

研究论文

一种基于经验增强的实时优化方法 MEO

张正江, 邵之江, 陈 曦, 周 舟, 钱积新

(浙江大学工业控制技术国家重点实验室, 工业控制研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要: 根据实时优化问题的特点, 提出了一种实时优化方法——MEO (mnemonic enhancement optimization), 它是一种高效的基于经验增强的实时优化方法。设计了 MEO 框架及其具体实现步骤, 基于 Aspen Plus 平台开发了 MEO 通用代理服务器系统。结合 Aspen Plus OOMF 脚本语言与 AOS NLP/NLA 接口混合编程实施了 MEO 通用代理服务器系统。并应用脱丙烷塔和脱丁烷塔的联塔系统及大规模乙烯分离系统进行测试, 结果显示相比于传统方法, MEO 不但具有很好的实时性和收敛性, 而且具有很好的鲁棒性和开放性, 为实时操作优化的进行奠定了基础。

关键字: 实时优化; MEO; 经验记忆库; 逼近方法; 联塔系统; 乙烯分离系统

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 04-0947-06

Real-time optimization method MEO based on mnemonic enhancement

ZHANG Zhengjiang, SHAO Zhijiang, CHEN Xi, ZHOU Zhou, QIAN Jixin

(State Key Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract: A real-time optimization method MEO (mnemonic enhancement optimization) is introduced according to the characteristics of the real time optimization (RTO) problem, it is an efficient method based on mnemonic enhancement. The framework of MEO is designed, and the process of implementation is presented in this paper. The universal proxy of MEO is developed based on Aspen Plus. Aspen Plus OOMF script language and AOS NLP/NLA interface are used. With the simulations of multi-column system and ethylene separation process system, the effectiveness of MEO is demonstrated. It confirms that MEO is not only efficient in solution and convergence, but also robust and flexible. As a result, MEO can be very useful in the real-time optimization.

Key words: real-time optimization; MEO; mnemonic database of experience; approximation methods; multi-column system; ethylene separation process system

引 言

目前我国流程工业企业不同程度地存在能耗

高、成本高、劳动生产率低、资源利用率低的特点。因此采用高效的实时优化方法, 对生产装置、生产流程进行实时操作, 对生产过程的关键运行参

2007-06-11 收到初稿, 2007-08-28 收到修改稿。

联系人: 邵之江。第一作者: 张正江 (1982—), 男, 博士。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2002CB312200); 国家高技术研究发展计划项目 (2007AA04Z192); 国家科技支撑计划项目 (2007BAF22B05)。

Received date: 2007-06-11.

Corresponding author: Prof. SHAO Zhijiang. **E-mail:** zjshao@iipc.zju.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2002CB312200), the High-tech Research and Development Program of China (2007AA04Z192) and the Sci-tech Program of China (2007BAF22B05).

数进行在线调整,使生产装置在最优状态下运行,保持流程生产的高效性和经济性,具有十分重要的现实意义。针对流程工业中非线性模型的实时优化方法研究最近几年引起各国学者兴趣,并做了大量的研究^[1-3]。

实时操作优化其本质是在有限时间、有限计算资源的限制下,快速、准确地求解大规模非线性优化问题。高性能、高可用性的实时优化算法是实时操作优化的关键。然而由于过程对象模型呈现非常明显的大规模、非线性特征,在实时优化算法中解决计算的实时性问题一直是难点和焦点所在。实时操作优化的特点是对同一过程对象模型重复地进行优化。Gondzio 等^[4]在算法水平上研究了内点法所产生的一系列线性规划问题的共性,从而提出求解先前线性规划问题所得的结果和经验可为当前待求解的线性规划问题所借鉴。Yildirim 等^[5]研究了内点法的热启动点的恢复策略,利用了对原始问题迭代求解的经验。

本文根据实时优化问题的特点,提出了一种高效的基于经验增强的实时优化方法——MEO (mnemonic enhancement optimization),它具有很好的实时性和收敛性,以及很好的鲁棒性和开放性。在 Aspen Plus 平台下,结合 Aspen Plus OOMF 脚本语言与 AOS NLP/NLA 接口混合编程,设计和开发了实时优化方法 MEO,并应用脱丙烷塔和脱丁烷塔的联塔系统与大规模乙烯分离系统进行测试,结果显示了实时优化方法 MEO 的高效性。为实时操作优化的进行奠定了基础。

