

DOI: 10.11949/0438-1157.

## 立管段塞流静态节流控制器参数自生成方法研究

王寒玄, 邹遂丰, 刘添宇, 许路寒, 郭烈锦

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 通过控制节流阀开度, 静态节流能够有效地消除海上油气立管发生的严重段塞流。针对现有方案依赖人工调参, 参数适用性弱的缺陷, 对控制器参数自生成方法进行了理论和实验研究。引入稳定性分析和基于模糊推理的融合算法, 预测段塞消除的临界条件, 提出了考虑稳定性判据间相互偏差的参数整定原则, 构建了参数自生成的调控方案。在两套大型实验系统, 开展了出口压力为常压和5MPa的验证实验, 共计29组。验证结果表明, 该调控方案适用于差异化的管道系统的严重段塞流控制场景, 可以快速且安全地消除严重段塞流。

**关键词:** 石油; 流动; 两相流; 模型预测控制; 段塞消除; 节流

**中图分类号:** TE832.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (XXXX) XX-0001-10

## Research on parameter self-generating method for permanent choking-based riser-slug controller

WANG Hanxuan, ZOU Suifeng, LIU Tianyu, XU Luhan, GUO Liejin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** By controlling the choke's opening, permanent choking can effectively eliminate severe slugging in offshore oil and gas risers. To address the limitations of existing methods, which rely heavily on manual parameter tuning and exhibit poor parameter adaptability, a controller with self-generated parameters has been developed and proposed. Stability analysis is introduced to predict the critical conditions for slug elimination, a fusion algorithm based on fuzzy inference has been proposed to further enhance prediction accuracy. The prediction results derived from the fusion algorithm is utilized to propose a standardized method for generating control parameters. Experimental validation of the proposed slug controller was conducted on two large-scale experimental systems under outlet pressures of atmospheric pressure and 5 MPa which achieved an average regulation time of less than 7 slug cycles across 29 sets of validation experiments and significantly reduced pressure fluctuation amplitude at the pipeline inlet without substantially increasing system pressure, thereby enabling rapid elimination of severe slugging flow without over-choking. The results indicate that the proposed controller can be applied to slug elimination tasks across different pipeline systems, varying flow rates and outlet pressure conditions as well as diverse types of valves.

**Keywords:** petroleum; flow; two-phase flow; model-predictive control; slug control; choking

收稿日期: 2026-01-06 修回日期: 2026-04-28

通信作者: 郭烈锦(1963—), 男, 博士, 教授, lj-guo@mail.xjtu.edu.cn

第一作者: 王寒玄(1996—), 男, 博士研究生, whx666@stu.xjtu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC2806202); 国家自然科学基金项目(52488201)

引用本文: 王寒玄, 邹遂丰, 刘添宇, 许路寒, 郭烈锦. 立管段塞流静态节流控制器参数自生成方法研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–10

**Citation:** WANG Hanxuan, ZOU Suifeng, LIU Tianyu, XU Luhan, GUO Liejin. Research on parameter self-generating method for permanent choking-based riser-slug controller[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–10

## 引 言

海洋油气工业中,出于经济性考虑,通常采用混输管道进行输运工作,以避免增加水下管道或部署水下油气分离设备所需的额外投资。海洋油气混输管道由连接油气井与水面浮式处理平台的管道组成,通常包括铺设在海床上的长距离的起伏管道以及连接至水面的立管。然而,起伏管道的存在,以及海底管-立管的复杂结构,在一定的产量范围内会诱发严重段塞流及其过渡流型等危害流型,严重威胁管道流动安全。

严重段塞流等危害流型表现出周期性和气液间歇流动的特点,在一个流动周期内呈现长时间出口断流(可能为95%以上的时间)、短时间气液喷发(少于5%的时间)的流动特性,因此会引发周期性的剧烈流量波动,喷发阶段的出口瞬时气液质量流量可达到入口平均质量流量的数十甚至数百倍。管道与下游设备间极不均匀的质量交换带来了显著的压力波动,给安全生产带来巨大威胁:根据Hod-Vall油气田的现场资料<sup>[1]</sup>,即便发生严重段塞流的卫星井的产量仅占总体产量的5%,其诱发的严重段塞流已经相当强烈,足以引发整个管道系统严重的操作问题,包括但不限于分离器断流或溢流、伴生气浪费,在部分产量下加剧蜡和水合物生成,引发管道机械疲劳等。更多关于严重段塞流的流动特性及危害见文献<sup>[2-5]</sup>。因此,海上油田开发均要考虑段塞风险及其调控,配置合适的调控手段。

常见的段塞消除或风险控制方法包括:改进管道设计<sup>[6]</sup>,加装段塞捕集器<sup>[7]</sup>,气举与自气举<sup>[8,9]</sup>,立管顶部节流<sup>[10-13]</sup>,添加表面活性剂<sup>[14]</sup>等。详细的段塞消除技术综述见文献<sup>[5,15]</sup>。其中,由于显著的经济优势和灵活性,顶部节流被视为最优的段塞控制技术。

立管顶部节流方法主要包括静态节流<sup>[5,16-18]</sup>和主动控制节流<sup>[19-23]</sup>,两种技术路线各有优缺点。“静态节流”指在平均产量不变的情况下,采用固定不变的节流阀开度或使节流阀在某一开度附近较小的区间小幅、缓慢变化来消除严重段塞流的方案,其调控方案基于流动的稳态响应设计。其优点是设计过程相对简单,实施方便,阀门动作和缓,尽管不能精确控制流动参数以尽可能降低系统压力、增加产量。“主动控制节流”则基于多相流管道系统的动态模型设计,使用采样周期短的控制器的控制阀门开度大幅、高频变化,达到控制流动参数的目的。

这一方法对压力和流量有一定的控制能力,但是设计过程相对复杂,启动时需要节流阀开度持续变化,同时所需测量信号多为水下信号<sup>[19,22]</sup>,不易或无法测量。此外,有文献指出该技术在长时间运行后可能失效<sup>[22]</sup>,在现场运用时可能失效<sup>[24]</sup>等,远不成熟。因此,油气田业主方更倾向于选用静态节流技术。

