因素进行建模，与实际复杂的腐蚀环境存在着较大的差别；三是没有找到综合评价各种因素对腐蚀影响的方法；四是剩余寿命预测在其可靠性和经济性方面还有待于进一步提高。因此深入系统地开展油气管道腐蚀因素研究、腐蚀剩余寿命预测和管道安全评价具有重要意义。

1.3 本文的研究意义

国内外很多学者已经对管道的腐蚀问题做了有意义的研究工作。然而，直到目前为止，有关管道腐蚀的研究主要集中在管道的外壁腐蚀问题，虽然针对管道的外壁腐蚀，很多学者深入研究了影响管道外腐蚀的具体因素并针对各影响因素提出了防腐蚀措施^[53]。输油管道输送的原油因为含有腐蚀性的介质，同样对管道具有较严重的腐蚀，但是原油对管道的腐蚀目前研究还很少。因此，本文的主要任务之一就是研究影响原油腐蚀性的因素，分析各因素的影响规律，按各影响因素对原油腐蚀性影响的大小进行排序，并对管道内腐蚀速率进行预测，从而对油田在输送原油前的原油防腐蚀处理提供指导。

仅仅对管道内壁腐蚀因素进行研究，对保证管道安全运行是远远不够的。研究管道的腐蚀问题，不仅要研究引起管道腐蚀的原因，还应该研究管道腐蚀缺陷将按什么样的规律发展（即管道腐蚀速率的预测），并回答管道按当前腐蚀规律发展还能安全运行多久的问题（即管道剩余寿命预测）。

因此，为了最大程度的保证管道的安全运营，避免因管道破裂造成的财产损失、人员伤亡事故发生，进行管道内腐蚀因素研究、管道腐蚀剩余寿命预测，确定管道检测周期及维修周期等重要参数，既可避免腐蚀所导致的爆裂等恶性事故的发生，也可避免因管道更换不当而产生的巨大浪费，从而为科学指导管道的维修计划和安全生产管理提供依据^[54-56]。

1.4 本文主要研究内容

本文首先在实验室条件下，采用高温高压动态腐蚀仪模拟了原油对输油管道内壁的腐蚀，采用挂片失重实验测量了管道内壁的腐蚀速率；随后通过人工神经网络对实验得

到的腐蚀数据进行训练，建立了腐蚀速率预测模型，并对影响原油腐蚀性的主要因素进行了分析；接着从输油管道腐蚀的腐蚀缺陷发展规律出发，建立了输油管道的内、外腐蚀剩余寿命预测模型；最后开发了一套适用于油气管道腐蚀剩余寿命预测的管道管理系统。

具体研究内容如下：

- 1、通过改变不同的因素在实验室条件下模拟了输油管道的腐蚀，考查了影响原油腐蚀性的因素；
- 2、通过人工神经网络建立了输油管道内腐蚀速率预测模型，并借助于人工神经网络节点删除规则对影响原油腐蚀性的因素进行了研究，找出了影响原油腐蚀性的主要影响因素。
- 3、在管道腐蚀剩余强度评价准则和管道腐蚀速率预测模型的基础上建立了管道腐蚀剩余寿命预测模型，对管道的腐蚀剩余寿命进行了预测。
- 4、最后，运用计算机语言开发了一套用于输油管道腐蚀速率预测与管道腐蚀剩余寿命预测的管道管理专家系统，降低了管道管理者对管道安全检测的频率，更好、更高效的帮助管理者对管道进行安全评价。

第二章 实验与理论方法介绍

2.1 前言

输油管道在输送原油的过程中造成的管道内壁腐蚀，主要是原油中的腐蚀性介质引起的管道金属腐蚀^[57]。影响原油对管道腐蚀的因素很多，但是目前还没有形成统一的认识，有关原油对管道腐蚀的具体的影响因素有哪些以及各因素对原油腐蚀性的影响大小，尚没有研究人员对其进行过较为系统的研究^[58]。

采用实验模拟的方法，通过控制影响原油对管道腐蚀的不同因素可以研究原油的腐蚀规律。采用实验手段研究原油对管道的腐蚀问题，不仅能够较好的模拟原油在管道中的实际腐蚀环境，使获取所需要的腐蚀数据变得简单；同时实验模拟的方法还能够根据实际的需要对实验条件进行控制，对所关注的某个影响因素进行单独研究。因此，实验方法研究腐蚀问题是目前应用最为广泛的腐蚀研究方法。

采用实验手段研究腐蚀问题，一方面可以通过先进的表征手段研究腐蚀机理，为更好的进行防腐蚀提供参考；另一方面利用测量得到的大量实验数据，采用多种数学处理方法建立相应的腐蚀预测模型，为以后相似腐蚀环境下的腐蚀问题进行腐蚀预测。目前使用较多的腐蚀速率预测方法为逐步回归法、统计方法等，但是这些方法对腐蚀速率的预测过程相当复杂，同时精度也有待进一步提高。

在解决众多研究领域内复杂的非线性问题方面，神经网络具有着自己的独特优势。近年来随着计算机的性能飞速提高，为神经网络技术的快速发展提供了保证，使得该技术已经成为一种重要的、可靠的工具。这其中就包括神经网络在腐蚀科学领域的广泛应用。

2.2 实验研究方法

2.2.1 原油的理化性质测量

为了研究原油的腐蚀性，首先有必要对原油与腐蚀性相关的各种性质参量进行测量。据文献资料显示，与原油腐蚀性相关或有可能相关的参量主要包括：API度、密度、粘度、凝点、硫含量、水含量、盐含量、酸值、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe含量、Ni含量、Cu含量、V含量、Na含量等。因此，需要确定原油中这些参量的数值。我们选定的研究对象分别为：卡宾达、杰诺、奎都、曼吉、阿曼、阿拉伯中质、巴士拉中

质等7个产地的原油。通过调研文献，首先确定了这7种原油的API度、密度、凝点、盐含量、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe含量、Ni含量、Cu含量、V含量、Na含量等14个参量的数值，而剩余的四组参量（粘度、硫含量、水含量、酸值等）由于文献上没有记录，需要在实验室条件下对其进行测量。

1 原油粘度的测量

原油粘度测量采用了同轴圆筒旋转粘度计，该粘度计的测量精度大于4%，符合行业精度要求。在剪切速率一定的条件下，待测原油的粘度与其产生的剪切应力是成正比的。当旋转圆筒转动时由于样品会对其产生一定的阻力，在这一阻力作用下扭力杆会产生相应的扭动，传感器将能够测量出相应的偏转度并将其显示。原油的粘度值将可以由式（2-1）和式（2-2）共同求出。

$$\tau = Z \cdot a \quad (2-1)$$

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2-2)$$

式中：

τ —剪切应力，单位为帕（Pa）；

Z —仪器测量系数常数，单位为帕（Pa）；

a —仪器示值；

γ —剪切率，单位为负一次方秒（ S^{-1} ）。

2 原油中硫含量的测量

采用微波消解法将原油中各种形态的硫化物，消解成为 SO_4^{2-} 离子的形式，然后再用氯化钡（ $BaCl_2$ ）水溶液进行滴定，根据生成的硫酸钡（ $BaSO_4$ ）沉淀的质量就可以计算出原油中的总硫含量^[59]。然后根据硫化物对铜片的腐蚀原理，向已经测量出总的硫含量的原油中加入足量的铜粉，在一定的温度条件下边搅拌边对原油进行加热，使原油与铜粉反应两个半小时后，过滤溶液并利用消解法重新测定滤液中的剩余硫含量，那么与铜粉反应前后原油中的硫含量之差即为原油中的活性硫（腐蚀性硫）的含量。

3 原油中水含量的测量

在回流条件下，将待测原油和不溶于水的溶剂混合加热，原油样品中的水将会被蒸

馏。冷凝后的溶剂和水在接受器中连续分离。水沉降在接受器的刻度管中，而溶剂将会返回到蒸馏烧瓶中^[60]。原油中的水含量可以由如下公式计算得出：

$$\omega_c = \frac{v_2 - v_0}{m} \times 100 \quad (2-3)$$

式中：

ω_c —为原油中水的质量分数%

v_2 —接受器中水的体积的数值(修约到 0.025mL)，单位为毫升 ml；

m —试样质量的数值，单位为 g；

假定水的密度为 1g/mL，如果原油中存在挥发性的水溶性物质，可把它们作为水来测量。

4 原油中酸含量的测量

首先将待测原油溶解在由甲苯、四氢呋喃、异丙醇和少量水组成的混合溶剂中，使用氢氧化钾异丙醇标准溶液在玻璃电极和甘汞电极的电位滴定仪上进行原油的中和滴定^[59]。以电位计的读数对滴定剂的体积做图，当发现所作得的曲线存在突跃点时，停止继续滴定，此即为原油的滴定终点，便可得到原油的酸值。

2.2.2 失重法

失重法是在腐蚀速率测量中使用最为广泛的测试方法，该测量方法得到的测量结果比较可靠。但是，应当注意的是采用失重法测得的腐蚀速率为均匀腐蚀速率，而对于点腐蚀等局部腐蚀该测量方法是无能为力的。失重法计算公式为：

$$v = \frac{W_0 - W_t}{\rho \times S \times t} \times 24 \times 365 \quad (2-4)$$

式中，

v —腐蚀速率，mm/a；

W_0 —试片腐蚀前重量，g；

W_t —试片腐蚀后重量，g；

S —试片的表面积，mm²；

t —腐蚀时间，h；

ρ —钢材的密度，g/mm³。

2.3 理论研究方法

2.3.1 人工神经网络简介

人工神经网络(Artificial Neural Network, 简称 ANN)是在人类对其大脑神经网络认识理解的基础上,人工构造的能够实现某种功能的神经网络,是对人类大脑系统的一阶特性的一种描述^[61]。较为通俗的来说,人工神经网络是根据某种需要而建立的一种数学模型,它能够采用电子线路或计算机程序等多种方式来实现,属于人工智能研究的范畴^[62]。1988年 Hecht-Nielsen 对人工神经网络给出了如下定义:人工神经网络采用的机构处理方式是并行、分布式的,它由处理单元及无向讯号通道两部分通过互联而成。由于处理单元都有着局部的内存^[63],能够对局部进行操作。处理单元上的输出联接能够分支成多个并行联接,同时这些联接输出的信号类型及信号的强弱完全一致^[64]。

人工神经网络的发展经历了以下几个阶段:

1)、萌芽期(20世纪40年代)

人工神经网络的研究最早可以追溯到人类开始研究自己的智能的时期,到1949年止。1943年,美国的心理学家和数学家建立起来了著名的阈值加权和模型,即(M-P模型)^[73]。阈值加权和模型的提出标志着神经网络的研究进程正式开始了。在1949年,心理学家 D.O.Hebb 又提出了著名的 Hebb 学习规则^[65],直到今日这一规则仍在人工神经网络的研究中发挥着非常重要作用。

2)、第一次高潮期(20世纪50年代到1968年)

到了20世纪50年代末期,Rosenblatt 等人提出了感知机模型(Perceptron),首次从工程实际出发,研究了神经网络模型在信息处理中的应用^[65]。虽然感知机模型比较简单,但是已具有了人工神经网络的一些基本性质,比如并行处理、可学习性、分布式存贮、连续计算等。因此,在20世纪的60年代以感知机模型作为该时期人工神经网络技术最为重要的成果,在世界范围内掀起了研究人工神经网络的第一次高潮。但是同时,由于人们对神经网络的研究太过于乐观,认为只要将各个独立的神经元互连成一个网络,几乎就可以完全解决模拟人脑思维的问题,认为已经找到了智能的关键。世界范围内许多部门都开始大批地投入此项研究,希望尽快占领人工智能的制高点,使得此后的研究逐渐偏离最终走上了另一个极端。

3)、反思期(1969年到1982年)

在神经网络研究逐渐走向歧途的时候,在 20 世纪 60 年代末,美国的 Minsky 和 Papert 又重新对 Rosenblatt 提出的感知机模型进行了再次研究^[73],并在 1969 年出版了在当时取得非常大轰动的《Perceptron》一书,该书中指出了 Rosenblatt 的感知机的局限性,甚至连简单的“异或”运算都不可以表示^[66]。同时,另一方面,由于 20 世纪 60 年代以来微电子和集成电路技术得到了飞速的发展,促使了计算机的性能呈几何级数增长的速度快速提高,给人工智能从模拟阶段走向工程实用阶段带来了有利的外界条件。在这一背景下,当时的人们普遍认为:以串行信息处理为基础的传统人工智能的发展潜力将是非常巨大的,这些技术完全可以满足工程实际的应用需求,这就降低了人们寻找新的人工智能的积极性。总之,由于多方面原因的存在使得神经网络的研究进入了一个低潮期。

4)、第二次高潮期(1983 年到 1990 年)

在 20 世纪 60 年代末到 80 年代初的低潮时期,仍有一些较为执着的学者在继续进行着神经网络模型和学习算法的理论研究,并且提出了许多有意义的理论和方法^[65]。主要有自组织映射,认知机网络模型理论,自适应共振理论,BSB 模型等,奠定了人工神经网络发展的理论基础^[64]。另一方面在 20 世纪 80 年代,随着“知识库”专家系统的运用,人们逐渐发现,专家系统实际情况并不像人们所想象的那么强大,尤其是在解决有关形象思维、视觉、联想记忆、听觉以及运动控制等方面问题时,以往的人工智能技术面临着各种各样的困难^[66]。人工神经网络因为具有并行分布处理的能力,又一次引起了大家的注意,随后带来了第二次研究神经网络的热潮。

在 1982 年,美国物理学家 J.J.Hopfield 在神经网络中引入了“能量函数”的概念,提出了一种循环网络(HNN)^[65]。到了 1984 年,J.J.Hopfield 又设计研制出了称为 Hopfield 网的著名电路^[65]。Hopfield 网的实现奠定了神经网络计算机研究的基础,并且能够非常好的处理了“巡回推销员问题”(TSP),在神经网络研究领域引起了轰动。1985 年,Hinton、Sejnowsky、Rumelhart 等学者,在 Hopfield 网络模型中引入随机机制,提出了 Boltzmann 机^[65]。1986 年 Rumelhart 重新在多层神经网络模型的基础上,提出了反向传播学习算法(即 BP 算法),使得多层前向网络的学习问题得到了较好解决。这一算法的提出,第一次证实了多层神经网络的学习能力是非常强大的,也证实了该网络确实具有实际应用的价值^[65]。

近十几年来,很多学者提出了具备各种各样信息处理能力的神经网络类型,并在许多工程实际中得到了成功应用。同时,相应的神经网络学术刊物大量的出现和神经网络

学术会议的频繁举行，给神经网络的研究者们提供了许多讨论交流的机会。值得注意的是，国内首届神经网络会议于 1990 年 12 月在北京得以成功召开。

虽然人们已对神经网络在人工智能领域中的应用研究达成了共识，对神经网络巨大的应用潜力也保持乐观，但是必须注意的是，现有的神经网络研究成果仅仅处于起步阶段，神经网络研究中还存在着很多问题，这些问题主要表现为：（1）应用面还不够宽；（2）结果不够精确（3）还存在可信度的问题，这些问题还需许多有识之士长期的艰苦努力去解决^[72]。

人工神经网络作为一种新的先进的人工智能，它的优点主要包括哪些呢。人工神经网络由于模拟了人类大脑的特征，因而神经网络有着如下的特点：

（1）高度的并行性

虽然人工神经网络是由大量完全相同的处理单元简单地并联组合而成，尽管单个处理单元的功能简单，但是当这些简单的处理单元大量地并行活动时，那么人工神经网络对信息的处理能力将会达到惊人的效果。

（2）高度的非线性全局作用

人工神经网络每个神经元并不是独立存在的，每个神经元不仅接受其他神经元的输入，并且每个神经元还可以产生输出进而影响其他的神经元，这种神经元间的相互影响，就实现了神经网络从输入到输出的非线性映射。

（3）良好的容错性与联想记忆功能

人工神经网络可以把有用的信息存储在各个神经元之间的权值中，因此神经网络可以通过自身具有的结构特点实现对信息的记忆。神经网络的分布式信息存储方式，使得神经网络具有良好的容错性。

（4）十分强的自适应、自学习功能

人工神经网络可以通过训练和学习来获得网络的权值与结构，呈现出很强的自学习能力和对环境的自适应能力。

2.3.2 BP 神经网络基本原理

BP 神经网络的全称为误差反向传播神经网络（Back-Propagation Network，简称 BP 网络），BP 网络把 W-H 学习规则一般化，是能够对非线性可微分函数的权值进行训练的多层神经网络。

目前在人工神经网络的实际应用中，BP 神经网络是应用最为普遍的一种神经网络

模型，据统计在所有应用的神经网络类型中，超过 80%-90%的网络是直接采用的 BP 网络或应用了它的变形形式。由此可以看出，BP 神经网络在人工神经网络中占据在非常重要的地位，可以说 BP 神经网络人工神经网络最精华的部分。

BP 神经网络一般具有一个或多个隐含层，但是根据 Kolmogorov 定理，对于给定的任一连续函数 $f: [0,1]^n \rightarrow R_m$ ， f 都能够精确地用一个三层 BP 神经网络实现，因此在实际应用中 BP 神经网络都采用三层网络结构。图 2-1 中所示即为一个三层的 BP 神经网络拓扑结构图，从图中可以看出该网络分别有一个输入层、一个隐含层和一个输出层。

