

基于电机热管理系统的新能源汽车能量管理优化

严瑜 王利希
上汽集团创新研发总院

摘要：随着新能源汽车的发展，“三电”系统逐渐取代传统发动机动力系统。电动化的发展趋势对热管理技术提出了更高的要求。本文基于电机电驱系统的热管理要求，通过调整电子水泵占空比和进气格栅叶片攻角的开度控制策略，尽可能满足低温冷却回路热管理需求的同时，减少整车能耗、增加续航里程。

关键词：电机热管理系统；能量管理；电子水泵；主动进气格栅

Abstract: With the development of new energy vehicles, "Battery-Motor-Electric Control" system has slowly replaced the traditional engine powertrain system. This electrification trend has raised higher requirements for thermal management technology. Based on the thermal control requirement of the electrical drive system, this paper adjusts the control maps of Electrical Water Pump(EWP) and shatter angle of Active Grill System(AGS), with the purpose of satisfying heat management requirement, and also reducing the energy consumption of electrical vehicle、extending driving range.

Keywords: motor heat management system; energy management; EWP; AGS

1. 前言

随着纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池动力汽车等新能源汽车的迅速发展，新能源汽车的续航里程成为车企造车的首要目标。

传统新能源汽车的热管理系统面临占用空间大、冷却效果差、能耗大的问题，因此新能源汽车热管理系统的优化变得尤为关键。在满足整车热管理安全的前提下，进一步优化热管理系统的控制策略可以减少整车能耗、增加续航里程。

从热交换角度，整车热管理是统筹各热管理子系统在最佳温度区间运行，确保车辆安全行驶。对于新能源车型，整车的热管理系统除了乘客舱供暖及制冷回路，主要是“三电”部件的热管理集成，如动力电池系统的散热及加热回路、电机电控系统的冷却回路、其他大功率电器元件的冷却回路等。

2. 新能源汽车构型介绍

本文使用一款纯电车作为试验车辆来分析 AGS 开度对整车电耗的影响，具体参数见表 1。

表 1 试验车辆参数

项目	参数
----	----

整备质量 (kg)	1695
主减速比	11.14
轮胎半径 (mm)	225
风阻系数 ($F=A+BV+CV^2$)	$A=142.59;$ $B=0.5639;C=0.0265$

使用 GT-SUITE 搭建该试验车的物理模型，如图 1，包括电池、电池控制单元、制动控制单元、DC-DC、低压电池、驱动电机、驾驶员模块、整车模块等。

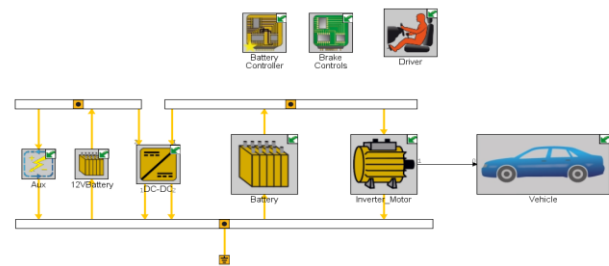


图 1 GT 搭建的试验车物理模型

为了验证该物理模型的可靠性，需核实该物理模型是否可以按照目标的 CLTC 车速进行仿真。将该实验车的相关参数输入物理模型后，计算该实验车在 CLTC 工况下的运行情况，如图 2 所示。由仿真可知，该试验车搭建的物理模型可以很好的跟随 CLTC 的目标车速。因此，本文使用图 1 物理模型进行后续的整车电耗计算。

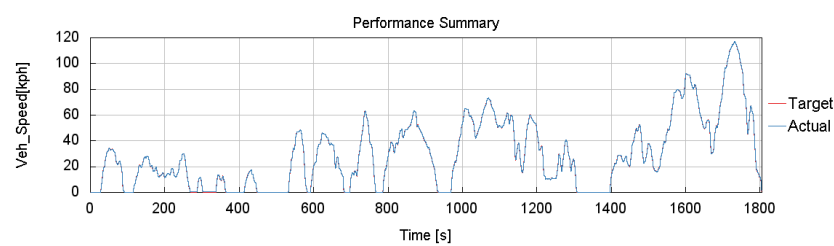


图 2 CLTC 工况下试验车的车速跟随情况

3. 电机热管理系统

作为新能源汽车的主要驱动源，电机电控系统工作时对散热需求较大，因而对新能源汽车续航里程的影响也较大。

为增加新能源汽车的续航里程，电机系统能在最佳温度工况区内安全高效运行显得尤为重要。因此，在满足电机电驱系统的热管理前提下，优化新能源汽车的能量管理策略能尽可能减少整车热管理能耗，进而增加新能源车型的续航里程。

