

# 汽油/CNG两用燃料汽车燃料切换仿真研究

## Simulation on Fuel Switching of Gasoline/CNG Bi-fuel Automotive

王凯楠 侯献军 余其旺 闫少杰 徐楠楠  
(武汉理工大学汽车工程学院, 武汉430070)

**摘要:** 应用GT-power软件对汽油/CNG两用燃料汽车的燃料切换进行建模与仿真。以节气门位置信号作为控制信号, 基于汽车后备功率选择合适的燃料切换点, 从而提高汽车在高负荷工况下的动力性, 为燃料切换的进一步研究提供理论依据。

**关键词:** 两用燃料发动机; GT-power; 模拟仿真; 后备功率; 燃料切换

**Abstract:** GT-power software is applied to establish a fuel supply switching simulation model in gasoline/CNG Bi-fuel vehicle. The TPS signal is set as the control signal, and the fuel switching point is selected rationally based on the considering of reserve supply of power, which improves the acceleration performance of the vehicle when the engine is in high load. The result provides a theory for further study on the control of fuel supply switching.

**Keywords:** Bi-fuel engine, GT-power, simulation, reserve supply of power, fuel switching

两用燃料汽车 (Bi-fuel Vehicle) 装有两套燃料供给系统, 使用中可以在两种燃料之间进行灵活切换<sup>[1]</sup>。目前市场上出现了大量以汽油机汽车改装的汽油/CNG两用燃料汽车, 改装后经济性好, 排放污染少, 但动力性下降10%–20%<sup>[2]</sup>。本文通过对两用燃料发动机燃料供给系统的控制策略进行优化设计, 使两种燃料在各工况下得到优化利用, 并通过一维仿真软件GT-power进行建模仿真, 验证设计方案。

### 1. 理论分析

#### 1.1 建立节气门开度与汽车后备功率的关系式

基于对汽车动力性和燃油经济性的综合考虑, 发动机按部分负荷运行时, 应使用天然气作为燃料; 以大负荷和全负荷运行时, 改用汽油作为燃料, 从而增大了汽车的后备功率, 有效地提高了汽车的动力性, 同时也可以避免在低负荷工况下长期以汽油作为燃料进行工作, 提高汽车的经济性。因此, 燃料的切换取决于负荷的变化。在发动机管理系统中, 负荷监测通常可分为空气质量监测、进气歧管绝对压力监测以及节气门开度监测, 其中节气门开度信号作为第二级负荷信号主要用作提供动态功能信息和负荷工作状况 (怠速、全负荷或部分负荷)<sup>[3]</sup>。节气门开度传感器用作负荷传感器结构简单, 成本低, 已广泛应用于发动机电控系统, 因此笔者采用节气门开度作为负荷信号, 燃料切换则取决于节气门开度的改变。

发动机的转矩或功率可表示为节气门开度 $\alpha$ 和转速 $n$ 的函数, 而当变速器档位一定时, 车速 $u$

与发动机转速  $n$  可建立线性对应关系。因此, 发动机转矩和功率经台架试验信号采集, 并进行数据转化与拟合后, 可分别表示为  $T(\alpha, u)$  和  $P(\alpha, u)$ 。

当汽车燃用CNG在水平良好路面上匀速行驶时, 由汽车的功率平衡方程可知<sup>[4]</sup>:

$$P(\alpha, u) = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gfu}{3600} + \frac{C_D A u^3}{76140} \right) \quad (1)$$

式中  $G$  为汽车总重量,  $f$  为滚动阻力系数,  $C_D$  为空气阻力系数,  $A$  为迎风面积,  $\eta_T$  为传动效率。代入发动机与车辆相关数据解方程 (1), 可求得节气门开度  $\alpha$  与车速  $u$  的关系:

$$\alpha = A(u) \quad (2)$$

汽车行驶时, 其后备功率可表示为:

$$Ps = P(100, u) - \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gfu}{3600} + \frac{C_D A u^3}{76140} \right) \quad (3)$$

