

# 化工原理课程设计的新方法

## ——单指标全塔负荷性能图技术和流程模拟的应用

曹睿,刘艳升,马君涵

(中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室,北京 102249)

[摘要]塔板负荷性能图是分析塔板操作最有效的手段,我们在单板的基础上拓展开发了基于全塔的负荷性能图分析技术。它能够使我们直观地了解全塔的操作状况,掌握整体的适宜操作范围、工艺和设备的匹配情况,并分析全塔的操作瓶颈,进行设计优化或工艺调整。鉴于该技术在工业上的成功应用,化工原理课程设计中首次采用了基于单指标的全塔负荷性能图技术。通过与流程模拟紧密结合,该方法从根本上改变了课程设计的传统套路,使之完全与工业设计水平接轨,显著提高了教学质量。

[关键词]全塔负荷性能图;单指标;流程模拟;课程设计;瓶颈分析

# The New Method of Course Design for Principles of Chemical Engineering

## ——the Applications of Whole Column Load Performance Diagram Technology with Single Index and Process Simulation

Cao Rui, Liu Yansheng, Ma Junhan

**Abstract:** Tray load performance diagram is usually employed as the most effective method to analysis the operating conditions on a tray. According to its principles on a single tray, a new analytic technology, named whole column load performance diagram, is proposed for the application of whole column. In this way, we are aware of the integral column performances and get to know the feasible operating region, the matching state of process parameters and device arrangement more intuitively, which can greatly help to discuss the operating bottleneck of whole column, to make optimum design and adjustments of process conditions. Considering the successful applications in industrial, for the first time, the whole column load performance diagram technology based on a single index is used in the course design for principles of chemical engineering. This method, closely combined with process simulation, approaches to be well connected with the practical industrial design. It abandoned the traditional design pattern which is quite laborious and time consuming, and significantly improve the teaching quality in a brand new way.

**Key words:** Whole column load performance diagram; Single index; Process simulation; Course design; Bottleneck analysis

[作者简介] 曹睿(1973-),女,副教授,硕士。

20世纪60年代,沈复教授等首次提出了根据塔板的水力学指标评估塔板操作性能的普遍化塔板负荷性能图分析法。由于传质理论尚未发展到能够可靠预测塔板效率或等板高度的水平,为了保证塔设备的分离要求,我们需要找到简单可行的控制指标。当体系和塔结构确定后,影响传质效果的主要因素是塔板间的返混及板上的气液接触不良,即传质性能与水力学操作限制之间有着必然联系,通过控制关键水力学指标,可以保证塔板操作处于适宜的传质、传热区域。据此,在大量实验数据和工业设计经验的基础上,沈复教授等开发了单板负荷性能图。这项技术把塔板自身结构对应的适宜操作范围与工艺条件有机地结合起来,可以简单、直观地判断塔板操作状况,解决了工业设计和核算问题,一直以来都是我国塔设备设计和操作分析的主流方法。

尽管如此,该技术只能对单板的负荷性能逐一进行分析,而对全塔评价不够直观。随着计算水平的高速发展,流程模拟软件功能日益强大,为工程设计、流程剖析提供了有力工具。刘艳升教授等人拓展开发了基于全塔的负荷性能图分析技术,<sup>[1]</sup>将全部塔板的负荷性能集中表现在一张图纸上。其中对单一塔板水力学指标(如雾沫夹带等)建立的叫单指标全塔负荷性能图,对实际塔板的气液负荷上、下限建立的叫全指标全塔负荷性能图,全指标技术需要编程计算,判断各层塔板的具体上下限是什么操作限。此外,该技术还借鉴国外的体系极限概念,建立了狭义(仅涉及传质限制)和广义(涉及全部水力学极限和传质限制)两种操作限制的概念,进一步完善了全塔负荷性能图。该技术从整个系统的角度来分析、判断装置性能的优劣,讨论设计和操作瓶颈,不仅可用于板式塔,还能推广到填料塔,工业上已经取得了良好的应用效果。

基于塔板分析技术的重要性,负荷性能图早已纳入化工原理的教学内容,并作为课程设计重要的环节。课程设计的化工原理课堂教学向工业设计和生产过渡的课程,学生需要综合运用前面讲授的三传基本知识,联系石油化工的生产实际,

