

进气控制方式对可变气门升程汽油机性能影响机制的仿真研究

谷乐祺¹,解方喜¹,石卜从²

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022;

2. 北京汽车股份有限公司 汽车研究院, 北京 101300)

摘要:为进一步推动可变气门升程技术的高效应用,基于一款四缸直喷汽油机,利用 GT-Power 软件仿真探讨不同进气控制方式对其性能的影响规律及作用机理。结果表明:相较传统节气门控制方式,进气门早关与节气门和进气门协同控制方式在改善发动机指示热效率、机械效率、有效热效率及油耗等方面均展现了很好的优化潜力,燃油消耗率最大降低近 5%。但由于 EIVC 方式在中、小负荷工况会导致缸内气流运动减弱、燃烧推迟现象,因而部分中、小负荷工况采用 TE 方式更佳。

关键词:汽油机;可变气门升程;进气控制方式;能量分配;优化控制

中图分类号:TK411 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)03-0089-07

Simulation Study on Effect of Intake Control Mode on Performance of Variable Valve Lift Gasoline Engine

GU Leqi¹, XIE Fangxi¹, SHI Bucong²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control (ASCL), Jilin University, Changchun 130022, China;

2. R&D Center, BAIC Motor Corporation Ltd., Beijing 101300, China)

Abstract: To further promote the efficient application of variable valve lift technology, the influence laws and action mechanism imposed by different intake control modes on engines performance are explored based on a four-cylinder direct-injection gasoline engine and by GT-Power software. It is concluded that the early intake valve closing and the throttle and intake valve cooperative control modes, compared with the traditional throttle control modes, show good optimization potential in improving the indicated thermal, mechanical, effective thermal efficiency and fuel consumption of the engine, with maximum reduction of nearly 5% fuel consumption rate. The EIVC modes, however, may cause the combustion delay phenomenon due to the weakening of the air flow in the cylinder under the medium and small load conditions, it is, therefore, better to adopt the TE modes in some small load conditions.

Keywords: gasoline engines; variable valve lift; intake control modes; energy distribution; priority control

0 引言

随着不断严格的汽车油耗和排放法规的相继推出,发动机节能和减排已成为众多汽车企业生存和发展的关键。目前可变气门升程技术是行业公认的一种可有效推动汽油机高效、清洁工作的技术措施。宝马利用 Valvetronic 可变气门升程系统使欧洲驾驶测试下的节油率达到了 12%^[1]。Fiat 公司利用一种凸轮驱动电液全可变气门机构使一 1.5 L 增压汽油机中小负荷时的泵气损失显著减小,油耗改善近 10%;同时,通过预热期间的进/排气门优化控制,还实现了 HC 和 CO 的显著降低^[2-3]。CLEARY D 等^[4]利用进气门早关策略使一单缸机部分负荷工况的燃油消耗率改善 7%。王天友等^[5]利用可变气门升程与定时耦合调节方式,使一发动机部分负荷的泵气损失降低近 50%,油耗改善 5.6%;胡顺堂等^[6]采用进气门升程调整的

进气控制方式,使发动机部分负荷工况的泵气损失减小了 20%~30%。同时,文献[7]发现降低气门最大升程有利于进气初期缸内滚流比的提高,而在进气后期及压缩过程中,最大升程为 1.0 mm 时缸内滚流比明显低于 7.7 mm 和 4.0 mm 时的缸内滚流比。文献[8]指出,使用可变气门升程技术实现了米勒循环效果,泵气损失及机械损失均有一定降低,燃烧效率提高,但油耗降幅不明显。文献[9]通过气门正时和气门升程联合调整试验研究指出,随着气门升程的增加,CO 和比油耗表现为先下降再上升。文献[10]指出如果保持节气门一直全开,在发动机小负荷由于气门升程太小,气门处节流损失上升,燃油消耗率反而也会增加。文献[11]也指出在发动机小负荷适当联合节气门控制更有利获得较好的油耗改善效果。

通过现有研究,一方面表明可变气门升程是一种极为有效的发动机节能减排技术策略;另一方面也注意到,要想实现可变气门升程系统在发动机上的高效清洁应用也

基金项目:国家自然科学基金项目(51876079);吉林省科技发展计划项目(20200403150SF);中央高校基本科研业务费专项资金资助

第一作者简介:谷乐祺(2000—),男,辽宁鞍山人,学士,研究方向为内燃机工作过程优化与控制。

是一个极为复杂的工作,需要与发动机运行工况、燃烧边界条件等进行细致的协同优化标定和匹配;特别是气门升程与气门启/闭正时、节气门开度等其他进气控制参数之间存在着复杂的耦合作用关系。然而,当前对相关问题还未有系统的认识,亟待进一步发展。故而,本文拟以课题组开发的一种凸轮驱动液压可变气门升程机构为原型,在一台 1.4 L 的缸内直喷汽油机上系统对比探讨不同进气控制方式(节气门控制方式、进气门早关控制方式及节气门和进气门早关协同控制方式)对发动机性能的影响,并对其缸内燃烧、机械损失、泵气损失、排气损失等能-功转化细节过程进行分析。本文研究对于可变气门升程系统的优化控制及高效应用具有很好的工程和理论价值。

