

基于 GT-SUITE 的 RDE 仿真研究

Simulation Study of Real Drive Emission by GT-SUITE

张宇璠, 马赫阳, 刘金玉, 王占峰, 黄平慧, 宫艳峰

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130011)

摘 要: RDE 是国六排放法规新增试验, 旨在控制车辆实际行驶过程中的排放。本文基于 GT-SUITE, 通过建立 SITurb 预测模型、发动机万有特性模型、整车模型、排放神经网络模型, 完成对 RDE 循环的仿真, 仿真得出的发动机瞬态负荷和 NO_x、CO、THC 瞬态排放与 RDE 试验数据跟随性较好。

关键词: RDE, SITurb, 瞬态, NO_x, CO, THC

Abstract: In order to control vehicle emissions in the process of real driving ,state 6 emission regulations add new test, Real Drive Emission test . This article is based on GT - SUITE, through the establishment of SITurb prediction model, engine universal model, vehicle model and neural network model, completed the RDE cycle simulation study, the simulation of engine transient load and NO_x, CO and THC transient emissions are in good agreement with RDE test data.

Key words: RDE, SITurb, Transient, NO_x, CO, THC

1 引言

RDE 是国六排放法规新增试验, 旨在控制车辆实际行驶过程中的排放, 是汽车排放攻关的难点, 也是未来技术发展必须考虑的因素。2020 年 7 月 1 日全国实施国 6a, 2023 年 7 月 1 日全国实施国 6b 及 RDE 检测 RDE 试验要求在 -7℃~35℃、2400m 海拔以下均满足标准限值。实际行驶中的交通状况又很随机, 导致试验难度增加, 因此开展对 RDE 循环的仿真研究是非常必要的。

2 整车基本情况介绍

本文基于一汽一款 3.0L 机械增压汽油机及其搭载的整车相关信息, 搭建发动机万有特性模型、SITurb 预测燃烧模型、整车模型、排放神经网络模型, 完成对 RDE 循环的仿真。

表 1 发动机基本参数

项目	参数	项目	参数
发动机型式	V 型 6 缸	驱动型式	适时四驱
发动机排量/L	2.951	变速器型式	8AT
最大净功率/kW	240.0	最高车速 / km/h	235.0
最大净扭矩/N·m	445	整车装备质量/ kg	2350.0

3 建模

3.1 发动机建模

3.1.1 SITurb 建模

SITurb 属于物理模型，基于缸内环境和换气状态预测燃烧率，该模型中火焰传播过程以火花塞电极为原点产生球形火焰面，火焰面卷积质量源于火焰面积和火焰传播速度，初始的火焰核心成长由层流火焰速度驱动，当火焰核心的尺寸与湍流特征长度相近时成为湍流燃烧，湍流火焰面的速度与湍流强度成正比。

SITurb 建模主要分为以下四步：

(1) 建立单缸机模型，在原始多缸机模型基础上，经过气量校核后，提取并输入单缸初始状态，包括充气效率、喷油量、点火时刻、缸内湍流等，计算单缸机缸压，如图 1 所示。

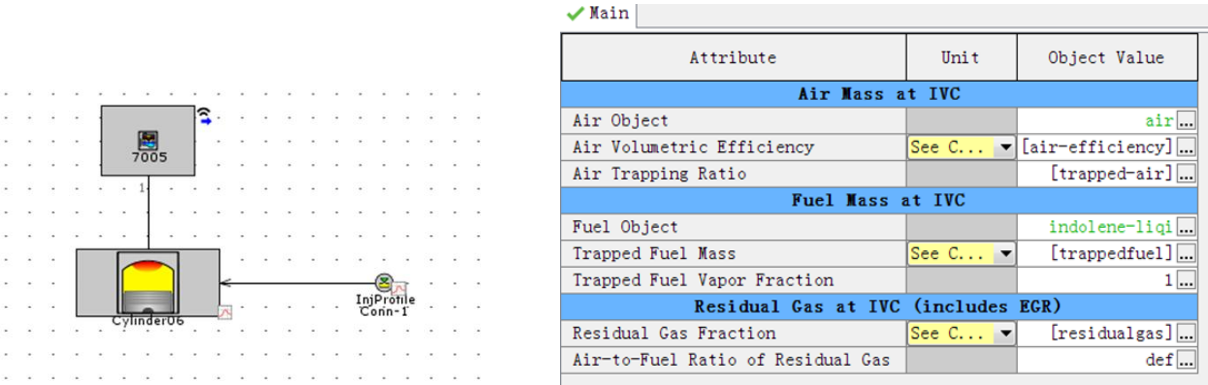


图 1 单缸机建模

(2) 校核计算缸压：根据输入的缸压已经缸内初始状态，GT 会拟合得出一条计算缸压，需要校核模型计算的缸压和实测缸压曲线，在合理范围内通过调整缸内换热系数、进排气门开启时刻等，如图 2 所示，红色曲线为试验缸压曲线，蓝色曲线为计算缸压曲线，两种较为吻合。

