结构与可靠性

直动平底挺柱凸轮的优化设计

葛新涛，楚万秀，赵同宾

（七一一研究所，上海 200090）

摘　要：针对直动平底式凸轮建立了缓冲段等加速—等速与工作段七项高次方的组合式从动件运动规律数学方程式；并应用 MATLAB 软件进行优化设计，获得较大的丰满系数和较好的动力学性能；利用坐标变换的方法得到的凸轮轮廓线可为凸轮机构的动力学仿真和数控加工编程提供依据。

关键词：直动平底挺柱凸轮；从动件；优化设计

中图分类号：TK423.4+1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1001-4357(2011)01-0029-04

Optical Design of Translating Flat-bottomed Tappet Cam

Ge Xintao, Chu Wanxiu, Zhao Tongbin

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai200090)

Abstract: The equation of follower moving rule for translating flat-bottomed tappet cam was established, combining uniform acceleration-uniform speed in amortizing section of cam and seven order polynomial curve in working section of cam. Then, through optical design by MATLAB, bigger fullness coefficient and better dynamic performance was achieved. The cam contour curve was obtained through coordinate transformation method. It offers references for dynamic simulation and the programming of numerical-control machining for cam mechanism.

Keywords: translating flat-bottomed tappet cam; follower; optical design

0 概　述

配气机构是内燃机的重要组成部分，它直接关系到内燃机运转的可靠性、振动和噪声，并显著影响内燃机的动力性和经济性等基本性能。配气凸轮是配气机构的重要组成部分，其设计包括从动件运动规律的设计和凸轮轮廓线的设计两部分。从动件运动规律对内燃机的进排气性能具有决定性的影响，对凸轮机构的设计起着主导作用。凸轮轮廓曲线是从动件运动规律的实现者，是凸轮加工工艺及数控编程的依据。

过去，人们常采用几何凸轮的设计方法设计凸轮，虽然这种方法获得的丰满系数较大，但是易导致从动件的冲击、振动和噪声较大[1]。为了解决此问题，现在人们普遍采用函数型从动件运动规律的设计方法。但是按照固定函数从动件运动规律设计的凸轮的丰满系数较小，往往不能满足性能要求。为此，本文针对函数型凸轮将丰满系数作为目标函数，以较缓和的冲击为限制条件，应用 MATLAB 软件对从动件运动规律进行优化设计；并采用坐标变换的方法用 MATLAB 计算出凸轮的轮廓曲线坐标；根据凸轮轮廓曲线坐标利用数控机床可直接加工出凸轮本体。

1　从动件运动规律的优化设计

通常的配气机构从动件运动规律基本上都是对称结构，上升段和下降段方程相同，故凸轮工作段对应的平底挺柱的升程、速度和加速度也是以凸轮最大升程为轴对称。因此本文以最大升程为轴对称的对称凸轮为对象，仅需设计从动件运动规律的升程曲线。

收稿日期：2010-05-20；修回日期：2010-08-23

作者简介：葛新涛（1984-），男，硕士，主要研究方向为机械设计、船舶动力系统集成，E-mail:sdgxintao@163.com。

万方数据

1.1 缓冲段的设计

由于配气机构中的气门在很高的温度下工作，从冷态到热态将会产生较大的热变形，为保证气门关闭可靠，需要在气门与传动机构间留有一定的间隙，该间隙即为从动件运动规律中的缓冲曲线。缓冲曲线应保证与基圆和工作段的光滑连接，即在连接点处相切且在该点附近挺柱速度足够小，以减小配气机构的撞击，因此对气门落座速度应进行限制，但落座速度也不能过小，否则不利于气门的及时关闭；此外，在缓冲段接近终点时，如升程变化过于平缓，当配气机构间隙略有变化时，会造成气门启闭时刻有较大的变化。一般缓冲终点的速度为 0.012 7 ~ 0.052 4 m/℃A[2]。