1 台架搭建及试验方法

1.1 仿真模型建立

本文以一款 1.4 L 缸内直喷汽油机为对象进行研究,其主要技术指标参数如表 1 所示。基于该发动机实机结构参数及相应台架测试数据利用 GT-Power 软件搭建一维模拟平台,并对其关键模型参数进行优化选择。该模拟平台喷油器模型采用 InjAFSeqConn 模型,燃烧室壁温模型采用 EngCylTWall 模型,传热模型采用 WoschniGT 模型,燃烧模型采用 Turb-flame 模型。另外,进气系统、排气系统、气缸、曲轴、配气相位等由实机值确定,所建发动机模拟平台如图 1 所示。

表 1 发动机主要技术参数

项目	参数
发动机类型	直列 4 缸,缸内直喷
排量/L	1.4
缸径/mm	76.5
行程/mm	75.6
压缩比	10.5
气门数	16DOHC
最大功率/kW	63 ($n=5\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
最大扭矩/N·m	130 ($n=1\ 800\sim 3\ 500\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)

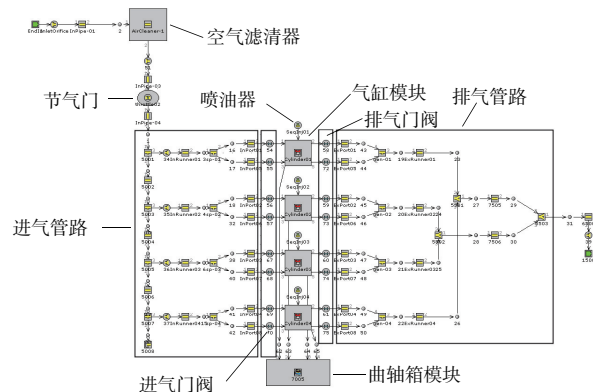


图 1 仿真模型

1.2 模型验证

为验证所建立仿真平台的准确性,通过台架试验对发动机外特性数据进行测试,并测取发动机 2 200 r/min 转速、118 N·m 转矩工况下的缸内燃烧压力。图 2 和图 3 所示为试验和模拟结果对比。由图可见,模拟计算结果与试验测试结果基本一致,能够满足后续模拟研究的需求。

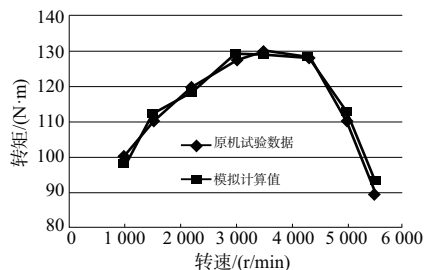


图 2 试验与模拟发动机外特性对比图

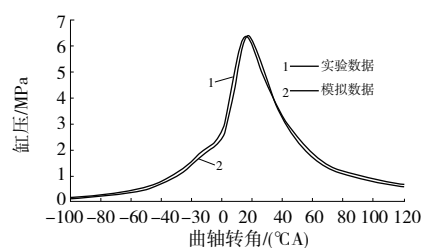


图 3 试验与模拟缸压对比图

1.3 研究方案

文中采用本课题组开发的一款凸轮驱动可变气门升程机构为原型进行研究,其气门升程型线如图 4 所示。基于该机构对气门升程的控制范围和能力,文中选取了 3 种进气控制方式:节气门进气控制方式 (TH, 气门升程型线固定为原机情况)、进气门早关进气控制方式 (EIVC, 节气门全开)、节气门和进气门早关协同进气控制方式 (TE), 同时对于 TE 方式又进一步选择了多种组合形式进行了对比分析。

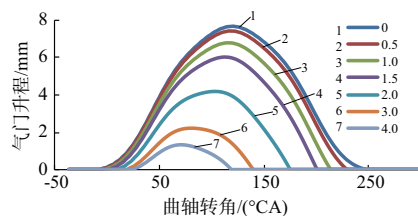


图 4 不同节流阀开度下的气门运动特性

选取 2 000 r/min 发动机转速,10%、25%、50%、75% 4 个负荷比工况进行研究。其中,负荷比以原机气门升程曲线采用节气门进气控制方式 (TH) 方式的外特性转矩为基准。研究中,针对同一负荷比工况进行仿真计算时,平均有效压力保持相同。同时,不同进气控制方式的点火正时均固定为相应负荷比下的 TH 进气控制方式最佳点火提前角。不同进气控制方式及负荷比下所应用的气门升程

