

# 12V190 燃气内燃机曲轴平衡块极限轮廓设计

王太涛

胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东 东营 257092

**摘要:**为解决 12V190 燃气内燃机增大行程时曲轴平衡块需增大质径积造成的平衡块形状设计困难问题,通过推导活塞相对平衡块的位移公式,绘制活塞裙底部运动包络线,确定平衡块的极限轮廓。使用三维软件进行运动模拟,验证平衡块极限轮廓的正确性。结果表明,活塞裙底和平衡块不干涉且紧密贴合。根据 12V190 燃气内燃机的结构和平衡块的加工工艺,将平衡块的极限外轮廓由椭圆修正为圆弧,并在活塞底部设计避让弧,使平衡块的重心外移,获得较大的质径积。

**关键词:**燃气内燃机;平衡块;形状设计

**中图分类号:**TK433.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2024)03-0026-06

**引用格式:**王太涛. 12V190 燃气内燃机曲轴平衡块极限轮廓设计[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(3): 26-31.

WANG Taitao. Design of the limit profile of crankshaft balancer for 12V190 gas engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024, 41(3): 26-31.

## 0 引言

在缸径不变的情况下增大行程可增大排量,从而提高内燃机的功率。增大行程时曲柄加长,旋转惯性力增大,需要增大曲轴平衡块的质径积。增大行程导致在下止点时活塞下移,平衡块的布置空间被压缩,增大了平衡块的布置难度。12V190 燃气内燃机广泛应用于天然气、煤矿瓦斯、沼气、焦炉煤气、油母页岩气、发生炉煤气等领域<sup>[1]</sup>。在 12V190 燃气内燃机平衡块的设计过程中,通常将平衡块的外圆弧中心与曲轴中心线重合,更加剧了增大行程时平衡块布置的难度。虽然可通过增大厚度来增加平衡块的质量,但 12V190 燃气内燃机设计紧凑,受连杆杆身间隙的限制,用于增大厚度的空间较小。

目前关于曲轴平衡块设计的研究较少,且大多集中在平衡计算方面,很少涉及平衡块形状设计。文献[2]对中大柴油机增大行程后的曲轴进行了设计,但并未提及平衡块的设计方法;文献[3]建立了液压约束活塞发动机曲轴平衡块形状优化平台,在平衡块的质量矩为定值的前提下,得到体积最小、形状合理的平衡块造型,但其外轮廓仍然是以曲轴中心为圆心的圆弧;文献[4]利用虚拟样机和设计研究技术,讨论曲轴优化设计目标选取问题,经过比较各种目标的优化结果,建议将工作周期内曲轴主轴承平均载荷作为平衡块动态优化设计的优化目标;文献[5]基于轴承润滑理论,针对某直列 4 缸发动机曲轴不同平衡块配置方案,研究了不同平衡率对曲轴的载荷、润滑、扭振、强度等性能的影响;文献[6]研究了 3 缸内燃机不同的平衡块布置方案对一阶往复惯性力矩转移率和旋转惯性力矩转移率的影响,结果表明布置偏心平衡块的曲轴平衡旋转惯性合力矩的效率高于布置不偏心平衡块的曲轴;文献[7]分析 CA6110ZLA9 型 6 缸柴油机采用 4 个平衡块产生的动平衡困难、振动大等问题的原因,进行 8 平衡块改进,解决了该型柴油机动平衡困难问题;文献[8]应用曲轴平衡理论及经验公式对 4 缸自然吸气发动机改为 3 缸增压发动机时曲轴平衡块的布置方式进行设计,并对曲轴的综合扭振进行评估,结果表明 3 缸发动机采用 4 平衡

收稿日期:2024-03-27

基金项目:2023 年山东省第二批技术创新项目(202360500011)