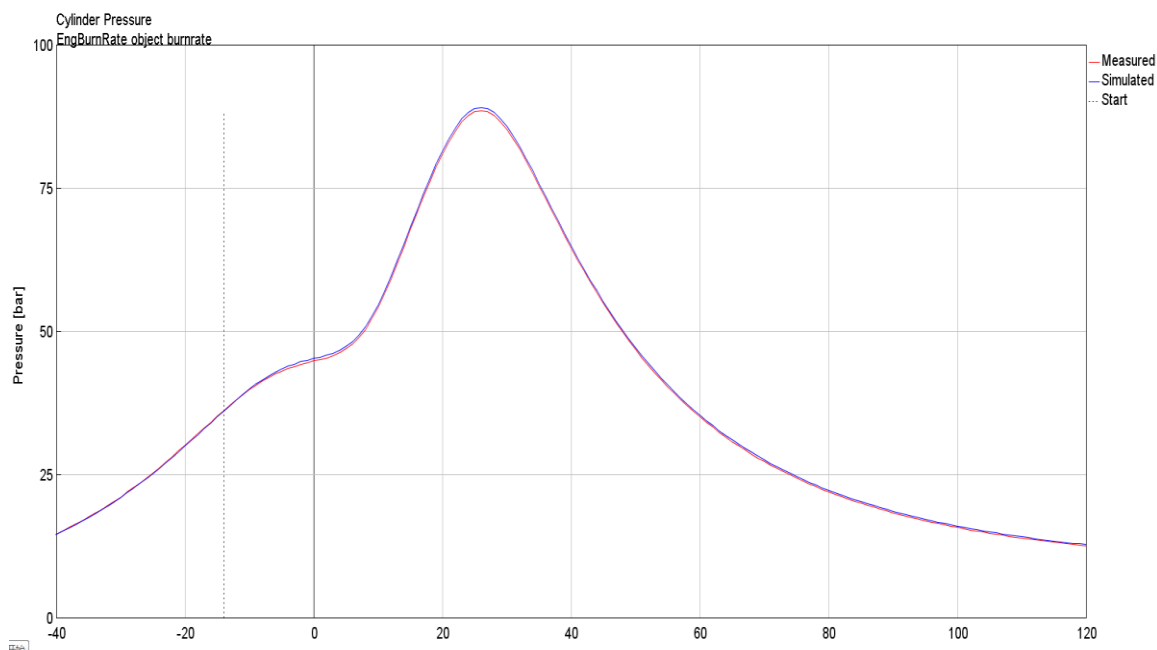


图 2 计算缸压与试验缸压曲线

(3) 建立三维燃烧室，利用第二步中调整好的参数，在单缸模型中建立 SITurb 模型，输入缸盖和活塞顶三维结构并导入模型文件，建立燃烧室三维坐标。

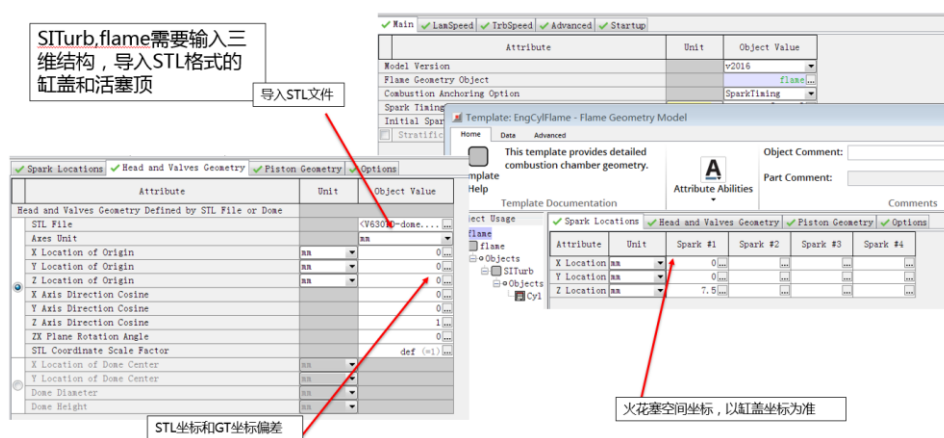


图 3 导入三维燃烧室

(4) 优化求解，优化四个影响燃烧的变量，包括稀释指数 (Dilution Exponent Multiplier)、火核发展指数 (Flame Kernel Growth Multiplier)、湍流火焰传播速度指数 (Turbulent Flame Speed Multiplier) 和泰勒长度系数 (Taylor Length Scale Multiplier)，使得预测燃烧缸压、计算缸压和实测缸压三者吻合，图 4 是预测缸压、计算缸压和实测缸压对比图，由图可知，三条缸压曲线基本重合，可以认定 SITurb 预测缸压较为准确。

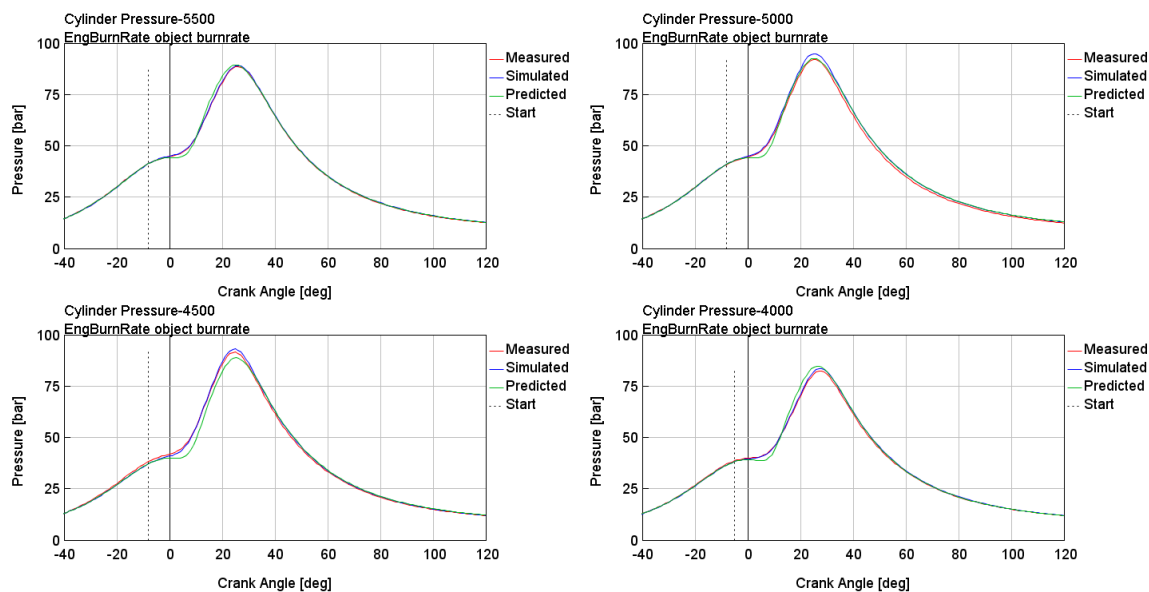


图 4 预测缸压、计算缸压与试验缸压校核

3.1.2 发动机万有特性建模

RDE 循环是具有随机性的，范围比 WLTC 更广，因此发动机模型应该具有对整个万有特性 map 进行仿真的能力，将发动机台架万有特性复现在 GT 模型中。因此建立发动机万有特性模型，如图 5 所示，通过节气门和旁通阀双 PID 控制实现负荷平稳升高控制，即旁通阀初始全开，由节气门控制负荷，到节气门全开后，保证节气门开度不变，由旁通阀开度控制发动机负荷。最终发动机万有特性模型包括 211 个工况点，包含对应 RDE 主要运行点，进气量和 IMEP 仿真绝对值偏差 $<5\%$ 。