完成以蒸馏过程为主的多种单元操作过程综合应用的设计任务。课程设计对培养学生的工程意识起着不可替代的作用,但是内容更新比较缓慢,一直以手工计算为主,没有本质上的变化,远远滞后于工业水平。作为实践环节,课程设计对精馏技术和支撑学科的发展依赖性更高,不及时补充修正,将会极大地降低设计水平,也会限制学生知识面的拓展和工程经验的提高。正如 Aspen 所提到的:“如果不能对工艺模拟,就不能了解它。如果不了解它,就不能改进它,在 21 世纪就不会具有竞争力。”

因此,我们在新的教学体系中引入了基于单指标的全塔负荷性能图,结合 Aspen Plus 流程模拟软件和 Origin 数据处理软件,完成工艺计算和设计。单指标全塔负荷性能图与全指标技术相比,不需要编程,学生容易使用,不仅可以提高本科生的设计水平,还能够加深学生对专业概念的理解。

## 一、单指标全塔负荷性能图分析技术

### (一)新技术的提出

普遍化塔板负荷性能图只能反映具体工况下某层塔板的设计性能,要了解全塔的总体情况,我们需要对所有塔板逐一作图。而设计中时常根据生产实际的操作波动改变工艺条件,这就需要多次核算塔设备是否能满足要求。采用传统方法完成一次设计,要输出大量的图和数据,对比不直观,不容易发现设计瓶颈,而且重复劳动量大,工作效率低。

为此,刘艳升教授提出了基于单指标和全指标的全塔负荷性能图概念,<sup>[1]</sup>通过流程模拟获得各板的工艺数据,采用 Microsoft Office 办公软件的多工作表环境实现不同方案的设计和流体力学计算,利用 Origin 软件的绘图功能绘制全塔负荷性能图,完成塔设备的设计和改造,具体流程见图 1。其中,全指标技术通过编程可实现工业设计,单指标技术不需编程,非常适合用于课程设计教学。

