

内燃机高次多项式函数凸轮最小油膜厚度变化特性分析

蒋晓琴

(四川交通职业技术学院 汽车工程系, 四川 成都 611130)

摘要: 高次多项式函数凸轮旋转中接触点的曲率半径、速度和载荷变化会引起油膜厚度发生变化。文中采用弹流润滑理论计算高次多项式函数凸轮的最小油膜厚度、弹流润滑特性数,并用 Mathematics 软件分析不同幂指数的高次多项式函数凸轮最小油膜厚度、弹流润滑特性数随转角的变化规律。结果表明,在凸轮桃尖区域最小油膜厚度最小。

关键词: 汽车; 内燃机; 凸轮; 最小油膜厚度; 高次多项式函数; 弹流润滑理论

中图分类号: U464.134

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2018)05-0013-03

凸轮机构是内燃机中较关键的机构,其工作状态直接影响内燃机的工作,目前整体式函数凸轮在内燃机中使用较多,而高次多项式函数凸轮是目前应用较广的整体式函数凸轮,凸轮形线采用高次多项式曲线,基本工作段升程曲线是函数曲线。高次多项式凸轮与平面挺柱配合工作时,接触面上承受的压力很大,包括气门弹簧力、气门机构各零件惯性力及由振动造成的附加惯性力,最大接触应力为 0.7~1.4 GPa,同时凸轮与挺柱工作面间的相对滑动速度很高,工作中摩擦热较高且散热条件差,工作面摩擦磨损很大,接触应力过大易引起局部材料剥落产生点蚀现象,接触带温度过高易引起两元件互熔撕裂产生拉毛现象。因此,有必要研究高次多项式函数凸轮与挺柱间的润滑。

凸轮与平面挺柱是以滑动为主的点线接触摩擦副,其润滑是典型的弹流润滑,凸轮挺柱机构设计时要进行弹流润滑计算,尤其是油膜厚度计算。油膜厚度随凸轮旋转中接触点的曲率半径、速度和载荷变化而变化,在对高次多项式函数凸轮机构进行弹流润滑计算时,按准稳定状态计算最小油膜厚度,有利于分析凸轮表面的磨损分布、评价凸轮轮廓形线。

1 高次多项式函数凸轮最小油膜厚度的计算

1.1 高次多项式函数凸轮升程曲线的建立

在高次多项式函数凸轮设计中,凸轮基圆半径 r_0 、凸轮作用角 $2\varphi_0$ 、最大升程 h_{tmax} 、气门开启初始速度 v_0 和凸轮轴转速 n 是已知的,根据凸轮转速可计算出凸轮角速度 ω 和凸轮线速度 v_R :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{1\,000\pi}{30}, v_R = -\frac{v_0 \varphi_0}{\omega}$$

式中: φ_0 为凸轮作用半角。

高次多项式函数凸轮形线采用高次多项式曲线,其升程曲线的表达式为:

$$h_t(\theta) = C_0 + C_p \theta^p + C_q \theta^q + C_r \theta^r + C_s \theta^s + \dots \quad (1)$$

式中: C_0, C_p, C_q, C_r, C_s 为待定系数; p, q, r, s 为幂指数; 上升阶段 θ 为 $(\varphi_0 - \alpha)/\varphi_0$, 下降阶段 θ 为 $(\alpha - \varphi_0)/\varphi_0$; α 为凸轮转角($^\circ$)。

高次多项式凸轮形线的多项式项数和待定系数取决于凸轮设计边界条件,在内燃机凸轮设计中满足 5 种边界条件: 1) $\alpha = \varphi_0$ 时气门升程最大,即 $\theta = 0$ 时 $h(\theta) = h_{\text{tmax}}$ 。2) $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 2\varphi_0$ 时气门关闭,即 $\theta = 1$ 时 $h(\theta) = 0$ 。3) $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 2\varphi_0$ 时气门的开启与落座速度皆为 v_0 , 由于 $dh(\theta)/dt = dh(\theta)/d\theta \cdot d\theta/d\alpha \cdot d\alpha/dt$, $\theta = 1$ 时 $dh(\theta)/dt = v_R = -v_0 \varphi_0 / \omega_r$ (ω_r 为凸轮旋转角速度)。4) $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 2\varphi_0$ 时气门开启与关闭时的加速度都为零,使基本工作段与缓冲段圆滑过渡,即 $\theta = 1$ 时 $d^2h(\theta)/d\theta^2 = 0$ 。5) $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 2\varphi_0$ 时气门开启与关闭时没有脉冲,即 $\theta = 1$ 时 $\alpha = 2\varphi_0$ 。将 5 种边界条件代入式(1),可求出 C_0, C_p, C_q, C_r, C_s :

$$\begin{aligned} C_0 &= h_{\text{tmax}} \\ C_p &= \\ &= \frac{h_{\text{tmax}} srq + v_R(sr + sq + rq - s - r - q + 1)}{(s-p)(r-p)(q-p)} \\ C_q &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{-h_{\text{tmax}}srq + v_R(sr + sp + rp - s - r - p + 1)}{(s - q)(r - q)(p - q)} \\
C_r = & \frac{-h_{\text{tmax}}spq + v_R(sq + sp + pq - s - p - q + 1)}{(s - r)(q - r)(p - r)} \\
C_s = & \frac{-h_{\text{tmax}}rpq + v_R(pq + rq + rp - r - p - q + 1)}{(q - s)(r - s)(p - s)}
\end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中, h_{tmax} 、 v_0 、 n 是已知的; v_R 按式(3)计算; q 、 r 、 s 的取值见式(4)。选取 n 、 m , 即可计算出 q 、 r 、 s 值, 代入式(1)可求出高次多项式函数凸轮升程曲线的表达式。

$$v_R = -\frac{v_0 \varphi_0}{\omega} = -\frac{60v_0 \varphi_0}{2\pi n} \quad (3)$$

$$\begin{cases} q = 2n \\ r = 2n + m \\ s = 2n + 2m \end{cases} \quad \begin{matrix} (n = 3, 4, 5, 6, \dots; \\ m = 2, 4, 6, 8, \dots) \end{matrix} \quad (4)$$

1.2 高次多项式函数凸轮外廊上各点曲率半径计算

挺柱升程 h_t 与凸轮转角的关系为 $h_t = H(\alpha)$ 。如图 1 所示, 凸轮转角为 α 时, 凸轮与挺柱接触于 P 点, \overline{PN} 为接触点偏离凸轮中心的距离。由图 1 可得 PN 方程式为:

$$y \sin \alpha + x \cos \alpha - (r_0 + h_t) = 0 \quad (5)$$

可写成 $f(x, y, \alpha) = 0$, 其中直线簇 $f(x, y, \alpha) = 0$ 的包络线方程满足 $\partial f / \partial \alpha = 0$, 得:

$$y \cos \alpha - x \sin \alpha - \frac{dh_t}{d\alpha} = 0 \quad (6)$$

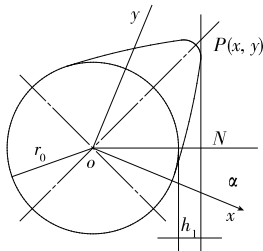


图 1 平面挺柱凸轮外型坐标计算示意图

联立式(5)和式(6)可得凸轮外型坐标方程:

$$\begin{aligned}
x &= (r_0 + h_t) \cos \alpha - \frac{dh_t}{d\alpha} \sin \alpha \\
y &= (r_0 + h_t) \sin \alpha + \frac{dh_t}{d\alpha} \cos \alpha
\end{aligned} \quad (7)$$

将式(7)代入凸轮外廊曲率半径计算公式[见式(8)], 得到凸轮外廊上各点的曲率半径 ρ 计算公式[见式(9)]。

$$\rho = \frac{[(dx/d\alpha)^2 + (dy/d\alpha)^2]^{3/2}}{dx/d\alpha \cdot d^2y/d\alpha^2 - dy/d\alpha \cdot d^2x/d\alpha^2} \quad (8)$$

