

文章编号:1671-6833(2009)02-0112-04

## 内摆线单缸柴油机运动规律及配气特性的研究

薛运锋, 杜群贵, 朱俊鹏

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

**摘要:**介绍了在S195柴油机基础上开发的新型内摆线单缸柴油机S195HC的机构原理和特点,分析了S195HC新型柴油机的活塞运动规律及其所带来的影响,研究了S195HC新型柴油机的配气特性。结果表明:与传统曲柄连杆机构相比,S195HC柴油机的活塞在上止点附近停留的时间比较长,活塞更接近上止点,有利于燃料的充分燃烧,改善内燃机的经济性;S195HC柴油机不存在二阶及更高阶往复惯性力,改善了内燃机的机械振动和噪声;S195HC柴油机的活塞运动特性有利于新鲜充量的进入,改善了燃烧过程。

**关键词:**内摆线;行星齿轮;运动规律;配气特性

**中图分类号:**TK 423

**文献标识码:**A

### 0 引言

平面四连杆机构<sup>[1]</sup>以其形式多样,运动可靠、设计灵活并可实现多种多样的运动轨迹和函数,在现代各类机械中起着非常重要的作用,如活塞式发动机和空气压缩机中的曲柄滑块机构、工业中各种用途柱塞泵中的曲柄滑块机构、抽油机中的曲柄摇杆机构、椭圆仪上的双滑块机构等。这类机械均使用一套传统的运动转换机构——曲柄滑块机构来实现旋转运动和直线运动之间的转换。但曲柄滑块机构由于活塞的侧压力而带来许多难以克服的问题,为此,长期以来各国学者都做了大量的研究。湖南大学杨连生教授<sup>[2-3]</sup>等提出了双连杆机构来消除活塞侧向力,但双连杆机构毕竟多了一套连杆机构,从而使内燃机结构变得复杂;天津大学的林建生教授<sup>[4]</sup>提出了一种多杆内燃机,该机构在曲柄滑块机构的基础上增加了一根摆杆来有效控制连杆的摆动范围,从而降低活塞侧压力的产生,但活塞侧压力并未彻底消除。国外Rosenkranz H. G等<sup>[5-6]</sup>课题组研究人员,研制了多缸对置发动机SYTech,其原理采用了正弦机构的十字滑块式机构,基本上消除了活塞侧压力。Selcuk Erkaya<sup>[7]</sup>提出了一种带有偏心机构和行星轮的曲柄滑块机构,但这种机构也未能够彻

底消除活塞侧压力。综上所述,各种新型机构尽管距离实际使用还有一段距离,但在机构设计方面无疑是一种重大突破,为内燃机的设计和发展提供了良好的思路。

笔者所在课题组利用内摆线原理设计了一种内摆线内燃机<sup>[8-9]</sup>,并对内摆线内燃机的动力学特性做了理论上的研究,这种内摆线内燃机理论上可以完全消除活塞侧向力,提高内燃机的输出功率。笔者正是在上述研究的基础上,重点研究了内摆线单缸柴油机的运动规律及配气特性。

### 1 内摆线内燃机 S195HC 结构特点

#### 1.1 内摆线特性

当一个半径为 $r$ 的滚圆在一个半径为 $R$ 的导圆内做纯滚动的时候,小圆上任意点的轨迹为内摆线,其内摆线方程为

$$\begin{cases} x = (R-r)\sin\alpha - r\sin[(R-r)\alpha/r] \\ y = (R-r)\cos\alpha + r\cos[(R-r)\alpha/r] \end{cases} \quad (1)$$

当 $R=2r$ 时,式(1)变为

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = R\cos\alpha \end{cases} \quad (2)$$

可以看出,当 $R=2r$ 时,滚圆上任意一点的轨迹是通过导圆中心的直线,即内摆线为直线,其运动为简谐运动。利用此特性,巧妙地设计出一种新

收稿日期:2008-10-20;修订日期:2008-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50475096);广东省自然科学基金委重点项目资助(05103545)

作者简介:薛运锋(1982-),男,山西运城人,华南理工大学博士研究生,主要研究方向为CAD/CAE及现代机电工程设计方法。

型内摆线内燃机能量转换机构,将活塞的直线运动转换为曲轴的旋转运动,输出功率。

### 1.2 机构原理

渐开线齿轮啮合传动时,其节圆作纯滚动。当一对渐开线齿轮组成内啮合副时,外齿轮分度圆上一点的运动轨迹为内摆线。因此根据上节所述的内摆线性质,设计出内摆线能量转换机构,其结构示意图如下图1所示。

