

环形串联直缸发动机配气系统设计*

徐海军, 杨聪楠, 徐小军, 唐源江

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 环形串联直缸发动机具有功率密度高、惯性力小等诸多优点, 但其运行时气缸转子始终绕输出轴周向转动, 使得传统发动机静态的配气方法不再适用。因此, 研究设计一种能够满足该型发动机进排气需求的新型配气系统意义重大。针对该型发动机独特的环形串联结构和差速运动特性, 研究了各转子气缸的容积变化规律, 分析了各转子气缸进排气相位与转子转角之间的关系, 创新设计了一种基于气道复用的动态位置配气系统。根据二冲程发动机配气方案设计加工了配气系统零部件, 并通过高压气动实验完成了对该型发动机的动态进排气过程。实验结果表明, 当给定外加驱动气压 0.25 MPa 时, 发动机能够以约 200 r/min 的速度稳定运转, 有效验证了该配气系统的可行性。

关键词: 气道复用; 动态位置配气; 环形串联直缸发动机; 配气系统设计

中图分类号: TK45 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1001-2486(2023)02-188-09



听语音
与作者互动
聊科研

Gas distribution system design for annular connecting straight cylinder engine

XU Haijun, YANG Congnan, XU Xiaojun, TANG Yuanjiang

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The annular connecting straight cylinder engine has many advantages such as high power density, low inertia force and so on. However, the cylinder rotors always rotate along the circumferential direction of the output shaft during operation, which makes the traditional static gas distribution method no longer applicable. Therefore, it is of great significance to research and design a new type of gas distribution system that meets the intake and exhaust requirements of this type of engine. In view of the unique annular connecting structure and differential velocity motion characteristic of the engine, the volume change law of each rotor cylinder was analyzed, and the relationship between the intake and exhaust phases of each rotor cylinder and the rotor rotation angle was studied. On this basis, an innovative dynamic position gas distribution system with airway reuse feature was designed. According to the gas distribution scheme of two-stroke engine, the parts of the gas distribution system were designed and processed, and the dynamic intake and exhaust process was completed through high-pressure pneumatic test. The experimental results show that the engine can run stably at 200 r/min when the driving air pressure is 0.25 MPa, which effectively verifies the feasibility of the gas distribution system.

Keywords: airway reuse; dynamic position gas distribution; annular connecting straight cylinder engine; gas distribution system design

当前, 轻小型无人平台的快速发展对发动机功率密度提出了更高要求^[1]。传统往复活塞发动机通过增加气缸数量等方法虽然在一定程度上提高了发动机功率输出, 但同时使得发动机尺寸重量增大, 曲轴结构更加复杂, 往复惯性力平衡难度加大, 无法大幅提升发动机功率密度。因此, 国内外诸多学者致力于研究探索新的发动机构型, 进一步提升发动机性能。

配气系统设计研究是新构型发动机成功研制

不可或缺的重要环节^[2]。不同构型的发动机所需的配气系统差异较大。传统发动机主要采用基于凸轮-气门式配气机构的配气系统, 包括常规的气门凸轮配气机构^[3]和可变的气门凸轮配气机构, 典型的有 Honda 开发的 i-VTEC^[4]等; 同时还有利用电磁、电液、电气等直接驱动气门的配气系统, 如基于全柔性化的电磁驱动配气机构 EMVT^[5]、全可变电液驱动配气机构^[6]等。德国工程师 Wankel 博士发明了三角转子发动机^[7],

* 收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 基础加强计划技术领域基金资助项目(2019-JCJQ-JJ-224)

作者简介: 徐海军(1981—), 男, 湖北武汉人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: 13787251384@163.com;

杨聪楠(通信作者), 男, 浙江浦江人, 硕士研究生, E-mail: pjzycn@163.com

该发动机利用三角转子自转和周转形成工作腔空间位置和容积的周期性变化,从而实现热力学循环输出动力。根据三角转子的运动特点,设计人员提出了基于静态位置配气方法的配气系统,即在三角转子发动机缸体特殊位置设计固定的开口作为进、排气口。该配气系统无须气门及配气机构,显得更加简洁高效。三角转子发动机的工程化应用证明了这种静态位置配气方法的可行性和实用性。张雷等^[8]采用类似的静态位置配气方法对旋转活塞式发动机进行了气口设计分析,即根据发动机活塞转子运转特性在缸体的特定位置设计进、排气口,满足了发动机的配气需求。该发动机采用“动态扩容”技术大幅提高了发动机的功率密度,但由于组合式环形气缸的特殊结构,其加工精度要求高,密封难度大。

本文主要针对一种新构型的环形串联直缸发动机(annular connecting straight cylinder engine, ACSCE),研究设计满足其进排气需求的配气系统。该型发动机采用连杆和活塞将两组气缸转子首尾相接,活塞和转子之间形成串联可变容积的直缸容腔,利用行星齿轮连杆机构(planet gear linkage mechanism, PGLM)约束转子运动,实现了发动机的动态扩容,功率密度成倍提升,同时发动机零部件加工简单,密封效果好,更有利于工程实现。但由于环形串联直缸发动机气缸转子工作时始终绕输出轴周向转动,难以继续采用传统发动机静态的配气方法进行配气。因此,本文在深入研究该型发动机独特的环形串联结构、差速运动特性及转子气缸进排气规律的基础上,创新设计了一种基于气道复用的动态位置配气系统,满足了该型发动机的进排气需求,为环形串联直缸发动机进一步工程化实现提供重要参考。

