第59卷第5期
2019年9月
大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology
Vol. 59, No. 5
Sept. 2019

文章编号：1000-8608(2019)05-0441-08

基于超结构法的间接式功交换网络综合

滕佳志，庄 钰，杨 蕊，武 杨，刘琳琳，张 磊，都 健*

（大连理工大学 化工学院 化工系统工程研究所，辽宁 大连 116024）

摘要：由于间接式功交换网络在工业上应用广泛，提出了基于超结构模型的间接式功交换网络综合方法.通过构建分级超结构，以年度总费用最小为目标建立了混合整数非线性规划模型.根据设备操作曲线提出压力与流量的约束，实现了间接式功交换网络中流股间的可行匹配，得到了最优功交换网络结构.算例结果分析表明，最优功交换网络结构的年度总费用比未进行流股匹配的基础结构减少了29.04%，验证了模型的有效性与网络结构优化的可行性.

关键词：间接式功交换网络；超结构模型；同轴涡轮压缩机；流股匹配

中图分类号：TQ021.8 **文献标识码**：A **doi**：10.7511/dllgxb201905001

0 引 言

在化工生产过程中，一些大型的化工单元操作如精馏、蒸发等过程由许多工艺流股组成.目前对于质量交换网络（mass exchange network，MEN）和换热网络（heat exchange network，HEN）的综合过程研究较多[1]，除此之外，功也是化工生产过程中最基本的能源形式之一.

一些化工单元（如液化天然气的利用、煤气化等过程）中除了冷、热流股之外，还存在许多需压流股（需要加压的流股）和裕压流股（需要减压的流股）.由多个需压及裕压流股组成并在流股之间进行功量交换的网络结构称为功交换网络（work exchange network，WEN）[2].功交换网络的综合与优化，旨在通过对化工生产过程中的流股进行合理匹配，从而达到节能减排、降低总成本的目的[3].

功交换网络按照能量交换设备的不同分为直接式功交换网络和间接式功交换网络.直接式功交换网络通过直接式功交换器发生功交换，要求流股间具有最小压力差，对流股的压力上下限要求严格，且要求设备的密封性；间接式功交换网络通过间接式功交换器的轴进行功交换，不受流股压力差的限制，流股压力范围较大，而且在交换过程中高、低压流股不直接接触，功交换器结构简单，设备操作与维护方便，系统的稳定性也更好[4].因此，在工业生产中间接式功交换网络的运用更为广泛：液化天然气工艺中，高压天然气蕴含着大量的压力能，为了达到储存压力需要膨胀降压，对功的集成可以显著地降低成本[5]；Texaco煤气化工艺过程中，气化炉出口的高压灰水具有巨大的压力能，经沉降槽处理后的低压灰水需要被加压送至气化工序，二者之间通过功交换器回收了部分压力能，同时节省了大量力学能和电能，从而减少整个工艺过程的成本[6].

目前，间接式功交换网络综合方法主要有3种：问题表格法、转运模型法和超结构法.2011年，周华等根据换热网络与功交换网络的相似性，以最小的功公用工程消耗量为优化目标，提出了综合功交换网络的问题表格法[7].2012年，Razib等提出了一种基于流股分流的超结构模型，建立了以年度总费用最小为目标函数的混合整数非线性规划（MINLP）模型[8].2014年，Onishi等提出了一种新的数学模型，通过改变流股压力、优化设

收稿日期：2019-03-22； **修回日期**：2019-07-26.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（21776035，21576036）；中国博士后科学基金资助项目（2019TQ0045）.
作者简介：滕佳志（1991-），男，硕士生，E-mail：tengjiazhi@dlut.edu.cn；都 健*（1964-），女，博士，教授，博士生导师，E-mail：dujian@dlut.edu.cn.

备个数等方式，在进行功交换网络综合的同时考虑热集成[9]．2015年，庄钰等提出了一种基于转运模型的功交换网络综合方法，通过划分压力间隔，求解模型得到最小的功公用工程消耗量[2]．2016年，Huang等提出了一个更高效的MINLP模型来进行功热集成，明确考虑用于热量集成的恒定压力流股，并能够优化选择末端加热器和冷却器，以满足所需的目标温度[10]．2018年，Zhuang等考虑了等温和绝热过程，提出了基于转运模型对间接式功交换网络进行㶲分析的综合方法[11]．2018年，Nair等提出了一种综合功热网络(WHEN)的通用结构，该结构不要求预判流股压力和温度，且引入部分热物理性质，并提出新的MINLP模型[12]．