图1中,(a)是正面图,(b)是侧面图,节圆半径为 $r$ 的小齿轮 $O_1$ 与节圆半径为 $R$ 的大齿轮 $O$ 构成内啮合齿轮副,由于 $R/r=2$ ,当小齿轮 $O_1$ 做行星转动时,如图1(a)所示,节圆上的点 $B$ ,做沿着 $AB$ 方向通过大齿轮中心的纯粹直线运动。如图1(b)所示,如果将活塞上的一点与小齿轮 $O_1$ 节圆上的点 $B$ 做成转动副,活塞必然也做纯粹的直线运动。图1所示的机构中,当爆炸气体推动活塞 $A$ 做纯粹的直线运动,必然使得小齿轮 $O_1$ 做行星转动,动力最终通过行星架(曲轴)输出。

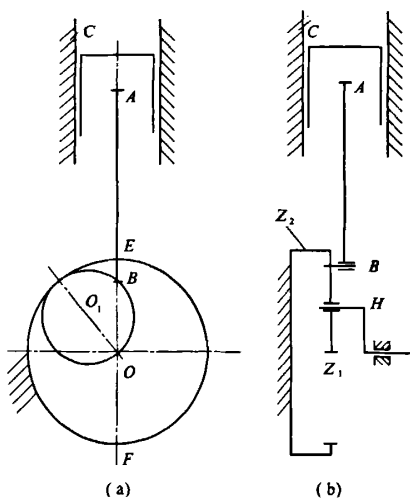


图1 内摆线机构原理示意图

Fig. 1 Hypocycloid mechanism principle

### 1.3 机构特点

(1)无侧压、虚连杆。活塞与连杆做纯粹直线平动。理论上,活塞对气缸无侧压,消除了传统曲柄连杆机构中,连杆对活塞不可避免地产生一侧向力,并导致活塞组在气缸内做横向平动和旋转摆动,其中该侧向力最终通过活塞作用于气缸壁;活塞与连杆可做成一体,避免了传统曲柄连杆机构中,因连杆高速摆动存在的问题。传统曲柄连杆机构的连杆小头作往复运动,大头作旋转运动,有分布质量的连杆便产生角加速度、惯性力矩而摆

动,这个惯性摆动力虽然不是很大,但是作为发动机的横向激振源是足以引起较大振动的了。另外,连杆机构在工作过程中高速变速地摆动,其受力情况非常恶劣,与之相连接的活塞销、曲柄轴承部分受力状况也非常差,严重威胁着这些零部件的寿命。

(2)低摩擦、磨损。由于活塞对气缸无侧压(不考虑活塞环的张紧力),与传统能产生侧压力的曲柄连杆机构相比,活塞与气缸的摩擦和磨损可以大大降低,提高了内燃机的使用寿命,也提高了内燃机的经济性、动力性。

(3)活塞对气缸无机械冲击,降低了机械噪音。活塞在气缸内做纯粹的往复平动,无传统曲柄连杆机构中,因活塞在气缸内高速摆动造成活塞对气缸的“拍击”。

## 2 活塞运动规律

图2所示为新型内摆线机构运动简图。气缸中心线 $A_1B_2$ 通过曲轴中心 $O$ , $A$ 为活塞销中心, $O$ 为大齿轮中心, $O_1$ 为小齿轮中心, $AB$ 为连杆, $OO_1$ 为曲柄, $\alpha$ 为曲柄转角(曲柄与气缸中心线间的夹角,顺曲轴旋转方向为正), $OO_1=r$ 为曲柄半径,大齿轮半径与小齿轮半径之比 $R/r=2$ 。运动时,连杆 $AB$ 做往复直线运动, $A_1$ 为上止点位置, $A_2$ 为下止点位置,活塞行程 $S=A_1A_2$ 。小齿轮以等角速度 $-\omega$ 绕中心 $O_1$ 自转,同时以等角速度 $\omega$ 绕大齿轮中心 $O$ 公转;曲柄 $OO_1$ 以等角速度 $\omega$ 旋转。在小齿轮公转一周内,对应活塞在上止点 $A_1$ 的位置时, $\alpha=0^\circ$ ;活塞在下止点 $A_2$ 的位置时, $\alpha=180^\circ$ 。

