浓缩蔗糖汁的高效节能热泵并流多效蒸发系统

念美玲， 阮 奇*， 江 浩， 黄艺玲， 周江建
（福州大学 石油化工学院，福建 福州 350108）

摘要：为了大幅降低蔗糖厂蒸发工艺的能耗，首次将蒸汽喷射式热泵技术、冷凝水闪蒸和引出额外蒸汽预热糖汁等3种节能措施，同时运用于糖汁浓缩并流多效蒸发系统中，并建立了用矩阵方程描述的该系统的数学模型。模型具有很强的通用性，可实现上述节能措施的自由组合和热泵在任意效抽汽的功能，还可推广用于食品工业其它热敏性溶液的蒸发浓缩；模型存在最佳的热泵喷射系数和抽汽位置，同时采用上述3种节能措施且在最佳条件下可以高效节能。用迭代法结合矩阵法求解浓缩糖汁的热泵并流四效蒸发系统的模型，结果表明，同时采用上述3种节能措施，并在满足约束条件的前提下，将糖汁预热至90 ℃，热泵的喷射系数为0.5，抽汽位置在第2效时节省的生蒸汽消耗量高达41%左右。

关键词：蔗糖汁；并流多效蒸发；热泵；节能；数学模型；矩阵法
中图分类号：TQ 021；TS 24　**文献标志码**：A　**文章编号**：1673—1689(2015)03—0274—09

Heat Pump Concurrent Multi-Effect Evaporation System of High-Efficiency Saving Energy for Concentrating Sugar Cane Juice

NIAN Meiling， *RUAN Qi*， *JIANG Hao*， *HUANG Yiling*， *ZHOU Jiangjian*
(School of Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to greatly reduce the energy consumption of evaporation process in sugar plant, three kinds of energy-saving measures which include steam jet heat pump technology, extra vapor elicitation to preheat the sugar cane juice and condensate water flash are applied together in concurrent multi-effect evaporation system to concentrate sugar cane juice for the first time, meanwhile, the mathematical model of the system which is described as the form of matrix equation was established. The developed model has strong versatility, it not only can be simplified as a concurrent multi-effect evaporation model with different combinations of energy-saving measures, but also can achieve the function of extracting stream at any effect, and it can be generalized to the concentrate of other heat-sensitive solution by evaporating in food industry. There is an optimal injection coefficient and pumping position of the steam jet heat pump, and the mathematical model is high efficiency and energy saving when above three energy conservation measures are used simultaneously and the model is under optimal conditions. Iteration method combining with matrix

收稿日期：2014-05-07
基金项目：国家基础科学人才培养基金项目(J1103303)；国家大学生创新创业训练计划项目(201210386012)。
* **通信作者**：阮 奇(1956—)，男，福建古田人，教授，硕士研究生导师，主要从事化工过程模拟与优化、传质与分离等研究。
E-mail：hys@fzu.edu.cn

method is used to solve the model of concentrated sugar cane juice 4 effects concurrent evaporation system with heat pump. The simulation results show that the evaporation system developed is high efficiency and energy saving when above three energy conservation measures are used simultaneously and it is under the premise of satisfying the constraints, the steam consumption can save up to about 41% when the injection coefficient is 0.5 and pumping position are set to the second effect and the temperature of sugar cane juice is preheated to 90 ℃.

Keywords: sugar cane juice, concurrent multi-effect evaporation, heat pump, energy-saving, mathematical model, matrix method

迄今为止，多效蒸发仍然是食品工业众多产品深加工浓缩过程最重要、最常用的单元操作，例如果汁、蔬菜汁、糖汁和牛奶等溶液（通常是水溶液）的蒸发浓缩[1-5]。因蒸发过程要除去大量的水分，需要消耗大量的加热蒸汽（生蒸汽），是一种高能耗的单元操作，故在能源日益紧张的今天，如何大幅降低蒸发操作的能耗就显得特别重要。多效蒸发本质上是多次利用由溶液蒸发产生的二次蒸汽的汽化潜热达到节能的目的，理论上能耗会随着效数的增加而降低。但食品工业蒸发的溶液通常是热敏性物料，对第一效溶液的蒸发温度有限制、不能太高，如果汁、蔬菜汁和牛奶等最好第一效的蒸发温度不能太高，以尽量保持其营养成分和天然风味[6]。蔗糖汁的蒸发温度可比果汁高一些，但温度太高亦会导致糖汁色值增加和蔗糖转化。为避免该现象的发生，第一效糖汁的蒸发温度也不应高于 125 ℃[7]。综上可知，食品工业的溶液蒸发时要求第一效溶液的沸点比较低，使第一效加热蒸汽的温度不能太高，系统总的有效传热温度差不大，这从技术上制约了效数的增加，通常 3 效或 4 效常见，要进一步节能须另辟蹊径。除多效蒸发以外，已报道的蒸发节能措施还有：利用二次蒸汽汽化潜热的蒸汽喷射式热泵技术[6,8-9]，机械压缩式热泵技术[10]，引出额外蒸汽预热原料液[4,11-13]和利用系统余热的节能措施（如冷凝水闪蒸[4,12-15]和溶液闪蒸[12]）。在上述节能措施中除溶液闪蒸以外，热泵技术、冷凝水闪蒸和引出额外蒸汽预热原料液，对并流多效蒸发系统均适用。在低温低压下蒸发热敏性食品溶液，采用蒸汽喷射式热泵技术比机械压缩式热泵技术更经济[6]。此外，因并流多效蒸发流程具有料液可由高压效自动流向低压效而无需泵送（但若蒸发器的高度较高时仍需泵送）、料液会自蒸发、完成液温度低、系统的能量利用较合理等优点，在果汁、糖汁等料液的蒸发浓缩时经常采用[6,16]。

