doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2025.11.004

设计计算

管壳式换热器热工水力模拟与校核计算软件开发研究

颜晨曦[1],张广强[1],刘翠波[2],周恒彦[1],涂善东[1],凌　祥[3]
(1.华东理工大学 机械与动力工程学院 承压系统与安全教育部重点实验室,上海 200237;
2.中广核工程有限公司 核电安全监控技术与装备国家重点实验室,广东深圳 518116;
3.南京工业大学 机械与动力工程学院,南京 211899)

摘　要:随着国家能源结构的战略调整与需求,换热器在能源系统的关键性作用越发凸显,因此,对其设计计算的精确性、智能化与可靠性提出了更高要求。本文针对核电系统中应用较多的管壳式换热器,以Bell-Delaware流路分析模型为基础,对换热器全局结构进行合理分段,建立精确的管壳式换热器传热与阻力分段计算模型和方法,进而基于Python语言开发了一款精确、智能的管壳式换热器校核、模拟计算软件,并可实现换热器的串联布置设计、布管图设计等功能。分别对E型和F型6个管壳式换热器工程案例进行校核及模拟分析,与国际主流软件HTRI的计算结果相比,总换热系数偏差小于10%,壳侧压降偏差小于22%,说明所开发软件可精确计算和评估管壳式换热器传热性能与阻力性能,可进一步推广应用。

关键词:热工水力计算;管壳式换热器;Bell-Delaware法;软件开发;Python语言
中图分类号:TH49;TK172;TQ051.5　　**文献标志码:**A

Development of software for thermal-hydraulic simulation and verification calculation of shell-and-tube heat exchangers

YAN Chenxi[1],ZHANG Guangqiang[1],LIU Cuibo[2],ZHOU Guoyan[1],TU Shandong[1],LING Xiang[3]
(1.Key Laboratory of Pressure Systems and Safety(MOE),School of Mechanical and Power Engineering,East China University of Science and Technology,Shanghai 200237,China;2.State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment,China Nuclear Power Engineering Co.,Ltd.,Shenzhen 518116,China;
3.School of Mechanical and Power Engineering,Nanjing Tech University,Nanjing 211899,China)

Abstract: With the strategic adjustment and demand of the national energy structure,the pivotal role of heat exchangers in energy systems has become increasingly prominent. Consequently, higher requirements have been put forward for the accuracy, intelligence, and reliability of their design and calculation. This paper focuses on shell-and-tube heat exchangers, which are widely applied in nuclear power systems. Based on the Bell-Delaware flow path analysis model, the global structure of the heat exchanger is reasonably segmented, and an accurate segmented calculation model and method for heat transfer and resistance of shell-and-tube heat exchangers are established. Furthermore, an accurate and intelligent software for verification and simulation calculation of shell-and-tube heat exchangers is developed using Python programming language, which can also realize the functions of series arrangement design and tube layout design of heat exchangers. Verification and simulation analysis are conducted on six engineering cases of E-type and F-type shell-and-tube heat exchangers respectively. Compared with the calculation results of HTRI, an internationally mainstream software, the deviation of the total heat transfer coefficient is less than 10%, and the deviation of the shell-side pressure drop is less than 22%. These results indicate that the developed software can accurately calculate and evaluate the heat transfer performance and resistance performance of shell-and-tube heat exchangers, and is worthy of further popularization and application.

收稿日期:2025-08-20　**修回日期:**2025-11-07
基金项目:国家自然科学基金项目(52075173)

Key words: thermal-hydraulic calculation; shell-and-tube heat exchanger; Bell-Delaware method; software development; Python language

符号说明：

A_x——第x单元的换热面积，m^2；
C_{pt}——管程流体定性温度下的定压比热，J/(kg·K)；
C_{ps}——壳程流体定性温度下的定压比热，J/(kg·K)；
d_i——传热管内径，m；
d_o——传热管外径，m；
f_i——摩擦系数；
F_{bp}——旁路流所占面积分数；
G_s——壳程流速，m/s；
h_i——管程传热系数，W/(m^2·K)；
$h_{i,2\,000}$——层流时管程系数，W/(m^2·K)；
$h_{i,10\,000}$——湍流时管程系数，W/(m^2·K)；
K——换热器总换热系数，W/(m^2·℃)；
N_c——中心管排数；
Pr——流体普朗特数；
Q——换热量，W；
r——管排修正系数；
R_b——旁路流校正系数；
R_l——漏流校正系数；
Re——流体雷诺数；
T_i——壳侧进口温度；
T_o——壳侧出口温度；
t_i——管程进口温度；
t_o——管程出口温度
λ——流体导热系数，W/(m·℃)；
ρ——流体密度，kg/m^3；
ϕ_s——壳程系数。

下标：

s——壳程；
t——管程；
i——进口；
o——出口。

0 引言

核能是一种典型的低碳能源，具有能量密度高、无间歇性、占地面积小、受自然条件约束少等优点[1]，不仅能提供电力，还在制氢、供热、海水淡化等高新领域中帮助减排降碳，起到保障能源安全的作用[2]。截至2024年12月31日，全球共有440台在运行核电机组，总装机容量约3.99亿千瓦，中国的核电装机容量也在十年间提升280.3%，达到56 888 MW[3-4]。由于结构系统复杂，运行于高温高压极端工况的反应堆芯积累着大量放射性强的物质，并且有迅速释放的可能。换热器作为核电系统能量转换及管理的关键设备，控制着反应堆芯温度，直接决定着核反应堆的发电效率与安全运行可靠性。一旦系统温度调控失效，会导致过热烧毁，引发巨大的事故，如美国三哩岛核电厂[5]、前苏联切尔诺贝利4号机组[6]和日本福岛核电事故[7]等，其带来的重大损失和影响近乎无法估量[8]。因此，核电系统换热设备的热工水力设计计算的准确性至关重要。

