

# 集成能源、物料、排放的能源系统建模与优化

戴毅茹, 王 坚

(同济大学 CIMS 研究中心, 上海 200092)

**摘要:** 考虑到多载体能源系统、生产系统、排放系统之间的复杂耦合关系, 引入综合枢纽基本模型, 提出了一种考虑能源、物料、排放协同作用的集成化能源系统建模方法. 案例分析表明: 能源成本及收益、产品生产对能源的需求量、产品收益以及废弃物排放成本等因素对能源系统的优化产生直接影响, 这些因素之间协同作用, 综合决定能源系统规划与设计的优化方案. 所提出的建模方法相比多载体能源系统的描述, 能够综合考虑能源、物料、排放之间的协同作用, 更加系统地解决能源优化问题给出合理的分析.

**关键词:** 多载体能源系统; 综合枢纽; 集成化建模; 能源优化; 排放

**中图分类号:** TK01+8

**文献标志码:** A

## Modeling and Optimization of Integrated Energy System Considering Synergy among Energy, Material and Emission Elements

DAI Yiru, WANG Jian

(CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Considering the complex coupling relationship among multi-carrier energy system, production system and emission system, a so-called integrated hub concept was introduced, in terms of which a modeling approach for integrated energy system considering the synergy among energy, material and emission elements was presented. The case study indicates that the energy cost and benefit, the energy demand required by product manufacturing, the product benefit and emission cost directly influence the optimal results of energy system. These factors interact cooperatively to comprehensively decide the optimal strategy for energy planning and design. Thus due to the synergy among energy, material and emission the developed modeling approach could resolve the optimization problem of energy system much more systematically and reasonably as compared to the available multi-carrier energy model.

**Key words:** multi-carrier energy system; integrated hub; integrated modeling; energy optimization; emission

能源模型已经成为现代社会解决复杂能源问题的有效手段. 传统能源模型主要基于各个能源载体子系统进行建立, 如电网系统、天然气系统和供热系统等. 随着分布式发电等新型能源技术的快速发展, 针对多载体能源子系统之间集成化建模的研究逐渐引起学术界的重视和关注, 成为能源模型研究的一个热点方向. 关于多载体能源子系统的集成化模型研究, 相继提出了一些概念名词: “基本单元(basic units)”<sup>[1]</sup>, “微电网(micro grids)”<sup>[2]</sup>, “混杂能源枢纽(hybrid energy hub)”<sup>[3]</sup> 和 “能源枢纽(energy hub)”<sup>[4]</sup>. 其中, “能源枢纽”描述了能源系统中的一个基本输入-输出单元, 它具有能源存储和转换功能<sup>[4-5]</sup>. 基于能源枢纽的能源系统的网络流模型已被其他众多学者所接受, 并以此为基础展开了多载体能源系统的优化问题, 如多能源系统的统一优化调度<sup>[6]</sup>、生活用能优化配置<sup>[7]</sup>、热电联产(combined heat and power)技术优化选择<sup>[8]</sup>等. 近年来, 能源枢纽的概念已被广泛应用于智能电网<sup>[9]</sup>、分布式能源<sup>[10-11]</sup>、可再生能源利用<sup>[12]</sup>、氢能源存储技术<sup>[13-14]</sup>等新一代能源系统问题.

能源系统作为社会系统的重要组成部分, 与经济、环境等其他社会子系统之间密切关联, 即除了多载体能源子系统之间的耦合关系, 能源系统与产品生产、废弃物排放之间也存在着复杂的相互作用. 能源开发、存储、运输、转化、分配、消耗等各项活动都是围绕产品生产需求而展开. 能源活动是产生排放的主要源头. 同时, 随着余热回收和生物质能燃烧等可再生能源技术的发展, 排放物可以转化为循环利用的能源资源. 可以说, 能源系统分析不能独立于产

收稿日期: 2013-10-25

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA112307); 国家自然科学基金(71273188, 91024131, 91024023)

第一作者: 戴毅茹(1972—), 女, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为能源系统建模. E-mail: zlydyr@tongji.edu.cn

品和排放要素. 能源模型应考虑产品和排放对能源利用的耦合作用, 即应建立综合能源系统、生产系统和排放系统的集成化模型. 该模型在统一框架下, 以能源系统为核心, 描述三者之间的交互作用, 为能源系统优化提供更为准确的分析模型.

本文基于对“能源枢纽”建模概念的扩展, 将产品生产和废弃物排放融入到能源系统中, 提出“综合枢纽(integrated hub)”的基本建模单元. 以此为基础, 提出考虑能源、物料、排放协同作用的集成化能源系统建模方法. 该方法将能源系统的分析延伸至综合考虑能源、经济和环境之间的相互作用, 使能源系统的分析与优化更加系统和全面.

## 1 综合枢纽节点的基本模型

综合枢纽扩展了能源枢纽的建模理念, 不仅描述能源存储、运输、转化、分配、消耗等能源活动, 而且将产品制造以及废弃物产生、处理、再利用等环节融入其中, 综合考虑能源、物料、排在某一区域范围内的复杂耦合作用. 综合枢纽的基本模型如图 1 所示.

综合枢纽描述的是具有能源活动、产品制造和废弃物排放处理的基本单元, 所包含的范围可以小到企业或建筑物, 也可以大到一个区域或国家. 在其内部, 能源经过转化(如燃气轮机、燃气锅炉等)、调配(如变压器、热交换网等)为本地的产品制造提供能源消耗(如电能、热能); 原材料经过制造加工, 转换成半成品/最终产品, 并消耗能源, 同时产生废弃物排放; 某些排放物通过余热回收或燃烧产生可回收热能, 同时为保障环境安全, 排放物需要进行脱硫、脱氮、脱碳等环境处理与控制. 综合枢纽与各个能源载体子系统(如电网、天然气网、热交换网)相连, 从能源载体子系统中获得能源, 经过转化与调配, 生成的能源不仅提供本地的产品制造用能, 而且剩余的能源可以反馈到各个能源载体子系统中, 供其他综合枢纽使用. 综合枢纽节点体现了多载体能源子系统之间, 以及能源系统与生产系统、排放系统之间复杂的耦合关系, 为能源、物料、排放之间的交互提供了接口.

