

8-7-2020

## Research and Simulation of Cross Flow Heat Exchanger

Chengyun Wu

*Shanghai Aviation Design Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China;*

Guangwen Wang

*Shanghai Aviation Design Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China;*

Geping Li

*Shanghai Aviation Design Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China;*

Xudong Xin

*Shanghai Aviation Design Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Research and Simulation of Cross Flow Heat Exchanger

### Abstract

**Abstract:** Based on cell concept, the lumped parameter method was applied and the parameters in single heat exchanger cell were deduced. *Thereafter 1, 4, 9, 100 cells heat exchanger simulation model was set up and the simulation error and its influencing factors were analyzed. To simplify the algorithm and increase the calculation speed, as well as improve the accuracy of cross flow heat exchanger, the simplified heat exchanger model was proposed and reviewed.* The research results show that the calculation of simplified heat exchanger is precise and the algorithm is simple. The model could be widely applied in cross flow heat exchanger computation.

### Keywords

cross heat exchanger, heat transfer, simulation, model, cell

### Recommended Citation

Wu Chengyun, Wang Guangwen, Li Geping, Xin Xudong. Research and Simulation of Cross Flow Heat Exchanger[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(9): 2220-2225.

## 叉流换热器换热特性模拟与研究

吴成云, 汪光文, 李革萍, 辛旭东

(中国商用飞机有限责任公司上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘要:** 采用集总参数法, 基于“微元段”方法, 推导了单个“微元段”换热器内参数的变化。建立了 1, 4, 9, 100“微元段”空气叉流换热器仿真模型, 并对模型稳态计算误差及其影响因素进行了分析。为了简化叉流换热器仿真计算算法, 提高仿真计算速度, 同时改善模型计算精度, 提出了一种简化的换热计算模型, 并基于该模型进行仿真研究。研究结果发现: 简化的换热计算模型准确度高, 模型算法简单, 可广泛应用于叉流换热器仿真计算。

**关键词:** 叉流换热器; 换热; 仿真; 模型; 微元段

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 09-2220-06

### Research and Simulation of Cross Flow Heat Exchanger

Wu Chengyun, Wang Guangwen, Li Geping, Xin Xudong

(Shanghai Aviation Design Research Institute, Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Based on cell concept, the lumped parameter method was applied and the parameters in single heat exchanger cell were deduced. Thereafter 1, 4, 9, 100 cells heat exchanger simulation model was set up and the simulation error and its influencing factors were analyzed. To simplify the algorithm and increase the calculation speed, as well as improve the accuracy of cross flow heat exchanger, the simplified heat exchanger model was proposed and reviewed. The research results show that the calculation of simplified heat exchanger is precise and the algorithm is simple. The model could be widely applied in cross flow heat exchanger computation.

**Keywords:** cross heat exchanger; heat transfer; simulation; model; cell

### 引言

叉流换热器广泛应用于航空航天、电子散热、石油化工等领域, 具有效率高、可靠性好、质量轻及适用性强等优点, 是重要的机械过程处理设备之一<sup>[1]</sup>。进行叉流换热器换热特性研究, 掌握换热器正常运行及故障工况下流体参数变化规律, 是合理使用叉流换热器、保证系统运行质量的前提。在对

换热器换热特性研究的仿真模型中, 集总参数模型由于算法简单、实时性好而被广泛采用, 但对整个换热器使用集总参数法由于忽略了换热器及流体温度沿流动方向上的分布情况, 得到的计算结果误差大, 且仿真结果会出现畸点错误<sup>[2-3]</sup>。文献[4-5]采用集总参数法计算模型, 对换热器换热特性进行仿真计算, 并对出现畸点出现的机理及消除方法进行了探讨。文献[6]采用整体集总参数法和分段集总参数法对换热器进行特性计算, 并对计算结果进行分析, 建议采用分段进行换热器仿真计算, 给出了具有应用价值的结论。但这些研究模型复杂程度、也未对仿真计算结果的误差及影响因素进行分析。



收稿日期: 2015-03-26 修回日期: 2015-07-23;  
基金项目: 973 计划(2012CB720100);  
作者简介: 吴成云(1984-), 男, 四川南充, 硕士, 工程师, 研究方向为飞机环控系统; 汪光文(1980-), 男, 安徽芜湖, 博士, 高工, 研究方向为飞机环控系统; 李革萍(1967-), 女, 江西抚州, 硕士, 研究员, 研究方向为飞机环控系统。

