

管壳式换热器设计软件开发

李彦晴¹, 陈亚平¹, 陈伟², 刘化瑾¹

(1. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210096; 2. 江苏大唐国际吕四港发电有限责任公司, 江苏 南通 226245)

摘要:为提高管壳式换热器设计效率,以C#程序语言为平台,基于换热器壳侧传热性能指标 $h_o/p_o^{0.3}$ 的优化设计开发了管壳式换热器计算软件,并用Excel生成计算报表。该软件包含传统弓形折流板换热器及一种新型换热器——三分螺旋折流板换热器的设计与校核计算。将实验数据与软件设计数据比较,软件设计有一定的优化效果;将实验数据与校核数据比较,软件计算准确性较高,可供工程设计及类似软件开发借鉴。采用软件计算了两种换热器的性能参数,结果证实了三分螺旋折流板换热器的优势。

关键词:管壳式换热器; 三分螺旋折流板; 软件; C#

中图分类号: TP391; TK124 文献标识码: A 文章编号: 1000-7024(2011)05-1866-04

Development of design software for shell-and-tube heat exchanger

LI Yan-qing¹, CHEN Ya-ping¹, CHEN Wei², LIU Hua-jin¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Datang International Lusigang Power Generation Company, Nantong 226245, China)

Abstract: To improve the design efficiency of shell-and-tube heat exchanger, the design software for shell-and-tube heat exchanger based on the heat transfer performance indicators $h_o/p_o^{0.3}$ under C# is introduced and Excel is used to generate the final report. Both design calculation and check calculation for the segmental baffled heat exchanger and trisection baffled helix heat exchanger are contained in the software. The software optimization of design data is confirmed by comparing with the experimental data. The accuracy of the check calculation is verified by comparing with the experimental data and the software could be used for design and be consulted by others for development of similar software. The advantage of the trisection baffled helix heat exchanger is confirmed by calculating the performance and parameters of the two heat exchangers with the software.

Key words: shell-and-tube heat exchanger; trisection helical baffles; software; C#

0 引言

换热器是能源转换和利用过程中必不可少的关键设备。其中管壳式换热器因其结构简单,能承受高温、高压等特点依然是热交换设备的主流型式。传统的管壳式换热器大多采用弓形折流板,但其存在流动阻力较大、传热系数较低等缺点,由此催生出各种新型换热器,陈亚平^[1]提出了三分螺旋折流板管壳式换热器方案。将圆筒截面分成三等分,每块折流板的投影占据120°夹角,折流板的2条直边可布置在正三角形排列管束的相邻管排之间。这种换热器不仅具有的高传低阻^[2]的优点,而且零件数目减少,适合管壳式换热器中大量使用的最为紧凑的正三角形排列布管。换热器的合理设计、制造及运行对于提高工业生产效率和有效利用能源都具有重要意义。但换热器设计复杂、繁琐,需要进行反复计算与调整才能

得到令人满意的结果,因此开发相应的计算软件显得十分必要。本文用C#语言开发了管壳式换热器设计软件,包含传统弓形折流板换热器及三分螺旋折流板换热器的设计计算与校核计算。C#是微软公司发布的一种面向对象的、运行于NET Framework之上的高级程序设计语言。该软件主要面向企业需要,按照工艺条件快速设计出符合要求的换热器,以及由已知工况校核换热器运行参数,并通过Excel制作出计算报表。通过该软件可方便的比较两种换热器的传热和压降等各种性能。

1 软件的总体结构和算法设计

1.1 优化设计及目标函数

对于设计者和使用者来说,使其换热器的费用最小化是一个重要目标。一般情况下,换热器的年总费用可用年固定费用和年操作费用之和表示。其年总费用可用下式计算

收稿日期: 2010-05-12; 修订日期: 2010-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50976022); 国家“十一五”科技支撑计划重点基金项目(2008BAJ12B02)。

