

一维粗糙管道非定常摩擦模型在高速列车隧道压缩波传播中的应用

毛 剑

兰州交通大学机电工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年3月20日

摘 要

当列车高速驶入隧道时会引发强烈的非定常流动现象, 列车进入隧道产生的初始压缩波在隧道内传播的过程类似于活塞在管道中的运动, 产生的压缩波在隧道中的传播为非定常流动, 本文以不同非定常摩擦模型研究了非定常流动时空气与管道壁面的摩擦, 其中包括只存在定常摩擦力的定常摩擦效应和只存在非定常摩擦力的非定常摩擦效应, 对比不同文献中的非定常摩擦模型, 并根据隧道中的非定常摩擦现象确定压缩波传播过程中的摩擦参数。研究表明, 定常摩擦系数越大, 衰减效应越明显, 并且对初始压缩波最大压力梯度越大的波形衰减越明显, 非定常摩擦因子越大, 传播过程带来的衰减效应越明显, 也更能反映长距离传播积累的壁面瞬态摩擦力, 模拟德国Eurwang隧道时, 取定常摩擦系数0.015, 非定常摩擦因子0.1, 可以更好地模拟隧道壁面带来的衰减效应, 并与实测数据对比得到了验证。该研究从隧道内空气与隧道壁面的定常与非定常流动研究得出了适用于高速列车进入隧道的压缩波传播摩擦模型, 提高了压缩波传播程序的精度和正确性。

关键词

粗糙管道, 非定常摩擦, 压缩波传播

Application of One-Dimensional Rough Pipe Unsteady Friction Model to Compression Wave Propagation in High-Speed Train Tunnel

Jian Mao

School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Mar. 20th, 2025

Abstract

When a train enters a tunnel at a high speed, it will cause strong unsteady flow phenomenon. The initial compression wave generated by the train entering the tunnel will propagate in the tunnel in a process similar to the movement of a piston in a pipeline, and the generated compression wave will propagate in the tunnel as unsteady flow. In this paper, different unsteady friction models are used to study the friction between air and the wall of the pipeline during unsteady flow. It includes the steady friction effect with only steady friction and the unsteady friction effect with only unsteady friction. The unsteady friction models in different literatures are compared, and the friction parameters in the process of compression wave propagation are determined according to the unsteady friction phenomena in the tunnel. The research shows that the larger the constant friction coefficient is, the more obvious the attenuation effect will be. In addition, the larger the maximum pressure gradient of the initial compression wave is, the more obvious the attenuation effect caused by the propagation process will be, and the more obvious the attenuation effect will be, which can better reflect the resulting wall friction accumulated by long-distance propagation. When simulating the Eurwang tunnel in Germany, the steady friction coefficient of 0.015 and the unsteady friction factor of 0.1 can better simulate the attenuation effect caused by the tunnel wall, and the comparison with the measured data is verified. Based on the study of the steady and unsteady flow of air and tunnel wall, the friction model of compression wave propagation for high-speed train entering tunnel is obtained, which improves the accuracy and correctness of the compression wave propagation program.

Keywords

Rough Pipe, Unsteady Friction, Compression Wave Propagation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当高速列车进入隧道时,车头前方空气被压缩,形成初始压缩波在隧道内以音速向前传播,并在隧道出口处向外辐射微气压波,并且对周边环境造成噪声污染甚至结构破坏。压缩波波形会随着传播距离的增加而演化,微气压波的振幅取决于压缩波在隧道内波形的演变以及达到隧道出口处的压缩波压力梯度。因此,压缩波传播过程中的演化是预测和控制微气压波问题的关键[1]。对于压缩波在隧道内长距离传播,通常采用一维特征线法对传播过程进行预测,并且假设壁面摩擦效应为准稳态模型,但压缩波快速瞬态特性会导致壁面摩擦力呈现非正常性,诱导壁面边界层发展,在长距离传播后,非正常摩擦带来的误差会很明显[2],忽略非正常摩擦效应会低估压缩波的衰减速率,进而影响微气压波强度的预测精度,以往的研究常常将隧道看作光滑壁面,忽略了壁面粗糙度对非正常摩擦模型的影响,并且粗糙管道中的流动瞬态响应需结合壁面粗糙度与流体惯性力的耦合效应,用加权函数考虑粗糙管道中的非正常摩擦效应[3]。

