



COMSOL
CONFERENCE
2014 SHANGHAI

扩散火焰面波纹振荡的 有限元分析

李言钦
郑州大学化工与能源学院



主要内容

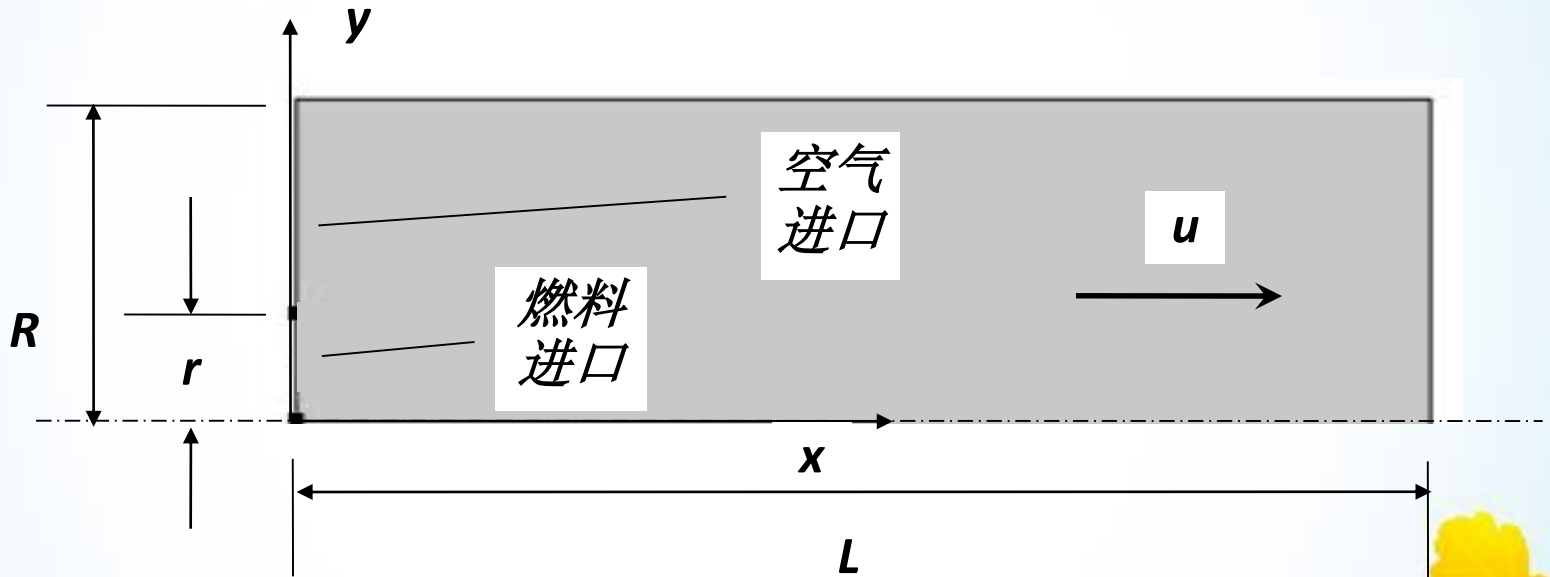
- 研究背景
- 扩散燃烧火焰面模型建立
- 数值模拟结果及讨论
 - COMSOL模拟与解析解的对比
 - 线性化近似火焰面瞬态特征分析
- 结论



研究背景

- 预混火焰：国内外有较多研究，如 Princeton 的 C.K. Law 课题组，MIT 的 Z.A. Ghoneim 课题组；国内的朱民课题组等
- 扩散火焰：Georgia Tech 的 T. Liewen 等，国内有多个团队在进行相关研究
- 目前，对于扩散火焰面的热声不稳定性规律还没有相应的研究
- 本论文采用 COMSOL 软件研究一简化扩散火焰面受流动扰动的规律

