

Automatic Three Dimensional Design for Tube-Shell Heat Exchanger and Software Development

Kun Wang, Qingbo Yu*, Jiuchong Li, Qin Qin

School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang
Email: *yuqb@smm.neu.edu.cn

Received: Oct. 18th, 2012; revised: Oct. 20th, 2012; accepted: Oct. 23rd, 2012

Abstract: Using Visual Basic to redevelop the Solid Edge, a software is developed to implement automatic three dimensional drawing of tube-shell heat exchangers. According to the concept of modularization the software is divided into two parts: technical calculation and three dimensional drawing. The thermal calculations and the pressure drop calculations can be finished by the software; Based on the ActiveX Automation technology, using parametric modeling to generate the independent parts and then to generate three-dimensional drawing is output with bottom-up assembly method. At the same time, this software has friendly interfaces and a human-computer interaction environment. It will be benefit to the development of the three dimensional modeling, which can improve the design speed and design quality.

Keywords: Redevelopment of Solid Edge; Tube-Shell Heat Exchanger; Technical Calculation; Three Dimensional Design

管壳式换热器三维自动化设计及软件开发

王 坤, 于庆波*, 李玖重, 秦 勤

东北大学材料与冶金学院, 沈阳
Email: *yuqb@smm.neu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 10 月 18 日; 修回日期: 2012 年 10 月 20 日; 录用日期: 2012 年 10 月 23 日

摘 要: 利用 Visual Basic 对 Solid Edge 进行二次开发, 实现了管壳式换热器三维自动化设计, 并编写了相应的设计软件。软件采用模块化设计思想, 主要分为工艺计算和三维图形输出两部分。工艺计算可实现管壳式换热器的热力计算和压降计算; 三维图形是基于 ActiveX Automation 技术先采用参数化建模生成独立零件再由自底向上装配的方法生成。软件界面友好, 人机交互能力强, 能快速生成三维模型, 有效提高了设计速度和设计质量。

关键词: Solid Edge 二次开发; 管壳式换热器; 工艺计算; 三维设计

1. 引言

加热炉是钢铁厂的大型耗能设备, 其能耗约占整个轧制工序能耗的 30%^[1], 排烟温度一般为 450℃~500℃, 如能进一步回收这部分烟气的余热将对降低加热炉乃至整个轧钢过程能耗起到重要的作用。管壳式换

*通讯作者。

热器具有易于制造、传热性能好、制造方法成熟、适应高温高压的场合等优点^[2], 作为烟气余热回收装置得到了广泛地应用。由于管壳式换热器使用行业以及运行工况的差异性, 所以一般不能进行批量生产, 必须根据用户要求进行针对性设计, 这导致了换热器设计工作量大, 设计周期长, 传统的人工计算和人工制图

已不能满足其发展的要求。近些年来随着计算机技术的飞速发展, 换热器计算机辅助设计取得了很大进步。张等^[3]利用 Visual Basic 对绘图工具 AutoCAD 进行了二次开发, 完成了具有三维绘图功能的管壳式换热器的设计。Gao 等^[4]利用三维绘图软件 Solid Works 建立了换热器三维参数化模型。任^[5]利用 VB 编程实现了换热器设计选型的功能, 并采用 Access 创建了换热器标准型号数据库。这些研究只是针对个别特殊形式的换热器, 而且辅助计算大多采用 Excel 表格计算完成, 本文提出了管壳式换热器三维自动化设计的思想, 利用 VB 编程, 在工艺计算基础之上对 Solid Edge 二次开发生成三维图形^[6,7]。设计软件适用于加热炉用管壳式换热器的三维自动化设计, 而且可为后续三维数值模拟提供模型。

2. 系统分析

2.1. 模型概述

管壳式换热器三维自动化设计数学模型的建立主要包括计算模型和三维参数化模型的建立两部分。

2.1.1. 计算模型

管壳式换热器的工艺计算主要包括热力计算和管壳侧压降计算两部分, 换热器的热力计算主要围绕传热方程式和热平衡方程式展开。

$$\text{传热方程式: } Q = K_m A \Delta T_m \quad (1)$$

热平衡方程式:

$$Q = m_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = m_2 c_{p2} (t_2' - t_2'') \quad (2)$$

式中: K_m 为整个换热面上的平均传热系数, $W/(m^2K)$; A 为换热器总的换热面积, m^2 ; ΔT_m 为冷热流体之间的平均温差, K ; m_1, m_2 分别为冷、热流体的质量流量, kg/s ; c_{p1}, c_{p2} 分别为冷、热流体的定压比热, $J/(kgK)$; t_1', t_1'' 分别为冷流体出、进换热器的温度, K ; t_2', t_2'' 分别为热流体进、出换热器的温度, K 。

