

复合增压技术对商用车性能影响的模拟分析

The Simulation and Analysis of Super-Turbo Charger on Commercial Vehicle Performance

王磊 史艳彬 李康

中国第一汽车股份有限公司技术中心

摘要: 本文在 GT-Suite 软件平台上采用动力学的方法进行详细发动机模型与整车模型的联合模拟。应用此计算模型分析不同增压形式对发动机负荷阶跃过程、整车固定档加速过程以及整车道路循环工况下动力性和经济性的影响。通过模拟发现复合增压能够明显改善发动机瞬态响应过程的动力性，提前换档技术却可以提高整车燃油经济性，复合增压和提前换档搭配使用不仅可以保持原机动力性，而且可以提高整车燃油经济性。

关键词: GT-Suite, 复合增压, 提前换档, 动力学模型, 负荷阶跃, 固定档加速, HHDDT

Abstract- A dynamic model combined detail engine and vehicle was set up with GT-suite. The model was used to analyze the effect of different charger systems on the power and fuel economical performance about the transient of sudden step load change, the acceleration of vehicle with fixed gear, and vehicle road cycle. Through the simulation, the power performance of transient could be improved by Super-Turbo Charger, but the fuel economical performance could be improved by Short-Shifting. The combination of Super-Turbo Charger and Short-Shifting could be used to keep same vehicle dynamic performance and improve vehicle fuel economy.

Key words: GT-Suite, Super-Turbo Charger, Short-Shifting, Dynamic Model, Sudden Step Load Change, Acceleration with Fixed Gear, HHDDT

1 前言

涡轮增压作为一种提高发动机动力性和燃油经济性的技术，已经被绝大多数的柴油机所采用。但是由于发动机与增压器的工作方式不同，导致涡轮增压发动机普遍存在着加速性差，加速冒烟等固有缺陷^[1]。压气机由发动机曲轴直接驱动的机械增压技术，能够很好地解决发动机的响应滞后问题。但是，由于需要消耗曲轴输出功，机械增压发动机燃油经济性将会变差。为了挖掘机械增压技术和涡轮增压技术各自的优

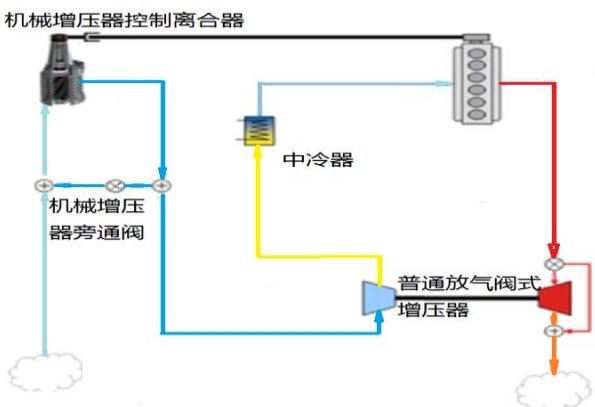


图 1 复合增压结构

压与涡轮增压联合使用的复合增压结构，如下图 1 所示。采用复合增压技术之后发动机的瞬态响应性能得到提高，整车动力性能也得到提高。为了能够合理地比较涡轮增压发动机（原机）和复合增压技术发动机的燃油经济性，需要保持两者的动力性能一致。为此采用提前换档技术，即降低发动机的换档转速^[2]。

商业软件 GT-Suite 是由 GAMMA 公司开发的高度集成的发动机+动力系统+车辆仿真平台，其能够进行发动机性能计算，还能进行车辆动力系统仿真计算、循环工况分析整车参数和控制策略设计^[3]。现在模拟整车燃油经济性和动力性的传统方法是基于后向运动学模型。这种方法假定发动机能满足指定工况所需的转速和扭矩，软件根据用户输入的车辆速度曲线和路面情况，由速度曲线和路面情况计算得到路面传递给车辆的负荷，反向求解得到发动机/驱动系统的扭矩、转速等参数，以满足速度曲线。该方法简单实用，但是不能模拟整车在不同运行工况下发动机的详细运行状态，尤其是发动机换气情况、响应滞后问题。此外，另外一种方法是采用动力学模型的方法，该方法根据用户输入的发动机油门位置、制动器动作等，求出车辆的动态反应，实际上就是由驾驶员的动作控制车辆的运动。该方法可以实现驾驶工况的计算，从静止到指定速度的加速时间、位移，车辆制动器的制动距离、时间，以及各个部件在动态过程中响应情况。基于详细的发动机与整车模型，该方法还能够捕捉不同驾驶工况下柴油机进气动态响应情况，能够用于模拟由于涡轮增压器转动惯量造成的响应滞后，以及机械增压器改善响应滞后的效果。但是该方法的不足之处是计算时间长。

