

学校代码: 10286
分类号: TG115.28
密 级: 公开
U D C: 621
学 号: 160350



东南大学

SOUTHEAST UNIVERSITY

硕士学位论文

基于管道瞬态温度场模型的红外缺陷深度定量检测方法研究

研究生姓名: 赵 勋

导师姓名: 彭 英

申请学位类别 工程硕士 学位授予单位 东南大学

一级学科名称 机械工程 论文答辩日期 2019年5月30日

二级学科名称 机械制造及其自动化 学位授予日期 20 年 月 日

答辩委员会主席 贾民平 教授 评 阅 人 YS002190185

YS002190186

2019 年 月 日

東南大學
硕士学位论文

基于管道瞬态温度场模型的红外缺陷深度定量
检测方法研究

专业名称: 机械工程

研究生姓名: 赵勋

导师姓名: 彭英

Study on Quantitative Detection of Pipeline with infrared based on transient temperature field model

A Thesis Submitted to

Southeast University

For the Academic Degree of Doctor of Engineering

BY

ZHAO Xun

Supervised by

Associate Prof. PENG Ying

School of Mechanical Engineering

Southeast University

April 2019

东南大学学位论文独创性声明

■

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名：_____日期：_____

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括以电子信息形式刊登）论文的全部内容或中、英文摘要等部分内容。论文的公布（包括以电子信息形式刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名：_____导师签名：_____日期：_____

基于管道瞬态温度场模型的红外缺陷深度定量检测方法研究

研究生姓名：赵勋

导师姓名：彭英 副教授

学校名称：东南大学

管道运输具有高效、安全、经济、便于控制和管理等优点，在工业生产中得到广泛应用，管道腐蚀缺陷检测对于保障安全生产与经济运行具有十分重要的意义。针对现有腐蚀管道检测方法存在检测效率低、精度差、操作复杂等问题，本文对缺陷管道的定量检测技术进行研究，主要工作如下：

1) 基于热传导理论和分离变量法，建立了管道瞬态温度场模型。通过 Fluent 仿真模拟变径管道内通入热流体时的温度场变化，分别提取变径前后管道表面的温度随时间变化曲线及管道表面轴向温度分布，对比分析仿真结果与基于管道瞬态温度场模型计算结果，可知在管道入口段和变径处管道瞬态温度场模型误差较大。

2) 提出一种基于最小二乘法拟合的模型修正方法，在分析管道瞬态温度场模型计算误差轴向分布的基础上，提取缺陷中点处温度随时间瞬态变化曲线，通过最小二乘法拟合确定修正因子与流体参数和管道缺陷之间的关系，带入原数学模型中实现对管道缺陷中点处瞬态温度分布模型的修正，提高了在缺陷中点处模型计算的精度。

3) 提出了一种基于 EFWA 的管道缺陷定量计算方法。将缺陷深度求解的问题转化为寻找使计算温度与实际温度误差最小的问题，根据缺陷中点处修正瞬态温度函数，采用 EFWA 计算管道缺陷深度，通过实例验证算法的有效性。

4) 搭建了基于红外热像的管道缺陷检测平台，管道缺陷深度定量检测与分析结果表明所提基于管道瞬态温度场模型的红外缺陷深度检测算法是可行的。

关键词：管道；温度场建模；最小二乘法；定量检测；红外热成像

Study on Quantitative Detection of Pipeline with infrared based on transient temperature field model

Pipeline transportation has the advantages of high efficiency, safety, economy, easy control and management, and is widely used in industrial production. Pipeline corrosion defect detection is of great significance for ensuring safe production and economic operation. In view of the existing detection methods of corrosion pipelines, such as low detection efficiency, poor precision and complicated operation, this paper studies the quantitative detection technology of defective pipelines. The main work is as follows:

1) Based on the heat conduction theory and the separation variable method, the transient temperature field model of the pipeline is established. Fluent simulation is used to simulate the temperature field change when the hot fluid is introduced into the variable diameter pipe. The temperature change curve of the pipe surface before and after the variable diameter and the axial temperature distribution of the pipe surface are extracted respectively. The simulation results are compared with the transient temperature field based on the pipeline. The calculation results of the model show that the model error of the pipeline transient temperature field is large at the inlet section and the variable diameter of the pipeline.

2) A model correction method based on least squares fitting is proposed. Based on the analysis of the error axial distribution of the pipeline transient temperature field model, the temperature transient curve at the midpoint of the defect is extracted and fitted by least squares method. Determine the relationship between the correction factor and the fluid parameters and pipeline defects, and bring it into the original mathematical model to achieve the correction of the transient temperature distribution model at the midpoint of the pipeline defect, and improve the accuracy of the model calculation at the midpoint of the defect.

3) Proposed a quantitative calculation method for pipeline defects based on enhanced fireworks algorithm. The problem of solving the depth of defects is transformed into the problem of minimizing the error between the calculated temperature and the actual temperature. According to the modified transient temperature function at the midpoint of the defect, the enhanced fireworks algorithm is used to calculate the depth of the pipeline defect, and the effectiveness of the algorithm is verified by an example.

4) Built a pipeline defect detection platform based on infrared thermal image. The quantitative detection and analysis results of pipeline defect depth indicate that the proposed infrared defect depth detection algorithm based on pipeline transient temperature field model is feasible.

Keywords: pipeline ; temperature field modeling ; least squares method ; quantitative detection ; infrared thermal imaging

目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 管道缺陷检测现状.....	2
1.2.2 红外无损检测技术研究现状.....	4
1.2.3 温度场建模研究现状.....	5
1.3 论文研究内容.....	6
第二章 管道瞬态温度场数学模型.....	9
2.1 管道温度场建模.....	9
2.1.1 管道温度场模型.....	9
2.1.2 基于分离变量法的管道温度场模型求解.....	12
2.2 管道温度场模型验证.....	16
2.3 本章小结.....	19
第三章 管道缺陷中点处温度分布模型修正.....	20
3.1 阶梯状缺陷管道有限元仿真.....	20
3.2 管道瞬态温度场模型误差分析.....	22
3.3 管道缺陷中点处温度分析.....	24
3.4 修正因子最小二乘法拟合.....	27
3.4.1 修正因子对时间的拟合求解.....	27
3.4.2 修正因子函数参数最小二乘法拟合.....	29
3.5 修正因子函数验证.....	31
3.6 本章小结.....	33
第四章 基于增强烟花算法的缺陷深度定量检测方法.....	34
4.1 定量检测方法.....	34
4.2 适应度函数构造.....	35
4.3 基于 EFWA 的缺陷定量检测方法.....	36
4.3.1 烟花算法 (FWA) 基本原理.....	36
4.3.2 基于 EFWA 的算法改进和检测流程.....	37
4.4 实验例证.....	39
4.5 本章小结.....	42
第五章 管道缺陷深度定量检测实验与分析.....	43

5.1 实验台搭建.....	43
5.1.1 恒温水箱.....	44
5.1.2 红外热像仪.....	47
5.2 实验设计.....	48
5.3 数据处理.....	49
5.3.1 红外图像降噪.....	49
5.3.2 红外图像边缘提取.....	50
5.3.3 红外图像中温度数据提取.....	51
5.4 管道缺陷深度定量计算.....	54
5.5 本章小结.....	59
第六章 总结与展望.....	61
6.1 总结.....	61
6.2 展望.....	62
致谢.....	63
参考文献.....	65
攻读硕士学位期间发表的论文.....	69

第一章 绪论

1.1 研究背景

管道运输流体是一种经济、方便的运输方式,和其它运输方式相比,它具有高效、安全、便于控制和管理等多项优点,因此在化工、军事、电力、冶金、城市供暖管道以及石油天然气输送管道中得到广泛的应用。在我国,管道运输已成为继铁路、公路、水路、航空运输之后的第五大运输行业^[1]。直到2017年,据部分统计,全球正在使用管道中,仅输油管道约3800条,总公里数约1961300km,其中天然气管道约1273600km,占管道总公里数的64.9%,而且在全球经济整体增速放缓的大背景下仍保持持续增长的趋势^[2]。然而不管是水循环管道、油气输送管道还是民用管道,随着时间的流逝,管道中存在的缺陷也日益加剧,特别是某些运输腐蚀性介质的管道,腐蚀造成的缺陷更为严重^[3]。由于缺陷引起的灾难性事故时常发生,甚至带来巨大的人员伤亡,损失极为惨重。例如,2013年青岛地下输油管由于腐蚀引发爆炸,导致62人死亡,直接损失7亿元;2000年,美国El Paso天然气公司在新墨西哥的天然气管道由于管道内壁发生断裂,导致12人死亡,直接损失99万美元;1966年由于硫化物应力腐蚀缺陷导致天然气井的套管开裂,造成特大爆炸且井喷,人员伤亡惨重,负责主要生产的气井因此报废;1971年海南威成天然气管线,由于缺陷超过应力极限断裂,产生爆炸,直接经济损失达七千万元之多;1991年1月25日,川东油田输送二氧化硫的管道由于腐蚀缺陷造成井喷,2人当场死亡,7人受伤,二氧化硫的泄露还破坏了水资源、生态环境并造成资源浪费;1997年某化工厂18个乙烯原料储罐由于硫化物腐蚀引起大火,停产半年,直接损失达2亿多元,间接损失巨大^[4]。

H.R. Vanaei 在调查中提到,截至1992年,每年由于管道腐蚀以及潜在的维修和监测费用可以达到数十亿美元^[5];柯伟在2003年的调查报告中提到,他利用Uhlig和Hoar两种方法对我国管道的使用现状进行了研究,结果相近表明腐蚀造成的直接经济损失分别为2048亿元/a和2288亿元/a,如果算上间接的损失,这一数字将达到4979亿元人民币以上,约为年国民生产总值的5%,远远超出发达国家2%~3%的水平^[6]。当前,由于全球经济高速增长带动各城市的基础设施建设蓬勃发展,带来每年数万公里的管道增长速度,为减少由于管道腐蚀缺陷引起的管道泄漏以及相关事故带来的沉重的财政损失、人员伤亡、生态环境破坏,需要提高管道的运行稳定性以及使用寿命。但是由于管道的结构跨度大、腐蚀种类多,导致对从源头上预防腐蚀十分困难,又由于管道本身整体性导致管道停机检修成本巨大,迫切需要提高在管道运行过程中的缺陷检测技术水平。

因此,本课题主要针对目前管道面临的腐蚀缺陷种类繁多、检测精度低下、检测程序复杂等问题,研究了一种缺陷管道无损检测定量分析的方法。本课题在热传导理论的基础上,利用分离变量法求解管道的控制方程获得管道瞬态温度场的数学模型,通过控制流体参数和缺陷深度对比基于Fluent有限元仿真的结果与基于管道瞬态温度场模型

计算结果,拟合出流体参数与缺陷深度与误差之间的函数关系,对模型进行修正提高模型的精度。同时,搭建采集管道红外图像序列的实验台,经过降噪处理后利用红外热像仪配套处理软件提取管道表面温度分布信息,进而实现对腐蚀管道缺陷的定量分析。

课题的研究,符合我国提出的可持续发展战略,有利于提高管道的使用寿命和维修效率,提高管道检测的现代化、规模化和智能化水平,同时对减少管道缺陷带来的经济损失和人员伤亡具有重大意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 管道缺陷检测现状

随着管道在人们日常生活使用的频率越来越高,管道缺陷带来的潜在危险也随之上涨,管道的使用寿命和安全性问题成为人们越来越关注的问题。因而越来越多的国内外学者开始对管道缺陷检测方法进行研究,也取得了许多成就。最初研制的管道缺陷检测装置时有缆线的,此类检测装置一般由运动模块、检测模块、电缆模块、外部遥控模块以及数据处理模块组成。其中运动模块负责在外部遥控模块的控制下在管道内部运动,该部分的英文名叫做“Pig”;检测模块负责在“Pig”移动时实时采集管道内的映像数据;电缆模块负责供电和数据传输;数据处理模块通过处理检测模块采集的映像数据从而实现对管道缺陷状态的检测^[7]。随着这种类型的 Pig 检测技术的发展,为适应长距离管道检测,研发了无缆线的 Pig 来对长距离管道进行检测。虽然脱离了缆线的束缚,但是 Pig 技术只能在管道停运时才能对管道进行检测,检测成本极高,而且检测精度较低。

所以无损检测技术应运而生,目前国内外常用的无损检测技术主要有漏磁检测、声发射检测、射线检测、超声检测和渗透检测五种,检测原理如下^[8]:

- 1) 漏磁检测:当金属管道被磁化之后,在金属管道内部会有磁场存在,当管道内部存在缺陷或者断裂时,磁场会根据缺陷的特点对应生成不同的漏磁场。在检测过程中,将磁粉均匀分布在管道表面,磁粉会由于漏磁场的作用,在缺陷管道的表面显示出缺陷的轮廓、位置。
- 2) 声发射检测:在管道内部发生振动或者主动使管道发出声波信号时,所发出的声发射信号会随着管道的材料、缺陷特征不同而产生不同,通过对声发射信号的分析和处理可以确定管道有无缺陷以及缺陷形式。
- 3) 射线检测:常用的射线有 α 射线和 γ 射线两种,射线可以不同程度的透过金属对照相胶片产生感光作用。利用这种特性,当管道内有缺陷或者其他形式损伤时会使射线落到胶片上的强度不同,从而反应管道内缺陷的形式。
- 4) 超声检测:超声波在管道中的传播会被管道的内部结构和特性影响,通过超声波被影响的程度和类型可以实现对管道内部结构的无损检测。
- 5) 渗透检测:在管道表面图上可以标记或被检测到的荧光染料作为渗透剂,染料会顺着缺陷的缝隙流入缺陷内部,通过分析渗透剂的位置和含量即可确定缺陷的形状和程度。

Qian, Q., Hanachi, H 等人^[9]用 COMSOL 建模模拟超声波传播,以便在管道内壁进行缺陷检测,并在不同大小缺陷下测试了几种尺寸探头对管道内缺陷检测,但是对于不同程度的缺陷,检测的精度受探头直径的影响。杨志军,刘玉琢等人^[10]基于漏磁检测原理,提出了适用于不同工况下的可变径磁化、整体磁化和直流磁化等漏磁检测方法,虽然可以对管道缺陷进行检测和评价,但是操作复杂而且在实际在线检测中存在磁化问题,会使检测精度降低。HUANG H^[11]等人分析了漏磁技术在管道缺陷检测种应用时的干扰因素。李春雨,马义来等^[12]以脉冲涡流检测技术原理为依据,设计了单片机检测系统,并验证了该方法可以有效识别管道内壁缺陷,但是由于脉冲涡流实验装置和试件的局限性,以及信号分析方法和数学建模的匮乏,导致数据采集和转换需要大量的时间,不适合用于在线检测上。王志春^[13]通过对管道运行过程种采集的声发射信号进行时域和频域的分析,发现不同工况与信号能量和频率之间的相关性,证明了声发射检测技术能实现对管道内缺陷的识别,但是由于实际现场环境的复杂性以及外界噪声等问题,实现在线检测困难较大。Hanafi Z^[14]等人利用声发射技术研究了均匀缺陷对管道使用寿命的影响程度。SHI J^[15]对煤气公司在役缺陷管道进行声发射检测,结合检测数据与射线检测得出的缺陷大小,建立了基于声发射与缺陷大小的评价模型。S LiYing^[16]利用声发射技术实现了对声发射频率在 20KHz~150KHz 之间的压力管道的缺陷检测,并于磁漏检测方法比较,得出结论:磁漏可以用于管道失效前的缺陷检测而声发射适合用来对有缺陷管道进行定量分析。

基于上述研究总结传统无损检测方法存在以下优点和局限性,如表 1.1 所示。

表 1.1 传统无损检测方法优缺点^[17]

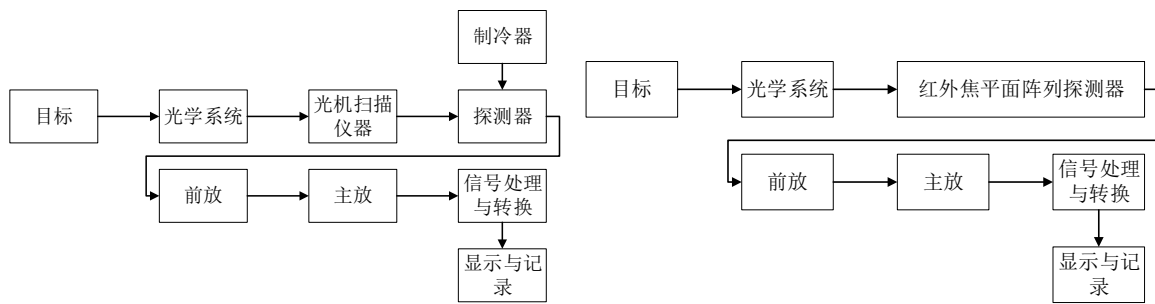
检测方法	优点	局限
漏磁检测	操作方便,检测迅速,原理简单,结果直观,不必对检测结果做过多的分析即可获得缺陷信息。	无法检测不能被磁化的管道,如有色金属、非导磁性材料或奥氏体不锈钢等。且只能做到缺陷的定性分析。
声发射检测	信号对缺陷特征敏感,不同的缺陷程度,声发射的信号都是不同的。且可以长时间连续的对运行设备进行监测。	容易受到环境噪声的影响;会受到材料的各向异性的影响;信号复杂程度高,分析起来十分困难,较难对缺陷进行定量分析。
射线检测	对于垂直于管道壁面的缺陷形式检测精度高,且可以实现定性的分析。	只可离线检测,缺乏对于平行于管道壁面的缺陷形式的检测能力,检测成本高、周期长、效率低。

超声检测	检测快捷方便，且波声的方向性好，频率越高方向性越好，以很窄的波束向介质中辐射，易于确定缺陷的位置。	对检测操作要求较高，对于复合材料的管道检测较为困难，且当缺陷小于波长时，声波会绕过缺陷而不反射。
渗透检测	原理简单，操作便捷，灵敏度高，成本低，对检测管道的材质、形状、规模均无要求。	只能对开口性缺陷检测，且当管道较小时检测精度会降低，不能用于多孔性材料的管道。

由于上述无损检测技术对管道缺陷检测存在缺陷渐渐不能满足要求。红外热成像技术凭借其使用范围广、检测速度快、非接触性、可在线检测、精度高以及可视程度高等优秀的特点，逐渐被用在管道缺陷检测方面。

1.2.2 红外无损检测技术研究现状

1800年英国物理学家 F.W.赫胥尔发现了红外线。红外线是一种电磁波，它在电磁波连续频谱中的位置处于无线电波与可见光之间的区域，红外线的波长范围大致是 $0.78\sim 1000\mu m$ ，比 $0.78\mu m$ 长的电磁波位于可见光谱的红色以外，故称为红外线，又称红外辐射。红外线中波长为 $0.78\sim 3.0\mu m$ 的部分称为近红外线， $3.0\sim 1000\mu m$ 的称为远红外线，实际热成像无损检测大多是工作在 $3.0\sim 30\mu m$ 的远红外线波段。在红外热成像无损检测系统中，热成像和显示的部分通常由红外热成像仪、红外热电视、近红外 CCD 摄像仪等来完成，这些仪器可以将被测试样热辐射转换为相应的红外图像。现有的红外热成像系统主要包括光机扫描红外热像仪和非制冷型红外焦平面阵列红外热成像仪，原理如图 1 所示^[18]：



(a)光机扫描红外热像仪

(b)非制冷型红外焦平面阵列红外热成像仪

图 1.1 红外热像仪原理示意图

随着红外热成像技术在无损检测领域中使用的频率逐日增长，检测者不仅仅想要得到是否存在缺陷以及缺陷的位置，更需要对缺陷程度进行量化。早在 1988 年，薛书文^[19]等人提出了一种金属内部近表面缺陷深度的定量化检测方法，但是仅适用于热传导性能较好的材料近表面大面积缺陷；Yun-KyuAn^[20]等红外热成像技术对低发射率的钢结构表面进行疲劳损伤检测，并利用霍尔指数分析方法建立裂纹评估的算法，实现了裂纹的识别、定位和量化；D.P.Almond^{[21][22]}提出了用热图像的半最大对比度宽度来表示缺陷

面积大小；杨黎俊^[23]利用三维导热方程及控制容积法来计算模拟缺陷面积的大小；N.P. Avdelidis^[24]根据采集到的红外图像分析各种参数之间的关系，得到一系列与缺陷大小和深度的相关曲线，从而达到对缺陷定量分析的目的；D.A. Gonza'lez^[25]等人基于对红外热像图的分析 and 处理，使得缺陷位置更加的明显，而后使用形态学算法实现对缺陷的评估；胡林海^[26]针对金属材料表层和浅表层缺陷检测问题，以铝板空洞缺陷为检测目标，开展红外热成像检测定量评估的研究，通过有限元仿真分析，研究了不同孔径、不同孔深表面缺陷的温度变化规律；Lien L^[27]等研究了红外热像仪对玻璃钢表面下不同深度预置孔缺陷的检测能力，并通过贝叶斯分类器进行缺陷识别和深度计算；曹丹^[28]等人讨论了影响缺陷区域与正常区域最大温差的影响因素，运用有限元模拟的方法，不仅可以排除真实红外图像中的噪声、不均匀等影响，还能定性的评估各个部位的缺陷大小；李大鹏^[29]等人和 Guofeng J^[30]等人分别基于仿真结果，将神经网络和粒子群优化算法用于缺陷的识别上，获得了一定的效果；王文泉^[31]利用 ANSYS 有限元方法模拟内表面有裂纹缺陷的管道内表面施加热空气红外无损检测的过程，从模拟结果中提取若干时间点的管道温度云图，获得了裂纹对应的管道外表面节点温度值和参考点温度—时间曲线，可以对管道的缺陷情况做一定的定量分析；除此之外也有学者采用图像处理方法通过计算红外热图像中缺陷像素点来确定缺陷面积的大小。综上所述，相关的定量分析研究主要存在计算繁琐、精度低、适用性差的问题，为解决上述问题，需要通过建立管道温度场的模型取得管道缺陷与管道表面温度场之间的定量关系。

