

新型棒料高速动态跟随切割装置设计与优化*

刘子建, 李斯明, 吴玄皓

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对目前棒料高速动态切割装置支撑半径无法调整, 切割精度以及刃磨刀片刃口形状无法控制的缺陷, 根据切割装置切割原理, 建立了切割模式、刀片数量等切割参数与支撑半径、切割误差的数学模型, 并运用曲柄滑块机构设计了新型可调式支撑装置; 基于空间齐次坐标变换方法构建了切割刀片刃口形状与切割直径、砂轮安装角度等刃磨参数之间的曲线方程, 设计了新型可调式刃磨装置。以刀盘转速、切割误差等作为优化目标, 采用 MATLAB 优化工具箱, 对现有双刀双切烟支切割装置的切割和刃磨特性参数进行了非线性多目标优化。根据优化结果, 提出了一种新型高速动态跟随切割装置设计方案, 该方案采用四刀双切的切割模式。与原装置相比, 新装置在切割效率不变的情况下具有更好的切割质量。最后通过仿真验证了该装置的可行性。

关键词:棒料; 可调式支撑装置; 可调式刃磨装置; MATLAB 优化工具箱; 非线性多目标优化; 四刀双切

中图分类号: TH122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2014)01-0116-08

Design and optimization of new high-speed and dynamic following cutting device of bar

LIU Zijian, LI Siming, WU Xuanhao

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: According to the insufficiencies of inability to adjust supporting radius and control cutting precision and shape of cutting blade in existing high-speed and dynamic cutting device of bar, the mathematical model between supporting radius, cutting error and cutting parameters such as cutting mode, number of blades and so on were established based on the analysis of cutting principle, and new adjustable support device was designed using slider-crank mechanism. The curvilinear equation between the shape of cutting blade and grinding parameters such as cutting diameter and installing angle of grinding wheel was built by means of homogeneous coordinate transformation, then a new adjustable grinding device was designed. The speed of cutter, cutting error and other parameters were selected as optimization objects, the nonlinear multi-objective optimization of parameters of the two-blade and two-cutting cigarette cutting device was achieved by using the Matlab optimization toolbox. The project of new high-speed and dynamic following cutting device of bar was proposed, and the new device adopts the cut mode of four-blade and two-cutting. It is found that it has better cutting performance and cutting quality when the cutting efficiency is constant, and the device proves possible after simulation.

Key words: bar; adjustable grinding device; adjustable grinding device; MATLAB optimization toolbox; nonlinear multi-objective optimization; four-blade and two cutting

本文讨论的棒料切割装置由切割刀盘、棒料支撑装置和刀片刃磨装置组成, 它的作用是将作高速轴向运动的长棒料切割成规定长度的短棒料。图 1 为一种典型的双刀双切式烟支切割装置结构图^[1]。烟支 3 沿支撑装置的喇叭嘴 4 做高速轴向运动。刀盘 1 内部有万向节机构 10, 万向节上的进刀盒 9 内安装的切割刀片 2 与切割点 C 形成相对静止的剪切力偶, 从而实现对烟支的高速动态跟随切割。切割结束后, 通过磨刀装置的磨刀砂轮 6 和磨刀砂轮 8 完成在线刃磨, 切割与刃

磨过程如图 2 所示。

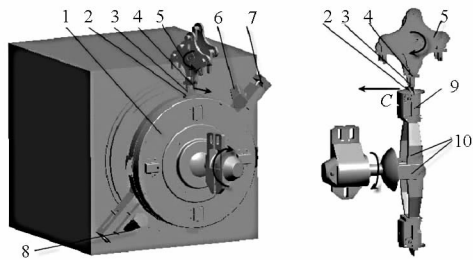
现有的易损棒料切割装置存在的缺陷是: 当切割不同长度的短棒料时, 图 1 所示的支撑装置工作半径也要发生变化^[2], 导致需要更换整套支撑装置; 另一方面, 双刀双切式刀盘切割精度无法控制, 且每转一周仅完成两次切割, 效率较低^[3]; 此外, 刀片的在线刃磨也是国内外没有解决好的问题, 致使棒料的切割质量得不到保障。

本文针对以上三个缺陷, 在分析切割原理的基础上建立了切割模式、刀片数量、喇叭嘴双轨距

* 收稿日期: 2013-04-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175161); 国家 973 项目(2010CB328002)

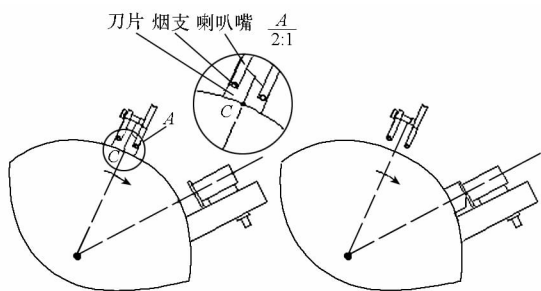
作者简介: 刘子建(1980—), 男, 湖南常德人, 教授, 博士生导师, E-mail: zjianliu@hnu.edu.cn