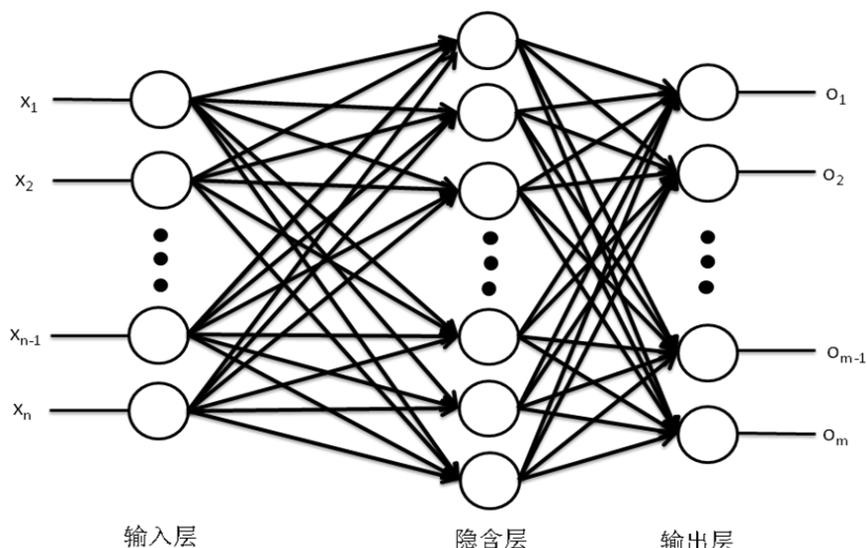


图 2-1 BP 神经网络拓扑结构图

Fig2-1 BP neural network topology

BP 神经网络不同于其他神经网络模型的最大特点在于 BP 网络的激活函数，他的激活函数必须是处处可微的，BP 神经网络最常用的激活函数类型包括：S 型的对数函数或正切函数和线性函数。由于 S 型函数具有非线性放大系数的功能，能够把输入信号从无穷大变换到[-1 1]之间的范围，便于网络的训练，因此在输入到隐含层间常采用 S 型函数作为激活函数；而在输出层输出信号就是实际的信号，不需要对信号进行限制，因此在隐含层与输出层间常采用线性激活函数。

BP 神经网络的基本原理为：有 n 个输入样本： P^1, P^2, \dots, P^n ，而与之相对应的输出样本为 T^1, T^2, \dots, T^n 。对神经网络的训练过程，实际就是通过网络实际输出 A^1, A^2, \dots, A^n 与目标值 T^1, T^2, \dots, T^n 之间的误差来调节权矩阵，使得 $A^l, (l=1, 2, \dots, n)$ 与实际值 T^l 尽可能的接近，也就是说使网络预测值的误差平方和最小。因此，BP 算法

神经网络是由两部分组成的：即信息的正向传递与误差的反向传播。在信息的正向传递过程中，信息是逐层向下传播的，并且每层神经元的信息只受上一层神经元的影响。输出层得到的期望值与实际值的误差平方和大于期望误差大小，则计算该次误差与上次误差的变化值，然后把误差信息按照原来的神经元链接通道反向传播，修改神经元的权值，反复该过程直到达到期望误差。

BP 神经网络的训练步骤主要包括：

- (1) 随机分配每一层网络的权值和偏差，同时设定网络训练的一些参数，比如：期望误差、最大训练步长、网络的学习率、设定隐含层数以及隐含层节点数等；
- (2) 计算网络的输出矢量，并求出与实际值相比较的误差大小；
- (3) 计算误差在反向传播到各层时的误差变化，以及各层权值修正后的新权值；
- (4) 再次训练网络，并计算输出矢量与实际值的误差大小；
- (5) 比较输出矢量与实际值的误差大小是否小于设定的目标误差，若小于目标误差，则训练结束，否则继续。

第三章 原油对管道的腐蚀特性研究

输油管道在输送原油的过程中造成的管道内壁腐蚀，主要是原油中的腐蚀性介质引起的管道金属腐蚀。一方面，针对输油管道的内壁腐蚀问题，尚没有引起足够的认识，也没有研究人员对其进行过较为系统的研究；另一方面，影响原油对管道腐蚀的因素很多，而且作用复杂，原油对管道腐蚀的具体的影响因素有哪些以及各因素对原油腐蚀性的影响大小直到目前还没有形成统一的认识。为了进一步揭示原油对管道的腐蚀规律，寻找影响原油腐蚀性的主要因素及其作用规律，本章中首先在实验室条件下进行了原油对管道腐蚀速率大小的测量，然后借助于人工神经网络方法对影响原油腐蚀性的组要影响因素进行了研究。

3.1 原油对管道腐蚀的实验研究

3.1.1 原油理化性质研究

本文中选定的研究对象为：卡宾达、杰诺、奎都、曼吉、阿曼、阿拉伯中质、巴士拉中质等7个产地的原油。在实验室条件下模拟原油对管道的腐蚀环境，分别考察7种原油对管道的腐蚀特性。

在研究原油对管道腐蚀的主要影响因素时，应该首先确定原油中可能对腐蚀有影响的因素有哪些。据文献资料显示，与原油腐蚀性相关或有可能相关的参量主要包括：API度、密度、粘度、凝点、硫含量、水含量、盐含量、酸值、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe含量、Ni含量、Cu含量、V含量、Na含量等。通过调研文献，首先确定了这7种原油的API度、密度、凝点、盐含量、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe含量、Ni含量、Cu含量、V含量、Na含量等14个参量的数值，而剩余的4组参量（粘度、硫含量、水含量、酸值等）由于文献上没有记录，需要在实验室条件下对其进行测量。按照2.2.1节中介绍的测量方法，对7种原油的粘度、硫含量、水含量和酸值进行了测量。原油的理化性质见表3-1中。

表 3-1 与原油腐蚀性相关的性质

Table3-1 Associated with the corrosive of oil

原油	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉中质
API	32.60	20.70	20.4000	28.90	33.90	31.00	31.10
密度 g/cm ³	0.8584	0.8894	0.9276	0.8782	0.8518	0.8664	0.8666
粘度 mm ² /s	9.3700	38.5600	43.0600	13.6500	7.9870	6.5350	12.7200

表 3-1 与原油腐蚀性相关的性质 (续)

Table 3-1 Associated with the corrosive of oil (continue)

原油	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉中质
凝点/°C	18	-10	-20	13	-29	-31	22
硫含量/%	0.14	0.31	0.66	1.12	1.15	2.64	3.11
水含量/%	0.000	0.025	0.120	0.000	0.025	0.025	0.000
盐含量 mgNaCl/L	52.10	34.35	47.70	11.50	90.00	14.60	3.29
酸值 mgKOH/g	0.06	0.54	0.75	0.38	0.47	0.12	0.19
胶质/%	7.51	8.03	11.21	0.16	0.57	9.10	6.10
沥青质/%	0.60	0.00	1.07	1.06	0.28	2.00	1.50
蜡含量/%	10.76	8.80	2.42	8.67	4.25	3.50	4.50
Fe%, $\times 10^{-4}$	3.79	4.59	5.90	3.12	5.29	1.13	2.35
Ni%, $\times 10^{-4}$	11.74	21.70	33.58	70.73	5.87	12.19	8.50
Cu%, $\times 10^{-4}$	0.27	0.08	0.75	0.07	0.02	0.04	0.05
V%, $\times 10^{-4}$	1.07	2.59	21.17	46.64	6.86	39.12	41.30
Na%, $\times 10^{-4}$	12.54	29.20	9.50	1.53	1.05	0.96	0.82

3.1.2 失重法测量原油对管道的腐蚀速率

本课题采用了挂片失重实验方法研究了原油对管道腐蚀的问题,挂片失重实验是最为常用也是非常有效的一种研究腐蚀问题的实验方法。实验中采用了长、宽、高分别为50mm×25mm×2mm的Q235钢材作为实验试片,腐蚀介质为要研究的7种原油。在实验开始前,首先需要分别使用220目、400目、600目的金相砂纸对试片的表面进行逐级打磨,去掉试样的原始金属表面。把打磨好的试片及时用去离子水冲洗去油并洗涤,然后再用丙酮、无水乙醇等不含氯离子的溶液对试片进行脱脂处理,在室温下迅速干燥并测量干燥后试片的重量和面积(在测量试片重量和面积时应当注意使用干净无污染的测量工具,并且要带干净的工作手套),最后把试片放入干燥器中备用。在进行腐蚀实验时,把试片悬挂于盛有原油的高温高压动态腐蚀仪中,每组实验应放置三个并行试片,且试片应尽量放置在溶液的中间位置,不能与容器壁相接触。控制实验参量(包括:原油性质参量 and 环境因素),待腐蚀24h后把试片取出,用蒸馏水冲洗试片,然后用毛刷、橡皮工具除去试片表面的腐蚀产物,然后再一次用丙酮、无水乙醇等不含氯离子的溶液对试片进行脱脂处理,在试片干燥后重新测量干燥后试片的重量和面积。试片的腐蚀速率按公式(3-1)计算。

腐蚀速率(v , mm/a)可由如下公式计算得到:

$$v = \frac{W_0 - W_t}{\rho \times S \times t} \times 24 \times 365 \quad (3-1)$$

式中,

v —腐蚀速率, mm/a;

W_0 —试片腐蚀前重量, g;

W_t —试片腐蚀后重量, g;

S —试片的表面积, mm^2 ;

t —腐蚀时间, h;

ρ —钢材的密度, g/mm^3 。

按照上述实验测量要求, 通过改变不同的外界环境条件, 进行了 70 组原油腐蚀实验, 部分腐蚀速率测量结果见表 3-2 中。

表 3-2 部分原油对金属的腐蚀速率测量结果

Table3-2 Partly corrosion rate for Q235 steel in oil

原油	卡宾达							阿拉伯中质						
API	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	32.6	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
密度	0.8584	0.8584	0.8584	0.8584	0.8584	0.8584	0.8584	0.8664	0.8664	0.8664	0.8664	0.8664	0.8664	0.8664
粘度	9.370	9.370	9.370	9.370	9.370	9.370	9.370	6.535	6.535	6.535	6.535	6.535	6.535	6.535
凝点	18	18	18	18	18	18	18	-31	-31	-31	-31	-31	-31	-31
硫含量	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64	2.64
水含量	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
盐含量	52.1	52.1	52.1	52.1	52.1	52.1	52.1	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
酸值	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
胶质	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	7.51	9.10	9.10	9.10	9.10	9.10	9.10	9.10
沥青质	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
蜡含量	10.76	10.76	10.76	10.76	10.76	10.76	10.76	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
Fe	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	3.79	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
Ni	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74	11.74	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19	12.19
Cu	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
V	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07	39.12	39.12	39.12	39.12	39.12	39.12	39.12
Na	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	12.54	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
温度	50	60	70	70	70	70	80	50	60	70	70	70	70	80
流速	1	1	0	1	2	3	1	1	1	0	1	2	3	1
腐蚀速率	0.0371	0.0389	0.0414	0.0772	0.0849	0.0624	0.0983	0.0668	0.1038	0.0891	0.1496	0.1502	0.1165	0.1704

3.1.3 实验测量结果与讨论

1 硫含量与原油腐蚀性的关系

为了研究原油中硫含量与原油腐蚀性的关系，在相同的环境条件下分别测量了 7 种原油对 Q235 钢的腐蚀速率，测量结果见表 3-3 中所示。为了能够更直观的考察原油硫含量与腐蚀速率间的关系，把表 3-3 中的测量结果作在了图 3-1 中。从图 3-1 中可以看出，随着原油中的硫含量逐渐增加，腐蚀速率呈现出递增的趋势。说明，原油中由于硫的存在促进了原油对钢材的腐蚀。

表 3-3 原油中硫含量与腐蚀速率的关系

Table3-3 The relationship between sulfur content and corrosion rate

原油	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉中质
硫含量%	0.14	0.31	0.66	1.12	1.15	2.64	3.11
腐蚀速率(mm/a)	0.0772	0.0721	0.0930	0.0992	0.1183	0.1496	0.1532

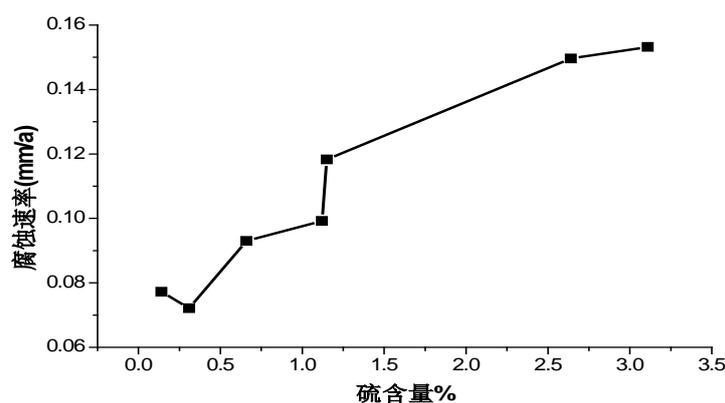


图 3-1 硫含量与腐蚀速率的关系

Fig3-1 The relationship between sulfur content and corrosion rate

2 酸值与原油腐蚀性的关系

酸性介质会对金属造成严重的腐蚀，由于石油中有石油酸等酸性介质的存在，对原油的腐蚀性将会有较大的影响。本论文首先通过实验方法研究了原油酸值大小与原油腐蚀性强弱的关系，为今后原油输送中的防腐蚀问题提供了参考。同样在相同的环境条件下，通过改变以上 7 种原油的酸值分别测量了其对 Q235 钢的腐蚀速率，测量结果见表 3-4 中。

表3-4 不同酸值下原油对应的腐蚀速率数据表

Table3-4 Variation of corrosion rate with acid number

酸值 mgKOH/g	腐蚀速率/mm/a						
	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉
0.5	0.1014	0.1122	0.1321	0.1303	0.1477	0.1833	0.1852
1	0.4151	0.4301	0.5014	0.5161	0.4987	0.5204	0.6247
2	0.6017	0.6009	0.6097	0.6101	0.6337	0.6385	0.7325
3	0.6785	0.7132	0.8531	0.8896	0.893	0.9777	1.0148

为了便于讨论，我们把不同酸值下原油对应的腐蚀速率数据以图形的格式示于图3-2中。从图中可以直观的看出，所有7种原油都随着酸值的增加腐蚀速率迅速增加。

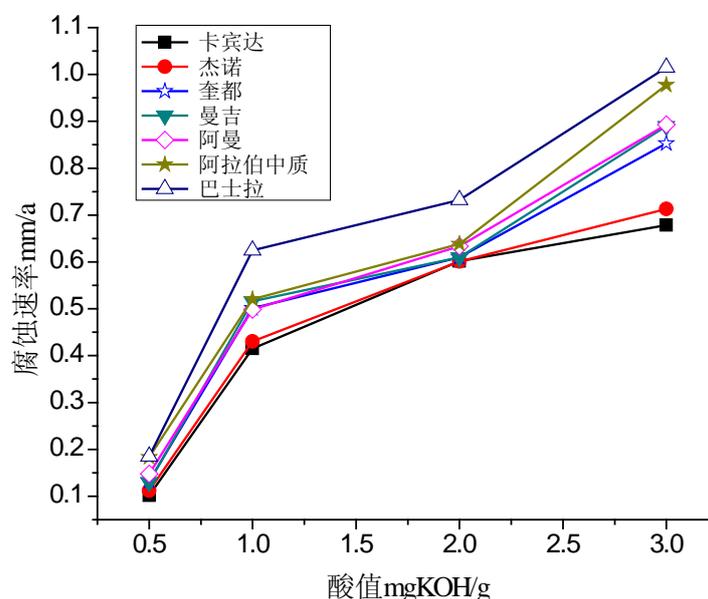


图 3-2 不同酸值下原油对应的腐蚀速率

Fig3-2 The relationship between acid number and corrosion rate

3 温度与原油腐蚀性的关系

原油粘度较高，在原油储运过程中为了提高输送流量，常常采用加热的方法降低原油的粘度。虽然升高温度，降低了原油的粘度提高了原油的输送量，但是根据腐蚀规律，原油的腐蚀性应该会随着温度的升高而增强。同样，温度对原油腐蚀性强弱的影响程度到底有多大，目前也不清楚。因此，本文通过实验方法研究了温度对原油腐蚀性强弱的影响，一方面证实原油的腐蚀性随着温度的升高而增强，另一方面了解温度对原油腐蚀性强弱的影响程度。在相同的环境条件下，分别测量了在 50℃、55℃、60℃、65℃、70℃、

75℃和 80℃的温度条件下 7 种原油对 Q235 钢的腐蚀速率，测量结果见表 3-5 中。

表 3-5 原油在不同温度下腐蚀速率数据表

Table3-5 Variation of corrosion rate with temperature

温度 /℃	试样腐蚀速率/mm/a						
	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉
50	0.0371	0.0373	0.0381	0.0439	0.0448	0.0668	0.0715
55	0.0377	0.038	0.0467	0.0512	0.0688	0.0812	0.0932
60	0.0389	0.0391	0.0525	0.0759	0.0864	0.1038	0.1211
65	0.0413	0.0405	0.0782	0.0988	0.1032	0.1373	0.1478
70	0.0772	0.0721	0.093	0.0992	0.1183	0.1496	0.1532
75	0.0974	0.0897	0.1278	0.1347	0.1472	0.1511	0.1677
80	0.0983	0.0932	0.1496	0.162	0.1685	0.1704	0.1785