1.2.3 温度场建模研究现状

建模是解决系统工程问题不可缺少的技术手段，因此建立有效且可靠的系统模型是系统研究者的首要任务。Wang X D 等^[32]通过简化半导体中的汤姆逊效应，根据零维问题模型求解了 p 型和 n 型半导体的温度场模型，并通过比较此模型与一维理论预测中的温度分布证明了模型的正确性；牛晓勇^[33]通过数值模拟找到温度和腐蚀率之间的关系，再利用灰模型预测法将温度和腐蚀率的关系转化为温度场和腐蚀缺陷的关系；Ozudogru TY 等^[34]，使用一维线性单元体模拟管道内的温度场，并通过与管道外表面温度场耦合减少单元体数量，根据温度场模型提出了一种估算能量堆稳态热阻的方法，并通过对比数值结果与模型计算结果对模型进行验证；方俊雅^[35]等通过改变管道的电磁激励频率和缺陷深度，得到缺陷表面的最大温差等缺陷规律，建立管道缺陷与温度场的模型；申金波^[36]通过 Fluent 软件对不同的管道腐蚀导致的泄漏类型进行数值模拟和对比分析，为了从地表温度场变化入手判断供热管道的泄漏类型提供参考，作者通过 Gambit 软件建立二维模型和三维模型，通过设定相同的初始条件和边界换热条件进行计算，得出不同情况下地表温度场整体分布，从而从地表温度判断泄漏的类型，但是此研究对未产生泄漏的腐蚀缺陷不能做出判断；张强^[37]等人采用红外热像仪获取缺陷管道的红外热像，分析得到红外热像的温度值数据及温度-频率图像，通过对比分析得到管道内部缺陷的温度变化规律及红外特征；王金秋^[38]提出了粗糙集-BP 神经网络管道外腐蚀预测模型，先利用粗糙集理论消除管道腐蚀影响因素中的冗余因素，然后利用神经网络对数据进行学习

建模。喻勇^[39]将管道腐蚀简化为平板缺陷并结合传热学的原理推导出热传导方程，根据推导出的热传导过程使用热分析软件 ANSYS 对材料缺陷进行建模仿真，仿真阶段讨论加热时间、缺陷面积、缺陷深度对温度场分布的影响为根据缺陷红外图像进行缺陷形状识别、面积评价做铺垫，最后设计了相关的算法对缺陷进行定量分析。

考虑到当管道内通入介质与管道存在温差时，在管道未达到温度平衡状态前，管壁温度场会发生剧烈的变化，温度场的变化中会包含管道缺陷信息。本文通过建立管道内缺陷与管道温度场的定量关系，通过红外热成像技术提取管道表面温度分布，实现管道缺陷深度的定量分析。

1.3 论文研究内容

本文针对管道内通入热流体时的温度场，研究缺陷深度定量检测的方法，研究内容主要包括四个部分：

1) 论文第二章根据热传导理论和分离变量法，建立管道瞬态温度场的数学模型。基于 Fluent 有限元仿真，分析变径管道基于管道瞬态温度场模型的计算误差及产生误差的原因。

2) 论文第三章通过控制缺陷深度，管道内流体参数不同，对基于瞬态温度场模型计算结果和 Fluent 仿真结果对比分析，采用函数拟合方法确定修正因子关于流体参数和缺陷深度的定量关系，代入管道瞬态温度场模型中得到缺陷中点处修正瞬态温度分布模型。

3) 论文第四章在根据第三章给出的管道缺陷中点处修正瞬态温度分布模型基础上，引入强化烟花算法，以 Fluent 仿真结果中缺陷中点处的温度为输入，验证方法的可行性，并从算法的稳定性、收敛速度和收敛精度方面出发，对比烟花算法和粒子群算法的适用性。

4) 搭建实验台，加工阶梯状缺陷的腐蚀管道，设计实验向管道内通入不同流速和温度的流体，通过红外热像仪采集管道表面红外图像序列，对红外图像进行降噪处理，并基于 Sobel 算子提取管道中缺陷边缘的信息，确定缺陷中点的位置。通过第四章提出的缺陷深度求解方法对阶梯状缺陷管道的缺陷深度进行求解，验证本文提出缺陷深度检测算法的有效性。

论文研究内容的技术路线如图 1.2 所示。

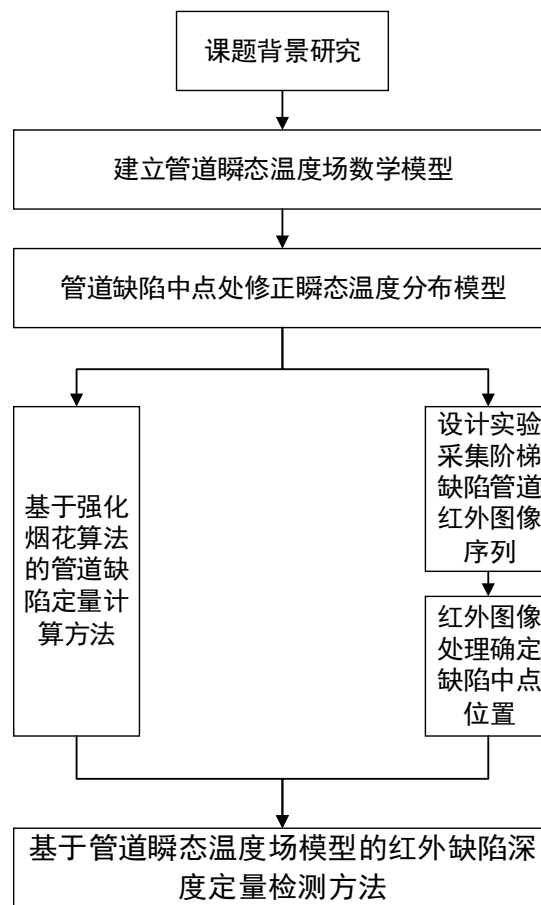


图 1.2 技术路线

公式章 2 节 2

第二章 管道瞬态温度场数学模型

在红外缺陷检测技术中，可以通过热分析获得被测物体表面温度分布，并在此基础上实现对被测物体中缺陷的检测，所以被测物体温度场的数学模型是红外缺陷检测的重要理论依据之一。本章主要建立了管道瞬态温度场的数学模型，并利用 Fluent 分析变径管道在通入热流体情况下管道瞬态温度场数学模型计算误差。

2.1 管道温度场建模

管道模型如图 2.1 所示，其中管道内径为 a ，外径为 b 。

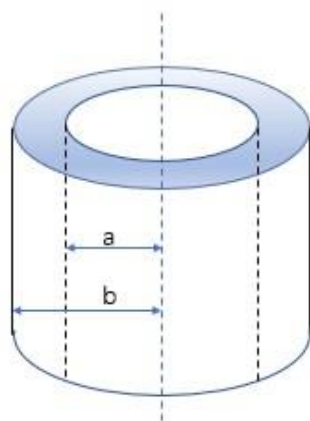


图 2.1 管道模型

为方便管道温度场建模，对管道模型做以下合理假设：

- 1) 管道内外表面均是光滑的；
- 2) 管道内通入的流体与周围环境均是连续介质，即其物性参数（温度、密度、速度、压力等）是空间的连续函数；
- 3) 管道内结构的变化对流体的流态不产生影响；
- 4) 管道内相邻缺陷之间的温度场相互独立；
- 5) 管道温度场在初始时已与周围环境达到动态平衡；
- 6) 管道外表面温度变化不影响管道外表面自然对流换热系数。

2.1.1 管道温度场模型

导热问题的完整描述包括导热微分方程及相应的定解条件，导热微分方程是所有导热物体的温度场都应该满足的通用方程，是根据能量守恒定律和傅里叶定律建立的物体中温度场的变化关系式^[40]；定解条件是描述某一特定物体温度场引入的时间和边界条件。

2.1.1.1 管道导热微分方程

从管道中取单位体积的六面微元体，对微元体做能量分析，假定管道的热物理性质

是与物体温度有关的函数，管道微元体中任一方向上的热流量都可分解为 r, φ, z 三个方向的分热流量。

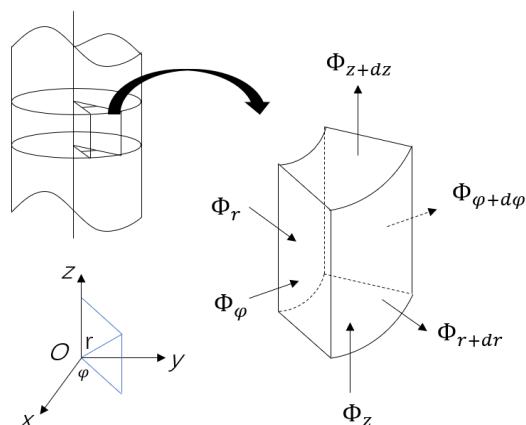


图 2.2 圆柱坐标系下管道微元体的导热热平衡分析

对于图 2.2 中的微元体， $\dot{\Phi}$ 是管道内热源，代表管道单位时间内单位体积中产生或消耗的热能（产生为正，消耗为负），单位是 W/m^3 ， Φ_r ， Φ_φ ， Φ_z 分别是通过 $r=r$ 、 $z=z$ 、 $\varphi=\varphi$ 三个微元面的热流量。根据傅里叶定律可以写为：

$$\left. \begin{aligned} (\Phi_r)_r &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_r r d\varphi dz \\ (\Phi_z)_z &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z r d\varphi dr \\ (\Phi_\varphi)_\varphi &= -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)_\varphi \frac{1}{r} dr dz \end{aligned} \right\} \quad 2.1$$

式中， $(\Phi_r)_r$ 为热流量在 r 方向上的分离 Φ_r 在 r 点的值， $(\Phi_\varphi)_\varphi$ 和 $(\Phi_z)_z$ 类推。

根据傅里叶定律，通过 $r=r+dr$ 、 $\varphi=\varphi+d\varphi$ 、 $z=z+dz$ 三个表面导出微元体的热流量可以以式 2.2 形式表示：

$$\left. \begin{aligned} (\Phi_r)_{r+dr} &= (\Phi_r)_r + \frac{\partial \Phi_r}{\partial r} dr = (\Phi_r)_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial r} \right)_r r d\varphi dz \right] dr \\ (\Phi_\varphi)_{\varphi+d\varphi} &= (\Phi_\varphi)_\varphi + \frac{\partial \Phi_\varphi}{\partial \varphi} d\varphi = (\Phi_\varphi)_\varphi + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial \varphi} \right)_{y\varphi} dr dz \right] d\varphi \\ (\Phi_z)_{z+dz} &= (\Phi_z)_z + \frac{\partial \Phi_z}{\partial z} dz = (\Phi_z)_z + \frac{\partial}{\partial z} \left[-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial z} \right)_z r d\varphi dr \right] dz \end{aligned} \right\} \quad 2.2$$

对于管道微元体，按照能量守恒定律，在任一时间间隔内有以下热平衡关系：

导入微元体的总热流量 + 微元体内热源的生成热 = 导出微元体的总热流量 + 微元体热力学能增量，其中：

$$\text{微元体热力学能增量} = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} r d\varphi dr dz \quad 2.3$$

$$\text{微元体内热源的生成热} = \dot{\Phi} r d\varphi dr dz \quad 2.4$$

式中, ρ 为微元体密度; c 为比热容; τ 为时间。将式 2.1-2.4 带入到热平衡关系中, 整理可得

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad 2.5$$

式中, r 为半径; φ 为极角。当导热系数为常数时, 某一固定管道半径时的温度函数为 $T(r, t)$, 根据式 2.5 可得管道导热微分方程可以写作如下形式:

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial z^2} + \frac{q^*}{\lambda} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad 2.6$$

式中, $T(r, t)$ 为温度函数; t 为时间; α 为热扩散系数, $\alpha = \lambda / \rho c$; q^* 为单位体积管道内部发出的热量。

本文研究的管道是无内热源的管道, 温度梯度以径向为主, 且管道未达到稳态。则式 2.6 的管道导热微分方程可以简化为:

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} \quad 2.7$$

2.1.1.2 管道的定解条件

管道温度场随时间变化的过程, 属于非稳态导热问题, 非稳态问题的定解条件通常包括初始条件 (initial condition) 和边界条件 (boundary condition), 其中初始条件指的是管道初始时刻的温度分布; 而边界条件则给出导热物体边界上温度或换热的情况, 通常边界条件可以根据形式分为三类:

- 1) 第一类边界条件规定边界上的温度值。对于非稳态导热, 此类边界条件形式主要是

$$\tau > 0 \text{ 时 } t_w = f_1(\tau) \quad 2.8$$

- 2) 第二类边界条件规定边界上的热流密度值。对于非稳态导热, 此类边界条件形式主要是

$$\tau > 0 \text{ 时 } -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau) \quad 2.9$$

式中, n 为表面 A 的法线方向。

- 3) 第三类边界条件规定边界上物体与周围流体间的表面对流传热系数 h 及周围流体的温度 t_f 。其形式主要是

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_w = h(t_w - t_f) \quad 2.10$$

由于管道初始时与环境温度处于热平衡状态，初始时管道温度场是关于半径的函数 $F(r)$ ，在这里设初始温度场为常数，则控制方程的初始条件为。

$$T(r, t) = F(r) = T_0 \quad 2.11$$

管道内的热传导以强制对流为主，管道外的热传导以自然对流为主，则定解条件是第二类边界条件。根据管道内强制对流的实验关联式和自然对流实验关联式可以求得管道内外的对流换热系数。边界条件具体如下：

$$-\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + H_1 T(r, t) = H_1 T_w \quad (r = a, t > 0) \quad 2.12$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + H_2 T(r, t) = H_2 T_A \quad (r = b, t > 0) \quad 2.13$$

其中， H_1 为管道内壁面与流体的对流换热系数； H_2 为管道外壁面与环境的自然对流换热系数； T_w 为流体温度； T_A 为环境温度。

2.1.2 基于分离变量法的管道温度场模型求解

分离变量法是在热传导问题中广泛被使用的分析求解方法^[41]，对齐次问题处理起来尤为方便。如果多维、无内热源的稳态热传导问题只有一个边界条件是非齐次的，也可以使用分离变量法；当非齐次边界条件超过一个时，可以通过将对应的边界条件分解为几个简单问题，每个简单问题分别分离变量计算。

在数学上，分离变量法可以将方程式重新编排，让方程式的一部分只含有一个变量，而剩余部分则跟此变量无关。隔离出的两部分值都分别等于常数，而两个部分的值的代数和等于 0。是一种解析常微分方程和偏微分方程的方法。

如常微分方程可以写为

$$\frac{d}{dx} f(x) = g(x) [h(f(x))] \quad 2.14$$

设定变量 $y = f(x)$ 。

$$\frac{dy}{dx} = g(x) h(y) \quad 2.15$$

只要是 $h(y) \neq 0$ ，就可以将方程式两边都除以 $h(y)$ ，再乘以 dx 得：

$$\frac{dy}{h(y)} = g(x) dx \quad 2.16$$

这样，可以将两个变量 x, y 分离到方程式得两边。由于任意一遍得方程式跟另外一边得变量无关，表达式恒等于常数 k 。因此，可以得到两个形式较为简单的常微分方程：

$$\frac{dy}{h(y)} = g(x)dx = k \quad 2.17$$

式 2.11-2.13 组成管道温度场的定解条件和 2.7 所示的导热微分方程组成管道温度场数学描述, 由式 2.7 可知该数学描述属于多维非齐次的导热微分方程, 可利用分离变量法求解该问题。

首先将这个问题分解成关于 $T_s(r)$ 的稳态问题:

$$\frac{\partial^2 T_s(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_s(r)}{\partial r} = 0 \quad 2.18$$

$$-\frac{\partial T_s(a)}{\partial r} + H_1 T_s(a) = H_1 T_w \quad 2.19$$

$$\frac{\partial T_s(b)}{\partial r} + H_2 T_s(b) = H_2 T_A \quad 2.20$$

和关于 $T_h(r,t)$ 的齐次问题:

$$\frac{\partial^2 T_h(r,t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_h(r,t)}{\partial r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T_h(r,t)}{\partial t} \quad 2.21$$

$$-\frac{\partial T_h(r,t)}{\partial r} + H_1 T_h(r,t) = H_1 T_w \quad (r=a, t>0) \quad 2.22$$

$$\frac{\partial T_h(r,t)}{\partial r} + H_2 T_h(r,t) = H_2 T_A \quad (r=b, t>0) \quad 2.23$$

$$T_h(r,t) = T_0 \quad 2.24$$

式 2.18-2.20 组成的稳态问题, 通过微分方程求解方法可得

$$T_s(r) = c_1 + c_2 \cdot \ln(r) \quad 2.25$$

其中, c_1 和 c_2 是根据定解条件求出的常数项。对于式 2.21-2.24 组成的齐次问题, 首先需要通过分离变量法将函数 $T_h(r,t)$ 分离成空间函数 $R_0(r)$ 与时间函数 $\Gamma(t)$, 具体如式 2.26 所示:

$$T_h(r,t) = R_0(r) \cdot \Gamma(t) \quad 2.26$$

将分离后的 $T_h(r,t)$ 带入式 2.21 中可得:

$$\frac{1}{R_0} \left(\frac{d^2 R_0}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_0}{dr} \right) = \frac{1}{\alpha \Gamma(t)} \frac{d\Gamma(t)}{dt} \quad 2.27$$

令式 2.27 等于 $-\beta_m^2$, β_m^2 取负号的原因是: 可以保证当 α 和 t 都是正值的情况下, 以及当时间趋近无限大时 $\Gamma(t)$ 趋于 0, 使其在物理上有意义。则时间函数 $\Gamma(t)$ 满足的微分

方程如下:

$$\frac{d\Gamma(t)}{dt} + \alpha\beta_m^2\Gamma(t) = 0 \quad 2.28$$

根据齐次微分方程的求解方法可求出时间函数

$$\Gamma(t) = \exp(-\alpha\beta_m^2 t) \quad 2.29$$

空间函数 $R_0(r)$ 满足微分方程^[42]:

$$\frac{d^2 R_0(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR_0(r)}{dr} + \beta^2 R_0(r) = 0 \quad (a < r < b) \quad 2.30$$

对应于这一方程的边界条件是由分离后的 $T_h(r, t)$ 带入边界条件式 2.22、2.23 后得到的, 即

$$-\frac{dR_0(r)}{dr} + H_1 R_0(r) = 0 \quad (r = a) \quad 2.31$$

$$\frac{dR_0(r)}{dr} + H_2 R_0(r) = 0 \quad (r = b) \quad 2.32$$

由于上述问题只对分离参数 β 取一些特定值 $\beta = \beta_m, m=1, 2, 3 \dots$ 才有解, 这些分离参数的值称为特征值, 相应的解 $R_0(\beta_m, r)$ 称为该问题的特征函数。当 β 不是特征值, 即 $\beta \neq \beta_m$ 时, 问题为零解。

这里我们假定这些特征函数 $R_0(\beta_m, r)$ 与特征值 β_m 是合适的, 并进一步求解上述热传导问题。温度 $T_h(r, t)$ 的完全解可由上述分解方程的基本解按线性迭加原理构成, 其形式为

$$T_h(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} c_m e^{-\alpha\beta_m^2 t} R_0(\beta_m, r) \quad 2.33$$

式 2.33 给出的解即满足热传导问题的微分方程 2.21, 又满足边界条件 2.22、2.23, 但是并不满足初始条件。因此将初始条件 2.24 带入式 2.33 可得

$$F(r) = \sum_{m=1}^{\infty} c_m R_0(\beta_m, r) \quad a < r < b \quad 2.34$$

式 2.34 是在区间 $a < r < b$ 内有定义的任意函数 $F(r)$ 用特征值问题和特征函数表示的式子。未知系数 c_m 可根据下述特征函数的正交性来确定:

$$\int_a^b r R_0(\beta_m, r) R_0(\beta_n, r) dr = \begin{cases} 0 & m \neq n \\ N(\beta_m) & m = n \end{cases} \quad 2.35$$

式中:

$$N(\beta_m) \equiv \int_a^b r R_0^2(\beta_m, r) dr \quad 2.36$$

上述的特征值问题属于斯特姆-刘维尔 (Sturm-Liouville) 问题^[43]的特殊情况。为确

定系数 c_m 我们用算子 $\int_a^b r R_0(\beta_n, r)$ 对式 2.36 两边进行运算, 再根据式 2.35 所示的正交性, 可求得:

$$c_m = \frac{1}{N(\beta_m)} \int_a^b r R_0(\beta_m, r) F(r) dr \quad 2.37$$

参考^[44]可知特征函数 $R_0(\beta_m, r)$ 满足

$$R_0(\beta_m, r) = S_0 J_0(\beta_m, r) - V_0 Y_0(\beta_m, r) \quad 2.38$$

特征值 β_m 则是下面方程的正根:

$$S_0 U_0 - V_0 W_0 = 0 \quad 2.39$$

式中:

$$S_0 = \beta_m Y_0'(\beta_m b) + H_2 Y_0(\beta_m b) \quad 2.40$$

$$U_0 = \beta_m J_0'(\beta_m a) - H_1 J_0(\beta_m a) \quad 2.41$$

$$V_0 = \beta_m J_0'(\beta_m b) + H_2 J_0(\beta_m b) \quad 2.42$$

$$W_0 = \beta_m Y_0'(\beta_m a) - H_1 Y_0(\beta_m a) \quad 2.43$$

$$B_1 = H_1^2 + \beta_m^2 \quad B_2 = H_2^2 + \beta_m^2 \quad 2.44$$

其中, J_0 是 0 阶第一类贝塞尔函数; Y_0 是 0 阶第二类贝塞尔函数, 具体表达式如下^[44]:

$$Y_0(x) = \frac{2}{\pi} J_0(x) \left(\ln \frac{x}{2} + c \right) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \left(\frac{x}{2} \right)^{2m}}{(m!)^2} \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k+1} \quad 2.45$$

$$J_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{(x)^{2m}}{2^{2m} (m!)^2} \quad 2.46$$

将式 2.40-2.44 代入式 2.39 中可求得特征值 β_m , 再将 β_m 和 c_m 代入式 2.33 中可得齐次方程组的解

$$T_h(r, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} c_m e^{-\alpha \beta_m^2 t} R_0(\beta_m, r) \cdot \int_a^b r' R_0(\beta_m, r') F(r') dr' \quad 2.47$$

将稳态问题和齐次问题的解相加可得管道温度关于时刻和内径之间的定量关系:

$$T(r, t) = T_s(r) + T_h(r, t) = c_1 + c_2 \cdot \ln(r) + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} c_m e^{-\alpha \beta_m^2 t} R_0(\beta_m, r) \cdot \int_a^b r' R_0(\beta_m, r') F(r') dr' \quad 2.48$$

若管道各点对应的内径是关于圆柱坐标的函数，代入式 2.48 中，可以得到管道瞬态温度场模型 $T(r, \varphi, z, t)$ 。

2.2 管道温度场模型验证

采用 Fluent 软件对上述管道瞬态温度场数学模型进行验证，通过有限元模拟计算管道内通入热流体后的温度场变化，与同工况下基于管道瞬态温度场模型的计算结果进行对比，验证管道瞬态温度场数学模型的正确性。

选用图 2.3 中所示的变径管道作为研究对象，其中，管道外径是 42mm，壁厚从 4mm 突变为 2mm，管道总长 200mm。管道材料是 304L 不锈钢，其物性参数列于表 2.1 中。

