

# 基于改进投影矩阵法的 甲醇合成系统数据校正

王金凡, 潘艳秋\*, 俞路, 高石磊  
(大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:**以甲醇合成系统为背景建立一套数据校正方法,以流程模拟数据为基础来识别测量数据的显著误差,改进投影矩阵法来校正测量数据的随机误差;调整精馏塔的部分结构参数,用校正数据进行稳态过程精馏塔模拟优化。结果表明,本文的数据校正方法能够有效识别出测量数据的显著误差,同时校正后的数据组分摩尔流量的方差普遍下降,说明校正效果较好;调整设备参数后的稳态模拟数据与校正数据对比,验证了模拟方法的可靠性,基于此方法提出的节能措施能更加有效地减少能量的损耗。因此本文校正方法可应用于甲醇合成系统的数据校正。

**关键词:**数据校正;稳态模拟;甲醇合成;投影矩阵法;精馏塔模拟

**中图分类号:**TQ011

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2021)02-0241-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.02.045

## Data reconciliation for methanol synthesis system based on improved projection matrix method

WANG Jin-fan, PAN Yan-qiu\*, YU Lu, GAO Shi-lei

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

**Abstract:** A set of data reconciliation method is established on the background of methanol synthesis system. Gross errors of measured data are identified on the basis of the process simulation data, and random errors are reconciled by the improved projection matrix method. Part of the structural parameters of the distillation column are adjusted, and the reconciled data are used to simulate and optimize the steady-state process for the distillation column. Results show that this data reconciliation method can identify the gross errors of the measure data effectively, and the variance of the component molar flow rate in the reconciled data drops generally, indicating a good reconciliation effect. The reliability of the simulation method is verified by comparing the reconciliation data with the data obtained from the steady-state simulation after adjusting equipment parameters. The proposed energy saving measures based on this method can reduce the loss of energy more effectively. Therefore, this data reconciliation method can be applied to data reconciliation of methanol synthesis system.

**Key words:** data reconciliation; steady-state simulation; methanol synthesis; projection matrix method; simulation on distillation

随着计算机科学、互联网和物联网等技术的发展,流程工业进入了信息化时代。准确而可靠的测量通常在过程建模、实时优化和过程控制中起关键作用。然而,流程工业中的测量数据很容易受到误差的影响,由此导致数据偏离守恒定律等约束。此外,由于技术和经济上的限制,存在许多无法测量的参数。测量数据误差可分为随机误差和显著误差,其中随机误差的校正也称为数据协调。流程工业中的随机误差校正方法主要有 Crowe 等<sup>[1]</sup>提出的投影矩阵法和 Simpson 等<sup>[2]</sup>的独立物流法。此外,徐忠勇等<sup>[3]</sup>提出一种消除不可测变量然后利用粒子群优化算法求解的技术;刘宇波等<sup>[4]</sup>提出改进的粒子

群优化算法用于甲醇数据校正;Tjoa 等<sup>[5]</sup>提出了一种用于鲁棒数据协调的新方法,以减少显著误差对于数据协调的影响;Jin 等<sup>[6]</sup>使用了新的鲁棒估计器进行随机误差校正,发现其性能优于 Cauchy 函数和 Huber 函数;Llanos 等<sup>[7]</sup>对不同鲁棒估计量的性能进行了比较研究,并利用不同的性能评价指标以分析数据校正的结果。除了随机误差,流程工业由于设备发生故障、管道泄漏等失误会产生显著误差,由此会导致随机误差校正后数据不正确。因此,显著误差的识别通常被认为是数据协调的前提。显著误差检测的方法主要是统计检验方法,包括 Mah 等<sup>[8]</sup>的节点检测法、Mah 等<sup>[9]</sup>的测量残差检测法、

