

引文格式:

瞿磊兴, 罗巍, 邵俊, 等. 基于共振原理的节油器设计及应用 [J]. 集成技术, 2024, 13(1): 19-29.

Qu LX, Luo W, Shao J, et al. Design and application of fuel saver based on resonance principle [J]. Journal of Integration Technology, 2024, 13(1): 19-29.

基于共振原理的节油器设计及应用

瞿磊兴¹ 罗巍^{1*} 邵俊² 刘闫龙³

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(北京璞墨科技有限公司 北京 100005)

³(南京师范大学 物理科学与技术学院 南京 210023)

摘要 该文设计了一款基于共振原理的节油器, 该产品为物流企业、运输车队、个体车主量身定制, 是一款高效节油的外挂型节能设备。针对如何提高发动机的热效率和减少燃料损失, 该文基于波能和共振原理提出了一种脉冲技术和自矢量复位技术, 旨在提高燃烧效率。经主流品牌车辆测试, 其节油效率结果显示, 在 1 500~3 500 km 的测试区间, 各品牌车辆的燃油效率均得到有效提升 (6.15%~11.16%), 最高可达 11.16%, 每 100 km 的节油量最高为 3.29 L。与此同时, 基于设计原理的理论分析可知, 在一定的适应周期后, 节油效率会逐步提高, 最终达到稳定最佳值。

关键词 节油; 共振; 燃烧效率; 脉冲

中图分类号 U 467.1 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20230703001

Design and Application of Fuel Saver Based on Resonance Principle

QU Leixing¹ LUO Wei^{1*} SHAO Jun² LIU Yanlong³

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(Beijing Pumo Technology Co., Ltd., Beijing 100005, China)

³(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

*Corresponding Author: wei.luo@siat.ac.cn

Abstract This is an efficient fuel-saving product based on the resonance principle, which is an external energy-saving device customized for logistics companies, transportation fleets, and individual vehicle owners. The product is designed to address the issues of improving engine thermal efficiency and reducing fuel losses. Based on the principles of wave and resonance, a pulse technology and self-vector resetting technology are proposed to improve the combustion efficiency. Mainstream brand vehicle tests have shown that the fuel efficiency of various brand vehicles has been effectively improved (6.15%~11.16%) in the testing range of 1500~3500 km, with

收稿日期: 2023-07-03 修回日期: 2023-09-19

作者简介: 瞿磊兴, 高级工程师, 研究方向为通信工程、控制理论与工程; 罗巍(通讯作者), 高级工程师, 研究方向为生物能源和工程生物学, E-mail: wei.luo@siat.ac.cn; 邵俊, 工程师, 研究方向为电磁场与电磁波; 刘闫龙, 硕士研究生, 研究方向为应用物理。

the highest reaching 11.16% and the highest fuel saving per 100 kilometers being 3.29 liters. At the same time, theoretical analysis based on the design principle shows that the fuel-saving efficiency will gradually improve and eventually reach a stable optimum value after a certain adaptation period.

Keywords fuel saving; resonance; combustion efficiency; pulse

1 引 言

随着全球汽车数量的不断攀升, 燃油资源、环境污染和人类出行的刚性需求等各个方面的矛盾愈发凸显。与此同时, 太阳能、风能等替代资源的局限性和不确定性导致其目前还不能被规模应用。因此, 如何提高汽车燃油效率是人类亟待解决的关键问题之一。

汽车在高速行驶时, 内部产生电能。累积的电能形成电磁场, 并在金属内部产生涡电流。涡电流形成的闭合电路在金属内部产生热量, 而正是这种热量对汽车内部的机械运动产生一定程度的阻碍作用, 并因此消耗部分燃油, 使汽车燃油的燃烧效率降低, 增大汽车燃油油耗。

汽车发动机的机械运动很大程度依赖于燃油等含碳燃料释放的能量。含碳燃料中的碳与氧气结合, 瞬间产生能量。而汽车燃油由于在气缸内的燃烧时间较短, 导致燃料燃烧不充分, 即燃烧比较低。因此, 提高燃烧比是提高汽车发动机输出和节省燃油的关键。

目前, 国内外许多专家和学者针对节油需求做了大量研究。大多研究集中在内燃机内部结构的优化和燃料物质的替换上。姚春德等^[1]研究了发动机在不同转速与负荷下, 柴油/甲醇二元燃料的燃烧特性。结果表明, 缸内压力在中低负荷时, 燃烧呈单峰快速放热; 在高负荷下, 预混燃烧比例有所提高。彭璐^[2]、Anvari 等^[3]、刘振明等^[4]、刘楠等^[5]、张俊红等^[6]提出通过以三维建模的方式进行仿真模拟, 对喷油嘴的喷孔直径进