### (二)单指标全塔负荷性能图的构成

单指标的全塔负荷性能图以流程模拟的理论板号为横坐标,以塔板或降液管的某一性能指标

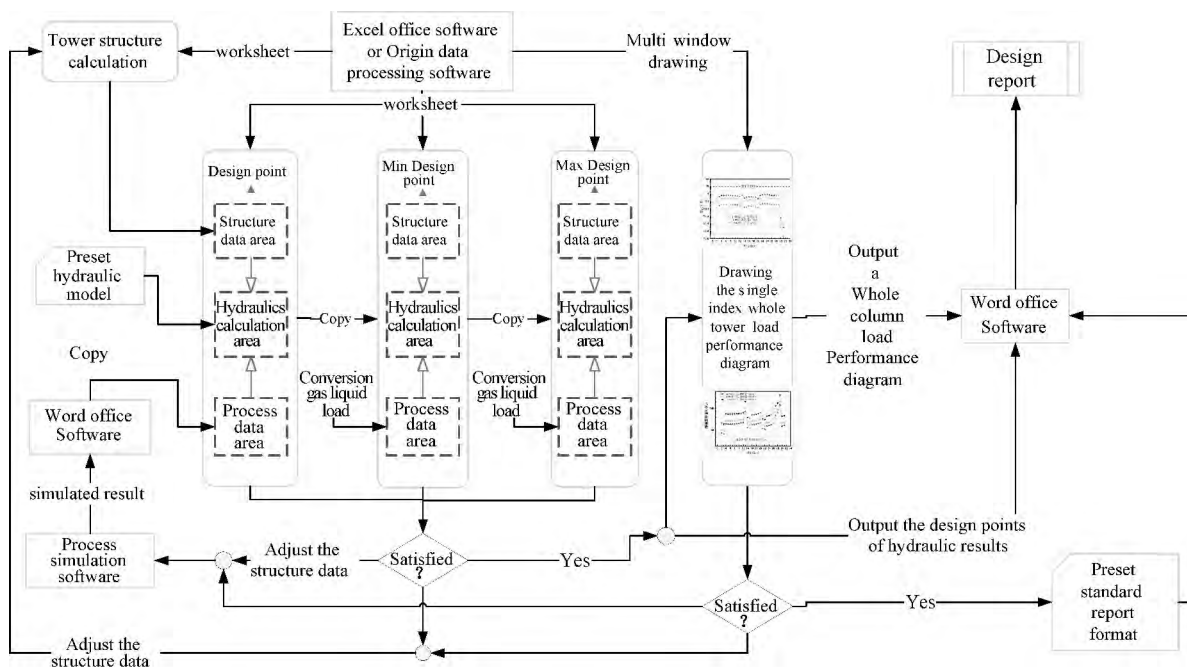


图 1 运用 Excel 或 Origin 软件处理塔设计

为纵坐标,将各板对应的操作点、水力学限制及进料量波动条件下的结果绘在同一图中。板式塔需要考察塔板和降液管的限制,<sup>[2]</sup>分为水力学限制和传质限制。水力学限制是指原料进入塔内,经多级操作后,能够正常稳定地获得出料的水力学条件,是塔板设计的必要条件;传质限制是指能够

生产出“合格”产品(组成满足要求)的水力学条件,是维持塔板良好效率的充分条件。塔板限制包括喷射液泛、雾沫夹带、泄漏、液噎点和最小液量限制,降液管限制包括降液管液泛、降液管停留时间,有时我们还需要考虑降液管入口液速和出口液速,具体见表 1 和表 2。

表 1 水力学操作限制

工质	属性	水力学极限	操作现象
气相	上限	喷射液泛	100%雾沫夹带,制约了塔内正常气液流动
	下限	泄漏液噎点	在液噎点附近的塔板发生压力波动,引起机械震动
液相	上限	降液管入口液泛	液速过高阻滞降液管内气液分离,造成降液管入口堵塞
	下限	最小溢流强度	保证正常均匀的堰上液体流动
气液两相	上限	降液管液泛	泡沫层高不超过降液管与堰高之和,防止降液管液泛
	下限	降液管液封	降液管液层过低,不足以产生液封,导致气体短路

表 2 传质操作限制

工质	属性	传质限制	操作现象
气相	上限	雾沫夹带	返混降低上层塔板传质推动力,过量雾沫夹带将引起液泛
	下限	泄漏	本层塔板气液接触不良,且返混降低下层塔板传质推动力
气液两相	上限	降液管气体夹带	降低下层塔板传质推动力,且降低降液管的处理能力

二、流程模拟技术的应用

流程模拟是用数学方法来描述某一特定过程的静态或动态特性,通过计算机进行物料平衡、热量平衡、化学平衡及压力平衡等模拟计算的过程,

可以作为过程系统分析和优化的基础。常用的化工流程模拟软件主要有 Aspen、PRO/II、HYSYS、Design II 等。

流程模拟软件以主控模块为中心,包含输入、

单元操作、物性数据库、算法子程序、单元设备估算、成本估算和经济评价、输出等模块,<sup>[3]</sup>可应用于产品生产实施的各个阶段:在项目策划阶段对工艺过程进行可行性分析,评价各种方案;在研究阶段进行概念设计,确定研究重点;在进行实验研究的同时进行模拟实验,开展数学模型化工作,使两者互相补充,提高研究质量,加快研究进度;在工程设计阶段对初步设计方案进行比较和调整,寻求最优设计;在生产阶段监控过程性能,克服生产“瓶颈”,实现操作优化,通过离线指导生产来实现企业的节能降耗、挖潜增效,从而提高经济效益。

在炼厂和化工厂中,流程模拟技术广泛应用于常减压、催化裂化、催化重整、加氢过程、延迟焦化、减黏裂化、气体分馏、三废处理等各个环节,还可进行用能分析和换热网络优化,以及整体工艺流程联合优化等。物性估算、热力学模型选择和收敛算法的选择等是流程模拟考虑的关键问题。

鉴于流程模拟技术在工业设计中的广泛应用,学生有必要在课程设计中进行尝试,辅助手工计算的设计方法。手算过程是教学基础,也是模拟计算的基础,为了让学生了解具体工艺计算过程,保留手算任务是必要的,但是手算结果是单一的、静态的,而工业生产的工艺变量是波动的,单

一的静态设计无法满足实际动态过程的要求,全塔负荷性能图技术配合流程模拟可以准确、科学地指导工程设计并剖析流程,使学生能够从整体角度系统地分析、判断一个装置操作的好坏,并对操作结果进行可靠预测,因此,在课程设计中引入流程模拟技术是未来的发展趋势。