1. 切割刀盘 2. 刀片 3. 烟支 4. 喇叭嘴 5. 枢轴旋转机构 6. 磨刀砂轮 7. 刃磨装置安装座 8. 磨刀砂轮 9. 进刀盒 10. 万向节机构

图 1 双刀双切式烟支切割装置结构图

Fig. 1 Structure of the two-blade and two-cutting cigarette cutting device



(a) 刀片切割过程 (b) 刀片刃磨过程

图 2 烟支切割装置切割和刃磨过程示意图

Fig. 2 Cutting and grinding process of cigarette cutting device

离等切割参数与支撑半径、切割误差的数学模型,并运用曲柄滑块机构设计了支撑半径调整机构,不更换整套支撑装置即可适用于不同长度棒料的加工;描述了切割刀片刃口刃磨形状与切割直径、砂轮安装角度等刃磨特性参数的曲线方程。根据曲线方程设计了可调式刃磨装置,通过改变刃磨特性参数可刃磨出确定刃口形状曲线的刀片。结合现有的双刀双切式烟支切割装置,把切割误差、双轨距离、刀盘转速及刀盘直径作为优化目标,利用 MATLAB 优化工具箱,结合线型加权、初始变换、在可行域随机选取循环初始值等方法对切割和刃磨特性参数进行了非线性多目标优化。根据优化结果,提出了一种四刀双切式切割装置方案。与原装置相比,在切割能力不变的情况下,降低了刀盘的转速,提高了切割效率。通过仿真验证了新型装置的可行性与合理性,并模拟出了相应的刀片刃磨刃口曲线。

1 动态跟随切割数学模型

1.1 动态原理分析

棒料高速动态跟随切割应具备以下三个条件^[4]:(1)棒料、切刀、喇叭嘴三者沿棒料轴向等

速运动;(2)切刀在连续高速切割时仍然保持锋利;(3)切刀沿垂直于棒料轴线方向进行切割。

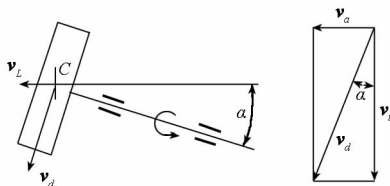


图 3 棒料切割原理及速度三角形

Fig. 3 Cutting principle of bar and velocity triangle

图 3 为棒料的切割原理图, v_L 为棒料的运动速度,表示为

$$v_L = \frac{ML}{2 \times 60 \times 1000} \quad (1)$$

式中, M 为切割装置的工作能力(支/min), L 为棒料的长度(mm)。刀片在切割点 C 的线速度为

$$v_d = \frac{n_d \pi D}{60 \times 1000} \quad (2)$$

式中, n_d 为刀盘的转速(r/min), D 为刀盘的切割直径(mm)。刀片在切割点的线速度沿棒料轴向和径向分解,得到

$$\begin{cases} v_a = v_d \sin \alpha \\ v_r = v_d \cos \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中, α 为刀盘的偏转角度(rad)。 v_d 为切割点 C 线速度。

喇叭嘴绕支撑装置中心的转速,以及支撑点在棒料轴线方向运动的速度分别为

$$\begin{cases} n_r = \frac{M}{2mt} \\ v_r = \frac{2\pi n_r r}{60 \times 1000} \end{cases} \quad (4)$$

其中, m 为切割模式(即一次切出 m 倍短棒料长度的棒料), t 为喇叭嘴的个数, r 为支撑点的半径(mm)。

根据切割条件,需要满足

$$v_a = v_L = v_r \quad (5)$$

将式(1)~式(4)代入式(5),得到

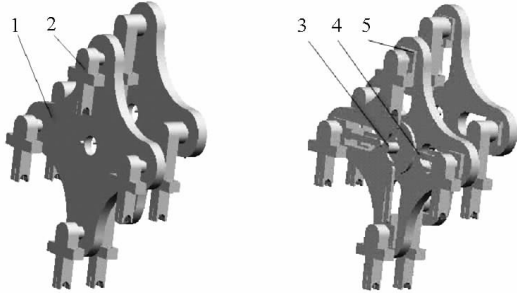
$$\begin{cases} n_d = \frac{ML}{2 \sin \alpha D \pi} \\ r = \frac{Lmt}{2\pi} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知,刀盘的转速与刀盘的安装角度、刀盘直径、棒料长度和切割装置工作能力有关;支撑半径则与棒料长度、切割模式和喇叭嘴个数有关。

1.2 可调式支撑装置

对于具有不同喇叭嘴数量和多种切割模式的

切割装置,当改变棒料长度 L 时,喇叭嘴的半径 r 也同样需要改变,而图 4(a)所示的传统枢轴式棒料支撑装置无法实现半径的变化。图 4(b)为新型半径可调式支撑装置结构图,该装置适用于多种切割模式,采用如图 5 所示的曲柄滑块机构实现支撑半径调整。



(a) 改进前的支撑装置 (b) 改进后的支撑装置

- 1. 枢轴旋转式机构 2. 喇叭嘴 3. 旋转调整盘
- 4. 连杆 5. 移动块

图 4 改进前后的支撑装置

Fig. 4 Support device before and after improvement

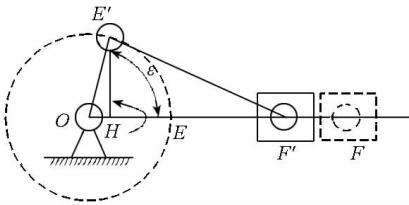


图 5 半径调整曲柄滑块机构

Fig. 5 Slider-crank mechanism used for adjusting radius

图 5 中 OE (OE')、 $E'F'$ 分别为图 4(b) 中旋转盘 3 的旋转半径及连杆 4 长度,初始长度为 20mm 和 48mm, ε 为旋转盘的调整角度,支撑半径与角度的关系为

$$OF' = OE \cdot \cos\varepsilon + \sqrt{(E'F')^2 - (OE \cdot \sin\varepsilon)^2} \quad (7)$$