行调整, 研究空化现象、湍流脉动等因素对燃油喷射特性的影响, 从而改善燃油的雾化效果, 达到改善燃烧率的目的。Lan 等^[7]基于废热回收技术对轻型车辆发动机进行改进, 提出了一种新型的 TEG-ORC 系统, 最高可达 4.43% 的节油率。Dolatabadi 等^[8]提出了一种用作钢气缸套表面替代材料的镍纳米复合材料和类金刚石碳涂层, 改善了活塞环的摩擦学性能, 减少了边界摩擦带来的损失, 提高了燃烧率, 但忽略了其他不稳定因素, 并且未给出准确的节油结果。杨坤等^[9]利用三维模拟软件 converge 对单缸发动机进行建模, 并用 GT-Power 软件进行数据设定, 采用喷油器分段喷射, 并调整喷油角度, 通过 3 次喷射可进一步改善缸内油气混合和燃烧过程。张耀飞等^[10]、Hagen 等^[11]通过调整喷油器中针阀的相应速度来减少燃油耗用, 一方面, 针阀迅速开启有利于前期多喷油, 另一方面, 针阀快速关闭有利于快速断油, 改善喷射后期因温度降低燃油过多造成的燃烧恶化, 最终达到通过改善喷油器响应速度, 优化改善燃油雾化性能和共轨系统喷射特性的目的。王利民等^[12]研究表明, 当采用天然气-汽油双燃料燃烧模式时, 低负荷固定转矩工况下的发动机随着天然气流量的增加, 最高燃烧压力逐渐提高; 中等负荷固定转矩工况下的燃烧特性变化规律与低负荷工况基本相同; 在高负荷节气门全开工况下, 尽管发动机的最大转矩有所下降, 但爆震起点和强度得到有效抑制, 燃烧相位也明显改善。李海娟等^[13]采用燃用氢气替换燃用汽油作为燃料时,

燃烧速率明显提升, 燃烧持续期显著缩短, 有效热效率有所降低, 且 NO_x 排放有所升高, CO 及总碳氢 (THC) 排放均明显降低。该方法通过提高过量空气系数有助于改善有效热效率水平, 但仍存在由部分润滑油参与燃烧产生的未完全燃烧产物组分。杨晨等^[14]研究不同比例聚甲氧基二甲醚 (PODE) 与柴油混合燃料的燃烧颗粒粒径分布规律, 结果表明, 聚甲氧基二甲醚的十六烷值和含氧量较高, 加速燃烧的同时也利于对扩散燃烧期形成的碳烟颗粒进行进一步氧化。陈东东等^[15]采用不同的能量管理策略, 在标准循环道路工况下, 对 P1~P4 构型的混动汽车进行了数值仿真计算, 分析不同构型汽车的节油率。结果显示, 与 P2 构型相比, P1、P3、P4 构型的混合动力汽车每 100 km 的油耗平均节省 0.94 L、1.96 L 和 1.62 L, 平均节油率分别为 4.39%、10.09% 和 7.57%。

与此同时, 部分学者通过安装节油器等外置设备提高节油率。刘兵等^[16]采用了一种电控增能节油器进行节油性能实验, 实验结果显示, 使用该节油器的样车在城间、市区、快速运输 3 种模式下, 均比原车具有 2.58%~3.91% 的节油效果。房熊等^[17]在渔业船舶行业利用了一种新型量子节油器进行实验, 实验结果表明, 安装节油器后, 船舶最高可达 9.1% 的节油率。

综上所述, 目前, 围绕外置节油设备的研究均达到了一定的节油效果。然而, 针对节油需求, 目前, 国内外的大多研究都集中在内燃机改进、燃料替换, 以及基于发动机物理构造改进或提升的节油器等方面。但是, 燃料颗粒之间的吸引力, 即燃料化学极性分子之间的联结才是导致燃料燃烧效率下降的主要原因。因此, 本文基于共振原理, 设计并开发了一种节油器产品。该节油器通过合成基本粒子, 降低燃油分子之间的黏性, 提高燃料的燃烧效率, 从而达到节油目的。与此同时, 本文给出该节油器的有效性和可靠性测试结

果。本产品的应用既能在减少污染、节约资源等方面有较好的社会效益, 又能有效降低汽车、船舶、航空等产业的成本, 具有客观的经济效益。

2 原理

2.1 涡电流——燃料损耗原因之一

在汽车燃料的消耗占比中, 约 35% 的燃料由摩擦和机械消耗, 约 35% 的燃料因排气废热而损失, 又有 15% 的燃料用于动力传动摩擦力, 即实际用于车辆移动的燃料不足 15%。相关研究表明, 机械损耗的一个重要原因是汽车内部形成的涡电流。

汽车是一个复杂的机电产品, 包含很多电气设备, 如点火系统、发动机系统、发电机系统等。在汽车发电系统中, 发电机发电的根本原理是皮带带动转子高速旋转产生旋转磁场, 并产生电压, 经整流后, 输出供给整车电器。而汽车内, 通电的、高速运动的导体内部会构成闭合回路, 在磁场中做切割磁感线的运动时, 会产生感应电动势, 进而产生感应电流。这些电流在导体内自行闭合成旋涡状, 故称涡电流, 简称“涡流”。

涡电流的生成是一种电磁感应现象。法拉第电磁感应定律表明了电磁感应中电动势和磁通量之间的关系, 如公式 (1) 所示。其中, ε 为电动势, $\Delta\Phi$ 为磁通量的变化量, Δt 为时间变化量。弗莱明定律则明确了导体在磁场下移动时所产生的电流方向, 如图 1 所示。

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1)$$

楞次定律表明, 感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。因此, 发电机转子运转时, 会因涡电流的影响而受到很大的阻力。这个阻力反作用于发动机曲轴, 对发动机的运转产生阻滞作用。综上所述, 涡流的产生增加了发电机的消耗功率, 即增加了汽车的燃油消耗。

