

基于平均传热温差的炼化企业换热网络设计

徐恋*, 陈江

(浙江工业大学化工机械研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要:传统夹点法设计的换热网络没有考虑热量在运输和换热过程中的耗散。结合炼化企业生产现场的特点,为了设计出符合实际能量目标需求的换热网络,将物流间匹配换热的平均传热温差按照两侧物流传热膜系数的比率分配为冷、热物流的温差贡献值之和,以此确定各物流的温差贡献值。将采用温差贡献值法获得的结果与原案例结果进行比较,结果表明,根据物流传热膜系数的比率确定各物流温差贡献值的方法是有效实用的。

关键词:夹点技术;温差贡献值;平均传热温差;换热网络

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2015)04-0155-03

Design of heat-exchange network based on average heat-transfer temperature difference

XU Lian*, CHEN Jiang

(Institute of Chemical Machinery, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The heat dissipation of the transport and heat transfer process is not considered in traditional pinch technology. In order to design a heat-exchange network to meet with the practical energy demand, the temperature difference (ΔT) contribution of different (heat and cold) streams is determined by distributing the average heat-transfer temperature difference into ΔT contribution according to the heat transfer film coefficient ratio of the streams on both sides. The result obtained from the ΔT contribution method is also compared with the original one. The result shows that the determination method based on the ΔT contribution through the heat transfer film coefficient ratio of different streams is effective and practical.

Key words: pinch technology; ΔT -contribution; the average heat-transfer temperature difference; heat exchange network

换热网络的优化设计是炼化企业降低能耗的重要手段。夹点技术是由英国学者 Linnhoff 等^[1]于1983年首次提出的一种将温度-焓值图(T-H图)作为设计工具的换热网络设计方法。凭借其物理意义直观、简便实用的优点,在工程实际中得到了广泛应用,如在炼油厂的催化裂化^[2]、连续重整^[3]、常减压蒸馏^[4]等装置的设计和改造中都取得了较为显著的节能和经济效益。

在实际工程中,各物流的传热膜系数不同,故物流间相互匹配换热的传热温差各不相同,全过程系统不能采用单一的最小允许传热温差 ΔT_m 作为夹点计算。Nishimura 考虑到各物流的传热膜系数对 ΔT_m 的影响,提出了温差贡献值 ΔT 的概念^[5], Rev 等^[6]在此基础上做了改进,提出 $\Delta T = kh^{-z}$,用各物流的 ΔT 去修正各自的实际初始温度和目标温度,再用修正后的虚拟温度去构造复合曲线,由此可以排除传热膜系数不同对 ΔT_m 的影响,从而获得更为准确的能量目标,被称为虚拟温度法。蒋宁等^[7]在参数 k, z 的上下值范围内进行寻优,根据最小年度总费用确定各物流的温差贡献值。之后姚平经^[8]提出了一种温差贡献值的关联式,根据统计方法估

算或经验选取一参照物流的温差贡献值 ΔT_r ,就可以求出其他物流的温差贡献值。刘桂莲等^[9]基于此关联式,选取单一最小允许传热温差 ΔT_m 的一半作为参照物流的温差贡献值,得到其他物流的温差贡献值。

综上所述,传统夹点设计中的温差贡献值是一个根据经验选取的经验值。然而,由于炼化企业的换热网络存在管道布置复杂、换热器容易发生腐蚀结垢等问题,物流在运输过程中必然会因为管道的摩擦阻力、与周围环境的能量交换、换热管的结垢等因素发生热量耗散,最终导致实际的公用工程消耗量大于传统夹点设计得到的公用工程消耗量。因此,如何设计一个符合实际能量目标需求的换热网络是炼化企业有待解决的问题。本文中基于物流间匹配换热的实际传热温差值,按照两侧物流的传热膜系数比率确定各物流的温差贡献值,进行换热网络优化设计,并将获得的优化结果与原案例的优化结果进行比较。

1 温差贡献值法的基本原理

相互匹配进行换热的冷、热物流的平均传热温

差 ΔT_m , 定义为冷物流对平均传热温差的贡献值 ΔT_c^c 与热物流对平均传热温差的贡献值 ΔT_c^h 之和^[8], 即:

$$\Delta T_m = \Delta T_c^c + \Delta T_c^h \quad (1)$$

各物流的温差贡献值可以根据下式估算出来^[8]:

$$\Delta T_c^j = \sqrt{(h_r \cdot a_j) / (h_j \cdot a_r)} \cdot \Delta T_r \quad (2)$$

式中, ΔT_c^j 为某物流 j 对传热温差的贡献值, $^{\circ}\text{C}$; h_j 为某物流 j 侧的传热膜系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; a_j 为某物流 j 侧单位传热面积的价格, $\text{元}/\text{m}^2$; ΔT_r 为参考物流对传热温差的贡献值, $^{\circ}\text{C}$; h_r 为参考物流侧的传热膜系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; a_r 为参考物流侧单位传热面积的价格, $\text{元}/\text{m}^2$ 。