自1990年Yee等提出分级超结构模型用于求解换热网络综合问题[13]，近30年来超结构法被广泛研究，但从未通过建立超结构模型对间接式功交换网络进行流股匹配和能量交换方面的分析，也从未明确指出间接式功交换网络结构．本文基于超结构法求解间接式功交换网络综合问题，建立以年度总费用最小为目标函数的MINLP模型，对流股的功交换问题考虑流股具体匹配，通过算例分析，求解得到最优的网络结构．

1　问题描述

在化工过程中，含有I股经过膨胀减压($p_{i,\mathrm{out}}<p_{i,\mathrm{in}}, i=1,2,\cdots,I$)的高压(HP)流股和$J$股经过压缩加压($p_{j,\mathrm{out}}>p_{j,\mathrm{in}}, j=1,2,\cdots,J$)的低压(LP)流股．在网络结构中，通过同轴涡轮压缩机(single-shaft-turbine-cum-compressor，SSTC)在高、低压流股之间进行功交换，网络还包括以下设备单元：

(1)公用工程压缩机(独立压缩机)，通过蒸汽或电力进行驱动．

(2)公用工程涡轮机(独立涡轮机)，可产生电能．

(3)等焓膨胀阀，已知焦耳-汤姆孙系数．

为了降低求解时间和难度，做出了以下合理的假设：

(1)在SSTC单元中所有的压缩机和涡轮机都是单级的．

(2)所有的压缩机和涡轮机都是离心式的．

(3)除了通过膨胀阀的膨胀过程以外，其他所有的压缩和膨胀都视为绝热过程．

(4)每一个流股都视为理想气体．

(5)通过各阀的膨胀过程是等焓过程．

(6)流股在网络结构中不发生相变．

(7)任何压缩机和涡轮机所需要的启动能量为零．

(8)所有压缩机和涡轮机的效率已知，并视为常数．

(9)过程中不考虑高、低压流股之间的热交换．

(10)分离器和混合器的成本忽略不计．

2　超结构与数学模型

2.1　功交换网络超结构

每个高压(低压)流股从进口到出口共经过K_s级膨胀(压缩)，在每级中经过SSTC功交换器进行功交换或单独经过设备单元改变压力，最终在出口达到目标压力．

$$K_s=\max\{I,J\} \tag{1}$$

功交换网络超结构如图1所示，特点如下：

(1)本文超结构解决了功交换网络中的具体流股匹配问题，即高、低压流股在某个压力位置通过SSTC功交换器进行功量交换，以完成用能回收，并得到了具体的功交换网络结构．

(2)本文流股为逆流操作，无旁路，流股通过设备单元改变压力，超结构模型得到了简化．

(3)每级超结构内压缩和膨胀均为一级压缩和膨胀，本文对流量和压力之间的关系进行了明

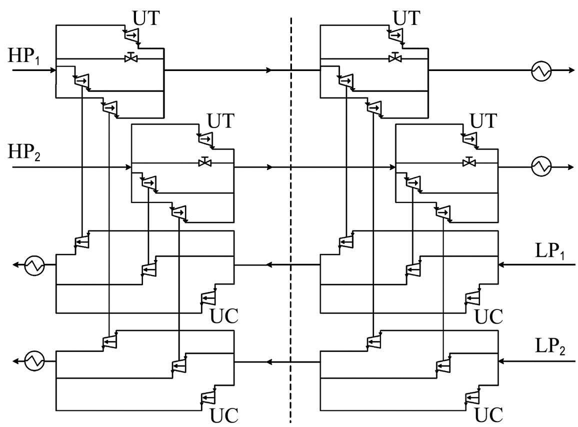


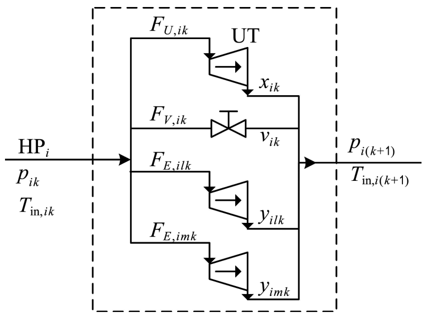
图1　功交换网络分级超结构

Fig. 1　Multi-stage superstructure in WEN

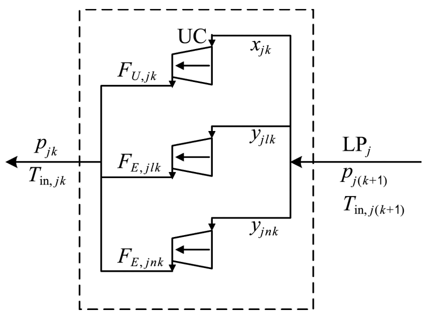
确约束，并要求等压混合以保持系统稳定，工程应用性更强.