压降计算是计算流体流经换热器的流动阻力, 看其压降是否在允许的范围之内以及是否需要在烟道中添加引风机。管侧压降主要由三部分构成:

$$\text{管内的压降: } \Delta p_i = \frac{4\xi_i G_i^2 L n_i}{2\rho_i g d_i} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (3)$$

管箱处由于流体改变方向时的压降:

$$\Delta p_r = \frac{4G_i^2 n_c}{2g\rho_i} \quad (4)$$

$$\text{接管处的压降: } \Delta p_n = \frac{1.5G_i^2 n_c}{2g\rho_i} \quad (5)$$

壳侧压降的计算主要分有无折流板两种情况:

$$\text{无折流板时: } \Delta p_s = \frac{\Delta\xi_s G_o^2 L}{2g\rho_o d_o} \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{-0.14} \quad (6)$$

$$\text{有折流板时: } \Delta p_s = 10.4 \frac{G_o^2 L}{\rho_o} \quad (7)$$

式中: G_i, G_o 分别为管内和管外流体的质量流速, kg/s ; d_i, d_o 分别为管内径和管外径, m ; n_i 为管程数; ξ_i, ξ_s 分别为管侧和壳侧的摩擦系数; ρ_i, ρ_o 分别为管侧和壳侧流体的密度, kg/m^3 ; n_c 为流体流动过程中换向的次数, $n_c = n_i - 1$ 。

2.1.2. 三维参数化模型

通过对固定管板式换热器结构和尺寸的分析以及对其各零部件参数的分析得到: 换热器各组件的位置关系固定, 可以方便提取各组件的结构尺寸进行描述, 有些结构尺寸之间存在一定的约束关系。基于以上特点可以采用参数化驱动设计或者全参数建模两种参数化建模方法建立换热器的三维模型。本软件的设计采用自底向上设计思想, 需要建立的模型包括: 换热管、封头、壳体、管板、壳体法兰、接管、接管法兰、膨胀节、折流板、补强圈等。

2.2. 二次开发技术

Solid Edge 的应用程序接口(API)使用户能够以 Visual Basic、Visual C、Visual C++ 等编程语言对其进行二次开发^[8]。Visual Basic 6.0(VB 6.0)具有友好的界面, 人机交换数据直观方便, 而且操作简单, 在引用菜单中添加 Solid Edge 类型库以后, 即可实现二者之间的连接。在 VB6.0 中编写的程序可以利用 ActiveX Automation 技术(是在 Windows 系统的统一管理下, 协调不同的应用程序, 准许这些应用程序之间相互沟通、相互控制, 达到一个程序控制另一个程序的目的)对 Solid Edge 不同层次对象进行访问、操作和控制, 即建立 C/S 模式的用户应用程序, VB6.0 作为 Client, 可以调用作为 Server 的 Solid Edge 服务程序, Solid

Edge 根据 VB6.0 中编写的程序语句实现相应的操作，即实现了 Solid Edge 二次开发。Solid Edge 对象层次结构如图 1 所示。其中，“Application”是 Solid Edge 的应用对象，它有一个文档集合对象“Documents”，“Documents”集合对象包含了五个文档对象——“Assembly Document(装配文档)”，“Draft Document(制图文档)”，“Part Document(零件文档)”，“Sheet Metal Document(钣金文档)”，“Weld Document(焊接文档)”。每个文档对象都包含了各自的属性和方法，对象之间一般通过对象层次结构的形式互相联系。VB 对 Solid Edge 的调用是按图 1 所示的层次关系进行依次调用的。