1968年 Zielke [4]导出了瞬态层流管内壁面剪切应力与瞬时平均速度和加权历史速度变化的关系式。适用于计算粘性流体中水锤现象的特征方法,用特征线法建立了瞬态流动的一维模型,并得到了粘度随频率变化的响应曲线,能较好地预测波传播过程中和频率相关的摩擦力。

1995年 Vardy [5]建立了光滑管内流动瞬态摩擦的加权函数模型,假定湍流粘度在管道核心周围的厚边界层内呈线性变化,从而使其适用于高雷诺数流动,对管道中的历史流动参数信息加权函数进行了近似,预测的结果接近实验结果。

2002年 Mohamed [6]推导了 Vardy-Brown 非定常摩擦方程的一个精确、简单、有效的近似,并将该近似应用在非定常管道流动的一维特征解中,模拟瞬态湍流管道流动中的剪切应力,并用特征线法求解得到水锤方程。提高了计算效率,降低了计算时的内存存储。

2004年 Vardy [3]利用理想径向粘度分布,推导了一维管道中完全粗糙壁面流动的非定常表面摩擦的加权函数模型,假设在足够短的瞬态过程,截面上的粘度分布是恒定的,外环内的涡流粘度假设为线性变化,得到了完全粗糙管道内流动非定常摩擦瞬态加速度的计算模型。

2017年 Duan [7]探讨了非定常摩擦项的相关性,分别比较了基于加权函数的模型和基于瞬态加速度的模型,通过实验研究和一维,二维数值模拟,用实验数据标定了非定常摩擦模型中的参数,并验证了各个模型所适用的领域和局限性。对于具有高频波动特性的管道瞬态流动,必须考虑非定常摩擦模型和湍流模型。

2021年 Iyer [8]提出对于隧道压缩波传播的准确预测取决于隧道壁面摩擦的模拟能力,隧道壁面的摩擦损失是准稳态分量和非稳态分量的总和,并且通过实验测量证明,在接近压缩波和壁面处的表面摩擦非定常效应对传播过程有较大影响,特别是表面切应力在隧道空间内的分布影响压缩波的传播速度和波形的衰减变形。在隧道压缩波传播的情况下,不考虑壁面粗糙度和非定常摩擦带来的影响,会使得理论预测的压缩波波形和实验测量的数据有严重的偏差,并且随着传播距离的增加,误差积累得严重。对于粗糙壁面,建立引入粗糙度的加权函数和非定常摩擦因子进行求解,只考虑瞬态流动前的流动参量,而不是所有的历史流动参量,减少了大量的计算量和计算时间。

本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型对压缩波传播过程进行计算,对比分析不同管道摩擦模型在高速列车隧道压缩波传播中应用的准确性,并和德国 Eurwang 隧道实测数据[9]进行对比分析,并考虑不同的隧道壁面粗糙度和不同的非定常摩擦因子下摩擦模型的准确性,为后续高速列车预测压缩波在隧道中传播提供非定常摩擦模型,提高计算精度。

2. 数学物理模型及数值计算方法

2.1. 一维流动基本方程

初始压缩波经过的地方会引起空气压力、流速等参数的变化。由于隧道长度远大于隧道水力直径,压缩波沿整个隧道长度的传播时间也远大于在横截面上的传播时间。且压缩波的传播过程还受到隧道壁面摩擦等耗散因素的影响。因此可将初始压缩波在隧道内传播所引起的空气流动简化为一维可压缩不等熵非定常流动[10]。将空气与隧道壁面的摩擦和传热引入到动量方程和能量方程中,利用质量、动量和能量守恒定律,推导出压缩波传播过程的控制方程,其具体为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{u}{F} \frac{dF}{dx} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G(u) = 0 \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + u \frac{\partial p}{\partial x} - a^2 \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = \rho(\kappa - 1)(q + uG(u)) \quad (3)$$