满足食品工业热敏性溶液蒸发时第一效加热蒸汽温度不能太高的限制，同时采用蒸汽喷射式热泵技术，引出额外蒸汽预热原料液和冷凝水闪蒸 3 种节能措施的高效节能热泵并流多效蒸发系统的流程、数学模型和算法，均鲜见于国内外文献报道。本文中将建立同时具有上述 3 种节能措施的高效节能热泵并流多效蒸发系统的数学模型，研究模型的求解方法，模拟并分析上述 3 种节能措施对浓缩蔗糖汁的并流多效蒸发过程的影响，这对深入了解食品工业热敏性溶液的并流多效蒸发过程的规律，提高其设计与操作水平，大幅降低其能耗，都具有重要的意义。

1 数学模型

1.1 工艺流程

包含蒸汽喷射式热泵技术，引出额外蒸汽预热原料液（蔗糖汁）和冷凝水闪蒸等 3 种节能措施的并流多效蒸发系统的工艺流程如图 1 所示。图 1 中蒸发器的总效数为 n，任意效用 i 表示，则 i=1,2,…,n；用 q 代表抽汽位置，q 可在除末效（第 n 效）以外的任意第 i 效。来自锅炉温度为 T_s 的高压生蒸汽进入蒸汽喷射热泵，将第 q 效低压的部分二次蒸汽抽吸进热泵，两者混合后温度为 T_0 的混合汽作为第 1 效的加热蒸汽，而第 1 效蒸发产生的温度为 T_1 的二次蒸汽作为第 2 效的加热蒸汽，以此类推直至末效（第 n 效），末效产生的二次蒸汽则全部进入冷凝器（图 1 中未画出），冷凝后排除。经过多级串联预热器预热后的糖汁，即图 1 中离开第 n-1 级预热器的糖汁，进入第 1 效蒸发器进行蒸发，糖汁依次在各效蒸发器中蒸发浓缩至规定的浓度后作为产品

离开末效。除末效(第 n 效)以外,各效均设有冷凝水闪蒸器(闪蒸器共有 $n-1$ 个,图 1 中示意画到第 i 个),各闪蒸器闪蒸出的二次蒸汽与本效蒸发器蒸发出的二次蒸汽汇合后一起作为下一效的加热蒸汽,闪蒸后离开各闪蒸器的冷凝水与离开下一效蒸发器加热室的冷凝水汇合后一起进入下一个冷凝水闪蒸器继续闪蒸。因多效蒸发越往后效,二次蒸汽的温度越低,且第 n 效二次蒸汽不引出而全部进入冷凝器冷凝除去,故可设 $n-1$ 级预热器,从第 $n-1$ 效引出的额外蒸汽作为温度最低的第 1 级糖汁预热器的加热蒸汽,以此类推,蒸发器的序号为 $n-1$,$n-2$,…,i,…,1,相应的预热器序号为 1,2,…,j,…,$n-1$。因从各效引出的额外蒸汽量不多,其在各级预热器冷凝后的冷凝水的余热也不多,故不考虑它们的余热闪蒸利用,以使工艺流程及数学模型不至于太复杂。

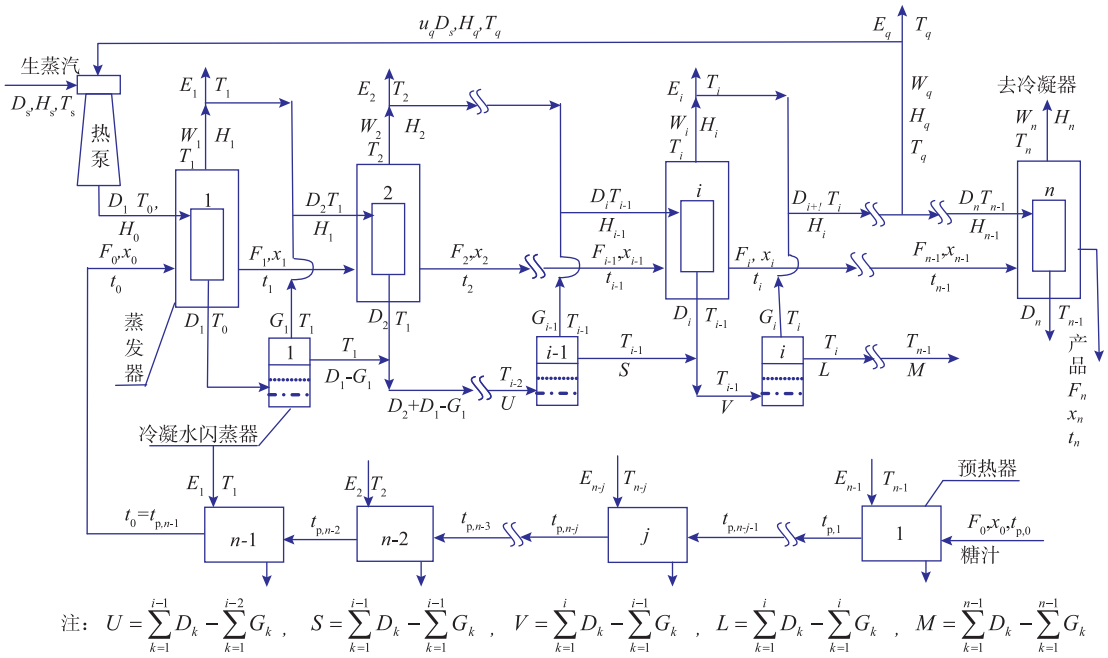


图 1　热泵并流多效蒸发系统流程示意

Fig. 1　Flow chart of concurrent multi-effect evaporation system with heat pump

1.2　系统物料衡算

假设蒸发时溶质蔗糖不挥发也不析出,对图 1 所示任意第 i 效蒸发器糖汁中的溶质进行衡算有

$$F_0x_0=F_ix_i=(F_0-W_1-\cdots-W_i)x_i \tag{1}$$

系统总蒸发水分量 W 为各效水分蒸发量之和,

$$W=\sum_{i=1}^{n}W_i=F_0\left(1-\frac{x_0}{x_n}\right) \tag{2}$$

1.3　系统热量衡算

1.3.1　蒸发器的热量衡算　假定各效加热蒸汽的冷凝水在相应的饱和温度下排出,对图 1 所示的任意第 i 效(i=1,2,…,n)蒸发器进行热量衡算,将二次蒸汽近似视为饱和蒸汽[17],将糖汁的比热容近似认为是由溶质蔗糖和水的比热容成线性加和关系[17]构成,利用式(1),并考虑热损失及浓缩热,采用与文献[4,17]类似的方法推导、整理,可得

