

基于 GT-Suite 的乘用车行驶性能综合优化

Passenger Vehicle Drive Performance Synthetic Optimization Based On GT-Suite
Software

于娟, 郑广勇, 艾小忱, 张寿凤

(重庆长安汽车股份有限公司动力研究院, 重庆 401133)

摘要:使用 GT-Suite 软件应用神经网络方法建立可靠的排放分析方法, 并引入以发动机转速为标志的整车 NVH 评价指标, 可以与动力性、经济性进行系统性的整车性能优化。考虑到工程应用的实际情况, 建立了优化结果的综合评价分析方法, 给出对应不同车型定位的优化解区域。应用这一优化方法, 可以在排放达到法规要求、经济性水平小幅恶化的条件下, 将目标车动力性各项指标提升 3-8%。同时各参数水平对结果的贡献排行可明确的指导改进某一指定性能优化的目标参数。

关键词: GT-Suite; 神经网络; Isight; 综合优化仿真

Abstract : A reliable emission analysis method is established by using GT-Suite software and Neural Network Method. The NVH evaluation index of whole vehicle based on Engine Speed. Which can systematically optimize vehicle performance with power and economy. Considering the actual situation of engineering application. A comprehensive evaluation method of optimization results is established. And the optimal solution regions corresponding to different vehicle type positioning are given. With this optimization method, the power performance of target vehicle can be increased by 3-8% under the condition that the emission meets the requirements of regulations and the economy level deteriorates slightly. At the same time, the contribution ranking of each parameter level to the results can clearly guide the improvement of the target parameters of a specified performance optimization.

Key words: GT-Suite; Neural Network; Isight; Integrated Optimization

1 前言

近年来, 随着国民经济持续稳定发展和城镇化进程加速推进, 我国汽车行业进入了快速发展阶段, 2018 年汽车保有量达到 2.4 亿辆, 且预计在今后较长一段时期内汽车保有量仍将保持增长势头。巨大汽车保有量带来的能源紧张和环境污染问题也愈加突出。为应对节能减排的严峻形势, 国家加快了节能减排法规的升级速度, 因此要求整车生产厂家一方面要做技术升级以满足日益严格的油耗和排放法规, 另一方面需要提高动力性、NVH (Noise Vibration Harshness)、成本等以适应愈加激烈的市场竞争。如何均衡各方面的性能指标要求, 做到综合性能最优, 是整车性能开发过程中面临的一大挑战。

整车性能仿真的工作起步较早, 但应用比较成熟的大多聚焦在动力性和经济性的仿真方面^[1-2], 对于排放和驾驶性、NVH 性能等的仿真研究虽然一直在进行, 但是能够达到实际工程应用的并不多^[3-6]。乘用车的排放需要在整车转毂试验台上测量, 也就是说, 能够通过试验手段对排放结果进行评价至少要在样车开发完成以后, 若排放测试不能达成目标, 对设计或匹配方案进行调整必然导致开发周期和成本增加。因此, 能够对排放和 NVH 指标建立可靠的仿真方法, 并与动力性及经济性在方案设计阶段进行系统性的综合考虑和优化就十分必要。

本文用神经网络方法建立的可靠的排放分析方法, 可以考虑发动机、车辆运行条件和催化器的转换影响, 对最终的尾管排放进行预测^[7]; 并且引入以发动机转速为标志的整车 NVH 评价指标, 与动力性、经济性进行系统性的统筹考虑, 可以对设计和匹配参数进行更全面的性能评价。优化的参数不只局限于传动方案, 而是延伸到换挡规律, 催化器参数等, 可以进一步发掘车辆的优化潜能。对于影响不同整车性能的众多参数, 给出对应于某种

性能的贡献率分析，明确改进这一特定性能的参数调整优先级。应用这一仿真优化方法，不但能够对整车的关键性能在早期进行方案设计和优化，还能够对各种性能的对应敏感参数做出定义，能够大大提高整车性能匹配工作的精准度，减少开发轮次，节省开发周期和开发成本。