1 整机结构及串联直缸容积变化规律

如图1所示为环形串联直缸发动机结构组成示意图。该型发动机主要由气缸转子组件(动力转换)、行星齿轮连杆机构(功率传输)、配气系统和输出轴部件四大部分组成^[9]。本文所设计的配气系统通过发动机中央轴供气,安装在与输出轴相对一侧的发动机中轴线位置。

行星齿轮连杆机构是约束发动机两气缸转子差速运动的重要组件,其结构示意图如图2所示。外齿圈与发动机外壳固定,两个行星轮与外齿圈啮合,分别作为一组四杆机构的曲柄,并以一定的相位差安装。输出轴以一定转速转动时带动行星架公转,从而使两行星轮绕各自中心轴自转。由

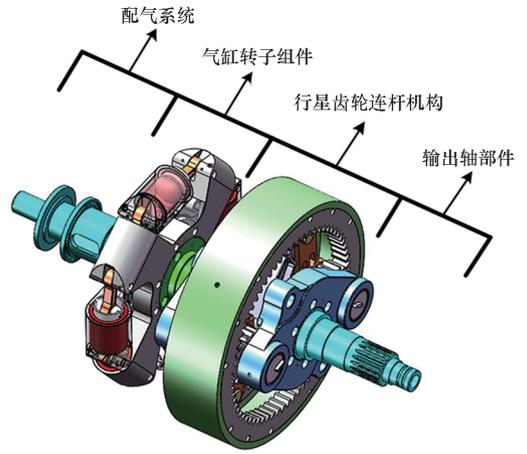


图1 环形串联直缸发动机结构组成
Fig.1 Structural composition of ACSCE

于初始相位差的存在,两摇杆在连杆的带动下将形成特定规律的差速运动。

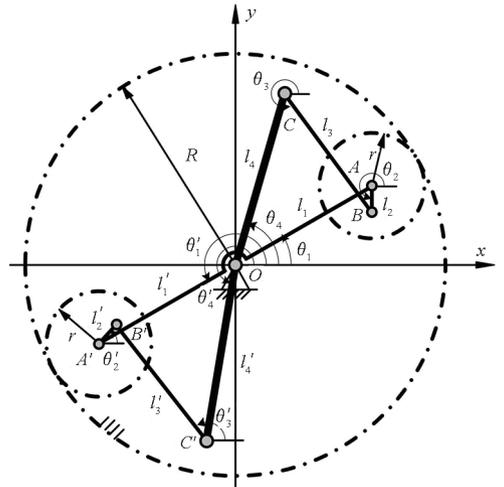


图2 行星齿轮连杆机构结构示意图
Fig.2 Schematic diagram of PGLM structure

张威扬^[10]对行星齿轮连杆机构的运动学特性做了详细的研究分析。借鉴其研究成果可知各杆件转角与输出轴(行星架)偏转角之间的关系可表达为:

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos \theta_2 + l_3 \cos \theta_3 = l_4 \cos \theta_4 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \sin \theta_3 = l_4 \sin \theta_4 \\ l_1 \cos \theta'_1 + l_2 \cos \theta'_2 + l_3 \cos \theta'_3 = l_4 \cos \theta'_4 \\ l_1 \sin \theta'_1 + l_2 \sin \theta'_2 + l_3 \sin \theta'_3 = l_4 \sin \theta'_4 \\ \theta_2 - \theta_{20} = (1 - \rho)(\theta_1 - \theta_{10}) \\ \theta'_2 - \theta'_{20} = (1 - \rho)(\theta'_1 - \theta'_{10}) \\ \theta'_{10} = \theta_{10} + \pi \\ \theta'_1 = \theta_1 + \pi \\ \theta'_2 = \theta_2 + \Delta\varphi + \pi \end{cases} \quad (1)$$

式中: l_i 、 l'_i 分别为四杆机构 $OABC$ 和 $OA'B'C'$ 中各

构件 i, i' 的长度, θ_i, θ'_i 为四杆机构各构件的偏转角 ($i=1, 2, 3, 4$); $\rho = z_0/z_2$ 为外齿圈与行星轮的传动比, z_0, z_2 分别为外齿圈和行星轮的齿数; $\theta_{10}, \theta'_{10}$ 和 $\theta_{20}, \theta'_{20}$ 分别为曲柄和连杆初始角度; $\Delta\varphi$ 为两行星齿轮初始安装相位差。

如图 3 所示为气缸转子组件结构示意图。转子 1 和转子 2 交错布置, 并通过活塞和连杆首尾相接形成串联的做功容腔, 其中转子 1 与摇杆 I 固连, 转子 2 与摇杆 II 固连。