(4)本文主要目的在于解决功交换的具体流股匹配问题以完成用能回收，而流股压力变化会导致温度改变，故仅在流股末端考虑换热，保证计算的完整性.

图 2 展示了高压流股 $i(1\leqslant i\leqslant I)$ 和低压流股 $j(1\leqslant j\leqslant J)$ 的 $k(k=1,2,\cdots,K_s)$ 级超结构. $F_{U,ik}$ 代表高压流股 i 通过 k 级公用工程涡轮机的流量；$F_{U,jk}$ 代表低压流股 j 通过 k 级公用工程压缩机的流量；$F_{E,imk}$ 代表高压流股 i 在 k 级第 m 条支流通过 SSTC 涡轮机的流量；$F_{E,jnk}$ 代表低压流股 j 在 k 级第 n 条支流通过 SSTC 压缩机的流量；$F_{V,ik}$ 代表高压流股 i 通过 k 级膨胀阀的流量. 每级超结构的开始有分离器，结束有混合器. 高压流股流经分离器分出了 $(J+2)$ 条支流，分别进入 SSTC 涡轮机、阀门和公用工程涡轮机；低压流股分为 $(I+1)$ 条支流，分别进入 SSTC 压缩机和公用工程压缩机，离开设备的支流在本级末端的混合器中合并成母体流股进入下一级. 如果在 k 级中存在单元设备，则流股发生对应的压力或温度



(a) 高压流股



(b) 低压流股

图 2　高、低压流股单级超结构

Fig. 2　One stage superstructure for a high-pressure(HP) stream and a low-pressure(LP) stream

的变化；如果 k 级中不存在单元设备，则流股正常通过管路.

在经过全部的压力操作设备单元后，流股完成了功量交换达到目标压力，为使流股达到目标温度，在流股末端设置了公用工程加热器或冷却器，经过加热或冷却使流股达到目标温度.

2.2　单元和流量

为了表示在每一级中的公用工程涡轮机和压缩机、阀门、单级 SSTC 功交换器的存在，本文定义了一些二进制变量(v_{ik}、x_{ik}、x_{jk}、y_{imk}、y_{jnk})表示超结构中各单元的存在. v_{ik} 表示高压流股 i 在 k 级有无膨胀阀；x_{ik} 表示高压流股 i 在 k 级有无公用工程涡轮机；x_{jk} 表示低压流股 j 在 k 级有无公用工程压缩机；y_{imk} 表示高压流股 i 在 k 级第 m 条支流有无 SSTC 涡轮机；y_{jnk} 表示低压流股 j 在 k 级第 n 条支流有无 SSTC 压缩机.

高压流股膨胀减压，本文规定阀门和公用工程涡轮机不能同时在 k 级中存在.

$$x_{ik}+v_{ik}\leqslant 1;\ 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant k\leqslant K_s \tag{2}$$

为确认 SSTC 功交换器的存在和流股匹配，分别将 k 级的高、低压分支流股进行编号 (i,j,m,n)，使得一个高压分支流股 (i,m) 有唯一确定的低压分支流股 (j,n) 与之对应. 若 k 级可以进行功交换，则 k 级对应的高、低压分支流股必定同时存在 SSTC 涡轮机和压缩机，即 k 级高、低压流股间存在 SSTC 功交换器.

$$\begin{gathered} y_{imk}=y_{jnk};\\ i=n,\ m=j,\ 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant m\leqslant J,\ 1\leqslant j\leqslant J,\\ 1\leqslant n\leqslant I,\ 1\leqslant k\leqslant K_s \end{gathered} \tag{3}$$

如果对于任一流股的任一级中所有的二元变量均为零，表示在该级中不存在 SSTC 涡轮机(压缩机)、公用工程涡轮机(压缩机)、膨胀阀等设备单元，即流股在这一级中没有压力变化.

由于流股进出口流量相同，各分支流股根据质量守恒定律得到

$$\begin{gathered} F_{V,ik}+F_{U,ik}+\sum_{m=1}^{J}F_{E,imk}=F_i;\\ 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant k\leqslant K_s \end{gathered} \tag{4}$$

$$\begin{gathered} F_{U,jk}+\sum_{n=1}^{I}F_{E,jnk}=F_j;\\ 1\leqslant j\leqslant J,\ 1\leqslant k\leqslant K_s \end{gathered} \tag{5}$$

只有上述设备单元存在时才会有流量通过，

但当这些设备单元不存在时，通过的流量为零.