图 6 为通过式(7)得到的旋转盘调整角度与支撑半径的关系曲线,用户可以根据支撑半径来调整装盘的角度。

1.3 棒料切割误差

如图 7 所示,双轨切割时,由于两个切割点偏离理论切割点 C 的距离均为 $d_g/2$ ^[1],故棒料的切割长度误差主要由以下两方面构成:刀片在切割过程中与棒料轴向运动速度差异所产生的误差 b_1 ;由于刀片角度倾斜所产生的误差 b_2 。棒料 1 和棒料 2 在切割过程中产生的误差相等。

设刀片在棒料轴向方向的分速度 v_a 与棒料轴向速度 v_L 相等的时刻为 0 时刻(切割 C 点时刻),则刀片切割棒料的时间表如表 1 所示。

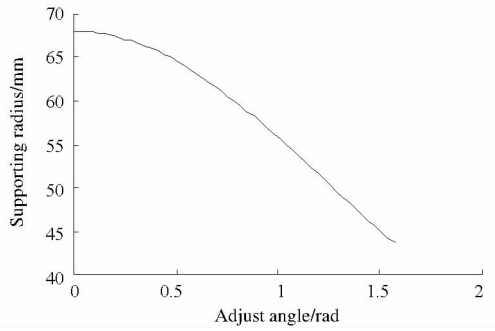


图 6 旋转盘调整角度与支撑半径的关系

Fig. 6 The relationship between adjustable angle and supporting radius

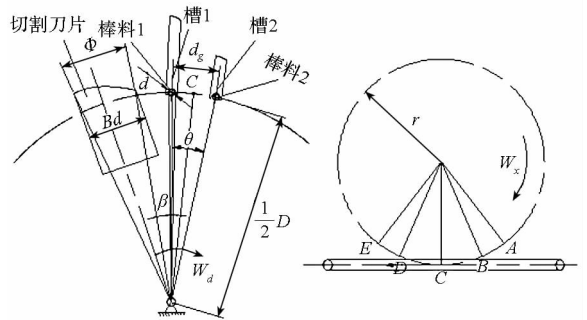


图 7 刀片切割棒料过程

Fig. 7 Cutting process of bar

表 1 刀盘切割棒料时间表

Tab. 1 Cutting time of the cutter

支撑点	切割状态	时间
A	开始切割棒料 1	$-\frac{\theta + \beta}{2w_d}t_1$
B	开始切割棒料 2	$\frac{\theta - \beta}{2w_d}t_2$
C	结束切割棒料 1	$\frac{2\phi + \beta - \theta}{2w_d}t_3$
D	结束切割棒料 2	$\frac{2\phi + \beta + \theta}{2w_d}t_4$

图 7 中, d_g 为双轨的轨距, d 为棒料的直径, θ 、 β 、 ϕ 分别为轨距、棒料直径以及刀片宽度对应于旋转中心的角度,且 $\theta = 2\arcsin(\frac{d_g}{D})$ 、