电机热管理系统的散热通常需要主动冷却，如利用冷却液进行热传导、通风换气进行热对流等，故本文使用的电机冷却系统的主要部件和连接方式如图 3 所示，该低温回路系统的冷却集成器件主要包括水泵、水箱、低温散热器、电机电驱系统等。

其中，水泵使用的是电子水泵（Electrical Water Pump，EWP），不仅可以将冷却液从低处泵到高处，还可灵活调节占空比大小来控制冷却液流量。低温散热器使用的是主动进气格栅（Active Grill System，AGS），通过调节 AGS 叶片攻角度数，即开度来调整进风量，从而达到热对流散热。

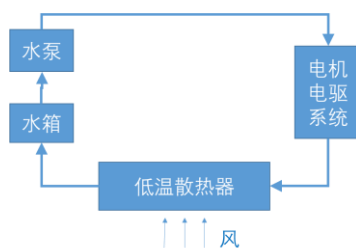


图 3 低温冷却回路原理图

在新能源汽车中，电机低温冷却回路的工作原理是，一方面通过调节 EWP 占空比改变管路中冷却液流量。与环境散热，EWP 开度越大、水端流量越大、散热效果越好，但 EWP 能耗也相应增大；另一方面通过调节 AGS 开度实现电机与外界环境的热交换。增加 AGS 开度，虽然加大了热对流面积，但却增加了整车风阻，导致整车能耗变大。

因此，如何合理组合优化 EWP 和 AGS 开度大小，使得在满足散热前提下，整车风阻尽量小、EWP 能耗尽量低成为本文的研究重点。

4. 基于 EWP 和 AGS 开度控制的电机热管理系统优化

4.1 电机冷却水泵

4.1.1 EWP 结构及工作原理

水泵是汽车冷却系统的重要部件，其主要作用是驱动冷却液循环、帮助汽车各发热器件散热，防止零部件过热失效[1]。

电子水泵主要由电子控制单元（ECU）、控制器、叶轮、电机总成、转子等组成，如图 4 所示。ECU 可根据水温、扭矩、转速、油压等反馈信号，通过脉冲宽度调制（PWM）调节 EWP 占空比。EWP 控制器根据占空比大小控制电机驱动叶轮和转子转动，以实现冷却液的传输和循环[2]。

与传统的机械水泵相比，电子水泵有较多优点，如冷却液流量的控制精度高、耗能低、冷却效果好等。



图 4 水泵结构图

4.1.2 EWP 开度对整车能耗的影响

作为整车热管理的关键部件，EWP 对电机电驱系统安全运行、降低能耗等方面有重要影响。

通过预先设定的策略，EWP 可根据输入信号精确输出占空比信号来控制冷却液流量。从理论上说，在电机系统温度上升时，尽快打开 EWP 开度能及时帮助电机电驱系统散热，但这样的控制策略增加了 EWP 功耗和热管理时的整车能耗。

因此，单一考虑 EWP 大小会影响热管理效率，增加新能源车辆的电耗。在电机电驱热管理系统中，EWP 开度控制策略必须联系 AGS 开度控制策略才能达到最优的热管

理效果。

4.1.3 EWP 开度控制的优化策略

为了与 AGS 开度一起灵活调控电机控制系统，本文设计了两种 EWP 开度控制表与 AGS 控制策略相结合，如表 2 和表 3 所示。本文对 EWP 的控制策略仅考虑入水温度作为单一的控制因子，在实车上 EWP 开度大小还与电机内部温度、转速[3]、扭矩等其他因素有关。

