

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.001

时变去除函数在气压砂轮抛光中的应用研究*

计时鸣, 蒋鑫鑫, 金明生*, 张 利

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对气压砂轮抛光中通过驻留时间控制材料去除量需在模具表面多去除一层材料及抛光效率低等问题, 提出了一种基于时变去除函数的抛光材料去除量控制方法。该方法以抛光工具所能达到的最大进给速度在模具表面进行抛光加工, 无需多去除材料, 通过实时改变抛光工具的去除能力以适应面形误差的变化, 极大地缩短了抛光时间; 开展了抛光材料去除过程研究, 建立了气压砂轮抛光工具进给速度与面形数据和抛光去除函数之间的关系, 提出了抛光过程时间的计算方法; 针对时变去除能力超出抛光工具最大去除能力的问题, 提出了在气压砂轮抛光中对需去除的材料进行分层抛光的思想。最后, 通过抛光过程时间对材料去除量控制的两种方法进行了对比分析。研究表明, 在气压砂轮抛光中采用时变去除函数来控制材料去除量能极大地提高抛光效率。

关键词: 气压砂轮; 驻留时间; 时变去除函数; 分层抛光

中图分类号: TH16; TG580.692 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)04-0409-06

Utilization of time-variant influence functions in pneumatic wheel precession polishing

Ji Shi-ming, JIANG Xin-xin, JIN Ming-sheng, ZHANG Li

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to solve the problem of the removal of an additional layer of material (uniform removal), across the workpiece surface in the application of the dwell time method in the pneumatic wheel precession polishing, a new approach considering time-variant influence functions was introduced to control the amount of materials polished to reduce the process time. Utilization of time-variant influence functions provides the basis that a polishing tool may move with a constant maximum velocity across the workpiece surface without additional uniform removal. The surface error profile was removed by changing the polishing tool removal characteristics during polishing process. After the analysis of the material removal process, the relationship between the velocity of the polishing tool and polishing removal function and surface error profile were established, and a calculating method of processing time was provided. When the polishing tool removal characteristic exceeds the value achievable in the pneumatic wheel precession polishing, the workpiece surface was polished layer by layer in a polishing process. The results indicate that the polishing efficiency can be greatly improved by the utilization of time-variant influence functions in the pneumatic wheel precession polishing process.

Key words: pneumatic wheel; dwell time; time-variant influence functions; layer by layer polishing

0 引 言

气压砂轮抛光是计时鸣等人^[1-2]提出的一种应用于模具曲面加工的新型抛光方法。其技术先进性在于: ①具有气囊抛光的特点, 可实现抛光工具与模具

表面的柔性接触; ②相比于气囊抛光, 气压砂轮抛光技术采用了表面软固结磨粒方法, 使得磨粒群获得更稳定的支撑, 从而形成了更为有效和平稳的切削效果, 提高了抛光效率。

通常, 抛光中材料去除量通过驻留时间^[3-6]控制。

收稿日期: 2013-10-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575208, 51205358); 浙江省教育厅项目(Y201225547)

作者简介: 计时鸣(1957-), 男, 浙江温州人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事先进加工技术方面的研究. E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

基于恒定的抛光工具去除能力(抛光中抛光工具去除函数不变),抛光工具在工件表面驻留时间越长,材料去除量越大,反之亦然;驻留时间的差异可通过抛光工具的进给速度来体现。需要去除的材料越少,抛光工具的进给速度就越高。但是,抛光工具的进给速度存在一个极限值,不可能达到无限大。为了不超出抛光工具所能达到的最大进给速度,采用驻留时间方法控制抛光材料去除量时需模具表面多去除一层材料,称之为多余去除层^[7-9]。多余去除层的存在使所需去除的材料变多,抛光时间变长。

为缩短气压砂轮抛光时间,提高抛光效率,本研究提出一种新的材料去除量控制方法—在抛光过程中根据面形误差的变化实时调整抛光工具的去除能力(即时变去除函数)。相比于驻留时间方法,通过在气压砂轮抛光中应用时变去除函数,可以使抛光工具以最大进给速度在工件表面进行抛光,且不需多余去除层,可极大地减少抛光时间,提高抛光效率。