$$F_{V,ik} \leqslant F_i v_{ik}\text{；}1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{6}$$

$$F_{U,ik} \leqslant F_i x_{ik}\text{；}1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{7}$$

$$F_{U,jk} \leqslant F_j x_{jk}\text{；}1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{8}$$

$$F_{E,imk} \leqslant F_i y_{imk}\text{；}1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant m \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{9}$$

$$F_{E,jnk} \leqslant F_j y_{jnk}\text{；}1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant n \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{10}$$

与换热网络不同的是，压力不同的分支流股不能直接混合，式(11)～(14)保证了每级中SSTC涡轮机(压缩机)之间的等流量分流，经过压力操作后等压混合.

$$F_{E,imk} \geqslant F_{E,i(m+1)k}\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant m \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{11}$$

$$F_{E,imk} \geqslant F_{E,i1k} - F_i(1 - y_{imk})\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 2 \leqslant m \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{12}$$

$$F_{E,jnk} \geqslant F_{E,j(n+1)k}\text{；}\quad 1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant n \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{13}$$

$$F_{E,jnk} \geqslant F_{E,j1k} - F_j(1 - y_{jnk})\text{；}\quad 1 \leqslant j \leqslant J,\ 2 \leqslant n \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{14}$$

2.3 流股压力

高压流股经膨胀降压，低压流股经压缩升压.但是由于功交换网络为逆流操作，对于低压流股来说，功交换网络中后一级的压力也小于等于前一级的压力.

$$p_{i(k+1)} \leqslant p_{ik}\text{；}1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{15}$$

$$p_{j(k+1)} \leqslant p_{jk}\text{；}1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{16}$$

如果级内存在膨胀(或压缩)设备单元，则流股通过设备单元后压力下降(或上升)；如果级内无任何膨胀(或压缩)单元，则压力保持不变.

$$p_{i(k+1)} \geqslant p_{ik} - \left(v_{ik} + x_{ik} + \sum_{m=1}^{J} y_{imk}\right) p_{\mathrm{in},i}\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{17}$$

$$p_{j(k+1)} \geqslant p_{jk} - \left(x_{jk} + \sum_{n=1}^{I} y_{jnk}\right) p_{\mathrm{in},j}\text{；}\quad 1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{18}$$

由于转速、工质、进出口条件、流量等因素均能够影响涡轮机和压缩机的操作曲线，该曲线较为复杂且高度非线性，而在功交换网络中，最主要的就是SSTC涡轮机和压缩机的匹配关系.为方便计算，根据线性化后的操作曲线[8]，以20 000 r/min转速为例，按照操作曲线约束进出口压力比，同时判断校正流量(F_{Ec})是否满足约束范围，确保进出口压力比、温度和功量可以满足匹配需求.

$$\frac{p_{im(k+1)}}{p_{imk}} + 1.094\ 2F_{\mathrm{Ec},imk} - 1.092\ 3 = 0\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant m \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s,\quad 0 \leqslant F_{\mathrm{Ec},imk} \leqslant 0.919 \tag{19}$$

$$\frac{p_{jnk}}{p_{jn(k+1)}} + 1.7F_{\mathrm{Ec},jn(k+1)} - 6.486\ 6 = 0\text{；}\quad 1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant n \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s,\quad 0.294 \leqslant F_{\mathrm{Ec},jn(k+1)} \leqslant 3.058 \tag{20}$$

2.4 流股温度

假设流股不涉及级间换热，仅当流股通过膨胀阀、涡轮机和压缩机时，流股温度将会改变.下式表示涡轮机和压缩机进出口温度与压力的关系：

$$T_{M,ik} = T_{\mathrm{in},ik}\left(1 + \eta_i\left(\left(\frac{p_{i(k+1)}}{p_{ik}}\right)^{\frac{r-1}{r}} - 1\right)\right)\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{21}$$

$$T_{M,jk} = T_{\mathrm{in},jk}\left(1 + \frac{1}{\eta_j}\left(\left(\frac{p_{jk}}{p_{j(k+1)}}\right)^{\frac{r-1}{r}} - 1\right)\right)\text{；}\quad 1 \leqslant j \leqslant J,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{22}$$

式中：$T_{\mathrm{in},ik}$为高压流股i进入k级的温度；$T_{\mathrm{in},jk}$为低压流股j进入k级的温度；$T_{M,ik}$为高压流股i通过k级涡轮机的出口温度；$T_{M,jk}$为低压流股j通过k级压缩机的出口温度；η为压缩机和涡轮机的效率因子；r为压缩机和涡轮机的绝热因子.

高压流股通过膨胀阀为节流膨胀，进出口温度与压力关系如下：

$$T_{V,ik} = T_{\mathrm{in},ik} + \mu_i[p_{i(k+1)} - p_{ik}]\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{23}$$

式中：$T_{V,ik}$为高压流股i通过k级膨胀阀的出口温度；μ_i为高压流股i通过膨胀阀的焦耳-汤姆孙系数.

