

文章编号: 1671-6612 (2007) 03-001-06

# 来流不均匀性对冷凝器性能影响的数值研究

邓 斌<sup>\*1,2</sup> 陶文铨<sup>1</sup> 余汪洋<sup>2</sup>

(1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室 西安 710049;  
2.金龙精密铜管集团股份有限公司传热技术研究所 上海 200135)

**【摘 要】** 基于相关文献提出的冷凝器分布参数模型,运用该模型分析了不同来流分布、不同冷媒流量、不同流程布置以及不同换热管排数时来流不均匀性对冷凝器性能的影响,得出了一些实用性的结论。研究表明:不同的空气来流分布形式对冷凝器性能的影响程度不同,不均匀程度的大小可以由不均匀因子  $\tau$  来衡量,当来流不均匀程度增大时,不均匀因子  $\tau$  增大,冷凝器换热性能恶化,整体性能下降。

**【关键词】** 冷凝器;数值模拟;不均匀因子;来流不均匀性  
中图分类号 TK32 文献标识码 A

## Numerical Investigation of Condensers with non-uniform air distribution

Deng bin<sup>1,2</sup> Tao wenquan<sup>1</sup> Yu wangyang<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;  
2. Institute of Heat Transfer Technology, Golden Dragon Precise Copper Tube Group Inc., 200135, China)

**【Abstract】** Based on the steady state distributed parameters model of the condensers which was put forward in the previous related reference. The effect of different non-uniform air distribution, different flow rate of the refrigerant, different refrigerant layout and different rows on the performance of the condensers are studied and some useful results are obtained. All the non-uniform air distribution make the performance of the condensers worse. The non-uniform degree can be measured by the non-uniform factor. When the non-uniform factor increase, the performance of the condensers become worse. All these research results can be applied to predict the influence on the performance of condensers when the inlet air distribution is non-uniform.

**【Keywords】** Condensers; Numerical simulation; Non-uniform factor; Non-uniform air distribution

## 0 引言

在研究换热器性能时,一般认为空气来流是均匀分布的,但在实际的运行条件下却往往相反。造成来流不均匀的原因多种多样,既有内部结构的因素又有外部扰动和条件的限制。例如,分体式空调机室内机一般采用贯流风扇,C型蒸发器,室外机为了充分利用离心风机的风量,也一般采用了折弯形式,这种机型室内机,室外机来流都是不均匀的。同时由于风机在安装位置,制造公差等方面不均匀也可能造成风速分布的不均匀。

来流不均匀性对换热器性能的影响,国外学者已经进行了一定的研究工作,主要有 Fagan<sup>[1]</sup>, Domanski<sup>[2]</sup>, Bensaf<sup>[3]</sup>等。但他们的研究主要集中在来流不均匀对换热器换热性能的影响,实际上来流不均匀对换热器流动阻力性能也是有一定影响的。另外以上模型一般都比较简单,得出的结论也太少。国内左潞<sup>[4]</sup>针对来流不均匀性对蒸发器换热性能影响的简单研究。

本文基于文献[5]提出的冷凝器分布参数模型,针对三种常见的来流不均匀的情况,对不同分布、

收稿日期: 2007-07-11

\*作者简介: 邓斌,男,1973年生,四川通江人,工学博士,目前研究方向:强化换热

不同流量、不同流程布置及换热器管排数变化的情况下, 来流不均匀性对冷凝器性能的影响进行了研究, 得出了一些实用性的结论, 可用来预测来流不均匀对冷凝器性能造成的影响。

具体的冷凝器分布参数模型详见文献[5]。

同时, 为了衡量风速分布的不均匀性程度, 在研究中引入了流动不均匀因子  $\tau$  [4], 其定义为:

$$\tau = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ag} - v_i)^2 \cdot \frac{S_i}{S}}}{v_{ag}} \quad (1)$$

式中:

$n$  - 控制单元个数

$S$  - 换热器迎风面面积,  $m^2$

$S_i$  - 换热器第  $i$  个控制单元迎风面面积,  $m^2$

$v_i$  - 换热器第  $i$  个控制单元进口处风速,  $m/s$

$v_{ag}$  - 换热器迎风面平均风速,  $m/s$

$\tau$  - 无量纲量

### 1 模拟冷凝器几何参数及测试条件

模拟冷凝器的流程布置主要分为顺流、逆流及“Z”字型错流三种情况, 见图 1 所示。其几何参数及测试条件见表 1 和表 2。需要说明的是: 在研究不同流速分布、管内流量变化及不同管排数情况下, 来流不均匀性对冷凝器性能的影响时, 冷凝器均采用逆流布置形式。