收稿日期:2020-03-09;修回日期:2020-12-21

作者简介:王金凡(1995-),男,硕士生;潘艳秋(1962-),女,博士,教授,研究方向为化工过程模拟,通讯联系人,yqpan@dlut.edu.cn。

Narasimhan 等<sup>[10]</sup>的广义似然法、Tong 等<sup>[11]</sup>的主元分析法检测法等。

我国是甲醇需求与消费的大国,甲醇的工业发展对国家的经济发展具有战略意义,因此建立可靠的过程模型、实现生产过程的有效管控十分重要。目前应用于化工过程中的数据校正方法中,显著误差的检测方法主要包括结合数据检测和广义似然比法的序列补偿法<sup>[12]</sup>,以及结合测量检验法和广义似然比法的联合检测法<sup>[13]</sup>;随机误差的校正方法主要是改进粒子群优化算法<sup>[4]</sup>和差分进化算法<sup>[14]</sup>。但在上述研究中涉及的反应器模型均为单塔反应器模型,而现在的甲醇合成系统多采用双塔反应器,即目前缺少针对双塔反应器模型的数据校正方法。而且研究中应用较多的改进粒子群优化算法和差分进化算法在对甲醇合成系统进行流量组分随机误差校正时,在考虑约束方程中忽略消耗的  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{O}$  气体,然而在实际生产过程中, $\text{CH}_4$  气体和  $\text{H}_2\text{O}$  气体会转化为  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$ ,造成校正结果在应用时受限。因此,研究适应于现代双塔反应器系统且考

虑到  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{O}$  气体的数据校正方法,对准确进行甲醇合成系统的数据校正及后续的生产管控十分必要。

本文中针对现有的甲醇合成系统建立了一套完善的数据校正方法。在识别出显著误差的基础上进行随机误差校正,并将校正数据用于精馏塔的稳态模拟,通过改变设计参数来进行系统用能分析,为过程优化及控制提供依据。

### 1 甲醇合成系统模拟

本文中模拟对象为国内某甲醇合成系统(流程见图 1)。煤气净化后制得的合成气进入合成装置反应(采用串并联耦合式蒸汽上升合成塔,合成气进入合成塔后经中心管上分布小孔均匀进入催化床层反应<sup>[15]</sup>),反应后气体依次经过闪蒸塔、预精馏塔、精馏塔,最终得到 MTO 级甲醇。主要设备包括 2 台 Davy 合成塔、1 台合成气循环气压缩机、若干分离器 and 换热器。装置的设计产能 5 500 t/d 甲醇,折合年产 180 万 t<sup>[16]</sup>。