表 2 EWP 水温-开度表 A

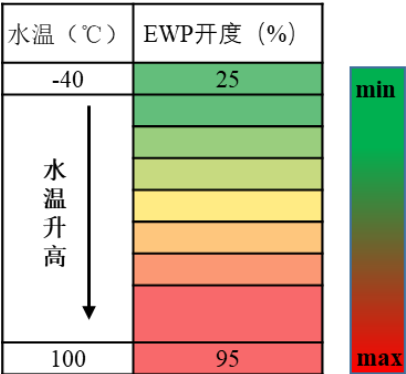
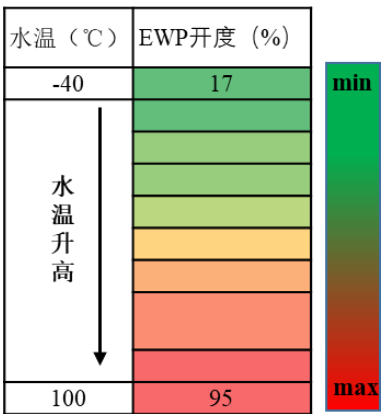


表 3 EWP 水温-开度表 B



由表可知，两种 EWP 水温-开度表的水泵开度都随着水温上升而增加。两表的区别是，在同一水温输入值下，表 A 的 EWP 开度比表 B 大；当 EWP 进口水温逐渐上升时，表 B 中 EWP 打开的速度也较表 A 晚。

4.2 主动进气格栅（AGS）

4.2.1 AGS 结构及工作原理

AGS 可根据前端冷却模块及发动机暖机需求精确调节进气格栅开度，改善机舱进气流量，帮助快速达到最佳工作温度，故又可称为可变格栅、智能格栅。

AGS 一般布置在车辆前保格栅和冷却模块之间，基本装置如图 5 所示，主要包括传感器、控制系统、散热器和格栅总成三部分[4]。

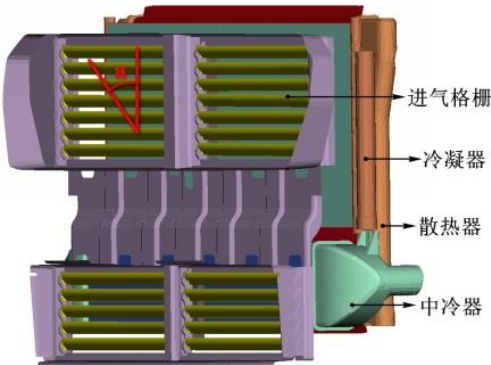


图 5 AGS 结构及格栅叶片攻角定义[5]

传感器可测量冷却液和环境温度、车速、空调和风扇状态等信息；控制系统可以根据传感器测量的数据，使用控制电机实现进气格栅叶片开口的控制[6]；进气格栅叶片

为百叶窗结构。

AGS 开度变化与其叶片攻角变化趋势相反。AGS 叶片全部开启对应叶片攻角 0° ，AGS 叶片关闭对应叶片攻角 90° [7]。AGS 是传统汽车前进格栅的更新迭代，保证车辆足够动力性的前提，进一步提高燃油和电耗的经济性。

4.2.2 AGS 开度对整车能耗的影响

AGS 开度变化对整车空气阻力、整车热性能、空调性能、整车能耗有重要影响。图 6 是瞬态下不同 AGS 开度的散热器风速变化曲线。蓝色、橙色、紫色曲线分别代表 AGS 叶片攻角 0° （全开）、 50° 和 20° 下的风速曲线。AGS 全开时，散热器进风速度随车速及其随车速的变化量都较大。AGS 半开时，进风速度较小，风速随车速变化幅度也较小。由于不同 AGS 开度下，散热器进风速度变化较大，整车行驶过程中所受风阻也随 AGS 开度变化而变化。

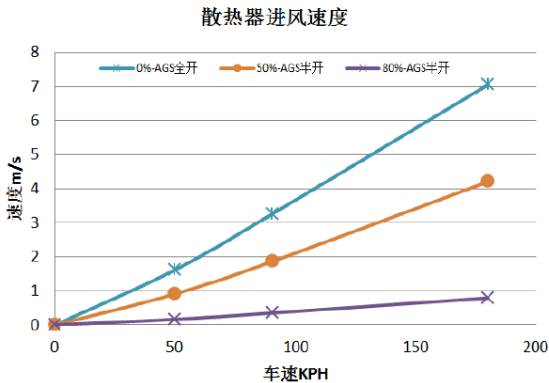


图 6 不同 AGS 开度下散热器进风速度变化

为了分析 AGS 开度对整车行驶阻力的影响，本文测量了 0° 至 90° 的 AGS 开度下的风阻系数（表 4）。不同开度下的阻力系数大致趋势是，随着 AGS 开度变大，整车阻力系数 A 和 B 不变、系数 C 越大。因此，AGS 开度对整车行驶阻力的影响较大，AGS 开度越大，整车风阻越大。