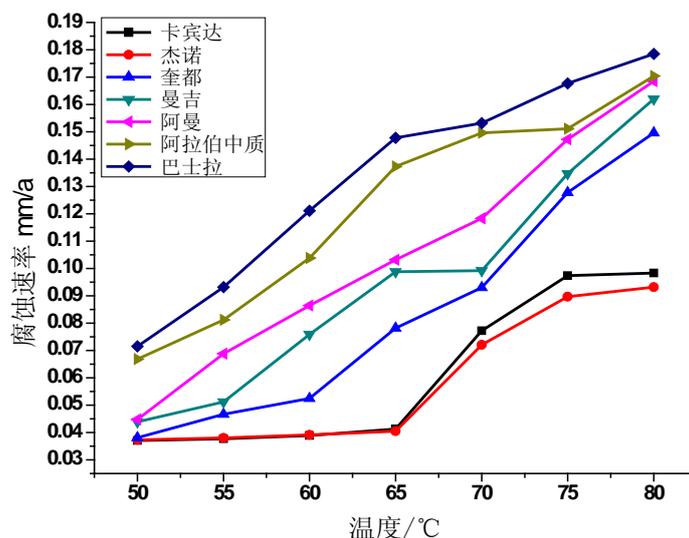


图 3-3 原油在不同温度下腐蚀速率

Fig3-3 The relationship between temperature and corrosion rate

从图 3-3 中可以直观的看出，原油对钢材的腐蚀速率随着温度的升高而较为迅速的增大，说明了温度对原油腐蚀性的大小具有较大的影响。

4 流速与原油腐蚀性的关系

原油在储运过程中，始终是处于流动状态的。流动的原油不仅会促使腐蚀介质与储运设备充分接触，而且原油的流动还会造成对设备的冲刷腐蚀，因此流速对原油的腐蚀性具有较大的影响，研究流速对腐蚀的影响将有积极地意义。固定其他环境条件，分别

在 0m/s、1m/s、2m/s、3m/s 的流速下测量了以上 7 种原油对 Q235 钢的腐蚀速率，测量结果见表 3-6 中。

表3-6 原油在不同流速下的腐蚀速率数据表

Table3-6 Variation of corrosion rate with velocity of flow

流速 m/s	腐蚀速率/ mm/a						
	卡宾达	杰诺	奎都	曼吉	阿曼	阿拉伯中质	巴士拉
0	0.0414	0.0403	0.0651	0.0658	0.0729	0.0891	0.0976
1	0.0772	0.0721	0.093	0.0992	0.1183	0.1496	0.1532
2	0.0849	0.0815	0.0978	0.1042	0.1274	0.1502	0.1638
3	0.0624	0.0701	0.0863	0.0928	0.1157	0.1165	0.1162

从图3-4中可以看出，原油对钢材的腐蚀速率首先随着流速的增加而迅速增大。当流速达到2m/s左右时，腐蚀速率达到极大值，随后腐蚀速率又随着流速的增加而逐渐降低。腐蚀速率随着流速的增加而增大，主要是由于流速增加时，原油对钢材造成更为严重的冲刷腐蚀；另外，流速增加也加大了腐蚀电子的转移速度并促进了腐蚀性介质与钢材表面的充分接触，使得整个腐蚀反应体系表现出更为迅速的的反应过程，因而较高流速条件下相对于低流速时会表现出更强的腐蚀性。这是容易理解的，然而当流速继续增加时，腐蚀速率又会表现出逐渐降低的趋势，分析其具体原因这可能是因为在高流速下会影响腐蚀产物的形核过程，使得在高流速条件下形成的腐蚀产物膜相对于较低流速下形成的腐蚀产物膜更为致密，致密的腐蚀产物膜能够较好的阻碍腐蚀介质与金属表面的接触，对钢材表面起到了很好的保护作用，因此表现出随着流速的继续增大腐蚀速率逐渐降低的现象。

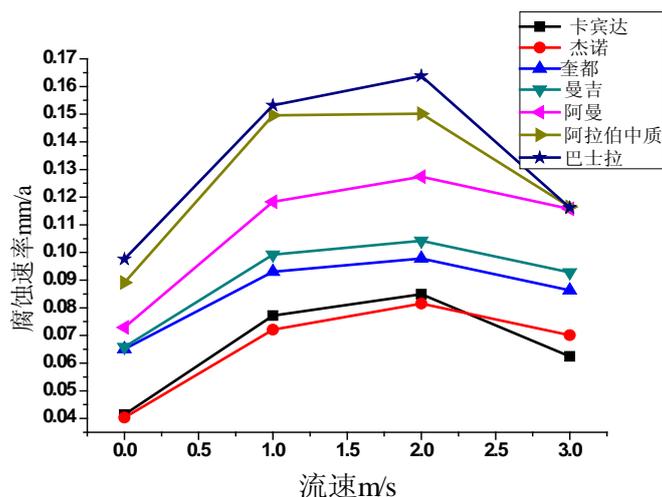


图3-4 流速对原油腐蚀性的影响

Fig3-4 The relationship between velocity of flow and corrosion rate

3.2 人工神经网络预测原油对管道的腐蚀速率

首先在实验室条件下对原油对管道的腐蚀环境进行了模拟, 并采用挂片失重法测得了原油对钢材的腐蚀速率, 具体的实验测量方法及步骤见 3.1 节中。通过对实际腐蚀环境的模拟, 我们研究了原油对钢材的腐蚀过程中各影响因素对原油腐蚀性的影响, 得到 70 组实验数据。本节中, 将借助于人工神经网络方法对已经测量的实验数据进行训练, 建立神经网络腐蚀速率预测模型, 达到对今后管道的内腐蚀进行预测的目的。

目前使用最为广泛的人工神经网络模型为 BP 神经网络, 该网络模型具有寻优精确性的优点, 但是同时 BP 神经网络又存在着容易陷入局部极小、易引起振荡和收敛速度慢等的自身缺点, 尤其是在处理输入因素较多的复杂问题时。例如本文中用于预测原油腐蚀性的问题, 由于影响原油腐蚀性的因素众多, 并且很多影响因素间也存在着复杂的联系, 因此运用单纯的 BP 神经网络方法很容易使网络陷入局部极小, 影响网络预测精度。

遗传算法 (Genetic Algorithm, 简称 GA) 的最早应用是, 美国密接根大学的 Holland 教授在计算机模拟生物系统的研究, 创造出的一种模仿生物遗传和进化机制的自适应概率优化方法—随机全局搜索和优化方法。遗传算法的实质是一种并行、高效、全局搜索的优化方法, 它在搜索过程中能够把搜索空间的知识自动搜索出来并加以积累, 同时在求解过程中还能够自适应地控制搜索过程。遗传算法 (GA) 最大的优点就是具有很好

的全局搜索能力,可以克服 BP 算法容易陷入局部极值的缺点,是一种全局优化算法,但同时 GA 算法又具有寻优不精确性。

鉴于此,本节尝试设计一种 GA-BP 联合算法神经网络模型,既希望该网络模型不仅能够发挥遗传算法的全局搜索能力,而且还能够保留 BP 神经网络寻优精确的优点,因此本节中设计的目标网络模型是一种吸取遗传算法和 BP 算法各自优点并互补各自不足的联合算法神经网络模型。

该算法神经网络的具体实现方法为:首先建立 BP 神经网络模型;然后利用遗传算法对 BP 网络随机分配的权值与阈值进行优化,寻求神经网络全局最小值,避免 BP 网络容易陷入局部极小的可能;最后再一次用 BP 算法对优化后的权值与阈值进行训练,对最优解进行精确定位,补充遗传算法寻优不精确的缺点,达到全局优化网络性能的目的。基本设计思想为:改变了以往 BP 算法依赖梯度下降法来调整权值与阈值的方法,而是采用遗传算法全局搜索的特点,对网络的权值与阈值进行优化,并把优化后的权值与阈值重新赋给 BP 神经网络,对其进行训练。

为了验证我们设计的 GA-BP 模型的预测能力,本文同时采用了较常用的 BP、GA 网络模型对输油管道的腐蚀速率进行了预测,最后通过对比 BP、GA 和 GA-BP 三种网络模型的预测精度,验证 GA-BP 神经网络模型是否如同我们所期望的那样同时发挥了遗传算法和 BP 算法的优点并舍弃了两者的不足。

3.2.1 BP 神经网络模型的建立

首先,采用 BP 神经网络建立腐蚀速率预测模型,由于用于训练神经网络的数据集包括训练集与测试集,并且两个数据集中的数据量通常按照 80:20 的比例进行随机分配,随机分配的目的是为了避免出现网络对同类数据进行反复训练,增强网络的记忆能力,降低了预测精度,因此我们把实验测量的腐蚀数据随机分成了两部分:其中 55 组作为神经网络的训练集,剩下的 15 组作为神经网络的测试集,测试集数据见表 3-7。考虑的影响因素主要为:API 度、原油密度、粘度、凝点、硫含量、水含量、盐含量、酸值、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe 含量、Ni 含量、Cu 含量、V 含量、Na 含量、温度、流速等 18 个变量。把这些影响因素作为输入变量,建立了 3 层的 BP 神经网络,对网络进行训练并对腐蚀速率进行预测。

表 3-7 测试集样本原始数据

Table3-7 The test samples and raw date

编号	API 度	密度 g/cm ³	粘度 mm ² /s	凝点 °C	硫含量 m%	水含量 m%	盐含量 mgNaCl/L	酸值 mgKOH/g	胶质
1	20.4	0.927	43.060	-20	0.660	0.120	47.700	0.75	11.21
2	20.4	0.927	43.060	-20	0.660	0.120	47.700	0.75	11.21
3	20.7	0.889	38.560	-10	0.310	0.025	34.350	0.54	8.03
4	28.9	0.878	13.650	13	1.120	0.000	11.500	0.38	0.16
5	33.9	0.851	7.987	-29	1.150	0.025	0.000	0.47	0.57
6	28.9	0.878	13.650	13	1.120	0.000	11.500	0.38	0.16
7	32.6	0.858	9.370	18	0.140	0.000	52.100	0.06	7.51
8	31.1	0.866	12.720	22	3.110	0.000	3.290	0.19	6.10
9	20.7	0.889	38.560	-10	0.310	0.025	34.350	0.54	8.03
10	32.6	0.858	9.370	18	0.140	0.000	52.100	0.06	7.51
11	20.4	0.927	43.060	-20	0.660	0.120	47.700	0.75	11.21
12	31.0	0.866	6.535	-31	2.640	0.025	14.600	0.12	9.10
13	31.1	0.866	12.720	22	3.110	0.000	3.290	0.19	6.10
14	32.6	0.858	9.370	18	0.140	0.000	52.100	0.06	7.51
15	31.1	0.866	12.720	22	3.110	0.000	3.290	0.19	6.10

表 3-7 测试集样本原始数据 (续)

Table3-7 The test samples and raw date(continue)

编号	沥青质	蜡含量	Fe ppm	Ni ppm	Cu ppm	V ppm	Na ppm	温度 °C	流速 m/s	腐蚀速率 mm/a
1	1.07	2.42	5.90	33.580	0.75	21.170	9.500	65	1	0.0782
2	1.07	2.42	5.90	33.580	0.75	21.170	9.500	60	1	0.0525
3	0.00	8.80	4.59	21.700	0.08	2.590	29.200	70	2	0.0815
4	1.06	8.67	3.12	70.730	0.07	46.640	1.530	60	1	0.0759
5	0.28	4.25	5.29	5.870	0.02	6.860	1.050	65	1	0.1032
6	1.06	8.67	3.12	70.730	0.07	46.640	1.530	70	2	0.1042
7	0.60	10.76	3.79	11.740	0.27	1.070	12.54	60	1	0.0389
8	1.50	4.50	2.35	8.500	0.05	41.300	0.820	65	1	0.1478
9	0.00	8.80	4.59	21.700	0.08	2.590	29.200	70	1	0.0721
10	0.60	10.76	3.79	11.740	0.27	1.070	12.540	50	1	0.0371
11	1.07	2.42	5.90	33.580	0.75	21.170	9.500	70	0	0.0651
12	2.00	3.50	1.13	12.190	0.04	39.120	0.960	70	3	0.1165
13	1.50	4.50	2.35	8.500	0.05	41.300	0.820	55	1	0.0932
14	0.60	10.76	3.79	11.740	0.27	1.070	12.540	70	1	0.0772
15	1.50	4.50	2.35	8.500	0.05	41.300	0.820	75	1	0.1677

在建立神经网络拓扑结构模型的过程中,其中的难点是神经网络隐含层数的选取和每个隐含层中节点数的确定。隐含层数的增加能够增强神经网络处理信息的能力,但是

过多的隐含层会增加网络的规模，网络变得复杂，处理信息的速度也会变得很慢。另外，有人证实相对于增加神经网络的隐含层数，增加隐含层的节点数对提高神经网络处理信息的能力更有效，同时增加隐含层节点数要比增加隐含层数要容易实现而且增加节点数对增加网络规模的促进要小。Kolmogorov 曾证实过：对于一个三层的 BP 神经网络（即仅有一个隐含层），任意一个连续的函数 $f:[0,1]^n \rightarrow R_m$ 都能够精确地用该网络去实现。因此，根据这一结论本文中设计的 BP 神经网络结构为三层，即第一层为输入层，中间层为隐含层，第三层为输出层。

在神经网络中最常应用的激活函数为 S 型的对数函数或正切函数和线性函数，其中 S 型的对数函数或正切函数常应用于神经网络的输入层和隐含层间，线性函数常应用于隐含层与输出层间，因此本文中的神经网络隐含层的迁移函数选为 S 型的正切函数 (Tan-Sigmoid Function)，而输出层迁移函数设为了线性函数 (Linear Function)。

而隐含层节点数的选取虽然目前没有一个严格的统一标准，往往需要根据网络实际情况去尝试选取，但是在神经网络的实际应用中也积累了一些经验公式：例如 $m=2n+1$ ，其中 n 为输入层的节点数， m 为隐含层的节点数。因此，在选取神经网络隐含层节点数时可以参考该公式，已知本文中的神经网络输入层节点数 $n=18$ ，根据该经验公式知 m 取值应在 37 左右，参考这一标准本文把选取的隐含层节点数从 1 个开始依次增加到 50 个，分别对这 50 种神经网络结构进行训练，并且每种网络类型分别训练 5 次。我们分别采用了测试集中的网络预测值与实际值的 5 次百分误差 (E_{VP} 见公式 3-2) 平均值和预测值与实际值的 5 次相关系数 (R 见公式 3-3) 平均值对模型质量和模型预测能力进行了比较。

$$E_{VP} = \left[\sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_i)^2 / k \right]^{0.5} / Y_A \quad (3-2)$$

$$R = \left\{ \sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_A)^2 / \left[\sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_i)^2 + \sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_A)^2 \right] \right\}^{0.5} \quad (3-3)$$

式中： Y_{ci} 和 Y_i 分别表示训测试集中的网络预测值和实际值， Y_A 表示测试集中实际值的平均值， k 为测试集中包括的样本数量。

分别把测试集中的网络预测值与实际值的 5 次百分误差 (E_{VP}) 平均值和预测值与实际值的 5 次相关系数 (R) 平均值大小随隐含层节点数变化情况作在图 3-5 和图 3-6 中。

从百分误差 (E_{VP}) 平均值随隐含层节点数变化图上可以看出：整体上，百分误差 (E_{VP}) 随隐含层节点数增加，呈现出忽大忽小的不规律变动，但是隐含层节点数在 35

个左右时, E_{VP} 有一段相对稳定的区域, 并且在该范围内误差较小。

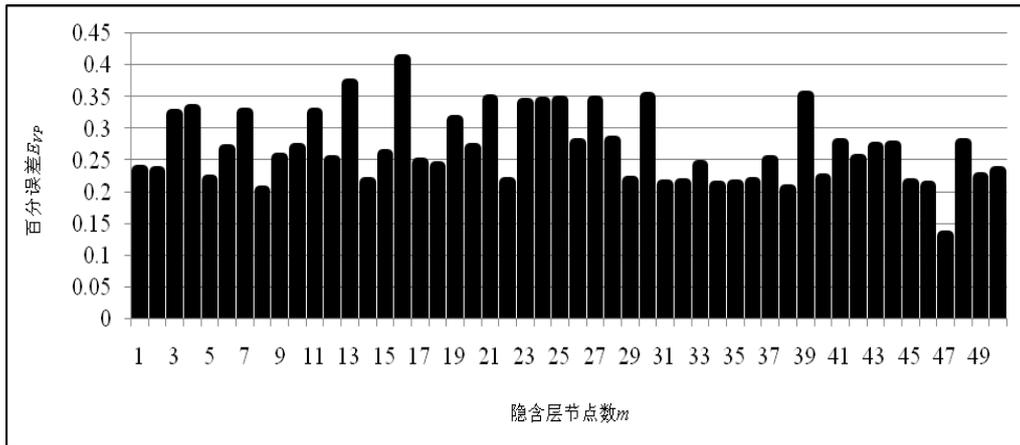


图 3-5 不同隐含层节点数 m 时的测试集百分误差 E_{VP} 比较

Fig3-5 E_{VP} in the different nodes (m) in hidden layer

从相关系数 (R) 平均值随隐含层节点数变化图上可以看出: 从图 3-6 中整体来看, 隐含层节点数增加时, 相关系数 (R) 变化有起伏, 但是起伏不是太大, 并且在隐含层节点数选取 35 个左右时相关系数整体较大, 而且在该区域内相关系数变化较平缓。

从以上百分误差 (E_{VP}) 图和相关系数 (R) 图中, 都可以看出当隐含层节点数选取 35 个左右时, 神经网络的预测值精度较高而且网络的性能较稳定, 因此以后本文中建立的神经网络拓扑结构均为 18-35-1 型结构。

