

# 小径木梯形板锯刨机结构设计与研究

马 岩,王 刚,宋文龙\*,杨春梅,曲 文,蒋 婷,缪 蹇

(东北林业大学 林业与木工机械工程技术中心,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**针对目前市面上加工小径木的机器加工精度低、效率不高、出材率低等问题,分析提高小径木梯形板出材率、加工效率及加工精度的设计方法,通过新的设计方法制定了新的加工工艺。结合工艺分析设计了小径木梯形板锯刨机的总体结构,可以对小径木梯形板进行锯切、粗刨、精刨加工。在对其核心组件锯切组件与刨削组件的加工原理进行分析的基础上,设计了锯切组件结构与刨削组件结构。通过导入锯切主轴 SolidWorks 的三维模型,利用 ANSYS 对其锯切主轴进行静力学分析,得到锯切主轴的应力、应变和变形云图,其中最大应力值为 7.435 MPa、最大应变值为 0.042 316 mm/m、最大变形量为 0.002 178 8 mm,其强度、刚度及变形量均在许用范围内,仿真验证了锯切主轴的设计的合理性。

**关键词:**小径木;锯切;刨切;结构设计

**中图分类号:**S776      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2020)02-0266-07

## Structural Design and Research of Sawing and Planing Machine for Processing Trapezoidal Plate from Small Diameter Wood

MA Yan,WANG Gang,SONG Wen-long\*,YANG Chun-mei,QU Wen,JIANG Ting,MIAO Qian  
(Forestry and Woodworking Machinery Engineering Technology Center,Northeast Forestry University,Harbin 150040,Heilongjiang,China)

**Abstract:** Aiming at solving the problems of low precision,low efficiency and low yield of wood processing machines available in the market when they are used to process small diameter lumber,a new machine-designing method was discussed to improve the yield,machining efficiency and precision during processing trapezoidal plate from small diameter lumber,from which the new processing technology was formulated. The overall structure of the machine was designed based on process analysis. The machine could accomplish sawing,rough and fine planing for processing trapezoidal plate from small diameter lumber. Based on the analysis of the machining principle of the sawing and planing components of its core components,the structures of the sawing and planing components were designed. By introducing the three-dimensional model of SolidWorks of sawing spindle and using ANSYS to carry out static analysis of its sawing spindle,the stress,strain and deformation nephograms of sawing spindle were obtained. The maximum stress value was 7.435 MPa,the maximum strain value was 0.042 316 mm/m and the maximum deformation was 0.002 178 8 mm. Therefore,the strength,stiffness and deformation of sawing spindle were within the allowable range. The simulation verified the rationality of the design of saw cutting spindle.

**Key words:** small diameter wood; sawing; planing; structure design

自实施天然林资源保护工程以来,我国加大了 森林管理和保护力度,实行木材停伐减产政策<sup>[1-3]</sup>,

收稿日期:2019-06-21 修回日期:2019-07-30  
基金项目:国家重点研发计划“小径材多界面加工关键装备研究”(2018YFD06003054);黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA19A402)。  
作者简介:马 岩,男,教授,研究方向:林业与木工机械设计。E-mail:myan@vip.163.com  
\*通信作者:宋文龙,男,教授,研究方向:林业与木工机械设计。E-mail:wlsong139@126.com

以遏制天然林资源不断锐减的趋势,然而家具行业对木材资源的需求量却一直处于增长态势,面临着木材资源匮乏的困境。小径木是一种新兴的可再生能源资源<sup>[4-6]</sup>,对小径木充分合理利用是解决目前困境有效措施,由于目前市场上能够锯刨小径木板材的机器都是由传统的木材加工设备调整进给尺寸和定位设备的大小来实现的,并没有成熟完善的设备来专门用于加工小径木<sup>[7]</sup>,因而对小径木的利用还不够充分,小径木的加工效率不高<sup>[8]</sup>,且现有的加工方式去除材料多,造成物料的损失,因此设计一种小径木梯形板锯刨机很有必要。

## 1 小径木梯形板的出材率、加工效率、加工精度的提高及工艺研究

### 1.1 提高小径木梯形板出材率的途径

小径木梯形板是采用图 1 所示的抽芯下锯法而得到的位于下锯图中间的髓心板。由于小径木材的生长特性导致其根部径级要大于顶部径级,这使得髓心板的形状呈现出一头为大端另一头为小端的梯形状。

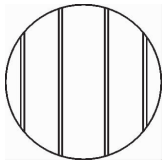


图 1 小径木抽芯下锯图

Fig. 1 Small path wood core-pulling saw drawing

表 1 实测 10 根小径木径级参数及出材率差值

Table 1 Measured diameter grade parameters and yield differences of 10 small diameter lumber

