

串联混动匹配与节能分析

The matching and analysis of Series HEV

豆佳永 刘系嵩 张秀英 王一聪 马克 张静

(北京汽车股份有限公司汽车研究院 动力中心)

摘要: 根据国家发展规划, 四阶段节能型汽车燃料消耗量需降到 5L/100km 以下, 非插电混合动力汽车 (HEV) 可以实现此目标; 未来 HEV 市场不可忽视【1】。欧洲车厂大多基于其强大的发动机和变速器, 附加单电机, 走并联 HEV 技术路线。美、日倾向于双电机的混合驱动系统, 完全替代传统变速器、降低混动系统成本, 走串联 HEV、混联 HEV 路线; 丰田、通用、福特、克莱斯勒坚持以行星轮系为核心的功率分流构型路线; 本田、三菱选择了系统构型路线; 日产选择了双电机串并联和串联路线。考虑成本、技术基础、目标产品等多方面因素, 选择串联混动作为研究方向进行匹配分析和节能研究。串联混动系统结构紧凑, 成本低, 动力总成结构形式上大致相同, 具有较好的产品继承性。

关键字: 串联, 混动, 匹配, 节能

Abstract: Based on National development planning, the fuel consumption of energy saving vehicle must drop to below 5L/100km at 4stage. The HEV can achieve this target. In the future HEV market cannot to be neglected. [1] Based on the goodness of engine and transmission, the European factories adopt parallel HEV technology line through add a single motor. American and Japanese factories use double motors, instead of the tradition transmission; reducecost of the power system. They use the Series HEV or Hybrids HEV. Toyota, Ford, Chrysler insist on power split device (planetary gear). Honda, Mitsubishi select system configuration line. Nissan select Series-Parallel and Series line. Think about cost, technology base, and target produce, we select the Series line. Analysis the matching and energy conservation. The Series HEV has low cost and the structure compact. The Series HEV has the benefit of succession.

Key words: Series, HEV, matching, energy conservation

1 概述

根据国家发展规划, 四阶段节能型汽车燃料消耗量需降到 5L/100km 以下, 非插电混合动力汽车 (HEV) 可以实现此目标; 未来 HEV 市场不可忽视【1】。预计 2020 年后 HEV 市场将快速增长, 2025 年达到乘用车总量的近 20%, HEV 在其中有很大的发展空间。

欧洲车厂大多基于其强大的发动机和变速器, 附加单电机, 走并联 HEV 技术路线。美、日倾向于双电机的混合驱动系统, 完全替代传统变速器、降低混动系统成本, 走串联 HEV、混联 HEV 路线; 丰田、通用、福特、克莱斯勒坚持以行星轮系为核心的功率分流构型路线; 本田、三菱选择了系统构型路线; 日产选择了双电机串并联和串联路线。2017 年中国市场上, 广汽丰田雷凌双擎、一汽丰田卡罗拉双擎两款 HEV 销量总和达 10 万辆规模, 其市场竞争力来源于: 良好的动力性, 极低的油耗, 与传统车售价相当。这也展示了 HEV 强大的市场竞争力。

考虑成本、技术基础、目标产品等多方面因素, 选择串联混动作为研究方向进行匹配分析和节

能研究。串联混动系统结构紧凑，成本低，动力总成结构形式上大致相同，具有较好的产品继承性。以本公司某款车型为匹配目标，进行串联混动系统的匹配分析，研究不同控制策略节能潜力。串联混动混动能够实现电机驱动乐趣和超低油耗的价值。将先进的电机驱动系统和发电用发动机的两者组合，成为新时代的动力总成。

2 串联混动系统匹配

车辆性能（加速度、爬坡能力和最高车速）完全取决于牵引电动机的尺寸和特性。串联混动系统中，发动机/发电机系统与驱动轮在机械上是分离的，如图 1 所示。发动机的转速和转矩与车速和牵引转矩的需求无关，于是可控制发动机运行在其转速-转矩平面上的任意运行点。通常，应控制发动机运行在最佳运行区，此时发动机的油耗和排放将减至最低程度。发动机的运行点与电驱动系统的运行模式和控制策略密切相关。

