

## MSF 多级闪蒸海水淡化系统的建模与仿真

周少祥, 胡三高, 宋之平

(华北电力大学 动力系, 北京 102206)

**摘要:**通过对 MSF 多级闪蒸过程的机理分析,建立了完整的动态数学模型,与其它文献提供的模型比,考虑了蒸汽密度和级间闪蒸盐水流量变化的影响。仿真计算结果真实地反映了 MSF 系统动态过程的非线性特性。

**关键词:**动态过程; 建模; 仿真; 多级闪蒸; 海水淡化

中图分类号: TK284.1 文献标识码: A

## 1 闪蒸器单元的数学模型

每一级闪蒸器的热工过程有盐水闪蒸、淡水闪蒸和海水(或循环盐水)预热、闪蒸盐水流动过程等环节,如图 1 所示。根据热工理论,可建立多级闪蒸过程的数学模型。

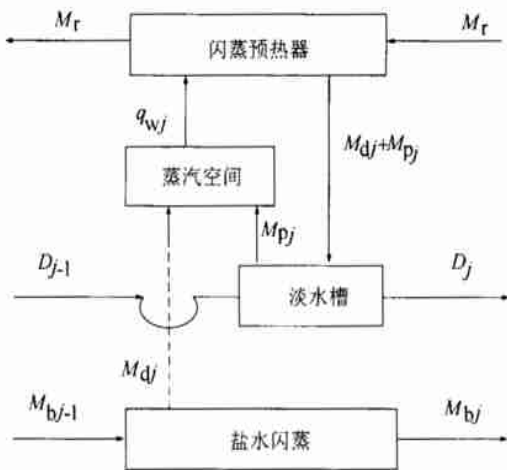


图 1 第  $j$  级闪蒸器单元模块表示

## 1.1 预热器动态过程的数学模型

第  $j$  级预热器的能量平衡方程为:

$$G_{vj} \frac{dT_{vj-1}}{d\tau} = q_{ij} - G_{vj}(T_{vj-1} - T_{vj}) \quad (1)$$

式中  $G_{vj} = n_j \frac{\pi d_i^2}{4} l_{vj} \rho_r C_{pr}$  为预热器管内盐水热容量,

$G_{vj} = M_{vj} C_{pj}$  为盐水水当量。

管内换热量可以用下式表示:

$$q_{ij} = a_{ijn} \pi d_i l_{vj} (T_{wj} - T_{vj-1}) = A_{ij} (T_{wj} - T_{vj-1}) \quad (2)$$

蒸汽凝结量为  $M_{dj} + M_{pj}$ , 管外蒸汽冷凝放热量为

$$q_{oj} \approx r_j (M_{di} + M_{pj}) = a_{ojn} \pi d_o l_{vj} (T_{dj} - T_{wj}) = A_{oj} (T_{dj} - T_{wj}) \quad (3)$$

式中  $r_j$  为闪蒸室压力  $p_j$  下的凝结潜热。

第  $j$  级闪蒸预热器的金属热容量方程:

$$G_{wj} \frac{dT_{wj}}{d\tau} = A_{oj} (T_{dj} - T_{wj}) - A_{ij} (T_{wj} - T_{vj-1}) \quad (4)$$

式中  $G_{wj} = M_{wj} C_w$  为金属热容量。

由于多级闪蒸装置与一般换热设备不同,预热器的换热量来自闪蒸的二次蒸汽,二次蒸汽的多少在很大程度上取决于预热器的传热性能,因此,管外蒸汽加热量不构成外部扰动源的条件。

闪蒸室温度方程为:

$$T_{dj} = T_j - BPE_j - \Delta t_{nej} - \Delta t_{dj} - \Delta t_{cj} = T_j - \Delta t_{lj} \quad (5)$$

动态过程中各级总温度损失  $\Delta t_{lj}$  的大小也会发生变化,但目前还没有相关的试验数据,为便于计算,常常假定其值为常数。

## 1.2 闪蒸盐水流动模型

为保证闪蒸过程的进行和淡水水质,要求各级闪蒸盐水水位相等,闪蒸盐水在级间压差作用下逐级自流,因此闪蒸装置的盐水堰的作用十分重要。

盐水堰采用矩形孔板结构,闪蒸盐水通过盐水堰的流动模型为:

$$p_{j-1} + g \rho_{bj-1} z_{j-1} - (p_j + g \rho_{bj} z_j) = \frac{\xi_j \rho_{bj-1}}{2} \left( \frac{M_{bj-1}}{A_j \rho_{bj-1}} \right)^2 \quad (6)$$