2 综合优化仿真模型的建立

综合优化仿真模型是由整车性能仿真软件 GT-Suite 和多目标优化软件 Isight 耦合而成，其中 GT-Suite 软件用于模拟整车设计匹配参数对性能的影响，Isight 软件用于确定优化参数、边界约束条件及结果评价等。Isight 软件作为整个优化方针“数据调度”部分，根据设定的优化算法确定优化参数的数值，输出给 GT-Suite 部分计算整车的动力性、经济性、排放和 NVH 等性能指标，并将计算结果输出给 Isight 进行评价及判断，从而进一步根据优化算法确定参数调整方向，输出下一个轮次优化参数进行整车性能计算。

2.1 整车行驶性能仿真模型的建立

2.1.1 基础动力性、经济性模型的建立与校正

整车行驶性能仿真模型用 GT-Suite 软件搭建，主要包含动力总成模块、整车模块及变速器换挡控制模块。为了更好地反映整车动力输出的真实情况，模型中增加了控制模块，考虑加速过程 Tip-in 及扭矩响应、减速断油及自动启停（STT）等控制功能。为了反映整车排放，建立了单独的排放仿真模块，如图 1 所示。

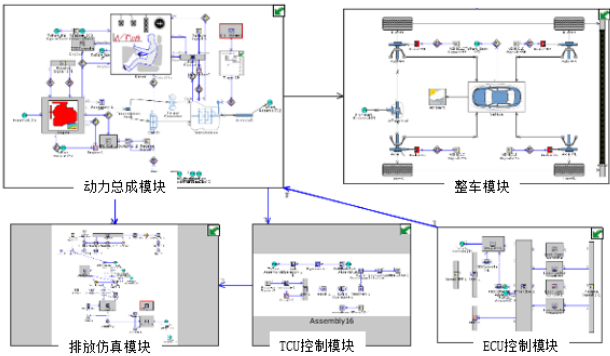


图 1 整车行驶性能仿真模型

为保证后续仿真结果的准确性，用试验结果对仿真模型进行校正，结果见表 1。

表 1 仿真与试验结果对比

数据来源	仿真	试验	相对误差/%
0-100km/h 加速时间, s	9.94	9.72	2.26
D 档 40-80km/h 加速时间, s	4.06	4.17	-2.64
D 档 60-100km/h 加速时间, s	5.52	5.77	-4.33
D 档 80-120km/h 加速时间, s	7.2	7.34	-1.91
90km/h 等速油耗, L/100km	5.65	5.89	2.32
120km/h 等速油耗, L/100km	8.54	8.68	-1.61
WLTC 油耗, L/100km	8.25	8.45	-2.37
NEDC 油耗, L/100km	7.47	7.55	-1.06

从表中的对比可以看出，重点关注的 4 项动力性结果和 4 项经济性结果与试验值很接近，误差都保持在 5%

以内，说明仿真模型能够反映整车的实际运行情况，可以保证后续优化结果的准确可信。

2.1.2 排放模型的建立与校正

应用参考文献7中所述的神经网络排放计算方法，建立整车排放仿真模型。以发动机稳态排放map为基础，用车速与动力传递关系决定的发动机运行点进行map插值可以计算出稳态排放曲线。这个计算出的排放曲线与最终的整车排放曲线存在较大差异，这种差异主要由部分过渡工况（暖机过程、催化器起燃过程、空燃比变化）及催化器催化反应情况决定的。本文中定义整车尾管排放曲线与稳态map插值得到的原始排放曲线的比值为一氧化碳（CO）、碳氢（THC）、氮氧化物（NOx）排放物的转换效率，分别用 η_{CO} 、 η_{THC} 、 η_{NOx} 来表示。

神经网络示意图如图2所示，主要为了确定过渡工况及催化器的各种影响因素对排放物转换效率的影响关系，在类似车型的已有试验数据中，取空燃比、催化器载体温度、排气温度、贵金属含量等影响因素作为输入，取三种气体排放物的计算转换效率作为输出，对确定结构的神经网络进行训练，确定输入和输出的对应关系，从而可以对整车的最终排放进行可靠的仿真预测。

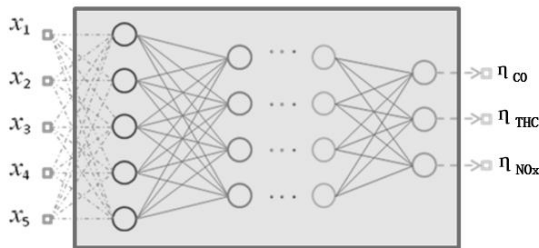


图 2 神经网络结构

排放仿真模型也要经过模型校正，结果如图3和表2所示。从图3的对比中可以看出，神经网络排放预测方法能够反映出整车排放的几乎所有特征，整个测试循环内的排放趋势与试验值吻合；表2中的排放值误差在5%以内，说明了这种排放仿真方法能够反映整车排放的真实情况，可以用于后续的整车性能优化工作。

