

二维激光连续切割移动材料路径算法及约束

胡 鹏 胡春燕 蒋念平

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要 提出了一种逐行获取信息的阅读文档(RW)模型,并利用该模型等效并推导出二维激光在二维空间定尺切割移动材料的路径关系。根据分析的路径和延迟的阶跃函数确定半连续、连续恒速、连续变速切割的路径算法。在理想情况下,只要设定好光刀均匀一致切割速度 v_y 、光刀在二维空间最大偏离坐标 (x_0, y_0) 、切割材料的最小尺寸 L_{MIN} ,就可以根据切割路径适当调节辅助切割过程中光刀移动速度 v_0 和被切割体进给速度 v_x ,实现对运动材料的连续切割,并且通过 Pro/E 运动仿真模拟和单位时间切割效率验证,所提出的 $G(t)$ 符合恒速体连续切割路径算法,且满足约束限制下,一个周期内可实现两段材料的连续剪切。

关键词 激光技术; 二维激光; 定尺切割; 路径; 算法; Pro/E

中图分类号 TG485; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1003012

Two Dimensional Laser Continuous Cutting in Moving Materials' Path Algorithm and Constraints

Hu Peng Hu Chunyan Jiang Nianping

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract One reading microsoft office word (RW) model is presented, which is an effective way for information acquisition line by line, on top of that, the relationship of the two-dimensional laser cutting path in the two-dimensional space for the fixed size cutting of the moving materials is easily deduced. By analysing the path and using the delay step function to definate algorithms about the semi-continuous, constant velocity-continuous, and variable velocity-continuous cuttings are derived. In an ideal situation, only the laser's uniform cutting velocity parameter v_y , laser's maximum offset coordinate (x_0, y_0) in the two dimensional space, and the materials' minimum cutting size L_{MIN} is identified, the continuous-cutting model by laser can come true with regulating the laser's moving velocity parameter v_0 and the materials' feed rate v_x in the auxiliary cutting process. Besides, for the constant velocity body, with the use of Pro/E and the analysis of the cutting efficiency in unit time, the proposed algorithm's rationality and reliability can be easily tested, and according to the constraints analyzed in the process, two pieces of fixed size materials can be cut constantly in one unit cycle time.

Key words laser technology; two dimensional laser; fixed size cutting; path; algorithm; Pro/E

OCIS codes 140.3460; 200.4880; 150.1135; 330.4150

1 引言

切割是现代材料加工的重要组成部分,对于传统的流水线材料剪切,其加工往往是半连续的,例如钣金材料的定尺切割(走停进料、静态剪切)。这种

加工方式效率不高,为此,寻找一种性价比高,适合特定约束下能对材料进行连续、优质、可靠切割的加工方式是提高材料加工效率的前提。

随着激光加工技术的发展,通过激光束作用下

收稿日期: 2014-04-10; **收到修改稿日期**: 2014-05-05

作者简介: 胡 鹏(1990—),男,硕士研究生,主要从事机械控制、电磁兼容等方面的研究。

E-mail: hfut_hupeng@126.com

导师简介: 胡春燕(1976—),女,硕士,讲师,主要从事图像处理与识别、计算机自动化控制与应用等方面的研究。

E-mail: hhuchy@163.com(通信联系人)

的材料表层电子与激光光子线性共振吸收热能^[1],使材料熔化或改善材料表面性能已经被大量应用于电子精细加工、钢铁及复合材料切割、表面处理等生产中^[2-3],特别是在文献[4-7]中,通过调节激光加工参数,可实现材料的均匀一致切割,达到优质、可靠加工的目的。然而在实际的材料剪切过程中,要想实现流水线材料的连续线性剪切,就必须对激光光刀切割移动材料的轨迹算法及约束进行研究。由此,针对被切割材料的进给速度变化情况,在光刀运动区间与光刀切割速度一定的前提下,寻找一种可适应材料不同进给速度下光刀切割轨迹的最优约束,为实现移动材料的连续随动定尺切割做好准备。

2 阅读文档模型的提出与等效

Reading Microsoft Office Word (RW)模型是在电脑上阅读 Microsoft Office Word 文档时通常采用的阅读方式。在阅读一个 Word 电子文档时,