扩散燃烧场条件



外筒半径 $R = 1$ ，内筒半径 $r = 0.1$ ，体长 $L = 10$

数学模型

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla Z - \nabla \cdot (D \nabla Z) = f$$

z — 燃料的混合分数, 入口边界处 $Z = \begin{cases} 1, & r \leq R_i \\ 0, & r > R_o \end{cases}$

$$u_x = u_{x,0} + u_{x,1} = u_{x,0} (1 + \varepsilon e^{i2\pi ft})$$

f 流动扰动频率

$$Z = Z_0 + Z_1$$

ε 扰动相对
幅值

近似假设

- ◆取 $Pe \gg 1$, 而不考虑轴向扩散
- ◆左边舍去高阶小量 $u_1 \frac{\partial Z_1}{\partial x}$

线性化近似
瞬态方程

$$\frac{\partial Z_1}{\partial t} + u_{x,0} \frac{\partial Z_1}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Z_1}{\partial y^2} = -u_{x,1} \frac{\partial Z_0}{\partial x}$$

线性化解析解

- 稳态对流 - 扩散火焰面解析解

$$Z_0 = \frac{r}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin(\tau) \cos\left(\tau \frac{y}{r}\right) \exp\left(-\tau^2 \frac{x}{\text{Pe} \cdot r}\right)$$

- 存在流动扰动时瞬态火焰面扰动量线性化解析解

$$Z_1 = \left[\frac{-i\varepsilon r}{2\pi \text{St}} \right] \frac{\partial z_0}{\partial x} \left\{ 1 - \exp\left(2\pi i \text{St} \frac{x}{r}\right) \right\} \exp[-i\omega t]$$

