

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.08.012

大型圆环类工件高效锯切系统设计与负载研究^{*}

王定胜¹, 卢勇波¹, 李斌胜¹, 李璐², 倪敬^{2*}

(1. 浙江锯力煌锯床股份有限公司, 浙江 缙云 321404; 2. 杭州电子科技大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对传统金属带锯床锯切大型圆环类工件存在的锯切效率低、精度差和能耗高的问题,研究设计了一种新型高效锯切系统。不同于传统锯架进给锯切方式,所设计的大型圆环类工件的锯切系统采用工件进给锯切方式。分析了该锯切系统的主要组成以及工作原理,特别对工件旋转装置进行了详细设计;基于西门子300系列PLC,设计了该锯床的电气控制系统;此外,基于经典锯切负载模型,通过对锯切过程中参与锯切齿数的分段计算,建立了该系统的锯切负载数学建模,并进行了Matlab仿真研究。研究结果表明:切削进给方式改变后,所设计的锯切系统不仅锯架体积较小,而且锯切效率、精度、能耗以及带锯条使用寿命等指标较传统带锯床都有大幅度提升。

关键词:工件进给;锯切;带锯床;大型工件;锯切负载

中图分类号:TH122;TG56⁺1

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)08-0875-05

Design and cutting force research of efficient cutting systems for large circular workpieces

WANG Ding-sheng¹, LU Yong-bo¹, LI Bin-sheng¹, LI Lu², NI Jing²

(1. Zhejiang Julihuang Sawing Machine Group Co., Ltd., Jinyun 321404, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of the low sawing efficiency, poor accuracy and high energy consumption in traditional metal band sawing machine when machining a large circular workpieces, a new efficient sawing system was designed. Different from the traditional way that feed by the saw frame, the designed cutting system for large circular workpieces used sawing workpiece feed mode. After the analysis of major components and operating principle, the workpiece rotating device was designed. Based on the S7-300 PLC, the electrical control system was established. Based on the classic cutting force model and calculating the number of tooth engaged in sawing, the cutting force model and Matlab simulation were also presented. The results indicate that the design can not only make the saw frame smaller, but also make sawing efficiency, accuracy and smaller power consumption than traditional band saws by the change of cutting feed.

Key words: workpiece feed; sawing; band saws; large circular workpieces; cutting force

0 引言

传统金属带锯床由锯带轮带动锯带往复旋转进行锯切加工,通常采取锯架进给的方式进行工件的锯切加工。但是,传统带锯床锯切特大型工件,如直径3 m

以上的圆环柱工件等,存在如下问题:首先,传统金属带锯床锯切大型工件,其切面线长,而锯带钢性不足,锯切精度和效率低,通常锯切效率在30 cm²/min左右,锯切精度为0.3/100 mm,并且能耗严重;其次,传统带锯床采用锯架进给方式,加工大型工件时锯架就要相

收稿日期:2016-01-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51375129)

作者简介:王定胜(1970-),男,浙江缙云人,工程师,主要从事锯床的设计研究开发. E-mail:wds@julihuang.com

通信联系人:倪敬,男,教授,研究生导师. E-mail:nj2000@hdu.edu.cn

应做得很大,致使机床的体积庞大。为解决上述传统带锯床锯切大型圆环类工件存在的问题^[14],设计一种新型、高效大型带锯床并对其锯切负载研究,使其锯切精度和效率显著提高具有重要意义。研究者们一直致力于大型锯床的研究。王纪磊等^[5]对半环类零件进行统计分析,设计等分锯切专用工装,由铣削加工改为锯切加工以提高生产效率与产品质量;王定胜等^[6]设计了一种高效大型带锯床,可将大型工件夹紧在上转盘上水平移动和旋转锯切,锯切精度和效率大大提高。

对于大型圆环类工件国内外仍以锯架进给锯切为主,本研究首先对锯切系统进行总体设计,包括工作原理、机械系统设计以及电气控制系统设计,其次通过建立理论模以及 Matlab 仿真,对锯切负载进行详细研究,最后对设计研究的大型圆环类工件的高效锯切系统进行总结说明。