本文应用 GT-Suite 软件建立了不同增压形式的发动机与整车的联合仿真模型并进行模拟分析，对比了两种的增压方式对发动机以及商用车性能的影响。最终对模拟结果进行分析，评价不同增压方式对发动机以及整车的影响，获知整车瞬态工况下发动机的工作状态，掌握发动机进气响应滞后对瞬态过程的影响。

2 整车及发动机模型建立

本文采用的模拟方法是动力学方法，发动机的喷油量、中冷后空气温度、燃烧规律、缸内传热情况和排气背压不再由人为设定，而是根据驾驶员的油门踏板位置以及发动机转速确定。商用车在实际使用过程当中，会出现涡轮增压器的滞后以及进气的滞后的现象。如果不对发动机进行喷油量限制，发动机空燃比将会急剧下降，导致发动机排气冒烟。为此，在发动机标定时会标定一个烟度限制 Map，即检测进气压力、发动机转速和加速踏板位置对喷油量进行修正防止加速过程出现空燃

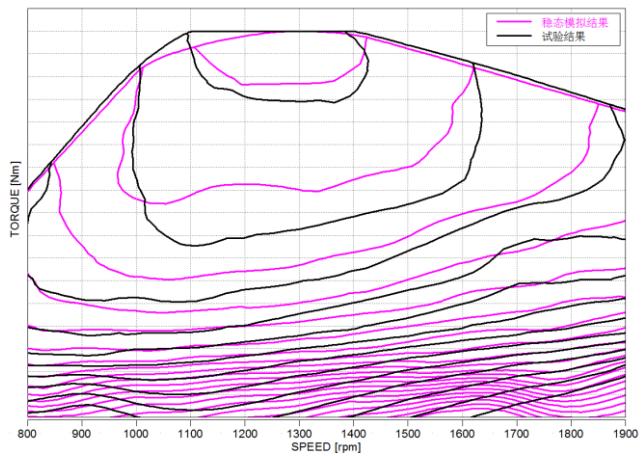


图 2 稳态模型校正结果

比太低。在建立发动机详细模型当中也设置相关的烟度限制 Map，该 Map 根据发动机进气量和发动机转速确定喷油量修正量。进行联合模拟之前首先基于准确的稳态模型，如此仿真模型能够很好地反应发动机的真实性能。稳态模型的校正结果如图 2 所示，模拟比油耗结果与试验比油耗结果吻合度较好，误差控制在 3% 以内。复合增压发动机模型，需要在涡轮增压发动机模型的基础上添加机械增压器以及相关部件，如图 1 所示。

本文选择 J6P 牵引车作为研究对象，其中涡轮增压器为普通放气阀式增压器，变速箱是陕齿 12 档变速箱。整车

及发动机关键参数详情见表 1 和 2 所示。在整车换档过程中，档位是逐级变化。对于复合增压中的机械增压器的控制需要一个稳定的控制策略，否则将会造成燃油经济性下降，或者发动机爆发压力增加过多从而造成发动机可靠性受到影响。其工作原理如下：发动机的首先采集进气压力（进气歧管压力）并与目标值 B、C 进行比较；如果测试值低于目标压力 B 则机械增压器控制离合器接合，并且使用 PID 控制机械增压器旁通阀的角度使进气压力与目标值一致；如果测试值高于目标压力 C 则机械增压器控制离合器断开，同时机械增压器旁通阀完全打开，机械增压器不参与工作；如果测试值介于目标压力 B、C 之间，机械增压器控制离合器状态与上一时刻一致，如图 3 所示。

表 1 整车及发动机关键参数

发动机型号	CA6DM2
发动机转动惯量	1.5kg·m ²
涡轮增压器转动惯量	340 kg·mm ²
整车载重量	25000kg
迎风面积	9.93m ²
主减速比	4.44

表 2 变速箱各档位速比

档位 1	档位 2	档位 3	档位 4	档位 5	档位 6
12.158	9.435	7.349	5.770	4.464	3.493
档位 7	档位 8	档位 9	档位 10	档位 11	档位 12
2.724	2.114	1.646	1.293	1.000	0.783