式中  $A_j$  为盐水堰开口面积。

仅当入口海水温度发生阶跃扰动时,各级压力

相应变化, 各级盐水水位和级间闪蒸盐水流量也将相应改变。根据上式, 流量变化相对较小, 如果循环盐水流量维持恒定, 则级间闪蒸盐水流量只是发生一个波动, 最后仍回到原值, 因此文献[3 ~ 6]忽略了流量的变化。如果扰动太大, 将导致水位变化超过闪蒸器高度, 上式已不再适用, 当然更不能生产合格淡水, 仿真计算也就失去了实际意义。

### 1.3 闪蒸过程的各级盐水水位的模型

由于闪蒸过程具有两相流特征, 对于第  $j$  级闪蒸器, 盐水水位以上的汽相容积  $V_{vja}$  的增加, 盐水水位  $z_j$  将降低。盐水液面以下的汽相容积  $V_{vju}$  的增加, 盐水水位  $z_j$  将增加。因此, 在研究闪蒸器盐水水位变动时, 应从汽相和液相的变化着手, 根据物质平衡, 闪蒸器内储质量的变化率可以用下式表示:

$$\Sigma M_{in} - \Sigma M_{out} = M_{b(j-1)} - M_{bj} - M_{dj} = M_{evj}$$

假定汽、液两相的密度可以用集总参数表示, 因此, 质量的变化率等于闪蒸器内汽相和液相两种介质总量随时间的变化率:

$$M_{evj} = \frac{d}{d\tau} [V_{bj} \rho_{bj} + (V_{vja} + V_{vju}) \rho_{vj}] \quad (7)$$

液相和汽相的容积之和等于闪蒸器的容积, 若忽略液下汽相份额对液位的影响, 且忽略液相介质密度变化。考虑到蒸汽密度远低于液相, 因此, 经推导得:

$$\frac{dz_j}{d\tau} \approx \frac{1}{E_b \rho_{bj}} [M_{evj} - F_b (Z - z) \frac{d\rho_{vj}}{d\tau}] \quad (8)$$

式中  $F_b$  为闪蒸发面积,  $Z$  为闪蒸室的高度。

根据实际观察, 大部分闪蒸蒸汽在流经盐水池的不远处就已扩散出来, 整个闪蒸室的液下汽相份额很小, 因此忽略液下汽相份额所带来的误差是可以接受的。

### 1.4 闪蒸过程的能量方程

根据能量守恒原理, 闪蒸室内汽液两相的能量变化等于进出闪蒸室盐水能量差减去闪蒸蒸汽带走的能量。即:

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\tau} (V_{bj} \rho_{bj} h_{bj} + V_{vj} \rho_{vj} h_{vj}) \\ & \approx M_{b(j-1)} h_{b(j-1)} - M_{bj} h_{bj} - M_{dj} h_{vj} \end{aligned}$$

上式左边  $\frac{d}{d\tau} (V_{bj} \rho_{bj} h_{bj} + V_{vj} \rho_{vj} h_{vj}) = (\rho_{bj} h_{bj} - \rho_{vj} h_{vj}) \frac{dV_{bj}}{d\tau} + V_{bj} (\rho_{bj} \frac{dh_{bj}}{d\tau} + h_{bj} \frac{d\rho_{bj}}{d\tau}) + V_{vj} (\rho_{vj} \frac{dh_{vj}}{d\tau} + h_{vj} \frac{d\rho_{vj}}{d\tau})$ , 令  $E_{evj} = M_{b(j-1)} h_{b(j-1)} - M_{bj} h_{bj} - M_{dj} h_{vj}$ ,