作者简介: 李彦晴(1986-),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为供热、供燃气、通风及空调工程; 陈亚平,男,江苏常州人,博士,教授,博士生导师,研究方向为换热器强化传热、制冷与低温工程; 陈伟(1988-),男,江苏泰州人,研究方向为热能与动力工程; 刘化瑾(1986-),女,河南安阳人,硕士研究生,研究方向为供热、供燃气、通风及空调工程。E-mail: sai158@163.com

$$J = C_a K_F F + (\Delta P_i V_i + \Delta P_o V_o) C_b H \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: C_a ——换热器单位传热面积的投资费用, 包括维修费用, 元/ m^2 ; K_F ——换热器的年折旧率, 即寿命的倒数; F ——换热器的传热面积 m^2 ; P_i, P_o ——管程、壳程流体阻力损失, N/m^2 ; V_i, V_o ——管程、壳程流体流量, m^3/s ; C_b ——单位动力费用, 元/($kw \cdot h$); H ——年工作小时数 h/Y 。

对于传统弓形折流板换热器和三分螺旋折流板换热器, 壳侧传热性能比起管侧更能影响换热器的总体性能。管壳式换热器有多种优化计算方法^[3-7], 比如遗传算法、过程模拟、粒子群优化算法等, 本文主要针对管壳式换热器壳侧传热性能的优化问题, 以 $h_o/p_o^{1/3}$ 作为综合评价指标确定最佳的换热器, 以达到总费用最低的目的, 其中 h_o 为壳侧传热膜系数, p_o 为壳程压降。

1.2 软件的总体结构

软件的总体结构包括换热器的设计计算和校核计算两部分, 每部分均包含三分螺旋折流板换热器和传统弓形折流板换热器的计算。

(1) 计算模块: 包括介质物性参数计算、结构计算、管内外传热膜系数计算、管壳程压降计算、壁温计算等。

(2) 基于 Excel 生成计算报表: 由 Visual C# 调用 Microsoft Excel 的 Application 对象, 并访问在 Excel 应用程序中的从属对象、以及这些对象的属性和方法。

1.3 软件的算法设计

软件的算法设计包括设计计算和校核计算两部分, 分别如图 1、图 2 所示。

(1) 设计计算: 首先输入设计参数, 计算有效传热温差、热负荷并初选总传热系数, 计算换热器结构参数, 然后分别对传热系数、管程阻力损失及壳程阻力损失进行校核, 最后输出合理的换热器结构及相关参数。具体步骤如下:

- 1) 输入相关设计参数;
- 2) 计算介质物性参数, 有效传热温差, 换热量;
- 3) 设定总传热系数初值 k , 由此估算换热面积 f , 初选换热器结构参数;
- 4) 计算管侧壳侧传热膜系数, 壁面温度, 总传热系数 K , 并计算换热面积 F ;
- 5) 将估算换热面积 f 与计算换热面积 F 对比, 满足精度则向下继续计算, 否则返回 3) 调整数据继续计算;
- 6) 计算管程压降, 小于允许压力损失则向下计算, 否则返回 3) 调整结构参数继续计算;
- 7) 计算壳程压降, 小于允许压力损失则向下计算, 否则返回 3) 调整结构参数继续计算;
- 8) 计算 $h_o/p_o^{1/3}$, 并返回到 3) 通过变化管径调整其他结构参数继续计算得到新的 $h_o/p_o^{1/3}$ 值, 与前面的进行比较, 直到循环完毕得到最大值以及对应的参数。
- 9) 输出结果, 完成计算。

(2) 校核计算: 首先输入运行条件及已知参数, 通过假定一侧出口温度, 计算另一出口温度, 由 4 个进出口温度的热平衡式和传热方程式分别计算传热量, 并进行对比直到满足精度要求, 最后输出换热器的运行参数。具体步骤如下:

- 1) 输入换热器的结构参数, 选择介质及进口温度;