1 实时优化方法 MEO

实时优化问题的特点在于每次优化的问题是相似的,由于一些参数变动引起操作条件的改变从而进行优化,每次优化问题的目标函数与系统模型方程相同。因此一般的实时优化问题可以描述为如下形式

$$\begin{cases} \min_{x \in R^n} & f(x, \alpha) \\ \text{s. t.} & c_i(x, \alpha) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m' \\ & c_i(x, \alpha) \geq 0, \quad i = m' + 1, m' + 2, \dots, m \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in R^n$ 为优化变量或决策变量, $f(x, \alpha) \in R$ 为目标函数, $c_i(x, \alpha) = 0$ ($i = 1, 2, \dots, m'$) 为模型等式约束, $c_i(x, \alpha) \geq 0$ ($i = m' + 1, m' + 2, \dots, m$) 为模型不等式约束, $\alpha \in R^p$ 为系统的操作参数。

记集合 $E = \{1, 2, \dots, m'\}$, $I = \{m' + 1, m' + 2, \dots, m\}$, 由一阶最优性 (KKT) 条件可知

$$\begin{cases} \partial f(x^*, \alpha) - \sum_{i=1}^m \lambda_i^* \partial c_i(x^*, \alpha) = 0, i \in E \cup I \\ c_i(x^*, \alpha) = 0, \quad i \in E \\ c_i(x^*, \alpha) \geq 0, \quad i \in I \\ \lambda_i^* \geq 0, \quad i \in I \\ \lambda_i^* c_i(x^*, \alpha) = 0, \quad i \in E \cup I \end{cases} \quad (2)$$

其中, x^* 为最优解, λ^* 为对应的 Lagrange 乘子。由上述 KKT 条件可知 x^* 与 λ^* 是系统操作参数 α 的函数

$$\begin{cases} \lambda^* = \lambda^*(\alpha) \\ x^* = x^*(\alpha) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 并不能直接得到,但可以利用先前的优化经验进行逼近此函数。然而传统的实时优化方法不积累先前的优化计算经验,每次优化计算时,只用前一个点计算的结果作为当前优化的初值点。当参数波动时,求解时间长,很难满足实时操作优化的实时性要求。当参数波动较大时,甚至会不收敛,不满足实时操作优化的平稳性要求。而 MEO 利用先前的优化经验对当前操作参数 α 下的最优解 x^* 进行逼近从而加速实时优化的进行。

MEO 本质上是一种基于迭代的实时操作优化方法,它能以极低的计算代价大幅度提升操作优化的性能。该方法利用实时优化过程中先前优化得到的最优解,建立解集的经验记忆库。当实时优化过程中操作参数改变时,依据距离最近原则从经验记忆库中选择若干先前优化计算的结果及相应操作参数值,结合优化问题的模型,合理地选择数值逼近方法,逼近当前优化问题的最优解,将逼近的结果代入到优化算法中以得到精确的最优解。由于优化和模拟之间具有共性,使得该方法不但可用于优化,还可用于系统模拟和仿真上。与传统的实时优化方法相比,此算法有着明显较快的计算速度以及较好的收敛性,具有更好的鲁棒性。同时 MEO 具有很好的开放性,它可以和各种数值逼近方法相结合,如不同的插值法和拟合法。MEO 的开放性同时也体现在它对各种不同的优化算法均能够提供良好的支持。

随着参数的不断变化, MEO 的经验在参数定义域上逐渐积累并变得密集起来。MEO 的性能将在速度和收敛性能等方面得以连续提升。而当前通

用的传统算法在操作优化进程中对改善性能无能为力。对于实时操作优化来说，MEO 能够通过这样一种经验积累，自然、合理地提高求解的实时性、收敛性。

2 基于 Aspen Plus 平台的设计与开发

MEO 充分地利用优化计算的经验以提升操作优化性能，通过反复迭代计算以低代价大幅度提升操作优化的实时性和可靠性，通过经验积累自然、连续地提高操作优化的性能。设计 MEO 的框架图如图 1 所示。MEO 由经验记忆库、逼近方法和优化算法三部分组成，经验记忆库存放所有成功收敛的优化计算经验，计算时选择有效经验提供给逼近方法。逼近方法利用经验库提供的经验逼近待求的最优解，要求计算代价低但逼近效果好，逼近值随着经验的积累而收敛于最优解。优化算法在逼近值的基础上进行精确寻优，求解时间短，成功率高。MEO 对多种优化算法均具有良好的支持。