等加速—等速型缓冲曲线可以很好地满足以上缓冲曲线的要求，并具有以下特点：

(1)缓冲段终点的加速度为零，因而冲击和噪声较小；

(2)由于缓冲段曲线终点时挺柱升程对凸轮转角的二阶、三阶导数皆为零，所以它与凸轮工作段廓线衔接的光滑性较好；

(3)缓冲段终点的速度可通过调整等加速与等速段的凸轮转角比来选定。

等加速—等速型从动件运动规律缓冲段的运动规律如下：

等加速段(当 $0 \leqslant \varphi \leqslant \varnothing_1$ 时)

$$h_{T0} = h_R \varphi^2 / [A_1 \varnothing_0^2 (2 - A_1)] \quad (1)$$

等速段(当 $\varnothing_1 \leqslant \varphi \leqslant \varnothing_0$ 时)

$$h_{T0} = 2h_R \varphi / [\varnothing_0 (2 - A_1)] - A_1 h_R / (2 - A_1) \quad (2)$$

式中：$\varnothing_0$ 为缓冲段张角(rad)；h_{T0} 为缓冲段挺柱升程；h_R 为缓冲段最大挺柱升程；φ 为凸轮转角(rad)；$A_1 = \varnothing_1 / \varnothing_0$。

缓冲段的速度为 h_{T0} 对 φ(或时间 t)的一阶导数，加速度为速度对 φ(或时间 t)的一阶导数。

1.2 工作段的优化设计

多项式高次方曲线高阶连续，能满足较多的边界条件，曲线的形状易于调整，可适应不同的应用要求，因而应用较广。一般来说，多项式的项数越多，对从动件运动规律的调节越灵活，用项数多的多项式设计的凸轮也就越精密。考虑到实际凸轮机械加工的精度，一般采用六项和七项高次方多项式。通过调整多项式高次方的幂指数，可以控制凸轮升程的最大加速度和丰满系数。本文选择七项高次方多项式作为凸轮工作段的型线设计方程，且应满足以下要求：

(1)气门升程曲线具有最大的丰满系数，以得到最高的进排气效率，保证内燃机良好的经济性；

(2)最大正、负加速度应低于许用值；

(3)工作段与缓冲段的连接处平滑无冲击。

从动件运动规律升程段七项高次方程如下：

$$h_v = h_{vmax} + C_2 x^2 + C_4 x^4 + C_p x^p + C_q x^q + C_r x^r + C_s x^s \quad (3)$$

式中：h_v 为从动件升程；h_{vmax} 为凸轮从动件最大升程；$x = (\varnothing_a - \varphi)/\varnothing_a$ ($\varnothing_a$ 为上升段凸轮包角(rad))；φ 为凸轮转角(rad)；C_4 为调整负加速段曲线形状的系数，一般取 $0.1h_{vmax} \sim 0.2\ h_{vmax}$。

根据七项高次方从动件运动规律设计要求，确定边界条件如下：

(1)当 $\varphi = \varnothing_a$ 时，气门升程达到最大值，即 $h_v = h_{vmax}$；

(2)当 $\varphi = 0$ 时，气门开启，即 $h_v = h_R$；

(3)当 $\varphi = 0$ 时，气门开启时挺柱的速度为常数，即为缓冲段终点时的速度 V_{Tomax}，也即 $h_v' = V_{Tomax}$；

(4)当 $\varphi = 0$ 时，气门加速度等于零，即 $h_v'' = 0$；

(5)当 $\varphi = 0$ 时，气门开启时无冲击，即 $h_v''' = 0$；

(6)当 $\varphi = 0$ 时，气门开启时加速度脉冲的变化率为零，即 $h_v^{(4)} = 0$。

由上述边界条件，可列出如下式所示的方程组：

$$A \begin{bmatrix} C_2 \\ C_p \\ C_q \\ C_r \\ C_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_R - h_{vmax} - C_4 \\ V_{Tomax} - 4C_4 \\ -12C_4 \\ -24C_4 \\ -24C_4 \end{bmatrix}$$

式中，

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & p & q & r & s \\ 2 & p(p-1) & q(q-1) & r(r-1) & s(s-1) \\ 0 & p(p-1)(p-2) & q(q-1)(q-2) & r(r-1)(r-2) & s(s-1)(s-2) \\ 0 & p(p-1)(p-2)(p-3) & q(q-1)(q-2)(q-3) & r(r-1)(r-2)(r-3) & s(s-1)(s-2)(s-3) \end{bmatrix}$$