管壳式换热器因其结构简单、换热能力强、适用范围广等特点成为核电厂最主要的换热器形式[9]。管壳式换热器管程结构较为简单，设计计算方法相对成熟，新近研究多针对新型换热管类型并对传统计算公式进行改进[10-11]。而壳程结构较为复杂，流通区域复杂多变，由此产生了很多的计算方法，包括Kern法、Tinker法、Bell-Delaware法等[12]。Kern计算方法是以理想管排为基础，以壳侧总流率为基准，在结构上仅考虑了管束几何形状的影响。Tinker计算方法进一步引入了折流板漏流对壳程的传热与压降的影响，即将壳程流体分为窗口流、旁路流和漏流等5股流路进行考虑，但较为理想。在Tinker流路分析法的基础上，根据大量试验数据修正了各流路、折流板等修正系数，定量计算出每股流路的流量分率，减小了整体计算带来的误差，形成了现在最为广泛应用的壳程传热与阻力计算方法——Bell-Delaware法[12-13]。传统的换热器设计基于该方法进行整体计算，通常假设物性恒定。但实际换热过程中，冷热流体温度、流态沿流动方向不断变化，导致密度、比热容等热物性参数也随之变化，在采用该计算方法进行计算时，误差较大，尤其是温差较大或流体状态变化显著时更甚。为了避免物性偏差过大导致的计算不准确，将换热器分成有限个小单元，即分段，在每段中采用对数平均温差法等局部模型，可显著降低误差，提高整体计算精度[14-16]。然而，这些分段方法仅针对壳程进口折流板到出口折流板的区间，未涵盖整个管壳程热交换区域和流动区域，这是计算偏差的主要来源。综上，对管壳式换热器流动与热交换区域进行合理分段，分区域采用符合实际情况的传热与

流动计算模型，进行详细的传热与阻力计算是实现换热器准确设计的关键所在。

此外，传统的换热器计算方法复杂，涉及大量的试算、迭代及对参数的校核，随着冷凝器、蒸发器等制造的增多，使用传统的人工计算会造成极大的浪费。针对以上问题，国内外学者对换热器设计与计算机技术的结合研究已经取得显著成果。作为国际常用的换热器计算软件，HTRI是美国传热研究协会基于40多年来广泛收集的工业级热传递设备的试验数据而研发的，传热工艺设计计算模块多，计算精准，效率高，是全球换热器制造行业公认的标准换热设备设计软件[17-18]。但出于商业机密的保护，其设计方法一直未公开，是一个黑箱。此外，针对不同应用场景的换热器，该软件的计算误差上下波动，无法进行有效的补偿。国内学者以Bell法作为壳侧换热系数与压降计算的理论基础，分段考虑流体温度对物性的影响，开发了一款换热器辅助设计软件[19]。为更加方便进行工程设计，又有学者基于CAD二次开发，自动绘制换热器CAD图并精确统计换热管数目，开发自动布管的强化管型换热器辅助设计软件[20]。近年来，有学者利用MATLAB对压缩机级间管壳式换热器进行软件开发，软件可实现管壳式换热器热负荷、换热面积、传热系数和流阻等参数的计算[21]。此外，还针对其他紧凑式换热器进行了设计计算软件的开发研究，如以Fortran 90为语言开发了一款用于螺旋翅片管换热器设计与校核计算的软件[22]，利用Visual Basic 6.0开发了板式换热器压降和传热系数设计计算程序[23]。但上述这些研究，并没有考虑到常用介质流动过程中物性随温度变化对计算的影响，设计计算不够准确；另外，所采用的编程语言具有局限性，效率低，已无法满足现在的编程要求，并且计算功能不全面。因此，以核电用管壳式换热器的热工水力设计计算为先导，自主研发一款普适、准确的换热器热工水力模拟与校核计算专业软件，以适配国内核电领域的发展需要，并应对未来国际形势的变化，具有重要意义。

本文针对核电系统常用的固定管板式换热器、U型管式换热器，基于Bell-Delaware法，采用全局分段计算法建立管壳式换热器热负荷、换热面积、传热系数与传热和压降的计算模型，基于Python语言开发集校核、模拟计算为一体的管壳式换热器热工水力计算软件，并采用核电工程案例对标HTRI，验证其可靠性与准确性。

1 管壳式换热器传热与阻力分段计算

在核电工程中应用较多的类型是固定管板式换热器和U形管式换热器，在中等压力工况下，采用固定管板式换热器；在流量、温差都较大的工况下，选用U形管式换热器。换热器不同区域参与换热的比例不同，压降也不同。为了准确计算换热器整体的换热量和压降，需要根据冷热流体实际的流动区域进行合理分段，并进行局部计算。

1.1 分段计算方法

根据流体流动及换热情况，将换热器流程结构分为5个部分：前端管箱、进口段换热区域、中间换热区域、出口段换热区域和后端管箱，如图1所示。前后端管箱主要是实现流体汇集，热量交换较少，但压降较大。热量交换主要发生在中间段区域，对于该区域，根据换热器的壳程数N_s、管程数n和折流板数N_b，将其划分成$n(N_b+1)N_s$个单元[24]。其中，进口段和出口段两个单元分别是壳程流体的进出口，流体流动方向和速度变化较大，传热和压降计算较为复杂。其余部分根据折流板的均匀排布呈现出周期性的流动和传热特性。