1 气压砂轮抛光去除函数

到目前为止,数控抛光主要遵守的是 Preston 于 1927 年提出的 Preston 假设,气压砂轮抛光去除函数也是基于 Preston 假设获得的。Preston 假设认为在很大范围内,抛光可描述为一个线性方程^[10-11]:

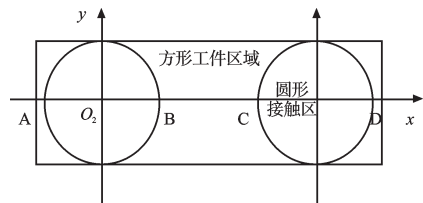
$$dz/dt = k \times p(x, y, t) \times v(x, y, t) \quad (1)$$

式中: dz/dt 一点 (x, y) 处的材料去除率; k 一比例常数,它由速度和压力以外的因素决定; $p(x, y, t)$ 一抛光接触区内各点的压力; $v(x, y, t)$ 一抛光工具与工件之间的相对速度。

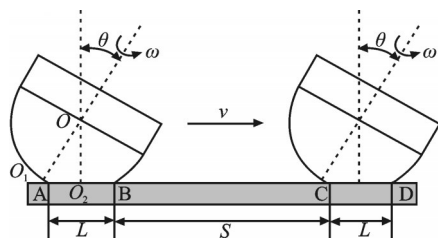
课题组前期已对气囊抛光中压力分布与速度分布进行了研究,提出了气囊抛光工具的去除函数模型,基于气压砂轮与气囊抛光工具的共性,气压砂轮抛光工具去除函数可采用前期研究所得。

本研究以气压砂轮抛光工具与平面模具接触为例,介绍气压砂轮抛光过程。如图 1(b)所示,抛光工具在工件表面沿 x 正方向作进给运动,抛光工具倾斜角为 θ ,自转角速度为 ω ,进给速度为 v 。抛光接触区长度为 L ,工件长度为 S ,抛光工具从 B 点开始接触工件,抛光工具从接触区右端点 B 运动到 D 点位置时,抛光工具完全离开工件,一个抛光过程结束,该过程中抛光工具进给距离为 $S+L$ 。图 1(b)的抛光投影图如图 1(a)所示。

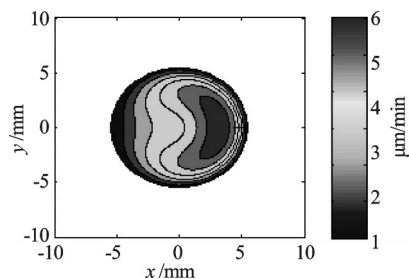
抛光工艺参数选择如表 1 所示。本研究采用表 1 所述工艺参数,基于去除函数模型进行仿真,可得抛光去除函数如图 1(c)所示。



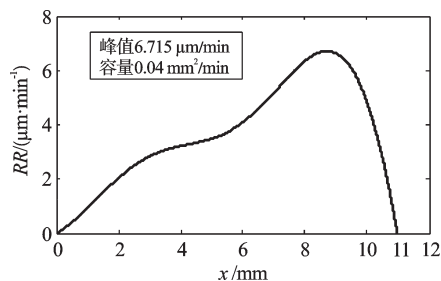
(a) 抛光接触区投影



(b) 气压砂轮抛光过程示意图



(c) 气压砂轮抛光去除函数



(d) $y=0$ 处气压砂轮抛光去除函数曲线

图 1 抛光示意及去除函数

表 1 抛光工艺参数选择

参数	数值
气压砂轮半径/mm	20
下压量/mm	2
倾角 $\theta/^\circ$	20
自转角速度/ $r \cdot \min^{-1}$	1000

通常可以用两个参数来表征抛光去除函数,一个是峰值,即抛光工具的最大材料去除率,单位为 $\mu\text{m}/\text{min}$;另一个是容量,即单位时间内抛光工具所能去除材料的体积,单位为 mm^3/min 。