### 三、算例

#### (一)塔板结构设计

某进料量为 12.3t/h 的正戊烷(1)—正己烷(2)—正庚烷(3)—正辛烷(4)混合物连续精馏装置,采用 F-1 型浮阀塔板。进料组成: $x_1 = 0.10$  (mol%,下同), $x_2 = 0.30$ , $x_3 = 0.40$ ,液相分率 0.1,常压操作。分离要求: $x_{w2} = 0.045$ , $x_{D3} = 0.04$ 。求设计点性能及操作弹性范围 60%~140%的加工能力。

设计过程:用 Aspen Plus 进行正常负荷(100%)的全流程模拟,选用 PR 热力学模型。先用 Aspen 的 DSTWU 模块对精馏塔进行简捷计算,为严格计算提供初值;然后运行 Columns 中的 RadFrac 模块进行严格计算。根据经验和液相负荷的大小设计堰径比  $L_w/D$ ,然后计算降液管面积、出口堰长和降液管宽度,<sup>[3]</sup>再根据气相负荷估算开孔率。 $L_w/D$  的设计初值选中间值 0.7,初步设计结果见表 3。

表 3 塔设备设计结果

结构	塔径 $D, \text{mm}$	溢流数	降液管宽 $W_d, \text{mm}$	溢流堰长 $L_w, \text{mm}$	板间距 $H_T, \text{mm}$	开孔率 $\phi, \%$	
						精馏段	提馏段
尺寸	1400	1	200	980	500	14.05	8.07

#### (二)水力学性能分析

根据全流程模拟结果,我们可得到各层塔板上气、液相物流的密度、黏度、表面张力、流量、温度、压力等工艺参数,见表 4。根据工艺计算结果,结合前述水力学限制及传质限制,我们可以采用文献提供的水力学模型,<sup>[2]</sup>并用 origin 软件绘制得到以下五个水力学性能的单指标全塔负荷性能图:泛点率、阀孔动能因数、雾沫夹带、降液管停留时间、降液管液层高,见图 2—6。

分析图 2 可知,精馏段各板的 100%操作点在 72%左右,已经接近塔板上限(80%~82%),

而一般设计点的泛点率通常在 40%~50%;140%操作点在 102%左右,已经发生液泛。图 3 中精馏段 100%操作点的雾沫夹带量在 0.115,塔板已经超过 0.1 的上限,140%点在 0.447,已经严重雾沫夹带。图 4 中的阀孔动能因数的 100%操作点为  $13.3 \text{ Pa}^{0.5}$ ,不在  $9 \sim 12 \text{ Pa}^{0.5}$  设计范围内,140%点为  $19 \text{ Pa}^{0.5}$ ,60%点为  $7.98 \text{ Pa}^{0.5}$ ,超过  $7 \sim 18 \text{ Pa}^{0.5}$  正常操作上限,操作弹性较小。图 6 中精馏段 100%点的降液管液层高虽然属于正常范围,但 140%点超过了上限。这说明精馏段气相负荷较大,塔径设计偏小,设计点已经超过上

限,不但没有提量的可能,正常操作都不能保证, 所以精馏段  $L_w/D$  取中间值 0.7 不合适。

表 4 100%操作点的流程模拟计算结果

理论板号	温度 ℃	压力 kpa	气相密度 kg/m <sup>3</sup>	气相流率 m <sup>3</sup> /s	液相密度 kg/m <sup>3</sup>	液相流率 m <sup>3</sup> /h	液相表面张 力 N/m	液相黏度 pa. s	气相黏度 pa. s
2	69.0	113.0	3.45	1.54	614.23	24.88	0.0133	2.00E-04	7.61E-06
3	74.7	114.6	3.54	1.52	613.76	25.01	0.0131	1.98E-04	7.65E-06
4	79.7	116.1	3.62	1.50	613.56	25.08	0.0131	1.97E-04	7.67E-06
5	84.9	117.7	3.69	1.47	613.33	25.17	0.0130	1.95E-04	7.68E-06
6	90.2	119.3	3.77	1.44	613.14	25.23	0.0129	1.94E-04	7.68E-06
7	95.5	120.8	3.84	1.42	613.15	25.19	0.0128	1.94E-04	7.69E-06
8	98.3	122.4	3.87	1.41	611.98	27.75	0.0127	1.91E-04	7.69E-06
9	100.2	123.9	4.01	0.61	610.98	28.07	0.0126	1.89E-04	7.67E-06
10	102.1	125.5	4.08	0.61	610.10	28.35	0.0124	1.87E-04	7.66E-06
11	104.1	127.0	4.15	0.61	609.27	28.64	0.0123	1.85E-04	7.66E-06
12	106.3	128.6	4.23	0.61	608.46	28.92	0.0122	1.83E-04	7.65E-06