选取相互匹配换热的冷、热物流其中之一, 即热物流作为参考物流, 假设两侧物流单位传热面积的价格相同, 则冷物流的温差贡献值可以用下式表示:

$$\Delta T_{c,i}^c = \sqrt{h_{c,i} / h_{h,j}} \cdot (\Delta T_{m,i,j} - \Delta T_{c,i}^c) \quad (3)$$

式中, i, j 分别表示冷、热物流的序号; $\Delta T_{m,i,j}$ 为冷物流 i 与热物流 j 的平均传热温差。

$\Delta T_{m,i,j}, h_{c,i}, h_{h,j}$ 均可以准确地计算出来。同理, 如果将冷物流作为参考物流, 则热物流的温差贡献值也可以通过上式表示。由此可见, 物流的温差贡献值反映了两侧物流对传热的温差推动力大小, 与两侧物流传热膜系数的比值有关。即使是同一股物流, 在与不同的另一物流匹配换热的情况下, 其温差贡献值也是不同的。可选取较小值作为温差贡献值。

当推算出各物流的温差贡献值后, 就可以采用“虚拟温度法”确定各物流的虚拟温度, 构造复合曲线:

$$\text{热物流虚拟初始温度} = \text{实际初始温度} - \Delta T_{c,j}^h$$

$$\text{热物流虚拟目标温度} = \text{实际目标温度} - \Delta T_{c,j}^h$$

$$\text{冷物流虚拟初始温度} = \text{实际初始温度} + \Delta T_{c,i}^c$$

$$\text{冷物流虚拟目标温度} = \text{实际目标温度} + \Delta T_{c,i}^c$$

2 应用案例

本案例引自文献^[10], 装置中一共包含 3 股热物流、4 股冷物流、1 股热公用工程和 1 股冷公用工程, 原案例采用传统夹点法得到的网络结构如图 1 所示。物流数据和费用数据如表 1 和表 2 所示。在表 1 中, S1 为热公用工程(蒸汽), W1 为冷公用工程(冷却水), 其中各物流的温差贡献值是根据式(3)推算得到的。当同一股物流流经多台换热器时可以选取较小值作为物流的温差贡献值。

表 1 物流数据表

物流序号	初温/K	终温/K	热容流率/(kW·K ⁻¹)	传热膜系数/(kW·m ⁻² ·°C ⁻¹)	流经的换热器编号	平均传热温差 ΔT_m	温差贡献值/K
H1	626	586	9.802	1.25	6	40.02	16.77
H2	620	519	2.931	0.05	9	45.53	35.64
H3	528	353	6.161	3.20	2,3,4	31.31/ 24.73/ 61.87	6.84
C1	497	613	7.179	0.65	6,9	40.02/ 45.53	9.89
C2	389	576	0.641	0.25	2	31.31	24.47
C3	326	386	7.627	0.33	4	61.87	46.83
C4	313	566	1.690	3.2	3	24.73	12.36
S1	650	650	—	3.5	1,7,8	—	—
W1	293	308	—	3.5	5	—	—

表 2 费用数据

费用参数	热公用费用	冷公用费用
费用数据	80	20

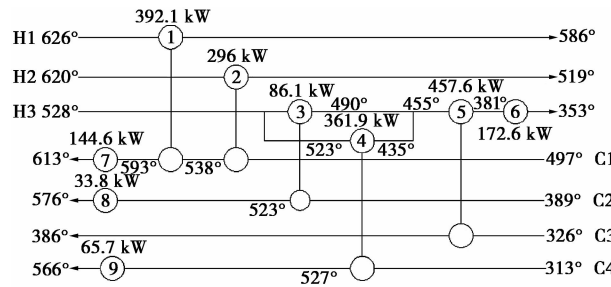
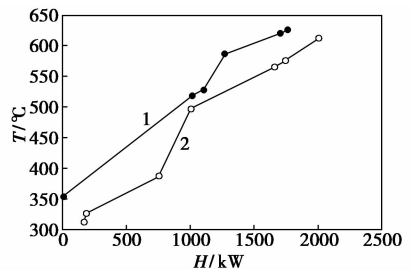


图 1 原案例得到的网络结构

原案例中网络结构的复合曲线如图 2 所示。根据经验取最小温差 ΔT_m 为 20°C , 得到冷物流在夹点处的温度为 497 K , 热物流在夹点处的温度为 517 K 。加热公用工程和冷却公用工程分别为 244.19 、 172.66 kW 。