单元之间相互影响, 互为扰动输入。由于上述模型为

考虑到蒸汽密度远小于液相密度, 且忽略液相密度的变化, 经推导得:

$$\frac{dT_j}{d\tau} \approx \frac{E_{evj} - F_b \rho_{bj} h_{bj} \frac{dz_j}{d\tau} - F_b (Z - z_j) h_{vj} \frac{d\rho_{vj}}{d\tau}}{F_b z_j \rho_{bj} C_{pbj}} \quad (9)$$

预热器的冷凝能力对闪蒸过程的进行起着决定性的作用, 将预热器管外传热方程引入上式, 同时将式(8)代入式(9), 经推导得盐水水位变化的数学模型:

$$\frac{dz_j}{d\tau} \approx \frac{M_{b(j-1)} (h_{b(j-1)} - h_{bj}) - A_{oj} (T_{dj} - T_{wj}) \xi_j - F_b (Z - z_j) \rho_{vj} \frac{d\rho_{vj}}{d\tau}}{F_b z_j \rho_{bj} C_{pbj}} \quad (10)$$

式中  $\xi_j$  为第  $j$  级预热器的总凝结蒸汽量与其淡水产量的比值。

上述模型比有关文献提供的模型更能反映闪蒸过程的实质<sup>[3-9]</sup>。在这些文献中, 级间闪蒸盐水流量被认为不随时间变化, 而且未考虑蒸汽密度的变化。

### 1.5 补充状态方程

#### 1.5.1 闪蒸室温度和压力的关系

根据非平衡热力学理论, 假定闪蒸室内压力  $p_j$  各处均匀, 且与预热器凝结温度相对应。即:

$$p_j = p(T_j - \Delta t_j) \quad (11)$$

在动态过程中, 温度损失  $\Delta t_j$  肯定有所变化, 但变化不大, 因此这里假定  $\Delta t_j$  为常数。因此, 各级闪蒸器的压力与温度的变化关系可以近似表示为:

$$dp_j = \frac{\partial p_i}{\partial T_j} dT_j \approx p_{vj} dT_j \quad (12)$$

#### 1.5.2 闪蒸室蒸汽密度变化关系式

假定闪蒸蒸汽为理想气体, 有下式关系式:

$$d\rho_{vj} = \frac{\partial \rho_{vj}}{\partial T_j} dT_j + \frac{\partial \rho_{vj}}{\partial p_j} dp_j \approx \frac{\rho_{vj}}{T_j} dT_j + \frac{1}{RT_j} dp_j \quad (13)$$

对于多级闪蒸过程, 闪蒸蒸汽具有的过热度是很小的, 通常不超过 2 °C, 而且各级的温度和压力变化的方向是一致的。为使问题得到简化, 可以利用水蒸气性质表计算密度随温度的变化:

$$d\rho_{vj} \approx \rho_{vj} dT_j \quad (14)$$

通常, 系数  $\rho_{vj}$  很小, 对于本文研究的 MSF 系统,  $\rho_{vj} \leq 0.0062 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{°C})$ 。因此 MSF 系统动态特性的仿真计算时, 常忽略密度变化的影响。

### 1.6 闪蒸器单元的数学模型

由图 1 可以看出, 对于多级闪蒸系统, 各闪蒸器

非线性方程, 因此需线性化简化处理。处理方法不同, 得到的闪蒸器单元的数学模型也不相同。

假定某种线性化处理, 第  $j$  级闪蒸器单元可以用  $n$  阶向量  $X_j = [x_1, x_2, \dots, x_n]'$  作为状态变量, 第  $j+1$  级闪蒸器对第  $j$  级的扰动为  $u_j'$ , 第  $j-1$  级对第  $j$  级的扰动为  $u_j''$ , 这时闪蒸器单元的数学模型可以表示为:

$$\begin{aligned} \dot{X}_j &= A_j X_j + B_j u_j \\ Y_j &= C_j X_j \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $A_j, B_j, C_j$  为系统状态矩阵, 耦合扰动输入为

$$u_j = B_j' u_j' + B_j'' u_j'' + B_j^3 \Delta t_{ij}$$

为了简便, 将  $B_j, C_j$  表示为  $n$  阶单位矩阵, 因此矩阵(向量)  $A_j, B_j', B_j'', B_j^3$  随线性化方法的不同而不同。闪蒸器单元的 MATLAB 模型结构如图 2 所示。