式中  $Ps$  为后备功率,  $P(100, u)$  即为功率外特性曲线的表达式。

定义某车速时, 后备功率  $Ps$  占该车速下最大功率  $P(100, u)$  的比例为  $Q$ , 即:

$$Q = \frac{P(100, u) - \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{Gfu}{3600} + \frac{C_D A u^3}{76140} \right)}{P(100, u)} \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 必然存在车速与后备功率比率的关系:

$$u = f(Q) \quad (5)$$

因此, 由关系式 (2)、(5) 可推导出后备功率比率  $Q$  与节气门开度  $\alpha$  的关系:

$$\alpha = g(Q) \quad (6)$$

## 1.2 燃料的切换策略

当司机踩下油门踏板, 汽车后备功率不断减小, 加速与爬坡能力下降; 后备功率下降到一定程度时, 须切换燃料供应, 以满足对汽车动力性的需求。因此, 可选取某一数值作为燃料切换前的后备功率比率, 记为  $Q'$ , 并通过式 (6) 计算出燃料切换时节气门开度  $\alpha'$ 。

为保证汽车行驶时有足够的后备功率,  $Q'$  可取较大值; 但  $Q'$  值过大时, 会使切换后发动机负荷率较低, 影响汽车经济性, 同时易造成发动机燃料频繁切换, 不利于汽车行驶。若  $Q'$  取值较小, 发动机切换至燃用汽油前负荷率高, 此时节气门开度较大。由于燃用汽油后动力性明显增强, 而切换瞬间节气门开度不变, 发动机转矩会瞬间大幅提高, 可能会使汽车行驶不稳定。

当汽车在水平良好路面上匀速行驶时, 由力的平衡关系, 在燃料切换前:

$$\frac{T(\alpha', u) i \eta_T}{r} = Gf + \frac{C_D A u^3}{21.15} \quad (7)$$

式中  $i$  为传动系传动比,  $r$  为汽车轮胎滚动半径。

假设切换时车速不变, 则转矩变化全部转化为汽车的加速度, 切换燃料造成的加速度为:

$$\frac{du}{dt} = \frac{i\eta_r}{\delta mr} [T_1(\alpha', u) - T(\alpha', u)] \quad (8)$$

式中  $T(\alpha', u)$  表示发动机燃料切换为汽油时的转矩,  $\delta$  为汽车旋转质量转换系数。

如果普通汽油机汽车以速度  $u$  行驶, 司机踩满油门时, 由汽车行驶力的平衡关系, 可得:

$$\left( \frac{du}{dt} \right)_m = \frac{1}{\delta m} \left[ \frac{T_1(100, u) i\eta_r}{r} - Gf - \frac{C_d A u^2}{21.15} \right] \quad (9)$$

将此加速度设为极限值, 则:

$$\frac{du}{dt} / \left( \frac{du}{dt} \right)_m \leq 1 \quad (10)$$

此式表明切换燃料产生的加速度不大于汽油机汽车瞬间踩满油门所产生的加速度<sup>[5]</sup>, 可作为约束条件以判断所选择工况点是否可行。

## 2. 仿真模型建立

以GT-power软件为设计平台, 对某两用燃料发动机汽车燃料切换的工作过程进行建模仿真, 该模型主要选用的模块有: 气缸、喷嘴、进排气管道、进排气门、控制单元等, 如图1所示。