图 1 描述了一个综合枢纽的基本模型. 枢纽节点 IH1(integrated hub 1)分别从各个能源载体子系统获得能源输入  $P_1^{(e)}$ ,  $P_1^{(n)}$ ,  $P_1^{(h)}$ .  $P_1^{(n)}$  经过  $\lambda_1^{(n)}$  分配, 一部分提供给燃气轮机转化为电能和热能, 另一部分经燃气锅炉生成热能. 在生成的电能与热能中, 一

部分( $T_1^{(eb)}$ ,  $T_1^{(hc)}$ )用于本地产品制造, 剩下的部分( $T_1^{(e)}$ ,  $T_1^{(h)}$ )可以反馈给能源载体子系统作为能源输出量. 原材料  $M_1^{(a)}$  经过  $\lambda_1^{(a)}$  的分配, 分别用于制造产品  $M_1^{(b)}$  和  $M_1^{(c)}$ . 在产品制造过程中, 产生的高温副产品或排放物进入热交换网, 实现余热回收  $P_1^{(rh)}$ . 产生的排放物  $W_1^{(s)}$  经过脱硫、脱氮、脱碳等处理, 向外界排放  $W_1^{(t)}$ . 文中相关符号说明见表 1.

表 1 文中符号说明

Tab. 1 Parameter specification in the paper		
类型	符号	含义
集合	$H$	能源载体子系统集合
	$M$	物料集合
	$W$	排放物集合
	$N$	综合枢纽节点集合, 如 IH1, IH2, ..., IHn
	$P$	能源输入
上标	$T$	能源输出或能源需求量
	$e$	电能
	$n$	天然气
	$h$	热能
	$a, b, c, d, k, l, m$	物料或产品类型
参数	$s, t$	排放物类型
	$r$	能源回收
	$C$	成本/收益
	$\lambda$	能源或物料的分配率
	$\eta$	设备转化效率(注: 其下标 T 表示燃气轮机转化效率, 下标 B 表示燃气锅炉转化效率)
参数	$S$	制造设备的能源强度, 定义为单位产品的能源消耗量
	$R$	制造设备的余热回收效率, 定义为产品制造单位用能的可回收热能
	$\Psi$	制造设备的排放强度, 定义为制造单位产品的排放量

根据综合枢纽节点的基本功能, 可以建立综合枢纽节点的数学模型. 模型包含能源平衡方程、物料平衡方程和排放平衡方程三部分, 分别描述了综合枢纽节点中的能源、物料与排放从输入到输出之间的关联关系.

### (1) 能源平衡方程

$$\begin{cases} T_1^{(e)} + T_1^{(eb)} = P_1^{(e)} \eta_1^{(e)} + P_1^{(n)} \lambda_1^{(n)} \eta_1^{(ne)} \\ T_1^{(h)} + T_1^{(hc)} = P_1^{(h)} \eta_1^{(h)} + P_1^{(n)} \lambda_1^{(n)} \eta_{1T}^{(nh)} + \\ P_1^{(n)} (1 - \lambda_1^{(n)}) \eta_{1B}^{(nh)} + P_1^{(rh)} \\ T_1^{(eb)} = M_1^{(b)} S_1^{(eb)} \\ T_1^{(hc)} = M_1^{(c)} S_1^{(hc)} \\ P_1^{(rh)} = T_1^{(eb)} R_1^{(eb)} \end{cases} \quad (1)$$

### (2) 物料平衡方程

$$\begin{cases} M_1^{(b)} = M_1^{(a)} \lambda_1^{(a)} \eta_1^{(ab)}, \\ M_1^{(c)} = M_1^{(a)} (1 - \lambda_1^{(a)}) \eta_1^{(ac)} \end{cases} \quad (2)$$

### (3) 排放平衡方程

$$W_1^{(s)} = M_1^{(c)} \Psi_1^{(cs)}, \quad W_1^{(t)} = W_1^{(s)} \eta_1^{(st)} \quad (3)$$