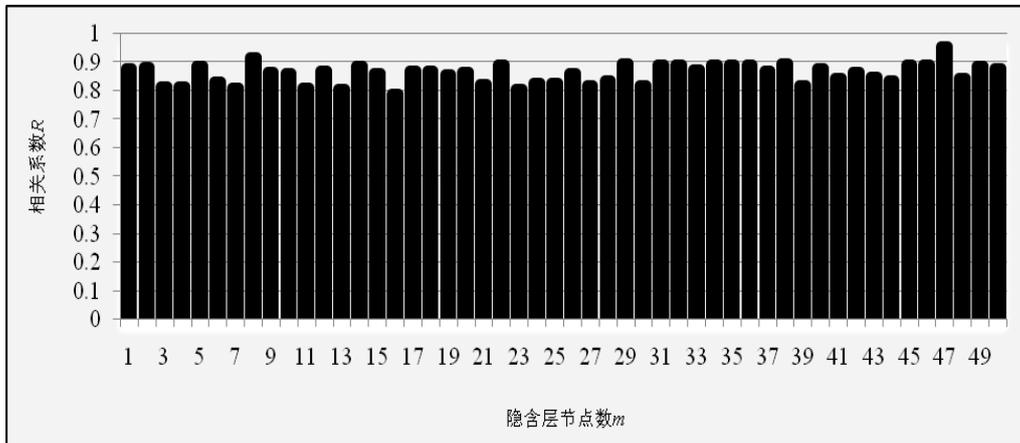


图 3-6 不同隐含层节点数 m 时的预测值与实验值相关系数 R

Fig3-6 correlation coefficient(R) in the different nodes (m) in hidden layer

建立起来 18-35-1 型的 BP 神经网络拓扑结构, 通过改变网络的训练参数, 对网络进行反复试算, 以求达到最优的预测结果。BP 网络的预测结果见表 3-8 中。

表 3-8 BP 神经网络的预测结果

Table3-8 The prediction results of corrosion rate by BP

实验值 mm/a	0.0782	0.0525	0.0815	0.0759	0.1032	0.1042	0.0389	0.0701	0.1478
预测值 mm/a	0.0685	0.0513	0.1116	0.0537	0.0988	0.1005	0.0265	0.1247	0.1408
误差%	-12.43	-2.26	36.92	-29.22	-4.23	-3.54	-31.97	77.89	-4.72
实验值 mm/a	0.0721	0.1165	0.0932	0.0381	0.0772	0.1677			
预测值 mm/a	0.0666	0.1182	0.0979	0.0567	0.0771	0.1625			
误差%	-7.60	1.44	5.00	48.92	-0.17	-3.08			

3.2.2 GA 神经网络模型的建立

遗传算法是基于生物进化理论而发展起来的搜索最优解的仿生算法，它模拟了自然选择和遗传中发生的复制、交叉和变异等现象，遗传算法把待解决的问题参数编成二进制编码即为基因，多个基因又组成了染色体，多个染色体组成了一个群体，遗传算法就是从一群个体出发，通过对其进行选择、配对交叉和变异操作，可以生成一个更适应环境的群体，经过多代的遗传最后产生了一个最适应环境的群体，即求得了问题的最优解。就本文来说遗传算法对神经网络的优化过程为：把网络随机生成的初始权值与阈值通过编码操作，表示成一群“染色体”（初始种群），接着把初始种群置于问题的“条件”下（即目标误差最小的条件下）选择适应度高的染色体（即目标误差较小的权值与阈值）进行复制、交叉、变异等操作，产生新一代种群（即新的权值与阈值），经过若干代的遗传进化，最终产生适应度最高的种群，经过解码，即为问题的最优解（最优的权值与阈值）。

遗传算法的主要实现因素包括：参数的编码、初始群体的生成、适应度函数的选择、遗传操作因子、算法控制和约束条件的选择等。

遗传算法的编码操作时遗传算法的一个应用难点，目前较常应用的编码方法主要有：二进制编码、符号编码和浮点数编码等。本文中应用的编码方法为浮点数编码方法，由于该编码方法使用的是真实值，所以浮点数编码也称为真值编码方法该编码方法。

遗传算法的操作因子是遗传算法能够进行遗传的根本，遗传算法的操作因子包括选择、交叉和变异。选择或称为复制，能够把群体中适应度高的个体选择出来并遗传到下一代群体中去，目前选择操作算子很多，本文中采用的是使用最为广泛的‘normGeomSelect’选择方法，选择率为 0.08。交叉或称重组，是把群体中两个染色体通过重组，而产生新一代的染色体，新的染色体有更高的适应度，在本文中采用的是“算数交叉”法。变异就是基因的突变，即对染色体编码串上的个别位置进行改变，产生更适应环境的个体。本文中采用的是“非均匀变异”方法。GA 优化神经网络的流程图见图

3-7 所示。

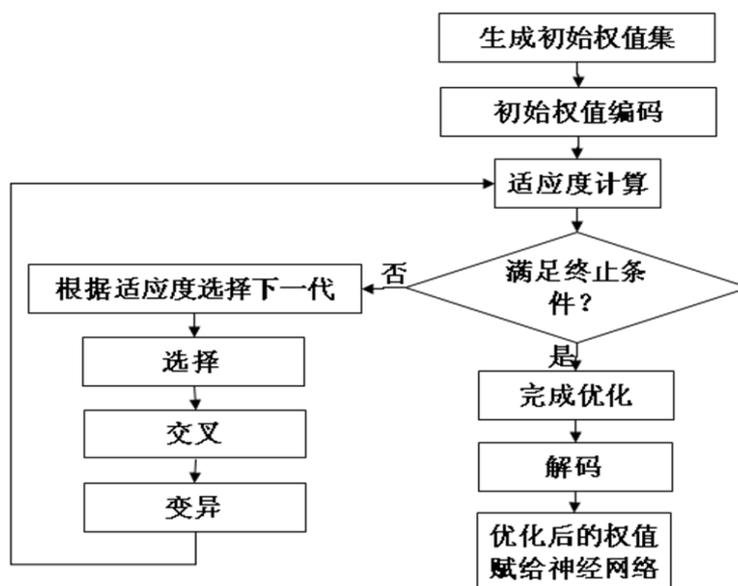


图 3-7 GA 优化神经网络的流程图

Fig3-7 The flowchart of GA-BP neural network

用 GA 算法建立了 18-35-1 型拓扑结构的神经网络模型，同样把输入层到隐含层的迁移函数设为双曲函数(Tan-Sigmoid Function)，隐含层到输出层的迁移函数设为线性函数(Linear Function)，对该网络进行训练，训练后的网络对测试集数据进行了预测。遗传算法网络的预测结果见表 3-9 中。

表 3-9 GA 神经网络的预测结果

Table3-9 The prediction results of corrosion rate by GA

实验值 mm/a	0.0782	0.0525	0.0815	0.0759	0.1032	0.1042	0.0389	0.0701	0.1478
预测值 mm/a	0.0822	0.062	0.0828	0.0693	0.1026	0.1048	0.0359	0.0718	0.1264
误差%	5.09	18.18	1.63	-8.75	-0.54	0.53	-7.58	2.46	-14.49
实验值 mm/a	0.0721	0.1165	0.0932	0.0381	0.0772	0.1677			
预测值 mm/a	0.0695	0.1403	0.0933	0.0305	0.0667	0.1584			
误差%	-3.58	20.42	0.14	-19.85	-13.64	-5.55			

3.2.3 GA-BP 神经网络模型的建立

在前面两节中分别建立了基于 BP 算法和 GA 算法的神经网络模型，本节中尝试把两种算法联合起来使用，形成一种 GA-BP 联合算法神经网络模型，期望能够继承 BP 算法和 GA 算法的各自优点。

具体实现过程如下：首先建立 18-35-1 型拓扑结构的 BP 神经网络模型，并随机分配网络的权值与阈值，接着使用 GA 算法对 BP 网络的权值与阈值进行优化，优化结束

后把网络的权值与阈值重新赋给 BP 网，并再次对网络进行训练。

GA-BP 神经网络模型的预测过程可按以下几步进行：

①个体的编码和种群的初始化。本文采用浮点数编码方法，即把 BP 网络随机分配的初始权值和阈值按照一定的顺序联结起来形成一个实数组，作为遗传算法的染色体。本文采用了 18-35-1 型拓扑结构的网络模型，由此可以计算出遗传算法的染色体长度为 $18 \times 35 + 35 \times 1 + 35 + 1 = 701$ 。遗传算法的初始种群由随机产生，种群的规模设为 100。

②种群个体所对应的适应度由适应度函数来确定。在本文中 BP 神经网络的性能评价函数采用的是训练集中预测值与实际值的百分误差 (E_{TP})，该误差越小说明网络的预测精度越高：

$$E_{TP} = \left[\sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_i)^2 / k \right]^{0.5} / Y_A \quad (3-4)$$

而在遗传算法中，往往是适应度函数越大说明对网络的优化越好，因此文中选取了误差平方和的倒数作为遗传算法的适应度函数：

$$f = \frac{1}{E_{TP}} = \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^k (Y_{ci} - Y_i)^2 / k \right]^{0.5} / Y_A} \quad (3-5)$$

③GA 算法的选择操作算子。‘轮盘赌方法’是目前使用较多的选择作用算子，但是该方法的缺点是误差大，因此在本文中采用了精度较高的‘normGeomSelect’选择方法，选择率设为 0.08。选择操作的目的是将群体中适应度较高的个体保存到下一代中，经过多次操作，直到选择保存到下一代的个体数目达到需要的数目。

④GA 算法的交叉操作算子。在本文中采用的交叉算子为‘算术交叉’方法。‘算术交叉’具体实现过程为：假设在一个群体中有两个个体 X_A^t 、 X_B^t 进行了算术交叉（即群体中的两个染色体进行了重组），则经过交叉算子作用后所产生的两个新个体为

$$\begin{cases} X_A^{t+1} = \alpha X_B^t + (1-\alpha) X_A^t \\ X_B^{t+1} = \alpha X_A^t + (1-\alpha) X_B^t \end{cases} \quad (3-6)$$

其中 α 为介于 [0, 1] 之间的随机常数。交叉运算的本质就是基因的重组，它是产生新个体的主要方法，交叉运算的好坏决定着遗传算法的全局搜索能力。

⑤遗传算法的变异操作因子。由于‘均匀变异’具有不便于对某重点区域进行局部搜索的缺点，因此文中采用了‘非均匀变异’，变异参数设定为 [4 500 3]。变异运算的本质就是基因的突变过程，虽然该方法不是产生新个体的主要方法，但是对遗传算法的局部搜索却具有决定性的作用，同时还能够避免在选择与交叉的过程中造成的基因信息的丢

失。

⑥终止条件。通常把遗传的代数设为遗传算法的终止条件，通常取 100-500 代，本文中选取了 500 代。当遗传的代数达到 500 时，遗传算法的优化过程将会终止，否则将转至步骤③。

⑦把遗传算法优化后的权值与阈值再次赋给 BP 网络，重新对网络进行训练。

以上 7 步就是 GA-BP 神经网络的一个整体训练过程，采用 GA-BP 神经网络对训练集数据进行训练，并对测试集数据进行预测，预测结果列于表 3-10 中。

表 3-10 GA-BP 神经网络的预测结果

Table3-10 The prediction results of corrosion rate by GA-BP

实验值 mm/a	0.0782	0.0525	0.0815	0.0759	0.1032	0.1042	0.0389	0.0701	0.1478
预测值 mm/a	0.0697	0.0552	0.0795	0.064	0.0988	0.1096	0.0382	0.0711	0.1359
误差%	-10.900	5.150	-2.510	-15.680	-4.270	5.170	-1.750	1.480	-8.020
实验值 mm/a	0.0663	0.1145	0.0947	0.0360	0.0739	0.1765			
预测值 mm/a	-8.0400	-1.6900	1.6100	-5.5600	-4.3100	5.2500			
误差%	0.066	0.115	0.095	0.036	0.074	0.177			

3.2.4 小结

上面分别采用了 BP、GA 和 GA-BP 三种算法的神经网络对原油的腐蚀性进行了预测，为了便于比较各种算法对腐蚀速率预测能力的大小，接下来把三种神经网络类型对腐蚀速率预测值和实际值共同列于表 3-11 中。同时，三种算法模型预测值与实际值间的相关系数 R 值见图 3-8 中。

表 3-11 BP、GA 和 GA-BP 三种神经网络模型的预测结果比较

Table3-11 Comparison of the prediction results of corrosion rate by BP GA and GA-BP ANN

实验测量 实验值 mm/a	BP 算法		GA 算法		GA-BP 算法	
	预测值 mm/a	误差%	预测值 mm/a	误差%	预测值 mm/a	误差%
0.0782	0.0685	-12.430	0.0822	5.090	0.0697	-10.900
0.0525	0.0513	-2.260	0.0620	18.180	0.0552	5.150
0.0815	0.1116	36.920	0.0828	1.630	0.0795	-2.510
0.0759	0.0537	-29.220	0.0693	-8.750	0.0640	-15.680
0.1032	0.0988	-4.230	0.1026	-0.540	0.0988	-4.270
0.1042	0.1005	-3.540	0.1048	0.530	0.1096	5.170
0.0389	0.0265	-31.970	0.0359	-7.580	0.0382	-1.750
0.0701	0.1247	77.890	0.0718	2.460	0.0711	1.480
0.1478	0.1408	-4.720	0.1264	-14.490	0.1359	-8.020
0.0721	0.0666	-7.600	0.0695	-3.580	0.0663	-8.040

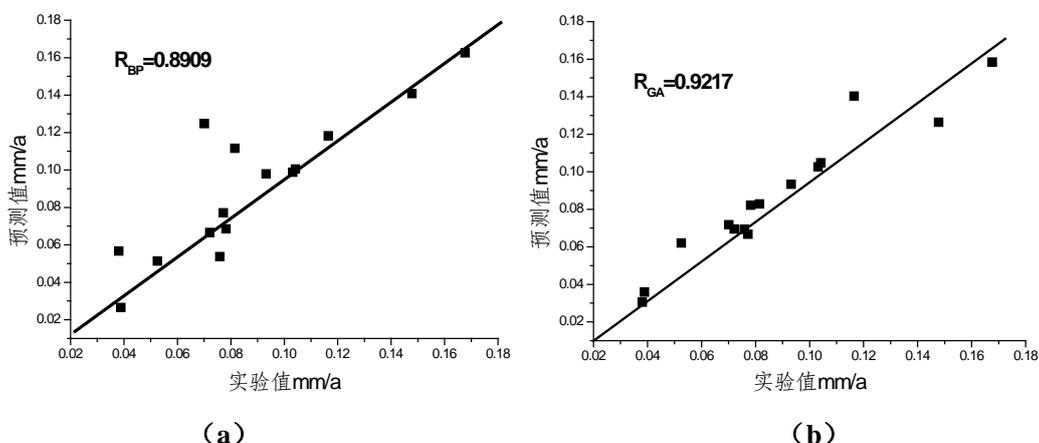
表 3-11 BP、GA 和 GA-BP 三种神经网络模型的预测结果比较（续）

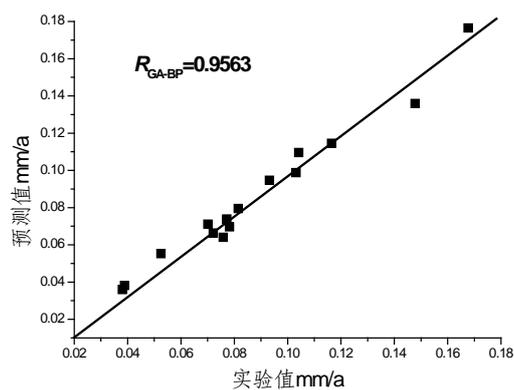
Table3-11 Comparison of the prediction results of corrosion rate by BP GA and GA-BP ANN

(continue)

实验测量 实验值 mm/a	BP 算法		GA 算法		GA-BP 算法	
	预测值 mm/a	误差%	预测值 mm/a	误差%	预测值 mm/a	误差%
0.1165	0.1182	1.440	0.1403	20.420	0.1145	-1.690
0.0932	0.0979	5.000	0.0933	0.140	0.0947	1.610
0.0381	0.0567	48.920	0.0305	-19.850	0.0360	-5.560
0.0772	0.0771	-0.170	0.0667	-13.640	0.0739	-4.310
0.1677	0.1625	-3.080	0.1584	-5.550	0.1765	5.250

从表 3-11 中的数据可以看出：BP 神经网络模型预测值整体误差最大，甚至个别预测值误差达到了 77.89%，而 GA 和 GA-BP 网络模型相对于 BP 模型预测精度有了较大的提高。但从网络的预测精度来说，这反映出 BP 网络模型可能已经陷入了局部极小值，也就是说 GA 和 GA-BP 网络模型确实能够发挥遗传算法的全局寻优能力，搜寻到了网络的全局最小值。从图 3-8 中可以看出：图 3-8 (c) 中的点基本上都聚集在图中直线的周围，(b) 图中有个别点偏离较远，而 (a) 图中的点偏离更为严重。三种模型预测值与实际值的相关系数 R 值分别为： $R_{BP}=0.8909$ 、 $R_{GA}=0.9217$ 、 $R_{GA-BP}=0.9563$ ， R 值越大说明模型的预测精度越高，因此三种网络模型的预测精度从低到高的顺序依次为 $BP < GA < GA-BP$ 。说明遗传算法确实能够具有全局寻优的能力，但是同时注意到，GA-BP 这种联合网络模型预测精度要比单独的 GA 网络模型要好，这也说明了遗传算法不仅具有全局寻优的特点，而且还具有巡游不够精确的不足，而引入具有寻优精确能力的 BP 神经网络，形成一种联合神经网络模型，确实能够同时发挥出 GA 全局寻优能力与 BP 寻优精确的优点。





(c)

图 3-8 三种神经网络模型预测值与实验值的关系

Fig3-8 Correlation between actual and predicted corrosion rate by BP GA and BP-GA ANN