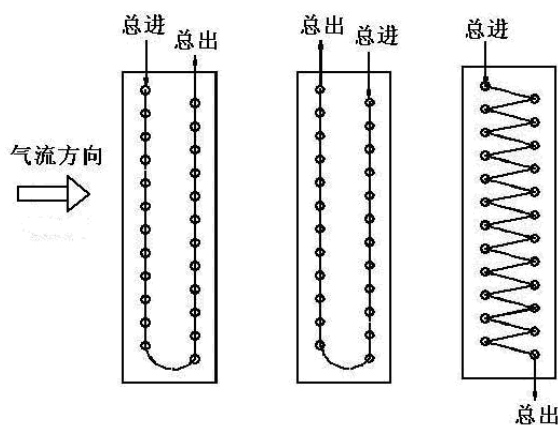


图 1 冷凝器流程布置示意图

Fig.1 Configuration of condenser tested

被测冷凝器几何参数如表 1 所示。

表 1 模拟冷凝器几何参数

Table 1 Geometrical parameters of condenser tested		
几何参数	参数值	单位
冷凝器长度	595	mm
冷凝器宽度	305	mm
冷凝器高度	32.57	mm
换热管外径	9.52	mm
换热管内径	8.82	mm
换热管横向间距	25.4	mm
换热管纵向间距	19.05	mm
换热管排数	2	/
每排管子根数	12	/
翅片形式	波纹片	/
波纹角	15	°
翅片间距	1.7	mm
翅片厚度	0.12	mm
翅片数量	350	/

测试条件如表 2 所示:

表 2 测试条件

Table 2 Test Condition		
参数	参数值	单位
工质	R22	/
空气进口干球温度	25	°C
空气进口湿球温度	20	
空气进口平均风速	2.0	m/s
冷媒进口温度	50	
冷媒进口压力	1730	KPa
冷媒进口流量	30-130	Kg/h
大气压力	10100	KPa

表 3 为三种典型风速分布不均匀的情况。表中第一行数据均为冷凝器迎风面风速分布均匀的情形 (序号为 1)。其余为风速分布不均匀的情形。需要特别说明的是: 表中随着序号的增大, 速度分布不均匀性增大, 表现为不均匀因子  $\tau$  的增大。每一种速度分布对应于唯一的  $\tau$  因子。

风速分布示意图如下 (L 表示冷凝器长度) 所示:

(1) 空气来流速度分布呈单向二阶阶梯型 (沿冷凝器长度方向无变化), 其分布图示意图如图 2 所示。

表 3 三种典型风速分布不均匀情况

(Table 3 Three typical types of air velocity distribution)

序号	单向二阶梯形速度分布 $V_a(m/s)$		单向三阶梯型速度分布 $V_a(m/s)$			抛物阶梯型速度分布 $V_a(m/s)$					$V_{ag}$ (m/s)
	$V_{a1}$	$V_{a2}$	$V_{a1}$	$V_{a2}$	$V_{a3}$	$V_{a1}$	$V_{a2}$	$V_{a3}$	$V_{a4}$	$V_{a5}$	
1	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
2	2.2	1.8	2.6	2.0	1.8	1.8	2.0	2.2	2.0	1.8	2.0
3	2.5	1.5	3.2	2.0	1.6	1.5	2.0	2.5	2.0	1.5	2.0
4	2.7	1.3	3.8	2.0	1.4	1.3	2.0	2.7	2.0	1.3	2.0
5	2.9	1.1	4.4	2.0	1.2	1.1	2.0	2.9	2.0	1.1	2.0
6	3.0	1.0	5.0	2.0	1.0	1.0	2.0	3.0	2.0	1.0	2.0
7	3.2	0.8	5.6	2.0	0.8	0.8	2.0	3.2	2.0	0.8	2.0
8	3.5	0.5	6.2	2.0	0.6	0.5	2.0	3.5	2.0	0.5	2.0
9	3.6	0.4	6.8	2.0	0.4	0.4	2.0	3.6	2.0	0.4	2.0
10	3.8	0.2	7.4	2.0	0.2	0.2	2.0	3.8	2.0	0.2	2.0

