

常规岛管道壁厚可视化管理和减薄预测的技术研究

覃 坤, 肖调兵, 陈 明, 张 帆

中核核工业仿真技术重点实验室, 湖北 武汉

收稿日期: 2022年4月11日; 录用日期: 2022年5月7日; 发布日期: 2022年7月6日

摘 要

本文介绍了一种核电站管道壁厚管理系统的主要技术和实施过程。建立电厂常规岛系统的管道基础信息和测厚数据库实现信息化存储, 结合虚拟现实三维可视化技术, 实现管道壁厚减薄现状的可视化展示, 并且根据电厂现有历次大修测厚数据, 通过可行的数学计算模型, 实现壁厚减薄趋势分析和预测, 从而促进二回路FAC系统管道数据的信息化建设, 解决电厂评估二回路管道壁厚减薄状况及计算部件腐蚀速率工作效率低下且容易造成疏漏的问题。

关键词

虚拟现实, 壁厚减薄, 三维可视化

Technology Research on Visualization Management and Reduction Prediction for Pipeline Thickness in Conventional Island

Kun Qin, Tiaobing Xiao, Ming Chen, Fan Zhang

CNNC Key Lab on Nuclear Industry Simulation, Wuhan Hubei

Received: Apr. 11th, 2022; accepted: May 7th, 2022; published: Jul. 6th, 2022

Abstract

This paper introduces the main technology and implementation process of a pipe wall thickness management system in nuclear power plant. The system can realize the information storage by establishing the pipeline basic information and thickness measurement database of the conven-

tional island system of the power plant, and realize the visual display of the current situation of pipeline wall thickness reduction by combining virtual reality three-dimensional visualization technology. According to the existing thickness measurement data of previous overhauls of the power plant, the wall thickness reduction trend analysis and prediction are realized through a feasible mathematical calculation model, so as to promote the information construction of the pipeline data of the secondary circuit FAC system, and solve the problems of low efficiency and easy leakage in evaluating the wall thickness reduction of secondary circuit pipeline and calculating the corrosion rate of components in power plant.

Keywords

Virtual Reality, Pipeline Thickness Reduction, 3D Visualization

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

核电厂二回路是完成汽水循环、将热能转化为机械能的场所。二回路汽水管道是连接各个设备输送汽水介质的通道，也是二回路的压力边界[1]。

汽水管道壁厚减薄是指由于各种流动诱发材质劣化而造成管道材料不断损失，局部壁厚不断减薄的现象。随着管内流体流态的变化，二回路汽水管道会发生 FAC (流动加速腐蚀)、汽蚀和冲蚀，乃至它们的叠加作用。这些侵蚀作用的共同结果都是管道壁厚减薄，达到一定程度时引发泄露或者破裂，造成了停堆停机、重大人员伤亡和经济损失，甚至对核电行业的发展造成了一定的冲击[2]。

由此可见，核电厂二回路汽水管道壁厚减薄如果不妥善管理和控制，则可能造成安全事故，严重威胁核电厂安全、可靠和经济运行。为此本文介绍一种方法，结合虚拟现实技术开发常规岛管道壁厚管理系统，实现对二回路 FAC 系统管道壁厚相关业务的信息化管理，提高管道壁厚管理的有效性。

2. 主要研究内容

2.1. 管道壁厚数据管理

电厂通常是以电子文档和纸质报告的方式记录历次大修期间二回路系统部件检查的结果。随着检查的逐年深入，测厚数据越来越多。当前人工逐一查阅文档和报告的形式不仅工作量大，且容易造成疏漏，不适应目前信息化存储、分析的趋势。因此需要将文档和报告形式的数据建数据库进行管理，为后续的管道壁厚可视化和减薄预测做好数据准备。

1) 基础数据建库

实现对设备、管道等部件的基本信息，如材质、规格、编码、介质条件、温度、压力、保温层数据等管道信息的存储。

2) 检测数据建库

建立管件与检测点之间一对多的映射关系，并根据部件测厚程序布点原则，记录被检部件编码、检测时间、测点名称、实测壁厚值、检测区域、侧线、标号等信息，实现对采集数据的存储。