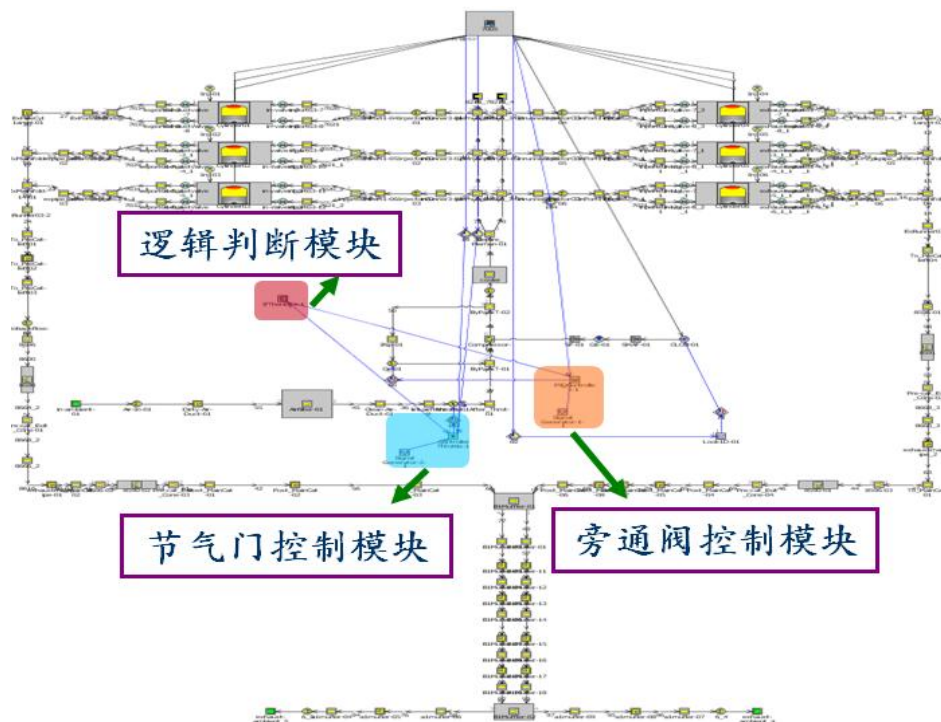


图 5 万有特性模型

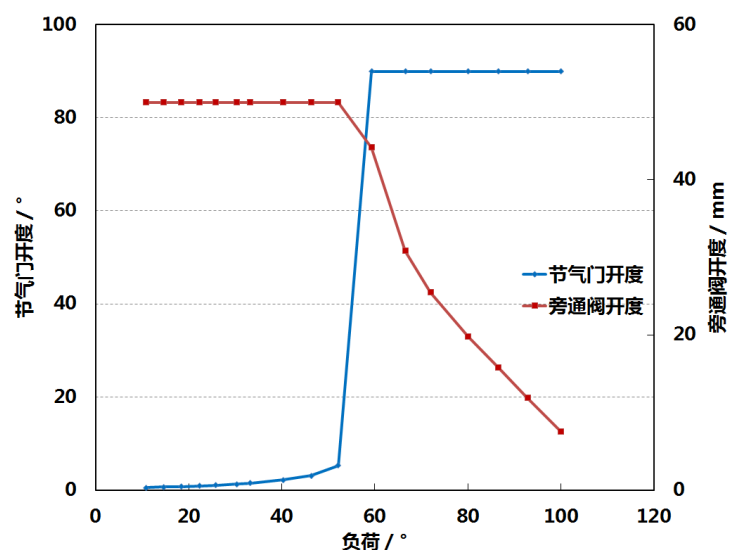


图 6 控制逻辑

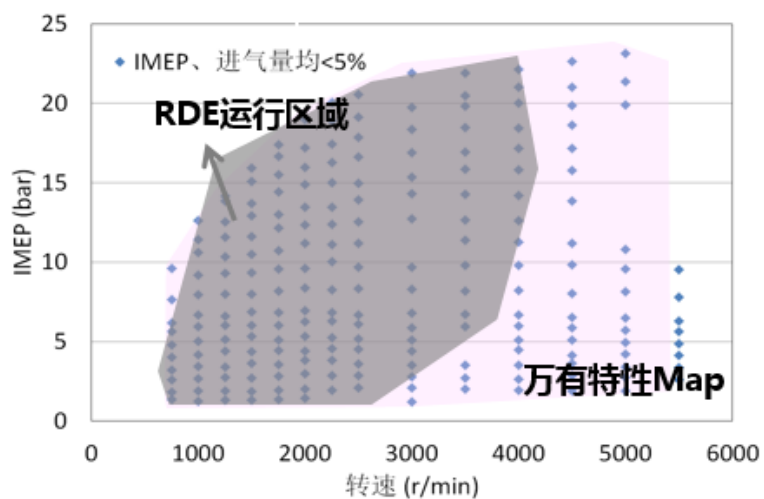


图 7 万有特性仿真结果

在万有特性模型基础上，为了提高运算速度，将进排气管路简化，将模型转化为快速运算模型。其中科朗数代表管路计算速度，科朗数越小，运算速度越慢，根据科朗数对管路进行简化，提高运算速度转化过程至少需要 7 步，每一步均要对万有特性 Map 的 211 个工况点进行管路参数（摩擦、换热系数等）优化，科朗数最小值由 0.01 提升至 0.33，计算速度提升至少 33 倍。

