

相位偏差对米勒循环发动机性能的影响及其控制

李加旺,朱博铖,尹子明,王永生

奇瑞汽车股份有限公司,安徽 芜湖 241009

摘要:为精确控制米勒循环发动机相位偏差,分析相位偏差对米勒循环发动机功率、转矩和比油耗的影响,提出米勒循环相位偏差的控制目标,分析发动机相位偏差的来源,提出相位偏差控制方案。试验结果表明:米勒循环发动机对相位偏差更加敏感,相位偏差需要控制在曲轴转角 $\pm 1^\circ$ 范围内。采用相位测量设备测量米勒循环发动机实际相位,根据实际相位和电子控制单元的预设相位对比,进行偏差补偿,实现精准控制。大量在线测量结果表明,测量凸轮升程位移精度为0.001 mm,相当于相位偏差在曲轴转角 1° 以内,满足米勒循环发动机相位偏差要求。

关键词:米勒循环;相位偏差;进气门早关;进气门晚关

中图分类号:TK423.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)05-0016-06

引用格式:李加旺,朱博铖,尹子明,等. 相位偏差对米勒循环发动机性能的影响及其控制[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(5):16-21.

LI Jiawang, ZHU Bocheng, YIN Ziming, et al. Influence and control of phase deviation on Miller cycle engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(5):16-21.

0 引言

日益严格的油耗标准对内燃机的发展提出了巨大挑战。为提高燃油经济性,直喷增压发动机普遍采用米勒循环技术,通过调整发动机进气门开启和关闭时刻,改变发动机有效压缩比并维持较高膨胀比来提高热效率^[1-2],减少发动机泵气损失。米勒循环技术首先被马自达公司成功商业化并批量生产,如马自达2.4 L KOERU型发动机,随后韩国现代1.5DPFI、大众EA211 1.5 L TSI等米勒循环发动机陆续批量生产。

相关研究表明,在米勒循环工作过程中,进气门开启、关闭时刻的偏差对缸内进气流量影响很大,即使很小的偏差,也会使气缸内进气充量出现较大差异,严重影响发动机性能一致性^[3]。气门正时相位的精确控制十分重要。影响相位偏差的零件的制造公差和装配公差至关重要,压缩零件尺寸公差、优化装调工艺等常规控制方法无法满足米勒循环发动机对相位偏差的要求,精确控制气门正时相位是实现米勒循环的关键。

1 相位偏差对米勒循环发动机性能的影响

1.1 米勒循环发动机工作原理

发动机的几何压缩比为活塞处在下止点(bottom dead center, BDC)时的气缸最大工作容积与活塞处在上止点(top dead center, TDC)时的气缸最小工作容积之比。传统发动机(奥拓循环)的膨胀行程与压

收稿日期:2022-07-29

基金项目:国家重点研发计划新能源专项(2017YFB0103405)

第一作者简介:李加旺(1969—),男,回族,湖南常德人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机设计,E-mail:lijiaawang@mychery.com.

缩行程相同,因此发动机的膨胀比等于几何压缩比^[4]。对奥拓循环的气门正时进行调整,采用进气门晚关(late intake valve closing, LIVC)策略,在压缩行程初期,使吸人气缸的一部分气体回流到进气歧管,即多排气,则该循环称为阿特金森循环;采用进气门早关(early intake valve closing, EIVC)策略,在压缩行程初期,使进气门早关,实现少进气,则该循环称为米勒循环^[4-5]。米勒循环过程中,进气门早关,活塞运行到下止点后并不立即开始压缩行程,而是上行到进气门关闭的位置时才开始压缩行程,因此米勒循环推迟了压缩开始时刻,降低了有效压缩比,使膨胀行程大于压缩行程,可以充分利用缸内燃烧产生的能量;同时在发动机部分负荷时,通过进气门早关削弱了节气门的节流影响,降低了泵气损失,改善了燃油经济性^[6]。

1.2 米勒循环发动机技术参数

研究对象为涡轮增压缸内直喷米勒循环发动机。该发动机采用可变截面涡轮增压器(variable geometry turbocharger, VGT)、进气和排气双可变气门正时(variable valve timing, VVT)、35 MPa 高压共轨等技术,其主要技术参数如表1所示。

