

基于实验数据的排气系统温度、背压和尾管噪声相关调校

Correlation of Exhaust System Temperature, Backpressure and Tail Pipe Noise Based on Test Data

黄华华

(克康 (上海) 排气控制系统有限公司)

摘 要: 系统背压和尾管噪声是衡量排气系统的两个重要指标。系统背压越大, 尾管噪声越小, 反之系统背压越小, 尾管噪声越大, 因此准确的系统背压仿真结果可以提高尾管噪声预测精度。在排气系统开发初期, 由于对系统信息了解有限, GT-Power 仿真结果与实验数据可能会存在一定误差。基于某车型实验数据, 本文详细地论述了在 GT-Power 中分别对排气系统温度和背压相关调校的一种方法。调校后尾管噪声仿真结果和实验结果吻合度得到提高, 有利于排气系统尾管噪声优化和降低开发时间和成本。

关键词: 相关调校、尾管噪声、背压、GT-Power

Abstract: System backpressure and tail pipe noise are two important indices of judging an exhaust system. Tail pipe noise will be lower with a larger system backpressure, and conversely tail pipe noise will be louder with a smaller system backpressure. Therefore the accuracy of tail pipe noise prediction can be improved with a more accurate system backpressure simulation result. Discrepancy may exist between GT-Power simulation results and test data in preliminary developing stage due to lacking of enough system information. A method of correlating exhaust system temperature and backpressure respectively will be detailed in this paper based on the test data of a vehicle. The simulation and test results of tail pipe noise are better matched after correlation, which is efficient for executing tail pipe noise optimization and reducing developing time and cost.

Key words: Correlation, Tail pipe noise, Backpressure, GT-Power

1 前言

人们对噪声的关注度提高和国家法规对汽车噪声的日益严格, 促使汽车生产者和零部件供应商对汽车 NVH 的重视度提高和研发投入加大^[1]。排气噪声是汽车噪声的主要贡献者之一, 控制排气噪声的新技术手段也越来越多, 例如主动降噪系统^[2]、主动和被动阀门等。为提高产品开发效率, 常使用 GT-Power 等仿真工具辅助产品设计, 因此提高 GT-Power 的仿真准确度可以大幅缩短产品开发周期。

影响排气系统尾管噪声的主要因素包括发动机排气脉动噪声激励强度、消声包体积、连接管直径、排气系统温度和背压分布等^[3]。当发动机 GT-Power 模型和车身底盘确定了之后(间接确定了消声包体积和连接管直径),排气系统温度和背压分布便是影响尾管噪声的主要因素。本文论述了一种在 GT-Power 中将排气系统温度和背压分布的仿真结果与实验数据分别进行相关调校的方法,然后将模型调校后的尾管噪声仿真结果与实验数据进行对比来验证相关调校效果。

2 概述

本文所分析车型发动机为 V6 3.6L 自然吸气汽油机,排气系统几何结构如图 1 所示。可以看到排气系统冷端包括一个中级消声器和两个后级消声器,其中两个后级消声器内部结构是一样的,以保证两边尾管噪声相同。在实验过程中,共布放了 4 个温度测量点(图 1 中以 T_n 标注, $n=1, 2, 3, 4$)和 3 个背压测量点(图 1 中以 BP_n 标注, $n=1, 2, 3$),这些传感器所采集到的实验数据将用于 GT-Power 模型的相关调校。图 2 是相应的 GT-Power 模型缩略图,可以看到在温度和背压传感器安装位置处做了相应的标记。