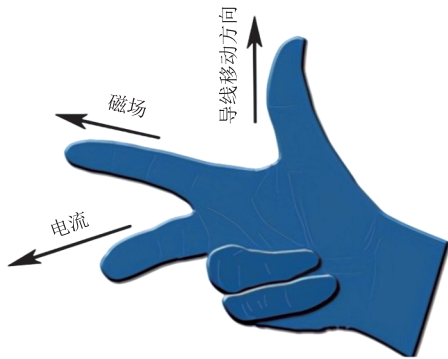


图 1 弗莱明定律

Fig. 1 Fleming's law

涡电流还有可能导致电气设备的短路。随着汽车行驶速率的增加，转子中产生的涡电流及累计的电位差将快速提升，异常放电的风险将增加，可能损坏车辆芯片及电路。由于现代汽车大多是由电子设备和软件控制的，因此，由涡电流引起的这些问题不容忽视。

2.2 波形与振动

分子是组成物质并保持物质化学性质的最小微粒，分子是由原子组成的，原子是由非常小的粒子组成的。一般情况下，分子保持旋转和循环往复振动，这些振动按力的相互平衡表现为各种复杂形式，图 2 为单分子运动示意图。气体分子和液体分子之间的吸引力较小，它们的自由移动和振动是不规则的。与气体分子相比，液体分子排列相对紧密。

在特定的频率和波长下，分子将以更大的振幅做振动，称为共振现象。在共振频率和共振波

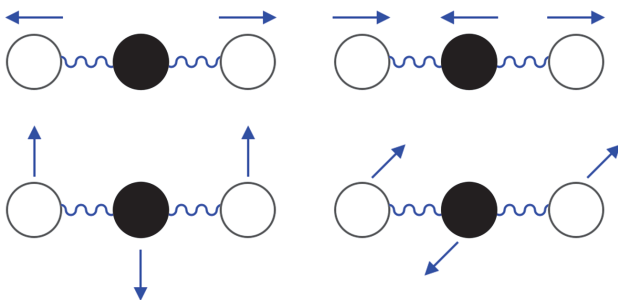


图 2 单分子运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single molecule motion

长下，很小的周期振动便可产生很大的振动，因为系统储存了动能。当振动的物体带动它周围的物质一起振动，就产生了波，通过组合两个或更多不同共振所产生的新波被称为共振波或复合波，如图 3 所示。

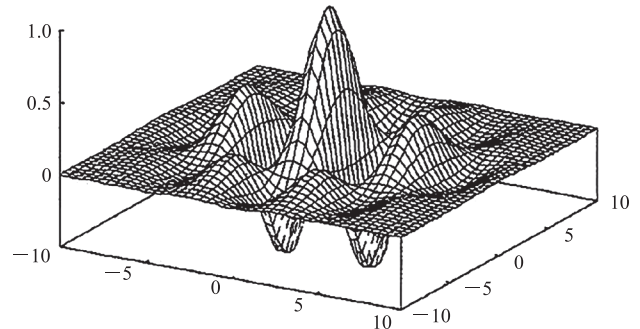


图 3 复合波

Fig. 3 Composite wave

在原子运动模型中，如图 4 所示，有一个旋转的原子核，并有几个电子围绕着原子核旋转，它们以非恒定的速度高速旋转。由于电子间的斥力和旋转力，其内部具有较强的电磁场特性，且振动模式非常复杂，这被称为物质的自然振动，其对应的频率称为自然频率，即指一个系统在没有外力或是阻尼的情形下，会倾向于振荡的频率。

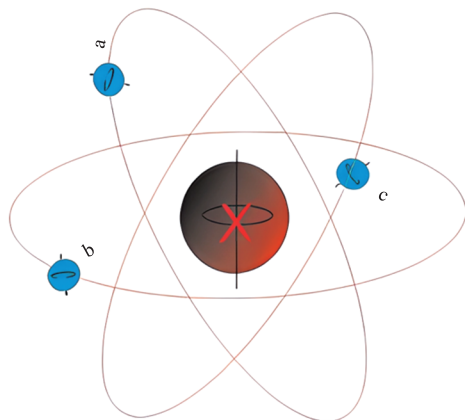


图 4 原子运动模型

Fig. 4 Atomic motion model

分子和原子均可称为粒子。物质的自然频率基本上是从粒子的振动开始的，但是它的振荡模式非同寻常，取决于粒子结构。以铀、钚等为例，其特定的原子结构和振荡模式将释放出特定

的辐射。如果采用合适的震荡模式, 如共振, 则会产生有利的效果。例如: 微波炉通过与水分子产生同频共振来产生热量, 使水加热; 在医学中, 使氢原子在强磁场内受到电磁波脉冲的激发, 产生核磁共振现象, 将核磁共振信号通过计算机进行数据处理, 并转换成图像, 以辅助诊断。但是, 现有关于共振的研究大多是从外部连续提供能量或是作用力使物质发生振动, 如果停止提供作用力, 它将恢复到原来的状态。

