

引文: 石国赞, 宇波. 掺氢天然气管网数值仿真轻量化算法[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 156-165.

SHI Guoyun, YU Bo. Lightweight algorithm for numerical simulation of hydrogen blending natural gas pipeline network[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 156-165.

掺氢天然气管网数值仿真轻量化算法

石国赞^{1,2,3} 宇波¹

1. 北京石油化工学院机械工程学院 2. 北京市安全生产工程技术研究院 3. 北京航空航天大学航空发动机研究院

摘要: 目前针对管网数值仿真算法的优化主要集中在代数方程组的求解上。针对管网流动数值仿真算法提升计算效率方案中缺少针对封闭关系与状态方程的优化, 分析了目前优化方案各模块的耗时情况, 发现了仿真程序中耗时模块为封闭关系与状态方程求解。最后, 结合计算机库函数的缺点以及现代 CPU 中 SIMD (Single Instruction Multiple Data) 模型的特点, 提出了针对封闭关系与状态方程的轻量化算法, 并验证了算法的高效性。研究结果表明: ①封闭关系与状态方程模型中的耗时原因为直接调用库函数的次幂运算、指数运算、对数运算以及除法运算; ②由于次幂运算效率远低于其他运算, 通过变换消除了模型中几乎所有的次幂运算; ③利用 SIMD 指令来计算指数运算与对数运算, 实现了在单核 CPU 上同时计算多个数据的指数与对数, 最后通过数学变换将所有除法转换为乘法; ④轻量化算法加速效果显著, 其整体加速比为 18, 而在状态方程求解模块的加速比更是高达 70 以上。结论认为, 该轻量化算法在不影响计算精度的条件下提高了计算速度, 对于提高掺氢天然气管网在线仿真与智能管网的建设具有重要的理论价值和技术支撑。

关键词: 天然气管网; 数值仿真; 计算效率; 状态方程; 加速比; 掺氢

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.02.015

Lightweight algorithm for numerical simulation of hydrogen blending natural gas pipeline network

SHI Guoyun^{1,2,3}, YU Bo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. Beijing Academy of Safety Engineering and Technology, Beijing 102617, China; 3. Research Institute of Aero-Engine, Beihang University, Beijing 102206, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.2, p.156-165, 2/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: At present, optimization of the numerical simulation algorithm for pipeline networks mainly focuses on solving the algebraic equation set. The scheme to improve the calculation efficiency of numerical simulation algorithm for pipeline network flow lacks the optimization of loop relationship and equation of state (EOS). To this end, this paper analyzes the time consumption situations of each module in the optimization scheme. It shows that the time consuming module in the simulation program is used to solve loop relationship and EOS. Finally, based on the disadvantages of computer built-in function and the characteristics of SIMD (Single Instruction Multiple Data) model in CPU, a lightweight algorithm for loop relationship and EOS is developed, and its efficiency is verified. And the following research results are obtained. First, the time consumption of the loop relationship and EOS model is caused by the direction call of the power operation, exponentiation operation, logarithm operation and division operation of built-in function. Second, the efficiency of power operation is much lower than that of other operations, so nearly all power operations of the model are eliminated through transformation. Third, SIMD order is applied in exponentiation operation and logarithm operation, which realizes the simultaneous calculation of the exponentiations and logarithms of multiple data in the single-core CPU. Eventually, all divisions are transformed into multiplications through mathematical transformation. Fourth, the lightweight algorithm achieves a remarkable speed-up effect, and its overall speed-up ratio is 18 and even over 70 in the EOS solving module. In conclusion, this lightweight algorithm improves the calculation speed without influencing the calculation accuracy, which provides important theoretical value and technological support for the online simulation of hydrogen blending natural gas pipeline networks and the construction of intelligent pipeline networks.

Keywords: Natural gas pipeline network; Numerical simulation; Calculation efficiency; Equation of state (EOS); Speed-up ratio; Hydrogen blending

基金项目: 国家重点研发计划项目“氢能技术”重点专项“中低压纯氢与掺氢燃气管输工艺与掺氢设备研发”(编号: 2021YFB4001602)。

作者简介: 石国赞, 1989 年生, 助理研究员; 主要从事管道流动仿真方面的研究工作。地址: (102617) 北京市大兴区黄村镇清源北路 19 号。ORCID: 0000-0002-0013-5170。E-mail: sgy-421205643@163.com

通信作者: 宇波, 1972 年生, 教授, 博士研究生导师; 主要从事油气长距离管输技术、流动与传热高效仿真技术方面的研究工作。地址: (102617) 北京市大兴区黄村镇清源北路 19 号。ORCID: 0000-0002-4231-6914。E-mail: yubobox@vip.163.com

0 引言

随着国家“碳达峰、碳中和”双碳目标的推进，对于能源的管理要求也越来越高，而氢能作为一种清洁能源，是实现双碳目标的重要发展对象^[1]。将氢气掺入现有的天然气管网中进行输送是目前最经济最实用的一种运输途径^[2]。截至2022年底，我国天然气管网总里程达到了 11.6×10^4 km^[3]。同时，管网流动的数值仿真对建设与管理大型管网^[4-5]、优化运行^[6-8]、泄漏检测^[9-15]、组分追踪^[16-18]等多个方面起着越来越重要的作用。随着管网规模的增大，工程现场对仿真的计算效率提出了更高的要求，如何提高管网流动仿真的计算效率成为亟待解决的一个重要问题。