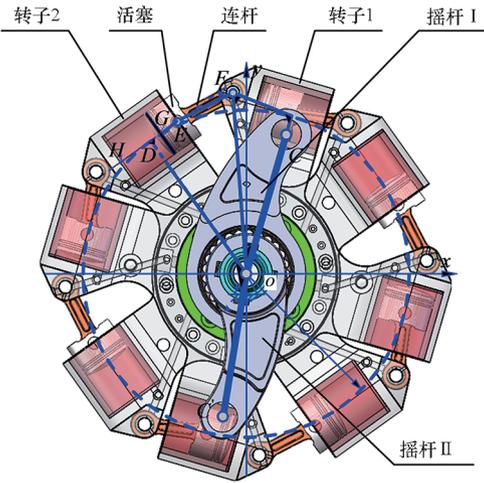


图 3 气缸转子组件结构示意图

Fig. 3 Structure of the cylinder rotor assembly

为便于描述气缸转子组件各构件之间的位置关系, 建立直角坐标系并给出各参数定义如图 4 所示, 其中 $|\overline{OF}| = l_5$, $|\overline{OD}| = l_6$, $|\overline{EF}| = l_7$, $\angle COF = \theta_{CF}$, $\angle DOC' = \theta_{DC'}$; $|\overline{HD}| = h_c/2$, $|\overline{GE}| = h$, 其中 h_c 为气缸高度, h 为活塞高度。

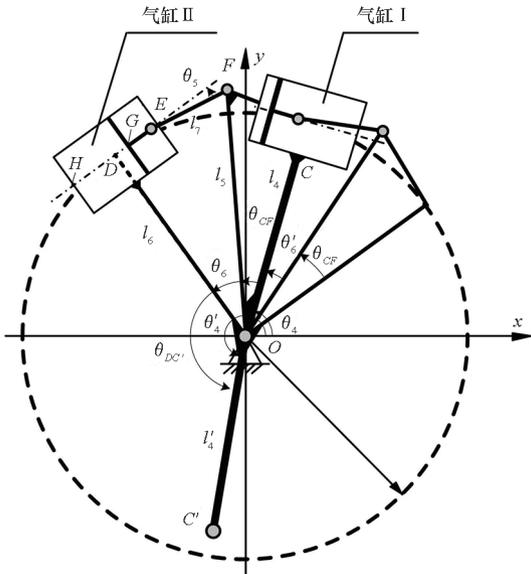


图 4 气缸转子组件坐标系及各参数定义

Fig. 4 Coordinate system and parameter definition of the cylinder rotor assembly

由图 4 可知, 气缸转子组件角度关系为:

$$\begin{cases} \theta_6 = \theta'_4 - \theta_4 - \theta_{CF} - \theta_{DC'} \\ \theta'_6 = \frac{\pi}{2} - \theta_6 - 2\theta_{CF} \end{cases} \quad (2)$$

根据闭环矢量关系 $\overline{OF} = \overline{OD} + \overline{DE} + \overline{EF}$, 可得:

$$\begin{cases} l_5 \sin \theta_6 = |\overline{DE}| + l_7 \cos \theta_5 \\ l_5 \cos \theta_6 = l_6 + l_7 \sin \theta_5 \end{cases} \quad (3)$$

解得活塞位移矢量 \overline{HG} 的表达式为:

$$\begin{cases} |\overline{DE}| = |l_5 \sin \theta_6 - \sqrt{l_7^2 - (l_5 \cos \theta_6 - l_6)^2}| \\ \overline{HG} = \overline{HD} + \overline{DE} - \overline{GE} \end{cases} \quad (4)$$

定义转子气缸内径大小为 D , 由此可求得气缸做功容积大小为:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 |\overline{HG}| \quad (5)$$

根据现有研究成果, 在优化发动机布局^[11]及传动特性^[12]的基础上, 给定该型发动机结构参数如表 1 所示。

表 1 发动机结构参数

Tab. 1 Structure parameter of ACSCE

参数符号	数值
l_1, l'_1	67.5 mm
l_2, l'_2	11.5 mm
l_3, l'_3	64 mm
l_4, l'_4	74 mm
l_5	101.6 mm
l_6	90 mm
l_7	35 mm
h_c	44 mm
h	15 mm
θ_{CF}	20.75°
$\theta_{DC'}$	135.8°
z_0	72
z_2	18
D	32 mm
$\Delta\varphi$	40°

结合气缸转子组件和行星齿轮连杆机构运动特性可得各转子气缸做功容积 V 与输出轴偏转角 θ_i 之间的关系曲线如图 5 所示。由图可知, 气缸 I 和气缸 II 之间相位相差 180°, 即当气缸 I 达到最大容积时, 气缸 II 达到最小容积, 反之亦然。通过调整摇杆与转子的固定连接相位可使得气缸

I 和气缸 II 的最大最小容积相同,其中最大容积约为 $2.0 \times 10^4 \text{ mm}^3$,最小容积约为 $0.17 \times 10^4 \text{ mm}^3$,压缩比约为 11.5;气缸活塞行程 $S \approx 23.25 \text{ mm}$ 。

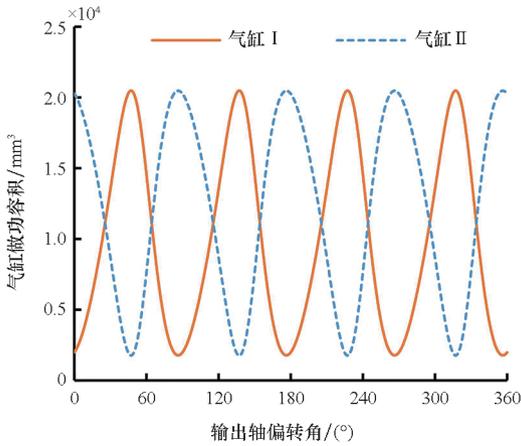


图5 做功容积与输出轴偏转角的关系曲线
Fig.5 Relationship between work volume and output shaft angle

