

混合动力汽车发动机快速起动瞬态燃烧和碳氢排放

于水¹,董光宇²,吴志军²,李理光²

(1. 上海交通大学 动力与机械工程教育部重点实验室, 上海 200030; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 200092)

摘要:介绍了用于混合动力汽车动力系统的发动机快速起动模拟试验台架系统和相关试验。针对一台进气道喷射式汽油机,模拟起动/发电一体化电机,研究在不同拖动转速下快速起动过程的瞬态特性和排放特性。试验结果表明:发动机在快速起动情况下,瞬态特性突出;随着拖动转速升高,进气歧管压力降低,对应的喷油策略也应随之调整;在发动机起动后的第2到第9循环,容易发生不完全燃烧和失火,并随着拖动转速升高,不完全燃烧程度增加,导致碳氢排放过高。在不同拖动转速下,三效催化剂都不能高效转化碳氢排放,但转化效率存在差异。随着拖动转速升高,催化剂的转化效率先降低后又升高。从优化排放角度来看,在本文试验条件下,快速拖动至1000 r/min 起动时,使用催化剂后排放最低。

关键词:动力机械工程;混合动力汽车;起动/发电一体化电机;快速起动;碳氢排放;瞬态特性
中图分类号:TK421 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)05-1034-06

Transient combustion and hydrocarbon emissions from a hybrid electric vehicle engine under high-speed rapid start conditions

YU Shui¹, DONG Guang-yu², WU Zhi-jun², LI Li-guang²

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A test bench to simulate the rapid start of the engine with an integrated starter/generator system for the hybrid electric vehicle was presented. The transient behaviors, especially the transient hydrocarbon(HC) emissions from a inlet port fuel injected gasoline engine under rapid start at different speeds were tested to simulat the engine with ISG. The test results show that the engine demonstrates more transient behavior under the rapid start conditions at high cranking speeds than the traditional engine under the normal start conditions. The intake manifold pressure is lower when the cranking speed increases, thus the fuel metering strategy should be modified. The incomplete combustion and misfire are more liable to come into being at the first 2~9 cycles during the start process. With the increase of cranking speed, the incomplete combustion becomes more serious, leading to higher HC emissions. Under the start conditions the HC emissions can not be converted effectively by the three-way catalytic converter no matter how high the cranking speed is but its

收稿日期:2007-06-23.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展规划项目(2007CB21005);“863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA11A130)

作者简介:于水(1981-),男,博士研究生.研究方向:内燃机燃烧与排放控制. E-mail:y-shui@sjtu.edu.cn

通信作者:李理光(1962-),男,教授,博士生导师.研究方向:燃烧与排放控制及代用燃料.

E-mail:liguang@mail.tongji.edu.cn

conversion rate depends on speed. When the cranking speed increases, the conversion rate decreases firstly, then increases again. For the condition of this study, the post-catalyst HC emissions appear minimum at the speed about 1000 r/min.

Key words: power and machinery and engineering; hybrid electric vehicle; integrated starter/generator; rapid start; hydrocarbon emission; transient behavior

随着能源危机和环保压力的日益加剧,混合动力汽车因其具有优异的节能环保性能加上能够在短期内实现大规模商业应用的优点,备受国内外企业以及研究机构的关注。混合动力汽车省油的主要途径之一是减少发动机怠速工况。因此,根据混合动力系统能量分配策略以及不同的道路交通状况,发动机会频繁地停机并重新起动。美国韦恩州立大学对一种并联结构的混合动力系统在 FUDS(Federal Urban Driving Schedule) 驾驶循环下进行了仿真,结果表明,发动机在单个驾驶循环中被起动了 65 次^[1]。这在某种程度上表明,发动机频繁起动-停机是混合动力汽车一个重要的瞬态工况,故对起动-停机过程发动机控制策略和燃烧排放特性进行研究非常必要。

