

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.015

# 一元三次方程在矿机速度平滑中的应用与实现\*

孙丽 张小峰 张利锋 周文举

(鲁东大学 信息与电气工程学院 烟台 264025)

**摘要:**速度平滑问题是高速数控加工及煤矿提升机为提高加工精度与设备寿命而提出的,针对该速度平滑问题建立分段模型,基于加速度与速度的关系,推导了各段速度、行程和时间的解析解,推导了模型中关键一元三次方程的通用解,并将其运用到速度平滑分段求解问题中。本方法应用于煤矿提升机速度平滑问题中,显示出易于程序实现、计算量小、过渡曲线平滑的特点,能很好适应高速运动设备速度平滑的场景。目前该方法已推广至多个实际项目中。

**关键词:**速度平滑;一元三次方程;煤矿提升机

**中图分类号:** TN701      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 520

## Application and implementation of simple cubic equation in velocity smoothing of mine hoist

Sun Li Zhang Xiaofeng Zhang Lifeng Zhou Wenju

(School of Information & Electronic Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China)

**Abstract:** Velocity smoothing is one problem which is proposed in high speed machining and coal mine safety production, the aim of which is to improve machining accuracy and equipment life. Aiming at this problem, this paper proposes a stage wise model and deduces the closed-form expression solution for each stage based on the relationship of acceleration and velocity, and then deduces the general solutions of cubic equation in detail for the model. Finally, the solutions are applied to the velocity smoothing. The proposed schema shows the advantages of easy to program and smoothing in transition curve when being applied for velocity smoothing in coalmine. The result demonstrates that the proposed method adapts the high-speed scenarios well and has used in other several projects.

**Keywords:** velocity smoothing; simple cubic equation; mine hoist

### 1 引言

煤矿提升机、电梯、机床等设备在高速的运行过程中,要求数控系统确保设备运动的平稳性,防止较大冲击载荷影响零件的加工质量和设备的寿命,并保护设备的动力系统。速度平滑问题是高速数控加工、煤矿提升机、电梯运行等领域中为了减少运行轨迹拐弯处的机械冲击而在设计中提出的一种要求,广泛地应用于目前数控系统对拐角处速度的处理,涉及机械类设备生产的各个领域<sup>[1-4]</sup>。

目前,速度平滑方法可以分为如下3类。1)速度行

程算法<sup>[3-8]</sup>:从速度角度将单段的速度曲线平滑成多段的速度曲线,并通过设定运动矢量间夹角阈值的方法来确定单段或多段处理,该方法提高了加工速度,但阈值的设置人为影响因素较大,缺乏规范性。2)插补算法<sup>[9-12]</sup>:该方法采用微段直线逼近曲线的方式逼近曲线,通过自动调节进给速度的实时插补微端的速度值,以实现将速度控制精细化,减小速度控制的误差的目的。比如文献[4]中提出一种圆弧过渡法来处理相邻加工段拐角处的速度变化问题,通过在拐角处增加一段微小圆弧曲线,在段与段之间以圆弧过渡处理拐角问题。但该方法插入的微小圆弧当拐角较小时不能很好地逼近拐角处的轮廓,因而误差较大。但这些方法未考虑实际机床的加減

速能力,当曲率突变时,加速度可能会急剧增大,甚至超出机床允许的最大加速度,会导致机床震动,降低加工精度。同时,实现复杂,并不适合提升机的速度平滑控制。3) 预测的方法<sup>[13-15]</sup>:该方法通过前瞻的速度控制方式来调节速度的变化,它预先计算每个转角大小,相应地进行速度调整,将拐角处速度矢量变化所形成的冲击限制在允许范围内。文献[13]将直线加减速算法引入前瞻速度处理中,并给出相邻直线段转角计算方法,但未考虑含圆弧段转接的情况。文献[15]针对直线加减速控制策略在中因加速度突变而导致速度曲线不平滑,该前瞻算法增加了非对称 S 曲线加减速控制的轨迹长度约束,并根据相邻两段轨迹的长度变化,自适应预测出轨迹段间的最优衔接速度。前瞻控制技术能保证加工速度最大化,提高加工效率和加工精度,但由于计算量大,对数控系统硬件要求较高,实现难度较大。

本文拟从加速度的角度对该问题进行处理,通过对加速度与速度的关系进行建模,分析一元三次方程解析

$$\begin{cases} x_1 = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \\ x_2 = w \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + \bar{w} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \\ x_3 = \bar{w} \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} + w \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $w = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}i$ 。