作者简介:王太涛(1980—),男,山东济阳人,工程硕士,工程师,主要研究方向为燃气内燃机开发设计,E-mail:13706478410@126.com。

块技术可以满足小型化增压发动机动平衡和扭振要求。上述文献都未涉及平衡块极限轮廓设计。

产品设计时可使用仿真软件建立曲轴、连杆、活塞和平衡块的三维模型,进行运动模拟,检查平衡块轮廓与活塞裙底的干涉情况。这一过程需要多次检查、重复建模,工作量大。本文中根据活塞相对平衡块的位移公式推导 12V190 燃气内燃机曲轴平衡块外轮廓的极限边界,并基于加工工艺要求修正平衡块的极限外轮廓,可为实际的平衡块设计提供参考,并且可以减少仿真工作量,提高内燃机开发效率。

## 1 平衡块与活塞的距离

12V190 燃气内燃机曲轴平衡块外轮廓通常设计成与曲轴中心重合的圆弧。平衡块旋转至活塞下方过程中,平衡块轮廓与活塞裙底部的距离  $S$  与曲柄转角的关系如图 1 所示。运行中,平衡块轮廓与活塞裙底的距离先减小,平衡块中心与活塞中心对齐时距离达到最小,然后逐渐增大。平衡块可以在远离中轴线的位置增加质量,如图 2 所示。

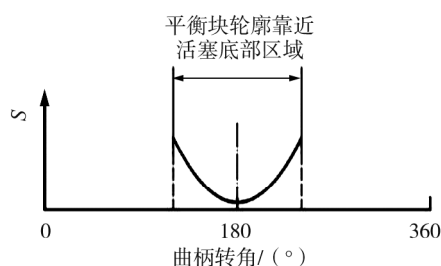


图1 平衡块轮廓与活塞裙底部的距离随曲柄转角的变化

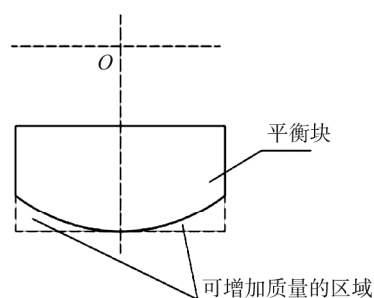


图2 平衡块增加质量的区域

## 2 活塞相对平衡块的位移

活塞的直线位移如图 3 所示。活塞直线位移<sup>[9]</sup>

$$x = (r + l) - [r \cos \alpha + l(1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}}] \quad (1)$$

式中:  $r$  为曲柄半径;  $l$  为连杆大、小头轴线距离;  $\lambda$  为连杆比,  $\lambda = r/l$ ;  $\alpha$  为曲柄转角。

将原点移至曲轴中心, 活塞位移

$$x_0 = r \cos \alpha + l(1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

根据运动的相对性, 将曲轴固定, 活塞的运动变为往复运动和旋转运动的组合。以曲轴中心为原点, 活塞销轴线相对曲柄运动的极坐标位移

$$\rho = r \cos \alpha_1 + l(1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha_1)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中  $\alpha_1$  为活塞相对曲柄的转角。

根据式(3)绘制以曲轴中心为原点的活塞销轴线相对曲柄运动的极坐标位移曲线如图 4 所示, 图中  $O$  点为曲轴中心。由图 4 可知: 活塞销轴线相对曲轴曲柄位移的极坐标图形为偏心圆, 直径为  $2l$ , 中心偏移量为  $r$ 。12V190 燃气内燃机曲轴平衡块布置如图 5 所示。

平衡块位于曲柄的对面, 与曲柄间隔  $180^\circ$ , 所以活塞相对平衡块的转角  $\alpha_2$  与活塞相对曲柄转角  $\alpha_1$  的关系为:  $\alpha_1 = \alpha_2 - 180^\circ$ , 代入式(3)得到以曲轴中心为原点的活塞销轴线相对平衡块的极坐标位移

$$\rho_1 = r \cos(\alpha_2 - 180^\circ) + l[1 - \lambda^2 \sin^2(\alpha_2 - 180^\circ)]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