$$\rho = r_0 + h_t + \frac{d^2h_t}{d\alpha^2} \quad (9)$$

联立式(1)、式(9), 即可求出高次多项式函数凸轮外廊上各点的曲率半径。

1.3 凸轮外廊各点最小润滑油膜厚度、弹流润滑特性数的求解

根据 Deschler 和 Wittmann 对凸轮机构弹流润滑的简化分析, 高次多项式函数凸轮外廊上各点的最小油膜厚度 δ_{\min} 可表达为:

$$\begin{aligned}
\delta_{\min} &= 1.6 \times 10^{-5} \frac{\omega \eta_0}{2} (r_0 + h_t) \times \\
&\quad \left| 2 \left(\frac{\rho}{r_0 + h_t} \right)^2 - \frac{\rho}{r_0 + h_t} \right|
\end{aligned} \quad (10)$$

式中: η_0 为润滑油粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

令 N 为凸轮弹流润滑特性数, 表示凸轮形线的几何关系, 有:

$$N = \frac{\rho}{r_0 + h_t} \quad (11)$$

将式(1)、式(9)代入式(10), 可得到最小润滑油膜厚度 δ_{\min} 随凸轮转角的变化趋势; 将式(1)、式(9)代入式(11), 可得到弹流润滑特性数 N 随凸轮转角的变化趋势。

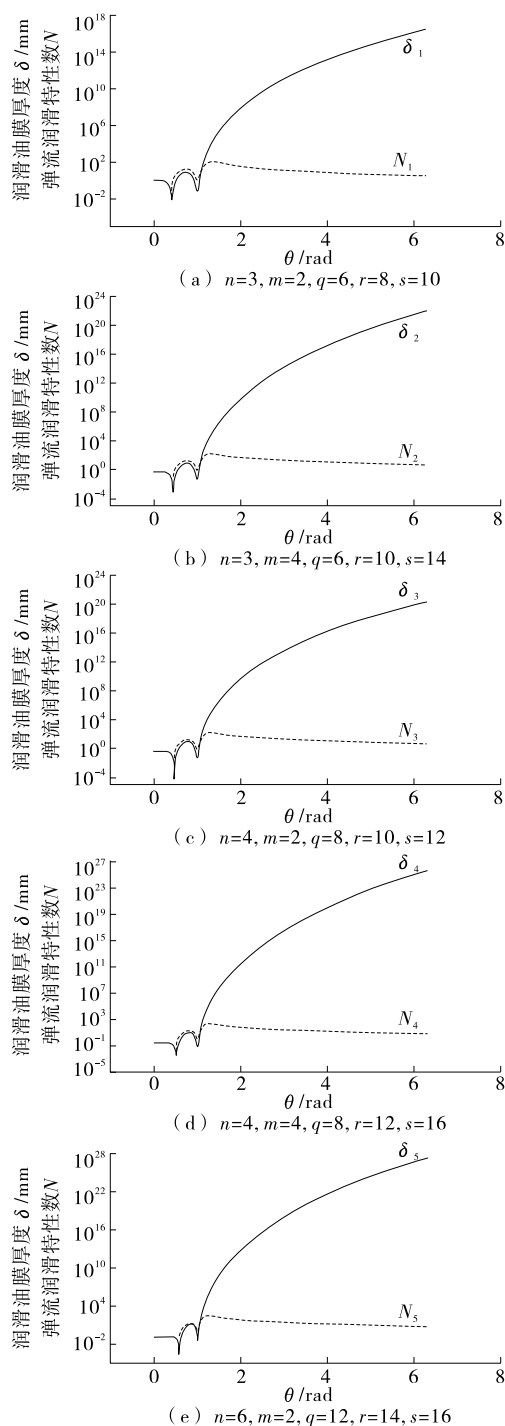
2 最小润滑油膜厚度、弹流润滑特性数随转角的变化

采用 Mathematics 软件绘图, 根据图中曲线分析最小润滑油膜厚度 δ_{\min} 、弹流润滑特性数 N 随转角的变化趋势。取 $p = 2$, $r_0 = 20 \text{ mm}$, $h_{\text{tmax}} = 13 \text{ mm}$, $\varphi_0 = 62^\circ$, 凸轮轴转速 $n = 1\,000 \text{ r/min}$, 凸轮角速度 $\omega = 2\pi n / 60 = 1\,000\pi / 30 \text{ rad/s}$, 气门开启初始速度 $v_0 = 0.06 \text{ m/s}$, $v_R = -v_0 \varphi_0 / \omega \text{ m/s}$, 润滑油粘度 $\eta_0 = 0.075 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 各幂指数取值见表 1。