目前针对混合动力汽车发动机起动-停机的研究主要集中在以下几个方面:①燃油经济性综合优化^[2];②车辆驾驶性和舒适性优化^[3];③排放特性^[4]。然而对于起动-停机过程排放特性的研究仅限于对量产混合动力汽车的测试,并未深入到对发动机燃烧和排放控制上。混合动力汽车发动机的快速起动过程与传统汽车发动机小电机低速拖动下的起动过程存在诸多不同。当进气道为喷射式(PFI)的汽油机起动时,发动机转速、进气道压力等显著影响发动机燃烧的参数都会剧烈变化,因此,起动过程控制策略极其复杂。起动时首先加速到最大转速,然后减速并稳定到怠速。进气道压力从大气压急剧下降到怠速状态的最低值。根据文献^[5]报道,在起动过程发生不完全燃烧和失火将产生大量的碳氢排放,这是因为此时过低的进气道压力使气缸内的残余废气增多,稀释了可燃混合气,同时由于缸内燃烧条件不好,造成起动开始后的第 4 到第 7 循环发生不完全燃烧和失火。混合动力汽车发动机由大电机拖动起动,起动过程更快,瞬态程度更高,进气道压力变化更加剧烈,这将加大发动机起动过程燃烧控制的难度。此外,由于起动时的空燃比不能精确控制在理论空燃比附近,对于在混合动力汽车频繁热起动过程中产生的碳氢排放,三效催化剂不能

进行高效的转化。

综上所述,混合动力汽车发动机快速起动以及频繁起动对排放控制提出了新的研究课题。因此,作者对汽油机快速起动过程的控制策略和瞬态排放特性进行了研究。由于混合动力汽车的频繁起动多为热机起动,因此建立了一套可模拟混合动力发动机快速起停的台架系统,并针对发动机的热机快速起动过程进行实验与分析研究。

1 实验装置及实验方案

所建立的快速起停模拟实验台架示意图如图 1 所示。在发动机测试台架上安装一套伺服电机系统,通过设定伺服控制器的起动转速来实现发动机在不同拖动转速下的起动,从而实现 ISG 快速拖动的功能。同时,由于可选用较大功率的电机实现快速拖动,故可以在更广的范围内研究拖动转速对起动特性的影响,进而实现对快速起动转速的优化。

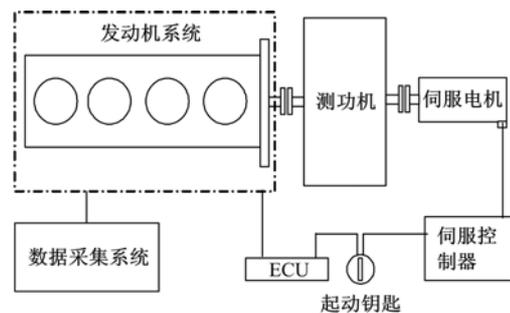


图 1 实验台架系统示意图

Fig. 1 Sketch map of test bench

对于进气道喷射式的汽油机,由于存在油膜动态问题,必须保证在起动首循环就喷油并可靠着火,以避免进气道油膜蒸发进入排气系统形成额外的碳氢排放。因此,本实验中发动机在拖动过程中就开始喷油点火,直到达到设定的拖动转速电机才断电由发动机反拖运行。采用这一拖动策略的好处是可以充分利用发动机燃烧的能量,而尽量减少电池能量的消耗,同时又能够实现更加快速和平稳的起动^[2]。此外,由于增加了伺服系统并与测功机连接,增加了一部分额外的起动