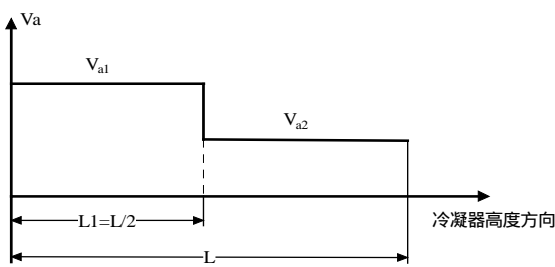


图 2 流速分布 1 (单向二阶梯型分布)

Fig.2 Velocity distribution 1

(2) 空气来流速度分布呈单向三阶梯型(沿冷凝器长度方向无变化), 其分布图示意图如图 3 所示。

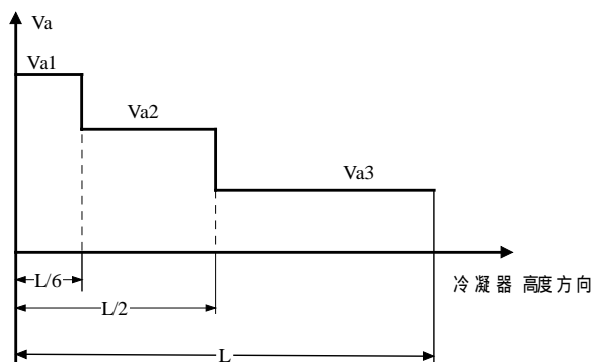


图 3 流速分布 2 (单向三阶梯型分布)

Fig.3 Velocity distribution 2

(3) 空气来流速度分布呈单向抛物阶梯型(沿冷凝器长度方向无变化), 其分布示意图如图 4 所示。

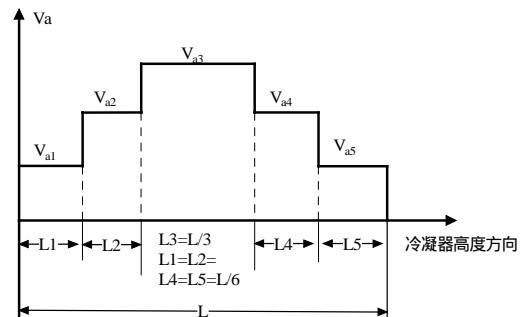


图 4 流速分布 3 (单向抛物阶梯型分布)

Fig.4 Velocity distribution 3

## 2 计算结果及分析

2.1 管内冷媒流量一定, 不同来流速度分布时, 冷凝器性能随不均匀因子的变化情况

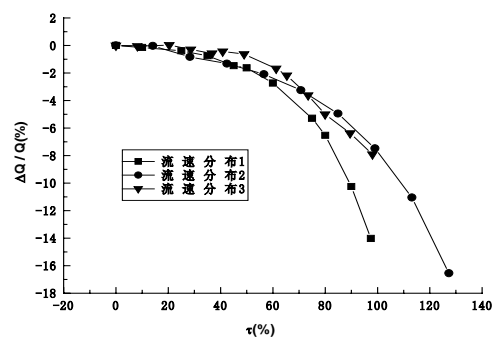


图 5 管内冷媒流量一定, 三种速度分布情况下冷凝器换热性能随不均匀因子的变化情况

Fig.5 Variation of heat transfer coefficient with  $\tau$  when applying different air distribution under the constant refrigerants flow rate

图 5 是管内冷媒流量为 80Kg/h 时, 在三种情况下, 来流分布不均匀与来流分布均匀时换热量偏差百分比随不均匀因子  $\tau$  的变化情况。从图 5 可以看出, 随着不均匀因子  $\tau$  的增大, 三条曲线的斜率变化越来越大, 换热量偏差  $\Delta Q$  随之增大, 表明冷凝器热工性能恶化程度越来越重 (偏差百分比为正, 表明该测定值增加, 为负则为减小, 下同)。在  $\tau < 40\%$  的范围内, 曲线的斜率变化较小, 说明此时不均匀性分布较小时对冷凝器换热性能影响较小。随着  $\tau$  因子的增大, 曲线的斜率逐渐增大, 不均匀性分布越来越严重, 对冷凝器热工性能影响越来越大, 冷凝器热工性能明显恶化。当  $\tau > 60\%$  时, 曲线的斜率几乎不变, 冷凝器热工性能的恶化程度线性增加。