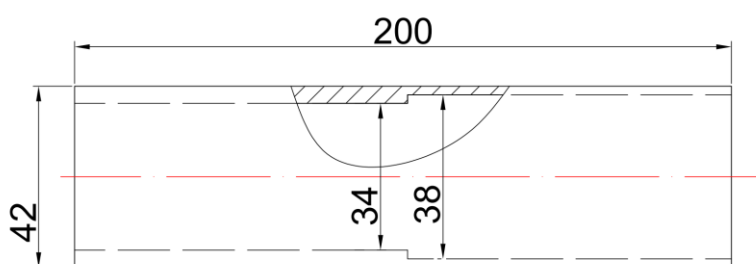


图 2.3 变径管道结构示意图

表 2.1 304L 不锈钢物性参数

参数	数值
密度/ kg/m^3	8030
比热容/ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	502.48
导热系数/ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	16.27

将变径管道 3D 模型导入网格划分软件 ICEM-CFD 中。采用四面体和六面体混合的网格划分方法；由于需要分析的问题属于流固耦合问题，在流体与管道的接触面上温度变化比较复杂，因此需设置膨胀层对耦合边界面进行细化处理，划分的网格如图 2.4 所示。

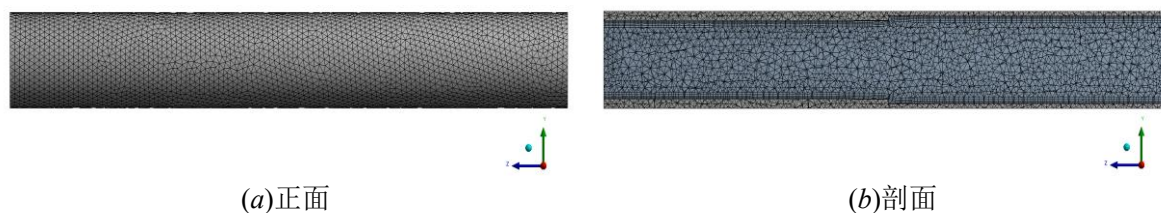


图 2.4 网格划分示意图

将从 ICEM CFD 中生成的网格导入 Fluent 中进行仿真计算。设管道在初始时温度已达到稳态，在管道的入口截面速度均匀分布，初始速度一致，入口类型为速度入口，

出口截面为自然出流类型 (*outflow*); 又因热流体对管道加热属于流固耦合问题, 故需设置流体和固体的接触面, 具体设置参数列入表 2.2 中。

表 2.2 仿真参数设置

参数	数值
流体流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	0.5
流体温度/ $^{\circ}\text{C}$	70
管道初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
管道表面对流换热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	12.4
步长/s	0.02
运算步数	300

对于管内受迫热交换, 常用幂函数作为热准则关联式, 具体如式 2.49 所示:

$$Nu = C Re^n Pr^m \quad 2.49$$

式中, 常数 C 、 n 、 m 均由实验数据确定, 当流体流态为紊流时, 使用最广的关联式是迪图斯-贝尔特(Dittus-Boelter)公式, 根据流体类型分为以下两种:

加热流体:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \quad (t_w > t_f) \quad 2.50$$

冷却流体:

$$Nu_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} \quad (t_w < t_f) \quad 2.51$$

当管内流体流态为层流时, 常用西得和塔特提出的常壁温层流换热关联式, 如式 2.52 所示。

$$Nu_f = 1.86 Re_f^{1/3} Pr_f^{1/3} \left(\frac{l}{d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad 2.52$$

需要注意的是, 由于实际对流换热时由于流体气态或者液态、温差变大或变小、流态稳定还是变化等因素, 往往会比较复杂。所以上述经验关联公式一般存在 20% 以内的计算误差。

通过计算可以知道管内流体处于紊流状态, 管内属于受迫紊流对流换热, 又因为流体在管内是被冷却的过程, 所以对应的努塞尔数计算公式以 2.51 为基准, 根据实际管道运行情况, 将式 2.51 进行修正, 具体如式 2.53 所示:

$$Nu_f = 0.008 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3} \quad 2.53$$

管内对流换热系数计算公式如式 2.54 所示:

$$h = Nu_f \frac{\lambda_f}{a} \quad 2.54$$

将上述参数带入到管道瞬态温度场的数学模型中，计算出管道通入流体后温度场的变化情。图 2.5 为仿真结果和基于瞬态温度场模型计算结果中不同壁厚下管道外表面温度随时间变化对比图。由图可知，对于管道上同一点的温度随时间变化的曲线，基于 Fluent 仿真的结果与基于数学模型计算的结果总体拟合度良好，管道温度刚开始变化时误差较大，当管道温度趋于稳定时温度都稳定在 70°C 。

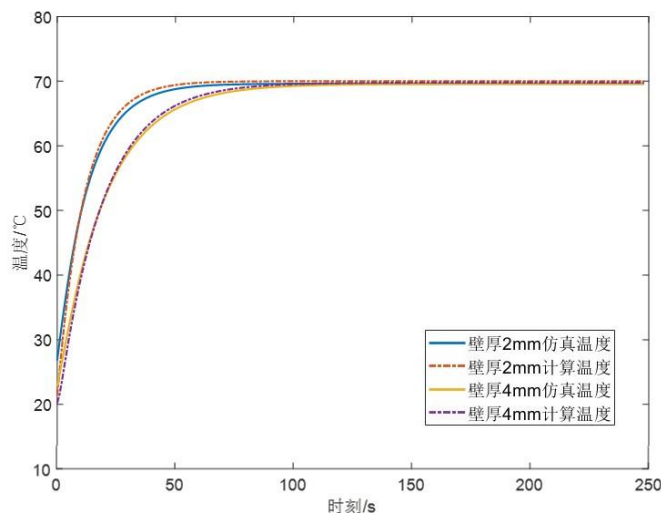


图 2.5 不同壁厚下的管道表面温度随时间变化曲线

提取仿真结果中管道表面同一轴线上在第 2s、4s、6s 时轴向的温度分布曲线，与相同条件下基于管道瞬态温度场数学模型计算的轴向表面温度相对比，如图 2.9 所示。

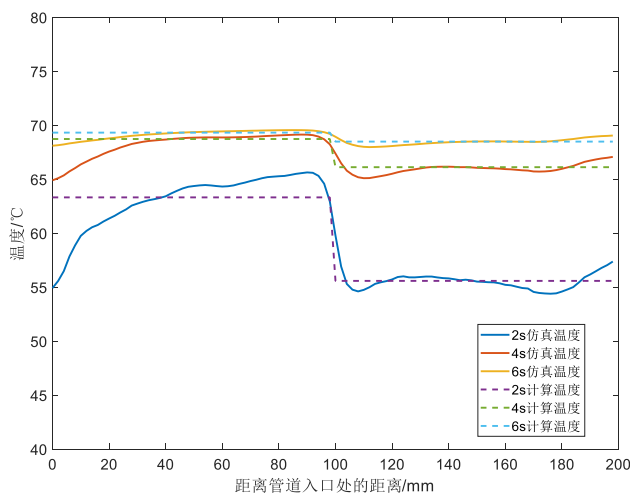


图 2.6 同一时刻管道表面温度延轴向分布曲线

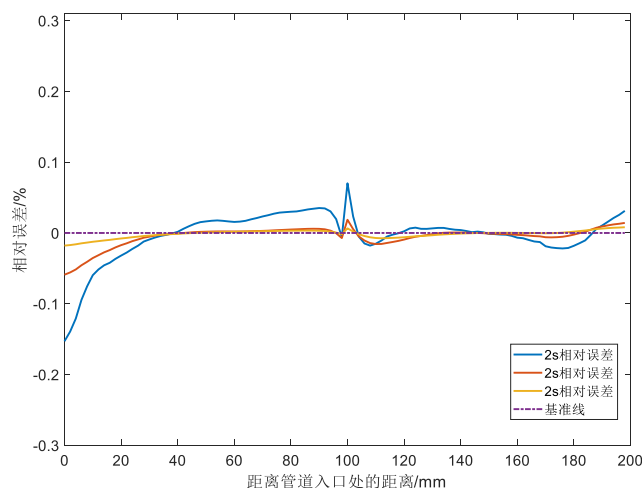


图 2.7 同一时刻管道表面温度延轴向分布相对误差

由图 2.6 可知，同一时刻下管道入口处和变径处基于 Fluent 仿真的管道表面温度值与基于数学模型计算的管道表面温度误差较大，其他位置拟合相对较好。其中管道入口处温度的误差较大是由于在粘性流体流过固体表面时会在靠近壁面的一个很小的区域内形成速度发生剧烈变化的薄层，称为流动边界层，当流体通入管道时，流动边界层具有从零开始增长的发展过程，这个区域称为入口段，在管道入口段热边界层较薄，局部表面热传导系数比发展段要高，且沿主流方向逐渐降低，由于数学模型的建立过程中没有考虑入口段的影响，故在入口段的误差较大；另外在变径处由于管道变径导致流体流态和流速发生变化，因此在变径处的误差较大。

以 Fluent 仿真数据作为基准，计算图 2.6 中基于管道瞬态温度场模型计算值曲线上各点的相对误差值，如图 2.7 所示，可以看出基于 Fluent 仿真的管道表面温度与基于数学模型计算的管道表面温度相对误差在入口段和变径处误差较大，总体相对误差小于 15%。

2.3 本章小结

(1) 基于热传导理论构建描述管道热传导问题的数学方程，根据分离变量法将其分解一个稳态问题和一个齐次问题，对于齐次问题需要分离成关于时间的和关于空间的两个独立函数，利用微分方程求解方法求解时间函数，结合定解条件和斯特姆-刘维尔问题求解方法求解空间函数，最后根据上述各函数建立管道瞬态温度场的数学模型；

(2) 为验证管道瞬态温度场数学模型的正确性，基于 Fluent 模拟变径管道内通入热流体后的管道温度场的变化。提取基于 Fluent 仿真结果中管道表面的温度值，与基于管道温度场数学模型的计算结果相对比，分析证明数学模型的正确性。

第三章 管道缺陷中点处温度分布模型修正

本章以阶梯状缺陷管道为研究对象，通过 Fluent 仿真模拟管道内通入热流体后管道温度场的变化过程。对比并分析仿真结果与基于管道瞬态温度场模型的计算结果，提取缺陷区域中点处的温度随时间变化曲线，通过对不同条件下的仿真结果和模型计算结果比值进行分析，引入修正因子对缺陷中点处温度场进行修正，根据拟合^[46]确定修正因子与管道缺陷之间的关系，带入原数学模型实现对缺陷中点处计算温度值进行修正，并根据测试结果证明了修正后可以提高在缺陷中点处的计算精度。

3.1 阶梯状缺陷管道有限元仿真

根据第二章变径管道表面基于 Fluent 仿真温度与基于管道瞬态温度场模型计算温度值的对比，可以看出以 Fluent 仿真温度为基准时，在管道内径突变处，基于瞬态温度场模型的计算误差较大。因此可以推断，在有缺陷的管道中，缺陷处基于瞬态温度场模型的计算误差也相对较大。为实现对缺陷管道瞬态温度场模型的优化，需研究不同缺陷深度下的计算误差，因此本章选用图 3.1 所示的阶梯状缺陷管道模型作为研究对象，其中，管道全长 300mm，外径 42mm，正常壁厚 4mm，在其内壁加工阶梯状缺陷，缺陷深度分别为 3mm、2mm、1mm，最深阶梯处壁厚为 1mm。管道材料是 304L 不锈钢，其物性参数见表 2.1。

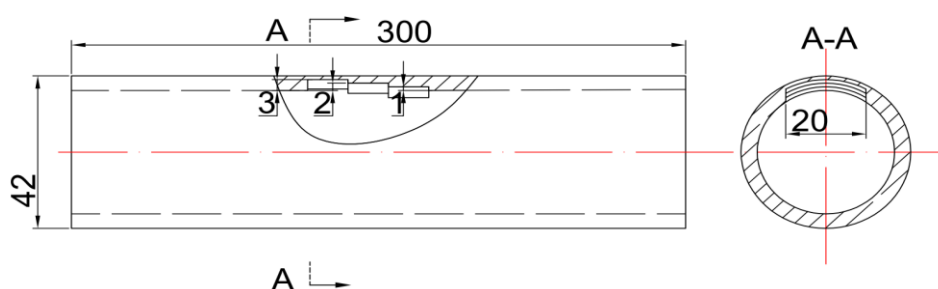


图 3.1 阶梯状缺陷管道结构示意图

网格划分过程与变径管道的网格划分方法类似，采用四面体和六面体混合的方式划分网格，并在流体与管道的接触面设置膨胀层；考虑到在阶梯状缺陷处温变化较剧烈，对局部网格进行细化，划分的网格结果如图 3.2 所示。

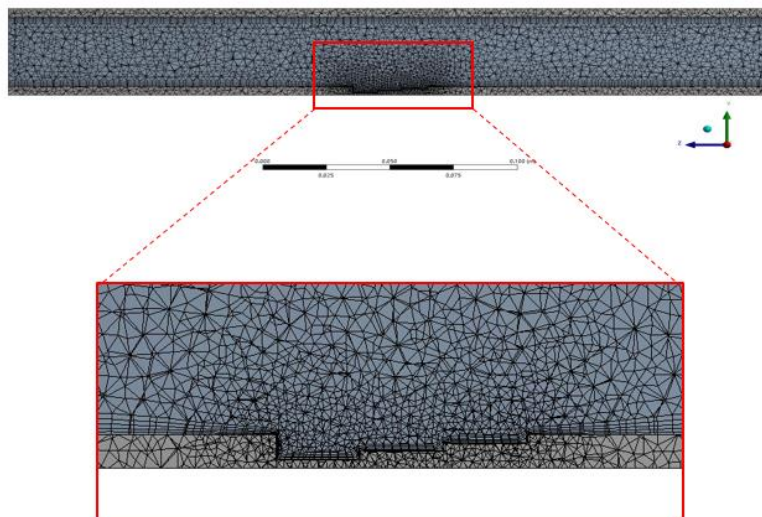


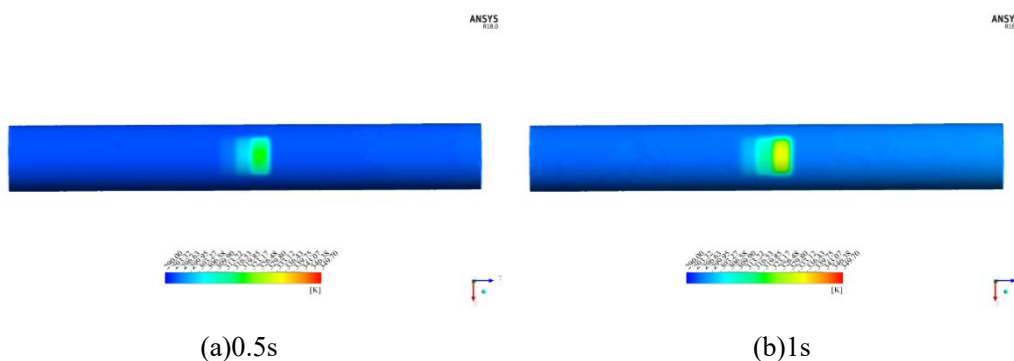
图 3.2 阶梯状缺陷管道网格划分示意图

将 ICEM-CFD 中生成的网格导入 Fluent 中进行仿真计算，仿真参数设置如表 3.1 中所示。

表 3.1 仿真参数列表

参数	数值
流体流速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1
流体温度/ $^{\circ}\text{C}$	70
管道初始温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
步长/s	0.05
运行步数	300

仿真结束后利用 Fluent 自带的后处理软件 CFD-POST 提取阶梯状缺陷管道外表面温度分布云图，如图 3.3 所示，其中管道右侧是热流体的入口。



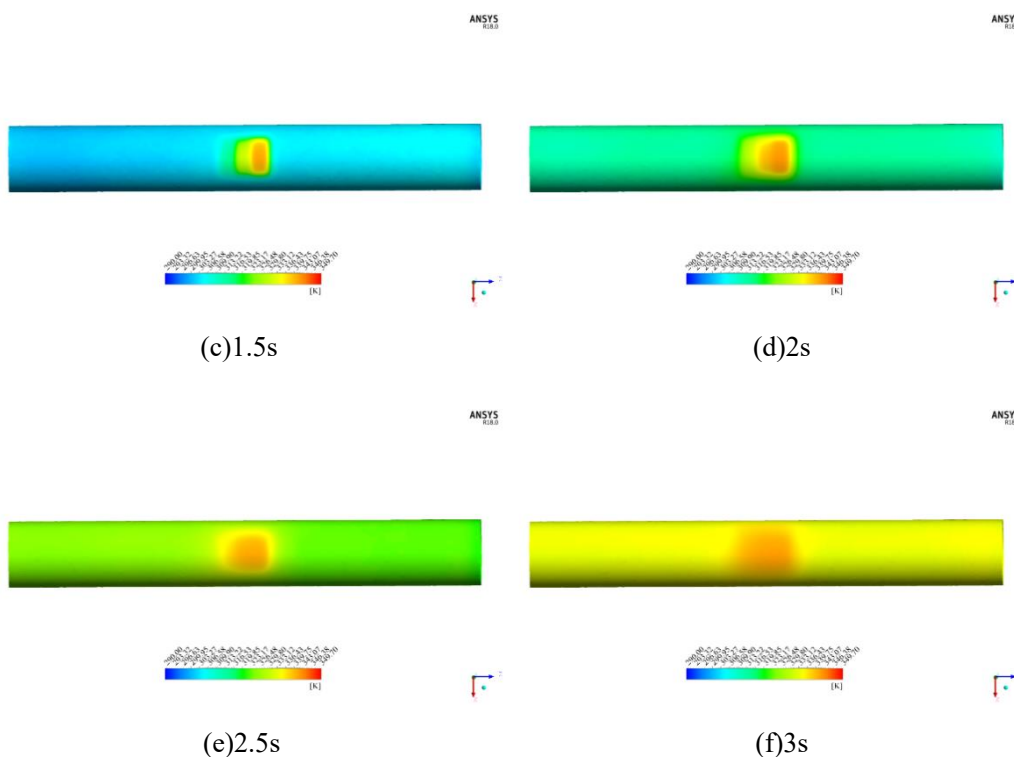


图 3.3 管道表面温度分布云图

3.2 管道瞬态温度场模型误差分析

利用 CFD-POST 提取仿真结果中不同缺陷深度对应的管道表面温度随时间变化曲线，如图 3.4 所示，从图中可以看出，在管道内通入热流体的最初一段时间内，管道表面温度变化较为剧烈，结合傅里叶定律可知，当管道内刚通入热流体时管道与流体之间的温度差较大，温度梯度较大，故热流量也相对较高，导致管道在通入热流体最初一段时间内温度变化较剧烈。

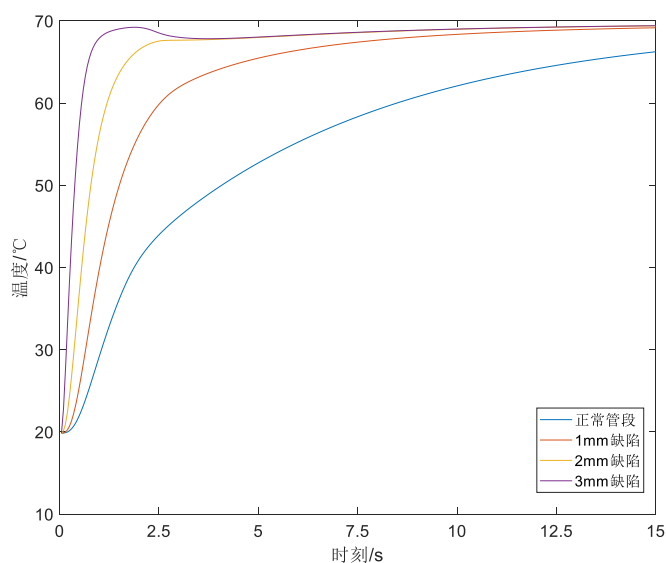


图 3.4 不同缺陷深度对应的管道表面温度随时间变化曲线

以 Fluent 仿真结果为基准, 根据式 2.48 所示的管道瞬态温度场模型可以求出在某一固定时刻管道表面的温度分布。由于在管道内刚通入热流体时, 管道温度场变化较为剧烈, 有利于对模型误差的分析。因此以 0.5s、2.5s、5s 时的管道温度场为例, 对比通过缺陷的轴线上基于 Fluent 仿真的温度值与基于管道瞬态温度场模型计算温度值, 如图 3.5 所示。

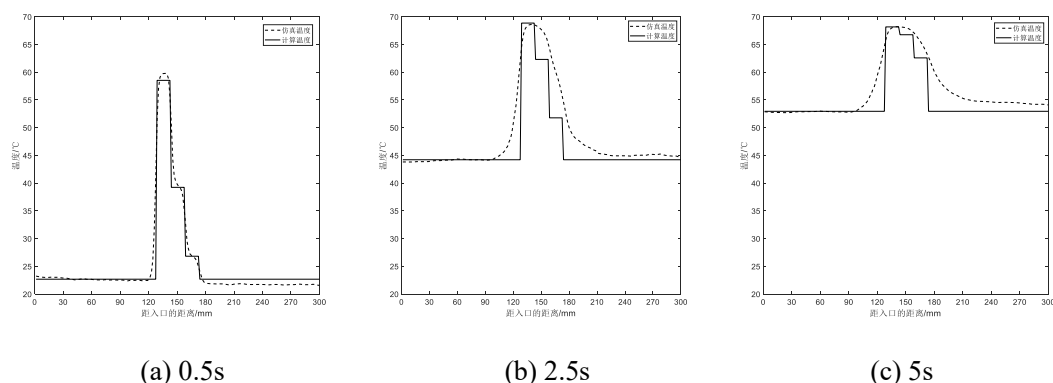


图 3.5 阶梯状缺陷管道轴向温度分布

对比图 3.5 中基于 Fluent 仿真温度值和基于管道瞬态温度场模型计算温度值可以得出以下结论: 管道入口段的正常管道段, 仿真数据和基于管道瞬态温度场的计算数据拟合良好, 且入口段效应随时间推移逐渐减少; 由于在缺陷处流体流态和流速会受到影响, 导致管道内对流换热系数与正常管段不同, 会使管道表面温度在缺陷处基于管段瞬态温度场模型计算值的误差较大, 基于 Fluent 仿真的数据主要有以下四个特点:

1) 在缺陷深度为 3mm 处, 仿真温度曲线达到最高值, 而后随着管段内缺陷深度的降低, 仿真温度逐渐降低。所以在未达到温度平衡的情况下, 缺陷深度越大, 缺陷处对应的管道表面温度值越高;

2) 三个不同时刻图像中, 管道从正常管段突变至 3mm 缺陷时, 仿真温度曲线的梯度明显大于管道从 1mm 突变至正常管段时的梯度。说明, 当缺陷深度变化越大时, 仿真曲线的温度变化梯度越大;