西安交通大学郭烈锦团队提出了多种基于静态节流的段塞控制方案<sup>[16,17,25]</sup>,主要为PID控制,成功运用于文昌油田、实现长期稳定运行。此外,Cranfield大学也提出了一种基于静态节流的段塞控制方案<sup>[26]</sup>,并在北海的一个油田进行了实验验证,取得了良好的效果<sup>[27]</sup>。这些静态节流调控方案包含一个以上的PID控制器,虽然调控效果良好,但是方案中不包含控制参数的整定方法,仅给出了单一工况的推荐控制参数。然而,控制参数随管道路由,工况条件,工质参数和调节阀流量特性变化而发生显著变化,因此,具体工况的推荐控制参数缺乏普遍适用性,贸然迁移使用可能起到负面作用。这一特点提升了现有静态节流调控方案的落地难度,同时催生了控制参数自生成调控算法的研究需求。而在作者调研范围内,目前尚无静态节流参数自生成方面的文献发表。因此,有必要对此进行相关研究,提出一种控制参数自生成的静态节流段塞控制算法。

本研究尝试在静态节流调控方案中引入稳定性判据来实现控制参数的自生成,通过对严重段塞流的稳定性分析,预估其消除的临界条件,并最终生成可用的控制参数。文献<sup>[28]</sup>指出,由于阀门开度与阻力系数存在对应关系,而阻力系数在部分流型稳定性判据<sup>[28-31]</sup>中作为已知参数出现。因此,可以基于稳定性判据逆向求解临界阻力系数和临界开度。然而,不同判据的求解精确度如何,是否可用于段塞消除,是本研究的关键问题之一。进一步地,还需要设计融合算法,提升现有判据的计算精度的同时,降低其误差分布区间,这部分内容对阀门调控的安全性至关重要。最后,根据控制变量优选结果<sup>[32]</sup>,设计方案选用阀门阻力系数而非传统的阀门开度作为被控变量,实现控制参数与阀门类型的解耦,避免阀门流量特性变化对控制参数的影响。

本文基于流动特性实验研究,构建控制参数自生成的调控算法,并最终通过自动控制实验验证。

第一部分介绍实验系统和实验方法,第二部分研究控制算法所需参数的自生成方法,第三部分为自动控制实验验证,第四部分是结论。

## 1 实验系统和方法

实验系统包含出口压力维持为一个大气压的常压实验系统,和出口压力可以在0~10 MPa调节的高压实验系统。本文涉及的实验包括用于获得临界阻力系数的静态节流实验,和用于控制算法验证的验证实验。以下分别进行介绍。

### 1.1 常压实验系统

常压实验系统由工质动力系统、实验环路及数据测量系统组成,详见文献<sup>[18]</sup>,常压实验系统环路示意图如图1-a所示,包括114 m的水平管路,18.7 m的下倾管路(倾斜角为 $-5^\circ$ ),16.3 m的垂直立管,以及2 m的立管后水平管。管路通径为50 mm。节流阀安装在立管下游的水平管上,公称直径为50 mm,节流阀的流量特性曲线参照中国标准GB/T 30832-2014进行实验校正。实验环路出口连接一旋风分离器,分离器上部直接与大气连通,因此管道出口压力维持在一个大气压;下部与一计量容器连接,用于测量液塞体积。

气液两相工质分别由空压机和离心泵驱动,经测量后进入实验环路,其中液相流量由两个并联的不同量程的电磁流量计测量,测量参数为0~6.36 m<sup>3</sup>/h, 0.5% F.S.以及0~42.5 m<sup>3</sup>/h, 0.5% F.S.。气相流量由三个并联的不同量程的孔板流量计测量,测量参数为1.85~12.9 NL/min, 0.5% F.S.; 10.6~105 NL/min, 0.5% F.S.以及89~630 NL/min, 0.5% F.S.。实验时按照工况条件选用合适量程的仪表。压力传感器型号为Keller PAA25绝压压力传感器,量程500 kPa,测量精度为0.25% F.S.。压差传感器为Rosemont 3051CD系列,量程按测点高差进行调整,测量精度为调节量程的0.075%。

### 1.2 高压实验系统

高压实验系统的管道设计压力为35 MPa,实验环路出口配有分离器,分离器的气液相出口均安装有调节阀,可以将压力维持在0~10 MPa间的设定值,从而进行不同出口压力等级的实验。

高压实验系统同样由实验环路,工质动力系统以及数据测量系统组成,详见文献<sup>[33]</sup>。高压实验系统环路示意图如图1-b所示,入口是长度为314 m

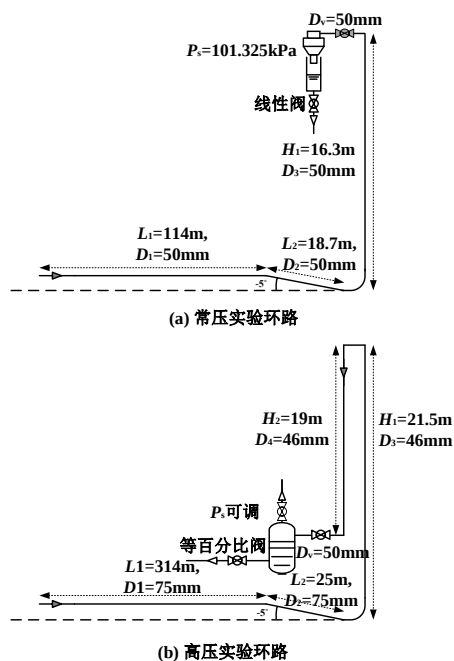


图1 实验系统环路示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system test loops

的水平管路,连接有25 m、倾斜角 $-5^\circ$ 的下倾管道,和高21.5 m的垂直立管,立管顶部至分离器的管道依次为一段约0.5 m的水平段,一段19 m的垂直下降管和一段约5 m的水平管,阀门安装在最后一段水平管上。其中,垂直立管及其上游的管路内径为75 mm,下游的管道内径为46 mm,节流阀公称直径为50 mm,流量特性曲线同样经由纯水单相压降实验校正。