表1 发动机主要技术参数

排量/L	缸径/mm	行程/mm	几何压缩比	进气门开启角/(°)	进气门关闭角/(°)	进气持续角/(°)	最大进气门升程/mm
1.5	74.5	86	11.6	395	547.5	152.5	7.2
最大净功率/kW	最大功率转速/(r·min ⁻¹)	最大净转矩/(N·m)	最大转矩转速/(r·min ⁻¹)	特征点油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)			
125	5500	265	2000~3500	328			

注:特征点指平均有效压力(brake mean effective pressure, BMEP)为0.2 MPa、转速为2000 r/min的工况。

1.3 相位偏差对发动机性能的影响

发动机配气相位反映某一时刻活塞和气门在曲轴旋转角中的位置关系,习惯上把第一缸活塞压缩上止点时刻定义为发动机的“0”时刻(即曲轴转角为0°的位置),四冲程发动机的曲轴转角范围为0°~720°,本文中基于曲轴转角描述配气相位角。

影响发动机进气充量的主要因素为换气过程的容积效率,容积效率与燃烧室形状、进气门和排气门端面积、气门打开和关闭时刻有关^[7]。发动机燃烧室和气门机构等结构参数确定后,容积效率仅与气门打开、关闭时刻相关。发动机凸轮轴初始位置(即进、排气门开启、关闭时刻)是电子控制单元(electronic control unit, ECU)的标定基础,如增压压力、空燃比、VVT角度、喷油和点火时刻等参数均以凸轮轴初始位置进行标定,并在ECU控制程序中固化。由于生产制造的一致性存在差异,凸轮轴初始位置与设计位置存在偏差,气门开启、关闭时刻发生变化,改变了发动机实际进气流量。ECU基于进气歧管压力、缸内残余气体及进气充量系数计算进气充量,进气充量系数曲线如图1所示。EIVC策略的米勒循环发动机进气门关闭时刻(升程为1 mm)对应的曲轴转角为525°~555°,如图1的左虚框a—b段所示;传统发动机进气门关闭时刻(升程为1 mm)对应的曲轴转角为585°~615°,如图1中右虚框c—d段所示。由图1可知:a—b段曲线斜率远大于c—d段曲线斜率的绝对值,表明米勒循环进气门关闭时刻之间存在较小的偏差时,即可导致气缸进气充量和进气充量系数出现较大的差异^[8-9]。

为了验证不同初始进气相位偏差(相对于设计值)对发动机性能的影响程度,在保持排气门关闭时刻不变的情况下,设定不同的进气门开启、关闭时刻方案(相对原机相位提前10°、6°、3°和滞后3°),进行发动机动力性和经济性对比试验。该米勒循环发动

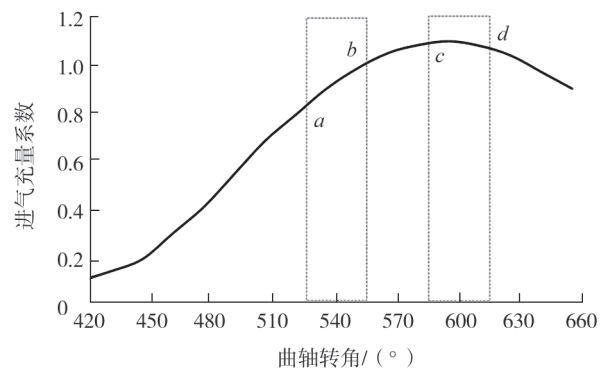


图1 进气充量系数与曲轴转角关系曲线

机 ECU 标定程序已固化,保持相同试验边界:进气温度为 25 °C、冷却出水温度为 105 °C、试验用燃油为 RON92,按文献[10]推荐的方法进行台架试验。进气门关闭相位变化对发动机性能影响如表 2 所示。

表 2 进气门关闭相位变化对发动机性能影响

进气门关闭时刻	最大净功率/kW	最大净转矩/(N·m)	特征点比油耗/(g·(kW·h) ⁻¹)
原机相位	122.0	264.0	328.0
相对原机提前 10°	110.5	237.4	536.0
相对原机提前 6°	115.8	245.4	444.9
相对原机提前 3°	118.4	252.4	374.8
相对原机滞后 3°	125.6	268.4	343.9