1 系统总体设计

1.1 系统的工作原理

大型圆盘类工件锯切系统总体结构原理图如图 1 所示。

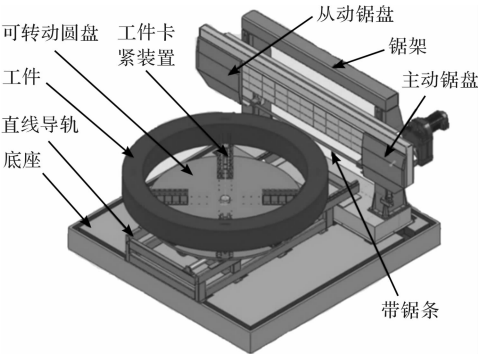


图 1 大型圆盘类工件锯切系统总体结构原理

大型圆环类工件的锯切系统主要由底座、直线导轨、旋转圆盘、锯架、锯盘等组成。待加工的工件由卡紧装置卡紧后,固定于旋转圆盘上。与传统金属带锯床的锯架进给工作方式不同,本研究中的大型圆环类工件锯切机床采取的是工件进给的工作方式,即在加工时,锯盘位置固定不动,工件沿直线导轨作水平方向进给,锯条水平锯切工件;待工件的锯切宽度达到机床最大值时,工件沿进给方向的直线导轨水平退回,旋转圆盘带动工件旋转一定角度,然后工件再次直线进给,进行锯切加工;重复以上工作方式,直到整个工件锯切完成。由于采取的是工件进给的工作方式,一方面,大型圆环类工件锯切机床的锯架不必做得很大;另一方

面,带锯条只需往复转动进行锯切加工,锯条振动较传统锯条进给的工作方式大大减小,因此锯切效率和锯切精度更能够得到保障。

笔者所设计研究的大型圆环类工件锯切系统的主要性能指标如表 1 所示。

表 1 主要性能指标

性能	指标参数
锯切效率/ $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$	90
锯切精度/mm	0.1/100
带锯条速度/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	20 ~ 100

1.2 机械系统设计

由大型圆环类工件锯切机床的工作原理可以看出,工件旋转装置的作用十分重要,工件的锯切宽度达到机床最大值时,工件退回后由旋转装置带动,转动一定的角度,再次锯切,直到整个工件锯切完成。

工件旋转装置结构原理如图 2 所示。

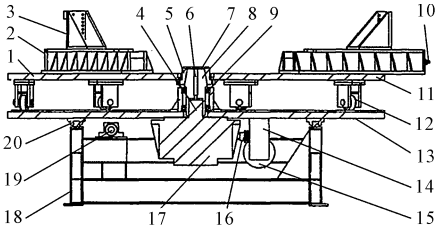


图 2 工件旋转装置结构原理

1. 上转盘;2. 夹紧座;3. 夹紧滑块;4. 二级减速机输出轴;5. 锥套;6. 锁紧螺丝;7. 垫片;8. 锥接头;9. 轴承;10. 丝杆;11. 滚轮座;12. 滚轮;13. 下底盘;14. 一级减速机;15. 驱动电机;16. 链轮;17. 二级减速机;18. 送料架;19. 驱动装置;20. 直线导轨;

其主要由上转盘、下转盘、驱动装置等组成。由图 2 可知,直线导轨上安装有一个可移动下底盘,下底盘由床身上的驱动装置连接驱动;下底盘上方设有上转盘,上转盘底面环设有若干与下底盘接触的支撑用滚轮,上转盘上面设有工件夹紧装置;带动上转盘旋转的旋转驱动装置设于下底盘底面,其输出动力的转动轴从下底盘中向上伸出,且上接于上转盘中。这样将大型工件夹紧在上转盘上,就可以在驱动装置推动下沿直线导轨水平移动锯切,以及在旋转驱动装置带动下旋转锯切。工件夹紧装置由夹紧座、丝杆和滑块组成。上转盘上面分别环设有 4 个夹紧装置,大型圆环柱工件可由 4 个夹紧装置沿径线向外移动夹紧,夹紧过程方便快捷。

旋转驱动装置由驱动电机、两级减速机构、链轮及链条组成。驱动电机和两个减速机均安装在下底盘底面,可随下底盘移动。上转盘由二级减速机的输出轴

来驱动,二级减速机的输出轴和锥接头组成,锥接头下部外接两滚动轴承,两滚动轴承安装在固设于下底盘上的轴承座中,锥接头上部与固设于上转盘中的锥套配接,锥套通过螺丝固定于上转盘上,锁紧螺丝穿过设于锥套和锥接头顶部的垫片中心,且连接二级减速机输出轴。这样,上转盘可以随锥套、锥接头和二级减速机输出轴旋转。采用上述连接方法,上转盘的连接和拆卸检修都很方便。