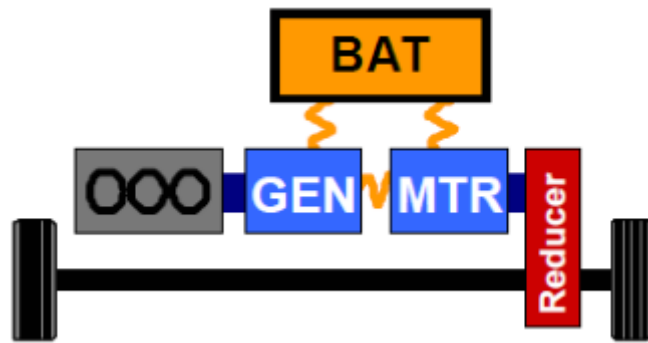


图 1 串联混动系统示意图

电驱动系统有多个运行模式，它们可以按照行驶条件和驾驶员的愿望予以选择。这些模式包括：
混合牵引模式：当需要大量功率时，驾驶员猛踩加速踏板，发动机/发电组合电池两者都向电动机供给功率。
电池牵引模式：电池单独供给功率，满足牵引功率的需求。
发动机/发电机牵引模式：发动机/发电机单独供给功率，满足牵引功率的需求。
发动机/发电机牵引、充电模式：当峰值电源中的能量减少到最低容量时，必须予以充电，充电过程可以由再生制动或发动机/发电机进行，通常，采用发动机/发电机充电。此时，发动机功率被分解为两部分：一部分用于驱动车辆，另一部分则用于向峰值电源充电。
再生制动模式：当车辆制动时，牵引电动机作为发电机，将车辆质量的部分动能转变为电能，向电池充电【2】。

2.1 牵引电动机功率匹配

串联混动系统中，电动机驱动的最大功率完全取决于车辆加速性能要求、电动机特性和传动装置特性。一般，按照加速性能（百公里加速时间）估算电动机的最大功率值，计算公式如下所示。对于乘用车，爬坡能力的需求功率一般低于加速性能的需求【2】。

$$P_t = \frac{\delta M}{2t_a}(V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3}M_g f_x V_f + \frac{1}{5}\rho_a C_D A_f V_f^3$$

式中, M 为车辆的总质量 (kg); t_a 为期望的加速时间 (s); V_b 为相应于电动机基速的车速 (m/s); V_f 为车辆加速后的终速 (m/s); g 为重力加速度 (9.80m/s^2); f_r 为轮胎的滚动阻力系数; ρ_a 为空气密度 (1.202kg/m^3); A_f 为车辆迎风面积 (m^2); C_D 为空气阻力系数。

2.2 发动机/发电机功率值匹配

串联混动系统中, 发动机/发电机用于供应稳态功率, 以防止电池完全放电。对于发动机/发电机的匹配, 应考虑两种驾驶情况: 长时间采用恒定车速的行驶情况, 车辆不应依靠电池承载高速行驶, 此时, 发动机/发电机应该有足够的功率支持这一车速的运行。可以根据长时间最高行驶车速所需功率选择发动机/发电机额定功率。采用频繁的停车-起动模式的行驶情况, 发动机/发电机应产生足够的功率以保持电池的能量储存, 使之有充裕的功率满足车辆加速和爬坡的需求。一般, 长时间采用恒定车速行驶情况的功率需求高于采用频繁的停车-起动模式的行驶情况的功率需求。在发动机/发电机系统匹配中, 其功率应大于等于维持车辆恒速 (高速公路/高速行驶) 行驶所需的功率。

发动机/发电机匹配中, 应规定运行点。在此运行点上, 该发动机/发电机可产生上述功率。有两种合理的设计, 一种方法是设计发动机的运行点在其效率最高点处。这种匹配油耗较低, 发动机匹配的较大。一种设计方法是令发动机的运行点为较高功率点, 接近发动机最大功率。这种匹配可用一个较小的发动机, 但是油耗较高。

2.3 电池匹配

电池电源必须在任何时刻均能向牵引电动机提供足够的功率, 同时电池必须存储充裕的能量以防止由于过度放电导致功率供应中断的状态。

为了充分利用牵引电动机的功率容量, 发动机/发电机和电池电源的总功率应大于等于电动机的最大功率。

3 某车辆串联混动系统匹配案例

输入车辆的总质量 (1600kg), 滚动阻力系数, 空气阻力系数, 迎风面积, 设定百公里加速时间为 10s。根据 2.1 牵引电动机功率计算公式, 得出最大功率为 90kW。根据可选电动机, 最终选择最大功率 104kW@12000r/min 的牵引电动机。图 2 为其外特性扭矩曲线。图 3 为其效率 Map。