惯量,但是通过实验观察发现:这部分增加的惯量对起动转速的影响并不大。因此,实验过程与发动机空载起动过程也比较接近。

将 ECU 喷油信号、点火信号、转速传感器信号、凸轮轴相位信号以及进气道压力传感器信号等接入自制的信号调理电路板进行信号隔离和调理,然后接入数据采集仪保存实验数据。利用起动时凸轮轴相位传感器信号的第一个上升沿作为触发信号使数据采集系统开始保存数据。为了使起动开始时就进行采集,每次起动前都手动将发动机盘调到凸轮轴相位传感器信号发生上跳变之前的位置,这样也避免了由于停机位置不同而造成的对排放的影响^[6]。每次起动前第一缸活塞都处于排气上止点前 280°曲轴转角处,即位于膨胀冲程中期,这个位置是发动机正常停机位置之一^[7]。本研究采用了英国 Cambustion 公司的快速响应瞬态碳氢测试仪 HFR500 和瞬态 NO_x 排放测试仪 FNO_x400 进行排放测试和分析。该仪器将反应腔提前到采样探头附近,减少了传统仪器由于采样通道造成的响应延迟。在对某一缸进行单独测量时,采样探头可探到排气门附近,因此能够快速精确地测出单一循环的排放变化曲线。作者对发动机第一缸排气门处以及三元催化剂催化前后的排放特性进行了研究。实验用发动机的型号为 JL479QA;缸径×冲程为 78.7 mm×77.0 mm;压缩比为 9.3;气缸数为 4;点火顺序为 1-3-4-2;点火线圈形式为 1-4, 2-3;燃油为 93[#] 汽油;排放参照欧 III 标准;电控单元由联合电子提供,标称为欧 III 排放。

2 起动过程瞬态转速

如前所述,本文所讨论的起动过程为发动机的热起动过程。每次起动前先将发动机加热并稳定在水温 70 °C,然后停机稳定后重新起动,水温控制精度为 1 °C。为了保证可靠起动,发动机起动时先加速到高于怠速的某一峰值转速,然后再减速稳定到怠速。图 2 给出了不同拖动转速起动时发动机转速前 3 s 的变化规律。起动 3 s 后,发动机转速差别不大,由 ECU 控制自动稳定到怠速。为了清晰表达拖动过程的不同,这里只给出前 3 s 的转速变化。从图中可以看出,原发动机的起动电机拖动时,拖动最大转速在 200 r/min 左右,拖动时间为 0.6 s,在 2.5 s 左右才达到最大峰值转速,然后开始减速并稳定到怠速。当采

用大电机拖动起动时,拖动时间大大减少,在拖动过程中发动机已经开始燃烧,因此转速很快就上升到峰值转速。在拖动转速低于 1000 r/min 时,电机断电后发动机还有一定的加速。当拖动转速高于 1200 r/min 时,拖动转速基本上就是峰值转速,电机断开后发动机减速。当采用较高转速拖动起动时,起动时间大大减少,增加了起动的瞬态程度。原机所标定的起动控制策略在快速起动时将会发生变化,从而不能实现很好的燃烧排放控制。

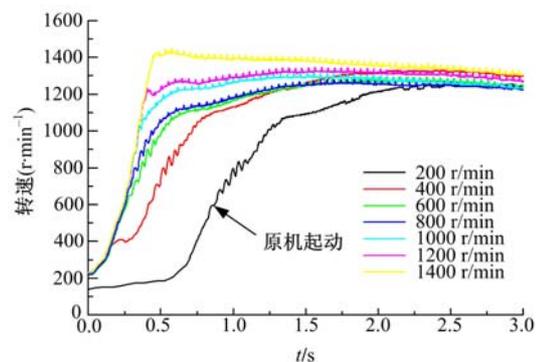


图 2 不同转速拖动起动时发动机瞬态转速变化规律
Fig. 2 Transient speed of engine at different start-up speeds

3 起动过程喷油策略

汽油机起动过程的燃烧控制策略都是经过大量的试验标定确定的,喷油量和点火提前角都进行了合理的优化以保证可靠的起动和良好的燃烧。本研究所用的 JL479QA 发动机是达到欧 III 排放标准的发动机,其原机的起动控制策略已进行了精确的标定。在进行快速起动时,拖动过程的改变使整个起动过程都发生了改变,发动机的控制策略也发生了改变。起动时,ECU 检测发动机转速、进气歧管压力以及水温、油温等状态参数,计算查表得到所需要的喷油量,并根据修正算法进行修正。图 3 给出了不同拖动转速起动时第一缸前 20 循环内各循环所对应的进气歧管压力。随着拖动转速升高,起动初始阶段的转速也较高,因而导致进气歧管压力降低。拖动转速高于 600 r/min 时,前 4 个循环处于电机拖动过程或刚刚脱离的状态,进气歧管压力差别并不大。从第 5 循环开始存在较大差异,一直到第 16 循环才基本达到一致。这种差异必然导致喷油策略和点火策略发生改变。图 4 给出了发动机在不同拖动转速下起动时,前 20 个循环的喷油脉宽。从图中可以

