

# GT-SUITE 用于柴油机发电复合涡轮行驶工况适应性的仿真研究

李苏苏 谢辉

天津大学内燃机燃烧学国家重点实验室天津 300072

**摘要:** 本文采用GT-SUITE构建了重型柴油机发电复合涡轮余热能回收整车仿真平台, 研究了四种典型的柴油机复合涡轮废气回收方式在不同运行工况下的节能潜力。研究结果对于复合涡轮结构选型以及发电复合涡轮与发动机的匹配与集成, 具有指导价值。

**关键词:** 柴油机; 余热能利用; 复合涡轮; 运行工况

**Abstract:** GT-SUITE is used to implement a heavy duty engine simulation platform in this paper. The capacity of waste energy recovery for four typical turbo-compound systems is analyzed in different operating conditions. The research result is valuable for guiding the turbo-compound selection and integration between engines and turbo-compound systems.

**Key words:** Diesel Engine; Waste energy recovery; Turbo-compound systems; Driving Cycles

## 1 前言

节能减排是当前内燃机工业发展的重大挑战。研究表明, 燃油在发动机中燃烧产生的能量大约有33%以尾气的形式排放到大气中, 还有29%的能量以摩擦和冷却水散热等方式损失<sup>[1]</sup>。因此发动机余热具有巨大的回收潜力, 朗肯循环、复合涡轮、热电转换是实现发动机余热能回收的主要方式。其中, 复合涡轮技术的实现和布置结构相对简单, 对原机改动较小, 控制手段灵活。发电复合涡轮的组合形式主要有电辅助复合涡轮、串联复合涡轮、并联复合涡轮和纯电动复合涡轮。不同的复合涡轮形式会对余热利用效率及本机效率产生不同的影响, 且回收效果受工况的影响大。

本文通过GT-SUITE建立了车用重型柴油机废气涡轮回收的整车仿真平台, 实现了电辅助复合涡轮、并联复合涡轮、纯电动复合涡轮和串联复合涡轮四种形式废气能量收回方案。获得四种典型的废气发电复合涡轮在稳态工况、瞬态工况和实际道路运行工况等典型运行条件下废气能量转换效率及节油效果, 为发动机功率与涡轮电功率的合理分配提供指导和依据。

## 2 仿真平台及模型建立

本研究以一款11.6L大排量增压柴油机为参考建立发动机模型, 同时以某重型卡车为参考建立了整车模型以满足驾驶循环仿真分析的需要。基于一维发动机仿真软件GT-Power搭建的柴油机模型

如图 1 所示。柴油机模型包括复合涡轮，进气歧管、排气歧管、中冷系统、缸内系统、涡轮、压气机、发动机/电动机、电池等。车辆模型、动力总成、驾驶员模型以及道路模型等子模型均集成到 GT-SUITE 整车模型<sup>[2]</sup>中。根据循环驾驶工况的要求，驾驶员模型通过调节加速踏板和制动踏板开度来跟踪目标车速，实现整车按照指定的驾驶工况运行。