表 4 不同 AGS 开度下的风阻系数表

AGS叶片攻角	A	B	C
0° (全开)	保持不变	保持不变	max
攻角变大			
90° (全关)			min

在车辆行驶中，调节 AGS 格栅叶片攻角可以改变整车能耗。在汽车冷启动时，关闭 AGS 格栅可减少进入机舱的冷却风量来提高发动机暖机速度、减少在暖机时的油耗。当动力系统温度较高时，全开 AGS 叶片攻角则会带走多余热量。对于空调制冷系统，调节 AGS 叶片开度也可帮助乘客舱更快达到需求温度、减少整车能耗。当乘客需要制冷时，可适当增加 AGS 开度提高冷凝器与外界的热交换量，

进而帮助降低温度；

因此，增加 AGS 开度可以增强前舱散热能力，但也加大了整车行驶的风阻系数、增大了内循环阻力、增加了整车能耗；减小 AGS 开度可以减小整车行驶阻力、降低了整车能耗，但却减少了前舱换热量、降低了电机电驱系统的冷却效率。

4.2.3 AGS 开度控制的优化策略

为了与 EWP 控制策略相结合，本文设计了两种 AGS 开度控制表，如表 5 和表 6 所示。红色 AGS 全关，绿色 AGS 全开。

表 5 AGS 叶片攻角（开度）表 C

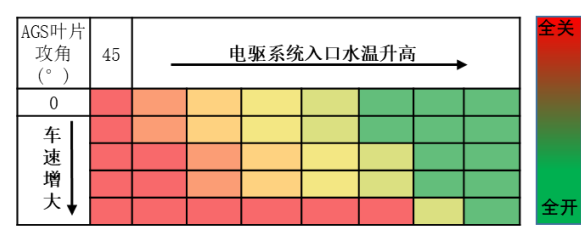
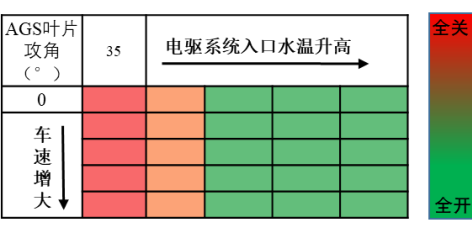


表 6 AGS 叶片攻角（开度）表 D



两表的相同点是，随着水温上升两种控制策略的进气格栅叶片攻角都逐渐减小、AGS 开度逐渐增大。而区别是表 D 中 AGS 开度变化不随车速变化；为了减小风阻，表 C 的控制策略中进气格栅叶片攻角随着车速增加逐渐增大、AGS 开度随着逐渐减小。

因此，在同一水温下，表 D 控制下的 AGS 开度较表 C 大。而且随着电驱系统入口水温上升，表 D 的 AGS 打开时间较表 C 早。

5. 仿真分析

5.1 边界输入

当前我国轻型车排放和油耗认证处于 NEDC 和 WLTC 并行，CLTC 逐步导入的特殊时期[8]，因此整车电耗分析有必要研究 CLTC 工况。

在 CLTC (China Light-Duty Vehicle Test Cycle, 中国轻型汽车行驶工况) 下，需满足的冷却系统需求是，水温在 45-52℃，且水泵平均低压功耗低于 12W。同时，通过调节 EWP 和 AGS 开度控制策略，还需实现电耗降低、续航里程提升等目标。

5.2 控制策略

为了综合考虑 EWP 和 AGS 对电机热管理系统的影响，找到最优的热管理控制策略，本文将两种 EWP 控制策略和两种 AGS 开度控制策略相结合，如图 7 所示。

5.3 EWP 能耗分析

在 CLTC 工况下，使用 EWP 开度表 A 和 B、AGS 开度表 C 和 D 相结合来计算某电车的电子水泵能耗和进口温度变化，结果如图 7 所示。一共有六种开度搭配，EWP 表 A 加无 AGS 开度、EWP 表 A 加 AGS 表 C、EWP 表 A 加 AGS 表 D、EWP 表 B 加无 AGS 开度、EWP 表 B 加 AGS 表 C、EWP 表 B 加 AGS 表 D。不论 EWP 策略如何变化，无 AGS 的水泵功耗都比有 AGS 的功耗低。