通常情况下,经常忽略求出上述解的条件,即  $\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 \geq 0$ 。如果该条件不满足,即  $\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 < 0$ , 需要进一步讨论一元三次方程的解的情况,不妨设  $-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3} = r(\cos\theta + i\sin\theta)$ , 则  $-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3} = r(\cos\theta - i\sin\theta)$ , 其中  $r = \sqrt{-\frac{p^3}{27}}$ ,  $\theta = \pi - \arctan\left(\frac{2}{q} \sqrt{-\left(\frac{q}{2}\right)^2 - \left(\frac{p}{3}\right)^3}\right)$ , 此时原方程的根为:

$$\begin{cases} x_1 = 2r^{+\frac{1}{3}} \cos \frac{\theta}{3} = 2\sqrt[3]{-\frac{p}{3}} \cos \frac{\theta}{3} \\ x_2 = r^{+\frac{1}{3}} \left[ -\cos \frac{\theta}{3} - \sqrt{3}i \sin \frac{\theta}{3} \right] = -2\sqrt[3]{-\frac{p}{3}} \cos \left( \frac{\theta}{3} - \frac{\pi}{3} \right) \\ x_3 = r^{+\frac{1}{3}} \left[ -\cos \frac{\theta}{3} + \sqrt{3}i \sin \frac{\theta}{3} \right] = -2\sqrt[3]{-\frac{p}{3}} \cos \left( \frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (3)$$

即此时方程有 3 个实根。

解的求解方式,求解精度更高,且易于程序实现。在实际生产中将该方法应用于煤矿提升机的速度平滑,取得了良好的效果。

## 2 一元三次方程的解

基于加速度与速度关系的速度平滑问题求解中需要求解一元三次方程,因此,本部分首先分析方程  $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$  的解析解。为了求解上述方程,通过变换  $y = x + \frac{a}{3}$ , 则  $x = y - \frac{a}{3}$ , 将方程变换成如下形式:

$$y^3 + \left(b - \frac{1}{3}a^2\right)y + \frac{2}{27}a^3 - \frac{1}{3}ab + c = 0 \quad (1)$$

即将形如  $x^3 + ax^2 + bx + c = 0$  的一元三次方程消去二次项,变换成  $x^3 + px + q = 0$  的形式。

对于方程  $x^3 + px + q = 0$ , 做进一步变换,令  $p = -3mn$ ,  $q = -m^3 - n^3$ , 求得方程的 3 个解如式(2)。

将式(2)、(3)的解代入式(1),同时令  $p = b - \frac{1}{3}a^2$ ,  $q = \frac{2}{27}a^3 - \frac{1}{3}ab + c$ , 即可得原方程的根。

## 3 速度平滑问题的描述

速度平滑问题的模型可抽象为图 1 所示。

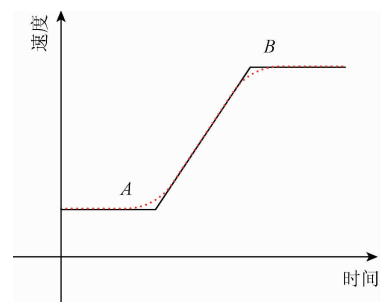


图 1 速度平滑问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of velocity smoothing

在图 1 中,要求速度从 A 点平滑过渡至 B 点,即在 A 点和 B 点做平滑处理,形成图 1 中虚线所示的效果。本文以煤矿提升机的速度平滑为例对该问题加以说明,在

煤矿提升机的速度平滑中,通常需要满足两点要求<sup>[5-6]</sup>:

- 1) 在 A 点和 B 点处进行速度平滑;
- 2) 将速度—时间曲线变为速度—行程曲线。

为解决该问题,在 AB 段考虑加速度以及加速度变化率以有效地对速度进行平滑,即 AB 段的加速度并不是在 0 和某一固定值之间跳跃变化,而是按照加速度变化率升至某一固定值,运行一段时间后再按照加速度变化率降为 0,如图 2 所示。

