

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.014

变进气压力条件下发动机压缩空气制动过程分析*

魏 巍, 黄 瑞, 陈俊玄, 窦文博, 俞小莉
(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对单级储能的气动-内燃混合动力发动机能量回收效果随储气罐压力增高而降低的问题,将双储气罐储能的技术方案应用到气动-内燃混合动力发动机中,初步得出了双储气罐储能系统可以通过改变进气压力来提高能量转化率 COP (coefficient of performance) 的观点。基于变质量热力学理论建立了压缩空气循环数学模型,并通过台架试验进行了初步验证。通过对模型进行稳态仿真,分析了进气压力、储气罐压力对压缩制动过程的影响。研究表明,进气压力与储气罐压力的变化对每循环回收气体质量的影响呈线性;储气罐压力与进气压力的比值是影响制动能量转化率的关键因素,能量转化率(COP)随储气罐压力与进气压力比值的升高而降低。

关键词:制动能量回收;双储气罐储能;进气压力

中图分类号:TH39;U463.23⁺48

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0623-06

Analysis of compressed air braking process under variable inlet pressure

WEI Wei, HUANG Rui, CHEN Jun-xuan, DOU Wen-bo, YU Xiao-li

(Power Machinery and Vehicular Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problem that the energy recovery effect of hybrid pneumatic engine based on single stage energy storage system decreased with the increase of the pressure of the air tank, double stage energy storage system was used into hybrid pneumatic engine, the viewpoint that the COP (coefficient of performance) could be improved by changing the inlet pressure was drawn preliminary. Based on the theory of variable mass thermodynamics, a mathematical model of compressed air circulation which was verified by testbed was established. Through the steady state simulation of the model, the influence of inlet pressure and air tank pressure on compressing braking process were obtained. The results indicate that the change of inlet pressure and the air tank pressure affect the quality of the recycled compressed air per circulation linearly. the ratio of air tank pressure and inlet pressure is a key factor affecting the COP which will decrease when the ratio increases.

Key words: braking energy recovery; double-stage energy storage; inlet pressure

0 引 言

就汽车工业而言,开发节能减排技术、代用燃料以及新能源动力为主要发展方向,其中,混合动力受到普遍关注。目前最为广泛应用的是电-燃油混合动力,这种混合动力增加了对电池技术的要求,且受电池寿命影响较大。除此之外,基于压缩空气储能的气动-内燃

混合动力系统,也可以通过制动能量回收以及对压缩空气的综合利用实现节能减排的效果。

国内外对于气动发动机的研究始于 1999 年,由 SCHECHTER^[1-2] 提出了气动内燃混合动力的概念,在普通内燃机的基础上增加了一个储气罐和连接储气罐与气缸的充气阀门,车辆制动过程中,将发动机转化为一个空气压缩机,提供辅助制动并以压缩空气的形式回收制动能量,然后通过直接膨胀做功和增压补气的

收稿日期:2017-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51476143)

作者简介:魏巍(1991-),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,主要从事气动-内燃混合动力发动机的研究。E-mail:yiluhuang123@163.com

方式加以利用^[3]。王雷等人^[4-7]改造了一台 290F 发动机,使用固定相位的凸轮轴驱动的充气门实现压缩空气的回收,结果表明随储气罐压力的增加,单循环回收气体比质量、单位指示功回收的气体质量以及能量转化率均有明显降低。

在较长距离压缩制动过程中,随着回收气体质量增加储气罐压力会不断增高,对于单级储能而言其回收能量的能力会大打折扣。根据初步的理论分析,认为双储气罐储能策略可以通过提高缸内进气压力从而提高压缩制动的能量回收性能^[8-9]。

本研究以某一单缸发动机为对象,通过局部结构改造,实现缸内压缩制动,并回收经过压缩空气。采用双储气罐储能方案,进行数学建模,并完成试验验证,后计算分析发动机进气压力、储气罐压力对压缩空气制动过程的影响。

1 数学模型建立

1.1 系统介绍

双储气罐压缩储能系统示意图如图 1 所示。

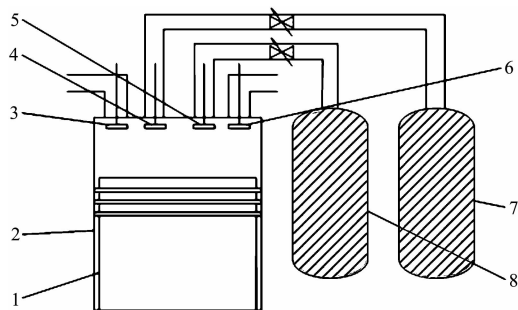


图 1 双储气罐压缩储能系统示意图

图注:1—活塞;2—缸壁;3—进气门;4—高压气门;

5—低压气门;6—排气门;7—高压储气罐;8—低压储气罐

为实现制动能量回收,本研究在现有单缸柴油机的缸盖上开孔,增加了两个气体通道分别经过两个充气气门(高压气门和低压气门)连接高、低压储气罐,进气门的开闭由一套可变正时、升程的凸轮机构驱动控制。制动过程,活塞下行时进气门打开,吸入空气,排气门和两个充气气门均关闭;活塞上行时,进气门关闭,缸内气体受到压缩,当其压力上升至接近低压储气罐压力时低压气门打开,缸内压缩空气充入储气罐;当活塞再次下行时,缸内压力逐渐降低至接近储气罐压力时,关闭低压气门,停止压缩空气回收,由此完成一个循环(低压循环)。对于双储气罐储能策略而言,与

单级储能不同之处在于活塞下行时,进气门关闭,连接低压储气罐的低压气门打开,由低压储气罐提供进气,活塞上行时,只打开连接高压储气罐的高压气门对高压气罐进行充气(高压循环)。

与单级储气罐的单级储能方式相比,上述双储气罐储能策略不同之处只有进气压力可以调节,从循环过程的数学模型而言,它们是相通的。因此,这里采用单级储能的机械结构进行建模,可以通过改变进气压力参数的方式来研究分析双储气罐储能方案的性能。

本研究的研究对象为经过气动改造的 S1115 单缸柴油机,充气门由一套电控柱塞泵全可变气门驱动机构驱动,模型中需要的发动机参数如表 1 所示。

表 1 发动机相关参数

| 参数 | 参数值 |
|-----------|----------|
| 缸径/mm | 110 |
| 行程/mm | 115 |
| 连杆曲柄比 | 189/59.5 |
| 压缩比 | 17 |
| 充气气门直径/mm | 22 |

1.2 数学模型

由于本项研究主要针对制动能量回收过程,在该过程中发动机不存在燃烧等状况,假设:

- (1) 缸内气体为理想气体且均匀;
- (2) 气体流动为准稳定流动;
- (3) 气缸壁温度均匀。

气动-内燃混合动力发动机内控制容积示意图如图 2 所示。

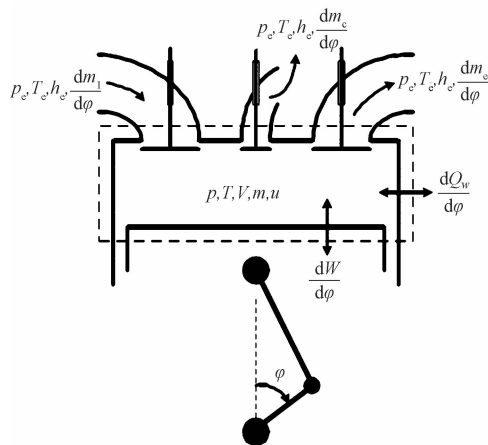


图 2 气动-内燃混合动力发动机示意图

根据上述假设以及质量守恒定律和能量守恒定律可写出缸内工质控制方程组^[10]:

$$\frac{d(mu)}{d\varphi} = \frac{d(Qw)}{d\varphi} + h_i \frac{d(m_i)}{d\varphi} - h_c \frac{d(m_c)}{d\varphi} - h_e \frac{d(m_e)}{d\varphi} - p \frac{dv}{d\varphi} \quad (1)$$

$$\frac{dm}{d\varphi} = \frac{dm_i}{d\varphi} - \frac{dm_c}{d\varphi} - \frac{dm_e}{d\varphi} \quad (2)$$

$$pV = mRT \quad (3)$$

求解可得气缸内连续性方程:

$$\frac{dp}{d\varphi} = \frac{k-1}{v} \times \left(\frac{-k}{k-1} p \frac{dv}{d\varphi} + \frac{\delta Q_w}{d\varphi} + h_i \frac{\delta m_i}{d\varphi} - h_c \frac{\delta m_c}{d\varphi} - h_e \frac{\delta m_e}{d\varphi} \right) \quad (4)$$

式中: P, T, V, m, k —缸内工质的压力、温度、体积、质量和比热比; u —比内能, J/kg; h_i —进气比焓, J/kg; dm_i —进气质量, kg; p_e —排气压力, Pa; T_e —排气温度, K; h_e —排气比焓, J/kg; dm_e —排气质量, kg; p_c —气罐压力, Pa; h_c —充气比焓, J/kg; dm_c —压缩空气回收质量, kg; dQ_w —缸内工质与缸壁的换热量, J。

缸内气体与缸壁的换热量由下式得出:

$$\frac{dQ_w}{dt} = h_x A_w (T_w - T) \quad (5)$$

式中: h_x —缸内气体与缸壁间的换热系数, T_w —缸内壁面温度, T —缸内工质温度, A_w —有效换热面积。

换热系数通过圆管内湍流经验公式得到^[11]:

$$h_x = 0.1129 p^{0.8} u^{-0.8} D^{-0.2} T^{-0.594} \quad (6)$$

流经气门的气体质量流量如下式:

$$\frac{dm}{dt} = \mu A \Psi \sqrt{2p_1 \rho_1} \quad (7)$$

式中: μ —流量系数, 进排气门的流量系数通过气道稳流试验获得; Ψ —流函数; A —理论流通截面积; p_1 —上游气体压力; ρ_1 —上游气体质量密度。

(1) 当 $\frac{p_{II}}{p_I} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时:

$$\Psi = \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{II}}{p_I}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{II}}{p_I}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (8)$$

(2) 当 $\frac{p_{II}}{p_I} < \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时:

$$\Psi = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k}{k+1}} \quad (9)$$

式中: p_{II} —下游气体压力。

本研究基于 Matlab, 以 1CA 为步长, 利用上述公式模型编写计算程序。

2 模型验证

为模拟特定工况下压缩制动过程以验证模型的准确性, 搭建了试验台, 试验台构成示意图如图 3 所示。

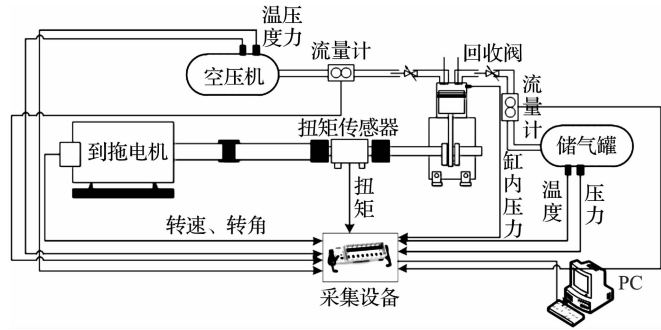


图3 试验台构成示意图

气动-内燃混合动力单缸机通过扭矩转速传感器连接到倒拖电机, 一台空压机提供可变压力进气, 另一台空压机模拟不同的储气罐压力。通过 Compact-DAQ 设备将数据采集到计算机中, 并进行数据处理。

试验值与计算值的示功图对比如图 4 所示。

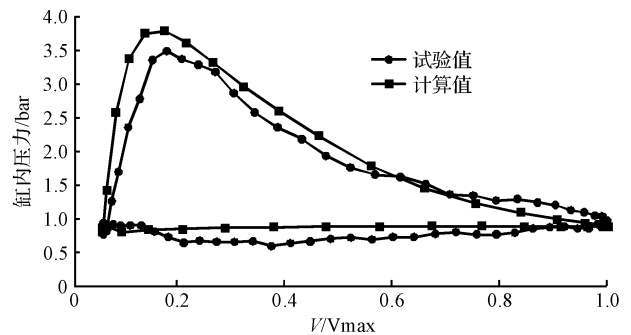


图4 进气压力 1 bar, 储气罐压力 1 bar, 发动机转速 600 r/min 时的试验值与计算值的示功图对比

运行参数是: 发动机进气压力 1 bar、储气罐压力 1 bar、发动机转速 600 r/min, 充气门在上止点前 180CA 开启。蓝线是试验值, 红线是计算值。由于漏气的存在, 缸内最大压力的试验值略低于计算值。

发动机转速 600 r/min, 进气压力 1 bar, 储气罐压力分别为 1 bar, 3 bar, 6 bar, 9 bar 时, 平均指示压力的计算结果与试验数据的对比如表 2 所示。

表 2 不同储气罐压力条件下平均指示压力试验数据与结果对比

| 储气罐压力/bar | 实验数据/bar | 计算结果/bar | 误差/% |
|-----------|----------|----------|------|
| 1 | 1.794 5 | 1.887 5 | 5.18 |
| 3 | 2.384 9 | 2.528 5 | 6.02 |
| 6 | 3.298 4 | 3.483 5 | 5.61 |
| 9 | 3.563 2 | 3.788 9 | 6.33 |

由上述对比可知,仿真模型可以较好模拟气动-内燃混合动力发动机制动能量回收过程的工作状况。本研究接下来的仿真研究均以该模型为基础进行。

3 仿真及结果分析

3.1 压缩制动能量回收性能指标参数

本研究的研究背景为双储气罐储能相对单储气罐储能的优势,而其优势主要体现在长距离制动过程(如长下坡滑行),该种工况下发动机对制动扭矩要求较低,所以本研究更加关注压缩制动循环将机械能转化为压缩空气内能的效率,本研究采用文献[12]中对压缩模式能量转化率 COP 的定义,计算公式如下:

$$COP = \frac{H}{W} \quad (10)$$

式中: H —每循环回收的压缩空气的焓, J ; W —每循环指示功, J 。

此外,每循环回收气体质量也是反映压缩制动循环的能量回收性能的重要参数,平均指示压力则反映循环消耗功的能力。

3.2 仿真计算结果分析

3.2.1 充气门开启、关闭时刻对 COP 的影响

在不同的工况下,充气门开启、关闭时刻对压缩制动过程有很大影响。本研究探讨的问题以长距离、长时间制动工况为背景,在此工况下,对制动力矩的要求较低,所以能量转化率 COP 更值得关注。故本节探讨充气门开启、关闭时刻对 COP 的影响规律,并以获得最大 COP 为目标优化气门时刻。

由于篇幅有限,本研究以进气压力 1 bar,排气背压 3 bar,发动机转速为 600 rpm 的工况为例完成气门时刻优化。选取充气气门开启角度为 $-135CA \sim -45CA$,梯度 10CA,关闭角度为 $0 \sim 40CA$,梯度 5CA,分别计算出充气门不同开启、关

闭时刻制动能量回收效率 COP 的数值,并做出 MAP 图如图 5 所示。

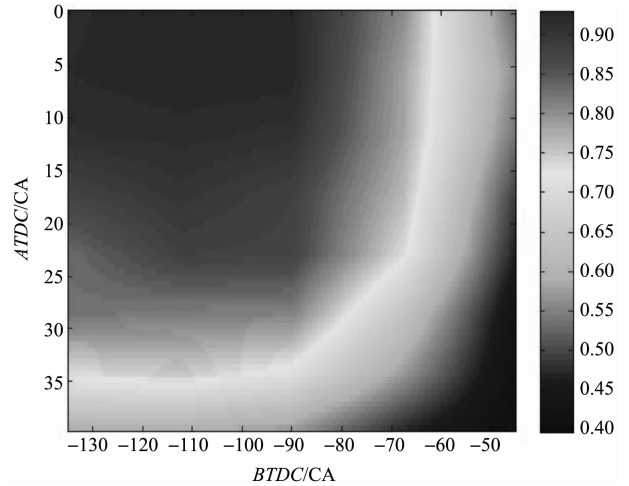


图 5 进气压力 1bar,储气罐压力 3bar,转速 600rpm 时 COP 随充气门开启关闭时刻变化规律

由图可见,COP 大致随充气门开启角和关闭角的提前而增加,充气门开启角和关闭角分别为 $-125C$ 和 $+5CA$ 时 COP 达到最大,此时制动能量回收效率 COP 为 0.930 2。由上述分析可知,COP 随充气门关闭角度的减小而增大,这主要是由于进气门相位固定,于上止点前 40CA 开启,下止点后 40CA 关闭,充气门关闭时刻过晚会导致储气罐内高压气体倒流至缸内后从进气门排出。所以对于其他工况气门的关闭时刻都确定在上止点后 5CA,对开启时刻进行优化。

依此方法,得出各工况下最优充气门开启时刻。不同转速下的优化结果如图 6 所示。

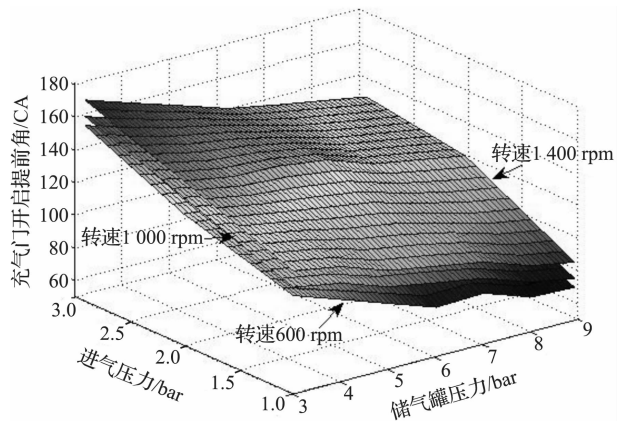


图 6 气门时刻优化方案

随转速增加,最优充气门开启时刻提前;随储气罐压力增加,最优充气门开启时刻推后;随进气压力增

加,最优充气门开启时刻提前。

3.3.2 进气压力和储气罐压力对每循环回收气体质量的影响

每循环回收气体质量随转速、储气罐压力以及进气压力变化规律如图7所示。

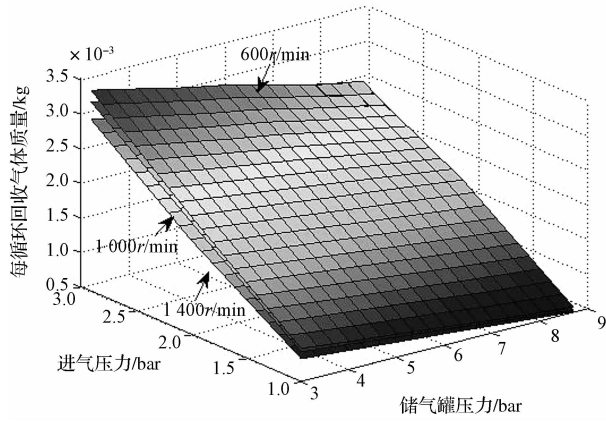


图7 每循环回收气体质量受各参数影响规律

每循环回收气体质量随转速增加、储气罐压力的增加以及进气压力的降低而减少。

由图可见,不同转速下的每循环回收气体质量随进气压力和储气罐压力变化的曲面接近平面,空间平面的数学方程为: $Ax + By + C = z$,可以得出进气压力与储气罐压力两个参数对每循环回收气体质量的影响呈线性,可写成如下公式:

$$m_{cyc} = aP_{tank} + bP_{in} + c \quad (11)$$

式中: m_{cyc} —每循环回收气体质量; P_{tank} —储气罐压力; P_{in} —进气压力; a, b, c —待定系数。

3.3.3 进气压力对平均指示压力的影响

平均指示压力随转速、储气罐压力以及进气压力变化的规律如图8所示。

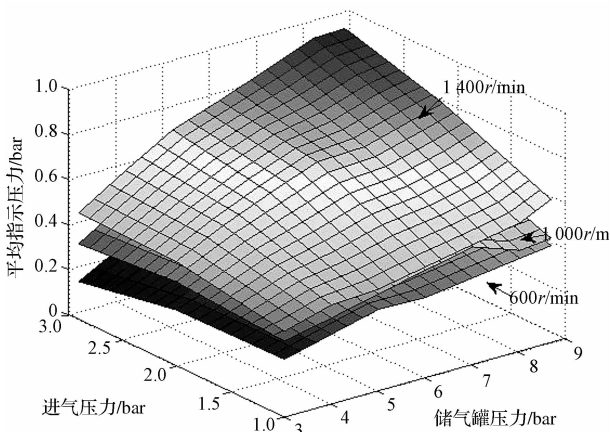


图8 平均指示压力受各参数影响规律

在考察到的转速范围内平均指示压力随转速的增加而增加,随储气罐压力的增加而增大。在发动机转速在600 r/min,储气罐压力低于4 bar时,平均指示压力随进气压力的增加而降低,其余工况下,平均指示压力均随进气压力的增加而增加。

转速600 r/min,储气罐压力3 bar,进气压力分别为1 bar、2 bar、3 bar时的示功图如图9所示。

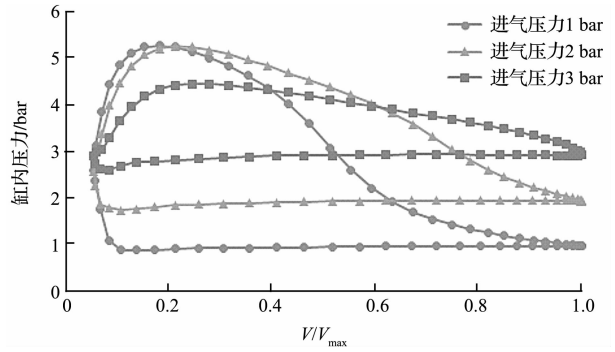


图9 发动机转速600 r/min、储气罐压力3 bar时,不同进气压力下的示功图

从图9可以看到,随着进气压力的增加,进气冲程增加的正功量远大于压缩冲程增加的负功量,使整个循环的指示功减少,从而平均指示压力降低。

3.3.4 储气罐压力与进气压力比值对COP的影响

COP受各参数影响规律如图10所示。

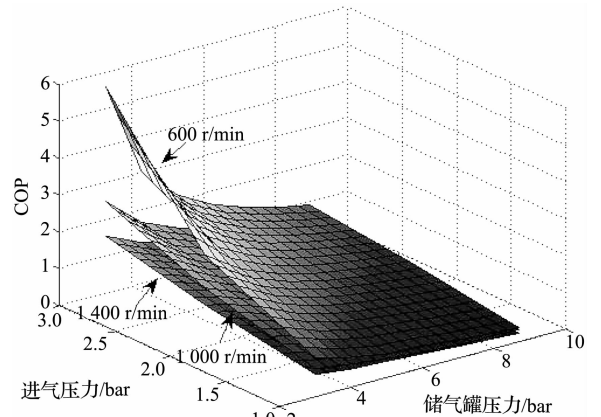


图10 COP受各参数影响规律

由图10可见,制动能量回收效率COP随转速和储气罐压力的增加而降低,随进气压力的增加而增加,在低转速时,增加趋势更加明显,可以发现进气压力和储气罐压力对COP的影响存在耦合,即储气罐压力的变化时,进气压力对COP的影响规律会发生变化。