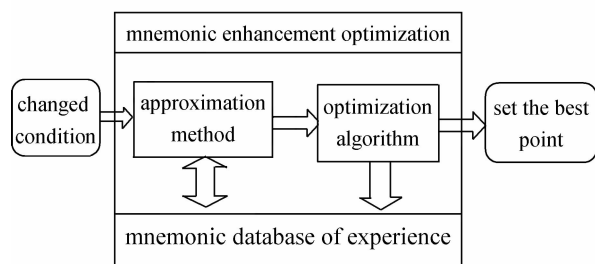


图 1 MEO 框架图

Fig. 1 Framework of MEO

根据 MEO 的框架，设计其具体步骤如下：

(1) 据模型特点，确定参数的维数 p ，选择逼近方法；设置选择的逼近方法的阶次 N ，设置经验记忆库的记录数 $\text{Label}=0$ ；

(2) 设置优化次数 $K=1$ ，采用当前提供的起始点应用求解器进行优化求解；如果优化成功保存优化结果到经验记忆库中，设置 $\text{Label}=\text{Label}+1$ ；

(3) 设置优化次数 $K=K+1$ ，如果 $\text{Label} \geq \text{Number}(N, p)$ ，其中 $\text{Number}(N, p)$ 为计算 N 阶逼近方法所需最少节点数，转 (5)，否则继续；

(4) 根据经验记忆库中的记录，选择距离当前参数 α_k 最近的经验参数点所对应的最优解作为计算起始点，对问题应用求解器进行优化求解；如果

优化成功保存优化结果到经验记忆库中，设置 $\text{Label}=\text{Label}+1$ ，转 (3)；

(5) 根据经验记忆库中的记录，采用 N 阶逼近方法，估计当前优化计算的最优点 \mathbf{x}_k^* ，将其作为优化起始点，对问题应用求解器进行优化求解；如果优化成功保存优化结果 \mathbf{x}_k^* 到经验记忆库中，设置 $\text{Label}=\text{Label}+1$ ，转 (3)。

Aspen Plus 是 AspenTech 公司开发的被广泛使用的流程模拟和优化软件，有序贯模块法和开放式方程法两种计算模式^[6]，它是流程模拟与优化的重要软件。在此平台下进行 MEO 的开发，对实时操作优化有显著的意义。在 Aspen Plus 平台下，开发 MEO 通用代理服务器系统的示意图如图 2 所示，该系统包括著名流程软件 Aspen Plus 及其 AOS NLP/NLA 接口、记忆增强优化型方法 MEO 及 Aspen Plus 内部的 NLP/NLA 求解器。

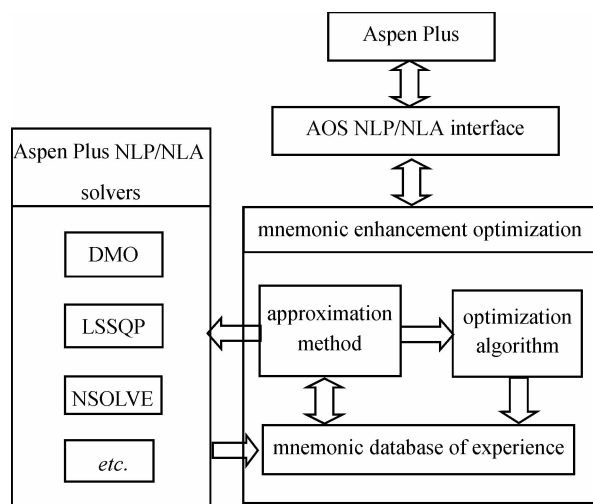


图 2 MEO 通用代理服务器系统的示意图

Fig. 2 Universal proxy of MEO

对 Aspen Plus 中的化工流程进行模拟或优化时，通过其 AOS NLP/NLA 接口，调用实时优化方法 MEO，MEO 作为代理服务器进行模拟或优化计算，包括提取经验记忆库信息，应用逼近方法估计模拟或优化的解，再调用优化算法进行模拟或优化计算，快速得到问题的真实解，将模拟或优化结果保存到经验记忆库中。整个 MEO 计算流程结合 Aspen Plus OOMF 脚本语言与 AOS NLP/NLA 接口混合编程实现。Aspen Plus OOMF 脚本语言是 Aspen Plus 对用户开放的一些操作指令^[7]，AOS NLP/NLA 接口则提供了 Aspen Plus 与外部求解器的各种接口信息，可通过它内嵌外部求解