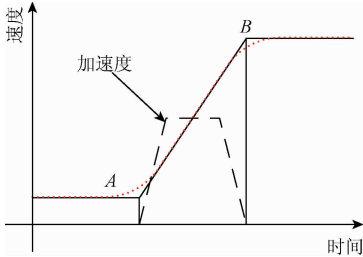


图 2 速度-加速度-时间关系图

Fig. 2 The relationship of speed-acceleration-time

为了对该问题形式化描述,对引入相关参数形式化描述如下:  $v_A$  为 A 点以前的速度;  $v_B$  为 B 点以后的速度;  $a_{max}$  为 AB 段的最大加速度;  $m$  为 AB 段加速度变化率;  $S_A$  为 A 点离出发点的距离;  $S_B$  为 B 点离出发点的距离。

根据上述分析,将 AB 段分为 3 段处理:加速度匀加速、加速度保持某一固定值和加速度匀减速阶段,即:

$$a = \begin{cases} mt; \\ a_{max}; \\ a_{max} - mt. \end{cases}$$

### 3.1 加速度匀加速

本段加速度为  $a = mt$ ,根据速度与加速度的关系可得:

$$\Delta v = v - v_A = \int a dt = \frac{1}{2} mt^2 \quad (4)$$

因此有  $v = v_A + \frac{1}{2} mt^2$ 。同时,为满足提升机速度平滑的第 2 个要求,需要将速度—时间关系转换成速度—行程关系,因此需要借助时间这个中间量在速度与行程之间建立函数关系。根据速度与行程的关系可得:

$$\Delta S = S - S_A = \int v dt = v_A t + \frac{1}{6} mt^3 \quad (5)$$

整理得:

$$t^3 + \frac{6v_A}{m} t - \frac{6\Delta S}{m} = 0 \quad (6)$$

根据一元三次方程的求解方程,得  $p = \frac{6v_A}{m}$ ,  $q =$

$$-\frac{6\Delta S}{m}, \text{ 而 } \left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{3}\right)^3 = \left(\frac{3\Delta S}{m}\right)^2 + \left(\frac{2v_A}{m}\right)^3 \geq 0。$$

根据式(2)可知,方程(6)有一个实数根,两个虚数根。显然时间是一个实数,因此该方程的根为:

$$t = \left(\frac{3\Delta S}{m} + \sqrt{\frac{9\Delta S^2}{m^2} + \frac{8v_A^3}{m^3}}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(-\frac{3\Delta S}{m} + \sqrt{\frac{9\Delta S^2}{m^2} + \frac{8v_A^3}{m^3}}\right)^{\frac{1}{3}}。$$

代入式(4)得,第一小段的速度—行程关系为:

$$v = v_A + \frac{1}{2} m \cdot \left[ \left(\frac{3\Delta S}{m} + \sqrt{\frac{9\Delta S^2}{m^2} + \frac{8v_A^3}{m^3}}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(-\frac{3\Delta S}{m} + \sqrt{\frac{9\Delta S^2}{m^2} + \frac{8v_A^3}{m^3}}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 \quad (7)$$

同时,可以计算出本小段的运行时间及行程,如下。

$$\text{运行时间: } \Delta t_1 = \frac{a_{max}}{m};$$

$$\text{运行行程: } \Delta S_1 = v_A \Delta t_1 + \frac{1}{6} m \Delta t_1^3 = \frac{v_A a_{max}}{m} + \frac{a_{max}^3}{6m^2};$$

$$\text{本小段末速度: } v_1 = v_A + \frac{1}{2} m \Delta t_1^2 = v_A + \frac{a_{max}^2}{2m}。$$

### 3.2 加速度保持不变

本小段加速度  $a = a_{max}$ ,根据速度与加速度的关系,可得:

$$\Delta v = v - v_1 = a_{max} t \quad (8)$$

行程变化为:

$$\Delta S = S - \Delta S_1 - S_A = \int v dt = v_1 t + \frac{1}{2} a_{max} t^2 \quad (9)$$

为完成速度平滑的第 2 个要求,解方程(9)得  $t = \frac{-v_1 \pm \sqrt{v_1^2 + 2a\Delta S}}{a}$ ,其中根  $t = \frac{-v_1 - \sqrt{v_1^2 + 2a\Delta S}}{a}$  为负根,删除。

将上述结果代入式(8),得  $v = v_1 + a_{max} t = \sqrt{v_1^2 + 2a_{max} \Delta S}$ 。

### 3.3 加速度匀减速

此处可以采用如下两种方法来处理:

- 1) 加速度:  $a = a_{max} - mt$ ;
- 2) 逆向处理:  $a = -mt$ 。

为了方便计算,本文采用第 2 种方法来处理。原因是第 1 种方法中会引入一元三次方程的二次项,增加计算的难度。

根据加速度与速度的关系,有:

$$\Delta v = v - v_B = \int a dt = -\frac{1}{2} mt^2 \quad (10)$$

可得:

$$v = v_B - \frac{1}{2}mt^2 \quad (11)$$

根据速度与行程的关系,有:

$$\Delta S = S - S_B = v_B t - \frac{1}{6}mt^3 \quad (12)$$

整理得:

$$t^3 - \frac{6v_B}{m}t + \frac{6\Delta S}{m} = 0 \quad (13)$$

由于  $(\frac{q}{2})^2 + (\frac{p}{3})^3 = (\frac{3\Delta S}{m})^2 - (\frac{2v_B}{m})^3$ , 根据实际

情况,一般取  $m = 1$ , 而作为速度平滑,一般要求满足如下两点:1)在较短的行程内完成平滑;2)速度过小的地方不需要平滑。根据这个要求,可以认为  $(\frac{q}{2})^2 + (\frac{p}{3})^3 \leq 0$ , 即使用式(2)求方程的根。

根据工程的具体情况,可以判断出实际应用中的解是确定的。即需要式(2)中的3个解确定一个惟一的解。具体分析一下在此情况下方程的解,3个解分别为:

$$x_1 = 2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos\frac{\theta}{3}}; x_2 = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos(\frac{\theta}{3} - \frac{\pi}{3})};$$

$$x_3 = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3})}。$$

其中  $\theta = \pi - \arctan(\frac{2}{q}\sqrt{-(\frac{q}{2})^2 - (\frac{p}{3})^3})$ , 考虑

到  $\theta$  位于第2象限,即  $\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \pi$ , 可得  $-\frac{\pi}{6} \leq \frac{\theta}{3} - \frac{\pi}{3} \leq 0$ ;  $\frac{\pi}{2} \leq \frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3} \leq \frac{2\pi}{3}$ 。

根据余弦函数的性质,可以判断出方程的3个解有如下的关系:  $x_2 \leq 0$ ;  $x_1, x_3 \geq 0$  且  $x_3 < x_1$ 。

由于时间一定是正值,因此根  $x_2$  首先被排除,而  $\Delta S = v_B t - \frac{1}{6}mt^3$  在工程中的实际情况是速度逐渐降低的过程,而方程  $v_B t - \frac{1}{6}mt^3$  的函数如图3所示。

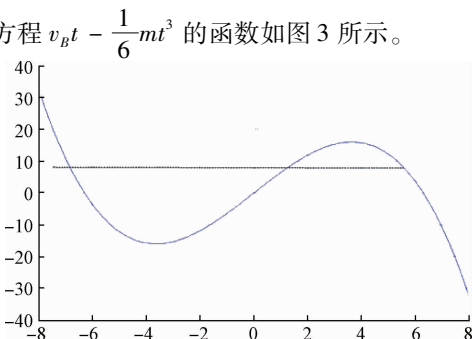


图3  $y = v_B t - \frac{1}{6}mt^3$  的函数曲线

Fig.3 Function curve for  $y = v_B t - \frac{1}{6}mt^3$

因此,对应某一特定值  $\Delta S$  而言,方程  $\Delta S = v_B t - \frac{1}{6}mt^3$  有3个根:一个负根,两个正根。而工程中考虑到速度是逐渐降低的过程,因此应该选取较小的根,即方程  $t^3 - \frac{6v_B}{m}t + \frac{6\Delta S}{m} = 0$  的根为:

$$t = -2\sqrt{-\frac{p}{3}\cos(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3})} = -2\sqrt{\frac{2v_B}{m}\cos(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3})} \quad (14)$$

其中  $\theta = \pi - \arctan(\frac{m}{3\Delta S}\sqrt{(\frac{2v_B}{m})^3 - (\frac{3\Delta S}{m})^2})$ , 代入式(11),得本小段的速度为:

$$v = v_B - \frac{1}{2}mt^2 = v_B - \frac{1}{2}m\left[-2\sqrt{\frac{2v_B}{m}\cos(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3})}\right]^2 = v_B\left\{1 - \left[2\cos(\frac{\theta}{3} + \frac{\pi}{3})\right]^2\right\} \quad (15)$$

本小段运行时间:  $t_3 = \frac{a_{max}}{m}$ ;