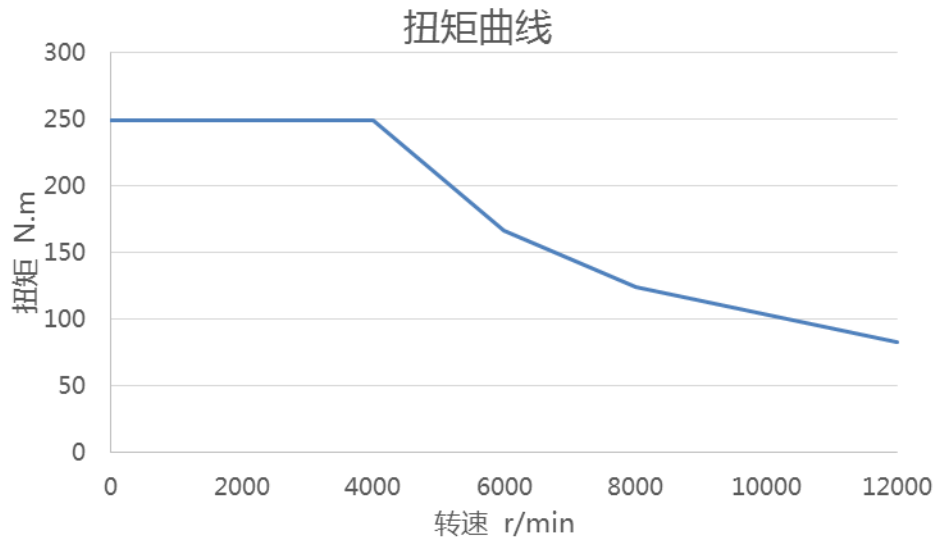


图 2 牵引电动机扭矩曲线

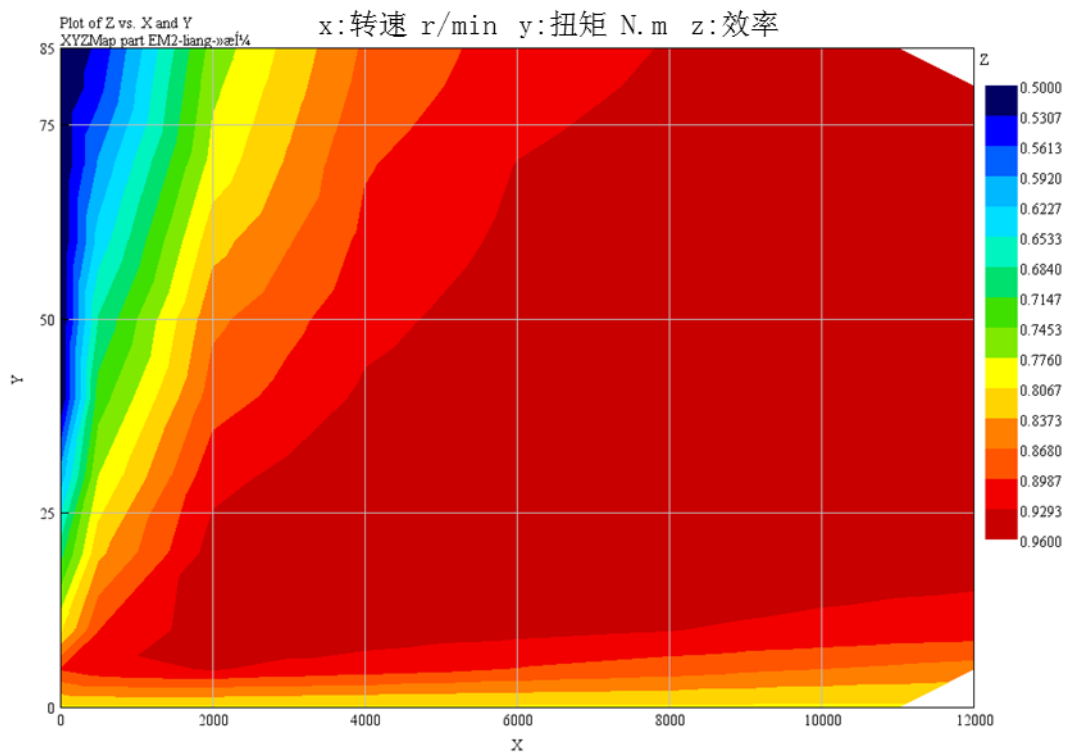


图 3 牵引电动机效率 Map

设定车辆最高车速为 150km/h，根据牵引电动机的特性，选择传动比为 10.3。

发动机/发电机功率的匹配要求以高速功率标准车速（120km/h）行驶的需求，所需发动机的功率为 30kW，采用第一种匹配方法，选择本公司某款发动机为基础机型，其最佳油耗点功率为 30kW。

4 某车辆串联混动节能分

对应于各种循环的油耗可通过仿真计算得出，此处采用 NEDC 