器^[8]。逼近方法、经验记忆库的选择与更新及外部算法的嵌入通过 AOS NLP/NLA 接口编程实现,模型参数的设置与读写、选择内嵌的优化算法或 Aspen Plus 内部的 NLP/NLA 求解器等过程则由 Aspen Plus OOMF 脚本语言编程实现。

图 2 所示的 MEO 通用代理服务器系统具有很好的开放性,它可以和各种逼近方法如 Lagrange 插值逼近方法、曲线拟合逼近方法等相结合,同时也可以对各种不同的优化算法提供良好的支持,如外部各种优化算法及 Aspen Plus 内部的 NLP/NLA 求解器的优化算法。此 MEO 通用代理服务器系统的开发为流程的实时操作优化奠定了基础。

3 实时优化方法 MEO 的应用测试

实例 1

脱丙烷塔和脱丁烷塔的联塔系统的流程图如图 3 所示,此联塔系统是乙烯生产过程中两个重要的精馏操作系统装置单元^[9],脱丙烷塔 (E-DA-404) 将进料中的 C3 部分轻组分与其他 C4 以上的组分分离出来,在塔顶形成液相 C3 产品,在脱丁烷塔 (E-DA-405) 中 C4 组分在塔顶作为出料产品被分离出来。

脱丙烷塔和脱丁烷塔得到的产品分别是 C3 产品和 C4 产品,影响脱丙烷塔和脱丁烷塔效益的主要是 C3、C4 产品的产量及价格。因此建立以下优化命题形式:

$$\text{目标函数} \quad \max F = (278.88 \times S1_bw + 227.752 \times S1_dw) / 10000$$

约束方程 精馏塔的 Mesh 方程 (质量平衡、能量平衡、相平衡及分子归一方程) 两塔的连接方程

边界约束 产品的纯度指标约束

$$\text{脱丙烷塔塔顶产品: } C_3H_6 \geq 0.93$$

$$\text{脱丁烷塔塔顶产品: } C_5 \leq 0.0095$$

其中, F 表示优化目标,单位为万元/小时; $S1_bw$ 、 $S1_dw$ 分别表示脱丙烷塔和脱丁烷塔的塔顶产品流量,单位为 $\text{kmol} \cdot \text{h}^{-1}$ 。将 MEO 应用于联塔流程的优化,求解器采用 DMO (Aspen Plus 内部求解器,算法内核为 SQP^[10]), $S502$ 的进料量作为波动参数,进料量波动 100 次。MEO 采用一阶分段 Lagrange 插值逼近方法,其计算的统计结果与传统方法比较如表 1 所示。

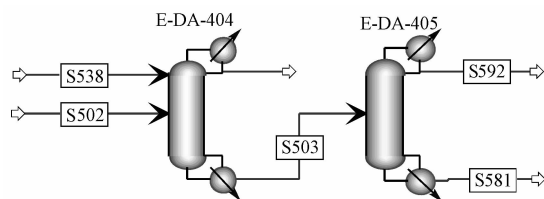


图 3 联塔流程图

Fig. 3 Flow chart of multi-column system

表 1 MEO 与传统方法在联塔系统的优化计算的统计结果
Table 1 Statistical result of multi-column system with MEO and traditional method

Method	Total steps	Total time /s	Convergent percent/%
traditional method	451	253.072	75
MEO	293	204.779	96

由表 1 可知,采用 MEO 方法相对传统方法明显降低了总迭代次数和总计算时间,并且收敛成功率高,体现了 MEO 的高效性。

实例 2

大规模乙烯分离系统的流程图如图 4 所示,乙烯分离的工艺流程是乙烯裂解气经压缩、脱除大部分重烃和水、脱除酸性气体深度干燥后,进入脱甲烷塔系统,各组分按 C1、C2、C3 等顺序先后进行分离^[11]。完整的乙烯分离流程包括脱甲烷塔系统、脱乙烷塔和乙炔加氢系统、乙烯精馏塔及乙烯产品贮存系统、脱丙烷塔和脱丁烷塔系统、丙二烯甲基乙炔加氢系统。