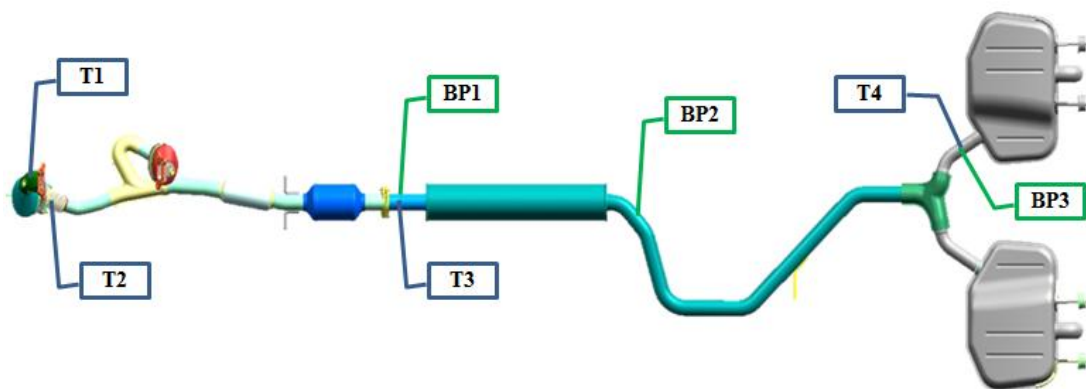


图 1 排气系统几何结构

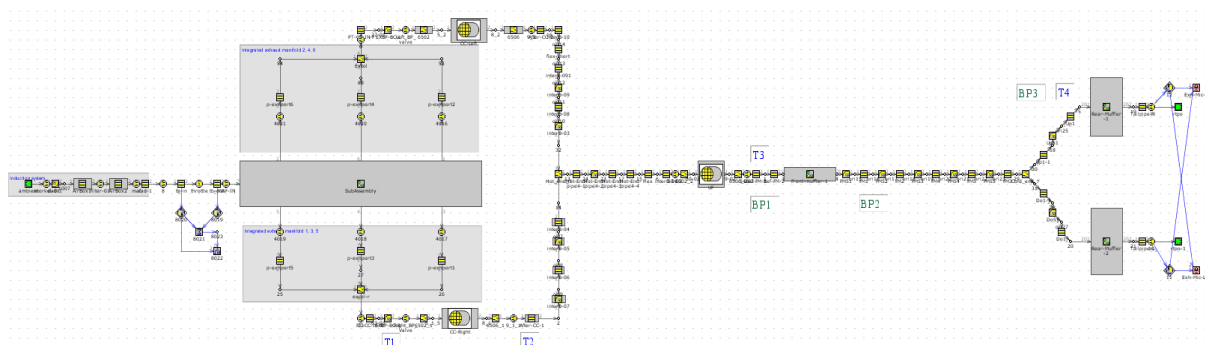


图 2 GT-Power 模型, 包括进气系统、发动机和排气系统

3 排气系统温度分布相关调校

在 GT-Power 中, 有三类管壁温度求解器 (wall temperature solver), 分别是稳态求解器 (steady)、瞬态求解器 (transient) 和关闭管壁温度求解器 (off)^[4], 其中稳态求解器和瞬态求解器分别适用于稳态和瞬态 GT-Power 发动机模型。如果在实验室过程中布置了足够多的温度传感器, 可以通过关闭管壁温度求解器来精准地控制排气系统的温度分布。由于本车型 GT-Power 为稳态, 且温度传感器布置数量未达到足够多, 因此瞬态求解器和关闭管壁温度求解器都不适用于本文, 本文将管壁温度求解器设置为稳态求解器来进行相关调校。

接下来需要通过设置管壁温度求解器对象 (wall temperature solver object) 来定义管壁和周围环境的热交换属性, 其中两个重要参数为外部对流系数 (external convection coefficient) 和表面辐射率 (surface emissivity)。在实验室环境下, 外部对流系数的取值范围为 $5 \sim 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, 表面辐射率为 $0.7 \sim 0.9$ 。

为了将模型中温度传感器安装位置处的温度与实验所测得的温度进行相关调校, 可以在温度传感器安装位置处不设置管壁温度求解器对象, 将初始管壁温度 (wall temperature) 设置为根据实测温度预先拟合好的数值, 同时将热传导倍增系数 (heat transfer multiplier) 设置为一个极大值 (例如 100), 这样 GT-Power 模型在求解过程中, 会使管道中气体温度尽可能地接近预先设定的管壁初始温度。以上管壁温度求解器相关设置界面如图 3 所示。

Attribute	Unit	Object Value
Wall Temperature Solver		steady
Wall Temperature Calculation Interval	sec	def ...
Wall Temperature SS Tolerance for Auto Shut-off	K/s	ign ...
Convergence Threshold for Flow Solver Skipping	fraction	ign ...
Number of Flow Solver Cycles Skipped		ign ...
Periods at Initial Wall Temperature (WallTempSolver ...		def ...