由表 2 可知:1)相较于原机相位,进气门关闭时刻变化对发动机功率和转矩的影响较大,进气门关闭时刻曲轴转角提前 10°,最大转矩降低 10.1%,最大功率降低 9.4%,不满足发动机功率和转矩一致性要求(设计要求功率和转矩一致性偏差在±5%以内);2)进气门关闭时刻变化对发动机低转速小负荷下的油耗影响更大,在特征点工况下,进气门关闭时刻曲轴转角分别提前 10°、6°、3°和滞后 3°时,比油耗相较于原机相位分别增加为 63.4%、35.6%、14.3%和 4.8%,不满足米勒循环发动机比油耗的一致性要求(设计要求比油耗一致性偏差在±4%以内)。

导致发动机功率、转矩偏差过大的主要原因为进气门的关闭时刻影响容积效率和进气充量系数:进气门的关闭时刻提前,米勒循环发动机的进气流量和容积效率降低,进气流量降低限制了发动机的最大输出功率和最大输出转矩;相反,进气门关闭时刻延迟,发动机的容积效率和进气流量相应提升。不同进气门关闭时刻的发动机进气质量流量随转速变化的测试结果如图 2 所示。由图 2 可知:进气门关闭时刻的角度提前 10°,发动机最大进气质量流量降低约 11%。

由表 2 和图 2 可知,进气门角度提前 3°和滞后 3°,发动机最大进气流量偏差在±2.5%以内,最大功率和最大转矩偏差在±4.5%以内,满足发动机功率、转矩一致性要求,但无法满足发动机比油耗的一致性要求。统计计算表明,满足该米勒循环发动机比油耗一致性要求,发动机相位偏差应控制在±1°以内。

导致发动机比油耗增大的主要原因为进气开启、关闭时刻的变化使得进气湍流能量、残留废气量和混合气浓度发生变化^[11-12]。发动机标定程序固化后,ECU 无法识别发动机进气相位的变化,仍按照原标定数据(增压压力、空燃比、点火角、充气效率等)进行控制,无法进行实时调节,导致发动机燃烧速率变化,造成比油耗不同程度增大^[13]。

θ_{MFB50} 表示燃料燃烧累积放热量达到 50%时的曲轴转角(即燃烧重心相对于活塞上止点后的曲轴转角)。发动机小负荷工况时, θ_{MFB50} 越小,燃烧速率越快,燃烧热损失越小,发动机的热效率越高,发动机油耗率越低^[14]。

该发动机在转速为 2000 r/min 时不同负荷的燃烧速率和比油耗如图 3 所示。由图 3 可知:发动机在小负荷工况(平均有效压力不大于 0.4 MPa)下,燃烧速率由小到大依次为提前 10°、提前 6°、提前 3°、原机相位、滞后 3°,且比油耗随着燃烧速率的增加而减小。

