

压缩空气动力发动机工作过程建模及特性研究*

刘 昊 陈 鹰 陶国良

浙江大学流体传动及控制国家重点实验室, 杭州 310027

摘要 压缩空气动力发动机工作特性的研究是进行发动机设计和配置该型发动机汽车的动力系统设计的基础. 文中运用热力学建立了气动发动机工作过程数学模型, 结合仿真研究探讨了转速变化时发动机工作特性的变化情况, 并与发动机台架试验结果进行了比较分析, 为优化气动发动机设计, 提高气动发动机性能提供参考.

关键词 压缩空气动力发动机 数学模型 仿真

压缩空气动力发动机(气动发动机)利用高压压缩空气在气缸内膨胀推动活塞做功对外输出动力, 不消耗燃料, 尾气无任何污染物质排放. 同时, 压缩空气可以利用由水力、风力和太阳能等可再生绿色能源作为动力的电能制备, 用于汽车动力将使汽车真正成为零排放的环保汽车, 缓解城市空气污染和石油资源匮乏的压力.

压缩空气动力发动机工作特性的研究是进行发动机设计和配置该型发动机汽车的动力系统设计的基础. 自20世纪90年代开始, 法国MDI公司已研制开发了压缩空气动力汽车^[1], 但是未见相关的论文报道. 美国北德克萨斯大学^[2,3]和华盛顿大学^[4,5]在液氮动力汽车方面进行了一系列研究工作, 发动机分别使用气动叶片马达和改造后的往复式活塞发动机, 由液氮加热膨胀后获得的高压氮气驱动, 但对发动机的工作特性尚未见深入的研究报道. 国内在这一领域的研究目前刚刚起步. 本文运用热力学对往复式活塞式气动发动机的工作过程建立了数学模型, 结合仿真研究探讨了转速变化时发动机工作特性的改变情况, 并与台架试验结果进行了比较分析, 为优化气动发动机设计, 提高气动发动机性能打下基础.

1 气动发动机工作过程理论建模

1.1 气动发动机工作过程热力学模型

往复式活塞式气动发动机的工作循环为简单的两冲程, 即高压压缩空气进入气缸膨胀做功冲程, 和膨胀后的低压气体排出气缸的排气冲程. 气缸中气体的压力通过活塞、连杆传递到曲轴转化为扭矩输出, 因此, 发动机输出扭矩与气缸内气体的状态相关. 发动机工作过程中气缸内气体状态的变化规律, 也就决定了发动机的工作特性.

压缩空气在气缸内的状态变化是一个热力学过程, 现取单个气缸作为一个热力学系统进行考察研究, 系统的边界由活塞顶、气缸盖及气缸套壁面组成, 如图1中虚线框中所示. 在进气冲程, 排气门关闭, 进气门打开阶段, 气缸是一个开口体系, 高压压缩空气由气门进入气缸, 气缸内气体的质量增加; 而在进气冲程后段, 进、排气门均关闭, 气缸成为一个封闭体系, 气缸内气体质量不变. 在排气冲程, 进气门关闭, 排气门开启, 气缸又变成一个开口体系, 气缸内气体的质量减少.

2003-07-18 收稿, 2003-09-08 收修改稿

* 国家自然科学基金-福特基金(批准号: 20122115)和国家科技攻关计划(项目号: 2003BA408B14)资助项目

E-mail: hliu2000@zju.edu.cn

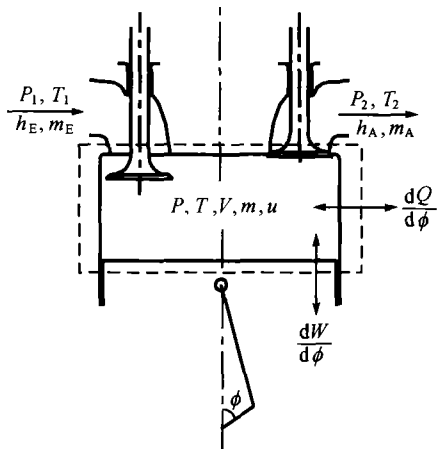


图1 气动发动机热力学分析简图

图中： P_1 —进气压力； T_1 —进气温度； h_E —进气气体比焓； m_E —进气气体质量； P_2 —排气压力； T_2 —排气温度； h_A —排气气体比焓； m_A —排气气体质量； P —气缸内气体瞬时压力； T —气缸内气体瞬时温度； V —气缸内气体瞬时体积； m —气缸内气体瞬时质量； u —气体比内能； Q —通过系统边界交换的热量； W —机械功； ϕ —曲轴转角