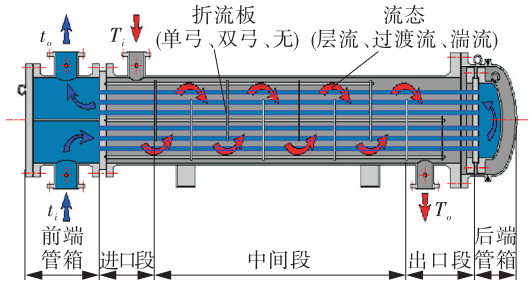


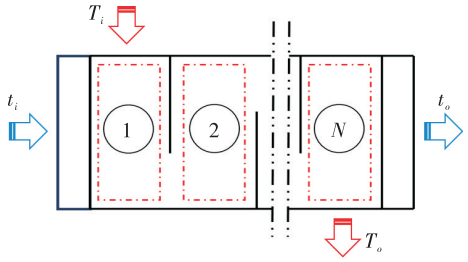
图1 换热器整体分段示意

Fig.1 Schematic diagram of overall segmented structure of heat exchangers

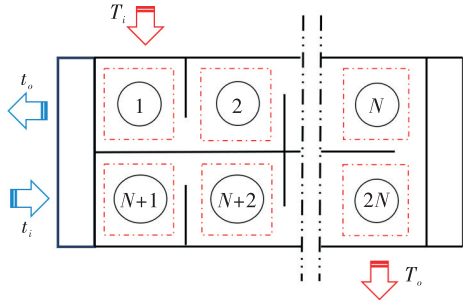
根据现行的TEMA—2007 *Standards of The Tubular Exchanger Manufacturers Association* 和GB/T 151—2014《热交换器》等标准，换热器壳体包括E型和F型两种型式[25-26]，其中，F型壳体比E型壳体中间多一个纵向隔板。壳体型式不同，分段方法和单元数不同，如图2和图3所示。

依据管板与折流板为分段边界，换热管长度相同时，将E型壳体换热器分为N个小单元，对应的F型壳体换热器则被分为$2N$个小单元。与E型壳体相比，F型壳体在进行每一单元的热工水力计算时，采用的管子数、换热面积、每一单元的进出口温度等物理量有着较大的差异，最后表现

在传热系数和压降计算结果上的数据往往是E型壳体的数倍。



（a）E型壳体



（b）F型壳体

图2　E/F型壳体分段方法

Fig.2　Segmentation methods for E/F-type shell

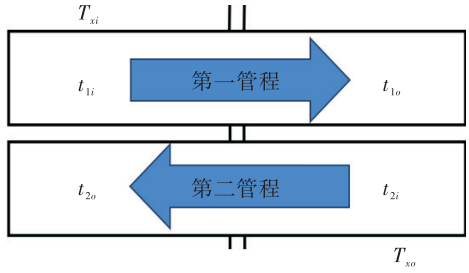


图3　2管程1壳程分段单元

Fig.3　2-tube-1-shell segmented unit

对换热器内流动做以下假设：

（1）上一单元出口温度与下一单元进口温度完全相同；

（2）分段单元换热系数K、质量流量m_s及定压比热容C_p等物性参数都为常数；

（3）分段单元中壳程流体均匀混合，定性温度等于单元进出口平均温度。

计算时根据具体分段情况，确定每个单元的冷热流体进出口温度，以及对应定性温度下流体的物性参数，进而计算单元的热交换和阻力情况，进一步获得换热器总体的传热系数和压降等参数。

1.2　沿程温度分布计算

以2管程1壳程8块折流板换热器为例，取其中第x个大单元（如图3所示）进行计算。

上方子单元内的壳程流体速率方程为：

$$Q=K\frac{A_x}{n}(T_x-t_{1i}) \tag{1}$$

管程的能量平衡方程为：

$$Q=C_{pt}(t_{1o}-t_{1i}) \tag{2}$$

联立该单元的速率方程和能量平衡方程[24]得到：

$$t_{1i}=t_{1o}-K\frac{A_x}{nC_{pt}}(T_{xo}-t_{1i}) \tag{3}$$

同理，下方子单元内：

$$t_{2o}=t_{2i}+K\frac{A_x}{nC_{pt}}(T_{xo}-t_{2i}) \tag{4}$$

从x单元向右进行热量衡算，可以得到：

$$(t_{1i}-t_{2o})C_{pt}=(T_{xi}-T_{(x+1)i})C_{ps} \tag{5}$$

进而求得$(x+1)$单元的壳程温度为：

$$T_{(x+1)i}=T_{xi}-\frac{C_{pt}}{C_{ps}}(t_{1i}-t_{2o}) \tag{6}$$

当计算到最右侧单元时，壳程温度等于壳程出口温度，上方管程的进口温度与下方管程的出口温度都等于后端管箱温度，即$T_x=T_o$，$t_{1i}=t_2$，$t_{2o}=t_2$。其中，t_2为第一管程与第二管程衔接处的温度。

由此计算方法可获得从前端管板位置到后端管板位置沿程方向的流体温度，即各单元进出口温度t_{1i}，t_{1o}，t_{2i}，t_{2o}。进而计算获得各单元定性温度，通过物性数据库查取获得第x个单元中冷、热流体的密度、黏度、比热容等物性参数。通过计算对应雷诺数与普朗特数以进行传热与阻力计算。

1.3　管程单元计算模型

管程流动分为层流、过渡流和湍流三种流型。管程传热系数根据流型采用不同的计算方法进行计算[12]。

（1）管内层流（$Re_t\leqslant 2\,000$）：

$$rex=Re_t+C_2\frac{Gr^{0.5}}{Pr_t\cdot l} \tag{7}$$

$$h_i=\frac{\lambda_t}{d_i}[C_1+1.15(0.785\cdot rex\cdot Pr_t\cdot l)^z] \tag{8}$$

式中，rex，C_2，Gr，l，C_1，z为与结构有关（如缺口等）的无量纲参数。

（2）管内过渡流（$2\,000<Re_t<10\,000$）：

$$g=1.25-\frac{Re_t}{8\,000} \tag{9}$$

$$h_i=\frac{\lambda_t}{d_i}[gh_{i,2\,000}+(1-g)h_{i,10\,000}] \tag{10}$$

式中，g为无量纲参数。

（3）管内湍流（$Re_t \geq 10\,000$）：

$$h_i = 0.027 \frac{\lambda_t}{d_i} Re_t^{0.8} Pr_t^{1/3} \left(\frac{\mu_t}{\mu_w}\right)^{0.14} \tag{11}$$

在工程上，液体被加热时，$(\mu_t/\mu_w)^{0.14} = 1.05$；液体被冷却时，$(\mu_t/\mu_w)^{0.14} = 0.95$。

管程压降主要包括直管段压降、弯管段压降和进出口处压降，分别按下式计算。

（1）因摩擦阻力引起的直管段压降 Δp_{Lt}：

$$\Delta p_{Lt} = \frac{G_t^2}{2} \cdot \frac{L_{bm}\rho_t}{d_i} \cdot f_i \tag{12}$$