表 2 排放物仿真与试验值对比

排放物	测试结果/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$	仿真结果/ $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$	相对误差/%
CO	216.2	225.3	-4.04
THC	13	13.5	-3.70
NOx	9.7	9.5	2.11

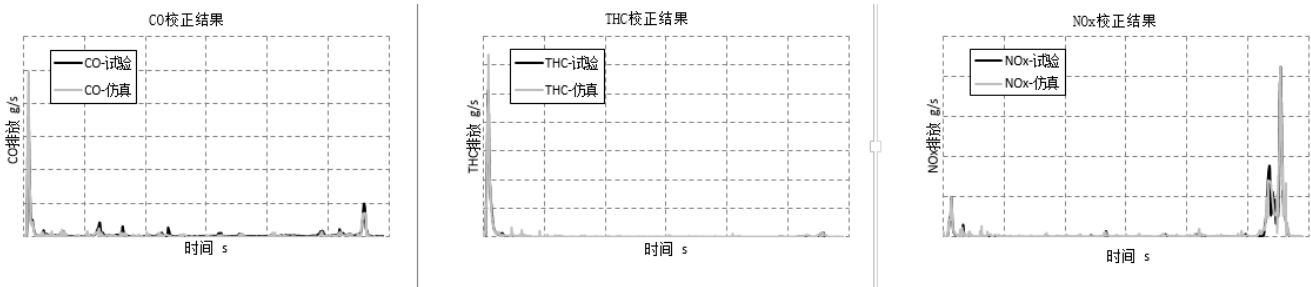


图 3 排放物仿真与试验结果对比

2.2 综合优化仿真模型的建立

综合优化仿真模型由多目标优化软件 Isight 和整车性能仿真软件 GT-Suite 耦合而成，如图 4 所示。其中的优

化计算模块确定整车性能结果的评价方法，确定优化参数、约束条件和优化算法；档位及换挡规律计算模块处理各档速比及换挡时机；排放模块、经济性模块和动力性模块实现与 GT-Suite 的数据交换，而后将计算结果输出到加权计算模块进行处理，最后输入到优化计算模块，最终根据性能指标优化方向决定下一个轮次的优化参数调整，进行新一轮的优化计算。

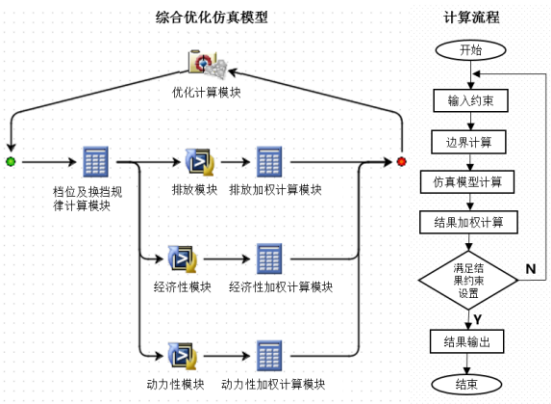


图 4 综合优化仿真模型及计算流程

2.2.1 优化算法、优化参数与约束条件

由于动力性、经济性、排放和 NVH 指标之间相互关系复杂且非线性，为了更好的寻找最优解，模型中采用多目标遗传优化算法 NCGA（Neighborhood Cultivation Genetic Algorithm）。

本文中并未对 NVH 做具体的物理建模，用最高档 120km/h 车速时的发动机转速作为反映整车在高速巡航时的 NVH 指标，并将此指标作为约束条件，在模型中设置惩罚因子，作用于动力性、经济性和排放的优化结果，参与到整车性能的综合评价中。

