

# 数控飞剪运动分析与仿真

黄永生, 郇 极

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083)

发表于《机械工程师》2007年第12期

**摘 要:** 介绍了数控飞剪的工作原理, 建立了数控飞剪的控制函数和仿真模型, 利用 MATLAB 对数控飞剪运动进行了仿真分析, 仿真方法和结果为数控飞剪控制系统性能分析和控制参数设定提供了重要依据。

**关键词:** 数控飞剪; 电子凸轮; 控制函数; MATLAB; 仿真

**中图分类号:** TP 391.9 **文献标识码:** A

## Kinematics analysis and simulation for NC flying shear

HUANG Yong-sheng, HUAN Ji

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The working principle of NC flying shear was introduced. The control function and the simulation model for NC flying shear were proposed, and the motion was simulated and analyzed with MATLAB. The simulation method and the results provide an important basis for the performance analysis and parameter setting of NC flying shear control system.

**Key words:** NC flying shear; electronic cam; control function; MATLAB; simulation

飞剪是工业上常用的一种进行连续定长剪切的自动化加工设备, 通常用于金属、塑料、纸张等带材的剪断。传统飞剪依靠曲柄连杆机构、机械凸轮等完成剪切动作, 其缺点是: 结构复杂, 磨损严重, 加工精度和速度不高, 操作和调整困难。近十几年, 数字控制和伺服技术取得了飞速的发展, 现代飞剪开始应用数字控制。相对于传统飞剪, 数控飞剪具有精度高、柔性好、加工速度高等优点。本文在介绍数控飞剪工作原理的基础上, 建立了数控飞剪的控制函数和仿真模型, 并利用 MATLAB 对数控飞剪运动进行了仿真分析。

## 1 数控飞剪工作原理

### 1.1 电子凸轮<sup>[1]</sup>

数控飞剪控制系统的核心是电子凸轮技术。电子凸轮采用数字伺服系统实现机械凸轮机构的功能, 具有控制灵活、精度高、无磨损、控制距离远等优点。

传统机械凸轮工作原理如图1(a)所示, 凸轮转角  $X$  与触销位置  $Y$  的运动关系由凸轮轮廓曲线确定。电子凸轮的工作原理如图1(b)所示,  $X$ 轴由外部其它装置驱动, 其运动位置由检测装置获得, 在每个控制周期, 控制器根据给定的电子凸轮曲线计算出  $Y$ 轴的位置指令, 控制电机产生所要求的运动。

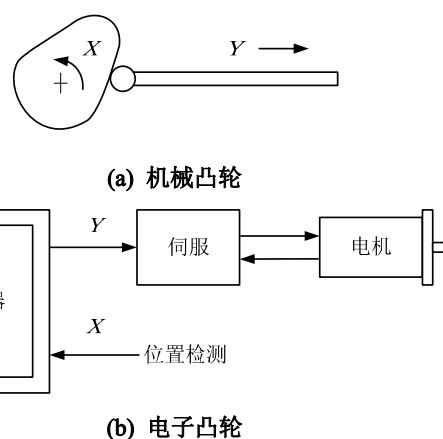


图1 机械凸轮和电子凸轮的工作原理

### 1.2 控制函数

数控飞剪采用图1(b)所示的电子凸轮结构, 其中  $X$ 轴为送料长度,  $Y$ 轴为切刀相对于剪切点的周向位移。系统结构如图2所示, 送料辊推动带材进行匀速送料; 测量辊上装有编码器, 可以检测送料长度信息; 上下剪切辊上装有切刀, 由一台伺服电机通过一对齿轮分别驱动。测量编码器将检测到的送料长度信息送至控制系统, 控制系统根据控制函数计算出相应的位置指令, 并发送给伺服电机, 从而带动剪切辊完成剪切动作。

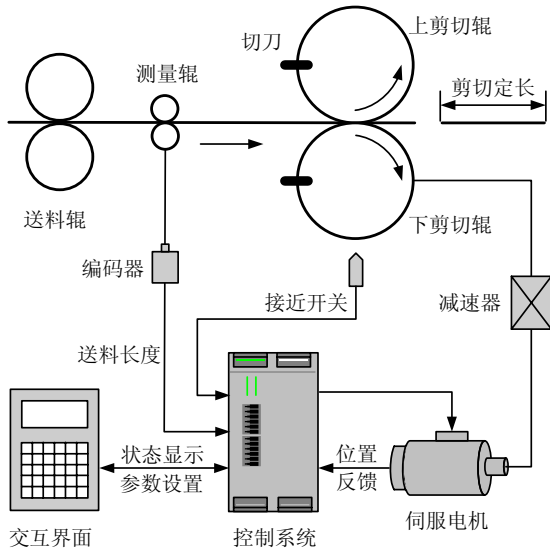
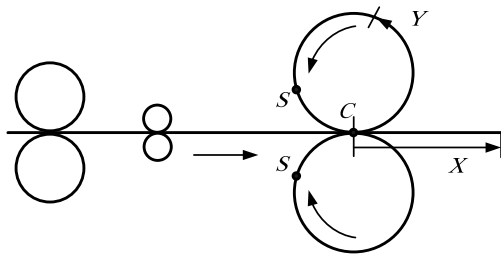
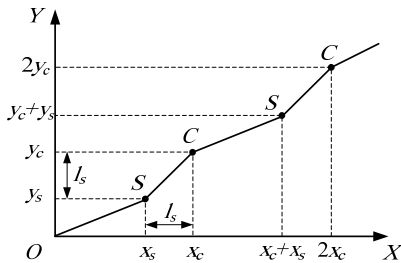