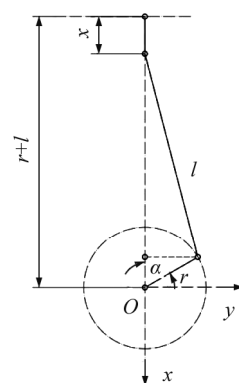


图3 活塞的直线位移

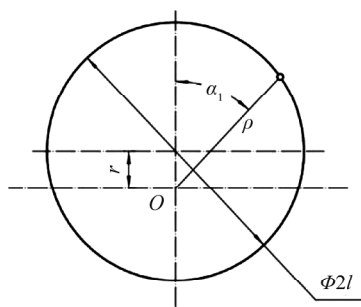


图4 活塞销轴线相对曲柄运动的极坐标位移

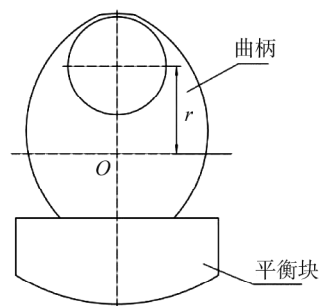


图5 平衡块位置

根据式(4)绘制以曲轴中心为原点的活塞销轴线相对平衡块的极坐标位移曲线如图6所示。12V190 燃气内燃机活塞结构如图7所示,图中  $b$  为活塞裙底部到活塞销轴线的高度,  $R_f$  为避让弧半径,  $c$  为避让弧最高点到活塞裙底部的高度。

平衡块外轮廓形状设计应避免与活塞裙底部干涉,活塞裙底相对平衡块的位移

$$\rho_2 = r \cos(\alpha_2 - 180^\circ) + l[1 - \lambda^2 \sin^2(\alpha_2 - 180^\circ)]^{\frac{1}{2}} - b. \quad (5)$$

根据式(5)绘制活塞裙底中心相对平衡块的位移曲线如图8所示,图中  $\delta$  为长轴与短轴的差。由图8可知:活塞裙底相对平衡块的位移曲线接近于与活塞销轴线位移曲线(图6)同心的椭圆,其短半轴长度为  $l-b$ ,长半轴长度略大于  $l-b$ 。令活塞轴线与平衡块对称轴重合时为  $0^\circ$ ,顺时针旋转,则活塞裙底相对平衡块的位移椭圆的短半轴与  $0^\circ$  方向重合,长半轴与  $90^\circ$  方向平行。

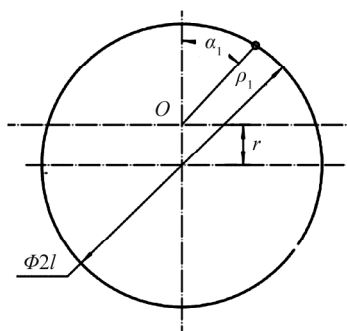


图6 活塞销相对平衡块的极坐标位移

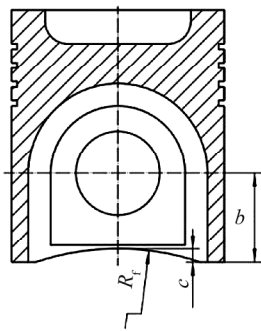


图7 12V190 燃气内燃机活塞结构

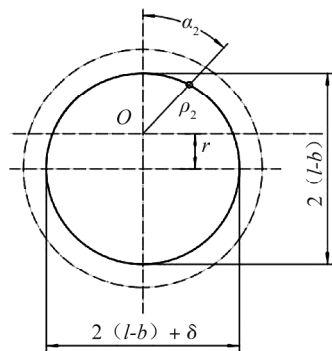


图8 活塞裙底中心相对平衡块的极坐标位移

### 3 平衡块的极限外轮廓

活塞裙底是一个面而不是一个点,在活塞相对平衡块转角  $\alpha_2 > 0$  时,活塞裙底的一部分位于活塞裙底位移曲线内侧,以活塞裙底中心位移曲线为轮廓设计出的平衡块与活塞裙底相互干涉。活塞裙底干涉示意图如图9所示。绘制活塞裙底的包络线如图10所示。活塞裙底的包络线近似于与活塞裙底位移曲线中心重合,以  $l-b$  为长半径,以  $\rho_d$  为短半径的椭圆,其中短半径