循环，建立某车辆传统动力经济性计算模型，某车辆串联混动经济性计算模型，对于串联混动模型分别采用了恒温控制策略和功率跟随策略，获得采用不同控制策略的循环百功率油耗，并对比分析了节油比例不同的原因。

4.1 传统车辆经济性计算模型和结果

根据 GT 模型的需求，输入对应的参数，NEDC 循环百公里油耗为 8L/100km，以此为基础，进行串联混动节能对比基础。图 4 为传统车辆经济性计算模型。

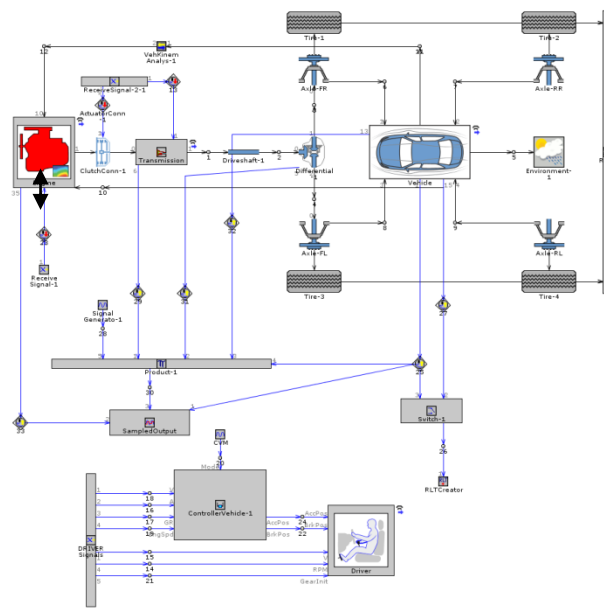


图 4 传统车辆经济性计算模型

4.2 串联混动恒温控制策略计算模型和结果

根据 GT 模型的要求，输入对应的参数，采用恒温控制策略，NEDC 循环百公里油耗为 6.1L/100km。节能 23.75%。图 5 为串联混动经济型计算模型。图 6 为恒温控制策略。