(a) 管壁温度求解器类型选择

Wall Temperature	K	[exhaust_WT]	...
Wall Temperature Solver Object		hco_cold-end	ign ...
Initial State Name		init_cold-end	...

(b) 管壁温度求解器对象设置

External Convection Temperature	K	293.15 ...
External Convection Coefficient	$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$	15 ...
External Radiation Sink Temperature	K	293.15 ...

(c) 外部对流系数设置

Surface Emissivity		0.7 ...
Layer Thickness	mm	1.2 ...

(d) 表面辐射率设置

图 3 GT-Power 中管壁温度求解器的相关设置

图 4 对比了 4 个温度传感器处实测温度、管壁初始设置温度、调校后计算所得气体温度和未调校计算所得气体温度的对比曲线。从图中可以看到, 未调校计算所得气体温度与实测温度偏差幅值

高达 260℃，这主要是由于 GT-power 计算所得为稳态温度而声学实验过程中所测温度为瞬态温度。调校后计算所得气体温度与初始设置温度的偏差在 20℃ 范围之内，以最低温度 290℃，最高温度 830℃ 计算，偏差率为 2.4%~6.9%，可以认为对排气系统温度分布的相关调校达到了预期目的，并以此为基础进行背压相关调校。

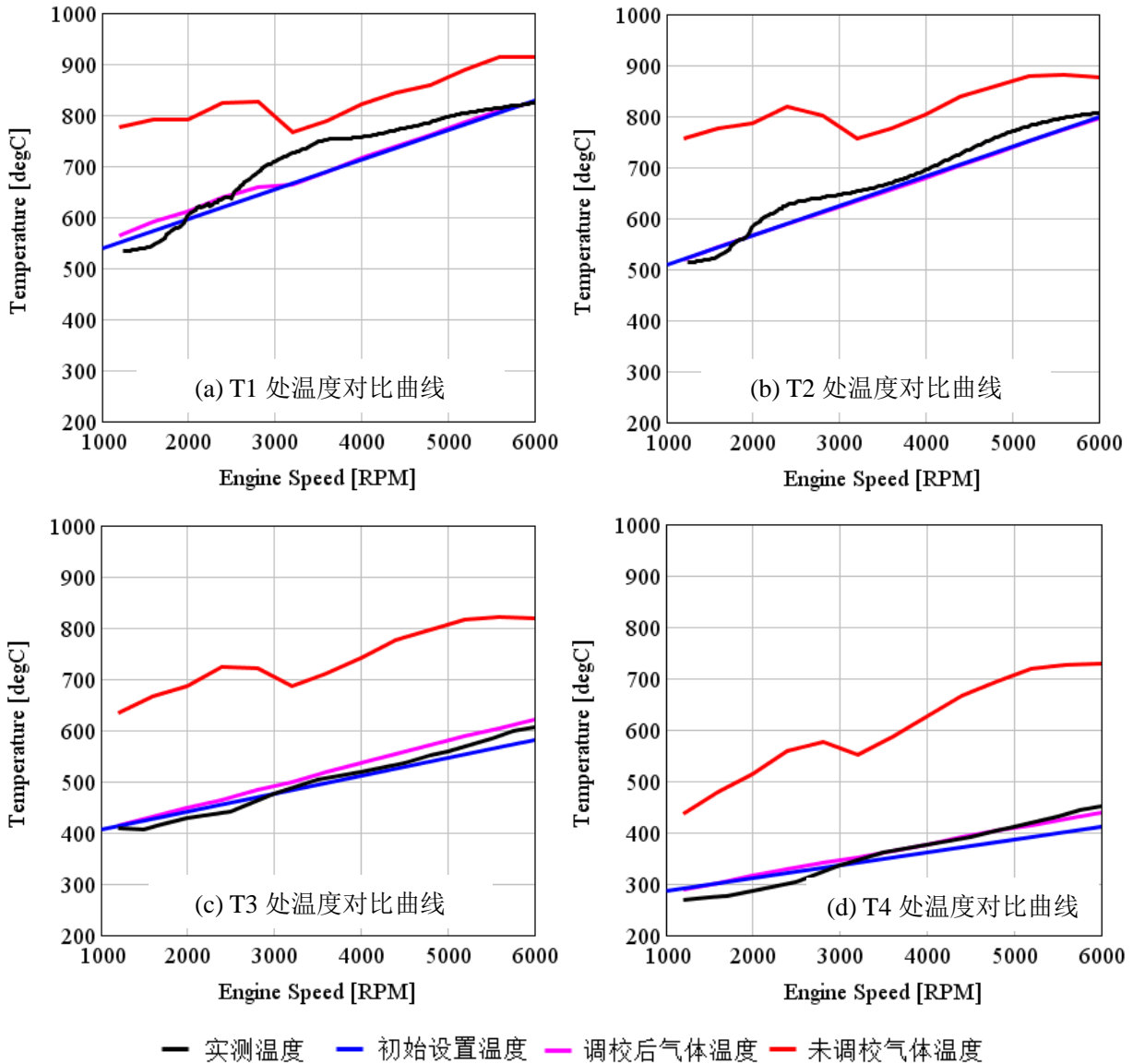