$$W_i=\{\alpha_iD_i+[F_0c_0-c^*(W_1+\cdots+W_{i-1})]\beta_i\}\eta_i \tag{3}$$

式(3)中:η_i 为任意第 i 效的热利用系数,对于糖汁的蒸发,可取 η_i=0.98[4];α_i、β_i 分别为任意第 i 效的蒸发系数和自蒸发系数,定义为

$$\alpha_i=(H_{i-1}-c^*T_{i-1})/(H_i-c^*t_i),$$

$$\beta_i=(t_{i-1}-t_i)/(H_i-c^*t_i)。$$

1.3.2　冷凝水闪蒸器的热量衡算　对图 1 所示的并流多效蒸发系统,只设一台蒸汽喷射式热泵且热泵的抽汽位置 q 可在除第 n 效以外的任意效,即 $1\leqslant q_{n-1}$,除第 n 效以外,各效均采用冷凝水闪蒸,引出额外蒸汽预热糖汁,则各效蒸发器的加热蒸汽量 D_i 的计算式为

$$\begin{cases}D_i=D_1=D_s(1+u_q), & i=1\\ D_i=W_{i-1}+G_{i-1}-E_{i-1}-D_su_{i-1}, & 2\leqslant i\leqslant n\end{cases} \tag{4}$$

式(4)中:u_q 为蒸汽喷射热泵对第 q 效(被抽汽效)

二次蒸汽的喷射系数，kg/kg；二次蒸汽量：生蒸汽量，kg/kg；D_s 为生蒸汽的质量流量，kg/s。故 i=1 时即第 1 效的加热蒸汽流量

$$D_1=D_s(1+u_q)$$

为混合汽（生蒸汽和被抽吸的二次蒸汽混合）的流量，kg/s。当 $i-1\neq q$ 时，$u_{i-1}=0$；当 $i-1=q$ 时，$u_{i-1}=u_q$；当系统不采用热泵技术时，$u_q=0$，$u_{i-1}=0$，$D_1=D_s$。

对图 1 所示的第 i 个（i=1,2,…,$n-1$）冷凝水闪蒸器进行热量衡算，可得

$$Vc^*T_{i-1}=G_iH_i+Lc^*T_i \quad (5)$$

式(5)中：V、L 的表达式见图 1 的说明，把 V、L 的表达式代入式(5)并利用式(4)，经过推导、整理，可得

$$G_i=[D_s(1+u_q-\sum_{k=1}^{i-1}u_k)+\sum_{k=1}^{i-1}W_k-\sum_{k=1}^{i-1}E_k]c^*\omega_i \quad (6)$$

式(6)中：i=1,2,…,$n-1$；ω_i 为第 i 个冷凝水闪蒸器的闪蒸系数，定义为

$$\omega_i=(T_{i-1}-T_i)/(H_i-c^*T_i);$$

当 i=1 求 G_1 时式(6)中 $\sum_{k=1}^{i-1}W_k$、$\sum_{k=1}^{i-1}E_k$ 和 $\sum_{k=1}^{i-1}u_k$ 项均为零。

1.4 传热面积的计算

1.4.1 各效蒸发器传热面积的计算 蒸发器为恒温差传热过程，第 i 效蒸发器的传热面积 A_i 可按下式[4,16-17]计算

$$A_i=Q_i/(K_i\Delta t_i)=D_ir_i/(K_i\Delta t_i) \quad (7)$$

通常为了制造、安装和检修方便起见，各效蒸发器按等面积 A_i 原则设计，在计算各效传热面积时要先按等面积原则[4,16-17]将系统总有效传热温度差 Δt_c 分配给各效，即确定各效的有效传热温度差 Δt_i，然后用式(7)迭代计算 A_i 直至各效A_i 相等为止[4]。文献[4] 提出的迭代法结合矩阵法是求解复杂多效蒸发系统计算难题的高效算法，决定采用该法计算，但文献[4]无热泵，而本文中建立的是有热泵的多效蒸发系统的模型，系统总的有效传热温度差Δt_c 的定义与文献[4]不同，定义

$$\Delta t_c=T_0-T_k-\sum_{i=1}^{n}(\Delta'_i+\Delta''_i+\Delta'''_i) \quad (8)$$

式(8)中：T_0 为第 1 效加热蒸汽即混合汽的温度，其值与混合汽的焓值 H_0 有关；T_k 为冷凝器中二次蒸汽温度，℃；Δ'_i 为第 i 效糖汁蒸汽压下降引起的温度差损失，可用文献[4,16]中的公式

$$\Delta'_i=1.78x_i+6.22x_i^2$$

计算；若为果汁等其它热敏性溶液，则可用文献[6]介绍的吉辛科公式计算 Δ'_i；Δ''_i 为第 i 效的液柱静压头引起的温度差损失，对热敏性溶液蒸发和热泵蒸发，均希望温度差损失越小越好，故决定采用降膜蒸发器，其 Δ''_i=0[16]；Δ'''_i 为第 i 效蒸汽在效间流动造成的温度差损失，可取Δ'''_i=1 ℃[4,17]。