3) 对于 0.5s 时轴线上的温度分布, 在 3mm 缺陷深度处, 由于缺陷左右两侧的管道壁厚都大于此处, 结合傅里叶定律可知, 由于管道壁厚较大, 导致管道的热流密度减小, 所以在 3mm 缺陷左右两侧管道的温度会相对较小, 由于受到周围温度场的影响, 3mm 缺陷段对应的温度曲线呈开口向下的抛物线; 同样, 在缺陷深度为 2mm 处的管道, 由于左侧缺陷深度为 3mm, 右侧缺陷深度为 1mm, 所以在此段对应的仿真温度变化曲线呈单调下降的趋势;

4) 由图 3.5 可知, 随着管道温度场的发展, 外表面温度逐渐趋于稳定, 缺陷处对应的管道表面温度与正常管段之间的温差减小, 所以缺陷处仿真温度曲线的特征也会削弱。

对于缺陷右侧的正常管段, 图 3.5a 中由于管道内刚通入热流体, 管道壁面温度与流体温度相差较大, 对应的热流量较大, 当热流体经过前边的热交换到达缺陷右侧正常管道时, 流体的温度已经下降, 导致在缺陷右侧正常管段处仿真温度值小于模型计算温度

值。在图 3.5b 和图 3.5c 中，随着管段温度场的发展，管段入口正常管段和缺陷段的温度都逐渐趋于稳定，热流量也相对减少，故达到缺陷右侧正常管段的流体热量更多，且由于流体在缺陷处会发生扰动，如图 3.6 所示，导致缺陷过后的流体混乱度更高，且流速相对增加，使得缺陷右侧的正常管段处对流换热系数较大，所以在图 3.5b 和 3.5c 中，此段管段表面基于 Fluent 的仿真温度值大于管段瞬态温度场模型的计算值。

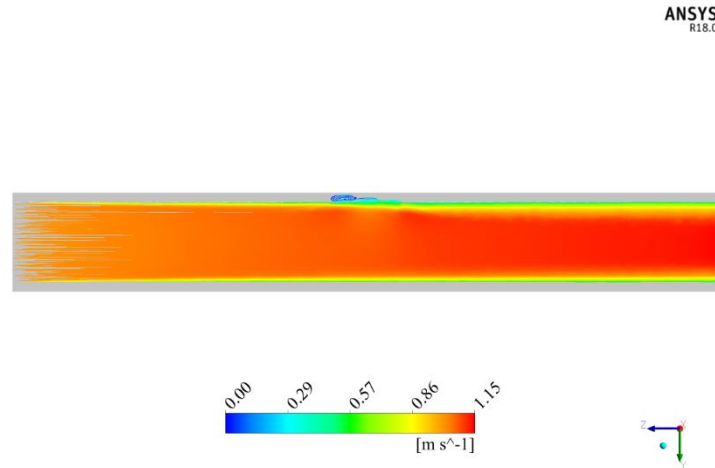


图 3.6 管内流体流速的分布图

根据上述分析，由于缺陷处温度场会受到左右两侧温度场的共同作用，假设缺陷处各点受其左右两侧温度场的作用量相同，则在缺陷中点对应的管道表面处，基于 Fluent 的仿真温度值与该缺陷深度下基于管道瞬态温度场模型的计算温度值相同，因此下文仅对缺陷中点处的温度值进行修正。

3.3 管道缺陷中点处温度分析

基于管道瞬态温度场模型计算管内通入 70°C ， 1m/s 流体时在 1mm 缺陷中点处的管道温度随时间变化曲线，与同一点基于 Fluent 仿真得到的温度随时间变化曲线绘制在同一图中，如图 3.7 所示。图中可以看出，在前 2.5s 内管道表面温度变化较为剧烈，且由于管道瞬态温度场模型中未考虑左右两侧管壁温度场的作用，导致基于管道瞬态温度场的计算结果相对于基于 Fluent 仿真的温度值存在滞后或超前，使得模型在温度变化较为剧烈的时间段内计算的相对误差较大。

在模型计算温度值达到稳定之后，由于仿真中的自然对流换热系数随着管道外壁温度的增加而逐渐变大，而管道瞬态温度场模型中的外表面自然对流换热系数是固定值，从而导致基于 Fluent 仿真的温度在模型计算温度达到稳定之后仍会继续上升，且最终稳定在稍高于模型计算值的位置。

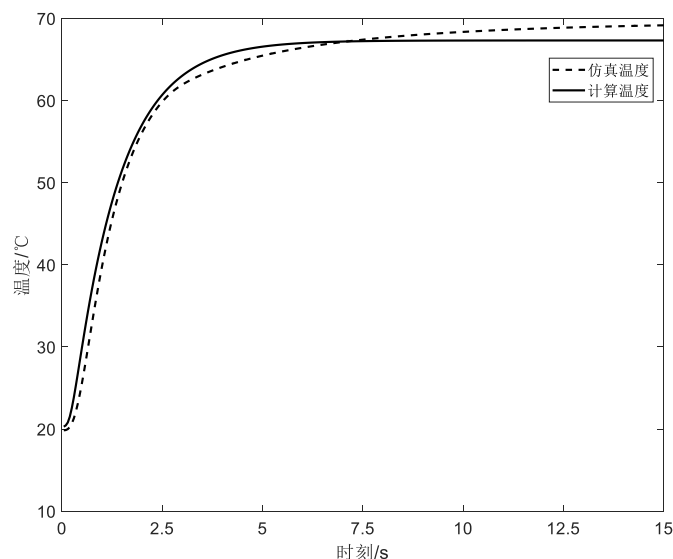


图 3.7 1mm 缺陷中点处温度随时间变化曲线

图 3.8 是图 3.7 中基于 Fluent 仿真温度值与基于管道瞬态温度场模型计算温度值的相对误差。由图可知，在前 2.5s 管道温度变化剧烈，管道缺陷中点处基于管道瞬态温度场模型的计算误差较大，相对误差在最高点会超过 25%，在 2.5s 后随着管道表面基于 Fluent 仿真温度值趋于稳定，模型计算值的相对误差也逐渐稳定并趋于 0。

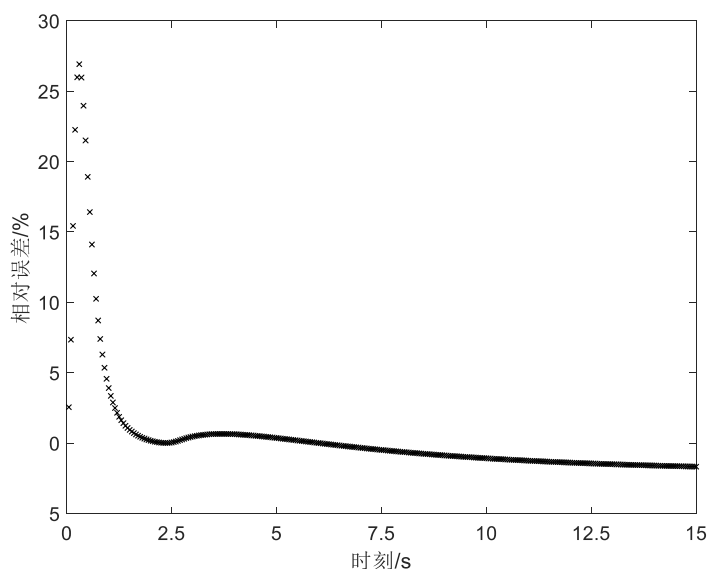


图 3.8 仿真温度与模型计算温度相对误差

为减少在缺陷中点处基于管道瞬态温度场模型的计算误差，对缺陷中点处管道瞬态温度场模型计算结果进行修正。由于当选用修正值对计算结果进行修正时，修正值的大小会随基于 Fluent 仿真的基准温度变化而变化，导致对影响修正值的参数分析更为复杂。因此文中采用修正因子对缺陷中点处管道瞬态温度场模型计算结果进行修正。修正因子如式 3.1 所示：

$$\xi = \frac{T_m}{T_f} \quad 3.1$$

其中, T_m 为基于管道瞬态温度场模型计算结果; T_f 为基于 Fluent 仿真温度值。

对于图 3.7 中两条曲线, 各点上的修正因子散点图如图 3.9 所示, 从图中可以看出, 修正因子随时间变化, 结合上述分析可知, 当温度变化较为剧烈时, 基于管道瞬态温度场模型的计算误差较大, 对应 ξ 也较大。

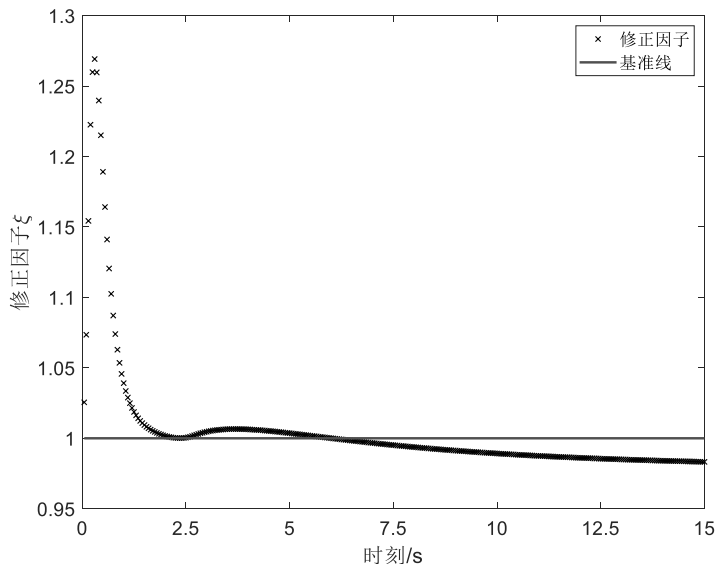


图 3.9 仿真温度于模型计算温度值比值

用同样的方法计算缺陷深度为 2mm 和 3mm 时缺陷中点处修正因子 ξ , 如图 3.10 所示。从图中可以看出, 修正因子的曲线随管道缺陷深度的变化而变化, 随着管道缺陷深度的增加, 在缺陷中点处温度修正因子峰值增加, 且峰值出现的时刻更早, 说明缺陷深度越大则对管道流体的扰动越剧烈, 导致流体流态和流速的变化更大, 从而使得缺陷处对流换热系数相对于正常管道变化更大。

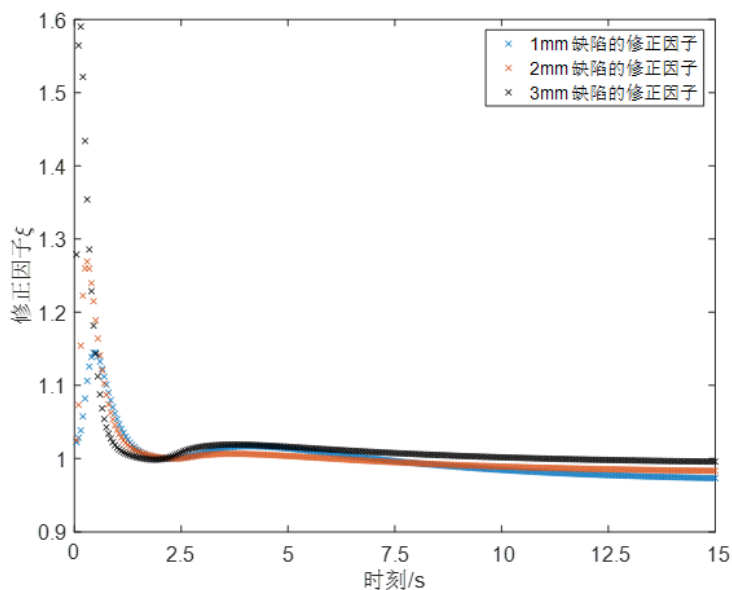


图 3.10 不同缺陷深度对应中点处修正因子值

给出同一缺陷深度的中点在不同流体温度下的修正因子, 如图 3.11 所示。从图中三

幅图可以看出，在缺陷深度相同时，修正因子的峰值随流体温度的降低而减少，结合热传导的理论可以推出当流体温度变小且管道壁面温度相同的情况下，管壁与流体的温差减少将削弱由管道结构变化引起的流体流态、流速变化对对流换热系数的影响。对比不同缺陷深度的修正因子，随着缺陷深度的增加，修正因子的波动减少，趋于稳定的时间也相对提前，符合管道表面温度变化的规律。

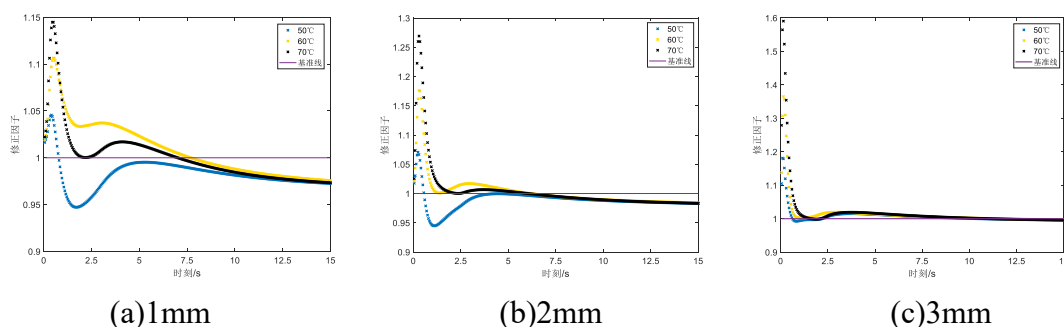


图 3.11 不同流体温度下各缺陷对应中点处修正因子

对于不同流速下、同一深度的缺陷，在其对应的管道外表面中点处求得基于管道瞬态温度场模型计算值与基于 Fluent 仿真温度值的比值，如图 3.12 所示，从图中可以看出，同一缺陷深度中点处的修正因子在不同流体流速时的变化较小，说明流体流速对于管道结构变化引起的流体流态、流速变化的影响较小。

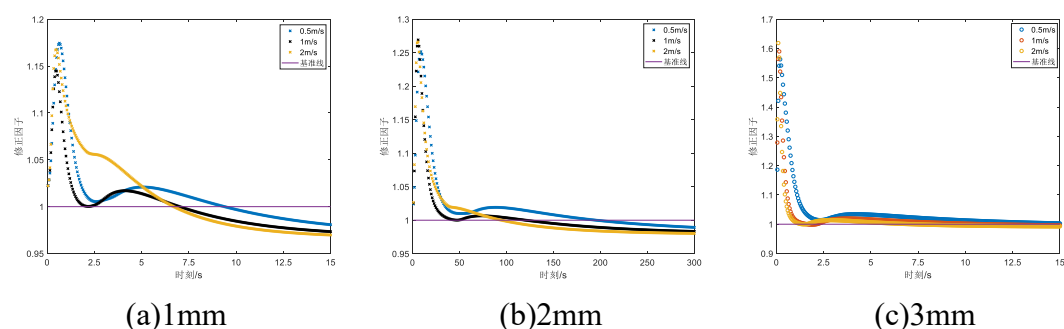


图 3.12 不同流体速度下各缺陷对应中点处修正因子

3.4 修正因子最小二乘法拟合

根据上述管道缺陷中点处温度分析，缺陷中点处温度的修正因子会随着时间变化；缺陷的深度和流体温度也会影响修正因子的取值。

3.4.1 修正因子对时间的拟合求解

管道缺陷的检测主要采集管道壁面温度变化较为剧烈时段的数据。根据图 3.7 及其分析可知，在温度变化较为剧烈的时段，基于管道瞬态温度场模型计算的温度值与基于 Fluent 仿真温度值差值较大，修正因子 ξ 也较大，而当温度趋于稳定时，修正因子 ξ 较小。因此为方便分析不同结构参数或者流体条件下修正因子的变化规律，在下文中仅对温度变化较为剧烈时段的修正因子进行处理。

以管道内通入 70℃, 1m/s 热水时基于 Fluent 的仿真数据为例, 1mm 缺陷深度的中点处管道表面温度值的修正因子在最初 1s 内变化较为剧烈, 散点图如图 3.13 所示, 主要有以下两个特点:

- 1) 散点图曲线呈开口向下的形状;
- 2) 由于修正因子是两种方法计算所得温度值的比值, 故修正因子的基准值是 1。

根据上述散点图分布的特点, 用一阶傅里叶函数作为修正因子的拟合函数, 拟合函数的形式如下所示:

$$f(t) = a - b * \cos(w * t) + b * \sin(w * t) \quad 3.2$$

利用最小二乘法拟合管道内通入热水 1s 内的修正因子, 拟合结果如式 3.3 所示, 拟合曲线与原始散点图的对比如图 3.13 所示。

$$f(t) = 1.08 - 0.0588 * \cos(0.2569 * t) + 0.0588 * \sin(0.2569 * t) \quad 3.3$$

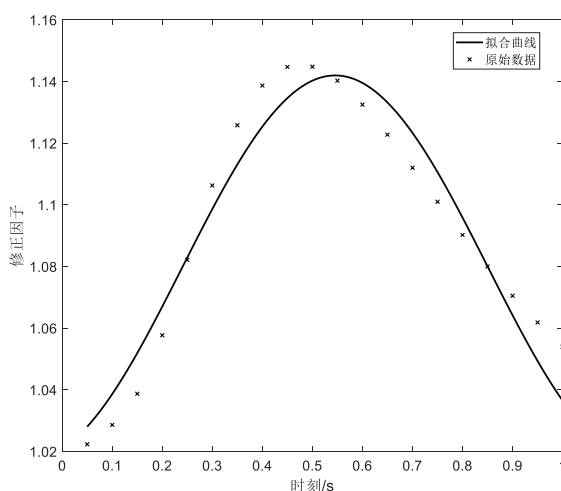


图 3.13 修正因子散点图及拟合曲线

为实现该拟合形式与其它拟合形式的效果对比, 引入评价指标均方根 (*RMSE*) 和确定系数 (*R-square*) 判断拟合的效果, 具体定义及计算公式如下:

均方根 (*RMSE*), 也叫回归系统的拟合标准差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad 3.4$$

确定系数 *R-square* 则需要通过另外两个参数 *SSR*、*SST* 计算。

(1) *SSR*: Sum of squares of the regression, 即预测数据与原始数据的差的平方和, 公式如下

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad 3.5$$

(2) *SST*: Total sum of squares, 即原始数据和均值差的平方和, 公式如下

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad 3.6$$

确定系数 $R-square = \frac{SSR}{SST}$ 。

式 3.3 中拟合结果的确定系数 $R-square=0.9399$ ，均方根 $RMSE=0.0107$ 。利用 Matlab 自带的拟合工具箱中分别采用不同的方法进行拟合，将各拟合结果的 $RMSE$ 和 $R-square$ 列入表 3.2 中，可以看出二阶有理数的拟合结果中均方根 $RMSE$ 最小，确定系数 $R-square$ 最大，且相对式 3.2 的拟合效果更优。但二阶有理数逼近的函数形式较为复杂，不利于分析不同条件对修正因子的影响，综合考虑拟合结果和拟合函数复杂度，因此本文采用式 3.2 对修正因子进行拟合。

表 3.2 拟合效果对比表

拟合形式	1 阶		2 阶	
	$R-square$	$RMSE$	$R-square$	$RMSE$
指数逼近	0.1497	0.064	0.8914	0.0243
有理数逼近	0.769	0.03489	0.9756	0.01102
幂逼近	0.4732	0.05095	0.6675	0.04055
多项式逼近	0.1466	0.0648	0.259	0.0602

3.4.2 修正因子函数参数最小二乘法拟合

根据上述分析，通过式 3.2 对不同流速和温度下各缺陷深度中点处所对应温度值的修正因子进行拟合，拟合结果如表 3.3 所示。

表 3.3 不同参数下的拟合结果列表

序号	水温/°C	流速/m/s	缺陷深度/mm	a	b	w
1	70	0.5	1	1.089	0.0571	5.959
2	70	0.5	2	1.134	0.841	6.148
3	70	0.5	3	1.024	0.1276	7.224
4	70	1	1	1.081	0.0588	5.137
5	70	1	2	1.141	0.0803	6.399
6	70	1	3	1.235	0.1558	7.258
7	70	2	1	1.090	0.0462	5.269
8	70	2	2	1.151	0.0701	6.548
9	70	2	3	1.001	0.1301	7.691
10	60	1	1	1.037	0.0325	5.421
11	60	1	2	1.084	0.0583	6.374
12	60	1	3	1.028	0.1163	6.943
13	50	1	1	1.007	0.00459	5.42
14	50	1	2	1.002	0.01159	6.157
15	50	1	3	1.072	0.01904	7.845

从表 3.3 可以看出，当管道内通入相同温度和流速的热水时，在不同缺陷深度的中

点处,对应的修正因子拟合函数参数 w 和参数 b 均会发生较大变化,而参数 a 的变化相对较小;当管道内流体流速确定且流体温度变化时,对于同一缺陷深度的中点位置,对应的修正因子拟合函数参数 b 会发生较大的变化,而参数 a 、 w 相对变化较小;当管道内流体温度确定,流体流速变化时,对于同一缺陷深度的中点位置,参数 a 、 b 、 w 的相对变化均较小。综上所述,流体温度和缺陷深度的变化均会对修正因子的参数造成影响,其中参数 w 主要受到缺陷深度的影响,参数 b 则会同时受到缺陷深度和流体温度的影响。

对于拟合函数(式 3.2),参数 b 主要影响图像的波动幅度,即修正因子拟合曲线的峰值;参数 w 影响的是曲线峰值出现的时间, w 越大则缺陷峰值出现的越早,反之缺陷峰值出现的越晚;常数项 a 主要影响函数图像的中心值,由于本文主要对温度变化较为剧烈时段缺陷中点处基于管道瞬态温度场模型计算误差进行修正,且当温度趋于稳定后,基于管道瞬态温度场模型的计算值与基于 Fluent 仿真温度值的误差较小,修正值会稳定在 1 附近,故 a 取值为 1。结合 3.3 节的分析研究,缺陷深度影响参数 w 和 b ,而流体温度主要影响参数 b ,这与表 3.3 的分析结论也是吻合的。