图 4 不同温度传感器处实测温度、初始设置温度和计算所得气体温度对比曲线图

4 排气系统背压分布相关调校

排气系统温度分布确定后，可以通过调整气体与管壁的摩擦系数倍乘数 (friction multiplier) 来调节排气系统背压分布。其流程为先按默认设置，在 GT-Power 中根据用户设定的管壁壁面粗糙度 (surface roughness) 计算出气体与管壁壁面摩擦导致的压降，然后用户可以设置摩擦系数倍乘数 (取值区间 0~1，排气系统中常用值为 0.6~0.9) 来调节此压降的大小，以匹配实验测量数据。管壁壁面粗糙度和摩擦系数倍乘数的设置示例界面如图 5 所示，其中管壁壁面粗糙度为默认值，摩擦系

数倍乘数为 0.85。

Surface Roughness	mm	def
Wall Temperature	See Ca...	[exhaust_WT]
Wall Temperature Solver Object		hco_cold-end
Initial State Name		init_cold-end

(a) 管壁表面粗糙度设置

Thermocouple Object		ign
Friction Multiplier		0.85
Heat Transfer Multiplier		def

(b) 管壁摩擦系数倍乘数设置

图 5 GT-Power 中管壁粗糙度和摩擦系数倍乘数的设置

图 6 给出了图 1 中背压测量点处实测背压、调校后计算背压和未调校计算背压的对比。可以看出未调校的计算背压均高于实测背压，而调校后的计算背压与实测背压吻合得较好。需要说明的是，由于实验测量得到的是总压（=静压+动压），因而此处调校的背压值也为总压。