气液两相流量的测量由共计四台质量流量计完成,参数分别为0~6 kg/min, 0.5% F.S.(气相)以及0~25 kg/min, 0.5% F.S.(气相)以及0~150 kg/min, 0.15% F.S.(液相)和0~600 kg/min, 0.15% F.S.(液相)。压力,压差传感器为Rosemont 3051S和Rosemount 3051CD系列传感器,量程可调,测量精度为0.075% F.S.。测量信号通过6台HP-WD8无线采集设备进行采集,避免电缆带来的测量噪声。

### 1.3 实验边界与温度条件

实验工质为水和空气,实验温度为20~30 $^\circ$ C,处理时假设实验温度不变。虽然液体工质是循环使用的,在实验过程中会有一定的温度上升,但是由于温度变化在严重段塞流相关研究中处于次要地位<sup>[34]</sup>,因此忽略温度变化。

在开始实验前,操作员通过调整液相回流阀开度,使流量计前压力稳定在1.2 MPa(常压系统)和6~10 MPa(高压系统),这些数值远高于实验过程中

由于开度变化引发的压力波动,因此入口液相流量基本不随管道流动状态变化,可以视为确定流量,对于常压系统,空压机需要调整至 850 kPa(A),远大于实验环路的压力变化,对于高压系统,空压机的工作压力大于 10 MPa,同样远大于实验环路的压力变化,因此气相流量也可以视为不变。常压系统的出口压力恒定为一个大气压,高压系统的出口压力按照实验要求进行调整,并使用控制算法自动调控气液相出口阀门,使液位和压力保持恒定。

#### 1.4 实验方法

静态节流实验的目的是尽可能精准地获取临界开度,操作员将入口流量,出口压力调至目标参数后,人工遍历开度并记录不同开度下的压力波形,每个开度记录 2~3 个段塞周期或至少 600 秒,段塞周期由实验数据得到。阀门调整的步长根据阀门的调节误差和实验条件进行调整,常压实验系统的阀门调节的最小步长设为 1%,高压实验系统的阀门调节最小步长定为 1%~2%。

验证实验主要用于验证控制算法的可靠性。实验时,将入口流量和出口压力等参数调至目标参数后,记录实验数据;在记录 2~3 个段塞周期后,启动控制器,控制器按照设计好的流程自动调控阀门开度,直至流动稳定。

## 2 控制器参数自生成方法研究

### 2.1 控制器介绍

本研究中生成的控制参数用于一种基于节流阀压降的静态节流控制器,本节将对该控制器的细节进行详细介绍。

控制器选用简单 P 控制器,而非传统的 PI 控制器。理由如下:P 控制器虽然简单,但足以承担控制任务<sup>[26]</sup>,其产生稳态误差的缺陷不是现场关注的重点,调节速度慢的特点也可以通过更换控制器的被控变量加以克服;同时,控制参数少,降低了自生成控制参数的风险。相较之下,PI 控制器中积分环节的引入加剧了阀门过度节流的风险,提升了系统不稳定的概率,为降低积分环节的负面影响,必须同时引入微分环节,进一步提升了控制参数自生成的复杂度,降低控制器的可靠性。

控制回路如图 2 所示。传统方案 1 采用管道入口压力信号<sup>[6]</sup>作为过程变量,传统方案 2 则采用立管底部压力信号<sup>[35]</sup>作为过程变量。其中,立管底部

压力信号属于水下信号,不易或无法测量;而相较于管道入口压力信号,节流阀压降信号位于下游处理平台,数据无需中转即可接收,易于传输。因此本文方案选用节流阀压降作为过程变量,使用 PID 控制器控制阀门参数,进而控制阀门开度,最终消除严重段塞流。

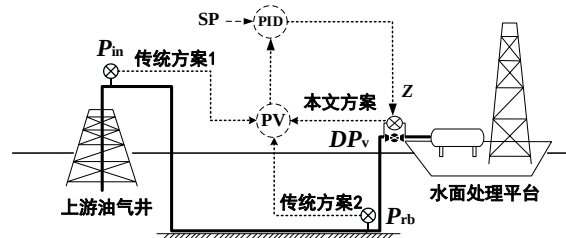


图2 传统控制回路简单示意图

Fig.2 Schematic diagram of traditional control loops

根据前期研究的优选结果<sup>[32]</sup>,选用“断流比率”作为过程变量。该变量的计算方法如下:实时采集一定长度的节流阀时序信号 $X(DP_v)$ ,之后按式(1)以二值化的形式处理时序信号,并按式(2)计算断流比率 $E$ 作为过程变量。根据严重段塞流的流动特性分析<sup>[18]</sup>,控制器的过程变量的设定值推荐为0,二值化阈值推荐为 3~5 kPa,时序信号的时间长度推荐为一个段塞周期。

$$F(DP_v) = \begin{cases} 1 & X(DP_v) \geq \text{threshold} \\ 0 & X(DP_v) < \text{threshold} \end{cases} \quad (1)$$

$$E = 1 - \frac{\text{sum}(F(DP_v))}{\text{len}(F(DP_v))} \quad (2)$$

式中,下标 $v$ 代表阀门, $\text{threshold}$ 为二值化阈值, $\text{len}()$ 代表时序信号中数据的个数。

控制器输出当前时刻阀门阻力系数的调节量 $\Delta f$ 而非直接调控阀门开度,见式(3),实际阀门阻力系数与阀门初始阻力系数和各时刻的控制器输出相关,见式(4),其与阀门开度的换算关系由式(5)和标定的阀门流量特性确定。

$$\Delta f_k = K_p e_k \quad (3)$$

$$f_k = f_0 + \sum_{i=1}^k \Delta f_i \quad (4)$$

$$f(Z) = \left( \frac{9000\pi d^2}{Kv(Z)} \right)^2 \quad (5)$$

式中, $K_p$ 为比例系数,无量纲; $e$ 为偏差,与过程变量单位相同,因此也为无量纲;下标 $k$ 为时刻序号; $f_0$ 为初始开度对应的阀门阻力系数,无量纲。 $d$ 为阀门所处管径的通径,m; $\rho_l$ 为液体工质的密度, $\text{kg/m}^3$ ; $Kv$ 为阀门开度对应的流量系数, $\text{m}^3/\text{h}$ 。