从三种速度分布结果的比较可以看出: 不同的速度分布形式对冷凝器性能影响的程度是不同的。在  $\tau < 40\%$  的范围内, 不同的速度分布使冷凝器性能恶化程度不明显, 几乎一样, 此时可以不考虑不均匀性影响。随着  $\tau$  因子的增大, 当  $\tau > 60\%$  时, 三种速度不均匀分布均使冷凝器性能恶化, 其中单向二阶梯型速度分布使冷凝器性能恶化程度较严重, 而且随着  $\tau$  的增大, 恶化程度趋势进一步加大。

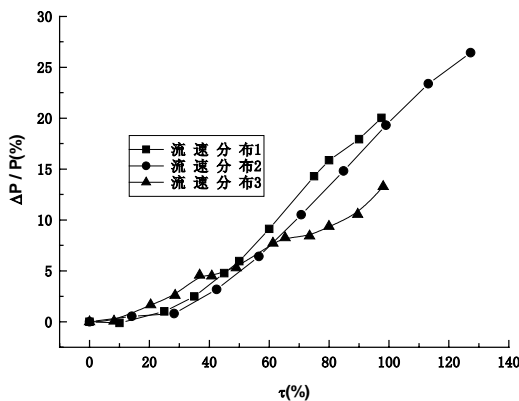


图 6 管内冷媒流量一定, 三种速度分布情况下冷凝器管内阻力性能随不均匀因子的变化情况

Fig.6 Variation of Pressure drop with  $\tau$  when applying different air distribution under the constant refrigerants flow rate

图 6 是换热器作为冷凝器使用时, 三种情况下, 来流分布不均匀与来流分布均匀时冷凝器进出口总压降偏差百分比随不均匀因子的变化情况。从图中可以看出, 随着  $\tau$  因子的增大, 三种分布冷凝器进出口总压降均增大。单向二阶梯和单向三阶梯增

大的幅度及趋势基本一致。抛物阶梯型分布增大趋势相比较为平缓。

由上述分析可知, 三种速度分布均使冷凝器换热性能下降, 管内流动阻力增加, 冷凝器整体性能下降。随着不均匀因子  $\tau$  的增大, 三种分布中, 单向二阶梯速度分布使冷凝器整体性能下降最为严重, 其次是单向三阶梯速度分布, 然后才是抛物阶梯速度分布。

2.2 来流速度分布不变, 管内冷媒流量变化时, 冷凝器性能随不均匀因子的变化情况

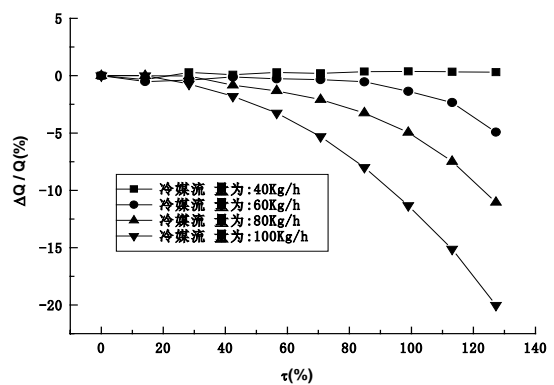


图 7 来流速度分布不变, 管内冷媒流量变化时冷凝器总换热量与来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.7 Variation of heat transfer coefficient with  $\tau$  when applying different refrigerants flow rate under the same air distribution

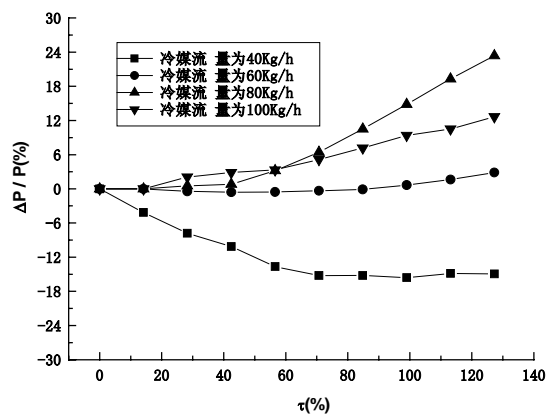


图 8 来流速度分布不变, 不同管内冷媒流量时冷凝器总压降与来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.8 Variation of Pressure drop with  $\tau$  when applying different refrigerants flow rate under the same air distribution