<http://www.china-simulation.com>

• 2220 •

本文基于已有研究成果, 首先采用分段集总参数法, 将叉流换热器分别分为 1, 4, 9, 100 个“微元段”, 选用“微元段”出口参数作为集总参数进行仿真计算, 比较不同分段数对仿真计算误差的影响, 热边/冷边流量和温度对仿真误差的影响进行研究; 在此基础上, 为简化模型并改善仿真计算误差, 本文建议采用 9“微元段”集总参数换热器模型, 并进行修正的方法进行仿真计算, 模型计算算法简单, 且计算精度也能满足要求。

## 1 模型建立

### 1.1 分段集总参数模型

将叉流换热器分为  $i \times j$  个“微元段”, 每个“微元段”中含有热流体, 冷流体及换热器本体, 如下图 1 所示。

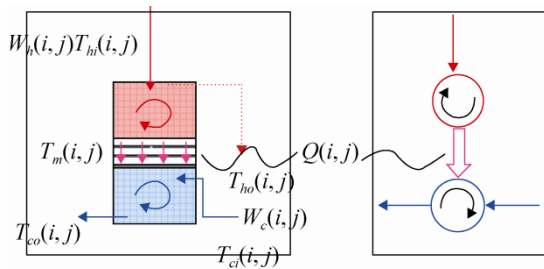


图 1 “微元段”模型示意图<sup>[7]</sup>

在上述“微元段”内, 热流体从上侧流入换热器, 冷流体从右侧进入换热器, 热/冷流体流量用  $W$  表示, 温度用  $T$  表示, 下标  $h, c$  分别表示热流体和冷流体, 下标  $i, o$  分别表示“微元段”进口和出口,  $w$  表示换热器壁面。每个“微元段”内热/冷流体能量守恒方程为:

$$W \times C \times dT = h \times (T(i,j) - T_w(i,j)) \times dx \quad (1)$$

其中:  $C$  为热/冷体比热容;  $i, j$  表示第  $i$  行, 第  $j$  列的“微元段”;  $h$  为单位长度换热器的换热系数;  $dT$  为“微元段”内流体的温度变化;  $dx$  为“微元段”长度。

设“微元段”内换热器壁面温度为恒定值, 对式(1)进行积分, 其中边界条件包括: 热流体  $x=0$ ,  $T=T_{hi}$ , 冷流体  $T=T_{ci}$ ; 热流体  $x=l$ ,  $T=T_{ho}$ , 冷流体

$T=T_{co}$ , 得到热流体与壁面的总换热量  $Q_h(i, j)$ , 冷流体与壁面的总换热量  $Q_c(i, j)$ :

$$Q_h(i,j) = W_h C_h [1 - \exp(-H_h / (W_h C_h))] [T_{hi}(i,j) - T_m(i,j)] \quad (2)$$

$$Q_c(i,j) = W_c C_c [1 - \exp(-H_c / (W_c C_c))] [T_{ci}(i,j) - T_m(i,j)] \quad (3)$$

式中:  $H$  为换热器“微元段”总换热系数。

“微元段”热流体出口温度  $T_{ho}$ , 冷流体出口温度  $T_{co}$ :

$$T_{ho}(i,j) = (T_{hi}(i,j) - T_m(i,j)) \exp(-H_h / (W_h C_h)) + T_m(i,j) \quad (4)$$

$$T_{co}(i,j) = (T_{ci}(i,j) - T_m(i,j)) \exp(-H_c / (W_c C_c)) + T_m(i,j) \quad (5)$$

壁面温度  $T_m(i, j)$  变化为:

$$M(i, j) C_m (dT_m(i,j) / dt) = Q_c(i,j) + Q_h(i,j) \quad (6)$$

基于 MATLAB/Simulink 平台, 连接多个“微元段”模型, 即可得到叉流换热器分段集总参数模型。

### 1.2 模型验证

为分析模型计算结果的误差, 以叉流换热器冷/热边出口温度理论解为比对基准, 比较不同模型仿真计算结果的误差。冷/热边出口温度理论解根据热边换热效率  $E_h$  及冷边换热效率  $E_c$  反推求得。根据 Mason 研究成果<sup>[8]</sup>, 叉流换热器热边效率  $E_h$  及冷边效率  $E_c$  表达式见式(7)。