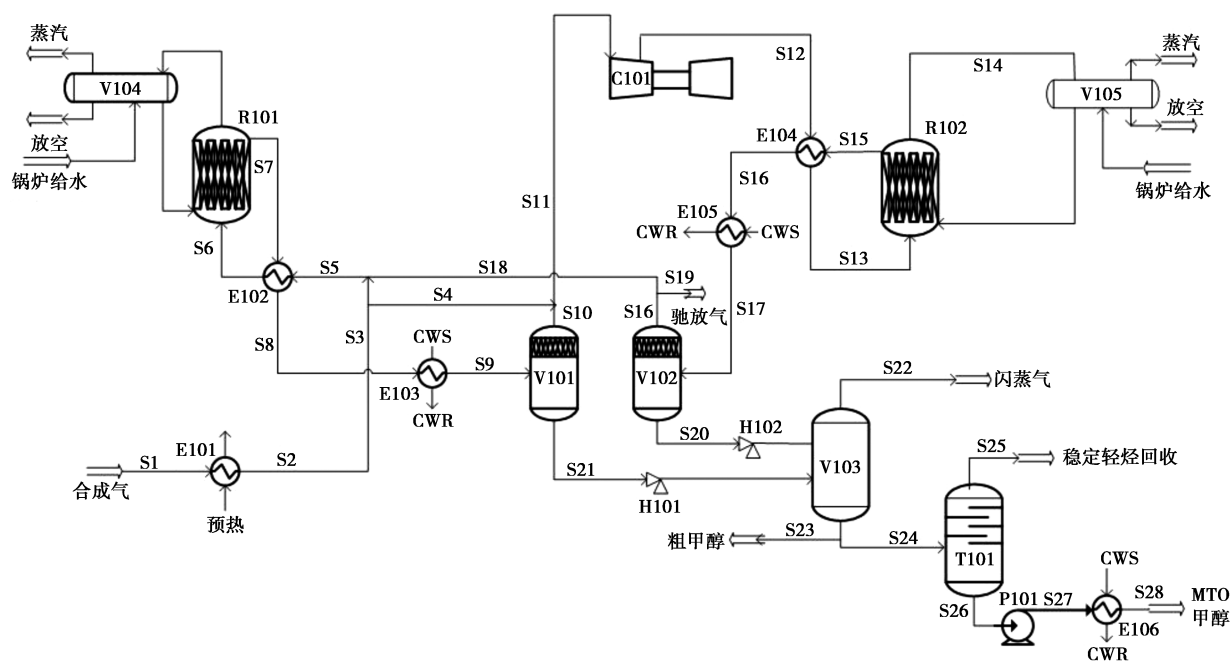


图 1 甲醇合成系统流程示意图

甲醇合成系统中主要包括由  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  加氢生成的  $\text{CH}_3\text{OH}$  以及  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2$  等组分,本文中选取 PSRK 物性方法<sup>[16]</sup>,输入基础数据进行稳态模拟。考虑到甲醇合成的目标产物是 mto 级甲醇,为此本文中通过对比粗甲醇 S24 流股和 mto 级甲醇 S26 流股来分析模拟结果。

分析表 1 中的数据可以发现,S24 流股的质量流率、主要组分  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_3\text{OH}$  的摩尔分数 3 个数据的相对误差分别为 4.25%、3.56%、1.17%,其他组分摩尔分数相对较小可忽略;流股 S26 的质量流率、主要组分  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_3\text{OH}$  摩尔分数的相对误差分别为 0.89%、0%、0%。说明模拟结果与设计值

基本吻合,证明建立的流程模型可靠,所得模拟数据可用于数据校正。

表1 甲醇合成系统模拟结果与设计值对比

流股	S1	S24			S26		
		模拟值	设计值	相对误差/%	模拟值	设计值	相对误差/%
压力/MPa	5.29	0.70	0.70	—	0.277	0.277	—
质量速率/(kg·h <sup>-1</sup> )	245082	237137	238150	4.25	236755	236966	0.89
摩尔分数							
H <sub>2</sub>	0.6717	0.0014	0.0005	—	0	0	—
CO	0.3030	0	0.0004	—	0	0	—
CO <sub>2</sub>	0.0195	0.0007	0.0014	—	0	0	—
H <sub>2</sub> O	0	0.0564	0.0562	3.56	0.0567	0.0567	0.00
CH <sub>4</sub>	0.0013	0.0003	0.0005	—	0	0	—
CH <sub>3</sub> OH	0	0.9409	0.9398	1.17	0.9433	0.9433	0.00
N <sub>2</sub>	0.0036	0.0001	0.0003	—	0	0	—
Ar	0.0009	0.0002	0.0001	—	0	0	—
合计	1.0000	1.0000	1.0000		1.0000	1.0000	

注:其他组分的摩尔分数低于1%,达到10<sup>-6</sup>级别,模拟结果对整体影响不大,故不进行误差计算。

## 2 数据校正方法

本文中数据校正方法包括3部分内容:数据分类、显著误差检测和随机误差校正,使数据符合物料平衡和其他约束关系。

(1)数据分类。包括数据的冗余性分析和测量网络图的规划。前者是剔除测量数据中不可校正型以及未测数据中不可估计数据,而后者是通过流程进行简化来完成数据的预处理。

(2)显著误差检测。在进行随机误差校正之前,必须保证测量数据不含显著误差,因此必须识别出显著误差。本文将流程模拟数据作为基础值进行测量数据的显著误差检测(误差大于10%时标记为显著误差<sup>[17-18]</sup>)。根据冗余性分类,该显著误差数据直接作为未测数据通过数据协调进行校正。