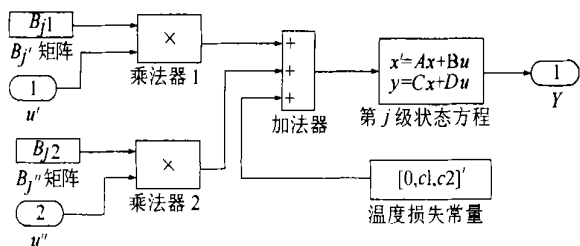


图 2 闪蒸器单元的仿真模型示意图

## 2 盐水加热器的数学模型

鉴于 MSF 系统热惯性较大, 因此盐水加热器采

用整段线性化模型, 令状态变量  $X_h = [T_0, T_w]'$ , 可得盐水加热器的数学模型为:

$$\begin{aligned} \dot{X}_h &= A_h X_h + B_h u_h \\ Y_h &= C_h X_h \end{aligned} \quad (16)$$

式中  $A_h, B_h, C_h$  为 2 阶矩阵或向量, 对于不同的扰动, 其具体形式不同。

## 3 MSF 系统动态过程的数学模型

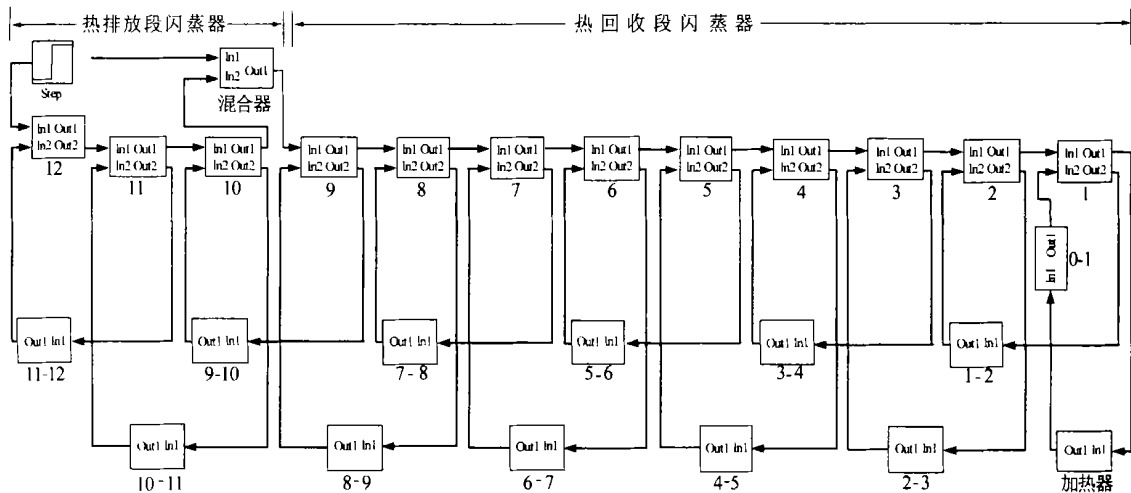
将各闪蒸器单元和盐水加热器的数学模型综合起来, 则构成 MSF 系统的模型

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + Bu \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (17)$$

式中状态变量  $X$  为各状态变量  $X_h, X_1, X_2, \dots, X_N$  构成的列向量。矩阵  $A$  由各闪蒸器单元系数矩阵  $A_j, B_j', B_j''$  和盐水加热器系数矩阵  $A_h, B_h$  构成, 具体形式与线性化处理方法有关。矩阵  $B$  也与扰动因素和线性化处理方法有关, 而矩阵  $C$  可为单位矩阵。

## 4 MSF 系统的仿真模型

通常, 对于 MSF 系统, 式 (17) 的系数矩阵  $A$  很大, 不便于仿真计算。本文以每一个闪蒸器单元的数学模型式 (15) 组成 MSF 系统的仿真模型, 使仿真计算的调整变得更方便。以入口海水温度阶跃扰动为例, 12 级 MSF 多级闪蒸海水淡化系统的模型结构图如图 3 所示。