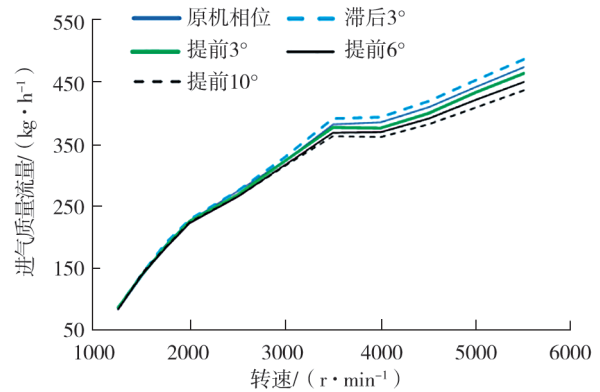


图 2 不同进气门关闭时刻发动机进气质量流量随转速变化的测试结果

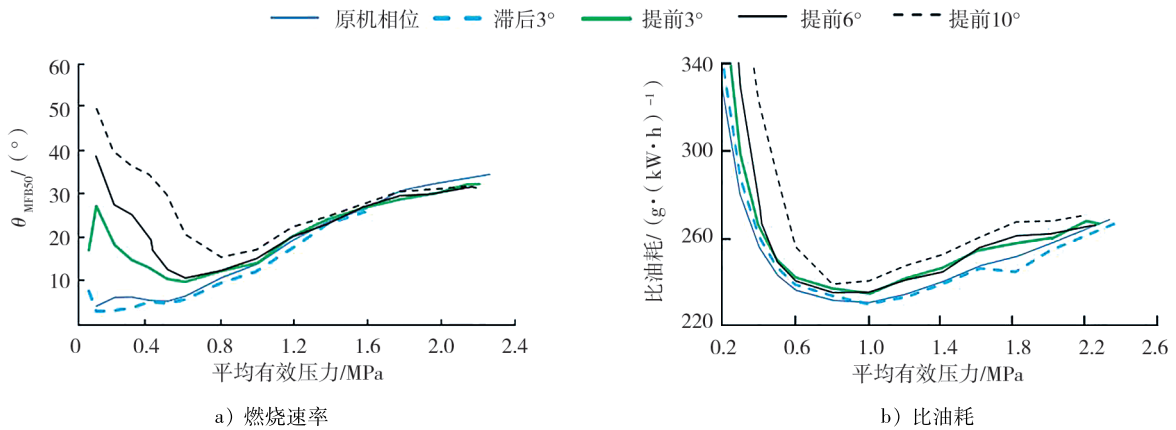


图3 转速为2000 r/min时不同负荷的燃烧速率、比油耗曲线

综上所述,与传统发动机相比,米勒循环发动机对相位偏差更加敏感,为满足米勒循环发动机性能一致性要求,相位偏差应控制在 $\pm 1^\circ$ 范围内。

2 发动机相位偏差的来源与控制

2.1 发动机正时相位偏差来源

发动机正时相位是指进、排气门开闭时刻或对应的曲轴转角。发动机工作时,ECU根据曲轴信号传感器和凸轮信号传感器间接计算相位角和进气充量,相位计算结果可能和设计值不一致,由此产生相位偏差。

相位偏差主要来自相关零件的制造偏差、发动机装配过程产生的偏差和传感器读取并发送给ECU的过程中产生的偏差3个部分。相关零件主要包括曲轴、信号齿、凸轮轴(含信号轮)、相位器、气缸体(安装传感器的位置)、气缸盖(安装凸轮轴的位置)、气门室罩盖(安装凸轮信号传感器的位置)等,这些零件制造偏差累计占总体相位偏差的55%,是相位偏差的主要来源。发动机装配过程产生的相位偏差主要由正时工装精度、装配工艺顺序与拧紧过程的相位偏移导致,占总体相位偏差的35%,是相位偏差控制的重点环节,其中,相位器在拧紧过程中可产生相对于曲轴的微小转动角度,而连接相位器和曲轴的传动链条或者皮带无法克服此转角,从而产生拧紧过程相位偏差。不同传感器信号检测准确性的差异导致在读取并发送信号给ECU过程中产生相位偏差。

相位偏差又可以分为凸轮轴相位偏差、曲轴相位偏差以及整机装配相位偏差。凸轮轴相位偏差是相位传感器检测到的以曲轴相位为基准的相位与设计相位之间的偏差,该偏差主要来自凸轮轴、信号轮以及传感器的安装位置。曲轴相位偏差是指相位传感器检测到的上止点位置和实际上止点位置的偏差,该偏差主要来自曲轴、信号齿以及传感器的安装位置。凸轮轴相位偏差、曲轴相位偏差以及整机装配相位偏差示意图如图4所示。

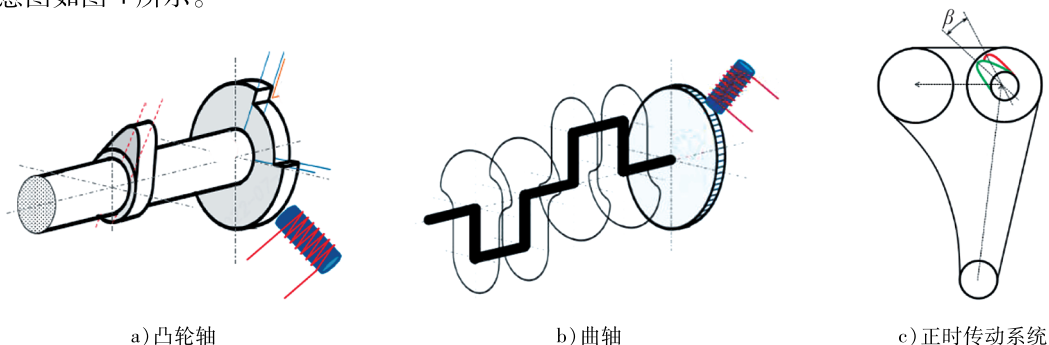


图4 凸轮轴相位偏差、曲轴相位偏差以及整机装配相位偏差来源示意图

结合相关零件实际的尺寸公差,整理并计算整机相位偏差,结果如表3所示。由表3可知:除整机装配过程公差外的累计极限公差不得超过 $\pm 3.895^\circ$,累计统计公差不得超过 $\pm 2.405^\circ$;所有环节的累计极限公差不得超过 $\pm 5.895^\circ$,累计统计公差不得超过 $\pm 3.560^\circ$ 。