1.4.2 各级预热器传热面积的计算 预热器为变温差传热过程，第 j 级预热器的传热面积可按下式[13]计算

$$A_{p,j}=F_0c_0\ln[(T_{p,n-j}-t_{p,j-1})/(T_{p,n-j}-t_{p,j})]/K_{p,j} \quad (9)$$

1.5 热泵喷射系数的计算

喷射系数不仅是蒸汽喷射式热泵的重要技术指标和设计依据，也是影响热泵多效蒸发过程的重要参数。可采用文献[18]导出的公式，计算蒸汽喷射热泵对第 q 效（被抽汽效）二次蒸汽的喷射系数 u_q，

$$u_q=\varphi_1\varphi_2\varphi_3\xi[1+(H_s-H_0)/(H_0-H_q)]^{1/2}-1 \quad (10)$$

式(10)中：H_s、H_0 和 H_q 分别为生蒸汽、混合蒸汽和第 q 效蒸发器二次蒸汽的焓值，J/kg；φ_1、φ_2 和 φ_3 分别为工作喷嘴、混合室和扩散室的速度系数，可分别取值为 0.95、0.975 和 0.9；ξ 为修正系数，计算时其值可取为 1.1。

上述模型中许多参数涉及到饱和水蒸气的焓 H_i 和汽化潜热r_i，J/kg；为了编程计算方便，采用文献[4]的回归式计算 H_i 和r_i。

2 模型求解

本文中建立的是包含蒸汽喷射式热泵技术、冷凝水闪蒸和引出额外蒸汽预热糖汁等 3 种节能措施的并流多效蒸发系统的数学模型，模型中的众多计算式实质上是一个很复杂且庞大的非线性方程组，求解相当困难，决定采用高效的迭代法结合矩阵法[4]并结合本文的特点求解，为此须将模型中的非线性方程组写成矩阵方程的形式。

2.1 系统物料衡算和热量衡算的矩阵方程

把式(4)代入式(3)可得各效蒸发水分量的计算式 n 个，把式(4)代入式(6)可得各个冷凝水闪蒸器的闪蒸汽量计算式 $n-1$ 个，由式(2)可得总蒸发水分量计算式 1 个，上述计算式共 $2n$ 个，待求的未知量有 $2n$ 个(D_s,W_1,W_2,…,W_n,G_1,G_2,…,G_{n-1})。将上述各式写成矩阵方程，该矩阵是一个稀疏矩阵，

将其写成分块矩阵会使原矩阵结构简单,运算更容易。另外,为了让矩阵能够实现有或无热泵技术,以及热泵可在任意效抽汽的通用性,在个别分块矩阵(后面的 $\boldsymbol{A}_3$ 分块矩阵)中人为加上了一些控制参数。其具体结构如下:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_2 \\ \boldsymbol{A}_3 & \boldsymbol{A}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_1 \\ \boldsymbol{B}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C}_1 \\ \boldsymbol{C}_2 \end{bmatrix} \tag{11}$$

其中

$$\boldsymbol{A}_1 = \begin{bmatrix} \alpha_1\eta_1(1+u_q) & -1 & & & & & & \\ -\alpha_2\eta_2u_1 & \alpha_2\eta_2-c^*\beta_2\eta_2 & -1 & & & & & \\ -\alpha_3\eta_3u_2 & -c^*\beta_3\eta_3 & \alpha_3\eta_3-c^*\beta_3\eta_3 & -1 & & & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & & & \\ -\alpha_{q+1}\eta_{q+1}u_q & -c^*\beta_{q+1}\eta_{q+1} & \cdots & -c^*\beta_{q+1}\eta_{q+1} & \alpha_{q+1}\eta_{q+1}-c^*\beta_{q+1}\eta_{q+1} & -1 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \\ -\alpha_n\eta_nu_{n-1} & -c^*\beta_n\eta_n & \cdots & -c^*\beta_n\eta_n & \cdots & -c^*\beta_n\eta_n & \alpha_n\eta_n-c^*\beta_n\eta_n & -1 \\ 0 & 1 & 1 & \cdots & 1 & \cdots & 1 & 1 \end{bmatrix}_{(n+1)(n+1)},$$

$$\boldsymbol{A}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \alpha_2\eta_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \alpha_3\eta_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_i\eta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_n\eta_n \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}_{(n+1)(n-1)}, \quad \boldsymbol{C}_1 = \begin{bmatrix} -F_0c_0\beta_1\eta_1 \\ \alpha_2\eta_2E_1-F_0c_0\beta_2\eta_2 \\ \alpha_3\eta_3E_2-F_0c_0\beta_3\eta_3 \\ \vdots \\ \alpha_i\eta_iE_{i-1}-F_0c_0\beta_i\eta_i \\ \alpha_n\eta_nE_{n-1}-F_0c_0\beta_n\eta_n \\ F_0(1-x_0/x_n) \end{bmatrix}_{(n+1)(n-1)},$$

$$\boldsymbol{A}_3 = \begin{bmatrix} k_1c^*\omega_1(1+u_q) & & & & & 0 & 0 \\ k_2c^*\omega_2(1+u_q) & c^*\omega_2 & & & & 0 & 0 \\ k_ic^*\omega_i(1+u_q) & c^*\omega_i & c^*\omega_i & & & 0 & 0 \\ \vdots & \cdots & \cdots & \ddots & & \vdots & \vdots \\ k_{n-1}c^*\omega_{n-1}(1+u_q) & c^*\omega_{n-1} & \cdots & \cdots & c^*\omega_{n-1} & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(n-1)(n+1)}, \quad \boldsymbol{A}_4 = \begin{bmatrix} -1 & & & \\ & -1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & -1 \end{bmatrix}_{(n-1)(n+1)},$$

$$\boldsymbol{B}_1 = \begin{bmatrix} D_s \\ W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix}_{(n+1)\times1}, \quad \boldsymbol{B}_2 = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{n-1} \end{bmatrix}_{(n-1)\times1}, \quad \boldsymbol{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ c^*\omega_2E_1 \\ c^*\omega_3(E_1+E_2) \\ \vdots \\ c^*\omega_{n-1}(E_1+E_2+\cdots+E_{n-2}) \end{bmatrix}_{(n-1)\times1}。$$