对确定的整车结构（车身重量、阻力、轮胎规格等）和发动机选型情况下，对整车动力性、经济性和排放影响较大的是变速器速比和换挡时机，对排放而言，除了速比变化引起的排放变化，催化器的参数也是非常重要的影响因素。所以最终确定三类优化参数：变速器速比、换挡规律变化和催化器参数。这些优化参数还受结构设计和和其他工程指标的约束，如 1 档蠕行车速、1000 转推重比、最大爬坡度、最高档爬坡能力，换挡冲击等几个方面[8-9]，根据实际情况，每个优化参数都确定出工程可行的优化空间。具体的优化参数设置见表 3-表 5。

表 3 变速器速比设置

优化参数	优化范围
12 档档间比 R12	1.65—1.8
23 档档间比 R23	1.5—1.65
34 档档间比 R34	1.35—1.5
45 档档间比 R45	1.2—1.35
56 档档间比 R56	1.1—1.25
最高档（6 档）速比 G6	0.62—0.82

表 4 换挡规律设置

油门/%	升档前转速/rpm	升档后转速/rpm
------	-----------	-----------

0	≤ 2000	≥ 750
20	≤ 2000	≥ 1000
90	≤ 6000	≥ 1000
100	≤ 6000	≥ 1000

表 5 催化器参数设置

优化参数	优化范围
催化器长度 CAT-L/mm	120—133
催化器直径 CAT-D/mm	112—124
催化器载体目数 CAT-Mesh	650—850
钯 Pd/g	1.73—1.91
铑 Rh/g	0.169—0.187

2.2.2 整车性能的处理和评价方法

对整车动力性、经济性和排放的评价并非单一指标，而是由一系列指标组合，用以反映整车不同应用场景下的性能特征。为了更加全面的反映整车的性能情况，同时也为了简化综合优化的数据传递及评价过程，对三个评价维度的 11 个指标按照实际工程开发关注程度和法规要求赋以不同的权重[10]，最终形成综合的加权指标，分别为动力性加权综合指标 P_{total} 、经济型加权综合指标 E_{total} 和排放加权综合指标 $Emission$ 。对每一项性能输出结果设定一个合理的边界约束，可以有效避免明显不符合工程实际的结果进入到优化循环，加速优化寻优计算速度。性能指标权重及约束设置如表 6 所示。

表 6 性能指标权重设置

性能指标		权重	结果约束
0-100km/h 加速时间/s	P_{0-100}	40%	≤ 11.0
40-80km/h 加速时间/s	P_{40-80}	20%	≤ 6.0
60-100km/h 加速时间/s	P_{60-100}	20%	≤ 7.0
80-120km/h 加速时间/s	P_{80-120}	20%	≤ 9.0
动力性加权综合指标	P_{total}	$P_{total}=P_{0-100}*40\%+(P_{40-80}+P_{60-100}+P_{80-120})*20\%$	
NEDC/L*100km ⁻¹	NEDC	40%	≤ 8.0
WLTC/L*100km ⁻¹	WLTC	40%	≤ 9.0
90km/h 等速/L*100km ⁻¹	E_{90}	10%	≤ 8.0
120km/h 等速/L*100km ⁻¹	E_{120}	10%	≤ 9.0
经济性加权综合指标	E_{total}	$E_{total}=NEDC*40\%+WLTC*40\%+(E_{90}+E_{120})*10\%$	
CO 排放量/mg*km ⁻¹	CO	35%	≤ 500
THC 排放量/mg*km ⁻¹	THC	35%	≤ 50
NOx 排放量/mg*km ⁻¹	NO _x	30%	≤ 35
排放加权综合指标	Emission	$Emission=CO*35\%+THC*35\%+NO_x*30\%$	

3 综合优化仿真的应用分析

应用本文描述的建模方法，对某紧凑型 SUV 车型进行整车性能的综合优化。由于优化参数对性能的影响方

向不同，不可能取得三个性能评价维度都是最优的优化参数方案，所以最终的方案确定要在 Isight 推荐的可行解集中，根据工程实际，将车型定位、市场需求及油耗排放法规等作为方案选择的依据。

3.1 综合优化结果分析及应用

Isight 的后结果处理工具会根据设定的边界条件、惩罚因子及优化算法的内部逻辑，在所有的运行解中，给出符合要求的可行解集，其参数选择和对应的结果如图 5 所示。模型推荐的最优解因更多的是出于数学算法的考虑，并不包含工程应用特征，所以这种推荐结果还需要进行进一步的工程化处理。图 5 中的信息虽然离工程实际还存在一定的差距，但通过优化参数和对应结果的变化趋势，还是可以解读出一定的参数对整车性能影响规律的信息，如六档速比 G6 不宜过高，催化器载体的长度和直径尽量选较大值等。