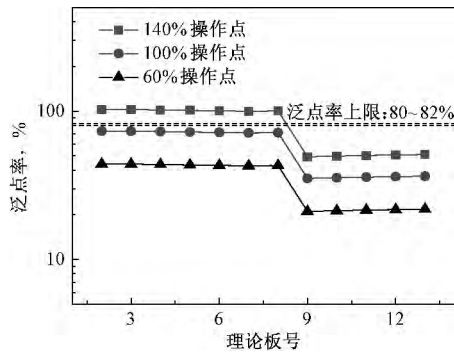


图 2 泛点率全塔负荷性能图

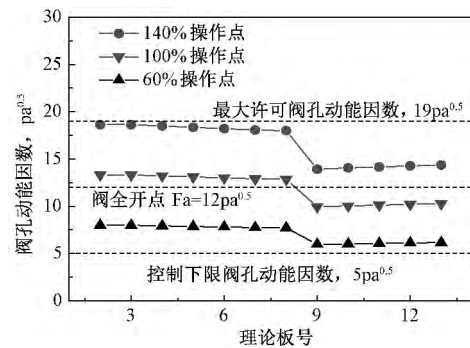


图 4 阀孔动能因数全塔负荷性能图

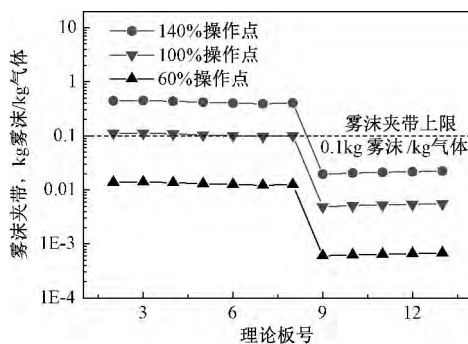


图 3 雾沫夹带全塔负荷性能图

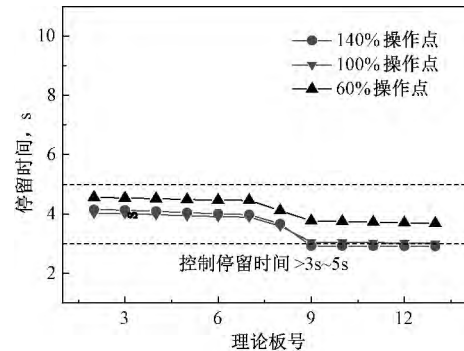


图 5 停留时间全塔负荷性能图

提馏段从图 2 和图 3 看是正常的,操作气速有较大裕量,但由图 5 可知,100%操作点的降液管停留时间低于 3s,说明提馏段液相负荷较大,降液管面积小了,提馏段  $L_w/D$  取中间值 0.7 也不合适。

根据上述全塔负荷性能图分析可知:精馏段发生过量雾沫夹带,喷溅液泛为操作上限,塔

板鼓泡区面积偏小,降液管面积富裕;而提馏段降液管停留时间过短,鼓泡区面积及开孔率偏大,降液管面积偏小。若适当减小精馏段的  $L_w/D$ ,加大提馏段的  $L_w/D$ ,可以改善操作性能。因此,调整精馏段的  $L_w/D = 0.65$ ,提馏段  $L_w/D = 0.75$ ,改造后的结果见表 5,单指标全塔负荷性能图见图 7~11。

表 5 塔设备设计结果

结构	塔径 mm	溢流数	降液管宽 mm		溢流堰长 mm		板间距 mm	开孔率 %	
			精馏段	提馏段	精馏段	提馏段		精馏段	提馏段
尺寸	1400	1	168	237	910	1050	500	15.52	7.14