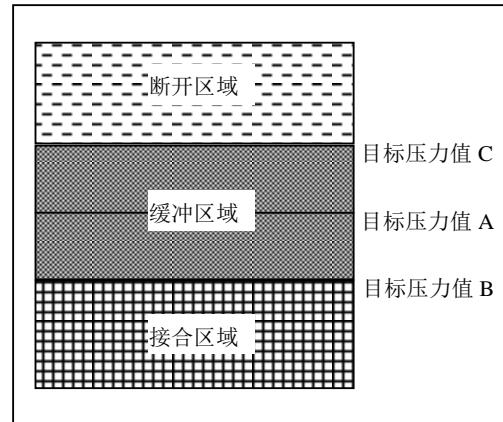


图 3 机械增压器控制策略图

3 不同增压形式对发动机性能的影响

发动机定转速变负荷的过程，常用于评价发动机的瞬态响应性能，通常评价准则是发动机 10% 负荷增加 90% 负荷所需的时间。由于整车爬坡能力主要体现在低速转矩的响应速度，选择最能反映整车爬坡能力的 1000r/min 作为研究工况，对比不同的增压方式对这一瞬态过程中扭矩、进气压力、空燃比和供油量的影响，见图 4 所示。

从图中可以明显看出复合增压发动机扭矩迅速增加，只需要 0.75s 就可达到 90% 稳定扭矩，而涡轮增压需要 2s 才能实现。主要是因为机械增压器协助迅速建立发动机的进气压力，迅速建立的进气压力意味着发动机进气量能够快速增加，在相同的烟度限制 Map 的作用下发动机的供油量也显著增加。图中可以明显看出在阶跃过程发动机的空燃比迅速下降，导致发动机在瞬态过程容易冒烟，复合增压发动机在阶跃过程的最低空燃比 17.3 高于涡轮增压发动机最低空燃比 16.6。虽然复合增压发

动机在机械增压器的作用下能够迅速增加进气压力，但是由于进气系统中管系的滞后性仍然存在，所以阶跃过程初期复合增压发动机空燃比仍然会快速下降，之后在机械增压器的作用下进气压力又迅速回升，此过程较涡轮增压明显要快很多。