根据化工过程的质量平衡、能量平衡、相平衡及分子归一方程,结合各流股的连接方程,通过严格的开放式机理方程形式建立整个系统的模型,对象模型含有变量 33839 维,方程数也为 33839,具有大规模、非线性的特征。将 MEO 应用于乙烯分离系统的模拟,求解器采用 DMO。 $S312$ 的进料量作为波动参数,进料量波动 50 次。MEO 采用一阶分段 Lagrange 插值逼近方法,其计算的统计结果与传统方法比较如表 2 所示。两种方法的计算时间比较如图 5 所示,图中“*”为 MEO 计算结果,而“+”为传统方法计算结果。

由表 2 和图 5 可知,相比于传统方法,MEO 方法降低了总计算时间和平均时间,提高了收敛成功率,求解计算平稳,非常有利于求解计算大规模复杂系统。由于其计算时间少、收敛成功率高、高效性能,非常适合应用于实时操作优化。

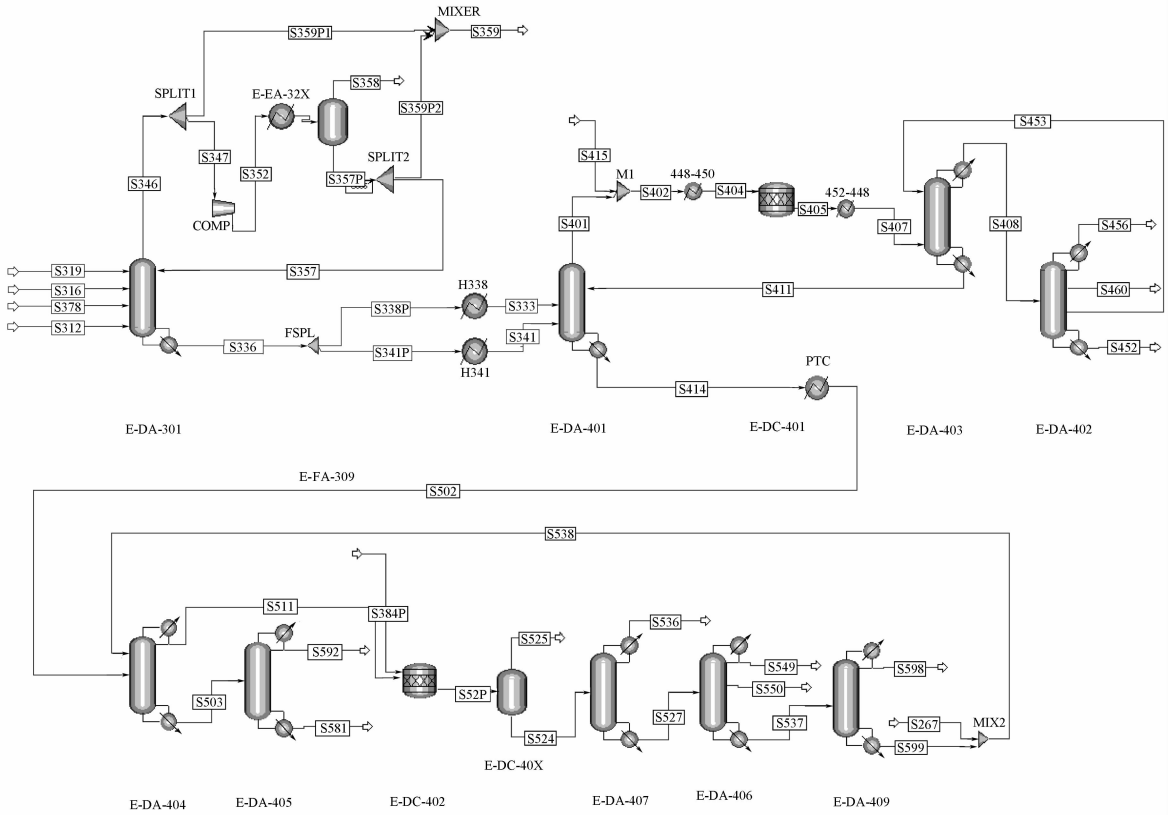


图 4 乙烯分离系统流程图

Fig. 4 Flow chart of ethylene separation process system

表 2 MEO 与传统方法在乙烯分离系统的模拟计算的统计结果

Table 2 Statistical result of ethylene separation process system with MEO and traditional method