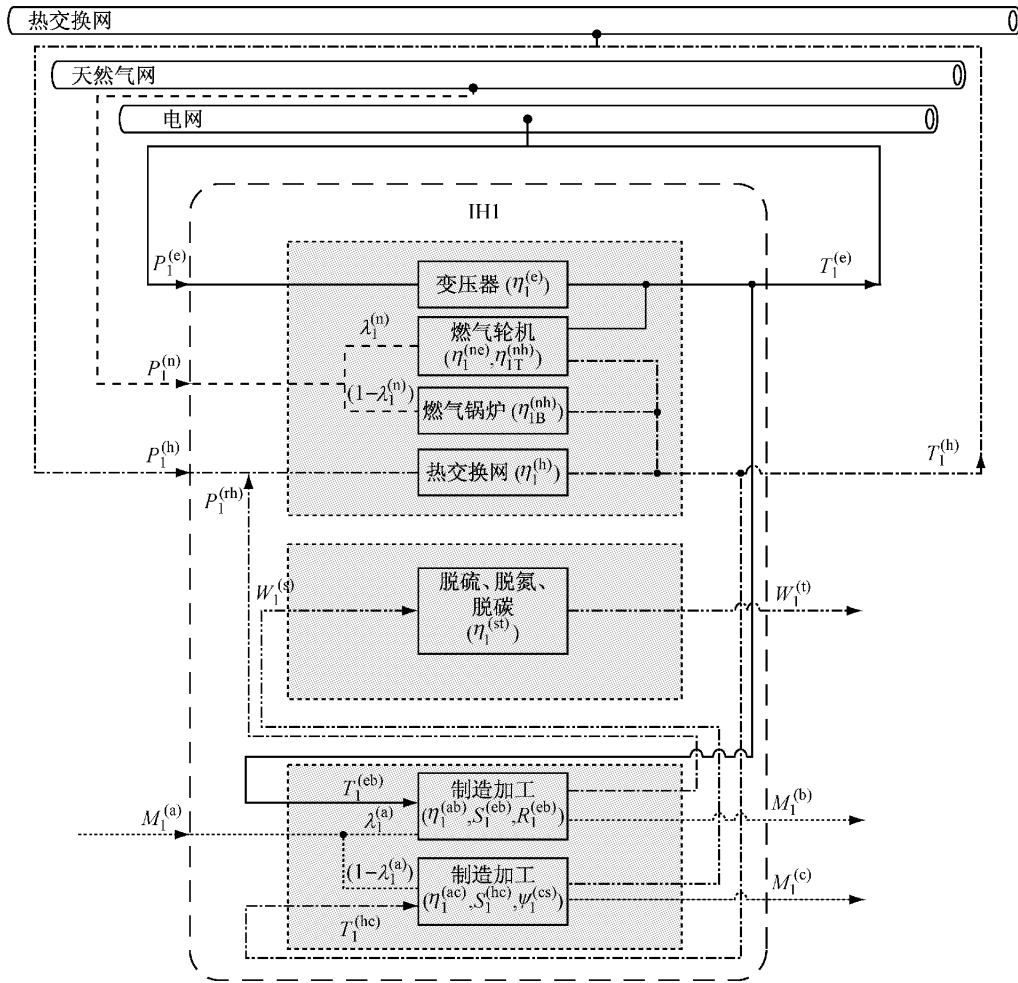


图1 综合枢纽的基本模型

Fig.1 Basic model of integrated hub

## 2 集成化能源模型

以综合枢纽节点的基本模型为基础,建立集成化能源模型.集成化能源模型由综合枢纽节点及其之间的传输系统构成.传输系统包含传递多能源载体、物料和排放物的网状结构,可以是网线、管道、交通路网等多种形式.集成化能源模型通过综合枢纽节点之间的输入输出关联描述了能源流、物料流与排放流及其相互作用,从而将能源系统、生产系统、排放系统进行紧密封集成.不失一般性,基于综合枢纽的集成化能源模型如图2所示.基于节点之间的连接,建立集成化能源模型中的能源流、物料流与排放流的平衡方程,如下所示:

$$\sum_{i=1}^n P_i^{(\alpha)} = \sum_{i=1}^n T_i^{(\alpha)}, \quad i \in N = \{1, 2, 3, \dots, n\},$$

$$\alpha \in H = \{e, n, h, \dots\} \quad (4)$$

$$M_i^{(\beta)} = \sum_{j=1}^m M_j^{(\beta)}, \quad i, j \in N = \{1, 2, 3, \dots, n\},$$

$$\beta \in M = \{a, b, c, \dots\} \quad (5)$$

$$W_i^{(\delta)} = \sum_{j=1}^m W_j^{(\delta)}, \quad i, j \in N = \{1, 2, 3, \dots, n\},$$

$$\delta \in W = \{s, t, \dots\} \quad (6)$$

方程(4)描述了对任一类型能源载体 $\alpha \in H = \{e, n, h, \dots\}$ ,从相应能源载体子系统输入各个节点的流量之和等于从各个节点反馈给该子系统的流量之和.方程(5)与(6)相类似,分别描述了相应某一物料或排放物类型 $\beta \in M = \{a, b, c, \dots\}$ 或 $\delta \in W = \{s, t, \dots\}$ ,其在节点 $i \in N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 的输出量等于位于其下游的各个节点 $j$ 的相应输入量之和.

## 3 优化模型

本文构建的集成化能源模型属于复杂的能源系统优化问题,需要以优化模型的方式进行求解,为此

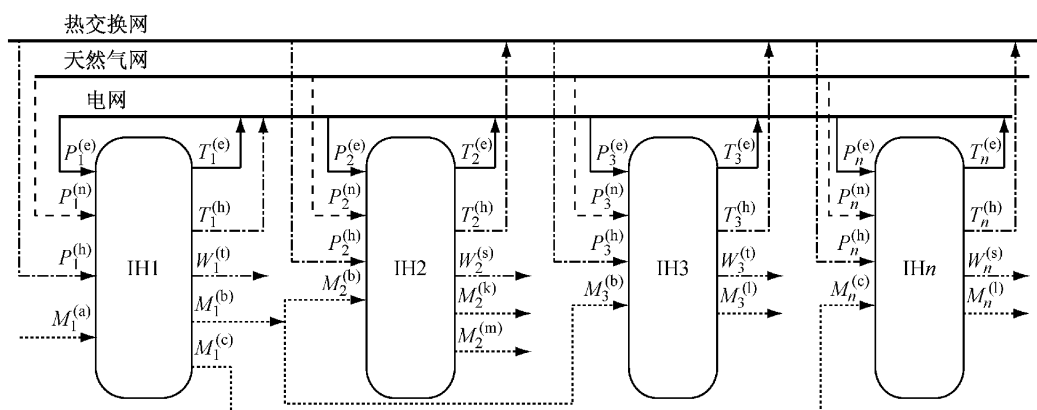


图 2 基于综合枢纽的集成化能源模型

Fig.2 Integrated energy model based on integrated hubs

建立面向系统优化的目标函数和约束条件。考虑建立的能源系统涉及能源、物料与排放等多种因素,为实现同一尺度下的度量分析,采用基于成本效益的分析手段,建立如下系统目标函数:

$$\min C_{\text{total}} = \sum_{a \in H} \sum_{i \in N} P_i^{(a)} C_P^{(a)} + \sum_{\delta \in W} \sum_{i \in N} W_i^{(\delta)} C_W^{(\delta)} - \sum_{a \in H} \sum_{i \in N} T_i^{(a)} C_T^{(a)} - \sum_{\beta \in M} \sum_{i \in N} M_i^{(\beta)} C_M^{(\beta)} \quad (7)$$