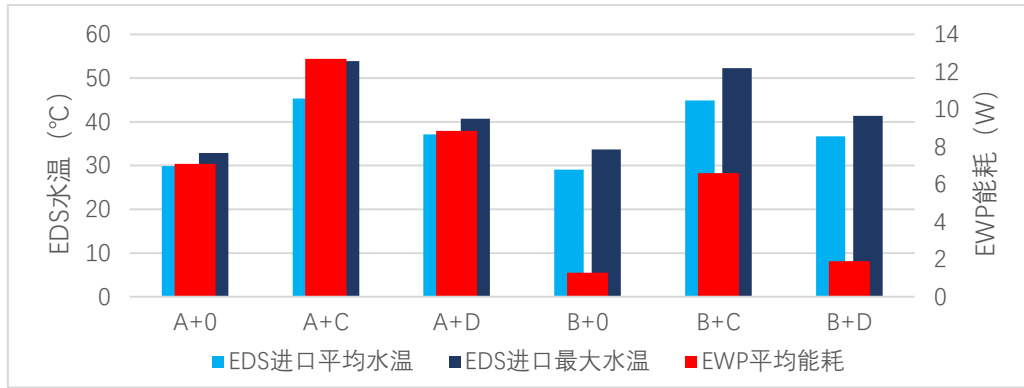


图 7 基于不同 EWP+AGS 开度表的 EWP 能耗和 EDS 温度计算结果对比

在 AGS 开度策略一定的前提下，EWP 开度表 B 控制下水泵的平均能耗和进口水温都较表 A 控制的有所下降。与 AGS 开度表 C 加 EWP 开度表 A 的控制策略相比，表 C 加表 B 的控制策略下电子水泵平均能耗从 12.7W 降到 6.6W，进口平均温度从 45.3°C 降到 44.86°C。与 AGS 开度表 D 加 EWP 开度表 A 的控制策略相比，表 D 加表 B 的控制策略下水泵平均能耗从 8.85W 降到了 1.9W，进口平均温度从 37.1°C 降到 36.7°C。

在 EWP 开度策略一定的前提下，主动进气格栅开度表 D 控制之后，水泵的平均能耗和进口水温也都较表 C 控制的有所下降。EWP 开度表 A 控制下，与 AGS 开度表 C 相比，使用 AGS 开度表 D 策略后电子水泵平均能耗从 12.7W 降到 8.85W，进口平均温度从 45.3°C 降到 37.1°C。在 EWP 开度表 B 控制下，与 AGS 开度表 C 相比，使用 AGS 开度表 D 策略后水泵平均能耗从 6.6W 降到了 1.9W，进口平均温度从 44.86°C 降到 36.7°C。

综上，EWP 开度表 B 与 AGS 开度表 D 的控制策略优化效果较好。在这两种策略相结合下，EWP 晚开且 AGS 早开、EWP 开度较小且 AGS 开度较大，此时 EWP 的平均能耗和进口温度都有所下降。

5.4 整车电耗分析

在整车电耗仿真计算时，本文选取 AGS 叶片攻角 10°、60°、80°和 90°（全关）来计算试验电车的百公里电耗，具体仿真步骤如下。

首先，依据表 4 查出不同开度下的风阻系数；其次，将风阻系数分别输入 GT 模型中；最后，使用 GT-SUITE 计算试验车在 10°、60°、80°和 90°的 AGS 开度下的百公里电耗。四种 AGS 叶片开度下的整车电耗的计算结果如图 8 和图 9 所示。