通过式(7)即可得叉流换热器热边效率  $E_h$ 、冷边效率  $E_c$ 、冷边理论出口温度值  $T_{co}$  及热边理论出口温度值  $T_{ho}$ 。将 1, 4, 9, 100“微元段”集总参数模型冷/热边出口温度与冷/热边出口理论温度进行对比, 即可判断“微元段”集总参数模型的误差。

$$E_h = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} = \frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} R_n(a) R_n(b)$$

$$E_c = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ci}} = E_h \times \frac{W_h C_h}{W_c C_c} \quad (7)$$

$$R_n(\omega) = 1 - e^{(-\omega)} \sum_{K=0}^n \frac{\omega^K}{K!}$$

$$a = (H_c \times H_h) / ((H_c + H_h) W_c C_c)$$

$$b = (H_c \times H_h) / ((H_c + H_h) W_h C_h)$$

### 1.3 简化的集总参数模型

显然，换热器仿真计算模型分段越多，“微元段”越多，模型越能较好的预测冷/热边出口温度，具有更高的正确性，但同时计算模型愈复杂，运算速度变慢。建议将换热器划分为 9 个“微元段”，并根据修正因子  $\beta_{C}$ ， $\beta_{H}$  对“微元段”集总参数模型冷/热边出口温度进行修正，集总参数模型冷/热边出口温度修正因子  $\beta_{C}$ ， $\beta_{H}$  推导如下，

$$\text{令: } P=W_h C_h(1-\exp(-H_h/(W_h C_h)))$$

$$Q=W_c C_c(1-\exp(-H_c/(W_c C_c)))$$

根据式(3)及式(4)，每个“微元段”内达到热平衡后，“微元段”出口温度为：

$$T_{ho}(i,j)=T_{hi}(i,j)\times(1P/(W_h C_h))+(P/(P+Q)\times T_{hi}(i,j)+Q/(P+Q)\times T_{ci}(i,j))\times P/(W_h C_h) \quad (8)$$

$$T_{co}(i,j)=T_{ci}(i,j)\times(1-Q/(W_c C_c))+(P/(P+Q)\times T_{hi}(i,j)+Q/(P+Q)\times T_{ci}(i,j))\times Q/(W_c C_c) \quad (9)$$

$$\text{设: } x=PQ/(W_h C_h(P+Q))$$

$$y=PQ/(W_c C_c(P+Q))$$

式(9)可简化为：

$$T_{ho}(i,j)=T_{hi}(i,j)(1-x)+T_{ci}(i,j)x \quad (10)$$

$$T_{co}(i,j)=T_{ci}(i,j)(1-y)+T_{hi}(i,j)y \quad (11)$$

根据上式迭代计算，即可得 9“微元段”模型冷边出口温度  $T_{co9}$  及热边出口温度  $T_{ho9}$ ：

$$T_{co9}=[T_{ci}((1-y)^3+(1-y)^3+3xy(1-y)^2+(1-y)^3+x(1-x)y(1-y)^2+xy(1-y)^2+xy(1-x)(1-y)^2+x(1-y)^2y+x(1-x)y(1-y)^2+xy(1-y)^2+x^2y^2(1-y)+x^2y^2(1-y)+x^2y^2(1-y))+T_{hi}((3y-3y^2+y^3)+y(1-x)(1-y)^2+(1-x)y(1-y)+2xy^2(1-y)+(1-x)y+xy^2+(1-x)^2y(1-y)^2+y(1-x)^2(1-y)+xy^2(1-y)(1-x)+xy^2(1-y)(1-x)+y(1-x)^2+x(1-x)y^2(1-y)+xy^2(1-x)+xy^2(1-x)(1-y)+x(1-x)y^2+x^2y^3)]/3 \quad (12)$$

$$T_{ho9}=[T_{ci}(x(1-x)^2+x(1-x)+x+x(1-x)^2(1-y)+x(1-x)(1-y)+x(1-y)+x^2(1-x)y+x^2y+x^2(1-x)y+x(1-x)^2(1-y)^2+x(1-x)(1-y)^2+4x^2(1-x)y(1-y)+x(1-y)^2+x^2y(1-y)+x^2y(1-y)+x^2(1-x)y+x^3y^2)+T_{hi}(((1-x)^3+(1-x)^3+xy(1-x)^2+x(1-x)^2y+x(1-x)^2y+(1-x)^3+3xy(1-x)^2+3(1-x)^2xy(1-y)+3x^2y^2(1-x)))]/3 \quad (13)$$