直径等主要结构参数，以便为辅助结构计算以及三维模型的建立提供数据。工艺计算结果如表 1 所示。

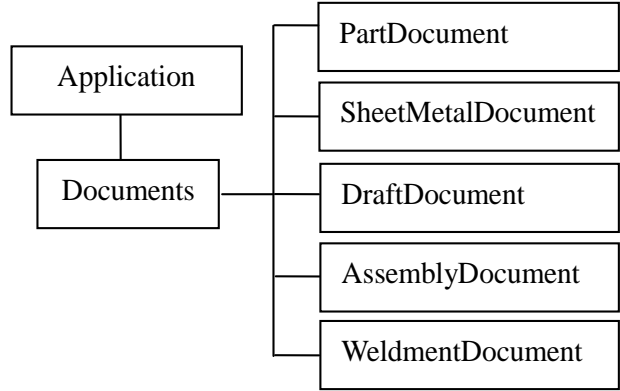


Figure 1. Object hierarchies of Solid Edge
图 1. Solid Edge 对象层次结构

2.3. 系统总体结构

整个系统大致可分成 4 个部分：辅助工艺计算部分、三维参数化建模部分、模型装配部分以及结果输出部分。系统总体结构如图 2 所示。

3. 软件开发及应用

软件采用模块化设计思想，主要分为工艺计算模块，数据库读写模块，各零部件设计模块，装配模块等。

3.1. 工艺计算

工艺计算是在用户输入基本数据和选择结构数据以后，依据管壳式换热器热力计算标准，计算得到换热器的壳体直径，换热管长度，换热管根数，接管

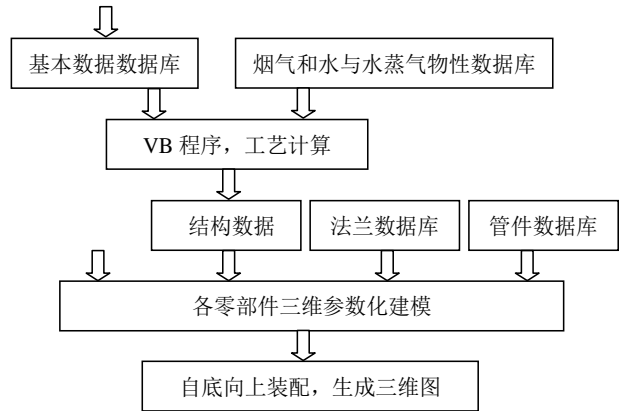


Figure 2. The whole structure of the system
图 2. 系统总体结构

Table 1. The results of technical calculations
表 1. 工艺计算结果

计算类型		计算结果		
管程参数	换热管类型	光管	换热管材质	Q235
	换热管排布方式	叉排	换热管外径 d_o , mm	48
	换热管壁厚 b , mm	3.5	换热管横向节距 s_2/d_o	3
	换热管纵向节距 s_1/d_o	3		
壳程参数	壳体内径 D_i , mm	2000	壳体壁厚 B , mm	8
	壳体折流板形式	弓形	折流板间距, mm	800
	折流板圆缺面积, m^2	0.64		
换热器中流体流速, m/s	水流速	0.37	烟气流速	4.2
换热器的传热系数, $W/(m^2K)$	水传热系数	721.8	烟气传热系数	44.5
	总传热系数	41.7		
换热器的压降, Pa	管侧水的压降	623.3	壳侧烟气的压降	318.9
	换热管根数	139	换热管长度, m	9.04
换热器的换热面积	总换热面积, m^2	189.2		

3.2. 数据库设计

数据库是程序中非常重要的一部分，其主要用来完成存储、查询、删除、修改数据等操作，根据数据库在程序运行过程中接受到请求的不同，可以将数据库分为以下三种类型：

- 1) 用以实现用户输入基本数据和选择结构数据的保存、读写操作；
- 2) 用以访问介质物性参数、各零部件国家标准数据库的操作；
- 3) 用以实现中间计算结果以及工艺计算结果存储、访问等操作。

这三种类型数据库都是在程序开发的过程中根据输入数据的类型、结果的形式以及国家标准的规范设计好的，程序在运行过程中只需要根据窗体按钮的提示及程序语句的自行控制即可实现数据库的调用。

3.3. 零部件三维参数化设计

前文已经指出，本软件需要建立的零部件模型主要包括：换热管、封头、壳体、管板、壳体法兰、接管、接管法兰、膨胀节、折流板、补强圈等，依据参数化的设计要求，对每一零部件提取特征参数，作为用户输入参数，同时对各零件的参数进行优化组合，以减少用户输入参数的个数，软件开发过程中用参数化驱动设计和全参数建模两种方法实现了各零部件的三维参数化设计^[9]。其中参数化驱动设计只需改变一个或几个变量即可实现整个模型尺寸的变化，特别适用于标准件及结构形式固定的零部件设计；而全参数建模方法建立的模型结构灵活多样，可以根据实际需要对 Solid Edge 进行轮廓、特征、尺寸等进行编辑，适用于结构形式不固定的零部件设计。

3.3.1. 参数化驱动设计

利用 Solid Edge 的绘图或者特征造型技术建立一个能够反映同类零件所有特征的三维模型，然后利用尺寸标注功能进行标注，则零件的特征参数即存在于变量表中，通过变量表建立参数之间的约束关系，并确定主控参数。二次开发时只需打开零件模型，根据用户输入数据修改变量表的参数即可实现零件的尺

寸自动修改。壳体表量表如图 3 所示。

3.3.2. 全参数建模

全参数建模的优点在于无需事先绘制零件的三维模型，只需利用二次开发中的 ExtrudedProtrusion、ExtrudedCutout、MirrorCopy、Hole、Chamfer、Rectangular 等操作一步步生成三维图形，全参数建模通过捕捉模型中的参数化关系记录了模型设计过程。设计管板的软件界面及设计模型如图 4 所示。

