

二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部加工 算法优化及轨迹点计算

吴海韵, 姜 涛, 常小龙, 郭隐彪*

(厦门大学物理与机电工程学院, 厦门大学微纳米加工与检测技术联合实验室, 福建 厦门 361005)

摘要: 二次椭圆-偏心正圆活塞在车用活塞领域得到了越来越广泛的应用, 但加工精度普遍较低. 详细介绍了二次椭圆-偏心正圆活塞的形状特征, 并建立二次椭圆-偏心正圆活塞的数学模型. 为了提高此类活塞的加工精度, 运用变截面螺旋线轨迹算法, 在此基础上, 通过 MATLAB 生成二次椭圆-偏心正圆活塞的加工轨迹点坐标.

关键词: 组合活塞; 数学模型; 螺旋轨迹; 坐标

中图分类号: TG 74

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2014)02-0212-05

目前, 中凸变椭圆活塞逐渐替代了传统活塞. 与传统活塞相比, 中凸变椭圆活塞具有在工作时可获得更宽、更均匀的承载面, 能减少活塞对气缸壁的冲击, 降低发动机运行噪声等诸多优点. 中凸变椭圆具有以下特性: 1) 活塞裙部的纵向截面是凸轮形状(中间凸的); 2) 活塞裙部的横截面的曲线是椭圆; 3) 每个截面的椭圆率是不同的; 4) 每个椭圆的长轴在横截面上的角度相同^[1].

国内针对中凸变椭圆活塞加工轨迹(刀具轨迹)算法的研究比较少, 孙华刚等^[2]提出一种近似螺旋线轨迹法来完成活塞裙部车削, 但由于采用的插补点坐标并不是真实的螺旋线轨迹点坐标, 误差较大, 不能适应高精度型面要求; 刘金陵等^[3]提出半截面螺旋线轨迹法, 半截面螺旋线轨迹法虽然在加工精度上有所提高, 但是也存在活塞车削表面形貌不均匀的缺点. 本文提出一种变截面螺旋线车削轨迹算法, 以提高中凸变椭圆活塞的加工精度, 在此基础上, 通过 MATLAB 生成二次椭圆-偏心正圆活塞的加工轨迹点坐标.

图纸数据一般以一系列离散点 (X_1, Z_1) 、 (X_2, Z_2) 、 $\dots$ 、 (X_n, Z_n) 形式给出, 各个离散点可在一个以 X 为横向坐标(主轴方向), Z 为纵向坐标(刀具车削方向)的坐标系中以描点的方式给出, 并通过一条光滑的曲线将各点连接起来(如图 1 所示)^[4]. 在中凸型线设计中, 裙部中凸点位置的选择非常重要. 一般中凸点位置选择在销孔中心线以下 $(0 \sim 0.3)D$ 处(D 为活塞最大长轴), 热态变形后, 中凸点位置将上移至销孔中心附近, 避免活塞换向时裙部在气缸套壁上的滚动^[5].

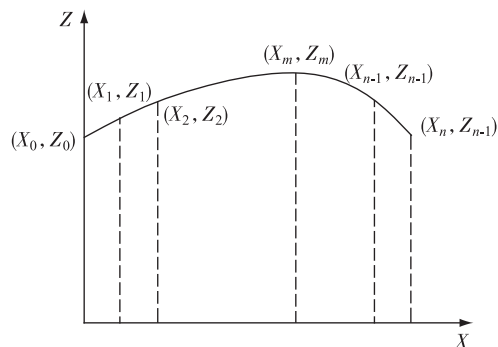


图 1 中凸型线示意图

Fig. 1 The sketch of molded lines

1 二次椭圆-偏心正圆组合活塞特征

中凸变椭圆零件纵向截面内的型线为中凸型线,

中凸变椭圆零件横截面内的型线为横向型线, 二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部的横向型线为二次椭圆与偏心圆弧的组合, 其中椭圆的长轴 $2b$ 与短轴 $2a$ 的差值称为此椭圆面的椭圆度 G , 其数学表达式为:

$$G = 2b - 2a.$$

为使活塞裙部与气缸套保持合理的接触, 保证运

收稿日期: 2013-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51275433, 51075343)

* 通信作者: guoyb@xmu.edu.cn

转平稳性,目前大多数发动机活塞椭圆度在裙高方向上是渐变的.多数裙部上端椭圆度大于下端椭圆度,这是由于靠近头部区域活塞温度较高,热变形大,在配缸间隙较小时,可以避免出现擦伤、拉缸现象.上下端半径缩减量差值一般为 0.10~0.50 mm.图 2 是某柴油机活塞的椭圆度曲线分布.