(3)随机误差校正。甲醇合成系统的约束方程是线性的,而且线性方程中的组分流量是流量和组分分率的乘积,符合双线性数据协调。稳态情况的双线性数据协调的目标函数包括2部分内容<sup>[18]</sup>:

$$\min[(\hat{F} - F)^T Q_F^{-1} (\hat{F} - F) + \sum_{k=1}^c (\hat{X}_k - X_k)^T Q_{X_k}^{-1} (\hat{X}_k - X_k)] \quad (1)$$

其中第一项是对流量数据的校正, $F$ 和 $\hat{F}$ 分别为流量测量数据组成的向量和校正值向量;第二项为对组分分率的校正, $X_k$ 和 $\hat{X}_k$ 分别为第 $k$ 个组分的组成分率的测量数据向量和校正值向量; $Q_F$ 和 $Q_{X_k}$ 为相对应的协方差矩阵; $c$ 为组分数。

约束方程包括组分流量平衡方程和组分分率归一方程:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_{ji} \hat{F}_i \hat{x}_{ik} = 0 (j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, c)$$

$$\sum_{k=1}^c \hat{x}_{ik} = 1 (i = 1, \dots, m) \quad (2)$$

式中, $n$ 为过程节点数; $m$ 为物流数; $\alpha$ 为流股与设备的关系,根据流股进入、离开和与设备无关而取+1、-1和0。

针对甲醇合成系统这种双线性数据的随机误差校正方法主要包括投影矩阵法和独立物流法以及优化算法求解法(包括上述的改进粒子群以及差分进化算法),该甲醇合成系统的流程复杂且约束方程较多,一般选用投影矩阵法和独立物流法,其中投影矩阵法应用于烯烃分离过程的效果较好<sup>[18]</sup>。因此本文将投影矩阵法应用于甲醇合成系统,并做2点改进。

①引入化学反应矩阵 $S^T$ 来修正化学反应带来的影响。

②已知总流量和组分分率时,式(1)的目标函数可简化为:

$$\min(Y - \hat{X})^T Q^{-1} (Y - \hat{X}) \quad (3)$$

其中, $Y$ 和 $\hat{X}$ 分别是各个组分流量测量数据(流股摩尔总流量乘以流股组分摩尔分率)组成的向量和校正值向量; $Q$ 是相对应的组分流量测量数据协方差矩阵。使用协方差矩阵时,要考虑多维变量间的关系。文献[18]使用的协方差矩阵是有对角线为方差的对角矩阵,忽视变量之间的相互影响。本文中对协方差对称矩阵 $Q$ 进行改进,其对角线元素 $Q_{11} \cdots Q_{nn}$ 是第 $n$ 个流股 $k$ 个组分测量数据构成的协方差矩阵,其他元素均为 $k \times k$ 的零矩阵。式(4)既简化了协方差矩阵,又考虑单个流股 $k$ 个组分之间变量关系。

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_{22} & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & Q_{33} & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & Q_{44} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 3 数据校正方法的应用

针对甲醇合成系统,首先对数据进行分类,该部

分为前期准备工作,简化流程见图 2(其中,方框代表节点,线条代表流股);其次对比各流股的总流量测量数据与模拟数据,识别出显著误差;再选取其中典型流股进行随机误差校正,该部分校正的数据可以调整稳态模拟中的精馏塔模型(合成反应器、闪蒸塔和预精馏塔均为简捷设计,精馏塔为详细设计,需要调整参数,满足实际生产需求),剩余流股数据也可以该方法协调得到。