为确定缺陷深度与参数 w 之间的规律,在保持流体流速和温度不变的情况下,通过 Fluent 模拟多组缺陷深度中点处的温度随时间变化情况,利用式 3.2 对其温度变化较为剧烈时段的修正因子进行拟合,而后利用最小二乘法对参数 w 和缺陷深度 $depth$ 进行拟合,具体拟合结果如式 3.7 所示,拟合曲线如图 3.14 所示,均方根 $RMSE=0.0134$,确定系数 $R\text{-square}=0.965$:

$$f_1(depth) = 0.07086 \times depth^{2.806} + 5.77 \quad 3.7$$

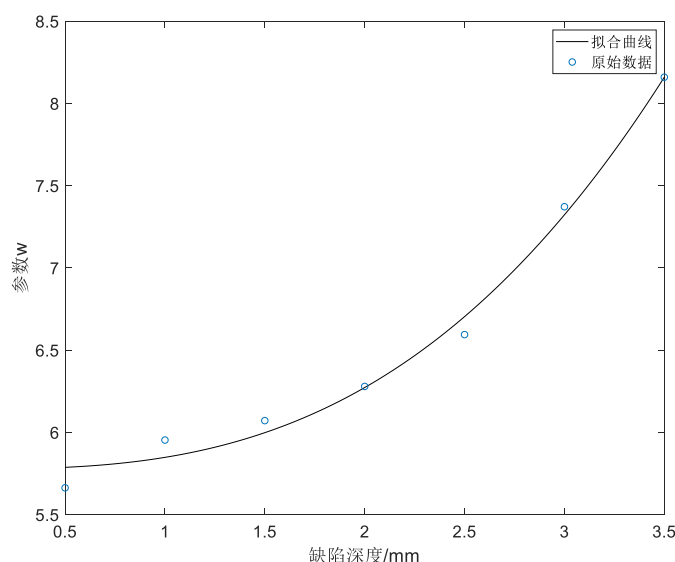


图 3.14 参数 w 的拟合曲线

同样可以拟合参数 b 关于流体温度和缺陷深度的函数 $f_2(T_w, depth)$, 拟合结果如式 3.8 所示,由于参数 b 的函数包含两个变量,因此拟合出的函数以空间曲面形式呈现,

如图 3.15 所示，拟合结果的均方根 $RMSE = 0.0123$ ，确定系数 $R-square = 0.953$ 。

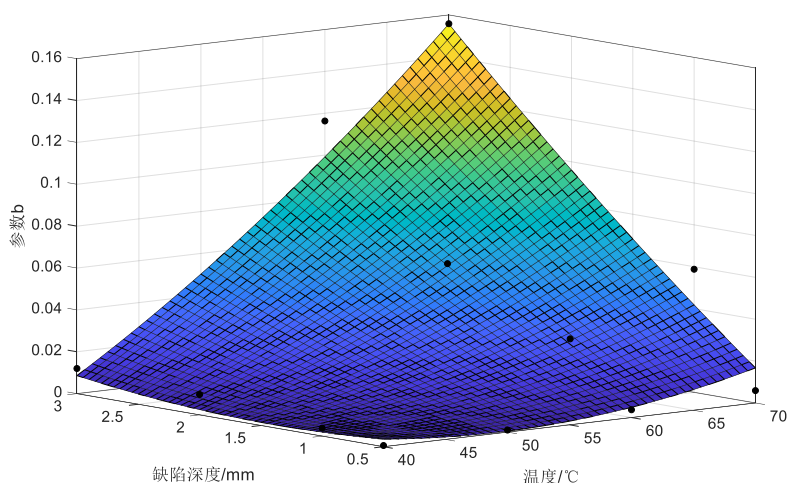


图 3.15 参数 b 的拟合曲面

$$f_2(T_w, depth) = 0.1296 - 0.00457 \times T_w - 0.079 \times depth + 3.74 \times 10^{-5} \times T_w^2 + 0.00178 \times T_w \times depth + 0.00273 \times depth^2 \quad 3.8$$

将式 3.7 和 3.8 带入式 3.2 中，可以得到管道缺陷中点处温度值的修正因子函数如式 3.9 所示：

$$f(t, T_w, depth) = 1 - f_2(T_w, depth) \times [\cos(f_1(depth) * t) - \sin(f_1(depth) * t)] \quad 3.9$$

可以通过式 3.9 对内径为 34mm，外径为 42mm 的管道中任意深度缺陷中点处，在给定流体流速和温度条件下，对管道瞬态温度场模型的计算温度值进行修正。将式 3.9 带入式 2.48 中可得缺陷中点处的温度修正函数如式 3.10 所示：

$$T'(r, t) = f(t, T_w, depth) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{N(\beta_m)} c_m e^{-\alpha \beta_m^2 t} R_0(\beta_m, r) \cdot \int_a^b r' R_0(\beta_m, r') F(r') dr' \quad 3.10$$

其中， $T'(r, t)$ 为管道缺陷中点处修正后的温度值； t 为管道内通入热水的时长； T_w 为管道内流体的温度。

3.5 修正因子函数验证

根据最小二乘法拟合获得修正因子函数，以管道内通入 65°C，1.5m/s 热水时的管道温度变化数据为例，对管道瞬态温度场模型的计算温度值进行修正，将管道内通入流体的温度带入到修正因子函数（式 3.9）中，可以得到不同缺陷深度下修正因子随时间变化的函数，对应的参数如表 3.4 所示：

表 3.4 不同缺陷深度修正因子函数参数表

缺陷深度	a	B	w
1mm	1	0.0304	5.841
2mm	1	0.0757	6.266

分别提取基于 Fluent 仿真数据中管道缺陷深度为 3mm、2mm、1mm 的管段中点处温度随时间变化曲线，计算基于 Fluent 仿真温度与修正前后基于管道瞬态温度场模型计算温度的比值，如图 3.16 所示，从图中可以看出，在温度变化较为剧烈的时间内修正后的缺陷中点处基于模型计算温度值与基于 Fluent 仿真温度值的比值明显减小。

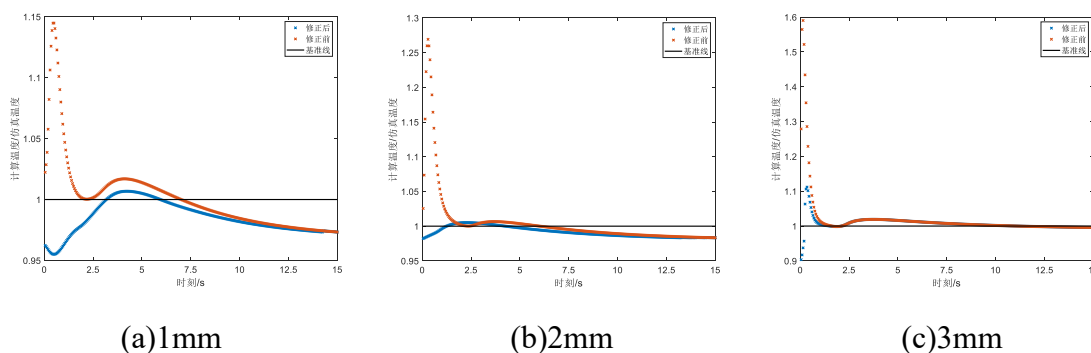


图 3.16 不同缺陷深度修正前后基于模型计算温度与仿真温度比值

对于缺陷深度为 2mm 处，控制管内流体的流速为 1m/s，当流体温度分别为 70℃、60℃、50℃时，计算缺陷中点处基于 Fluent 仿真温度与修正前后基于管道瞬态温度场模型计算温度的比值，如图 3.17 所示。从图中可以看出，对于不同温度下相同缺陷深度时，在温度变化较为剧烈的时间内，修正后的缺陷中点处的模型计算温度值与仿真温度值的比值明显减小。

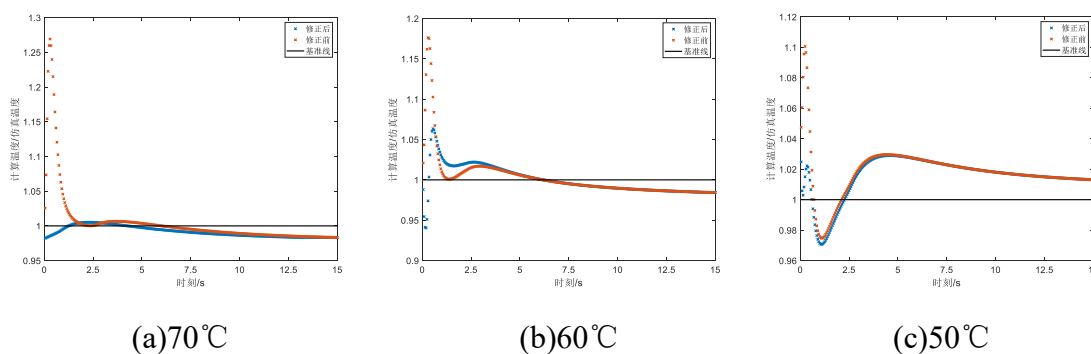


图 3.17 不同流体温度修正前后基于模型计算温度与仿真温度比值

计算上述管道缺陷中点处瞬态温度场修正模型计算结果的相对误差，如图 3.18 所示，可以看出以 Fluent 仿真数据为基准，修正后缺陷中点处温度随时间变化曲线上各点相对误差可控制在 10%之内，相对于图 3.8 中未修正模型相对误差高达 25%，有很大的提高。说明本章给出的缺陷中点处修正因子函数可以提高计算温度值的精度。

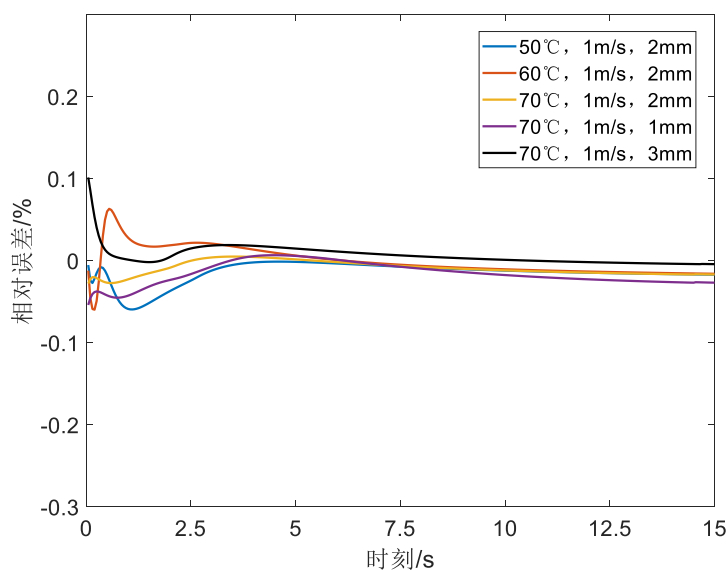


图 3.18 修正后缺陷中点处温度值的相对误差

3.6 本章小结

- 1) 通过 Fluent 仿真模拟阶梯缺陷管道内通入热流体后管道温度场的变化，通过 CFD-POST 提取出仿真数据中管道表面通过缺陷的轴线上的温度分布，并与相同条件下基于管道瞬态温度场模型的计算结果对比，分析管道瞬态温度场模型的误差，得出结论：在理想情况下，基于 Fluent 的仿真温度值在管道缺陷中点处表面温度值与对应缺陷深度下基于模型的计算温度值十分接近；
- 2) 提取管道外表面在缺陷中点处温度值随时间的变化曲线，通过对不同缺陷深度、流体温度和速度条件下基于 Fluent 的仿真温度值与基于管道瞬态温度场模型计算温度值的比值，分析影响不同流体条件或缺陷深度对比值的影响。通过最小二乘法拟合确定修正因子与流体参数和管道缺陷之间的关系；
- 3) 将修正因子与流体条件和缺陷深度定量关系的函数代入管道瞬态温度场模型，得到在管道缺陷中点处修正的温度分布模型。对比不同缺陷深度和不同流体温度下修正前后温度场模型相对基于 Fluent 仿真结果的比值，证明了修正因子可以提高在管道缺陷中点处瞬态温度场模型计算温度值的准确性。

公式节 4

第四章 基于增强烟花算法的缺陷深度定量检测方法

第三章证明修正因子可以提高在管道缺陷中点处瞬态温度分布模型的准确性。本章中将缺陷深度求解的问题转换为寻找使计算温度值误差最小的最优解问题，根据缺陷中点处的修正温度函数，研究强化烟花算法（EFWA）在管道缺陷深度求解过程中的应用，通过具体的实例验证算法的有效性，并从收敛速度和求解精度出发，通过对比强化烟花算法和粒子群算法，证明强化烟花算法在缺陷定量检测中的适用性。

4.1 定量检测方法

基于数学模型的缺陷深度定量计算方法主要包括解析解^[50]和数值解^[53]两种方法：

- 1) 解析解方法：通过数学推导得出缺陷深度关于其他参数（管道表面温度、流速、流体温度等）的严格关系式，将实际测量值带入关系式即可求出缺陷深度；
- 2) 数值解方法：构造目标函数，通过最优解算法求出目标函数的极小值点，极小值点即为缺陷深度值。

对于管道缺陷中点处瞬态修正温度分布模型，由于管道瞬态温度场模型中与缺陷深度相关的函数项较多，且对于贝塞尔函数求解步骤较为复杂，因此本文使用数值解方法进行缺陷深度的定量计算。在数值解方法中，最优解算法是影响计算精度的重要因素，根据缺陷中点处的修正温度函数参数多、计算复杂的特点，引入智能算法^[54]对缺陷深度定量检测。

目前使用较为广泛的集群智能算法包括蚁群算法和粒子群算法^[58]。由于腐蚀管道瞬态温度场模型中的贝塞尔函数使得寻找最优值的过程中存在很多局部最优值，为提高缺陷定量检测的精度，选用 EFWA 进行缺陷深度的定量计算，定量计算流程如图 4.1 所示：

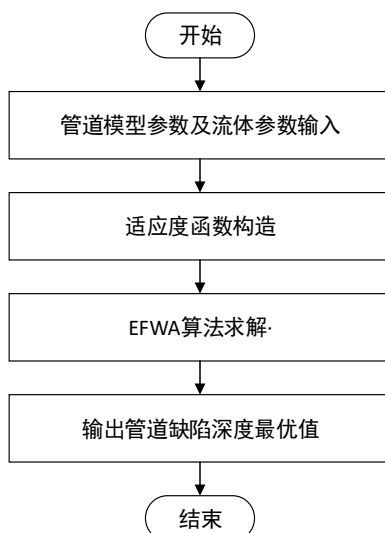


图 4.1 管道缺陷定量计算流程图

4.2 适应度函数构造

EFWA 算法与管道缺陷深度定量计算之间的关系如图 4.2 所示。

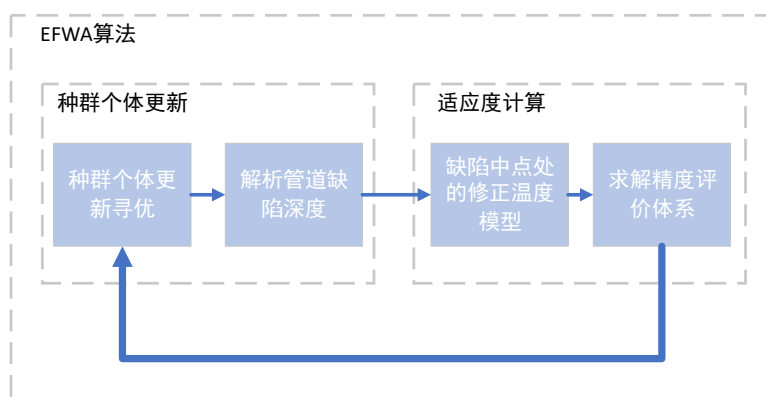


图 4.2 EFWA 算法与管道缺陷深度定量计算关系图

在图 4.2 中，适应度计算是用来评价种群个体优劣的标准，也是种群更新方向和更新幅度的确定依据。因此适应度函数值通常与目标函数有关，一般由目标函数转换求得。集群智能算法一般规定适应度函数取正值，若其数值越大，则表明个体越优。

管道缺陷深度定量计算的目标是获得最优的缺陷深度值，使管道缺陷中点处修正温度函数的计算温度值和实际温度值更加一致，因此目标函数可定义为

$$E(D) = |T_t'(D + r_0) - T_A(t)| \quad 4.1$$

其中， $T_t'(D)$ 是 t 时刻在缺陷中点处修正温度模型的计算温度值； D 是管道缺陷深度； r_0 是正常管段的内径； $T_A(t)$ 是管道在 t 时刻缺陷中点处对应管道外表面的实际温度值。因此适应度更高的种群个体，则其对应的目标函数值应该更小，可行性越高。适应度函数的表达式如下：

$$Fitness'_i = 1/E_i \quad i = 1, 2, \dots, K \quad 4.2$$

其中, $Fitness'_i$ 为第 i 个个体的适应度; E_i 为第 i 个个体对应的目标函数值; K 为群体的规模。

4.3 基于 EFWA 的缺陷定量检测方法

4.3.1 烟花算法 (FWA) 基本原理

烟花算法 (FWA) 是最近提出的基于模拟烟花爆炸过程的群体智能算法, 与真实的烟花爆炸并照亮周围夜空类似, 烟花 (个体) 被是放到潜在的搜索空间中, 对于每一个烟花都会启动爆炸过程并在周围的局部空间生成火花^{[59][60]}。在 FWA 中, 烟花和在其周围生成的火花代表搜索范围内的潜在解决方案, 与其他优化算法类似, FWA 算法是为了寻找目标问题在解空间中的最优解, 形式为如式 4.3 所示, 其中 Ω 是 x 的可行解空间。

$$D_m = \max_{x \in \Omega} Fitness(x) \quad 4.3$$

FWA 提出了一种新的搜索方式, 通过局部空间内的随机爆炸过程搜索潜在的空间。在数学上, 其搜索原理如下: 首先, 随机初始化 N 个烟花, 并计算其适应度以确定初始时每个烟花的爆炸幅度和生成的火花数量。随后, 烟花爆炸并在其周围空间产生不同类型的火花, 通过对比爆炸生成火花的适应度, 从包括原始烟花和爆炸生成火花在内的所有群体中选择 N 个候选烟花。为确保局部和全局搜索的多样性和平衡性, 爆炸幅度和每个烟花新产生火花数量都是不同的。具有更好适应性的烟花可以在较小的范围内爆炸产生更多的火花数量, 相反, 具有较低适应度的烟花只能在较大范围内爆炸产生更少的火花数量。为保证优化过程中的收敛速度和精度, FWA 算法可以调节“搜寻”能力和“探索”能力, 其中“搜寻”能力指的是算法搜索整个空间内各个待搜索区域以确定可能存在最优解区域的能力, “探索”能力指的是在可能存在最优解的小区域内进行彻底搜索以找到最优解的方案。可以通过具有小爆炸范围 (对应高适应度) 的烟花实现“探索”, 可以增强在可能有最优解区域中的局部搜索能力; 通过具有大爆炸范围 (对应低适应度) 的烟花实现“搜寻”, 因为爆炸产生的火花更具有从局部最小值“逃逸”的能力。另外在爆炸之后会随机选择一部分烟花进行高斯变异生成另一种类型的火花, 来进一步确保种群多样性, 避免陷入局部最优, 在 FWA 算法中两种不同方式产生的火花分别称为: “爆炸火花”和“高斯火花”。

在 FWA 算法中通过自适应的方法来平衡“探索”和“搜寻”的能力, 使得有更好适应性的烟花相较适应性低的烟花有更小的“爆炸幅度”和更多的“爆炸火花”。假设烟花数量 N , 维度是 d , 则每个烟花 X_i 的爆炸幅度 A 和爆炸火花的数量 s 计算方法如下:

$$A_i = \hat{A} \cdot \frac{f(X_i) - y_{\min} + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (f(X_i) - y_{\min}) + \varepsilon} \quad 4.4$$

$$s_i = M_e \cdot \frac{y_{\max} - f(X_i) + \varepsilon}{\sum_{i=1}^N (y_{\max} - f(X_i)) + \varepsilon} \quad 4.5$$

其中, $y_{\max} = \max(f(X_i))$, $y_{\min} = \min(f(X_i))$, \hat{A} 和 M_e 是两个控制“爆炸幅度”和“爆炸火花”数量的常数, ε 是一个小量, 可以控制运算过程中不出现除 0 后数值溢出现象。为避免下一代中的烟花数量过多或者过少, 通过下式来控制火花数量:

$$s_i = \begin{cases} \text{round}(aM_e) & (s_i < aM_e) \\ \text{round}(bM_e) & (s_i > bM_e) \\ \text{round}(s_i) & \text{otherwise} \end{cases} \quad 4.6$$

其中, a 和 b 分别是限制种群数量范围的参数, 函数 $\text{round}()$ 用来取四舍五入的值。根据式 4.7 产生“爆炸火花”

$$X_{i,j} = X_i + A_i \cdot (2 \times \text{rand}() - 1) \quad 4.7$$

其中 $X_{i,j}$ 为第 i 个烟花爆炸产生的第 j 个“爆炸火花”位置, $j=1,2,\dots,s_i$ 。在生成“爆炸火花”之后, 选取一部分火花进行变异产生“变异火花”, 引入随机数目, 维度 k 的变异因子 e , 对选中的火花进行变异:

$$\hat{X}_{ik} = X_{ik} \cdot e \quad 4.8$$

根据选择策略从包括烟花、“爆炸火花”和“变异火花”在内的群体中选取新一代的烟花, 首先采用欧式距离计算任意两个个体(烟花、火花)之间的距离, 公式如下:

$$R(x_i) = \sum_{j=1}^K d(x_i, x_j) = \sum_{j=1}^K \|x_i - x_j\| \quad 4.9$$

其中, $d(x_i, x_j)$ 表示个体(烟花、火花)之间的欧氏距离。然后, 计算每个个体被选择的概率

$$p(x_i) = \frac{R(x_i)}{\sum_{m=1}^K R(x_m)} \quad 4.10$$

依据上式可以计算出每个个体被选为下一代的概率, 采用轮盘赌的方式选出下一代个体, 并将最优个体也同时作为下一代的个体。

4.3.2 基于 EFWA 的算法改进和检测流程

传统的烟花算法中没有控制爆炸生成火花的取值范围, 可能会超出可行解空间导致算法失效。本文通过映射将超出可行解空间的火花映射到可行解空间内^[61], 具体映射公式如下

$$\hat{X}_{i,j} = X_{\min} + |X_{i,j}| \bmod (X_{\max} - X_{\min}) \quad 4.11$$

式中, X_{max} 和 X_{min} 分别代表可行空间中 X 可取的最大值和最小值。当可行空间最大值和最小值分别为 1 和 -1 时, 分别取粒子值为 -1.1, 1.2, 2.3, 2.4 时, 经过映射后取值分别为 0.1、0.2、-0.7、-0.6, 可见经过映射后的粒子均在可行空间内。

传统的烟花算法中会根据适应度调整烟花的“爆炸幅度”以及“火花数量”, 虽然可以加快烟花算法收敛的速度, 但当烟花个体很接近最优解时, 烟花的爆炸幅度会趋于 0, 导致很难产生新解, 因此在增强烟花算法中引入了最小爆炸幅度的检测机制^[62]

$$A_i^k = \begin{cases} A_{min}^k, & A_i^k < A_{min}^k \\ A_i^k, & otherwise \end{cases} \quad 4.12$$

其中 A_{min}^k 的大小由式 4.13 确定。

$$A_{min}^k = A_{init} - \frac{A_{init} - A_{final}}{L} \sqrt{(2L - k)k} \quad 4.13$$

其中, A_{init} 和 A_{final} 分别为爆炸幅度的起始值和终止值; L 为最大迭代次数; k 为当前迭代次数。

基于 EFWA 算法的缺陷深度定量检测方法流程如图 4.3 所示。具体步骤如下:

- 1) 根据管道缺陷中点处的修正温度函数构造适应度函数, 并根据实际参数初始化烟花种群, 设置参数;
- 2) 计算各个初始烟花的适应度, 根据式 4.4 和式 4.5 计算烟花的“爆炸幅度”和生成的火花数量, 并根据式 4.6 和式 4.12 分别控制火花数量和“爆炸幅度”;
- 3) 根据式 4.7 计算爆炸后生成火花的位置并选取一部分火花进行变异产生“变异火花”, 利用式 4.11 将超出可行解空间的火花映射到可行解空间内;
- 4) 计算所有个体(烟花、爆炸火花、变异火花)的适应度, 适应度越大, 个体越优。根据适应度大小, 更新个体的最优位置;
- 5) 判断是否达到迭代结束条件, 是则结束迭代, 输出全局最优解的位置作为寻优结果, 否则继续执行;
- 6) 根据式 4.9 计算全部种群中任意两个个体之间的距离, 再利用式 4.10 计算每个个体被选作下一代烟花的概率;
- 7) 通过轮盘赌方法选择下一代烟花群体, 转至步骤 2。

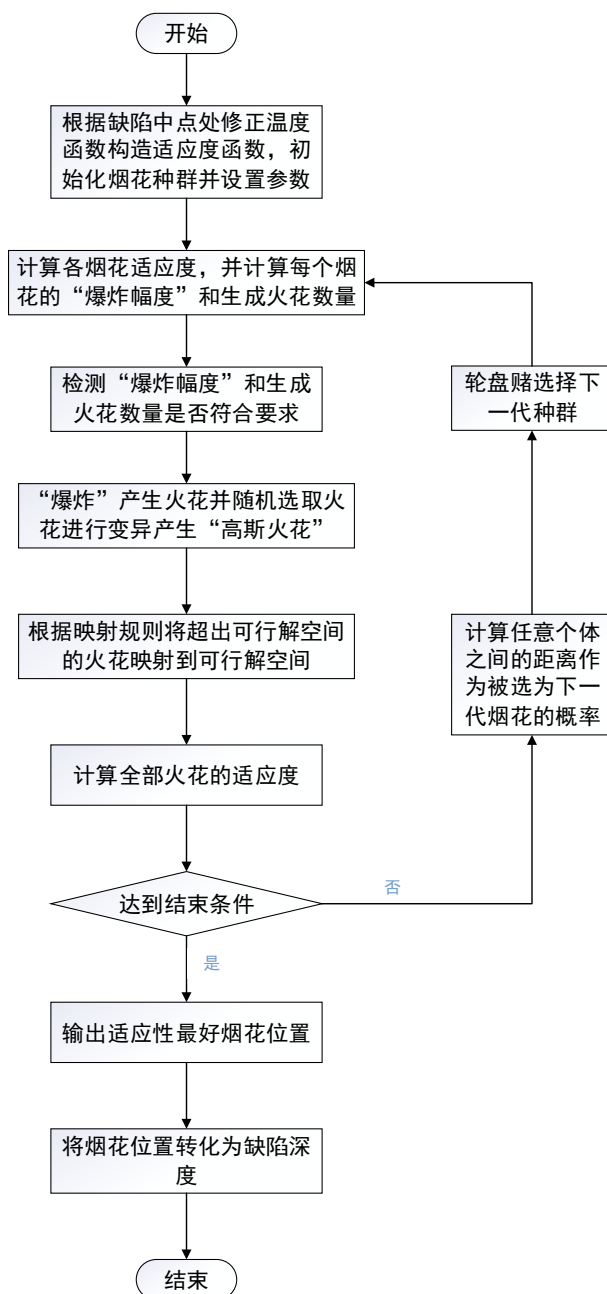


图 4.3 基于 EFWA 的缺陷定量检测算法流程图

4.4 实验例证

以 Fluent 仿真的结果作为实际测量温度值, 使用 EFWA 算法对缺陷深度为 2mm、0.5s 时的 Fluent 仿真温度值进行寻优, 其中 EFWA 算法的主要参数设定依据如下:

- 1) 问题维度: 在本文中, 管道表面温度对应的管道内流体温度、流速和管道物性参数均是已知的, 需要寻优的值只有缺陷深度, 所以寻优问题的维度为 1 维;
- 2) 种群规模: 种群大小会影响集群智能算法的运算速度, 过小会使种群多样性差过早收敛, 寻不到最优解, 而过大会使集群算法的寻优效率降低。一般种群数量取自身维数的 20-30 倍。由于管道缺陷深度定量计算问题中, 问题维数是 1,

为保证集群智能算法可以找到最优解，种群规模取 30；

- 3) 终止条件：集群算法的终止条件一般为达到最大迭代步数，或满足最小适应度阈值。本文以迭代步数达到 100 为终止条件。

EFWA 算法的完整参数设置如表 4.1 所示：

表 4.1 EFWA 算法参数

参数	数值
初始烟花规模	30
子代烟花规模最大值	60
子代烟花规模最小值	5
烟花最大值	3mm
烟花最小值	1mm
最大迭代次数	100
高斯变异因子	50
问题维度	1

将 0.5s 时缺陷深度为 2mm 处的仿真温度值带入 EFWA 算法中进行寻优，EFWA 算法的收敛曲线如图 4.4 所示：

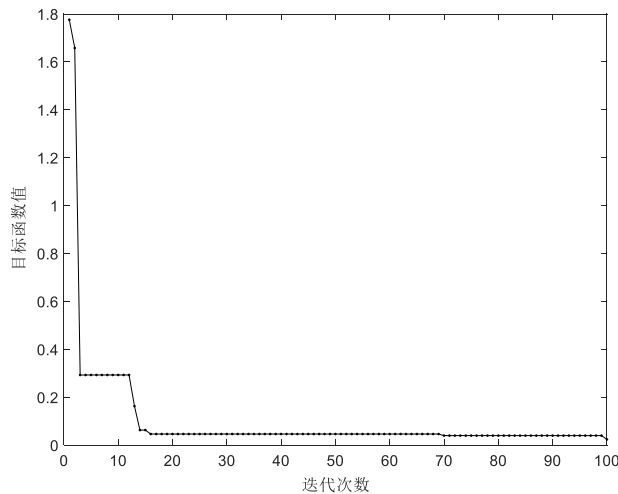


图 4.4 EFWA 算法的收敛曲线

从图 4.4 中的收敛曲线可以看出，EFWA 算法在第 10 次迭代时就陷入局部最优解，由于存在“变异火花”，随着迭代次数的增加，算法仍可以向全局最优解靠近，最终输出的最优缺陷深度为 1.9415mm，目标函数值为 0.0240，相对误差为 2.9%。证明了 EFWA 算法的可行性。

为确定 EFWA 算法的稳定性和适用性，提取管道内通入温度为 70℃，流速为 1m/s 的流体时，缺陷深度为 2mm 的中点处在 0.5s、1s、1.5s、2s、2.5s 时的 Fluent 仿真温度值，通过 PSO 算法和 EFWA 算法分别进行缺陷深度寻优，收敛曲线分别如图 4.5 和图 4.6 所示，计算结果如表 4.2 所示：

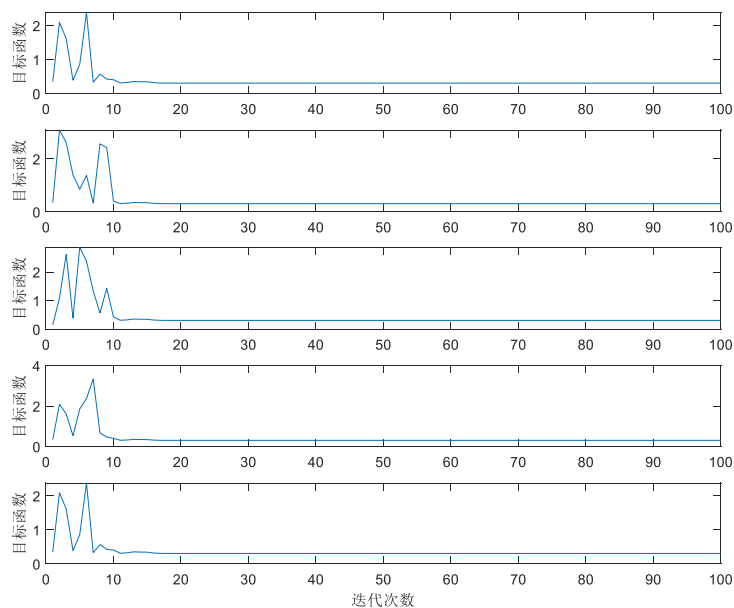


图 4.5 PSO 算法的收敛曲线

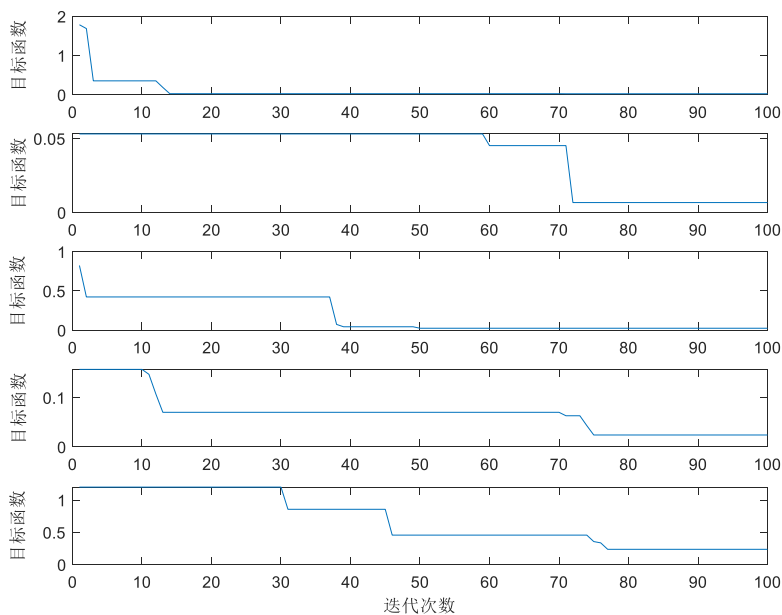


图 4.6 EFWA 算法的收敛曲线

表 4.2 PSO 和 EFWA 在不同时刻寻优结果比较

时刻	0.5S		1S		1.5S		2S		2.5S		平均值	
	PSO	EFWA	PSO	EFWA	PSO	EFWA	PSO	EFWA	PSO	EFWA	PSO	EFWA
最优值	1.8631	1.9415	1.8663	1.9315	1.8610	1.9803	1.8713	1.9846	1.8173	1.9509	1.8558	1.9818
适应度	0.0311	0.0240	0.0334	0.0140	0.0328	0.0177	0.0291	0.0110	0.0354	0.0147	0.0323	0.0139
计算误差	6.845%	2.925%	6.685%	3.425%	6.95%	0.985%	6.435%	0.77%	9.14%	2.455%	7.21%	2.112%

通过对 PSO 算法和 EFWA 算法仿真结果有效性和适用性进行对比分析,结合图 4.5、图 4.6,可以看出: PSO 算法作为经典的寻优算法,应用在管道缺陷深度定量计算中,虽然收敛速度相对较快,收敛后适应度较平稳,但是容易陷入局部最优解。而 EFWA 算法,由于每次“爆炸”都会产生新的“火花”,且会随机产生“变异火花”,使得 EFWA 算法的全局搜索能力更强,导致 EFWA 算法的寻优结果误差更小,由表 4.2 可知, EFWA 寻优结果误差在 3%以内,说明了基于 EFWA 算法的管道缺陷定量检测方法的稳定性较好,适用性较高。

4.5 本章小结

通过对第三章得出的缺陷中点处修正温度函数的分析,从集群智能算法与管道缺陷深度定量计算的关系出发,定义了 EFWA 算法的适应度函数;提出一种基于 EFWA 的缺陷深度定量检测算法,以 Fluent 仿真数据为输入,对基于 EFWA 的缺陷深度定量检测算法进行测试,验证缺陷定量检测方法的有效性;通过对比多组参数下 PSO 和 EFWA 算法寻优的稳定性、收敛速度和收敛精度,证明 EFWA 算法的适用性。

第五章 管道缺陷深度定量检测实验与分析

本章搭建了管道红外缺陷检测平台，通过对红外图像进行降噪和边缘提取确定红外图像中缺陷中点处的位置，而后提取红外图像中缺陷中点处温度随时间变化变化的曲线。基于 EFWA 算法的缺陷定量计算方法，对阶梯状缺陷管道的缺陷深度定量计算，验证基于管温瞬态度场模型的红外无损检测方法的有效性。

5.1 实验台搭建

实验台主要包括恒温水箱、待测管道、红外热像仪和输水管道四部分，如图 5.1 所示，其中恒温水箱主要包括加热器和水泵两部分，图 5.2 是实验台实物图。

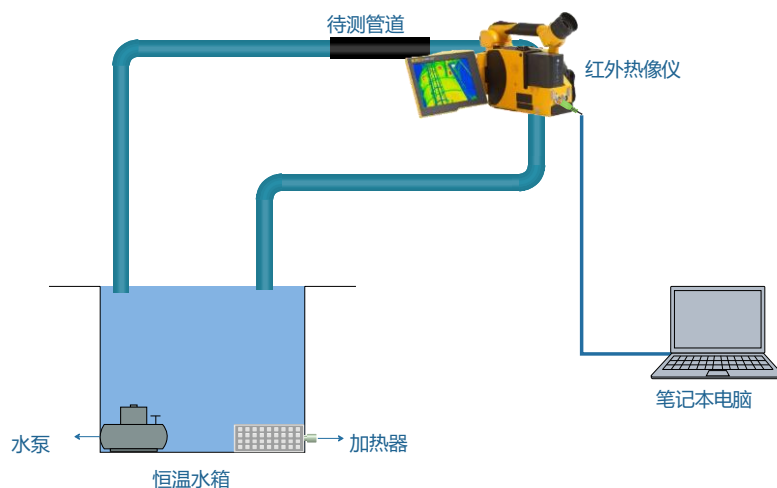


图 5.1 管道缺陷检测平台示意图

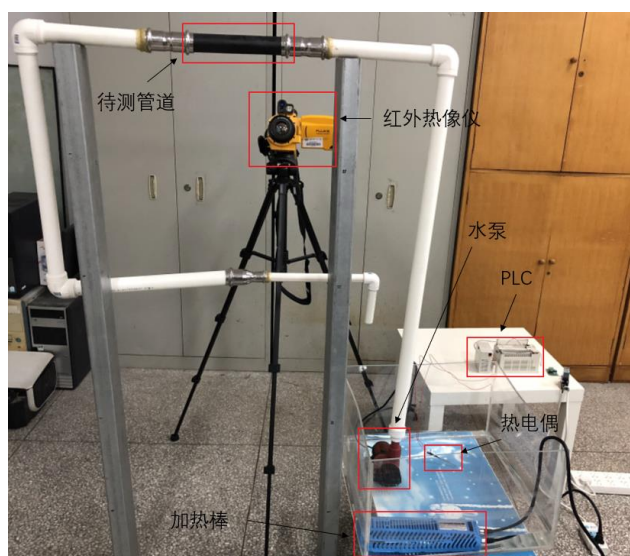


图 5.2 管道缺陷检测平台

5.1.1 恒温水箱

为提高通入待测管道中流体温度的精度，通过可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller, PLC）实现将恒温水箱内水的温度控制在一个浮动范围内^[63]。控制系统原理图如图 5.2 所示。

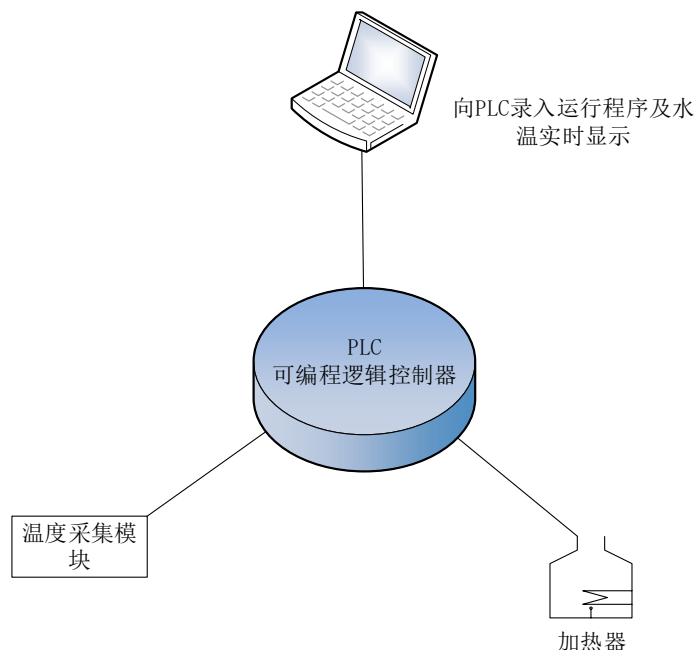


图 5.2 恒温水箱控制系统原理图

PLC 从温度采集模块获取水箱中的水温，通过 AD 转换将电信号转换为 PLC 可以识别的数字信号，传入 PLC 中；PLC 一方面将温度值传入计算机中显示出来，另一方面实现对水温的控制。

本实验台使用加热棒对水进行加热，利用的是电流的热效应：

$$Q = I^2 R t \quad 5.1$$

式中， Q 为电热棒产生的热量； I 为通过电热棒的电流； R 为电热棒的电阻； t 为电热棒的加热时间。在加热过程中，水箱也在和周围环境进行对流换热，想要将水箱温度控制在某个范围内实质上是控制水从加热棒获得的能量散失能量的差值在一定范围内。从上式可知控制水从加热棒获取的能量多少即控制电热棒的做功量，当选定加热器之后电阻 R 是恒定值，可以改变的量只有通过电热棒的电流 I 和电热棒的加热时间 t ，而控制加热棒的加热时间 t 会导致加热器频繁起停，而且会有较大延迟，所以在这里我们选择控制通过电热棒电流，而控制通过电热棒的电流实际上就是控制加载电热棒两端的电压。通常通过调制脉冲宽度来控制电热棒的输入电压。如图 5.3 所示

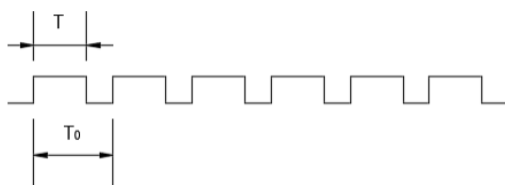


图 5.3 脉冲宽度调制示意图

上图是一个典型的脉冲宽度调制输出的波形，其中 T_0 是周期， T 是脉冲宽度，则占空比 T/T_0 决定一个周期内输出的电压大小。

占空比的大小通过 PID 控制原理确定^[64]，图 5.4 是 PID 控制的基本原理图，设定值 $r(t)$ 与实际输出值 $y(t)$ 构成控制器的输入偏差 $e(t)$ ， $e(t) = r(t) - y(t)$ 。PLC 通过对输入偏差 $e(t)$ 进行比例增益、积分、微分之后获得输入受控对象的输出值 $u(t)$ ，具体如式 5.2 所示：

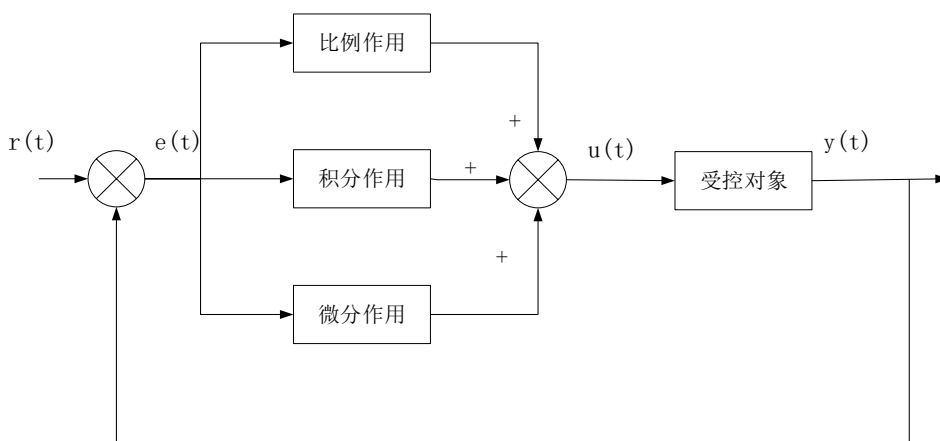


图 5.4 PID 控制原理图

$$u(t) = Ke(t) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^n e(j) + \frac{T_d}{T} [e(n) - e(n-1)] \quad 5.2$$

式中： n 是采样次数； T 是采样周期。PLC 作为目前应用最为广泛的可编程逻辑控制器，为减少用户建立控制系统时的编程工作，大多数厂商生产的 PLC 都集成了 PID 功能指令，用户仅需设定 PID 参数即可完成相关运算，本文使用的三菱 FX2N 系列 PLC，如图 5.5 所示，其 PID 功能指令格式如图 5.4 所示。



图 5.5 三菱 FX2N-48ER 型号 PLC

PID	S1	S2	S3	D
-----	----	----	----	---

图 5.6 PID 功能指令格式

其中： $S1$ 为目标设定值； $S2$ 为当前实际值； $S3$ 为PID的参数； D 为计算后的输出值。假设 $S3$ 中存放参数的首地址为 P ，在表 5.1 中介绍PID指令中的关键参数。

表 5.1 PID 指令中的关键参数

地址	名称	说明
P	采样时间(T_s)	1~32767 ms
P+1	动作方向(ACT)	0:正向 1: 逆向
P+2	输入滤波常数(α)	0~99%
P+3	比例增益(K_p)	1~32767%
P+4	积分时间 T_i	0~32767 ($\times 100ms$) 0 时无积分作用
P+5	微分增益(K_D)	0~100% 0 时无微分增益
P+6	微分时间(T_D)	0~32767 ($\times 100ms$) 0 时无微分作用

在控制水箱温度恒定的过程中，为平衡水温达到稳态的时间和稳态时的波动误差，本文选用比例积分(PI)控制方式，经实验对比调试选定最优PI参数：比例增益 $K_p=20\%$ ，积分时间 $T_i=400ms$ ，采样时间 $T_s=200ms$ 。当目标温度 $S1=70^\circ C$ 时，恒温水箱中水温度随时间变化曲线如图 5.7 所示，可以看到温度在 6000s 左右可以达到动态平衡，平衡时的温度波动可以控制在 1%之内。

