

文章编号:1009-038X(2001)01-0084-04

活塞环自由型线计算方法的比较

刘卫华, 华岩

(无锡轻工大学机械工程学院, 江苏无锡 214036)

摘要: 论述活塞环径向压力分布函数的一般形式, 归纳、总结由径向压力分布求解自由状态型线的方法, 对各种计算方法进行了分析比较. 实际计算结果表明, 各种计算方法之间误差较大, 实际应用中采用能量法较宜.

关键词: 活塞环; 自由型线; 计算方法

中图分类号: TK 402

文献标识码: A

Comparison of Calculation Methods on Freedom Molded Lines of Piston Ring

LIU Wei-hua, HUA Yan

(School of Mechanical Engineering, Wuxi University of Light Industry, Wuxi 214036, China)

Abstract: A generality format of piston ring radial pressure force distribution function was discussed. The methods by known radial pressure force distribution function to solve freedom molded lines were summed. Each calculation method was analysed and compared by real examples. From the results of calculations, there were big errors among each calculation method. In real uses, the energy method should be prior to be considered.

Key words: piston ring; freedom molded lines; calculation method

活塞环是发动机的关键零件之一,起着密封、润滑、导热和支承作用,其性能的优劣在很大程度上影响着发动机的动力性、经济性及大修期限.为了实现活塞环的优良性能,其制造方法已从古典的同心圆制造法、锤击法发展为现代的靠模仿车削法,并且能够进行内外圆同时车削.在使用靠模仿车削时,靠模的制作方法是先确定活塞环径向压力分布,由此计算出自由状态下的型线,然后以此型线为依据,根据所使用车床的杠杆机构设计靠模的理论型线.因此计算出活塞环自由状态型线是制造活塞环的基础.

求解活塞环自由状态型线的问题,已有约一百

年的历史,有许多文献对此进行了专门论述^[1~5],但各自研究的出发点并不一致,所做的假设、简化也不同,推导出的计算方法差异甚大,作者对这些方法进行归纳、整理,分析比较,为实际生产应用提供方便.

1 活塞环径向压力分布函数的一般形式

活塞环自由状态型线与其径向压力分布函数密切相关,早期人们都采用均压分布的方式,但在实践中发现,均压环寿命较短,因而非均压分布应运而生.压力分布函数可归纳为两类:即仅由余弦

收稿日期 2000-04-27,修订日期 2000-11-14.

作者简介:刘卫华(1965-),男,湖南衡阳人,工学博士,副教授.

万方数据

函数构成和非仅由余弦函数构成.其一般形式分别为:

仅由余弦函数构成

$$P(\theta) = P_m(1 + \sum_{n=1}^k C_n \cos n\theta) \quad (1)$$

式中 P_m 为平均压力, C_n 为系数.其典型代表就是文献 [1] 所介绍的金茨布露公式, 式中 $n = 10$. 文献 [6] 所介绍的葫芦形压力曲线也是一例.

非仅由余弦函数构成(在此仅限于 $\theta, \cos\theta, \sin\theta$)

$$P(\theta) = P_m [C_0 + (\sum_{n=1}^{k_1} a_{2n} \theta^{2n}) + (\sum_{n=1}^{k_2} b_{2n} \sin^{2n} n\theta) + (\sum_{n=1}^k C_n \cos n\theta) + (\sum_{n=0}^{k_3} d_{2n+1} \theta^{2n+1} \sin(2n+1)\theta) + (\sum_{n=1}^{k_4} e_n \theta^{2n} \cos n\theta) + (\sum_{n=1}^{k_5} f_n \sin^2 n\theta \cdot \cos n\theta) + (\sum_{n=0}^{k_6} g_{2n+1} \theta^{2n+1} \sin(2n+1)\theta \cos n\theta)] \quad (2)$$

式中 $C_0, a_{2n}, r, f_n, g_{2n+1}$ 均为系数.

对两类径向压力分布函数的研究,非仅由余弦函数构成较仅由余弦函数构成有明显的优越性,在目前生产中应用广泛.著名的阿诺尔德表达式就是其中一例 [1]:

$$\begin{cases} P(\theta) = P_m \{ n + [\frac{1}{2} (\theta^2 + \sin^2 \theta) + \chi \cos \theta + \cos^2 \theta] \} \\ n + 2.8949l = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 n, l 称为压力分布形状系数,选择不同的值得到不同的径向压力分布.

2 自由型线计算方法

文献 [1] 指出,活塞环的径向压力分布,可归结为环自由状态下弹性的曲率 $1/\rho$ 和曲率的二阶导数 $d^2(1/\rho)/d\theta^2$,或归结为活塞环由压缩状态变成自由状态时,环周上任一点位移 u 及其二阶、四阶导数.因此,直接通过 $\rho(\theta) = f(\rho)$ 或 $P(\theta) = F(u)$ 的关系来求解自由状态下的 ρ 或 u 有相当的难度,需另辟途径.目前由已知的径向压力分布曲线求解自由型线的方法可归纳为四类,即几何法、能量法、经验法和有限元法.有限元法计算工作量很大,并且可能有数值不稳定现象,因而较少采用.作者主要分析前 3 种方法.

2.1 几何法

几何法包括文献 [1] 所提出的几种典型计算方法.如 Arnold 法、Prescott 法,以及文献 [2] 提出的曲线弧长法等.其基本点都是根据微分几何曲线理

论,设定活塞环中性轴的相对伸长为零,以此来建立自由状态下曲线方程.该法简述如下:

设活塞环上作用有径向压力 $P(\theta)$,环高为 h ,理论半径为 r .取活塞环上微元体进行力和弯矩平衡分析,如图 1 所示,在径向压力、截面切向力 T 、法向力 N 及弯矩 M 的作用下,其处于平衡状态,列出 x 方向、 y 方向和弯矩平衡方程,简化整理并以曲线自然弧长 s 为参数,可得关系式:

$$P(s) = (d^2M/ds^2 + M/r^2)/h \quad (4)$$

设中性轴自由状态曲线自然参数方程为:

$$\vec{R} = R(s) \cdot \vec{e}[\alpha(s)] \quad (5)$$

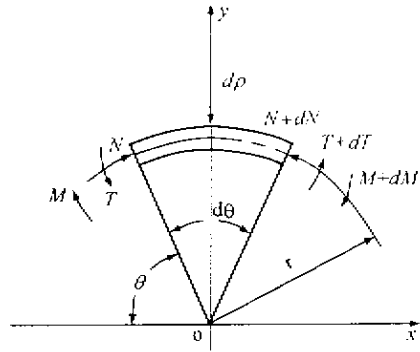


图 1 活塞环单元体力学平衡

Fig.1 force equilibrium of piston ring element

由于 s 是微分不变量,根据此性质结合式(5)可推得

$$\begin{cases} \ddot{R}(s) + R(s)\dot{\alpha}(s)/r(s) - R(s)[\dot{\alpha}(s)]^2 = 0 \\ [\dot{R}(s)\dot{\alpha}(s)]^2 + [\dot{R}(s)]^2 = 1 \end{cases} \quad (6)$$

由于活塞环的变形在弹性限度以内,满足 Hooke 定律,因此有

$$1/\rho = 1/r + M/EJ \quad (7)$$

对于活塞环中性轴而言,要同时满足方程(6)和(7),并且在工作状态下活塞环的曲率半径 $\rho(s)$ 恒为 R_0 ,因此可用式(7)逐点求出 $r(s)$,然后再根据式(6)用龙格-库塔法数值积分求出 $R(s)$ 和 $\alpha(s)$,从而得出曲线的极坐标表示.

2.2 能量法

该法将活塞环看成曲梁,应用弹性的虚功原理,即以能量守恒为基础的 Maxwell-Mohr 定理来考虑弯矩、法向力和切向力的全面作用.根据 Maxwell-Mohr 定理,活塞环上任一点的广义变形为:

$$\delta(\theta) = \int_0^\theta [\frac{M \cdot M(\alpha)}{E \cdot Z} + \frac{M \cdot N(\alpha) + N \cdot M(\alpha)}{E \cdot F \cdot r} + \frac{N \cdot N(\alpha)}{E \cdot F} + \frac{Q \cdot Q(\alpha)}{K \cdot G \cdot F}] \cdot r \cdot d\alpha \quad (8)$$

式中, $F = t \cdot h$ 是活塞环的横截面积; G 是材料的剪

切模量 ; K 是截面形状因子 ,对矩型截面 , $K = 5/6$; α 是积分变量 ,对应与活塞环的角坐标 , $1/Z = 1/J + 1/Er^2$, J 是惯性矩 . M 、 N 、 Q 分别是 $P(\theta)$ 作用下 ,曲梁横截面上的弯矩、法向力和剪力 .