2 配气需求及进排气相位分析

分析各转子气缸做功容积 V 与输出轴偏转角 θ_1 之间的关系可知,输出轴旋转 1 周,活塞往复运动 4 次,相应的气缸做功容积变化 4 次。结合热力学循环过程和做功容积的变化规律,可分别设计二冲程和四冲程两种工做原理的发动机^[13]。二冲程时,活塞往复运动 1 次完成 1 个做功循环,即只有进气(做功)和排气两个过程;四冲程时,活塞往复运动 2 次完成 1 个做功循环,即分为进气、压缩、做功、排气四个过程。本文采用二冲程工作原理对发动机进行配气系统设计。

对于二冲程发动机来说,气缸容积由小变大对应为进气冲程,气缸容积由大变小对应为排气冲程,即:当气缸容积达到最小时,相应的输出轴偏转角为进气初始相位和排气最大相位;当气缸容积达到最大时,相应的输出轴偏转角为排气初始相位和进气最大相位。由于气缸转子始终绕输出轴周期性单向转动,当气缸处于不同进排气相位时,气缸转子对应于周向不同转角,且呈周期性分布。如图 6 所示为发动机输出轴处于不同偏转角时各转子气缸的配气需求。

由图 6 可知,同一时刻同一转子上各气缸(转子 1 上气缸 I、III、V、VII 或转子 2 上气缸 II、IV、VI、VIII)进排气状态相同。因此,不同转

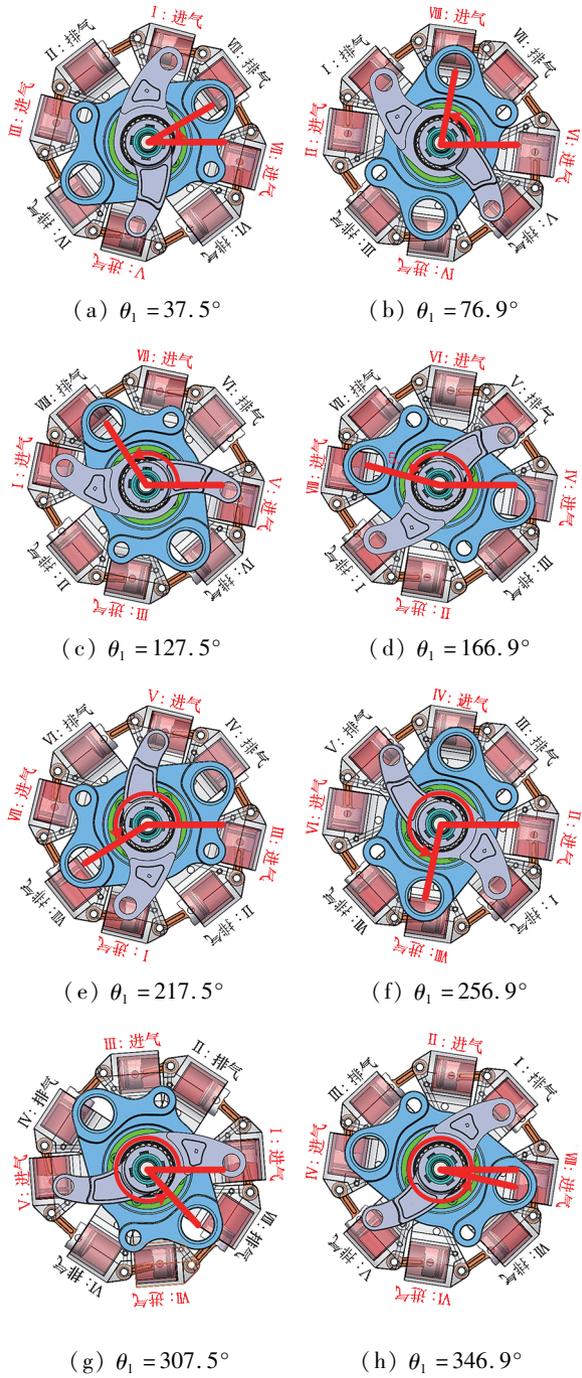


图6 发动机输出轴偏转角对应各转子气缸的配气需求
Fig.6 Gas distribution requirements of each rotor cylinder at different output shaft angles

子的偏转角与其气缸做功容积的变化关系是进、排气规则设计的重要依据。输出轴转动 1 周,转子 1、转子 2 气缸做功容积 V 与其偏转角的关系曲线如图 7 所示。由图可知,转子转动 90° ,做功容积变化一个周期,完成一个进排气循环,同时同一转子上各气缸角度固定偏差为 90° ,因此只需选取相应转子的其中一个气缸设计配气相位即可,对应的转子 1、转子 2 配气相位如图 8 所示。

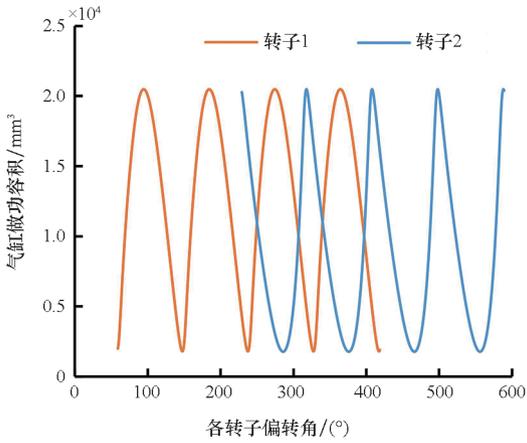
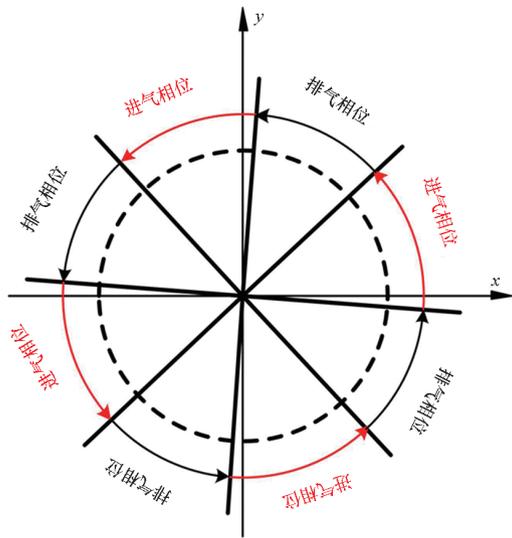


图 7 各转子气缸做功容积与其偏转角的关系曲线
Fig. 7 Relationship between work volume and rotation angle of rotors

由图 8 可以看出,转子 1 和转子 2 的进排气相位存在错位交叉,难以使用固定位置气口同时分别对其进行配气。因此,本文提出一种基于气道复用的配气方法,将转子 1 的进排气相位映射到转子 2 转角上后,在两转子同一进排气重叠相位内设置进排气口,复用转子 2 气道实现发动机配气过程。

如图 9 所示为映射后转子 1 和转子 2 气缸进排气与各转子偏转角关系图,由此可得映射后二冲程发动机转子 1 和转子 2 气缸进排气相位重叠图如图 10 所示。将中央配气轴的进排气口设计在相应的进排气重叠相位内,即可实现对二冲程发动机的配气过程。



(a) 转子 1
(a) Rotor 1

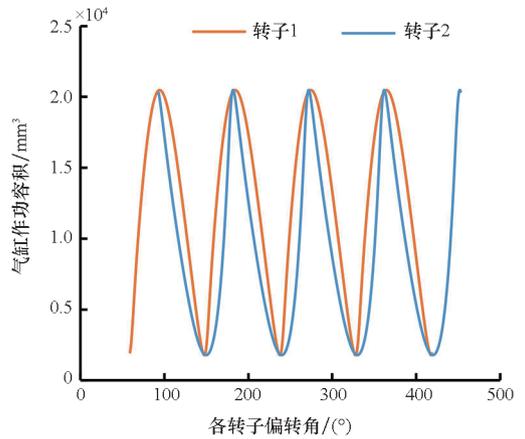
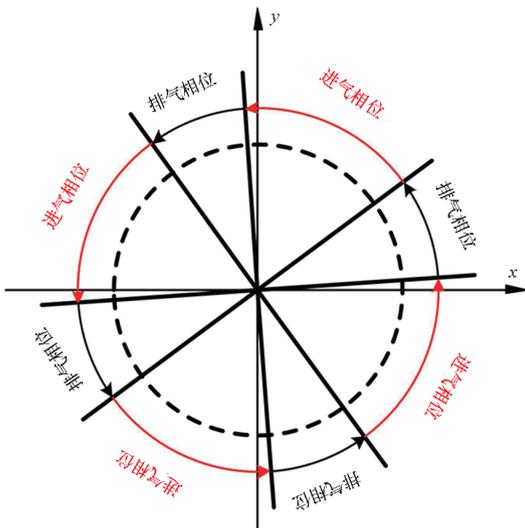


图 9 映射后转子气缸容积与偏转角关系
Fig. 9 Relationship between work volume and rotation angle of rotors after mapping



(b) 转子 2
(b) Rotor 2

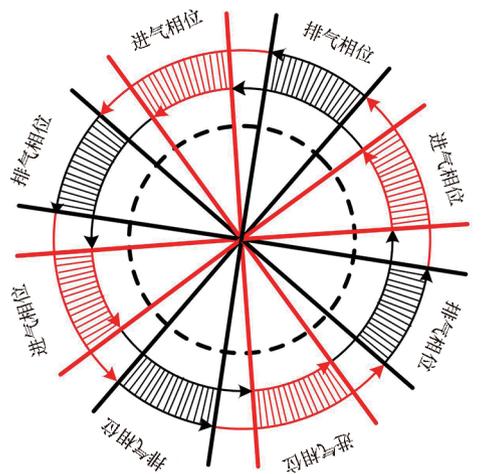


图 10 映射后转子 1 和转子 2 进排气口重叠相位图
Fig. 10 Overlapping phase diagram of inlet and outlet of rotor 1 and rotor 2 after mapping

图 8 各转子配气相位图

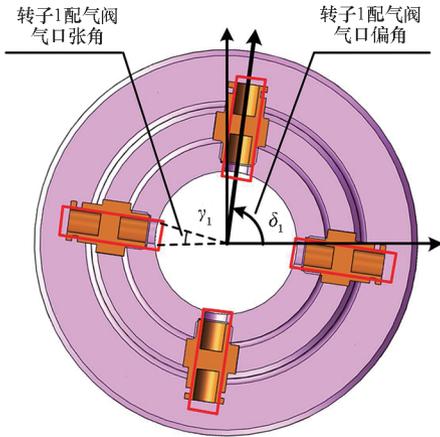
Fig. 8 Gas distribution phase of rotor cylinders

3 配气系统可行性实验

3.1 零部件设计与加工

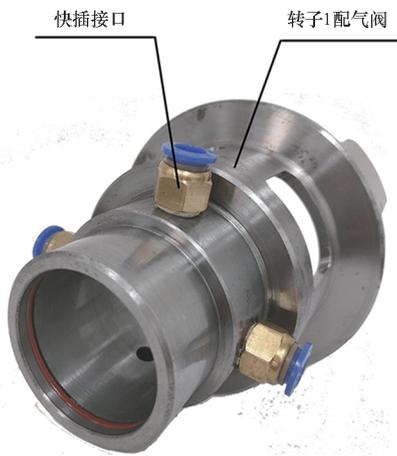
为使得转子 1、2 的进排气相位在固定空间坐

标系中尽可能重叠,需在与转子固连的配气阀上设计不同相位偏角的进排气口。如图 11、图 12 所示为转子 1、2 配气阀进排气口位置分布及实物图,每个配气阀周向均匀分布 4 个配气阀气口,采



(a) 模型

(a) Model

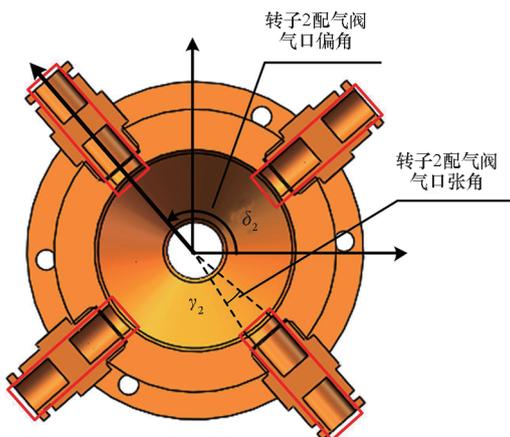


(b) 实物

(b) Object

图 11 转子 1 配气阀进排气口位置

Fig. 11 Distribution of inlet and exhaust ports of rotor 1



(a) 模型

(a) Model



(b) 实物

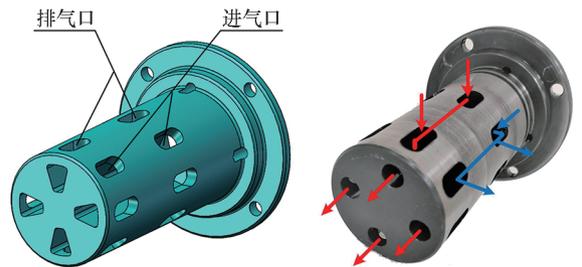
(b) Object

图 12 转子 2 配气阀进排气口位置

Fig. 12 Distribution of inlet and exhaust ports of rotor 2

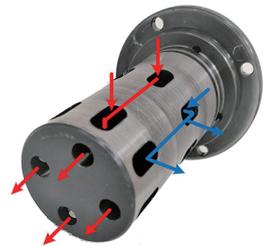
用气管快插接头分别与相应固连转子气缸的进排气口相连。由于每个配气阀气口间隔 90° , 因此只需分别设计转子 1、2 上的其中一个气口相位偏差即可确定所有气口位置。转子 1 配气阀气口位置偏角设计为 δ_1 , 气口大小张角设计为 γ_1 ; 转子 2 配气阀气口位置偏角设计为 δ_2 , 气口大小张角设计为 γ_2 。

为实现气道复用,同时减小进排气瞬间气波冲击,设计中央配气轴模型及实物加工如图 13 所示。中央配气轴巧妙地集成转子 1 和转子 2 进排气所需的所有气道和气口,其进排气流走向如图 14 所示。在轴向上转子 1 和转子 2 进排气口布置在同一母线上,在周向进气道和排气道交错布置。



(a) 模型

(a) Model



(b) 实物

(b) Object

图 13 中央配气轴

Fig. 13 Central valve shaft

图 15 所示为中央配气轴进排气口分布图。中央配气轴安装位置角设计为 δ_0 , 进气口位置角设计为 δ_3 , 排气口位置角设计为 δ_4 , 进气口张角设计为 γ_3 , 排气口张角设计为 γ_4 。