看出,随着拖动转速的升高,进气道压力降低,循环进气量减少,因而喷油量也随之减少。

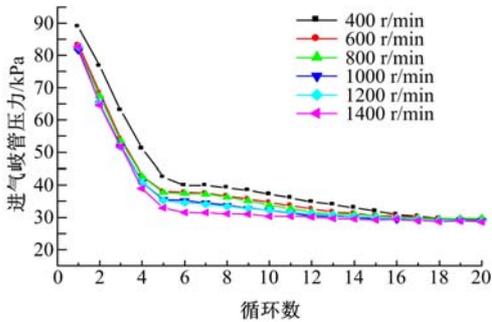


图 3 不同拖动转速下前 20 个循环进气歧管压力
Fig. 3 Intake pressure of first 20 cycles at different start-up speeds

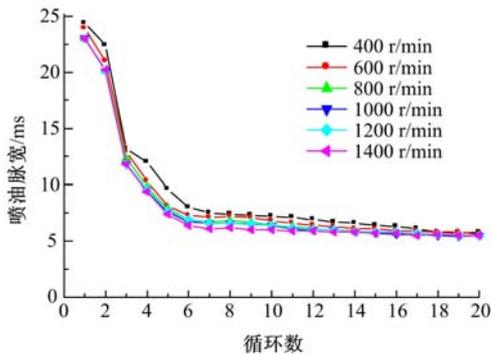


图 4 不同拖动转速下第一缸前 20 个循环喷油脉宽
Fig. 4 Injection pulse width of first 20 cycles in first cylinder at different start-up speeds

4 瞬态排放特性

4.1 起动过程瞬态排放特性

图 5 给出了发动机正常怠速时在排气门附近测量的碳氢排放在一个循环内的变化规律。图中 0° 位置在进气下止点位置,此时测量的碳氢排放为排气道内残留废气。由于采样抽气减少了排气道内废气量,因此在排气门打开之前碳氢浓度有

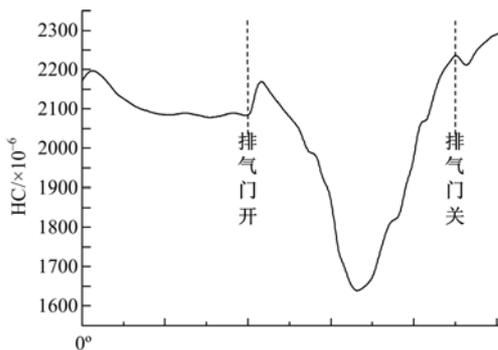


图 5 单一循环碳氢排放变化规律
Fig. 5 HC emission in a single cycle

所降低。排气门刚打开时,气体流速最大,将排气门附近缝隙内的未燃碳氢带出,使碳氢浓度出现一个峰值。随着排气的进行,大量废气从排气门排出,紧接着排出来的都是良好燃烧的废气,这些废气中碳氢浓度较低,因此在此阶段碳氢浓度急剧下降。直到排气冲程后期,残留在活塞和缸壁缝隙内的残余未燃碳氢才开始排出,因此随着排气冲程的进行,碳氢浓度又急剧升高。这说明发动机正常燃烧时,缝隙中残留的未燃碳氢是碳氢的主要来源,这与文献[8]中的结论一致。当排气门关闭后,碳氢浓度先降低,然后又有所升高,这是由于气流惯性产生的压力波动在排气道内形成回流所造成的^[9]。瞬态碳氢测量能够实时反映发动机瞬态过程的燃烧规律,下面将结合瞬态排放的测试结果对发动机起动过程的瞬态特性进行分析。