为了问题描述方便,本研究选择一维变化的去除函数,在图 1(c)所示的气压砂轮抛光去除函数中选择 $y=0$,可得气压砂轮去除函数曲线如图 1(d)所示。由图 1 可知去除函数的峰值 $6.715 \mu\text{m}/\text{min}$,容量 $C=0.04 \text{ mm}^2/\text{min}$,接触区长度 $L=11 \text{ mm}$ 。

2 驻留时间控制抛光材料去除量

驻留时间是确保材料定量去除的重要实现方式。通常,抛光中材料去除量通过驻留时间控制,抛光工具在工件表面驻留时间越长,材料去除量越大,反之亦然。

气压砂轮抛光驻留时间的计算需要两个参数:工件的面形误差数据和抛光工具的去除函数。为了计算驻留时间,本研究除了需要图1(d)所示的气压砂轮抛光去除函数曲线,还需要模具表面的面形误差。

2.1 模具表面面形误差分布

模具表面面形误差代表的是实际面形与期望的理想面形之间的差距,其示意图如图2所示。它可表示为:

$$y = f(x) + H \quad (0 \leq x \leq S) \quad (2)$$

式中: S —模具表面的长度,为了不超出气压砂轮抛光工具所能达到的最大进给速度,应用驻留时间方法控制抛光材料去除量需要在模具表面多去除一层材料,即多余去除层; H —多余去除层的厚度,它是驻留时间方法控制抛光材料去除量的一个重要参数。

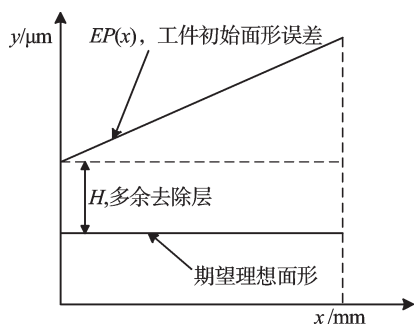


图2 面形误差示意

为了方便问题的描述,这里讨论的模具表面面形误差只随 x 轴一维变化。

2.2 抛光工具进给速度分布

已知模具表面的面形误差分布和抛光工具的去除函数,就可以计算出抛光工具在工件上的驻留时间模型,而驻留时间的倒数体现为抛光工具在模具表面上的进给速度。

进给速度计算原理示意图如图3所示。由图3可知,不管气压砂轮抛光工具的去除函数形状如何,抛光加工中模具表面上任一微小距离 dx 都会被整个抛光工具所通过。

基于模具表面的面形误差分布与抛光工具的去除函数,气压砂轮抛光工具进给速度为:

$$v(x) = \frac{1}{f(x) + H} \int_0^L RR(x) dx \quad (0 \leq x \leq S + L) \quad (3)$$

根据式(3)的计算可知,抛光工具在模具表面上

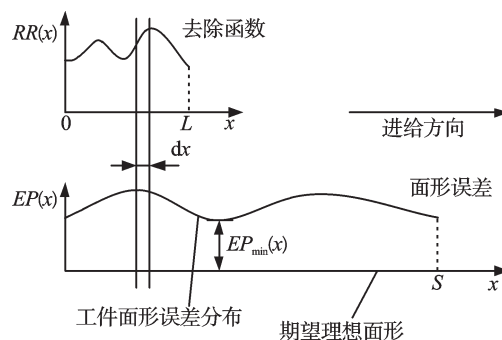


图3 进给速度计算原理示意图

沿 x 轴方向进给,因为抛光工具通过整个工件表面需移动的距离为其去除函数的长度 L 加上工件的长度 S ,式(3)只在 0 到 $S+L$ 处有效。

去除函数确定后,式(3)中的积分 $\int_0^L RR(x) dx$ 总为一个常值,表示为 C 。所以进给速度只与抛光工具去除能力有关,而与去除函数形状无关。

以 $V_{\max}$ 表示气压砂轮抛光工具最大进给速度,基于式(3),多余去除层的厚度 H 可计算为:

$$H = \frac{C}{v_{\max}} - EP_{\min}(x) \quad (0 \leq x \leq S) \quad (4)$$

假设模具表面面形误差可表示为:

$$f(x) = -0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x \quad (5)$$

该面形误差是由表面微观几何形状中的一个波峰扩大拉伸而来。式(5)中, $0 \leq x \leq 50\text{ mm}$,故工件长度为 $S = 50\text{ mm}$,面形误差 $0 \leq f(x) \leq 3\ \mu\text{m}$ 。