圆盘沿直线导轨的运动由油缸来驱动,油缸固定于送料架上,其顶杆连接下底盘,下底盘在油缸推动下可沿直线导轨水平移动锯切。

1.3 电气控制系统设计

本研究所设计研究的锯切机床控制系统原理如图 3 所示。

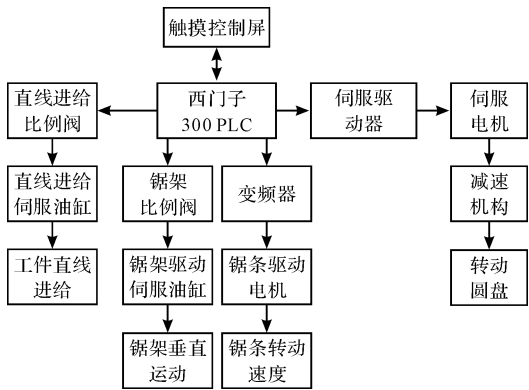


图 3 控制系统原理

本研究采用西门子 300 系列 PLC 为主控制器,通过触摸控制屏可设置系统运行参数和监控系统运行状况^[7]。工件直线进给方面,直线进给比例阀的阀口开度由 PLC 指令来确定,在阀口压力恒定时,由阀口流量公式可知,进入直线进给伺服油缸的油液流量恒定,从而使得伺服油缸的运动速度恒定。工件的旋转方面,伺服驱动器接受 PLC 控制器的角度指令,驱动伺服电机,进而通过减速机构,对旋转圆盘的转动角度进行控制。锯架的垂直运动方面,锯架垂直运动比例阀的阀口开度由 PLC 控制指令来确定,锯架匀速垂直运动,确定锯切位置。锯条的旋转锯切运动由变频器带动电动机来驱动,调节变频器频率,可调节锯条的运动速度,以适应不同锯切场合。

系统锯切工作流程如图 4 所示。
步骤为:(1)锯架下移到锯切位置,锯条往复转动,等待工件进给;(2)工件由直线进给伺服油缸驱动,快进到待锯切工位;(3)进给比例阀的开度调小,进入直线进给伺服油缸的油液流量减少,工件工进锯切;(4)由安装于锯架两侧的传感器检测锯切宽度是

否达到机床最大锯切宽度,如果达到,则单次进给锯切完成;(5)判断锯切是否全部完成,如果没有全部完成,则工件先退回一定距离,转动一定的角度后再次作工件锯切;(6)重复(4)、(5)两步,直至锯切全部完成,工件退出。

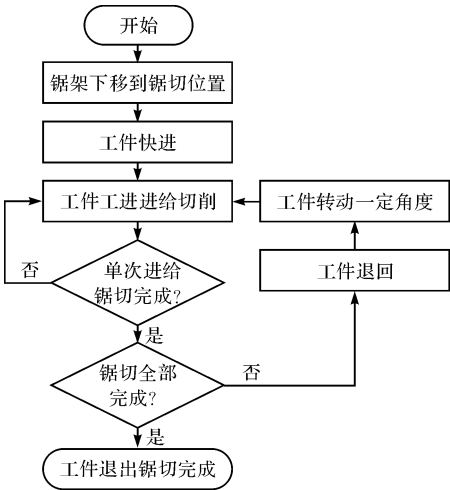


图 4 锯切系统工作流程

2 系统锯切负载研究

直齿锯切原理图如图 5 所示。

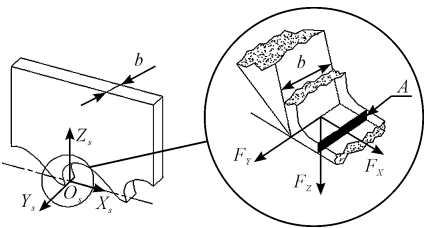


图 5 直齿锯切原理图

本研究以锯带上任意直锯齿刃的中心为原点 O_s ,以各直锯齿刃的中心点连线为 X_s 轴,建立三维坐标系 $O_sX_sY_sZ_s$ 。根据文献[8] 锯切方向上的主切削力与未塑性形变前的切屑截面面积以及锯切材料的比压相关,即单个直锯齿在锯切方向上的经典锯切负载可表示为:

$$F_{x0} = k_s \cdot A^{\beta_1} \tag{1}$$

式中: k_s —与锯切材料相关的比压力, A —未塑性形变前的切屑面积, β_1 —量纲一常数。

根据相关文献[9-10] 对锯齿几何特征的分析,面积 A 又可表示为:

$$A = b \cdot \frac{p \cdot v_f}{v_c} = b \cdot \delta_f \tag{2}$$

式中: b —锯带厚度, δ_f —进给量。

等齿距含偏齿金属带锯条如图 6 所示。

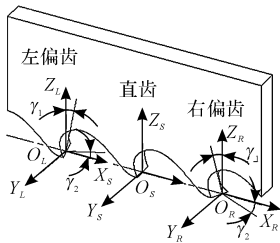


图 6 等齿距含偏齿金属带锯条

若所用金属带锯条为如图 6 所示的等齿距带偏齿金属带锯条,齿距为 P ,通过斜锯齿的左分齿平面 $X_L O_L Z_L$ 和右分齿平面 $X_R O_R Z_R$ 上的锯齿线向直齿平面 $X_S O_S Z_S$ 的投影,即利用偏角 γ_1 和 γ_2 ,可将单个斜齿等效为一个直齿,有:

$$\cos \gamma = \cos \gamma_1 \cos \gamma_2 \quad (3)$$

式中: γ —斜齿的等效直齿偏角。

则偏齿的锯切负载为:

$$F_{X1} = k_s \cdot A^{\beta_1} \cos \gamma \quad (4)$$

带锯条单齿锯切负载可以表示为:

$$F_{X2} = \begin{cases} k_s \cdot A^{\beta_1} & (\text{单个直齿}) \\ k_s \cdot A^{\beta_1} \cos \gamma & (\text{单个偏齿}) \end{cases} \quad (5)$$

锯切工件的尺寸如图 7 所示。

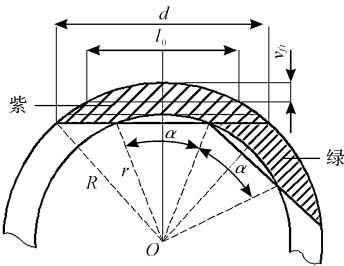


图 7 第一次锯切示意图

锯床最大锯切宽度为 d ,工件的进给速度为 v_f ,切削速度为 v_c 。当工件第一次锯切,切除的部分为图 7 紫色阴影部分,当第二次锯切时候,为保证材料被切除且效率最大,旋转允许最大角度 α 之后,切除的为绿色阴影部分,以后的每一次均为绿色部分。由于零件规格不定,无法确定最后一次的切除情况,故不考虑。在整个锯切过程中最主要的是对参与锯切齿数的计算,即得到锯缝长度 l_0 随时间 t 的变化。

(1) 第一次锯切工况(锯切紫色阴影部分)。

当锯痕未过内径圆的外切线之前:

$$l_0(t) = 2 \sqrt{R^2 - (R - v_f t)^2} \quad (6)$$

当锯痕通过内径圆的外切线,达到最大锯切宽度之前:

$$l_0(t) = 2(\sqrt{R^2 - (R - v_f t)^2} - \sqrt{r^2 - (R - v_f t)^2}) \quad (7)$$

(2) 第二次及之后锯切工况(锯切绿色阴影部分)。

第二次锯切示意图如图 8 所示。

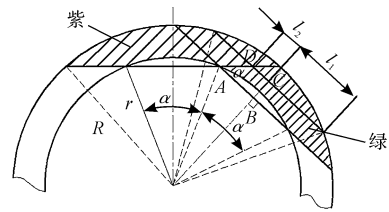


图 8 第二次锯切示意图

由图 8 知,在梯形 $ABCD$ 中,有:

$$l_2(t) = r \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{R - v_f t - r \cos \frac{\alpha}{2}}{\tan \alpha} \quad (8)$$

当锯痕未过内径圆的外切线之前:

$$l_0(t) = l_1(t) + l_2(t) = \sqrt{R^2 - (R - v_f t)^2} +$$

$$r \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{R - v_f t - r \cos \frac{\alpha}{2}}{\tan \alpha} \quad (9)$$

当锯痕通过内径圆的外切线,达到最大锯切宽度之前:

$$l_0(t) = \sqrt{R^2 - (R - v_f t)^2} + r \sin \frac{\alpha}{2} - \frac{R - v_f t - r \cos \frac{\alpha}{2}}{\tan \alpha} - 2 \sqrt{r^2 - (R - v_f t)^2} \quad (10)$$