当流股支流经过膨胀和压缩之后，出口压力相同但温度不一定相同，通过混合器混合，依据能量守恒定律得到温度约束方程：

$$F_i T_{\mathrm{in},i(k+1)} = F_i T_{\mathrm{in},ik} + \left(F_{U,ik} + \sum_{m=1}^{J} F_{E,imk}\right) \times (T_{M,ik} - T_{\mathrm{in},ik}) + F_{V,ik}(T_{V,ik} - T_{\mathrm{in},ik})\text{；}\quad 1 \leqslant i \leqslant I,\ 1 \leqslant k \leqslant K_s \tag{24}$$

$$F_j T_{\mathrm{in},jk} = F_j T_{\mathrm{in},j(k+1)} + \left(F_{U,jk} + \sum_{n=1}^{I} F_{E,jnk}\right) \times$$

$$(T_{M,jk}-T_{\mathrm{in},jk});\quad 1\leqslant j\leqslant J,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}} \tag{25}$$

2.5　流股能量

在功交换网络超结构中，SSTC 涡轮机和公用工程涡轮机膨胀做功为压缩机提供能量；而 SSTC 压缩机和公用工程压缩机则消耗能量对流股进行压缩做功. 在绝热操作条件下，SSTC 及公用工程压缩机（涡轮机）所需要（产生）的功量如下：

$$W_{E,imk}=F_{E,imk}C_{p,i}(T_{\mathrm{in},ik}-T_{M,ik});\quad 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant m\leqslant J,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}} \tag{26}$$

$$W_{E,jnk}=F_{E,jnk}C_{p,j}(T_{M,jk}-T_{\mathrm{in},jk});\quad 1\leqslant j\leqslant J,\ 1\leqslant n\leqslant I,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}} \tag{27}$$

$$W_{U,ik}=F_{U,ik}C_{p,i}(T_{\mathrm{in},ik}-T_{M,ik});\quad 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}} \tag{28}$$

$$W_{U,jk}=F_{U,jk}C_{p,j}(T_{M,jk}-T_{\mathrm{in},jk});\quad 1\leqslant j\leqslant J,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}} \tag{29}$$

式中：$W_{E,imk}$ 为高压流股 i 在 k 级第 m 条支流通过 SSTC 涡轮机产生的能量；$W_{E,jnk}$ 为低压流股 j 在 k 级第 n 条支流通过 SSTC 压缩机消耗的能量；$W_{U,ik}$ 为高压流股 i 通过 k 级公用工程涡轮机产生的能量；$W_{U,jk}$ 为低压流股 j 通过 k 级公用工程压缩机消耗的能量；C_p 为流股的比热容.

由于 SSTC 功交换器通过轴进行功量交换，SSTC 涡轮机产生和 SSTC 压缩机需要的能量是对应的，单级涡轮机做功产生的能量与对应的压缩机所需的能量相同，流股间总的功交换同样守恒.

$$W_{E,imk}=W_{E,jnk};\quad j=m,\ n=i,\ 1\leqslant i\leqslant I,\ 1\leqslant m\leqslant J,\ 1\leqslant k\leqslant K_{\mathrm{s}},\ 1\leqslant j\leqslant J,\ 1\leqslant n\leqslant I \tag{30}$$

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{J}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}W_{E,imk}=\sum_{j=1}^{J}\sum_{n=1}^{I}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}W_{E,jnk} \tag{31}$$

同时，对高、低压流股而言，每个流股的能量守恒.

$$W_i=F_iC_{p,i}(T_{\mathrm{in},i1}-T_{M,iK_{\mathrm{s}}}) \tag{32}$$

$$W_i=\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}\left(W_{U,ik}+W_{V,ik}+\sum_{m=1}^{J}W_{E,imk}\right) \tag{33}$$

$$W_j=F_jC_{p,j}(T_{M,j1}-T_{\mathrm{in},jK_{\mathrm{s}}}) \tag{34}$$

$$W_j=\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}\left(W_{U,jk}+\sum_{n=1}^{I}W_{E,jnk}\right) \tag{35}$$

2.6　目标函数

本文所建立的超结构模型以功交换网络年度总费用最小为目标函数. 年度总费用（C_{t}，\$）包括 3 个部分：设备费用（C_{e}，\$）、操作费用（C_{o}，\$ · h^{-1}）和公用工程涡轮机生产电能带来的收益（E，\$ · h^{-1}）.

$$C_{\mathrm{t}}=RC_{\mathrm{e}}+t(C_{\mathrm{o}}-E) \tag{36}$$

其中 R 是最小投资回报率，t 是每年操作时间.