2.2 矩阵方程的特点及通用性

矩阵方程式(11)是描述包含热泵技术、冷凝水闪蒸和引出额外蒸汽预热糖汁等 3 种节能措施的并流多效蒸发系统的数学模型,具有结构清晰、意义明确、易于编程求解和通用性强等特点,易简化为其它多种并流蒸发模型。当热泵在任意第 q (q=1,2,…,n-1)效抽汽时,矩阵方程式(11)中的分块矩阵 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_3$ 中的 $u_q\neq0$,而令 $u_1,u_2,\cdots,u_{q-1},u_{q+1},\cdots,u_{n-1}=0$,且取 $\boldsymbol{A}_3$ 中的控制参数 $k_{q+1},k_{q+2},\cdots,k_{n-1}=1/(1+u_q)$,取控制参数 $k_1,k_2,\cdots,k_1,k_2,\cdots,k_q=1$,即可实现热泵在除第 n 效以外的任意效抽汽的功能;当系统不设置热泵时,令分块矩阵 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_3$ 中的 $u_q=0$,其它参数的取值同上所述,则该矩阵方程简化为文献[4]导出的没有热泵技术、有其它两种节能措施的并流多效蒸发模型。若令矩阵方程式(11)中的分块矩阵 $\boldsymbol{A}_2$、$\boldsymbol{A}_3$、$\boldsymbol{A}_4$、$\boldsymbol{B}_2$、$\boldsymbol{C}_2$ 为零矩阵,则该矩阵方程简化为没有冷凝水闪蒸、有其它两种节能措施的并流多效蒸发模型。同理,还可以简化为无上述节能措施或只有其中一二种节能措施的并流多效蒸发模型。上述情况充分说明该模型具有很强的通用性。

2.3 迭代法结合矩阵法简介

采用收敛速度快的迭代法结合矩阵法[4]并结合本文中所建模型的特点求解,算法步骤如下:

1) 输入设计参数(包括 n、q、c_0、F_0、t_0、x_0、x_n、u_q、T_0、T_s、T_k、K_i 等),凭经验设定 α_i、β_i、ω_i、r_i、Δt_c 等变量的初值,使原非线性方程组即矩阵方程式(11)转化成线性方程组;

2) 用高斯-约旦消去法解该线性方程组式(11),得出 2.1 节中提及的 $2n$ 个未知量;

3)按各效等面积原则[4,16-17]得出各效有效传热温度差 Δt_i,计算各效 t_i、T_i、H_i(包括 H_q)和$\Sigma\Delta t_i$等参数;

4)通过计算修正 α_i、β_i、ω_i、r_i、Δt_c 等变量的值,修正Δt_c 时须将已知的 u_q、H_s 和计算得到的 H_q 代入式(10),求出混合汽的焓值 H_0,将 H_0 代入温度与焓的关系式[4]求出 T_0,再用 T_0、T_k 和$\Sigma\Delta t_i$ 求出Δt_c;

5）将糖汁初始温度和要求的预热温度间的差值，按等温差的原则分配到各级预热器，计算各级预热器出口糖汁温度 $t_{p,j}$；

6）计算各级预热器传热面积 $A_{p,j}$；

7）判断各级 $A_{p,j}$ 是否符合相等的精度要求，若不符合则按各级等面积原则更新 $t_{p,j}$ 后再返回步骤 6）；

8）计算各效蒸发器传热面积 A_i，判断是否符合各效 A_i 相等的精度要求，若不符合则用修正后的有关变量的值返回步骤 2），再进行下一轮迭代计算，直至收敛为止。

实现上述算法的程序框图可参照文献[4]的程序框图。

上述数学模型中除已在文中说明的符号以外，其它符号的意义参见文后符号说明。

3 算例及讨论

拟设计一个并流四效蒸发系统，用于将质量流量为 5.79 kg/s 的蔗糖汁从初始质量分数 0.1 浓缩到 0.5。已知糖汁的初始比热容[4,16]为

$$c_0=4\ 190-2\ 350x_0\quad (\mathrm{J/(kg\cdot ℃)})$$

初始温度 t_0 为 26.7 ℃，冷凝器中的二次蒸汽饱和温度为 51.3 ℃。为避免高温导致蔗糖转化的现象发生，第一效糖汁的蒸发沸点 t_1 应不高于 125 ℃[7]，故无热泵技术时取进入第 1 效的生蒸汽温度 T_1 为 130 ℃，以保证 t_1<125 ℃。但低压低温的生蒸汽通常是由高压生蒸汽通过节流减压得到的，这会产生能量的无效贬值，造成热能的浪费[19]。有热泵技术时取进入蒸汽喷射式热泵的生蒸汽温度为 170 ℃，要求生蒸汽与被抽吸的低温二次蒸汽混合后进入第 1 效的混合汽温度 T_0 不超过 130 ℃，以保证 t_1<125 ℃。采用热泵技术既避免了高压生蒸汽因节流减压造成的能量贬损，又使低温二次蒸汽的汽化潜热得到充分利用，达到了节能的目的。蒸发器为不锈钢制作的降膜蒸发器，各效蒸发器的传热系数[20]K_1~K_4 分别为 2 600、1 700、1 280、871 W/(m²·℃)，各级预热器传热系数 $K_{p,1}$~$K_{p,3}$ 均为 1 000 W/(m²·℃)，各效蒸发器和各级预热器均采用等面积原则进行设计。

