

第 4 章 浮头式换热器性能监测与故障诊断系统的设计

4.1 引言

目前, 工业生产中对换热设备的故障监测与诊断仍有许多采用传统方法, 主要依靠观测人员定期观察在换热器进出口位置布置的测试点记录的数据来判断是否发生故障, 并反馈给专家咨询故障的处理措施。这样不仅耗费了大量的人力物力, 故障诊断的实时性和准确性也很难得到保障。此外, 由于缺少数据记录与查询系统, 不利于后期的故障维修和后续进一步故障诊断分析研究。因此, 设计开发一个能够对浮头式换热器进行实时性能监测并给出预警建议的系统, 对浮头式换热器的高效、安全、可靠运行具有重要的意义。

本章主要分析了浮头式换热器运行状态监测的系统需求, 研究了浮头式换热器性能监测与故障诊断系统框架的总体设计, 并讨论了浮头式换热器性能监测与故障诊断系统各功能模块的设计与实现。

4.2 系统需求分析

在进行系统开发时, 首先需要知道该系统的需要实现的功能, 也就是系统的需求分析。本系统是实现浮头式换热器的故障监测与诊断, 首先要解决的就是换热器监测数据的获取问题, 也就是具备数据采集和读取的功能。此外, 为了实现采集数据的存储, 并能在后期查询历史故障信息, 需要有一个与监测系统关联的数据库。最后, 为了方便操作人员随时了解换热器的运行情况, 需要实现监测数据和诊断分析结果的可视化。系统具体的功能需求如下:

- (1) 用户登录功能, 对已经储存相关信息的用户, 允许其进入和管理系统。
- (2) 添加设备信息, 对需要监测的换热器, 需要在监测前在数据库中添加被监测换热设备相关信息, 并可以在程序中随时查看与修改。
- (3) 数据采集, 程序与配套的数据采集系统连接, 并实时读取各监测变量的数值并显示运作阶段的实时变化曲线。
- (4) 历史数据查询, 实现任意时间段内的监测变量以及故障信息的查询, 并通过图表的形式展示。专家能够通过远程客户端查询相关数据。
- (5) 实时监测、诊断与报警功能, 通过监测的数据监测换热器的运行情况, 判断是否发生故障。若发生故障, 能及时提醒操作人员, 并反馈故障类型, 故障程度以及故障处理建议等信息。

4.3 系统环境

换热器故障监测与诊断系统的主程序，包括现场服务端和远程客户端都是基于 Windows 系统上的 LabVIEW 程序开发的。本地和远程数据库分别基于 Access 和 MySQL 关系型数据库开发，所有需要预先安装对应的数据库和数据库引擎，以确保系统中数据查询功能的实现。

通过 LabVIEW 主程序实时读取采集到的数据，并在界面上显示具体的数值信息以及数据的变化曲线。建立主程序与本地和远程数据库链接，实现主程序和数据库之间的数据存储与调用。同时在移动监测端上也能够随时观测数据的变化情况。

4.4 系统功能及结构框架

本系统主要针对换热器在运行过程中可能存在的故障，采集进出口位置的温度、流量和压力，结合换热器故障的理论模型，对是否出现故障进行评判，并给出故障类型及故障的处理建议。此外，实时监测的数据以及运行的结果也需要存储在对应的数据库中，并能够在远程客户端上显示相关信息。主程序基于 LabVIEW 建立，除了实现上述功能外，也需要建立数据库及远程客户端的连接接口。

根据上述程序所需要的实现的功能，主程序分为三大模块，分别为：采集与通讯模块、数据处理模块、监测与报警模块。根据实现功能的不同，进一步划分为多个小模块。各模块并不是相互独立的，相互之间随时进行数据的传输与调用。下面结合程序的内容说明各模块具体功能的实现以及相关之间的关联：

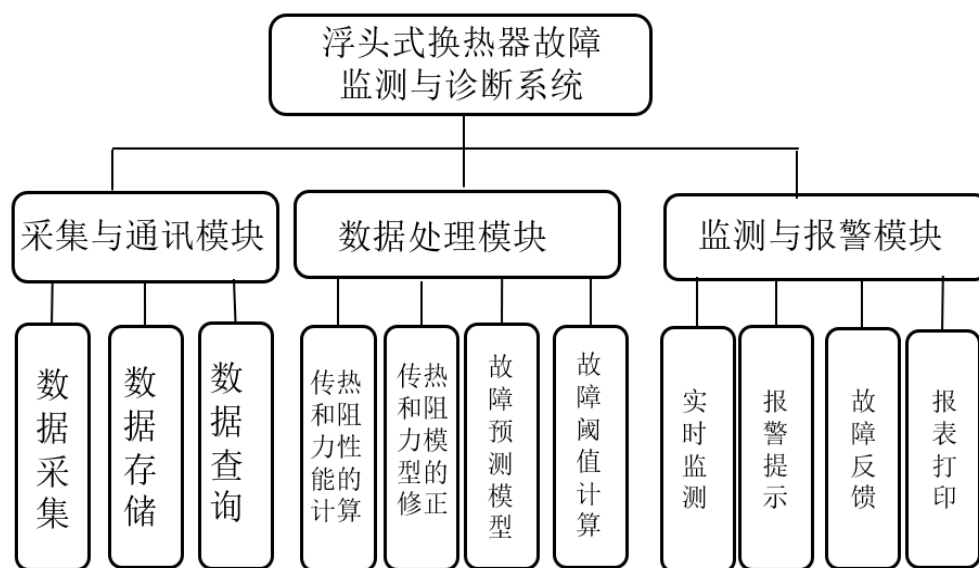


图 4.1 系统整体框架图

Fig. 4.1 the frame diagram of system

4.5 系统各功能模块设计

4.4.1 人机交互界面

人机交互界面是操作人员观察换热器运行状态，获取故障信息及处理故障措施，进行历史数据查询等操作的主要面板。整个换热器故障监测与诊断系统由数据采集界面、故障监测界面和数据查询界面构成并通过选项卡实现各界面之间的切换。左侧主要用来对被测换热器进行参数设置。下方的信息提示框中显示系统的操作记录和故障记录。

数据采集界面主要显示采集到的换热器进出口的温度、压力和流量信息。同时根据故障指示灯，判断运行的换热器是否发生故障。若发生故障，可以切换至故障监测界面查询具体故障原因及处理建议，也可以切换至数据查询界面进行故障记录查询。

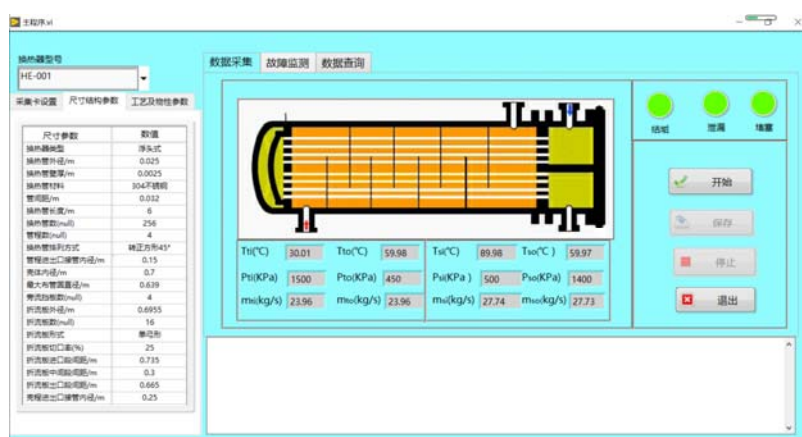


图 4.2 数据采集界面

Fig. 4.2 the data acquisition interface

故障监测界面主要将采集到的数据进行数据处理，导入故障数学模型中计算得到不同的故障程度，并显示其随时间的变化曲线，并通过对应的故障阈值判断是否发生故障，右侧对话框中显示故障原因及处理建议。

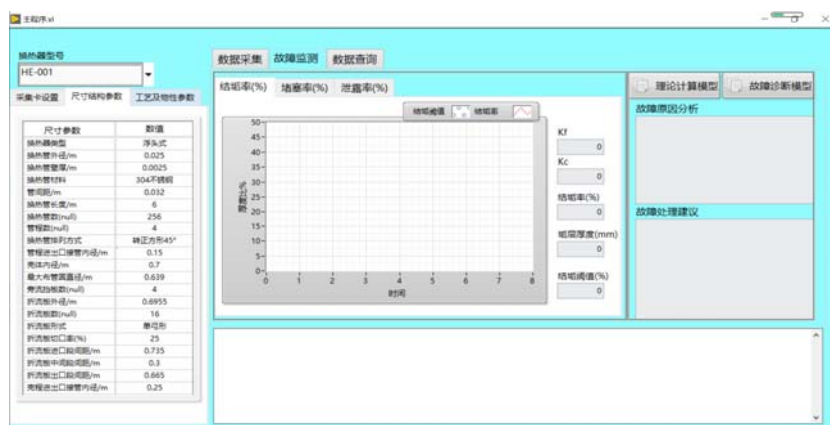


图 4.3 故障监测界面

Fig. 4.3 the fault monitoring interface

数据查询界面上可以同时查询本地和远程数据库中的数据，远程数据库主要用于远程客户端的数据查询。查询项目下拉列表其中包括各监测变量和故障程度，通过选择查询的起始时间和结束时间，查询该时间段内的历史数据曲线，并显示在右侧的图形总。右键图形可以将该时间段内的查询结果以 excel 文件的形式保存。

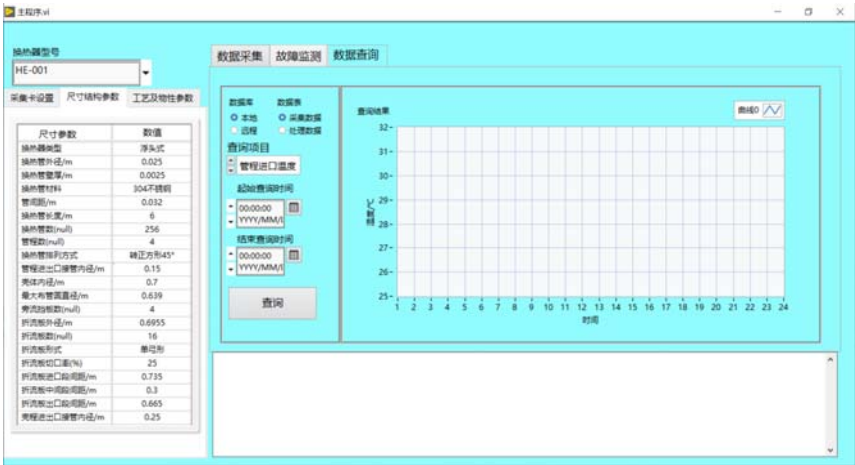


图 4.4 数据查询界面

Fig. 4.4 the data query interface

4.4.2 数据采集模块

为了实现数据的采集，需要在系统开始监测前对采集的相关参数进行设置。如图 4.2 所示，左边采集卡设置选项卡中设置采集数据的物理通道，也就是与采集卡连接的传感器。并且根据数据采集卡的配置信息，设定好采样率、采样数以及信号的量程，以确保程序能够准确读取到传感器的数据。系统运行时可以在数据采集、故障监测和数据查询三个选项卡自由切换。数据采集界面主要显示被监测换热器的示意图，包括冷热流体的走向。下方显示换热器进出口位置的温度、压力和流量数值，共 12 个监测变量。点击任意一个被监测变量，弹出监测变量的实时变化曲线图。

右侧的 4 个按钮分别为控制开始/停止采集数据，是否将采集到的数据保存到数据库中，退出程序。按钮上方的指示灯在监测出结垢、堵塞或是泄露故障时会闪烁，提示操作人员查询具体的故障信息，以便于及时地对故障进行处理。

4.4.3 数据库模块

数据库为系数数据的存储和调用提供了充足的空间，也是后续进行数据查询与分析的重要组成部分。本系统中的本地数据库为 Access，通过微软提供的应用程序访问关系数据的接口 ODBC，实现 LabVIEW 程序与 Access 数据库的连接。Access 数据库中主要存放以下表：

- (1) 尺寸结构参数表：包括换热器的类型，换热管尺寸，折流板信息等，主键为换热器的型号，系统通过换热器的型号检索其对应的各项尺寸参数。
- (2) 工艺参数表：包括换热器设计时的进出口流量、温度和压力参数以及操作压

力和允许压降的信息，主键为工艺序号。换热器的尺寸结构和工艺信息需提前录入数据库中。

(3) 物性参数表：用于查询对应温度下的物性参数。

(4) 采集数据表：用于存储采集到的监测变量，主键为采集时间。

(5) 故障信息表：当诊断出故障后，系统会将故障类型，及其对应的故障程度存放在该表中，主键为时间，可以用于后续的故障记录的查询。

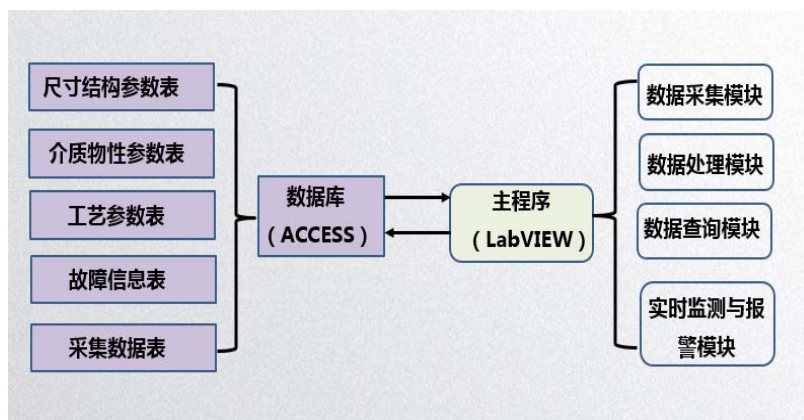


图 4.5 数据库中各参数表与主程序各功能模块的关系

Fig. 4.5 the relationship between parameter tables in the database and the function module of the main program

如图 4.5 所示，主程序与数据库连接，当系统需要调用数据库中的数据进行分析处理时，通过查询命令从对应的参数表中索引出需要的信息。例如，当进行传热和阻力计算时，根据用户的设置从数据库中查询对应换热器的结构尺寸参数和工艺条件以及对应的物性参数，再将查询到的数据导入数据处理模块中进行分析。换热器运行时，通过数据采集模块，自动地将数据存储与采集数据表中。后期需要查询或分析时再从该表中，检索出所需要的信息。

系统程序部分主要通过 LabVIEW 自带的 Database 技术，通过 SQL 查询语言，实现数据的查询、存储、修改和删除。当需要观察某一段时间内，某一项监测变量或是故障评判指标的变化情况。切换至数据查询界面，查询某一段时间内的历史数据变化情况。

为了实现远程客户端的数据查询，需要在远程服务器上用 MySQL 建立远程数据库。通过服务器提供的 ip 地址和端口号连接系统。这样，采集的数据能够实时存储至远程数据库中，而通过远程客户端也能够获取需要的数据。

4.4.4 数据处理模块

数据处理模块主要根据第二和第三章建立的传热和阻力计算模型、状态预测模型等建立能够实现对对应功能的子程序，以供主程序调用。

以监测时间为节点，将子程序分为监测前和监测过程中调用的子程序。

监测前调用的子程序包括：

- 1) 通过传热和阻力模型计算理想工况下的总传热系数和管壳程压降的子程序。
- 2) 不同传热系数下出口温度校核计算的子程序。
- 3) 建立状态预测模型的子程序。
- 4) 建立结垢预测模型的子程序。
- 5) 故障阈值计算的子程序。

监测过程中调用的子程序包括：

- 1) 通过监测变量计算故障程度的子程序。
- 2) 通过监测变量变化趋势识别故障类型的子程序。
- 3) 修正传热计算模型的子程序。

子程序计算时通过系数的数据库调用接口，从尺寸结构参数表、工艺参数表和物性参数表中索引出需要的数据。在调用修正传热计算模型的子程序时，将测试数据输入子程序中才能够得到修正后的模型参数。需要将有效的测试数据保存为 excel 文件，通过 ActiveX 控件读取测试数据。在对传热计算模型修正和确定状态预测模型的过程中，需要进行相关的拟合操作。拟合的过程不需要人为操作，系统会根据输入的尺寸参数和工况参数自动进行拟合。如图，拟合的结果以及建立的相关模型会以曲线图的形式呈现，通过点击“理论计算模型”进行查看。

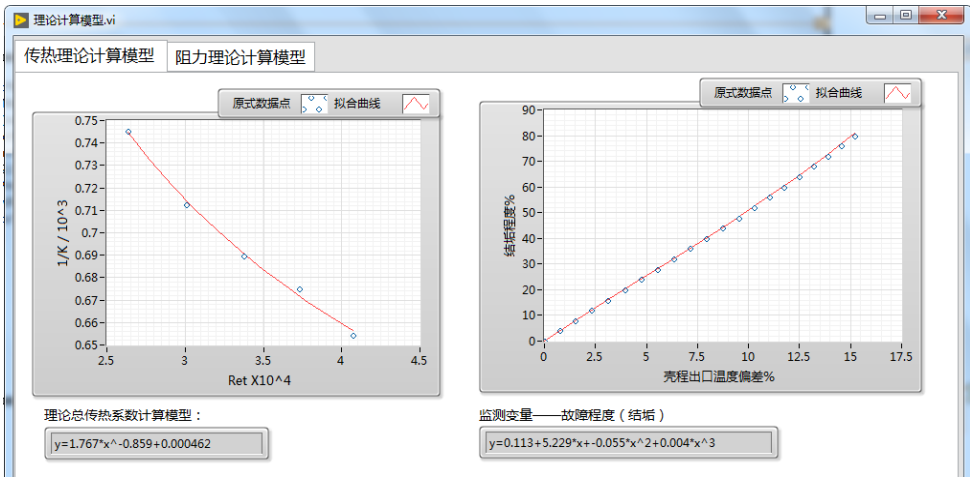


图 4.6 传热计算模型和结垢状态预测模型

Fig. 4.6 the heat transfer calculation model and scale state prediction model

4.4.5 实时监测与报警模块

故障监测界面上主要显示不同故障程度随时间的变化，而故障程度通过采集的监测变量代入故障诊断模型得到。当故障程度超过其对应的故障阈值后，系统会进行故障报警提醒，主要方式有：

- (1) 数据采集界面上故障类型的指示灯地持续闪烁，
- (2) 报警对话框的弹出，并播放报警提示音；

(3) 主界面下方信息提示框内，记录故障发生的类型和时间。

如图 4.3 所示，故障监测界面右侧会对引发故障可能的原因进行分析，并根据故障类型不同给出相应的故障处理的措施。按下上方的理论计算模型和故障诊断模型按钮，进入后台的数据处理模块子程序，且不会影响主程序的正常运行。在子程序中，可以看到对对应理论模型、故障诊断模型以及结垢的预测模型的函数曲线及表达式，更加直观地显示数据处理的过程。

4.6 本章小结

本章根据系统需求，搭建了主程序基于 LabVIEW，数据库基于 ACCESS 和 MySQL 的浮头式换热器故障监测与诊断系统。将系统的各功能模块分为：人机交互界面、数据采集系统、数据库系统、数据处理系统和实时监测与报警系统。详细阐述了各功能模块所包含的内容、实现的功能以及相互之间的关系。

第 5 章 系统的工程应用

5.1 引言

为了证明程序系统在换热器实际运行中能够及时准确地诊断出故障，并且对操作人员进行故障处理时能够提供有效的指导，需要结合实际工程案例的故障数据。由于实际运行时的故障数据获取较为困难，本章采用一台实际案例中的浮头式换热器，利用其结构尺寸和工况条件参数，结合换热器模拟仿真软件获取结垢的故障数据。介绍了浮头式换热器性能监测与故障诊断系统的使用方法和操作步骤，并进一步验证了该系统的可行性与可靠性。

5.2 浮头式换热器结构参数与运行条件

本文以上海某石化企业采用的浮头式换热器，其具体的结构尺寸参数如表 5.1 所示。根据其工艺要求：通过循环冷却水将工艺水冷却至 60℃并输送至下一工艺流程，其设定的进口温度和流量以及压降要求如表 5.2 所示。


 表 5.1 换热器结构尺寸




Table 5.1 The structure size parameters of heat exchanger	
换热器类型	AES
换热面积 $A(\text{m}^2)$	118
管程 N_{tu} /壳程数 N_s	1/4
换热管外径 d_o /壁厚 δ_w (mm)	25/2.5
换热管长度 L (m)	 , 
换热管数 N_t	256
换热管布置形式	转正方形
换热管间距 P_t (mm)	32
壳体内径 D_i (mm)	700/15
折流板类型/切口率	单弓形/25%
折流板间距 L_o (mm)	
管程进/出口接管直径 D_{ti}/D_{to} (mm)	150
壳程进/出口接管直径 D_{si}/D_{so} (mm)	250

表 5.2 工艺参数

Table 5.2 The process parameters

工艺条件	管程	壳程
介质	循环冷却水	工艺水
进口温度/°C	30	90
出口温度/°C	—	60
质量流量/(kg/s)	24	27.778
进口压力/MPa	1.5	0.5
允许压降/kPa	150	50

5.3 基于 PRO/II 的浮头式换热器故障模拟

5.2.1 换热器仿真模型的建立

PRO/II是一个款通用性的化工稳态流程模拟软件，广泛应用于油气、炼油、化工、制药等行业。为了满足各种工艺条件的模拟要求，该软件提供了丰富的单元包括：管道、阀门、压缩机以及各类反应器。对于换热器单元，软件提供了两种模型，包括 Simple HX 和 Rigorous HX。采用 Simple HX 进行模拟时，仅需要输入换热器的传热面积和总传热系数。而 Rigorous HX 则需要输入换热器详细的结构尺寸信息和污垢信息后才能进行模拟计算。为了模拟不同结垢程度下换热器的工况参数的变化情况。

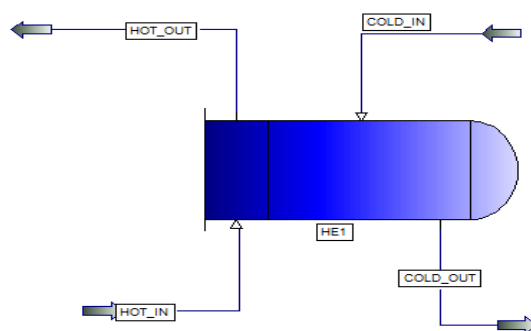


图 5.1 Rigorous HX 模型

Fig. 5.1 The Rigorous HX model

Rigorous HX 的建模如图 5.1 所示。根据表 5.2 所给的工艺参数，在换热器的管壳程进口处设置介质的类型、进口温度、流量和压力。根据表 5.1 所示工程所用换热器的实际参数信息，在模型中输入具体结构尺寸参数。然后，利用 PRO-II 中 Rigorous HX 的计算校核功能，即能得到出口参数的结果。

5.2.2 结垢故障的模拟

基于 PRO-II 的故障模拟主要通过设置管壳程的污垢热阻值和垢层厚度来模拟故

障对换热器的传热和阻力性能的影响。根据工艺条件所给出的信息，通常管程的循环冷却水容易发生结垢故障。根据第 3 章的结垢预测模型，渐进污垢热阻值 R_f^* 可以参考换热器设计时推荐的不同介质在不同温度和流速下的污垢热阻，如表 3.2 所示。根据所给的工艺参数信息，运行时管程的流速为 1.21m/s，定性温度为 45℃，根据表 3.2 渐进污垢热阻 R_f^* 取为 $5.28 \times 10^{-4} \text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ 。而案例浮头式换热器的清洗周期为 360 天，则 θ_c 为 120。据此可以做出针对本案例的污垢热阻随时间的变化曲线，如图 5.2 所示。

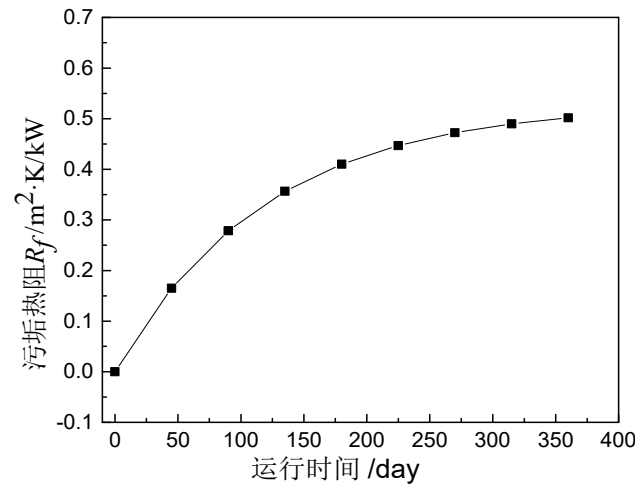


图 5.2 浮头式换热器污垢热阻随时间的变化曲线

Fig. 5.2 The curve of fouling resistance with time of floating head heat exchanger

根据式（2-22）可以计算出在该时间段内的当量垢层厚度。以 45 天为间隔，计算出对应的污垢热阻和垢层厚度，再输入至所建立的仿真模型中，计算出各时间点对应的出口温度和出口压力。结垢后出口温度和管程压降的模拟结果如表 5.3 所示。

表 5.3 结垢的模拟结果

Table 5.3 The simulation results of scaling

时间/day	$R_f/\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{kW}$	δ_f/mm	$K_f/\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$	$T_{t0}/^\circ\text{C}$	$T_{s0}/^\circ\text{C}$	$\Delta P_t/\text{kPa}$
0	0	0	1528	64.9	60	29.9
45	0.165	0.462	1185	62.8	61.8	36.9
90	0.279	0.767	1025	61.3	63.1	42.7
135	0.357	0.971	938	60.3	63.9	47.2
180	0.410	1.108	886	59.6	64.5	50.5
225	0.447	1.202	854	59.2	64.9	52.9
270	0.472	1.265	833	58.9	65.1	54.8
315	0.490	1.309	819	58.7	65.3	56.1
360	0.502	1.338	810	58.4	65.5	57.5

根据结垢模拟的结果作出出口温度和压降随时间的变化曲线,如图 5.3 和 5.4 所示。壳程的出口温度较初始运行时上升了 5.5°C , 通常对流体出口温度有着严格的要求,如要求产物的出口温度的偏差控制在 5% 以内,则完成一个完整的运行周期前就已经需要采取相应的措施来减小结垢故障的影响。而由于管内垢层厚度的增加,管程压降增长了 1.67 倍,运行结束时的压降并没有超过允许压力降。由于在第 3 章时,对于结垢过程假设污垢均匀分布在整個换热表面上,此时所得到的垢层厚度比较小,因此结垢后压降的增长并不明显。而实际过程中,由于污垢层分布不均匀所导致的粗糙度增大,局部区域结垢程度严重,都会导致实际的管程压降会大于模拟得到的结果。

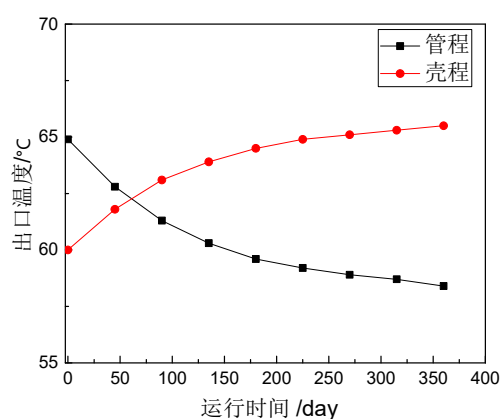


图 5.3 出口温度随时间的变化曲线

Fig. 5.3 The curve of outlet temperature with time

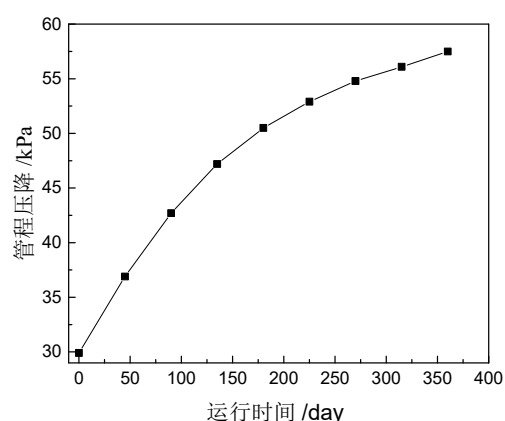


图 5.4 管程压降随时间的变化曲线

Fig. 5.4 The curve of tube pressure drop with time

5.4 浮头式换热器性能监测与故障诊断

将上一节的仿真案例作为监测对象,采用前述设计开发的浮头式换热器性能监测与故障诊断系统对其进行监测与分析。并通过具体的操作步骤,指导操作人员如何从系统中获取有用的信息。

5.4.1 系统程序的操作与运行

为了演示浮头式换热器运行中的性能监测与故障诊断的过程,下面按照程序运行的不同阶段介绍其操作步骤及系统所反馈的信息。

(1) 运行前的准备工作

考虑到本文所建立的浮头式换热器性能监测与故障诊断系统能够适用于不同结构和不同工况条件下的换热器。在系统运行前,需要确保数据库中已经记录有所有被测换热器的结构尺寸参数和工艺参数。在结构尺寸参数表中,通过换热器的型号进行索引。在工艺参数表中,通过工艺路线进行索引。而物性参数表包含所有可能的介质,具体的物性参数通过定性温度进行索引。

（2）进入系统，并进行相关设置

进入系统前需要输入正确的用户名和密码。为了确保能够准确地采集到各监测变量的实际信号，需要对采集卡进行相关设置，主要是采集设备和采集通道的设置。同时，每隔多少时间记录一组采集的数据，可以通过存储时间间隔进行设置，默认是 1min。然后，根据被测换热器，在“换热器型号”的下拉菜单进行设置。设置完毕后，可以在对应的表格中检查是否准确。

在数据采集界面，可现实浮头式换热器的结构示意图，冷热流体的走向也可以根据工艺参数判断在示意图上显示。在运行前，点击各监测变量，可以对其阈值进行设置。比如在本案例中，更关注的是壳程工艺水的出口温度，按照要求可以设置±5%的阈值。其他没有设置阈值的变量，默认为在监测过程中不进行判断。详细的程序界面，见第 4 章的数据采集界面。

（3）换热器实际运行过程中查看换热器的运行情况

如图 5.2 所示，点击“开始”按钮，系统读取采集到的各监测变量，并显示具体的值。若运行过程中，监测变量超过允许的阈值，监测变量会变成红色，以提示操作人员。界面下方的信息提示框中，显示操作记录和报警记录。当监测到某一监测变量超出设定的阈值，会弹出消息提示框，并发出报警声。同时，根据设定的阈值判断当前是否发生结垢、堵塞和泄露故障，若检测到发生故障，右上方的故障指示灯会闪烁。

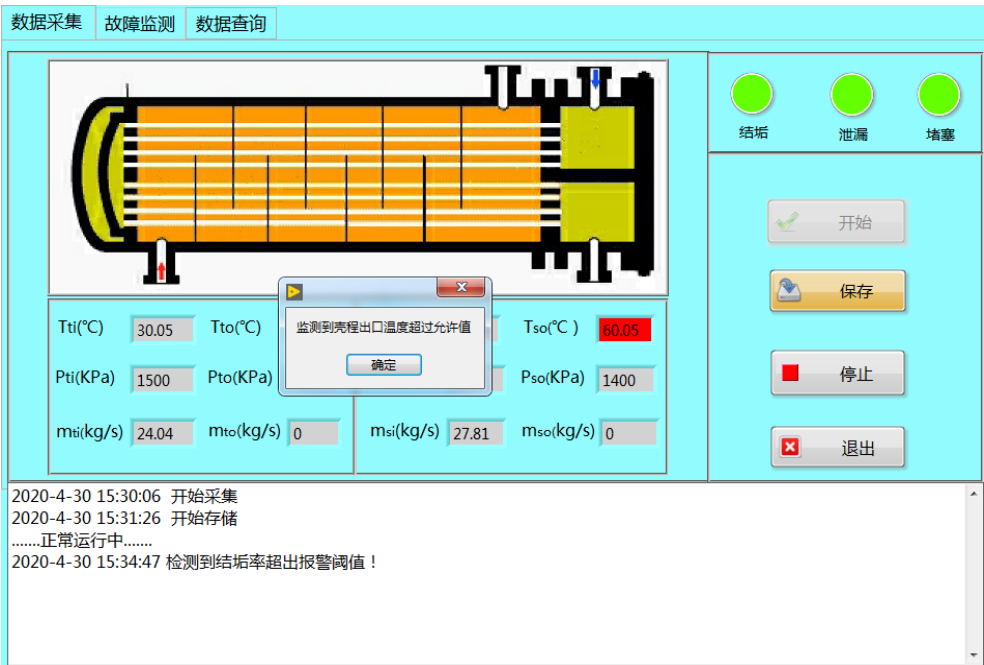


图 5.5 采集界面上的故障提示

Fig. 5.5 The fault prompt on the acquisition interface

运行时，点击采集界面上的监测变量的数值框后，就能显示各监测变量的实时变化曲线，同时还可以查看实际总传热系数和污垢热阻的变化情况。这些参数反应出换

热器当前的传热和阻力性能情况。当监测到故障时，进入故障监测界面查看当前故障的程度、详细的故障原因分析和故障处理建议。

（4）运行结束后，查询历史数据和记录查询

在换热器在线运行或离线停工时，需要查看某段时间内的出口监测变量是否处于要求的范围内。在监测变量下拉按钮中选择要查询的名称（包括进出口的温度、压力和流量以及各故障程度的记录），在分别输入起始查询时间和结束查询时间，该时间段的监测变量的数据在右侧图形中显示，如图 5.5 所示。若查询到的记录是超出阈值的，则会以红点标记出来。

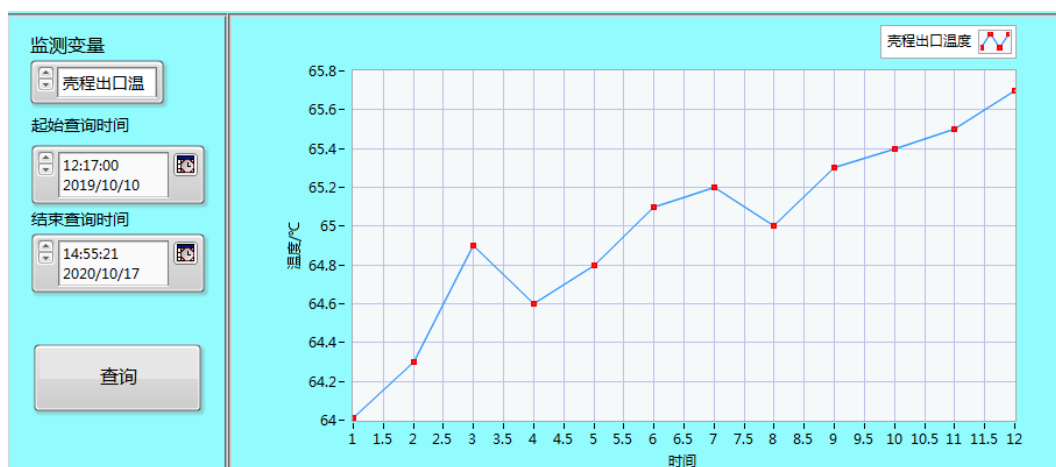


图 5.6 历史数据查询结果

Fig. 5.6 The query results for historical data

本章所采用的数据为结垢故障模拟得到的结果，得到的变化曲线比较平滑。而实际监测过程中，监测变量的变化曲线通常呈锯齿形。此外，由于缺少实际经验和数据的支持，故障阈值的设置的偏差可能会导致漏判或误判，需要在后期结合专家经验对故障阈值进行调整。

5.4.2 性能监测与故障诊断

（1）性能监测

如换热器监测过程中，在采集界面上点击壳程出口监测变量的名称，显示出口温度的实际测量值和理论计算值，其中理论壳程出口温度是根据第 2 章的清洁工况下出口温度的校核计算得到。如图 5.9 所示，在运行初期，此时壳程的出口温度为 60.5°C ，与理想工况下的出口温度 60°C 偏差较小，说明此时结垢对浮头式换热器传热性能的影响较小。

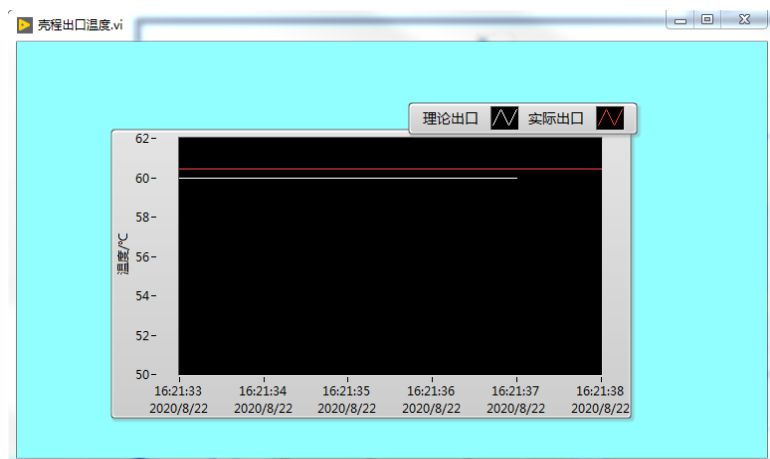


图 5.7 壳程出口温度的实时变化曲线

Fig. 5.7 The real-time variation curve of shell outlet temperature

如图 5.8 和 5.9 所示, 在故障监测界面处, 可以看到运行 90 天时浮头式换热器的总传热系数和污垢热阻分别为 $1055 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 和 $0.26 \text{ m}^2 \cdot \text{K/kW}$, 与实际值的相对误差分别为 2.9% 和 6.9%; 运行至 180 天时浮头式换热器的总传热系数和污垢热阻分别为 $886 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 和 $0.426 \text{ m}^2 \cdot \text{K/kW}$, 与实际值的相对误差分别为 1.6% 和 3.8%; 运行至 270 天时浮头式换热器的总传热系数和污垢热阻分别为 $816 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ 和 $0.491 \text{ m}^2 \cdot \text{K/kW}$, 与实际值的相对误差分别为 2% 和 3.9%。270 天以后, 总传热系数和污垢热阻趋于稳定。

在监测过程中, 点击数值名称则会另外弹出窗口显示当前运行时间段内浮头式换热器的污垢热阻和总传热系数的变化曲线。根据该曲线可以判断此时的传热性能满足要求, 换热器能够正常运行。在整个运行阶段, 系统记录的总传热系数最大相对偏差小于为 5.6%, 污垢热阻的最大相对偏差为 6.9%, 说明本系统在浮头式换热器性能监测的过程中具有较高的准确性。

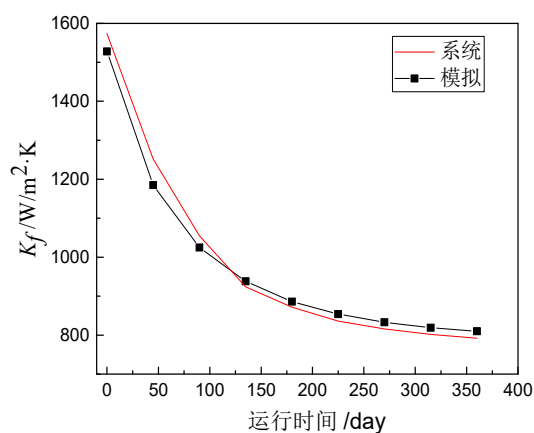


图 5.8 总传热系数的变化曲线

Fig. 5.8 The curve of heat transfer cofficeient

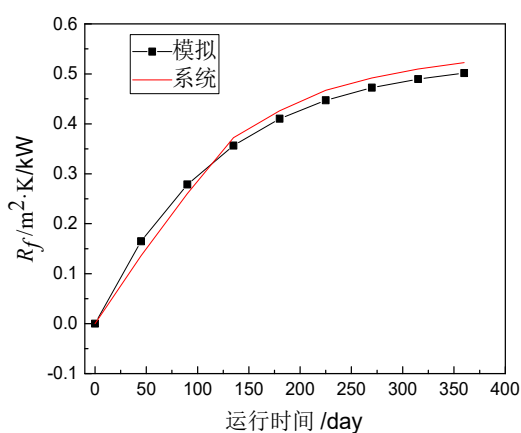


图 5.9 污垢热阻的变化曲线

Fig. 5.9 The curve of fouling resistance

(2) 故障诊断

当检测到故障后，选择故障监测界面，查看具体的故障原因和故障的处理建议。当采集界面处提醒出口温度超出阈值或是结垢故障指示灯闪烁时，进入故障监测界面发现运行至 100 天时结垢率超过报警阈值但未到达清洗阈值，查看右侧的故障原因分析和故障处理建议，如图 5.10 所示。通常对于结垢到达这一阶段时，认为结垢故障对换热器的进出口温差产生较大的影响，但此时的换热性能仍然能够满足工艺要求。因此，给出的故障建议是通过调节的方式来增大换热效率，使得调节后的出口温度降低至允许的范围之内。

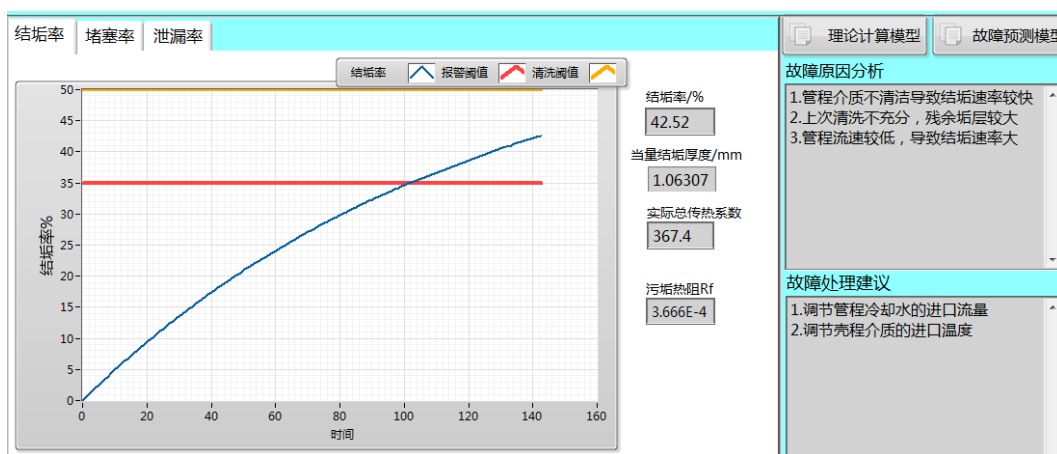


图 5.10 超出报警阈值时的故障提示

Fig. 5.10 The fault prompt when the alarm threshold is exceeded

当换热器运行至 210 天时，结垢程度超出清洗阈值，如图 5.11 所示，说明结垢故障的程度已经比较严重，此时换热效率以及不能够满足生产要求。此时，建议及时对换热器进行清洗，清洗的方式由污垢的类型及主要成分决定。操作人员可以结合换热器的运行时间决定是否需要马上停工清洗。

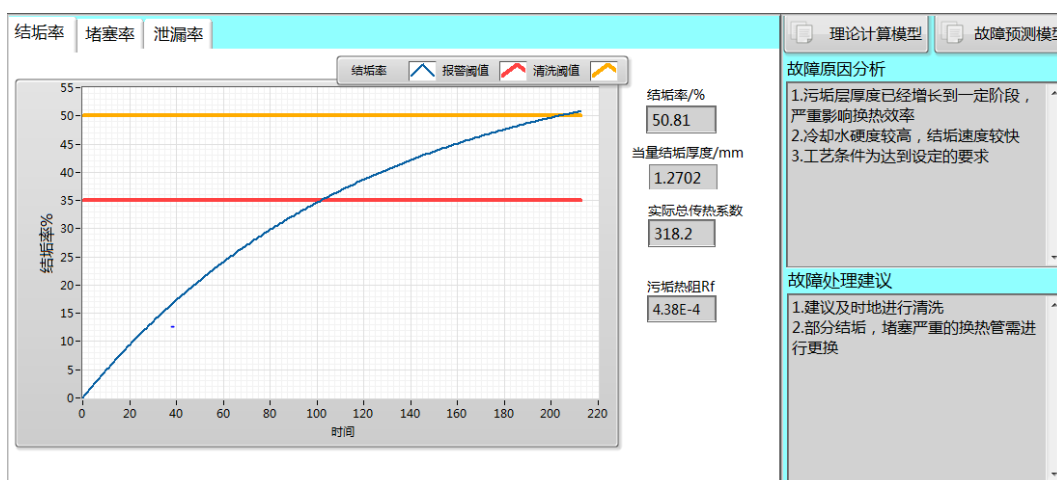


图 5.11 超出清洗阈值时的故障提示

Fig. 5.11 The fault prompt when the cleaning threshold is exceeded

5.5 本章小结

用户通过浮头式换热器性能监测与故障诊断系统，能够实时获取各监测变量的信息，通过故障程度观察换热器的性能变化，通过设定的故障阈值判断换热器是否满足生产的要求。当监测到故障后，对不同类型的故障，故障产生及发展的原因，并根据当前故障的严重程度给出合理的处理建议。系统还为用户提供了数据查询的功能，通过回顾以往的故障记录，用户能够更加合理有效地安排换热器的清洗和维修计划。

为了验证系统在实际监测过程中的实用性和准确性，根据具体的工程案例，基于 PRO/II 模拟仿真软件和结垢预测模型，对结垢故障进行了模拟，并根据获得的故障数据结合系统实际操作过程中所得到的监测结果，来验证系统处理和检测故障的能力。