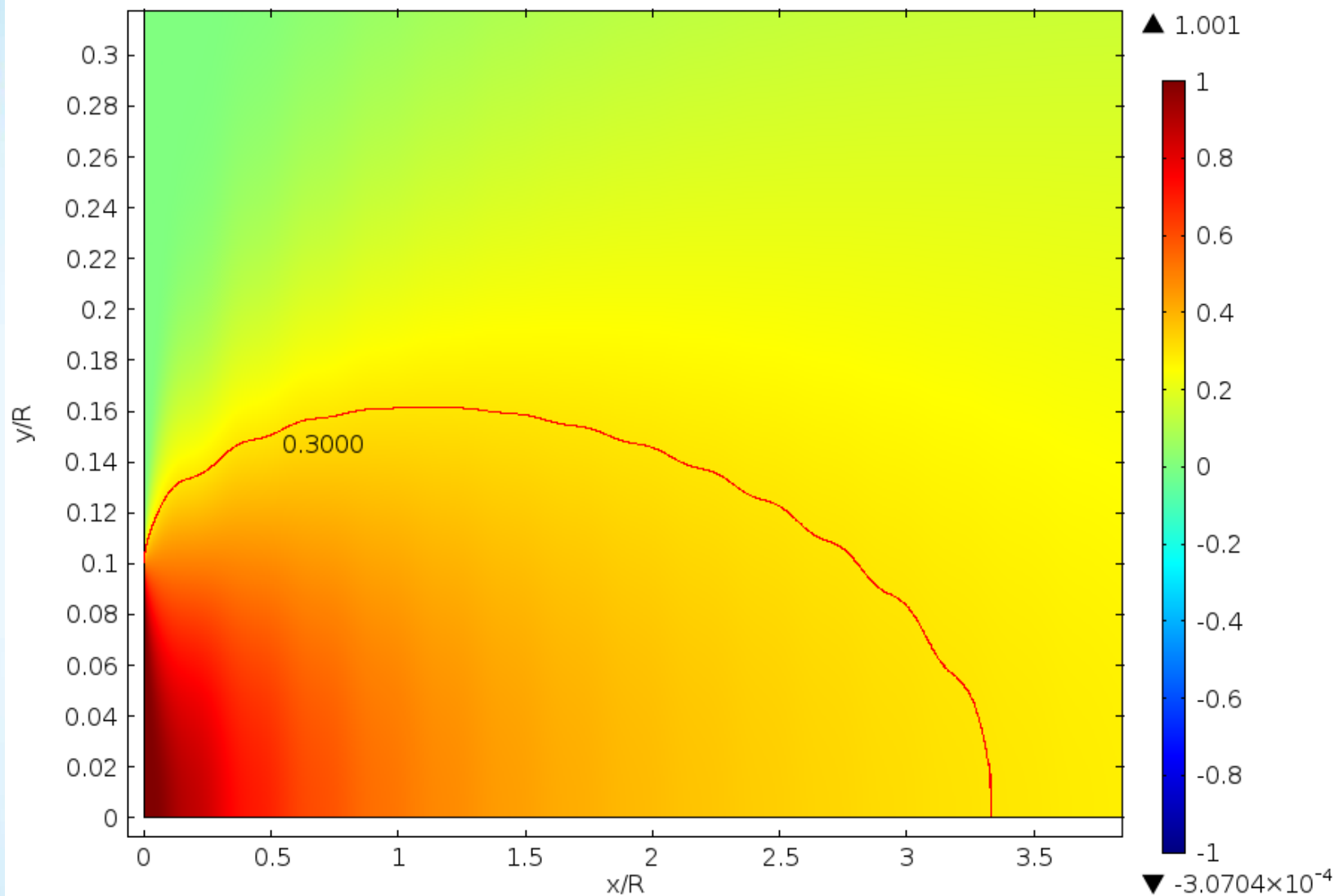
其中

$$\tau = n\pi(r/R) \quad \text{Pe} = \frac{Ru_{x,0}}{D} \quad \text{St} = \frac{Rf}{u_{x,0}}$$