本研究假设气压砂轮抛光中 $V_{\max} = 100\text{ mm/min}$,采用如图1(d)所示的去除函数曲线,则:

$$H = \frac{C}{V_{\max}} - f_{\min} = \frac{0.04}{100} - 0 = 0.000\ 4 \quad (6)$$

基于如图1(d)所示的抛光工具去除函数曲线和式(5)所示的面形误差分布,气压砂轮抛光中采用驻留时间控制抛光去除量时,抛光工具沿 x 轴的进给速度可计算为:

$$v(x) = \frac{1}{|f(x)| + H} \int_0^L RR(x) dx = \frac{C}{|f(x)| + H} = \frac{0.04}{|-0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x| + 0.000\ 4} \quad (7)$$

式(7)中, $0 \leq x \leq 61$,速度变化如图4所示。

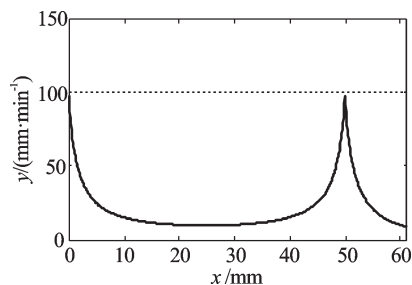


图4 气压砂轮进给速度分布

图4中,在 $x=0$ mm与 $x=50$ mm处,需去除的材料量最少,驻留时间最短,抛光进给速度最大,因最大进给速度不能为无穷大,材料去除量不能为0,需有多余去除层的存在;在 $x=25$ mm处,需去除的材料量最多,驻留时间最长,抛光工具的进给速度最小。

基于上述的气压砂轮进给速度分布,抛光加工去除如式(5)所示的面形误差,需要的抛光过程时间可计算为:

$$t_1 = \int_0^{L+S} \frac{1}{v(x)} dx = \int_0^{61} \frac{1}{0.04 / (|-0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x| + 0.000\ 4)} dx = 25 \int_0^{61} (|-0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x| + 0.000\ 4) dx = 3.525\ \text{min} \quad (8)$$

3 时变去除函数

气压砂轮抛光中通过驻留时间来控制抛光材料去除量存在以下不足:

(1) 通过驻留时间控制抛光去除量,需在模具表面多去除一层材料,增加了抛光加工的去除总量。

(2) 通过驻留时间来控制抛光去除量,抛光工具不能一直以最大进给速度做进给运动,增加了抛光时间,降低了抛光效率。

(3) 通过驻留时间来控制抛光去除量,由于模具表面的面形误差不可能均匀分布,抛光工具的进给速度一直处在上下波动之中,控制不够平稳。

针对抛光加工中通过驻留时间来控制材料去除量存在的不足,本研究提出在气压砂轮抛光中采用时变去除函数来控制抛光去除量的方法,即在抛光过程中抛光工具以最大速度做进给运动,通过改变抛光工具的去除能力 C 来适应面形误差的变化,控制材料去除量,以达到相同抛光效果下抛光时间最短、抛光效率最高为目的。

以时变去除函数来控制抛光去除量,不需要在工件表面多去除一层材料,即多余去除层 $H=0$ 。用 $C(x)$ 表示时变去除函数随时间变化的去除能力, $f(x)$ 表示模具表面的面形误差数据,则有:

$$V_{\max} = \frac{C(x)}{f(x)} \quad (0 \leq x \leq S+L) \quad (9)$$

则时变去除能力 $C(x)$ 可计算为:

$$C(x) = V_{\max} \times |f(x)| \quad (0 \leq x \leq S+L) \quad (10)$$

当面形误差 $f(x)$ 如式(5)所示,抛光工具最大进给速度 $V_{\max}=100$ mm/min时, $C(x)$ 为:

$$C(x) = 100 \times |-0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x| \quad (11)$$