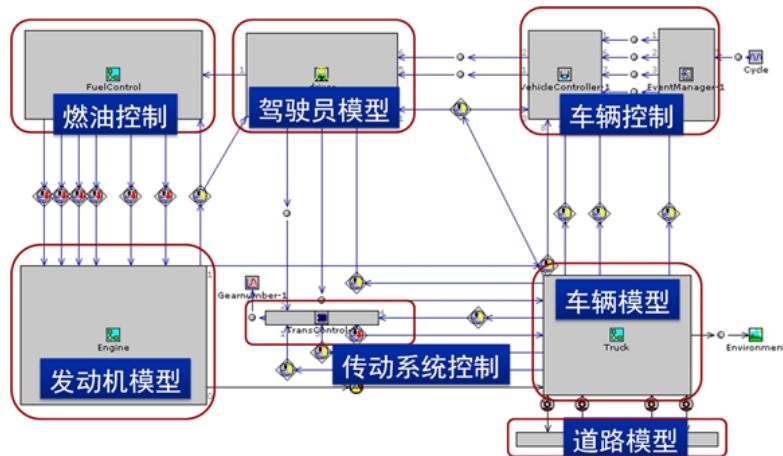


图 1 增压柴油机模型耦合整车仿真模型框图

通过配置柴油机模型的非结构性参数使模型尽可能接近参考机型。图 2 是外特性下模型计算得到的扭矩、功率和油耗数据与原机实验数据对比，偏差在 5% 以内。

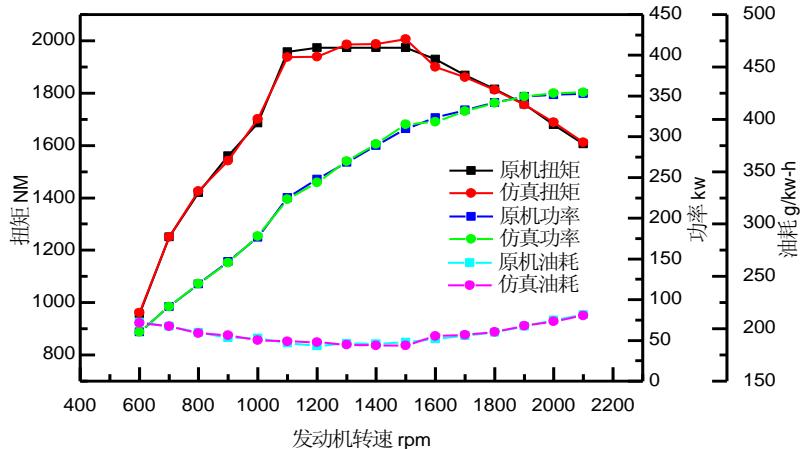


图 2 柴油机模型外特性与参考机型的对比

### 3 复合涡轮工况适应性研究

#### 3.1 不同形式的复合涡轮

本文基于上述发动机及整车仿真平台构建如下四种形式的废气发电复合涡轮方案, 如图 3 所示。(1) 图 3-a 为电辅助涡轮方案: 发电机/电动机集成安装在增压器转动轴上, 当废气能量超过增压器所需能量时回收多余能量, 而进气量不足时, 电机则驱动增压器辅助增压。(2) 图 3-b 是并联复合涡轮方案: 排气能量分为两部分, 一部分用于废气涡轮增压满足发动机进气需求, 另一部分废气经过旁通阀进入并联涡轮发电。3) 图 3-c 为纯电动复合涡轮方案: 涡轮和压气机之间无机械连接, 可独立工作。废气经过涡轮发电回收到蓄电池, 同时电能驱动压气机进行增压。(4) 串联复合涡轮方案如图 3-d 所示: 排气先进行增压, 再经过二级涡轮发电。

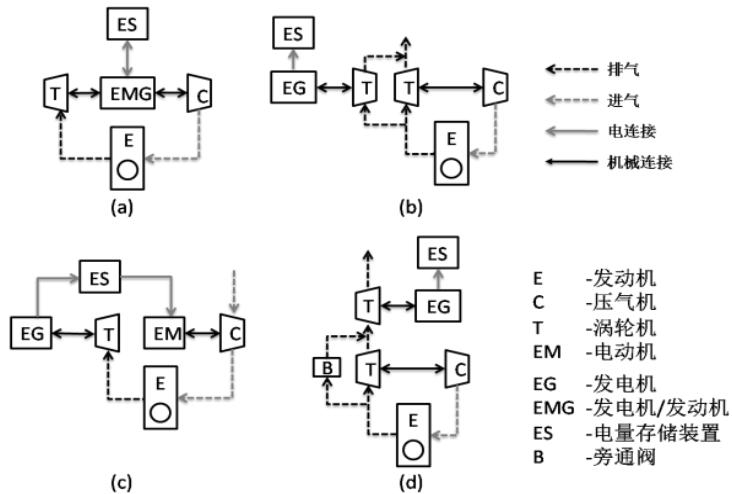


图 3 不同形式的复合涡轮增压系统

### 3.2 外特性下的仿真结果比较

本文将原机以及四种不同形式的复合涡轮系统在外特性下的性能进行了详细的对比。如图 4 所示, 为比较不同形式的复合涡轮对发动机效率的提升作用, 应避免进气对发动机效率的影响。本研究通过对不同形式的复合涡轮增压器部分进行旁通控制从而保证原机与四种形式的涡轮复合系统的进气流量基本一致。