表 1 幂指数的取值

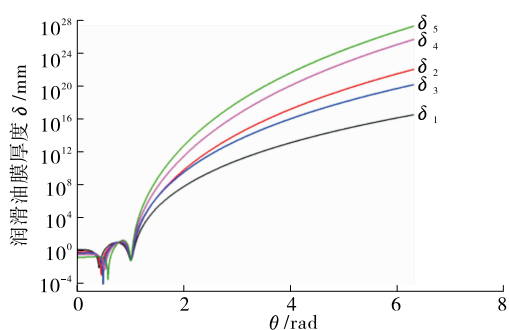
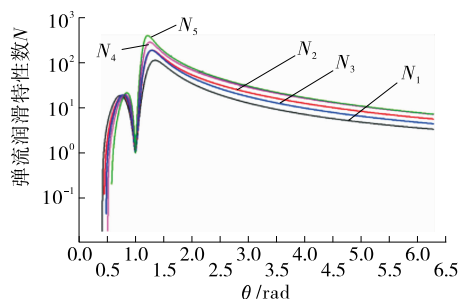
n	m	q	r	s	δ_{\min}	N	n	m	q	r	s	δ_{\min}	N
3	2	6	8	10	$\delta_{1\min}$	N_1	4	4	8	12	16	$\delta_{4\min}$	N_4
3	4	6	10	14	$\delta_{2\min}$	N_2	6	2	12	14	16	$\delta_{5\min}$	N_5
4	2	8	10	12	$\delta_{3\min}$	N_3							

利用 Mathematics 软件计算不同幂指数高次多项式函数凸轮的最小润滑油膜厚度 δ_{\min} 、凸轮弹流润滑特性数 N 随 θ 的变化, 结果见图 2。

图2 不同幂指数高次多项式函数凸轮 δ 、 N 随 θ 的变化

将 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 、 δ_4 、 δ_5 绘制在同一图上,得到不同幂指数的 $\delta-\theta$ 曲线(见图3);同理可得到不同幂指数的 $N-\theta$ 曲线(见图4)。

取多组不同的 p 、 r_0 、 h_{tmax} 、 φ_0 、 n 、 ω 、 v_0 代入式(10)、式(11)进行计算,所得结果与图2~4吻合,表明各高阶多项式函数凸轮最小润滑油膜厚度 δ_{min} 、凸轮弹流润滑特性数 N 随转角的变化规律一致。

图3 不同幂指数的 $\delta-\theta$ 曲线图4 不同幂指数的 $N-\theta$ 曲线

3 结论

(1) 无论幂指数条件如何变化,高次多项式函数凸轮的最小润滑油膜厚度 δ_{min} 、凸轮弹流润滑特性数 N 均随转角 θ 变化而变化。

(2) 在相同转角 θ 下,幂指数不同,则凸轮外廓上 δ_{min} 不同,且不同幂指数的高次多项式函数凸轮的最小润滑油膜厚度 δ_{min} 随 θ 的变化趋势一致,各凸轮外廓上最小油膜厚度均出现在凸轮桃尖区域。

(3) 在相同转角 θ 下,幂指数不同,则凸轮外廓上弹流润滑特性数 N 不同,且不同幂指数的高次多项式函数凸轮弹流润滑特性数 N 随转角 θ 的变化趋势一致。

参考文献:

- [1] 吴兆汉,汪长民,林桐藩,等.内燃机设计[M].北京:北京理工大学出版社,1990.
- [2] 温诗铸,黄平.摩擦学原理[M].第二版.北京:清华大学出版社,2012.
- [3] 毕佳宾,唐焱,刘亚鹏,等.内燃机凸轮机构弹性流体润滑分析[J].液压气动与密封,2011(1).
- [4] 巨刚,袁亮,刘小月.凸轮机构高次多项式运动规律曲线研究及仿真分析[J].机械设计与制造,2015(5).