气动发动机工作时使用的是压缩空气，为简化计算过程，做如下假定：

- (1) 气缸内的气体状态是均匀的，气缸内各点的压力、温度完全相同；
- (2) 压缩空气为理想气体，比热、内能仅与气体温度有关；
- (3) 气体流入或流出气缸为准稳定流动；
- (4) 进、出口的动能忽略不计；
- (5) 气缸及配气机构在工作过程中无泄漏。

在上述假定下，对于该热力学系统在发动机工作过程中气体状态变化应满足以下能量守恒方程

$$dU = dQ + dW + h_E dm_E + h_A dm_A, \quad (1)$$

式中 U —气体内能。

在一般情况下，气缸内气体的比内能 u 和质量 m 同时变化，因此有：

$$dU = d(m \cdot u) = u dm + m du. \quad (2)$$

实际气体的比内能 u 是压力 P 、温度 T 和气体成分的函数，因为气缸内的气体为成分稳定的纯空气，所以比内能的变化只与气体压力、温度有关，

如下式所示

$$u = u(T, P). \quad (3)$$

对(3)式进行微分得

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial u}{\partial P} \right)_T dP, \quad (4)$$

将上述关系式代入(1)式，并因为压力 P 对气体比内能 u 的影响非常小忽略不计，可以求得缸内气体温度随曲轴转角变化的微分方程

$$\frac{dT}{d\phi} = \frac{1}{m \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)}.$$

$$\left[\frac{dQ}{d\phi} + \frac{dW}{d\phi} + h_E \frac{dm_E}{d\phi} + h_A \frac{dm_A}{d\phi} - u \frac{dm}{d\phi} \right]. \quad (5)$$

考虑到在热力学中，理想气体比内能和比热比存在以下关系：

$$\frac{\partial u}{\partial T} = C_v, \quad (6)$$

式中 C_v —气体等容比热。

(5)式可以简化为

$$\frac{dT}{d\phi} = \frac{1}{m C_v} \cdot \left[\frac{dQ}{d\phi} + \frac{dW}{d\phi} + h_E \frac{dm_E}{d\phi} + h_A \frac{dm_A}{d\phi} - u \frac{dm}{d\phi} \right]. \quad (7)$$

在发动机工作过程中，由于不存在燃烧过程，系统的热量的来源主要来自通过气缸周壁与外界交换的热量，由下式确定

$$\frac{dQ}{d\phi} = \frac{1}{\omega} \alpha_w A_w (T_w - T), \quad (8)$$

式中 ω —曲轴转动角速度； α_w —气体换热系数； A_w —气缸传热表面积； T_w —气缸传热表面平均温度。

(7)式中，系统对外界所做的机械功由下式确定

$$\frac{dW}{d\phi} = -P \frac{dV}{d\phi}, \quad (9)$$

同时,在发动机工作过程中,系统内气体质量的变化满足质量守恒微分方程

$$\frac{dm}{d\phi} = \frac{dm_E}{d\phi} + \frac{dm_A}{d\phi}. \quad (10)$$

在系统内外压差和气阀的开口截面确定时,气体的瞬时质量流量是可以计算的,而进、出系统的质量随曲轴转角的变化率与瞬时质量流量的关系如下式所示

$$\frac{dm_j}{d\phi} = \frac{1}{\omega} \sum_j \dot{m}_j, \quad (11)$$

式中 j —标志进气或排气状态; \dot{m} —流入或流出系统的气体的瞬时质量流量,其值由下式计算

$$\dot{m} = \mu A \sqrt{2P_I \rho_I} \cdot \psi, \quad (12)$$

式中 μ —气体流量系数; A —进气阀或排气阀瞬时开口面积; P_I —气阀前气体瞬时压力; ρ_I —气阀前气体瞬时密度; ψ —流动函数,由气体流动状态确定,见下式

当 $\frac{P_{II}}{P_I} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时为亚临界流动

$$\psi = \sqrt{\frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{II}}{P_I}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{II}}{P_I}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (13)$$

式中 P_{II} —气阀后气体压力; k —气体比热比.