表3 整机相位公差来源及其极限、统计公差

编号	相位公差来源	极限公差/(°)	统计公差/(°)	编号	相位公差来源	极限公差/(°)	统计公差/(°)
1	整机装配过程公差	± 2.000	± 1.155	5	正时传动系统动态公差	± 0.500	± 0.500
2	凸轮轴与信号轮制造公差	± 1.000	± 0.800	6	曲轴信号轮制造公差	± 0.250	± 0.030
3	缸盖凸轮轴孔位置公差	± 1.320	± 0.250	7	曲轴信号轮安装公差	± 0.175	± 0.175
4	凸轮轴传感器读取信号公差	± 0.400	± 0.400	8	曲轴传感器读取信号公差	± 0.250	± 0.250

2.2 发动机正时相位偏差控制

为降低相位偏差,需要提高零件的加工精度,改善装配工艺过程,提高传感器的测量精度,但压缩零件尺寸公差和提高传感器测量精度将增加零件制造成本,各主机厂主要通过优化发动机装配过程或反向补偿来控制相位偏差^[8]。根据表3中的统计公差与极限公差计算结果,结合当前发动机实际相位偏差统计结果,控制后的相位偏差在 $\pm 3.5^\circ$ 内,满足传统发动机设计要求,但无法满足米勒循环发动机设计要求。因此必须对相位偏差进行精确控制以满足米勒循环对相位精度的要求,确保发动机性能偏差在设计规范以内。

为精确控制相位偏差,引入发动机相位在线测量设备。该设备通过2个位移传感器分别检测进、排气凸轮升程曲线,通过中间的位移传感器检测活塞上止点,定义活塞上止点为参考零点,光电编码器记录此时曲轴信号齿的位置;根据检测到的进、排气凸轮升程曲线,判断出进、排气门开启和关闭相对于曲轴的角度,该角度即为发动机的实际相位角。发动机相位采集和ECU读写路径如图5所示。在发动机生产过程中,检测每台发动机的实际相位角并记录下来,然后输入给ECU,ECU根据预设名义相位和实测相位的差进行VVT调节补偿^[15]。每个工况点都引入此相位补偿量,ECU基于发动机实际的相位关系进行精确控制,保证米勒循环发动机相位偏差满足设计要求。

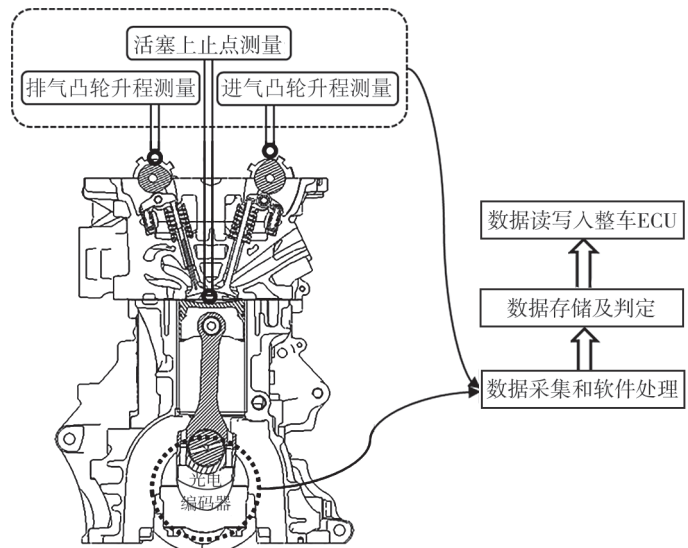


图5 发动机相位采集和ECU读写路径

根据发动机大批量在线测量结果,该设备测量凸轮升程位移精度为 0.001 mm ,转化为正时相位偏差,曲轴转角小于 1° ,满足米勒循环发动机相位偏差要求。

3 结论

通过测量相位偏差,分析相位偏差的来源及对米勒循环发动机性能的影响,提出米勒循环相位偏差的控制目标和实际相位角测量方案。

1)与传统发动机比较,米勒循环发动机性能和油耗对相位偏差更加敏感,为满足发动机生产一致性控制的要求,米勒循环发动机的相位偏差需要控制在 $\pm 1^\circ$ 内。