图 6 给出了在拖动转速为 800 r/min 的起动过程中,前 3 s 发动机转速、进气歧管压力、瞬态 HC 排放、瞬态 NO_x 排放和喷油脉宽的变化规律。发动机转速在 0.3 s 左右达到拖动转速设定值 800 r/min,在 0.5 s 左右达到峰值。随着转速

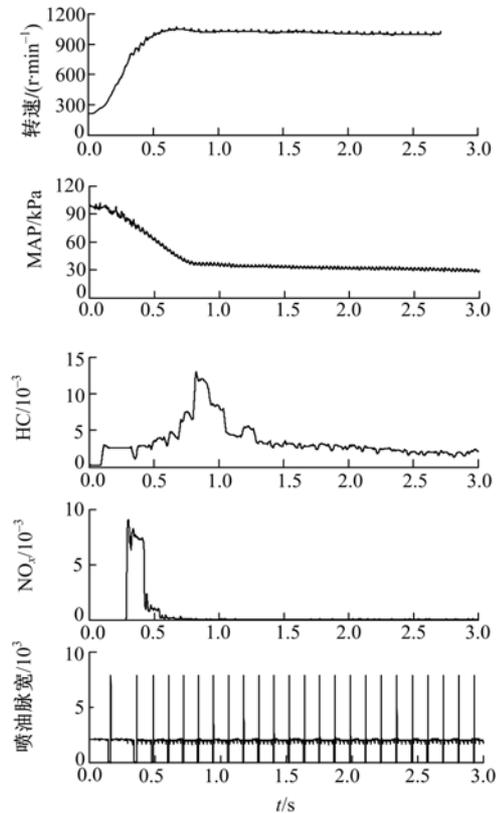


图 6 拖动转速为 800 r/min 时起动过程瞬态特性
Fig. 6 Transient characteristics at start-up speed of 800 r/min

的升高,进气歧管压力从 100 kPa 降低到 30 kPa 左右,但滞后于转速的变化,这主要是由进气歧管容积效应造成的。从喷油信号上看,第 1 循环喷油脉宽最宽,这是为了保证在第 1 循环实现可靠的着火。如图 4 所示,首循环将喷入 5 倍于正常怠速的喷油量。随后喷油量依次减少,直到第 5 循环才基本接近于怠速喷油量。起动阶段加大混合气尝试的目的除了要保证形成可靠着火的混合气以及重新建立进气道内油膜平衡外,还要克服起动惯量并对发动机加速。

由于采样探头一直在抽气,起动前从采样孔漏入空气,因此拖动开始时的碳氢排放接近于零。由于起动开始时第一缸位于膨胀冲程中期,此时排气门还未打开,因此直到排气冲程碳氢排放曲线才第一次上升,达到 2×10^{-3} 左右。这一阶段的排放只是上次停机时残留在气缸内的碳氢。对应喷油信号可以看出,虽然喷入了过浓的混合气,第 1 循环着火后碳氢排放浓度不高,但却产生了很高的 NO_x 排放,这说明首循环形成了强烈的燃烧。从第 2 循环开始,基本上不产生 NO_x 排放,这是因为在保证了首循环的可着火后,随后的几个循环发动机的点火角相对有所推迟。从第 2 循环开始,碳氢排放持续上升,直到第 6 循环碳氢排放达到最大值,到第 9 循环碳氢排放才恢复到较低的水平。如文献[8]所述,当进气歧管压力降低时,上一循环的缸内残余废气增多,使本次循环进入气缸内的可燃混合气稀释,导致不完全燃烧的发生,严重时还会发生失火,从而产生大量的碳氢排放。虽然在本研究中还未能测量出缸内混合气的空燃比以及残余废气系数,但是可以断定从第 2 到第 9 循环,缸内实际形成的混合气浓度偏稀而不能完全燃烧,因此这几个循环的喷油浓度应该适当增加。