当 $\frac{P_{II}}{P_I} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时为超临界流动

$$\psi = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{k}{k+1}}. \quad (14)$$

联立微分方程(7)和(10),再结合气体状态方程

$$PV = mRT, \quad (15)$$

式中 R —气体常数,即组成气动发动机的热力学模

型,可以求解发动机稳定转动时任一曲轴转角位置的缸内气体的压力 P 、温度 T 和质量 m .

1.2 气动发动机输出扭矩

参考往复式活塞式内燃机输出扭矩计算过程^[6],分别以活塞和曲轴作为研究对象进行受力分析,可得发动机单个缸输出的扭矩为

$$M_P = \frac{(P - P_0)S - m_i r \omega^2 (\cos\phi + \lambda \cos 2\phi)}{\cos\beta + \mu A_b \sin\beta} \cdot \sin(\phi + \beta) \cdot r, \quad (16)$$

式中 P_0 —大气压; S —活塞顶投影面积; β —连杆与气缸轴线夹角; μ —活塞与缸壁间滑动摩擦系数; A_b —活塞与缸壁接触面积; m_i —往复质量; r —曲柄半径; λ —曲柄连杆比.

2 气动发动机工作特性仿真分析

基于上述模型,对不同转速下气动发动机工作特性进行了仿真.仿真参数选取气缸直径 62 mm,冲程 66 mm,连杆比为 0.3,发动机进气压力为 1 MPa,顶置凸轮轴—气门配气形式,进气提前角为 33° 曲轴转角,持续角 187° 曲轴转角,排气提前角 17° 曲轴转角,持续角 227° 曲轴转角.

图 3 所示的是代表气动发动机工作特性的输出扭矩、功率及耗气量(换算到自由空气状态下体积计算)的仿真结果曲线.由图中可以看出,气动发动机低速输出扭矩(平均扭矩)很大,随着转速的上升,扭矩值不断下降,且曲线下落的斜率逐渐变大.这就引起作为转速和扭矩乘积的输出功率在较低转速时随转速上升而上升,在转速 3000 ~ 4000 r/min 间达到最大值,随后虽然转速继续上升,由于扭矩降低幅度加大,输出功率却开始逐渐下降.而发动机的耗气量持续上升,但曲线的上升斜率逐渐减小,这表明耗气量与转速并不成正比,转速升高时,单位工作循环耗气量降低.

考察前述发动机热力学模型,由(16)式可知,发动机的瞬时输出扭矩由缸内气压确定.对于往复式活塞式气动发动机,虽然每一个工作循环中气缸容积随曲轴转角变化规律是不变的,但是在进、排气阀开启阶段,气缸为开口体系,气缸内气体质量是变化的,其变化率受转速影响,这就导致了不同转

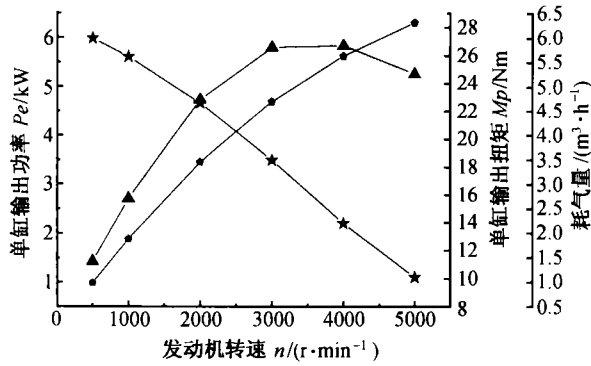


图2 发动机输出扭矩、功率及耗气量随转速变化曲线
▲ 功率曲线；★ 扭矩曲线；● 耗气量

速下发动机工作循环中气体的压力随曲轴转角度的变化规律发生改变，从而使平均输出扭矩发生变化。

气缸内气体质量的变化率即排气和进气气体质量流量之和，由(11)和(12)式可知，在压力和通流截面一定时，发动机单位转角内进气和排气的流量与发动机转速成反比。因此由图3~5中可以看到，随发动机转速的升高，在发动机工作循环中单位转角进、排气流量均下降。这就导致在进气冲程进气门刚开启阶段，气缸内气体压力上升较慢，气缸内最高压力降低，且在进气门持续开启阶段维持的压力也降低，进气冲程平均压力下降，最终使发动机输出的正向扭矩降低；而在排气冲程，排气流量的减小使气缸内气体的压力降低速度减小，排气不充分，平均压力高，发动机负向扭矩增大，最终整个