浓缩糖汁的热泵并流多效蒸发系统的通用数学模型及其求解算法已用 Visual Basic 6.0 语言开发成通用设计软件，分别将各种设计情况的设计条件输入并运行软件，设计结果如表 1、图 2 和图 3 所示。

表 1　算例模拟计算结果

Table 1　Calculation results of sample simulation

No.	冷凝器数	t_0/℃	q	u_q	ΣA_i/m²	$\Sigma A_{p,j}$/m²	增加总面积	D_s/(kg/s)	节省耗汽量
①	0	26.7	—	—	466.08	—	—	2.03	—
②	3	26.7	—	—	478.24	—	2.61%	1.93	4.93%
③	3	预热至 70	—	—	434.76	19.17	−2.60%	1.71	15.76%
④	3	预热至 90	—	—	415.36	35.85	−3.19%	1.62	20.20%
⑤	3	预热至 90	2	0.5	520.64	62.61	25.14%	1.19	41.38%

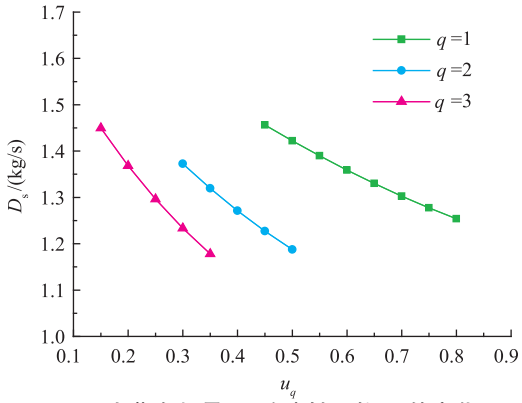


图 2　生蒸汽耗量 D_s 随喷射系数 u_q 的变化

Fig. 2　Effect of injection coefficiton on steam consumption varies

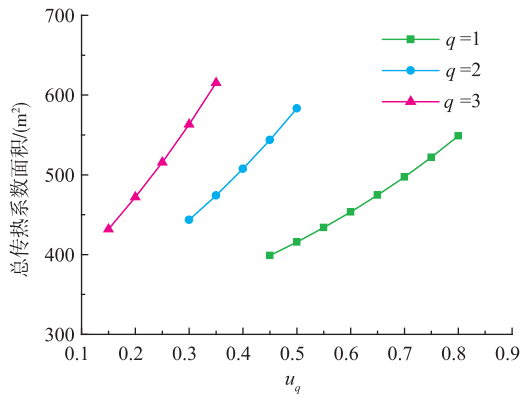


图 3　总传热系数面积 $\Sigma A_i+\Sigma A_{p,j}$ 随喷射 u_q 的变化

Fig. 3　Effect of injection coefficient on total area varies

表 1 中 ΣA_i 是 4 效蒸发器的传热面积之和；ΣA_{pj} 是 3 级预热器的传热面积之和；生蒸汽消耗量 D_s 对无热泵的①—④这 4 种情况即为第 1 效的加热蒸汽量 D_1，对有热泵的⑤这种情况则为进入蒸汽喷射热泵的生蒸汽量 D_s。表 1 中①为无节能措施，②为采用冷凝水闪蒸节能措施，③和④均为同时采用引出额外蒸汽预热糖汁（但④的预热温度高于③）和冷凝水闪蒸两种节能措施的设计结果；表 1 中的⑤和图 2、图 3 中的数据均为同时采用蒸汽喷射式热泵技术、引出额外蒸汽预热糖汁（预热温度与④相同）和冷凝水闪蒸 3 种节能措施，且满足混合汽温度 T_0<130 ℃和各效降膜蒸发器的有效传热温度差 $\Delta t_i \geqslant 5$ ℃[20]两个约束条件的设计结果。比较分析这些设计结果可知：

1）3 种节能措施均有较显著的节能效果，节能效果（即节省的生蒸汽耗量 D_s）由大到小的顺序是蒸汽喷射式热泵技术>引出额外蒸汽预热糖汁>冷凝水闪蒸。同时采用 3 种节能措施节能效果最大。

2）引出额外蒸汽预热糖汁不仅节能效果显著，而且还减少了蒸发系统的总传热面积，达到一箭双雕的目的；糖汁预热温度 t_0 越高，节能效果越好，因最后一级预热器是引出温度为 T_1 的第一效二次蒸汽作为加热蒸汽，故 t_0 受 T_1 的制约不可能太高，即 $t_0<T_1$。这些现象可解释为糖汁的预热温度 t_0 越高，引出的额外蒸汽量就越多，利用的二次蒸汽的汽化潜热也越多（即越节能）；t_0 越高，第一效蒸发器的热负荷就减小越多，生蒸汽消耗量也减少越多（即越节能），蒸发器的传热面积也减小越多，虽然增加了预热器的传热面积，但两者相加的总面积反而减少。

3）在满足 T_0<130 ℃和 $\Delta t_i \geqslant 5$ ℃两个约束条件的前提下，由图 2 与图 3 可看出：当热泵的抽汽位置 q 相同时，喷射系数 u_q 越大，被抽吸利用的低温二次蒸汽的量就越多，所需的生蒸汽耗量 D_s 就越小，但混合汽的温度也越低，总有效传热温度差 Δt_c 和各效有效传热温度差 Δt_i 均越小，总传热面积则越大，反之亦然；当热泵的喷射系数 u_q 相同时，q 越大即抽汽位置越往后，所抽的二次蒸汽的汽化潜热已在前面的效得到更多次的利用，则所需的生蒸汽耗量 D_s 就越小，但 T_0、Δt_c 和 Δt_i 均越小，总传热面积则越大，反之亦然。另外，热泵的喷射系数 u_q 和抽汽位置 q 都不能过大，过大时会导致 T_0、Δt_c 和 Δt_i 均下降过多，使得 Δt_i 不满足约束条件。综上可知，在满足 T_0 和 Δt_i 的约束条件下，热泵存在最佳的喷射系数 u_q 和最佳的抽汽位置 q，使得生蒸汽费用（由生蒸汽消耗量决定）与设备投资折旧费用（主要由传热面积决定）之和最少。这是热泵多效蒸发最优化问题，有待今后继续深入研究。