如何利用粒子共振的基本原理, 在汽车节油方面产生有利效果, 是一个值得研究的问题。

3 方 法

本文着眼于燃料的粒子层面, 利用共振原理, 设计并产生特定的波形, 减小燃料分子之间的黏性, 从而提高燃料燃烧效率, 减小燃料损失, 以达到节省燃料的目的。

最大限度地提高燃料粒子晶格结构强烈振动时的振幅是利用共振原理的首要条件。不论是从物理方面, 还是化学方面, 为了最大限度地提升晶格结构强烈振动时的振幅, 合成基本粒子, 原子和分子的矢量合成方向是必要的。

本研究将燃料粒子多方向向量结构重置为单一向量结构, 以去除金属表面累积的电荷, 提高晶格结构强烈振动的大小。首先, 单矢量结构在电振动中振幅较大, 足以将电荷移到阳极上。其

次, 电振动振幅大, 物理振动也很高, 这足以使燃料脱去黏性。最后, 一个平衡的单矢量结构能持续很长时间, 不管材料的种类如何, 在干涉过程中, 振幅的大小与输入能量的大小成正比, 增加输入的波能将提高晶格的振幅。

与此同时, 本研究通过分析影响粒子自旋的因素, 设计特定的能量波进行自旋操控, 通过电磁场来控制粒子的自旋状态。经过对原子振动方向的基本改造, 成功地通过向底层原子内的粒子赋予强大的能量来增强粒子的自旋矢量。新形成的定向粒子可以长期维持, 不需要外部能源供应, 通过这种特定频率的复合振动波传递波能, 引起燃油、金属部件和整车的各类分子所携带的电子运动状态由振动变为旋转, 降低摩擦引力的效果, 减少汽车燃料消耗, 以达到节油的目的。

结合本研究方法, 本文针对重型载重卡车构建了波能节油系统。该系统包括控制主机和波能发射器, 构成示意图如图 5 所示: 左侧所示的波能发射器通过信号线同右侧所示的控制主机相连接。该系统通过震动波干涉整车, 尤其是燃油与动力系统中特定分子的电子, 从而可以产生 3 个方面的效果: 第一, 降低了燃油分子之间的黏性; 第二, 改善了整车中关键部件之间的摩擦力; 第三, 减少了整车与外界的阻力, 进而达到节省燃油, 改善驾乘的效果。

综上所述, 本研究一方面产生了基本粒子, 使原子和整个分子的晶格结构放大, 降低燃油分

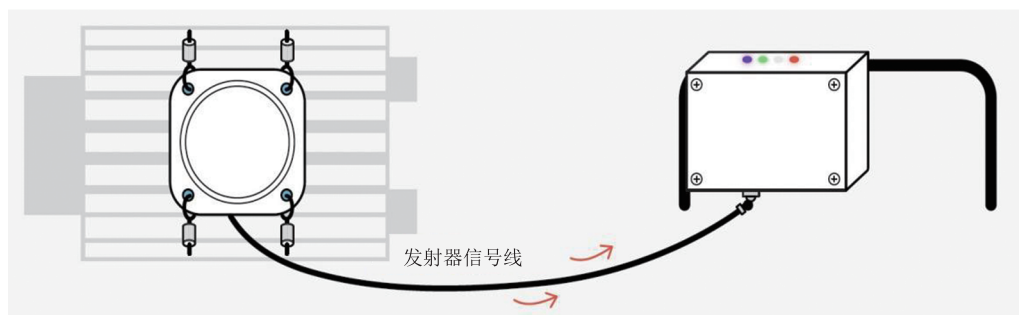


图 5 波能节油系统构成示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the composition of fuel saver based on wave energy

子之间的黏性，提高了燃料的燃烧效率；另一方面，通过特定的复合振动波，使粒子由振动转为自旋维持，进而改善汽车部件之间的摩擦力，减少克服摩擦阻力所需的能量，减少汽车燃油消耗。

4 测试结果与分析

4.1 测试结果

基于共振原理，目前已成功设计并开发节油器产品，并对其进行有效性和可靠性测试。

测试共选用 4 种车辆品牌，分别为欧曼(型号 BJ4259SNFKB-CA)、沃尔沃(型号 YV2XG20C)、斯堪尼亚(型号 YS2G6X23)、汕德卡(型号 ZZ4186V361HF1B)，类型均为牵引大货车。测试方法为：每次行程前，测试车辆在同一加油站补充相同燃油；测试车辆在已安装节油器和未安装节油器两种状态下进行长距离行驶对照实验；根据每次行程的行驶状况、平均速率、出发点和目的地等行驶记录数据，计算测试车辆每 100 km 的平均油耗、每 100 km 的平均节油量及节油率等。

其中，每 100 km 的平均油耗代表每 100 km 的车辆燃油消耗，如公式(2)所示， α 为每 100 km 的平均油耗， Q 为总加油量， L 为总车辆行驶距离。每 100 km 的平均节油量为安装节油器前和安装节油器后的每 100 km 的平均油耗的差值，如公式(3)所示， β 为每 100 km 的节油量， α_1 为未安装节油器时每 100 km 的平均油耗， α_2 为安装节油器之后的每 100 km 的平均油耗。节油率表明节油量与安装节油器后平均每 100 km 油耗之间的关系，如公式(4)所示， γ 为节油率。

$$\alpha = \frac{Q}{L/100} \quad (2)$$

$$\beta = \alpha_1 - \alpha_2 \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{\beta}{\alpha_2} \quad (4)$$