此时完成去除目标所需抛光过程时间可计算为:

$$t_2 = \frac{S+L}{V_{\max}} = \frac{61}{100} = 0.61\ \text{min} \quad (12)$$

相比于采用驻留时间控制气压砂轮抛光去除量所需的3.525 min,采用时变去除函数只需0.61 min,抛光过程时间变为原来的1/6,极大地缩短了抛光时间,提高了抛光效率。

由式(10)可知,在气压砂轮抛光中采用时变去除函数控制材料去除量时,气压砂轮抛光工具的去除能力需随着面形误差的变化实时调整变化,而抛光中时变的去除能力 $C(x)$ 可通过影响去除能力的几个工艺参数(如下压量、抛光工具倾角和抛光工具自转角速度)的实时调整来实现,因抛光工具自转角速度对去除能力的调控灵敏度最高,且其调控简便,本研究优先调控自转角速度来获得时变去除能力。

4 分层思想的应用

不管是采用哪种抛光方式进行抛光加工,抛光工具的去除能力都不可能无限大,都存在一个极限值,气压砂轮抛光也一样,其去除能力存在一个极限值 $C_{\max}$ 。由式(11)可知,抛光工具时变的去除能力与工件面形误差的变化存在关系 $C(x)=V_{\max} \times f(x)$,面形误差的变化需要抛光工具的去除能力随之发生变化,当所需去除的材料层太厚时,就可能使得抛光工具去除能力的变化超出 $C_{\max}$,这样就难以完成预期的去除目标了。因此,采用时变去除函数控制气压砂轮抛光加工中材料去除量时存在以下两种情况:

(1) 当需去除的面形误差 $f(x) \leq C_{\max}/V_{\max}$ 时,气压砂轮抛光工具以 $V_{\max}$ 的恒定进给速度在模具表面进行抛光加工,通过抛光工艺参数的调控可以使得抛光工具时变的去除能力适应面形误差的变化;

(2) 当面形误差 $f(x) > C_{\max}/V_{\max}$ 时,如果气压砂轮抛光工具仍以 $V_{\max}$ 的恒定进给速度在模具表面进行抛光加工,那么此时为适应模具表面面形误差变化的抛光工具时变去除能力就超出了抛光工具所能达到的极限值,从而导致抛光去除的目标函数 $f(x)$ 不能被一次抛光加工完全去除,不能获得理想的表面面形。因此,该种情况下,需在抛光加工中应用分层去除思想,将需要去除的材料分成若干层,控制每一层的厚度,使得每一层中因面形误差变化而变化的抛光工具去除能力控制在抛光工具所能达到的极限值以内,这样以 $V_{\max}$ 进给的抛光工具就能完美地去除掉每一层中的材料。

如图5(a)所示,当 $f(x)_{\max} > C_{\max}/V_{\max}$ 时,本研究以

面形误差最大值处为分界线,从上往下对所需去除的材料进行分层,以 n 表示分层的层数, h_1 表示前 $n-1$ 层每一材料层的厚度, h_2 表示第 n 层材料层的厚度,各参数可计算如下:

$$h_1 = \frac{C_{\max}}{V_{\max}} \quad (13)$$

$$n = [f(x)_{\max}/h_1] + 1 \quad (14)$$

$$h_2 = f(x)_{\max} - (n-1) \times h_1 \quad (15)$$

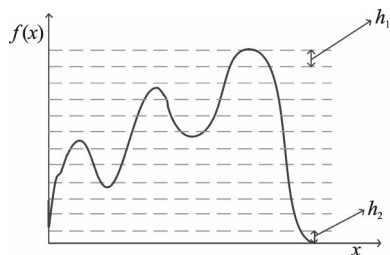
式(14)中, $[f(x)_{\max}/h_1]$ 表示不超过 $f(x)_{\max}/h_1$ 的最大整数。