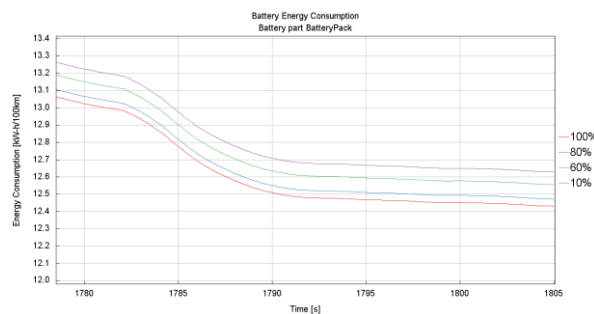


图 8 不同 AGS 叶片攻角下试验车电耗变化曲线:10°； 60°； 80°； 90°

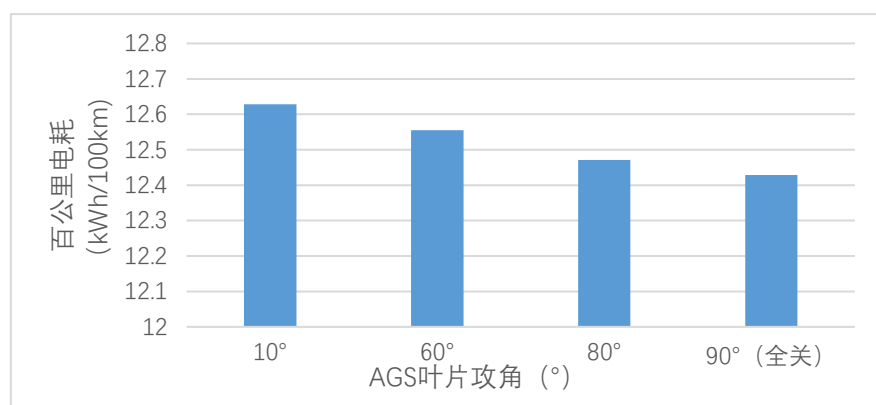


图 9 不同 AGS 叶片攻角下百公里电耗值:10°; 60°; 80°; 90°

经过 GT-SUITE 的仿真计算, 当 AGS 叶片攻角为 10°、60°、80°、90°时, 该新能源试验电车百公里电耗分别为 12.628kW-h/100km、12.555kW-h/100km、12.471kW-h/100km、12.429kW-h/100km。由于整车风阻系数 C 随着 AGS 叶片开度增大而增大, AGS 叶片攻角度数较小时, 整车电耗较大。

因此, 在新能源汽车能量管理优化过程中, 需要平衡 EWP 相关的低压电耗和 AGS 对整车高压电耗的影响, 电机电驱系统的热管理效果和整车电耗才能同时优化到最佳。在保证电机热管理系统达到散热效果前提下, 考虑优化 AGS 开度来降低整车能耗。

6. 结论

为增加新能源车型的续航里程, 提升新能源汽车的“三电”系统热管理效率是能量管理优化的重要内容。

本文就其中的电机电驱系统的热管理效率展开研究。经过多次仿真试验发现, 电机电驱系统的热管理效率与 EWP 开度和 AGS 开度的控制策略紧密联系, 具体结论如下:

- 1) 从电机电驱系统热管理优化角度, 在 EWP 晚开且 AGS 早开的控制策略下, EWP 的平均能耗和进口温度都较小。
- 2) 从整车能耗优化角度, 在 EWP 早开且 AGS 晚开的控制策略下, 试验电车的整车电耗较小。
- 3) 统筹考虑电机低温回路热管理系统和整车电耗后, 使用本文提出的 EWP 开度表 A 来控制 EWP 占空比、AGS 开度表 C 来控制 AGS 叶片攻角度数, 整车的热管理效果和百公里电耗都较为理想。

7. 参考文献

- [1]张松,于萍,席洪亮,等. 浅谈汽车发动机电子水泵作用及其失效[J]. 汽车电器, 2021(09): 62-63.
- [2]冯天昱,方存光.车用电子水泵国内外发展综述[J]. 汽车实用技术, 2017 (22): 3-4
- [3]刘传波,张若楠,段茂,等.汽车进气格栅角度与冷却风扇转速的匹配研究[J]. 汽车工程, 2019, 42 (4): 388-394.
- [4]谢月凤.某车型主动进气格栅优化设计[D]. 湖南大学, 2018.
- [5]张涵,韦流权,刘康,占魁. 某 MPV 车型进气格栅开口角度的仿真分析[J]. 汽车科技,2019(05):28-32.

[6]杨彬. 基于 CFD 的汽车主动进气格栅匹配与仿真分析[D].合肥工业大学,2018.

[7]刘传波, 刘康, 占魁, 等.汽车主动进气格栅开启角度的匹配优化[J]. 机械设计与制造, 2021(9):160-167.

[8]罗长亮, 郭晓鑫, 马毅, 等.不同工况循环下的轻型汽车排放和油耗特性研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2019,48(6):1-5.