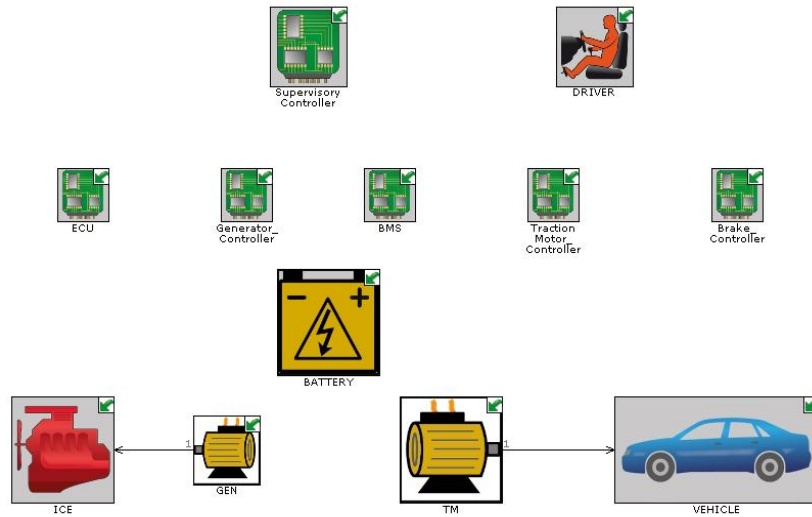


图 5 串联混动经济型计算模型

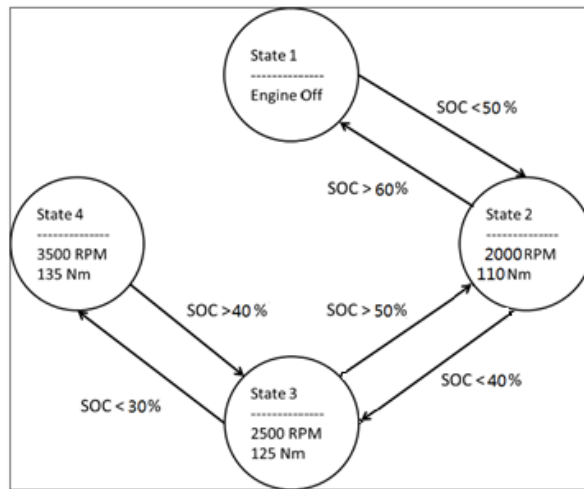


图 6 恒温控制策略

4.3 串联混动功率跟随控制策略计算模型和结果

根据 GT 模型的要求，输入对应的参数，采用功率跟随控制策略，NEDC 循环百公里油耗为 5.4L/100km。节能 32.5%。图 7 为功率跟随控制策略。

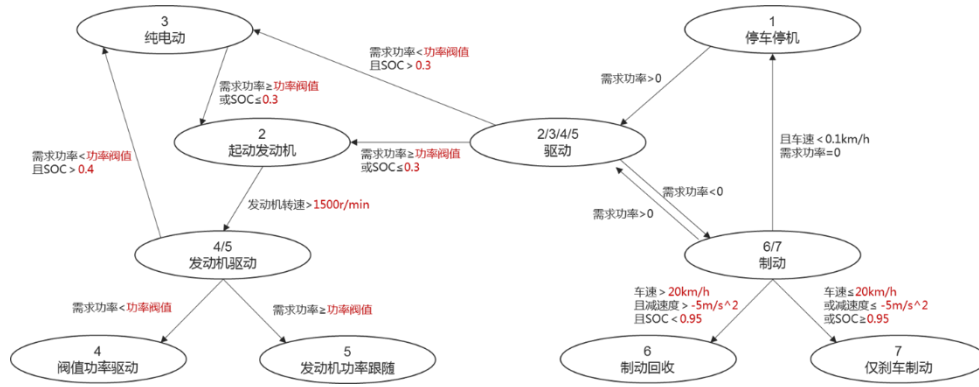


图 7 功率跟随控制策略

4.4 节能原因分析

传统车辆油耗高的主要原因是：怠速耗油，低速低负荷油耗高。图 8 为传统车辆发动机运行点分布，可以看出大部分时间，发动机都运行在低速低负荷区域，导致油耗高。

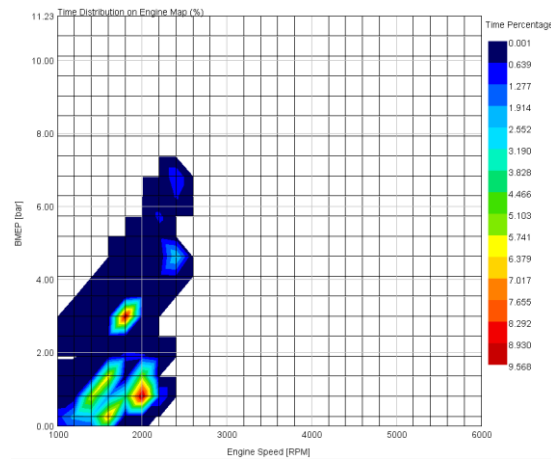


图 8 传统车辆发动机运行点分布

串联混动，解决了怠速耗油问题，通过控制策略使得发动机运行在最佳油耗区域，使得循环油耗大幅度降低。

串联混动，NEDC 循环有两种运行状态：**EV 状态**：电池供电，牵引电动机驱动车辆，能量来源于汽油，通过发动机转化为机械能，带动发电机给电池供电（发电-电池-电动路径，传递效率 75%，转化效率 24.8%）。图 9 为 EV 状态示意图，图 10 为发电-电池-电动路径传递路径，传递效率 75%，转化效率 24.8%。**发动机运行充电状态**：发动机单点运行，发动机带动发电机，发电机带动电动机驱动车辆，这部分功率走（发电-电动路径，传递效率 88%，转化效率 28.3%）发动机剩余功率充电，这部分功率走（发电-电池-电动路径，传递效率 75%，转化效率 24.8%）。