方程(7)描述了目标函数为最小化成本效益组合,其中成本包含能源消耗成本和排放物处理成本,效益包括产品制造收益和反馈剩余能源收益。

系统约束条件来自于综合枢纽节点和集成化能源模型的平衡方程,即由方程(1)~(6)组成,分别描述了综合枢纽节点内部及其节点之间存在的能源、物料和排放的平衡约束。

## 4 案例分析

为说明方法的有效性,建立包含三个综合枢纽

节点的集成化能源模型进行案例分析,如图 3 所示。三个节点(IH1, IH2, IH3)组成了一个内部网络,各个节点同时与电网、天然气网、热交换网相连接,为节点提供所需的电能、天然气和热能。电网由外部网络向节点提供电能, IH1 和 IH3 的剩余电能可以发送回电网;供热网输送的热能仅由 IH1 和 IH3 提供,外部网络不向该系统供应热能;天然气网提供的可用天然气不受约束。IH1 中的能源转换技术包含变压器、燃气轮机和燃气锅炉。其中,部分电能用于满足本节点的产品制造需求。IH2 包含变压器和热交换网,产品制造需要的电能与热能直接来自电网和热交换网。IH3 包含变压器、燃气轮机和热交换网,产品制造需要消耗电能,产生的余热可以回收到热交换网。同时,制造过程产生的排放物需要脱硫、脱氮处理。

针对图 3 描述的集成化能源系统,建立如下目标函数和约束条件:

$$\begin{aligned} \min C_{\text{total}} &= \sum_{i=1}^3 P_i^{(e)} C_P^{(e)} + \sum_{i=1}^3 P_i^{(n)} C_P^{(n)} + W_3^{(t)} C_W^{(t)} - \sum_{i=1}^3 T_i^{(e)} C_T^{(e)} - M_1^{(c)} C_M^{(c)} - M_3^{(d)} C_M^{(d)} \\ \text{s. t. } &P_1^{(e)} \eta_1^{(e)} + P_1^{(n)} \lambda_1^{(n)} \eta_1^{(ne)} = T_1^{(e)} + T_1^{(ec)}, \quad P_1^{(n)} (1 - \lambda_1^{(n)}) \eta_{1B}^{(nh)} + P_1^{(n)} \lambda_1^{(n)} \eta_{1T}^{(nh)} = T_1^{(h)} \\ &T_1^{(ec)} = M_1^{(c)} S_1^{(ec)}, \quad P_2^{(e)} \eta_2^{(e)} = T_2^{(eb)}, \quad P_2^{(h)} \eta_2^{(h)} = T_2^{(hb)}, \quad T_2^{(eb)} = S_2^{(eb)} M_2^{(b)} \\ &T_2^{(hb)} = S_2^{(hb)} M_2^{(b)}, \quad P_3^{(e)} \eta_3^{(e)} + P_3^{(n)} \eta_3^{(ne)} = T_3^{(e)} + T_3^{(ed)}, \quad P_3^{(n)} \eta_3^{(nh)} + P_3^{(rh)} \eta_3^{(h)} = T_3^{(h)} \\ &T_3^{(ed)} = M_3^{(d)} S_3^{(ed)}, \quad P_3^{(rh)} = T_3^{(ed)} R_3^{(ed)}, \quad M_1^{(c)} = M_2^{(b)} \lambda_2^{(b)} \eta_1^{(bc)}, \quad M_2^{(b)} = M_2^{(a)} \eta_2^{(ab)} \\ &M_3^{(d)} = M_2^{(b)} (1 - \lambda_2^{(b)}) \eta_3^{(bd)}, \quad W_3^{(t)} = W_3^{(s)} \eta_3^{(st)}, \quad W_3^{(s)} = M_3^{(d)} \Psi_3^{(ds)} \\ &P_1^{(e)} + P_2^{(e)} + P_3^{(e)} \geq T_1^{(e)} + T_3^{(e)}, \quad T_1^{(h)} + T_3^{(h)} \geq P_2^{(h)} \\ &0 \leq \lambda_1^{(n)} \leq 1, \quad 0 \leq \lambda_2^{(b)} \leq 1, \quad T_1^{(e)} \geq 0, \quad T_3^{(e)} \geq 0 \\ &P_i^{(e)} \geq 0, \quad P_i^{(n)} \geq 0, \quad P_i^{(h)} \geq 0, \quad i = \{1, 2, 3\} \end{aligned}$$