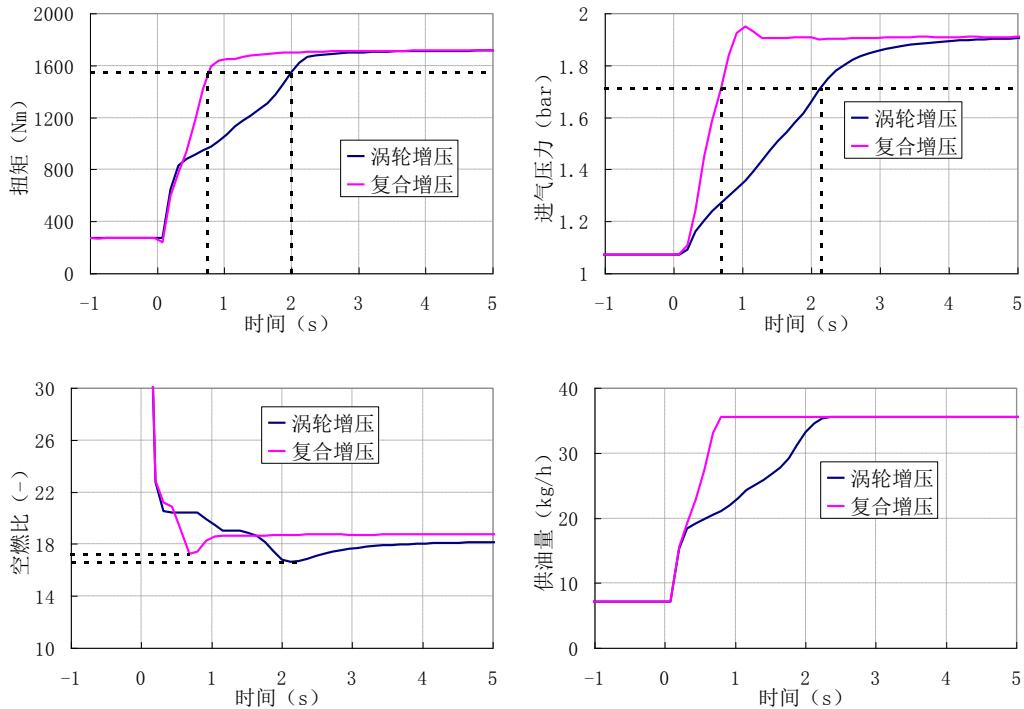


图 4 负荷阶跃过程发动机响应结果

4 不同增压形式对整车的影响

4.1 不同增压形式对整车固定档加速的影响

通常整车在实际使用当中发动机转速和负荷均变化，其中最为常见的过程就是加速过程。此时整车档位固定，驾驶员将加速踏板踩到底，发动机输出扭矩、转速均增加，整车速度也上升。下面将分别介绍整车次高档和 2 档加速过程中不同增压形式对整车性能的影响。

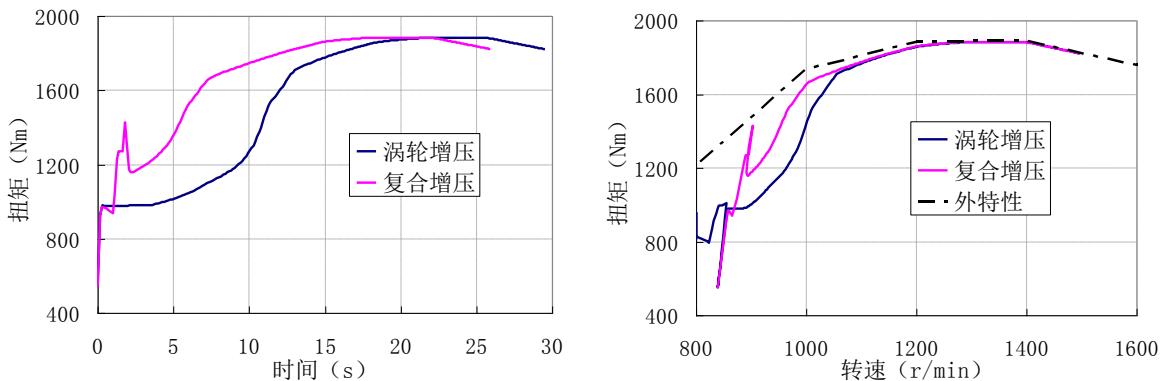


图 5 次高档整车加速过程发动机响应情况

从图 5 中可以看出次高档加速过程中复合增压能够显著改善整车的加速过程，能够改善发动机瞬态响应，缩短加速过程消耗的时间。加速过程初期相同转速下发动机的输出扭矩明显增加，主要

原因是发动机在机械增压的作用下发动机进气压力能够很快建立起来, 进气量相比涡轮增压多, 所以发动机能够喷入更多的燃油, 进而输出扭矩能够较大。同时也可以看到, 加速过程初期复合增压发动机扭矩有一个峰值, 主要是由于加速初期进气压力下降较多, 所以机械增压器进入工作状态, 进气压力、发动机喷油量和输出扭矩均快速增加, 持续工作约 2s 后进气压力超过目标值, 机械增压器退出工作, 导致初期扭矩出现波动峰值。由于加速时间较长, 加速过程中后期发动机能够工作到外特性, 两种增压方式发动机输出扭矩相当。