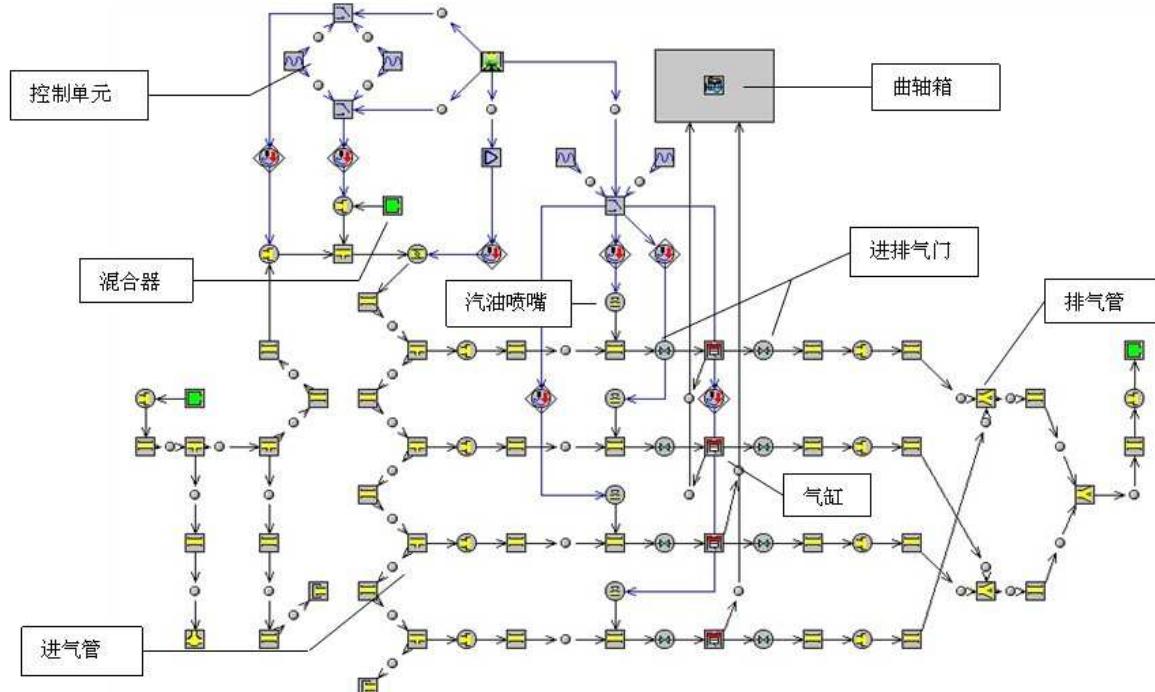


图1 两用燃料发动机及燃料切换系统模型

首先对发动机的进、排气管道进行布置, 其中进、排气口处的摩擦损失与压差损失均设为0, 因为此处的损失已计入气门的流量系数<sup>[6]</sup>。本模型中采用混合器作为供气装置, 并利用 EndEnvironment模块模拟混合器总成, 在Composition中建RLTDependence类型参考模块mixgas来调节空燃比, 从而模拟功率阀的工作。在SignalGenerator模块中存入目标值或目标指针, 再利用 Switch模块构成一定的逻辑单元, 将参数Threshold设为切换时的节气门开度, 从而根据节气门开度控制混合器阀门的开启以及喷油器工作与否。

两用燃料发动机建模时须根据信号来改变燃烧模型参数, 为缩短运算时间, 采用相对简单的韦伯燃烧模型<sup>[7]</sup>, 调用EngCombSIWiebe模块, 将数组指针存入XYTableDependency参考模块实现不同燃料燃烧参数根据节气门开度而变化, 从而模拟不同燃料的切换燃烧。

### 3. 仿真分析及方案验证

将节气门开度与发动机转速分别设为变量, 通过改变逻辑控制单元中的参数, 打开混合气阀门并使喷油器处于非工作状态, 对发动机模型进行稳态仿真运算, 运算得出发动机燃烧CNG时功率随节气门开度与发动机转速的变化关系。为简化运算, 将汽车档位设定在高速档, 以计算高档位时的运行状况, 将发动机转速转化为汽车行驶速度, 再通过曲面数据拟合处理, 得到关系式 $P(\alpha, u)$ , 如图2所示。由方程(1)可得到水平良好路面上匀速行驶车辆节气门开度与车速的关系 $\alpha=A(u)$ , 如图3所示。

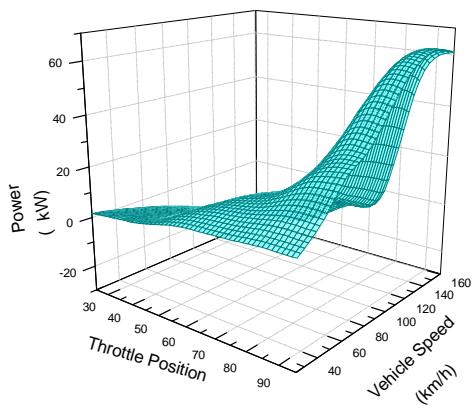


图2 燃用CNG时的发动机功率万有特性

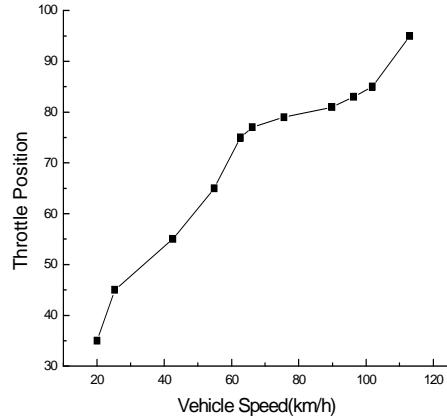


图3 节气门开度与车速的关系

通过改变逻辑控制单元中的参数并运行模型, 可得到发动机燃烧两种燃料时功率外特性曲线, 再根据车辆的相关参数计算出汽车行驶的阻力功率, 计算得到车辆行驶的后备功率比率 $Q$ 与汽车行驶速度 $u$ 的关系, 如图4所示。再根据上述计算结果作出汽车功率平衡图, 如图5所示。