3.3 影响原油腐蚀性的主要因素研究

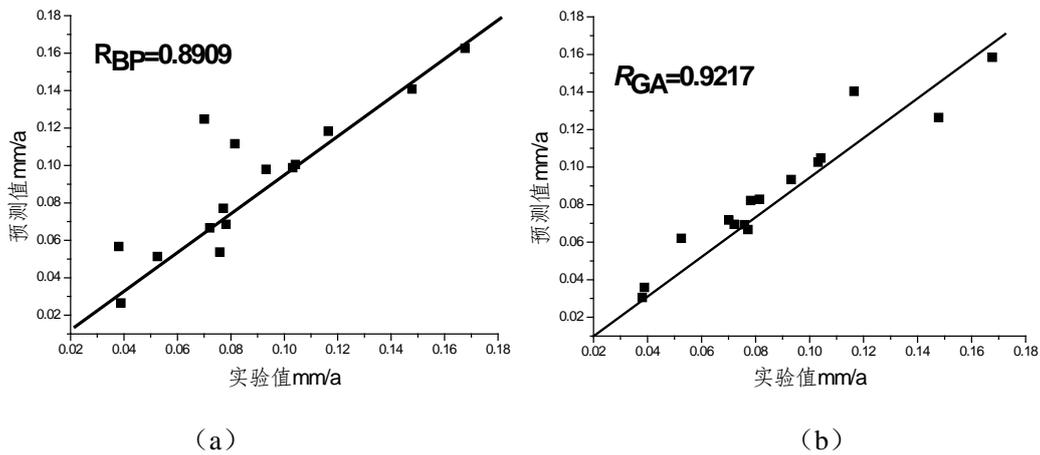
在上一节中，建立了三种神经网络模型对腐蚀速率进行了预测，从预测结果来看，由于遗传算法的引入使得神经网络的预测精度有了较大的提高。然而影响原油腐蚀性的因素众多、作用复杂，目前对原油腐蚀性的问题还没有形成较为清楚、统一的认识。有些因素对影响原油腐蚀性的贡献较小，或者存在对原油腐蚀性影响效果重叠的因素，这些因素引入神经网络都会增大网络的规模，使得网络变得臃肿，影响网络的收敛速度和预测精度。

本文中建立的神经网络模型，考虑了 18 个可能对原油腐蚀性有影响的因素，这些因素到底对原油腐蚀性的影响分别有多大，是否有某些影响不大的因素也引入了网络中，是否存在两种或几种对原油腐蚀性影响效果重叠的因素同时引入了网络？这些问题都无法回答，也就不能保证本文中考虑的影响因素都是有用的因素。这就要求我们是否可以寻找到一种方法，能够把影响原油腐蚀性的主要因素从这些众多的影响因素中筛选出来，一方面可以通过较少的因素重新组建网络降低了网络规模，提高了网络的收敛速度和预测精度，另一方面对进一步研究原油腐蚀性提供了参考。

高大文等^[67]人曾经在定量构效关系 (Quantitative Structure-Activity Relationships, 简称 QSARs) 研究中尝试着采用了人工神经网络技术对影响微生物活性的输入因素进行了筛选，并总结出来了神经网络输入层节点的筛选规则。通过采用筛选前的输入因素与筛选后的输入因素分别建立神经网络模型，并对两种网络的预测能力进行对比，结果发现：输入因素筛选后的神经网络模型虽然输入节点数变少了，但是其预测精度反而要比筛选前的神经网络模型预测精度要有所提高，证明了该方法是可行的。

鉴于此，本文也尝试着对神经网络输入层节点进行筛选，期望能够筛选出来影响原油腐蚀性的主要因素，同时提高神经网络的预测精度。高大文等人提出的神经网络输入节点筛选规则为：(1)输入层节点与隐含层节点间的连接权值占该隐含层节点总的权值的百分数 $\geq -\ln(3.30n-15.2)+9.2$ ， n 为输入层节点数；(2)满足条件(1)的输入层节点在各隐含层节点中的出现次数必须 $\geq 1/2$ 隐含层节点数。对输入因素进行筛选，凡同时满足以上两条规则的输入因素将被保留。

具体实现过程为：首先借助于上一节中已经建立的预测结果最好的 GA-BP 神经网络，采用神经网络输入节点筛选规则对输入因素进行了筛选，最终从 18 个影响因素中筛选出来了原油腐蚀性影响最大的 9 个主要因素，它们分别是：原油的基本性质（包括：粘度（ mm^2/s ）、硫含量（m%）、水含量（m%）、Fe 含量（ppm）、Cu 含量（ppm）、V 含量（ppm）、Na 含量（ppm））和腐蚀环境因素（温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）、流速（m/s））。然后再以这 9 个影响因素作为输入层的输入重新建立了神经网络模型，在隐含层节点数选取时仍采用了上一节中的寻找方法，最后发现当节点数选取 10 个时网络的预测精度最高，因此该节中建立的神经网络拓扑结构为 9-10-1 型的 GA-BP 神经网络。该网络预测值与实际值的相关系数 R 如图 3-9（d）所示，为了便于与上一节中建立的 35 个输入因素的神经网络预测结果进行比较，把上一节中三种网络的相关系数图也放在了图 3-9 中。



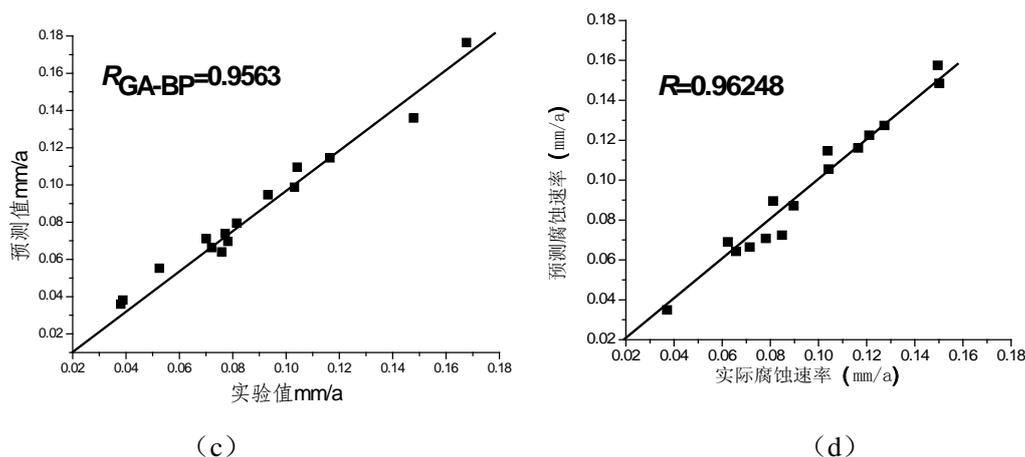


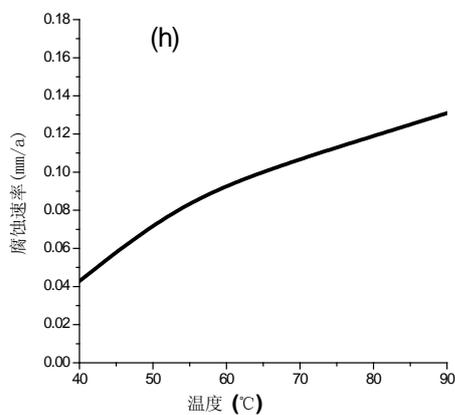
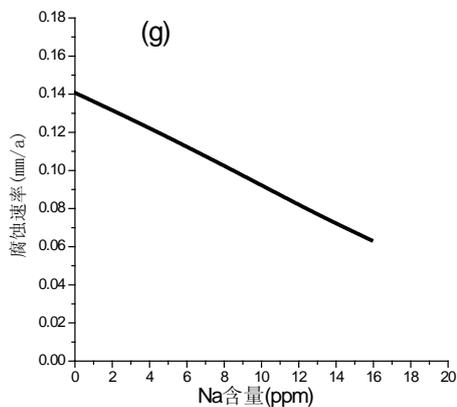
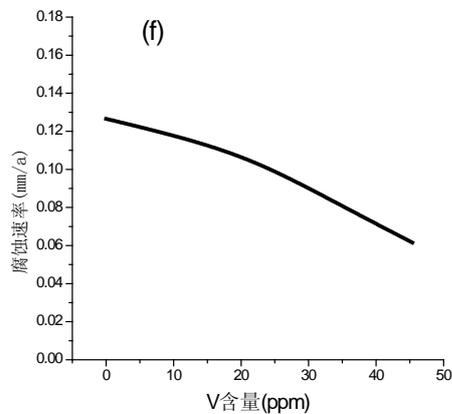
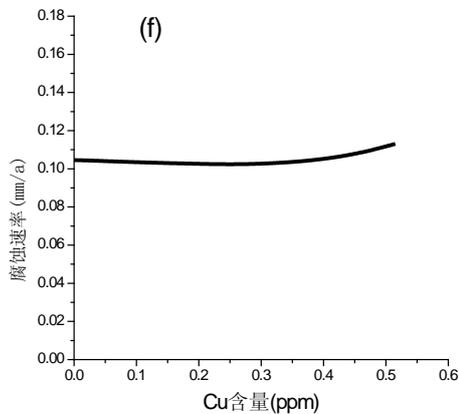
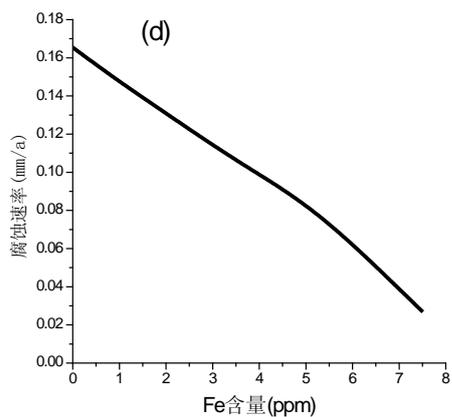
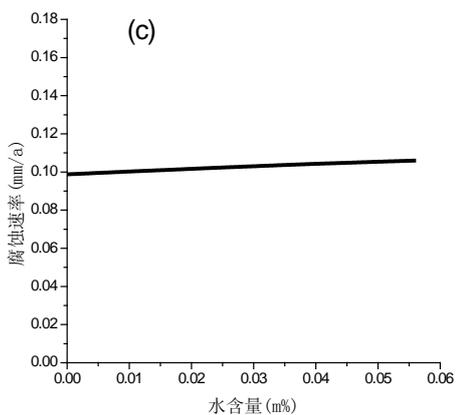
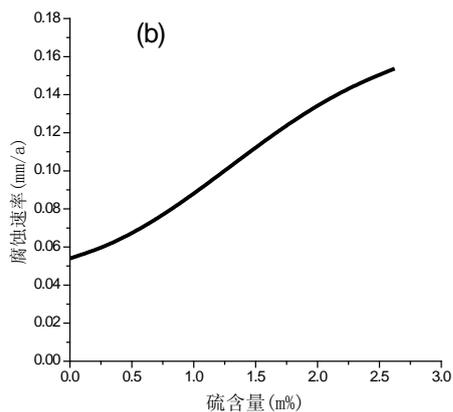
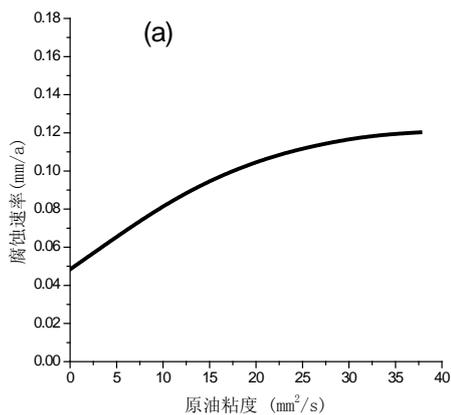
图 3-9 四种神经网络模型预测值与实验值的关系

Fig3-9 Correlation between actual and predicted corrosion rate

图 3-9 中的四幅图，横坐标分别表示实际的腐蚀速率，纵坐标表示各自网络的预测腐蚀速率，当预测值与实际值越相近时，数据点就越靠近图中 $y=x$ 的直线。对比(a)、(b)、(c)和(d)四幅图，能够看出(c)和(d)两幅图中的点要比(a)和(b)中的点更紧密的聚集在图中直线的周围，这说明(c)和(d)中的神经网络模型预测精度明显高于(a)和(b)中的神经网络。而从(c)和(d)中的相关系数数值可以看出，(d)图中的相关系数要略高于(c)图中的相关系数，因此可以说明通过节点删除规则对神经网络的输入节点进行删除后建立的网络预测精度反而提高了。

在上面的内容中我们借助于神经网络输入节点删除规则，对影响原油腐蚀的主要因素进行了筛选，使用筛选出来的因素重新建立了网络对腐蚀速率进行了预测。这些影响原油腐蚀性的主要因素对原油腐蚀速率的影响规律目前还不清楚，接下来我们将借助于新建立的神经网络对影响原油腐蚀性的单一因素进行敏感性分析，研究它们对原油腐蚀性的影响规律。

首先将 7 个产地的原油（分别为：卡宾达原油、杰诺原油、奎都原油、曼吉原油、阿曼原油、阿拉伯中质原油和巴士拉中质原油）的各主要影响因素分别取平均值。当要研究某个因素对原油腐蚀性的影响时，首先把要研究的该因素在其平均值位置增减 100% 的范围内变化（温度变化范围为实际模拟的温度范围 $40^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ ）如表 3-12 所示，而把其他影响因素固定在其平均值的位置，考察该因素对原油腐蚀性的影响。各因素对原油腐蚀性的影响规律如图 3-10 所示。



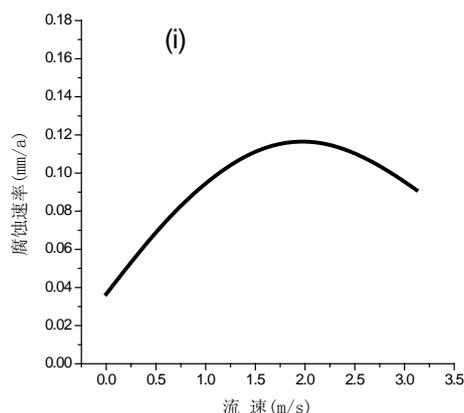


图 3-10 各因素对原油腐蚀性的影响规律

Fig3-10 Effect of single factor to crude oil corrosion rate

图 3-10 (a)表示的是粘度对原油腐蚀性的影响，可以看出随着原油粘度的增加原油对钢材的腐蚀速率也是增加的。图 3-10 (b)表示的是硫含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着硫含量的增加钢材的腐蚀速率较为迅速地增加，这说明了原油中的硫化物增强了原油的腐蚀性。图 3-10 (c)表示的是原油中水含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着水含量的增加腐蚀速率略有增加，而且从图中的横坐标能够看出原油中水含量是非常低的，这是因为原油在进行储运之前已经进行了脱水处理，因此原油中的水含量对原油腐蚀性的影响就不太明显了。图 3-10 (d)表示的是 Fe 含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着原油中 Fe 含量的增加，原油的腐蚀性是减弱的。分析具体原因，这可能是当原油中含有较多的 Fe 元素时，原油中的腐蚀性介质将与其发生反应，从而能够消耗掉原油中大量的腐蚀性介质，而原油中的 Fe 含量越高消耗掉的腐蚀性介质越多，因此表现为原油中 Fe 含量越高，原油的腐蚀性越平和。图 3-10 (e)表示的是 Cu 含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着原油中 Cu 含量的增加腐蚀速率略有增加。图 3-10 (f)表示的是 V 含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着原油中 V 含量的增加原油对钢材的腐蚀速率迅速地降低了，这说明 V 能够抑制原油对金属的腐蚀，这跟 Hernandez,S 等人得到的结论是一致的^[68]。已有学者证明了 V 等物质的存在，能够帮助原油湿润金属表面，由于原油覆盖了金属表面，就能够抑制腐蚀介质与金属接触，从而达到了抑制腐蚀的作用。图 3-10 (g)表示的是 Na 含量对原油腐蚀性的影响，可以看出随着原油中 Na 含量的增加，腐蚀速率也表现为较迅速地降低，这可能是 Na 对原油湿润金属表面也具有促进作用。图 3-10 (h)表示的是温度对原油腐蚀性的影响，可以看出随着温度的升高原油对金属的腐蚀速率逐渐增大，这是因为化学反应的速度会随着温度的升高而逐渐加快。同

样，在本章 3.1.2 节中，我们已经通过实验手段研究了温度对原油腐蚀性的影响，得出的结论与本节中的结论是一致的（见图 3-3），这也再次证明了该节中建立的网络模型是可信的。图 3-10 (i)表示的是流速对原油腐蚀性的影响，值得注意的是，不同于以上因素对原油腐蚀速率的影响都是呈现出单调递增或单调递减的变化规律，而流速对原油腐蚀性的影响却表现出先增加后降低的变化规律。从图中可以看出，腐蚀速率首先随着流速的增加而增加，当流速达到 2m/s 左右时腐蚀速率达到了最大值，随后随着流速的继续增大腐蚀速率却又表现为逐渐降低的趋势。同样，这跟本章 3.1.2 节中的结论也是一致的（见图 3-4 所示）。这是因为随着流速增大将会加大 Fe^{2+} 和电荷的转移速度，同时也增大对金属表面的冲蚀作用^[69]，因此腐蚀速率随之增大；但同时 Vera 等人^[70]认为，高流速有可能通过影响 Fe^{2+} 溶解动力学和腐蚀产物的形核过程，形成一个更具保护性的薄膜，从而抑制了腐蚀的进行。因此当这两方面的原因相互作用时，就会表现为：在低流速范围内随着流速增大腐蚀速率增大，当流速达到一定值后，形成了更具保护性的薄膜，腐蚀速率随后又会逐渐降低。

表 3-12 各因素的变化区间及其对腐蚀速率的影响

Table3-12 Variation range of the factors and effect on corrosion rate

影响因素	平均值	变化范围 (-100%-100%)	腐蚀速率(CR)		
			CR_{max}	CR_{min}	ΔCR
粘度 mm ² /s	18.840	0~37.68	0.1203	0.0484	0.0719
硫含量 m%	1.304	0~2.608	0.1533	0.0540	0.0993
水含量 m%	0.028	0~0.0558	0.106	0.0988	0.0072
Fe(ppm)	3.739	0~7.478	0.1654	0.0275	0.1379
Cu(ppm)	0.256	0~0.5122	0.1128	0.1024	0.0104
V(ppm)	22.679	0~45.358	0.1266	0.0616	0.065
Na(ppm)	7.943	0~15.886	0.1408	0.0634	0.0774
温度 °C	66.500	40~90	0.1347	0.0426	0.0921
流速 m/s	1.500	0~3	0.1169	0.0366	0.0803