对图 2 所示能源系统进行优化分析。系统相关参数如表 2 所示,变量上标表示前者转换为后者的效率。为分析的便利,参数取为量纲一值,即能源、物

料、排放、成本/效益参数的相应单位分别取为单位能源量、单位物料量、单位排放量以及单位成本/效益。

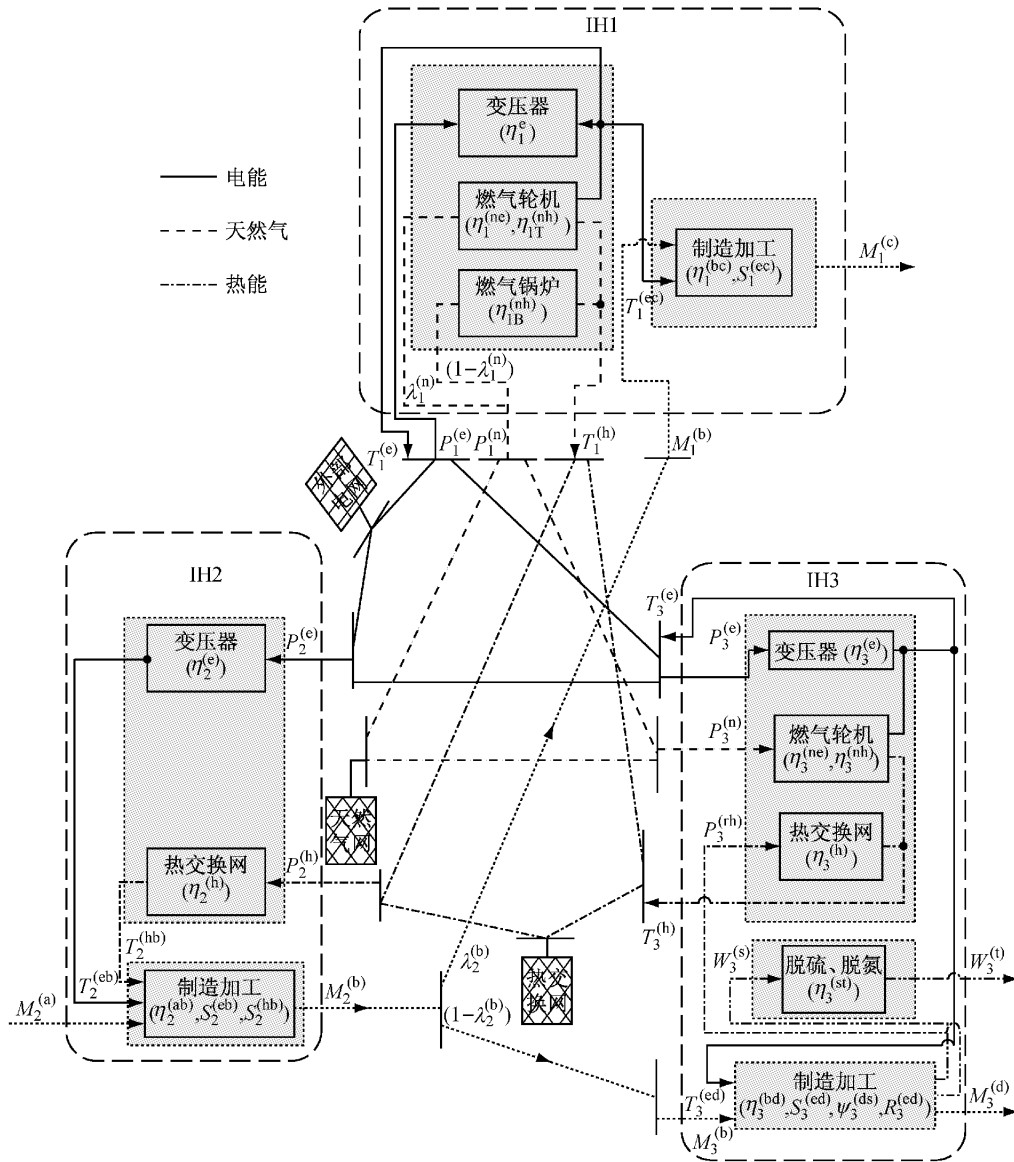


图3 包含三个综合枢纽节点的集成化能源模型

Fig. 3 The integrated energy model composed of three integrated hubs

取表2中的参数,对系统进行优化求解,求解结果如表3所示。

从优化结果可以看出,由于IH2不具备自产电能的能力,产品制造所需要的电能全部来自电网,其值为17.05。来自电网的电能成本 $C_p^{(e)}=3.5$ ,变压器转换效率为0.5,通过电网输入的可用单位电能成本为7。天然气的单位成本为 $C_p^{(n)}=2.7$ ,对于IH1和IH3,天然气转化为电能的效率为 $\eta_1^{(ne)}=\eta_3^{(ne)}=0.64$ ,因此在IH1和IH3中,通过天然气生产出单位电能的成本为4.22,明显小于来自电网的可用单位电能成本7。因此IH1和IH3通过内部的燃气轮机将天然气转化为用于本地产品制造所需的电力资源是最为经济的用电方式( $P_1^{(e)}=P_3^{(e)}=0$ ),同时所

产生的热能提供给IH2使用( $T_1^{(h)}+T_3^{(h)}=P_2^{(h)}$ )。IH3将剩余的电能10.97返回给电网。由于IH3的产品制造过程会生产排放,为降低排放处理成本,由 $\lambda_2^{(b)}=1$ 可以看出,IH3没有产品制造过程。即便如此,由于IH3的燃气轮机的热能转化效率 $\eta_3^{(nh)}=0.6$ 比IH1的燃气轮机的热能转化效率 $\eta_1^{(nh)}=0.4$ 要高,因此仍需要通过IH3向IH2提供大部分的热能,同时产生的剩余电能作为额外收益。虽然IH1的燃气锅炉的热能转化效率 $\eta_{IB}^{(nh)}=0.78$ 接近燃气轮机热能转化效率 $\eta_{IT}^{(nh)}=0.4$ 的2倍,但是由于燃气轮机的热电联产效益,因此从最经济的角度考虑,IH1完全通过燃气轮机产生电能和热,即 $\lambda_1^{(n)}=1$ 。以上优化方案产生的系统总成本 $C_{total}=54.65$ 。