$$\beta = 2\arcsin(\frac{d}{D})、\phi = 2\arcsin(\frac{B_d}{D})。$$

切割过程中,刀片在棒料运动方向上的分速度为

$$v'_a = v_a \cos(w_d t) \quad (8)$$

因此切割过程中刀片与棒料轴向运动速度不完全相等所产生的误差为

$$b_1 = \left| \int_{t_1}^{t_3} (v'_a - v_L) dt \right| \quad (9)$$

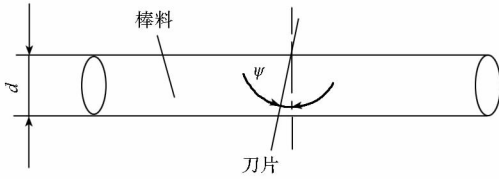


图 8 刀片相对于棒料倾斜

Fig. 8 Lean of the blade with respect to bar

刀片相对于棒料偏转如图 8 所示,设棒料的直径为 d ,刀片在切割过程中的最大的倾斜角为 ψ ,则刀片倾斜所产生的误差为

$$b_2 = d \tan \psi \quad (10)$$

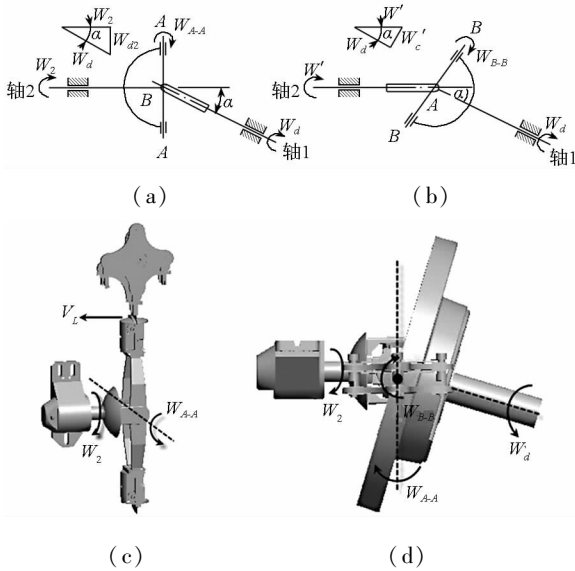


图 9 刀盘内部万向节机构角速度示意图

Fig. 9 Angular velocity of cardan joint inside cutter

式(10)中的参数 ψ 与虎克式切割刀盘结构有关。如图 9 所示,刀盘内部使用了万向节联轴结构带动刀片完成切割。刀片切割时发生偏转主要是由于刀片绕 $A-A$ 轴转动所引起的。令图 9(a) 所示的时刻为 0 时刻,图 9(b) 所示的时刻为刀盘转动 90° 的时刻,图 9(c)、图 9(d) 为 0 时刻刀盘内部结构示意图。角速度 w_{A-A} 、 w_{B-B} 如图 9 所示,可以得出^[5]

$$\begin{cases} w_{A-A} = w_{d2} = w_d \sin \alpha, w_{B-B} = 0 \Big|_{t=0} \\ w_{A-A} = 0, w_{B-B} = w_{d2}' = w_d \tan \alpha \Big|_{t=\frac{\pi}{2w_d}} \end{cases} \quad (11)$$

图 10 为 ADAMS 软件中模拟刀片在运动过程中绕 $A-A$ 轴和绕 $B-B$ 轴的角速度变化曲线。

从图 10 中可以看出 w_{A-A} 近似正弦变化,因此可以得到

$$\begin{cases} w_{A-A} = |w_d \sin \alpha \cos(w_d \times t)| \\ b_2 = d \tan \left(\int_0^t w_{A-A} dt \right) \end{cases} \quad (12)$$

因此棒料切割总误差为

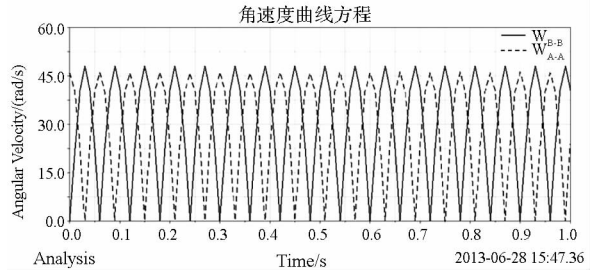


图 10 w_{A-A} 及 w_{B-B} 变化曲线

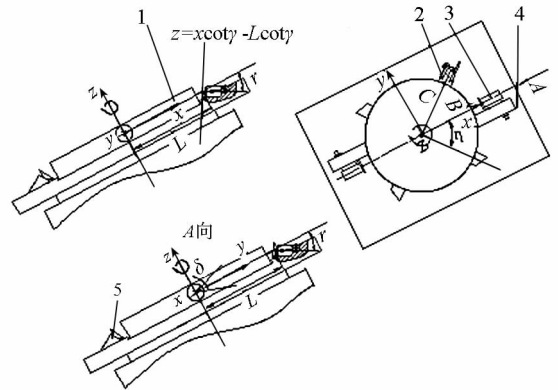
Fig. 10 Changing curve of w_{A-A} and w_{B-B}

$$b = \left| \int_{t_1}^{t_3} (v'_a - v_l) dt \right| + d \times \tan \left(\int_0^{t_1} w_{A-A} dt \right) \quad (13)$$

2 刀片刃磨数学模型

2.1 刀片刃口曲线与刃磨特性参数的关系

本文针对切割装置刀片刃口形状无法控制的问题,提出了一种描述刀片刃口形状与三个刃磨特性参数之间关系的方法。该方法适用于不同刀头数目、多种切割模式刀片的刃磨,且申请了发明专利,申请号为[201310115481.6]。



1. 切割刀盘 2. 刀片 3. 磨刀砂轮
4. 刃磨装置安装座 5. 磨刀砂轮

图 11 刃磨装置调整特性参数

Fig. 11 Adjusting parameters of grinding device

如图 11 所示,刃磨装置主要由一个磨刀砂轮 4 和一个磨刀轮 5 组成,二者机构基本相同。磨刀砂轮安装在刀盘的上部,用于磨刀;磨刀轮安装在刀盘下部,起修光刀片的作用^[6]。

在刀盘中心建立绝对坐标系,磨刀装置轴线位于绝对坐标系的 xz 平面内。设磨头轴线的偏角为 γ ,刀盘的旋转中心到砂轮刃磨面中心的距离为 L (L 也为切割装置的切割半径,即 $L = \frac{D}{2}$),棒料切割中心点 C 和刃磨点 B 形成的相对于刀盘旋转中心圆心角的余角为 η 。刀片刃口曲线上任意一点与磨刀砂轮的交点在 xz 面的投影位于如下