曲线以及对应节气门开度调整参数分别如表 2 和图 5 所示。

表 2 不同进气方式调控参数表

进气方式	调整参数							
	10%负荷		25%负荷		50%负荷		75%负荷	
	气门升程	节气门开度/%	气门升程	节气门开度/%	气门升程	节气门开度/%	气门升程	节气门开度/%
TH	原机	10	原机	25	原机	50	原机	75
EIVC	1a	100	1b	100	1c	100	1d	100
TE1	2a	27.38	2b	39.65	2c	70.84	2d	91.0
TE2	3a	15.58	—	—	—	—	—	—
TE3	4a	12.32	—	—	—	—	—	—

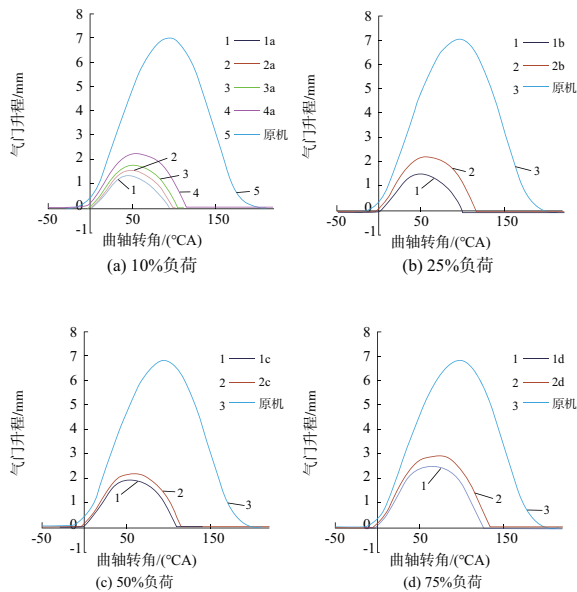


图 5 不同负荷比下的气门升程曲线表

2 研究结果及分析

图 6 给出了不同负荷比下进气控制方式对发动机缸内燃烧压力的影响。从图 6(a) 可以发现, TH 控制方式的压缩压力和燃烧压力较 EIVC 和 TE 显著升高, 而 EIVC 则相对较低, 且燃烧过程相对推迟。10% 负荷工况下 EIVC 的最大燃烧压力和压缩上止点压力分别较 TH 降低了约 0.334 MPa 和 0.142 MPa, 下降幅度达 30.6% 与 23.2%, 且最大燃烧压力相位推迟了近 8°CA 。这主要因为, 一方面本文在进行不同进气方式对比研究过程中, 在同一负荷比工况下其 BMEP 基本不变。对于 TH 方式, 其燃烧能向发动机有效功的转化效率可能较低, 进而使得发动机需要更多的进气和燃油才能达到预定的 BMEP 效果; 另一方面, TH 方式在发动机排气末期及扫气过程中的进气管和进气压力相对较低, 可能会使更多废气残留在缸内, 造成缸内工质总量增多。此外, 结合图 7 进气控制方式对缸内湍动能的影响还可以发现, 对于 EIVC 和 TE 方式, 其压缩过程的缸内湍动能相对减弱, 这在一定程度上也不利于燃

烧过程的进行, 导致燃烧压力和温度较低。同时, 对比不同负荷比下的缸压曲线还可以看出, 随着负荷比的升高, 缸压变化差异越来越小, EIVC 方式在 75% 负荷比下的压缩上止点压力和最大燃烧压力分别较 TH 方式仅低约 1.25% 和 0.31%。这主要是因为随着发动机负荷比的增大, EIVC 与 TE 进气控制模式下的气门开启持续期逐渐增加, 进气冲程状态与原机的差异逐渐减小(本刊为黑白印刷, 如有疑问请咨询作者)。

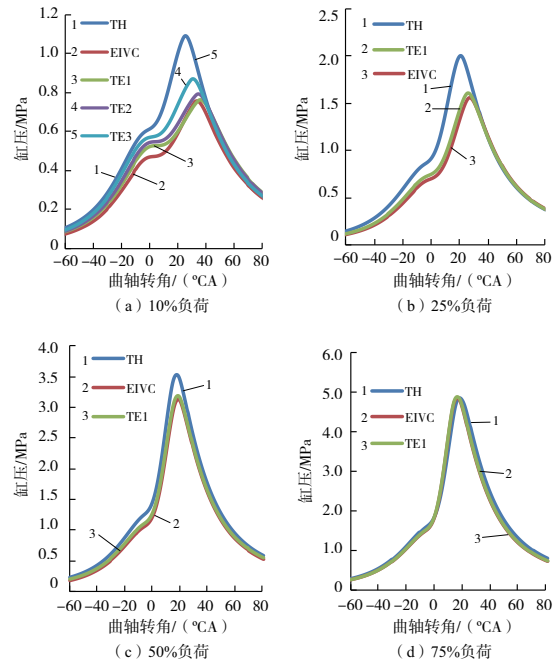
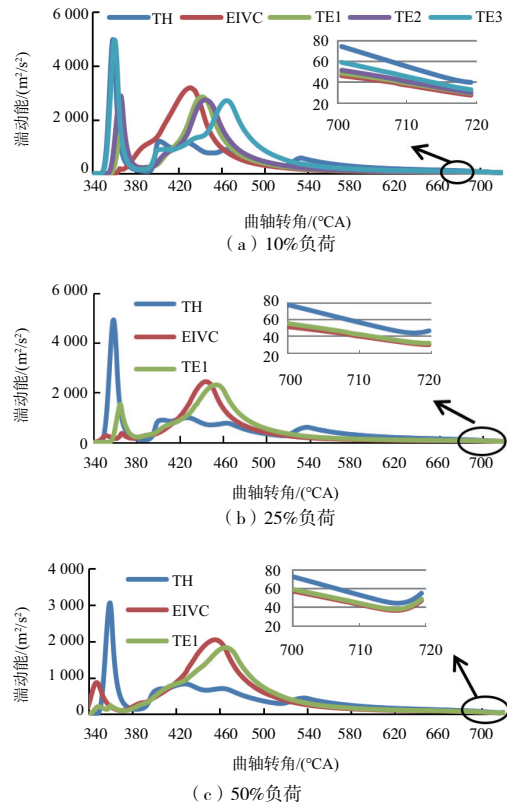


图 6 进气控制方式对缸内压力的影响



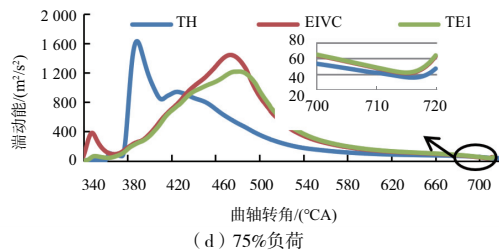


图7 进气控制方式对缸内湍动能的影响

图7中360°CA~540°CA为发动机的进气冲程,540°CA~720°CA为压缩冲程。由图7(a)~图7(c)可见,在发动机中、小负荷工况进气过程中,不同进气控制方式下其缸内湍动能均大体呈现出双峰现象,其波峰分别出现在进气初期和中期位置。对于EIVC与TE方式,其在进气初期的湍动能波峰相对较小,但在进气中期形成的湍动能波峰却相对较大。同时,随着节气门开度的降低和气门关闭推迟,其进气中期形成的波峰也略有降低和推迟。通常情况下,进气过程缸内湍动能波峰越推迟,越有助于气流运动能量在压缩和燃烧过程的延续。进而,10%负荷比工况下TE3进气控制方式在压缩上点的湍动能较EIVC方式提升了近 $5.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

对于TH进气控制方式,虽然其相比EIVC与TE进气控制方式在进气初期形成的湍动能峰值明显升高,但随着进气过程的进行,其会迅速衰减下来,之后在进气中期形成的湍动能波峰却相对较小。然而,由于TH控制模式能够使气缸不断获得新鲜充量能量的补充,其第二个湍动能波峰的衰减速度较EIVC与TE方式显著减缓,特别在进气下止点附近,活塞运动变向和缸内气流可能发生了复杂的交互作用,致使其进气下止点附近又出现了一个小的湍动能波峰,使得其在压缩过程中反而具有相对较高气流运动湍动能。

由图7(d)还可发现,发动机在75%负荷比工况运转时,虽然其整体规律与中、小负荷相类似,但不同之处在于EIVC与TE方式在压缩冲程也仍具有相对较高的湍动能。在压缩上止点,EIVC方式反而较TH方式升高了近 $15.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。这可能主要得益于当发动机大负荷运转时其气门开启持续期延长,与TH方式之间的差异缩小,且波峰的推迟又进一步有效抵消了其由进气过程缩短所带来的能量补给及活塞运动扰动不足的问题。

从能量流的角度出发,在能量转化过程中燃烧能不仅会转换为发动机有用功,还有部分能量会通过燃烧室壁面传热及排气耗散掉,进而燃烧总能量可分流为指示功、排气损失及传热损失3部分。图8所示为不同进气控制方式对缸内燃烧能分流特性的影响。由图可见,在2000 r/min发动机转速10%、25%及50%负荷比下,采用EIVC和TE进气方式时发动机均展现出了相对较高的排气损失和相对较低的传热损失。然而,当发动机在大负荷运转时(75%负荷比),EIVC与TE方式的传热损失上升到了与TH大致相当的水平,但排气损失显著减小。同时,虽然排气和传热损失变化极为复杂,但在两者综合作用下不同控制方式的发动机指示热效率变化趋势却相对

较为一致,基本上EIVC进气方式均具有相对较高的指示热效率,而TH方式的热效率则相对较低。在10%、25%、50%及75%负荷比工况下,EIVC方式的指示热效率分别较TH方式增加了0.77%、1.21%、1.14%与1.00%。然而,也要注意,研究中也初步展现出了在发动机某些工况下(图8(b)),TE方式不仅达到与EIVC相当的指示热效率水平,并且还有进一步提升的趋势。

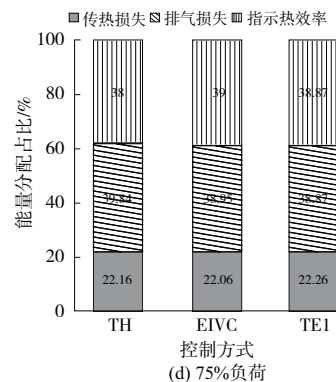
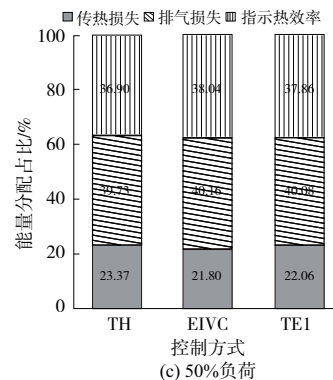
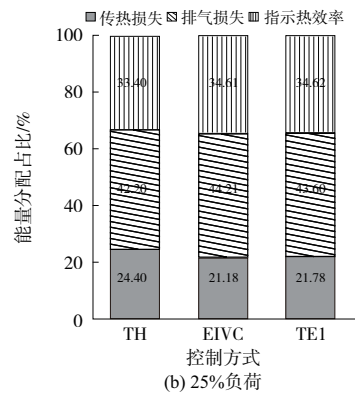
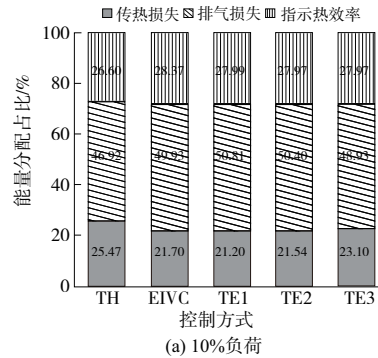


图8 进气控制方式对缸内燃烧能分流特性的影响

在发动机实际工作过程,指示功并不能完全转化为发动机的有效输出功,还有部分指示功会被损耗掉。泵气损失与摩擦损失是其主要损耗类型,图9和图10进一步给出了不同进气控制方式下的泵气损失与摩擦损失变化情况。由图可见,在研究的4个负荷比工况下,EIVC进气方式基本显示出了相对较低的泵气损失和摩擦损失,而TH方式展现出了相对较高的泵气损失和摩擦损失,在发动机中,小负荷比时表现尤为明显。这主要是因为TH方式利用节气门控制控制进气,气体在流经节气门时会产生显著的进气节流损失,负荷比越小,其损失会越大,进而造成泵气损失较高。对于摩擦损失,其主要由曲轴和连杆及活塞、活塞环和缸筒之间的相对运动产生,通常缸内压力越高,摩擦副之间受到的挤压力会越强,进而摩擦力和摩擦损失越大,结合图6,EIVC方式的缸内压力也相对较小。

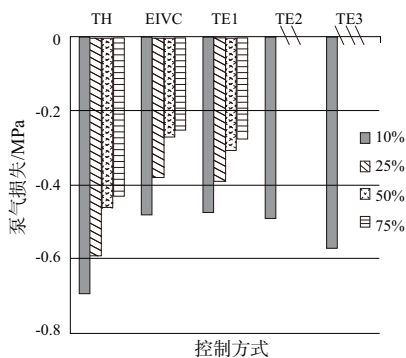


图9 进气控制方式对泵气损失的影响

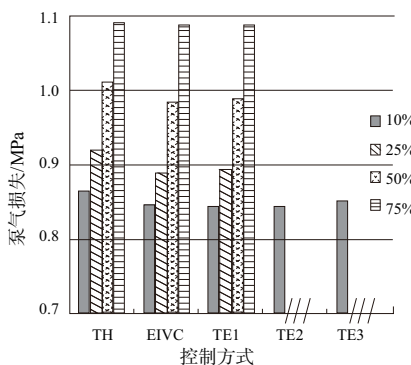
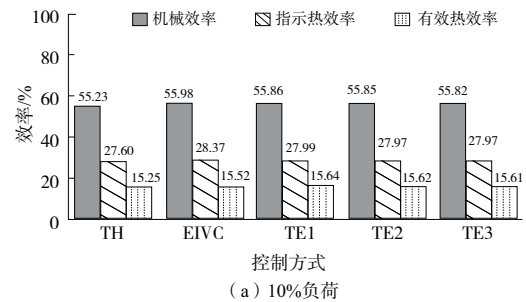


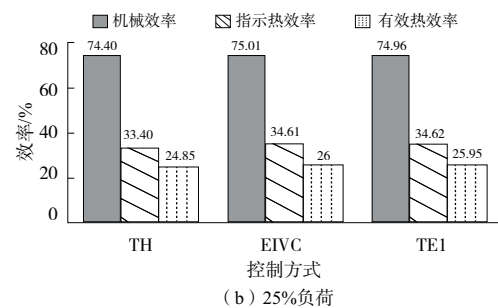
图10 进气控制方式对摩擦损失的影响

图11进一步给出了不同进气控制方式下的发动机3种主要效率(指示热效率、机械效率、有效热效率)变化情况。由图可见,对于研究的4个负荷比工况,总体上随着发动机负荷比的提高,其指示热效率、机械效率及有效热效率均呈现不断增加的趋势。并且,对比3种进气控制方式,EIVC进气方式基本均具有相对较高的指示热效率、机械效率和有效热效率,而TH控制方式则相对较低,TE方式大多处于两者之间。相关指示热效率的变化前文已经进行论述,对于机械效率,由于EIVC方式的泵气损失和摩擦损失相较TH方式具有极为显著的改善效果,进而其机械效率有所升高。同时,有效热效率主要受指示热效率和机械效率的影响,EIVC方式由于具有较高的指示热效率和机械效率,使得其有效热效率也相对较高。4个负荷比工况下,EIVC方式的有效热效率相比TH方式分别升高了0.57%、1.15%、1%及0.84%。此外,还需

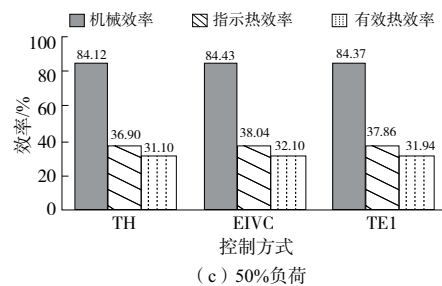
进一步指出的是,文献[12]指出,当发动机燃烧过程过于提前和退后均不利于燃烧能向发动机有效输出功的高效转化,当发动机燃烧中心上止点后 $8^{\circ}\text{CA}\sim 9^{\circ}\text{CA}$ 时发动机能够获得相对较佳的能-功转化效率。结合图6可以发现,对于EIVC和TE进气方式,其在发动机中、小负荷工况燃烧过程均明显推迟,燃烧滞后,故而,结合点火提前角等协同控制,EIVC和TE进气控制模式还有望获得更大的有效热效率提升潜力。



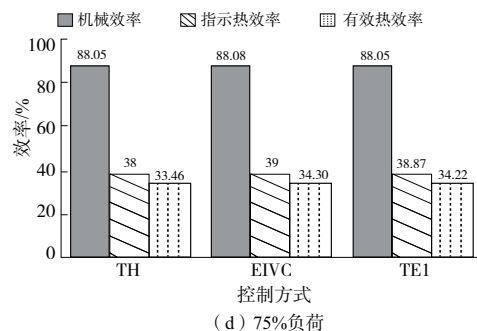
(a) 10% 负荷



(b) 25% 负荷



(c) 50% 负荷



(d) 75% 负荷

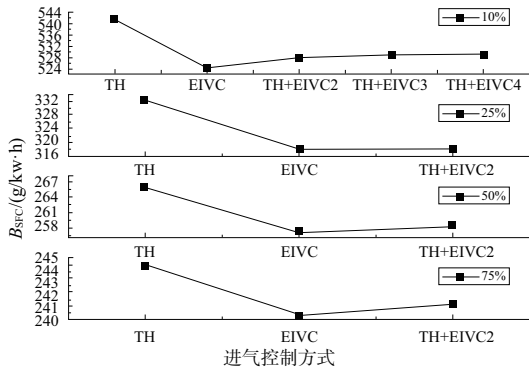
图11 进气控制方式对发动机效率指标的影响

图12所示为进气控制方式对发动机燃油消耗率的影响。为更全面了解气门控制方式对宽范围发动机运转工况的作用潜力,图中又进一步给出了3500 r/min和5000 r/min发动转速相应负荷比的燃油消耗率变化情况。并且,在表3中还给出了可使发动机各工况点获得最佳燃油消耗率的气门控制方式。通常,发动机燃油消耗率(BSFC)与有效热效率基本成反比关系,进而对于

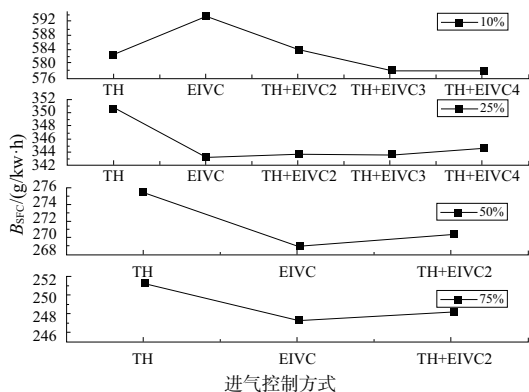
2 000 r/min 4 个负荷比工况 EIVC 方式均具有相对较低的燃油消耗率,相比 TH 方式分别改善了约 3.2%、4.3%、3.35% 和 2.57%。