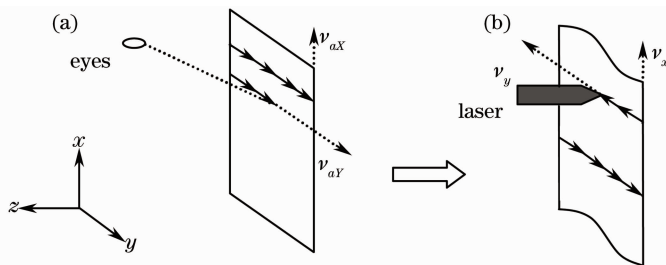


图 1 等效模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the equivalent model

为了能更好的分析激光切割移动材料的路径,取激光光刀初始位置为 z 轴,那么在 x - y 平面上,坐标原点即为光刀的零初始投影,考虑到实际材料加工过程中激光设备沿 x 轴、 y 轴移动的范围有限,取光刀沿材料运动方向所能切割的最大位移点坐标为 (x_0, y_0) ,如图 2 所示。取光刀离开坐标原点到首次返回坐标原点的的时间间隔为一个周期 T ,定义在一个周期 T 内光刀的轨迹为 G ,可知 $G(t)$ 为随时间变化光刀走过的路径函数,显然,在定义域内轨迹点

通常的习惯是从页面的“首字”阅读到页面的“尾字”,当读完当前页面后,滑动页面,以同样的方式阅读新页面。在这里,可以认为 Word 文档是以一定速度 v_{ax} 沿 x 轴正方向运动,如图 1(a)所示,而阅读者的眼睛则以一定的速度 v_{ay} 沿 y 轴获取信息。这种“自左而右、自上而下”逐行获取信息的方式,定义为 RW 模型,在阅读效率一定的前提下,最大阅读量 G_{max} 与 v_{ax} 、 v_{ay} 关系可定义为

$$G_{max} = G(v_{ax}, v_{ay}), \quad (1)$$

对于流水线生产的材料,从理想的情况下可认为材料的厚度和切割长度是不变的,即在 y 轴材料的宽度(所切割长度)和 z 轴上材料的厚度是均匀一致的,如图 1(b)所示。在光刀切割的过程中,材料以速度 v_x 沿 x 轴运动,光刀随动且沿 y 轴以定速 v_y 切割移动材料,由(1)式可知,光刀在空间中走过的最短路径为

$$G_m = G(v_x, v_y), \quad (2)$$

$G(t)$ 为广义的连续函数。

此外,为了能找到适应不同进给速度的切割约束,保证光刀切割走过的路径最短,对于 $G(t)$ 的分析可从半连续切割(走停进给、静态切割,在被切割体进给过程可认为 v_x 匀速且恒定)、连续恒速切割、连续变速切割三种状态下进行讨论。

3 切割路径 $G(t)$ 及其描述

光刀的切割路径主要由实际切割和辅助切割路径组成^[8],实际切割过程中,光刀对移动材料进行实际切割,在辅助切割过程中,光刀移动进而为实际切割做准备。由于被切割体进给速度的差异,对于切割路径 $G(t)$ 的分析可从半连续、连续恒速、连续变速三种情况展开研究。