产品在部分测试整车上的安装情况如图 6~7 所示。

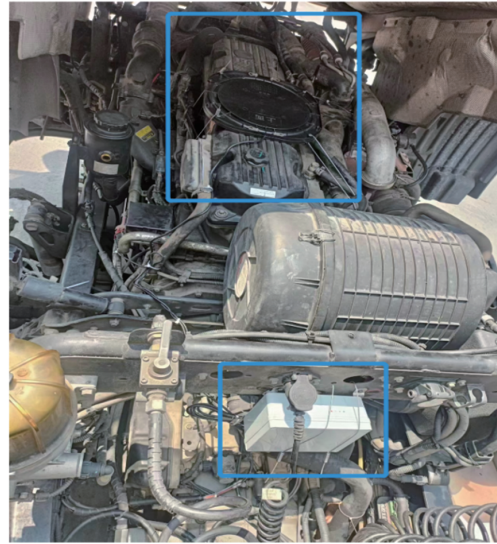


图 6 设备装车试验图(车型一)

Fig. 6 Equipment loading test (type 1)

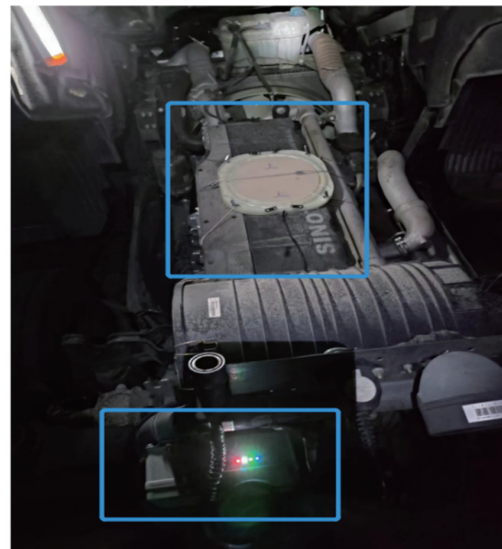


图 7 设备装车试验图(车型二)

Fig. 7 Equipment loading test (type 2)

欧曼品牌测试车测试结果如图 8 所示，节油率如表 1 所示。沃尔沃品牌测试车测试结果如图 9 所示，节油率如表 2 所示。

斯堪尼亚品牌测试车测试结果如图 10 所示，节油率如表 3 所示。汕德卡品牌测试车测试结果如图 11 所示，节油率如表 4 所示。

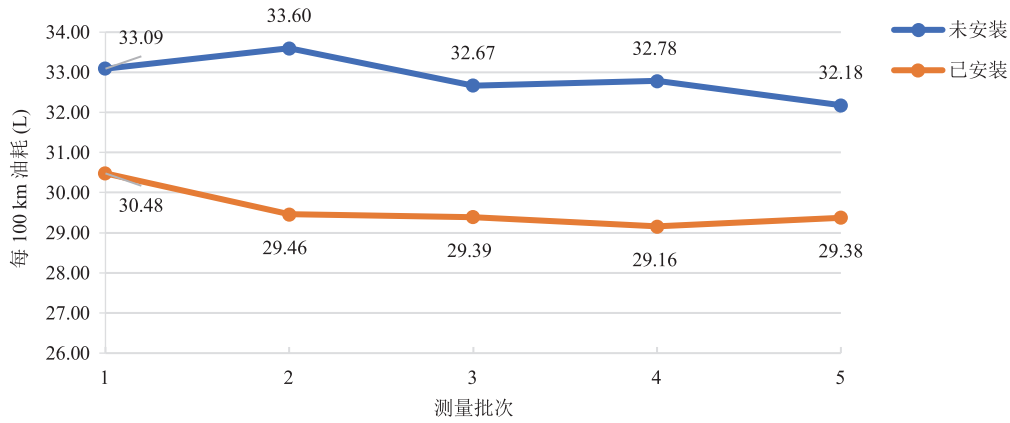


图 8 欧曼品牌测试车未安装及已安装节油器油耗对比

Fig. 8 Comparison of fuel consumption of Auman vehicle without/with fuel saver

表 1 欧曼品牌测试车安装节油器前后测试结果对比

Table 1 Comparison of test results before and after installing fuel saver in Auman vehicle

类型	每 100 km 的油耗 (L)	每 100 km 的平均节油量 (L)	节油率 (%)
未安装节油器	32.86	3.29	11.13%
安装节油器	29.57		