可以看出，跑 NEDC 循环，在 EV 状态，走发电-电池-电动路径，传递效率和转化效率较低；在发动机运行充电状态，发电功率分流成两路，一路走发电-电池-电动路径，传递效率和转化效率较低，一路走发电-电动路径，传递效率和转化效率较高。所以，节能的一个出发点，就是尽量多走发电-电动路径，少走发电-电池-电动路径。

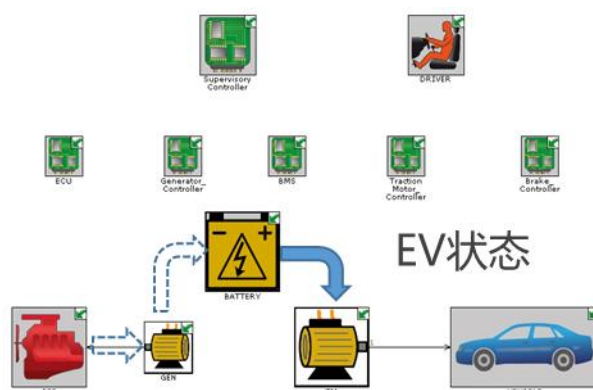


图 9 EV 状态示意图

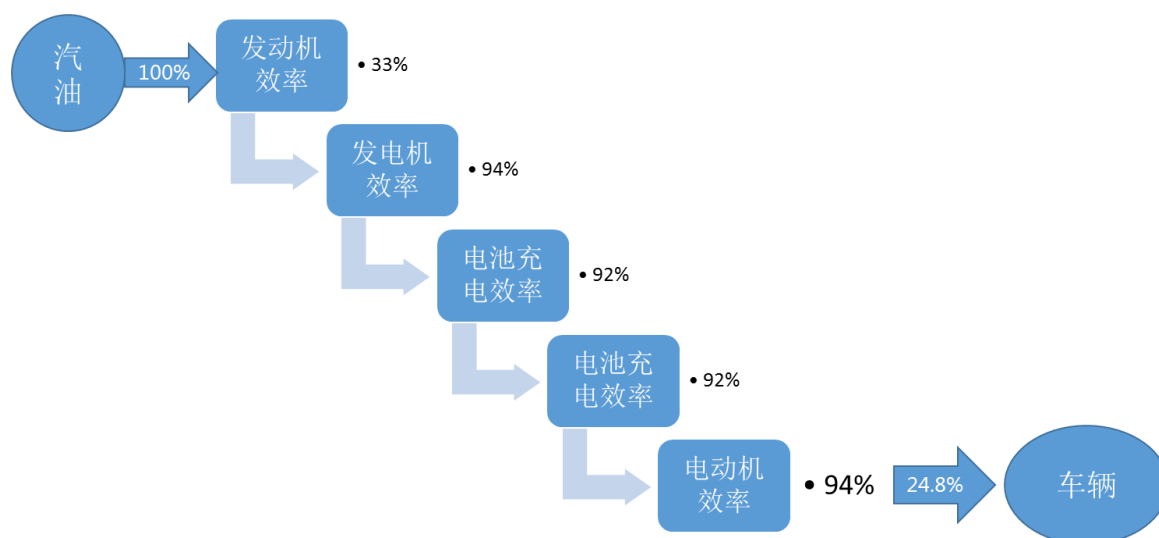


图 10 发电-电池-电动路径