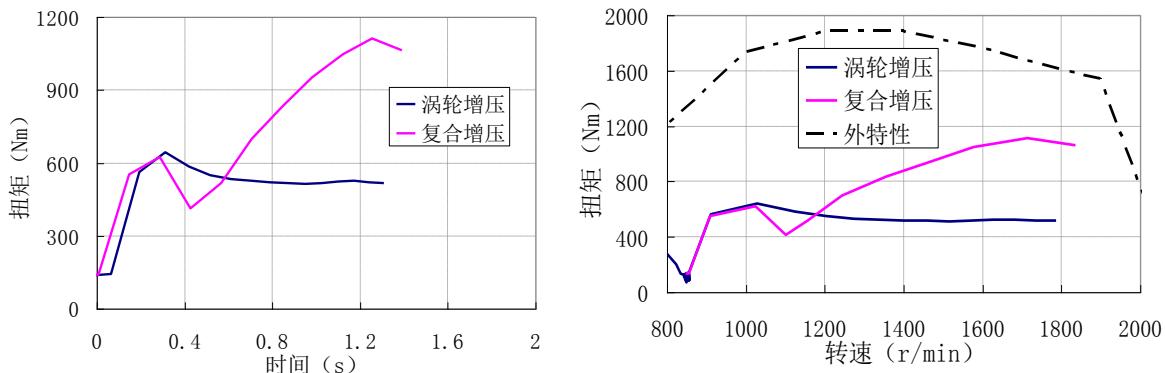


图 6 2 档整车加速过程发动机响应情况

从图 6 中可以看出整个 2 档加速过程持续时间非常短, 仅持续 1.2s 左右。加速过程初期, 相同发动机转速下两种增压方式的发动机输出扭矩相差不大且都远远低于外特性扭矩, 进气系统管系的滞后响应是关键因素。尽管此时机械增压器处于工作状态, 在如此短的加速持续时间内机械增压器作用也不明显。机械增压器一直处于工作状态, 加速过程中后期复合增压发动机输出扭矩明显提升, 改善了整车的加速过程。加速过程中后期, 进气系统管系的滞后响应的影响逐渐减弱, 机械增压器作用才开始显现, 复合增压发动机进气压力才快速建立起来, 发动机进气量和喷油量也均相应增加, 所以发动机的输出扭矩相比涡轮增压要大一些, 但仍然远低于外特性扭矩。

4.2 不同增压形式对整车连续档加速的影响

上文所述涡轮增压柴油机技术上再采用机械增压技术之后发动机的瞬态响应以及整车的瞬态响应均得到明显提高, 对应整车的动力性能也显著提高。整车连续档加速过程常用于评价整车的动力性能, 而评价整车的燃油经济性的前提条件是动力性相当。所以本文首先对商用车 0.4km 连续档加速过程进行模拟, 研究发动机

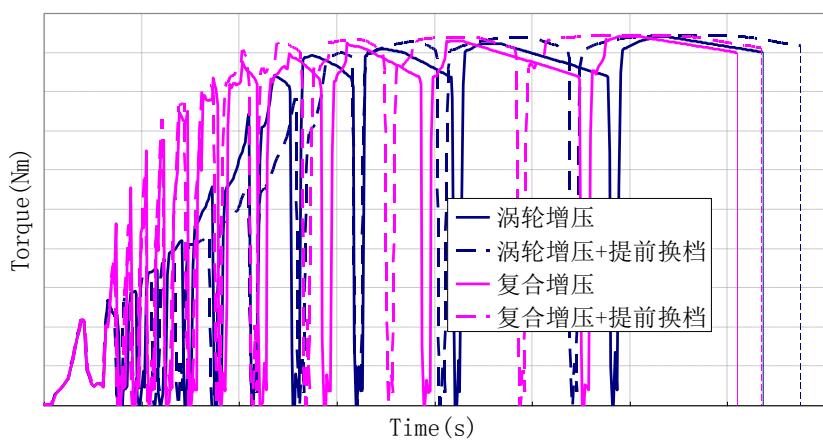


图 7 整车连续档加速过程发动机响应情况

在不同增压形式和不同换档策略下整车加速性的不同。

在加速过程中，采用复合增压技术后即使有烟度限制发动机在中低档位的输出扭矩仍然比原机（涡轮增压）输出扭矩大，在高档位时输出扭矩与原机基本相当，如图 4 所示。这说明采用复合增压技术能够显著提高发动机中低档位的响应性能，其最主要原因是机械增压器能够明显改善加速持续时间短造成发动机供气严重滞后的问题。但是，在高档加速过程由于持续时间比较长，发动机的供气滞后不明显，机械增压器很少甚至根本不起作用，所以在高档位时输出扭矩与原机基本相当。相反地，采用提前换档将会导致发动机在中低档位输出扭矩相比原机降低，造成发动机在中低档位加速的响应变慢，而在高档位加速过程中输出扭矩与原机也基本相当。造成这种情况的原因是整车在中低档位加速过程频繁换档，导致中低档位加速持续时间更短发动机的供气滞后更严重，而高档位加速持续时间长发动机的供气滞后不明显。最终根据加速时间可以看出原机（涡轮增压）所需时间和复合增压+提前换档所需时间相当，所以两者动力性能相当。只采用复合增压的整车动力性能最好，耗时最少，而涡轮增压+提前换档技术耗时最长动力性能最差。

4.3 不同增压形式对整车道路循环燃油积极性的影响

以恒定车速行驶一段距离或者若干个加速过程来评价一款商用车燃油经济性实际上是不全面的，因为这并不代表商用车的实际使用工况。HHDDT (Heavy Heavy-Duty Diesel Truck) 和 HHDDT-Cruise 循环工况是由 California Air Resources Board 和 West Virginia University 共同开发的能够比较客观