3) 数据更新维护

数据存储能根据检测报告模板格式实施批量导入数据，数据导入方式简单且易于输入。

2.2. 壁厚分布可视化

根据图纸资料建立常规岛现场相关的三维模型，并对模型进行轻量化处理。然后采用自主三维引擎加载模型构建虚拟三维场景，再现常规岛厂房内部工作环境。

1) 现场环境可视化

现场三维建模范围包括：常规岛厂房建筑及内部环境三维模型，以及高压抽气管线系统(LBQ)、低压抽气管线系统(LBS)、汽水分离器凝结水系统(LCT)三个系统所包含的三维模型如系统中管道、设备、现场部件(弯头、三通、节流孔板、大小头、阀门等)。

2) 壁厚总体分布可视化

壁厚总体分布以管线系统中的所有管件为对象，每个管件为最小显示单元。根据大修检测时间的变化筛选后台数据，壁厚值数据变化驱动虚拟三维常规岛场景中所有管件模型外型所渲染颜色的变化，直观显示历次大修管件壁厚值的变化情况。

3) 壁厚局部分布可视化

壁厚局部分布以管线系统中的某一个管件为对象，管件上的每个检测点为最小显示单元。根据大修检测时间的变化筛选后台数据，检测点壁厚值变化驱动虚拟三维管件模型上检测点所渲染颜色的变化以及壁厚曲线图的变化，直观显示历次大修管件检测点上壁厚值的变化情况。

2.3. 壁厚减薄预测

结合电厂目前采用的检测手段，找到合理可行的管道壁厚预测方法，使预测方法与电厂实际管道壁厚变化情况基本一致，具备参考价值。

本文采用直线方程数学模型模拟壁厚减薄趋势，利用历次大修测厚历史数据求解直线方程中的参数，使直线趋势尽量逼近实际壁厚走势。采用多种方法进行壁厚减薄的计算和预测，并比较计算结果的合理性和可靠性。具体计算方法详情请见 3.2 章节。

3. 主要技术

3.1. 壁厚分布显示

系统支持壁厚分布情况的总体查看和局部查看，并且支持自定义和修改壁厚范围值对应的颜色标记。其中配色常用规定为：网格壁厚大于原始壁厚 87.5% 的为绿色，介于原始壁厚 87.5%~66% 之间的网格壁厚为蓝色，小于原始壁厚 66% 的网格壁厚为红色，无检测数据的网格为白色。

1) 总体查看壁厚分布

总体查看常规岛环境时，后台数据库根据输入的检测时间遍历匹配的管件壁厚检测数据，参照极值选取的方法，筛选出每个管件的最小壁厚检测值，并根据壁厚值范围和颜色的对应表对三维场景中的管件模型渲染对应的颜色，见图 1。

2) 局部查看壁厚分布

局部查看管件模型时，弹出窗口显示网格化的管件模型，网格化的管件模型对管件整体模型进行网格划分，划分的网格与检测数据中的空间位置对应，每个网格模型根据其位置对应的壁厚值渲染对应的颜色，见图 2。

由于管件种类较多、规格尺寸也不尽相同，参照部件测厚程序布点原则，管件上的检测点分布也大不相同。如果采用传统做法，在前期三维建模过程中需要对管线系统的各种类型各种规格的管件模型依

据测厚布点原则一一分割成几十乃至上百个独立的网格模型，导致大大增加了建模工作量，而且很不灵活不能通用化。



Figure 1. Overall distribution
图 1. 总体分布



Figure 2. Part distribution
图 2. 局部分布

本系统采用二维纹理映射技术[3]实现网格的动态划分，用来显示管件上各个检测点的壁厚分布。使用一个二维颜色数组来定义用于表面区域绘制的二维纹理图案，其纹理空间位置用二维坐标(s, t)来指定。对于一个 m 行、n 列的二维纹理图案，用 RGB 表示颜色信息，则其所需数组的存储空间为 $m*n*3$ 字节。