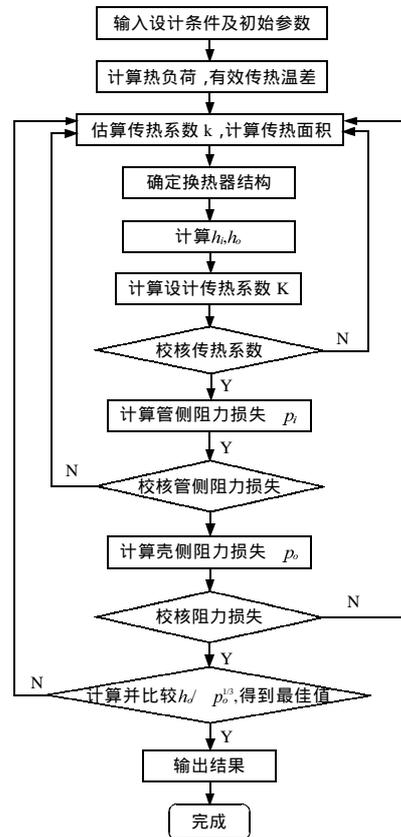


图 1 设计计算逻辑

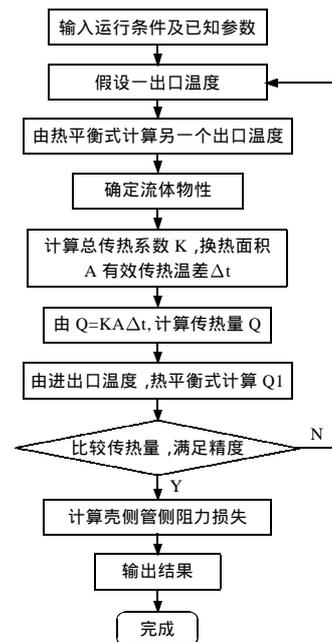


图 2 校核计算逻辑

- 2) 假设一个流体出口温度;
- 3) 由热平衡式计算另一个流体出口温度和换热量 Q ;
- 4) 计算介质物性参数、有效传热平均温差 ΔT ;
- 5) 计算总传热系数 K ;

6)由 $q = K \cdot F \cdot \Delta T$ 计算换热量,比较 Q 和 q ,满足精度则向下继续计算,否则返回 2)调整出口温度继续计算。

7)计算管程、壳程压力损失;

8)输出结果,完成计算。

1.4 计算方法

换热器的热力计算采用对数平均温差(LMTD)法。其中,弓形折流板换热器应用公式已发展成熟,壳程压降计算有贝尔-台华法、埃索法等,壳程传热膜系数计算有科恩(Kern)、多诺霍(Donohue)等方法,参见文献[8]。三分螺旋折流板换热器的相关计算公式还处于研究阶段,壳程换热系数计算公式^[2]如下

$$Nu = 0.4 C_{\beta} Re^{0.55} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \quad (2)$$

其中,折流板倾斜角度修正因子 C_{β} 为

$$C_{\beta} = 1 - 0.0015 \times |\beta - 40|^{1.5} \quad (3)$$

式中 μ ——壳程流体平均温度下的粘度 $kg/(m \cdot s)$ μ_w ——管壁温度下的粘度 $kg/(m \cdot s)$ β ——折流板倾斜角度。

三分螺旋折流板换热器壳程压降公式^[9-10]

$$\Delta p_0 = f_0 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot 2L/(2H_s) \quad (4)$$

式中 Δp_0 ——按实验数据推导计算的壳程压降,Pa f_0 ——壳程摩擦因数 ρ ——壳程流体的密度 kg/m^3 u ——壳程流体流速 m/s L ——管长 H_s ——螺旋折流板螺距 m 。

2 软件运行

软件运行首先进入欢迎界面,欢迎界面包括选择设计计算及校核计算两部分,点击按钮进入相应计算程序。

2.1 设计计算

如图 3 所示,为设计计算部分主界面,要求用户输入相关的设计参数,包括设计控制、工艺条件和介质条件 3 部分。



图 3 设计计算界面

设计控制选择包含折流板形式、安装方式、热流通道、换热器类型、壳侧传热系数计算方法、流速控制(软件有默认推荐数值,也可进行更改)和折流板参数;工艺条件选择包含管壳侧污垢热阻、流量、工作压力、管径、换热管材料、管子排列方式、管程数、热量损失系数和管侧流速;介质条件包含管壳侧入口温度、出口温度、所用介质,软件自带常用介质水、油和乙二醇的物性参数计算模块,用户还可通过对话框自定义介质参数。输入参数完毕后,软件自动对输入参数的合理性进行判断,输出相应结果。