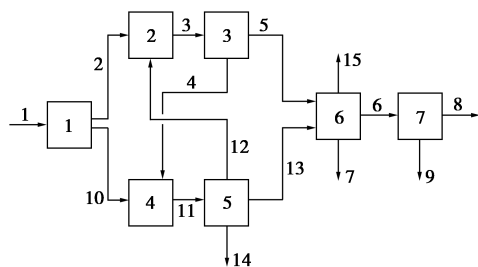


图 2 甲醇合成系统简化图

### 3.1 显著误差的识别

将图 2 中的 1、2 号流股数据输入前述已建好的稳态模拟模型中,进行 Aspen Plus 流程模拟。所得模拟结果与测量数据对比见表 2。可以看出其中 12

表 2 流股流量数据对比

流股编号	1	2	3	4	5	6	7
测量数据/(t·h <sup>-1</sup> )	245.1	134.8	602.2	482.4	119.7	238.6	1.0
模拟数据/(t·h <sup>-1</sup> )	245.1	134.8	602.1	472.0	130.1	237.0	1.0
相对误差/%	0.00	0.00	0.00	2.21	7.98	0.68	0.00

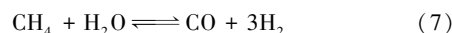
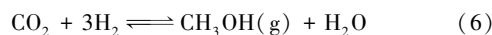
  

流股编号	8	9	10	11	12	13
测量数据/(t·h <sup>-1</sup> )	237.0	1.2	110.3	592.7	413.1	119.6
模拟数据/(t·h <sup>-1</sup> )	236.3	1.2	111.4	602.1	458.0	130.1
相对误差/%	0.27	0.00	0.01	1.56	10.87	8.07

号流股的相对误差超过 10%,故将 12 号数据归入显著误差范畴,14、15 号流股的数据为未测数据,其他物流数据归入随机误差。

### 3.2 随机误差校正

该流程中节点 2、4 存在化学反应,影响较大的主要 3 个反应为:



对应的 S 反应矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & K & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 3 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

S 矩阵中 O 为 7×7 的零矩阵,组分依次为 H<sub>2</sub>O、H<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、Ar+N<sub>2</sub>、CH<sub>3</sub>OH,根据反应式(5)~式(7)可得到 2、4 节点反应系数矩阵 K。

选择有采样点数据(包括总流量和每个组分的摩尔分率)的流股 1、2、6、7、8、9 作为校正示例,采用上述改进的投影矩阵法对这 6 个流股进行随机误差校正,校正结果列于表 3。可以发现:①流股 9 中杂质二甲醚组分不满足归一化方程,但由于总流量较小,对总体结果影响不大;②选取校正后的 6 组数据组分流量方差与测量组分流量方差进行分析,对应 42 个组分流量方差中组分流量方差大于原测量值方差占比为 3/42(1.82%),方差小于原测量值占比 9/42(21.43%),其余方差保持不变,可以认为此次随机误差数据校正的结果较好,证明了所建立的数据校正方法的可靠性。

表 3 随机误差的数据校正结果

摩尔分率	流股 1				流股 2				流股 6			
	测量值	校正值	组分方差		测量值	校正值	组分方差		测量值	校正值	组分方差	
			测量值	校正值			测量值	校正值			测量值	校正值
H <sub>2</sub> O	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0552	0.0552	0.037	0.036
H <sub>2</sub>	0.6790	0.6719	0.337	0.331	0.6790	0.6831	0.184	0.186	0.0009	0.0009	0.000	0.000
CO	0.2952	0.2954	0.044	0.044	0.2952	0.2951	0.024	0.024	0.0003	0.0003	0.000	0.000
CO <sub>2</sub>	0.0191	0.0208	0.083	0.082	0.0191	0.0181	0.046	0.046	0.0016	0.0016	0.002	0.002
CH <sub>4</sub>	0.0013	0.0013	0.001	0.001	0.0013	0.0013	0.001	0.001	0.0005	0.0005	0.000	0.000
Ar+N <sub>2</sub>	0.0054	0.0106	0.248	0.244	0.0054	0.0024	0.136	0.137	0.0005	0.0005	0.000	0.000
CH <sub>3</sub> OH	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.9411	0.9410	0.191	0.194
合计	1.0000	1.0000			1.0000	1.0000			1.0001	1.0000		

续表

摩尔分率	流通股 7				流通股 8				流通股 9			
	测量值	校正值	组分方差		测量值	校正值	组分方差		测量值	校正值	组分方差	
			测量值	校正值			测量值	校正值			测量值	校正值
H <sub>2</sub> O	0.0011	0.0020	0.000	0.000	0.0565	0.0563	0.047	0.045	0.0002	0.0000	0.000	0.000
H <sub>2</sub>	0.4820	0.4820	0.007	0.007	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.1132	0.1267	0.165	0.164
CO	0.1106	0.1100	0.001	0.001	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0907	0.0992	0.010	0.010
CO <sub>2</sub>	0.0428	0.0420	0.003	0.003	0.0000	0.0000	0.003	0.003	0.3036	0.3361	0.105	0.104
CH <sub>4</sub>	0.0919	0.0920	0.003	0.003	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.1108	0.1240	0.181	0.180
Ar+N <sub>2</sub>	0.2156	0.2160	0.003	0.003	0.0000	0.0000	0.000	0.000	0.0814	0.0909	0.042	0.042
CH <sub>3</sub> OH	0.0560	0.0560	0.001	0.001	0.9433	0.9437	0.562	0.516	0.2037	0.2231	0.001	0.001
合计	1.0000	1.0000			0.9998	1.0000			0.9036	1.0000		

#### 4 校正结果在精馏塔设计优化中的应用

随着化工厂设备的连续运行,设备的运行效率、可靠性和安全性等都会下降,因此需要优化设备参数,使之更加符合工厂实际需求。本文中利用以上数据校正结果及生产操作要求,适当调整设备结构参数:塔板数从 26 块调整到 24 块,进料位置从原来第 16 块板调整到第 10 块板,再次得到的模拟数据与上述校正数据对比见表 4。

表 4 调整设备参数后的模拟数据

流通股	S24				S26		
	S1 校正值	模拟值	设计值	相对误差/ 差/%	模拟值	设计值	相对误差/ 差/%
压力/MPa	5.29	0.70	0.70	—	0.277	0.277	—
摩尔流率/ (mmol·h <sup>-1</sup> )	22.98	7.60	7.60	0.00	7.57	7.57	0.00
摩尔分数							
H <sub>2</sub>	0.6719	0.0009	0.0009	—	0	0	—
CO	0.2954	0.0003	0.0003	—	0	0	—
CO <sub>2</sub>	0.0208	0.0016	0.0016	—	0.0010	0	—
H <sub>2</sub> O	0	0.0551	0.0552	1.81	0.0553	0.0563	17.76
CH <sub>4</sub>	0.0013	0.0005	0.0005	—	0	0	—
CH <sub>3</sub> OH	0	0.9408	0.9410	0.21	0.9437	0.9437	0.00
N <sub>2</sub> +Ar	0.0106	0.0007	0.0005	—	0	0	—
合计	1.0000	0.9999	1.0000		1.0000	1.0000	

分析表 4 中的数据可以发现,流通股 S24 的摩尔流率、主要组分 H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>3</sub>OH 摩尔分数 3 个数据的相对误差分别为 0、1.81‰、0.21‰;流通股 S26 的流量相对误差为 0,CO<sub>2</sub> 的摩尔分数从 0 变为 0.001,H<sub>2</sub>O 的摩尔分数相对误差达到 17.76‰。主要原因在于减少了塔板数,造成分离效果下降,少许的 CO<sub>2</sub> 未能完全分离,但能保证主组分 CH<sub>3</sub>OH 的