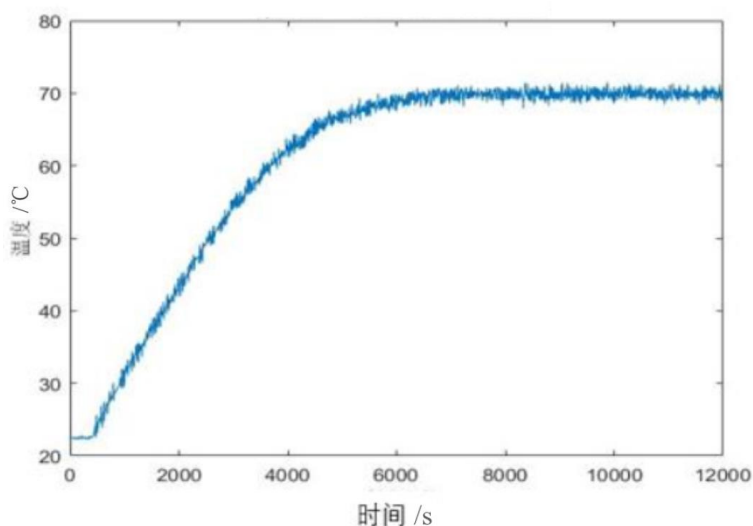


图 5.7 温度随时间变化曲线

水泵则是通过控制流量进而控制通入待测管道的流体流速，本文中选用博特 TS-5000 型号变频水泵，具体参数如表 5.2 所示。

表 5.2 博特 TS-5000 型号变频水泵参数

参数	最大流量	扬程	最大功率	最小功率	额定输出	尺寸
数值	5000L/H	5M	70W	10W	DC-24V	170*167*79mm

5.1.2 红外热像仪

红外热像仪为美国 Fluke 公司的 Tix660，如图 5.8 所示。



图 5.8 Fluke Tix660 手持式红外热成像仪

红外热像仪参数如表 5.3 所示：

表 5.3 红外热像仪参数表

参数	数值
红外光谱范围	7.5 μm 至 14 μm
像素	1280×960 或 640×480
测量温度范围	-40℃~1200℃
测量误差	±1.5K 或 1.5%
最高采样频率	60Hz
热敏度	NETD ≤ 0.03℃

采集图像时，通过千兆以太网将手持式红外热像仪与计算机相连，Fluke Tix660 配套的图像采集及处理软件 SmartView 可以实时观察红外热像仪采集到的图像。利用 SmartView 提取红外图像中对应各点的温度，也可以提取某一点在一段时间内的温度随时间变化曲线并将数据导出以便后续的分析。图 5.9 是 SmartView 的工作界面，界面左侧是管道红外热图像的显示窗口，可以实时显示检测物体表面的红外热像图；界面右侧是表面温度信息监测截面，可以给管道表面加温度监测点。

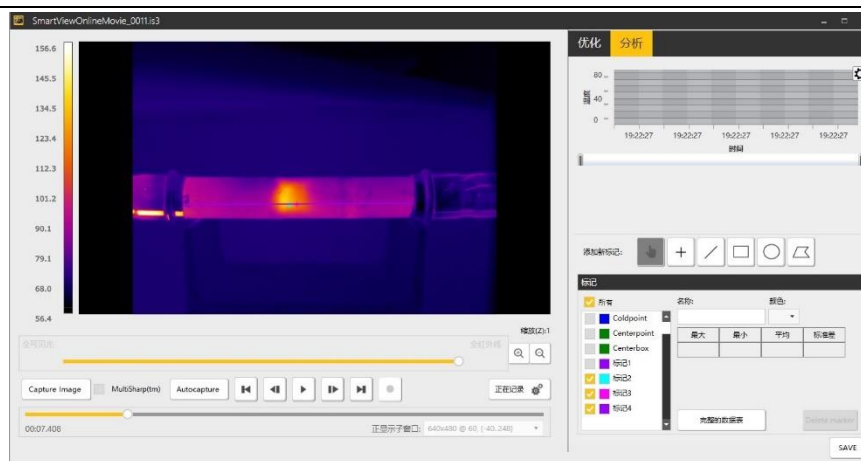


图 5.9 SmartView 的工作界面

5.2 实验设计

为验证第四章提出的管道缺陷深度定量计算方法，待测管道选用 304L 不锈钢管道，管道全长 300mm，外径 42mm，正常壁厚 4mm，在其内壁加工 3 个梯度为 1mm 的阶梯状缺陷，缺陷形式与图 3.1 中缺陷一致。在实际检测过程中，若待测管道表面光亮会使表面发射率较低且存在反光问题，导致采集到的红外图像序列误差较大，影响后续检测的精度，因此在待测管道表面喷涂防反光漆来提高辐射率、降低反光。实物如图 5.10 所示：



图 5.10 待测管道

当设定温度过高时，水箱达到设定温度所热量较多且与环境热交换量大，会导致加热时间较长且达到动态平衡时温度波动较大。实验中通入待测管道的水温为小于等于 70℃ 的水，水流速度通过调节水泵挡位实现，博特 TS-5000 型号水泵部分挡位与流量对照表如表 5.4 所示，从水泵出口到待测管道的路径较短且只有两个弯头，所以沿程水力损失和局部水力损失均可忽略，计算流量应满足下式。

$$q = S \times v = \pi R^2 v \quad 5.3$$

其中， q 为流量 m^3/s ； S 为管道横截面积； v 为水流速度 m/s ； R 为管道内半径。

表 5.4 博特 TS-5000 型号水泵挡位、流量、流速对照表

挡位	1	4	7	10	13	16
流量 L/h	1500	2052.63	2605.26	3157.89	3710.52	4263.15

流速 m/s	0.459	0.628	0.797	0.967	1.136	1.3
----------	-------	-------	-------	-------	-------	-----

在红外图像采集平台通过控制通入管道内流体的流速和温度分别做 9 组实验，实验水流速度和温度的具体参数如表 5.5 所示。手持式红外热像仪的采样频率为 60Hz，环境温度为 13.4℃，采集每组实验在管道内通入热流体后 10s 内，管道外表面的红外图像序列。

表 5.5 实验参数表

实验组号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
温度/℃	50	50	50	60	60	60	70	70	70
挡位	1 档	10 档	16 档	1 档	10 档	16 档	1 档	10 档	16 档
流速/m/s	0.459	0.967	1.3	0.459	0.967	1.3	0.459	0.967	1.3

5.3 数据处理

5.3.1 红外图像降噪

在进行定量计算之前，通过边缘提取确定管道中缺陷的中点位置，由于采集到的红外图像会受到待测管道表面发射率不均匀、环境噪声、反光或者其他因素的影响，提取的图像信息中会存在噪声点，使红外图像中缺陷的边界位置模糊，因此先通过非局部均值滤波算法对对红外图像进行降噪。

非局部均值滤波算法通过寻找整个红外图像中与某一噪点具有结构相似的像素区域作为滤波区域，该方法将图像中噪点的滤波放到整个图像中进行考虑，而不是仅仅局限于噪声点的邻域区域，通过充分挖掘图像中所有与噪声点区域相似的信息，使其全部参与到噪声点的滤波过程中，从而使得滤波后的图像失真程度较小^{[65][66]}。滤波的原理公式如下：

$$NLMF[\Phi(a)] = \sum_{a' \in I} w(a, a') \Phi(a') \quad 5.4$$

$$w(a, a') = \frac{1}{z(a)} \exp\left[-\frac{D(a, a')}{h^2}\right] \quad 5.5$$

$$z(a) = \sum_a \exp\left[-\frac{D(a, a')}{h^2}\right] \quad 5.6$$

式中， I 为图像的坐标域， $w(a, a')$ 为权重值， $D(a, a')$ 为 a 与 a' 所在图像区域的欧氏距离， $D(a, a') = \|\Phi(N_a) - \Phi(N_{a'})\|$ ； h 是调节因子，用于控制 $w(a, a')$ 相对于 $D(a, a')$ 的衰减程度；非局部滤波算法能够在抑制图像噪声的同时具有较好的边缘保持性能。为验证算法的作用，选择图 5.11 所示的红外图像进行非局部滤波算法降噪，为使降噪效果更明显，在降噪前将图像灰度化并添加高斯噪声，如图 5.12 所示，可以看出，右侧降噪后的图像相比于左侧加噪声的图像噪声点明显减少，图像更光滑。

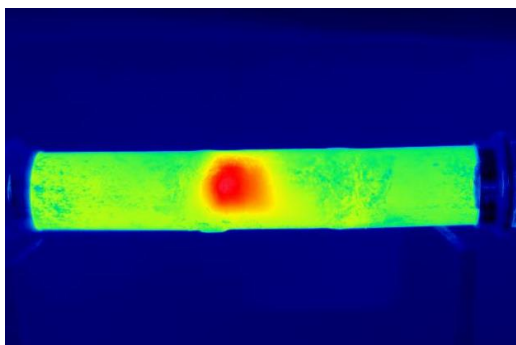


图 5.11 原始红外图像



(a) 加噪声图像

(b) 降噪后图像

图 5.12 非局部滤波算法降噪

5.3.2 红外图像边缘提取

在图像降噪之后需对红外图像进行边缘提取，获取缺陷的边界信息。边缘提取主要是对图像灰度值变化的度量、检测和定位，选用基于 Sobel 算子^[67]的边缘提取方法。

Sobel 算子包含两组 3×3 的矩阵，分别是横向和纵向的卷积算子，将两个矩阵于图像做平面卷积，即可分别得出横向和纵向的灰度值差分近似值，对于每个点通过式 5.9 可以计算出该点梯度的估计值，进而提取出图像中灰度值变化较剧烈的点作为边缘，两组矩阵具体如下：

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad 5.7$$

$$grad = \sqrt{(G_x * A)^2 + (G_y * A)^2} \quad 5.8$$

同样选取图 5.11 中的红外图像进行验证，利用 Sobel 算子边缘提取，如图 5.13 所示，可以看出提取效果较好，边缘清晰可见。



(a) 灰度化红外图像

(b) 边缘提取结果

图 5.13 Sobel 算子边缘提取效果图

5.3.3 红外图像中温度数据提取

通过 SmartView 对采集到的红外图像序列进行温度标定，并将温度数据以.csv 的格式导入 matlab 中，根据采集到的红外图像中管道表面部分所占像素点个数及采样频率，将红外图像序列数据转换成一个 $N * M * P$ 维的三维矩阵， $P = T \cdot f'$ 表示采集的红外图像帧数， T 是采样时间， f' 是采样频率； N 、 M 分别表示 Tix660 型号手持式红外热像仪采集图像中管道部分的行像素和列像素数据，所以在 matlab 中二维矩阵 $N \times M$ 代表一幅采集的热图像，对于每个像素点 (i, j) 对应的第 p 个离散时域信号 $T(p)$ 可用式 5.9 表示^[68]。

$$T(p) = \begin{bmatrix} T_{11}(p) & T_{12}(p) & \cdots & T_{1M}(p) \\ T_{21}(p) & T_{22}(p) & \cdots & T_{2M}(p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N1}(p) & T_{N2}(p) & \cdots & T_{NM}(p) \end{bmatrix} \quad 5.9$$

其中， $T_{i,j}(t)$ 表示第 p 帧红外图像中第 i 行，第 j 列像素点处的管道表面温度值；当时间为 t 时的测量值 $f_{i,j}(t)$ 组成一组某一像素点在时间维度上不断变化的一维向量，由于实验过程中待测管道是固定在实验台上的，所以任意 (i, j) 时的像素点，可以唯一对应管道表面上的一点，因此 $f_{i,j}(t)$ 可以画出管道表面一点温度随时间变化的曲线。同样 $f_t(location)$ 可以画出管道表面 $location$ 区域内各点在某一时刻的温度分布曲线，其中 $location$ 可以是像素点集合、线或者面。具体如图 5.14 所示。

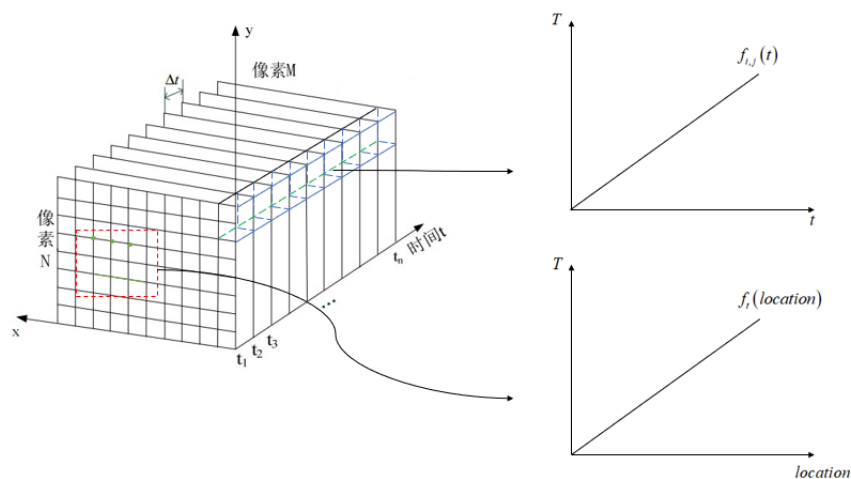
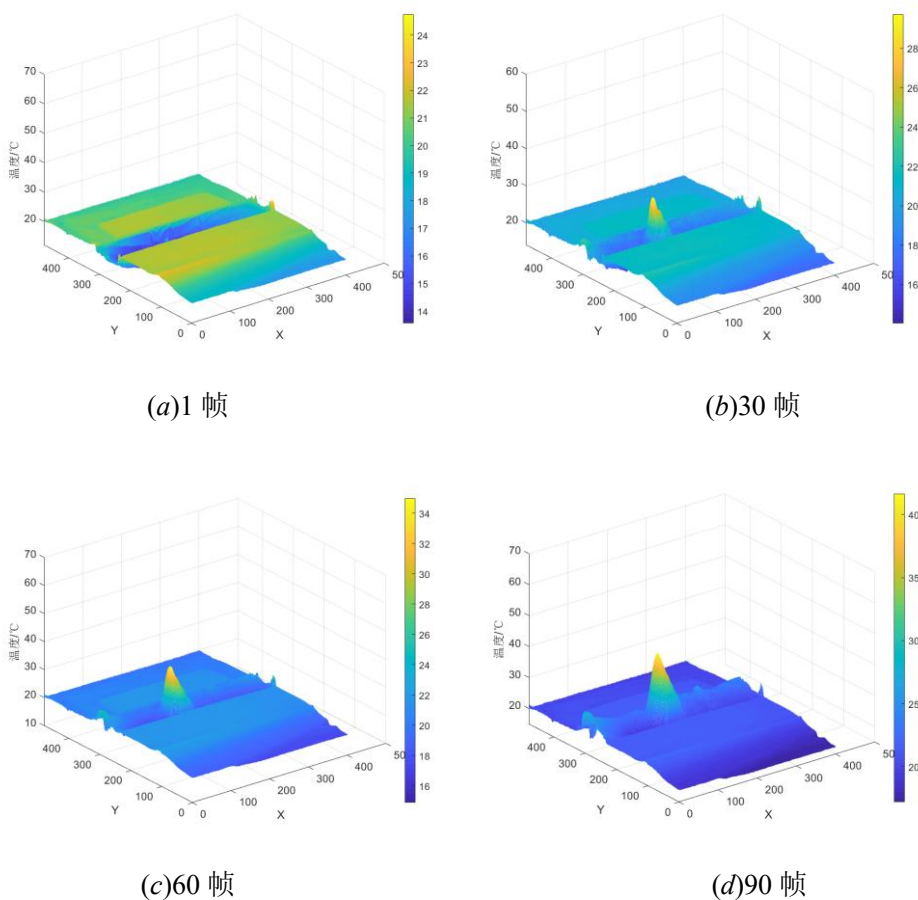


图 5.14 红外热图像序列示意图

以管道内通入 70℃ 流体，水泵挡位为 10 挡时采集到的红外图像序列为例，提取 1、30、60、90、120、150 帧时的红外图像，如图 5.15 所示，其中由于在管道入口段有入口段效应，且在加工阶梯状缺陷时由于加工需要，管道出入口的管道表面平整度受到影响，所以将红外图像入口段和出口段的 50mm 截除在外，仅考虑中间 200mm 的温度分布。从图中可以看出，在管道内通入热流体之后，管道表面温度随时间不断上升，在缺陷处管道表面温度高于正常管段。



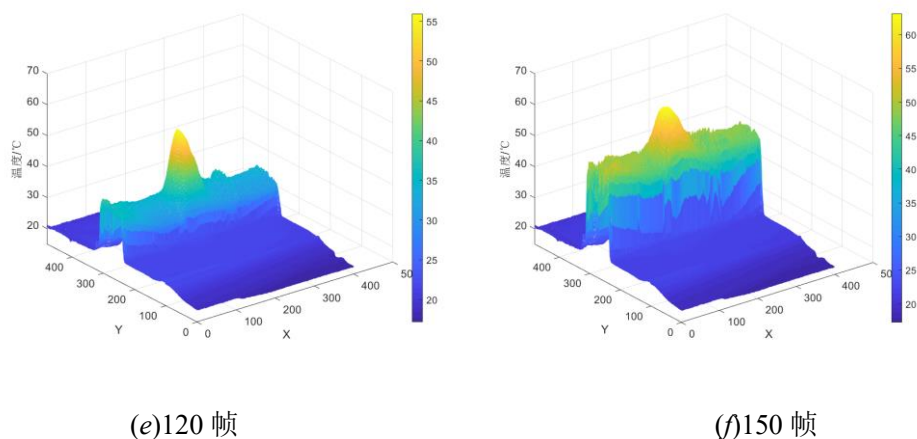
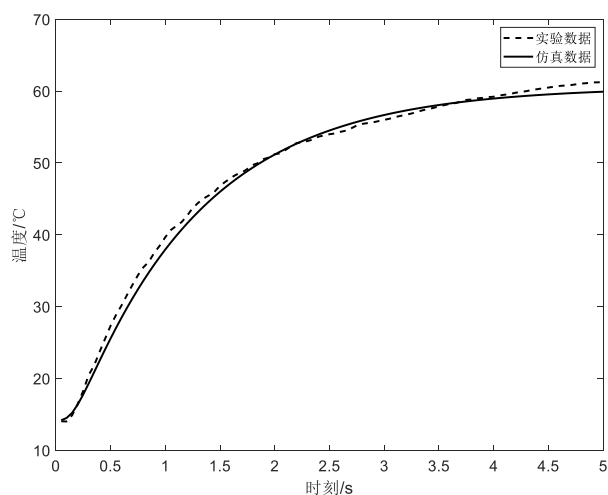


图 5.15 红外图像温度分布

分别提取前 5s 内管道在 2mm 缺陷中点处的温度随时间变化曲线，和在第 30 帧图像时对应的经过缺陷的表面轴线上温度分布，与相同条件下的基于 Fluent 仿真温度值相对比，如图 5.16 和 5.17 所示，从图中可以看出，实验数据与仿真数据可以较好的拟合。



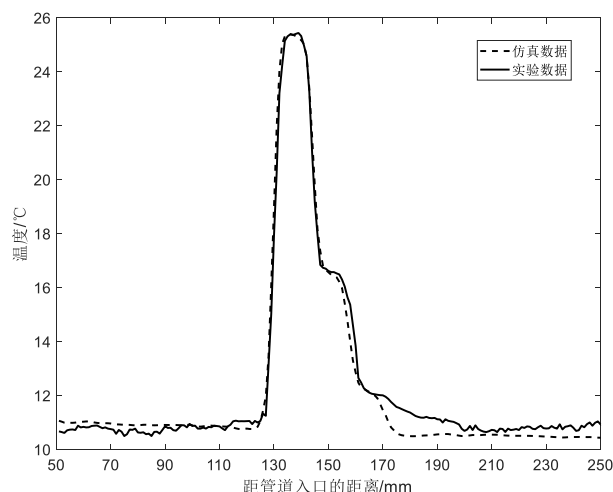


图 5.17 轴线上温度分布曲线

5.4 管道缺陷深度定量计算

经过上述分析，Fluent 仿真结果与实际实验采集到的数据拟合良好，所以在对管道缺陷进行定量计算的时候，可以采用第三章介绍的以 Fluent 仿真温度值为基准求出的缺陷中点处温度修正因子对缺陷中点处的温度值进行修正，利用 EFWA 寻优算法对缺陷深度进行求解。本节以通入流体温度为 50°C ，水泵挡位选用 10 挡时红外热像仪采集到的红外图像序列为例。采集到的红外图像如图 5.18 所示。

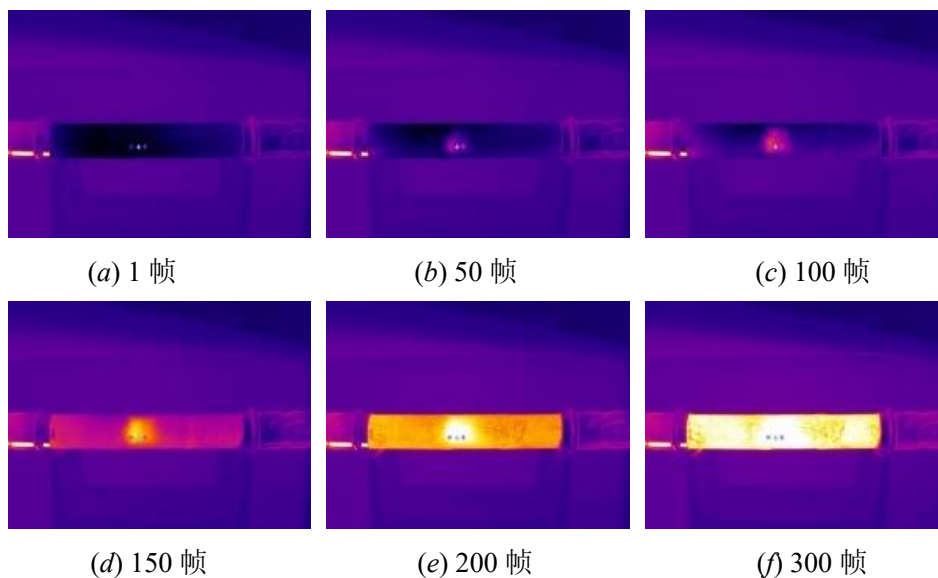


图 5.18 待测管道红外图像

通过非局部均值滤波算法对采集到的红外图像进行空间降噪，然后通过对不同灰度区间进行对比度增强并用 Sobel 算子提取边缘^[69]，分别提取出总体边缘梯度最大的三个边缘，如图 5.19 所示。由于管道总长已知，通过像素点测量可计算出各边缘得位置，如表 5.6 所示。