曲线上:

$$z = x \cot \gamma - L \cot \gamma \quad (14)$$

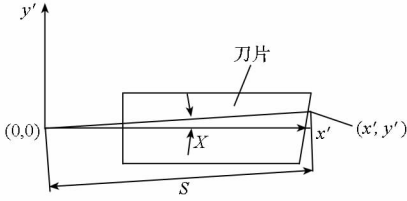


图 12 刀片局部坐标系

Fig. 12 Local coordinate system of blade

刀片的局部坐标系如图 12 所示,刀片局部坐标原点与切割装置绝对坐标的原点重合。设刀片上任意一点在局部坐标系中的坐标为 (x', y') , 则该点相对于局部坐标系的偏角为

$$\chi = \arcsin\left(\frac{y'}{S}\right) = \arcsin\left(\frac{y'}{\sqrt{(x')^2 + (y')^2}}\right) \quad (15)$$

设刀片在刃磨过程中绕绝对坐标系 x 轴旋转的角度为 δ , 绕 z 轴方向的旋转角度为 ξ 。因此, 在右手坐标系下, 刀片局部坐标相对于切割装置绝对坐标的齐次坐标变换矩阵分别为^[7]

$$T_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_z = \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 & 0 \\ -\sin \xi & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, $\xi = -\chi$, δ 主要由图 10 所示的角速度 w_{B-B} 变化引起。在切割位置点 C 时, $\delta = \alpha$, $t = 0$ 。而对于刀片上任意点在刃磨点 B 时, 有

$$\begin{cases} t = \frac{\frac{\pi}{2} - \eta + \chi}{w_d} \\ w_{B-B} = |w_d \tan \alpha \sin(w_d t)| \\ \delta = \alpha - \int_0^t w_{B-B} dt \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可以得出刀片上任意点 $(x', y', 0)$,

1) 在绝对坐标系中的齐次坐标为

$$(X, Y, Z, 1) = (x', y', 0, 1) \cdot T_x \cdot T_z \quad (18)$$

通过式(18)可以得到

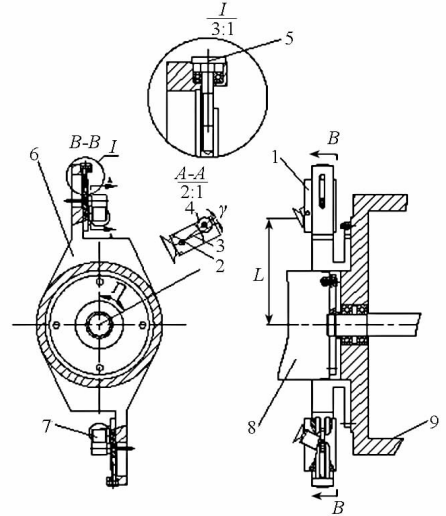
$$(X, Y, Z, 1) = (x' \cos \xi - y' \cos \delta \sin \xi, x' \sin \xi + y' \cos \delta \cos \xi, y' \sin \delta, 1) \quad (19)$$

将式(19)代入式(18)中得到关于 x, y, γ, L, η 的隐形方程

$$f(x, y, \gamma, L, \eta) = \cot \gamma (x' \cos \xi - y' \cos \delta \sin \xi - L) - y' \sin \delta = 0 \quad (20)$$

2.2 可调式刃磨装置的设计

图 13 为可调式刃磨装置结构图, 该装置采用如下的调整方法: 调节图中的调节螺杆 5 和滑板 1 调整参数 L 、转动调节齿轮 4 控制参数 γ 、调整转动支架设置参数 η , 从而刃磨出确定形状的刀片。



1. 滑板 2. 磨头 3. 磨头转动底座 4. 调节齿轮
5. 调节螺杆 6. 转动支架 7. 璧刀砂轮
8. 切割刀盘 9. 刃磨装置安装座

图 13 可调式刃磨装置结构

Fig. 13 Structure of adjustable grinding device

3 切割与刃磨特性参数多目标优化

3.1 自变量

由式(1)~(13)可以看出, 切割装置的切割模式 m 、刀片数量 k 、刀盘偏转角度 α 以及喇叭嘴双轨距离 d_g 是影响切割质量及切割性能的切割参数。而由式(14)~(20)可以看出, 刀盘偏转角度 α 、磨头轴线的偏角 γ 、余角 η 、中心距 L 是影响刀片刃口形状曲线的刃磨参数; 而 $m, k, \alpha, d_g, \gamma, \eta, L$ 又相互耦合, 因此, 确定它们为自变量。

3.2 约束条件

以图 1 所示的烟支切割系统为例, 自变量和可行域如下^[8-10]:

$$\begin{cases} 1 \leq k \leq 6 \\ 1 \leq m \leq 2 \\ t = 4 \\ d_g \geq 38 \text{ mm} \\ 12^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ \\ 0 \leq b \leq 0.5 \text{ mm} \\ C = 16000 \text{ 支/min} \\ L = 64 \text{ mm} \\ B_d = 60 \text{ mm} \end{cases} \quad (21)$$

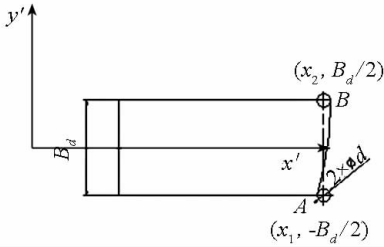


图 14 刀片切割棒料极限状况

Fig. 14 Limit state of cutting

由图 14 可以看出,在切割过程中刀片能够完全切断棒料,还应满足以下约束条件

$$\begin{cases} f(x_1, -\frac{B_d}{2}, \gamma, L, \eta) = 0 \\ f(x_2, \frac{B_d}{2}, \gamma, L, \eta) = 0 \\ x_2 - x_1 \geq d \end{cases} \quad (22)$$