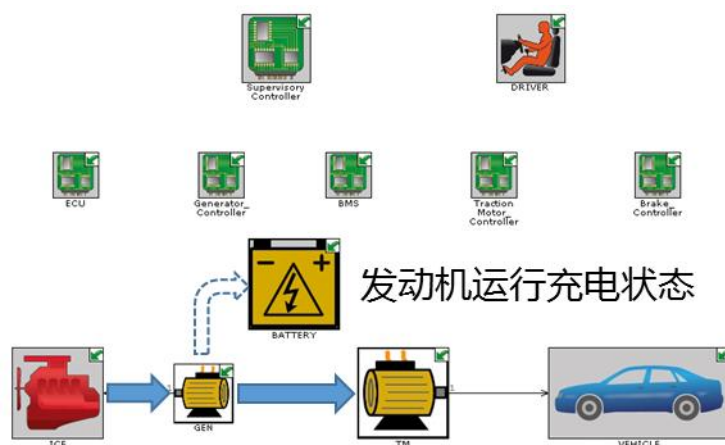


图 11 发动机运行充电状态示意图

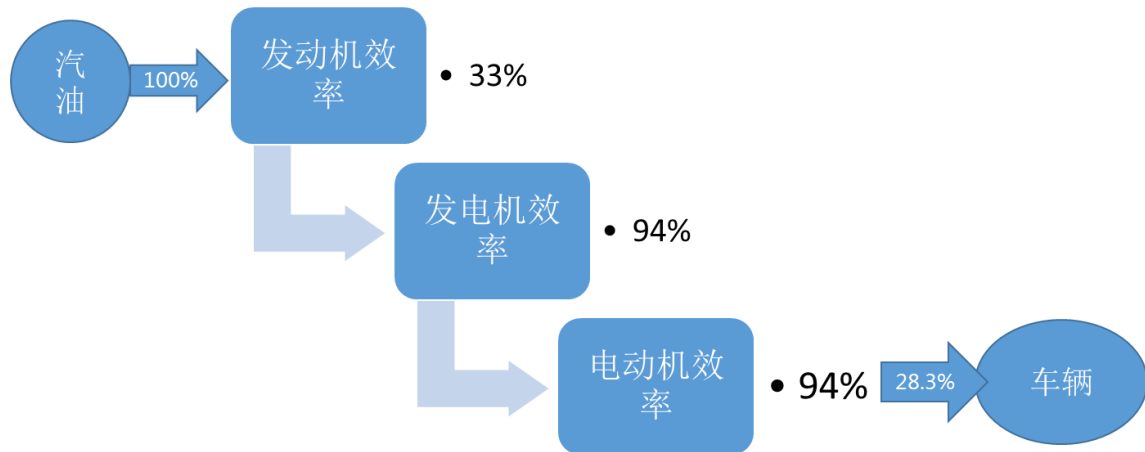


图 12 发电-电动路径

恒温控制策略下，大部分时间在 EV 状态运行，少部分时间发动机运行充电。图 13 为恒温控制策略下发动机运行状态。功率跟随控制策略下，EV 状态运行时间减少，发动机运行充电时间增多。图 14 为功率跟随控制策略下发动机运行状态。功率跟随控制策略相比恒温控制策略，发动机运行充电时间增多，传递效率提高，所以节能比例更高（32.5%VS23.75%）。