本小段末速度:  $v_2 = v_B - \frac{1}{2}mt_3^2 = v_B - \frac{a_{max}^2}{2m}$ ;

本小段行程:  $\Delta S_3 = \frac{v_B a_{max}}{m} - \frac{a_{max}^3}{6m^2}$ 。

## 4 应用

为了验证上述建模方法的有效性,我们将结果应用于山东某煤矿速度平滑技术改造项目,项目中速度—时间曲线如图4所示。

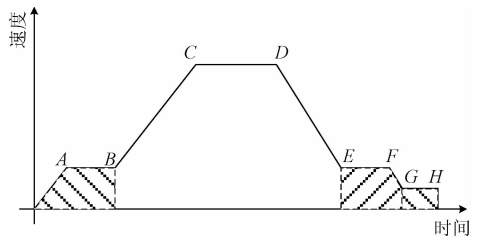


图4 某煤矿提升机的速度—时间曲线

Fig.4 The curve of speed-time for a mine hoist

在本项目中,要求对 B、C、D 和 E 4 个主要的拐点进行速度平滑,应用第2节中的结论对速度进行平滑,采用 STEP 7 在西门子 S7-300 单片机编程对 BC 段和 DE 段进行平滑实现,实现了预期的效果。由于提升机的加速度可以通过电流的情况进行追踪,因此在系统改造过程中通过双通道示波器对速度及加速度进行追踪,结果如图

5所示,其中横坐标表示时间,纵坐标表示速度,锯齿状曲线为加速度。

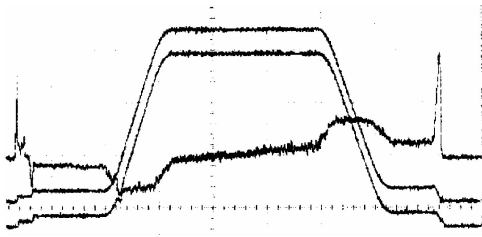


图5 速度平滑后的速度曲线

Fig.5 The speed curves after velocity smoothing

图5中,中间带毛刺的是加速度曲线,相对平滑的两条是两条速度曲线,下方的速度曲线是正常运行的曲线,上方的速度曲线是速度保护曲线,当提升机的实际运行速度超过保护曲线的速度时,将以保护曲线的速度为主。从图5中的加速度曲线可以看出,平滑后的4个点有效的实现了速度的平滑过渡,而未平滑的几个点存在加速度跳变的情况,这说明本文基于加速度和速度的关系建模,对速度平滑的改造取得了良好的平滑效果。

## 5 结 论

高速运动设备速度的平滑处理是保障设备安全、延长设备寿命的重要手段。考虑到一元三次方程是求解速度平滑问题的关键步骤,本文首先分析并推导了一元三次方程的解析解,然后将速度平滑问题分解为加速度匀加速、加速度保持和加速度匀减速3个阶段并分别建模,给出了各阶段速度控制的解析解。本方法基于一元三次方程得到解析解,求解精度高,易于程序实现,速度控制时过渡曲线平滑,适应高速运动场景。本方法已成功应用于山东某煤矿的提升机的速度平滑控制项目,长期运行测试效果良好且已经获得推广,运行效果良好。

## 参考文献

[1] 周向阳,贾媛,岳海潇,等. 惯性稳定平台变置信度优化平滑CMAC复合控制[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4): 764-771.  
ZHOU X Y, JIA Y, YUE H X, et al. MC & OS-based CMAC compound control of inertially stabilized platform for aerial remote sensing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 764-771.

[2] 谢宏,杨鹏,陈海滨,等. 遗传优化模糊PID融合算法的5自由度机械手控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1):21-30.  
XIE H, YANG P, CHEN H B, et al. Fuzzy PID control

system optimized by genetic algorithm for 5-freedom robot arm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(1):21-30.