图2 数控飞剪系统结构图



(a) 剪切动作示意图



(b) 控制函数

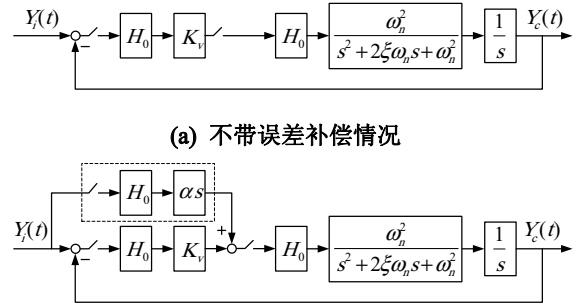
图3 数控飞剪动作示意和控制函数

数控飞剪采用位置控制，剪切辊旋转一周过程中，分为“同步区域”和“非同步区域”。具体的剪切动作如图3(a)所示：从剪切点C开始，系统处于非同步区域，切刀以 $Y=kX$ 的关系运动到同步点S；在S点和C点之间，系统处于同步区域，切刀与带材保持同步运动，在C点将确定长度的带材切断。图3(b)给出了飞剪运行两个周期的控制函数，其中 $y_c$ 表示剪切辊周长， $x_c$ 表示剪切长度， $l_s$ 表示同步长度， $k$ 为非同步系数，其大小与剪切长度相关。

## 2 伺服系统数学模型

数控飞剪一般采用直流伺服电机或交流

同步电机驱动，其伺服系统是一种三阶采样控制位置随动系统，结构如图4所示，其中 $H_0$ 表示采样保持器，典型伺服系统的参数为<sup>[2]</sup>：固有频率 $\omega_n = 80 \sim 150 \text{ s}^{-1}$ ，阻尼系数 $\xi = 0.7 \sim 0.9$ ，位置增益 $K_v = 10 \sim 50 \text{ s}^{-1}$ ，采样控制周期 $\Delta T = 1 \sim 8 \text{ ms}$ 。



(a) 不带误差补偿情况

(b) 采用前馈补偿情况

图4 数控飞剪伺服系统结构图

图4(a)所示的伺服系统在速度输入下存在位置跟踪误差，稳态误差值 $e$ 与加工速度 $v$ 和系统位置增益 $K_v$ 相关<sup>[3]</sup>：

$$e = \frac{v}{K_v} \quad (1)$$

为保证飞剪进行剪切时的同步性能，一般可以通过引入图4(b)所示虚线框中的前馈控制环节对跟踪误差进行补偿，此时伺服系统的稳态跟踪误差<sup>[4]</sup>：

$$e = \frac{v(1-\alpha)}{K_v} \quad (2)$$

其中 $\alpha$ 为前馈系数，当 $\alpha = 1$ 时，系统变为II型系统，稳态跟踪误差 $e = 0$ ，但此时的系统在高速运行下容易产生振动。

## 3 MATLAB 运动仿真与分析

MATLAB 是目前国际上最流行和普及的一种科学和工程计算工具，具有丰富和广泛的数据计算、图形处理和系统仿真功能<sup>[5]</sup>。SIMULINK 是 MATLAB 中进行动态系统建模、仿真和综合分析的集成软件包，本文利用 SIMULINK 对数控飞剪的运动进行了仿真和分析。

### 3.1 系统建模

本文对采用前馈补偿的数控飞剪控制系统进行仿真，用 SIMULINK 提供的标准模块可以很方便地建立系统的仿真模型，如图5所示。在仿真过程中，数控飞剪的X轴为送料长度的实际值，没有伺服系统作为中间环节。