附注： CR_{max} 表示某一因素在其变化区间变化时腐蚀速率所能取到的最大值；

CR_{min} 表示某一因素在其变化区间变化时腐蚀速率所能取到的最小值；

ΔCR 表示某一因素在其变化区间变化时腐蚀速率所能取到的最大值与最小值之差，即

$$\Delta CR = CR_{max} - CR_{min}$$

最后，我们对筛选出来的主要影响因素根据它们对原油腐蚀性的大小进行排序，从表 3-12 中 ΔCR 值的大小能够很容易的看出：在模拟的原油对钢材的腐蚀环境中，各因素在各自限定的范围内对原油腐蚀性的影响从大到小依次为：原油中的 Fe 含量、硫含

量、温度、流速、Na 含量、粘度、V 含量、Cu 含量、水含量。该结论的获得，为今后有针对性的预防原油腐蚀问题提供了一定的参考。

3.4 本章小结

为了研究原油的腐蚀性，首先选定了 7 种原油（包括：卡宾达、杰诺、奎都、曼吉、阿曼、阿拉伯中质、巴士拉中质），对其理化性质进行了测量，主要的参量包括：API 度、密度、粘度、凝点、硫含量、水含量、盐含量、酸值、胶质含量、沥青质含量、蜡含量、Fe 含量、Ni 含量、Cu 含量、V 含量、Na 含量等。然后采用挂片失重实验方法通过控制不同的实验参数对选定的原油进行了腐蚀实验，并测量了原油对钢材的腐蚀速率，得到了 70 组实验数据。接着在实验测量的基础上，建立了三种不同的神经网络（BP 神经网络、GA 神经网络和 GA-BP 神经网络）类型，分别对原油的腐蚀速率进行了预测，通过对比发现 GA-BP 神经网络的预测精度相比于 BP 神经网络和 GA 神经网络有了很大提高，因此本文中最终采用了 GA-BP 神经网络对原油的腐蚀速率进行预测。考虑到过多的输入因素引入网络会使网络变得臃肿，影响网络的预测精度。借助于神经网络节点删除规则对影响原油腐蚀性的因素进行了筛选，从最初的 18 个变量中筛选出来 9 个变量重新建立了神经网络模型，并对原油腐蚀速率进行了预测。通过对比发现，节点筛选后的神经网络的预测精度要比筛选前有了明显的提高。最后对影响原油腐蚀的因素进行了敏感性分析，并对影响原油腐蚀的因素根据影响大小从高到低进行了排序，为今后有针对性的预防原油腐蚀问题提供了一定的参考。

第四章 输油管道剩余寿命预测与预测软件开发

4.1 研究背景及意义

由于输油管道长期埋置于地下，会受到内在（管道自身的缺陷、老化，管道自身的划痕、擦痕、蚌眼、凹坑等机械损伤）和外在（人为破坏、自然灾害和腐蚀作用，主要包括：土壤中的细菌腐蚀、原电池腐蚀和杂散电流的腐蚀以及管道中输送流体中的腐蚀性介质对管道造成的腐蚀）等多方面的影响^[71]，都会严重威胁管道安全，减少管道使用寿命。

在影响管道安全的诸多因素中，内壁腐蚀和外壁腐蚀是困扰管道安全的主要因素，管道埋地后最终导致其报废的因素总是腐蚀。有数据表明利用现有技术，可以减少30%的金属腐蚀损失，最大程度的减小了腐蚀的危害，其经济意义、社会意义都是非常巨大的。针对管道内外壁的腐蚀问题，国内外很多学者提出了多种防护方法。对于外壁的腐蚀问题，目前较为常用的管道防护方法为防腐涂层与阴极保护相结合的双重保护措施。由于管道内壁腐蚀主要是由输送介质中含有的腐蚀性介质引起的腐蚀和流体引起的冲刷腐蚀，因此对于内壁的腐蚀问题，目前较为常用的防护方法为在输送流体中添加缓蚀剂并对管道内壁涂装防护层。采用防护手段虽然可以较好的减轻管道腐蚀危害，但是由于在现场施工过程中施工工艺的好坏，缓蚀剂的添加手段选择以及缓蚀剂缓蚀效果优劣都不太容易控制，再加上防护涂层随着使用年限的增加会发生老化破裂甚至产生剥离现象等，由于多方面的不确定性目前来说管道的腐蚀问题还是依然很严重。

管道因腐蚀会造成管道壁厚减薄，由于管道都是在较大载荷下运行的，当壁厚将至不能承受运行压力时，管道将发生破裂，导致管道失效；同时管道由于局部腐蚀还会造成管道穿孔泄露。腐蚀会导致管道的破坏从而引发诸如火灾、爆炸、有毒气体泄漏等事故的发生，不仅造成了巨大的经济损失和环境破坏，甚至还会威胁到生命的安全，因此必须对管道腐蚀予以高度重视。

尤其是带有腐蚀缺陷的管道在后期运行过程中，管道破裂泄漏事故更是经常发生，如果不能及时了解管道的腐蚀情况，不能及时掌握管道的安全状况，管道一旦破裂，将会产生非常恶劣的后果，带来巨大的财产损失，甚至威胁人员的生命安全。最保守的保证管道安全运营的方法为提前更换存在缺陷的管道，但是过早的更换缺陷管道，将会带来巨大的资源浪费。

如果能够对管道的安全运行寿命进行预测,那么将可以在最大限度上延长了管道的更换或维修周期,节约了资源减少了工作量,将具有非常重要的经济意义。正是如此,以预测管道剩余寿命为核心的管道安全评价工程,受到了国内外众多研究机构和管道公司重视,逐渐成为了研究管道安全的热点。

如果能够把建立的缺陷管道腐蚀剩余寿命预测模型,通过计算机软件来实现界面化操作,将大大的方便了管道管理者对管道的管理。随着计算机技术的高速发展,为管道的寿命预测软件实现提供了可能。如今,国内外研究人员已经建立了大量的管道腐蚀速率预测和缺陷管道腐蚀剩余寿命预测的专家系统,例如 Fishcher 等开发的 CORROS 预测软件,能够用于对金属材料/水、低合金钢/土壤体系的腐蚀行为预测; N. R. Smart 等开发的 ACHILLES 系统,能够用于有关材料腐蚀与防护以及事故分析等领域;霍尼韦尔公司开发的 PREDICT 软件不仅能够对油气管道的腐蚀问题进行预测而且还能够预测管道的腐蚀剩余寿命,已经在世界范围内的多家油田单位得到了成功应用并取得了不错的效果。因此开发管道腐蚀预测专家系统,对管道腐蚀缺陷发展规律进行模拟并对管道剩余寿命做出评估将成为今后发展的趋势。采用管道专家系统不仅提高了管道管理效率而且还降低了管道检测的频率,节约了管理成本。

4.2 常用的管道剩余强度与剩余寿命预测方法

油气管线腐蚀剩余寿命预测的基本思想就是:首先借助于适当的数值分析方法建立起来相对应的管道腐蚀速率预测模型,对管道的腐蚀发展变化趋势进行预测;然后结合管道强度评价原则,来回答管线按当前腐蚀发展趋势还能够安全运行多久的问题,管道腐蚀剩余寿命预测是管道安全领域中较高层次的研究范畴。因此可以说,对存在腐蚀缺陷的管道进行剩余寿命预测,对保证管道的安全运行,避免重大事故的发生,最大程度地降低维修费用等都具有非常积极的意义。管道腐蚀剩余寿命预测是管道安全领域中一项非常重要的工作,并拥有着广阔的应用前景。

设备的极限状态定义如下^[72]:整个设备或设备的一部分超过了设备正常运行所需要的特定状态,而导致设备失去了某一特定的功能,那么该特定状态就是设备的极限状态。同样,含有腐蚀缺陷管道的剩余寿命可以这样描述:在整条管道或管道的某一特定的位置,管道缺陷因腐蚀而发展到某一状态,那么管道的强度将会下降到一个较低的程度,当管道剩余的强度水平低于管道正常运行所需要的最低强度要求时,管道就会出现爆破等事故发生。管道所对应的这一强度状态称之为腐蚀缺陷管道的极限强度状态,通过管

道的腐蚀缺陷状态来确定所对应的管道极限强度状态过程就是管道剩余强度评价；而缺陷管道腐蚀剩余寿命预测就是采用管道剩余强度评价的方法首先确定管道的极限缺陷状态，然后再根据管道当前缺陷的状态和管道的腐蚀发展趋势来回答管道还能够安全运行多久的问题。

有关剩余强度评价及剩余寿命预测的方法很多，其中应用比较广泛的主要包括：美国机械工程师协会评价腐蚀管线剩余强度的 B31G 准则，该准则是应用最为广泛的评价方法，但是该方法对剩余强度的评价较为保守，该协会针对 B31G 准则的保守性，多次对其进行了修正；API 579“Fitness-For-Service”管道安全适应性评估做法，该评估方法也是基于 B31G 准则同时考虑了管道的轴向载荷、腐蚀宽度、弯矩以及腐蚀缺陷螺旋角等对管道安全的影响；另外目前应用较多的评估方法还包括基于弹塑性理论极限的分析方法、有限元分析方法和基于可靠性理论的管道安全性评价方法等。

下面，针对目前应用较多的一些方法将作一个简单的介绍：

4.2.1 ASME/ANSI B31G 准则及其优缺点

B31G 准则最早是由德克萨斯州东部运输公司和 AGA 管道设计委员会共同提出来的^[73]。在该准则中规定，当腐蚀深度 d 大于壁厚的 80% 时管道将会失效，因为当达到该深度时，将会直接导致管道泄露事故的发生。因此，该准则评价的管道缺陷深度范围是 $[0-0.8t]$ 之间的管道缺陷，在该区域内管道允许最大运行压力表达式为：

$$P_f = \sigma_f \frac{2t}{D_0} \left[\frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} M_T} \right] \quad (4-1)$$

其中：

P_f ——管道允许最大运行压力，MPa；

σ_f ——管道流变强度，MPa；

D_0 ——管道外径，mm；

t ——管道壁厚，mm；

d ——腐蚀缺陷深度，mm；

M_T ——Folias 因子。

管道允许最大运行压力表示：当管道的实际运行压力小于或等于该值时，含有腐蚀缺陷的管子是可以继续使用，否则，管道将会发生破裂，必须对其进行修理或更换新的

管道。在实际应用中发现, B31G 准则对带有轴向裂纹或轴向腐蚀缺陷的管道具有较好的评价效果。但是该准则却具有一定的保守性, 尤其是对环向腐蚀缺陷尺寸很大或具有螺旋腐蚀以及焊缝腐蚀的管道进行评价时, 评价结果不是太好。针对 B31G 的保守性, 美国天然气协会的 Kiefner 等人于 1989 年对 B31G 准则做了以下的修正: 考虑把流变强度值设为屈服极限值加上 68.95MPa, 即:

$$\sigma_f = \sigma_{ys} + 68.95 \quad (4-2)$$

其中: σ_{ys} ——管材屈服极限, MPa。

同时把 Folias 因子的表达式修改为:

当 $\left(\frac{l}{\sqrt{D_0 t}}\right)^2 \leq 50.0$ 时,

$$M_T = \sqrt{1 + 0.6275 \left(\frac{l}{\sqrt{D_0 t}}\right)^2 - 0.003375 \left(\frac{l}{\sqrt{D_0 t}}\right)^4}; \quad (4-3)$$

当 $\left(\frac{l}{\sqrt{D_0 t}}\right)^2 > 50.0$ 时,

$$M_T = 0.032 \left(\frac{l}{\sqrt{D_0 t}}\right)^2 + 3.3 \quad (4-4)$$

其中: l ——腐蚀缺陷长度, mm。

4.2.2 API 579 准则

API 579 首先是使用在炼化企业中的, 它是根据炼化厂中压力设备对服役适应性评价(Fitness-For-Service)的需要而发展得来的^[74]。API 579 准则是在改进的 B31G 基础上, 同时考虑了相邻缺陷和附加载荷的相互影响, 为带有腐蚀缺陷的压力容器设备剩余强度评价和剩余寿命预测提供了更为准确的方法。API 579 服役适应性评价方法对设备的剩余强度采取了分级评价的方法, 设置了三级评价的体系。第一级评价是最简单的评价方法, 所需要的设备缺陷信息最少, 当然这种评价方法也是最为保守。第二级评价方法相对于第一级评价要复杂得多, 对评价人员的素质要求也较高, 需要专门的评价工程师或在设备服役适应性(FFS)评价领域具有丰富经验的专家来完成, 采用该方法得到的评价结果要比第一级评价更为准确。第三级评价是最为详细的评价方法, 得到的评价结果比第二级评价结果还要准确, 但是第三级的评价对设备的缺陷信息要求更为详细对评价人员的基本素质要求更高。

4.2.3 腐蚀管道评估的推荐作法(SY/T10048-2003)

我国的管道腐蚀缺陷评价方法形成的较晚,最早的是中国海洋石油总公司在 2003 年制定的《腐蚀管道评估的推荐作法》标准,该标准是在借鉴了挪威船级社 DNVRP-101 的基础上制定出来的,主要是用在海底管道的适应性评价,评价效果等同于 DNVRP-101。《腐蚀管道评估的推荐作法》标准的评价方法最大的特点是它采用了两种安全原理完全不同的腐蚀管道评估方法,这两种方法在具体评估过程中评价者可以根据需要来选择^[75]。

4.3 管道腐蚀剩余寿命预测模型的建立

4.3.1 腐蚀剩余寿命预测的原则

由上一节已知,油气管线腐蚀剩余寿命预测的基本思想就是:首先借助于管道腐蚀速率预测模型,对管道的腐蚀发展变化趋势进行预测;然后结合管道强度评价原则,来回答管线按当前腐蚀发展趋势还能够安全运行多久的问题。

因而管道腐蚀剩余寿命预测评估的基本原则是:在保证管道所有区段安全前提下的对运行时间的预测。即解决从当前壁厚条件下开始算起达到管道最小允许剩余壁厚 t_{\min} 时所花费的时间的问题,改时间就是管线的剩余使用寿命 T 。

4.3.2 腐蚀剩余寿命预测的基本步骤

在进行缺陷管道腐蚀剩余寿命预测时一般需要做准备工作包括:

1 基本数据的收集

主要包括管道腐蚀缺陷区域的初始尺寸形状,管道操作运行相关的参数(管道最大允许压力、实际操作压力、运行温度等),以及管道的材质参数和设计参数(最小屈服极限、流变应力、焊缝系数等)。

2 腐蚀检测结果的分析

根据管道缺陷检测得到的原始数据,对原始数据进行处理,得出可以直接进行管道剩余寿命预测所需要的缺陷尺寸数据及相关参数。

3 使用状态和剩余寿命的预测

根据实际检测得到的数据和对检测结果的分析,评价管道的腐蚀程度和现在所处的状态,找出腐蚀缺陷尺寸的发展规律(建立预测腐蚀缺陷尺寸发展的模型)和发展速度(腐蚀速率)。然后根据检测得到的管道当前状态和缺陷发展趋势结合相应的强度评价准则

进行剩余寿命的预测。

当以上的准备工作都进行后，即可以对管道的剩余寿命进行预测了。根据管道剩余寿命预测的基本思想，寿命预测的流程可以用图 4-1 来表示。

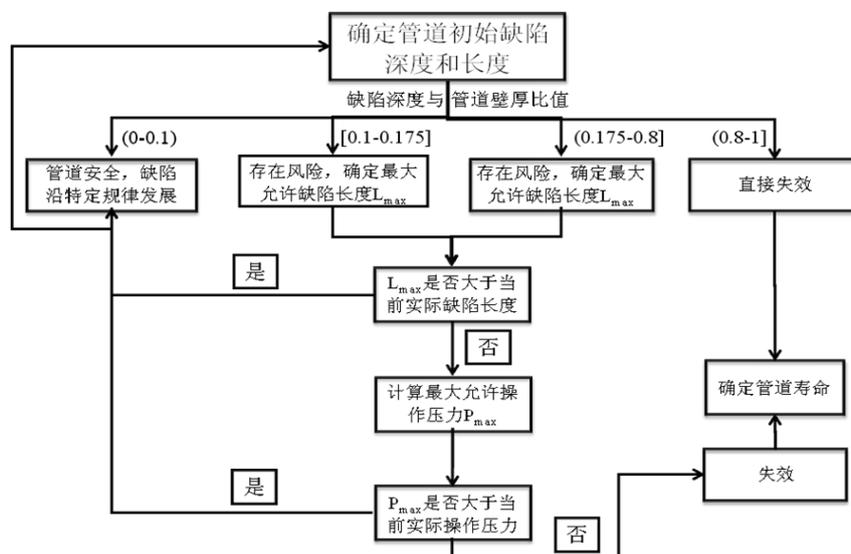


图4-1 管道腐蚀剩余寿命预测流程

Fig4-1 Forecasting process of remaining life of pipeline corrosion

从图 4-1 中的流程可以看出，进行管道剩余寿命预测前，要先确定管道腐蚀缺陷的初始尺寸（包括腐蚀深度与腐蚀长度），然后对缺陷发展的趋势进行预测。根据当前确定的管道腐蚀缺陷深度 d 与管道实际壁厚 t 的比值，把管道所处的状态分为四类区间：