在数组中查找每个纹素对应的颜色信息的偏移量为 3。纹理空间坐标位置(0, 0)指向第一行第一个位置的第一组颜色分量(即左下角),位置(1.0, 1.0)指向该数组最后一行最后一个位置的最后一组颜色分量(即右上角)。本系统将纹理空间原点安排在左下角,有利于简化纹理映射中坐标系的转换[4] [5]。

对于管件模型这样的样条面片或球面部分等图形的表面位置用 UV 对象空间坐标来描述,投影平面上的像素点在笛卡尔坐标 xy 中定义,采用两步映射法,先从纹理模式映射到物体表面,再映射到投影平面。

3.2. 减薄速率计算

1) 区域法和点对点法相结合

依据参考文献(6)中有关 FAC 的资料,评价壁厚检查结果数据的方法共有 5 种:分别为 Band Method、Averaged Band Method、Area Method、Moving Blanket Method、Point-to-Point Method [6]。

考虑目前采用的无损检测手段,本系统选用上述方法中的第 3 种(即区域法)和第 5 种(即点对点法)作为支管壁厚的预测方法。每种方法都需借助当前支管在特定部位的最小原始壁厚以及当前支管对应的运行时最小允许壁厚,这 2 个数据作为分析时基准参数。具体见表 1:

Table 1. Comparison of area method and point-to-point method

表 1. 区域法和点对点法对照表

评价方法	区域法	点对点法	备注
最新检查数据与原始数据相比的计算	设支管对应的名义壁厚为 T_{nor} , 设最新检查的各测点最小实测壁厚为 T_{min} , 设第一次检查获得的最小实测壁厚为 $T_{1,min}$, 将 $\text{Min}\{T_{1,min}, T_{nor}\}$ 作为支管对应的原始壁厚, 设为 T_{init} , 设最新检查距离机组第一次检查(或机组投运)的时间间隔为 D , 则磨损量 $W_1 = (T_{init} - T_{min})/D$	设最新检查中各个测点的实测壁厚为 $T_{n,i}$, 设各个测点的第一次检查的实测壁厚 $T_{1,i}$ 作为原始壁厚, 设最新检查距离第一次检查的时间间隔为 D , 则各个测点的磨损量 $W_i = (T_{1,i} - T_{n,i})/D$, 取上述测点磨损量的最大值作为该部位的磨损量 W_3	在进行预测分析时采取保守策略, 选取 4 个磨损量的最大值作为支管某部位的磨损量, 即 $W = \text{Max}\{W_1, W_2, W_3, W_4\}$
每年磨损量计算公式	设最新 2 次大修的最小实测壁厚依次为 T_{n-1}, T_n , 检查时间依次为 D_{n-1}, D_n , 则磨损量 $W_2 = (T_{n-1} - T_n)/(D_n - D_{n-1})$	设最新 2 次大修各个测点的实测壁厚依次为 $T_{n-1,i}, T_{n,i}$, 检查时间依次为 D_{n-1}, D_n , 则各个测点的磨损量 $W_i = (T_{n-1,i} - T_{n,i})/(D_n - D_{n-1})$, 取上述测点磨损量的最大值作为该部位的磨损量 W_4	
残余寿命计算	设最新检查的最小实测壁厚为 T_{min} , 设对应的最小允许壁厚为 T_{allow} , 不再区分预测方法, 则 $RL = (T_{min} - T_{allow})/W$		采取保守策略。

两种预测方法的比较: 后者比前者预测更准确, 但是后者对原始数据的依赖性较大, 它需要管理人员录入大量的检测点数据。两种方式的计算结果见图 3。

1) 线性回归拟合

除了区域法和点对点法相结合外, 系统还支持采用线性回归模型用最小二乘逼近来拟合壁厚减薄速率。直线方程使用带截距线性方程 $y = a + bx$, 所以要求解的直线参数为斜率 b 和截距 a 。设样本数据点

(x_i, y_i) , $i=1,2,3,\dots,N$, x_i 为大修周期, y_i 为检测壁厚值, 则直线参数的计算方法如下:

$$b = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}, \quad a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - b \sum_{i=1}^N x_i}{N}$$