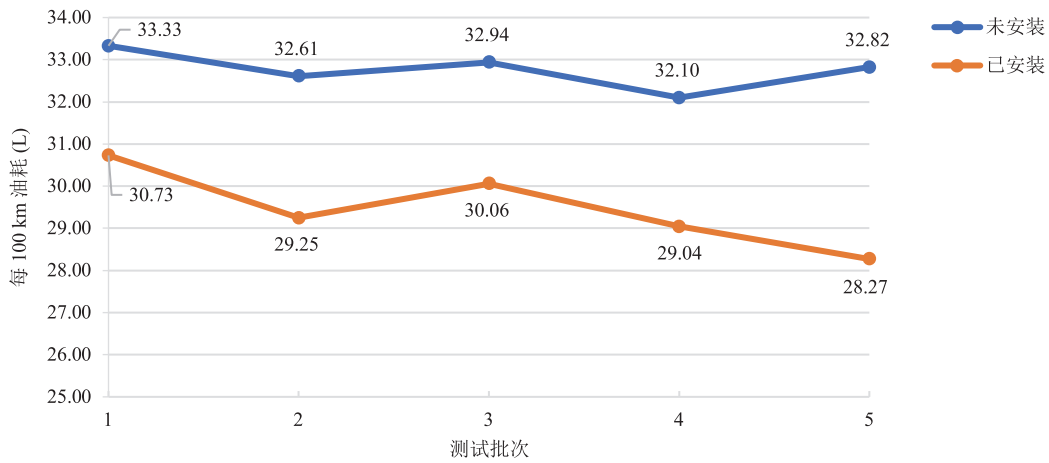


图 9 沃尔沃品牌测试车未安装及已安装节油器油耗对比

Fig. 9 Comparison of fuel consumption of Volvo vehicle without/with fuel saver

表 2 沃尔沃品牌测试车安装节油器前后测试结果对比

Table 2 Comparison of test results before and after installing fuel saver in Volvo vehicle

类型	每 100 km 的油耗 (L)	每 100 km 的平均节油量 (L)	节油率 (%)
未安装节油器	32.76	3.29	11.16
安装节油器	29.47		

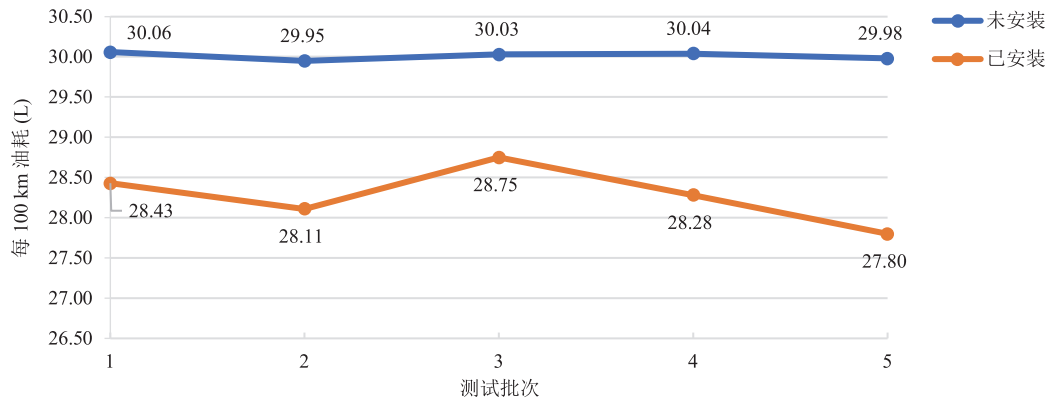


图 10 斯堪尼亚品牌测试车未安装及已安装节油器油耗对比

Fig. 10 Comparison of fuel consumption of Scania vehicle without/with fuel saver

表 3 斯堪尼亚品牌测试车安装节油器前后测试结果对比

Table 3 Comparison of test results before and after installing fuel saver in Scania vehicle

类型	每 100 km 的油耗 (L)	每 100 km 的平均节油量 (L)	节油率 (%)
未安装节油器	30.01		
安装节油器	28.27	1.74	6.15

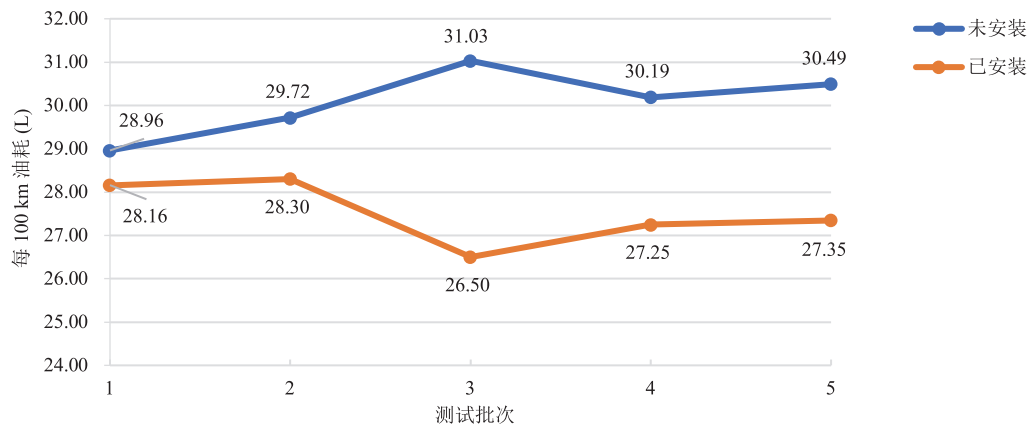


图 11 汕德卡品牌测试车未安装及已安装节油器油耗对比

Fig. 11 Comparison of fuel consumption of Shandeka vehicle without/with fuel saver

表 4 汕德卡品牌测试车安装节油器前后测试结果对比

Table 4 Comparison of test results before and after installing fuel saver in Shandeka vehicle

类型	每 100 km 的油耗 (L)	每 100 km 的平均节油量 (L)	节油率 (%)
未安装节油器	30.08		
安装节油器	27.51	2.57	9.34%