提取了发动机转速为600 r/min时COP随储气罐压力和进气压力变化的MAP图如图11所示。

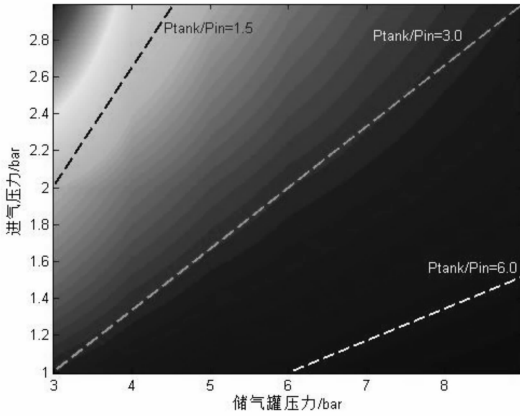


图 11 发动机转速 600 r/min 时, COP 随进气压力和储气罐压力变化规律 MAP 图

图中 3 条线分别代表储气罐压力与进气压力比值为 1.5、3 和 6 的等压力比线, 可见在等压力比线上 COP 的值不变, 所以得出储气罐压力与进气压力的比值是影响 COP 的重要因素, 且 COP 随储气罐压力与进气压力之比增加而降低, 即:

$$COP = f\left(\frac{P_{\text{tank}}}{P_{\text{in}}}\right) \quad (12)$$

$$\frac{d(COP)}{d\left(\frac{P_{\text{tank}}}{P_{\text{in}}}\right)} < 0 \quad (13)$$

4 结束语

双储气罐储能策略可以通过改变缸内进气压力提高压缩制动循环的能量回收性能, 本研究基于变质量热力学理论建立了压缩空气循环数学模型, 通过对模型进行稳态仿真, 分析了进气压力、储气罐压力对压缩制动过程的影响, 得出如下结论:

(1) 发动机压缩制动过程中, 储气罐压力一定的情况下, 进气压力增加, 能量转化率 COP 增加; 转速一定的情况下, 储气罐压力与进气压力之比是影响能量转化率 COP 的重要因素, 且随该比例的增加而降低;

(2) 压缩制动过程中, 每循环回收气体质量受进气压力和储气罐压力的影响呈线性, 可表示为 $m_{\text{cyc}} =$

$$aP_{\text{tank}} + bP_{\text{in}} + c;$$

(3) 压缩制动过程中平均指示压力在低速低储气罐压力情况下, 随进气压力的增加而降低。

参考文献 (References):

[1] SCHECHTER M. New cycles for automobile engines [C]// SAE International, warrendale: SAE, 1999.

[2] SCHECHTER M. Regenerative compression braking—a low cost alternative to electric hybrids [C]// SAE International, Warrendale: SAE, 2000.

[3] 樊之鹏, 王雷, 徐焕祥, 等. 涡轮增压器旁通废气能量回收利用 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2016, 50(12): 2277-2282, 2335.

[4] 王雷, 李道飞, 叶瑾, 等. 车用发动机压缩空气制动循环特性 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2014, 48(1): 56-62.

[5] 王雷, 回收利用制动能量的内燃机—空气压缩膨胀循环研究 [D]. 杭州: 浙江大学能源工程学院, 2015.

[6] 金旭, 张阔, 蒋爽, 等. 压缩机容量比固定的双级压缩热泵系统变工况性能分析 [J]. 流体机械, 2016, 44(11): 71-77, 48.

[7] 王雷, 李道飞, 徐焕祥, 等. 发动机压缩空气再生制动理想热力循环分析 [J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(1): 21-27.

[8] ANDERSSON M, JOHANSSON B, HULTQVIST A. An air hybrid for high power absorption and discharge [C]// SAE International, Warrendale: SAE, 2005.

[9] FAZELI A, KHAJEPOUR, DEVAUD. A novel compression strategy for air hybrid engines [J]. APPLIED ENERGY, 2011, 88(9): 2955-2966.

[10] 曹建明, 李跟宝, 高等工程热力学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.

[11] 胡军强, 俞小莉, 聂相虹, 等. 并联式气动-柴油混合动力可行性研究 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(9): 1632-1637.

[12] DÖNITZ C, et al. Realizing a concept for high efficiency and excellent driveability: the downsized and supercharged hybrid pneumatic engine [C]// SAE International, Warrendale: SAE, 2009.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

魏 巍, 黄 瑞, 陈俊玄, 等. 变进气压力条件下发动机压缩空气制动过程分析 [J]. 机电工程, 2017, 34(6): 623-628.

WEI Wei, HUANG Rui, CHEN Jun-xuan, et al. Analysis of compressed air braking process under variable inlet pressure [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(6): 623-628.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>