3.3 优化目标

切割误差 b 直接影响棒料的切割质量,因此,应尽量减少切割误差;较大的刀盘直径 D 和过高的转速 n_d 不仅对其动力学性能以及工作可靠性不利,也增加了刀盘的生产成本,因此需要降低刀盘转速和减小刀盘直径;双轨距离 d_g 越宽,越利于相关的结构设计,但带来的切割原理误差也越大。综上所述,这是一个多目标优化问题,令目标函数为

$$\min y = \min(f_1(X), f_2(X), f_3(X), f_4(X)) \quad (23)$$

本文运用线性加权方法将多目标优化问题转换为单目标优化问题^[11],而由于目标函数中的 b 、 D 、 n_d 以及 d_g 单位不一样,因此在优化之前先采用初值化变换进行去量纲化处理。初值化变换是指用所有迭代计算数据除以第一个初始数据,得到各个不同时刻的值相对于第一时刻的值的百分比^[12]。本文以现有的双刀双切式切割装置目标参数值作为初值,每次迭代生成的各个目标均除以初值,经过初始值变化和线型加权得到的综合目标函数为

$$\min y = \min(w_1 \frac{b}{b_0} + w_2 \frac{D}{D_0} + w_3 \frac{n_d}{n_{d0}} - w_4 \frac{d_g}{d_{g0}}) \quad (24)$$

其中, $w_1 \sim w_4$ 为加权系数。

3.4 优化方法

MATLAB 优化工具箱的 `fmincon` 函数利用序列二次规划法来求解一般非线性约束优化问题, `fmincon` 函数的数学模型如下:^[13-14]

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s. t. } C(x) \leq 0 \\ C_{eq}(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ A_{eq} \cdot x = b_{eq} \\ l_b \leq x \leq u_b \end{cases} \quad (25)$$

式中, $C(x)$, $C_{eq}(x)$ 分别为向量函数,表示非线性不等式和线型不等式约束; A , A_{eq} 为矩阵; b , b_{eq} , l_b , u_b 为向量。

`fmincon` 函数的调用格式为:

$$[X, fval, exitflag] = \text{fmincon}(@fun, x_0, A, b, A_{eq}, b_{eq}, l_b, u_b, @nonlcon) \quad (26)$$

式中, X 为返回的最优解, $fval$ 为目标函数值。 $exitflag$ 为返回算法的终止标志,当 $exitflag > 0$ 时,优化有可行解;当 $exitflag < 0$ 时,无可行解^[15]。 fun 为目标函数, x_0 为初始值, $nonlcon$ 的返回值中包含非线性不等式约束 $C(x) < 0$ 和非线性等式约束 $C_{eq}(x) = 0$ 。

由于初始点的选取对优化结果有影响,因此,用 MATLAB 优化工具箱得到的往往是局部最优解。通过在可行域内随机循环给定初始点,可以得到优化结集,再从结集中寻找最小值,从而获得全局最优解^[16]。

3.5 切割与刃磨特性参数多目标优化

图 15 是切割与刃磨特性参数多目标优化流程,式(23)中的多目标函数经过线型加权法和初始值变换法后得到式(24)的目标函数。在可行域内随机给定 n 次初始值,每循环一次,都通过 `fmincon` 函数调用目标函数 fun 和约束条件函数 $nonlcon$,最后从满足条件的优化解集中寻找最优解。

4 设计实例

4.1 实例分析与优化

在高速烟支卷接机组中,烟支切割刀盘、支撑机构、刃磨装置构成了典型的动态跟随切割系统。基于上述优化方法,对图 1 所示的双刀双切双轨式烟支切割装置在式(21)、(22)描述的可行域内进行多目标优化,取加权系数为: $w_1 = 0.3$, $w_2 = 0.5$, $w_3 = 0.5$, $w_4 = 0.3$ 。得出的结果如表 2 所示。

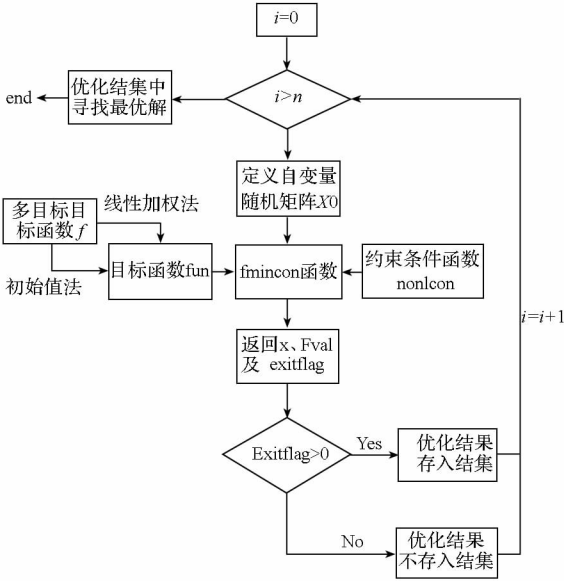


图 15 切割与刃磨特性参数多目标优化流程
Fig. 15 Multi-objective optimization process of cutting and grinding parameters