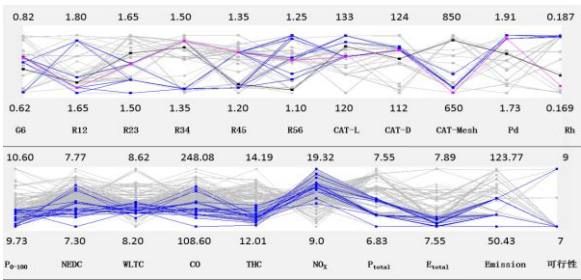


图 5 边界参数水平及优化的结果区间

通过仿真软件计算得到的推荐可行解集，需要经过进一步的工程分析，结合工程上的实际要求来确定最终的推荐配置。建立一种整车综合性能评价分析方法，对可行解进行进一步分析，以动力性综合指标作为 X 轴，经济性综合指标为 Y 轴，排放性能指标作为 Z 轴，绘制如图 6 所示的评价图，其中黑色阴影区域为不满足边界约束的结果区域。图中的等高线表示的是加权排放值，为了更加直观的表达排放风险，引入排放一致性表现的指标，即用计算值除以排放法规加权值得到的百分比，考虑到排放劣化及产品一致性，工程上通常设定 50%为排放一致性合格线。根据最终结果的动力经济性及排放表现将最优解集分为 4 个区域。区域 1 偏动力性，区域 3 偏经济性，区域 4 是动力性和经济性比较均衡的区域，区域 2 的动力性和经济性最优，但排放一致性较差，存在排放不达标风险。

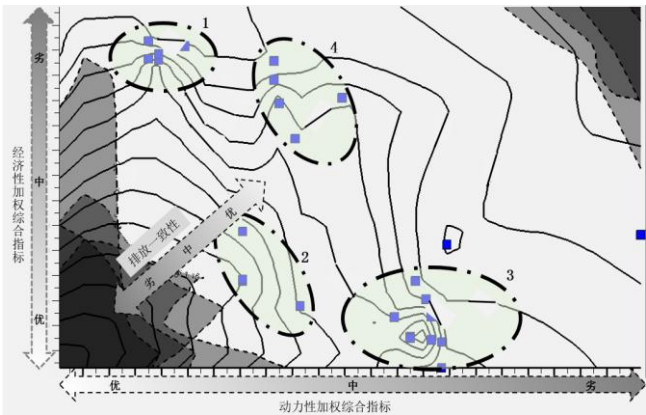


图 6 整车性能综合分析评价图

对于最终方案的选择应参考目标车型的车型定位、市场需求、油耗及排放法规要求。目标车型的四个区域的整车指标如表 7 所示，若目标车定位为倾向于动力性的 SUV 车型，面向的消费群体为追求动力及驾驶感受的年轻人，应选择区域 1 的参数配置方案；若定位在代步车，此时油耗水平成为用户选择的重点考虑因素，应选择区

域 3 的参数配置方案；若动力性和经济性要求比较均衡，可以考虑区域 2 或区域 4 的参数配置方案，区别在于区域 2 的排放裕度较小，对整车加工、装配等环节的一致性要求更高，否则有排放超标风险。

表 7 最优解集各区域性能表现

各区域性能表现	1	2	3	4
动力性加权/s	6.90	7.29	7.41	7.32
经济性加权/L*100km ⁻¹	7.79	7.69	7.61	7.75
排放一致性表现/%	42	53	42	41

对于目标车型，优化改进的目标为排放达到法规要求、经济性水平没有太大牺牲的条件下进一步改进整车动力性，所以在可行解集中区域 1 中选择参数配置方案，并进行最终的各项具体指评估，结果如表 8 所示，与原车型状态相比，经济性有很小幅度的恶化，而动力性能提升 3%-8%。