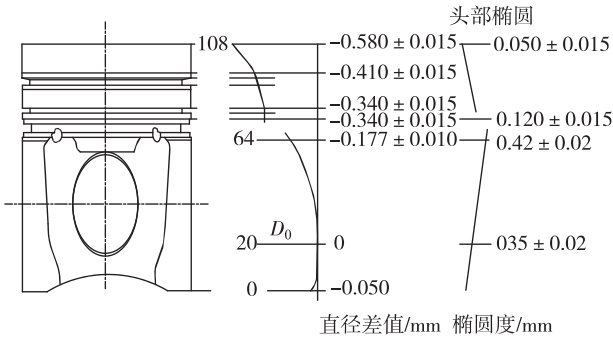


图 2 某活塞椭圆度曲线分布图
Fig. 2 The distribution curve of piston's ovality

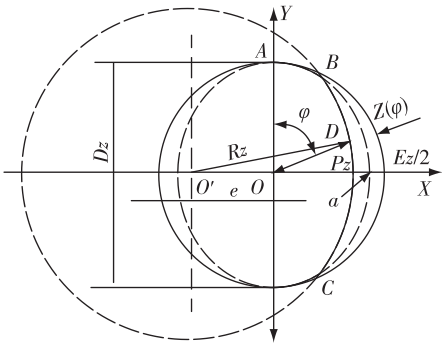


图 3 二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部横截面图
Fig. 3 The cross section of piston that combination of elliptical part and eccentric circular

如图 3 所示,二次椭圆长轴长为 D_z ,椭圆度为 E_z ,活塞 AB 段曲线为标准椭圆弧,其半径在 φ 角处缩减量为:

$$\Delta Z(\varphi) = \frac{Ez}{4(1-\cos 2\varphi)}. \quad (1)$$

BC 段为一偏心圆弧,偏心量为 e ,半径 Rz 为:

$$Rz = \frac{Dz}{2 - \frac{Ez}{2}} + e - a, \quad (2)$$

式中, a 表示偏心圆弧在标准椭圆短轴处的削边量,以下求 BC 段圆弧上任一点在 φ 角的半径缩减量 $\Delta z(\varphi)$,该点处半径为 $Pz(\varphi)$.

在 $\triangle O'OD$ 中,由余弦定理:

$$Rz^2 = e^2 + Pz^2(\varphi) - 2ePz(\varphi) \times \cos(90^\circ + \varphi) = e^2 + Pz^2(\varphi) + 2ePz(\varphi)\sin \varphi, \quad (3)$$

即:

$$Pz^2(\varphi) + 2ePz(\varphi)\sin \varphi + e^2 - Rz^2 = 0, \quad (4)$$

对以上方程求解,舍去不合理根得:

$$Pz(\varphi) = \sqrt{Rz^2 - e^2 + e^2 \sin^2 \varphi} - e \sin \varphi \quad (5)$$

则偏心圆弧在 φ 角处半径缩减量为:

$$\Delta z(\varphi) = \frac{Dz}{2} - Pz(\varphi) = \frac{Dz}{2} - \sqrt{Rz^2 - e^2 + e^2 \sin^2 \varphi} + e \sin \varphi. \quad (6)$$

由以上计算可知椭圆部分半径缩减量 $\Delta z(\varphi)$ 由式(1)决定,仅与该断面的椭圆度 Ez 及转角有关.偏心圆弧部分的半径缩减量 $\Delta z(\varphi)$ 由式(6)决定,与该断面的长轴长 Dz 、椭圆度 Ez 、偏心量 e 、椭圆短轴削边量 a 都有关.