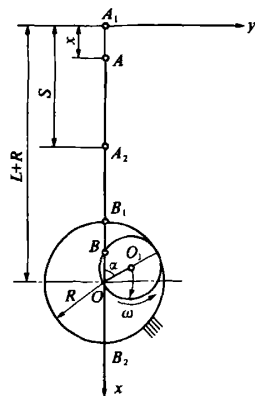


图2 内摆线机构运动简图

Fig. 2 Kinematics diagram of hypocycloid mechanism

活塞位移从上止点算起,如上图2所示,从而

可以得到活塞位移  $x$ :

$$x_{S195HC} = R(1 - \cos\alpha) \tag{3}$$

$$x_{S195} = R[(1 - \cos\alpha) + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos2\alpha)] \tag{4}$$

活塞速度  $v$ :

$$v_{S195HC} = R\omega\sin\alpha \tag{5}$$

$$v_{S195} = R\omega(\sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin2\alpha) \tag{6}$$

活塞加速度  $a$ :

$$a_{S195HC} = R\omega^2\cos\alpha \tag{7}$$

$$a_{S195} = R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos2\alpha) \tag{8}$$

上式(3)~(8)中,新型内摆线行星齿轮机构的活塞位移、速度、加速度只有第一项,说明活塞作完全的简谐运动,同时新型内摆线行星齿轮机构还具有以下特性:

(1)同样的曲轴转角下(除上下止点位置),如图3所示,横轴代表上止点,活塞的最大位移为下止点.内摆线柴油机的活塞位移比传统内燃机小,活塞位置更加靠近上止点.虽然是微小的差别,但是在短短的气体激烈燃烧期内,一点点的差别也会带来巨大的影响,从而使得燃烧膨胀行程中,缸内气体压力高于传统曲柄连杆机构,整个做功行程可以充分使用燃烧的能量.

(2)内摆线内燃机的活塞加速度只有第一项,因此没有二阶及更高阶的往复惯性力,惯性力更小,降低了机械振动和噪音,如图4所示.

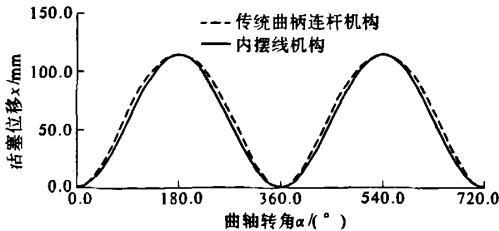


图3 两种机构的活塞位移比较  
Fig.3 Comparison in piston displacement between new engine and conventional one

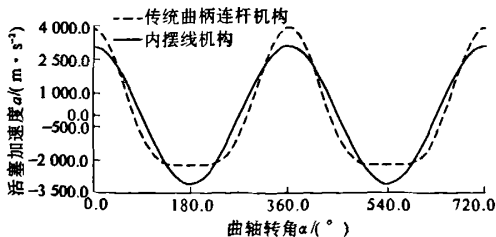


图4 两种机构活塞加速度比较  
Fig.4 Comparison in piston acceleration between new engine and conventional one

### 3 配气正时

配气机构是内燃机的重要部件之一,其功能是实现换气过程.内燃机的换气过程指从排气门开启到进气门关闭的整个阶段,其任务是排除上一循环的废气,并吸入下一个工作循环燃烧所需的新鲜混合气.换气过程既是发动机工作过程不可缺少的组成部分,也是决定发动机动力、经济性能极为重要的环节.

S195柴油机的标定转速为2200 r/min,进气提前角为上止点前17°,进气迟闭角为下止点后43°,排气提前角为下止点前43°,排气迟闭角为上止点后17°.表1为通过数值仿真得到的标定转速2200 r/min, S195HC柴油机和S195柴油机同样的进配气提前角下,二者的活塞位移、速度、加速度的对比情况.

由表1可以发现,进气门关闭和排气门打开时刻, S195HC柴油机比S195柴油机更靠近上止点,使得压缩压力提高,从而在压缩冲程末尾具有较高的气缸压力,根据柴油机求取滞燃期的谢特凯经验公式<sup>[10]</sup>,在其它参数相同的情况下,提高缸内压力,可以缩短着火延迟期(滞燃期),从而有利于改善燃烧过程;而在进气门开启和排气门关闭时刻, S195HC柴油机的活塞速度和加速度均比S195小,减少了气物流经气门时的流动阻力,有利于新鲜冲量的进入和残余废气的排出<sup>[11]</sup>.

表1 配气正时和活塞运动的关系  
Tab.1 Relationship between valve timing and piston displacement, velocity and acceleration

| 曲轴转速<br>2200/<br>(r·min <sup>-1</sup> ) | 活塞位移<br>x/mm |        | 活塞速度<br>v/(m·s <sup>-1</sup> ) |        | 活塞加速度<br>a/(m·s <sup>-2</sup> ) |          |
|---|--------------|--------|--------------------------------|--------|---------------------------------|----------|
|   | S195         | S195HC | S195                           | S195HC | S195                            | S195HC   |
| 进气门开                                    | 2.52         | 2.51   | -4.89                          | -3.87  | 3 611.3                         | 2 918.6  |
| 进气门关                                    | 99.62        | 99.55  | -7.23                          | -9.03  | -2 173.7                        | -2 232.0 |
| 排气门开                                    | 99.62        | 99.55  | 7.23                           | 9.03   | -2 173.7                        | -2 232.0 |
| 排气门关                                    | 2.52         | 2.51   | 4.89                           | 3.87   | 3 611.3                         | 2 918.6  |

### 4 结论

(1)内摆线单缸柴油机 S195HC 的活塞做简谐运动,具有运动学上固有的优点.在同样的进配气提前角下,更接近上止点位置,提高了缸内气体压力,缩短了着火延迟期(滞燃期),有利于燃料的充分燃烧,提高燃料利用率.

(2)内摆线单缸柴油机 S195HC 活塞和连杆

做纯粹的直线运动,使得内燃机的侧压力大大降低,几乎可以忽略不计,从而降低由于活塞与气缸的摩擦而带来的能量损失。同时,由于没有二阶和更高阶的惯性力,减小了机构的振动和噪音。

#### 参考文献:

- [1] 熊滨生,张明成,李秀明. 四位置刚体导引曲柄滑块机构的设计[J]. 郑州大学学报:工学版,2004,25(2):84-86.
- [2] 杨连生. 双连杆无侧压力内燃机的研究[J]. 湖南大学学报,1989,26(1):1-6.
- [3] 黄星梅,龚志辉,谭理刚. 双连杆双曲轴内燃机运动仿真分析[J]. 湖南大学学报,2004,31(4):24-27.
- [4] 林建生,张宝欢,付伟成,等. 一种新型多杆内燃机的机构运动学与动力学的虚拟仿真研究[J]. 内燃机学报,2006,24(6):565-568.
- [5] ROSENKRANZ H G, WATSON H C. The scotch yoke for internal combustion engines-An opportunity revived by new technology[J]. Journal of the JSAE,1996,50(5):102-108.
- [6] HANS G, ROSENKRANZ, Simple harmonic piston motion of CMCR's SYTech engines influence on design and operation[C]//Presented at the 10th International Pacific Conference on Automotive Technology, Melbourne, 1999.
- [7] SELCUK E, SUKRU S, IBRAHIM U. Dynamic analysis of a slider-crank mechanism with eccentric connector and planetary gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007,42: 393-408.
- [8] 何观龙,杜群贵. 一种高效内燃机活塞零侧压技术及装置:中国,ZL200410060759[P],2005-03-23.
- [9] 杜群贵,赵方龙,薛运锋,等. 内摆线内燃机动态仿真[J]. 机械设计与制造,2008,(4):86-88.
- [10] 罗响亮,任自中. 柴油机滞燃期的确定方法及试验验证[J]. 柴油机,2006,28(1):16-18.
- [11] 王宇,黄静安,任成君. 大偏心双曲柄单缸柴油机运动规律及工作过程的研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2001,30(6):12-14.

## Study on Valve Characteristic and Motional Law of the New Type Hypocycloid Single Cylinder Diesel Engine

XUE Yun-feng, DU Qun-gui, ZHU Jun-peng

(School of Mechanical and Auto Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Based on S195 diesel engine, utilizing the hypocycloid principle, the new type hypocycloid single cylinder diesel engine, S195HC, was developed and its mechanism principle and characteristics are introduced. The motional law of piston and its influences in the new type S195HC diesel engine was analyzed. The valve characteristic of the new type S195HC diesel engine was studied. The results show that compared with traditional mechanism of crank and connection rod, the piston of S195HC diesel engine has longer residence time near top dead center, and it is more near to top dead center. So the fuel combustion can be done fully and the economy of internal combustion engine is improved. And mechanical vibration and noise of internal combustion engine is improved because there is no second-order and high-order reciprocating inertial force in the S195HC diesel engine. It betters the entry of fresh charge and improvement of the combustion process.

**Key words:** hypocycloid; planet gear; motional law; valve characteristic