在设备费用中，包括 SSTC 涡轮机和压缩机、公用工程涡轮机和压缩机以及膨胀阀的费用. 为了便于计算，对不同单元的设备费用做出以下合理的假设：

（1）SSTC 涡轮机和压缩机的费用是固定费用和附加费用的总和，附加费用取决于流股流量.

（2）膨胀阀、公用工程涡轮机和压缩机的费用是固定费用和附加费用的总和，附加费用取决于流股，且与流量呈线性关系.

由下式计算得到总设备费用（\$）：

$$C_{\mathrm{e}}=\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}(a_iv_{ik}+b_iF_{V,ik})+\sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}(c_ix_{ik}+d_iF_{U,ik}+c_jx_{jk}+d_jF_{U,jk})+\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{J}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}(e_iy_{imk}+f_iF_{E,imk}) \tag{37}$$

式中：a_i 为膨胀阀的年设备费用；b_i 为膨胀阀的年设备附加费用系数；c_i 为公用工程涡轮机的年设备费用；d_i 为公用工程涡轮机的年设备附加费用系数；c_j 为公用工程压缩机的年设备费用；d_j 为公用工程压缩机的年设备附加费用系数；e_i 为 SSTC 功交换器的年设备费用；f_i 为 SSTC 功交换器的年设备附加费用系数.

对于操作费用，由于 SSTC 功交换器能量供需平衡，操作费用近似为零，同时膨胀阀的操作费用也可以忽略不计，只考虑公用工程压缩机的操作费用，如下式所示：

$$C_{\mathrm{o}}=g_j\sum_{j=1}^{J}\sum_{k=1}^{K_{\mathrm{s}}}W_{U,jk} \tag{38}$$

其中 g_j 为公用工程压缩机的操作费用系数.

功交换网络超结构中，公用工程涡轮机可以产生一定的电费收益，如下式所示：

$$E=P\sum_{i=1}^{I}\sum_{k=1}^{K_s}W_{U,ik} \tag{39}$$

其中 P 为公用工程涡轮机产生能量的电费.

2.7 模型求解说明

由于本文主要目的在于进行流股匹配以回收用能,故在全文提出的约束和求解的目标函数上均未体现换热,所得到的也是最优功交换网络结构.但是为了达到目标温度仍需在完成功交换后考虑换热,从而保证结果的通用性.需要注意的是,换热部分在本文中不是被考虑优化的重点.

此外,尽管本文对模型进行了合理的简化,上述超结构模型仍然是一个很复杂的非凸混合整数非线性规划问题.为便于计算,该模型用 GAMS 24.0 进行编程,选取 BARON 求解器进行计算,采用的是酷睿双核 3.20 GHz CPU、16 GB RAM 的计算机.

3 算例分析

本算例来自文献[8],某化工生产过程有 3 条高压(HP)流股和 2 条低压(LP)流股.表 1 列出了流股温度、压力、流量以及比热容等参数,表 2 列出了各个单元设备费用与操作费用等参数.

压缩机与涡轮机的效率因子取 0.75,绝热因子取 1.41.算例优化后功交换网络结构如图 3 所示,包含 5 对 SSTC 功交换器、1 个公用工程压缩机、2 个加热器以及 3 个冷却器,求解时间为 3.5 h.本算例不考虑流股匹配的基础结构如图 4

表 1 流股基本参数表[8]

Tab.1 Stream properties[8]

流股	流量 F/(kg·s^{-1})	进口温度 T_{in}/K	出口温度 T_{out}/K	进口压力 p_{in}/kPa
HP_1	3	600	430	850
HP_2	5	580	300	960
HP_3	2	690	300	800
LP_1	3	300	700	100
LP_2	3	300	600	100

流股	出口压力 p_{out}/kPa	比热容 C_p/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	最大温度/K	最小温度/K
HP_1	100	1.432	700	273
HP_2	160	0.982	700	273
HP_3	300	1.046	700	273
LP_1	510	1.432	700	273
LP_2	850	1.432	700	273

表 2 设备成本参数[12]

Tab.2 Cost parameters of equipment[12]

设备单元	固定费用/(10^3 \$·a^{-1})	附加费用系数/(10^3 \$·s·kg^{-1}·a^{-1})	操作费用系数/(\$·(kWh)$^{-1}$)
阀门	2	1	—
末端加热器	3	0.03	0.035
末端冷却器	3	0.03	0.012
公用工程涡轮机	200	1	0.100
公用工程压缩机	250	1	0.120
SSTC 涡轮机	40	1	—
SSTC 压缩机	50	1	—