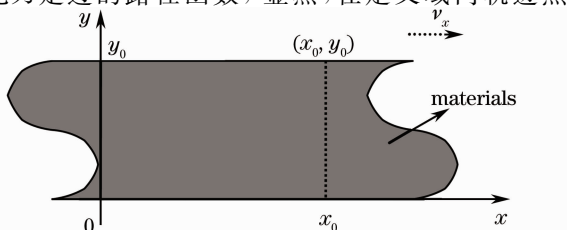


图 2 激光的移动范围

Fig. 2 Movement scope of the laser

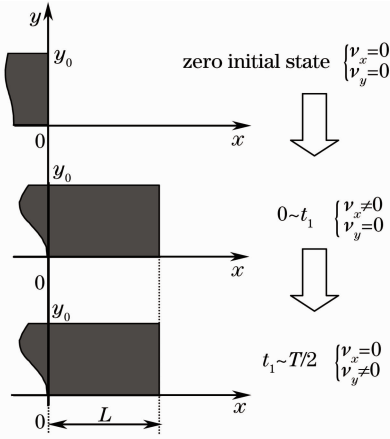


图 3 0~T/2 半连续切割示意图

Fig. 3 Schematic diagram of semi-continuous cutting during 0~T/2

3.1 半连续定尺切割

在半连续定尺切割过程中,设原点为光刀的零初始状态,如图 3 所示。此时有 $v_x = 0, v_y = 0$,光刀移动路程为 $G(t) = 0$;在 $0 \rightarrow t_1$ 过程中,假定匀速定尺进给 L 的速度 v_x 为非零常数, $v_y = 0, G(t) = 0$; $t_1 \rightarrow T/2$ 过程中, $v_x = 0$,激光光刀以定速 v_y 沿 y 轴正方向切割;在 $T/2$ 时刻,完成长度为 L 的材料切割,之后又经 t_1 时间段定尺进给,然后激光光刀以定速 v_y 沿 y 轴负方向切割,在一个周期 T 内,完成了两段长度为 L 的材料切割,光刀在二维空间中移动路径为 $0 \rightarrow (0, y_0) \rightarrow 0$ 。

显然,根据上面分析和(2)式可知,在半连续切割过程中,光刀在二维空间路径函数 $G(t)$ 为

$$G(t) = \begin{cases} (n-1)y_0, & t \in \left[\frac{n-1}{2}T, t_1 + \frac{n-1}{2}T \right] \\ t[(n-1)y_0 + v_y] \left[\epsilon(t - nt_1) - \epsilon\left(t - \frac{T}{2}n\right) \right], & t \in \left[\frac{n-1}{2}T + t_1, \frac{n+1}{2}T \right] \end{cases}, \quad (3)$$

式中 n 为从零初始开始激光光刀切割过的第 n 段材料,一般 $n=1, 2, 3, \dots$ 。

t_1 为匀速定尺进给 L 所需的时间,且有:

$$L = v_x t_1.$$

v_y 为激光光刀纵向移动速度,且有:

$$y_0 = v_y \left(\frac{T}{2} - t_1 \right).$$

3.2 恒速体的连续定尺切割

与半连续切割不同的是,恒速体的连续定尺切割过程中被切割材料始终以 v_x 匀速送进。光刀停留在原点,保持静止,被切割体由 y 轴以 v_x 匀速送进,如图 4 所示,经时间 t_1 ,被切割体送进 L ,光刀开始动作,此时有 $G(t) = 0$ 。

为保证连续切割的稳定性,设定实际切割过程中,光刀与被切割体在 x 轴方向上相对静止,那么,在切割第一段运动体的过程中,光刀实际轨迹为 $0 \rightarrow A$,切割所用的时间为 y_0/v_y ,此时有:

$$G(t) = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} t \{ \epsilon(t - t_1) - \epsilon(t - t_2) \}, \quad t \in [t_1, t_2],$$

式中 t_2 为光刀恰好剪切完第一块的时刻,且

$$t_2 = t_1 + \frac{y_0}{v_y}.$$

光刀从 A 返回 $(0, y_0)$,被切割体仍按照速度 v_x 匀速送进,设光刀从 A 返回 $(0, y_0)$ 的速度为 v_0 ,为保证切割的连续性,此时有:

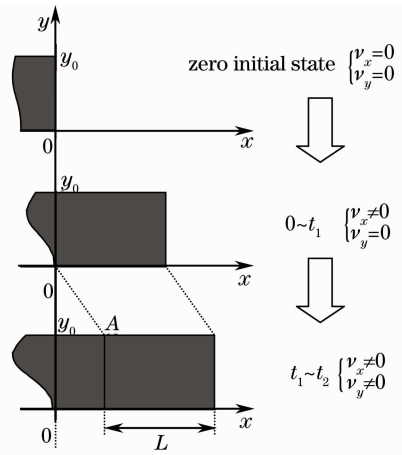


图 4 0~t₂ 连续切割示意图

Fig. 4 Schematic diagram of continuous cutting during 0~t₂

$$\frac{v_x}{v_y} \left(\frac{v_x}{v_0} + 1 \right) y_0 \leq L,$$

$$G(t) = v_0 t \{ \epsilon(t - t_2) - \epsilon(t - t_3) \}, \quad t \in [t_2, t_3].$$

式中 t_3 为光刀转移到 $(0, y_0)$ 准备切割下一段运动体的时刻,且有:

$$t_3 = t_1 + \frac{y_0}{v_y} + \frac{y_0}{v_y} \times \frac{v_x}{v_0}.$$

之后重复 $0 \rightarrow A \rightarrow 0$,完成第二段运动体的切割,并返回原点,综上分析,参考(2)式、(3)式,可得光刀在二维空间路径函数为

$$G(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_1] \\ t \left[(n-1)y_0 \frac{v_x}{v_y} + \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \right] [\varepsilon(t-t') - \varepsilon(t-t'')], & t \in [t', t''] \\ v_0 t \left[n \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \frac{y_0}{v_y} \right] [\varepsilon(t-t'') - \varepsilon(t-t''')], & t \in [t'', t'''] \end{cases}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} t' &= t_1 + (n-1) \frac{y_0}{v_y} \left(1 + \frac{v_x}{v_0} \right), \\ t'' &= t_1 + \frac{y_0}{v_y} + (n-1) \frac{y_0}{v_y} \left(1 + \frac{v_x}{v_0} \right), \\ t''' &= t_1 + n \frac{y_0}{v_y} \left(1 + \frac{v_x}{v_0} \right), \end{aligned}$$

且有:

$$\frac{v_x}{v_y} \left(\frac{v_x}{v_0} + 1 \right) y_0 \leq L.$$

3.3 变速体的连续定尺切割

在实际工程中,被切割体在流水线上的移送速度是时变的,为保证连续一致切割,在被切割体送进方向上,光刀速度分量要与其保持一致^[9-11]。为了

能达到这种效果,设变速体速度为 $v_x(t)$,显然它都离不开进给电机的速度变化范围 $[v_{\min}, v_{\max}]$,切割一段时间 t 内,变速体进给长度为

$$L' = \int_0^t v_x(t) dt.$$

显然,在 $(0 \sim t)$ 时间内存在某点速度 $v_x(t_0) \in [v_{\min}, v_{\max}]$,使得

$$L' = \int_0^t v_x(t) dt = v_x(t_0)t.$$

可认为在切割过程中,材料的进给速度恒定为 $v_x(t_0)$,那么,根据(4)式,可得到光刀在二维空间路径函数为

$$G(t) = \begin{cases} 0, & t \in [0, t_1] \\ t \left[(n-1)y_0 \frac{v_x(t_0)}{v_y} + \sqrt{v_x(t_0)^2 + v_y^2} \right] [\varepsilon(t-t') - \varepsilon(t-t'')], & t \in [t', t''] \\ v_0 t \left[n \sqrt{v_x(t_0)^2 + v_y^2} \frac{y_0}{v_y} \right] [\varepsilon(t-t'') - \varepsilon(t-t''')], & t \in [t'', t'''] \end{cases}, \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} t' &= t_1 + (n-1) \frac{y_0}{v_y} \left[1 + \frac{v_x(t_0)}{v_0} \right], \\ t'' &= t_1 + \frac{y_0}{v_y} + (n-1) \frac{y_0}{v_y} \left[1 + \frac{v_x(t_0)}{v_0} \right], \\ t''' &= t_1 + n \frac{y_0}{v_y} \left[1 + \frac{v_x(t_0)}{v_0} \right], \end{aligned}$$

且有:

$$\frac{v_x(t_0)}{v_y} \left[\frac{v_x(t_0)}{v_0} + 1 \right] y_0 \leq L.$$

4 路径算法及约束的模拟与分析

4.1 基于 Pro/E 的激光二维切割模拟及约束

光刀连续定尺切割运动体是现代机床设计与发展的一个重要方向,对于剪切系统的设计,一方面要考虑剪切的功能要求,例如剪切材料的尺寸范围^[12],另一方面要对连续定期切割系统各级功能部件进行优化配置^[13],并辅助整机虚拟样机进行开

发,缩短设备的开发周期。二维激光定尺切割移动材料的过程中,受光刀切割速度、移动范围的限制,在最短的路径内完成最长的实际切割是符合(2)式基本思想的。

综上所述,在理想情况下,可认为变速体是以 $v_x(t_0)$ 作恒速进给的,为此,可针对恒速体的路径算法和约束进行研究,利用 Pro/E 仿真,可模拟二维光刀在空间的路径轨迹,如图 5 所示。

由图 5 和(4)式、(5)式可得,激光在二维坐标下的路径 $G(t)$ 随时间变化的关系,如图 6 所示,其中 $\tan \alpha = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, $\tan \beta = v_0$ 。

显然,材料恒速进给时,激光在二维平面上的运动轨迹是连续的。因此,为保证连续切割,需要满足如下约束:

- 1) 在实际切割过程中,光刀沿被切割体进给方向上与其保持相对静止;
- 2) 所切割材料的最小长度 L_{\min} 不小于光刀切

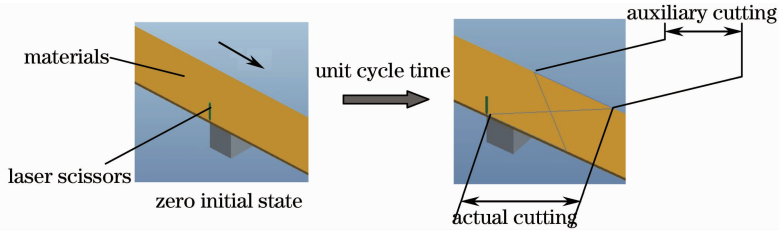


图 5 单位周期切割路径的 Pro/E 仿真

Fig. 5 Cutting path of unit cycle time with Pro/E simulation

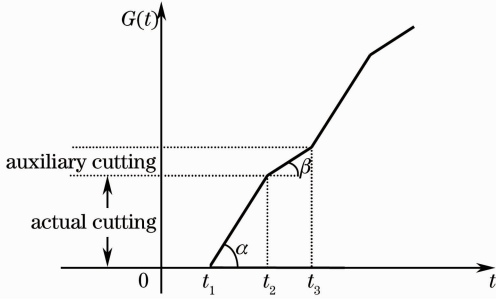


图 6 切割轨迹 $G(t)$ 的变化示意图

Fig. 6 Schematic of cutting trajectory $G(t)$ changes

割过程中被切割体进给的长度,即:

$$\frac{v_x}{v_y} \left(\frac{v_x}{v_0} + 1 \right) y_0 \leq L_{\text{MIN}}$$

4.2 路径算法及约束的合理性分析

(1)式中,如果单位时间内获取的信息量越大,则算法越优,同样,为保证(2)式、(4)式和(5)式的优越性,可对比(3)式半连续切割在单位时间内切割的材料数目。为此,可通过激光器切割强化玻璃来模拟,选用新锐 F100W 激光器,为实现均匀一致切割,切速 v_y 可取 230 mm/s^[14],材料的进给速度 v_x 约为 200 mm/s原材料和加工后的材料尺寸如表 1 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Parameters of the material

	Length in x axis /mm	Width in y axis /mm	Thickness in z axis /mm
Raw materials	10000	800	0.7
Final products	1200	800	0.7

1) 走停进给、静态切割

显然,在 $0 \rightarrow T/2$ 过程中,辅助切割时间 t_1 为 6 s,实际切割实际约为 3.5 s,半个周期($T=19$ s)内切割一块玻璃板,切割 n 段材料所用时间为 $9.5n$ s。

2) 连续进给、连续切割

实际加工过程中,材料的进给速度为时变的,为了分析方便,可认为材料以恒速进给。由(4)式和(5)式可知,在第 6 s 时开始切割,约第 9.5 s 切完第一段材料,等待 2.5 s(辅助切割时间),在第 15.5 s 切完第二段材料,……,以此类推,当切割切割 n 段材料所用时间为 $3.5 + 6n$ s。

相比于传统的切割算法(走停进给、静态切割),随着板料加工数目的增多,连续进给切割的优越性

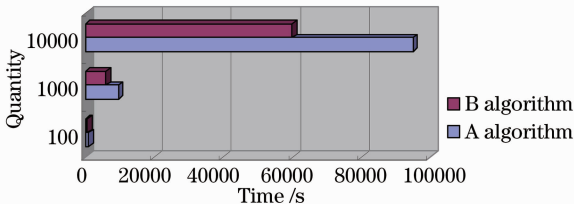


图 7 算法的优越性对比

Fig. 7 Superiority comparison of the two algorithms

日益明显。如图 7 所示,A 算法对应(3)式(走停进给、静态切割),B 算法对应(4)式和(5)式(连续进给、连续切割),分别加工 100、1000、10000 块同规格板材,(4)式和(5)式切割轨迹所用时间更短。

5 结 论

1) 提出了一种 RW 模型,为二维激光连续切割移动材料提供等效模型。

2) 通过分析,确定了光刀在不同工况下的路程函数 $G(t)$ 。既可以根据 $G(t)$ 对最优约束进行检验,也可以根据 $G(t)$ 设计被切割体伺服进给和光刀随动逐行定尺切割系统的相关控制,深入对虚拟样机的研究,为成套设备的实现与设计提供理论依据。

3) 确定了点随动逐行定尺切割运动体的约束方案:在实际切割过程中,保证光刀沿被切割体进给方向上与其保持相对静止;要求所切割板的最小长度 L_{MIN} 不小于光刀切割过程中被切割体进给的长度。

4) 利用 Pro/E 运动仿真模拟在最优约束下光刀在空间中的轨迹,并通过单位时间内切割的数目

说明最优约束算法的合理性,可实现对被切割体进给速度 v_x 、光刀辅助切割过程移动速度 v_0 和最小加工板材长度 L_{MIN} 进行合理性选择、判断。

参 考 文 献

- 1 Yan Jixiang. Principle of Laser Technology and Applications [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 265.
阎吉祥. 激光原理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 265.
- 2 Wang Guobiao. Photonic manufacturing science & technology: overview and outlook [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21): 157-168.
王国彪. 光制造科学技术的现状和展望[J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 157-168.
- 3 Jiao Junke, Wang Xinbing, Li Youping. Experimental study of cutting glass by dual CO₂ laser beams[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(11): 1808-1812.
焦俊科, 王新兵, 李又平. 双束 CO₂ 激光切割玻璃的实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11): 1808-1812.
- 4 Ma Nangang, Wang Xijun, Ding Huajun, *et al.*. Laser cutting processing and mechanism for thick boron plate[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(10): 1441-1445.
马南钢, 王希军, 丁华东, 等. 碳化硼厚板的激光切割工艺及其机制[J]. 中国激光, 2007, 34(10): 1441-1445.
- 5 Wang Shiyong, Li Di, Chen Chao. Power control and synchronization control between power and motion in laser-cutting machining[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(3): 118-122.
王世勇, 李迪, 陈超. 激光切割的功率控制及其与运动的同步控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2010, 38(3): 118-122.
- 6 Si Lizhong. Research on the direction of focused beam of numerical-control laser cutting machine by focusing lens [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 011403.
司立众. 透镜聚焦数控激光切割机聚焦光束方向研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 011403.
- 7 Gao Shiyong, Ma Lei, Zhang Runsheng. Method of monitoring cutting point state in laser cutting plank process based on vision [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0203007.
高士友, 马雷, 张润生. 基于视觉激光切割厚板切割状态监控方法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0203007.
- 8 Rao Yunqing, Wang Yuhui, Liu Yanlin. Engineering applications of 2-D CNC laser cutting[J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech, 1994, 22(10): 9-14.
饶运清, 王瑜辉, 刘延林. 二维 CNC 激光切割的工程应用[J]. 华中理工大学学报, 1994, 22(10): 9-14.
- 9 Yu Hongxiang, Zhang Yu, Pan Xuhua. Research on novel motion model of noncircular follow grinding for crankshaft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(13): 167-174.
俞红祥, 张昱, 潘旭华. 曲轴新型非圆随动磨削运动模型的研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(13): 167-174.
- 10 Zhang Heping, Yu Yingliang, Peng Lei. NC (speed linear/double variable motion) in the uniform variable pitch screw[J]. Modern Manufacturing, 2005, (9): 116-118.
张和平, 余英良, 彭磊. 数控(变速直线/双变速运动)加工匀变螺距丝杠[J]. 现代制造工程, 2005, (9): 116-118.
- 11 Liu Zhigang, Lu Huanzhang, Chen Huihuang. Point target detection algorithm based on multistage velocity matching[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, 33(4): 366-370.
刘志刚, 卢焕章, 陈辉煌. 基于分段复合速度匹配的点目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2004, 33(4): 366-370.
- 12 Zhang Ce. Mechanical Principles and Mechanical Design [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 17.
张策. 机械原理与机械设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004. 17.
- 13 Xu Jinghua, Zhang Shuyou, Li Yan. Modular configuration design method for numerical control machine tools based on multi-domain mutual-use[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(7): 127-134.
徐敬华, 张树有, 李焱. 基于多域互用的数控机床模块化配置设计[J]. 机械工程学报, 2011, 47(7): 127-134.
- 14 Wang Xinggang, Zhou Ming, Di Jianke, *et al.*. Numerical simulation and experiment of CO₂ laser cutting electronic strengthened glass[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 091402.
王星罡, 周明, 狄建科, 等. CO₂ 激光切割电子强化玻璃过程的有限元模拟与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(9): 091402.

栏目编辑: 张浩佳