地评价重载商用车燃油经济性的道路循环^[4]，如图 8 所示。HHDDT 的工况变化比较大，整车总是处于加速、减速等变工况；而 HHDDT-Cruise 工况变化比较少，整个循环整车车速比较高，档位变化比较少。

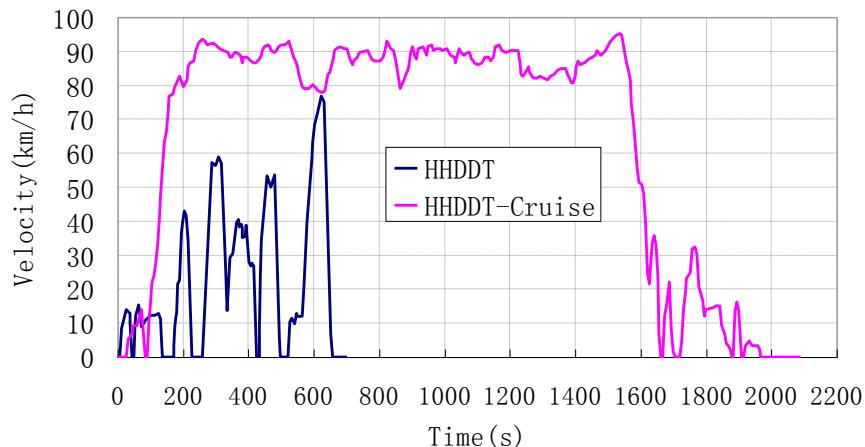


图 8 整车道路循环

采用复合增压和提前换档技术后在 HHDDT 循环工况下的燃油经济性如图 9 所示。采用提前换档技术之后燃油经济性提高 3.6%，也就是说只要驾驶员频繁换档将会提高整车的燃油经济性，但是这会增加驾驶员的工作量，以及影响动力性能，如图 7 所示。整车采用复合增压技术后，由于机械增压器消耗曲轴输出功，整车道路循环燃油经济性下降 1.0%。虽然燃油经济性下降，但是在加速过程中由于机械增压器的作用将会使驾驶员感觉整车动力充沛。如果采用复合增压技术+提前换档技

术, 此时整车的动力性与原机(涡轮增压)相当, 而且整车道路循环燃油经济性下降了 3.4%。由于该循环工况变化较大, 整车车速不高, 而且经常加速、减速以及换档。此工况下机械增压器接合工作的概率较高, 整车瞬态响应性能提高, 驾驶员能够提前换档, 相同车速下整车档位更高, 也就是发动机转速更低、负荷更高, 即发动机能够工作在更加经济的区域。

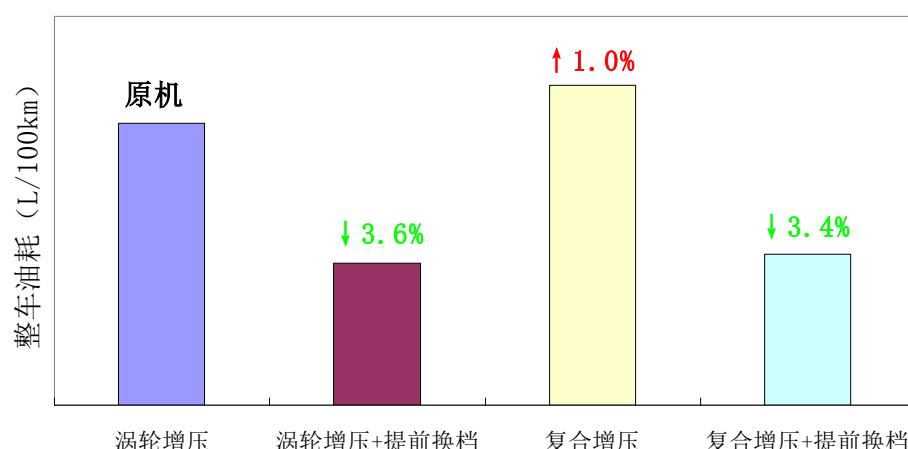


图 9 整车 HHDDT 循环工况下的燃油经济性

采用复合增压和提前换档技术后在 HHDDT-Cruise 循环工况下的燃油经济性如图 10 所示。由于该循环工况下整车工况变化比较少, 整车大部分时间以最高档高速行驶, 机械增压器接合工作的几率非常小, 所以采用提前换档技术不能带来明显燃油经济性的提升, 同时复合增压技术也不会由于机械增压器的耗功导致燃油经济性变差。复合增压技术+提前换档技术带来的燃油经济性的提升也只有 0.3%, 效果非常不明显。