Step—阶跃扰动发生器; In1—输入通道 1; In2—输入通道 2; Out1—输出通道 1; Out2—输出通道 2

图 3 MSF 系统的 MATLAB 模型结构图

## 5 实例仿真计算与结论

通过对上述模型的微分线性化处理, 采用 MATLAB 软件进行仿真计算, 得到如图 4 和图 5 的计算

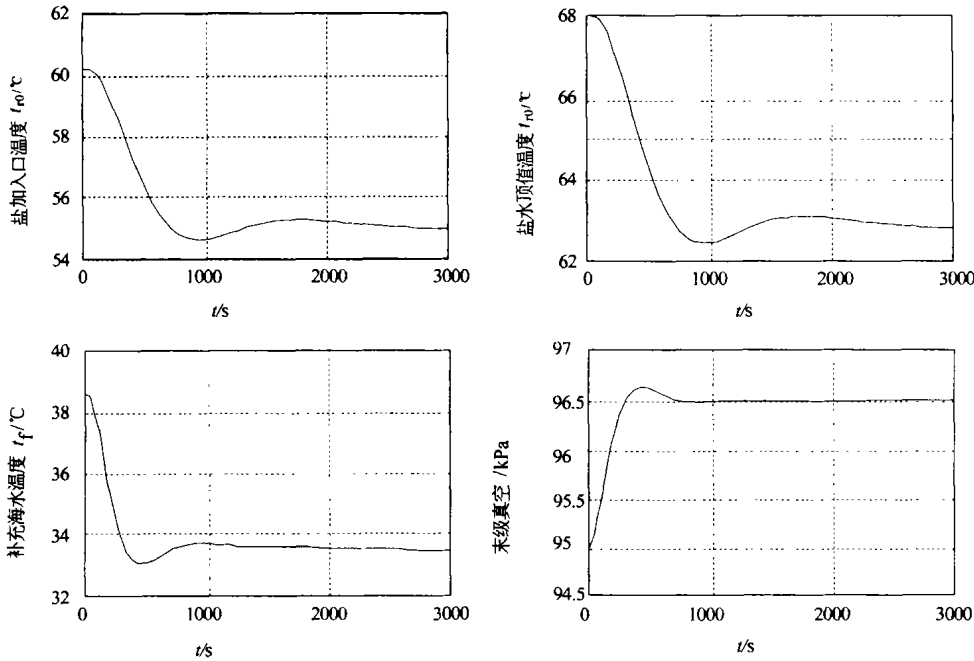


图 4 海水温度阶跃-5 时, 系统主要参数的动态响应

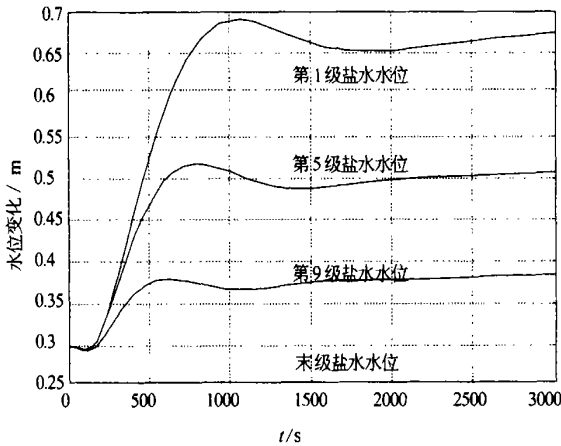


图 5 海水温度阶跃-5 时, 各级盐水平位的动态响应

结果。从图中可以看出, 所建立的 MSF 系统的动态数学模型能真实地反映多级闪蒸过程的非线性特征。

本文建立了一套完整的 MSF 系统动态过程的数学模型, 与其它文献相比, 还考虑了级间盐水流量变化之非线性因素的影响和闪蒸蒸汽密度变化的影响, 考虑的因素更全面, 为研究多级闪蒸系统的动态特性提供了便利条件。