Method	Total time/s	Convergent percent/%	Average time/s	Variance
traditional method	2072.6	80	41.45	2940.0
MEO	547.3	100	10.95	4.21

4 结 论

MEO 是一种基于迭代的高效实时操作优化方法，它能以极低的计算代价大幅度提升操作优化的性能。本文在 Aspen Plus 平台下设计和开发了 MEO 通用代理服务器系统。MEO 计算流程结合 Aspen Plus OOMF 脚本语言与 AOS NLP/NLA 接口混合编程实现。应用脱丙烷塔和脱丁烷塔的联塔系统与大规模乙烯分离系统进行测试，相比于传统方法，本文实施的 MEO 降低了总计算时间和总迭代次数，提高了收敛成功率，求解计算平稳，非常适合应用于实时操作优化。

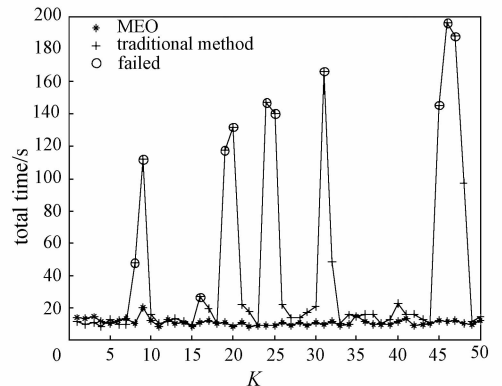


图 5 MEO 与传统方法计算时间比较

Fig. 5 Comparison of total time between traditional method and MEO

References

- [1] Biegler L T, Rawlings J B. Optimization approaches to nonlinear model predictive control//Arkun Y, Ray W H. Chemical Process Control-CPC IV. Austine, Texas: The CACHE Corp., 1991: 543-571
- [2] Diehl M, Uslu I, Findeisen R. Real-time optimization for large scale processes: nonlinear model predictive control of a high purity distillation column//Groetschel, Krumke, Rambau. Online Optimization of Large Scale Systems: State of the Art. Springer, 2001
- [3] Thomas E M, Andrew N H. Real-time operations optimization of continuous processes//Fifth International Conference on Chemical Process Control (CACHE/AICHE). AIChE Symposium Series, 1997, **93**: 156-164
- [4] Gondzio J, Grothey A. Reoptimization with the primal-dual interior point method. *SIAM J. Optim.*, 2003, **13** (3): 842-864
- [5] Yildirim E A, Wright S J. Warm-start strategies in interior-point methods for linear programming. *SIAM J. Optim.*, 2002, **12** (3): 782-810
- [6] Aspen Technology, Inc. Aspen Plus 12.1 User Guide [DB/OL]. [2003-06-27]. <http://support.aspentech.com/webteamasp/My/FrameDef.asp?/webteamasp/AllDocsDB.asp>
- [7] Aspen Technology, Inc. Aspen Plus12.1 OOMF Script Language [DB/OL]. [2003-06-27]. <http://support.aspentech.com/webteamasp/My/FrameDef.asp?/webteamasp/AllDocsDB.asp>
- [8] Aspen Technology, Inc. Aspen Open Solvers 12.1 User Guide [DB/OL]. [2003-06-27]. <http://support.aspentech.com/webteamasp/My/FrameDef.asp?/webteamasp/AllDocsDB.asp>
- [9] Jiang Aipeng (江爱朋), Shao Zhijiang (邵之江), Chen Xi (陈曦). Simulation and optimization of distillation column sequence in large-scale ethylene production. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2006, **57** (9): 2128-2134
- [10] Aspen Technology, Inc. Aspen Plus 12.1 Getting Started EO Modeling [DB/OL]. [2003-06-30]. <http://support.aspentech.com/webteamasp/My/FrameDef.asp?/webteamasp/AllDocsDB.asp>
- [11] Geng Dazhao (耿大钊). Simulation and optimization on ethylene separation process [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006