摩尔分数一致,所以在实际应用中,存在塔板效率下降造成理论板数略有减少的情况,可根据校正结果修正模拟模型中精馏塔参数。针对性提出该系统的节能措施,通过改进换热网络的匹配,更加有效地减少热量损耗,有效管控生产过程。

#### 5 结论

(1) 针对甲醇合成系统,建立了一套基于改进投影矩阵法的甲醇合成系统数据校正方法,利用稳态流程模拟数据与测量数据相结合的方法,有效地识别出显著误差,并针对随机误差选用改进投影矩阵法,进行测量数据校正,校正后的数据方差减小比率占 21.43%,验证了该校正方法的有效性。

(2) 用校正后的数据调整精馏塔的结构参数,再次对甲醇合成系统进行模拟,有效塔板数从 26 块减少到 24 块,进料位置从第 16 块板调整到第 10 块板,模拟的数据与校正值比较吻合。因此该稳态模拟模型可以有效模拟实际生产过程,提出的节能改造措施更加有效地减少能量的损耗,为工厂带来巨大的经济效益。

#### 参考文献

- [1] Crowe C M, Garcia C Y A, Hrymak A. Reconciliation of process flow rates by matrix projection. I: Linear case[J]. Aiche Journal, 1983, 32(4): 616-623.
- [2] Simpson D E, Everett M G. Reducing the number of unknowns in a constrained minimization problem—an application to material balances[J]. Appl Math Modeling, 1988, 12(4): 204-212.
- [3] 徐忠勇, 荣冈, 王旭. 一种新的双线性数据协调方法[J]. 高校化学工程学报, 2007, (6): 1049-1055.
- [4] 刘宇波. 基于改进 PSO 的甲醇合成过程数据校正与软测量[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.

(下转第 250 页)

由表 4 可知,从建设投资方面,建设投资从高到低依次为前置脱轻烃低压液化工艺、后置脱轻烃低压液化工艺、前置脱轻烃高压液化工艺、后置脱轻烃高压液化工艺。前置脱轻烃低压液化工艺和前置脱轻烃高压液化工艺 2 个工艺技术建设投资最少,且 2 种工艺投资相差不大。从财务净现值方面,从高到低依次为后置脱轻烃低压液化工艺、前置脱轻烃低压液化工艺、前置脱轻烃高压液化工艺、后置脱轻烃高压液化工艺。前置脱轻烃低压液化工艺和前置脱轻烃高压液化工艺财务净现值明显优于另外 2 种工艺技术。从内部收益率方面,和建设投资、财务净现值趋势一致,前置脱轻烃低压液化工艺和前置脱轻烃高压液化工艺内部收益率明显高于另外 2 种工艺技术,且 2 种工艺技术内部收益率相差不大。

根据不同工艺技术的流程复杂程度、操作难易度、能耗、主要设备数量和经济性,结合项目规模和组分,对 4 种工艺技术进行综合比较发现:前置脱轻烃低压液化工艺和前置脱轻烃高压液化工艺优于另外 2 种工艺技术。前置脱轻烃低压液化工艺流程最简单,既不需要增设重接触塔,也无需增加压缩机数量,且冷箱工艺物流数量最少,冷箱结构简单。同时,由于后置脱轻烃低压液化工艺操作不稳定,工艺控制、开工过程较为复杂。因此,选取前置脱轻烃低压液化工艺作为本项目的最优工艺技术方案。