当活塞环中性轴上的 (r, θ) 点沿径向向气缸中心作用一单位虚力时 (见图 2) ,在 (r, α) 点产生的内力素 M_0 、 N_0 、 Q_0 为

$$M_0(\alpha, \theta) = \begin{cases} r \sin(\theta - \alpha) & \alpha \leq \theta \\ 0 & \alpha > \theta \end{cases} \quad (9)$$

$$N_0(\alpha, \theta) = \begin{cases} -\sin(\theta - \alpha) & \alpha \leq \theta \\ 0 & \alpha > \theta \end{cases} \quad (10)$$

$$Q_0(\alpha, \theta) = \begin{cases} -\cos(\theta - \alpha) & \alpha \leq \theta \\ 0 & \alpha > \theta \end{cases} \quad (11)$$

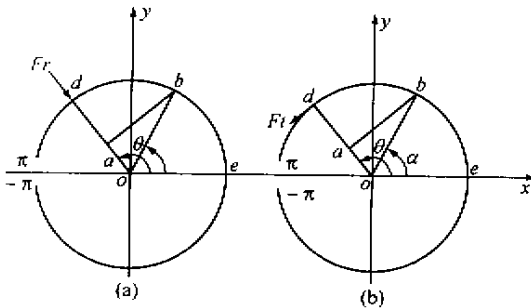


图 2 环受虚力作用图

Fig.2 Imagine force function figure of piston ring

将式 (9)–(11) 代入式 (8) 整理后可得

$$\Delta \rho(\theta) = \left(\frac{hr^4}{EZ} - \frac{hr^2}{EF} \right) A(\theta) + \frac{hr^2}{GFK} B(\theta) \quad (12)$$

$$A(\theta) = \int_0^\theta \sin(\theta - \alpha) d\alpha \int_\alpha^\pi P(\beta) \sin(\beta - \alpha) d\beta \quad (13)$$

$$B(\theta) = \int_0^\theta \cos(\theta - \alpha) d\alpha \int_\alpha^\pi P(\beta) \cos(\beta - \alpha) d\beta \quad (14)$$

同时 ,若要求 (r, θ) 点的切向位移 ,则沿切向作用一单位虚力 ,如图 2b 所示 ,则可得 :

$$\Delta \varphi(\theta) = \left(\frac{hr^3}{EZ} - \frac{hr}{EF} \right) \alpha(\theta) + \frac{hr}{GFK} D(\theta) \quad (15)$$

$$\alpha(\theta) = \int_0^\theta [1 - \cos(\theta - \alpha)] d\alpha \int_\alpha^\pi P(\beta) \sin(\beta - \alpha) d\beta \quad (16)$$

$$D(\theta) = \int_0^\theta \sin(\theta - \alpha) d\alpha \int_\alpha^\pi P(\beta) \cos(\beta - \alpha) d\beta \quad (17)$$

由式 (12) 式 (15) 可得 :

$$\begin{cases} \rho = r + \left(\frac{hr^4}{EZ} - \frac{hr^2}{EF} \right) A(\theta) + \frac{hr^2}{GFK} B(\theta) \\ \varphi = \theta - \left(\frac{hr^3}{EZ} - \frac{hr}{EF} \right) \alpha(\theta) - \frac{hr}{GFK} D(\theta) \end{cases} \quad (18)$$

直接对式 (18) 进行数值积分 ,即可求出活塞环自由状态型线 .

2.3 经验计算

在实际生产中 ,对高点环自由状态型线常按下经验公式计算^[8] .

$$\rho(\theta) = \frac{D}{2} + s \cdot u \cdot Z \quad (19)$$

式中 $\rho(\theta)$ 为活塞环外圆在角度为 θ 处的曲率半径 ; D 为活塞环名义直径 ; s 为自由开口尺寸 ; u 为角度系数 (表 1) ; Z 为自由开口修正系数 , $Z = 1 - 0.235s/(D - t)$.

表 1 角度系数 u

Tab.1 Angle coefficient u

θ°	u	θ°	u	θ°	u
0	0.11765	70	0.16743	140	0.17578
10	0.11889	80	0.17701	150	0.16046
20	0.12279	90	0.18496	160	0.14042
30	0.12902	100	0.19060	170	0.11600
40	0.13718	110	0.19309	180	0.10115
50	0.14675	120	0.19176		
60	0.15708	130	0.18614		

3 计算实例

为进一步分析比较计算方法 ,作者以工厂实际需要为计算实例 .取活塞环直径 D 为 90 mm ,活塞环矩形截面形状尺寸为 :高度 $h = 3$ mm ,厚度 $t = 3.7$ mm .平均压力 p_m 为 0.127 MPa .自由开口尺寸要按国标 GB/T1149.1-94 计算 , $s = 13.5$ mm .材料弹性模量 E 为 960.4×10^2 MPa .首先以 $P(\theta)$ 为非仅由余弦函数构成为例 ,形状系数为 : $n = 0.1916$; $l = 0.2776$.泊松比 $\nu = 0.25$.对活塞环中性轴的计算结果如表 2 所示 :