表 2 优化前后参数对比

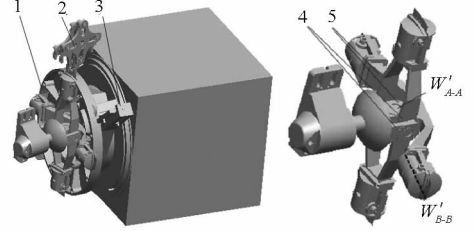
Tab. 2 Comparison of parameters before and after optimization

优化变量及目标	优化前	优化后
刀片数量 k	2	4
切割模式 m	2	2
刀盘角度 α	13°	17°
双轨距离 d_g	38mm	47mm
刀盘切割直径 D	362mm	560mm
刀盘偏转角 γ	-	45°
余角 η	-	60°
易损棒料切割误差 b	0.398mm	0.320mm
刀盘转速 n_d	2000r/min	1000r/min
目标函数值	1.000	0.816

表 2 所示的优化结果是经过 30 次循环得到的解集中的最优解。从表中可以看出优化后刀片数量为 4, 使刀盘的工作空载率降低了 50%, 双轨距离提高了 24%, 棒料切割误差减少了 19%, 刀盘转速降低了 50%。刀盘半径虽然有所增加, 但由于安装空间较大, 不会产生干涉。

4.2 四刀双切式切割装置仿真

新型切割装置与原装置相比, 除了可调式支撑装置(图 4) 和刃磨装置(图 13) 外, 切割刀盘内部还装有双万向节结构, 如图 16 所示。刀盘上刀片数量为 4, 保证了在切割效率不变的情况下降



1. 切割刀盘 2. 可调式支撑装置 3. 可调式刃磨装置 4. 万向节 1 5. 万向节 2
图 16 四刀双切式切割装置及刀盘内双万向节结构
Fig. 16 Double Cardan joints inside four-blade and two cutting device

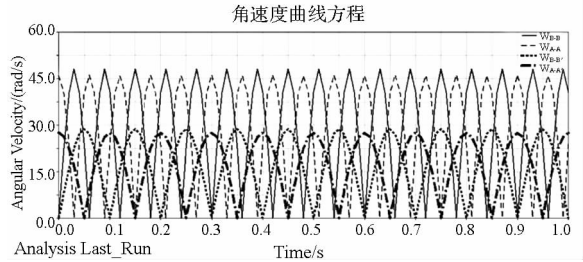


图 17 优化前后角速度 w_{A-A} 及 w_{B-B} 对比
Fig. 17 Comparison of w_{A-A} and w_{B-B} before and after improvement

低了刀盘的转速。图 17 为万向节角速度 w_{A-A} 、 w_{B-B} 优化前后通过 ADAMS 软件仿真得到的对比曲线, w_{A-A} 、 w_{B-B} 为优化前变化曲线, w'_{A-A} 、 w'_{B-B} 为的优化后变化曲线。通过对比可以看出: 优化后的 w_{A-A} 、 w_{B-B} 的变化周期分别为优化前的 2 倍, 且在数值上满足

$$\begin{cases} \frac{(w_{A-A})_{\max}}{(w'_{A-A})_{\max}} \approx \frac{w_d \sin(13p_i)/4}{0.5w_d \sin(13p_i)/4} \\ \frac{(w_{B-B})_{\max}}{(w'_{B-B})_{\max}} \approx \frac{w_d \tan(13p_i)/4}{0.5w_d \tan(17p_i)/4} \end{cases} \quad (27)$$

式(27) 再次证明了式(12) 的正确性, 同时也验证了表 2 中优化后四刀双切切割装置的合理性及可行性。

根据优化结果, 通过 MATLAB 软件模拟出优化后的刀片刃口曲线如图 18 所示, 其对应的刃磨参数分别为 $L = 280\text{mm}$, $\gamma = \frac{\pi}{4}$, $\eta = \frac{\pi}{3}$ 。

5 结论

本文分析了现有棒料切割装置的缺陷, 并提出相应的解决方法, 主要包括如下三个方面。

(1) 分析了棒料高速动态跟随切割装置的切割原理, 建立了支撑半径、棒料切割误差等与刀盘刀片数量、切割模式、刀盘倾斜角度、双轨距离之间的精确数学模型, 并设计了可调式支撑装置, 模拟了调整角度与支撑半径的变化曲线。

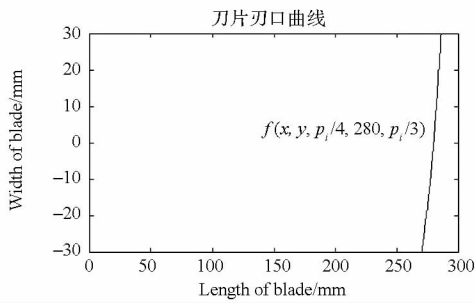


图 18 优化后模拟的刀片刃口曲线

Fig. 18 Simulative curve of blade after improvement

(2)提出了一种描述动态跟随切割刀片刃口形状曲线与三个刃磨特性参数之间关系的方法,设计了在线可调式刃磨装置,并介绍了相应的调整方法。

(3)以 MATLAB 优化工具箱的 fmincon 函数为基础,针对高速双刀双切烟支切割装置,运用线性加权法、初始变化法、在可行域内随机循环给定初始点等方法对切割和刃磨特性参数进行了非线性多目标优化,并利用 ADAMS 软件对优化后的四刀双切式切割装置进行了仿真,同时模拟了此时的刀片刃口曲线。

参考文献 (References)

- [1] 万晶晶,刘子建,谢宗敏. 枢轴旋转式喇叭嘴支撑装置设计与优化[J]. 机械设计,2012,29(2):64-68.
WAN Jingjing, LIU Zijian, XIE Zongmin. Design and optimization of a pivot rotary ledger supporting device [J]. Journal of Machine Design, 2012, 29 (2): 64 - 68. (in Chinese)
- [2] 高绍梁. PROTOS 70 型卷烟机改变烟支长度所需的调整[J]. 烟草科技,2003(4):12-14.
GAO Shaoliang. Adjustment necessary for cigarette length change in PROTOS 70 cigarette maker [J]. Tobacco Science & Technology/Equipment & Apparatus, 2003 (4): 12 - 14. (in Chinese)
- [3] Hauni. MAX90E operating manual [M]. Germany: Hauni Maschinen bauAG ~ Kurt - A, 2002: 295 - 305.
- [4] 邓光华. PASSIM7K 型卷烟机烟条切割机构分析及提高烟支外观质量对策研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程系,2005:10-11.
DENG Guanghua. The kinematic synthesis and analysis for the rod-cut mechanism in PASSIM7K cigarette maker and the study for the strategy to improve the cigarette outward appearance quality [D]. Chongqing: Department of Mechanical Engineering of Chongqing University, 2005: 10 - 11. (in Chinese)
- [5] 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2005:253-254.
SUN Huan, CHENG Zuomo, GE Wenjie. Mechanical principles [M]. Beijing: Higher Education Publishing House, 2005: 253 - 254. (in Chinese)
- [6] 董祥云. YJ17 - YJ27 卷接机组[M]. 北京:科学出版社,2000:68-70.

- DONG Xiangyun. YJ17-YJ27 cigarette-making machine [M]. Beijing: Science and Technology House, 2000: 68 - 70. (in Chinese)
- [7] 刘子建,叶南海. 现代 CAD 基础与应用技术[M]. 长沙:湖南大学出版社,2004:39-60.
LIU Zijian, YE Nanhai. Basic of modern CAD and application technology [M]. Changsha: Hunan University Press, 2004: 39 - 60. (in Chinese)
- [8] 陈炳基,李新光. YJ19-YJ29 卷接机组[M]. 北京:北京出版社,2000:45-48.
CHEN Binjib, LI Xinguan. YJ19-YJ29 cigarette-making machine [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2000: 45 - 48. (in Chinese)
- [9] 于建军. 卷烟工艺学[M]. 天津:中国农业出版社,2003:285-286.
YU Jianjun. Technology of cigarette [M]. Tianjin: China Agriculture Press, 2003: 285 - 286. (in Chinese)
- [10] 云南省烟草工业研究所. PASSIM 卷烟机[M]. 昆明:云南科技出版社,1998:16-32.
Tobacco Industry Research Institute. PASSIM cigarette making machine [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1998: 16 - 32. (in Chinese)
- [11] 郭希旺,刘士新,王大志. 多目标拆卸序列优化问题的分散搜索算法[J]. 东北大学学报,2012,33(1):56-59
GUO Xiwang, LIU Shixin, WANG Dazhi. Scatter search for solving multi-objective disassembly sequence optimization problems [J]. Journal of Northeastern University, 2012, 33 (1): 56 - 59. (in Chinese)
- [12] 李永祥,童恒超,杨建国. 灰色系统理论在机床热误差测点优化中的应用[J]. 机械设计与研究,2006,22(3):79-81.
LI Yongxiang, TONG Hengchao, YANG Jiaoguo. Application of grey system theory in optimizing the measuring points of thermal error on machine tools [J]. Machine Design and Research, 2006, 22 (3): 79 - 81. (in Chinese)
- [13] 葛哲学,陈仲生,谢关军等. MATLAB 6.5 辅助优化计算与设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003:87-90.
GE Zhexue, CHEN Zhongsheng, XIE Guanjun. MATLAB 6.5 auxiliary calculation and optimization design [M]. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 2003: 87 - 90. (in Chinese)
- [14] 杨世文,许小健. MATLAB 优化工具箱在结构优化设计中的应用[J]. 科学技术与工程,2008,8(5):1348-1349.
YANG Shiwen, XU Xiaojian. Application of MATLAB optimization toolbox in structural optimization [J]. Science Technol and Engineering, 2008, 8 (5): 1348 - 1349. (in Chinese)
- [15] 李明. 详解 MATLAB 在最优化计算中的应用[M]. 北京:电子工业出版社,2011:236-238.
LI Ming. Explanation of application of MATLAB in optimization calculation [M]. Beijing: Electronics Industry Publishing House, 2011: 236 - 238. (in Chinese)
- [16] 张武. MATLAB 优化工具箱及其应用[J]. 农业网络信息,2008(8):138-142.
ZHANG Wu. The MATLAB optimization toolbox and its application [J]. Agriculture Network Information, 2008 (8): 138 - 142. (in Chinese)
- [17] Li Z, Kota S. Virtual prototyping and motion simulation with ADAMS [J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, 1 (9): 276 - 279.