3.4. 三维模型的自动装配

建立各零部件三维模型以后，本软件采用由底向上的方法进行装配，即将设计好的零件利用装配对象关系集合(Relations3d)中的 AngularRelations3d, AxialRelations3d, GroundRelations3d, PlanarRelations3d, PointRelations3d 和 TangentRelations3d 关系属性确定各零件之间的相对位置，然后通过实例对象(Occurrence)中的 Getorigin, Putorigin, Move, Rotate 等方法，实现对各零部件的坐标定位、移动和旋转等操作，最终实现各零部件装配关系的匹配。程序界面及装配模型如图 5 所示。

4. 结论

利用 VB6.0 对 Solid Edge 进行二次开发，实现了管壳式换热器的三维自动化设计，三维实体模型能够适应加热炉烟气的工况，满足设计的要求。软件的开发提高了产品设计质量、缩短了产品设计周期，克服了二维图纸直观性不强，投影受限的缺点，并且可以将设计的三维模型应用到后续的模拟计算当中，具有很好的应用价值。

距离	名称	值	公式
<input type="checkbox"/>	壳体长度	500.00 mm	L
<input type="checkbox"/>	d123	100.00 mm	d
<input type="checkbox"/>	T123	5.00 mm	T
<input checked="" type="checkbox"/>	PhysicalProperties_1	.000 kg/m ³	
<input checked="" type="checkbox"/>	PhysicalProperties_2	.990	
<input type="checkbox"/>	T	5.00 mm	
<input type="checkbox"/>	d	100.00 mm	
<input type="checkbox"/>	L	500.00 mm	

Figure 3. The variable table of shell
图 3. 壳体表量表



Figure 4. Program interface and design mode of tube plate
图 4. 管板软件设计界面及模型

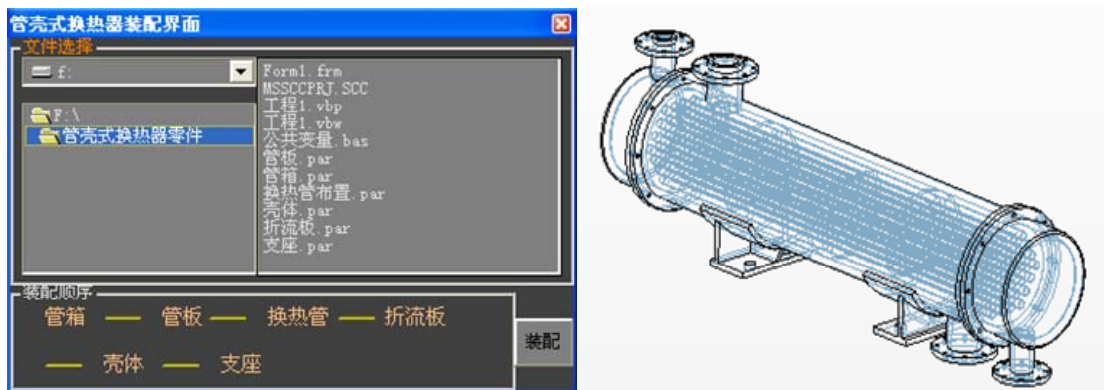


Figure 5. Program interface and assembling mode
图 5. 装配界面及模型

参考文献 (References)

- [1] 陈友文, 柴天佑. 基于双交叉限幅 PID-RBR 的加热炉温度控制[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 9(31): 1217-1220.
- [2] 吴国东, 尹清华, 华贲等. 管壳式换热器的优化选型[J]. 石油化工, 1994, 23(2): 100-104.
- [3] 张冠敏, 潘继红, 杜文静. 管壳式换热器自动化设计及三维结构模拟[J]. 山东大学学报: 工学版, 2003, 33(4): 390-394.
- [4] P. Gao, Z.-F. Sang. Three dimensional parameterized design of heat exchanger tube sheet based on solid works. 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design: Multicultural Creation and Design, 2008: 488-492.
- [5] 任雷雷. 管壳式换热器设计选型软件系统开发[D]. 西安理工大学, 2006.
- [6] X. H. Zhou, Y. J. Qiu, G. R. Hua, et al. A feasible approach to the integration of CAD and CAPP. Computer-Aided Design, 2007, 39(4): 324-338.
- [7] W. J. Ding. Engineering design of heat exchangers based on solid edge modeling. Mechanical Science and Technology, 2006, 12: 1442-1446.
- [8] L. Kong, J. Y. H. Fuh, K. S. Lee, et al. A windows-native 3D plastic injection mold design system. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 1-3: 81-89.
- [9] K.-H. Chang, S.-H. Joo. Design parameterization and tool integration for CAD-based mechanism optimization. Advances in Engineering Software, 2006, 37(12): 779-796.