式中, F 为隧道净空面积, ρ 为空气密度, u 为气流速度, a 为声速, κ 为比热容比, p 为压力。 q 为传热项, $G(u)$ 为摩擦项。

2.2. 壁面摩擦模型

2.2.1. 定常摩擦模型

定常摩擦模型采用 Darcy-Weisbach 方程导出的压力损失形式, 在隧道压缩波传播模型中, 考虑可压缩流动的情况下, 重力对流动的影响可忽略不计, 因此忽略定常摩擦模型中的 $1/g$ 项。则本文的定常摩擦模型为:

$$G_s = \frac{\lambda}{2D} u |u| \quad (4)$$

其中, λ 为达西摩擦系数, u 为隧道内空气流速, D 为隧道当量直径。

2.2.2. 非定常摩擦模型

当流体在管道或隧道中流动为瞬态流动时, 即流体速度快速变化, 会导致壁面摩擦力的显著波动, 与定常摩擦不同, 非定常摩擦模型与非定常流动的雷诺数有关。定常摩擦理论根据隧道截面的平均流速和平均加速度来计算壁面带来的表面切应力, 与实际隧道中压缩波传播引起的瞬变流动不同, 近壁区的边界层内的切应力不能用平均切应力来表示, 因此会对传播过程中的压力梯度计算带来很大误差, 因此为了准确预测压缩波传播过程的流动情况, 需要同时考虑定常和非定常摩擦项。本文选取两种不同的非定常摩擦模型进行对比, 并分析哪种摩擦模型适用于预测初始压缩波在隧道中传播过程的衰减效应。

2002 年 Mohamed 等人[6]在 Vardy-Brown 光滑管道非定常摩擦模型的基础上, 推导了一个近似的, 更为简单有效的加权函数, 只需要存储单个时间步长下的流动变量, 极大地减小了运算时的内存占用和计算时间, 采用的壁面切应力为:

$$\tau = \frac{4\mu}{D} \int_0^t W(t-t') \frac{\partial u}{\partial t'} dt' \quad (5)$$

式中, μ 为空气的动力黏度系数, D 为隧道当量直径, u 为当前时刻气体流速, $W(t-t')$ 为历史时刻流动参量的加权函数, 定义为:

$$w(t) = \frac{\alpha e^{-\beta t}}{\sqrt{\pi t}} \quad (6)$$

式中各参数定义为:

$$\alpha = \frac{D}{4\sqrt{\nu}}; \beta = \frac{0.54\nu \text{Re}^\kappa}{D^2}; \kappa = \log_{10} \left(\frac{14.3}{\text{Re}^{0.05}} \right) \quad (7)$$

式中 ν 为空气的运动黏度系数, D 为隧道当量直径, Re 为隧道内气流的雷诺数。

动量方程中的非定常摩擦项与壁面切应力的关系为:

$$G_{us} = \frac{4\tau}{\rho D} \quad (8)$$

2021 年 Iyer 等人采用的非定常摩擦模型用非定常摩擦因子进行了代替, 表示为:

$$G_{us} = \varepsilon_{us} \int_0^t W(t) \frac{\partial u}{\partial t} dt \tag{9}$$

式中, ε_{us} 为非定常摩擦因子, $W(t)$ 为历史时刻流动参量的加权函数, 定义为:

$$w(t) = \frac{e^{-B\psi}}{2\sqrt{\pi\psi}} \tag{10}$$

式中各参数定义为:

$$B = \frac{Re^\kappa}{12.86}; \kappa = \log_{10} \left(\frac{15.29}{Re^{0.0567}} \right); \psi = \frac{4\nu\theta}{D^2}; \theta = t - t' \tag{11}$$

式中 ν 为空气的运动黏度系数, D 为隧道当量直径, Re 为隧道内气流的雷诺数。

2.3. 数值计算方法

本文采用一维可压缩非定常不等熵流动模型, 并用特征线法对控制方程进行求解, 使得其转化为方便计算的常微分方程组, 特征线法分为正步进特征线法和逆步进特征线法, 本文采用改进的逆步进特征线法对网格进行计算, 采用修正的迭代算法确定特征线在网格中的插值点位置, 插值点和网格的相对位置如图 1 所示。