4.2 不同拖动转速下的碳氢排放

当拖动转速增加时,发动机起动时间减少,进气歧管压力更低,气缸内的残余废气系数更大,因此更容易发生不完全燃烧和失火。图 7 给出了不同拖动转速起动时碳氢排放的对比。随着拖动转速的升高,不完全燃烧程度越来越大。当转速高于 1400 r/min 时甚至发生完全失火,这就造成了大量的碳氢排放。相比于原机小电机在拖动转速(200 r/min)下起动时,整个过程并未发生严重的不完全燃烧,碳氢排放浓度比较低。这说明原机作为达到欧 III 排放标准的发动机,其起动控制策

略能够保证在整个起动过程中良好的燃烧,并实现了较低的排放控制。从图中还可以看出,当起动过程加快时,最高碳氢排放位置沿时间轴前移。600 r/min 拖动起动时,最高碳氢出现在第 7 循环,而 1400 r/min 拖动起动时,最高碳氢排放出现在第 4 循环。此外,在较高的拖动转速下,发生不完全燃烧和失火的循环数更多,持续时间也 longer。上述情况表明,高拖动转速下的起动需对喷油量进行重新标定和匹配。

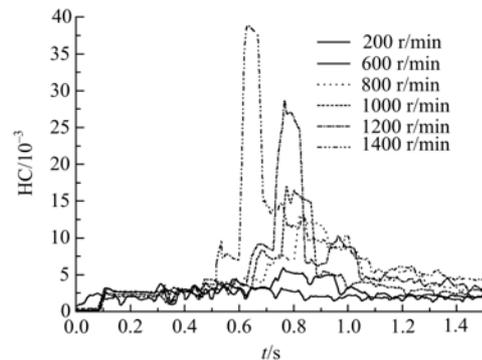


图 7 不同拖动转速起动时碳氢排放对比

Fig. 7 Comparison of HC emission at different start-up speeds

5 使用催化剂前后的碳氢排放特性

对于混合动力汽车,发动机会频繁地停机并重新起动,因此三元催化剂在起动过程的催化转化特性就尤为重要。图 8 给出了热机起动时使用催化剂前测得的碳氢排放波形。随着拖动转速升高,由于失火和不完全燃烧的加剧,碳氢排放升高。图 9 给出了不同拖动转速起动时使用催化剂后测量的碳氢排放曲线。从图中可以看出,使用催化剂后碳氢排放降低很多,但是仍然有大量未转化的碳氢排出。原机小电机拖动起动时,使用