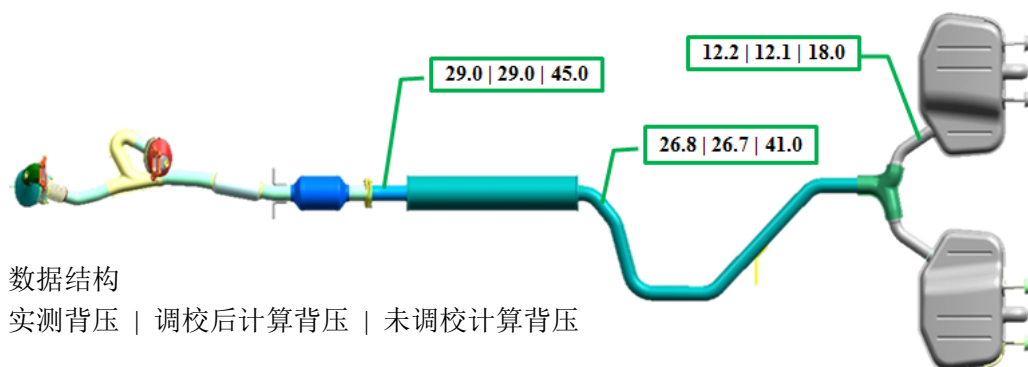


图 6 背压测量点处实测背压、调校后计算背压和未调校计算背压对比

5 尾管噪声分析

在对排气系统温度和背压分布都进行了相关调校之后，接下来可以对比排气尾管阶次噪声，图 7 给出了实测尾管噪声、调校后尾管噪声和未调校尾管噪声的 3 阶、6 阶和 9 阶曲线对比图。对于 3 阶噪声，未调校模型的第一个峰值出现在 2500rpm，与实测数据的 2600~3000rpm 有一定偏移，而调校后模型的第一个峰值出现在 2500~3000rpm，与实测数据吻合得更好。对于 6 阶和 9 阶噪声，未调校模型与实测数据存在较大偏差，相反地调校后模型与实测数据在幅度和趋势上都吻合得很好。这里需要注意的是，6 阶噪声 4500rpm 和 9 阶噪声 3500rpm 以上为气流噪声控制区，由于 GT-power 模型在计算过程中并未将气流噪声贡献量计入阶次噪声，因而在气流噪声控制区 GT-Power 模型计算结果与实测数据存在一定偏差，同时由于在高转速条件下，气流噪声占据主导地位，完全掩蔽了阶次噪声，此时通常可以忽略高转速下的高阶次噪声。

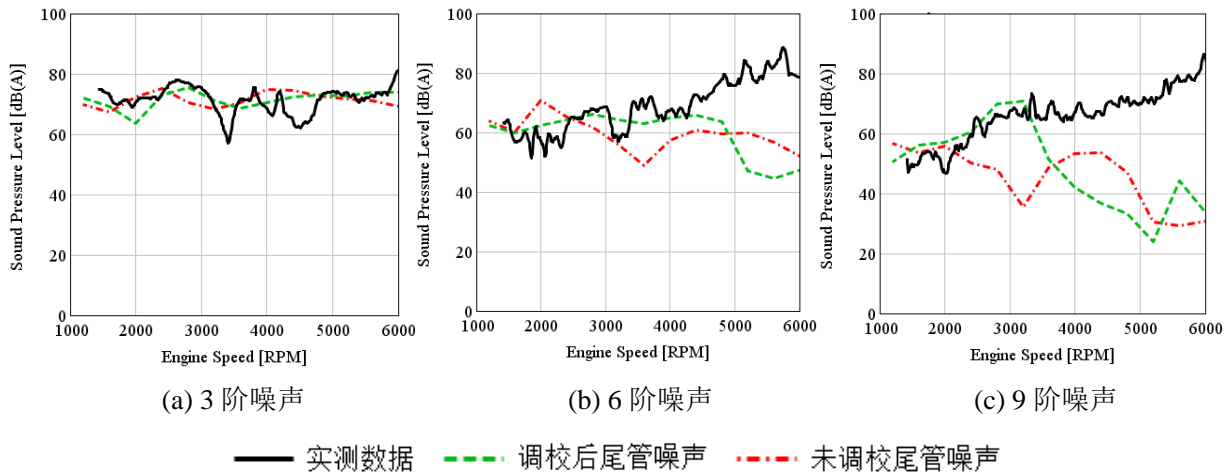


图 7 实测尾管噪声、调校后尾管噪声和未调校尾管噪声对比图

6 总结

本文以某 V6 3.6L 自然吸气汽油机车型为例，论述了基于实验测试数据，在 GT-Power 模型中进行排气系统温度和背压分布相关调校的各类参数物理意义、设置方法和常用取值区间，并将模型调校前和调校后温度和背压仿真数据与实测数据进行了比较，然后进一步检查了尾管阶次噪声仿真结果与实测结果的吻合度。结果表明，未经调校模型的温度、背压和尾管阶次噪声与实测结果均存在较大偏差，而调校后模型的温度、背压和尾管阶次噪声与实测结果吻合度均较高。由于调校后模型能较准确地预测排气系统背压和尾管阶次噪声波峰波谷位置、曲线趋势和幅值，因而可以用来进行排气系统背压分布和尾管噪声研究，大幅降低开发时间和成本。

7 参考文献

- [1] Matthew Harrison, 《Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles》, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004;
- [2] Stephen Elliott, 《Signal Processing for Active Control》, Academic Press, 2000;
- [3] 庞剑, 湛刚, 何华, 《汽车噪声与振动-理论与应用》, 北京理工大学出版社, 2006;
- [4] Gamma Technologies, 《GT-SUITE: Acoustic Application Manual》, 2012.