万方数据

解方程组可求得高次多项式的各项系数 C_p、C_q、C_r、C_s(为 p、q、r、s 的表达式)。

对于给定的幂指数 p、q、r、s 利用 MATLAB 的符号计算工具箱可求得高次七项式的各项系数 C_p，C_q，C_r，C_s。

为了获得良好的发动机进气性能，从动件运动规律的优化设计以丰满系数 ξ 最大为目标函数。丰满系数系数 ξ 的解析表达式为：

$$\xi=(h_{vmax}+\frac{C_2}{1+2}+\frac{C_4}{1+4}+\frac{C_p}{1+p}+\frac{C_q}{1+q}+\frac{C_r}{1+r}+\frac{C_s}{1+s}) \tag{4}$$

约束条件为：气门升程曲线方程的幂指数 p、q、r、s，t 必须通过优化组合选取，通常按各种等差级数取值。

$p=2m$；$q=2(m+n)$；$r=2m+4n$；$s=2m+6n$

式中，m、n 为正整数，$m=3\sim9$，$n=1\sim10$。

一般幂指数越大，丰满系数越大，最大负加速度越小，使凸轮外形最小曲率半径增大，这对减小该处接触应力、降低磨损是有利的。所以最大负加速度和凸轮外形最小曲率半径不必作为约束条件。而当幂指数越大时，最大加速度越大，故应对最大加速度进行约束。

优化设计模型为：

$$\begin{cases} \min f(x)=\dfrac{1}{\xi} \\ s.t.\ 3\leqslant m\leqslant 9 \\ \quad 1\leqslant n\leqslant 10 \\ \quad h''_{vmax}\leqslant[h''_{vmax}] \end{cases}$$

应用 MATLAB Optimization Toolbox 中的 fmincon 函数，实现上述优化数学模型的求解。

2　凸轮轮廓线的设计

小型内燃机常用的凸轮机构为无偏心直动平底盘形凸轮机构。由于凸轮为对称凸轮，故凸轮的转向对凸轮的轮廓线没有影响。采用坐标变换的方法，在凸轮从动件运动规律已知的条件下可进行凸轮实际轮廓线的设计。

对图 1 所示的直动平底从动件盘状凸轮机构，取导路的中心线为 y_0 轴，原点为凸轮的回转中心，建立一个右手直角固定坐标系 x_0Oy_0。设升程开始时，推杆斜底位于最低位置 B_0T_0；其中，T_0为凸轮与平底的切点，B_0为导路中心线与斜底最低位置的交点。取 O 为原点，$\overline{OT_0}$为 x 轴，建立一个与凸轮相固联的右手直角动坐标系 xOy。

于是可得固定坐标 x_0Oy_0 到动坐标系 xOy 的坐标变换关系式为：

$$\begin{cases} x=-x_0\sin\varphi+y_0\cos\varphi \\ y=-x_0\cos\varphi-y_0\sin\varphi \end{cases} \tag{5}$$

令：$r_0=l_{0B_0}$为凸轮的基圆半径。设在任一时刻凸轮转角为 φ，从动件位移为 h(由式(1)、(2)、(3)确定)，从动件平底位置为 BT，T 为凸轮与从动件的切点，B 为平底与运动方向的交点。过 T 做共法线 n，交 x_0 轴于点 P，点 P 为速度瞬心，则 $l_{op}=\dfrac{dh}{d\varphi}$，于是可得 T 在固定坐标系 x_0Oy_0 中的坐标为：

$$\begin{cases} x_T=\dfrac{dh}{d\varphi} \\ y_T=r_0+s \end{cases} \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)可得凸轮实际轮廓线方程式：

$$\begin{cases} x=-x_T\sin\varphi+y_T\cos\varphi \\ y=-x_T\cos\varphi+y_T\sin\varphi \end{cases} \tag{7}$$

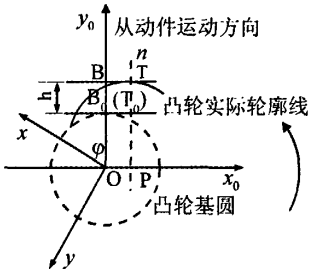

图 1　直动平底从动件盘状凸轮机构

3　设计实例

某柴油机凸轮的设计参数如表 1 所示。

表 1　某柴油机凸轮的设计参数

发动机转速 n /(r/min)	1 500
凸轮最大升程 h_{vmax}/mm	8. 26
进气缓冲段张角 $\varnothing_0$/(°)	18
进气缓冲段升程 h_R/ mm	0. 189 2
进气门开 /(°)	26. 5(上止点前)
进气门关/(°)	46. 5(下止点后)
最大允许加速度/(m/s^2)	600
基圆半径/mm	19