控制器的采样周期在文献<sup>[16]</sup>的基础上进行修

正,推荐为1.2~2个段塞周期。

## 2.2 控制参数自生成方法

以下研究参数自生成方法。引言已提到可以利用流型的稳定性判据,预测严重段塞流消散的临界条件,进而生成控制参数。对于一套确定的管道系统,在工质不变的条件下,临界条件包括入口流量,出口压力和阀门阻力系数。如果入口流量和出口压力已知,就可以估算临界条件对应的阀门阻力系数,也即临界阻力系数;进而,若阀门流量特性已知,可以基于式(5)和阀门流量特性求解临界开度。之后,临界阻力系数和临界开度将作为先验知识,参与控制参数的生成。

现有文献中提出两种用于直接计算临界阻力系数的方法,第一种<sup>[29]</sup>基于半经验公式计算临界阻力系数,记为方法一;另一种<sup>[28]</sup>基于稳定性判据计算临界阻力系数,记为方法二;而经典文献中的部分判据同样具有求解临界阻力系数的潜力,包括Jansen判据<sup>[31]</sup>和Malezadeh判据<sup>[30]</sup>。然而,稳定性判据基于简化的物理假设和物理模型建立,其求解结果必然带有一定水平的偏差,这些方法的实际预测表现还需要大量实验结果进行验证和分析。为此,首先开展了高压实验系统的静态节流实验,在文献<sup>[28]</sup>的基础上,得到了不同实验系统、不同流量工况下共计57组临界阻力系数实验数据。其中,常压系统36组,高压系统出口压力0.1 MPa(A) 8组,出口压力1.2 MPa(A) 7组,出口1.5 MPa(A) 6组。常压系统实验结果与各方法的预测结果绘制在图3,高压系统实验结果与预测结果绘制在图4。此外,需要指出:Malezadeh判据在高流速的工况下可能出现无法求解的情况,因为Malezadeh判据需要在计算前预先计算立管持液率,判据作者推荐使用文献<sup>[36]</sup>的方法首先确定立管多相流型,之后根据流型计算持液率,而文献<sup>[36]</sup>没有给出搅动流的持液率计算方法,因此在立管流型被判定为搅动流的工况下(通常是气速相对高的工况),将因无法计算立管持液率导致判据无解。

需要注意,本研究基于阀门阻力公式,即式(6),定义阀门阻力系数 $f$ ,式中, $DP$ 为阀门压差,Pa; $U$ 为流速,m/s, $\rho_L$ 为液相工质密度, $\text{kg/m}^3$ 。

$$DP = f \rho_L U^2 \quad (6)$$

$f$ 不同于文献<sup>[30,31]</sup>中使用的 $C$ 以及文献<sup>[28]</sup>中使用的 $f_L$ ,在使用时应按照式(7)进行换算。

$$f_L = C = f \rho_L / 1000 \quad (7)$$

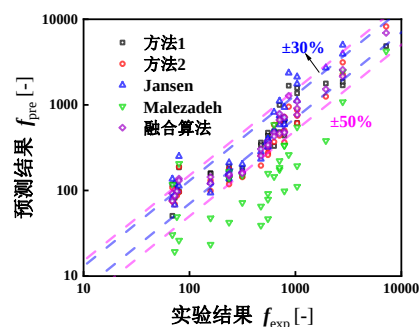


图3 常压系统实验结果与预测结果展示

Fig.3 Results of the atmospheric pressure system experiment versus predictions

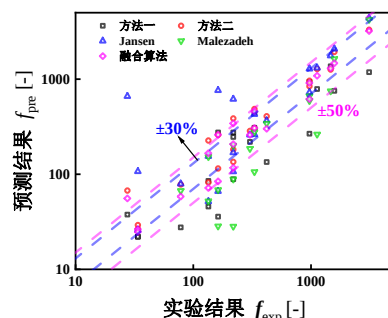


图4 高压系统实验结果与预测结果展示

Fig.4 Results of the high-pressure system experiment versus predictions

本文采用平均绝对误差(MAE)与平均相对误差(MRE)分析各方法预测临界阻力系数的统计表现,具体计算公式见式(8-9),式中下表exp与pre分别代表实验结果与预测结果:

$$MAE = \text{abs}(f_{\text{exp}} - f_{\text{pre}}) \quad (8)$$

$$MRE = \frac{\text{abs}(f_{\text{exp}} - f_{\text{pre}})}{f_{\text{exp}}} \quad (9)$$

各方法预测临界阻力系数的平均绝对误差(MAE)和平均相对误差(MRE)如表1所示,其中,方法一和方法二具有最好的预测精确度,在全部57组验证工况上分别得到了262.18和184.92的平均绝对误差和37.84%和32.87%的平均相对误差, Malezadeh判据的结果(MAE:396.42, MRE:59.43%)稍微优于Jansen判据(MAE:468.75, MRE:93.22%)。

考虑阀门调控的安全性要求,在借助预测临界阻力系数生成控制参数时,必须小心处理预测结果,避免极端坏值的影响,尤其是预测结果极端偏大的情况,可能出现过度节流,进而导致管线压力飙升,迫使生产关停,造成显著经济损失。因此,作

表1 各方法预测结果MAE与MRE展示

Table 1 Display of MAE and MRE for prediction results by various methods

|       | 方法一    | 方法二    | Jansen判据 | Malezadeh判据 | 融合算法   |
|-------|--------|--------|----------|-------------|--------|
| MAE   | 262.18 | 184.92 | 468.75   | 396.42      | 141.08 |
| MRE/% | 37.84  | 32.87  | 93.22    | 59.43       | 31.32  |

者尝试采用信息融合算法对子算法的预测结果进行融合处理,以进一步提升计算结果的精确度。融合算法的首要目的是减少极端坏值的发生概率,即缩小相对误差分布区间,以保障阀门调控安全,在此前提下尽可能地降低MAE。基于表1结果,同时考虑到Jansen判据和Malezadeh判据在出口压力较高(5 MPa)时会计算出负的临界阻力系数<sup>[28]</sup>,本文选用方法一和方法二作为融合的子算法。

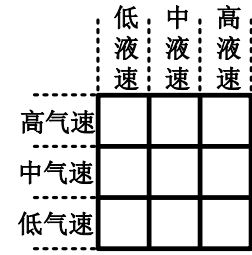
经分析比较,构建基于模糊推理系统的融合算法,通过预先统计两个子算法在不同流量范围内的性能,合理分配各自的权重,从而提高预测精度。主要过程是将入口流量按模糊律转化为不同流量区域的概率分布矩阵,并基于子算法在各流量区域的统计表现融合计算最终的预测临界阻力系数。