图 5 为外特性下各种形式的复合涡轮回收的电功率曲线对比。可以看出, 在 600–1000 r/min 的低转速下, 排气能量不足, 几乎无电能回收。而在中高负荷工况, 随着排气能量不断提高, 四种形式的复合涡轮发电功率也逐渐增加。其中, 串联发电涡轮由于采用的是离心式涡轮具有高的功率输出, 且膨胀比相对小, 最大发电功率可达 35 kW。其次是电辅助复合涡轮, 最大回收功率为 20 kW。电辅助涡轮发电机转子与增压器同轴, 转速较高, 涡轮基本工作在高效区域, 因而回收电功率高。但增压器受到压比的限制, 能用于发电的功率相对于串联发电涡轮低。

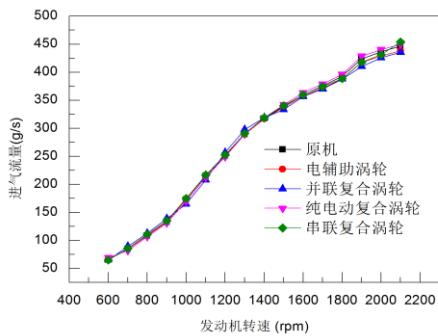


图 4 外特性下不同复合涡轮进气流量比较

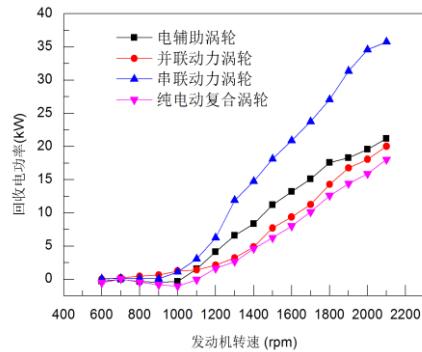


图 5 外特性下不同复合涡轮发电量比较

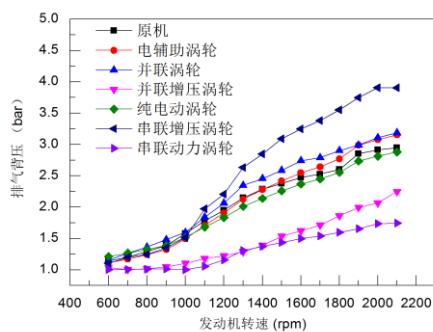


图 6 外特性下发动机排气背压的比较

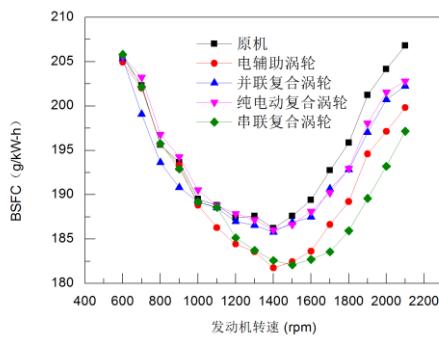


图 7 外特性下发动机油耗的比较

复合涡轮的应用能回收部分的发动机排气能量，但是该回收方案会对发动机的排气背压产生影响，在保证同样增压度的情况下，发动机本机效率会有所下降<sup>[3] [4]</sup>。各发电复合涡轮形式对发动机排气背压的影响如图 6 所示。由图可知，串联涡轮对排气背压的影响最大，如 2000 rpm 时，排气背压为 4.0 bar，远高于原机排气背压 2.8 bar。相比于串联涡轮，并联涡轮通过节流阀将剩余的排气流量分配给涡轮进行发电回收，也会产生一定的节流损失从而导致排气背压的升高，影响发动机的本机效率。纯电动复合涡轮对排气压力的影响最小，发动机泵气损失最小。