将 9“微元段”热边及冷边出口温度代入换热器效率计算公式，得 9“微元段”集总参数模型冷边效率  $E_{c9}$ ，热边效率  $E_{h9}$ ：

$$E_{c9}'=3y-3y^2+y^3-3xy+6xy^2-3xy^3+x^2y-3x^2y^2+2x^2y^3 \quad (14)$$

$$E_{h9}'=3x-3x^2+x^3-3xy+6x^2y+xy^2-3x^2y^2-3x^3y+2x^3y^2 \quad (15)$$

冷/热边出口温度修正因子  $\beta_{C9}$ ， $\beta_{H9}$  定义如下：

$$\beta_{C9}=E_c/E_{c9}' \quad (16)$$

$$\beta_{H9}=E_h/E_{h9}' \quad (17)$$

根据修正因子，即可得到修正后的 9“微元段”集总参数模型出口最终温度  $T_{co}$ ， $T_{ho}$ ：

$$T_{co}=T_{ci}+\beta_{C9}\times(T_{co9}-T_{ci}) \quad (18)$$

$$T_{ho}=T_{hi}-\beta_{H9}\times(T_{hi9}-T_{ho9}) \quad (19)$$

## 2 MATLAB/Simulink 仿真研究

### 2.1 误差分析

1) “微元段”数对计算误差的影响

Simulink 能快速有效的建立仿真计算模型，为分析“微元段”个数对仿真误差的影响，建立了 1，4，9，100“微元段”分段集总参数模型，在 MATLAB/SIMULINK 平台进行仿真计算。

计算算例 1：某换热器热边参数  $W_h=0.544$  kg/s， $T_{hi}=366.48$  K， $H_h=659.96$  W/K， $C_h=1.009$  kJ/(kg·K)；冷边参数  $W_c=0.272$  kg/s， $T_{ci}=297.04$  K， $C_c=1.009$  kJ/(kg·K)， $H_c=449.96$  W/K。1，4，9，100“微元段”分段集总参数模型冷边出口、热边出口温度计算结果如图(2)，(3)所示。冷边、热边出口稳态温度值及理论计算值见表 1。

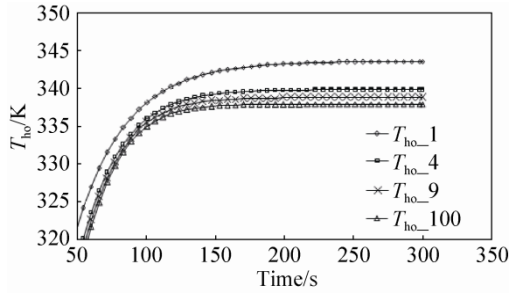


图 2 不同“微元段”数模型热边出口温度

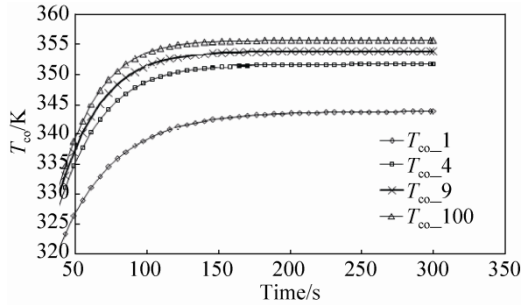


图 3 不同“微元段”数模型冷边出口温度

表 1 不同“微元段”个数模型稳态计算温度

测试参数	1	4	9	100	理论值
热边温度值(K)	70.4	66.6	65.6	64.4	64.6
冷边温度值(K)	69.6	77.2	79.3	81.0	81.2