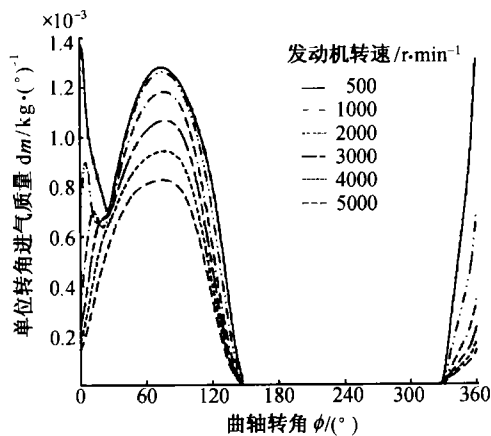


图3 不同转速下进气流量变化曲线组

工作循环气缸内气体温差和发动机平均输出扭矩都随转速的上升不断减小。

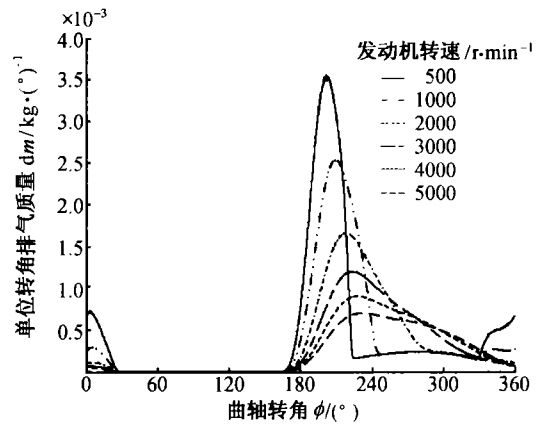


图4 不同转速下排气流量变化曲线组

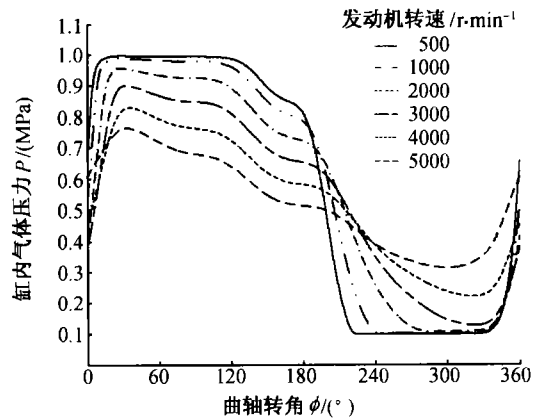


图5 不同转速下缸内气体压力变化曲线组

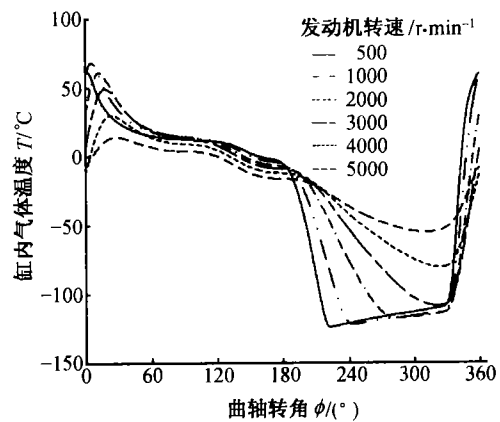


图6 不同转速下缸内气体温度变化曲线组

发动机气缸内气体温度的变化是决定发动机工作特性的另一个重要因素,因为它将影响到发动机气缸和机体的温度,进而影响机体的膨胀和润滑油的粘度.由图6可以看到,在进气冲程进气门刚开启阶段,相当于气罐充气过程,进气压差大,进气速度快,气缸内气体温度迅速上升.在缸内压力升高到接近进气压力后,进气速度下降,与此同时气缸容积在变大,气体温度逐步降低.进气门关闭后,气缸成为一封闭体系,气体温度随气缸容积的增大快速下降,直到活塞运行到下止点为止.接下来的排气冲程,初始时相当于气罐放气过程,排气压差大,排气速度极快,气体温度也大幅降低,最低可达 -124°C .当缸内气体压力接近缸外压力,排气速度减缓时,活塞上行使气缸容积减小而温度缓慢回升.最后在排气门逐步关闭,进气门提前开启的阶段,由于进气和活塞上行压缩气体的作用,缸内气体的温度又迅速大幅上升.转速的上升使单位转角进、排气的速度减小,从而使气缸内气体温度的变化趋缓,气缸内气体最低温度升高,单位循环温差减小.

3 气动发动机试验研究

为验证仿真结果,通过对配气方式和机体结构的改造,将一台4冲程汽油发动机改造为使用压缩空气工作的往复式活塞式气动发动机,并在气动发动机台架上进行了试验.原发动机为直列4缸、4冲程、8气门单顶置凸轮轴配气,气缸直径62mm,活塞行程66mm,总排量0.797L,压缩比8.7:1,进气压力为1MPa.

气动发动机工作平稳,工作特性曲线变化规律

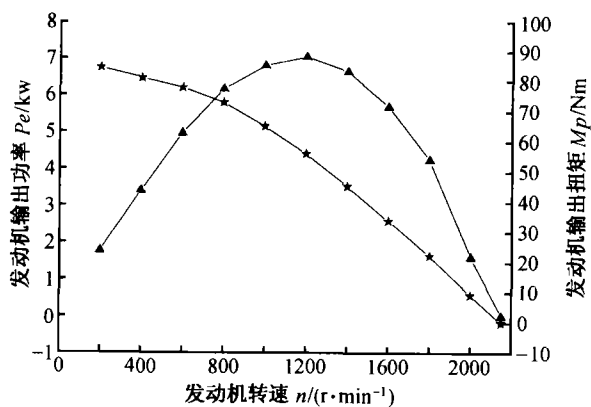


图7 四缸气动发动机输出扭矩和功率随转速变化试验曲线

★ 扭矩曲线; ▲ 功率曲线

和图2一致,但在数值上有较大降低,如图7所示.发动机空载最高转速在2150r/min左右,四缸总输出功率在转速为1100r/min左右达到最大值,最低稳定运转转速为200r/min左右,此时输出最大扭矩.

考察气动发动机在转速1000r/min时其中一缸缸内压力变化实测曲线,如图8所示.由图中可以看出,实测缸内压力变化曲线与图5中对应仿真曲线变化趋势也基本一致,但在图8中曲线BCD段出现一个异常压力陡降的波谷,并且在整个进气膨胀冲程缸内气体压力比仿真结果低,因此导致发动机输出扭矩和功率下降,转速较低.分析其原因,是因为发动机进气门采用了滑阀结构,进气口较小且在开始阶段开启不充分,而气缸及活塞未作改造,两者间一定间隙,泄漏量大.虽然有进气提前,并且在活塞刚开始下行时活塞运动速度很低,气缸内气压可以迅速上升到较高压力(曲线A—B段),但在B点附近活塞加速下行,导致缸内压力下降.到达C点时进气门升程达到最大,进气流量增大使缸内压力回升,但由于进气截面依然偏小,进气流量不足,气缸内压力偏低.这一现象与发动机结构有关,对其进一步改造完善后可以改进,使试验曲线与仿真曲线更为接近.因此,试验说明气动发动机数学模型可以较好的描述发动机的工作过程,其仿真结果可以为完善实际发动机的结构设计提供帮助.