当 $f(x)_{\max} \leq C_{\max}/V_{\max}$ 时,即为上述分层思想的特例,此时 $n=1$ 。

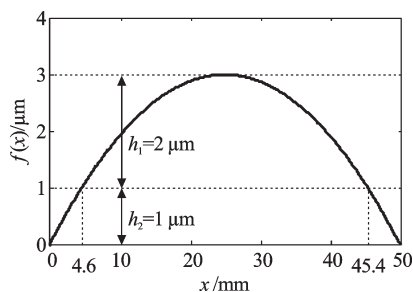
气压砂轮抛光分层去除材料时,去除每一层材料时,抛光工具的去除能力都需随着该材料去除层面形误差的变化而相应变化,以 $f_i(x)$ 表示第 i ($i=1,2,\dots,n$) 层面的面形误差分布,则第 i 层抛光工具的时变去除能力可表示为:

$$C_i(x) = f_i(x) \times V_{\max} \quad (16)$$

以式(5)所示的面形误差分布 $f(x)$ 为例,假设气压砂轮最大速度 $V_{\max}=100$ mm/min,气压砂轮抛光工具最大去除能力 $C_{\max}=0.2$ mm²/min,则 $h_1=C_{\max}/V_{\max}=0.2/100=2$ mm。式(5)所示面形误差 $0 \leq f(x) \leq 3$ mm, $f(x)_{\max} \leq 3$ mm $> h_1$,所以需对材料进行分层去除,分层数可计算为:



(a) 分层抛光思想示意



(b) 两层分层的应用

图5 分层抛光思想及应用

$$n = [f(x)_{\max}/h_1] + 1 = [3/2] + 1 = 2 \quad (17)$$

即将材料层分成如图5(b)所示的两层:第1层厚度 $h_1=2$ mm,第二层厚度可计算为 $h_2=f(x)_{\max}-h_1=1$ mm,此时抛光加工需分两步走:

第1步:抛光工具以 $V_{\max}$ 的进给速度沿 x 轴进行抛光加工,去除第一层材料,即图5(b)中 $1 \leq f(x) \leq 3$ mm 的材料层。这里需要注意的是去除这层材料时,面形误差变为:

$$f_1(x) = -0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x - 0.001 \quad (4.6 \leq x \leq 45.4) \quad (18)$$

去除该面形误差,抛光工具时变的去除能力需为 $C_1(x) = V_{\max} \times f_1(x)$ 。

第2步:抛光工具以 $V_{\max}$ 的进给速度在沿 x 轴进行抛光加工,去除第二层材料,即图5(b)中 $0 \leq f(x) \leq 1$ mm 的材料层。该材料层面形误差为:

当 $0 \leq x \leq 4.6$ 或 $45.4 \leq x \leq 50$ 时:

$$f_2(x) = -0.000\ 004\ 8x^2 + 0.000\ 24x \quad (19)$$

当 $4.6 < x < 45.4$ 时:

$$f_2(x) = 0.001 \quad (20)$$

此时抛光工具的时变去除能力可根据面形误差计算为 $C_2(x) = V_{\max} \times f_2(x)$ 。

在气压砂轮抛光中应用时变去除函数的同时采用分层去除的思想,可以使得在圆满完成去除目标的前提下抛光的效率最高,耗时最短。

5 结束语

(1) 针对气压砂轮抛光中通过驻留时间控制材料去除量需在模具表面多去除一层材料及抛光效率低等问题,本研究提出了一种基于时变去除函数的抛光材料去除量控制方法。抛光中抛光工具以最大进给速度进行抛光加工,通过实时改变去除能力以适应面形误差的变化。

(2) 通过计算比较发现,通过在气压砂轮抛光中采用时变去除函数控制材料去除量,能极大地缩短抛光过程时间,提高抛光效率。

(3) 针对由于需要去除的材料层太厚而导致时变去除能力超出气压砂轮抛光工具所能达到的极限值的情况,本研究提出了分层去除的思想,通过多次抛光以完成抛光任务。

(下转第430页)

本文引用格式:

计时鸣,蒋鑫鑫,金明生,等. 时变去除函数在气压砂轮抛光中的应用研究[J]. 机电工程,2014,31(4):409-413,430.