表 8 优化方案与原状态结果对比

性能表现	原状态	优化后	优化率/%
0-100km/h 加速时间/s	9.94	9.40	5.80
D 档 40-80km/h 加速时间/s	4.06	3.94	2.98
D 档 60-100km/h 加速时间/s	5.52	5.14	7.40
D 档 80-120km/h 加速时间/s	7.2	6.64	8.43
90km/h 等速油耗/L*100km ⁻¹	5.65	5.57	1.53
120km/h 等速油耗/L*100km ⁻¹	8.54	8.49	0.59
WLTC 油耗/L*100km ⁻¹	8.25	8.47	-2.55
NEDC 油耗/L*100km ⁻¹	7.47	7.49	-0.25
CO 排放量/mg*km ⁻¹	225.3	147.58	52.66
THC 排放量/mg*km ⁻¹	13.5	12.48	8.17
NOx 排放量/mg*km ⁻¹	9.5	12.26	-22.51
NVH/rpm	2322	2356	-

3.2 影响结果的参数优先级分析

影响结果的参数优先级取决于参数对于结果的贡献率。贡献率为参数变化对结果影响的百分比，即通过方差分析，改变单个参数的水平，用每个水平和其他参数的所有可能的组合对结果的影响的平均值。

通过贡献率分析可以对于不同整车性能的众多影响参数，明确给出改善某一特定性能的参数优先级。以 NEDC 油耗结果为例，在本文中设定的用于优化的结构参数中，优先级排行前几位的参数如图 7 所示。将 4 档速比作为优化 NEDC 油耗的首选参数，其后依次为 3 档及 2 档速比等。有目标性的选择优化参数可提高机车匹配工作的精准度，节省开发周期与成本。

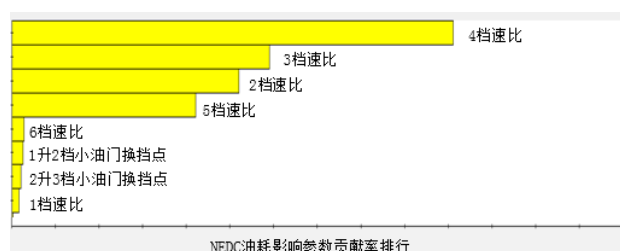


图 7 影响结果的参数优先级排序

参数对结果影响的优先级分析亦可将优化的结构参数拓展至所有影响整车行驶性能的边界参数,如车辆的整备质量、迎风面积、风阻系数及发动机性能等,得到改善某一特定性能的参数优先级后,在满足项目周期成本等限制的要求下,指导结构参数的优化来达成性能的改善。

4 结束语

本文用神经网络方法建立可靠的排放分析方法,考虑发动机、车辆运行条件和催化器的转换影响,对最终的尾管排放进行预测。并引入以发动机转速为标志的整车 NVH 评价指标,与动力性、经济性进行系统性的统筹考虑。将传动方案,换挡规律,催化器参数等作为优化的结构参数,进一步的发掘车辆的优化潜能。同时各结构参数对结果的影响优先级排行可明确的指导改进某一指定性能优化的目标参数。应用这一仿真优化方法,能够对整车的关键性能在早期进行方案设计和优化,大大提高整车性能匹配方案,减少开发轮次,节省开发周期和开发成本。

5 参考文献

- [1] 李水良,郭守峰.汽车动力传动系统参数最优化研究[J].农业装备与车辆工程,2014,52(9):5-8
- [2] 何仁,高宗英.汽车传动系最优匹配评价指标的探讨[J].汽车工程,1996(1):55-60.
- [3] 张宇.基于遗传算法的某款汽油车油耗和排放综合优化[J].湖北汽车工业学院学报,2014,28(1):18-21.
- [4] 刘宾,孙跃东.基于 GT-DRIVE 软件的汽车传动系参数对经济性和排放性的影响[J].上海理工大学学报,2014,36(6):571-577.
- [5] 刘宾,孙跃东,周萍,廖欢,王智巍.兼顾排放性的汽车动力传动系匹配综合评价指标研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(5):520-524.
- [6] 王振亚,周萍,孙跃东.考虑排放约束的汽车动力传动系的优化匹配研究[J].现代制造工程,2015,(8):47-51
- [7] 重庆长安汽车股份有限公司.一种基于神经网络的车辆气体排放物的模拟仿真系统:中国,CN201710891692.7[P].2018-01-05[2019-02-20]
- [8] 艾小忱,郑广勇,张寿凤,曾浩.基于 Cruise-Isight 联合仿真的乘用车变速器速比优化[J].机械传动,2018,42(2):90-94
- [9] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [10] GB18352.6-2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》