- [3] 范狄庆,吴子岳. 矿井提升机理想S形速度运行曲线的模型研究[J]. 煤矿机械, 2006,27(2):241-244.  
FAN D Q, WU Z Y. Research on model of ideal running curve in mine hoist [J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(2):241-244.
- [4] 方逸远,刘正武,周敬烈. 基于加窗平滑的融合算法在单兵雷达中的应用[J]. 电子测量技术, 2015, 38(2):28-31.  
FANG Y Y, LIU ZH W, ZHOU J L. Fusion algorithm research in individual radar and implementation with median filter basing on the windowed smooth [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(2):28-31.
- [5] 田子怡,李云红. 基于多尺度Gabor滤波器的角点检测[J]. 国外电子测量技术, 2016,35(7):75-79.  
TIAN Z Y, LI Y H. Corner detection using multi-scale Gabor filters [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016,35(7):75-79.
- [6] 何波,罗磊,胡俊,等. 高速数控加工轨迹拐角的速度平滑方法[J]. 上海交通大学学报,2008,42(1):83-86.  
HE B, LUO L, HU J, et al. Smoothing algorithm for high speed machining at corner[J]. Journal of Shanghai JiaoTong University, 2008,42(1):83-86.
- [7] ZHANG D L, ZHOU L SH. Intelligent NURBS interpolator based on the adaptive feedrate control[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2007, 20(5):469-474.
- [8] 张得礼,周末水. 数控加工运动的平滑处理[J]. 航空学报, 2006,27(1):125-130.  
ZHANG D L, ZHOU L SH. Adaptive algorithm for feedrate smoothing of high speed machining [J]. Acta Aeronautica Astronautica Sinica, 2006,27(1):125-130.
- [9] HU J, XIAO L J, WANG Y H, et al. An optimal feedrate model and solution algorithm for a high-speed machine of small line blocks with look-ahead [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006,28(9):930-935.
- [10] 徐志明,冯正进,汪永生,等. 连续微小路径段的高速自适应前瞻插补算法[J]. 制造技术与机床, 2003(12):20-23.  
XU ZH M, FENG ZH J, WANG Y SH, et al. High-speed adaptive look-ahead interpolation algorithm for continuous micro path sections [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2003(12):20-23.
- [11] 孙玉娥,林浒,盖荣丽. 基于速度平滑控制的高效非

均匀有理 B 样条曲线插补算法[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(11):2248-2252.

SUN Y E, LIN H, GAI R L. Effective NURBS interpolation algorithm based on velocity smooth control[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008,14(11):2248-2252.

- [12] 梁宏斌,王永章,李霞. 自动调节进给速度的 NURBS 插补算法的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2006,12(3):428-433.

LIANG H B, WANG Y ZH, LI X. Research and implementation of NURBS interpolation algorithm for adaptive feed speed [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006,12(3):428-433.

- [13] 陈光胜,梅雪松. 一种小线段的非对称 S 曲线速度规划与前瞻算法[J]. 机械设计与制造, 2010(8): 47-49.

CHEN G SH, MEI X S. A dissymmetrical s curve velocity plan & look-ahead algorithm for small line segments[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(8):47-49.

- [14] 谢东,丁杰雄,杜丽,等. 高速加工运动性能预测方法研究[J]. 农业机械学报, 2014,45(6):333-340.

XIE D, DING J X, DU L, et al. High speed machining movement performance forecast method research [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6):333-340.

- [15] 潘海鸿,杨增启,陈琳,等. 一种优化轨迹段间衔接速度的自适应前瞻控制[J]. 机械工程学报, 2015, 51(5):151-159.

PAN H H, YANG Z Q, CHEN L, et al. An adaptive look-ahead control algorithm using optimized transition velocity between two trajectory segments [J]. Journal Of Mechanical Engineering, 2015,51(5):151-159.

## 作者简介



孙丽,1977 年出生,2000 年于齐齐哈尔大学获得学士学位,2004 年于东北石油大学获得硕士学位,现为鲁东大学信息与电气工程学院讲师,主要研究方向为数据挖掘、机器学习。

E-mail: water0262@163.com

**Sun Li** was born in 1977, received B. Sc. from Qiqihar University in 2000 and M. Sc. from Northeast Petroleum University in 2004, respectively. Now, she is a lecturer in School of Information and Electrical Engineering, Ludong University. Her main research direction is data mining and machine learning.



张小峰,1978 年出生,2005 年于兰州理工大学获得硕士学位,2014 年于山东大学获博士学位,现为鲁东大学副教授,主要研究方向为数据挖掘,数字图像处理等。

E-mail: iamzxf@126.com

**Zhang Xiaofeng** was born in 1978, received M. Sc. from Lanzhou University of Technology in 2005 and Ph. D. from Shandong University in 2014, respectively. Now, he is associate professor of Ludong University. His main research direction is data mining and digital image processing, etc.