2.2 校核计算

如图 4 所示,为校核计算部分主界面,要求用户输入相关

的已知参数,包括设计控制、工艺条件和介质条件 3 部分。



图 4 校核计算界面

其中,设计控制选择包含折流板形式、安装方式、热流通道、换热器类型、壳侧传热系数计算方法和折流板参数;工艺条件选择包含管壳侧污垢热阻、工作压力、管径、换热管材料、管子排列方式、管程数、管长、管子根数、壳体内径、热量损失系数;介质条件包含管壳侧入口温度、介质流量、所用介质。输入参数完毕后,软件会校核流体出口温度及换热量是否能满足生产工艺要求,输出相应结果。

2.3 结果输出

经过以上步骤,当设计者对设计结果比较满意后,在输出结果的界面上单击“生成报表”,该计算结果的Excel报表会自动生成。设计计算结果包含热力计算(换热量、换热面积、总传热系数、管壳侧传热膜系数)、管壳程压力损失计算、管壳程流速计算、结构计算(管长、管径、管子数、壳径、进出口连接管管径、折流板数目、折流板间距、折流板尺寸)。校核计算结果包含热力计算(换热量、换热面积、总传热系数、管壳侧传热膜系数、管壳侧出口温度)、管壳程压力损失和流速计算。

3 应用举例

实验系统流程见图 5,试验件换热器管程和壳程都是单程,逆流布置。实验时以质量分数为 20%的乙二醇水溶液为加热流体,走管程;导热油为冷却流体,走壳程。油在试验件中被加热后再引入一个板翅式换热器由风洞冷却,通过变频器调节风机流量来控制进油温度。主要测量仪器及设备有质量流量计、铂电阻温度计、差压变送器和安捷伦公司生产的 34970A 数据采集仪,并以美国 NI 公司的 LABVIEW 软件平台编制程序实施操作,测量数据每 10s 巡读一遍。实验现场示意图见图 6 所示。

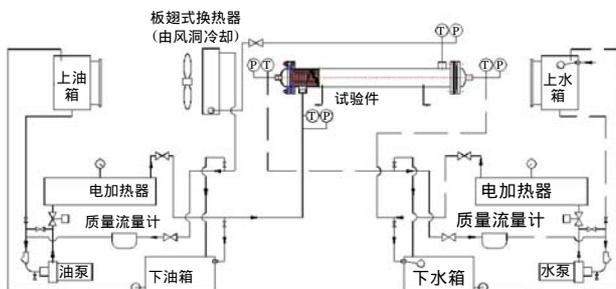


图 5 实验系统流程



图6 实验现场图片

(1)结构参数:换热器壳体内径 $\phi 126\text{ mm}$,管子 $\phi 10\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 1196\text{ mm}$,三分螺旋折流板倾斜角为 20° ,螺距为 125 mm ,管子数目为48根;弓形折流板外径 $\phi 123\text{ mm}$,折流板间距为 115 mm ,管子数目为49根。

(2)介质条件:壳侧为导热油,进出口温度为 $31.5 \sim 38.2$,质量流量 2.11 kg/s ;管侧为20%的乙二醇水溶液,进出口温度为 $69.3 \sim 61.8$,质量流量 1.071 kg/s ,被冷却。

3.1 三分螺旋折流板换热器实验数据与软件结果对比

由表1可以看出,应用软件进行设计计算时,取 $C_d = 1600\text{ 元/m}^2$, $K_F = 0.2$, $C_b = 1.2\text{ 元/(kw} \cdot \text{h)}$, $H = 7\text{ 000 h}$,则设计换热器年总费用 $J = 967.9\text{ 元}$,实验换热器年总费用 $J = 970.7\text{ 元}$,设计换热器一定程度上减少了投资与运行费用。

应用软件进行校核计算时,将校核计算数据与实验数据进行比较,出口温度误差为2%以内,压力损失部分误差在15%以内,热力计算部分除壳侧传热膜系数误差在15%以内,结构参数部分计算误差均在5%以内。可见,均在工程应用允许误差范围内。

3.2 三分螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器对比

由以上分析,校核计算部分满足误差精度要求,应用校核计算部分对三分螺旋折流板换热器和弓形折流板换热器计算并进行对比。由表2可见,与传统弓形折流板相比,三分螺旋折流板换热器换热系数增加了20%左右,具有较高的传热系数,并有效降低了壳程流动压力损失,是一种优于传统弓形折