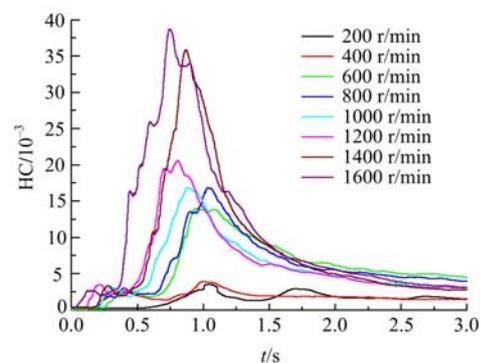


图 8 热机起动时使用催化剂前碳氢排放

Fig. 8 HC emission by warm start before catalyst

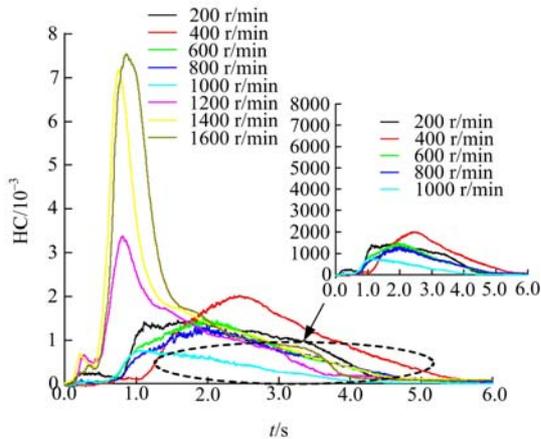


图9 热机起动时使用催化剂后碳氢排放

Fig.9 HC emission by warm start after catalyst

催化剂前排放最低,但使用催化剂后也有相当一部分不能转化,这是由于起动时的空燃比不能控制在理论空燃比附近,致使三效催化剂转化效率降低。

此外,使用催化剂后的排放曲线峰值并不像使用催化剂前那样随着拖动转速升高而单调增加。在拖动转速低于1000 r/min时,虽然由于不完全燃烧导致使用催化剂前的排放增加,但是使用催化剂后的排放却随着拖动转速升高而降低,甚至在拖动转速为1000 r/min时,使用催化剂后的碳氢排放峰值比原机要低一半左右。当拖动转速高于1200 r/min时,使用催化剂后的碳氢排放又随着拖动转速的升高而增加。一个可能的原因就是,在拖动转速为1000 r/min时的空燃比更接近于理论空燃比,因而催化剂的转化效率最高。但这一推测有待于在下一步的工作中通过测量排气空燃比来验证。采用优化的起动空燃比控制策略将使三效催化剂尽快开始高效转化,这对混合动力汽车实现超低排放是至关重要的。

6 结论

(1)利用所建立的快速起动发动机试验台架系统,成功模拟了不同拖动转速下发动机的快速起动特性,从而为混合动力汽车ISG和发动机控制策略优化匹配提供了研究平台。

(2)在原控制策略和标定参数不改变时,发动机高速起动时只在第1循环产生较多的 NO_x 排放,而在第2到第9循环最易发生不完全燃烧和失火导致碳氢排放恶化,并随拖动转速升高,第2到第9循环的不完全燃烧加剧。

(3)催化剂的转化效率随拖动转速升高先升高后降低。对于本机而言,拖动转速为1000 r/min时使用催化剂后的排放最低,约为原机的50%。

(4)由于快速起动所引起的混合动力汽车发动机进气系统压力的变化较大,快速起动时的燃油喷射量必须重新优化匹配才能达到最佳燃烧和最佳排放性能。

致谢 感谢英国Cambustion公司提供的瞬态排放测试设备;感谢上海安普罗环保科技有限公司的李强等人在仪器使用和维护方面给予的帮助。

参考文献:

- [1] Henein N A, Taraza Dinu, Chalhoub Nabil, et al. Exploration of the contribution of the start/stop transients in HEV operation and emissions[C]//SAE Paper 2000-01-3086.
- [2] Moritaka Matsuura, Koji Korematsu, Junya Tanaka. Fuel consumption improvement of vehicles by idling stop[C]//SAE Paper 2004-01-1896.
- [3] Kuang Ming L. An investigation of engine start-stop NVH in a power split powertrain hybrid electric vehicle[C]//SAE Paper 2006-01-1500.
- [4] Ng Henry K, Anderson John A, Duoba Michael J, et al. Engine start characteristics of two hybrid electric vehicles (HEVs)-honda insight and Toyota Prius[C]//SAE Paper 2001-01-2492.
- [5] Mauro Keniti Tagomori. Cold start emissions in gasoline engines[D]. Detroit: Wayne State University, 1996.
- [6] Quader Ather A, Majkowski Richard F. Cycle-by-cycle mixture strength and residual-gas measurements during cold starting[C]//SAE Paper 1999-01-1107.
- [7] Castaing Brigitte M, Cowart Jim S, Cheng Wai K. Fuel metering effect on hydrocarbon emissions and engine stability during cranking and start-up in a port fuel injected spark ignition engine[C]//SAE Paper 2000-01-2836.
- [8] Luan Yun-fei, Henein Naeim A. Contribution of cold and hot start transients in engine-out HC emissions[C]//SAE Paper 982645.
- [9] Cheng Wai K, Summers Tim, Collings Nick. The fast-response flame ionization detector[J]. Progress Energy Combustion Science, 1998, 24:89-124.