计算结果显示, 1, 4, 9, 100 “微元段”模型热边/冷边稳态温度误差分别为 9.0%/14.3%、3.0%/11.1%、1.5%/2.3%和 0.3%/0.2%。由此可得, “微元段”数增加, 稳态计算结果越接近理论计算结果, 误差越小。这表明, 随着“微元段”个数的增加, 计算节点数增加, “微元段”换热器模型计算得到的温度分布更能较为准确的反映真实情况。100 “微元段”模型稳态计算结果与理论计算结果基本一致, 基本代表了换热器的真实换热特性, 可用于换热器出口温度计算, 具有较高的准确度。

## 2) 冷/热边流量对计算误差的影响

为研究冷、热边流量对计算误差的影响, 基于 9“微元段”模型效率计算公式(14)及式(15), 采用下述算例 2, 3 进行计算。

计算算例 2:  $W_h=0.27$  kg/s, 0.45 kg/s, 0.73 kg/s, 1.36 kg/s,  $W_c$  从 0 增加到 1.4 kg/s, 其它已知条件见算例 1 所示, 将计算结果与理论计算结果进行比较, 热边/冷边出口温度计算误差见图 4~5 所示。

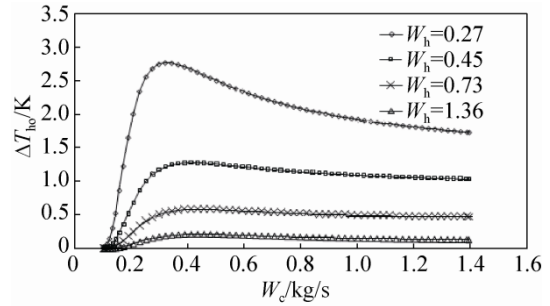


图 4 热边出口温度计算误差(冷边流量变化)

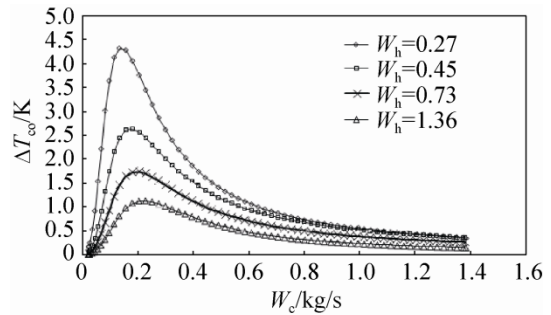


图 5 热边出口温度计算误差(冷边流量变化)

计算算例 3:  $W_c=0.27$  kg/s, 0.45 kg/s, 0.73 kg/s, 1.36 kg/s, 热边流量  $W_h$  从 0 增加到 1.4 kg/s, 其它已知条件与算例 1 相同, 热边/冷边出口温度计算误差见图 6, 7 所示。

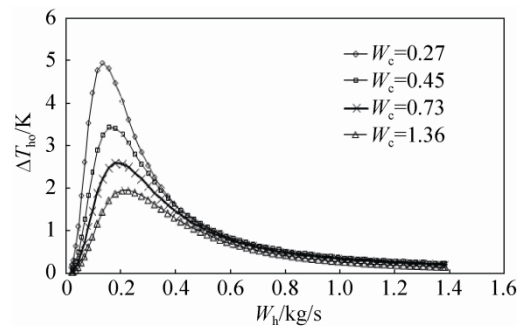


图 6 冷边流量固定, 热边出口温度计算误差

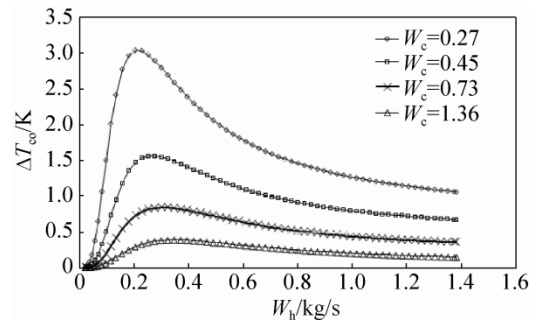


图 7 冷边流量固定, 热边出口温度计算误差



根据上述 9“微元段”集总参数换热器模型计算结果, 可得以下结论:

a) 热边流量保持不变, 冷边流量从 0 不断增大的过程中, 热边/冷边出口温度计算误差先上升, 后逐步下降, 最后保持稳定; 同样, 冷边流量保持不变, 热边流量从 0 不断增大的过程中, 热边/冷边出口温度计算误差先上升, 后逐步下降, 最后保持稳定, 即流量较小时, 出口温度计算误差大, 流量较大时, 计算误差小。