流板换热器的新型管壳式换热器形式。

4 结束语

采用C#开发的管壳式换热器设计软件包含新型的三分螺旋折流板换热器计算,该软件适用于传统弓形折流板换热器及三分螺旋折流板换热器的设计计算与校核计算,并能将设计结果送入Excel生成计算报表。通过应用举例,将实验数据与软件计算数据进行比较,软件计算准确性较高,可供工程设计,也可供类似软件的开发借鉴,通过软件计算三分螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器工作性能及参数,并将之对比,进一步证实三分螺旋折流板换热器具有高传低阻的优势。

参考文献:

- [1] 陈亚平.适合于正三角形排列布管的螺旋折流板换热器[J].石油化工设备,2008,37(6):1-5.
- [2] 李彦晴,陈亚平,刘化瑾,等.三分螺旋折流板换热器壳侧换热系数的关联式[J].东南大学学报,2010,40(1):149-153.
- [3] 沈杨.基于遗传算法的管壳式换热器的优化设计[J].油气田地面工程,2007,26(6):39-40.
- [4] 李保红,张珏庭.基于过程模拟软件的管壳式换热器优化设计[J].大连民族学院学报,2010,12(1):1-5.
- [5] 姜进科,潘云阳.管壳式换热器优化设计[J].化学工程与装备,2008(5):17-20.
- [6] 杜雪平,陈贵冬,曾敏,等.基于GooseLDW-PSO的管壳式换热器优化设计[J].工程热物理学报,2010,31(4):679-681.
- [7] 杨明,孟晓风,张卫军.管壳式换热器的一种优化设计[J].北京航空航天大学学报,2009,35(5):615-617.
- [8] 史美中,王中铮.换热器原理与设计[M].4版.南京:东南大学出版社,2009:39-91.
- [9] 潘振,陈保东.螺旋折流板换热器传热系数与压降实验研究[J].石油化工设备,2006,35(6):5-7.
- [10] 黄阔,邓先和,陈庆辉.螺旋折流板管壳式换热器壳程局部传热及流阻[J].化学工程,2008,36(2):41, 51, 61.

表1 三分螺旋折流板换热器实验数据与软件结果对比

参数	壳侧(导热油)			管侧(乙二醇溶液)			压力损失			
	流量/(kg/s)	入口温度/	出口温度/	流量/(kg/s)	入口温度/	出口温度/	壳侧流速/(m/s)	管侧流速/(m/s)	壳侧阻力/kPa	
实验数据	2.11	31.5	38.2	1.071	69.3	61.8	0.92	0.43	20.1	
设计计算	2.11	31.5	38.2	1.071	69.3	61.8	0.87	0.43	15.9	
校核计算	2.11	31.5	38.8	1.071	69.3	61.9	1.06	0.41	21.7	
参数	热力计算					结构参数				
	换热量/kW	传热系数/(W/(m ² ·))	壳侧传热膜系数/(W/(m ² ·))	换热面积/m ²	管子数目	管长/m	管径/m	壳径/m	螺距/m	
实验数据	31.1	577.2	847.3	1.73	48	1.19	0.01	0.126	0.125	
设计计算	31.1	527.7	867	1.99	46	1.38	0.01	0.14	0.117	
校核计算	30	553.2	961.7	1.81	48	1.19	0.01	0.126	0.104	

表2 三分螺旋折流板换热器与弓形折流板换热器对比

换热器名称	换热量/kW	换热系数/(W/(m ² ·))	换热面积/m ²	壳侧传热膜系数/(W/(m ² ·))	管侧传热膜系数/(W/(m ² ·))	壳侧出口温度/	管侧出口温度/	壳侧阻力/kPa	管侧阻力/Pa	壳侧流速/(m/s)	管侧流速/(m/s)
三分螺旋折流板	30.03	553.18	1.81	961.78	2355.33	38.75	61.86	21.77	619	1.06	0.41
弓形折流板	26.12	463.87	1.81	827.26	2363.33	37.78	62.81	23.50	619	1.09	0.41