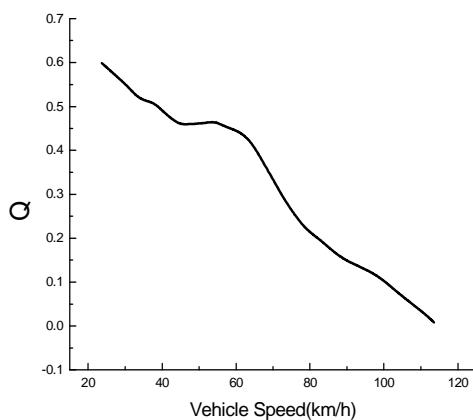


图4 燃用CNG时后备功率比率 $Q$ 与车速的关系

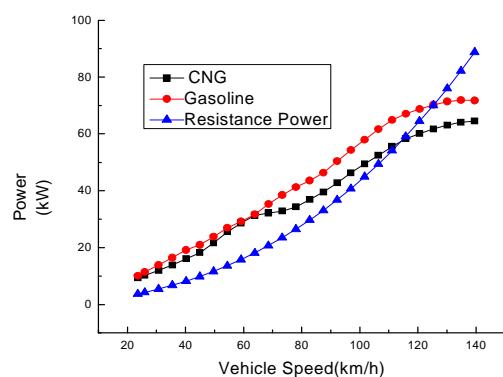


图5 汽车行驶功率平衡图

此处笔者取 $Q'=20\%$ 来计算验证汽车动力性增强与行驶稳定性。由运算结果可知当 $Q'=20\%$ 时,

汽车行驶速度  $u \approx 79 \text{ km/h}$ , 代入  $\alpha = A(u)$  后可得  $\alpha' = 80\%$ 。故将  $\alpha' = 80\%$ 、 $u \approx 79 \text{ km/h}$  作为燃料切换工况点, 经计算表明, 此时发动机发出功率提高约 19% 功率, 汽车后备功率提高约 193%。

同时以此研究燃料切换时对汽车行驶稳定性的影响。运行模型可得两用燃料发动机在燃烧不同燃料时的转矩的部分速度特性, 将燃料切换工况点的数据代入式 (8)、(9) 中, 经计算可以得出:

$$\frac{du}{dt} \left/ \left( \frac{du}{dt} \right)_m \right. = 0.4734 < 1$$

这表明此时燃料切换对车辆行驶稳定性的影响小于汽油机汽车瞬间踩满油门对汽车产生影响, 因此该工况点的选取合理有效。

## 4. 结论

- (1) 对汽油/CNG 两用燃料发动机燃料供给系统控制策略进行设计, 提出并建立了汽车后备功率与节气门开度关系的数学表达式, 从后备功率的角度选择适合的燃料切换点, 要求切换燃料产生的加速度不大于汽油机汽车瞬间踩满油门所产生的加速度。
- (2) 建立汽油/CNG 两用燃料发动机及燃料切换系统的 GT-power 仿真模型, 并利用该软件对两用燃料汽车燃料切换进行仿真分析。结果表明, 在  $\alpha' = 80\%$  的工况点进行燃料切换, 发动机发出功率提高约 19% 功率, 汽车后备功率提高约 193%。
- (3) 仿真分析可以减少研发的时间及成本, 并通过对发动机工作过程的准确预测, 为实际装置试制及道路试验提供理论基础。

## 5. 参考文献

- [1] 黄海波. 燃气汽车结构原理与维修 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 姚勇. CNG发动机和汽油机燃烧的比较分析 [J]. 车用发动机, 2005 (5).
- [3] 吴森等译. 汽油机管理系统 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
- [4] 余志生. 汽车理论 [M]. (第3版) 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [5] 廖均智. 电控汽油—压缩天然气 (CNG) 两用燃料发动机动力性恢复研究 [D]. 西安: 长安大学, 2005.
- [6] Gamma Technologies, Inc. GT-POWER USER'S MANUAL. 2006.
- [7] 蒋德明. 内燃机燃烧与排放学 [M]. (第1版) 西安: 西安交通大学出版社, 2001.