2) 发动机相位偏差来源于零件的制造偏差、发动机装配过程产生的偏差和传感器读取偏差,采用压缩零件尺寸公差并优化装调工艺等常规控制方法,控制后的相位偏差仍然在 $\pm 3.5^\circ$ 内,不满足米勒循环发动机对相位偏差的要求。

3) 采用发动机相位在线测量并通过 ECU 进行相位偏差修正与补偿,实现了米勒循环发动机实际相位关系的精确控制,确保批量生产的发动机性能和油耗偏差都在设计规范内。

参考文献:

- [1] 祖柄峰,周仁杰,徐玉梁,等. 米勒循环在小型增压汽油机典型工况的应用研究[J]. 内燃机工程,2017(6),38:123-130.
- [2] SHINAGAWA T, KUDO M, MATSUBARA W, et al. The new Toyota 1.2 liter ESTEC turbocharged direct injection gasoline engine[C]//Proceedings of SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2015:1268-1277.
- [3] 周重光,张志福,董宏伟,等. 进气相位对高膨胀比发动机性能影响的研究[J]. 车用发动机,2010(6):77-80.
- [4] LI T, GAO Y, WANG J S, et al. The Miller cycle effects on improvement of fuel economy in a highly boosted, high compression ratio, direct-injection gasoline engine: EIVC vs LIVC[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 79:59-65.
- [5] 郑斌,李铁,尹涛. 米勒循环改善增压直喷汽油机热效率的机理分析[J]. 内燃机工程,2016,37(6):116-121.
- [6] 周仁杰. 米勒循环在传统汽油机上的应用研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- [7] 李钟福. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,2016.
- [8] 李益民,王三桂,郑远平,等. 米勒循环发动机配气相位角装配精度控制的研究[J]. 机械装备,2018(5):77-79.
- [9] 渠肖楠,魏胜利,宋志磊. 基于 AVL-BOOST 的米勒循环发动机性能分析研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2019, 44(6):1607-1614.
- [10] 国家机械工业局. 汽车发动机性能试验方法:GB/T 18297—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2001.
- [11] 吴中浪,陈韬,谢辉,等. 高压比米勒循环汽油机气门策略优化[J]. 燃烧科学与技术,2019,25(4):331-339.
- [12] 付中伟,腾勤,刘青林,等. 阿特金森/米勒循环发动机的技术应用[J]. 小型内燃机与车辆技术,2017,46(5):75-82.
- [13] 张国刚,王斌. 米勒循环对增压直喷汽油机燃烧性能影响的模拟研究[J]. 车用发动机,2021(6):59-65.
- [14] 安宗权,黄昭明,潘金元,等. 高压比米勒循环对 GDI 增压汽油机性能和排放影响[J]. 汽车技术,2018(5):25-29.
- [15] 范巍,吴健,李云龙,等. 米勒循环汽油机部分负荷燃油经济性研究[J]. 车用发动机,2014(2):46-50.

Influence and control of phase deviation on Miller cycle engine

LI Jiawang, ZHU Bochong, YIN Ziming, WANG Yongsheng

Chery Automobile Co., Ltd., Wuhu 241009, China

Abstract: In order to control the phase deviation of the Miller cycle engine precisely, the influence of phase deviation on power, torque and specific fuel consumption of Miller cycle engine is analyzed. Miller cycle phase deviation is chosen as control target, and the source of engine phase deviation is analyzed. The test results show that the Miller cycle engine is more sensitive to the phase deviation, which needs to be controlled within the crankshaft angle range of the $\pm 1^\circ$. The phase measurement equipment is used to measure the actual phase of the Miller cycle engine, and the deviation compensation is compared according to the preset phase of the electronic control unit (ECU) to achieve accurate control. According to the testing results, the solution measures the cam lift displacement accuracy of 0.001 mm, which is equivalent to the phase deviation within 1° crankshaft angle, meeting the phase deviation requirements of the Miller cycle engine.

Keywords: Miller cycle; phase deviation; early intake valve closing; late intake valve closing

(责任编辑:郎伟锋)