计算结果表明 ,文中所给出的 3 种方法相互之间误差很大 ,最大时可高达 5% 以上 ,这也说明 ,有分析探讨各方法的必要性 ,要便实际应用时合理采用 .由于几何法在建模时只考虑了弯矩作用 ,忽视了法向和切向力的影响 ,文献 [5] 指出 ,法向力和切向力的影响最大会在 2% 以上 ,而能量法在建模时考虑因素较全面 ,所作简化也较合理 ,所以作者认为采用该法较合适 .

表 2 3 种算法计算结果比较

Tab.2 Comparison of three kinds of Calculation methods mm

θ°	几何法 R_1	能量法 R_2	经验法 R_3	$ R_1 - R_2 /R_2$	$ R_3 - R_2 /R_2$
0	43.15000	43.15000	44.67989	0	3.50%
20	43.26444	43.38455	44.74673	0.28%	3.14%
40	43.58961	44.05376	44.93385	1.05%	2.00%
60	44.07376	45.06414	45.19262	2.19%	0.30%
80	44.63821	46.25701	45.45179	3.50%	1.74%
100	45.18790	47.42817	45.62851	4.72%	3.79%
120	45.62383	48.29270	45.64359	5.53%	5.49%
140	45.85745	48.56048	45.43579	5.56%	6.43%
160	45.82479	48.03389	44.97600	4.60%	6.37%
180	45.50013	46.74307	44.46533	2.66%	4.87%

考虑到经验法中角度系数 u 来源于 $\rho(\theta)$, 为仅由余弦函数构成, 因此, 作者再以 $P(\theta) = \rho(1 + 0.42\cos 2\theta - 0.18\cos 3\theta)$ 为例, 来计算比较能量法和经验法, 计算结果如表 3 所示:

表 3 $\rho(\theta)$ 仅由余弦函数构成能量法和经验法比较

Tab.3 Result comparison of energy method with experience method when $P(\theta)$ is only made up of cosine function

θ°	能量法 R_2	经验法 R_3	$ R_3 - R_2 /R_2$
0	43.149857	44.67989	3.55%
20	43.26214	44.74673	3.43%
40	43.58376	44.93385	3.1%
60	44.07122	45.19262	2.54%
80	44.64712	45.45179	1.8%
100	45.21218	45.62851	0.9%
120	45.64751	45.64359	0.008%
140	45.83892	45.43579	0.88%
160	45.70592	44.97600	1.6%
180	45.23621	44.46533	1.7%

从表 3 可见, 对于 $P(\theta)$ 为仅由余弦函数构成时, 两法的计算结果较相近, 这也说明: 经验法对 $\rho(\theta)$ 函数形式有一定要求. 这一点在实际工作中应充分重视.

4 结 论

活塞环径向压力分布函数是环自由状态型线设计与计算的出发点与基础, 活塞环自由状态型线是环加工工艺的出发点与基础, 对其计算方法应深入研究. 现有的几种计算方法相互之间误差较大, 在实际运用中应充分考虑, 由于能量法考虑因素较全面, 建议优先采用. 经验法由于角度系数的来源, 仅对 $P(\theta)$ 为仅由余弦函数构成的压力分布较适应, 而当 $P(\theta)$ 为非仅由余弦函数构成时误差较大, 这在实际运用中值得注意.

参考文献:

[1] 鄂伯翔. 活塞环 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987.
 [2] 王殿龙. 活塞环自由状态曲线方程的研究 [J]. 大连理工大学学报, 1991, 31(1): 82~85.
 [3] 王伯年. 应用推广的定理计算活塞环自由状态型线 [J]. 内燃机学报, 1992, 10(4): 317~322.
 [4] 辜英求. 一种计算活塞环自由状态型线的新方法 [J]. 内燃机工程, 1995, 16(2): 29~32.
 [5] 赵高晖. 活塞环自由状态型线的研究 [J]. 内燃机, 1994(5): 6~9.
 [6] 史玉山. 葫芦形活塞环压力曲线及模具设计计算 [J]. 汽车技术, 1987(7): 36~41.
 [7] 苏颖颖. 活塞环径向压力分布函数分析 [J]. 上海理工大学学报, 1991, 13(1): 47~49.
 [8] 史绍熙主编. 柴油机设计手册 (上册) [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1984.

(责任编辑 朱 明)