具体如下:首先统计各子方法在不同流量区域的预测表现,包括高(低)估概率,平均高估幅度和平均低估幅度四个参数,由三个特征矩阵表述,见图5。其中,特征矩阵A表述子方法在各流量区域内高估临界阻力系数的概率,特征矩阵B表述子方法高估量的MRE,特征矩阵C表述子方法低估量的MRE。之后对于任意入口流量条件,计算该入口流量归属于各流量区域的概率分布矩阵,记为矩阵D。具体流程如图6所示。之后按照式(10)计算融合矩阵G,并求解融合矩阵G所有元素之和,得到融合结果,见式(11)。融合算法的计算结果见图3和图4。融合算法的预测偏差情况同样展示在表1中。

$$G = \sum_{i=1}^2 w_i f_i [A_i \circ (I + B_i/100) + (1 - A_i) \circ (I - C_i/100)] \circ D \quad (10)$$

$$f_{fus} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g_{ij} \quad (11)$$

式(10)中,下标*i*代表子方法,下标*fus*代表融合算法,*w*代表子方法所占权重,*f*代表子方法计算结果,*G*为融合矩阵,*I*为单位矩阵, $\circ$ 为点乘符号, $\oslash$ 为点除符号,式(11)中,*g*代表融合矩阵各元素。*w*<sub>1</sub>推荐为0.39,*w*<sub>2</sub>推荐为0.61,由子方法1,2的MAE确定。



(a) 流速区域划分

|                    |      |      |                    |       |       |                    |      |      |
|--------------------|------|------|--------------------|-------|-------|--------------------|------|------|
| 0.30               | 0.43 | 0.74 | 0.53               | 1.53  | 4.40  | 2.14               | 1.54 | 0.98 |
| 0.06               | 0.03 | 0.23 | 2.38               | 8.93  | 7.19  | 6.39               | 2.72 | 2.83 |
| 0.07               | 0.27 | 0.83 | 10.62              | 37.67 | 79.02 | 4.33               | 1.98 | 0.88 |
| Mat A <sub>1</sub> |      |      | Mat B <sub>1</sub> |       |       | Mat C <sub>1</sub> |      |      |
| 0.52               | 0.31 | 0.28 | 5.57               | 0.94  | 0.64  | 1.92               | 1.57 | 1.75 |
| 0.18               | 0.06 | 0.05 | 5.85               | 3.63  | 0.14  | 5.23               | 2.56 | 3.05 |
| 0.49               | 0.41 | 0.39 | 7.40               | 11.56 | 17.08 | 3.41               | 1.75 | 1.96 |
| Mat A <sub>2</sub> |      |      | Mat B <sub>2</sub> |       |       | Mat C <sub>2</sub> |      |      |

(b) 特征矩阵

图5 流量区域划分方法与特征矩阵细节图

Fig.5 Flow velocity zoning method and characteristic matrices

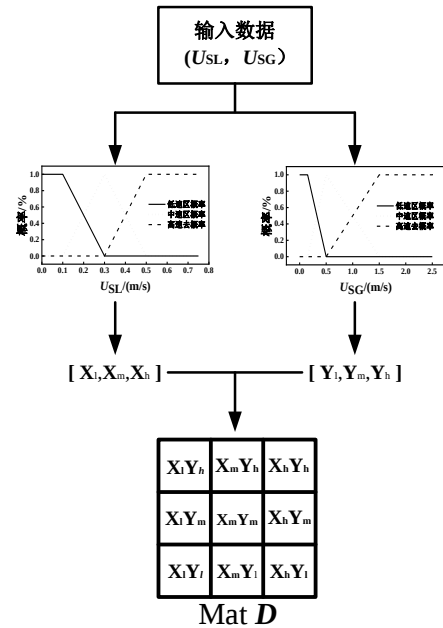


图6 概率分布矩阵D的计算流程

Fig.6 Calculation process of the probability distribution matrix D

图7为融合算法和子方法的误差分布。结合图7和表1可以发现:融合算法有效降低了子算法的MAE,从方法1的262.18和方法2的184.92下降至141.08,同时缩小了误差分布区间,标准差(SD)从方法1的0.44和方法2的0.43下降至0.33,显著降低了

极端坏值出现的概率,很好地实现了设计目的。

之后,基于融合结果和子方法的临界开度计算结果估算控制参数 $K_p$ ,见式(12)、(13)。式(12)中 $N$ 为可信度因子,根据子算法各自求解的临界开度的差值计算得到, $\lceil \cdot \rceil$ 为向上取整符号。显然,子算法计算的临界开度越接近,则 $N$ 越小,说明此时得到的预测结果越可信。式(13)基于简单的设计理念得到:视预测临界阻力系数为参照,控制参数应使得阀门能够快速调节至略高于预测临界开度的开度,之后基于实时数据缓慢调节开度,以尽可能精确地搜索实际临界开度,避免引入不必要的系统压力,降低产量。式中的100由断流比率 $E$ 的定义域 $[0,100)$ 确定,该数值确定了阀门初次调节的上限,对于类似的其他方案,可以根据过程变量的定义域生成对应的控制参数; $N$ 则定义了实际临界开度的搜索范围, $N$ 越小,预测结果越可信,搜索范围越小,调节时间越短。

此外,由于融合算法的预测结果整体倾向于低估临界阻力系数,进一步降低了调控算法过度节流的情况发生。

$$N = \left\lceil \frac{\text{abs}(Z_1 - Z_2)}{5} \right\rceil \quad (12)$$

$$K_p = (f_{\text{fus}} - f_{100\%}) / (-100N) \quad (13)$$

图8展示了本文所述控制流程的全过程,控制流程的核心是读取管道工况信息,基于融合算法求解临界阻力系数,并基于临界阻力系数确定控制器参数。此外,阀门的流量特性曲线必须已知,以实现阀门阻力系数到阀门开度的换算。