图 7、图 8 为来流速度分布呈单向三阶梯时, 随着管内冷媒流量的变化, 冷凝器总换热量和进出口总压降与来流分布均匀时的偏差百分比随不均

匀因子  $\tau$  的变化情况。

从图 7 可以看出：不均匀因子  $\tau$  不变时，随着冷媒流量的增大，换热器总换热量下降；冷媒流量不变时，随着  $\tau$  因子的增大，换热器总换热量亦下降。从图 8 可以看出：流量较小时（40Kg/h），冷凝器总压降随着  $\tau$  因子的增大而降低，其它情况均随着流量的增大（ $\tau$  因子不变）， $\tau$  因子的增大（流量恒定），冷凝器总压降增大。

从图 7、8 可以得出如下结论：流量较小时，来流速度的不均匀分布对冷凝器整体性能影响较小。随着流量的增大，来流速度的不均匀分布将使冷凝器整体性能下降，随着不均匀度的增加，这种性能恶化的趋势将增大。

### 2.3 来流速度分布不变，不同流程布置时，冷凝器性能随不均匀因子的变化情况

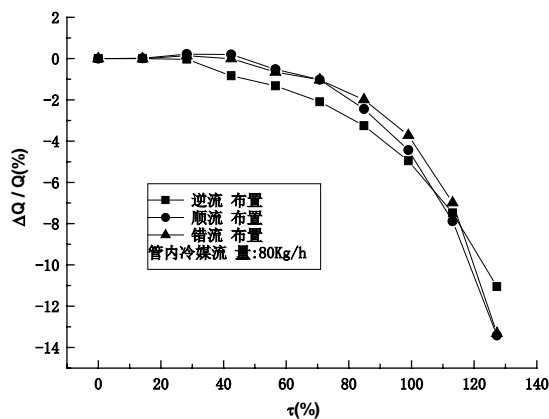


图 9 来流速度分布不变，不同流程布置冷凝器总换热量与来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.9 Variation of heat transfer coefficient with  $\tau$  when applying different refrigerants circuitry under the same air distribution

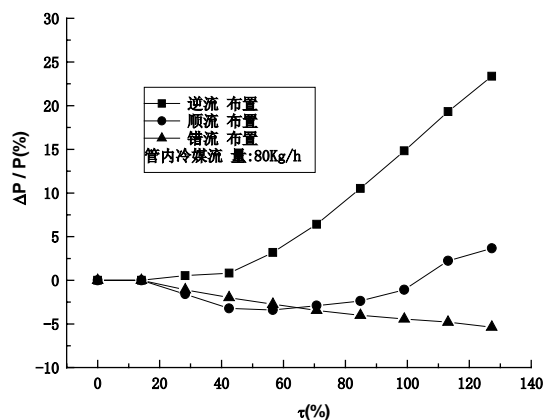


图 10 来流速度分布不变，不同流程布置冷凝器总压降与

来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.10 Variation of Pressure drop with  $\tau$  when applying different refrigerants circuitry under the same air distribution

图 9，图 10 为来流速度分布呈单向三阶梯，管内冷媒流量恒定时，三种不同流路布置（逆流布置，顺流布置及“Z”字型错流布置）的冷凝器总换热量与来流分布均匀时的偏差百分比和进出口总压降与来流分布均匀时的偏差百分比随  $\tau$  因子的变化而变化的情况。从图 9 中可以看出：三种流路冷凝器总换热量随着不均匀因子  $\tau$  的增大均下降。从图 10 中可以看出：三种流路布置中，逆流布置冷凝器总压降随着不均匀因子  $\tau$  的增大而增大，错流布置的总压降有所降低，但降低幅度不大（5%左右），顺流布置压降变化也不大。由此可以看出：三种不同的流路布置中，来流不均匀性对逆流布置的冷凝器影响最大，其性能下降相比也最严重。顺流布置其次，错流相对较好。

### 2.4 来流速度分布不变，换热管管排数变化时，冷凝器性能随不均匀因子的变化情况

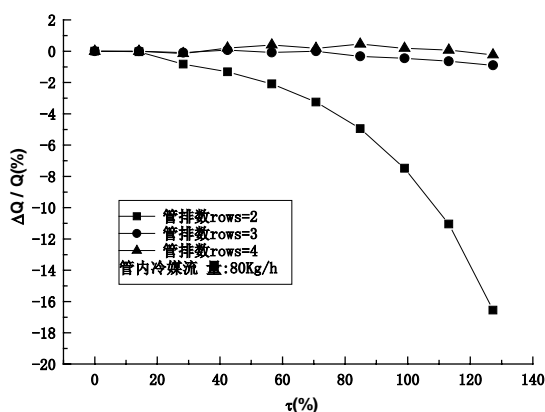


图 11 来流速度分布不变，不同管排数冷凝器总换热量与来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.11 Variation of heat transfer coefficient with  $\tau$  when applying different row number under the same air distribution