给定本文研究的串联直缸发动机中央配气轴

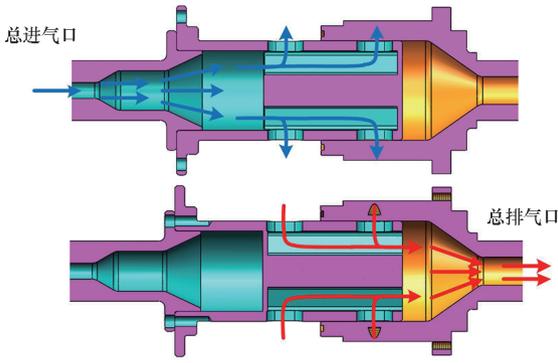
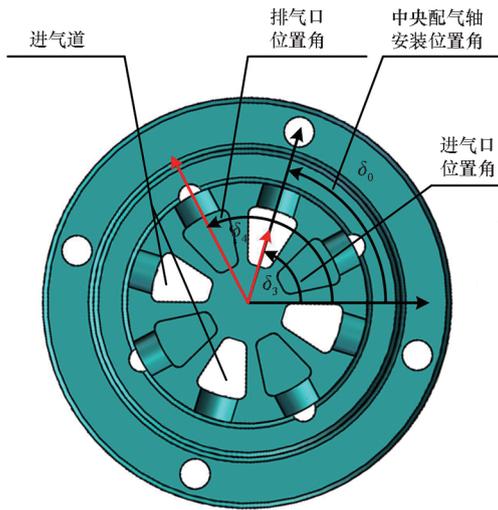
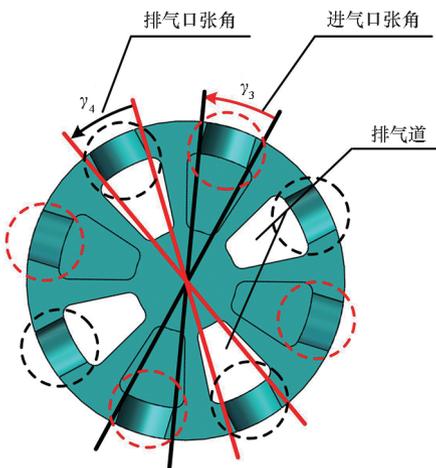


图 14 中央配气轴进排气流向

Fig. 14 Flow action of central valve shaft



(a) 前剖视图
(a) Front section



(b) 后剖视图
(b) Rear section

图 15 中央配气轴进排气口分布

Fig. 15 Distribution of inlet and exhaust ports of the central valve shaft

表 2 串联直缸发动机配气结构参数

Tab. 2 Parameters of gas distribution structure of ACSCE
单位: (°)

参数符号	数值	参数符号	数值
δ_0	76	γ_1	18.4
δ_1	83	γ_2	18.4
δ_2	130	γ_3	18.4
δ_3	76	γ_4	18.4
δ_4	121		

3.2 整机气动实验

如图 16 所示为转子 1、2 与配气阀装配实体。发动机运行时,中央配气轴保持初始安装位置不动,随着转子 1、2 的差速运动,转子 1、2 所固连的配气阀气口将依次扫略经过中央配气轴上的进排气口,从而实现无须传统配气机构的全自动换气过程。

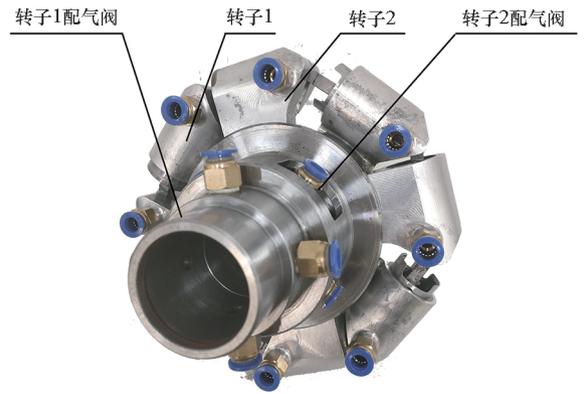


图 16 配气系统装配示意图

Fig. 16 Schematic of gas distribution system assembly

发动机整机气动实验台架如图 17 所示,其中转子 1 气口与转子 2 气口之间采用气管连接获得更好的气密性。

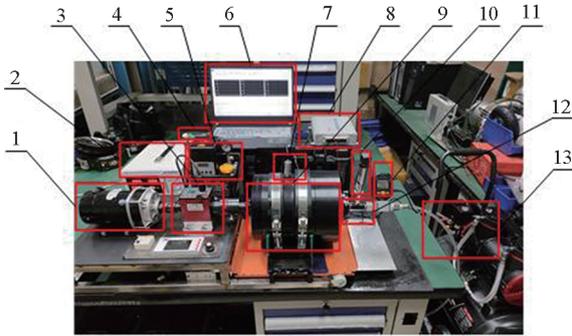
采用不同压强外加气压对发动机进行空载气动实验,得到相应气压驱动下发动机输出轴转速如表 3 所示。

空载条件下,给定高压气源 0.7 MPa,打开气源阀门,采集串联直缸发动机进气道气压数据和动力输出数据如图 18 和图 19 所示。

由图 18 ~ 19 可知,在进气道气压驱动下,串联直缸发动机在空载条件下可达到转速最大值约为 276 r/min;随着进气道气压下降,输出轴转速也呈下降趋势。当外加气压较小时,由于机构摩擦阻力作用,发动机工作状态不稳定甚至

和配气阀气口位置、大小及安装角位置参数如表 2 所示。

无法运转;当进气道气压稳定在 0.25 MPa 时,串联直缸发动机能够以约 200 r/min 的转速稳定运转。



1—启动电机;2—电源;3—动态扭矩/转速传感器;
4—通信模块;5—润滑系统;6—上位机;7—振动传感器;
8—数据采集模块;9—串联直缸发动机;10—气压计;
11—流量计;12—中央配气轴配气组件;13—高压气源