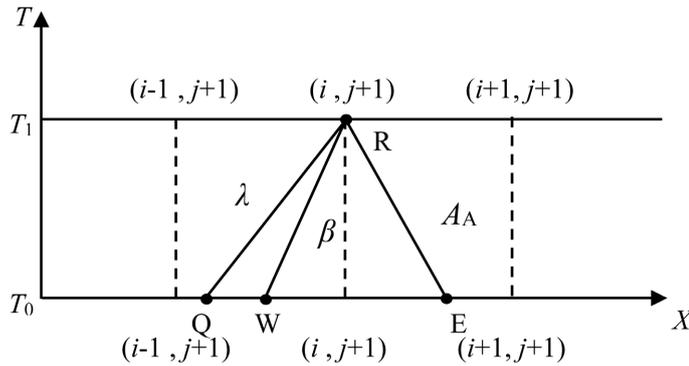


Figure 1. Discrete grids and interpolation points
图 1. 离散网格和插值点

针对控制方程中的定常和非定常摩擦项进行数值计算, 可将非定常摩擦模型中的积分项转变为用网格点表示的离散求解公式, Mohamed 文献采用的非定常摩擦模型离散公式第 $n + 1$ 步的切应力 τ_u^{n+1} 可用第 n 步的切应力 τ_u^n 计算得到, 离散公式为:

$$\tau_u^{n+1} = \frac{\rho\sqrt{\nu}}{\Delta t\sqrt{\beta}} \operatorname{erf}\sqrt{\beta\Delta t} [Q^{n+1} - Q^n] + \zeta \exp(-\beta\Delta t) \left[\sqrt{\frac{n+1}{n}} + \frac{1}{2n} \ln \frac{\sqrt{\frac{n+1}{n}} - 1}{\sqrt{\frac{n+1}{n}} + 1} \right] \tau_u^n + (1 - \zeta) \tau_u^n \tag{12}$$

Iyer 文献采用的非定常摩擦模型离散公式为各时间步保存的流动参量的代数和, $t + \Delta t$ 时刻受到的壁面非定常摩擦力表示为:

$$f_{us}(t + \Delta t) = \frac{16\nu}{D^2} \sum_{i=1}^N W(t) e^{-\frac{4n_i\nu}{D^2}} + \frac{m_i D^2}{4n_i\nu} \left(\frac{1 - e^{-\frac{4n_i\nu}{D^2}}}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial t} \right) \tag{13}$$

3. 压缩波传播摩擦模型探究

3.1. 定常摩擦模型参数探究

由定常摩擦模型公式得知,压缩波传播过程中受到的衰减效应与定常摩擦系数 λ 和空气流速 u 有关,而空气流速与初始压缩波的最大压力幅值有关。本节在只考虑定常摩擦项的情况下对比德国文献中的实测数据[9]和西班牙文献初始压缩波[11]在隧道中的传播现象,采用的初始压缩波特征参数如表1所示。

Table 1. Maximum pressure and gradients for different references

表 1. 不同文献的最大压力幅值和压力梯度

文献	$(\Delta p)_{\max}$ [Pa]	$(dp/dt)_{\max}$ [Pa/s]
[9]	1353	7218
[11]	1494	8033

分析定常摩擦模型的两个参数对传播衰减激化过程的影响,选取定常摩擦系数 0.005 和 0.015 进行对比在隧道中传播 3000 m 后的压缩波压力幅值。由图 2 可知,初始压缩波压力幅值越大,压缩波传播过程中受到的衰减现象越明显,且随着传播的距离越远,衰减越大,定常摩擦系数越大,传播过程的衰减效应越明显,因此,对于不同的隧道,可以采用不同的定常摩擦系数进行计算,根据实验数据确定合适的定常摩擦系数。

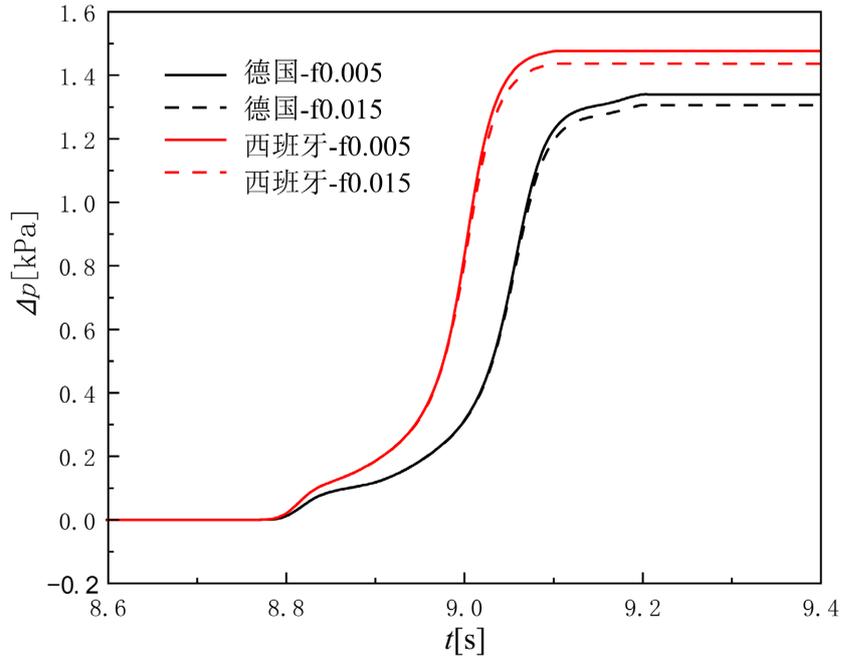


Figure 2. Comparison of parameters of steady friction model

图 2. 定常摩擦模型参数对比

3.2. 非定常摩擦模型参数探究

由非定常摩擦模型公式可知,非定常摩擦力由上一时刻流体的流动参量以及非定常摩擦因子决定,因此对比不同初始压缩波在不同非定常摩擦因子的情况下计算得到的压力幅值衰减效应,分别选取非定

常摩擦因子 ε_{us} 为 20 和 15 进行对比, 并分析同一初始压缩波在不同非定常摩擦因子下传播 5000 m 后的压力幅值变化规律, 探究其对压缩波传播过程中非定常摩擦项的影响, 并且将压缩波传播到隧道不同位置处的压力幅值与初始压缩波压力幅值的比值定义为压缩波衰减率 ξ , 表示为:

$$\xi = \frac{\Delta p_x}{\Delta p_0} \quad (16)$$

由图 3 可知, 考虑非定常摩擦因子使得压缩波传播过程的衰减现象延后了, 并且衰减效应大于只考虑定常摩擦模型的情况, 非定常摩擦因子越大, 压缩波的衰减现象越滞后, 并且衰减后的压力幅值更低, 而初始压缩波压力幅值越大的压缩波传播过程中受到非定常摩擦效应带来的衰减现象越明显。由图 4 可知, 不同非定常摩擦因子带来的衰减效应不同, 非定常摩擦因子越大, 衰减现象越明显, 并且, 传播距离越远, 衰减幅度越大, $\varepsilon_{us} = 15$ 时传播到 5000 m 处压缩波的衰减比为 0.84, $\varepsilon_{us} = 20$ 时传播到 5000 m 处压缩波的衰减比为 0.77。

3.3. 压缩波传播中的应用

根据 Mohamed 文献和 Iyer 文献的非定常摩擦模型, 对比不同非定常摩擦模型应用于高速列车隧道压缩波传播计算程序的正确性和精确性, 并且根据德国 Eurwang 隧道实测数据[9], 确定对于不同的非定常摩擦模型下的定常摩擦系数和非定常摩擦因子, 采用德国文献初始压缩波, 在传播距离为 7300 m 后的压缩波波形以及梯度进行对比, 由图 5 可知, 定常摩擦系数为 0.005 时与实测数据压力幅值的误差为 4.70%, 定常摩擦系数为 0.015 时与实测数据压力幅值的误差为 6.89%, 因此定常摩擦系数取 0.005 更适应德国 Eurwang 隧道壁面的粗糙程度, 能很好地反映出初始压缩波在隧道内的摩擦效应。当考虑 Iyer 非定常摩擦模型时, 由图 6 可知, 非定常摩擦因子 $\varepsilon_{us} = 0.5$, 定常摩擦系数 $f = 0.015$ 时, 与实测数据压力幅值的误差为 5.40%, 取 $\varepsilon_{us} = 0.1$, $f = 0.02$ 时, 误差为 3.70%, 而取 $\varepsilon_{us} = 0.1$, $f = 0.015$ 时, 误差为 0.71%, 能够很好模拟 Eurwang 隧道壁面的粗糙程度。

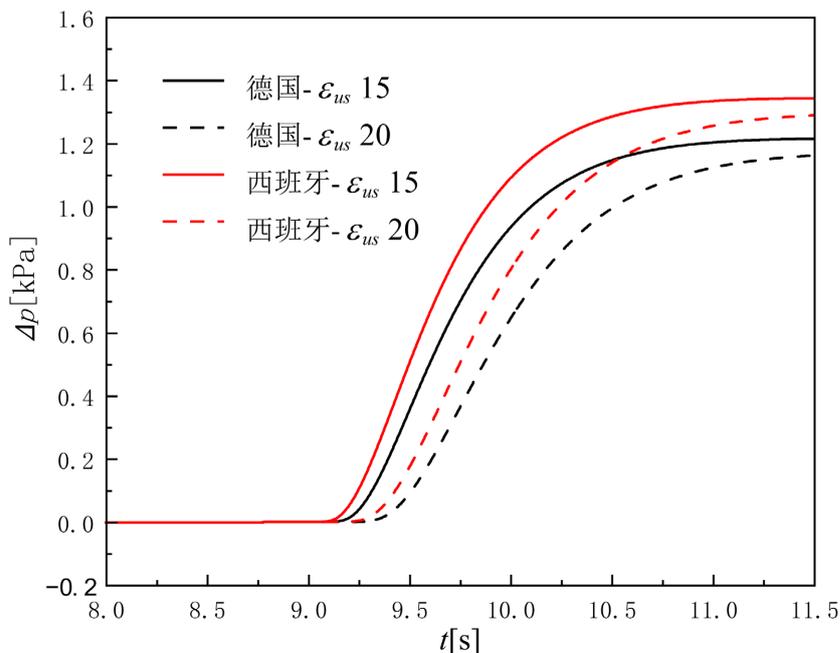


Figure 3. Comparison of unsteady friction factors
图 3. 非定常摩擦因子对比

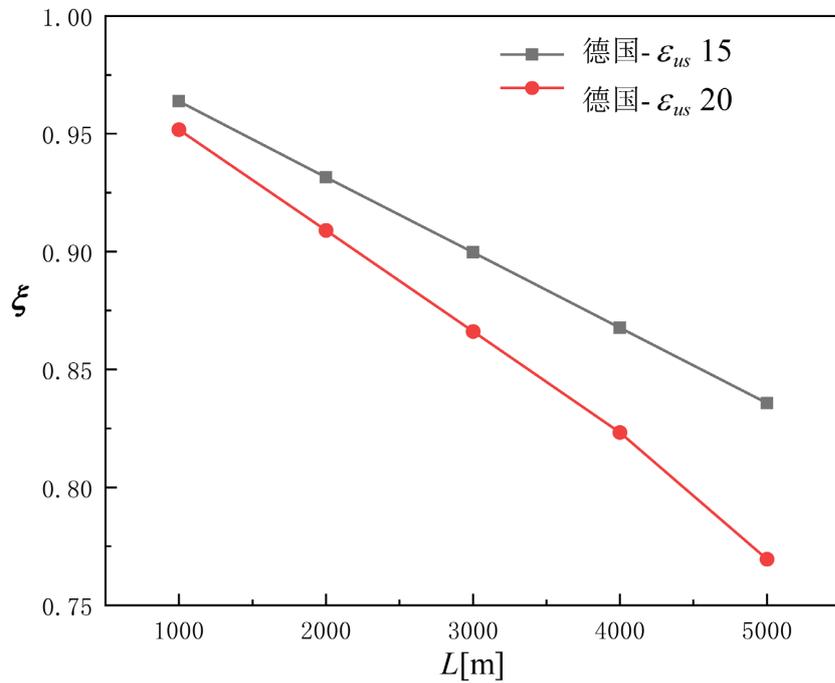


Figure 4. Comparison of unsteady friction factor attenuation ratio

图 4. 非定常摩擦因子衰减比对比

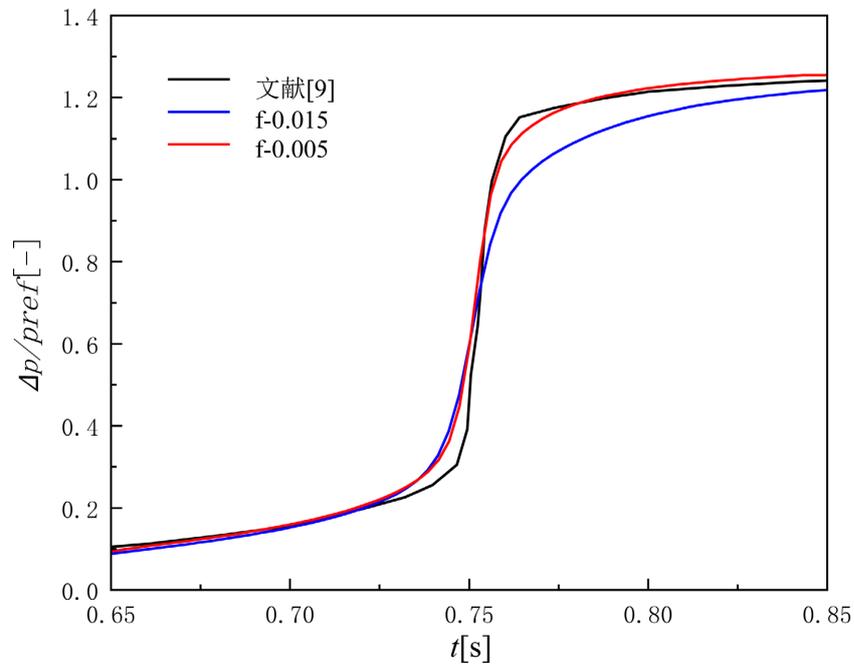


Figure 5. Mohamed parameter comparison of unsteady friction model

图 5. Mohamed 非定常摩擦模型参数对比

4. 结论

本文通过一维可压缩非定常不等熵流动模型探究了定常摩擦模型各参数对于压缩波传播过程衰减效应的影响，以及不同文献中的非定常摩擦模型各参数对于压缩波传播过程衰减效应的影响，并探究了

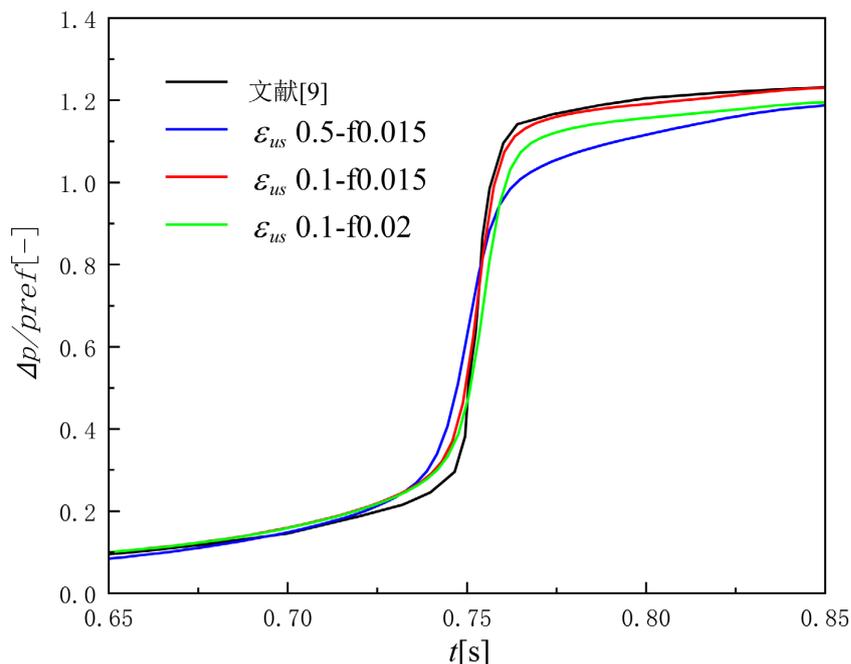


Figure 6. Iyer parameter comparison of unsteady friction model
图 6. Iyer 非定常摩擦模型参数对比

不同非定常摩擦模型在隧道压缩波传播计算程序中的应用，确定了不同摩擦模型下参数。当压缩波传播模型只考虑定常摩擦效应时，定常摩擦系数越大，传播过程中的衰减效应越明显，初始压缩波最大压力幅值越大时，传播过程受到的衰减效应也越明显；当压缩波传播模型考虑定常摩擦模型和非定常摩擦因子时，衰减效应更加明显，也能更精确地模拟传播过程中的衰减现象，非定常摩擦因子越大，传播过程的衰减现象越明显，并且对于初始压缩波最大压力幅值越大的波形衰减越明显， $\varepsilon_{us} = 15$ 时传播到 5000 m 处压缩波的衰减比为 0.84， $\varepsilon_{us} = 20$ 时传播到 5000 m 处压缩波的衰减比为 0.77；考虑 Mohamed 摩擦模型时，定常摩擦系数取 0.005 可以很好地模拟 Eurwang 隧道壁面的粗糙程度，而考虑 Iyer 非定常摩擦模型时，非定常摩擦因子取 0.1，定常摩擦系数取 0.015 可以很好地模拟 Eurwang 隧道壁面的粗糙程度，对于不同隧道，应采取不同的系数建立隧道内的摩擦模型，能够精确地预测长隧道传播下的压缩波衰减效应。

参考文献

- [1] Wang, H., Lei, B., Bi, H. and Yu, T. (2018) Wavefront Evolution of Compression Waves Propagating in High Speed Railway Tunnels. *Journal of Sound and Vibration*, **431**, 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.05.039>
- [2] Szymkiewicz, R. (2002) Developments in Unsteady Pipe Flow Friction Modelling. *Journal of Hydraulic Research*, **40**, 647-656. <https://doi.org/10.1080/00221680209499910>
- [3] Vardy, A.E. and Brown, J.M.B. (2004) Transient Turbulent Friction in Fully Rough Pipe Flows. *Journal of Sound and Vibration*, **270**, 233-257. [https://doi.org/10.1016/s0022-460x\(03\)00492-9](https://doi.org/10.1016/s0022-460x(03)00492-9)
- [4] Zielke, W. (1968) Closure to "Discussions of 'Frequency Dependent Friction in Transient Pipe Flow'" (1968, ASME J. Basic Eng., 90, pp. 413-414). *Journal of Basic Engineering*, **90**, 414-414. <https://doi.org/10.1115/1.3605129>
- [5] Vardy, A.E. and Brown, J.M.B. (1995) Transient, Turbulent, Smooth Pipe Friction. *Journal of Hydraulic Research*, **33**, 435-456. <https://doi.org/10.1080/00221689509498654>
- [6] Ghidaoui, M.S. and Mansour, S. (2002) Efficient Treatment of the Vardy-Brown Unsteady Shear in Pipe Transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, **128**, 102-112. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:1\(102\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:1(102))
- [7] Duan, H.F., Meniconi, S., Lee, P.J., Brunone, B. and Ghidaoui, M.S. (2017) Local and Integral Energy-Based Evaluation

-
- for the Unsteady Friction Relevance in Transient Pipe Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, **143**, Article 04017015 [https://doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001304](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001304)
- [8] Iyer, R.S., Kim, D.H. and Kim, H.D. (2021) Propagation Characteristics of Compression Wave in a High-Speed Railway Tunnel. *Physics of Fluids*, **33**, Article ID: 086104. <https://doi.org/10.1063/5.0054868>
- [9] Adami, S. and Kaltenbach, H.J. (2008) Sensitivity of the Wave-Steepening in Railway Tunnels with Respect to the Friction Model. *Proceedings of the 6th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*, Milano. 20-24 July 2008, 1-4.
- [10] 梅元贵. 高速铁路隧道空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 244-245.
- [11] Rivero, J.M., González-Martínez, E. and Rodríguez-Fernández, M. (2019) A Methodology for the Prediction of the Sonic Boom in Tunnels of High-Speed Trains. *Journal of Sound and Vibration*, **446**, 37-56. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.01.016>