### 参考文献:

- [1] 倪维斗, 徐向东, 李政, 等. 热动力系统建模与控制的若干问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] 周少祥. 热电联产多级闪蒸海水淡化技术的理论与实践 [D]. 北京: 华北电力大学, 2000.
- [3] MARCO MAZZOTTI. Dynamic modeling of multistage flash desalination plants [J]. *Desalination* 2000, 127: 207-218.
- [4] EMAD ALI. Model reduction and robust control of multi-stage flash (MSF) desalination plants [J]. *Desalination*, 1999, 121: 66-85.
- [5] ALY N H. Dynamic behavior of MSF desalination plants [J]. *Desalination*, 1995, 101: 287-293.
- [6] MONA A RINAWI. Transient model of multistage flash desalination [J]. *Desalination*, 1989, 74: 317-326.
- [7] ASAGHAR HUSAIN. Modeling, simulation, optimization and control of multistage flash (MSF) desalination plants [J]. *Desalination*, 1993, 92: 21-55.
- [8] HUSSIN A. Modeling and simulation of a multistage flash (MSF) desalination plant [J]. *Desalination*, 1994, 97: 555-586.
- [9] MANIAN ROSS. Modeling multistage flash desalination plants [J]. *Desalination*, 1996, 108: 365-374.

(何静芳 编辑)

# 欢迎订阅热能动力工程

静电旋风分离器的流场分析= **Flow Field Analysis of an Electrostatic Cyclone Separator** [刊, 汉] / ZHANG Ji-guang, SHEN Heng-gen (East China University, Shanghai, China, Post Code: 200051), LI Hua (Qingdao Architectural Engineering Institute, Qingdao, China, Post Code: 266033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 499 ~ 501

A three-dimensional speed distribution was tested respectively for two versions of CLT type (C - dust remover, L - centrifuge, T - cylinder) of electrostatic cyclone-separator, i. e., with and without a corona electrode being installed. The above-cited distribution was compared with that of two versions of XCY type (X - cyclone, C - long cone, Y - flue gas) of electrostatic cyclone separator, i. e., with and without a corona electrode being installed. After an analysis of the effect of corona electrode installation on the three-dimensional speed distribution the authors made the following observations. With the rational selection of a cyclone separator and the installation of a corona electrode at a specified location the favorable speed distribution in the cyclone separator will be conducive to enhancing the separation function of a centrifugal force and lowering the resistance in the electrostatic cyclone separator. The authors also discussed how to achieve a rational configuration of the electrostatic cyclone separator. **Key words:** electrostatic cyclone separator, separation effect, pressure loss, flow field

燃气机热电冷联供系统技术经济分析= **Technical and Economic Analysis of a Gas Engine-based process heat, electricity and cooling energy Cogeneration System** [刊, 汉] / YANG Zhao, ZHANG Shi-gang, TONG Chun-rong (Thermal Energy Research Institute under the Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 502 ~ 505

In an effort to seek a rational approach of energy utilization, the authors have made a technical and economic analysis with regard to a gas engine-driven total energy system incorporating the triple supply of process heat, electricity and cooling energy. Its comparison with a motor-driven air-cooled heat pump shows that the recommended total energy system is technically feasible and economically rational. **Key words:** total energy system, technico-economics, heat pump

MSF 多级闪蒸海水淡化系统的建模与仿真= **Modeling and Simulation of a Multi-stage Flash (MSF) Seawater Desalination System** [刊, 汉] / ZHOU Shao-xiang, HU San-gao, SONG Zhi-ping (North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 506 ~ 509

Through the mechanism analysis of a multi-stage flash (MSF) process a comprehensive and dynamic mathematical model was set up for a MSF seawater desalination system. The model is different from those as reported in current literature in that it has taken into account the influence of steam density and flow rate changes of interstage-flash brine-water. The results of simulation calculations truthfully reflect the nonlinearity characteristics of the MSF system dynamic process. **Key words:** dynamic process, modeling, simulation, multi-stage flash, seawater desalination

方形截面弯管二次流数值模拟= **Numerical Simulation of the Secondary Flow in a Curved Duct of Square-shaped Cross-section** [刊, 汉] / FAN Hong-ming, LI Xian-ting, JIANG Yi (Department of Architectural Science, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), HE Zhong-yi (Department of Architectural and Thermal Energy Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). — 510 ~ 513

With the help of a large eddy simulation (LES) method for turbulent flows a numerical simulation was performed of the secondary flow in ninety degree curved ducts of a square-shaped cross-section with and without flow-guide blades. Meanwhile, presented is a Taylor-Galerkin finite-element discrete scheme. Two pairs of secondary flow were formed after the