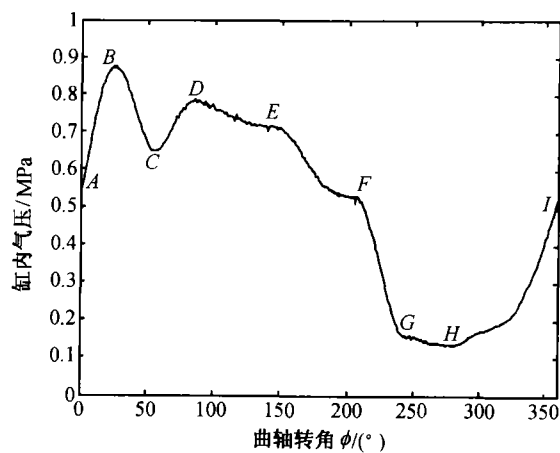


图8 气动发动机实测缸内压力变化曲线

4 结论

运用热力学理论建立了压缩空气动力发动机数学模型,基于该模型的仿真结果表明,在保持进气

压力不变时, 发动机工作特性随发动机转速变化改变较大. 随着转速的上升, 发动机输出扭矩加速下降, 输出功率在逐渐上升到峰值后下降, 而耗气量上升的速度不断减小. 气动发动机工作特性按上述规律变化的主要原因在于, 单位转角进、排气流量受发动机转速变化影响, 引起压缩空气在气缸工作循环中的热力学状态变化过程发生改变. 改变进气压力和气门开启截面, 可以改变不同转速下的单位转角进气流量, 因此可以调节相应转速下发动机的性能特性, 适应实际工况的需要. 发动机台架试验结果证明, 压缩空气动力发动机数学模型可以较好地描述发动机的工作过程, 为深入研究气动发动机工作特性, 进行优化设计奠定基础.

参 考 文 献

- 1 法国 MDI 公司网站, www.zeropollution.com
- 2 Knowlen C, et al. Quasi-isothermal expansion engines for liquid nitrogen automotive propulsion. SAE Paper, No. 972649, 1997
- 3 Knowlen C, et al. High efficiency energy conversion systems for liquid nitro-gen automobiles. SAE Paper, No. 981898, 1998
- 4 Ordonez C A. Liquid nitrogen fueled, closed Brayton cycle cryogenic heat engine. Energy Conversion & Management, 2000, 41: 331
- 5 Ordonez C D A, et al. Cryogenic heat engines for powering zero emission vehicles. Proceedings of 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 11-16, 2001, New York, NY
- 6 杨连生. 内燃机设计. 北京: 中国农业机械出版社, 1981. 73~87

液态金属结构领域项目集团管理 研究成果显著

由国家自然科学基金委员会工程与材料科学部组织、周尧和院士主持的液态金属结构领域的集团管理项目年度学术交流研讨会于 2003 年 11 月 26 日在上海交通大学举行. 集团管理是将若干个同一类的面上资助项目组成一个邦联式的集团, 为他们创造一个学术气氛活跃、能够相互启迪、相互促进的环境, 以利于出成果的管理形式. 本次纳入集团管理的项目分别由山东大学、湖南大学和上海交通大学承担, 具体项目是“金属熔体中程有序结构的演化及其遗传性”、“金属凝固过程中纳米团簇结构的形成、演变及控制机理研究”和“大块非晶合金熔体/非晶体/晶化体间微观结构的内在联系”. 通过 3 年的工作, 由于三方优势互补、各有所长, 取得了丰硕的研究结果, 有 51 篇论文发表在国际刊物上, 国际会议论文 6 篇. 具体成果如下:

(1) 通过对各种类型合金熔体结构的实验研究和理论分析, 发现了中程有序结构的存在条件和随温度变化的演化规律, 建立了多种熔体结构的分析和表征方法, 为合理利用熔体结构控制凝固组织指明了方向.

(2) 在液态金属原子大系统分子动力学模拟方面有所突破, 利用自行创立的“原子团簇类型指数法”, 成功刻画了原子团簇的种类、构成和冷却过程中的变化, 为最终解决整个无序系统的科学描述问题开辟了一条新途径.

(3) 揭示了大块非晶形成合金熔体、非晶体、晶化体间微观结构的相互关联作用, 提出了非晶形成能力的最小自由体积模型, 初步探讨了局域有序结构向稳定晶核的转变问题, 为深入研究结晶过程的微观机制奠定了基础.

(车成卫 靳达申)