(1) 当 $0 < d/t < 0.1$ 时，管道安全；(2) 当 $0.1 \leq d/t \leq 0.175$ 时，管道存在风险；(3) 当 $0.175 < d/t \leq 0.8$ 时，管道存在风险；(4) 当 $0.8 < d/t \leq 1$ 时，管道直接失效。由此可知，当 d/t 处于第一类区间时，管道将能够按照当前的缺陷发展趋势继续运行，并不需要对管道的寿命进行预测，直到管道缺陷发展到一定程度使得 d/t 处于后三类区间的任意一个时；当 d/t 处于第二或第三类区间时，管道将有发生失效的可能，需要分别计算管道的最大允许缺陷长度和最大允许操作压力根据剩余强度准则对剩余寿命进行预测，应当注意第二和第三类区间中最大允许缺陷长度的计算方法是不同的；当 d/t 处于第四类区间时，管道将直接失效，不必再计算管道的剩余寿命。

管道最大允许缺陷长度按如下公式计算：

当 $0.1 \leq d/t \leq 0.175$ 时，

管道最大允许缺陷长度：

$$L_{\max} = 4.48(Dt)^{1/2} \quad (4-5)$$

当 $0.175 < d/t \leq 0.8$ 时，

管道最大允许缺陷长度：

$$L_{\max} = 1.12B(Dt)^{1/2} \quad (4-6)$$

$$\text{其中， } B = \sqrt{\left(\frac{d/t}{1.1d/t - 0.15}\right)^2 - 1} \quad (4-7)$$

管道允许最大操作压力 P_{\max} 的计算公式如下：

$$P_{\max} = 0.5 \left[\left(\frac{D_i + 2t}{D_i} \right)^2 - 1 \right] \times \left[(\sigma_s + 68.95) \cdot \frac{1 - 0.85d/t}{1 - 0.85(d/t) \cdot M^{-1}} - \sigma_h \right] \quad (4-8)$$

$$\text{其中， } \sigma_h = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{2(1-\nu)} \left[\frac{1}{\ln \frac{D_i + 2t}{D_i}} - \frac{2}{\left(\frac{D_i + 2t}{D_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (4-9)$$

而 M 计算公式如下：

当 $z = \left(\frac{L_{\max}}{\sqrt{Dt}} \right)^2 \leq 50.0$ 时，

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \cdot z - 0.003375 \cdot z^2} \quad (4-10)$$

当 $z = \left(\frac{L_{\max}}{\sqrt{Dt}} \right)^2 > 50.0$ 时，

$$M_T = 0.032 \cdot z + 3.3 \quad (4-11)$$

P_L 管道运行压力，计算公式如下：

$$P_L = P_0 - P_s - \Delta z \quad (4-12)$$

其中，

$$P_s = \rho g h_t / 10^6 \quad (4-13)$$

$$h_t = \lambda \frac{100L}{D_i} \frac{V^2}{2g} \quad (4-14)$$

$$\text{Re} = \frac{VD_i}{100\nu_0} \quad (4-15)$$

当 $\text{Re} < 2000$ 时，

$$\lambda = f(\text{Re}) = 64 / \text{Re} \quad (4-16)$$

当 $2000 < \text{Re} < 10^5$ 时,

$$\lambda = 0.3164 \text{Re}^{-0.25} \quad (4-17)$$

当 $\text{Re} > 10^5$ 时,

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \lg(\text{Re}) - 1.53 \quad (4-18)$$

P_0 ——泵站出口压力值;

P_s ——为沿程磨阻压降,

那么管道的腐蚀剩余寿命即可表示为:

$$y = (d - d_0) / R_{\text{corrosion}} \quad (4-19)$$

其中:

d —管道适时腐蚀缺陷深度 mm; t —管道壁厚 mm;

D —管道外直径 mm; D_i —管道内直径 mm; σ_s —材料屈服强度;

E —材料弹性模量; ΔT —管道内外温度差, $\Delta T = T_{\text{in}} - T_{\text{out}}$; ν —管材泊松比;

α —热膨胀系数; L —管道测试点距加压站距离, V —流速, g —重力加速度; λ —水力磨阻系数, ν_0 —油品运动粘度, ρ —油品密度; Δz —势能消耗; $\Delta z = \rho gh / 10^6$, h —

泵站到测试点的垂直距离即: $h = h_{\text{测}} - h_{\text{泵}}$;

d_0 —管道初始缺陷深度 mm; $R_{\text{corrosion}}$ —管道的腐蚀速率; y —腐蚀剩余寿命 a。

以上便是对管道腐蚀剩余寿命预测的整个过程, 仅仅进行剩余寿命预测并不是最终的目的, 剩余寿命预测的最终目的是对管道的检测、修复周期进行指导。通过对管道腐蚀剩余寿命预测, 可以使管道管理者提前掌握管道的安全隐患, 对管道的安全生产具有积极的意义。

4.4 寿命预测软件开发

4.4.1 寿命预测软件研究现状

国际上对管道腐蚀寿命的预测越来越关注, 国内外研究人员根据不同的腐蚀类型, 建立了大量的腐蚀速率、腐蚀寿命预测模型和专家系统, 如 1989 年, Charles 等研制出了 CHEMCOR, 用于工程应用材料选择的咨询。例如 Fishcher 等开发的 CORROS 预测软件, 能够用于对金属材料/水、低合金钢/土壤体系的腐蚀行为预测; N.R.Smart 等开发的 ACHILLES 系统, 能够用于有关材料腐蚀与防护以及事故分析等领域; 霍尼韦尔公

司开发的 PREDICT 软件不仅能够对油气管道的腐蚀问题进行预测而且还能够预测管道的腐蚀剩余寿命,已经在世界范围内的多家油田单位得到了成功应用并取得了不错的效果。我国油气管道寿命预测与评价方面的研究起步较晚,但也取得了一定的研究成果,例如赵新伟和井一平等采用 TCP-FEM 数值分析方法和 TGRC-AR-SP 软件并结合全尺寸实验方法对克拉玛依—乌鲁木齐复线管道的腐蚀剩余强度进行了评价。

但是从目前研究的总体情况来看,油气管道腐蚀剩余寿命预测方面的研究还存在着以下几方面的不足:一是研究本身缺乏系统性,到目前为止尚未建立起来比较规范的、统一的研究准则,已有的准则都是基于经验模型得到的;二是已建立的寿命预测模型本身都存在着或多或少的缺陷,大部分的模型考虑影响因素比较简单,与在现场实际腐蚀环境存在着较大的差异;三是剩余寿命预测在其可靠性和经济性方面还有待于进一步提高。因此深入系统地开展油气管道腐蚀寿命预测和安全评价并开发相关软件具有重要意义。

4.4.2 软件开发工具及语言介绍

本文中的寿命预测软件是基于 Microsoft Access 和 Visual Studio 集成开发环境下开发出来的,采用了 SQL 和 C#语言对程序进行编写。

Microsoft Access 简介

Microsoft Access 能够存取 Microsoft SQL Server、Access/Jet、Oracle (甲骨文软件公司),或者任何 ODBC 兼容数据库内的资料。Microsoft Access 主要的优点为:

- (1)存储方式单一;
- (2)面向对象的新版操作界面;
- (3)界面友好、易操作;
- (4)Access 支持 ODBC (即 Open Data Base Connectivity, 开发数据库互连)。

Visual Studio 简介

Visual Studio 是一套完整的开发工具集,可以生成 XML Web Services、ASP.NET Web 应用程序、移动应用程序和桌面应用程序等。目前应用非常普遍的 Visual Basic、Visual C++、Visual C#和 Visual J#等都可以使用该开发工具进行程序开发。

C #(C Sharp)语言简介

C#(C Sharp)是微软公司(Microsoft)为.NET Framework 量身订做的程序语言,该语言不仅具有 C/C++强大的功能而且还具有 Visual Basic 简洁易用的优点,它不但是对象导

向(object-oriented)的程序语言而且还是第一个组件导向(Component-oriented)的程序语言。

SQL 语言简介

SQL 即为结构化查询语言(Structured Query Language),它最早是由 IBM 公司的圣约瑟研究实验室为其数据库管理系统开发的一种查询语言,即 SQUARE 语言。SQL 是高级的非过程化编程语言,允许用户在高层数据结构上工作。它不要求用户对数据指定存放方法和数据存放方式,因此它拥有着完全不同于底层结构的数据库系统。SQL 语言具有着功能强大、结构简洁、简单易学等诸多优点,因此自从推出以来,就得到了广泛的应用。

4.4.3 腐蚀预测软件的总体设计

本软件的开发使用了 Visual Studio C#和 Microsoft Office Access 等开发工具,首先基于 BP 神经网络建立了预测模型,并对输油管道的腐蚀速率进行预测;然后使用管道剩余强度评价方法并结合管道腐蚀速率预测结果建立了管道腐蚀剩余寿命预测模型,对管道剩余寿命进行了预测。同时考虑到管道内腐蚀和外腐蚀的差异性,分别建立了管道内腐蚀和外腐蚀寿命预测模型。由于不同产地的原油其基本性质差别较大,通过收集不同原油的信息,建立了原油性质及其腐蚀性数据库,该数据库可以实现对原油信息的检索与编辑。在对原油腐蚀性进行预测时,能够通过对数据库进行调用直接得到要研究的某类原油的腐蚀性相关信息。

软件由三层架构组成,分别为系统层、功能层及界面层。系统层主要是实现软件的模块化和可扩展性,功能层主要为预测模型功能的编程实现,界面层是面向用户,提供友好的交互操作界面。软件主要包括三个模块:原油信息库模块、原油腐蚀速率预测模块、输油管线剩余寿命预测模块。其中原油信息库模块、原油腐蚀速率预测模块和输油管线剩余寿命预测模块这三个模块互相之间通过原油数据库和 BP 神经网络进行通信,共享信息库和预测函数核心。本软件开发采用了先进的软件技术,提供了一个基于全面实验与理论上腐蚀速率预测和剩余寿命预测的决策。图 4-2 即为软件的主体框架图。

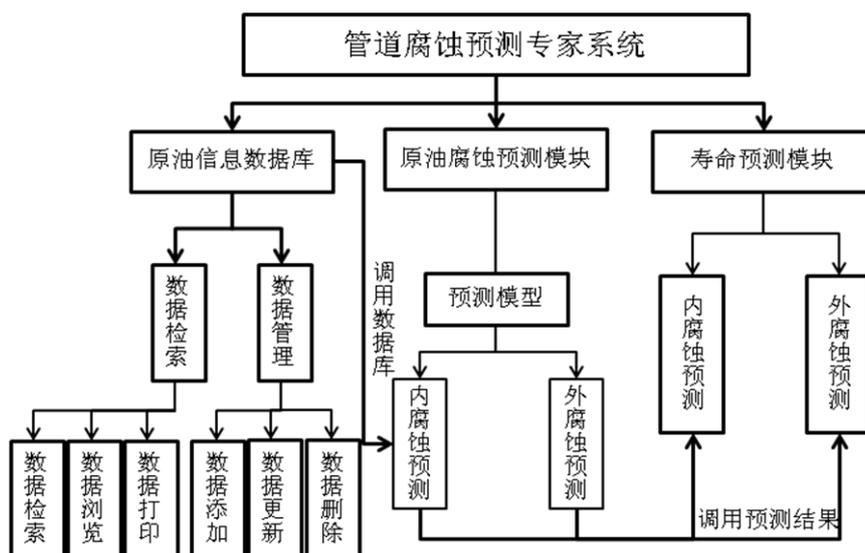


图4-2 专家系统总体结构图

Fig4-2 The total structure of the expert system

4.4.4 腐蚀预测软件功能的实现

软件主界面



图 4-3 管线剩余寿命预测软件主界面

Fig4-3 The main interface of pipeline residual life prediction software

如图 4-3 所示，即为管线腐蚀预测软件主界面。从图中可以看出，软件主界菜单栏上主要包括：原油信息库、原油腐蚀数据、寿命预测、成本预测和帮助模块，用户通过鼠标点击菜单栏上模块就可以迅速进入软件的该模块中，另外软件的帮助模块，能够帮助软件的使用者迅速地了解该软件，并掌握其使用方法。

原油信息数据库模块

在第二章研究原油对管道腐蚀的时候,发现原油的性质对管道的内腐蚀影响是非常大的,比如原油的硫含量、pH 值、金属离子含量、粘度等。通常情况下,在输油管道在运行过程中,要输送多种原油,原油由于产地的不同,性质会有很大的差别,而原油的性质信息又是对原油腐蚀性进行预测的重要依据。如果能够建立起来一个原油的信息数据库,用户需要了解某种原油的性质信息只需要在软件中输入该种原油的名称,将能够检索到该类原有的信息,极大地方便了用户对原油的管理。当需要对某种原油的腐蚀性进行预测时,也可以通过软件中的数据库调用原油的信息对腐蚀性进行预测。基于以上考虑,对原油性质信息建立一个数据库进行数据的存储、更新、调用是十分必要和有意义的。原油数据库是基于 Microsoft Access 建立的,主要存储了原油性质信息,包括 API、密度、粘度、凝点、硫含量、水含量、盐含量、酸值、胶质、沥青质、蜡含量等信息。这些数据将被软件调用对原油腐蚀性进行预测,并结合环境变量对影响腐蚀速率的因素进行分析。如图 4-4、图 4-5 所示,分别表示原油信息数据库检索模块和原油信息数据库管理模块。



图 4-4 原油信息数据库检索模块



图 4-5 原油信息数据库管理模块

Fig4-4 Oil information database retrieval module Fig4-5 Oil information database management module

在原油信息数据库检索界面(如图 4-4)上,可以通过在检索框中输入原油名称来进行对数据库中的原油信息进行检索,也可以从列表中点击所需要查询的原油名称来获取它的性质信息。当数据库中数据相对较少的时候,也可从下拉框中直接选择需要查看的原油信息。本数据库中包括的原油的主要信息为:API、密度、凝点、油含量、水含量、盐含量、酸值、胶质、沥青质、蜡含量、Fe 含量、Ni 含量、Cu 含量、V 含量、Na 含量及相关附注说明。从该界面还可以直接浏览全部数据库中的原油信息,打印当前查看的原油信息。

当需要对当前原油数据进行修改更新时,可以通过管理操作进入数据库管理界面

(如图 4-5)。在原油信息数据库管理界面主要完成对数据库的管理，可以通过搜索引擎检索出需要管理的数据，该界面可以完成对数据的基本操作，如：添加、更新、删除及数据库浏览。在实际应用中，可以不断对新采集到的原油信息储存到数据库中，更新需要变动的数据。

腐蚀速率预测模块

在原油对管道的腐蚀速率预测中，采用的是已经建立的 BP 神经网络模型。具体实现过程为：首先在 MATLAB 环境下建立神经网络模型，对网络模型进行训练，并把训练好的模型保存，然后把模型导出再通过 C#语言编程实现网络模型的外部移植。整个功能原理是从界面输入或者调用网络需要的输入变量，通过调用人工神经网络模型对输入变量进行处理，最终输出预测结果。



图 4-6 原油腐蚀性预测模块

Fig4-6 oil corrosion rate module

原油腐蚀速率预测界面如图 4-6 所示，对于要预测原油的腐蚀性，可以通过，直接输入原油的性质参量对腐蚀速率进行预测；另外还可以通过 4-6(b)中的界面首先调用原油信息数据库中的原油性质信息同时输入原油所处的环境变量，也可以计算出原油对管道的腐蚀速率。

管道剩余寿命预测模块

管道剩余寿命预测模块分为内腐蚀剩余寿命预测（图 4-7）和外腐蚀剩余寿命预测（图 4-8）两个子模块。

软件管线内腐蚀剩余寿命预测部分主要实现基于内腐蚀管线剩余寿命预测。图 4-7 即为内腐蚀剩余寿命预测界面，从图中可以看出软件输入变量分为了四类：初始缺陷、管道参数、运行参数及油品参数。初始缺陷参数是可选参数，如果未知可以选择未知，即不需要输入初始缺陷深度和初始缺陷长度，寿命预测将根据初始缺陷的选择情况，选

择不同的预测流程对寿命进行预测。而管道参数中需要输入的参量主要为管道直径（即管道公称外径）、管道壁厚和管材类型等，其中管材类型是通过下拉框选择进行选择的，当选择了某种管材，相应的屈服极限强度、杨氏模量、热胀系数和泊松比等参量就能够从系统内存储的管材数据库中得出。运行参数主要是管道运行时涉及到的一些与腐蚀相关的量。油品参数主要有油品粘度、油品密度及原油腐蚀速率，这里腐蚀速率可以直接输入，或者调用数据库中的原油信息即可得到相应原油腐蚀速率。完成所有参量的填写即可计算得到管道剩余寿命预测结果。



图 4-7 管线内腐蚀剩余寿命预测模块

Fig4-7 Within the pipeline corrosion residual life prediction module

软件管线外腐蚀剩余寿命预测部分主要实现基于外腐蚀管线剩余寿命预测。在管道外腐蚀寿命预测中，对腐蚀速率的预测本文采用的建立的电化学模型。图 4-8 即为外腐蚀剩余寿命预测界面，它分三种情况对管道腐蚀剩余寿命进行预测，分别为：均匀腐蚀、局部腐蚀和点腐蚀。对于均匀腐蚀和局部腐蚀都涉及到计算允许最大腐蚀深度，因此对均匀腐蚀和局部腐蚀的计算所需要的变量基本上是一样的。而点腐蚀并不会造成管道的爆破，它的失效形式主要是造成管道的穿孔泄露，因此对于点腐蚀进行寿命预测时并不需要计算管道的最大允许缺陷深度，只需要计算管道的穿孔时间即可。

在点腐蚀寿命预测界面中，该软件还对管道的腐蚀速率随管道实时腐蚀深度的关系进行了曲线分析（见图 4-8(c)），从图中可以看出，随着腐蚀深度的增加，腐蚀速率逐渐降低。