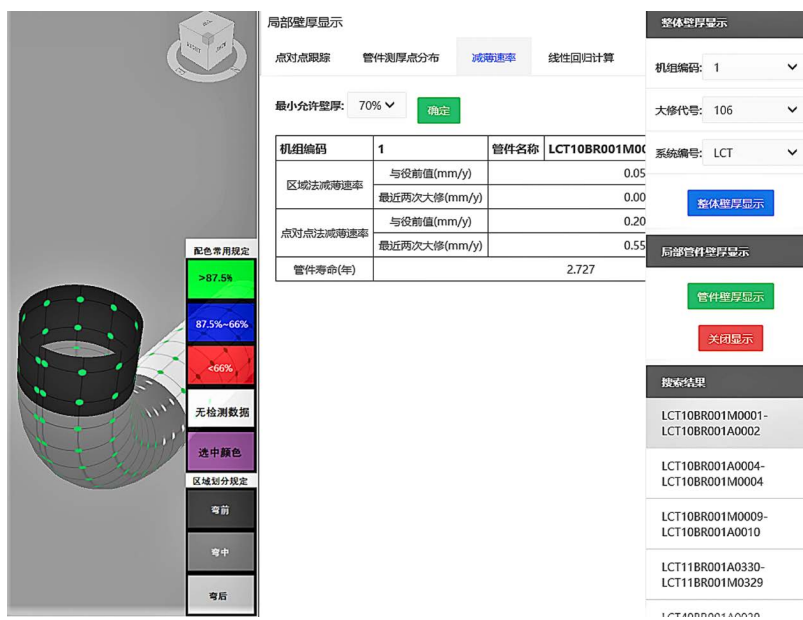


Figure 3. Calculation of wall thickness reduction rate
图 3. 壁厚减薄速率计算

采用线性回归拟合方法需要一定数量的历史数据, 数据太少会导致模拟的精确度太低, 对异常值很敏感而极大的改变直线参数值, 最后的结果和实际情况相差较大。只有当数据量达到一定程度时, 才能尽量减小偶然的异常值对计算结果的干扰, 把偏差降低。线性回归拟合方法的计算结果见图 4。

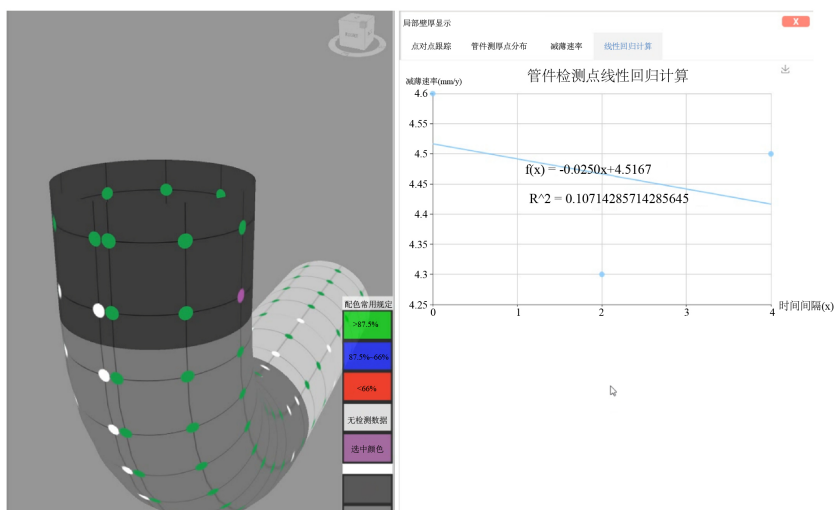


Figure 4. Linear regression fitting reduction rate trend
图 4. 线性回归拟合减薄速率趋势

4. 实施过程

4.1. 系统部署

常规岛管道壁厚管理系统采用 B/S(Browser/Server, WEB 浏览器模式)开发, 用户通过局域网办公电脑的浏览器登陆系统门户, 经过身份认证后允许使用系统。系统部署见图 5。