4）在表 1、图 2 和图 3 的所有设计结果中，表 1 中同时采用蒸汽喷射式热泵技术（抽汽位置在第 2 效，喷射系数为 0.5），引出额外蒸汽将糖汁预热至 90 ℃和冷凝水闪蒸 3 种节能措施的第⑤种设计结果是最好的，生蒸汽消耗量节省高达 41.38%，但总传热面积亦增加了 25.14%。文献[21]指出，对蒸发器材质为不锈钢或碳钢的多效蒸发系统，生蒸汽费用占年总费用的 88%~96%；而设备投资折旧费用（主要取决于蒸发器的传热面积）仅占年总费用的 12%~4%。根据文献[21]的观点可知，表 1 中第⑤种设计结果所节省的生蒸汽消耗量带来的经济效益将远远大于因传热面积增加而增加的设备投资折旧费用，这充分说明同时采用上述 3 种节能措施，且在满足相关约束条件下使糖汁预热温度尽可能高，并使热泵的喷射系数和抽汽位置均接近最佳值时的浓缩糖汁的热泵并流多效蒸发系统是高效节能的。

5）综上并推论可知，对食品工业的众多热敏性溶液的蒸发而言，本文作者所建的热泵并流多效蒸发系统的数学模型均可适用，对不同溶液的蒸发，若均采用降膜蒸发器，则 Δt_i 的约束相同，仅进入第 1 效的混合汽温度 T_0 的约束不同，如果汁、蔬菜汁和牛奶的 T_0 将比糖汁的 T_0 低较多。T_0 越低，最佳的热泵喷射系数 u_q 和抽汽位置 q 将越大。

4 结 语

1）首次建立的热泵并流多效蒸发系统的数学模型具有很强的通用性。模型同时包含蒸汽喷射式热泵技术、冷凝水闪蒸和引出额外蒸汽预热原料液 3 种节能措施，并以矩阵方程的形式表达，可实现上述节能措施的自由组合和热泵在任意效抽汽的功能，还可推广用于食品工业其它热敏性溶液的蒸发浓缩。

2）所建的模型具有高效节能性。浓缩蔗糖汁的热泵并流四效蒸发系统的模拟结果表明，当热泵的喷射系数为 0.5、抽汽位置在第 2 效，引出额外蒸汽将糖汁预热至 90 ℃，并采用冷凝水闪蒸时系统是

高效节能的。节省的生蒸汽消耗量高达41%左右,其带来的经济效益远远大于设备投资折旧费用因传热面积增加25%左右而增加的费用,这在能源日益紧张的今天意义尤为重要。

3)对热泵并流多效蒸发系统而言,在满足T_0和Δt_i的约束条件下,热泵存在最佳的喷射系数u_q和最佳的抽汽位置q;对食品工业的众多热敏性溶液的蒸发而言,若均采用降膜蒸发器,则各效有效传热温度差Δt_i的约束相同,仅进入第1效的混合汽温度T_0的约束不同,T_0越低、最佳的u_q和q将越大。

附录 符号说明:

c_0—原料液的比热容,J/(kg·℃)

c^*—水的比热容, J/(kg·℃)

D_i—第i效加热蒸汽质量流量,kg/s

E_i—第i效引出的额外蒸汽质量流量,kg/s

F_0—原料液的质量流量,kg/s

F_i —第i效完成液质量流量,kg/s

G_i —第i效冷凝水闪蒸汽质量流量,kg/s

H_i —第i效二次饱和蒸汽的焓,J/kg

K_i —第i效蒸发器的传热系数,W/(m²·℃)

K_{pj} —第j级预热器的传热系数,W/(m²·℃)

Q_i —第i效传热速率(热流量),W

T_0 —混合汽的饱和温度,℃

T_i —第i效二次饱和蒸汽温度,℃

T_k —冷凝器中二次饱和蒸汽温度,℃

T_s —生蒸汽的饱和温度,℃

$T_{p,n-j}$—第j级预热器加热蒸汽温度,℃

t_i —第i效溶液沸点,℃

t_{pj} —第j级预热器出口溶液的温度,℃

W_i —第i效水分量蒸发速率,kg/s

x_0 —糖汁初始质量分数

x_i —第i效浓缩糖汁质量分数

x_n —末效浓缩糖汁质量分数

参考文献:

[1] Miranda V,Simpson R. Modelling and simulation of an industrial multiple effect evaporator:tomato concentrate [J]. **Journal of Food Engineering**,2005,66(2):203-210.

[2] Higa M,Freitas A J,Bannwart A C,et al. Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant [J]. **Applied Thermal Engineering**,2009,29(2):515-522.

[3] Ye A,Singh H,Taylor M,et al. Disruption of fat globules during concentration of whole milk in a pilot scale multiple-effect evaporator[J]. **International Journal of Dairy Technology**,2005,58(3):143-149.

[4] 阮奇,陈文波,黄诗煌,等. 复杂并流多效蒸发系统的数学模型与矩阵解法[J]. 中国工程科学,2001,3(4):36-41.
RUAN Qi,CHEN Wenbo,HUANG Shihuang,et al. The mathematics model and matrix method of complex cocurrent multi-effect evaporation[J]. **Engineering Science**,2001,3(4):36-41.(in Chinese)

[5] 杨同舟,于殿宇. 食品工程原理[M]. 第2版. 北京:中国农业出版社,2013:200-204.