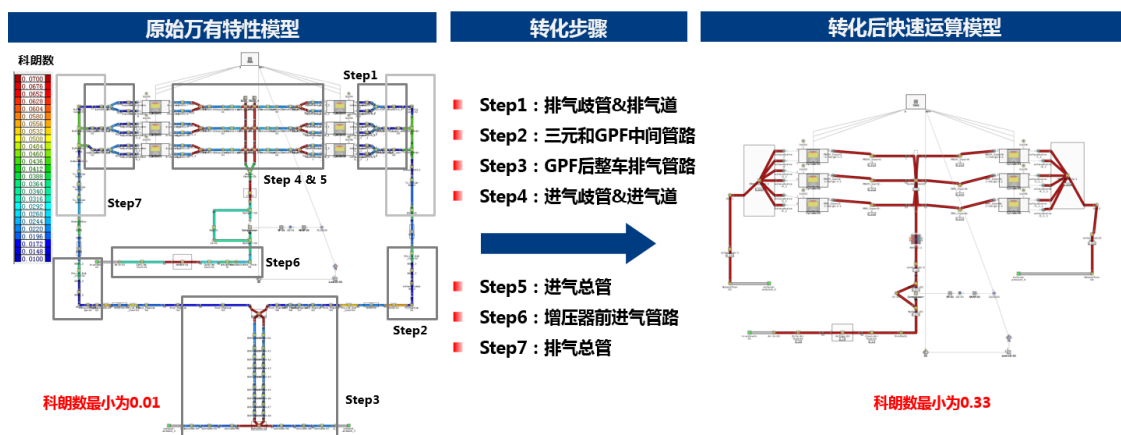


图8 快速运行模型

3.2 整车模型搭建

3.2.1 变速器

将换挡曲线、不同油温下传动效率等信息输入变速器模块，构建变速器模型。

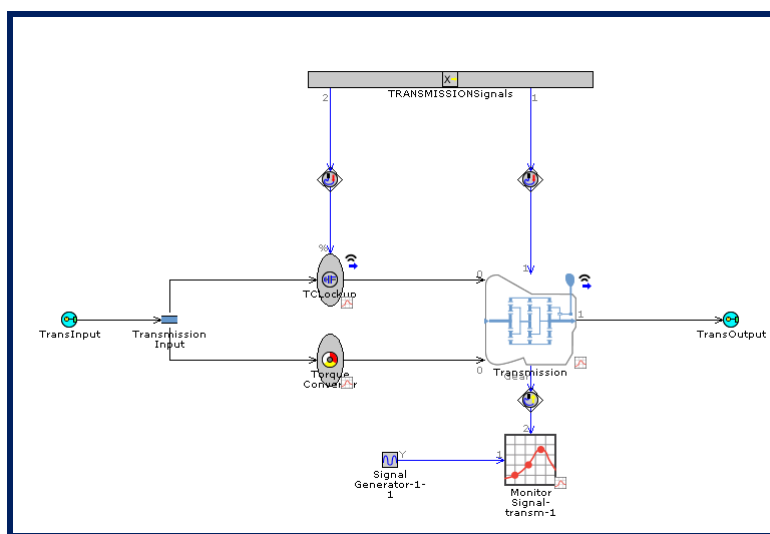


图9 变速器模型

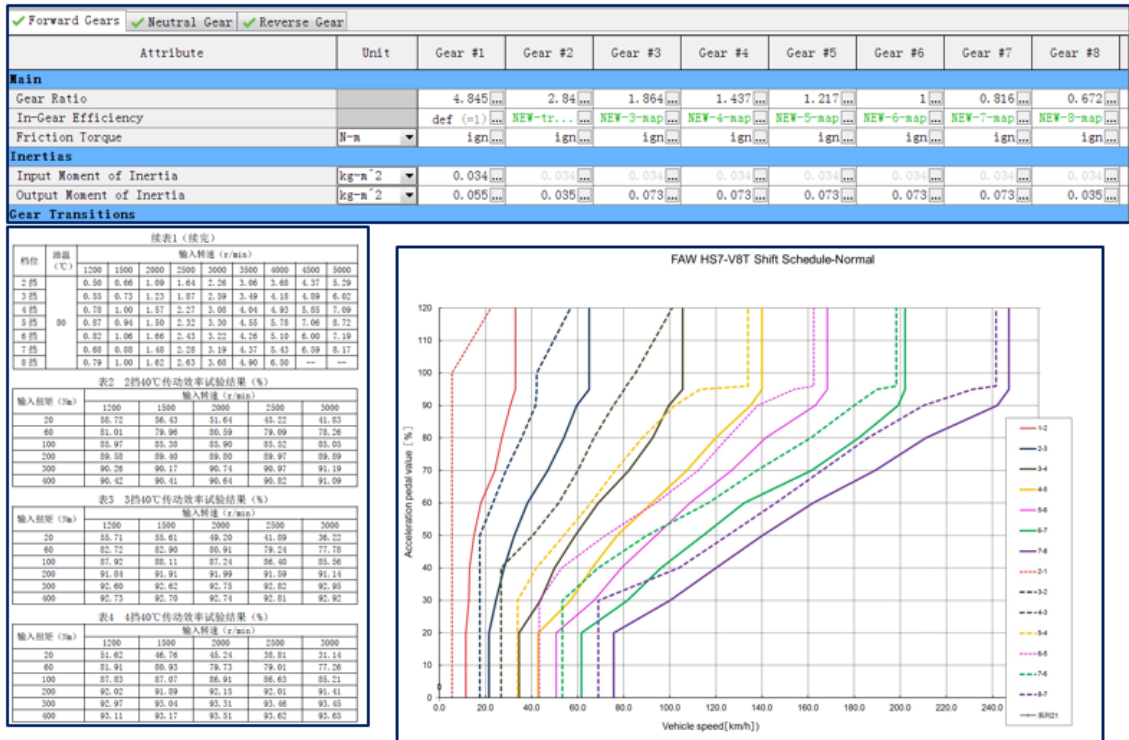


图 10 变速器参数

3.2.2 车身

将整车相关参数输入车身模块，包括主减速惯量，车轴惯量，车轮制动半径，滑行阻力曲线，整备质量，环境温度、压力等，滑行阻力曲线是车以 120km/h 车速自由滑行到停止的曲线，代表整车负载。