不同形式的复合涡轮的节能潜力比较主要包括两部分：发动机有效输出功及涡轮回收的电能。为便于比较，本文将涡轮发电回收的电能用作曲轴功输出，转化效率为 85%，综合曲轴输出功率及电功率转化后的辅助功率之和，配备有四种不同形式复合涡轮的柴油机总燃油消耗率见图 7。结果表明，串联复合涡轮系统总燃油消耗率最低，节能潜力最大，在 1900 rpm 全负荷工况下油耗降低 11.6%。电辅助复合涡轮形式同样在 1900 rpm 全负荷时达到最佳的燃油改善，油耗下降 7.0%。纯电动及并联形式节能效果比较有限。

### 3.3 瞬态工况仿真结果对比

发动机实际运行过程大部分属于瞬态过渡工况，为了分析复合涡轮在发动机瞬态工况下的性能，本文以两类复合涡轮为研究对象，分类如下：一、配有电增压的电辅助涡轮和纯电动涡轮；二、仅有废气涡轮增压的并联涡轮和串联涡轮。

通过对电辅助涡轮和并联复合涡轮的瞬态工况响应来分析这两类涡轮形式的不同瞬态工作特性。瞬态过渡过程中，涡轮的迟滞效应使得原机增压压力的变化不能及时跟随上需求的目标压力，导致实际空燃比与理论最优空燃比之间的较大偏差，因而燃油经济性变差。电辅助系统的优势在于能够自由补充进气量，通过蓄电池提供附加电能驱动增压器工作，改善增压系统的瞬态响应性能，改善燃油经济性。从图 8 可以看出电辅助涡轮实现进气压力与目标压力的跟随效果最佳，并联形式的复合涡轮虽然能够较好的跟随目标进气压力，但跟随效果不如电辅助涡轮。在瞬态工况下，并联复合涡轮排气能量不足，不能驱动压气机迅速建立需要的增压压力。串联复合涡轮在瞬态过程中存在涡轮迟滞效应，因而发动机经济性改善低于电辅助涡轮及纯电动涡轮。

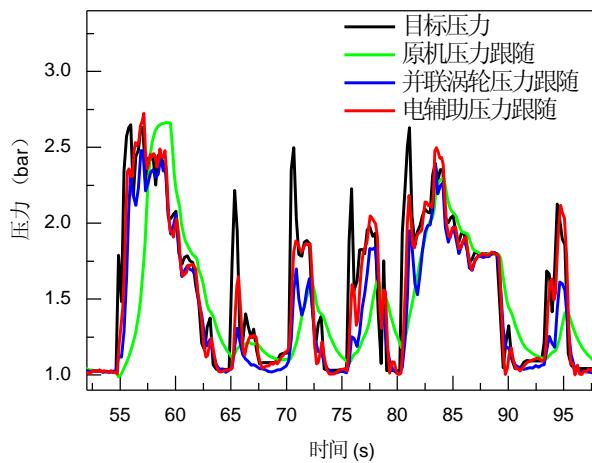


图 8 复合涡轮瞬态增压压力跟随情况对比

### 3.4 实际驾驶工况仿真结果对比

本文基于天津泰达公交工况和 HUDDS 以及高速公路驾驶循环三种典型的实际运行工况对比分析不同复合涡轮节油效果，工况速度曲线如图 9 所示。司机模型控制踏板开度，并由 PID 控制器实现需求车速跟随。仿真过程中车辆的总燃油消耗采用将排气回收的所有电能折合成燃油量的计算方式<sup>[5]</sup>，结果如图 10 所示。总的来看，由于对排气能量都有不同程度的回收，因此不同形式的复合涡轮油耗均低于原机油耗。