[6] 无锡轻工业学院,天津轻工业学院. 食品工程原理:下册[M]. 北京:中国轻工业出版社,1993.

[7] 霍汉镇. 现代制糖化学工程与工艺[M]. 北京:化学工业出版社,2008:278-281.

[8] Kumar R S,Mani A,Kumaraswamy S. Analysis of a jet-pump-assisted vacuum desalination system using power plant waste heat [J]. **Desalination**,2005,179(1):345-354.

[9] 邢晓康,魏峰,史晓平,等. 三效顺流蒸汽喷射式热泵蒸发系统的计算[J]. 现代化工,2013,33(8):117-119.
XING Xiaokang,WEI Feng,SHI Xiaoping,et al. Calculation of three-effect downstream steam jet heat pump evaporation system [J]. **Modern Chemical Industry**,2013,33(8):117-119.(in Chinese)

[10] 赵庆霞,陶乐仁,黄理浩,等. 机械压缩式热泵蒸发系统在碱液浓缩中的应用研究[J]. 现代化工,2013,33(3):91-93.
ZHAO Qingxia,TAO Reren,HUANG Lihao,et al. Application of mechanical compression heat pump evaporation system in alkali concentration[J]. **Modern Chemical Industry**,2013,33(3):91-93.(in Chinese)

[11] Kaya D,Ibrahim Sarac H. Mathematical modeling of multiple-effect evaporators and energy economy [J]. **Energy**,2007,32(8):1536-1542.

[12] Khanam S,Mohanty B. Energy reduction schemes for multiple effect evaporator systems[J]. **Applied Energy**,2010,87(4):1102-1111.

[13] 李玲,阮奇. 平流多效蒸发系统的数学模型与求解[J]. 化工学报,2009,60(1):104-111.

LI Ling,RUAN Qi. Mathemtical model and process simulation of parallel-feed muti-effect evaporation system [J]. **Journal of Chemical Industry and Engineering**,2009,60(1):104-111.(in Chinese)

[14] Bhargava R,Khanam S,Mohanty B,et al. Selection of optimal feed flow sequence for a multiple effect evaporator system[J]. **Computers & Chemical Engineering**,2008,32(10):2203-2216.

[15] 阮奇,黄诗煌,叶长燊,等. 复杂逆流多效蒸发系统常规设计的模型与算法[J]. 化工学报,2001,52(7):616-621.
RUAN Qi,HUANG Shihuang,YE Changshen. Conventional design model of complex countercurrent multi-effect evaporation and its algorithm[J]. **Journal of Chemical Industry and Engineering**,2001,52(7):616-621.(in Chinese)

[16] 谭天恩,窦梅. 化工原理:上册[M]. 第 4 版. 北京:化学工业出版社,2013.

[17] 上海化工学院,成都科技大学,大连工学院. 化学工程:第 1 册[M]. 北京:化学工业出版社,1980:316-352.

[18] 王权,向雄彪. 蒸汽喷射压缩器喷射系数计算方法研究[J]. 太阳能学报,1997,18(3):314-321.
WANG Quan,XIANG Xiongbiao. A study of method for calculation jet coefficient of steam jet compressor [J]. **Acta Energiae Solaris Sinica**,1997,18(3):314-321.(in Chinese)

[19] 蒋作良. 蒸发设备的节能型式[J]. 医药工程设计,1986(4):35-38.
JIANG Zuoliang. Saving type of evaporation equipment [J]. **Phmarmaceutical and Engineering Design**,1986 (4):35-38.(in Chinese)

[20] 涂伟萍,陈佩珍,程达芳. 化工过程及设备设计[M]. 北京:化学工业出版社,2000:35-55.

[21] 梁虎,王黎,朱平. 多效蒸发系统优化设计研究[J]. 化学工程,1997,25(6):48-51,55.
LIANG Hu,WANG Li,ZHU Ping. Study on the optimum design of muti-effect evaporation [J]. **Chemical Engineering**,1997,25(6):48-51,55.(in Chinese)

会　议　信　息

会议名称(中文):中国细胞生物学学会第 15 次全国会员代表大会暨 2015 年全国学术大会

开始日期: 2015-04-01　　结束日期: 2015-04-04
所在城市:广东省　深圳市　　主办单位:中国细胞生物学学会
承办单位:南方科技大学　　议题:细胞-生命的体现
会议主席:裴钢、朱清时　　E-MAIL: cscb@sibs.ac.cn
会议网站: http://www.cscb.org.cn/news.asp?id=2963

会议名称(中文):第一届全国玉米生物学学术研讨会

开始日期: 2015-04-04　　所在城市:湖北省　武汉市
具体地点:华中农业大学
主办单位:中国作物学会玉米专业委员会 农业部玉米生物学与遗传育种重点实验室
联系人: 许先凤　　联系电话: 027-87280141　　E-MAIL: maizemeeting@163.com
会议网站: http://www.chinacrops.org/news_display.asp?keyno=324&menucode=202

会议背景介绍: 为促进我国玉米科研工作者的合作与交流,展示我国玉米基础研究的最新科研成果,中国作物学会玉米专业委员会和农业部玉米生物学与遗传育种重点实验室定于 2015 年 4 月在华中农业大学召开 “第一届全国玉米生物学学术研讨会”。会议主办单位将特邀国外内外著名专家就植物生物学的最新进展做大会专题报告,从提交的论文摘要中筛选优秀做大会报告。 大会涵盖主题: 1)玉米重要性状基因/QTL 定位,克隆和分子机理; 2)玉米组学、细胞学和表观遗传学; 3)玉米分子育种理论与技术。