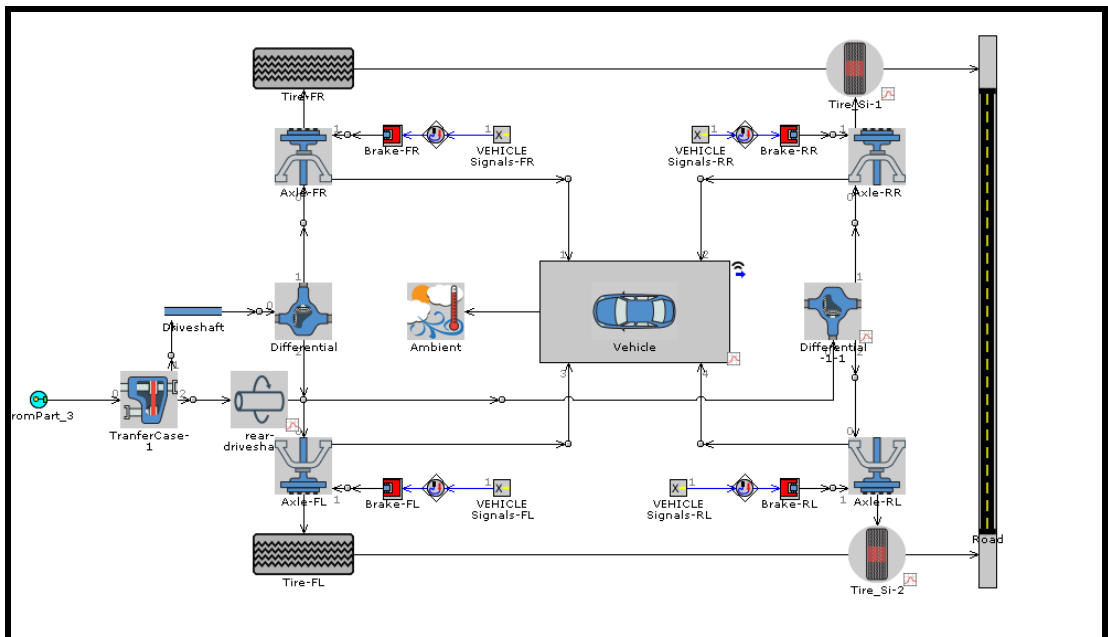


图 11 车身模型

3.2.3 整车模型

将发动机和整车耦合，最终完成整车模型搭建。

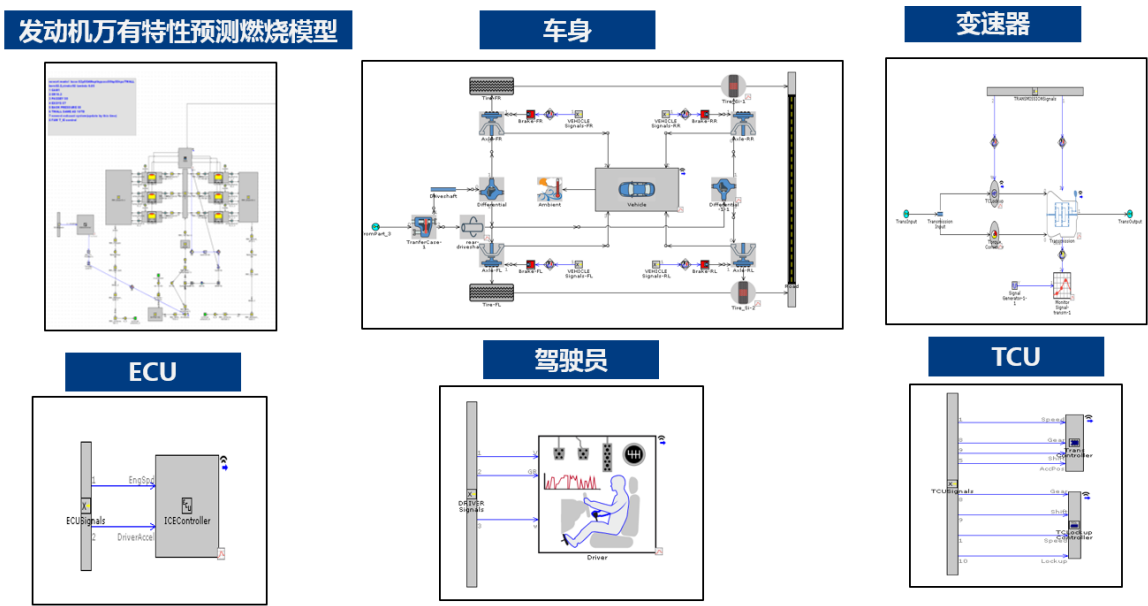


图 12 整车模型

3.3 发动机原排神经网络训练

3.3.1 神经网络训练建模

发动机排放和很多因素相关联，本文模拟中采用神经网络训练的方法，利用 RDE 实验数据，将和排放相关的因素（IMEP 及变化率, 发动机转速及变化率，点火角，空燃比，进排气相位，喷油时刻等）与相应排放物进行神经网络训练，得到原排神经网络训练模型，神经网络训练模型如下图所示，再通过建立的基于发动机快速运算模型的整车 RDE 模型，可以根据目标车速计算出实时瞬态的工况，得到和排放相关的瞬态数据，与原排神经网络模型耦合，计算出 RDE 原排数据。

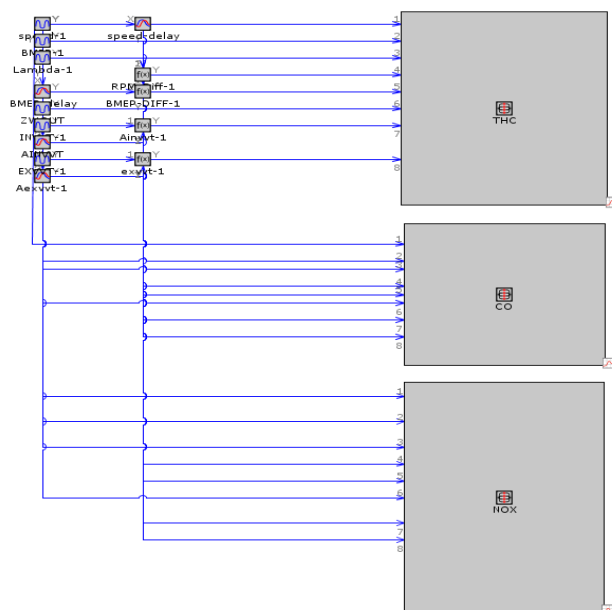


图 13 神经网络训练模型

3.3.2 神经网络训练结果

蓝色点为验证点，棕色点为训练点，训练点和验证点大体收敛至同一条线，证明数据训练效果较好。

CO:

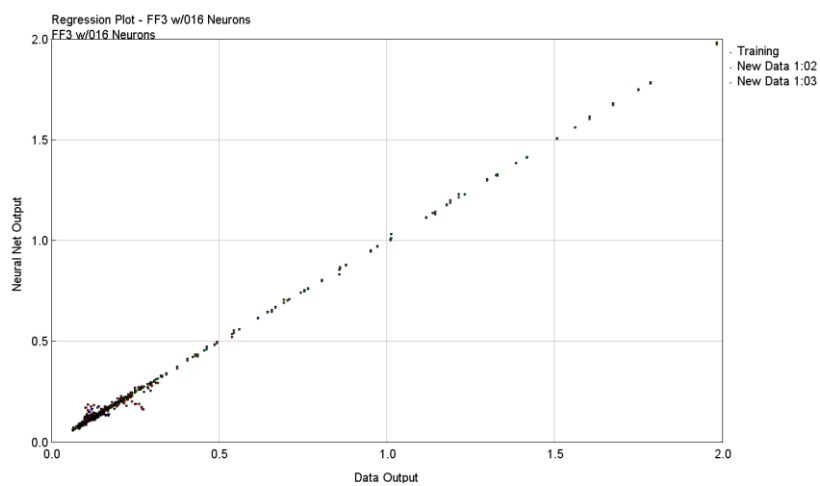


图 14 CO 神经网络训练结果

THC:

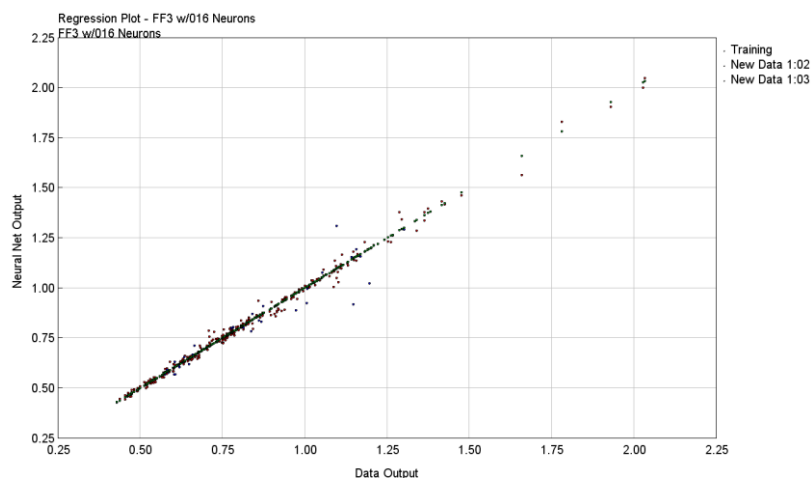


图 15 THC 神经网络训练结果

NOX:

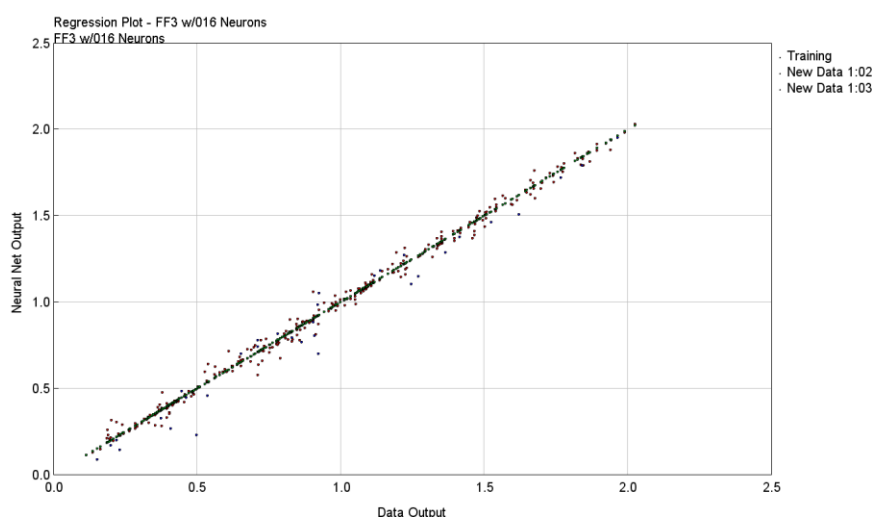


图 16 NOX 神经网络训练结果

4 原排仿真结果

基于一组 RDE 实车实路测试数据的路谱和车速、档位等信息，以实测车速为目标车速进行 RDE 仿真，结果对比如下。

4.1 车速对比

如下图所示，红色为仿真计算的车速，蓝色为试验车速，跟随性较好。

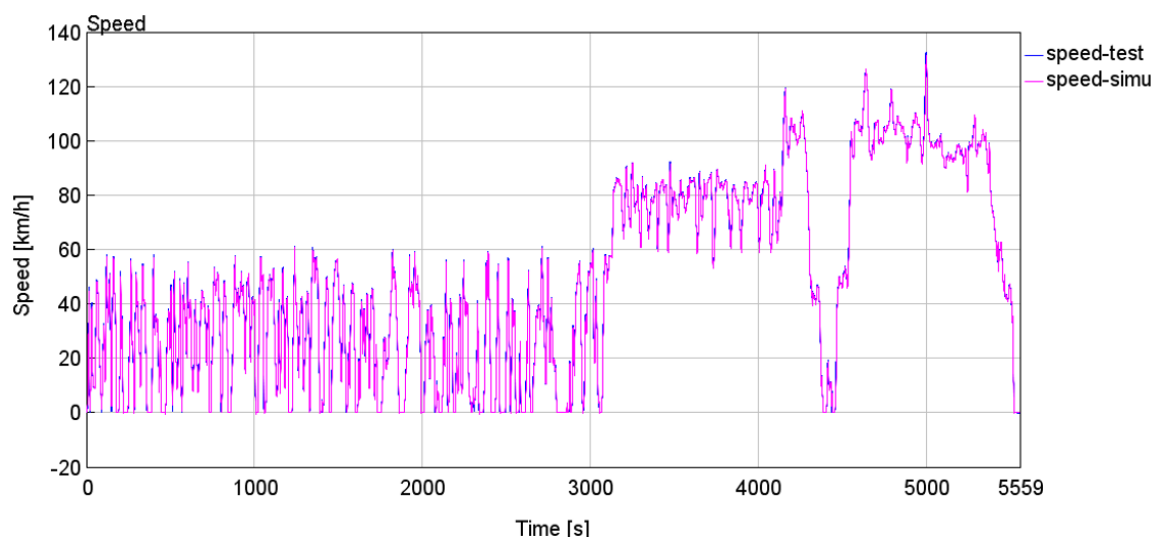


图 17 RDE 仿真车速与试验对比

4.2 IMEP 对比

如下图所示，红色为模型计算得出的发动机 IMEP，黑色为试验实测 IMEP，瞬态变化跟随性较好。

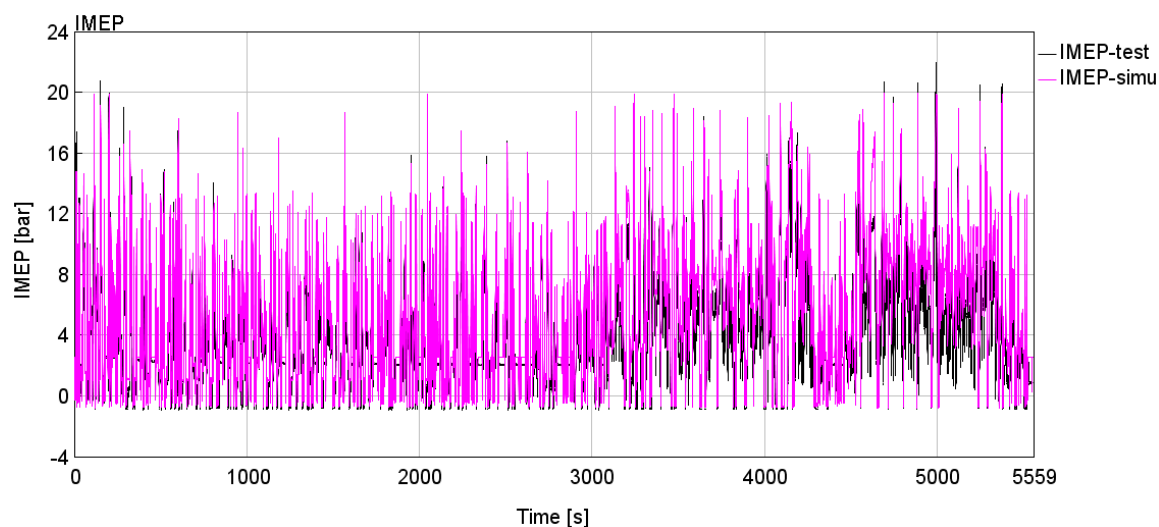


图 18 RDE 仿真 IMEP 与试验对比

4.3 RDE 循环排放结果对比

将神经网络模型嵌入到 RDE 整车模型中，如图 4.1 所示。CO、THC 和 NOX 排放仿真数据和 RDE 实验数据对比如图 4.2-4.4 所示。蓝色点为实验数据，红色为仿真数据，跟随性较好，变化趋势接近，幅值在同一数量级。

CO:

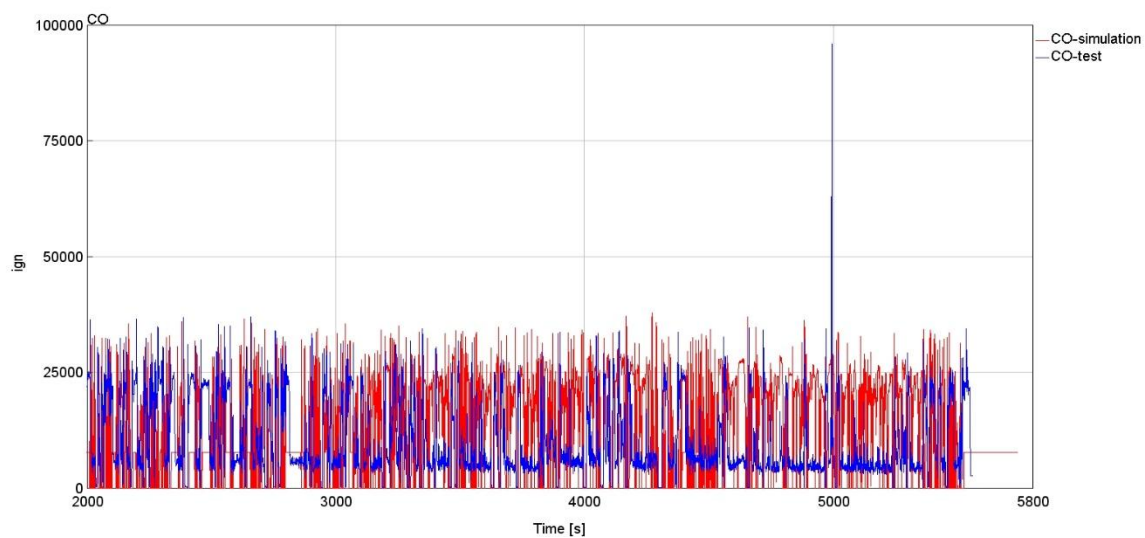


图 19 RDE 循环 CO 排放数据对比

THC:

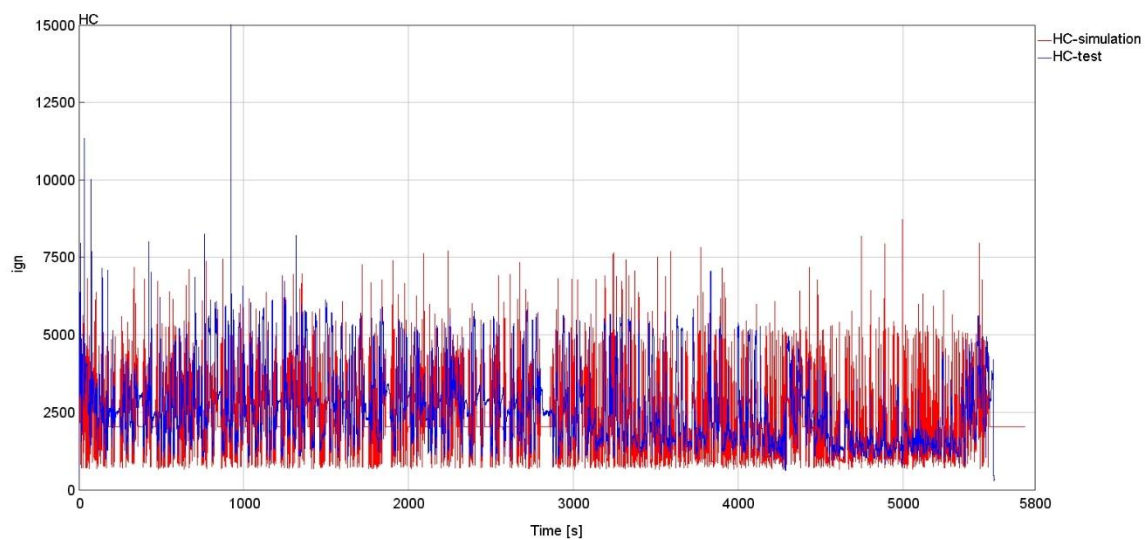


图 20 RDE 循环 THC 排放数据对比

NOx:

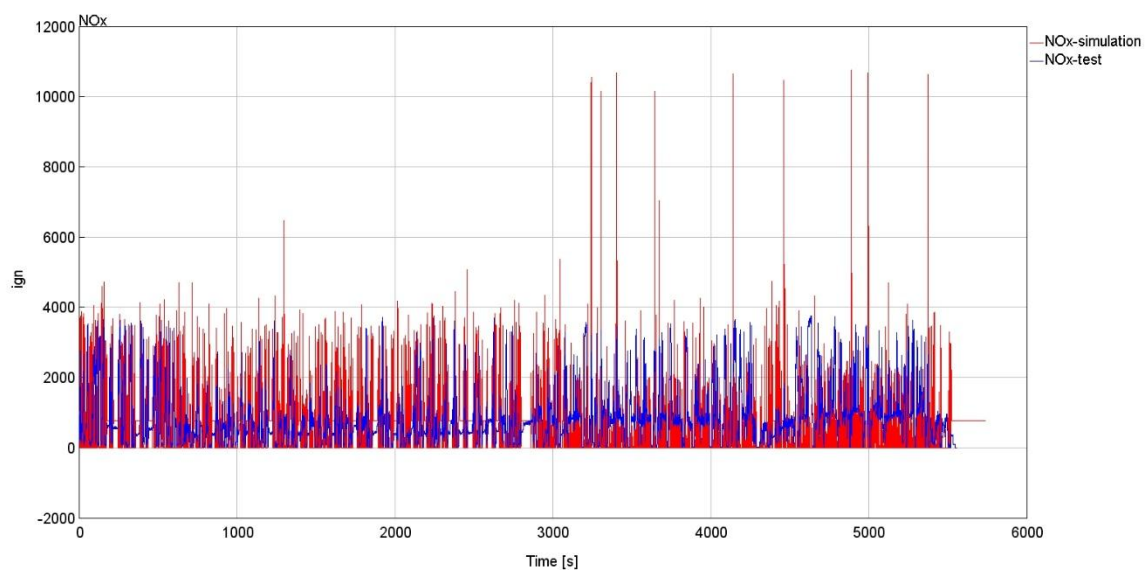


图 21 RDE 循环 NOx 排放数据对比

4.4 WLTC 循环排放结果对比

取一组实验 WLTC 数据进行验证，改变目标车速进行 WLTC 工况运行计算，排放数据如 4.5-4.7 所示。

CO:

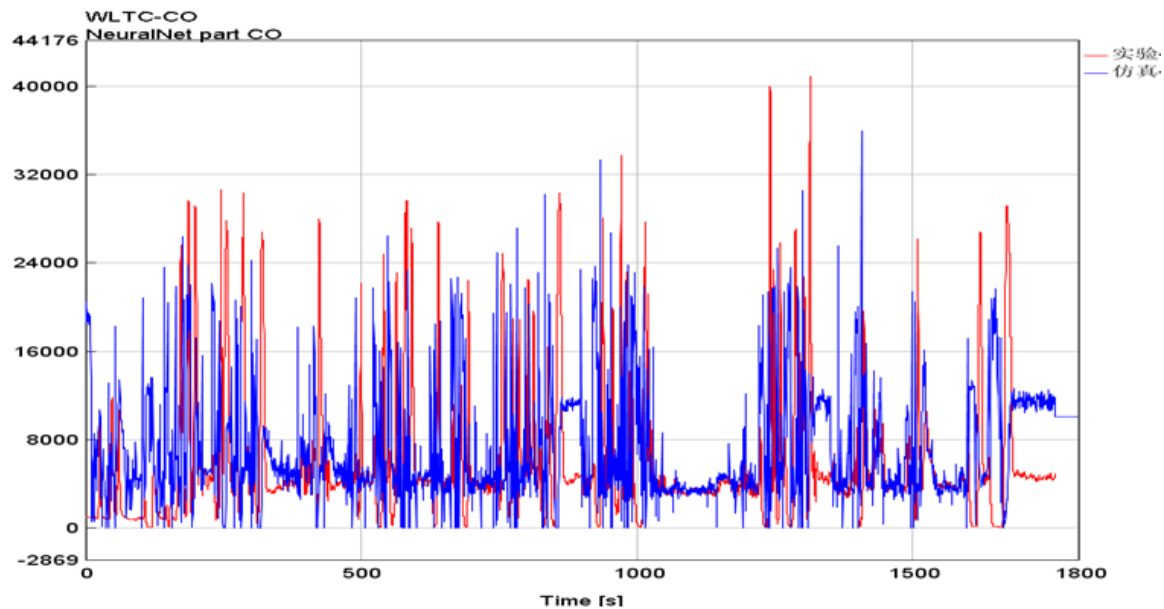


图 22 WLTC 循环 CO 排放对比

THC:

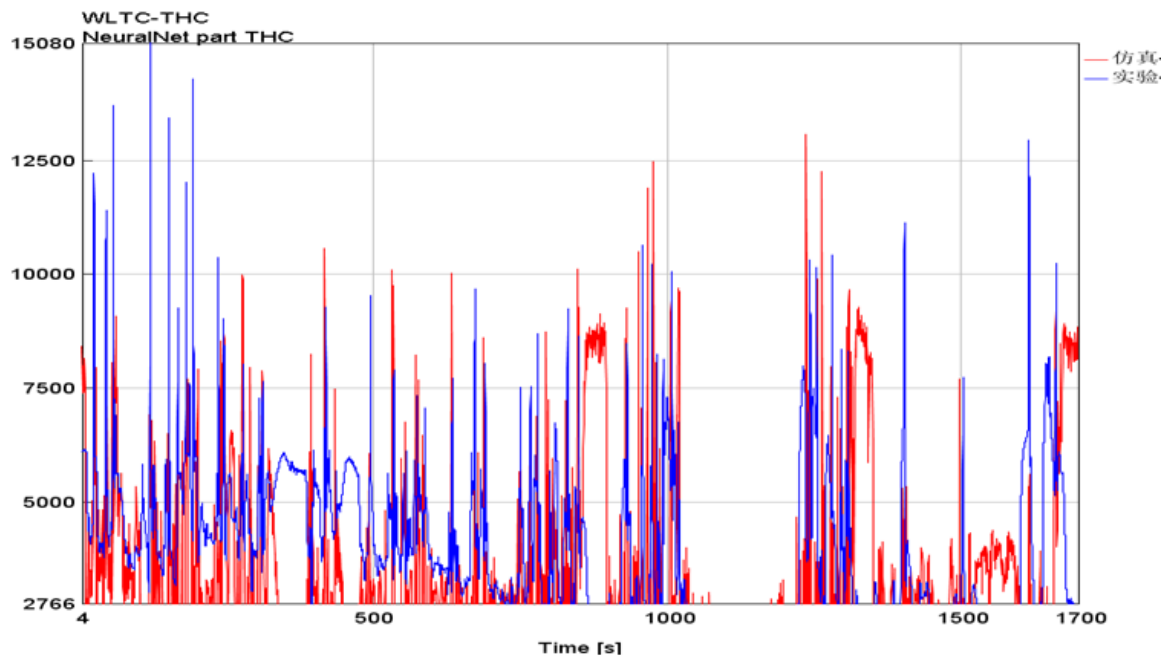


图 23 WLTC 循环 THC 排放对比

NOX:

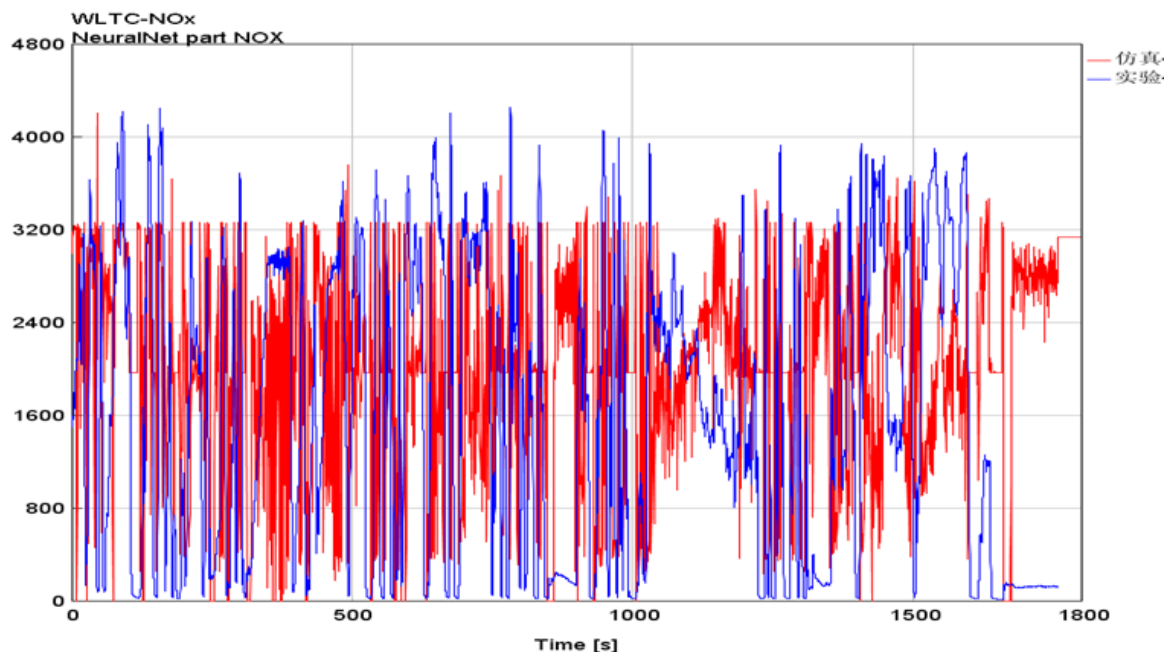


图 24 WLTC 循环 NOX 排放对比

5 总结

- (1) 建立发动机快速运算模型和 SITurb 模型，可以预测瞬态缸内燃烧，完成发动机瞬态运行工况的仿真。
- (2) 基于发动机快速运算模型的整车模型，可以完成 RDE 循环的仿真，在车速、档位、以及发动机燃烧扭矩等方面，和实验数据吻合较好。
- (3) 通过一组 RDE 和 WLTC 循环实验数据验证，对于 CO、THC、NOX 等排放物，实验数据和仿真瞬态跟随状态吻合较好。
- (4) 后续可以开展和 HiL 等集成工作，完成 RDE 仿真预测。

6 参考文献

- [1]周龙保. 内燃机学[M]. 北京：机械工业出版社. 2011.
- [2]陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京：机械工业出版社. 2005.