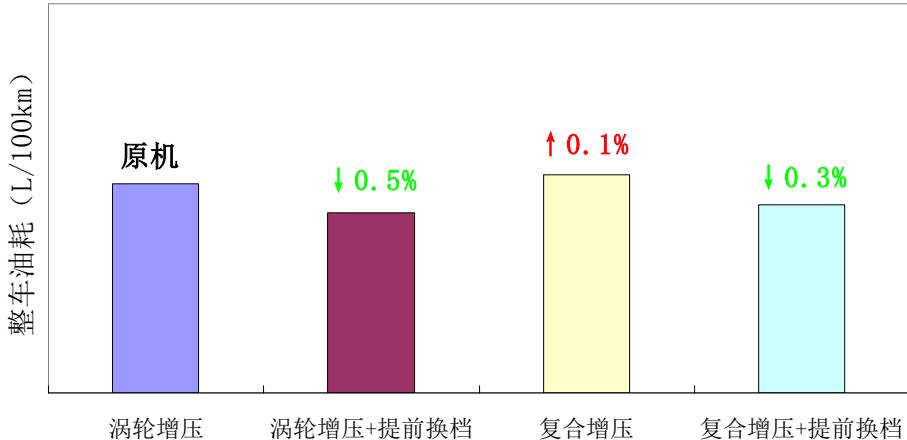


图 10 整车 HHDDT-Cruise 循环工况下燃油经济性

综合而言, 经常使用在高速公路上的长途运输牵引车由于中低档位加速过程比较少, 整车大部分时间工作在高档位高速行驶, 不能很好地体现本文所述的复合增压技术的优势。针对高速公路上的长途运输牵引车, 如果增加变速箱的档位数, 具有大幅提高燃油经济性的潜力。这是因为在高速行驶时档位可以更高, 发动机工作转速可以降低。然而针对循环变动大比较大的城市工况的城市公交车、邮政车和垃圾车以及工程用车等, 由于其循环变动大、经常停车起步加速过程, 恰好是本文所述的复合增压技术目标应用对象。复合增压技术和提前换档应用在这类商用车后, 对燃油经济性的提高

将会非常明显。

5 总结

本文通过模拟计算的方法探讨了机械增压对发动机瞬态特性的影响，以及对整车固定档加速过程的影响，最终还分析机械增压+涡轮增压组成的复合增压技术和提前换档技术应用在商用车上对整车动力性和循环工况下燃油经济性的影响。模拟结果得出以下结论：

- 1) 复合增压方式中，机械增压器能够改善发动机负荷阶跃瞬态响应，同样也能够提高整车固定档加速过程发动机扭矩输出。对于高档位加速过程，机械增压器主要提高加速初期发动机输出扭矩；对于低档位加速过程，机械增压器主要提高加速后期发动机输出扭矩。
- 2) 复合增压技术能够提高商用车的加速性，驾驶员通过频繁换档或者改变自动变速箱控制策略等换档调整技术能够降低整车的加速性能，综合应用复合增压+提前换档技术可保持与原机相当的加速特性。
- 3) 复合增压+提前换档并不适合高速公路上长途运输牵引车，主要是该技术对燃油经济的影响非常有限，除非增加变速箱的档位。但是如果整车的运行工况变化大、经常起停加速换档，复合增压匹配提前换档技术将是一个不错的选择，在 HHDDT 循环下燃油经济能够提高 3.4%。

6 参考文献

- [1] 周红秀, 姚春德. 改善车用增压发动机加速性的技术发展 [J]. 柴油机设计与制造, 2008, 15, 2, 281–286.
- [2] Cantore G, Mattarelli E, Fontanesi S. A New Concept of Supercharging Applied to High Speed DI Diesel Engines. SAE Technical Paper 2001-01-2485, 2001.
- [3] Gamma Technologies Inc. GT-Suite Application Manual (Version 7.0). Westmont: Gamma Technologies Inc, 2009.
- [4] DieselNet. Heavy Heavy-Duty Diesel Truck Schedule. <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/hhddt.php>, 2012.