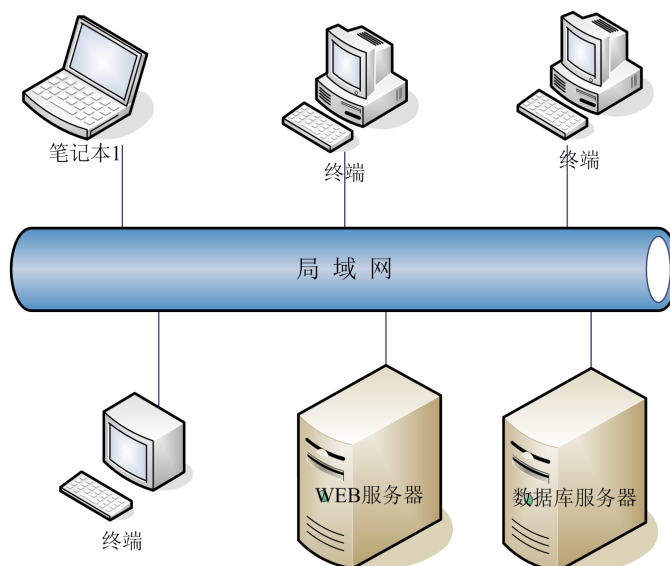


Figure 5. Platform deployment
图 5. 平台部署

4.2. 系统架构

常规岛管道壁厚管理系统的三维视图内容采用基于主流图形 API(如 DirectX11、OpenGL 等)的自主三维可视化引擎进行开发, 以 OCX 插件方式嵌入 Web 页面。

系统基于 Web 标准建立集成服务, 并且与电厂现有系统数据集成, 为平台提供管道分析数据支撑。Web 开发采用前后端分离开发技术, 后端使用 SpringBoot 应用框架, 简化项目配置; 前端使用 JQuery Bootstrap, 将界面的设计与应用的逻辑分离。后端负责应用逻辑, 前端负责页面设计和交互。系统部署见图 6。

4.3. 数据存储

系统数据存放在数据库服务器上集中管理, 服务器端提供模型存储、模型调度、上传和下载等业务功能, 采用 HTTP 和 HTTPS 协议对外提供标准化服务。在服务器端, 管道基础数据、管道检测数据、平台信息数据等结构化数据存放于关系型数据库中; 模型的几何信息及文本、图片、文件等非结构化数据存放于服务器分类文件夹中, 便于快速进行数据的 I/O。