### 3 验证结果与讨论

对设计调控算法进行实验验证。验证工况共计29组,其中,12组来自常压实验系统,11组来自

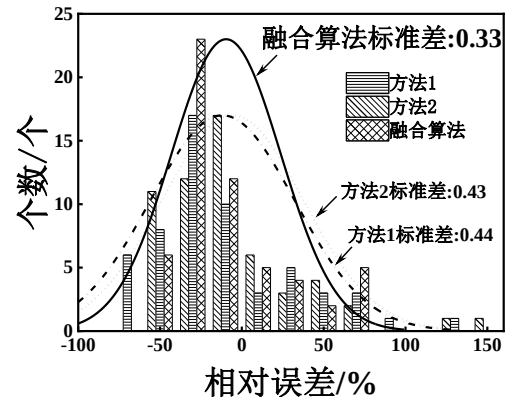


图7 子方法与融合算法的相对误差分布图

Fig.7 Relative error distribution of sub-methods and fusion algorithm

高压实验系统,出口压力为5 MPa(A),6组来自高压实验系统,出口压力为0.1 MPa(A)。验证工况涵盖了规模不同的两个实验系统,以及多个不同的出口压力条件,同时,验证流型包含了全部三种严重段塞流流型和两种过渡流型,以尽可能全面地对调控算法进行验证。

#### 3.1 整体调控性能

统计了表征入口压力波动幅度的部分参数调控前后的对比效果,见表2。表2同时展示了验证工况的平均调节次数,根据前文提到的控制器采样周期,可以计算得到调控所需的平均段塞周期个数。

表2表明,尽管实验系统和出口压力条件存在较大差异,入口流量也分布广泛,但是对于全部的29个验证工况,在使用标准化方法生成的控制参数的前提下,调控算法能用平均3.76次调阀,在入口压力平均上升18.94%的前提下,显著降低入口压力的波动幅度,成功消除严重段塞流,此外,平均调节时间远少于同类静态节流调控方案<sup>[16,37]</sup>;平均3.76次调阀对应不到7个段塞周期,而前述两种同类调控方案均需要数十个段塞周期的调控时间。这说明自生成的控制参数不仅可以有效消除严重段塞流,同时提升了调控速度。

表2 入口压力调控前后波动幅度对比

Table 2 Comparison of the fluctuation amplitude of  $P_m$  before and after regulation

|                    | 均值上升幅度 /% | 标准差下降幅度 /% | 四分位差下降幅度 /% | 变异系数下降幅度 /% | 调节次数/次 |
|--------------------|-----------|------------|-------------|-------------|--------|
| 常压系统-出口 0.1 MPa(A) | 18.37     | 77.11      | 74.17       | 80.99       | 3.83   |
| 高压系统-出口 0.1 MPa(A) | 36.22     | 55.49      | 54.49       | 69.87       | 3.17   |
| 高压系统-出口压力 5 MPa(A) | 1.59      | 60.8       | 64.04       | 61.28       | 4      |
| 全体工况               | 18.94     | 66.45      | 66.26       | 71.21       | 3.76   |

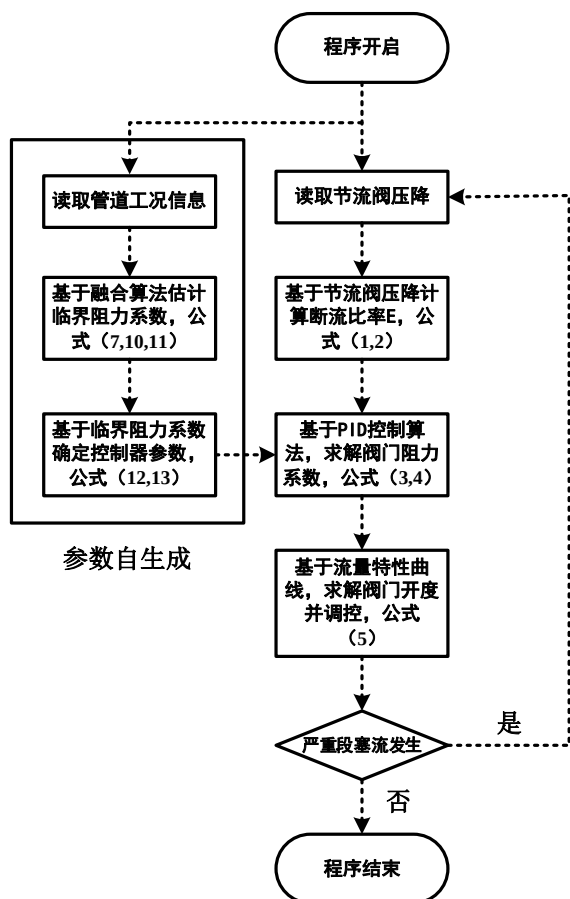


图8 控制方法流程图

Fig.8 Flowchart of the proposed control method

### 3.2 实验案例

图9展示了四个典型工况的调控细节,即入口压力随阀门开度变化而变化的曲线。如图9所示,初始入口压力波形对应阀门初始开度100%,经过数个严重段塞流周期之后启动控制流程,控制器开始迅速调节阀门,直至流动稳定,此时,对比调控前后,可以看到入口压力的波动水平显著下降。

此外,尽管两个实验系统使用了不同流量特性的阀门(常压系统为线性阀,高压系统为等百分比阀),阀门调控均展现出类似的先激进(单次开度变化量大)后保守(单次开度变化量小)的调控策略。这是因为相较于传统方法直接以阀门开度为被控变量,本文设计控制器选择通过调控阀门阻力系数来间接调控阀门开度的方案。该方案首先实现了控制参数与阀门参数的解耦,避免阀门流量特性的差异影响调控效果。在验证过程中,操作者完全采用标准化的设计方法在不同类型阀门的实验系统上生成控制参数,并且取得了良好的实验效果;其次优化了阀门调控策略,这是因为阀门开度本身不

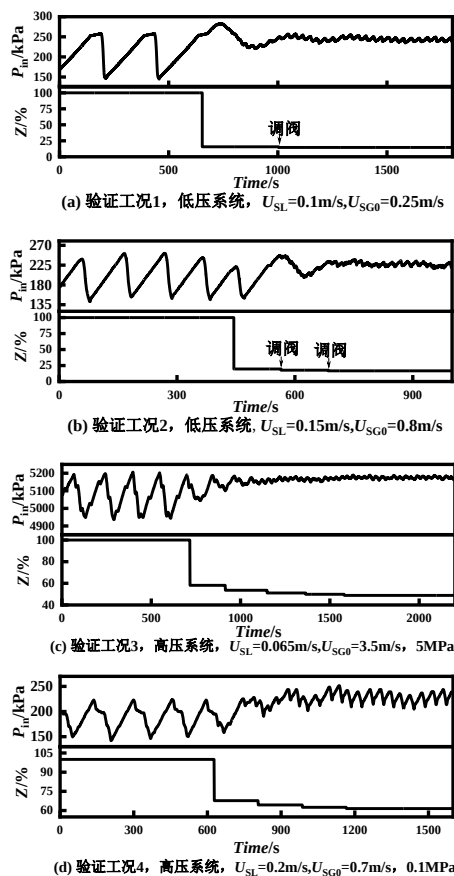


图9 四组典型工况的调控过程展示

Fig.9 Demonstrations of the control process of four typical working conditions

具备流体力学物理意义,在修改被控变量后,控制器能够基于物理意义在宽广的开度区间内进行调节,从而在显著提升调控速度的同时保证调控安全。这是传统的静态节流调控方案无法做到的。综上所述,通过在静态节流调控方案中引入稳定性判据和修改被控变量,实现了对差异化的流动系统的控制参数自生成。

## 4 结论

针对现有静态节流技术控制参数泛用性弱,并且依赖人工调参的缺陷,本文通过引入稳定性分析和融合算法,构建了静态节流控制器参数自生成方法,进而得到了一种参数自生成的控制器,并在多套实验系统上进行了充分验证,得到了良好的验证效果。本文主要的结论如下:

(1) 为进一步提升现有判据对临界阻力系数的计算精度,提出了基于模糊推理的融合算法,基于模糊律划分流量区域,并根据子算法在不同流量区

域的统计表现进行融合预测,得到了比子算法更优的预测精确度,MAE从262.18(方法一)和184.92(方法二)降至141.08,标准差从0.44(方法一)和0.43(方法二)降至0.33;

(2) 构建了融合算法预测结果的可信度评价参数,基于融合预测结果和可信度评价参数,提出了控制器参数生成的标准化方法,实现控制快速性和安全性的平衡。同时优化了控制器的被控变量,实现了控制参数与阀门流量特性的解耦,最终实现了对差异化的流动系统的自适应控制。

(3) 不同实验系统、不同出口压力条件、不同阀门流量特性的条件下的宽广流量工况验证结果表明,使用标准化方法生成的控制参数进行调控,均可以显著地降低入口压力波动幅度,消除严重段塞流,体现了良好适用性。此外,验证工况的平均调节时间小于7个段塞周期,远小于同类方案所需的数十个段塞周期,表明自生成的控制参数可以快速地消除段塞。

### 符号说明

**A**——特征矩阵,用于表征不同流量区域内高估概率  
**B**——特征矩阵,用于表征不同流量区域内高估工况的MRE  
**C**——特征矩阵,用于表征不同流量区域内低估工况的MRE  
**D**——特征矩阵,用于表征入口流量归属于不同流量区域的概率  
**DP**——压差,Pa  
**d**——管道通径,m  
**E**——断流比率,控制器使用的过程变量,一个段塞周期内液相断流的时间占比,%  
**e**——控制器偏差,由设定值减去过程变量得到  
**f**——阀门阻力系数,无量纲  
**G**——融合矩阵  
**g**——融合矩阵元素  
**K<sub>v</sub>**——阀门流量特性,m<sup>3</sup>/h  
**K<sub>p</sub>**——控制器比例系数  
**N**——可信度因子,用于表征融合结果的可信度,越小越可信,无量纲  
**P**——压力,Pa  
**U**——流速,m/s  
**w**——权重,无量纲  
**X**——液相流量区域概率  
**Y**——气相流量区域概率

**Z**——阀门开度,%

**ρ**——密度,kg/m<sup>3</sup>

### 下角标

**exp**——实验结果

**fus**——融合算法结果

**h**——高流速

**in**——入口

**i**——数字,整数

**j**——数字,整数

**k**——时刻,数字,整数

**L**——液相

**l**——低流速

**m**——中流速

**rb**——立管底部

**SL**——液相表观

**SG**——气相表观

**v**——阀门

**0**——初状态或标况

**1**——方法1

**2**——方法2

### 参考文献

- [1] Havre K, Stornes K O, Stray H. Taming slug flow in pipelines[J]. Pipes & pipelines international, 2000, **46**(2): 23–30.
- [2] Taitel Y. Stability of severe slugging[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1986, **12**(2): 203–217.
- [3] 王海燕, 李玉星, 蔡晓华, 等. 基于段塞流的通用气液两相流模型的建立与验证[J]. 化工学报, 2013, **64**(10): 3549–3557.  
Wang H Y, Li Y X, Cai X H, et al. Development and verification of unified model based on slug flow for gas-liquid two-phase flow [J]. CIESC Journal, 2013, **64**(10): 3549–3557.
- [4] 王鑫, 王兆婷, 张晓凌, 等. 水平管油气两相段塞流及其传热特性[J]. 化工学报, 2017, **68**(6): 2306–2314.  
Wang X, Wang Z T, Zhang X L, et al. Heat transfer of oil-gas slug flow in horizontal pipe[J]. CIESC Journal, 2017, **68**(6): 2306–2314.
- [5] Pedersen S, Durdevic P, Yang Z Y. Challenges in slug modeling and control for offshore oil and gas productions: a review study[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, **88**: 270–284.
- [6] 马华伟, 任玉林, 李怀印, 等. 旁通管法消除严重段塞流的实验与模型[J]. 化工学报, 2010, **61**(10): 2552–2557.  
Ma H W, Ren Y L, Li H Y, et al. Experiment and modeling of bypass-pipe method in eliminating severe slugging[J]. CIESC Journal, 2010, **61**(10): 2552–2557.
- [7] 李自力, 冯叔初. 国外部分长距离混输管道调研[J]. 中国海上油气(工程), 1996(5): 52–60.  
Li Z L, Feng S C. Investigation on some long-distance mixed transportation pipelines abroad[J]. China Offshore Oil and Gas, 1996(5): 52–60.
- [8] Hill T J. Gas injection at riser base solves slugging, flow problems [J]. Oil and Gas Journal, 1990, **88**(9): 88–92.
- [9] 王鑫, 郭烈锦. 气举消除严重段塞流方法的实验研究[J]. 工程

- 热物理学报, 2007, **28**(4): 607-610.
- Wang X, Guo L J. Experimental study of gas-lift method for severe slugging elimination[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, **28**(4): 607-610.
- [10] Schmidt Z, Brill J P, Beggs H D. Choking can eliminate severe pipeline slugging[J]. Oil and Gas Journal, 1979, **77**(46): 230 - 238.
- [11] Taitel Y, Vierkandt S, Shoham O, et al. Severe slugging in a riser system: experiments and modeling[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1990, **16**(1): 57-68.
- [12] Azevedo G R, Balıño J L, Burr K P. Linear stability analysis for severe slugging in air - water systems considering different mitigation mechanisms[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, **73**: 238-250.
- [13] Zhao X Y, Xu Q, Fu J Q, et al. Study on eliminating severe slugging by manual and automatic choking in long pipeline-riser system[J]. Chemical Engineering Science, 2024, **292**: 119978.
- [14] Sarica C, Beggs P I, Pereyra E, et al. Feasibility of Surfactants as Severe Slugging Suppression Agents, F, 2014 [C].
- [15] Banjara V, Pereyra E, Avila C, et al. Critical review & comparison of severe slugging mitigation techniques[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, **228**: 212082.
- [16] 郭烈锦, 李乃良, 叶晶, 等. 消除集输-立管系统严重段塞流的实时节流装置及方法: CN102410391B[P]. 2013-07-10.
- Guo L J, Li N L, Ye J, et al. Real-time throttling device and method for eliminating severe slugging of gathering-riser system: CN102410391B[P]. 2013-07-10.
- [17] 郭烈锦, 赵向远, 徐强, 等. 一种气液分离器与节流阀联合消除严重段塞流的系统及方法: CN113864653B[P]. 2025-07-04.
- Guo L J, Zhao X Y, Xu Q, et al. System and method for eliminating serious slug flow through combination of gas-liquid separator and throttle valve: CN113864653B [P]. 2025-07-04.
- [18] Wang H X, Zou S F, Liu T Y, et al. Experimental investigation of online solving for critical valve opening for eliminating severe slugging in pipeline-riser systems[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2024, **110**: 109584.
- [19] Hedne P, Linga H, Kim J H, et al. Suppression of terrain slugging with automatic and manual riser choking Winter Annual Meeting ASME Dallas 1990 [M]. 1990.
- [20] Havre K, Dalsmo M. Active feedback control as a solution to severe slugging[J]. SPE Production & Facilities, 2002, **17**(3): 138-148.
- [21] Ogazi A I I, Cao Y, Yeung H, et al. Slug control with large valve openings to maximize oil production[J]. SPE Journal, 2010, **15**(3): 812-821.
- [22] Jahanshahi E, De Oliveira V, Grimholt C, et al. A comparison between Internal Model Control, optimal PIDF and robust controllers for unstable flow in risers[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, **47**(3): 5752-5759.
- [23] Park K H, Kim T W, Kim Y J, et al. Experimental investigation of model-based IMC control of severe slugging[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, **204**: 108732.
- [24] Henry T, Cao Y. Modified Smith predictor for slug control with large valve stroke time in unstable systems[J]. Digital Chemical Engineering, 2022, **3**: 100028.
- [25] 张西迎, 李乃良, 陈冰清. 文昌油田集输-S形立管内严重段塞流的分析与控制[J]. 油气储运, 2019, **38**(4): 472-480.
- Zhang X Y, Li N L, Chen B Q. Analysis and treatment on the severe slug flow in pipeline S-shaped riser of Wenchang Oilfield [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, **38**(4): 472-480.
- [26] Cao Y, Lao L Y, Hoi Y. Method, controller and system for controlling the slug flow of a multiphase fluid: United States: United States, 8489244B2 [P/OL]. 2013-07-16.
- [27] Dinart D B(Vitoria). Controller for suppressing slugs in petroleum production systems: United States, 12460520 [P/OL]. 2020-09-15.
- [28] Wang H X, Xu L H, Zou S F, et al. Estimation model of critical opening of topside choking for slugging elimination in pipeline-riser system[J]. Chemical Engineering Science, 2026, **321**: 122810.
- [29] Fu J Q, Wu Q H, Sun J, et al. The prediction of the valve opening required for slugging control in offshore pipeline risers based on empirical closures and valve characteristics[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, **13**(5): 981.
- [30] Malekzadeh R, Henkes R A W M, Mudde R F. Severe slugging in a long pipeline - riser system: Experiments and predictions[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, **46**: 9-21.
- [31] Jansen F E, Shoham O, Taitel Y. The elimination of severe slugging: experiments and modeling[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, **22**(6): 1055-1072.
- [32] Du Y H, Wang H X, Wu Q H, et al. Potential variables for automatic slugging control by topside choking in pipeline - riser systems[J]. International Journal of Fluid Engineering, 2025, **2**(3): 033501.
- [33] Liu T Y, Zou S F, Wang H X, et al. Cyclic flow cut-off characteristics of gas-liquid two-phase flow in pipeline-riser system and prediction of its occurring condition[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2025, **182**: 105042.
- [34] Azevedo G R, Balıño J L, Burr K P. Influence of pipeline modeling in stability analysis for severe slugging[J]. Chemical Engineering Science, 2017, **161**: 1-13.
- [35] 郭烈锦, 王鑫, 张西民. 消除严重段塞流的阀门节流动态控制方法: CN1297779C[P]. 2007-01-31.
- Guo L J, Wang X, Zhang X M. Active valve control method for severe slugging elimination: CN1297779C [P]. 2007-01-31.
- [36] Petalas N, Aziz K. A mechanistic model for multiphase flow in pipes[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, **39**(6).
- [37] Pedersen S, Durdevic P, Yang Z Y. Learning control for riser-slug elimination and production-rate optimization for an offshore oil and gas production process[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2014, **47**(3): 8522-8527.