锯切过程中参与锯切的最大齿数:

$$n_m = \left\lceil \frac{l_0(t)}{P} \right\rceil \quad (11)$$

当 $0 \leq l_0(t) < P, n_m = 1$,参与锯切的齿数将在 1 与 0 之间变化。

参与锯切齿数及锯切时间计算原理图如图 9 所示。

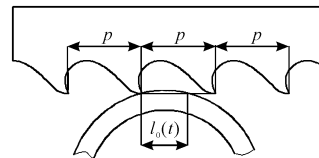


图 9 参与锯切齿数及锯切时间计算原理图

1 个齿锯切的时间:

$$t_1 = \frac{l_0(t)}{v_c} \quad (12)$$

0 个齿锯切的时间:

$$t_2 = \frac{P - l_0(t)}{v_c} \quad (13)$$

同理,当 $(n_m - 1)P \leq l_0(t) < n_m P$,参与锯切的齿数将在 $n_m - 1$ 与 n_m 之间变化。

n_m 个齿参与锯切的时间段长度为:

$$t_{i1} = \frac{l_0(t) - (n_m - 1)P}{v_c}$$

(14)

$$F_X(t) = \begin{cases} n_m F_{X2} & \sum_{i=0}^{i-1} (t_{i1} + t_{i2}) \leq t < \sum_{i=0}^i t_{i1} + \sum_{i=0}^{i-1} t_{i2}, i = 1, 2, 3, \dots\dots \\ (n_m - 1) F_{X2} & \sum_{i=0}^i t_{i1} + \sum_{i=0}^{i-1} t_{i2} \leq t \leq \sum_{i=0}^i (t_{i1} + t_{i2}), i = 1, 2, 3, \dots\dots \end{cases}$$

(16)

为进一步直观研究锯切负载的变化,本研究选定某一工况进行 Matlab 数值仿真。

具体工况参数如表 2 所示。

表 2 仿真工况参数表

名称	数值
工件外径 R/mm	1500
工件内径 R/mm	1 200
切削速度为 $v_c/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	38
进给速度为 $v_f/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	2
齿距 P/mm	7
带锯条厚度 b/mm	1.1
最大锯切宽度/ mm	2 000

锯切负载仿真图如图 10 所示。

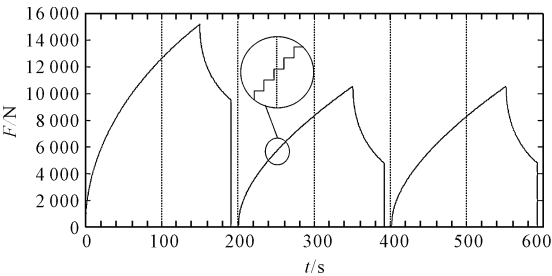


图 10 锯切负载仿真图

4 结束语

笔者研究了一种大型圆环类工件高效锯切系统,详细介绍了其工作原理、机械及电气控制系统,之后对其进行了锯切负载建模以及仿真。通过将大型工件夹紧在上转盘上水平移动锯切和旋转锯切,使锯切切面线较短,锯带钢性较高,锯切效率达到 $90\text{ cm}^2/\text{min}$,锯切精度达到 $0.1/100\text{ mm}$,均比传统带锯床大大提高。

$n_m - 1$ 个齿参与锯切的时间段长度为,

$$t_{i2} = \frac{n_m P - l_0(t)}{v_c}$$

(15)

综上所述,锯切过程中的锯切负载可以表示:

锯切过程中的负载变化较传统锯切更加平稳,有效提高了带锯条的使用寿命,具有非常实用的价值和广阔的市场前景。

在下一阶段,本研究将针对该大型锯床搭建锯切负载采集系统,基于现有的仿真基础,进一步对该锯床进行负载研究,优化系统设计。

参考文献(References):

[1] 韩 斌. 金属切削带锯床设计的若干问题研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.

[2] 倪 敬,汤海天,刘湘琪,等. 带锯床锯切负载检测系统研制[J]. 机电工程,2014,31(5):620-623.

[3] 曾 云. 卧式金属带锯床进给系统设计与研究[D]. 长沙:中南大学机电工程学院,2006.

[4] 陈海烽. 金属切削带锯床数控锯切系统研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2014.

[5] 王纪磊,杜小兵,王玉杰. 液压支架千斤顶半环类零件等分锯切的分析研究[J]. 河南科技,2016(19):77-79.

[6] 王定胜,应晓伟,卢勇波,等. 高效大型带锯床[P]. 中国:CN201010250472.4,2010-08-09.

[7] 西门子(中国)有限公司. S7-300 PLC 系统手册[M]. 北京:西门子中国有限公司,2008.

[8] KO T J, KIM H S. Mechanistic cutting force model in band sawing[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,1999,39(8):1185-1197.

[9] 蒙 臻. 带锯床恒功率锯切系统研制[D]. 杭州:杭州电子科技大学机械工程学院,2013.

[10] 倪 敬,李 璐,许 静,等. 金属带锯动态锯切负载建模与验证[J]. 中国机械工程,2016,27(3):302-307,314.

[编辑:张 豪]

本文引用格式: