

第5章 管壳式换热器性能监测与评价系统优化

5.1 引言

传统的换热设备监测方式通常是由工作人员定期查看换热器进出口的温度、压力和流量监测数据，确定设备的效率并判断是否发生故障，这种传统的方法不仅会使人力和时间成本增加，并且监测到的数据也不能及时的存储，不利于历史数据的查询，对于后期的换热器故障维修和分析都产生了一定的难度。因此对管壳式换热器进行在线监测和性能分析，可以保证换热器能够安全稳定的运行，也可以及时的监测到早期故障的发生。

原有的管壳式换热器性能衰减智能监测系统^[93]具备实时采集进出口参数、数据存储、数据查询、结垢预测等功能，但是使用的模型不能对换热器性能进行准确的评价，并且对于污垢热阻的预测与实际存在一定的误差。因此本章在已有换热器监测系统的基础上，首先使用第2章修正的传热计算模型和第3章建立的污垢热阻预测模型对系统的计算和预测模块进行更新。之后使用第4章确定的故障程度计算模型和故障阈值对系统中的故障监测模块进行完善，将建立的换热器综合性能评价方法写入系统，并对系统的界面进一步优化，使系统的操作更加直观和方便。最后通过浮头式换热器和石脑油换热器两个实际工程案例的验证，介绍了优化后的管壳式换热器性能监测与评价系统的具体操作流程，使用实际工程应用中的历史故障数据，验证了本文所建立模型计算结果的准确性，以及优化后性能监测与评价系统的有效性和实用性。

5.2 故障监测与性能评价模块优化

5.2.1 故障监测模块

在确定所监测的换热器工艺和结构参数之后，为了能够准确的监测管壳式换热器的运行情况，在故障发生时及时的提醒和报警，增加了阈值设置界面中对管程和壳程出口参数正常运行范围的设置功能，如图5.1所示，通过设置监测参数的上下限以及不同故障的阈值，可以更好的对换热器当前的运行状况进行判断。可以在数据库中提前储存不同类型换热器的阈值参数，通过选择相应的管壳式换热器类型，系统会自动对应相应的阈值参数。当系统计算的故障程度超出阈值范围时，系统会自动弹出提醒框并发出报警声音来提醒工作人员。

根据第4章计算得到的故障判断阈值数据，设置系统的默认结垢阈值为29%，默认结垢清洗阈值为42%，默认堵塞阈值为35%，当堵塞阈值达到35%时，换热器的结垢率已经达62%，此时必须对换热器进行停工维修和清洗等工作，因此设置维修阈值为62%。用户在使用时也可以根据实际要求或历史运行数据，针对不同运行工况下的换热器运行参数和故障阈值，手动修改阈值参数，保证监测结果的有效性和准确性。



图 5.1 监测阈值设置界面

Fig. 5.1 Monitoring threshold setting screen

完成换热器参数阈值的设置之后，使用第 3 章建立的 GA-BP 污垢预测模型对系统中的污垢热阻预测功能进行更新，可以根据实时采集到的换热器进出口数据对污垢热阻进行预测。LabVIEW 作为功能强大而又灵活的图形界面开发程序，其编程方式简洁又直观，可以集成数千种硬件虚拟设备，也可以实现数据的可视化，还具备许多直观的虚拟空间。虽然 LabVIEW 在大量的数据分析和算法工具等方面的功能是不够完善的，但是它具有与其他编程语言和软件的交互功能，而 MATLAB 的最大优点就是可以进行大量数据的矩阵运算，并且具有许多应用程序工具箱和一些常用的函数。因此综合两种软件的优点，使用 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程实现污垢热阻的预测。LabVIEW 与 MATLAB 的混合编程可以通过四种方法来实现：ActiveX 技术、DLL（动态链接库）技术、DDE（动态数据交换）技术以及 MATLAB Script 节点技术。前三种方式的实现相对来说比较复杂，因此本文使用 MATLAB Script 节点技术实现与 LabVIEW 的混合编程，这种方法的实现过程方便，并且开启和运算速度也很快。通过 LabVIEW 中的 MATLAB Script 通信接口，当在 LabVIEW 中需要调用 GA-BP 模型时，系统会自动打开并运行 MATLAB 脚本程序用来调用 MATLAB 软件中的神经网络工具箱完成操作命令。调用过程示意图如图 5.2 所示。

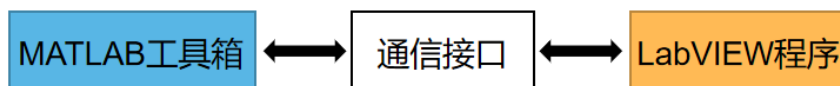


图 5.2 LabVIEW 调用 MATLAB 过程示意图

Fig. 5.2 LabVIEW call MATLAB process diagram

需要注意的一点是，使用 LabVIEW 调用 MATLAB 程序进行计算的前提是，计算机上需要装有 5.0 以上版本的 MATLAB 软件才可以正常运行。

通过 MATLAB Script 节点建立 GA-BP 污垢热区预测模型程序，部分程序如图 5.3 所示。将采集的每一组换热器实时运行数据进行相应的处理之后，传输到 MATLAB 软

件中自动进行运算,得到相应的预测污垢热阻值,将结果自动保存在名为 data 文件夹的 data.txt 文件中,可以随时查看,并且将结果实时显示在污垢预测界面的预测污垢热阻并绘出变化曲线,如图 5.4 所示。通过给出的系统运行过程中实时的污垢热阻预测值,可以了解污垢生成情况的变化趋势,有利于操作人员判断换热器内部污垢生成情况,做好清洗或维修的提前准备工作。

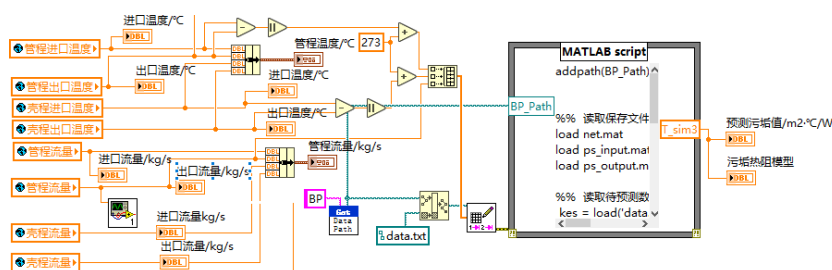


图 5.3 污垢热阻预测部分程序框图

Fig. 5.3 Fouling hot zone prediction part of the block diagram

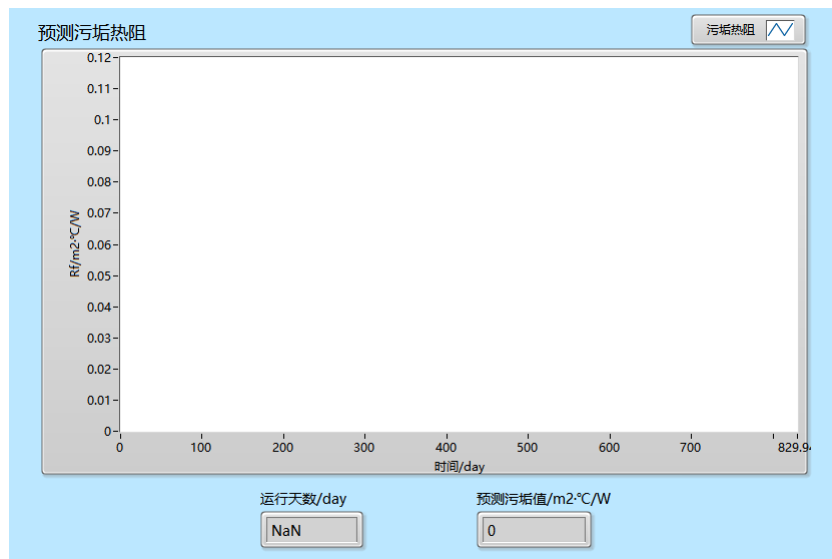


图 5.4 污垢预测结果显示界面

Fig. 5.4 Dirt prediction results display interface

管壳式换热器传热效率下降之后,为了更好的监测到故障程度的发展情况,在系统中写入第 4 章建立的结垢、堵塞和泄漏故障程度表征方式,并设置了相应的计算结果显示界面,部分程序如图 5.5 所示,显示界面如图 5.6 所示。

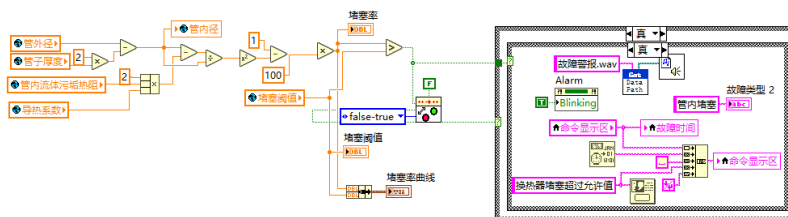


图 5.5 故障程度计算部分程序

Fig. 5.5 Fault degree calculation part of the program



图 5.6 故障程度显示界面

Fig. 5.6 Fault degree display interface

当换热器的出口参数超过设置的范围或者故障程度达到阈值设定时，系统会发出报警声，报警灯会持续闪烁。并且会根据故障的不同类型在右侧提示框内给出故障的可能原因以及相应的故障解决建议，例如，当堵塞率达到维修阈值 35% 时，故障原因为：污垢积累过多，部分换热管已经发生堵塞，污垢热阻已经严重影响换热效率，给出的故障建议为：换热器停工，对换热管进行清洗，更换已经堵塞的换热管，并检查是否有换热管泄漏。

5.2.2 性能评价模块

对管壳式换热器的性能评价主要从两部分来进行，一是通过传热和阻力计算模型，使用采集的进出口参数、用户输入的换热器参数以及数据库中的数据计算换热器的实际传热系数和压降，将计算数据在监测界面的图表中显示出来，并且可以在计算结果中查看具体数据。二是根据换热器的管程进出口数据的变化情况，对参数进行实时评分，使用第 4 章中确定的换热器综合性能评价方法，根据评分实现管壳式换热器的性能分级，更直接的展现出换热器的实时性能。结合这两种方法，可以更为准确的实现对换热器的性能评价，为换热器后续的正常运行和操作人员维修保养做准备。

传热系数和压降的计算通过调用建立的传热和阻力计算子 VI 来实现，将采集到的实时流体温度、压力和流量赋值给全局变量，再通过子 VI 调用相应的数据进行处理，完成传热系数和压降的计算。在第 2 章中已经提到，在设备运行一段时间后，污垢厚度和雷诺数超出一定范围后，使用通用的传热计算模型得到的传热系数与实际传热系数之间会有一定的误差，为了保证计算结果的准确性，需要对管内放热系数进行修正，因此使用第 2 章建立的传热计算修正模型对原监测系统计算程序进行更新，部分程序如图 5.7 所示。

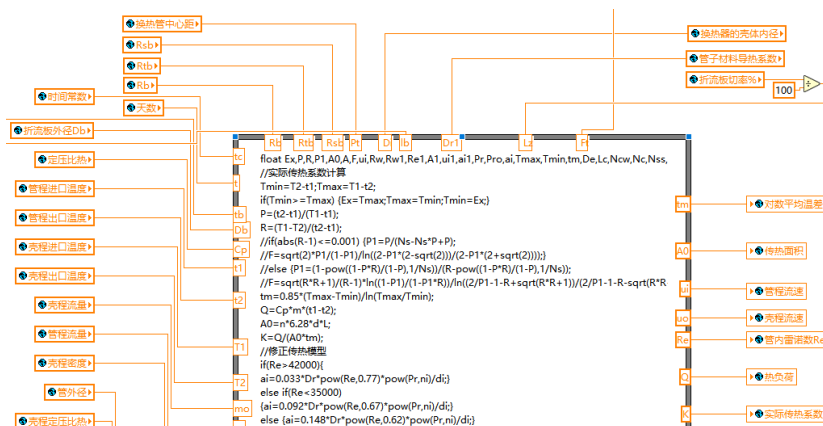


图 5.7 传热系数计算部分程序

Fig. 5.7 Heat transfer coefficient and pressure drop calculation part of the program

前面已经提到, 在开始采集之前, 会对换热器的故障阈值以及参数的正常工作范围进行设置, 以保证可以准确的监测设备运行状态和判断故障的发生。将设置的参数正常工作范围与第 4 章建立的换热器性能综合评价方法结合, 增加了系统的性能评价功能, 部分程序如图 5.8 所示。使用采集到的换热器实时进出口数据, 结合开始监测之前用户设置的换热器出口参数的允许运行范围, 通过系统设置的评分标准对各项参数进行评分, 再根据各个参数所占的权重就可以计算得到传热和阻力性能的综合评分, 从而实现对换热器的分级评价, 使操作人员能够了解到设备的实时状态。

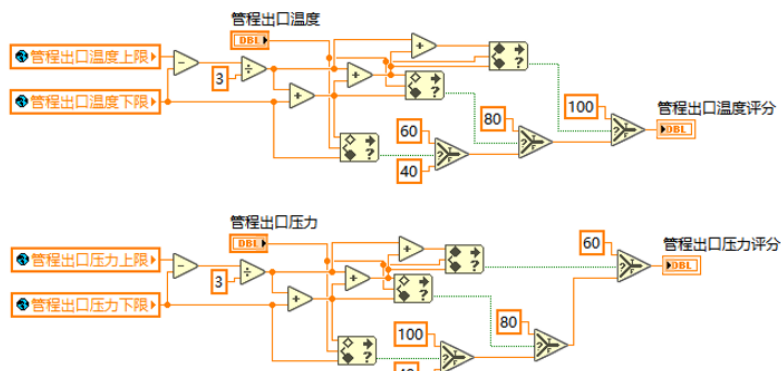


图 5.8 性能评价部分程序

Fig. 5.8 Performance evaluation part of the program

在系统开始采集数据后, 如图 5.9 所示, 用户可以在“性能监测”界面看到传热系数和压降的实时数值和变化曲线, 以便操作人员根据参数的变化及时调整换热器的入口流量、压力等数据, 保证换热器传热效率能够保持在正常范围内。为了能够更加直观的了解到目前设备的性能状态, 增加了换热器性能监测评价功能, 用户可以在“数据监测与评价”界面观察到设备的实时进出口数据以及相应的曲线图。

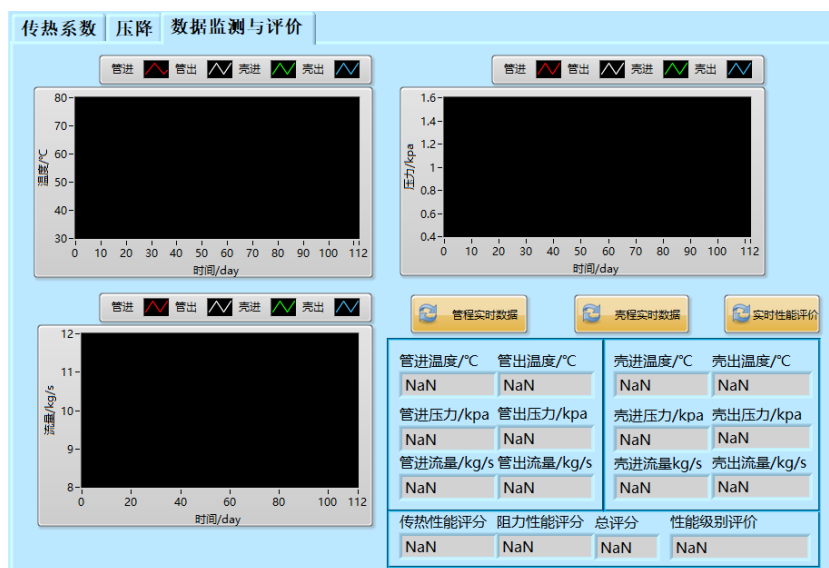


图 5.9 数据监测与评价界面

Fig. 5.9 Performance monitoring and evaluation interface

5.3 基于工程案例的优化系统监测结果分析

5.3.1 系统使用过程介绍

由于工作环境不同，管壳式换热器的工况要求也不同，因此在系统开始运行之前之前，首先要对换热器进行相关参数的设置和导入，如图 5.10 所示。在换热器工艺参数设置中，可以设置折流板厚度、管壳程流体介质等参数，在系统中已经写入了部分介质的参数和对应选项，用户可以根据需要自己选择或者修改。

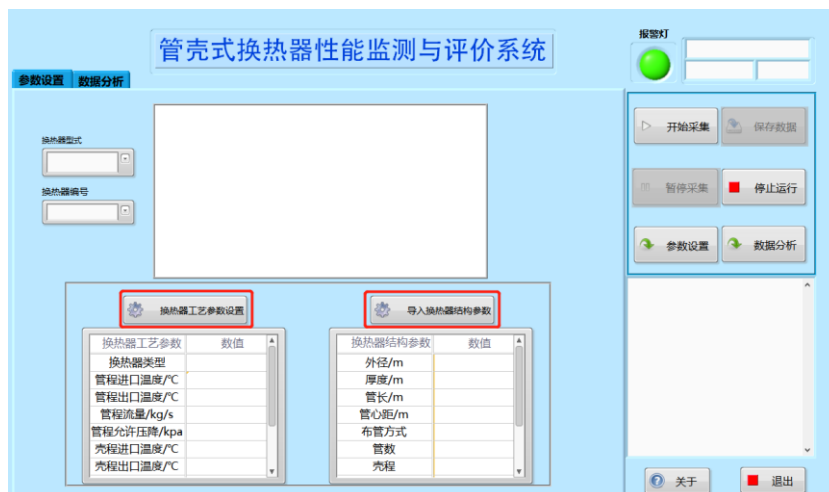


图 5.10 换热器参数设置界面

Fig. 5.10 Heat exchanger parameter setting interface

通过选择换热器编号确定对应的换热器结构参数，若系统中已有的换热器结构参数不符合使用要求，用户可以通过“导入换热器结构参数”功能自行导入所使用的换热器参数，导入页面如图 5.11 所示。在系统的主程序文件夹中，给定了导入换热器结构参数的数据文件模板，用户可以根据实际的换热器结构参数修改 EXCEL 文件，并将结构

参数文件导入，系统会自动识别各个数据并显示在换热器结构参数数据框中。

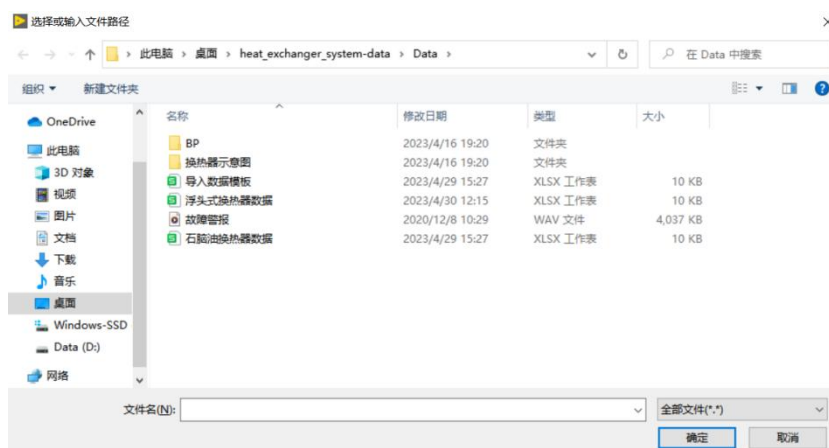


图 5.11 换热器结构参数导入

Fig. 5.11 Heat exchanger structure parameter import

在换热器结构和运行参数设置完成之后，如图 5.12 所示，在“采集卡设置”中对采集卡进行采集设备和采集通道的设置和选择，以便可以采集到正确的监测变量。之后在“阈值设置”中查看系统默认的故障阈值以及监测参数的上下限设置，如果不符合当前换热器的监测，用户可以设置对应的阈值以及参数的上下限，具体的设置界面在本章的第 2 节中的故障监测模块部分已经展示，此处不再赘述。



图 5.12 系统参数设置界面

Fig. 5.12 System parameter setting screen

在换热器参数设置全部完成并检查无误之后，点击系统界面右侧的“开始采集”按钮，系统会读取进出口的各个变量进行相关计算并自动跳转至“数据监测与评价”界面，在这个界面可以看到各个变量的变化曲线和实时数据，并且可以看到对换热器当前性能的实时评价，反映出换热器当前的运行状态。

在开始采集之后，用户可以在系统的数据分析界面查看系统的计算结果，如图 5.13 所示。点击“性能监测”按钮，可以查看当前的总传热系数和压降相关数据、进出口参数实时数据以及对换热器当前性能的实时评价；点击“故障监测”按钮，可以查看系统

实时的污垢热阻预测值以及结垢、堵塞和泄漏三种故障程度的变化曲线，当前的传热系数当监测到结垢或其他故障超出设置范围后，系统会发出报警声和自动提示用户采取措施。



图 5.13 系统数据分析界面

Fig. 5.13 System data analysis interface

5.3.2 浮头式换热器

以某石化企业采用的浮头式换热器为例，其结构参数和工艺要求如表 5.1 和表 5.2 所示。

表 5.1 浮头式换热器结构参数

Table 5.1 Structural parameters of floating head heat exchanger

结构名称	参数
壳体内径 D_i /m	7
管程数 N_t /壳程数 N_s	2/1
换热管外径 d_o /内径 d_i /m	0.025/0.0025
换热管长度 L /m	20
换热管数 n	250
换热管布置方式	转角正方形
换热管间距 p /m	0.032
折流板形式	单弓形
折流板厚度 A /m	0.005
折流板切口率	25%
折流板间距 B /m	0.2

表 5.2 浮头式换热器工艺参数要求

Table 5.2 Technical parameter requirements of floating head heat exchanger

参数名称	管程	壳程
流体介质	循环冷却水	工艺水
进口温度/°C	30	72
出口温度/°C	52	53
质量流量/kg/s	9.7	10.5
进口压力/MPa	1.5	0.5
允许压降/MPa	0.15	0.05

将上述结构参数和工艺参数存入数据库中，在系统的换热器参数设置界面，选择对应的工艺参数和结构参数，在采集卡设置页面选择相应的采集设备和通道，在阈值设置界面输入不同故障对应的阈值以及出口温度的允许范围值，检查其他设置无误之后，系统采集之前的准备工作完成，设置完成之后的界面如图 5.14 所示。

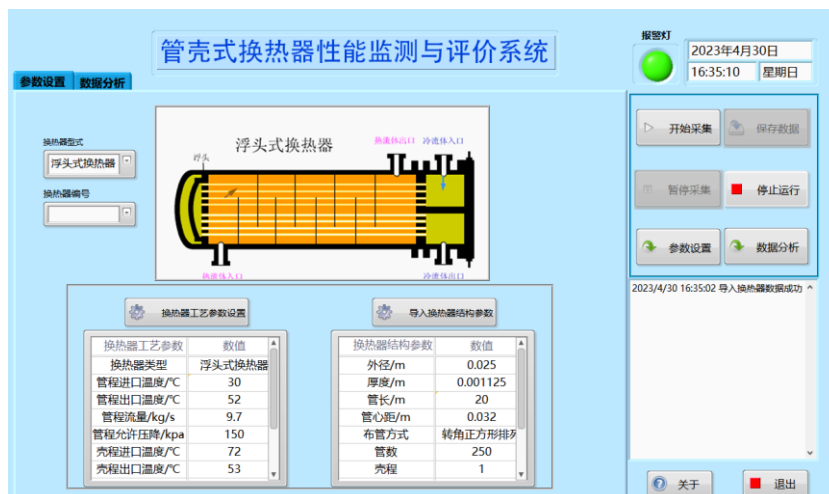


图 5.14 参数设置完成界面

Fig. 5.14 Parameter setting complete interface

点击“开始采集”按钮之后，系统开始工作。换热器在刚开始运行时是没有故障的，随着工作时间的增加，内部逐渐有污垢生成，随着污垢厚度的增加，换热器的结垢率也在随之增加，当监测到的结垢率超过故障阈值时，系统会弹出提醒框，进入故障监测界面可以查看当前的结垢率，并且会给出可能的故障原因以及建议，如图 5.15 所示。可以看到，在换热器运行到 135 天左右时，内部的结垢率达到了 29%，根据故障建议可以对换热器进行清洗等操作。此时换热器仍然可以继续工作，当结垢率达到清洗阈值后，监测系统会弹出提醒框，报警灯会持续闪烁并发出报警声，提醒工作人员换热器内部的结垢已经比较严重，需要及时处理。

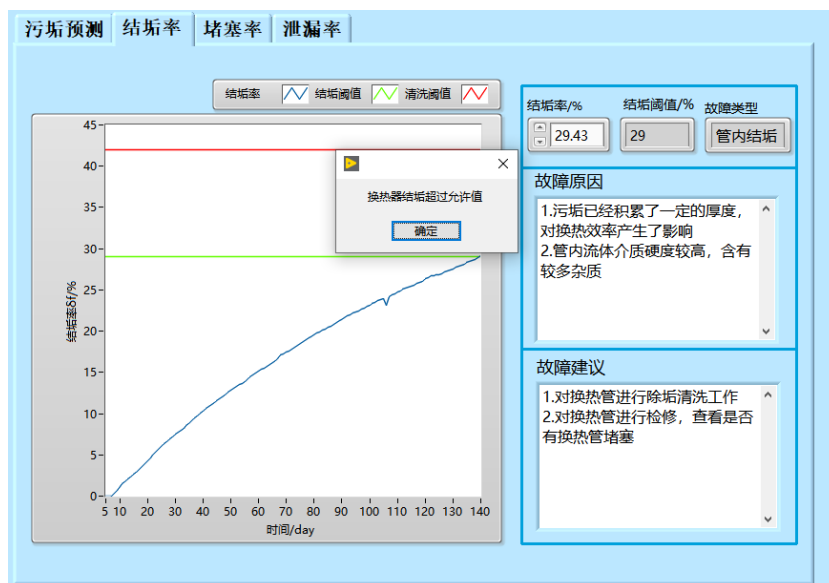


图 5.15 达到结垢阈值后的监测界面

Fig. 5.15 The monitoring interface after reaching the scale threshold

当监测到的结垢率超出系统设置的清洗阈值时, 系统会弹出提醒框, 并且会发出报警声来提醒工作人员, 如图 5.16 所示。可以看到, 在运行到 320 天左右时, 换热器的结垢率已经达到清洗阈值, 此时系统给出了可能的故障原因以及相关的建议, 操作人员可以根据设备具体的运行时间进行换热器清洗和维修等相关工作。

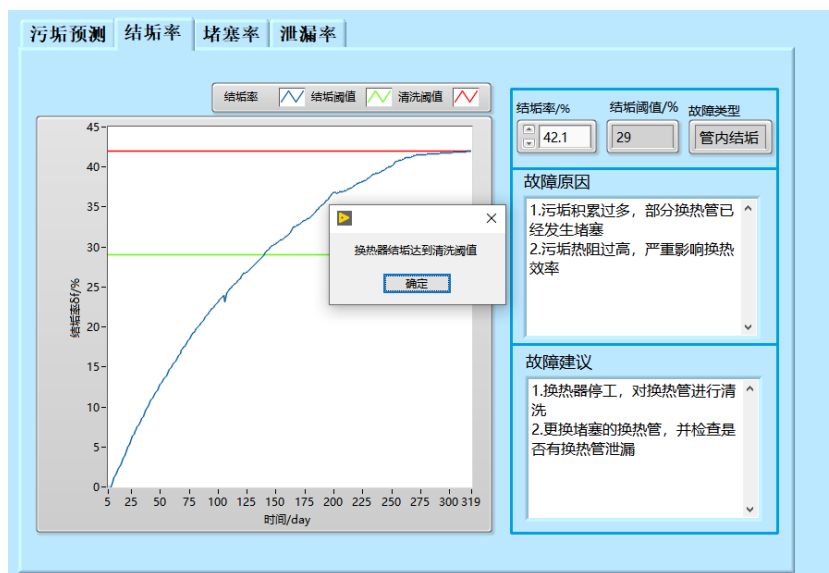


图 5.16 达到清洗阈值后的故障监测界面

Fig. 5.16 The fault monitoring screen after the cleaning threshold is reached

在系统完成监测之后, 将浮头式换热器的运行数据在原监测系统中进行监测和计算, 并将优化前后总传热系数的计算结果与实际数据进行对比和误差分析, 如图 5.17 所示。从图中可以看出, 随着换热器工作时间的增加, 结垢率也随之增加, 污垢的存在使得换热器的总传热系数逐渐下降, 在运行至 125 天时, 换热器总传热系数为 $1466.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, 与实际传热系数之间的相对误差为 1.9%; 运行至 315 天时, 换热器的总传热系数为

1416.91 W/m²·K, 与实际总传热系数之间的相对误差为 1.3%, 系统的计算结果与传热系数的实际值的偏差较小, 说明了系统监测结果的准确度和可信性。

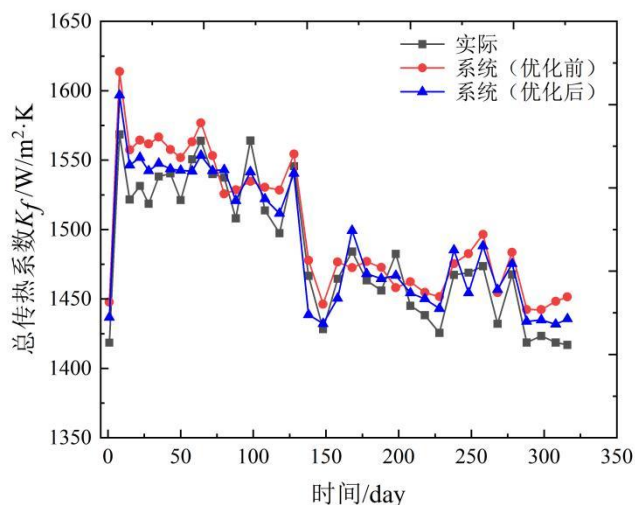


图 5.17 换热器总传热系数变化

Fig. 5.17 Change of total heat transfer coefficient of heat exchanger

将优化前后污垢热阻的预测结果与实际数据进行对比和误差分析, 如图 5.18 所示。从图中可以看出随着换热器工作时间的增加, 污垢热阻也在逐渐增加, 并且由于污垢的剥蚀和脱落等现象, 污垢热阻也伴随着降低现象。在运行到 125 天时, 换热器内部的污垢热阻为 0.1652m²·K/W, 与实际污垢热阻之间的相对误差为 3.2%, 运行到 315 天时, 换热器内部污垢热阻为 0.3578m²·K/W, 与实际污垢热阻之间的相对误差为 0.84%。

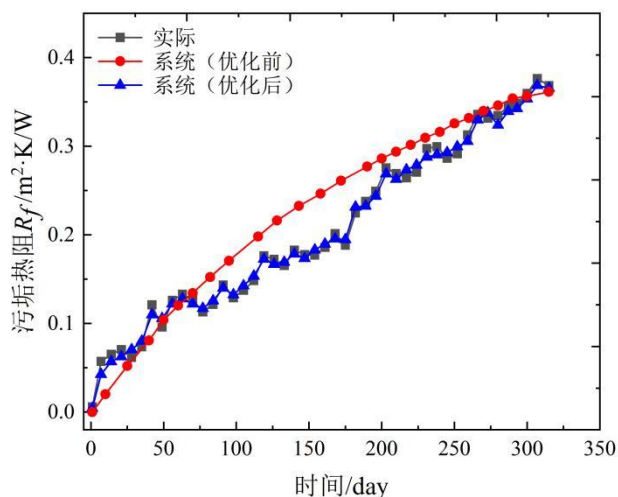


图 5.18 污垢热阻对比

Fig. 5.18 Fouling thermal resistance comparison

计算优化前后系统的监测值与实际值之间的误差, 将部分数据整理至表 5.3 以及表 5.4。

表 5.3 浮头式换热器总传热系数误差

Table 5.3 Total heat transfer coefficient error of floating head heat exchanger

时间/day	优化前总传热系数误差/%	优化后总传热系数误差/%
8	2.88	1.80
35	1.84	0.61
72	1.51	0.15
118	2.07	0.95
168	1.46	1.02
218	1.14	0.82
268	1.56	1.71
315	2.44	1.32

表 5.4 浮头式换热器污垢热阻误差

Table 5.4 Fouling thermal resistance error of floating head heat exchanger

时间/day	优化前污垢热阻误差/%	优化后污垢热阻误差/%
56	9.72	3.17
72	5.40	3.93
118	10.76	2.09
168	15.60	2.93
218	14.03	3.44
268	3.34	1.81
315	1.87	0.84

由表 5.3 和表 5.4 可以看出,原监测系统计算所得的总传热系数与实际总传热系数之间的误差最大值为 2.88%,误差最小值为 1.14%,污垢热阻与实际污垢热阻之间的误差最大值为 15.6%,最小值为 1.87%;优化后的监测系统计算所得的总传热系数与实际总传热系数之间的误差最大值为 1.80%,误差最小值为 0.15%,污垢热阻与实际污垢热阻之间的误差最大值为 3.93%,最小值为 0.84%,说明修正后的系统计算结果相对于原系统中的计算结果的准确度有了一定的提高。

当换热器运行至 125 天时,在没有进行污垢清理等工作后,使得污垢会随着运行时间的增加逐渐积累,运行至 315 天时,结垢率达到清洗阈值,此时对换热器性能的影响较大,换热系数也有一定的降低,如图 5.19 所示,在“数据监测与评价”界面可以看到,根据出口监测变量对换热器性能进行的性能评价为“三级:性能较差”,符合当前换热器的性能状况。

通过对比系统实际监测结果和历史数据,可以看到对于总换热系数的计算结果与实际值之间的误差基本上保持在 5%以内,预测污垢热阻的变化趋势与实际污垢热阻变化趋势吻合,误差也在工程可接受的范围内,总体来说,系统数据处理和故障监测的能力

具有较高的准确度和可靠性。

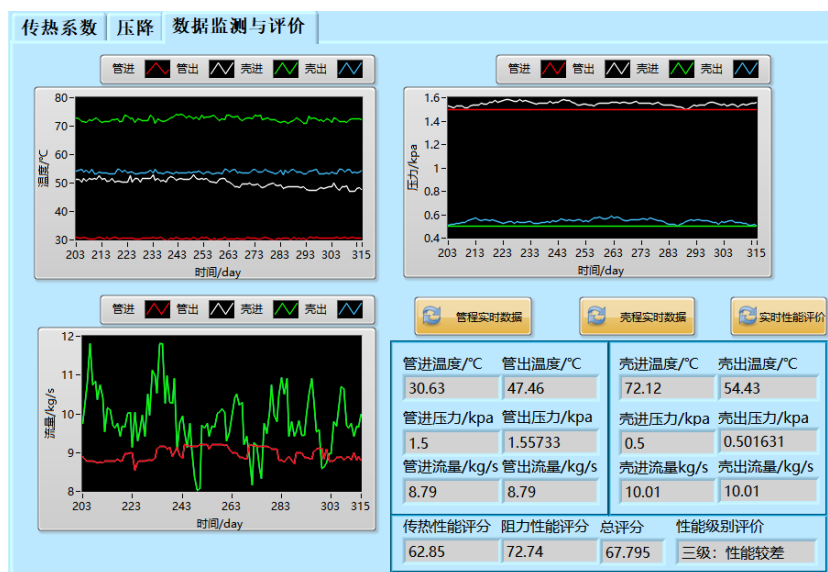


图 5.19 达到清洗阈值时的数据监测界面

Fig. 5.19 Data monitoring interface when the cleaning threshold is reached

5.3.3 石脑油管壳式换热器

为了进一步验证优化后的监测系统对于传热系数计算和污垢热阻预测的准确度和有效性的提升，以文献[93]中所使用的石脑油管壳式换热器相关参数和运行数据为例，使用本文优化后的监测系统对该换热器的运行过程进行监测，来对比监测和相关计算结果的误差。石脑油管壳式换热器的结构参数和工艺参数如表 5.5 和表 5.6 所示。

表 5.5 石脑油换热器结构参数

Table 5.5 Structural parameters of naphtha heat exchanger

结构名称	参数
壳体内径 D_i /m	0.498
管程数 N_t /壳程数 N_s	2/1
换热管外径 d_o /m/内径 d_i /m	0.01905/0.01483
换热管长度 L /m	18.288
换热管数 n	250
换热管布置方式	转角正方形
换热管间距 p /m	0.0254
折流板形式	单弓形
折流板厚度 A /m	0.005
折流板切口率	25%
折流板间距 B /m	0.381

表 5.6 石脑油换热器工艺参数要求

Table 5.6 Technical parameter requirements of naphtha heat exchanger

参数名称	管程	壳程
流体介质	石脑油	石脑油
进口温度/°C	-18	42
出口温度/°C	22	-4.5
质量流量/kg/s	9.7	11.9
进口压力/MPa	5.45	1.35
允许压降/MPa	0.15	0.05

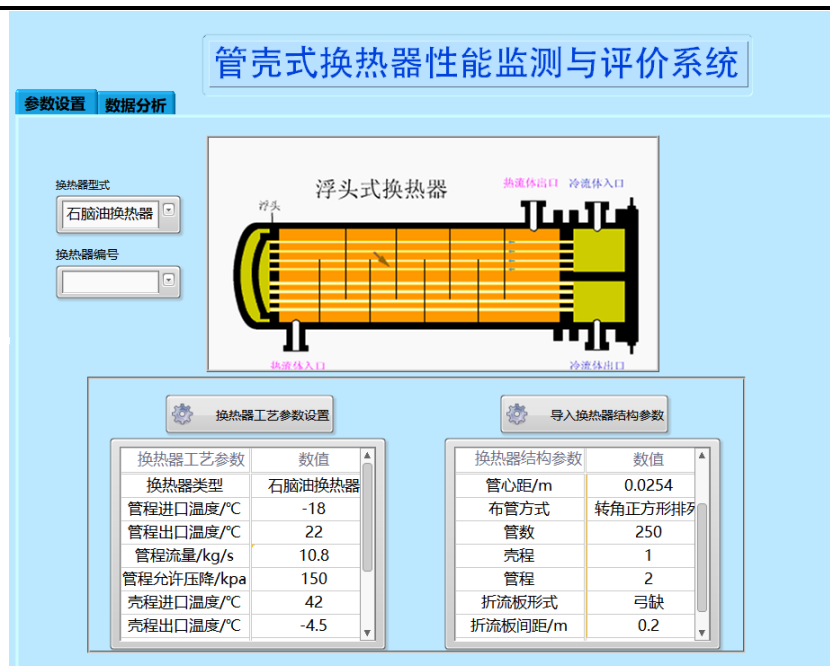


图 5.20 石脑油换热器参数设置界面

Fig. 5.20 Parameter setting interface of naphtha heat exchanger

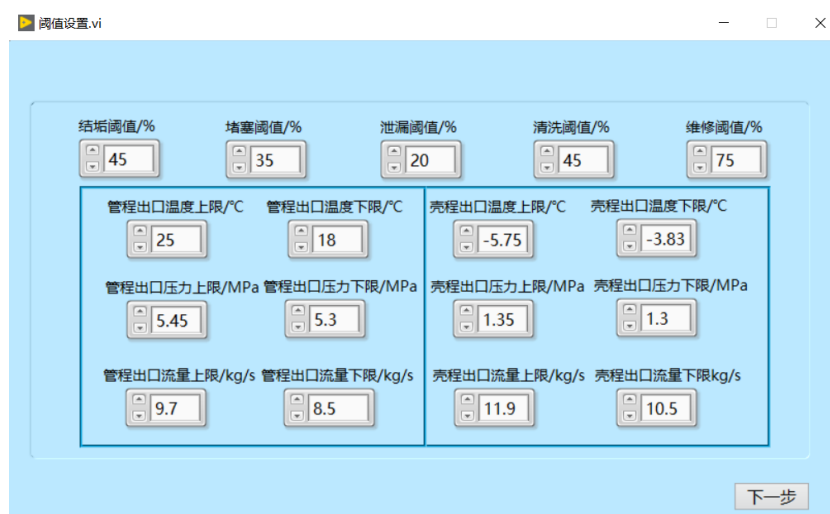


图 5.21 石脑油换热器阈值设置界面

Fig. 5.21 Parameter setting interface of naphtha heat exchanger

将该换热器的结构和工艺参数写入系统数据库，在“换热器参数设置”界面选择相应的参数和介质，如图 5.20 所示。并根据工艺要求的温度、流量和允许压降等数据，在系统的“参数设置”界面对阈值和监测数据范围进行设置和修改，如图 5.21 所示。

在参数设置完成后，对该换热器的运行过程开始监测，将系统计算得到的总传热系数与换热器的实际传热系数值以及系统优化前计算所得的总传热系数进行对比，如图 5.22 所示。

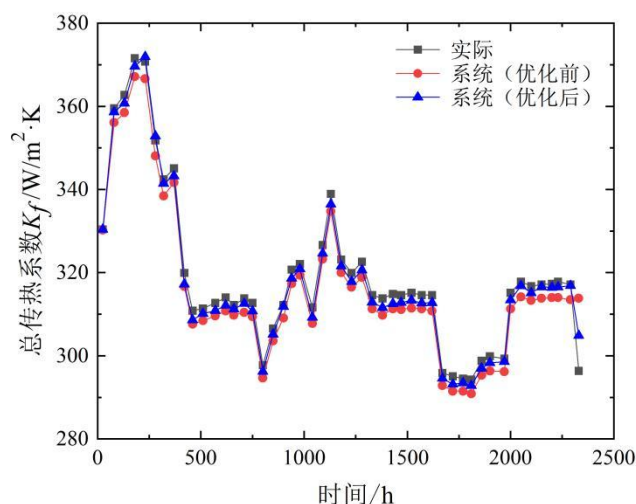


图 5.22 石脑油换热器总传热系数对比

Fig. 5.22 Comparison of total heat transfer coefficients of naphtha heat exchangers

从图中可以看出，优化后的系统计算所得到的换热器的总传热系数变化曲线与实际总传热系数的变化曲线更加吻合。

表 5.7 总传热系数误差

Table 5.7 Total heat transfer coefficient error of naphtha heat exchanger

时间/h	优化前总传热系数误差/%	优化后总传热系数误差/%
25	0.036	0.01
230	1.11	0.31
460	1.04	0.71
710	1.06	0.39
940	1.06	0.65
1180	0.97	0.48
1430	1.13	0.74
1670	1.02	0.44
1900	1.17	0.52
2150	1.06	0.19
2330	5.89	2.87

计算优化前后系统的总传热系数与实际值之间的误差，由于数据较多选择部分数据整理至表 5.7。由表中数据可以看出，原监测系统计算所得的总传热系数与实际总传热系数之间的误差最大值为 5.89%，误差最小值为 0.04%，优化后的监测系统计算所得的总传热系数与实际总传热系数之间的误差最大值为 2.87%，误差最小值为 0.01%，误差能够控制在 3%以内，说明修正后的传热系数计算模型相对于原系统中的传热计算模型准确度有了一定的提高。

将优化后的系统预测所得的污垢热阻与实际污垢热阻以及原系统计算所得的污垢热阻进行对比，如图 5.23 所示。

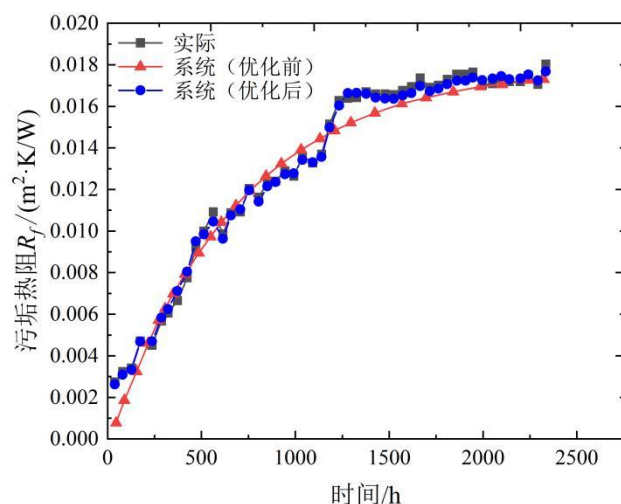


图 5.23 石脑油换热器污垢热阻对比

Fig. 5.23 Comparison of fouling thermal resistance in naphtha heat exchangers

表 5.8 石脑油换热器污垢热阻误差

Table 5.8 Fouling thermal resistance error of naphtha heat exchanger

时间/h	优化前污垢热阻误差/%	优化后污垢热阻误差/%
25	-	4.37
230	2.21	3.99
460	3.03	3.03
710	2.93	1.09
940	2.71	1.24
1180	2.11	1.12
1430	6.03	1.02
1670	5.46	2.24
1900	4.84	1.82
2150	2.4	0.22
2330	4.10	1.99

从图中可以看出,优化后系统预测的污垢热阻变化规律和实际的污垢热阻变化规律更加一致,可以根据实时采集数据预测出对应的污垢热阻值。计算优化前后系统监测值与实际值之间的误差,整理部分数据至表 5.8。由表 5.8 可知,原系统计算所得的污垢热阻值与实际污垢热阻之间的误差最大值为 6.03%,误差最小值为 2.21%,优化后的系统计算所得污垢热阻值与实际污垢热阻之间的误差最大值为 4.37%,误差最小值为 0.22%,可以证明优化后的监测系统对于污垢热阻预测的准确度有了一定程度上的提高,可以在监测过程中为操作人员提供更加准确的故障信息,保证换热器的安全稳定运行。

5.4 本章小结

本章在已经实现的管壳式换热器性能监测与评价系统原有功能的基础上,使用前文的修正传热计算模型、污垢热阻预测模型和性能评价方法等内容对系统进行更新和优化,并结合两个实际案例,介绍了优化后的换热器性能监测与评价系统的实际应用过程,验证了该系统的可行性和准确性。首先将建立的污垢热阻预测模型使用 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程技术耦合进系统中,使系统可以通过调用污垢热阻模型实现对污垢热阻的预测,使用建立的故障程度计算模型结合故障阈值对系统的故障监测模块功能进行了更新和完善。之后使用建立的修正传热计算模型更新了系统传热计算子程序,并将建立的换热器性能综合评价方法写入系统,增加了性能评价模块,同时对对系统的界面和操作进行了修改和完善,使操作过程更加方便和直观。最后结合两个实际案例,介绍了优化后的监测系统的具体使用过程及相关界面,使用优化后的系统对浮头式换热器和文献[93]中的石脑油管壳式换热器的实际运行过程进行监测,比较分析了系统优化前后监测得到的总传热系数和污垢热阻数据和实际历史数据之间的误差和吻合程度,证明了系统优化后在监测结果准确度方面有了一定的提高,验证了系统的可靠性和有效性。