学者们在提高计算效率方面做了很多努力，极大地提高了仿真软件的计算效率。郭乔等^[19]在离散方程处理方面做出了改进，还有其他学者分别从数学模型处理方面做了改进^[20-21]，提出了自适应时间、空间步长法^[22-23]，并行计算^[24-26]等。此外，向月^[27]提出了CPU+GPU并行法，王鹏^[22]、宇波等^[28]提出了“分而治之”算法DIMENS。这些算法大多集中在如何提高控制方程离散后的代数方程组方面，提出了不同类型的加速算法。然而仿真软件是一个复杂的系统，不但需要求解控制方程，还需要求解封闭方程，尤其对于气体，还需要求解状态方程。各方程的求解效率对整体仿真效率的影响各不相同，目前DIMENS快速算法中，计算耗时最长的是求解热力方程时所需通过状态方程求解的物性计算，其耗时占总耗时的45%；其次是求解水力方程时所需通过状态方程求解的物性计算，其耗时占总耗时的37%。这两个模块也就是状态方程的求解，总耗时几乎达到了仿真程序整体耗时的82%。而对于离散方程的方程组求解，反而是计算时间最短的几个模块。因此认为目前管网求解算法的性能瓶颈在封闭关系与状态方程的求解方面，而非控制方程以及其离散方程组的求解方面。

笔者针对目前管网求解算法的性能瓶颈，提出了高效轻量化算法。首先，针对封闭关系与状态方程的特点，找到其计算效率低下的原因，提出了修补直接调用库函数的高效方案；其次利用Single Instruction Multiple Data (SIMD)模型来加速方程中的指数、对数运算；最后通过算例验证了算法的高效性。

1 管网模型

管网流动数学模型包括流动控制方程（连续方程、动量方程以及能量方程）、气体状态方程（例如

BWRS 状态方程）、气体黏度模型以及管道与流体之间的摩阻系数模型以及边界条件、初始条件、设备特性方程等。本文针对气体状态方程（例如 BWRS 状态方程）、气体黏度模型以及管道与流体之间的摩阻系数模型进行优化以提高管网流动仿真效率，下面给出具体模型。此外求解算法采用快速求解算法 DIMENS^[28]。

1.1 气体状态方程

掺氢天然气物性通常通过气体状态方程来计算。在大型天然气管网中，BWRS 状态方程^[29]因其适用范围广、精度高被广泛使用，方程计算如下：

$$p = \rho RT + \left(B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left(bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + \alpha \left(a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) \exp(-\gamma\rho^2) \quad (1)$$

式中 p 表示压力，kPa； T 表示温度，K； ρ 表示密度，kmol/m³； R 表示气体常数， $R=8.314$ 3 kJ/(kmol·K)。 A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 、 E_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 α 和 γ 表示状态方程的 11 个参数，详见本文参考文献 [29]。

通过状态方程可以计算气体的密度、压力、比热容等参数^[22]。

1.2 黏度计算

掺氢天然气黏度一般可认为是一个常数，但是对于大型管网，其状态变化范围大，因此通常采用下式来计算：

$$\mu = C \exp \left[x \left(\frac{\rho}{1000} \right)^y \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad x &= 2.57 + 0.278 \Delta + \frac{1063.6}{T} \\ y &= 1.11 + 0.04x \\ C &= \frac{2.415 \times (7.77 + 0.184 \Delta) T^{1.5}}{122.4 + 377.58 \Delta + 1.8T} \times 10^{-4} \\ \Delta &= \frac{\rho_0}{\rho_a} \end{aligned}$$

式中 μ 表示动力黏度，mPa·s； ρ_0 表示标准状况下密度，kg/m³； ρ_a 表示标准状况下空气密度， $\rho_a=1.206$ kg/m³。

1.3 摩阻系数计算

气体与管道之间的摩阻通过摩阻系数计算，本文针对流动处于紊流区的完整模型见本文参考文献 [22]，计算方程如下：

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{K_e}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{\lambda}} \right) \quad (3)$$

式中 Re 表示雷诺数； K_e 表示管道绝对粗糙度， m 。

2 DIMENS 快速求解算法

本文采用快速求解算法 DIMENS 来仿真天然气管网流动。该算法基于“分而治之”的思想，将管网分解为管道与节点两种数学模型，先对管道模型进行预求解，随后根据管网拓扑结构与节点模型进行回代，完成管网的求解。通过此分解算法，能够有效降低管网整体求解时的矩阵阶数以及求解难度，保证结果正确的前提下，显著提高了求解速度，使其能够应用于小规模管网在线预测中（图 1）。

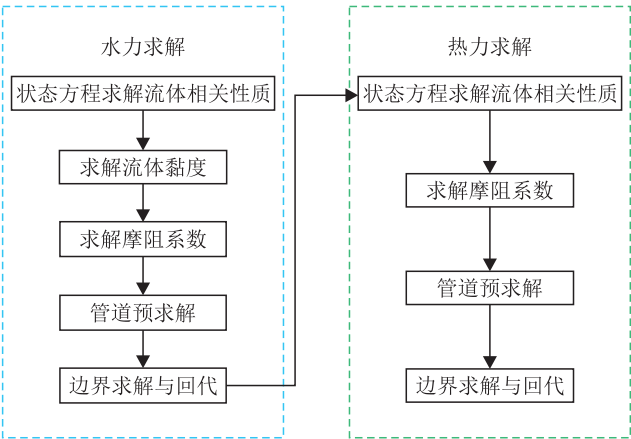


图 1 管网求解算法 DIMENS 流程图

该算法通过水力、热力学解耦来实现对管网数学模型的求解，主要包括水力求解的 5 个模块以及热力求解的 4 个模块。

水力求解具体步骤为：

- 1) 利用状态方程求解掺氢天然气中与水力模型相关的物性。
- 2) 利用黏度公式求解掺氢天然气黏度。
- 3) 结合物性、黏度以及管道参数，利用摩阻系数公式求解管道与流体间的摩阻。
- 4) 利用以上结果离散水力控制方程并进行预求解。
- 5) 结合管网拓扑结构、节点流量、压力平衡与边界条件求解节点流量压力，并回代到步骤 4) 的预求解结果中，得到管网流量、压力的解，完成管网水力控制方程求解。