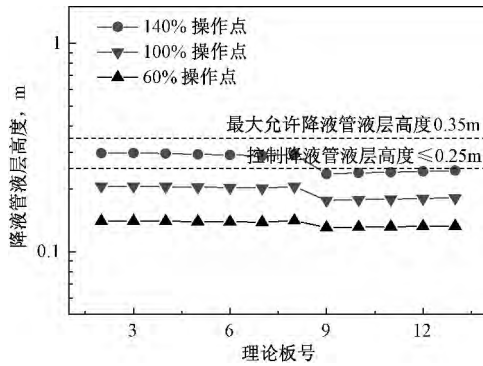


图 6 降液管液层高度全塔负荷性能图

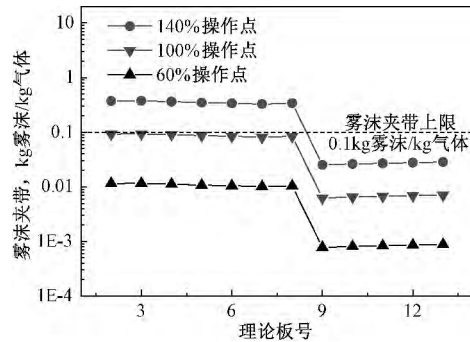


图 7 雾沫夹带全塔负荷性能图

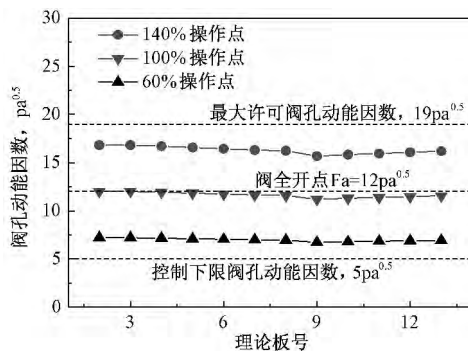


图 8 阀孔动能因数全塔负荷性能图

由图 7 可知,精馏段 100%操作点的雾沫夹带降低到 0.1 以内,改善了塔板喷射液泛上限,图 8 中精馏段和提馏段 100%点的  $F_H$  都控制在 12% 以内,满足 9~12  $\text{Pa}^{0.5}$  的设计范围,140%点在 16.82% 以内,60%点在 7.2 以上,满足 7~18  $\text{Pa}^{0.5}$  的正常操作范围。图 9 中提馏段的停留时间得到显著改善,精馏段也满足要求,只是进料板的

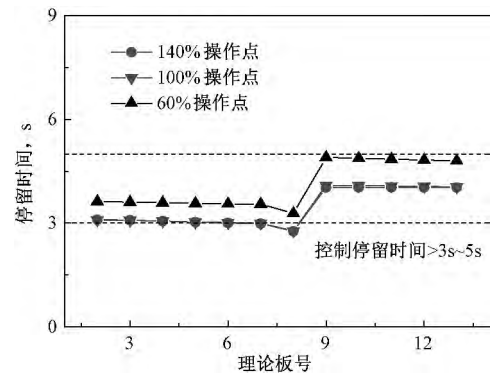


图 9 停留时间全塔负荷性能图

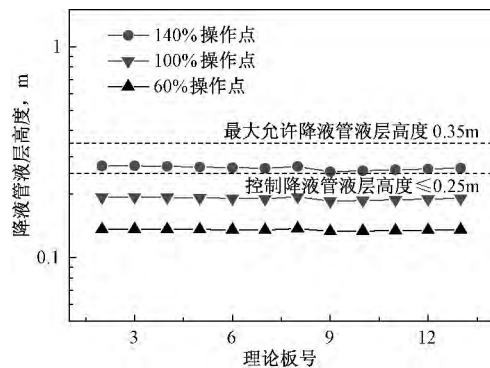


图 10 降液管液层高度全塔负荷性能图

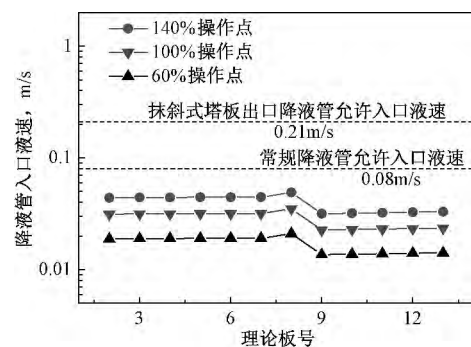


图 11 降液管入口液速全塔负荷性能图

停留时间为  $2.76\text{s} < 3\text{s}$ ,因此需要增加降液管入口液速,判断进料板的降液管液速是否小于  $0.08 \sim 0.12\text{m/s}$ 。由图 11 可知,100%点的降液管入口液速为  $0.034\text{m/s}$ ,140%为  $0.049\text{m/s}$ ,都属于正常操作范围。此外,图 10 的降液管液层高与改造前相比,不仅 100%点明显降低,140%点