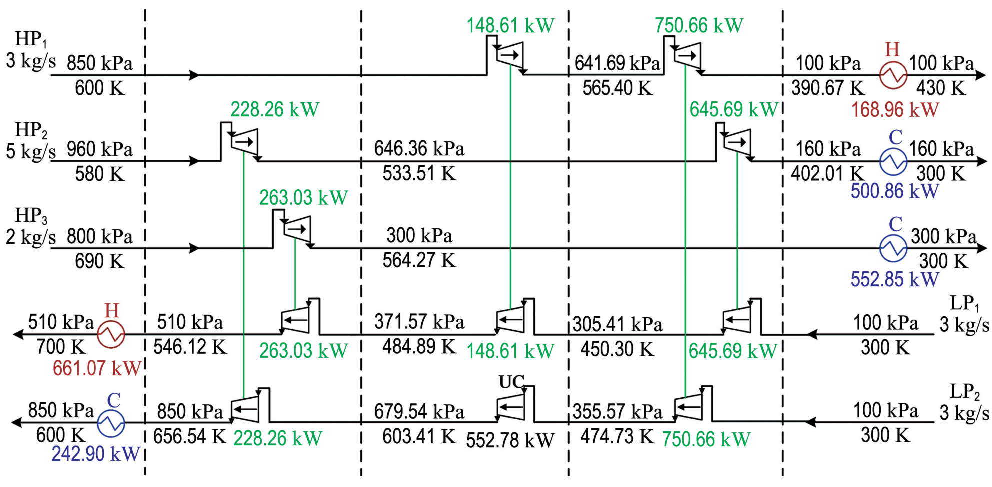


图 3 优化后的功交换网络结构

Fig.3 Optimized work exchange network configurations

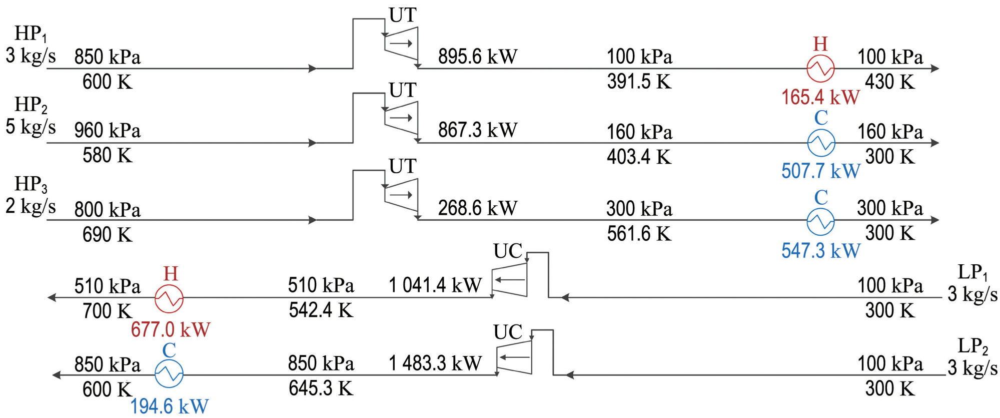


图 4　基础功网络结构

Fig. 4　Basic work network configurations

所示，该基础结构中高、低压流股仅通过公用工程设备改变压力，最后在流股末端通过加热器或冷却器达到目标温度. 因此，基础结构中含有最少操作单元，其年度总费用为 2 285 800 ＄. 而本文方法求解得到功交换网络的年度总费用为 1 622 032 ＄，与没有进行流股匹配的基础结构相比，总费用降低了 29.04%，说明通过该模型优化后的功交换网络在经济性上具有很好的可行性.

4　结　语

相较于文献，本文构建的超结构模型在考虑压力-流量约束的前提下，对流股匹配、流股操作方式和旁路选择等进行了优化，降低了模型的复杂程度与求解难度. 通过实例验证，年度总费用相比于未进行流股匹配的基础结构降低 29.04%，证明本文所提方法的有效性. 尽管本文的 MINLP 模型很复杂且不能保证全局最优，但提供了一种对功交换网络优化的方法，在提高能量利用效率的基础上还降低了年度总费用，为工程项目中的节能减排、成本控制等提供了理论依据. 然而，高、低压流股进行功量交换的同时也伴随着换热，本文并没有详细考虑热量的集成问题，所以得到的仅为最优功交换网络结构. 而对功和热的同步集成将更有利于能源的回收利用，还需要日后进行更加深入的研究.