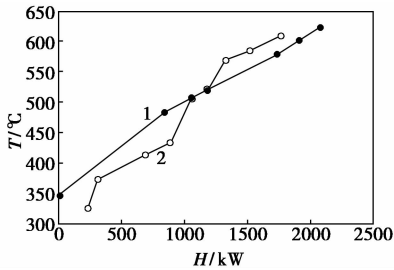


1—热物流组合曲线; 2—冷物流组合曲线

图 2 原案例网络结构的冷、热物流的复合曲线

得到各个物流的温差贡献值后, 采用温差贡献值法做出的复合曲线如图 3 所示, 得到夹点温度为

507 K, 加热公用工程和冷却公用工程分别为 308.35、236.81 kW。经能量松弛后最终得到的网络结构如图4所示。



1—热物流组合曲线;2—冷物流组合曲线

图3 温差贡献值法中的冷、热物流的复合曲线

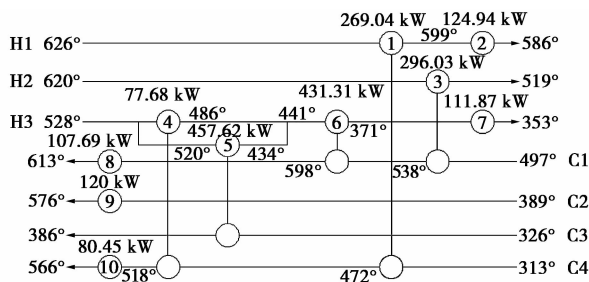


图4 本文中得到的网络结构

采用换热器的基本传热方程式比较2种网络结构中夹点附近的换热面积,其结果如表3所示。

表3 2种方法的换热面积比较 m^2

原案例方法			温差贡献值法		
换热器编号	换热面积	换热面积积总和	换热器编号	换热面积	换热面积积总和
3	4.65	23.36	4	2.58	12.66
4	7.88		5	1.10	
5	2.17		6	0.80	

将2种网络结构得到的公用工程负荷、换热面积结果汇总,如表4所示。

表4 2种方法的计算结果汇总

方法	热公用工程负荷/kW	冷公用工程负荷/kW	换热面积/ m^2
原案例方法	244.19	172.66	23.36
温差贡献值法	308.35	236.81	13.17

从表4可见,使用温差贡献值法得到的公用工程负荷较多,但换热面积比原案例中的小。为了进一步比较使用2种方法所得的年度总费用,换热面积所需的费用可以下式估算^[10]:

$$Y = 8\,600 + 670 \times A^{0.83}$$

式中, A 为换热器面积, m^2 ; Y 为换热器面积所需投资费用,美元。

2种方法所得方案的年度总费用如表5所示。

表5 2种方法的年度总费用结果比较

方法	热公用工程费用/ (美元·a ⁻¹)	冷公用工程费用/ (美元·a ⁻¹)	设备费用/ 美元	年度总费用/ (美元·a ⁻¹)
原案例方法	19535	3453	17760	40748
温差贡献值法	24668	4736	14109	43513

3 结论

(1)在实际工程中,各物流间相互匹更换热的传热温差各不相同,全过程系统不能采用单一的最小允许传热温差 ΔT_m 作为夹点计算,按照匹更换热的两侧物流的传热膜系数比率确定各物流的温差贡献值,能够真实反映物流对实际生产现场传热温差的推动力大小。

(2)采用温差贡献值法对换热网络进行优化设计,并将优化结果与原案例采用的传统夹点法相比,结果表明,虽然温差贡献值法得到的公用工程负荷较多,但所需换热面积较小,且2种方法所得的年度总费用相差不大,说明根据平均传热温差确定各物流温差贡献值的方法能够反映热量在生产现场中的损耗,得到更加符合实际情况的能量目标。

参考文献

- [1] Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks [J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38 (5): 745-763.
- [2] 郭文豪.用窄点技术挖掘催化裂化装置的节能潜力[J].炼油技术与工程,2004,34(3):1-4.
- [3] 马晓明,高凯,夏力,等.连续重整装置换热网络节能研究[J].华北电力大学学报,2012,9(2):108-112.
- [4] 魏慧,戴毓刚,马家洁,等.常减压蒸馏装置换热网络的节能技术改造[J].石化技术与应用,2014,32(1):26-31.
- [5] Nishimura E. A theory for the optimal synthesis of heat exchanger systems [J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1980,30(3):423-450.
- [6] Rev E, Fonyo Z. Diverse pinch concept for heat exchange network synthesis; The case of different heat transfer conditions [J]. Chemical Engineering Science, 1991, 46(7): 1623-1634.
- [7] 蒋宁,李林,高增梁.基于参数 k, z 优化的换热网络温差贡献值设计方法[J].化工学报,2011,62(4):1014-1019.
- [8] 姚平经.全过程系统能量优化综合[M].大连:大连理工大学出版社,1995.
- [9] 刘桂莲,冯霄,刘军平,等.考虑不同温差贡献值时的热集成[J].石化技术与应用,2000,18(3):129-133.
- [10] Yee T F, Grossmann I E. Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis [J]. Computers and Chemical Engineering, 1990, 14(10): 1165-1184. ■