利用 MATLAB 将从动件运动规律的设计(式(1)、(2)、(3))及轮廓线的设计(式(6)、(7))集成为一个程序，可实现从动件运动规律及轮廓线的设计。凸轮从动件升程图、速度图和加速度图分别如图 2、3、4 所示。

万方数据

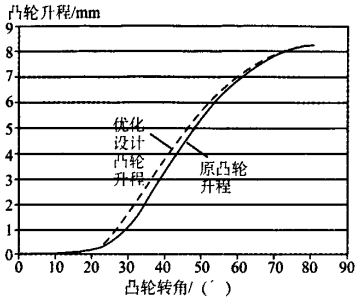

图2　凸轮从动件升程曲线

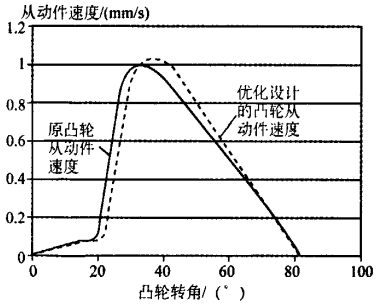

图3　凸轮从动件升程曲线

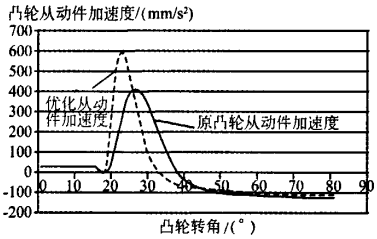

图4　凸轮从动件升程加速度曲线

由图2可看出，优化设计的凸轮升程曲线与横坐标轴所包含的面积大于原凸轮的，丰满系数得到提高。由图3可看出，在凸轮工作段开始时，优化设计的凸轮从动件速度比原凸轮变化平缓，对从动件的冲击比原凸轮小。由图4可看出虽然优化设计的凸轮的最大加速度大于原凸轮的最大加速度，但是其最大值满足设计要求，且最大负加速度要小于原凸轮，优化设计的凸轮在缓冲段与工作段连接处的速度相等且变化率都等于0，故该点凸轮对从动部件的作用力为0，所以加速度也满足设计要求。综上可以得出，优化设计的凸轮比原凸轮的丰满系数大，冲击小并且加速度满足要求，即综合性能较好。

将凸轮轮廓坐标导入到Pro/E中，利用样条曲线的命令可得凸轮的轮廓线(如图5所示)和凸轮的三维图(如图6所示)。根据得到的凸轮三维图，利用Pro/E的加工模块，可自动生成数控机床加工程序(G代码)。

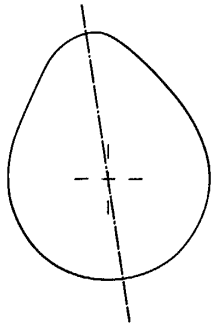

图5　凸轮轮廓线

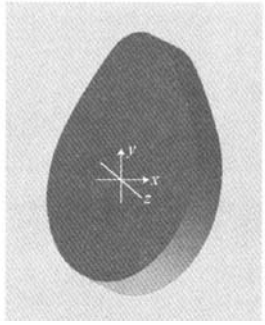

图6　凸轮三维图

4　结　论

直动平底盘形凸轮从动件运动规律采用等加速—等速的缓冲段与工作段七项高次方的组合方程，并且采用MATLAB进行优化设计，能够得到较大的丰满系数和较好的动力学性能。

利用坐标变换的方法得到的凸轮的轮廓线，为进行凸轮机构的动力学仿真和数控加工编程提供很好的依据，并可提高凸轮设计效率和加工精度。

参考文献

[1] 詹樟松，杨正军，等. 高次多项式动力凸轮优化设计及MATLAB算法实现[J]. 内燃机，2004，(1)：4-6.

[2] 吴义生，冯向勇，等. 内燃机配气凸轮的理想运动规律的设计与研究[J]. 机械科学与技术(增刊)，2003(22)：109-112.

[3] 张纪元. 机构分析与综合的解[M]. 北京：人民交通出版社，2007.

万方数据