4.2 测试结果分析

由表 5 中的数据对比可知，每 100 km 的平均

节油量为 1.74~3.29 L；节油率为 6.15%~11.16%，节油率最高达到 11.16%。4 种品牌的节油率从

表 5 实验结果分析

Table 5 Analysis of experimental results

品牌	安装节油器前每 100 km 的油耗 (L)	安装节油器后每 100 km 的油耗 (L)	每 100 km 的平均节油量 (L)	节油率 (%)
欧曼	32.86	29.57	3.29	11.13
沃尔沃	32.76	29.47	3.29	11.16
斯堪尼亚	30.01	28.27	1.74	6.15
汕德卡	30.08	27.51	2.57	9.34

高到低分别是沃尔沃组、欧曼组、汕德卡组、斯堪尼亚组。其中, 沃尔沃组的车辆行驶距离为 3 000~3 500 km, 欧曼组的车辆行驶距离为 2 900~3 100 km, 汕德卡组的车辆行驶距离为 2 800~2 900 km, 斯堪尼亚组的车辆行驶距离为 1 500~2 500 km。由此得出, 在一定的适应周期内, 车辆行驶距离与节油效率呈正相关, 即理论上, 随着行驶距离的增加, 节油率得到提升, 最终达到一个最佳值, 以目前实验来看, 保守估计节油率在 6%~12% 之间。

在提升内燃机效率、整车节油技术领域, 通常的研究模型所评估的先进节油技术包括发动机技术、变速器技术、电动化技术、整车技术等^[18]。在已有的研究成果中, 大部分可通过改进内燃机获得小于 5% 的节油率。而围绕替换燃料的研究大多集中在燃烧颗粒的物理特性方面, 鲜有节油效果的相关分析。而基于发动机物理构造改进或提升的节油率在 2%~9% 之间。本文设计的基于共振原理的节油器最高可获得 11.16% 的节油率。因此, 在节油效率方面, 本文提出的基于共振原理的节油器的节油效果更为显著。与此同时, 本文的实验测试行驶距离为 1 500~3 500 km, 该产品在多种品牌的汽车上都获得了理想的节油效果, 测试结果稳定。

目前, 在节油领域, 围绕基本粒子结构和运动原理等微观方面的研究较少, 还没有类似方法的节油产品发布。因此, 尚不能与同类产品进行比较分析, 产品具备独创性。

与此同时, 为了进一步验证基于共振原理

的节油器的有效性和可靠性, 本文上述实验均通过了国家汽车质量监督检验中心、中国合格评定国家认可委员会 (CNAS) 等检测认证 (编号: WT-19-597-02-ZD03)。此外, 依托该技术, 已授权实用新型专利与外观设计专利 4 项 (ZL201930418882.7, ZL201930524467.X, ZL201921376133.3, ZL201930418878.0)。

本研究已取得一定的数据积累和成果验证, 后续将参照国内外的相关研究工作, 拟从以下 3 个方面深化研究工作。

(1) 拓展研究的条件和范围, 在更为宽泛的环境和工况下, 获取研究数据, 完善研究内容。

(2) 结合传统厂商的先进节油技术, 增加内燃机测试对象的类型和型号, 覆盖多种具备节油技术的发动机。

(3) 在传统纯燃油车辆研究的基础上, 开展对采用混合动力技术车辆的节能研究, 为节能与新能源技术发展提供研究数据。

5 结 论

为提升燃油汽车的效率, 国内外的研究机构 and 厂商做过发动机、整车等方面的研究和技术开发。其中, 发动机技术主要包括增压、汽油缸内直喷、连续可变气门正时、先进柴油机等; 整车技术包括轻量化、减摩擦、减阻力等。本文提出了基于波能和共振原理的节能研究方法, 在未改变车辆发动机和整车设计的条件下, 使用外置设备产生能量波, 实现车辆节油。经检索查

证, 目前, 国内外关于“节油”“节能”“能量波”“波能”“发动机效率”等关联性的研究较少, 这反映出本方法的先进性和独创性。

针对燃料损耗及燃烧效率低这一问题, 本文提出在燃料的基本粒子层面对其结构进行改造, 设计并产生特定波形, 通过减小燃料分子之间的黏性, 提高内燃机燃烧率, 以达到节油的目的。基于该研究方法, 本文设计了基于共振原理的节油器, 并进行有效性和可靠性的试验和测试。测试结果显示, 该产品节油效果显著, 最高节油率可达 11.16%, 并具有较高的可靠性。据报道, 节油率在 5% 以上的节油器已经具有良好的市场号召力, 因此, 该技术的市场前景广阔。同时, 该技术不仅适用于汽车、火车、轮船、航空等运输行业, 也可通过对能量波应用的深入研究, 将该技术应用于半导体、生物、医疗等领域, 具有一定的社会意义。