### 3 结论

本文中工艺技术的选择研究是在建立的工艺流程模拟的基础上开展的,对各工艺技术的工艺特点、主要设备数量、能耗、经济性等进行综合对比,确定

了最优的工艺技术方案,主要结论如下。

(1) 本项目天然气液化规模较小,宜采用单混合制冷液化工艺。

(2) 根据天然气组成中含有大量的丙烷组分,考虑回收轻烃,将轻烃回收和液化设置成联合工艺,简化工艺流程。

(3) 前置脱轻烃低压液化工艺具有流程、工艺控制、开工过程简单,操作稳定的特点。

(4) 在能耗方面,4 种工艺技术方案相差不大;前置脱轻烃低压液化工艺主要设备数量最少;前置脱轻烃低压液化工艺和前置脱轻烃高压液化工艺在经济性方面具有优势。

(5) 根据不同工艺技术的流程、操作难易度、能耗、主要设备数量和经济性,确定前置脱轻烃低压液化工艺为最优的工艺技术方案。

### 参考文献

- [1] 顾安忠.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [2] 刘英波.液化天然气装置净化与液化工艺关键技术研究[J].当代化工,2016,45(11):2593-2595.
- [3] 顾安忠,石玉美,汪荣顺,等.天然气液化流程及装置[J].深冷技术,2003,(1):1-6.
- [4] 金海刚.LNG 轻烃回收和冷能发电组合工艺[J].山东化工,2019,48(9):153-154.
- [5] Bai F F,Zhang Z X.Integration of low-level waste heat recovery and liquefied nature gas cold energy utilization[J].Chinese Journal of Chemical Engineering,2008,16(1):95-99.
- [6] 尹全森,李红艳,季中敏,等.混合制冷剂循环的级数对制冷性能的影响[J].化工学报,2009,60(11):2689-2693.
- [7] 林文胜,顾安忠,朱刚.天然气液化装置的流程选择[J].真空与低温,2001,7(2):105-109.
- [8] 罗小武.天然气净化工艺技术研究与应用[J].天然气与石油,2006,24(2):30-34.■
- [9] Tjoa I B,Biegler L T.Simultaneous strategies for data reconciliation and gross error detection of nonlinear systems[J].Computers & Chemical Engineering,1991,15(10):679-690.
- [10] Jin S Y,Li X W,Huang Z J,et al.A new target function for robust data reconciliation[J].Industrial and Engineering Chemistry Research,2012,51(30):10220-10224.
- [11] Llanos C E,Sánchez M C,Maronna R.Robust estimators for data reconciliation[J].Industrial and Engineering Chemistry Research,2015,54(18):5096-5105.
- [12] Mah R S,Stanley G M,Downing D M.Reconciliation and rectification of process flow and inventory data[J].Industrial & Engineering Chemistry Process Design & Development,1976,15(1):175-183.
- [13] Mah R S H,Tamhane A C.Detection of gross errors in process data[J].Aiche Journal,2010,28(5):828-830.
- [14] Narasimhan S,Mah R S H.Generalized likelihood ratio method for gross error identification[J].Aiche Journal,1987,33(9):1514-1521.
- [15] Tong H,Crowe C M.Detection of gross errors in data reconciliation by principal component analysis[J].Aiche Journal,2010,41(7):1712-1722.
- [16] 刘宝卫,赵霞,吴胜昔,等.过程测量数据校正技术在甲醇工厂的在线应用[J].自动化仪表,2008,29(2):20-23.
- [17] 蒋志能,赵霞,潘兆鸿.MT-GLR 在甲醇工厂数据协调中的应用[J].自动化仪表,2009,30(7):25-27.
- [18] 翁惠瑜.基于差分进化算法的数据校正及其在甲醇合成装置中的应用[D].上海:华东理工大学,2012.
- [19] 蒋海金.Davy 合成塔中心管改造提产能的应用[J].山西化工,2018,38(6):142-145.
- [20] 孙晋东.流程模拟在中煤榆林甲醇装置增产扩能改造中的应用[D].北京:北京化工大学,2017.
- [21] 宋卫卫.基于测量数据冗余性的显著误差检测方法[D].上海:华东理工大学,2013.
- [22] 张红森.稳态数据校正方法在烯烃分离中的应用[D].大连:大连理工大学,2018.■

(上接第 245 页)