扩散火焰模型参数

表1 燃烧器几何结构及出口反应物流速扰动参数

r/R	L/R	ε	Pe	St
0.1	10	0.5	100	4



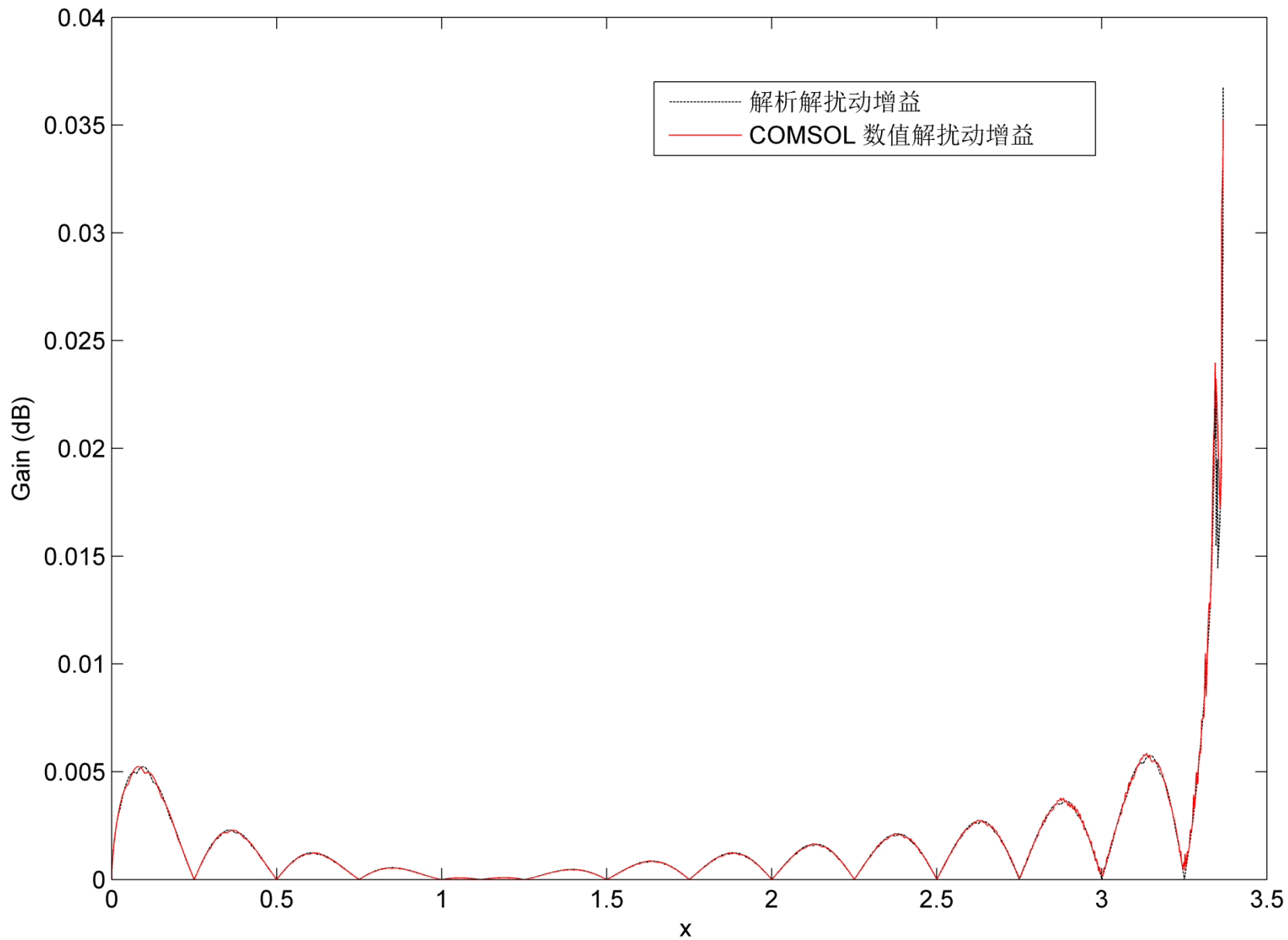
COMSOL 所计算的瞬态火焰面分布： $z_{st} = 0.3$