图 17 发动机整机气动实验台架

Fig. 17 Test bench for gas distribution of engine

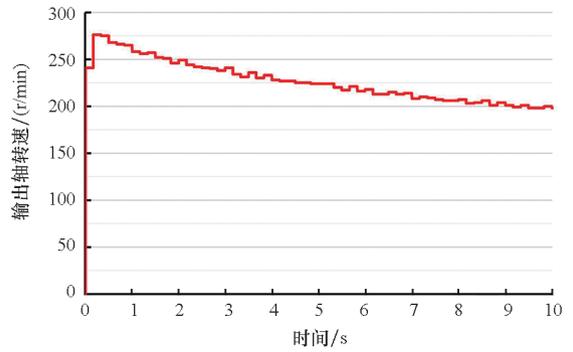


图 19 空载条件高压气源驱动下动力输出数据结果

Fig. 19 Output power data results under no-load condition of high pressure air drive test

表 3 不同气压驱动下发动机输出轴转速
Tab. 3 Output shaft speed under different air pressure

外加气压/MPa	输出轴转速/(r/min)
0.05	0(不稳定)
0.25	198(稳定)
0.5	242(稳定)
0.7(峰值)	276(峰值)

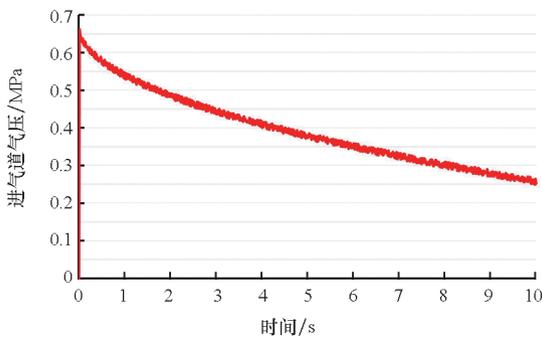


图 18 空载条件高压气源驱动下进气道气压数据结果

Fig. 18 Inlet air pressure data result under no-load condition of high pressure air drive test

试验结果充分说明了发动机气缸由小变大时,高压气体能够通过进气口由外界流向气缸;发动机气缸由大变小时,乏气能够通过排气口由气缸流向外界。由此验证了该配气系统设计的有效性,为下一步发动机点火配气试验奠定了坚实的基础。

4 结论

通过对环形串联直缸发动机结构及差速运动特性的研究,揭示了各转子气缸容积与转子转角之间的变化关系,采用气道复用思想创新设计了一种动态位置配气系统,并通过气动实验验证了该配气系统的有效性,解决了该型发动机采用传统静态配气方法一直以来无法实现的配气问题。该配气系统同样无须气门及配气机构,惯性作用力小,更加简洁高效,其设计所采用的基于气道复用的动态位置配气方法和思想可为其他新构型发动机配气系统的创新设计提供重要参考与启发。

参考文献 (References)

[1] 陈虎. 新型双转子活塞发动机关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2016.
CHEN H. Key point research on a novel twin-rotor piston engine [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016. (in Chinese)

[2] 袁兆成. 内燃机设计[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2019.
YUAN Z C. Internal combustion engine design[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2019. (in Chinese)

[3] 刘圣华,周龙保. 内燃机学[M]. 4版. 北京:机械工业出版社, 2017.
LIU S H, ZHOU L B. Internal combustion engine science[M]. 4th ed. Beijing: China Machine Press, 2017. (in Chinese)

[4] SABLE N S, BAWANE R K. I-VTEC: intelligent-variable valve timing & lift electronic control—a review [J]. International Journal for Scientific Research and Development, 2017, 5(1): 594–596.

[5] 徐亚旋,刘梁,胡茂杨,等. 电磁驱动配气机构发动机启动过程气门运行策略研究[J]. 汽车技术, 2020(12): 49–54.
XU Y X, LIU L, HU M Y, et al. Valve operation strategy of engine starting based on EMVT[J]. Automobile Technology, 2020(12): 49–54. (in Chinese)

- [6] 侯冬岩. 电液全可变配气系统试验测试与非线性控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
HOU D Y. Research on test and nonlinear control of electro-hydraulic fully variable valve system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [7] ZHANG Y, LIU J X, ZUO Z X, et al. Optimization of volumetric efficiency of a small wankel engine using genetic algorithm[J]. Thermal Science, 2020, 24(1): 101 - 111.
- [8] 张雷, 潘存云, 徐海军, 等. 旋转活塞式气动发动机气口设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2014, 48(12): 2181 - 2187.
ZHANG L, PAN C Y, XU H J, et al. Design of air ports for rotary piston air-powered engine [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2014, 48(12): 2181 - 2187. (in Chinese)
- [9] 崔华盛, 赵振峰, 王恩华, 等. 某航空活塞发动机进气系统优化设计[J]. 航空动力学报, 2019, 34(9): 2063 - 2070.
CUI H S, ZHAO Z F, WANG E H, et al. Intake system optimization study and design for an aircraft piston engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(9): 2063 - 2070. (in Chinese)
- [10] 张威扬. 差速式转子发动机功率传输机构动力特性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2011.
ZHANG W Y. Analysis of dynamic characteristics of the power transmission equipment of a differential rotor engine[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] 黄福军. 微小型自由活塞发动机理论与实验研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2020.
HUANG F J. Theoretical and experimental studies on a miniature free piston linear engine[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)
- [12] 李文东. 发动机曲轴系扭转振动分析与配置优化[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
LI W D. Torsional vibration analysis and configuration optimization of engine crankshaft system [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022. (in Chinese)
- [13] 严健, 杨贵恒, 邓志明, 等. 内燃机构造与维修[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
YAN J, YANG G H, DENG Z M, et al. Structure and maintenance of internal combustion engine [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019. (in Chinese)