表 2 系统相关参数

Tab.2 Related parameters of the illustrated case		
节点	组成	参数
IH1	变压器	$\eta_1^{(e)}=0.5$
	燃气轮机	$\eta_1^{(ne)}=0.64, \eta_{IT}^{(nh)}=0.4$
	燃气锅炉	$\eta_B^{(nh)}=0.78$
	制造加工	$\eta^{(bc)}=0.57, S_1^{(ec)}=0.32$
IH2	变压器	$\eta_2^{(e)}=0.5$
	热交换网	$\eta_2^{(h)}=0.8$
	制造加工	$\eta^{(ab)}=0.74, S_2^{(eb)}=0.32, S_2^{(hb)}=0.4$
IH3	变压器	$\eta_3^{(e)}=0.5$
	燃气轮机	$\eta_3^{(ne)}=0.64, \eta_3^{(nh)}=0.6$
	热交换网	$\eta_3^{(h)}=0.8$
	脱硫、脱氮处理	$\eta_3^{(st)}=0.75$
	制造加工	$\eta_3^{(bd)}=0.65, S_3^{(ed)}=0.36, \eta_3^{(ds)}=0.4, R_3^{(ed)}=0.12$
成本与收益	来自电网的电能单位成本	$C_P^{(e)}=3.5$
	反馈电能单位收益	$C_T^{(e)}=3.5$
	天然气单位成本	$C_P^{(n)}=2.7$
	排放处理单位成本	$C_W^{(v)}=1.23$
	产品单位收益	$C_M^{(v)}=2.2, C_M^{(d)}=2.3$
	原材料量	$M_2^{(a)}=36$

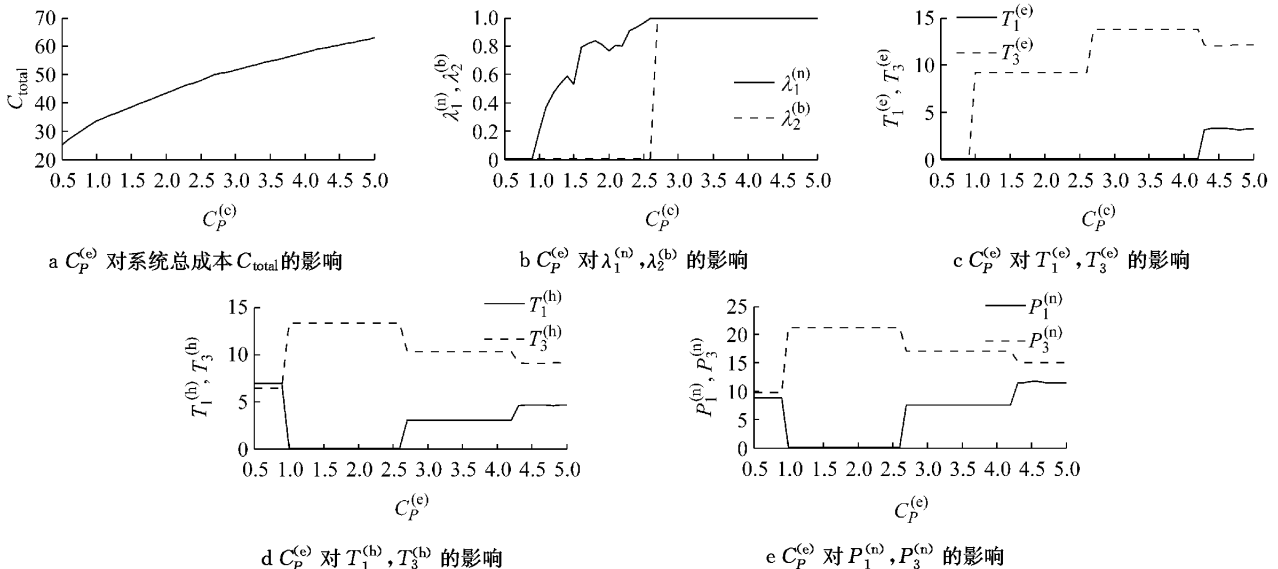
表 3 系统优化结果

Fig.3 Optimization results of the illustrated case			
参数	数值	参数	数值
$P_1^{(e)}$	0	$T_1^{(e)}$	0
$P_2^{(e)}$	17.05	$T_3^{(e)}$	10.97
$P_3^{(e)}$	0	$T_1^{(h)}$	3.04
$P_1^{(n)}$	7.59	$T_3^{(h)}$	10.28
$P_3^{(n)}$	17.14	$P_3^{(rh)}$	0
$P_2^{(h)}$	13.32	$W_3^{(v)}$	0
$\lambda_1^{(n)}$	1	$M_1^{(e)}$	15.18
$\lambda_2^{(b)}$	1	$M_3^{(d)}$	0
总成本 $C_{total}=54.65$			