参考文献：

[1]　都　健，李秀峰，陈　理，等. 超结构法分步综合热集成的质量交换网络[J]. 化工学报，2010，**61**(10)：2636-2643.
DU Jian，LI Xiufeng，CHEN Li，*et al*. Synthesis of heat integrated mass exchanger networks using step-wise approach based on superstructure [J]. **CIESC Journal**，2010，**61**(10)：2636-2643. (in Chinese)

[2]　庄　钰，刘琳琳，李继龙，等. 基于转运模型的功交换网络综合[J]. 化工进展，2015，**34**(4)：952-956.
ZHUANG Yu，LIU Linlin，LI Jilong，*et al*. Synthesis of work exchange network based on transshipment model [J]. **Chemical Industry and Engineering Progress**，2015，**34**(4)：952-956. (in Chinese)

[3]　ONISHI V C，RAVAGNANI M A，CABALLERO J A. Simultaneous synthesis of heat exchanger networks with pressure recovery: optimal integration between heat and work [J]. **AIChE Journal**，2014，**60**(3)：893-908.

[4]　邓建强，马　丽，冯　霄. 化工过程功量交换回收效率理论[J]. 化工学报，2011，**62**(11)：3017-3023.
DENG Jianqiang，MA Li，FENG Xiao. Work recovery efficiency of work exchange in chemical process [J]. **CIESC Journal**，2011，**62**(11)：3017-3023. (in Chinese)

[5]　闻　菁，徐明仿. 天然气管网压力能的回收及利用[J]. 天然气工业，2007，**27**(7)：106-108，144.
WEN Jing，XU Mingfang. Recovery and utilization of pressure energy of natural gas pipeline network [J]. **Natural Gas Industry**，2007，**27**(7)：106-108，144. (in Chinese)

[6]　张栋博，邓建强，方永利，等. Texaco 煤气化灰水处

理功量交换应用分析[J]. 化学工程，2011，**39**(12)：1-5.

ZHANG Dongbo，DENG Jianqiang，FANG Yongli，*et al*. Analysis of applying work exchange in grey water treatment of Texaco gasification [J]. **Chemical Engineering**，2011，**39**(12)：1-5. (in Chinese)

[7] 周 华，刘桂莲，冯 霄. 考虑效率的功交换网络问题表格法[J]. 化工学报，2011，**62**(6)：1600-1605.

ZHOU Hua，LIU Guilian，FENG Xiao. Problem table method for work exchange network with efficiency considered [J]. **CIESC Journal**，2011，**62**(6)：1600-1605. (in Chinese)

[8] RAZIB M S，HASAN M M F，KARIMI I A. Preliminary synthesis of work exchange networks [J]. **Computers & Chemical Engineering**，2012，**37**：262-277.

[9] ONISHI V C，RAVAGNANI M A S S，CABALLERO J A. Simultaneous synthesis of work exchange networks with heat integration [J]. **Chemical Engineering Science**，2014，**112**：87-107.

[10] HUANG Kefeng，KARIMI I A. Work-heat exchanger network synthesis (WHENS) [J]. **Energy**，2016，**113**：1006-1017.

[11] ZHUANG Yu，LIU Linlin，ZHANG Lei，*et al*. Synthesis of indirect work exchange networks considering both isothermal and adiabatic process together with exergy analysis [J]. **Chinese Journal of Chemical Engineering**，2018，**26**(8)：1644-1652.

[12] NAIR S K，RAO H N，KARIMI I A. Framework for work-heat exchange network synthesis (WHENS) [J]. **AIChE Journal**，2018，**64**(7)：2472-2485.

[13] YEE T F，GROSSMANN I E，KRAVANJA Z. Simultaneous optimization models for heat integration — Ⅲ. Process and heat exchanger network optimization [J]. **Computers & Chemical Engineering**，1990，**14**(11)：1185-1200.

Synthesis of indirect work exchange networks based on superstructure method

TENG Jiazhi，ZHUANG Yu，YANG Rui，WU Yang，LIU Linlin，ZHANG Lei，DU Jian*

(Institute of Chemical Process Systems Engineering，School of Chemical Engineering，Dalian University of Technology，Dalian 116024，China)

Abstract：Since the indirect work exchange networks (WEN) are more widely used in industry，an indirect work exchange networks synthesis method based on the superstructure model is proposed. A multi-stage superstructure is established for the WEN，and a mixed-integer nonlinear programming formulation is proposed to minimize the annual total cost. According to the pressure-flow constraints derived from equipment operation curves，the matching among the streams in the indirect WEN is realized，and the optimized WEN configurations are obtained. Through the analysis of the example results，it is found that the annual total cost of the optimized WEN configurations is reduced by 29.04% compared with the basic work network configurations without stream matching，and the availability of the model and the feasibility of network optimization are confirmed.

Key words：indirect work exchange networks；superstructure model；single-shaft-turbine-cum-compressor (SSTC)；stream matching