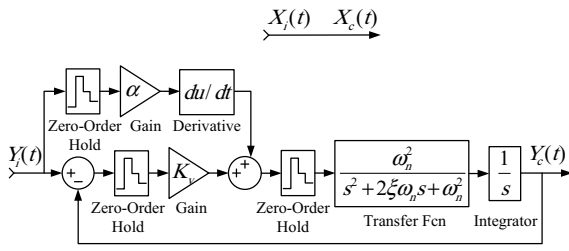


图5 数控飞剪 Simulink 仿真模型

本文选取典型系统参数进行仿真，参数值： $\omega_n = 120 \text{ s}^{-1}$ ， $\xi = 0.7$ ， $K_v = 35 \text{ s}^{-1}$ ， $\Delta T = 4 \text{ ms}$ ， $\alpha = 1$ 。

### 3.2 输入函数

正常运行时，飞剪进行连续的循环加工，为研究方便，实际仿真中仅选取3个运行周期 ( $n=0,1,2$ )，设送料速度为  $v$ ， $T = x_c / v$ ， $T_1 = (x_c - l_s) / v$ ，输入函数如图6所示。

当  $t \in [nT, nT + T_1]$  时，即非同步区域，

$$\begin{cases} X_i(t) = vt \\ Y_i(t) = k(vt - nx_c) + ny_c \end{cases} \quad (3)$$

其中非同步系数  $k = (y_c - l_s) / (x_c - l_s)$ 。

当  $t \in [nT + T_1, (n+1)T]$  时，即同步区域，

$$\begin{cases} X_i(t) = vt \\ Y_i(t) = vt - (n+1)x_c + (n+1)y_c \end{cases} \quad (4)$$

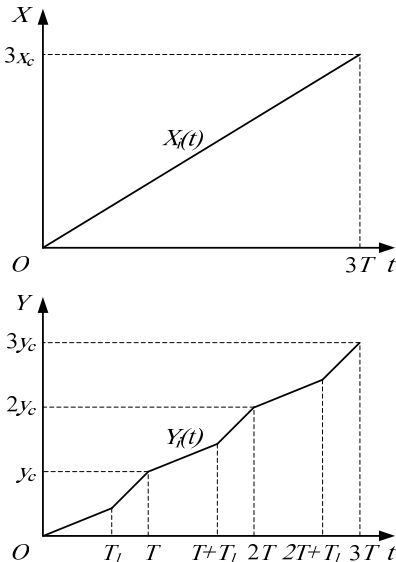


图6 输入函数

### 3.3 仿真分析

考虑到第一个运行周期的初始状态为零，不具有代表性，本文中选取第二个运行周期的仿真结果进行观察和分析。

#### 3.3.1 典型实例

选取剪切辊周长  $y_c = 400 \text{ mm}$ ，剪切长度  $x_c = 600 \text{ mm}$ ，同步长度  $l_s = 200 \text{ mm}$ ，加工速度  $v = 80 \text{ m/min}$ ，仿真结果如图7所示。可以看出，指令轨迹从非同步区域进入同步区域时，实际轨迹要先经过一个“调节区域”才会进入“稳定同步区”。

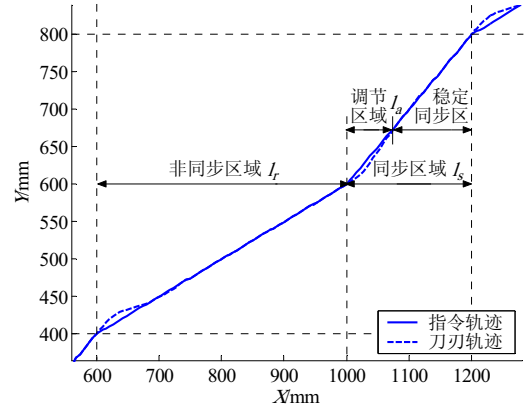


图7 典型仿真结果

要保证剪切质量，必须保证在剪切之前达到稳定同步。对于采用直刀的飞剪，同步长度  $l_s$  须满足

$$l_s \geq l_a \quad (5)$$

其中  $l_a$  为调节区域长度。采用螺旋刀可以减小剪切力，提高剪切质量，其剪切过程是从幅宽的一端到另一端的动态剪切，此过程中必须保证稳定同步，此时同步长度  $l_s$  须满足

$$l_s \geq l_a + l_q \quad (6)$$

其中  $l_q$  为螺旋刀动态剪切时的长度。

#### 3.3.2 调节长度

为观察加工速度  $v$  对调节长度的影响，分别选取  $v = 80 \text{ m/min}$ ， $120 \text{ m/min}$ ，剪切辊周长  $y_c = 400 \text{ mm}$ ，剪切长度  $x_c = 600 \text{ mm}$ ，同步长度  $l_s = 200 \text{ mm}$ ，仿真结果如图8所示，在两种不同速度下，调节长度  $l_a$  分别为  $80 \text{ mm}$ ， $120 \text{ mm}$ 。由仿真结果可以看出，调节长度  $l_a$  与加工速度  $v$  有关，当系统参数一定时，加工速度  $v$  越大，调节区域  $l_a$  越长。

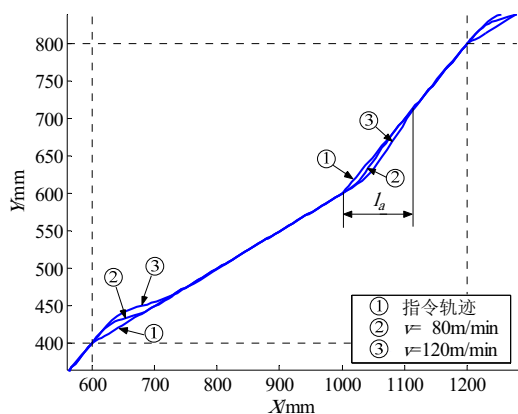


图 8 不同加工速度下的调节长度

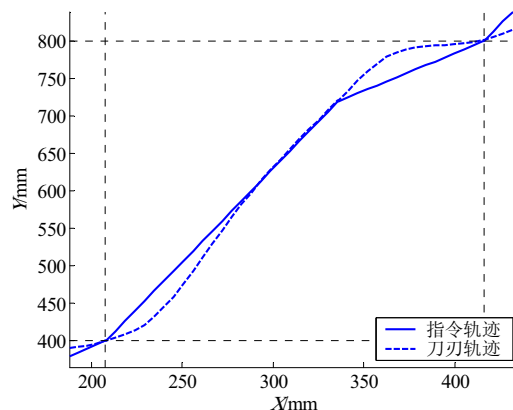


图 9 最小剪切长度的仿真验证

### 3.3.3 最小剪切长度

最小剪切长度是飞剪性能的重要指标，与加工速度有关，通过仿真分析和计算可以确定在确定加工速度下的最小剪切长度。

剪切长度的计算公式：

$$\begin{aligned} x_c &= I_s + I_r \\ &= I_s + \frac{(y_c - I_s)}{v_r} v \end{aligned} \quad (7)$$

$$= \frac{vy_c}{v_r} + \frac{v_r - v}{v_r} I_s \quad (8)$$

其中  $I_r$  为不同步区域长度， $v_r$  为切刀在非同步区域的线速度。由式 7 可知，剪切长度  $x_c$  关于  $v_r$  单调递减；容易知道最小剪切长度一定是在  $v_r$  大于  $v$  时取得，此时由式 8 可知，剪切长度  $x_c$  关于  $I_s$  单调递增，所以当  $v_r$  取最大值且  $I_s$  取最小值时，剪切长度  $x_c$  取到最小值。设  $v_{\max}$  为切刀最大线速度，由式 5 可知，对于直刀， $I_s$  最小值为  $I_a$ ，最小剪切长度

$$(x_c)_{\min} = I_a + \frac{v}{v_{\max}} (y_c - I_a) \quad (9)$$

由式 6 可知，对于螺旋刀， $I_s$  最小值为  $I_a + I_q$ ，最小剪切长度

$$(x_c)_{\min} = I_a + I_q + \frac{v}{v_{\max}} (y_c - I_a - I_q) \quad (10)$$

针对直刀对上述分析结论进行仿真验证，选取剪切辊周长  $y_c = 400$  mm，加工速度  $v = 80$  m/min，并设  $v_{\max} = 200$  m/min。由上一节的仿真结果可知此速度下的调节长度  $I_a = 80$  mm，由式 9 计算可得最小剪切长度  $(x_c)_{\min} = 208$  mm。图 9 为此时的仿真结果，与计算结果基本一致。

## 4 结束语

本文建立了数控飞剪的控制函数和仿真模型，并利用 MATLAB 对数控飞剪运动进行了仿真和分析，结果表明：指令轨迹在进入同步区域时，要经过一个调节过程才会实现稳定的同步跟踪，在系统参数一定时，调节长度与加工速度有关，通过 MATLAB 仿真可以确定指定加工速度下的调节长度，进而确定最小剪切长度，该仿真方法和结果为数控飞剪控制系统性能分析和控制参数设定提供了重要依据。

## 参考文献

- [1] 郇极, 尹旭峰, 刘玉常. 数控机械及其控制系统[J]. 制造业自动化, 1999, 21(6): 30-32, 35.
- [2] 郇极, 马维民. 数控机床动态轨迹误差的 MATLAB 仿真计算方法研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(4): 299-302.
- [3] 李清新. 伺服系统与机床电气控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [4] 李佳特. 数控机床进给伺服系统的性能评估与改进[J]. 制造技术与机床, 2004(10): 112-115.
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.

**作者简介:** 黄永生 (1981-), 男, 硕士, 研究方向为数字控制技术

**电话:** 13810260261 010-82316024

**E-mail:** yshuang1981@gmail.com

**通信地址:** 北京航空航天大学机械学院 705 信箱 郇极 (转黄永生)