2 中凸变椭圆活塞裙部参数

二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部的横向型线为二次椭圆与偏心圆弧的组合,其半径缩减量 $\Delta z(\varphi)$ 与该断面的长轴长 Dz 、椭圆度 Ez 有关,但由于各个横截面的 Dz 、 Ez 不同,且加工图纸仅提供裙部几个关键横截面的中凸型线量 Dz (见表 1)和椭圆度 Ez (见表 2),还无法计算活塞裙部的加工轨迹点,因此需要

表 1 16V240ZJ 型活塞裙部型线量图纸参数表
Tab.1 Parameters table of 16V240ZJ piston molded lines

H (mm)	3.5	10	20	28	36	45	54	63
Dz (mm)	239.660	239.664	239.670	239.670	239.668	239.664	239.660	239.654
H (mm)	72	81	90	100	110	120	130	140
Dz (mm)	239.648	239.642	239.635	239.628	239.621	239.613	239.605	239.596
H (mm)	150	160	170	180	190	198.5		
Dz (mm)	239.586	239.575	239.562	239.549	239.532	239.515		

注: H 为活塞裙部高度, Dz 表示对应高度 H 的中凸型线量.

通过对几个关键横截面的 Dz 和 Ez 进行插值得到更多横截面的中凸型线量 Dz 和椭圆度 Ez 。

2.1 各截面中凸型线量

活塞裙部中凸型线的插值拟合一般采用多项式插值、分段多项式插值和三次样条函数插值.为了提高多项式的插值精度,克服高次多项式插值的不足,本文采用三次样条插值.经实验数据处理发现,三次样条插值有很好的局部性质,可以保证插值曲线的连续性,十分精确地逼近原曲线和曲面形状,满足精密化的现实需要。

将活塞裙部的中凸型线沿 z 向细分为 m 个椭圆截面,构造细分矩阵:

$$HH = 0:qh/(m-1):qh.$$
其中: qh 为活塞最高点高度。

根据三次样条插值得每个椭圆截面的型线量:
 $Dz = \text{spline}(H,D,HH)$

针对表 1 所给出的数据,可以在 MATLAB 中通过三次样条函数对活塞裙部各个截面的中凸型线量进行插值,结果如图 4 所示。

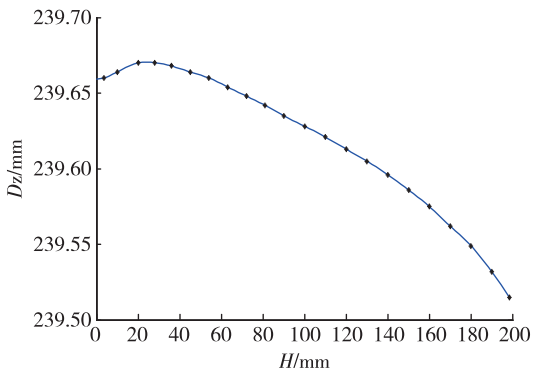


图 4 中凸型线量插值结果

Fig. 4 The interpolation result of convex contour's value

2.2 各截面椭圆度

有些活塞用在非常精密的设备中,图纸给出的椭

圆度信息除了活塞三个重要部位(裙部上顶面、中凸面,裙部下端面)还有很多关键的裙高部位.针对此类活塞,一般采用三次样条函数进行插值。

将活塞裙部的中凸型线沿 z 向细分为 m 个椭圆截面,构造细分矩阵:

$$HH = 0:qh/(m-1):qh$$

根据三次样条插值得每个椭圆截面的型线量:
 $Ez = \text{spline}(H,E,HH)$

针对表 2 所给出的数据,可以在 MATLAB 中通过三次样条函数对活塞裙部各个截面的椭圆度进行插值,结果如图 5 所示。

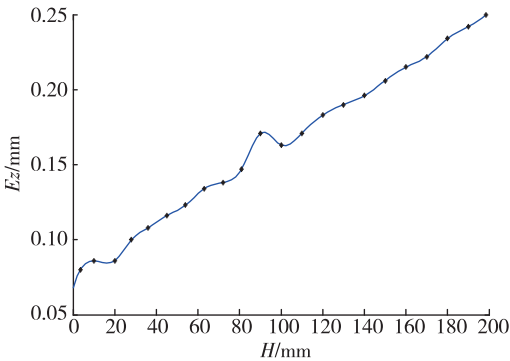


图 5 椭圆度插值结果

Fig. 5 The interpolation result of ovality

3 加工轨迹规划与计算

计算活塞裙部的加工轨迹点不仅需要以上得到的活塞参数,还需要有合理的加工算法.为了提高活塞表面的加工精度,本文运用变截面螺旋线轨迹加工算法^[6].如图 6 所示,该车削轨迹为 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ 的变截面螺旋线轨迹.把车削轨迹区分为椭圆横截线和螺旋截交线两种,其中横截面间距和螺旋线螺距相同,都为 ΔZ .加工过程如下:

1) $A \rightarrow B \rightarrow A$: 车刀由 A 点进入,根据 $Z1$ 处,活

表 2 16V240ZJ 型活塞裙部椭圆度图纸参数表
Tab.2 Parameters table of 16V240ZJ piston ovality

$H(\text{mm})$	3.5	10	20	28	36	45	54	63
$Ez(\text{mm})$	0.080	0.086	0.086	0.100	0.108	0.116	0.123	0.134
$H(\text{mm})$	72	81	90	100	110	120	130	140
$Ez(\text{mm})$	0.138	0.147	0.171	0.163	0.171	0.183	0.190	0.196
$H(\text{mm})$	150	160	170	180	190	198.5		
$Ez(\text{mm})$	0.206	0.215	0.222	0.234	0.242	0.25		

注: Ez 表示对应高度 H 的椭圆度。

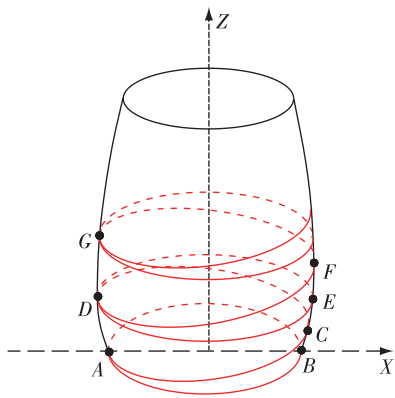


图 6 变截面螺旋线轨迹示意图

Fig. 6 The sketch of variable cross-section helix turning trajectory

塞第 1 个椭圆截面数据完成第 1 段横截线的车削;

2) $A \rightarrow C \rightarrow D$: 根据活塞第 1 条截交线的数据, 完成第 1 段螺旋线的车削;

3) $D \rightarrow E \rightarrow D$: 根据活塞 Z2 高度的椭圆截面数据完成第 2 段横截线的车削;

4) $D \rightarrow F \rightarrow G$: 根据活塞第 2 条截交线的数据完成第 2 段螺旋线的车削;

5) 重复上述过程, 直到中凸型面终点。

如图 6 所示, 变截面螺旋线轨迹法的车削轨迹由椭圆横截线和螺旋截交线两组曲线组成, 所以在计算的时候可通过活塞裙部的原始数据和相关参数先进行椭圆横截线上的轨迹坐标的计算, 然后通过椭圆横截线上的轨迹坐标计算螺旋截交线上的轨迹坐标, 最后通过合并椭圆横截线和螺旋截交线上的坐标矩阵, 得到刀触点轨迹坐标矩阵, 具体流程见图 7。

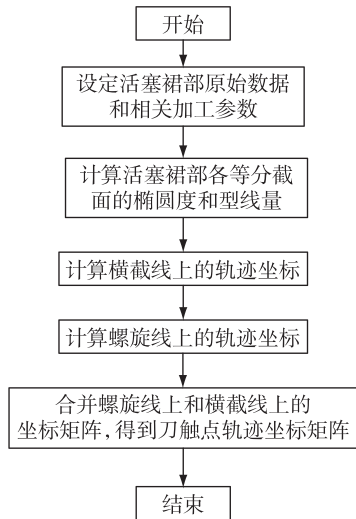


图 7 活塞裙部车削刀触点曲面坐标的计算流程
Fig. 7 The calculation process about cutter contact coordinate on piston skirt

图 8 所示为变截面螺旋线法的局部实际轨迹, 其中虚线为螺旋轨迹, 实线为横截面轨迹, 车削轨迹方向如图中箭头所示。图 9 为 MATLAB 仿真的二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部曲面在不同截面的直径收缩量与回转角度的关系, 实线表示 20 mm 处截面直径收缩量与回转角度的关系, 虚线表示 190 mm 处截面直径收缩量与回转角度的关系。图 10 为通过 MATLAB 生成的二次椭圆-偏心正圆活塞的加工轨迹点, 其中红点为螺旋加工轨迹点, 蓝点为横截面加工轨迹点。由图 9 可以看出, 二次椭圆-偏心正圆组合活塞在不同裙部高度的直径收缩量是不同的; 图 8, 10 可看出, 变截面螺旋线轨迹是由螺旋线轨迹和横截面轨迹合成。