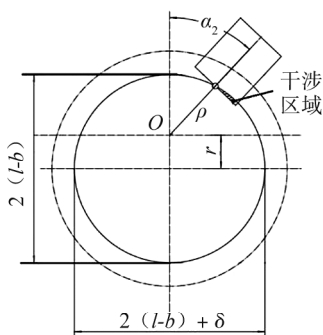


图9 活塞裙底干涉示意图

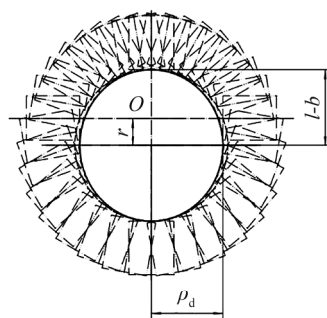


图10 活塞裙底包络线

$$\rho_d = l(1 - \lambda^2)^{\frac{1}{2}} - b_0 \quad (6)$$

#### 4 实例计算及三维模拟

12V190 燃气内燃机活塞直径为 190 mm,行程为 220 mm,曲柄半径  $r$  为 110 mm,连杆长度  $l$  为 405 mm,活塞裙底部到活塞销轴线的距离  $b$  为 70 mm。

由式(6)可得  $\rho_d = 319.78$  mm。

建立曲轴、平衡块、连杆、活塞装配三维模型如图 11 所示。设置曲轴、平衡块、连杆、活塞的配合、运动关系:机体(白色部分)设置为固定;曲轴(灰色部分)主轴颈与机体主轴承座孔同心设置为相对转动;平衡块(红色部分)与曲轴固定在一起随曲轴一起作旋转运动;连杆(蓝色部分)的大头孔与曲轴的曲柄销同心并相对转动,连杆小头孔与活塞的活塞销孔同心并相对转动;活塞(绿色部分)与机体的缸套孔同心,沿轴线方向相对运动。

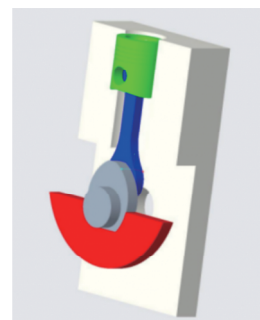


图 11 曲轴、平衡块、连杆、活塞装配三维模型

使用虚拟电机带动曲轴旋转,进行曲轴、平衡块、连杆和活塞的运动分析,在曲柄转角为  $80^\circ \sim 280^\circ$  内每间隔  $10^\circ$  记录一次,结果如图 12 所示。

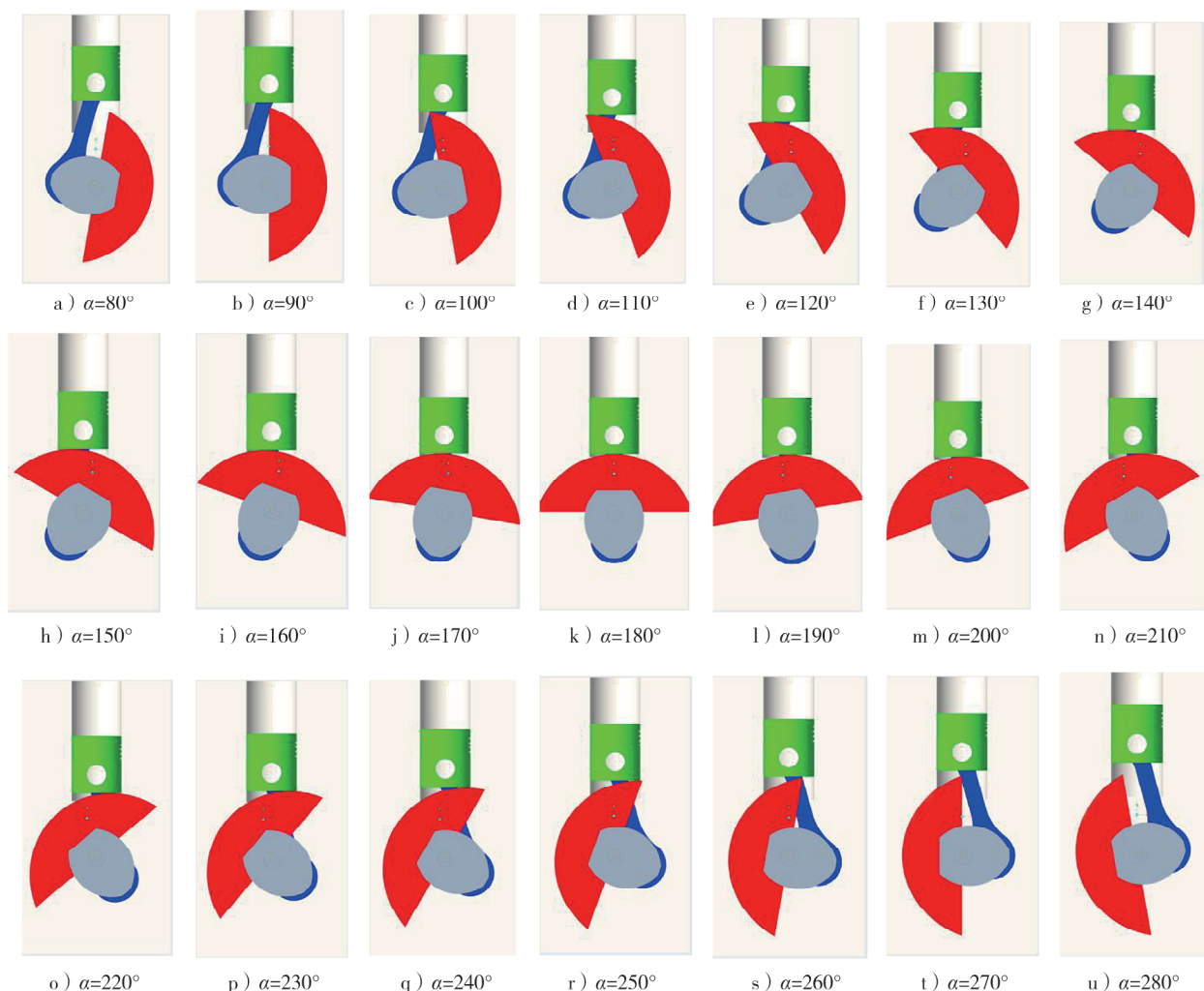


图 12 曲柄转角为  $80^\circ \sim 280^\circ$  时曲轴、平衡块、连杆和活塞的运动截图

由图 12 可知:计算的平衡块轮廓与活塞不干涉,且在曲柄转角为  $110^{\circ} \sim 250^{\circ}$  时,平衡块刚好与活塞裙底接触,是平衡块的极限轮廓。