也接近正常值 0.25m。分析结果表明,改造后塔板和降液管的设计指标全部满足要求。

上述改造过程若以普遍化单板负荷性能图的方式表示,在某些方面也可以得到类似效果,但必须在各层板的气液负荷接近恒摩尔流的情况下才适用,遇到炼油塔等负荷沿塔高变化显著的情况就完全不适用,而且对局部塔板出现负荷突变的情况也无法考察。以本工况为例,图 12 和图 13 是改造后的单板图,精馏段和提馏段设计点都在适宜操作区内,看起来完全满足要求,但实际上对进料板的停留时间就没有考察到。单板图不仅不易发现设计瓶颈,也不利于多方案对比和方案的调整匹配。

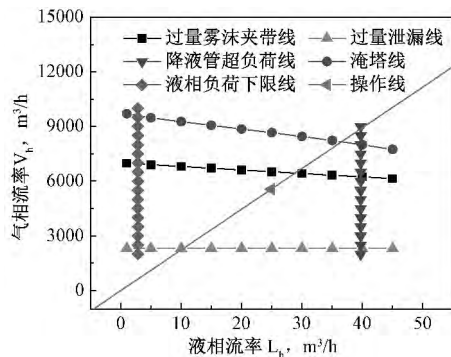


图 12 精馏段单板负荷性能图

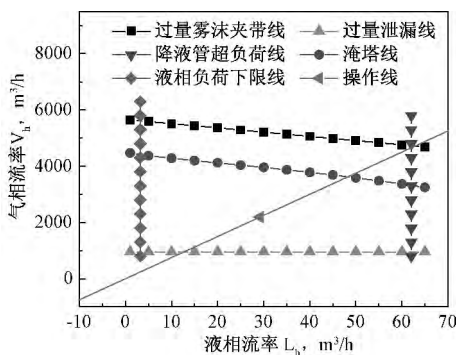


图 13 提馏段单板负荷性能图

四、结束语

全塔负荷性能图对塔操作限制的分析仅需绘制 5~6 幅图,可直接利用 Microsoft Windows 资源和 Office 办公软件实现,采用剪贴板可直接与流程模拟软件对接,而且能将塔板水力学计算和负荷性能图绘制直接联系在一起,便于多方案对

比。此分析技术可以直接对塔设备工艺模拟结果的适应性进行评价,容易发现设计瓶颈,并提出相应的改造措施。熟练技术人员从精馏塔流程模拟到设计报告仅需要 2~4 小时。对初学者来说,该方法图形绘制灵活、简便,单指标技术无须编程,尤其适用于初步设计和本科生课程设计。

流程模拟技术以其自身的强大功能,在石油化工领域已经占据了不可撼动的地位,一个设计单位的流程模拟水平往往标志着单位的设计水平。课程设计中,采用流程模拟能够获得全塔的工艺计算结果,这也是全塔负荷性能图技术的应用基础。对学生来说,能够在不承担任何设计风险的前提下学习使用流程模拟,设计能力将会得到真正有效的锻炼。学生通过反复调整设计条件,分析装置操作情况及弹性,体会设计变化或生产波动对实际效果的影响,将十分有助于他们向工程实际设计过渡。

现在普遍提倡学生拓宽知识面,向合理的多元化方向发展。如全国大学生化工设计大赛,对大学生的要求是全方位的,包括项目的可行性分析、工艺计算、流程设计、工程设计及厂区选址、环评等一系列内容,用传统的课程设计教学方法根本不可能完成。因此,按照重理论基础、强工程实践能力、高创新潜质的培养路线,课程设计内容必须有实质性的改革,这样才能形成集创新意识与工程能力于一体的培养模式。

(文字编辑:吴文水)

参考文献:

[1] 刘艳升,许光. 板式塔的操作分析(2)——单指标全塔负荷性能图分析新方法[J]. 炼油技术与工程, 2004, 34(8): 33-37.

[2] Lockett M. J. Distillation tray Fundamentals[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.

[3] 曹湘洪. 石油化工流程模拟技术进展及应用[M]. 北京: 中国石化出版社, 2009.

[4] Lockett M. J, Gharani A A W. Downcomer hydraulics at high liquid flow rates[J]. Instn Chem Engrs Symp Series, 1979, 56(2,3): 43-64.