b) 热边/冷边流量都在 0.2 kg/s 附近时, 计算误差最大, 最大误差为 5 °C, 随着热边/冷边流量增加, 热边/冷边出口温度计算误差逐步减小。

3) 热/冷边进口温差对计算误差的影响

基于 9“微元段”模型, 对以下算例进行计算, 比较不同热/冷边进口温差对计算误差的影响。

计算算例 4:  $W_h=0.544$  kg/s,  $W_c=0.363$  kg/s, 其它已知条件同计算算例 1, 不同热边/冷边进口温差条件下, 出口温度计算误差见图 8 所示。图 8 表明, 随着热边/冷边进口温度差增大, 热边/冷边出口温度计算误差增大。

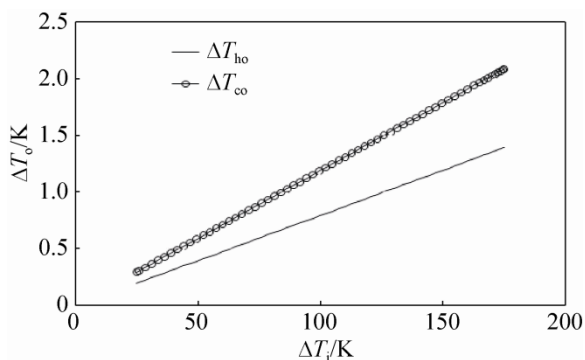


图 8 不同进口温度时, 出口温度计算误差

## 2.2 改进模型分析

上述误差分析表明, “微元段”集总参数模型分段数较少时, 出口温度计算误差较大, 100“微元段”集总参数模型能较好的预测换热器稳态及动态换热特性, 但计算算法复杂。为了简化计算算法, 提高模型计算准确度, 采用 9“微元段”集总参数模型, 并根据式(18)、式(19)进行修正, 计算算例

同算例 1, 计算结果与 100“微元段”集总参数模型对比如图 9~10 所示。

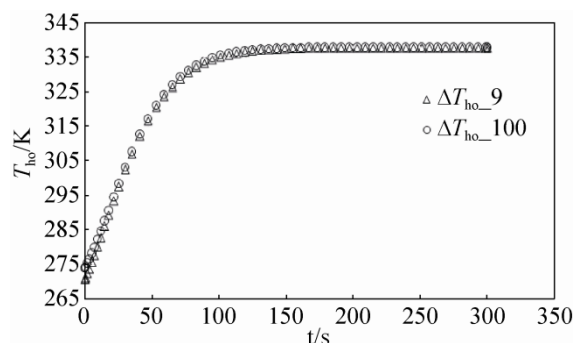


图 9 改进模型与 100“微元段”热边出口温度

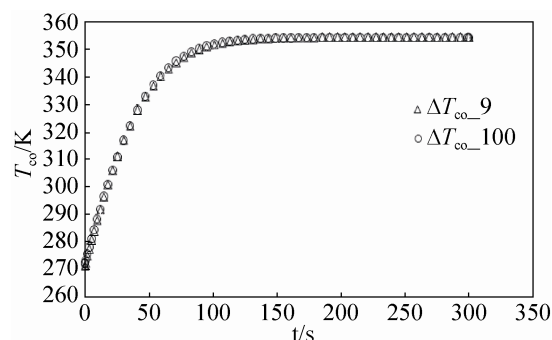


图 10 改进模型与 100“微元段”冷边出口温度

上述结果表明, 改进后的 9“微元段”集总参数模型具有很高的计算精度, 温度达到稳定时, 计算结果与 100“微元段”模型计算结果, 由此表明, 9“微元段”修正模型稳态温度值与理论温度值误差较小。

## 3 结论

本文采用 simulink 建立了 100“微元段”叉流换热器集总参数模型, 并进行了仿真计算, 将仿真计算结果与理论计算结果进行对比发现, 100“微元段”集总参数模型计算结果具有较高精确度, 但计算模型较为复杂, 且运算速度较慢。建立的 9“微元段”修正模型计算结果既能满足计算精度要求, 而且计算模型简单, 可广泛应用于叉流换热器仿真。

## 参考文献:

- [1] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

(下转第 2231 页)