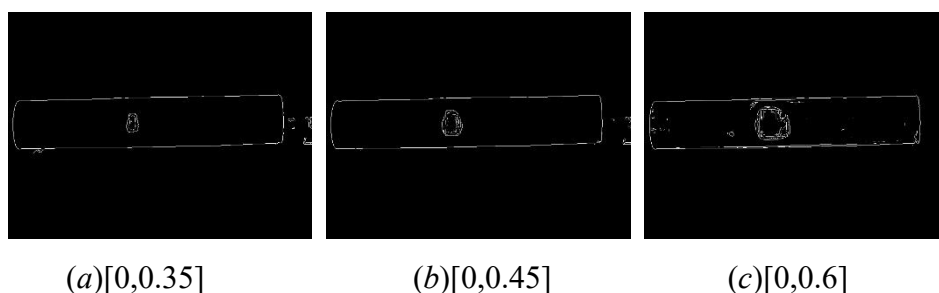


图 5.19 不同灰度区间对比度增强后边缘提取结果

表 5.6 缺陷边缘分布

区域	整个管段	边缘 1	边缘 2	边缘 3
起始像素点位	0	335	329	325
终止像素点位	660	359	375	398
像素点/个	660	24	46	73
起始点位置/mm	0	152.3	149.5	147.7
终止点位置/mm	300	163.2	170.4	180.9
长度/mm	300	10.9	20.9	33.18

由于对灰度区间对比度增强会导致灰度区间之外的部分灰度差异降低，所以当上述图中提取的边缘是有重合的。当管道缺陷深度越大时，缺陷对应管道表面温度越高，灰度化之后图片的灰度值越低，所以图 5.19 中三幅图依次为最大深度缺陷单独缺陷的边缘、缺陷深度较大的两个缺陷的边缘、所有缺陷整体边缘。结合表 5.6 分析，缺陷起点取三个边缘起点平均值，为 149.8mm 处，缺陷长度分别为 10.9mm、10mm、12.28mm，对应的缺陷中点处位置分别为 157.75mm、168.2mm、179.34mm。

为避免局部测量误差对缺陷深度产生过大的影响，分别提取三个缺陷中点位置附近区域中 10 个点的温度值随时间分布曲线，某一时刻该缺陷深度中点处的温度值通过求十个点测量值在此该时间点的平均值获得。基于缺陷中点处管道瞬态温度场修正模型，利用 EFWA 寻优算法对缺陷深度进行求解，EFWA 算法参数设置如表 5.7 所示

表 5.7 EFWA 算法参数

参数	数值
初始烟花规模	30
子代烟花规模最大值	60
子代烟花规模最小值	5
烟花最大值	3mm
烟花最小值	1mm
最大迭代次数	100
高斯变异因子	50
问题维度	1

图 5.20 是 EFWA 算法对缺陷深度为 2mm 处 0.5s 时实验采集到的数据进行缺陷深度寻优的收敛曲线，经过 55 步运算逐渐趋于稳定，稳定时的适应度函数值为 0.5531，

对应的缺陷深度值为 1.864，相对误差为 6.8%。

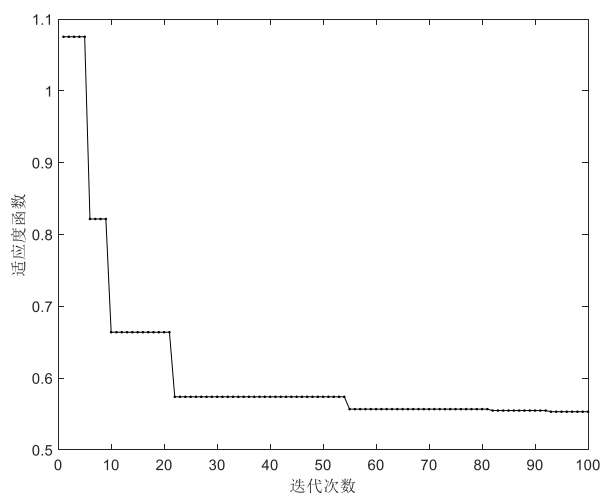


图 5.20 EFWA 算法收敛曲线

用同样的方法确定实验采集的 9 组实验数据中缺陷区域及缺陷对应的中点位置，取每组实验中十个时间点的不同缺陷深度对应的温度值，通过 EFWA 对缺陷的深度进行定量计算，结果如表 5.8 所示。

根据表 5.8 可以到，计算缺陷深度误差相对误差在 10%以内，说明基于管道缺陷中点处修正温度值函数通过 EFWA 算法进行缺陷深度定量计算的方法是可行的。

表 5.8 FWA 算法计算缺陷深度表

实验参数		1S			2S			3S			4S			5S		
温度/°C	流速/m/s	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm
50	0.459	0.901	1.943	2.837	0.951	1.971	2.894	0.943	1.957	2.843	0.991	1.963	2.912	0.931	1.847	2.861
50	0.967	0.912	1.865	2.904	0.927	1.913	2.793	0.916	1.867	2.831	0.935	1.915	2.964	0.861	1.795	2.850
50	1.3	0.894	1.913	2.861	0.937	1.742	2.914	0.927	1.891	2.914	0.932	1.942	2.934	0.913	1.913	2.846
60	0.459	0.917	1.899	2.764	0.915	1.823	2.968	0.931	1.905	2.647	0.946	1.932	2.812	0.923	1.906	2.861
60	0.967	0.938	1.951	2.866	0.896	1.932	2.946	0.929	1.962	2.842	0.915	1.928	2.921	0.913	1.941	2.946
60	1.3	0.916	1.927	2.917	0.917	1.964	2.876	0.946	1.934	2.745	0.976	1.943	2.745	0.934	1.916	2.916
70	0.459	0.831	1.918	2.954	0.962	1.914	2.713	0.971	1.914	2.931	0.864	1.891	2.691	0.897	1.863	2.769
70	0.967	0.937	1.882	2.649	0.936	1.878	2.869	0.899	1.946	2.945	0.915	1.976	2.752	0.817	1.897	2.875
70	1.3	0.923	1.966	2.878	0.925	1.912	2.943	0.843	1.867	2.815	0.976	1.964	2.915	0.864	1.749	2.968

5.5 本章小结

本章搭建了基于红外热像的管道缺陷检测平台，基于管道缺陷中点处的修正温度值函数和 EFWA 算法对阶梯状缺陷管道的缺陷进行定量计算，验证本文提出的缺陷定量检测方法的可行性，本章主要工作如下：

(1) 基于红外热像技术搭建管道缺陷检测平台，控制管道内通入流体的流速和温度，采集 9 组不同实验参数下阶梯状缺陷管道的表面红外图像序列，并基于非局部均值滤波算法对采集到的红外图像进行空间降噪。

(2) 提取实验数据中管道表面通过缺陷区域轴向温度分布和缺陷中点处温度随时间变化曲线，通过与相同条件下基于 Fluent 仿真数据对比分析，证明以 Fluent 仿真数据为基准提出的管道缺陷中点处的修正温度模型的有效性。

(3) 对降噪后红外图像经过不同灰度区间的对比度增强，通过 Sobel 算子提取管道缺陷的边缘，确定管道缺陷的中点位置。基于第 4 章提出的 EFWA 的缺陷定量检测方法对不同组实验中缺陷中点处的温度值进行定量检测，证明本文提出的管道缺陷深度定量检测方法是可行的。

第六章 总结与展望

随着我国工业 4.0 的进展, 腐蚀管道检测问题亟待解决, 基于红外热成像技术的管道腐蚀缺陷检测已经成为当前工业研究应用的热点, 该技术不仅可以降低管道腐蚀带来的经济和人员损失, 还可以提高管道的使用寿命, 减少材料浪费, 符合国家提出的可持续发展战略要求。因此本文对缺陷管道的定量检测技术展开研究, 建立管道瞬态温度场模型, 结合 Fluent 仿真数据对阶梯状缺陷管道的数学模型进行修正, 并引入强化烟花算法实现对缺陷深度进行定量检测。

6.1 总结

针对现有腐蚀管道检测方法普遍存在检测效率低、精度差、操作复杂等问题, 本文通过建立管道瞬态温度场模型, 对缺陷管道的定量检测技术进行研究, 提出了一种基于管道瞬态温度场模型的红外缺陷深度定量检测方法, 本文完成的主要工作如下:

(1) 建立管道瞬态温度场数学模型。建立管道壁厚和管道温度场之间的联系出发, 应用分离变量法对管道温度场的数学描述进行求解, 结合缺陷深度和壁厚之间的关系, 建立了管道瞬态温度场数学模型。通过 Fluent 对变径管道在通入热流体后的温度场变化进行模拟, 验证了管道瞬态温度场模型是正确的。

(2) 提出一种基于最小二乘法拟合的模型修正方法。通过分析管道表面温度分布确定取缺陷中点处的温度值进行温度值修正, 控制流体参数和缺陷深度, 对缺陷中点处基于管道瞬态温度场模型计算结果与 Fluent 仿真结果进行误差分析, 通过最小二乘法拟合缺陷中点处的修正因子关于管内流体参数以及缺陷深度的方程。并通过 Fluent 仿真验证了缺陷中点处瞬态温度分布修正模型的准确性。

(3) 提出了一种基于 EFWA 的缺陷定量检测算法。将缺陷深度求解问题转化为寻找使计算温度与实际温度误差最小的问题, 根据缺陷中点处瞬态温度分布修正模型构造适应度函数, 以 Fluent 仿真数据为输入, 对基于 EFWA 的缺陷深度定量检测算法进行测试, 验证了算法的有效性; 通过对比多组参数下 PSO 和 EFWA 寻优的稳定性、收敛速度和收敛精度, 证明了 EFWA 在缺陷定量检测中的适用性。

(4) 搭建了基于红外热像的管道缺陷检测平台, 采集管道内通入热流体时表面的红外图像序列。以阶梯状缺陷为待测管道, 控制流体的温度和流速设计了 9 组实验, 从实验采集的红外图像序列中提取管道表面温度信息, 基于非局部均值滤波对红外图像进行空间降噪; 通过 Sobel 算子实现管道缺陷边缘提取, 确定缺陷的边界和中点位置, 利用 EFWA 基于管道缺陷中点处的修正温度模型对缺陷深度进行定量计算。通过对 9 组实验中五个时刻的缺陷中点温度进行寻优, 证明可以基于红外热成像技术和管道温度模型实现缺陷管道的定量检测。

6.2 展望

本文的研究仅对阶梯状缺陷管道的缺陷中点处温度模型进行了修正。而在平时工业中遇到的缺陷形式多种多样，本文提及的模型未必会适用。本文提供的仅是一种对管道缺陷进行定量分析的方法，若想实现实际工业应用中对不同种类缺陷都可以定量分析，仍需对如下问题进一步研究：

- 1) 本文在建立管道瞬态温度场模型时，对模型进行了简化，忽略了相邻缺陷之间温度场的相互影响。在后续研究中可以考虑基于相邻区域的温度场给控制方程添加新的边界条件；
- 2) 本文并未探讨管道缺陷深度和流体参数与管道温度场关系之间的物理意义，而是通过拟合的方式确定了修正系数与相关物理量的定量关系。在后续研究中需要根据管道缺陷形式对温度场影响的机理进一步研究。

致谢

流光容易把人抛，走了春夏，来了秋冬。时光如水，岁月如梭，交织出我的青春。蓦然回首，东大三年的研究生时光如白驹过隙，短暂又充实，繁忙又惬意，让我学会如何奋斗，如何忍耐，如何感恩。

值此毕业之际，首先需要感谢胡建中导师对我的悉心指导和不懈支持，在学习和生活中都给予了我无限的帮助，是您让我认识了思考的重要性，是您让我学会了如何去面对问题，衷心祝福胡老师万事如意，阖家欢乐！

还需要感谢实验室贾老师、许老师、黄老师、彭老师在学业和科研过程中无私的指导和帮助！

感谢东南大学机械工程学院为我提供这么好的学习环境！

感谢实验室师兄师姐们在我学习过程中的帮助和陪伴，感谢 RCCMFD 王佳俊、邱浩哲、刘亚东、谭荣龙、付帅旗、王昶、花园、周世红、张弗宇；感谢我的舍友杨振波、田伟、邵陈真；感谢实验室的每一位同学，谢谢你们陪我度过了这段快乐的日子，祝你们前途似锦。

最后，感谢我的父母对我的养育之恩，女朋友对我的关心和忍耐，谢谢你们。

也许我不是最有天赋的、不是最努力的、不是最懂事的，但是有你们在我就是最幸运的，谢谢你们。

赵勋

2019/5 于李文正图书馆

参考文献

- [1] 王强, 曲文晶. 管道腐蚀与防护技术[M]. 机械工业出版社, 2017.
- [2] 祝悉智, 吴超, 李秋扬, 等. 全球油气管道发展现状及未来趋势[J]. 油气储运, 2017, 36(4): 375-380.
- [3] 王桂增, 叶昊. 流体输送管道的泄露检测与定位[M]. 清华大学出版社, 2010.
- [4] 李晓刚. 材料腐蚀与防护概论[M]. 机械工业出版社, 2017.
- [5] Vanaei H R, Eslami A, Egbewande A. A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models[J]. International Journal of Pressure Vessels & Piping, 2017, 149:43-54.
- [6] 柯伟. 中国腐蚀调查报告[M]. 化学工业出版社工业装备与信息工程出版中心, 2003.
- [7] 何宏, 江秀汉, 李琳. 国内外管道腐蚀检测技术的现状与发展[J]. 油气储运, 2001(04):7-10+55-3.
- [8] 李艳红. 被检物表面条件对红外热波无损检测结果影响的研究[D]. 首都师范大学, 2006
- [9] Qian Q, Hanachi H, Liu J, et al. Simulation of ultrasonic testing for resolution of corrosion detection in pipes[C]// IEEE International Conference on Prognostics & Health Management. IEEE, 2016.
- [10] 杨志军, 刘玉琢, 吴忠义, 等. 管道外漏磁检测技术研究[J]. 压力容器, 2018(3).
- [11] HUANG H, HE R, XIONG C, et al. Application of Magnetic Flux Leakage Inspection Technology to Pipeline Inspection [J][J]. Pipeline Technique and Equipment, 2010, 3.
- [12] 李春雨, 马义来, 张莉莉, 何仁洋. 基于脉冲涡流的管道内检测系统设计[J]. 无损检测, 2018, 40(07):65-68.
- [13] 王志春, 袁小健, 王月明, 李海广. 基于声发射的气固两相流质量流率及粒径的测量[J]. 仪表技术与传感器, 2017(07):93-96.
- [14] Hanafi Z H, Jamaludin N, Abdullah S, et al. Acoustic emission study of corrosion fatigue and fatigue for API 5L X70 gas pipeline steel[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2012, 138: 635-639.
- [15] SHI J, ZHANG B, HAN L, et al. Acoustic Emission Source Assessment of Defective In-service Pipeline [J][J]. Petro-Chemical Equipment, 2010, 6.
- [16] LiYing S, YiBo L, LiBo S, et al. Comparison of Magnetic Flux Leakage (MFL) and Acoustic Emission (AE) techniques in corrosion inspection for pressure pipelines[C]//Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. IEEE, 2012: 5375-5378.
- [17] Holographic nondestructive testing[M]. Elsevier, 2012.
- [18] 沈建中, 林俊明. 现代复合材料的无损检测技术[M]. 国防工业出版社, 2016.
- [19] 薛书文, 宗明成. 金属内部近表缺陷深度的定量化检测新方法[J]. 北京交通大学学报, 1998, 22(1):59-62.
- [20] Liang K, Ma Y, Xie Y, et al. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4):309-315.
- [21] Almond D P, Lau S K. Defect sizing by transient thermography. I. An analytical treatment[J]. Journal of

- Physics D Applied Physics, 1994, 27(5):1063.
- [22] Saintey M B, Almond D P. Defect sizing by transient thermography. II. A numerical treatment[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 1999, 28(12):2539.
- [23] 杨黎俊, 耿完楨, 姜铃珍,等. 红外成像检测中的缺陷大小评估[J]. 无损检测, 1999(2):65-67.
- [24] Avdelidis N P, Hawtin B C, Almond D P. Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites[J]. Ndt & E International, 2014, 36(6):433-439.
- [25] Ibarra-Castaneda C, González D, Klein M, et al. Infrared image processing and data analysis[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 46(1):75-83.
- [26] 胡林海. 基于红外热成像技术的金属材料缺陷定量评估研究[D]. 华东交通大学, 2014.
- [27] Lien L, Djurovic S, Thoresen M, et al. Application of the Naive Bayes Classifier to Defect Characterization Using Active Thermography[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 31(4):383-392.
- [28] 曹丹, 屈惠明. 基于有限元的材料红外无损检测研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(5):513-517.
- [29] 李大鹏, 赵元松, 杨天任. 有限元法与 BP 神经网络在红外检测信号处理中的应用[J]. 无损检测, 2006, 28(1):2-7.
- [30] Guofeng J, Wei Z, Zhengwei Y, et al. Image Segmentation of Thermal Waving Inspection based on Particle Swarm Optimization Fuzzy Clustering Algorithm[J]. Measurement Science Review, 2012, 12(6):296-301.
- [31] 王文泉. 基于红外热成像技术的聚乙烯管道裂纹缺陷无损检测[J]. 无损检测, 2017, 39(8):29-33.
- [32] Wang X D, Huang Y X, Cheng C H, et al. A three-dimensional numerical modeling of thermoelectric device with consideration of coupling of temperature field and electric potential field[J]. Energy, 2012, 47(1): 488-497.
- [33] 牛晓勇, 任向征, 赵迎东,等. 电厂取排水管道腐蚀预测[J]. 应用能源技术, 2010(9):34-37.
- [34] Ozudogru T Y, Olgun C G, Senol A. 3D numerical modeling of vertical geothermal heat exchangers[J]. Geothermics, 2014, 51: 312-324..
- [35] Fang J, Guohua L I, Gao J, et al. Numerical simulation study on NDT of cast steel pipe by electromagnetically excited thermography[J]. Mining & Processing Equipment, 2012, 39(4):59-60.
- [36] 申金波. 供热管道检漏的数值模拟研究[D]. 华北电力大学, 2012.
- [37] Zhang Q, Guo T, Zhang X, et al. Research on diagnosis and prediction of corrosion in heating pipe wall based on infrared thermal image testing[J]. Corrosion Science & Protection Technology, 2017, 29(4):462-468.
- [38] 王金秋, 李为相, 朱承飞. 基于粗糙集和 BP 神经网络的石化管道外腐蚀程度预测应用[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(1):266-268.
- [39] 喻勇. 红外热成像管道检测方法研究[D]. 昆明理工大学, 2015.
- [40] 杨世铭. 传热学.第 4 版[M]. 2006.
- [41] Ozisik, Necati M. Heat conduction[M]. 1980.
- [42] 郭玉翠. 数学物理方法.第 2 版[M]. 2006.

- [43] Marchenko V. Sturm-Liouville Operators and Applications: Revised Edition[M]// Sturm-Liouville operators and applications /. 1986.
- [44] 姜根明,常安定,王拉省.零阶贝塞尔函数组成的两个正交系[J].纯粹数学与应用数学,2002(02):126-129
- [45] Xue H, Greiser A, Zuehlsdorff S, et al. Phase - sensitive inversion recovery for myocardial T1 mapping with motion correction and parametric fitting[J]. Magnetic resonance in medicine, 2013, 69(5): 1408-1420.
- [46] Bootsma G J, Verhaegen F, Jaffray D A. Efficient scatter distribution estimation and correction in CBCT using concurrent Monte Carlo fitting[J]. Medical physics, 2015, 42(1): 54-68.
- [47] Erkorkmaz K. Efficient fitting of the feed correction polynomial for real-time spline interpolation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(4): 044501.
- [48] Zastavnik F, Pintelon R, Kersemans M, et al. Local bending stiffness identification of beams using simultaneous Fourier-series fitting and shearography[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 443: 764-787.
- [49] Lucchese M M, Stavale F, Ferreira E H M, et al. Quantifying ion-induced defects and Raman relaxation length in graphene[J]. Carbon, 2010, 48(5): 1592-1597.
- [50] Petersilka G J, Bell M, Mehl A, et al. Root defects following air polishing: An in vitro study on the effects of working parameters[J]. Journal of clinical periodontology, 2003, 30(2): 165-170.
- [51] Hu X, Xu D, Wirth B D. Quantifying He-point defect interactions in Fe through coordinated experimental and modeling studies of He-ion implanted single-crystal Fe[J]. Journal of Nuclear Materials, 2013, 442(1-3): S649-S654.
- [52] 王海亮, 范春利, 孙丰瑞, et al. 二维内部缺陷的红外瞬态定量识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7).
- [53] Ibarra Castanedo C. Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography: depth retrieval with the phase[J]. 2005.
- [54] Saeed N, Omar M A, Abdulrahman Y. A neural network approach for quantifying defects depth, for nondestructive testing thermograms[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 94: 55-64.
- [55] Kim J W, Park S. Magnetic flux leakage sensing and artificial neural network pattern recognition-based automated damage detection and quantification for wire rope non-destructive evaluation[J]. Sensors, 2018, 18(1): 109.
- [56] Maldague X, Largouet Y, Couturier J P. A study of defect depth using neural networks in pulsed phase thermography: modelling, noise, experiments[J]. Revue générale de thermique, 1998, 37(8): 704-717.
- [57] Benitez H, Ibarra-Castanedo C, Loaiza H, et al. Defect quantification with thermographic signal reconstruction and artificial neural networks[C]//Proc of 8'h Conf on Quantitative Infrared Thermography, Padova, Italy. 2006.
- [58] Li K, Ma Z, Fu P, et al. Quantitative evaluation of surface crack depth with a scanning laser source based

- on particle swarm optimization-neural network[J]. NDT & E International, 2018, 98: 208-214.
- [59] Tan Y. Fireworks Algorithm[M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- [60] Gao H, Diao M. Cultural firework algorithm and its application for digital filters design[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control, 2011, 14(4): 324-331.
- [61] Zheng S, Janecek A, Ying T. Enhanced Fireworks Algorithm[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. 2013.
- [62] Li J, Zheng S, Ying T. Adaptive Fireworks Algorithm[C]// Evolutionary Computation. 2014.
- [63] 吴渊. 基于模糊 PID 的循环水温度控制系统研究[D]. 电子科技大学, 2013.
- [64] 黄颖, 杜润生. 基于智能数字 PID 算法的温度控制系统[J]. 自动化与仪表, 2005(01): 36-39.
- [65] 朱晨晨. 基于热波理论的红外热成像缺陷量化研究[D]. 电子科技大学, 2017.
- [66] 易子麟, 尹东, 胡安洲, 张荣. 基于非局部均值滤波的 SAR 图像去噪[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(04): 950-955.
- [67] Aygun S, Altun M, Gunes E O. Sobel filter operation in image processing via stochastic arithmetic-logic unit design[C]// 2017 25th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). IEEE, 2017.
- [68] 李长凯. 基于瞬态系数的 SAR 图像分割方法研究[D]. 合肥工业大学.
- [69] 董静, 王正勇. Zernike 矩结合 Sobel 算子的边缘检测[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(02): 202-205+210.

攻读硕士学位期间发表的论文

- 赵勋, 胡建中. 基于有限元建模的管道腐蚀热成像检测[J]. 北京: 中国科技论文在线 201904-24.