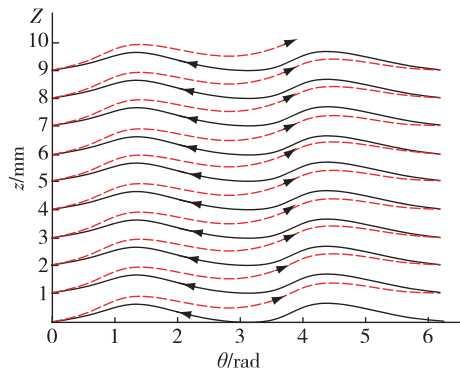


图 8 局部车削轨迹图

Fig. 8 The part of turning path

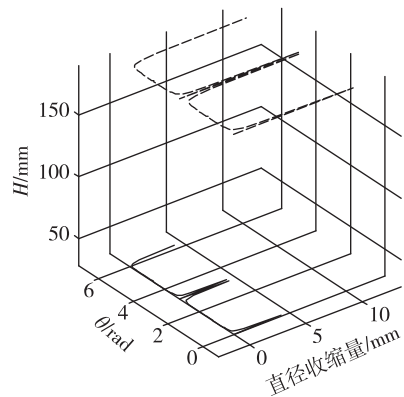


图 9 活塞裙部曲面直径收缩量

Fig. 9 The diameter shrinkage of piston skirt

4 结 论

本文运用一种新的活塞裙部的加工轨迹算法—变截面螺旋线算法。

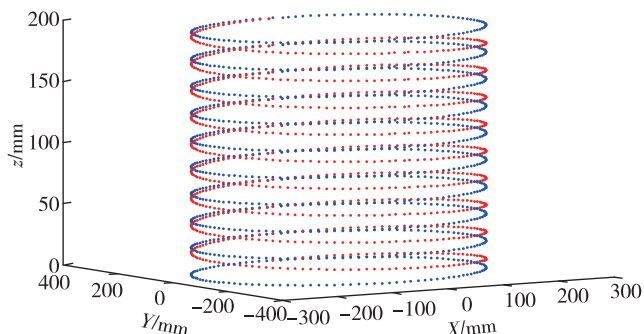


图 10 二次椭圆-偏心正圆活塞的加工轨迹点

Fig. 10 The machining trajectory point coordinates of piston that combination of elliptical part and eccentric circular

1) 建立二次椭圆-偏心正圆组合活塞的数学模型;

2) 根据二次椭圆-偏心正圆组合活塞裙部相关参数,通过 MATLAB 做三次样条插值处理得到各层截面椭圆度和型线量的细化数据;

3) 利用以上数据及相关参数,运用 MATLAB 计算得到变截面螺旋线法的加工轨迹点.

参考文献:

- [1] Wang H F, Yang S Y. Design and control of a fast tool servo used in noncircular piston turning process[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36 (1): 87-94.
- [2] 孙华刚,袁惠群.活塞裙部超磁致伸缩车削加工机理研究[J].制造技术与机床,2007,9:14-17.
- [3] 刘金凌,王先逵,冯之敬,等.中凸变椭圆活塞数控车削技术[J].组合机床与自动化加工技术,1994,4:7-9.
- [4] 潘尚峰,张嵘,马骋,等.数控车削中凸变椭圆型面的成形方法[J].中国机械工程,2001,12(8):911-914.
- [5] 秦月霞,宋刚,胡德金.活塞裙部型面的样条插值系统[J].上海交通大学学报,2003,37(1):47-49.
- [6] Guo Y B, Huang H B, Lin J H. The variable cross-section helix turning trajectory algorithm used on the middle-convex and varying ellipse piston skirt[J]. Advanced Materials Research, 2011, 311: 2340-2343.

Optimizing Process Algorithm and Calculating Data Points of the Skirt Part of Piston that Combination of Elliptical Part and Eccentric Circular

WU Hai-yun, JIANG Tao, CHANG Xiao-long, GUO Yin-biao *

(The Union Lab of Micro/Nano Manufacturing and Testing, School of Physics and Mechanical

& Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: More and more piston that combination of elliptical part and eccentric circular used in vehicle, but the machining accuracy is generally low. This paper introduce the features of piston that combination of elliptical part and eccentric circular and build the mathematical model of piston that combination of elliptical part and eccentric circular. In order to improve the machining accuracy of this piston, we adopt the variable cross-section helix turning trajectory algorithm, then generate the machining trajectory point coordinates of piston that combination of elliptical part and eccentric circular by MATLAB.

Key words: combination piston; mathematical model; helix turning trajectory; coordinates