从图 12(b) 和图 12(c) 可以发现,虽然在 3 500 r/min 和 5 000 r/min 发动机转速的大负荷比工况, EIVC 方式仍能取得较低的燃油消耗率。但是在一些发动机中,高转速小负荷比工况下,例如 3 500 r/min 转速、10% 负荷比和 5 000 r/min 转速、10% 与 25% 负荷工况, TE 进气方式却获得了相对较低的燃油消耗。研究的某些工况点 EIVC 方式甚至较 TH 方式还有显著恶化,例如在 3 500 r/min、10% 负荷, EIVC 负荷控制策略相比原机 TH 负荷控制策略其指示热效率降低 3.32%。结合图 6-图 8,这可能是因为,在发动机中,高转速和中、低负荷比工况,由于 EIVC 控制方式引发的缸内气流运动减弱、燃烧过程推迟及排气损失增加现象更为严重,进而燃烧能向有用功的转化效率可能发生显著降低,抵消了由机械效率提升所带来的收益,使得发动机最终的有效热效率和燃油消耗率恶化。

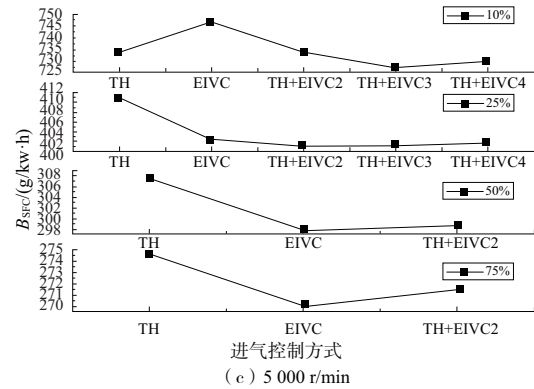
要最终通过可变气门技术达到提升发动机燃油经济性的目的,需要综合兼顾不同进气控制方式在不同工况下的各指标损益平衡关系,不能顾此失彼。结合表 3,总体上看来,对于研究样机在发动机中,高转速小负荷比工况采用节气门和进气门早关协同进气控制方式更佳,一方面能提高进气能量的维持和延续效果,使压缩和燃烧过程气缸内具有更高的气流运动强度,提升燃烧速度、降低排气损失;另一方面还可兼顾 EIVC 方式在高机械效率方面的优势,进而可使发动机获得更佳的节能效果。但在发动机低转速和中、高转速中、高负荷比,采用 EIVC 方式由于可同时具有较好的指示热效率和机械效率,进而可获得相对更佳的油耗改善效果。



(a) 2 000 r/min



(b) 3 500 r/min



(c) 5 000 r/min

图 12 进气控制方式对燃油消耗率的影响

表 3 不同转速负荷下所对应较优控制策略

转速/(r/min)	负荷比			
	10%	25%	50%	75%
2 000	EIVC	EIVC	EIVC	EIVC
3 500	TE	EIVC	EIVC	EIVC
5 000	TE	TE	EIVC	EIVC

3 结语

本文以前期开发的一种可变气门升程机构和四缸缸内直喷汽油机为对象,通过一维仿真研究了节气门控制方式、进气门早关控制方式及节气门和进气门早关协同控制方式等 3 种进气控制方式对发动机性能的影响,并对其能-功转化细节过程进行分析,本文的主要结论如下:

1) 不同进气控制方式的缸内湍动能存在显著的差异,发动机中,小负荷 TH 方式在压缩冲程具有较高气流运动强度,湍动能较大,而在大负荷工况下 EIVC 及 TE 方式的湍动能却相对较高。同时, EIVC 及 TE 方式在中、小负荷工况下的燃烧速度较慢,燃烧过程滞后,缸压峰值较低。

2) 在中、小负荷比工况下, EIVC 和 TE 方式的传热损失较 TH 方式显著改善,但排气损失增加;在大负荷比工况 EIVC 和 TE 方式与 TH 之间的传热损失差异缩小,但排气损失改善。总体上看,在传热和排气损失的耦合作用下, EIVC 方式在研究的 4 个负荷比下均展现出了较高的指示热效率,而 TH 方式的较低。

3) EIVC 方式的泵气损失和摩擦损失较小,机械效率较高,更有利于指示功向发动机有效输出功的传递和转化。TH 方式的泵气损失和摩擦损失较高,机械效率较差。同时,在研究的 2 000 r/min 转速 4 个负荷比工况, EIVC 方式均获得了相对较佳的有效热效率,而 TH 方式的有效热效率较低。

4) 低转速各负荷工况下采用 EIVC 负荷控制策略时发动机指示热效率和机械效率均较高,因此有效热效率较大。随着转速升高, EIVC 负荷控制策略适宜的应用负荷范围逐渐减小,在中、高转速小负荷工况, TE 负荷控制策略的能量走向分配更为合理,使有效热效率和燃油经济性更佳。