（2）弯管段压降 Δp_{rt}：

$$\Delta p_{rt} = \frac{G_t^2}{2} \cdot [1.5 + 2.3(N_{tu} - 1)] \cdot \rho_t \tag{13}$$

（3）进出口管嘴处压降 Δp_{nt}：

$$\Delta p_{nt} = K_{Ni} \frac{G_{Ni}^2 \rho_t}{2} \tag{14}$$

（4）管程总压降 Δp_t：

$$\Delta p_t = (\Delta p_{Lt} + \Delta p_{rt})(N_b - 1) + \Delta p_{nt} \tag{15}$$

1.4 壳程单元计算模型

壳程传热系数计算公式为：

$$h_{\text{idea}} = c \cdot \frac{\lambda_s}{d_o} \cdot r \cdot Re_s^{0.6} Pr_s^{1/3} \phi_s \tag{16}$$

式中，c 为结构相关的参数。

根据 Bell-Delaware 法，壳程压降采用下述公式计算：

$$\Delta p_b = a f_i \frac{G_s^2 N_c}{\rho_s} \tag{17}$$

$$\Delta p_b = a f_i \frac{G_s^2 N_c}{\rho_s} \phi_s R_b R_l \tag{18}$$

旁路流校正系数 R_b：

$$R_{bm} = \mathrm{e}^{-C_R F_{bp}\left(1 - \sqrt[3]{2r_{ss}}\right)} \tag{19}$$

漏流校正系数 R_l：

$$R_{li} = \mathrm{e}^{-1.33(1+s_s)S_i^z} \tag{20}$$

式中，a，C_R，r_{ss}，s_s，s_i 为与结构有关的参数。

2 软件开发设计与实现

基于上述分段计算方法和传热与阻力模型，采用面向对象的编程方式，基于 Python 语言，并调用第三方物性数据库 Pyfuild，对管壳式换热器的热工水力计算进行可视化、交互式程序设计与编写。

2.1 软件整体架构

管壳式换热器热工水力计算程序的总体架构如图 4 所示，主要分为三层结构，即界面层、服务层和数据层。

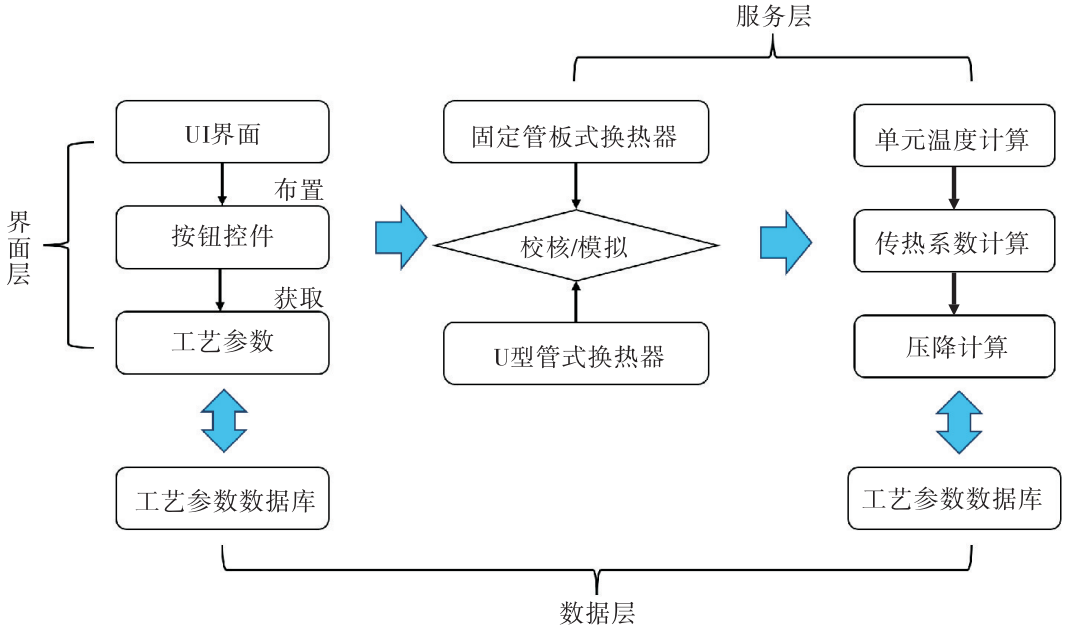


图 4 管壳式换热器热工水力计算软件框架

Fig.4 Framework diagram of thermal-hydraulic calculation software for shell and tube heat exchangers

界面层主要采用 PySide6 进行界面图形设计，将界面上的控件图形转化成为 Python 代码，以管壳程结构为依据，将界面上的参数代码封装成为不同的类，方便服务层进行调用，界面交互层继承了界面上的参数，并在内部封装了包括界面切换、参数框设计、文件保存等函数，在界面输出层上，主要是将服务层计算后的参数显示在输出界面上。

服务层主要采用Python编写换热器热工计算程序，针对管壳式换热器建立4个不同的类，在每个类下面将各个计算单元进行整合，调用数据库计算物性数据，将界面层的参数和数据层参数输入到各个单元用于热工计算，并将计算结果输出到输出界面上。在服务层中，主要包含以下几个功能函数：单元温度计算函数、传热系数计算函数、压降计算函数、布管图绘制函数等。

数据层主要包含数据库的计算和调用程序，通过调用Pyfuild的数据库包进行参数设定并计算，对于需要手动输入数据的计算，则需要建立流体类，根据输入的温度、压力等参数计算该流体的物性参数。

2.2 软件计算功能

换热器的热工水力计算不仅可以通过输入参数进行计算，还可以通过布管图的方式。本软件可以通过输入壳体外径、管程数、管子外径等参数实现对换热器的整体布管。布管完成后，程序通过返回错流区和窗口区的管子数和管子行数等参数，完成换热器热工计算，目前所开发的程序只能完成一些较为简单的布管设计。