## 5 基于加工工艺的平衡块极限轮廓设计

根据文献[10],曲轴平衡块外轮廓设计成圆弧形易于保证曲轴的动平衡精度。12V190 燃气内燃机曲轴平衡块的外轮廓采用车床加工,不宜采用椭圆轮廓,应加工成圆弧形轮廓。12V190 燃气内燃机曲轴平衡块外轮廓半径示意图如图 13 所示。由图 13 可知:平衡块圆弧形轮廓半径  $R_{\max}$  应满足  $l-b-r \leq R_{\max} < l-b$ ,由平衡块外轮廓圆弧对曲轴中心的包角  $\theta$  确定,并且圆弧应与椭圆在交点  $P$  处相切。根据椭圆方程可以求出椭圆在  $P$  点的斜率和切线,作切线的垂线并与竖直中心线相交可得  $R_{\max}$ ,平衡块的极限圆弧线位于椭圆内侧。设极限圆弧的中心到曲轴中心线的距离为  $e$ ,每一个圆弧线的  $R_{\max}$  都对应一个唯一的  $e$ 。

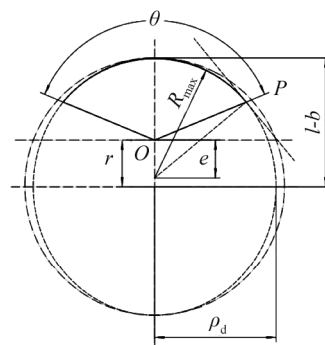


图 13 曲轴平衡块外轮廓半径

若要增大平衡块的极限轮廓,需要在活塞裙底设置避让弧。避让弧越大,平衡块的极限轮廓扩展范围越大。

将活塞参数代入式(4),利用 CAXA 软件进行计算,分别绘制无避让弧和有避让弧时活塞底位移曲线和平衡块半径,如图 14 所示。由图 14 可知:活塞无避让弧,当  $\theta = 180^{\circ}$  时,  $R_{\max} = 318.24 \text{ mm}$ ;活塞有避让弧,  $R_f = 255 \text{ mm}$ ,  $c = 15 \text{ mm}$ ,当  $\theta = 180^{\circ}$  时,  $R_{\max} = 255 \text{ mm}$ 。

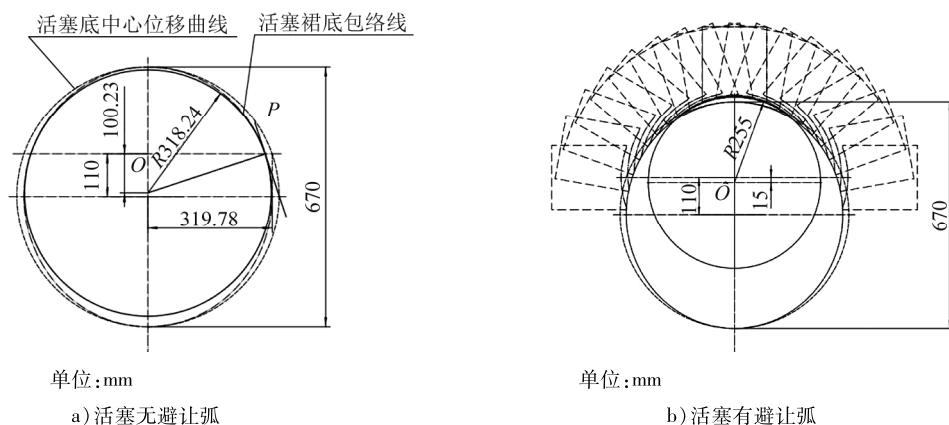


图 14 无避让弧和有避让弧时活塞底位移及平衡块半径

平衡块的质量与平衡块重心的旋转半径(平衡块重心到曲轴中心的距离)的积为平衡块的质径积。测量平衡块面积和旋转半径,结果如表 1 所示。由表 1 可知:活塞无避让弧和有避让弧时,平衡块面积与旋转半径的乘积分别为  $8\,712\,149.90$ 、 $9\,579\,947.71 \text{ mm}^3$ ;在平衡块密度和厚度不变的情况下,活塞有避让弧,尽管平衡块质量较小,但由于旋转半径大,平衡块的重心外移,平衡块使用较小的质量获得较大的质径积。