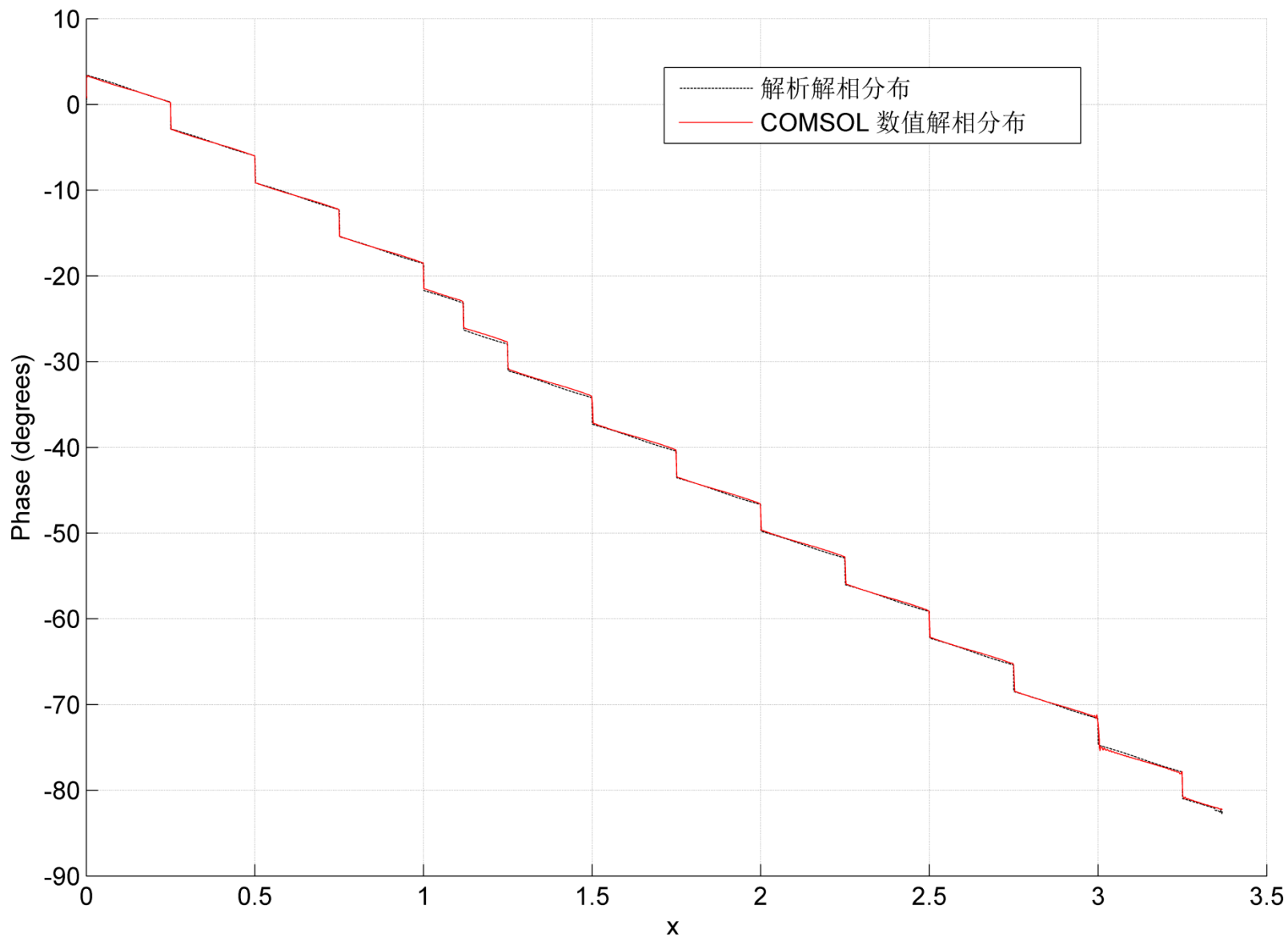
COMSOL 模拟与解析解的对比

$$\text{Gain} = \text{abs}\{\text{Fourier}[\zeta(t)]\}, t = t_0, \dots, t_0 + T_0, \zeta = (\zeta_0, \dots, \zeta_I)$$