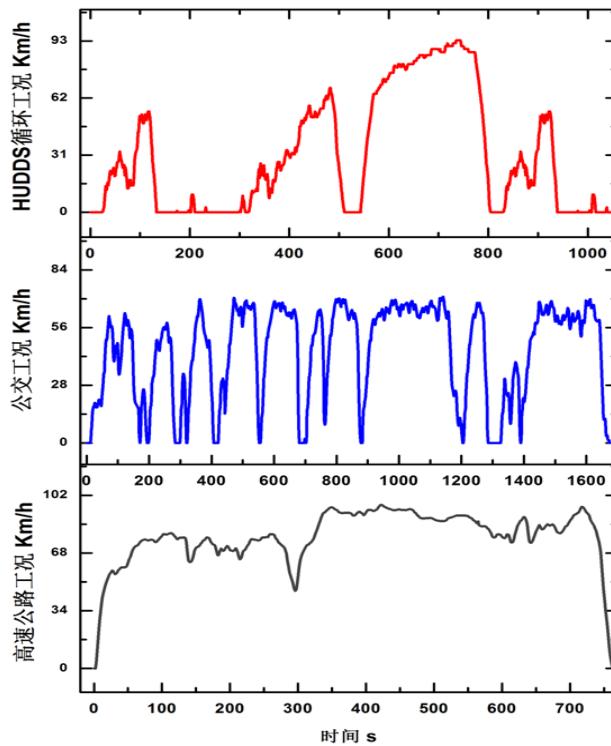


图 9 三种典型运行工况速度曲线

仿真结果表明：在实际公交运行工况中，电辅助复合涡轮的形式节油效果最佳，可以达到 6.8% 的油耗改善，由于其实现了很好的压力跟随，提高了发动机瞬态燃烧性能，因此油耗改善最为明显。在高速公路工况中，串联复合涡轮百公里油耗最低，可降低油耗 5.1%。在 HUDDS 工况中，电辅助复合涡轮形式的节油能力最好，降低油耗 4.7%。可见，实际道路工况应适用合理的复合涡轮形式才能达到最佳的节油效果。总体而言，电辅助涡轮适合瞬态工况比例高的运行工况，串联涡轮适合车速高、运转负荷大的运行工况。

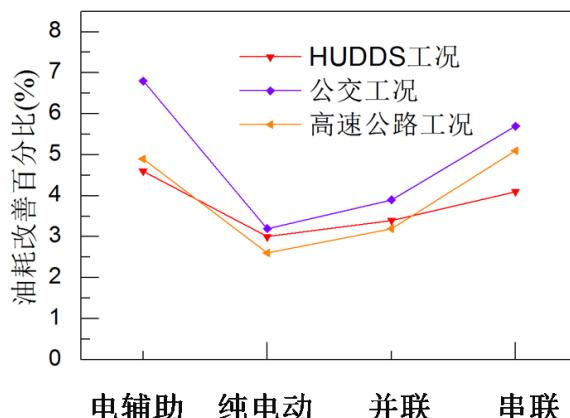


图 10 复合涡轮油耗改善对比

## 4 结论

(1) 外特性下, 不同形式复合涡轮对排气背压影响效果使得串联复合涡轮节油潜力最大, 电辅助涡轮次之, 并联涡轮效果最低。

(2) 瞬态工况下, 涡轮迟滞效应是影响复合涡轮系统的主要因素, 电辅助涡轮系统通过利用蓄电池电能可以提高进气量, 改善发动机瞬态特性。

(3) 不同形式的复合涡轮最大的节油潜力与其运行的实际道路工况相关。电辅助涡轮工作稳定, 对排气背压影响很小, 适合瞬态工况比例高的运行工况。串联涡轮在中高负荷对排气能量利用充分, 适合车速高、运转负荷大的运行工况。

## 5 参考文献

- [1] Taylor A M K P. Science review of internal combustion engines [J]. Energy Policy, 2008, 36 (12): 4657—4667.
- [2] GT-Power V6.2.0 用户手册
- [3] 刁爱民, 梁卫华, 刘镇. 进、排气背压对涡轮增压柴油机工作过程影响的研究 [J]. 车用发动机, 2008, VolB06.
- [4] Heywood JB. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGraw-Hill, 1988.
- [5] 王峰, 冒晓建, 卓斌. ISG 并联混合动力轿车最优转矩分配策略 [J]. 重庆大学学报, 2008, Vol31.