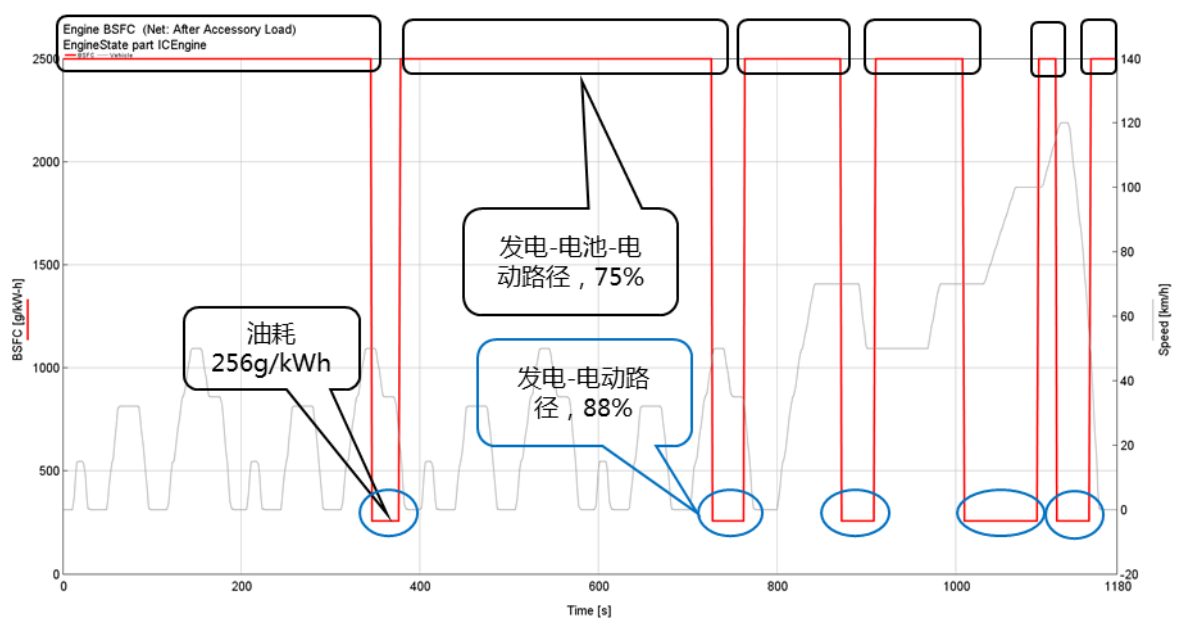


图 13 恒温控制策略下发动机运行状态

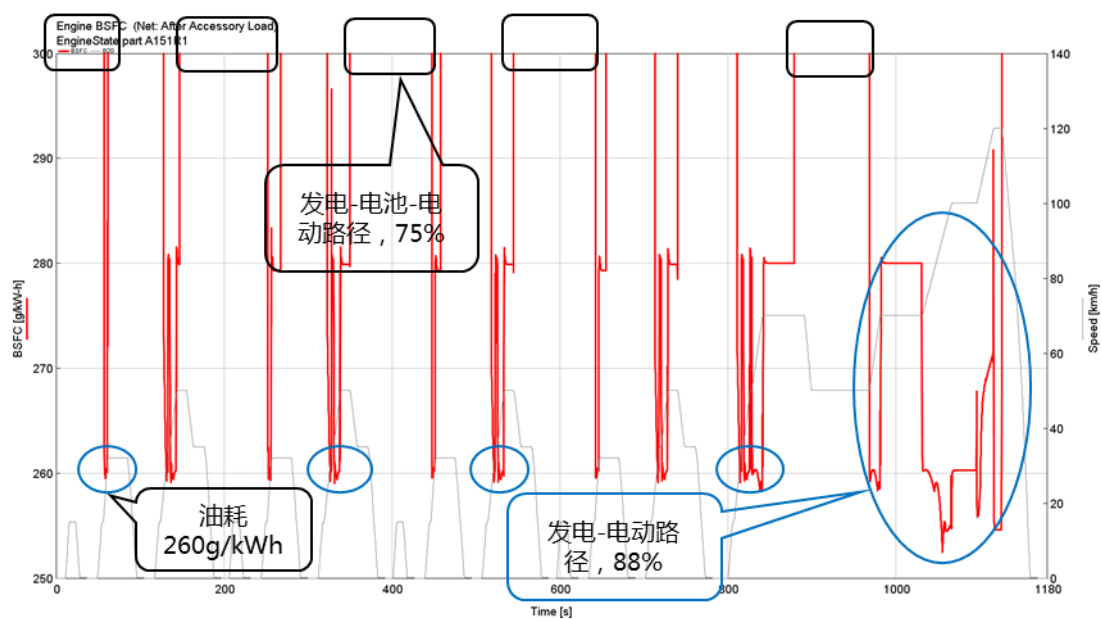


图 14 功率跟随控制策略下发动机运行状态

5 结论

- 1) 根据开发目标，以某款车型为匹配对象，进行了串联混动匹配分析；
- 2) 通过 GT 软件，进行了节能潜力分析，恒温控制策略可节能 23.75%，功率跟随控制策略可节能 32.5%；
- 3) 分析了两种控制策略节能比例不同的原因主要是传递效率不同。

6 参考文献

- [1] 中国汽车技术研究中心，《中国节能与新能源汽车发展研究报告 2017》，会议论文，2017 年 9 月
- [2] Mehrdad Ehsani 等，《现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车-基本原理、理论和设计》，机械工业出版社，2010 年 8 月