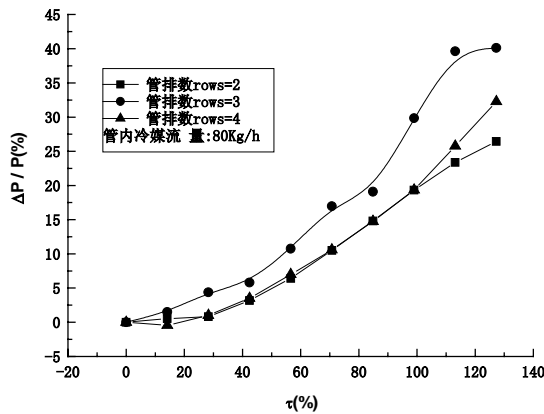


图 12 来流速度分布不变，不同管排数冷凝器总压降与来流分布均匀时的偏差百分比随不均匀因子的变化情况

Fig.12 Variation of Pressure drop with  $\tau$  when applying different row number under the same air distribution

图 11，图 12 为来流速度分布呈单向三阶梯，管内冷媒流量恒定时，三种不同管排数流路布置（2—4 排）的冷凝器总换热量与来流分布均匀时的偏差百分比和进出口总压降与来流分布均匀时的偏差百分比随  $\tau$  因子的变化的情况。从图 11 中可以看出：2 排管冷凝器总换热量随着不均匀因子  $\tau$  的增大而降低，3—4 排管冷凝器总换热量变化不大。从图 12 中可以看出：三种不同管排数的冷凝器进出口总压降均随着不均匀因子  $\tau$  的增大而增大，其中管排数为 3 时，其压降偏差百分比变化趋势最为明显。从以上两图的分析可以看出：来流不均匀对 2 排管冷凝器影响较大，3 排管其次，4 排管相对较弱。因而可以认为：来流不均匀对冷凝器管排数较少时的性能影响较为明显，随着管排数的增加，这种影响趋势将逐渐减弱。

### 3 结论

本文基于文献[5]提出的冷凝器分布参数模型，并运用该模型详细分析了三种典型的来流不均匀

情况对冷凝器性能的影响。得出的结论主要如下：

(1) 随着冷凝器来流不均匀度的增加，换热量损失一定增加，压降损失可能增加，也可能降低。

(2) 三种不同的速度分布，不均匀度对阶梯型（尤其是单向二阶梯分布）风速分布冷凝器性能影响最大，对抛物型分布冷凝器性能影响较小。

(3) 在一定的管内冷媒流量变化范围内，随着流量的增大，来流不均匀对冷凝器影响增大，冷凝器性能下降。

(4) 来流不均匀对不同流程布置的冷凝器影响是不一样的，对简单流路来说，逆流冷凝器受影响最大，性能下降最为严重，其次是顺流，对错流冷凝器性能影响较小。

(5) 来流不均匀对管排数较少的冷凝器性能影响较大，随着管排数的增大，这种影响趋势减弱。

### 参考文献

- [1] T J Fangan. The effects of air flow maldistribution on air-to-refrigerant heat exchanger performance[J]. ASHRAE Transaction. 1980, 86(2): 699-713.
- [2] P A Domanski. Simulation of an Evaporator with Nonuniform One Dimensional Air Distribution[J]. ASHRAE Transactions. 1991, 97(1): 793-802.
- [3] A Bensafi, S Borgand D Parent. A computational model for the detailed design of plate-fine-and-tube heat exchangers using pure and mixed refrigerants[J]. International Journal of Refrigeration, 1997, 20 (3): 218-228.
- [4] 左澍. 空调用直接蒸发器的数学模拟及空气来流不均匀性对其影响分析[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力学院, 1990.
- [5] 邓 斌, 陶文铨, 林澜. 冷凝器流程布置的数值模拟研究(1)—数学模型的建立与验证[J]. 暖通空调, 2006, 36(2): 47—50.