表 1 平衡块面积、旋转半径

| 活塞类型   | 平衡块面积/ $\text{mm}^2$ | 旋转半径/ $\text{mm}$ |
|--------|----------------------|-------------------|
| 活塞无避让弧 | 96 362.68            | 90.41             |
| 活塞有避让弧 | 94 495.44            | 101.38            |

## 6 结论

本文通过公式推导、公式曲线绘制和三维软件模拟验证对 12V190 燃气内燃机曲轴平衡块的极限外

轮廓进行设计,得出如下结论。

1) 活塞销轴线相对曲轴平衡块的位移曲线为圆形,半径为连杆大、小头轴线距离,圆形中心沿  $0^\circ$  方向偏离曲轴中心,偏离距离为曲柄半径。

2) 活塞底部相对曲轴平衡块的运动包络线近似椭圆,长半轴长度为连杆大小头轴线距离与活塞裙底部到活塞销轴线距离的差,与  $90^\circ$  方向重合,短半轴长度为活塞相对平衡块旋转  $90^\circ$  时活塞裙底部到曲轴中心的距离,与  $0^\circ$  方向平行。

3) 在活塞底部设置避让弧时,本文中对避让弧对极限轮廓影响的研究尚不够深入。极限外轮廓研究有助于在空间受限的情况下对平衡块的形状进行优化,使质径积达到要求。

#### 参考文献:

- [1] 牟善祥. 气体燃料及燃气机的技术研究与应用[J]. 柴油机,2009,31(4):45-52.
- [2] 张振胜. 长冲程 12V190 柴油机的研究开发[D]. 济南:山东大学,2007.
- [3] 尹凯. 液压约束活塞发动机曲轴参数化设计及平衡块形状优化[D]. 青岛:青岛大学,2013.
- [4] 彭禹,郝志勇. 基于仿真分析的曲轴平衡重动态优化设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2007(11):1893-1897.
- [5] 张超,温志高,毕玉华,等. 直列 4 缸发动机曲轴平衡重优化[J]. 小型内燃机与车辆技术,2015,44(6):76-81.
- [6] 包永惠,程用科,顾永强. 偏心与不偏心平衡块曲轴的平衡计算对比分析[J]. 山东内燃机,2002(1):12-15.
- [7] 杨从洛,孟繁臣,李鹏. CA6110 型系列柴油机曲轴两种平衡方案的研究[J]. 汽车技术,2001(4):15-18.
- [8] 张俊,黄勇,李佳家,等. 小型化车用汽油机曲轴平衡设计[J]. 汽车工程师,2015(7):47-50.
- [9] 袁兆成. 内燃机设计[M]. 北京:机械工业出版社,2013.
- [10] 戴兆明,朱海,张立平,等. 平衡块半径变化对曲轴动平衡的影响[J]. 汽车制造业,2013(8):50-56.

## Design of the limit profile of crankshaft balancer for 12V190 gas engine

WANG Taitao

Shengli Oil Field Shengli Power Machinery Group Co., Ltd., Dongying 257092, China

**Abstract:** To solve the difficulty in designing the shape of the balance block caused by the need to increase the mass-semidiameter of the crankshaft balance block when increasing the stroke of a 12V190 gas internal combustion engine, the displacement formula of the piston relative to the balance block is derived, and the motion envelope of the piston skirt bottom is drawn to determine the limit contour of the balance block. Use 3D software for motion simulation to verify the correctness of the limit contour of the balance block. The results indicate that the bottom of the piston group and the balance block do not interfere and are tightly fitted. According to the structure of the 12V190 gas internal combustion engine and the processing technology of the balance block, the limit outer contour of the balance block is modified from an ellipse to a circular arc, and an avoidance arc is designed at the bottom of the piston to shift the center of gravity of the balance block outward and obtain a larger mass diameter product.

**Keywords:** gas engine; balancer; shape design

(责任编辑:臧发业)