热力求解具体步骤为：

- 1) 利用状态方程求解掺氢天然气中与热力模型相关的物性。

2) 结合物性、黏度以及管道参数，利用摩阻系数公式求解管道与流体间的摩阻。

3) 利用以上结果离散热力控制方程并进行预求解。

4) 结合管网拓扑结构、节点能量平衡与边界条件求解节点温度，并回代到步骤 3) 的预求解结果中，得到管网温度的解，完成管网热力控制方程求解。

时间推进：更新所有参数，仿真时层加 1，重新回到水力求解进入下一时层的求解，直到所需时刻结束。

表 1 给出了 DIMENS 求解器各模块耗时对比情况，由表 1 可知，目前 DIMENS 快速算法中，计算耗时最长的是求解热力方程时所需通过状态方程求解的物性计算，其耗时占总耗时的 45.04%；其次是求解水力方程时所需通过状态方程求解的物性计算，其耗时占总耗时的 37.01%。这两个模块也就是状态方程的求解，总耗时达到了仿真程序整体耗时的 82.05%。而对于离散方程的方程组求解，反而是计算时间最短的几个模块。因此认为目前管网求解算法的性能瓶颈在封闭关系与状态方程的求解方面，而非控制方程以及其离散方程组的求解方面。

表 1 DIMENS 求解器各模块耗时对比表

模块	耗时 /ms		占比	
	热力	水力	热力	水力
状态方程求解	35 778	29 399	45.04%	37.01%
边界求解与回代	132	6 537	0.17%	8.23%
摩阻求解	2 013	2 074	2.53%	2.61%
黏度求解		1 547		1.95%
管道预求解	533	1 431	0.67%	1.80%

3 轻量化算法

轻量化算法是指仅依赖单个 CPU，而不依赖第三方硬件的算法。本节分析了封闭关系与状态方程求解耗时原因，对 SIMD 模型进行简要介绍，在此基础上提出了状态方程、黏度以及摩阻系数轻量化算法。

一方面，根据引言统计结果可知，仿真程序中，耗时模块为流体物性的计算模块，包括 BWRS 方程的相关计算、流体黏度的计算以及摩阻系数的计算。不同于管道控制方程中仅有最简单的加、减、乘、除四则运算，BWRS 状态方程式（1）、黏度方程式（2）以及摩阻方程式（3）还存在幂运算、指数运算以及对数运算等非四则运算。由于计算机硬件本身并不

能进行这些高级运算^[30]，通常是由一些算法在软件层面通过简单的四则运算来实现^[31]，这些运算的效率并不高，导致在求解相关方程时，计算时间增加。通过统计耗时发现，幂运算的耗时是指数运算和对数运算的2倍以上，且这3种运算耗时远大于四则运算。在四则运算内部，耗时顺序为：除法>乘法>减法≈加法，这是因为在现代计算机中，硬件层面上只有加法或加减法的实现，其他所有运算均由软件层面的算法实现。此外，对于嵌套循环，当内层循环次数小于外面循环时，由于存在更多的调用，也会导致计算效率低下。

另一方面，采用基于系统多线程模型的并行计算是提升计算效率、提高计算速度的手段之一。然而此模型也存在一些缺陷：首先，此模型是通过操作系统来协调计算资源，因此其实际执行并不一定是并行计算；其次，此模型还需要通过共享数据来进行同步，而这些操作均需要操作系统通过调用额外的资源来协调，导致计算效率低下。因此，多线程模型的并行计算并不适用于任何场景，有时候甚至其效果比串行程序更差。另外一种并行模型是基于消息传递(MPI)实现的数据共享与同步，此模型通过网络通信来实现，其效率相较于系统多线程需要调用更多的硬件资源，其应用受到更多的限制。通过以上分析可知，采用基于系统并发模型的并行计算提升计算速度是有使用条件的，只有在计算时长远大于系统资源调用时，其加速效果才有体现。

对于掺氢天然气管网的数值仿真，若每个节点采用一个线程的模型来并行计算，则其加速效率可能将远小于1，将起到减速的效果。即使采用每根管道一个线程的模型，其加速比在1附近，无法真正实现计算加速。由于通过软件实现的并发模型具有多种延迟与数据同步等与计算模型无关的操作导致实际应用中受到多种限制，因此思考能否直接从硬件层面实现并行计算从而避免延迟以及数据同步等操作。单指令多数据(SIMD)便是一种在硬件层面实现的并行计算^[32]，此模型不需要数据同步等与计算模型无关的操作，真正实现了即使是两个数据也能并行计算且提升计算效率的功能。

3.1 SIMD 模型介绍

单指令多数据模型是指一条指令同时处理多个数据，是CPU基本指令集的扩展，主要提供小碎数据的并行操作。其原理如图2所示，图2-a表示传统的标量运算，可以看出在传统模型中，一条指令只

处理一组数据并得到一个结果；图2-b表示SIMD模型的运算，可以看出在此模型中，一条指令可以同时处理8组数据，并得到8组结果，实现了在硬件层面的并行计算，理论上加速比可达到8。

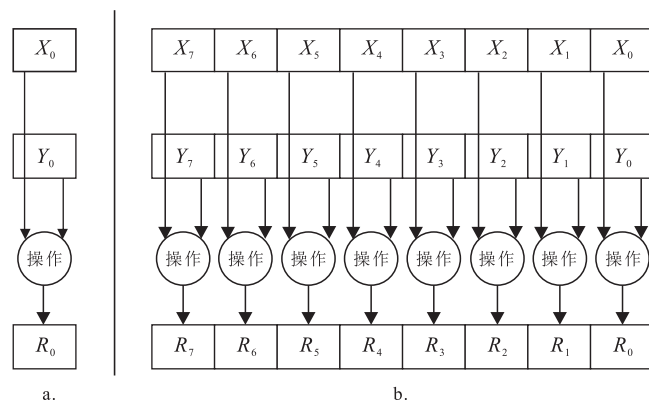


图2 SIMD 模型示意图

值得注意的是，SIMD模型是基于CPU内部的寄存器实现的，而寄存器是CPU运行的基本单元，因此该模型实现的并行并不需要像系统多线程或MPI多进程模型中需要数据共享与同步操作。同时，由于该模型无需数据共享与同步，且无需多线程或多进程提供技术支撑，只需要像串行程序一样进行编程即可。其使用方式是通过直接调用CPU提供的SIMD指令来实现数据并行计算。需要注意的是，由于其计算单元为寄存器，需要数据在内存中是连续的，因此仿真程序架构中，需要以数组的形式来组织管道数据，保证每根管道所有离散节点的数据是连续的。

3.2 状态方程轻量化算法

掺氢天然气物性通过状态方程来计算，而所有物性均可通过对其基本形式的求导或积分得到，因此本节从原始BWRS状态方程的计算出发，提出轻量化算法，其他物性则可通过调用此算法来实现。观察BWRS状态方程式(1)并结合第2节耗时原因分析可知，此方程中的耗时计算包括幂运算(密度与温度的 n 次方)、指数运算以及除法运算。下面通过SIMD模型给出通过BWRS方程计算压力的轻量化算法。

从SIMD模型可以看出，其加速的原因是可以同时对多个数据进行运算，需要基础数据在内存中是连续的，因此在管网仿真程序中，需要将所有物性存储在一个数组中。考虑到管网结构不固定，权衡复杂性与计算性能，本文提出以管道为单位，将

所有物性存储在数组中, 即每根管道的物性存储在对应的数组中。

算法 1 给出了通过 BWRS 状态方程计算压力的轻量化算法:

1) 将 BWRS 方程中的指数进行运算, 并将结果存储到返回值压力数组中。

2) 通过 SIMD 模型计算 $\exp(-\gamma\rho^2)$ 并存储到返回值压力数组中。

3) 提前计算出状态方程中的密度次幂以及温度次幂的倒数, 注意禁止使用库函数 pow。

4) 基于以上结果计算压力, 并将结果存储到返回值压力数组中。

从算法 1 可以看出, 该算法首先通过复用压力数组来减少内存访问, 其次通过 SIMD 模型一次性计算 8 个指数运算; 随后利用手动计算次幂取代库函数调用并在计算次幂前将除法转换为乘法, 从而提高计算效率。与传统基于多线程的并行计算不同, 在同时计算 8 个指数运算时并没有任何数据同步、线程等待等操作, 因此其加速效果仅与算法本身相关, 与操作系统的资源调度无关。

算法 1 的具体表示如下:

算法 1: BWRS 压力轻量化算

输入: 温度数组 T , 密度数组 ρ , 维度 len

输出: 压力数组 p

```

1 for i=1 to len do
2    $p_i \leftarrow -\gamma\rho^2$ ;
3   for i=1 to len, i+=8 do
4     var vx=SIMD_load( $p_i$ ); // 将数组中的数据加载到并行硬件中
5     var vexp=SIMD_exp(vx); // 并行计算指数运算
6     SIMD_store( $p_i$ , vexp); // 将计算结果从硬件存储到数组中
7   for i=1 to len do
8      $\rho^2 \leftarrow \rho \times \rho$ ;  $\rho^3 \leftarrow \rho^2 \times \rho$ ;  $\rho^6 \leftarrow \rho^3 \times \rho^3$ ; // 禁止使用库函数 pow
9      $iT \leftarrow 1/T$ ;  $(iT)^2 \leftarrow (iT) \times (iT)$ ;  $(iT)^3 \leftarrow (iT)^2 \times (iT)$ ;  $(iT)^4 \leftarrow (iT)^3 \times (iT)$ ; // 禁止使用库函数 pow
10    var tmp $\leftarrow \rho RT + (B0T - A0 - C0iT^2 + D0iT^3 - E0iT^4)\rho^2$ ;
11    tmp $\leftarrow tmp + (bT - a - diT)\rho^3$ ;
12    tmp $\leftarrow tmp + a(a + diT)\rho^6$ ;
13    tmp $\leftarrow tmp + c\rho^3 iT^2 (1 + \gamma\rho^2)p_i$ ;
14     $p_i \leftarrow tmp$ ;
```

3.3 黏度轻量化算法

掺氢天然气的黏度通过式 (2) 计算, 通过观察

发现其耗时计算包括次幂运算 (密度与温度的 n 次方)、指数运算。根据 SIMD 模型, 将管网中所有黏度以管道为单位进行组织, 并以此数据结构进行计算。

算法 2 给出了掺氢天然气黏度的轻量化算法:

1) 计算式 (2) 中的次幂 y 并存储到返回值黏度数组中。

2) 通过 SIMD 模型计算 $\text{pow}(\rho/1\,000, y)$ 并存储到返回值黏度数组中。

3) 计算式 (2) 中的参数 x 并与第二步的结果相乘, 存储到返回值黏度数组中。

4) 通过 SIMD 模型计算 $\exp\left[x\left(\frac{\rho}{1\,000}\right)^y\right]$ 并存储到返回值黏度数组中。

5) 计算剩余参数与运算得到最终结果。此步需要注意的是对于参数 C 中的 $T^{1.5}$, 不能使用库函数 pow 来计算, 而是采用 $T_i\sqrt{T_i}$ 的方式来计算。这是因为开方运算比幂运算效率高, 速度甚至能快几倍。

从算法 2 可以看出, 该算法仍然采用数组复用的方式来减少内存访问, 再结合 SIMD 来提升次幂运算与指数运算效率。此外还根据方程特点, 为避免采用传统方法计算方程中的 $T^{1.5}$, 提出了计算该项的高效算法, 进一步挖掘了计算性能。

算法 2 的具体表示如下:

算法 2: 掺氢天然气黏度轻量化算法

输入: 温度数组 T , 密度数组 ρ , 维度 len

输出: 黏度数组 μ

```

1 for i=1 to len do
2    $\mu_i \leftarrow 1.11 + 0.04(2.57 + 0.278\,1A + 1\,063.5/T_i)$ ;
3   for i=1 to len, i+=8 do
4     var vx=SIMD_load( $\mu_i$ ); // 将数组中的数据加载到并行硬件中
5     var vpow=SIMD_pow( $\rho_i$ , vx); // 并行计算次幂运算
6     SIMD_store( $\mu_i$ , vpow); // 将计算结果从硬件存储到数组中
7   for i=1 to len do
8      $\mu_i \leftarrow \mu_i (2.57 + 0.278\,1A + 1\,063.5/T_i)$ ;
9     for i=1 to len, i+=8 do
10      var vx=SIMD_load( $\mu_i$ ); // 将数组中的数据加载到并行硬件中
11      var vexp=SIMD_exp(vx); // 并行计算指数运算
12      SIMD_store( $\mu_i$ , vexp); // 将计算结果从硬件存储到数组中
13    for i=1 to len do
```


表 2 环状管网各管道长度表

管道编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
管道长度 /km	29	19	26	27	25	21	30	21	26	22	28
管道编号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
管道长度 /km	22	22	31	21	23	24	28	24	28	25	28

图 4 给出了环状管网中管道 1、10、20 在仿真结束时本文算法与 DIMENS 算法压力对比情况，可以看出两者是完全重合的，说明本文算法不会在精度方面对原有的仿真算法产生影响，由于 DIMENS 算法已由作者进行了正确性验证^[22]，本文不再对其精度进行验证与讨论。下面对其加速效果进行讨论。

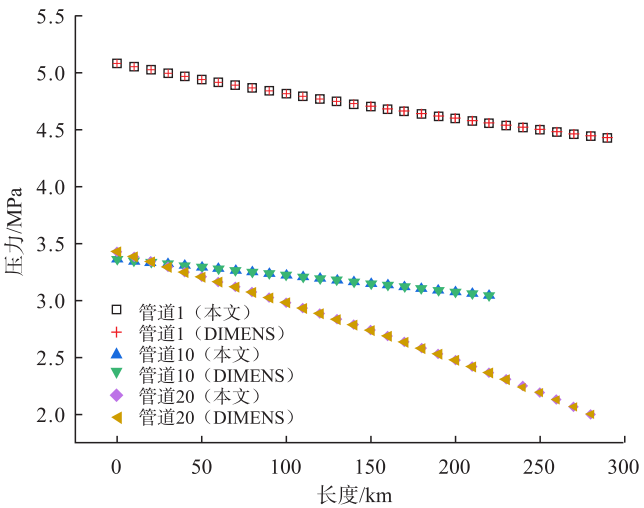


图 4 环状管网中不同管道本文算法与 DIMENS 算法压力对比图

4.2 环状管网

本节利用图 3 所示的环状管网来对比两种算法来验证本文算法的加速效果。计算机配置为：Intel(R) Xeon(R) W-2125 CPU @ 4.00GHz，RAM 16.0 GB，系统为 Windows 10 专业版，同时 DIMENS 算法的编译开启所有优化选项。以空间步长为 1 000 m，时间步长为 360 s，仿真 40 000 时步，即 4 000 h，并分别对各个模块进行耗时统计（表 3）。表 3 给出了优化前后各模块的耗时对比，可以看出所有模块都得到了不同程度的加速。首先，对于基于状态方程求解气体物性模块，加速效果显著，加速比高达 50 左右（热力计算时状态方程加速比为 49.35，水力计算时状态方程加速比为 54.85）。原因是采用了 SIMD 模型，使得 8 个数据同时运算，更重要是避免了次幂运算，在前两个优化的基础上，优化了循环结构以及除法转换为乘法的操作，进一步提升了计算效率，使得

最终的加速比超过了 50。同时可以看出，次幂运算是一个非常耗时的运算，原因是次幂运算并不能直接计算得到，需要将其转换为指数与对数运算，分别计算后再组合，即 $x^y=e^{y\lg x}$ ，因此一次次幂运算需要计算一次指数运算和一次对数运算，使得次幂运算成为所有常见运算中最耗时的运算。这也是本文强调将所有整数次幂运算调整为连乘运算而非调用 pow 库函数，以及将 1.5 次幂调整为与开方运算乘积的原因。此外，水力求解中的边界求解与回代模块中，包含有一个物性的更新，因此其加速比同样可观。

表 3 环状管网求解器各模块耗时优化前后对比表

模块	优化前耗时 / ms		优化后耗时 / ms		加速比	
	热力	水力	热力	水力	热力	水力
状态方程求解	35 778	29 399	725	536	49.35	54.85
边界求解与回代	132	6 537	146	385	0.90	16.98
摩阻求解	2 013	2 074	985	917	2.04	2.26
黏度求解		1 547		237		6.53
管道预求解	533	1 431	607	719	0.88	1.99
总耗时	79 444		5 257		15.11	

其次，可以看出黏度的加速比为 6.53，其没有达到如同状态方程求解物性的 49.35 以上原因是黏度计算本身并没有太多的次幂运算、多层循环嵌套以及除法运算。从算法 1、2 对比可以看到，黏度轻量化算法中仅对指数运算与次幂运算做了 SIMD 模型的优化，而状态方程轻量化算法中针对次幂优化方案不再是调用库函数，这是因为状态方程中的次幂运算是整数次，再结合数组复用、循环优化以及除法优化，使得速度加速比超过了 SIMD 模型的理论值。可以看出，虽然非四则运算的计算效率低下是影响整体计算效率的主要因素，但是由于计算机硬件本身只能够计算加法运算，再结合内存分配等因素，除法运算与循环顺序对整体计算效率也有较为明显的影响，需要根据具体问题分析与优化相应的程序。

再次，可以看出摩阻的加速比为 2.26 左右，其没有达到理论的 8.00 或以上的原因是从算法流程可

以看出，一方面该模块需要迭代求解，从而需要多次重复的数据读取与函数调用；另一方面该模块仅在部分计算中引入了 SIMD 模型。综合以上两个原因，导致最终加速比为 2。

最后，其他模块由于统计时间的误差，出现加速比不是 1.00 的情况，由于这几个模块对应的程序未做任何改动，因此其多次运行的平均加速比为 1.00。综合所有计算模块，优化后仿真程序的整体加速比为 15.11，使得原本需要 1 分钟多的仿真耗时缩减到仅需 5 秒多便可完成所有仿真，大大节约了仿真耗时，同时说明本文提出的算法对于掺氢天然气管网的动态仿真具有显著的加速效果，能够为实际生成节约时间与成本。

4.3 分支管网

为进一步验证算法的通用性，本节利用分支管

网（图 5）算例对比两种算法来验证本文算法的加速效果。该管网总长 688 km，包含 29 个节点、28 条管道、5 个源点以及 12 个汇点，分支管网中各管道长度见表 4，气体组成同环状管网。同上一节，空间步长取 1 000 m，时间步长取 360 s，仿真 50 000 时步，即 5 000 h，并分别对各个模块进行耗时统计。

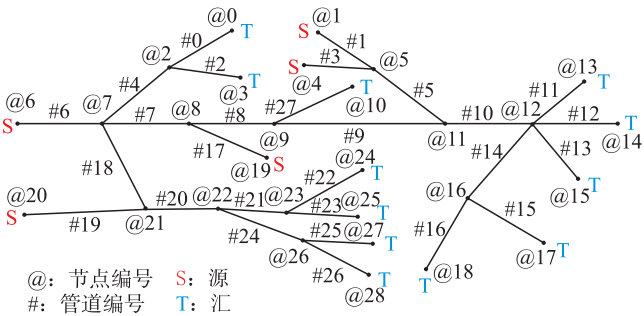


图 5 分支管网拓扑结构图

表 4 分支管网各管道长度表

管道编号	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
管道长度 /km	28	22	26	21	24	29	22	24	20	27	27	27	20	24
管道编号	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
管道长度 /km	22	23	20	21	28	26	29	27	24	23	28	29	21	26

表 5 给出了优化前后各模块的耗时对比，可以看出与环状管网相同，各模块均得到了不同程度的加速。整体加速比为 14.79，略低于环状管网，考虑到统计误差以及 CPU 状态的动态变化，可以认为整体加速比为 15.00，与环状管网加速效果持平。在基于状态方程求解气体物性方面，同时保持了很高的加速比，也说明了本文算法具有很好的通用性。此外，也可以看出对于不同规模不同连接关系的管网，在仿真不同时长时，本文算法对于网络步长为 1 000 m 的管网流动数值仿真具有基本稳定的加速比，为 15.00。

表 5 分支管网求解器各模块耗时优化前后对比表

模块	优化前耗时 / ms		优化后耗时 / ms		加速比	
	热力	水力	热力	水力	热力	水力
状态方程求解	56 677	46 619	1 222	892	46.38	52.26
边界求解与回代	225	10 597	244	577	0.92	18.37
摩阻求解	3 253	3 177	1 601	1 566	2.03	2.03
黏度求解		2 602		399		6.52
管道预求解	864	2 353	905	1 136	0.95	2.07
总耗时	126 367		8 542		14.79	

而在物性计算方面，其加速比可达 46.38 以上，同时对黏度计算以及管道预求解模块也具有明显的加速效果，黏度加速比为 6.52、摩阻加速比为 2.03、管道预求解加速比为 2.07。

4.4 高精度仿真

由于空间步长为 1 000 m，具有一定的误差，因此下面以空间步长为 100 m，时间步长为 360 s，仿真 40 000 时步，即 4 000 h，来研究本文算法的加速效果。表 6 给出了求解环状管网时各模块耗时对比。从整体看，虽然计算量增加了 10 倍，但是加速

表 6 环状管网求解器各模块耗时优化前后对比表

模块	优化前耗时 / ms		优化后耗时 / ms		加速比	
	热力	水力	热力	水力	热力	水力
状态方程求解	351 217	287 613	5 382	3 975	65.26	72.36
边界求解与回代	565	63 886	395	2 133	1.43	29.95
摩阻求解	19 656	19 503	8 162	8 250	2.41	2.36
黏度求解		15 486		1 270		12.19
管道预求解	6 056	13 952	6 502	6 048	0.93	2.31
总耗时	777 934		42 117		18.47	

比仍然保持在 15.00 以上, 并略微有所提升, 达到了 18.47, 将原本耗时 13 min 的仿真提升到仅需 42 s。对比发现, 其加速效果提升的主要原因是基于状态方程求解气体物性模块在此算例下, 进一步得到了加速, 其加速比为 65.26。由于本文在 SIMD 模型的基础上, 结合次幂运算的特点来针对性提出了加速算法, 因此在计算量增加的情况下, 不仅能够充分展现 SIMD 同时处理 8 个数据的优势, 且由于数据的连续, 还能够充分展现 CPU 内存的缓存机制优势, 从而使得加速比进一步提升。此外, 对于黏度的加速效果超过了 SIMD 模型理论的 8 倍, 加速比达到了 12.19。同时从提升 10 倍以上的效果看, 若进一步加大计算量, 其加速效果将进一步提升, 但是考虑到 CPU 性能极限, 其加速比提升效果将基本稳定。

下面考察本文算法对分支管网的适用性以及加速效果。表 7 给出了网格分辨率为 100 m, 仿真时长为 5 000 h, 求解器各仿真耗时对比情况。与环状管网结果对比可以看出, 其所有模块的加速效果基本持平, 热物性的加速比为 63.51, 在水力模块计算时, 其加速比达到了 72.01, 说明本算法对于此模块的加速效果具有极大的提升, 同时对于黏度计算与摩阻计算也有不同程度的提升。而整体加速比为 18.44, 从而使得原本耗时 20 min 的仿真提升到仅需约 1 min。

表 7 分支管网求解器各模块耗时优化前后对比表

模块	优化前耗时 / ms		优化后耗时 / ms		加速比	
	热力	水力	热力	水力	热力	水力
状态方程求解	543 496	445 072	8 557	6 181	63.51	72.01
边界求解与回代	812	98 801	665	3 280	1.22	30.12
摩阻求解	29 876	30 078	11 679	12 654	2.56	2.38
黏度求解		23 736		2 018		11.76
管道预求解	9 176	21 945	10 568	9 620	0.87	2.28
总耗时	1 202 992		65 222		18.44	

5 结 论

本文针对管网流动数值仿真算法提升计算效率方案中缺少针对封闭关系与状态方程的优化, 分析了目前优化方案各模块的耗时情况, 发现仿真程序中耗时模块为封闭关系与状态方程求解。在此基础上, 结合计算机库函数的缺点以及现代 CPU 中 SIMD 模型的特点, 提出了针对封闭关系与状态方程的轻量化算法, 通过算例验证得到如下结论:

1) 造成封闭关系与状态方程求解效率低下的原因是其模型中的次幂运算、指数运算、对数运算以及除法运算。

2) 提出的轻量化算法掺氢天然气管网的仿真效率提升明显, 在低分辨率与高分辨率仿真中的加速比分别为 15.11 与 18.47。而对于气体状态方程的加速效果显著, 在低分辨率与高分辨率仿真中的加速比分别为 46.38 和 63.51 以上, 最高可达 72.01。

参 考 文 献

[1] 王鹏, 童睿康, 蒋若兰, 等. 天然气管道瞬态仿真研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(17): 6959-6970.
WANG Peng, TONG Ruikang, JIANG Ruolan, et al. Review on transient simulation of natural gas pipeline[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(17): 6959-6970.

[2] 辛艳萍. 中国油气管道技术现状与发展趋势分析 [J]. 天然气与石油, 2020, 38(2): 26-31.
XIN Yanping. Current situation and development trend of oil and gas pipeline technology in China[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(2): 26-31.

[3] 仲冰, 张学秀, 张博, 等. 我国天然气掺氢产业发展研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 100-107.
ZHONG Bing, ZHANG Xuexiu, ZHANG Bo, et al. Industrial development of hydrogen blending in natural gas pipelines in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 100-107.

[4] 钱建华, 牛彻, 杜威. 管道智能化管理的发展趋势及展望 [J]. 油气储运, 2021, 40(2): 121-130.
QIAN Jianhua, NIU Che, DU Wei. Development trend and prospect of intelligent pipeline management[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(2): 121-130.

[5] 路保平. 中国石化石油工程技术新进展与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 1-10.
LU Baoping. New progress and development proposals of Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 1-10.

[6] ZHANG Xiaorui, WU Changchun, ZUO Lili. Minimizing fuel consumption of a gas pipeline in transient states by dynamic programming[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 28: 193-203.

[7] 康琦, 吴海浩, 张若晨, 等. 面向智能油田的集输管网工艺模拟软件研制 [J]. 油气储运, 2021, 40(3): 277-286.
KANG Qi, WU Haihao, ZHANG Ruochen, et al. Development of process simulation software for gathering and transportation pipeline network of intelligent oilfield[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(3): 277-286.

[8] 唐善华, 杨毅, 张麟, 等. 天然气管网智能调控初探 [J]. 油气储运, 2021, 40(9): 991-996.
TANG Shanhua, YANG Yi, ZHANG Lin, et al. Preliminary study on intelligent control of natural gas pipeline networks[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(9): 991-996.

[9] 汪春付. 压力分布在线仿真泄漏检测系统 [J]. 油气储运, 2019, 38(6): 672-677.
WANG Chunfu. Leak detection system based on pressure

- distribution on-line simulation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2019, 38(6): 672-677.
- [10] 王晓丹. 天然气管线动态模型压力分布泄漏检测技术研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- WANG Xiaodan. Research on natural gas pipeline leak detection technology based on real time model and pressure profile[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.
- [11] 冷建成, 钱万东, 周临风. 基于应力监测的油气管道安全预警试验研究[J]. 石油机械, 2021, 49(6): 139-144.
- LENG Jiancheng, QIAN Wandong, ZHOU Linfeng. Experimental study on safety warning of oil and gas pipeline based on stress monitoring[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(6): 139-144.
- [12] 徐阳, 罗明璋, 杜国锋. 基于超声导波的管道缺陷监测及径向损伤评估[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 142-151.
- XU Yang, LUO Mingzhang, DU Guofeng. Defect monitoring and radial damage evaluation of pipeline based on ultrasonic guided wave[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 142-151.
- [13] 李晓龙, 陈金忠, 马义来, 等. 油气管道复合变形内检测技术研究[J]. 石油机械, 2021, 49(8): 152-158.
- LI Xiaolong, CHEN Jinzhong, MA Yilai, et al. A composite in-line detection technology for oil and gas pipeline deformation[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(8): 152-158.
- [14] 唐胜雨, 哈丽旦木·托呼提买提, 张鹏, 等. 基于信息熵隶属度的油田集输管道风险评价方法[J]. 油气储运, 2021, 40(7): 761-767.
- TANG Shengyu, TUOHUTIMAITI Halidanmu, ZHANG Peng, et al. Risk assessment method of oilfield gathering pipelines based on membership of information entropy[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(7): 761-767.
- [15] 孙文祥, 汪坤, 朱海. 高压天然气储运管道泄漏定量风险评估研究[J]. 非常规油气, 2022, 9(2): 132-139.
- SUN Wenxiang, WANG Kun, ZHU Hai. The study on quantitative risk assessment of high pressure natural gas storage and transportation pipelines leakage[J]. Unconventional Oil & Gas, 2022, 9(2): 132-139.
- [16] FAN Di, GONG Jing, ZHANG Shengnan, et al. A transient composition tracking method for natural gas pipe networks[J]. Energy, 2021, 215(Part A): 119131.
- [17] CHACZYKOWSKI M, SUND F, ZARODKIEWICZ P, et al. Gas composition tracking in transient pipeline flow[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 55: 321-330.
- [18] 王寿喜, 邓传忠, 陈传胜, 等. 天然气管网在线仿真理论与实践[J]. 油气储运, 2022, 41(3): 241-255.
- WANG Shouxi, DENG Chuansheng, CHEN Chuansheng, et al. Online simulation of natural gas pipeline networks: Theories and practices[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(3): 241-255.
- [19] 郭乔, 谢文昊, 聂子豪, 等. 基于断裂降维算法的天然气管网瞬态仿真新方法[J]. 天然气工业, 2023, 43(5): 78-87.
- GUO Qiao, XIE Wenhao, NIE Zihao, et al. A new method for transient simulation of natural gas pipeline networks based on fracture-dimension-reduction algorithm[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(5): 78-87.
- [20] OSIADACZ A. Optimal numerical method for simulating dynamic flow of gas in pipelines[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1983, 3(2): 125-135.
- [21] HELGAKER J F, YTREHUS T. Coupling between continuity/ momentum and energy equation in 1D gas flow[J]. Energy Procedia, 2012, 26: 82-89.
- [22] 王鹏. 复杂天然气管网快速准确稳健仿真方法研究及应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016.
- WANG Peng. Study on the fast, accurate and robust simulation method for a complex natural gas pipeline network and its application[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2016.
- [23] WANG Peng, YU Bo, HAN Dongxu, et al. Adaptive implicit finite difference method for natural gas pipeline transient flow[J]. Oil & Gas Science and Technology-Revue IFP Energies Nouvelles, 2018, 73: 21.
- [24] 谢黛茜, 梅大成, 丁鹏. 基于并行计算的天然气管网动态模型算法[J]. 计算机应用, 2016, 36(增刊2): 44-48.
- XIE Daixi, MEI Dacheng, DING Peng. Natural gas dynamic simulation algorithm based on parallel computing[J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(S2): 44-48.
- [25] 谢黛茜. 基于并行计算的天然气管网动态模型算法研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- XIE Daixi. Research on dynamic model algorithm of natural gas pipeline based on parallel computation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [26] XIANG Yue, WANG Peng, YU Bo, et al. GPU-accelerated hydraulic simulations of large-scale natural gas pipeline networks based on a two-level parallel process[J]. Oil & Gas Science and Technology-Revue IFP Energies Nouvelles, 2020, 75: 86.
- [27] 向月. 基于CPU+GPU异构计算的天然气管网瞬态仿真方法及其应用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- XIANG Yue. Study on transient simulation of gas pipeline network and its application based on CPU+GPU heterogeneous computing[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.
- [28] 宇波, 王鹏, 王丽燕, 等. 基于分而治之思想的天然气管网仿真方法[J]. 油气储运, 2017, 36(1): 75-84.
- YU Bo, WANG Peng, WANG Liyan, et al. A simulation method for natural gas pipeline networks based on the divide-and-conquer concept[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2017, 36(1): 75-84.
- [29] 吴玉国, 陈保东. BWRS方程在天然气物性计算中的应用[J]. 油气储运, 2003, 22(10): 16-21.
- WU Yuguo, CHEN Baodong. The application of BWRS equation in calculating the thermo-physical properties of natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(10): 16-21.
- [30] 李志斌, 居晓波, 朱文, 等. 与结构算术逻辑单元的优化设计[J]. 固体电子学研究进展, 2003, 23(1): 79-82.
- LI Zhibin, JU Xiaobo, ZHU Wen, et al. Architecture optimization of and-or ALU[J]. Research & Progress of SSE, 2003, 23(1): 79-82.
- [31] 王铖. 一些C库函数的实现[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
- WANG Cheng. Some function implementations of C library[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
- [32] AMIRI H, SHAHBAHRAMI A. SIMD programming using Intel vector extensions[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2020, 135: 83-100.