为较为全面地揭示能源、物料、排放等多种生产要素对能源系统优化问题的协同影响作用,在此分别从电能单位成本、天然气单位成本等多个方面做进一步分析。

#### 4.1 电能单位成本 $C_P^{(e)}$ 的灵敏度分析

电能单位成本  $C_P^{(e)}$  会随着电力市场的动态变化产生波动,假定  $C_P^{(e)}$  从 0.5 逐步上升至 5.0,其对系统优化结果的影响如图 4 所示。从图 4a 可见,系统总成本  $C_{total}$  受  $C_P^{(e)}$  的影响较大,其变化趋势与  $C_P^{(e)}$  的变化趋势一致。从图 4b 可见,当  $C_P^{(e)} < 2.6$  时,  $\lambda_2^{(b)}=0$ ,说明在该阶段, IH2 生产的产品  $M_2^{(b)}$  全部输送给其下游 IH3 用于产品  $M_3^{(d)}$  的制造, IH1 没有产品生产任务。这可能是由于  $M_3^{(d)}$  的单位收益 ( $C_M^{(d)}=2.3$ ) 略大于  $M_1^{(e)}$  ( $C_M^{(e)}=2.2$ ) 的单位收益,并且 IH3 的燃气轮机的热能转化效率 ( $\eta_3^{(nh)}=0.6$ ) 明显大于 IH1 的燃气轮机的热能转化效率 ( $\eta_{IT}^{(nh)}=0.4$ ), 因此虽然 IH3 存在废弃物处理成本,但相比产品收益和热能转换效率,从总成本最小化考虑,该生产方案较为合理。随着  $C_P^{(e)}$  的增长,为弥补 IH2 消耗的来自电网的电能成本,需要 IH3 增大向电网输送的反馈电量,因此当  $C_P^{(e)} > 2.6$  时,  $\lambda_2^{(b)}=1$ ,说明 IH1 将负责所有的产品生产任务, IH3 向电网提供反馈电量并且向 IH2 输送热能。IH1 和 IH3 输送给电网的反馈电量 (分别为  $T_1^{(e)}, T_3^{(e)}$ ) 的变化曲线如图 4c 所示。可见,在  $C_P^{(e)} < 0.8$  时,由于来自电网的电能单位成本明显小于反馈电量的生产成本,因此在该阶段, IH1 和 IH3 没有反馈电量。随着  $C_P^{(e)}$  的增长, IH3 的反馈

图 4 电能单位成本  $C_P^{(e)}$  对系统优化结果的影响Fig.4 Effect of unit energy cost  $C_P^{(e)}$  on optimization results

电量  $T_3^{(e)}$  呈逐步上升趋势,当  $C_P^{(n)} > 4.2$  时,  $T_3^{(e)}$  略有下降,其下降量为 1.26,此时  $T_1^{(e)}$  从 0 上升至 2.48,总反馈电量仍然呈上升趋势. 由于在该案例中,外部网络不向该系统供应热能,因此 IH2 产品生产的热能消耗全部来自 IH1 和 IH3 的输出热能,其变化曲线如图 4d 所示. 由于燃气轮机的热电联产效应,其热能产出与图 4c 的反馈电量的产出体现出了这种联产效应. 图 4e 描述了 IH1 和 IH3 的天然气消耗曲线,其变化趋势与热能产出变化曲线基本一致.

#### 4.2 天然气单位成本的灵敏度分析

分析天然气单位成本  $C_P^{(n)}$  对能源优化的影响作用,优化结果如图 5 所示. 从图 5a 可见,  $C_P^{(n)}$  对总成本的影响也比较明显,近似呈正比关系. 从图 5b 可见,  $\lambda_2^{(b)}$  在前半部分呈现梯形,说明在  $C_P^{(n)}$  较低时,从

总成本最优化考虑,物料全部用于产品  $M_3^{(d)}$  的制造;当  $C_P^{(n)}$  逐步增长,由于 IH3 的产品转化效率及单位产品用电量 ( $\eta_3^{(bd)} = 0.65, S_3^{(ed)} = 0.36$ ) 相比 IH1 较大 ( $\eta_1^{(bc)} = 0.57, S_1^{(ec)} = 0.32$ ),虽然  $M_3^{(d)}$  的单位收益 ( $C_M^{(d)} = 2.3$ ) 略大于  $M_1^{(e)}$  ( $C_M^{(e)} = 2.2$ ) 的单位效益,但 IH3 同时存在排放物处理成本,因此相比 IH1, IH3 需要消耗更多的天然气进行发电,用于本地生产. 因此,随着  $C_P^{(n)}$  的增长,  $\lambda_2^{(b)}$  由最初的 0 上升为 1,经过较短时间又下降为 0. 与图 4 不同,从图 5c 可见,在最开始阶段, IH1 的反馈电量较大,其随着产品加工任务的转移逐渐减至 0,说明天然气单位成本相比电能单位成本对总成本的影响系数较大,因此为降低天然气成本影响的作用,需要增加更多的反馈电量进行弥补.