(a) (b)



(c)

图 4-8 管线外腐蚀剩余寿命预测模块

Fig4-8 Outside the pipeline corrosion residual life prediction module

4.5 结论

(1) 基于压力管道剩余强度评价方法，并借助于人工神经网络系统和腐蚀电化学方法分别对管道的内外壁腐蚀速率预测的结果，建立起来了管道剩余寿命预测模型，可以用于预测管道的腐蚀剩余寿命。

(2) 采用 visual studio C#集成开发环境，开发了基于 Win32 平台的管线腐蚀预测专家系统。腐蚀剩余寿命预测软件实现了系统的可视化、人机交互能力和模块化，操作简单便捷。

(3) 软件对原油腐蚀速率预测时与实验值相比较结果偏差较小，对于原油腐蚀速率的预测具有较高的实用价值；软件对管线的剩余寿命预测，可以帮助用户对管道安全隐

患进行预测，在对管道的安全管理具有一定的参考价值。

(4) 由于理论知识和时间的限制，软件的预测能力未能完全经过实际检验，由于管线剩余寿命预测的复杂性，软件需要在实际应用中不断的加以改进。

结 论

本文根据输油管道的腐蚀问题，选定了不同产地的 7 种原油，利用挂片失重实验在实验室条件下模拟了原油对管道的腐蚀环境，通过改变不同的环境变量研究了原油性质对管道的腐蚀规律，测定了原油对管道的腐蚀速率，并建立了原油性质数据库。根据测得的原油对钢材的腐蚀数据建立了人工神经网络模型，对腐蚀速率进行了预测，最后建立了管道腐蚀剩余寿命预测模型。本文得出的主要结论如下：

1、分别建立了 BP、GA 和 GA-BP 算法的人工神经网络模型（最合理的拓扑结构为 18-35-1），通过对比发现，三种网络模型的预测精度从高到低为：GA-BP>GA>BP。说明本文中建立的引入遗传算法的网络模型确实同时发挥了遗传算法的全局寻优与 BP 算法的精确寻优的优点。

2、借助于神经网络节点删除规则，对影响原油腐蚀性的影响因素进行了筛选。从最初的 18 个影响变量筛选出来了 9 个影响因素，并以这 9 个变量重新建立了 GA-BP 算法的网络（拓扑结构为 9-10-1），与 18 个影响因素的网络预测精度进行对比发现：9 个影响因素的网络预测精度要高于 18 个因素的网络，说明本文中筛选出来的这 9 个因素是影响原油腐蚀性的主要因素，减少网络中不必要的输入节点可以提高网络的预测能力。

3、对寻找出来的影响原油腐蚀性的主要因素进行了敏感性分析，结果表明影响原油腐蚀性的主要因素从大到小为：原油中的 Fe 含量、硫含量、温度、流速、Na 含量、粘度、V 含量、Cu 含量、水含量。

4、借助于缺陷管道剩余强度评价方法并结合管道腐蚀速率预测模型，建立了缺陷管道剩余寿命预测模型，实现了对管道腐蚀剩余寿命的预测。

5、采用 visual studio C#集成开发环境，开发了一套基于 Win32 平台的管线腐蚀预测专家系统，实现了对管道内腐蚀速率及管道剩余寿命的预测。在实验室条件下对该软件的预测可靠性进行了检验，发现预测结果与实际情况能够较好的吻合，具有一定的推广使用价值。

参考文献

- [1] 杜凡.基于卡尔曼滤波器的管道泄漏增强研究[D].北京:北京化工大学,2009.
- [2] 姚晓.CO₂对油气管材腐蚀的预测及防护[J].石油钻采工艺,1998,20(3):44-49.
- [3] 李小娟,左庆乐.浅谈完善各种运输方式的分工协作[J].交通企业管理,2010,5(30):64-65.
- [4] 闫科锋.油气集输管线泄漏检测技术研究[D].哈尔滨:黑龙江大学,2010.
- [5] 王疆戈.加快油气管网建设[J].中国石化,2004,7:78-91.
- [6] 杨静,马国光.含硫管道腐蚀预测方法[J].油气储运,2006,25(10):55-57.
- [7] 张耀东.油气长输管道通过权研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
- [8] 高庭禹.中国石油管道企业管理历史回顾及发展思考[J].国际石油经济,2004,9(20):45-50.
- [9] 全庚,王西.论中国的能源战略决策[J].科技情报开发与经济,2007,17(3):118-120.
- [10] 章远.我国能源战略若干问题的思考[J].中外能源,2009,14(7):6-9.
- [11] 戚爱华.我国油气管道运输发展现状及问题分析[J].国际石油经济,2009,12(14):57-59,84.
- [12] 张华伟.油气长输管线的腐蚀剩余寿命预测[D].东营:中国石油大学(华东),2009.
- [13] 白清东.腐蚀管道剩余强度研究[D].大庆:大庆石油学院,2006.
- [14] 胡涛,王千,陶刚,等.金属管道的腐蚀与防腐蚀技术现状[J].石油化工腐蚀与防护,2008,3:25-31.
- [15] Palacios.C.A,Shadley.J.R. CO₂ corrosion of N80 steel at 71 °C in a two-phase flow system[J]. Corrosion, 1993, 49(8): 686-693.
- [16] 孙岩冰.争做油气管输领跑者[J].中国石油石化,2010,6:72-75.
- [17] 贡璐,安尼瓦尔·阿木提,吕光辉,等.关于构建中国新疆与中亚能源战略通道的思考[J].新疆金融,2009,1(5):27-29.
- [18] 李建平,赵国仙,郝士明.塔里木油田用油套管钢的静态腐蚀[J].中国腐蚀与防护学报,2004,24(4):230-233.
- [19] 卢绮敏.石油工业中的腐蚀与防护.北京:化学工业出版社,2001.
- [20] 曾光廷,李静媛,刘泽洲,等.真空制盐设备腐蚀过程研究[J].四川大学学报:工程科学版,2000,4:55-62.

- [21] 李 莉. 输送含硫原油产生的腐蚀问题[J]. 油气储运, 2008, 27(5): 34.
- [22] 贾思洋. 金属材料在污染土壤中的腐蚀规律研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [23] 冯佃臣. Q235 钢和 X70 管线钢在包头土壤中的腐蚀规律研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2008.
- [24] 陶翠翠, 李亚峰, 蒋白懿. 埋地金属管道外壁腐蚀原因及防治措施[J]. 辽宁化工 2009, 7: 15-20.
- [25] 吴向东. 500kV 输电线路接地网腐蚀分析及防护措施[J]. 腐蚀与防护, 2002, 12: 31-36.
- [26] 董超芳, 李晓刚, 武俊伟, 等. 土壤腐蚀的实验研究与数据处理[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 3: 62-69.
- [27] 马涛, 张洪雷. 浅谈油气输送管道的腐蚀机理[J]. 化学工程与装备, 2009, 11: 22-25.
- [28] 杨波, 田松柏, 赵杉林. 不同形态硫化物腐蚀行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 385-388.
- [29] Edward H. Tandy. Inspection of petroleum refinery equipment[J]. Corrosion, 1954, 10(5): 160.
- [30] B. W. Neumaier, C M Schillmoller. High - temperature sulfide corrosion[J]. Petroleum, 1957, 10: 385.
- [31] A S Couper. High temperature mercaptan corrosion of steels[J]. corrosion, 1963, 19(11): 396t.
- [32] E B Backensto, J W Sjoberg. New hydrogen sulfide corrosion curves[J]. Petroleum Refiner, 1958, 37(12): 119.
- [33] H L Du, P KDatta, J S Gray, et al. Sulphidation behavior of Fe- Co - Cr - Al - Y alloys containing refractory metals[J]. Corrosion Science, 1994, 36(1): 99.
- [34] 卜文平, 王剑梅. 高含硫原油储罐问题研究[J]. 油气储运, 2003, 22(7): 48-49.
- [35] 李晓刚, 付冬梅, 董超芳. 神经网络分析在高温硫腐蚀中的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(2): 76-81.
- [36] 俞树荣, 李建华, 李淑欣, 梁瑞, 等. 埋地管道腐蚀剩余寿命预测概率模型[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(6): 11-16.
- [37] Li Quanpan, Bai Zhenquan, Huang Dezhi, et al. Predictive Model for Corrosion Rate of Oil Tubes in CO₂/ H₂S Coexistent Environment Part I : Building of Model Journal of

- Southwest Jiaotong University Vol.12No.2.
- [38] J.M.Mandhane . “A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes,”
J.Multiphase Flow,1974,Vol.1,pp.537-553.
- [39] 刘福伦,张迎恺. 高温含硫含酸原油对钢材的腐蚀[J]. 石油化工设备技术, 2003,
24(3): 38-40.
- [40] Y Niu ,F Gesmundo ,F Viani. The sulfidation of Fe - Nb alloys At 600~800 °C under
10-8ATM S₂ [J]. Corrosion Science ,1994 ,36 (5): 853.
- [41] H A Cataldi, R J Askevold ,A E Harnsberger. Estimating thecorrosion of crude oils[J].
Petroleum Refiner,1953, 32(7): 145.
- [42] A hammed.M. Prediction of Remaining strength of Corroded Pressureied Pipe lines[J].
Int.J .Pr es,V es&Piping, 1997.
- [43] M andke.J.S. Corrosion causes most pipeline failure in Gulf of Mexico[J]. Oil&GasJ,
1988, (4): 40-44.
- [44] David Jones, Jane Dawson. Risk assessment approach to pipeline life management[J].
Pipes& pipelines International, 1998, J anuary-February.
- [45] 赵新伟,罗金恒,韩晓毅. 在役油气管道腐蚀剩余寿命预测方法[J]. 压力容器, 2001,
18(2): 56-58.
- [46] 白真权,路民旭,赵新伟. 油气管线腐蚀剩余寿命预测研究现状分析[J]. 天然气与石
油, 1998, 16(1): 25-30.
- [47] 罗金恒,王曰燕,赵新伟, 等. 在役油气管道土壤腐蚀研究现状[J]. 石油工程建设,
2004, 6: 74-78.
- [48] 侯建国,路民旭,常炜, 等. 原油对CO₂腐蚀过程的影响及相应腐蚀速率预测研究进
展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 2: 120-130.
- [49] 敬尚前. 长输管道的腐蚀风险评价[J]. 石油和化工设备, 2009, 7: 87-92.
- [50] 梁洪涛.腐蚀海底管道可靠性评估方法研究[D].天津: 天津大学, 2003.
- [51] 祁世芳. 输油管道安全评估模式及其在我国的应用[J]. 油气储运,2002, 21(3).
- [52] 李裕奇. 未知寿命分布时可靠寿命的统计估计[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(4):
438-443.
- [53] 王永忠. 原油管线腐蚀原因分析[J]. 石油化工安全技术, 2004, 20(4): 35-37.
- [54] 姜如桦,张鹏,陈莉琼, 等. 腐蚀管道剩余寿命的性能衰减模型研究[J].油气储运,
2001, 11: 72-77.

- [55] 高锋. 油田热采注汽管道剩余寿命预测技术研究[J]. 西安石油大学学报, 2008, 7: 65-72.
- [56] 李琦. 油气管道完整性管理与评价[J]. 金卡工程: 经济与法, 2010, 4:33-36.
- [57] 卜全民,温力,姜虹, 等. 炼制高硫原油对设备的腐蚀与安全对策[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(6): 362-364.
- [58] 田松柏, 汪申. 含硫原油腐蚀评价研究的进展[J]. 炼油设计, 2000, 30(7): 23-25.
- [59] 丁国平, 刘秀清, 郭志军. 原油硫含量与馏分油的收率及硫分布的相关性研究[J]. 当代化工, 2008, 37(2): 142-145.
- [60] 郁军荣. 原油加工过程中硫分布的研究[J]. 石油化工技术经济, 2009, 25(1): 20-23.
- [61] L. F. Hoogerheide, J. F. Kaashoek, H.K. van Dijk. On the shape of posterior densities and credible sets in instrumental variable regression models with reduced rank: An application of flexible sampling methods using neural networks[J]. Journal of Econometrics, 2007, 139(1): 154-180.
- [62] 张立明. 人工神经网络的模型和应用[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993: 98-227.
- [63] 周新, 周露, 李翔, 等. Matlab 神经网络仿真与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-21.
- [64] 徐秉挣, 张百灵, 韦岗. 神经网络理论与应用[M]. 广州: 华南理工出版社, 1994: 2-18.
- [65] 蒋宗礼. 人工神经网络导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 1-23.
- [66] 聂永萍. 人工神经网络与计算机[J]. 重庆邮电学院学报, 1998,10(4): 33-86.
- [67] 高大文, 王鹏, 孙丽欣, 等. 人工神经网络输入层节点筛选规则的确定[J]. 高技术通讯, 2002, 06:65-68.
- [68] Hernández, S.; Nestic, S. Weckman, G. Ghai. V. Use of Artificial Neural Networks for Predicting Crude Oil Effect on CO₂ Corrosion of Carbon Steels[J]. Corrosion/2005, paper no.05554 (Houston TX:NACE,2005).
- [69]赵国仙, 吕祥鸿, 韩勇. 流速对 P110 钢腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2008, 8:5-8.
- [70] VERA J R, VILORIA A, CASTILLO M, et al. Flow velocity effect on CO₂ corrosion of carbon steel using a dynamic field tester [A]. A Working Party Report on Prediction CO₂ Corrosion in Oil and Gas Industry [C]. London:The Institute of Materials, 1994. 94-119.
- [71] John F.Kiefer, Partrick H.Vieth. New method corrects criterriion for evaluating corrode pipe.Oil&Gas Journal, 1990, 88(32): 56~59.

- [72] 蔡文军, 陈国明, 潘东民, 等. 腐蚀管线剩余强度评估的研究进展[J].石油机械, 1999, 27(11): 47~49.
- [73] 张平生. 美国材料性能委员会(MPC)在适用性评价研究中的进展[J]. 石油专用管, 1996(4): 36~41.
- [74] API Recommended Practice 579, Fitness-for-Service. First Edition, 2000.
- [75] SY/T 10048-2003, 腐蚀管道评估的推荐作法[S].北京: 中国标准出版社, 2003.

攻读硕士学位期间取得的学术成果

发表的文章:

- [1] 任振甲, 张军, 骆成双, 石鑫, 胡松青, 张扬. 基于人工神经网络研究影响原油腐蚀的主要因素[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(4).
- [2] 张军, 任振甲, 燕友果, 于立军, 乔贵民. 2-巯基苯并咪唑缓蚀剂对 Q235 钢的缓蚀性能研究[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2010, 25(1): 76-80.
- [3] 乔贵民, 任振甲, 张军, 胡松青, 燕友果, 提阳. 腐蚀介质在缓蚀剂膜中扩散行为的分子动力学模拟[J]. 物理化学学报, 2010, 26(11): 3041-3046.
- [4] 张军, 姜娟娟, 任振甲, 于维钊, 于立军, 乔贵民. 1-(2-羟乙基)-2-烷基咪唑啉缓蚀剂在铁表面吸附的分子动力学模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(5): 159-163.
- [5] 张军, 燕友果, 任振甲, 胡松青, 乔贵民. 氨基酸缓蚀剂缓蚀性能的实验评价与缓蚀机制分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(3): 152-156.
- [6] 胡松青, 石鑫, 胡建春, 任振甲, 郭爱玲, 高元军. 基于BP神经网络的输油管道内腐蚀速率预测模型[J]. 油气储运, 2010, 29(6): 448-450.
- [7] 张军, 于维钊, 燕友果, 于立军, 任振甲. 咪唑啉缓蚀剂在Fe(001)表面吸附行为的分子动力学模拟[J]. 物理化学学报, 2010, 26(5): 1385-1390.
- [8] 胡松青, 于立军, 燕友果, 张军, 任振甲, 提阳. SDBS与HA缓蚀剂复配的实验与理论研究[J]. 物理化学学报, 2011, 27 (2): 275-280.
- [9] 刘金祥, 尤龙, 张军, 燕友果, 于立军, 任振甲. 温度对半胱氨酸缓蚀性能影响的实验评价与机理研究[J]. 化学学报, 2010, 68(18): 1807-1812.

致 谢

本论文是在导师张军教授的悉心指导下完成的，导师渊博的学识、严谨的治学态度、高尚的师德、淡泊名利的处世哲学、踏实的工作作风、高涨的工作激情，都是我今后工作中的学习榜样。老师不仅是我学习上的导师，更是我生活中的良师益友。导师在理论和专业学习上谆谆教诲，悉心指导，严格要求，引领我步入学术殿堂，开启人生新的追求；在生活上，导师嘘寒问暖，给予了我无微不至的关怀与照顾，同时还教诲我们如何待人接物，乐观对待人生。我时常暗自庆幸自己能够遇上一位很好的导师，在他的教导下不仅自己的知识水平有了很大的提高，而且也从他那里领悟到了很多处事技巧，感觉三年的研究生生活过的很充实。在此论文完成之际，谨向张老师表示最诚挚的谢意！祝愿他身体健康，全家幸福！

实验室浓厚的学术气氛和优良的科研条件是我能够顺利完成论文的 necessary 保证，在此感谢刘金祥、尤龙、刘林法、于立军、郭爱玲、乔贵民、提阳等分子模拟实验室和腐蚀与防护实验室的所有同学给我提供了良好的学习环境和融洽的实验室氛围，作为这个大家庭中的一员是我一生的幸事。

本论文工作还得到了石鑫师兄和骆成双师弟给予的很多有意义的启发和大量的技术支持，尤其是在软件开发中得到了骆成双的全力帮助，在此对他们的无私帮助表示深深的感谢。

最后，我深深感谢我的父母，感谢他们对我生活无微不至的关怀，对我工作不断地鼓励和无条件的支持。