Ji Shi-ming, JIANG Xin-xin, JIN Ming-sheng, et al. Utilization of time-variant influence functions in pneumatic wheel precession polishing[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(4): 409-413, 430.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

5 结束语

本研究提出了一种实现S曲线加减速控制的新方法,简化了参数的指定方式—通过直接指定加减速时间代替加加速、减加速以及加速度、减速度来决定S形曲线的方式,将常用S形曲线7阶段模型简化为5阶段模型,解决了基于加减速时间控制的规划方法无法适用的情况,并根据运动长度的不同,进一步推导出了该规划算法的基本公式,保证了速度、加速度均能够实现连续变化,满足了柔性加工要求,减少了实际加工过程中的冲击,提高了加工质量。与原有的7阶段模型相比,参数的指定大为简化,使用更加方便直观。该方法已在16轴运动控制卡中得到了实际应用,并取得了较好的使用效果。

参考文献(References):

- [1] 张得礼,周来水. 数控运动加工的平滑处理[J]. 航空学报,2006,27(1):125-130.
- [2] 朱晓春,屈波,孙来业,等. S曲线加减速控制方法研究

- [J]. 中国制造业信息化,2006,35(23):38-40.
- [3] 张得礼,周来水. 数控运动加工的平滑处理[J]. 航空学报,2006,27(1):125-130.
- [4] 杨超,张冬泉. 基于S曲线的步进电机加减速的控制[J]. 机电工程,2011,28(7):813-817.
- [5] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. **International Journal Machine Tools & Manufacture**. 2001,41(9):1323-1345.
- [6] 郭新贵,李从心,阮雪榆. 采用线性加减速伺服系统的快速准确定位方法[J]. 机械工程学报,2003,39(7):74-78.
- [7] 张振华,赵福令. 数控系统终点控制算法研究[J]. 机械设计与制造,2008(8):163-165.
- [8] 胡鸿豪,吴勇种,肖 绚. CNC系统直线加减速优化算法[J]. 机床与液压,2008,36(5):287-289.
- [9] 邵现京,董金才,赵龙章,等. 基于新型加减速曲线的多步进电机控制的研究[J]. 自动化与仪表,2013,28(4):53-56.
- [10] 陈寿坤. 基于微机原理的步进电机控制[J]. 机电技术,2012(5):28-30.
- [11] 李晓辉,郭义杰,冷洪滨. S曲线加减速控制新方法的研究[J]. 控制与检测,2007(10):50-53.

[编辑:张 翔]

本文引用格式:

郑仲谦,王兴飞,李 松,等. 基于加减速时间控制的S形速度规划新算法研究[J]. 机电工程,2014,31(4):425-430.

ZHENG Zhong-qian, WANG Xing-fei, LI Song, et al. Algorithm of S-shape acceleration based on control of anticipation time[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014, 31(4):425-430.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第413页)

参考文献(References):

- [1] 计时鸣,张 利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.
- [2] 计时鸣,金明生,张 宪,等. 应用于模具自由曲面的气囊抛光新技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [3] 李全胜,成 晔,蔡复之,等. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J]. 光学技术,1999,5(3):56-62.
- [4] 俞 敏,杨 力,万勇建. 驻留时间参数优化分析[J]. 光学与光电技术,2006,4(1):5-7.
- [5] 万勇建,施春燕,袁家虎,等. 基于驻留时间补偿的抛光误差控制方法[J]. 强激光与粒子束,2011(1):97-100.
- [6] 汉语,伍 凡,万勇建. CCOS技术驻留时间的计算方法[C]//2009年先进光学技术及其应用研讨会论文集,红外与激光工程,2009:69-72.
- [7] SCHINHAERL M, RASCHER R, STAMP R, et al. Utilisa-

- tion of time-variant influence functions in the computer controlled polishing[J]. **Precision Engineering**, 2008(32): 47-54.
- [8] SCHINHAERL M, SMITH G, STAMP R, et al. Mathematical modelling of influence functions in the computer controlled polishing: Part I[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2008(32):2888-2906.
- [9] SCHINHAERL M, SMITH G, STAMP R, et al. Mathematical modelling of influence functions in the computer controlled polishing: Part II[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2008(32):2907-2924.
- [10] 陈伟强,计时鸣,金明生,等. 气囊连续进动抛光的转换模块设计[J]. 轻工机械,2013,31(1):24-28.
- [11] 金明生. 模具自由曲面抛光机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.

[编辑:罗向阳]