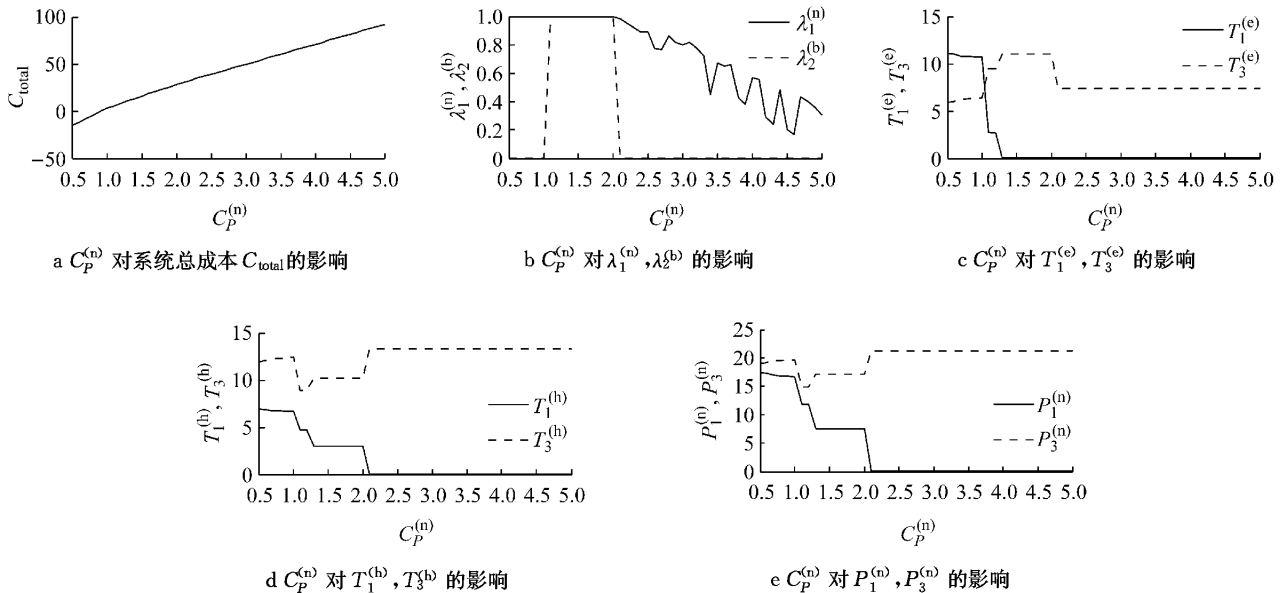


图5 天然气单位成本  $C_P^{(n)}$  对系统优化结果的影响

Fig.5 Effect of unit natural gas cost  $C_P^{(n)}$  on optimization results

从上述优化结果分析可以看出,能源成本及收益、产品生产对能源的需求量、产品收益以及废弃物排放成本对能源系统的优化产生直接影响,这些因素之间协同作用,综合决定能源系统规划与设计的优化方案.

## 5 结语

能源问题的分析与优化必须要综合考虑能源、经济、环境之间的相互作用. 为此,本文提出的基于综合枢纽的集成化能源系统建模方法,通过能源流、物料流、排放流之间的耦合关系将能源系统、生产系统、排放系统进行了有效集成. 案例分析结果说明,

能源优化与产品生产、废弃物排放存在紧密的关联,相比单纯考虑能源系统本身,所提建模方法能够更加全面、合理地进行能源系统的分析与优化.

#### 参考文献:

- [1] Bouwmans I, Hemmes K. Optimizing energy systems: hydrogen and distributed generation[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Distributed Generation: Power System Market Aspects. Stockholm: Elsevier, 2002: 1-7.
- [2] Lasseter R H, Piagi P. Microgrid: a conceptual solution[C]//2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen. Piscataway, NJ: IEEE, 2004: 4285-4290.

- [3] Friik R, Favre-Perrod P. Proposal for a multifunctional energy bus and its interlink with generation and consumption[D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2004.
- [4] Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, *et al.* Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24.
- [5] Salimi M, Ghasemi H, Vaez-Zadeh S. IRAN's electricity and natural gas networks modeling by means of energy hubs[C]// 2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Venice, Italy. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 648-654.
- [6] Ghasemi A, Hojjat M, Javidi M H. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs[C]// 2nd Iranian Conference on Smart Grids, Tehran. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 1-7.
- [7] Bozchalui M C, Hashmi S A, Hassen H, *et al.* Optimal operation of residential energy hubs in smart grids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 755.
- [8] Sheikhi A, Ranjbar A M, Oraee H. Financial analysis and optimal size and operation for a multicarrier energy system[J]. Energy and Buildings, 2012, 48: 71.
- [9] Pazouki S, Haghifam M R, Olamaei J. Economical scheduling of multi carrier energy systems integrating renewable, energy storage and demand response under Energy Hub approach[C]// Smart Grid Conference, Tehran. Piscataway, NJ: IEEE, 2013: 80-84.
- [10] Abduslam S, Ali A, Michael F, *et al.* Design of an energy hub based on natural gas and renewable energy sources [J]. International Journal of Energy Research, 2014, 38(3): 363.
- [11] Ralph E, Kristina O, Viktor D, *et al.* New formulations of the 'energy hub' model to address operational constraints [J]. Energy, 2014, 73: 387.
- [12] Pazouki S, Haghifam M R, Moser A. Uncertainty modeling in optimal operation of energy hub in presence of wind, storage and demand response[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 61: 335.
- [13] Proietto R, Arnone D, Bertocini M, *et al.* Mixed heuristic-non linear optimization of energy management for hydrogen storage-based multi carrier hubs[C]// 2014 IEEE International Energy Conference, Cavtat. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1019-1026.
- [14] Yaser M, Ali A, Michael F, *et al.* Energy hub based on nuclear energy and hydrogen energy storage[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2013, 52(22): 7470.

#### (上接第212页)

- [6] Molins C, Arnau O. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2. Numerical simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(6): 778.
- [7] 廖少明. 圆形隧道纵向剪切传递效应研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
- LIAO Shaoming. Research on the effect of longitudinal shear transfer on circular tunnel lining [D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [8] Liao S M, Peng F L, Shen S L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 421.
- [9] Brazier L G. On the flexure of thin cylindrical shells and other "thin" sections [J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1927, 116(773): 104.
- [10] Tang N C. Plastic-deformation analysis in tube bending[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77(12): 751.
- [11] E D X, Chen M F. Numerical solution of thin-walled tube bending springback with exponential hardening law[J]. Steel Research International, 2010, 81(4): 286.
- [12] Liu Y F, E D X. Effect of cross-sectional ovalization on springback and strain distribution of circular tubes under bending [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(9): 1591.
- [13] 樊振宇. 软土盾构隧道衬砌结构计算方法及纵向变形分析[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- FAN Zhenyu. Lining structure calculation method and longitudinal deformation analysis of soft soil shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [14] Huang X, Huang H W, Zhang J. Flattening of jointed shield-driven tunnel induced by longitudinal differential settlements [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 31: 20.
- [15] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
- LIU Jianhang, HOU Xueyuan. Shield driving tunnel [M]. Beijing: China Railway Press, 1991.
- [16] 姜启元, 管攀峰, 叶蓉. 软土盾构隧道的纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道, 1999(4): 2.
- JIANG Qiyuan, GUAN Panfeng, YE Rong. Analysis on longitudinal deformation of soft shield tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnel, 1999(4): 2.
- [17] 林永国. 地铁隧道纵向变形结构性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2001.
- LIN Yongguo. Study of longitudinal structural characteristics of metro tunnel in deformation [D]. Shanghai: Tongji University, 2001.