针对管壳式换热器温度交叉的情况，即管程出口温度t_2大于壳程出口温度T_2时，不允许采用单壳程设计，必须采用换热器串联设计。一般根据下式计算温度校正系数$\varepsilon_{\Delta t}$：

$$\varepsilon_{\Delta t}=\sqrt{R^2+1}\ln\left(\frac{1-P}{1-RP}\right)\div\left[(R-1)\ln\frac{2-P(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-P(R+1+\sqrt{R^2+1})}\right] \tag{21}$$

其中，

$R=(T_1-T_2)/(t_2-t_1)$，$P=(t_2-t_1)/(T_1-t_1)$。

$\varepsilon_{\Delta t}=f(R,P)\leqslant 0.8$时，进行两台换热器串联计算，若两台串联仍然出现温度交叉，则进行3台换热器串联计算，直到满足设计要求。

串联计算时，主要通过有效平均温差与进出口温度的比例关系，得到每台换热器的真实进出口温度，从而对每台换热器进行热工计算。当有n台换热器串联时，分别将管壳程的进出口温差n等分[27]，如图5所示。

假设热流体流入第一台换热器壳程和流出最后一台换热器壳程的温度分别为T_1和T_2，冷流体流入最后一台换热器管程和流出第一台换热器管程的温度分别为t_1和t_2，则第一台换热器的壳程出口温度为$T_1-(T_1-T_2)/n$、管程进口温度为$t_2-(t_2-t_1)/n$，通过第一台换热器的进出口温度得到第一台换热器的平均温差Δt_m。同理可依次得到每台换热器的进出口温度和平均温差。对每台换热器进行热量衡算：

$$\begin{aligned}Q_n&=KA\Delta t_{mn}=C_{pc}m_c(t_{nx}-t_{(n+1)x})\\&=C_{ph}m_h(T_{nx}-T_{(n+1)x})\end{aligned} \tag{22}$$

根据设计要求，K，A，C_{pt}均为定值，则每台换热器的平均温差Δt_m与冷热流体的进出口温差成正比，即：

$$\begin{cases}\dfrac{\Delta t_{m1}}{t_2-t_{2x}}=\dfrac{\Delta t_{m2}}{t_{2x}-t_{3x}}=\ldots=\dfrac{\Delta t_{mn}}{t_{(n-1)x}-t_1}\\[2ex]\dfrac{\Delta t_{m1}}{T_1-T_{2x}}=\dfrac{\Delta t_{m2}}{T_{2x}-T_{3x}}=\ldots=\dfrac{\Delta t_{mn}}{T_{(n-1)x}-T_2}\end{cases} \tag{23}$$

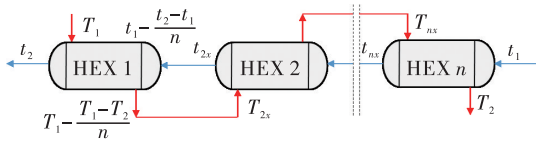


图5 换热器串联示意

Fig.5 Series-connected heat exchanger diagram

根据假定的等分温度和已知条件求取每台换热器的平均温差Δt_m，并计算各台换热器间平均温差的比值，根据式(23)求解得到每台换热器实际的进出口温度，完成每台换热器的热工计算。所开发软件可以实现最多6台换热器的串联计算。

换热器都有两种计算模式，即模拟和校核模式，模拟是在工艺参数未知，但结构参数已知的情况下进行计算；校核是在工艺参数和结构参数都已知的情况下进行计算，用户可根据需要进行选择。

软件计算步骤分为两方面，即传热系数计算和压降计算。其中，传热系数计算需要先计算所需传热系数，再计算实际传热系数，并比较两者之间的偏差是否满足换热裕度，不满足则重新计算所需传热系数。而压降计算则是计算管壳程压降，若超过允许压降，则需要修改结构参数，重新进行计算。具体计算逻辑如图6所示。