4.4. 系统功能

本系统主要包括 5 个功能模块, 即门户首页、三维可视化管理、管道基础信息管理、管道检查分析管理、系统维护。功能框架见图 7。



Figure 6. System framework
图 6. 系统架构

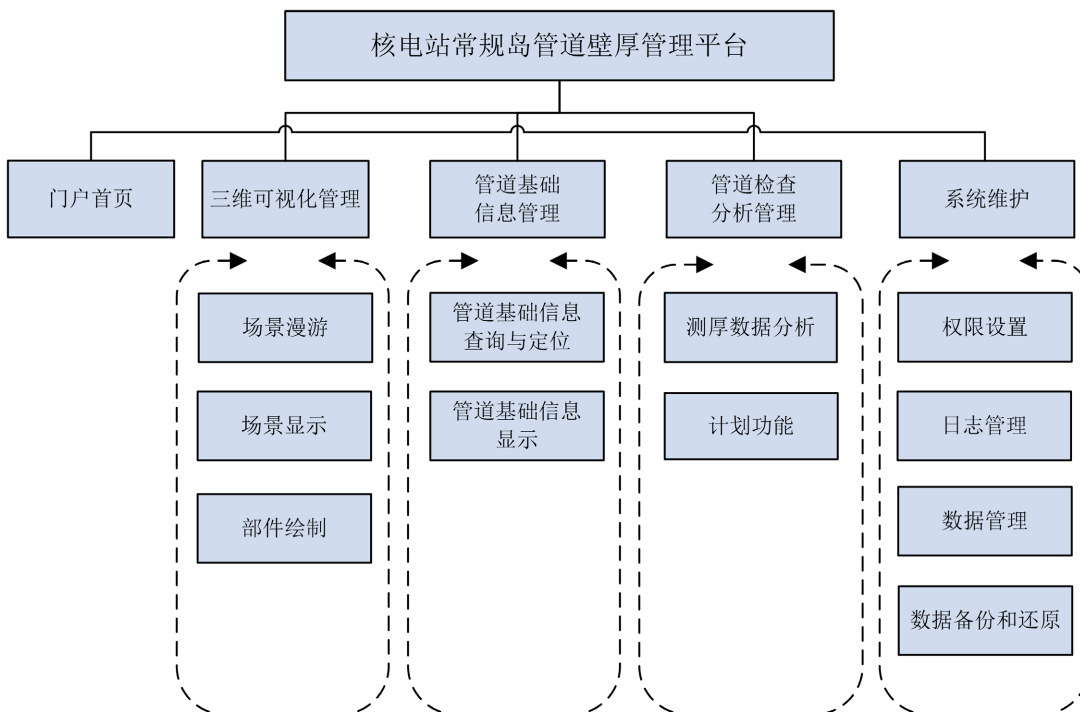


Figure 7. Functional framework diagram
图 7. 功能框架图

1) 门户首页。展现通知公告、系统联接、机组状态信息等内容。

2) 三维可视化管理。以虚拟三维场景方式展现常规岛内部结构(包括土建、设备、管道、阀门等),便于用户观察和熟悉工作环境;并且系统支持三维场景中常用管件模型的编辑操作,使模拟的三维场景与实际环境保持一致。

3) 管道基础信息管理。查询管道基础信息,三维场景中的相机视角快速定位至匹配对应的管道模型附近,且此时管道模型高亮显示,用户可自行调整相机视角的远近与角度,以便更好地观察模型及周围环境。管道基础信息包含模型信息、管道及管件信息、材料成分、检测方法、管道对应图册等。

4) 管道检查分析管理。用户通过查询统计查看历次大修测厚数据对比;实现壁厚分布情况的整体显示和局部显示;系统提供多种管件腐蚀速度计算策略,实现减薄速率及剩余寿命预测;平台根据减薄速率计算结果并结合管件设定的更换临界壁厚,自动编排检查计划。

5) 系统维护。系统管理员通过权限设置界面对用户进行分组和权限设置,赋予用户在平台上的浏览范围和数据操作范围;用户登录进入平台开始到退出平台结束,系统自动把用户在平台上的活动和操作描述记录在日志数据库中;系统提供数据输入和输出接口;系统支持数据备份和还原。

5. 结论与展望

核电站管道壁厚可视化管理平台从满足行业在经验反馈、信息共享和运行维护等方面的需求入手,分析能够促进二回路管道和设备壁厚减薄管理水平的方法,进而根据这些需求和方法详细地设计系统的组成结构和各部分的功能,最后选定 B/S 模式作为技术路线进行平台的研制和开发。由于该方法具有很强的通用性和有效的沟通效率,其应用还可扩展至其他电厂和其他厂房的管道壁厚系统领域,对加强和改善二回路壁厚减薄方面经验反馈交流起到积极作用。

参考文献

- [1] 栾兴峰, 郑会, 等. 提高核电厂二回路汽水管道壁厚管理的有效性[J]. 发电设备, 2014, 28(1): 37-40.
- [2] 郑会, 彭欣然, 李杰, 等. 核电厂二回路汽水管道流动加速腐蚀管理的工程实践[C]//2011 核电厂二回路管道壁厚管理研讨会会议论文集. 上海: 中国核能行业协会, 2011: 70-72.
- [3] 吴发辉, 张玲, 余文森. 基于图形学算法的纹理映射技术的研究与实现[J]. 现代电子技术, 2018(24): 71-74.
- [4] 李丽亚. 基于 VC++ 的图像纹理映射算法的应用[J]. 吕梁学院学报, 2017, 7(2): 43-46.
- [5] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构 C 语言版[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 278-283.
- [6] Munson, D. and Horowitz, J. (2006) Recommendations for an Effective Flow-Accelerated Corrosion Program. Final Report, Electric Power Research Institute 1011838, Palo Alto, 4.11-4.13.