$$\text{Phase} = \text{angle}\{\text{Fourier}[\zeta(t)]\}$$

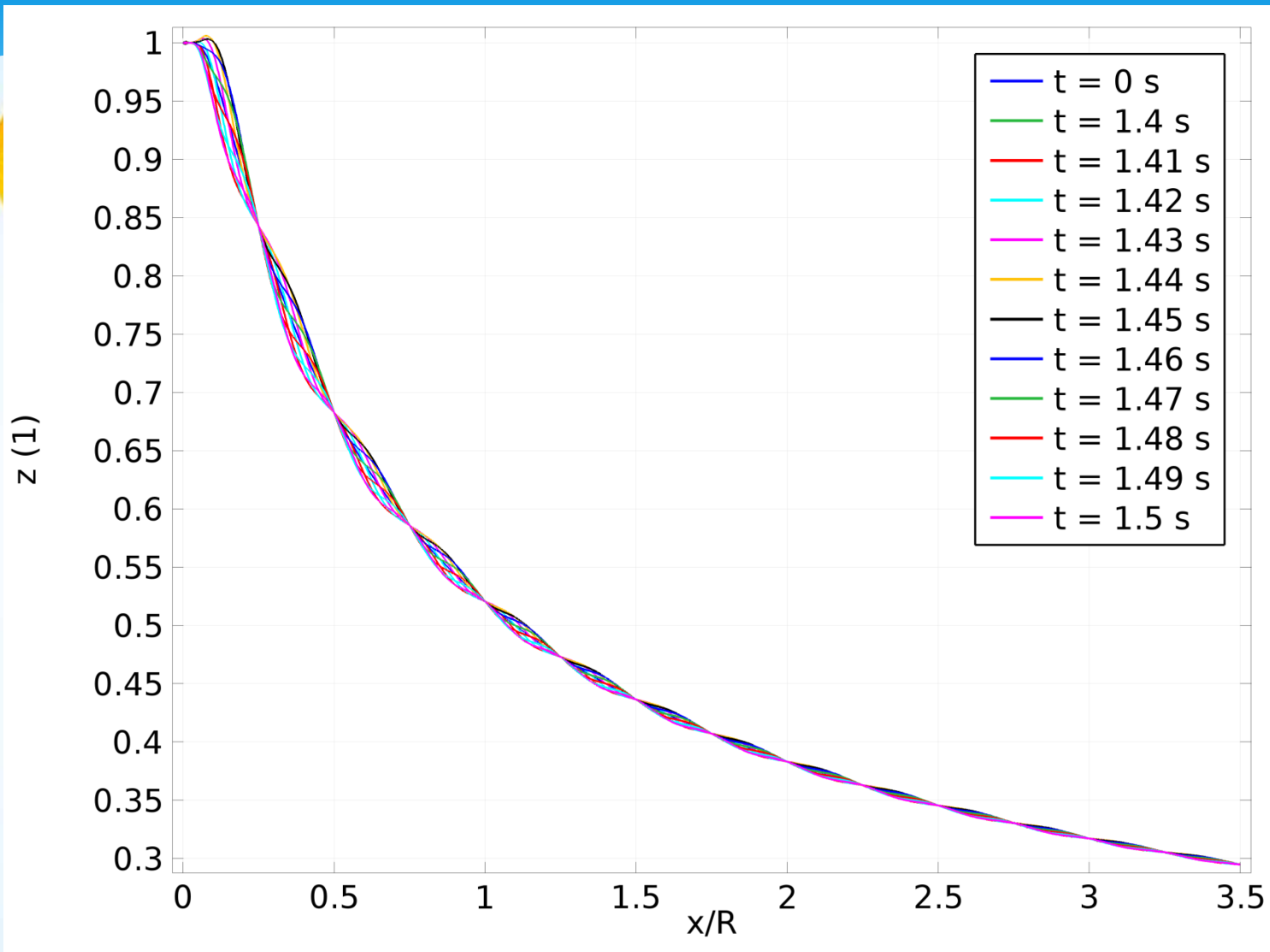
式中 $\zeta(t)$ 为某一周期内各点上的瞬态火焰面的位置向量式



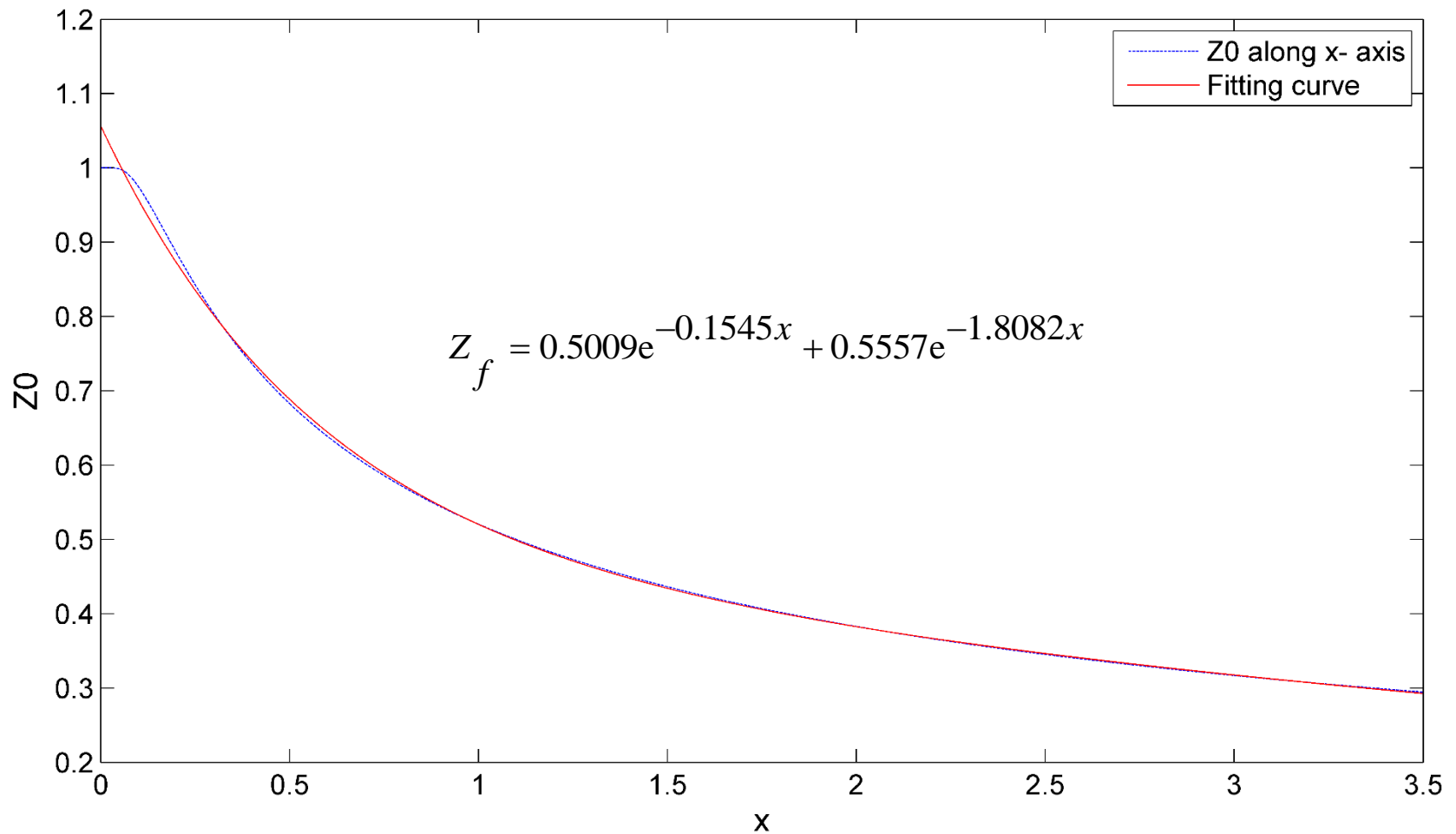


对比结论

- COMSOL 有限元模拟在足够求解精度的情况下，能够合理、准确地模拟求解基于一定控制方程的火焰面模型
- 靠近火焰基部和末梢产生的扰动强度大，而越接近中央扰动越弱，即波纹的幅值与火焰面 y - 向位置间有相应的反比关系
- 波纹的无量纲波长约为 0.25，而流速扰动波沿流动传播的无量纲波长为 $1/St = 0.25$ 。说明进口流速扰动引起的火焰震荡以介质平均流速（即稳态时流速）沿流动传播，不同于压力波的传播机制



沿对称轴 $y = 0$ 的一维空间瞬态混合分数变化
(一个扰动周期的一簇线)



稳态时 Z_0 沿对称轴 $y = 0$ 的分布及指数规律拟合

火焰混合分数分布特征

- 稳态火焰混合分数沿中心轴的分布

$$Z_0 \Big|_{y=0} = \frac{r}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin(\tau) \exp\left(-\tau^2 \frac{x}{\text{Pe} \cdot r}\right)$$

- 越靠近火焰基部混合分数梯度越大，且整体趋势依近似指数规律降低，如图中所示
- 出口附近起始阶段为准指数变化



结论

- 扩散燃烧火焰包含复杂的物理和化学机理，对流 - 扩散方程可以描述其基本规律
- COMSOL数值解与解析解完全吻合，既检验了解析解的正确性，反过来亦验证了COMSOL数值解的可行和可靠性
- 燃烧器进口反应物流速产生的扰动以流速值向下游传播
- 火焰面对扰动的响应幅值从火焰两端到火焰最宽处逐渐变弱
- 混合分数的梯度自火焰基部朝下游方向以复合指数规律衰减



感谢您的关注!