3 软件案例验证

采用研究开发的软件，对E型和F型6个在役核电换热器工程案例进行设计计算，并与HTRI的结果进行对比，验证该软件的可行性与准确性。

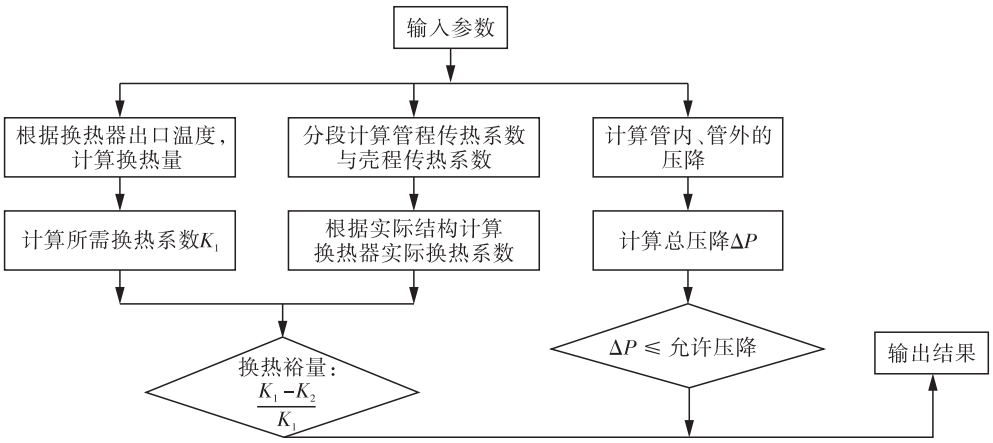


图6 计算流程框图

Fig.6 Calculation flowchart

3.1 校核案例验证

单弓形、1管程、1壳程、7块折流板BEM型固定管板式换热器的运行工况及关键结构参数如表1所示，采用校核计算模式进行计算。

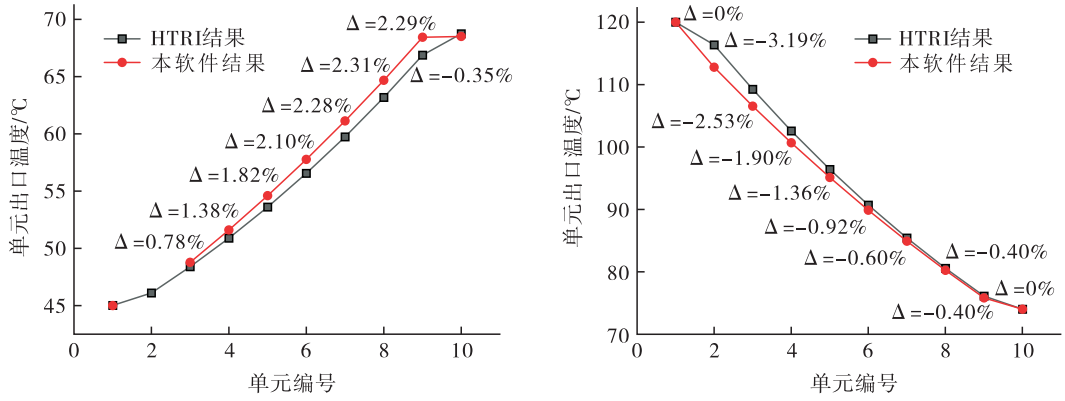
表1 BEM案例管壳程参数

Tab.1 Shell and tube side parameters of the BEM case

项目	壳程	管程
流量/(kg·s^{-1})	528	270.4
温度(进口/出口)/℃	45/—	120/74
壳体内径/mm	1 160	
折流板间距/mm	218	
折流板剪切率/%	30	

根据前述分段方法，将管壳程分成8个单元。由本程序计算的管/壳程流体沿程温度分布如图7所示。可以看出，程序计算的管/壳程单元温度与HTRI计算结果基本一致，管程计算温度最大偏差为3.19%，壳程计算温度最大偏差2.29%。

综合换热器计算结果，进出口温度、传热系数、压降等关键特征量的计算结果如表2所示。结果显示，与国际主流软件HTRI对比，冷流体出口温度计算值偏差小于0.5%，总传热系数偏差小于3%，压降偏差小于16%，均在工程设计偏差许可范围内，说明所开发的热工水力计算程序可以对E型壳体固定管板式换热器进行准确设计计算。



(a)壳侧单元温度分布 (b)管侧单元温度分布

图7 软件与HTRI关于BEM单元温度分布的对比结果

Fig.7 Comparison of BEM cell temperature distribution between developed program and HTRI

3.2 模拟案例验证

F型壳体，单弓形、2管程、2壳程、13块折流板的BFU型U形管式换热器的运行工况及关键结构参数信息如表3所示，采用模拟计算模式进行计算。

根据前述分段方法，将管壳程分成28个子单元。由程序计算的管/壳程流体沿程温度分布如图8所示。可以看出，程序计算的管/壳程单元温度与HTRI计算结果基本一致，管程计算温度最大偏差为6.2%，壳程计算温度最大偏差4.7%。

表2 本程序与HTRI的计算结果对比

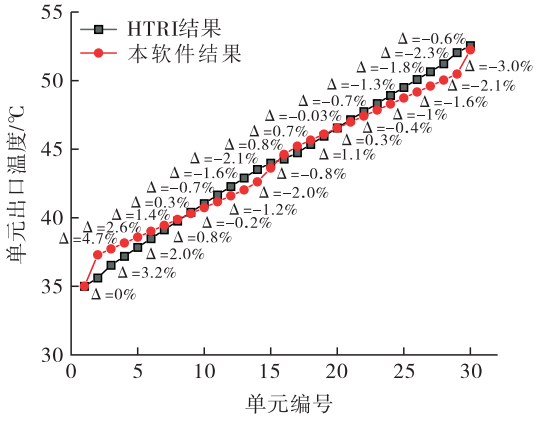
Tab.2 Comparison of the calculation results between this program and HTRI

项目	HTRI计算结果	软件计算结果	偏差/%
冷流体出口温度/℃	68.73	68.50	0.3
总传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	2 541.6	2 482.6	−2.3
管程压降/kPa	19.786	23.29	15.04
壳程压降/kPa	82.409	72.97	−12.93

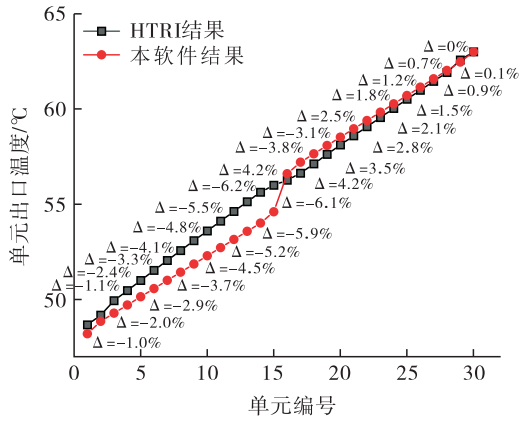
表3 BFU案例的管壳程参数

Tab.3 Shell and tube side parameters of the BFU case

项目	壳程	管程
流量/(kg·s^{-1})	6.911	8.464
温度(进口/出口)/℃	35/—	63/48.65
壳体内径/mm	305	
折流板间距/mm	250	
折流板剪切率/%	26.7	



(a)壳侧单元温度分布



(b)管侧单元温度分布

图8 软件与HTRI关于BFU单元温度分布的对比结果

Fig.8 Comparison of BFU cell temperature distribution between developed program and HTRI