参 考 文 献

- [1] 姚春德, 余海涛, 王全刚, 等. 机车中速柴油机应用柴油/甲醇二元燃料的燃烧特性研究 [J]. 内燃机工程, 2015, 36(3): 38-43.
Yao CD, Yu HT, Wang QG, et al. Combustion characteristics of a locomotive medium-speed diesel engine using diesel/methanol compound combustion mode [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2015, 36(3): 38-43.
- [2] 彭璐. 高压共轨喷油器耦合喷嘴内流的喷雾特性研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
Peng L. Study on spray characteristics coupled with internal nozzle flow in high pressure common rail injector [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [3] Anvari S, Taghavifar H, Khalilarya S, et al. Numerical simulation of diesel injector nozzle flow and in-cylinder spray evolution [J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(19-20): 8617-8629.
- [4] 刘振明, 欧阳璐菲, 郭立君, 等. 喷油器喷嘴结构参数对空化效应的影响 [J]. 内燃机工程, 2020, 41(6): 72-77.
Liu ZM, Ouyang LF, Guo LJ, et al. Influence of the structural parameters of injector nozzle on cavitation effect [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2020, 41(6): 72-77.
- [5] 刘楠, 刘振明, 龚鑫瑞, 等. 关键结构参数对压电式喷油器喷射特性的影响 [J]. 内燃机学报, 2019, 37(2): 139-147.
Liu N, Liu ZM, Gong XR, et al. Influence of key structural parameters on fuel injection characteristics of piezoelectric injectors [J]. Transactions of CSICE, 2019, 37(2): 139-147.
- [6] 张俊红, 李晨阳, 裴国斌, 等. 喷油嘴内流特性与喷雾特性研究及结构优化 [J]. 内燃机工程, 2022, 43(2): 41-48.
Zhang JH, Li CY, Pei GB, et al. Research and optimization on flow and spray characteristics of nozzles [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2022, 43(2): 41-48.
- [7] Lan S, Li QS, Guo X, et al. Fuel saving potential analysis of bifunctional vehicular waste heat recovery system using thermoelectric generator and organic Rankine cycle [J]. Energy, 2023, 263: 125717.
- [8] Dolatabadi N, Forder M, Morris N, et al. Influence of advanced cylinder coatings on vehicular fuel economy and emissions in piston compression ring conjunction [J]. Applied Energy, 2020, 259: 114129.
- [9] 杨坤, 孙凯, 鲁祯, 等. 多喷油器分段喷射对大缸径低速柴油机燃烧及排放的影响 [J]. 内燃机工程, 2020, 41(3): 27-34.
Yang K, Sun K, Lu Z, et al. Influence of split injection on combustion and emissions of large-bore low-speed diesel engine with multiple injectors [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2020, 41(3): 27-34.
- [10] 张耀飞, 李国祥, 白书战, 等. 柴油机电控喷油器瞬态响应分析及结构优化 [J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(5): 8-15.
Zhang YF, Li GX, Bai SZ, et al. Transient response analysis and structural optimization of diesel

- electronically controlled injectors [J]. *Internal Combustion Engine & PowerPlant*, 2022, 39(5): 8-15.
- [11] Hagen J, Herrmann E, Weber J, 等. 进一步开发喷油器优化柴油机燃烧 [J]. *国外内燃机*, 2017, 49(2): 30-33.
Hagen J, Herrmann E, Weber J, et al. Diesel combustion potentials by further injector improment [J]. *Foreign Internal Combustion Engine*, 2017, 49(2): 30-33.
- [12] 王利民, 韩义勇, 王志刚, 等. 天然气-汽油双燃料发动机燃烧特性试验研究 [J]. *内燃机工程*, 2018, 39(5): 38-44.
Wang LM, Han YY, Wang ZG, et al. Experimental investigations into combustion characteristics of natural gas gasoline dual-fuel engines [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2018, 39(5): 38-44.
- [13] 李海娟, 张海婷, 陶磊, 等. 氢气直喷对发动机燃烧及排放性能的影响 [J]. *内燃机工程*, 2022, 43(5): 48-53+60.
Li HJ, Zhang HT, Tao L, et al. Effects of hydrogen direct injection on combustion and emission performance of an engine [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2022, 43(5): 48-53+60.
- [14] 杨晨, 刘军恒, 孙平, 等. PODE/柴油混合燃料燃烧颗粒的粒径分布及微观结构 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2018, 34(6): 1136-1142.
Yang C, Liu JH, Sun P, et al. Size distribution and micro-structure of PODE/diesel blended fuel combustion particles [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2018, 34(6): 1136-1142.
- [15] 陈东东, 王铁, 李国兴, 等. P1-P4 构型混合动力汽车节油率对比研究 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(8): 1-10.
Chen DD, Wang T, Li GX, et al. Comparative study on fuel saving rate of P1-P4 hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(8): 1-10.
- [16] 刘兵, 夏煜, 王晓安. 一种电控增能节油器整车道路性能对比试验 [J]. *交通节能与环保*, 2016, 12(3): 23-28.
Liu B, Xia Y, Wang XA. A control can increase the performance contrast test of economizer of vehicle road [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation*, 2016, 12(3): 23-28.
- [17] 房熊, 毛文武, 林礼群, 等. 量子节能器的设计及节油降耗应用 [J]. *机电设备*, 2016, 33(6): 21-23.
Fang X, Mao WW, Lin LQ, et al. Quantum economizer design and fuel consumption of the application [J]. *Mechanical and Electrical Equipment*, 2016, 33(6): 21-23.
- [18] 郝瀚, 陈康达, 刘宗巍, 等. 美国 2030 年节能与新能源技术发展预测 [J]. *汽车技术*, 2018, (2): 1-9.
Hao H, Chen KD, Liu ZW, et al. Prediction of energy saving & new energy technology development in the US through 2030 [J]. *Automobile Technology*, 2018, (2): 1-9.