5)通过进气方式的优化选择,基本能使发动机燃油消耗率较传统单一进气门控制方式有所改善,最大改善效果近5%。

参考文献:

- [1] FLIERL R, KLÜTING M. The third generation of valvetrains - new fully variable valvetrains for throttle-free load control [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2000.
- [2] BORETTI A. Use of variable valve actuation to control the load in a direct injection, turbocharged, spark-ignition engine [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2010.
- [3] 张文,陈家基.新技术对燃油经济性的重大改进(下) [J]. 轻型汽车技术 2005(1):26-30.
- [4] CLEARY D, SILVAS G. Unthrottled engine operation with variable intake valve lift, duration, and timing [C]//SAE Technical Paper Series. 400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States; SAE International, 2007.
- [5] 王天友,张运泉,王利民,等.无节气门负荷控制策略对汽油机性能影响的研究[J]. 内燃机学报, 2009, 27(3):224-230.

- [6] 胡顺堂,谢辉,陈韬,等.可变进气门升程对汽油机泵气损失的控制及对燃烧过程的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(1):29-34.
- [7] 赵昌普,钟博,朱云尧,等.可变气门升程对涡轮增压缸内直喷汽油机缸内流动特性的影响[J]. 天津大学学报, 2013, 46(8):737-742.
- [8] 崔亚彬,袁中营,郭峰,等.连续可变气门升程技术在汽油机上的应用研究[J]. 车用发动机, 2019(5):35-40.
- [9] 韩本忠,李理光,张力华.连续可变气门升程系统对发动机燃烧和排放的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(增刊1):32-38.
- [10] 韩本忠,张力华,傅园松,等.连续可变气门升程系统对增压直喷发动机燃油经济性影响的研究[J]. 内燃机工程, 2019, 40(3):72-79.
- [11] 韩林沛.均质EGR及基于排气回流的分层EGR在GDI发动机部分负荷的应用研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.
- [12] HEYWOOD JB. Internal combustion engine fundamentals [M]. New York: McGrawHill, 1988.

收稿日期:2021-06-07

(上接第88页)

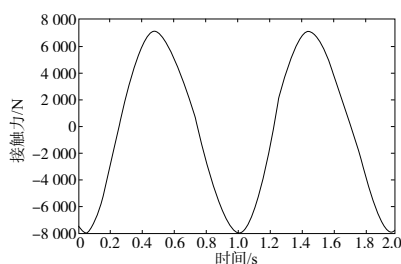


图12 第3级行星轮-太阳轮接触力曲线

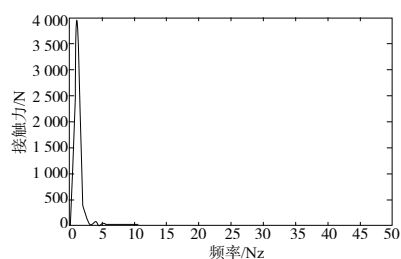


图13 第3级行星轮-太阳轮接触力幅频特性曲线

4 结语

本文结合三维建模、虚拟样机动力学仿真和 Simulink 控制系统仿真,建立了结构较为复杂的四级行星混合减速器直流伺服电机控制系统,借助 Simulink 虚拟控制器和 Adams 后处理功能对部分特性参数在时域和频域内作了检测和分析,验证了基于指数收敛观测器补偿 PID 控制在此联合仿真系统中的成功运用,为复杂模型设计和故障

诊断提供了一种机电一体化建模和分析思路。

遗留问题:1)虽然建立了齿面接触模型,但未考虑摩擦因素和启动惯性问题;2)尚未验证其他控制算法,进而突出该控制算法的优越性;3)速度阶跃响应下,没有严格考虑到位置的实时精度。

参考文献:

- [1] IGLESIAS M, FERNÁNDEZ DEL RINCÓN A, DE JUANAM, et al. Planetary gear profile modification design based on load sharing modelling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(4):810-820.
- [2] 孔令贤.基于Adams二次开发的复合齿轮传动系统动态接触仿真分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
- [3] SENSINGER J W. Efficiency of high-sensitivity gear trains, such as cycloid drives [J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(7):071006.
- [4] 王建湘,秦大同.考虑效率和动力学性能的大速比行星传动(NGWN(II))设计方法[J]. 机械传动, 2018, 42(1):41-46.
- [5] BODZÁS S. Analysis of the effect of the addendum modification coefficient for contact surfaces of spur gear [J]. Strojnicky Casopis - Journal of Mechanical Engineering, 2019, 69(1):5-16.
- [6] 刘晓乐,刘后广,程刚,等.基于ADAMS的两级行星齿轮断齿故障动态特性分析[J]. 机械传动, 2015, 39(6):98-102.
- [7] 张云超,王友仁,李加兴.基于ABAQUS的圆柱直齿轮齿根裂纹扩展与寿命估计[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(1):54-56.
- [8] 刘金琨.先进PID控制MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2016:116-117.

收稿日期:2021-02-01