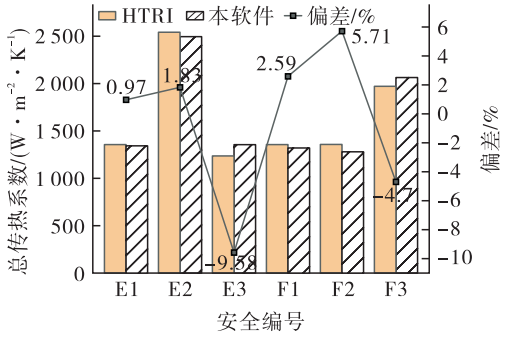
综合换热器计算结果，进出口温度、传热系数、压降等关键特征量的计算结果如表4所示。结果显示，与HTRI软件相比，冷流体出口温度计算值偏差小于0.7%，总传热系数偏差小于10%，压降偏差小于30%，均在工程设计偏差许可范围内，说明所开发的热工水力计算程序可以对F型壳体固定管板式换热器进行准确设计计算。

表4 本程序与HTRI计算结果的偏差对比

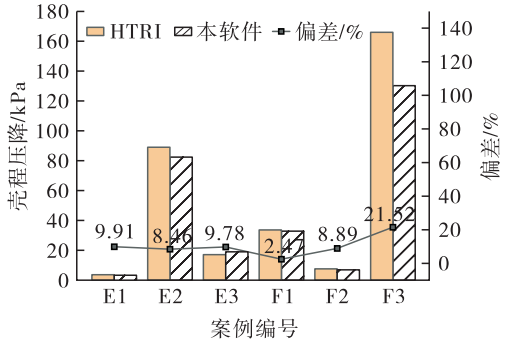
Tab.4 Comparison of deviation between this program and HTRI calculation results

项目	HTRI计算结果	软件计算结果	偏差/%
冷流体出口温度/℃	52.55	52.24	−0.6
总传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	2 010.6	1 814.5	−9.8
管程压降/kPa	12.066	14.450	19.8
壳程压降/kPa	73.366	51.520	−29.8

为了进一步验证所开发的计算程序的可靠性和适用性，综合3个E型和3个F型核电换热器工程案例(4个在役设备)进行校核验证。考虑到壳程结构的复杂性与计算难度，以总传热系数和壳程压降作为评判参数，与HTRI的计算结果进行对比，如图9所示。



(a)总换热系数对比



(b)壳侧压降对比

图9 软件与HTRI关于压力降与换热系数的对比结果

Fig.9 Comparison of pressure drop and heat transfer coefficient between developed program and HTRI

可以看出，由本软件计算得到的总换热系数与HTRI计算结果的偏差均小于10%，平均偏差为4.23%；壳侧压降的计算偏差均小于22%，平均偏差为10.2%。由此可见，所开发的热工水力计算程序对换热器沿程温度和换热系数、压降的模拟与校核计算较为精确，都满足工程对于模拟与校核的需求，可进一步推广应用。

4 结论

（1）以Bell-Delaware法为基础，再结合合理的分段及计算方法，建立了精确计算固定管板式换热器的管壳程单元温度、传热系数和压降等参数的方法，与HTRI计算的单元温度偏差不大于3.5%，计算合理准确，避免了因物性偏差过大导致计算不准确的问题。

（2）利用Python和Qt等编程工具开发了一款用于管壳式换热器热工水力计算软件，可实现管壳式换热器精确、智能的校核、模拟计算，并具有基于图形的换热器布管设计，以及换热器串联布置设计、校核和模拟计算等特色功能。

（3）综合F型和E型核电在役管壳式换热器的热工水力计算结果，总换热系数与HTRI设计计算结果的偏差均小于10%，平均偏差为4.23%；壳侧压降的计算偏差均小于22%，平均偏差为10.2%，说明本研究所开发的软件可精确计算管壳式换热器沿程温度分布，实现管壳式换热器传热性能与阻力性能的准确计算和评估。

参考文献：

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA). Nuclear power for sustainable development [R]. Vienna:IAEA,2017.

[2] 王海洋，荣健.碳达峰、碳中和目标下中国核能发展路径分析[J].中国电力，2021，54(6)：86-94.
WANG H Y，RONG J. Analysis on China's nuclear energy development path under the goal of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality[J]. Electric Power，2021，54(6)：86-94.

[3] 伍浩松，王兴春. 2024年全球核电装机容量小幅增加[J].国外核新闻，2025(1)：1-3.
WU H S，WANG X C.The installed capacity of global nuclear power increased slightly in 2024[J]. Foreign Nuclear News，2025(1)：1-3.

[4] IEA/NEA. Technology roadmap：Nuclear energy [EB/OL].(2015-08-29)[2025-08-20].https://www.oecd-nea.org/pub/techroadmap/.

[5] 邢馥史.美国调查三里岛核电站泄露事故委员会对事故原因和后果的分析[J].国外核新闻，1980(10)：16-17.
XING F S. Analysis of the TMI nuclear power plant accident by the U.S. presidential commission on the accident[J].Foreign Nuclear News，1980(10)：16-17.

[6] 李宗明.让切尔诺贝利核事故的警钟长鸣——纪念切尔诺贝利核事故25周年[J].核安全，2011(3)：1-8.
LI Z M.Let the Chernobyl nuclear accident alarm bells ring forever[J].Nuclear Safety，2011(3)：1-8.

[7] 陈达.核能与核安全：日本福岛核事故分析与思考[J].南京航空航天大学学报，2012，44(5)：597-602.
CHEN D.Nuclear energy and nuclear safety：Analysis and reflection about Fukushima nuclear accident[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics，2012，44(5)：597-602.

[8] 李朝君，张春明，左嘉旭，等.核电安全目标与公众接受性[J].辐射防护通讯，2014，34(3)：20-23.
LI C J，ZHANG C M，ZUO J X，et al.Nuclear safety goals and public acceptance[J].Radiation Protection Bulletin，2014，34(3)：20-23.

[9] 汪波，茅靳丰，耿世彬，等.国内换热器的研究现状与展望[J].制冷与空调，2010，24(5)：61-65.
WANG B，MAO J F，GENG S B，et al.Present state and perspectives of research on domestic heat-exchanger[J].Refrigeration & Air Conditioning，2010，24(5)：61-65.

[10] LI L Y，ZOU D Q，MA X F，et al.Preparation and flow resistance characteristics of novel microcapsule slurries for engine cooling system [J]. Energy Conversion and Management，2017，135：170-177.

[11] CHEN X，LI W，SUN Z J，et al. Correlation of evaporation heat transfer inside 8.8 mm and 7.14 mm horizontal round micro-fin tubes [J]. Heat Transfer Engineering，2019，40(3/4)：320-329.

[12] 刘魏，邓方义.冷换设备工艺计算手册[M].北京：中国石化出版社，2008.
LIU W，DENG F Y.Heat transfer design manual[M]. Beijing：China Petrochemical Press，2008.

[13] 尾花英朗.热交换器设计手册[M].北京：烃加工出版社，1987.
OBANA H. Heat exchanger design handbook [M]. Beijing：Hydrocarbon Publishing Company，1987.

[14] KE H B，XIAO Q，CAO Y P，et al.Simulation of the printed circuit heat exchanger for S-CO_2 by segmented methods[J].Energy Procedia，2017，142：4098-4103.

[15] 伍美，胡大鹏.多管程螺旋折流板换热器分段传热

算法[J]. 化工机械，2019，46(6)：684-690.
WU M，HU D P. Segmental heat transfer algorithm for multipass heat exchanger with helical baffles [J]. Chemical Engineering & Machinery，2019，46(6)：684-690.

[16] 孟祥宇，王学生，张庆，等. 多组分降膜蒸发传热计算方法研究[J]. 化学工程，2020，48(4)：22-26.
MENG X Y，WANG X S，ZHANG Q，et al. Calculation method of heat transfer in multi-component falling film evaporation [J]. Chemical Engineering (China)，2020，48(4)：22-26.

[17] 刘佳，张兴. HTRI软件在管壳式换热器工艺设计与优化中的应用[J]. 化工设计，2017，27(4)：34-36.
LIU J，ZHANG X. Application of HTRI software in process design and optimization of shell and tube heat exchanger [J]. Chemical Engineering Design，2017，27(4)：34-36.

[18] 王科，邵东亮，孙振国，等. 基于HTRI软件的换热器工艺设计优化分析[J]. 石油和化工设备，2022，25(10)：21-23.
WANG K，SHAO D L，SUN Z G，et al. Optimization analysis of heat exchanger process design based on HTRI software [J]. Petro & Chemical Equipment，2022，25(10)：21-23.

[19] 许光第，周帼彦，朱冬生，等. 管壳式换热器设计及软件开发[J]. 流体机械，2013，41(4)：38-42.
XU G D，ZHOU G Y，ZHU D S，et al. Development of the design software for shell and tube heat exchanger [J]. Fluid Machinery，2013，41(4)：38-42.

[20] 方运惠，薄守石. 基于VB6.0的套管式换热器辅助程序设计[J]. 广州航海学院学报，2018，26(1)：47-51.
FANG Y H，BO S S. The auxiliary program design for double-tube heat exchanger based on VB6.0 [J]. Journal of Guangzhou Maritime University，2018，26(1)：47-51.

[21] 张静，吴伟烽，李程翊，等. 压缩机级间管壳式换热器设计与软件开发[J]. 压缩机技术，2024(1)：1-7.
ZHANG J，WU W F，LI C Y，et al. Design and software development of interstate shell and tube heat exchangers for compressors [J]. Compressor Technology，2024(1)：1-7.

[22] 陈爱志，袁猛，张文平，等. 螺旋翅片管换热器设计校核计算软件开发[J]. 热能动力工程，2019，34(8)：176-181.
CHEN A Z，YUAN M，ZHANG W P，et al. Development of design and calibration calculation software for spiral finned tube heat exchanger [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2019，34(8)：176-181.

[23] 李滢，阮富城，杨昊泽，等. 板式换热器设计程序开发及变工况特性分析[J]. 电站辅机，2019，40(2)：35-38.
LI Y，RUAN F C，YANG H Z，et al. Development of the design software for plate heat exchanger and studies on variable operating conditions [J]. Power Station Auxiliary Equipment，2019，40(2)：35-38.

[24] 雷俊杰，周帼彦，朱冬生. 预测管壳式换热器温度分布的模型[J]. 化学工程，2011，39(11)：30-35.
LEI J J，ZHOU G Y，ZHU D S. Model of predicting temperature distribution in shell-and-tube heat exchanger [J]. Chemical Engineering (China)，2011，39(11)：30-35.

[25] 宋利滨，朱国栋，龚雪茹. 不完全布管对浮头换热器管板弯曲应力和换热管轴向应力的影响[J]. 压力容器，2023，40(9)：45-54.
SONG L B，ZHU G D，GONG X R. Influence of non-fulfilled layout of tubes on bending stress of tubesheets and axial stress of tubes for floating head heat exchangers [J]. Pressure Vessel Technology，2023，40(9)：45-54.

[26] PENG H，LING X. Neural networks analysis of thermal characteristics on plate-fin heat exchangers with limited experimental data [J]. Applied Thermal Engineering，2009，29(11/12)：2251-2256.

[27] 刘春明. 列管式换热器串联的设计计算[J]. 石油化工，1989，18(1)：40-44.
LIU C M. Design calculation of shell-and-tube exchangers in series [J]. Petrochemical Technology，1989，18(1)：40-44.

作者简介：颜晨曦(2000)，男，硕士研究生，主要研究方向为高性能换热装备设计，通信地址：200237 上海市梅陇路130号华东理工大学，E-mail：chenxiyan_2020@163.com。

通信作者：周帼彦(1977)，女，教授，主要研究方向为新型能源设备及其结构完整性，通信地址：200237 上海市梅陇路130号华东理工大学，E-mail：zhougy@ecust.edu.cn。

本文引用格式：
颜晨曦，张广强，刘翠波，等. 管壳式换热器热工水力模拟与校核计算软件开发研究[J]. 压力容器，2025，42(11)：30-39.
YAN Chenxi，ZHANG Guangqiang，LIU Cuibo，et al. Development of software for thermal-hydraulic simulation and verification calculation of shell-and-tube heat exchangers[J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(11)：30-39.