编号	小径木小头径级/mm		小径木大头径级/mm		椭圆度		实测长度	传统锯切方式	新锯切方法	出材率差值/%
	小头短径	小头长径	大头短径	大头长径	小椭圆度	大椭圆度		出材率/%	出材率/%	
1	160	170	240	280	0.941	0.851	4 000	73.5	87	13.5
2	170	170	200	210	1.000	0.952	4 020	85.4	87.03	1.63
3	190	200	260	280	0.950	0.929	4 070	78.67	88.44	9.77
4	170	190	200	210	0.895	0.952	3 000	85.21	87.06	1.85
5	170	180	220	250	0.944	0.880	5 200	80.51	86.67	6.16
6	160	180	190	190	0.889	1.000	2 840	84.57	86.29	1.72
7	180	180	230	240	1.000	0.958	4 950	81.46	87.31	5.85
8	190	200	250	260	0.950	0.962	4 970	80.45	88.18	7.73
9	190	200	240	250	0.950	0.960	6 000	82.33	87.91	5.58
10	200	220	270	300	0.909	0.900	2 050	79.57	88.93	8.96

在小径木的梯形板的生产线上,小径木梯形板锯刨机采用锯切和刨切的组合加工方式,通过 1 次上料,对梯形板的一侧窄边进行锯切和刨切。经由数控角度调整运输机到达另一台镜像布置的锯刨机,进行另一侧锯切和刨切。锯刨机上的刨切工序可分为粗刨和精刨,精刨工序只起到表面处理的作用,

现有的设备加工小径木梯形板窄面时,先对板材锯掉一角后,以加工后的窄面作为定位面,利用定位靠尺定位后,进行板材的进给切削。其加工机理如图 2(a)所示。

由图 2(a)可明显看出,现有的锯切加工方式浪费物料,新锯切方法是可以提高出材率的,为了显示具体出材率的增量,实测 10 根小径木的具体数据进行分析。由于梯形板的厚度有限,且沿小径木小头短径方向计算时曲率多为 $\leq 1$ 的,因而可以进行曲边直线化近似求解,这样会导致 2 种锯切方式的出材率均略微下降,但对 2 种出材率之间的差值影响微乎其微,故设定梯形板厚度为 30 mm、单侧锯切深度 10 mm,计算后得到出材率差值(表 1)。

小径木梯形板主要用途之一是用来造集成材,由表 1 可得平均出材率高出了 6.73%,若以年产 5 万  $\text{m}^3$  的大型锯材厂为例,提高 6.73% 的出材率,按市场松木集成材价格 3 800 元/ $\text{m}^3$  计算,则每年可以可增加纯利润 1 278.7 万元,其经济效益不言而喻。

### 1.2 提高小径木梯形板加工效率、加工精度的方法

小径木梯形板窄面的加工精度越高,拼接的效果越好,现有的加工方式是在不同的设备上先对梯形板进行两侧的锯切,然后再进行两侧的刨切,2 道工序经过 2 次翻料,4 次上料,一个工件被加工完毕。4 次上料定位带来 4 次的定位误差,严重影响其加工精度,4 次上料、2 次翻料同时也消耗了大量工时。

因而粗刨与精刨可以依次同时进行。和现有的加工方式比,新设计方法减少了 3 次定位误差,多了 1 道表面处理工序,所得工件的精度大幅度提高。减少了 3 次上料、2 次翻料以及这 2 次翻料中间所需要的运输时间,小径木梯形板的加工效率自然倍增。

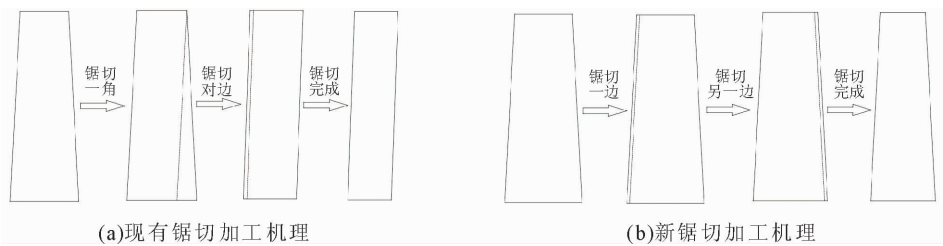


图 2 现有锯切机理与新锯切机理对比

Fig. 2 Comparison between existing sawing mechanism and new sawing mechanism

1.3 小径木梯形板的工艺流程

上述分析可以确定所要设计小径木梯形板锯刨机能够提升出材率、效率和定位精度，方式方法的创

新意味着工序的改变,通过分析小径木梯形板窄面的加工机理,得到其工艺流程(图 3)。

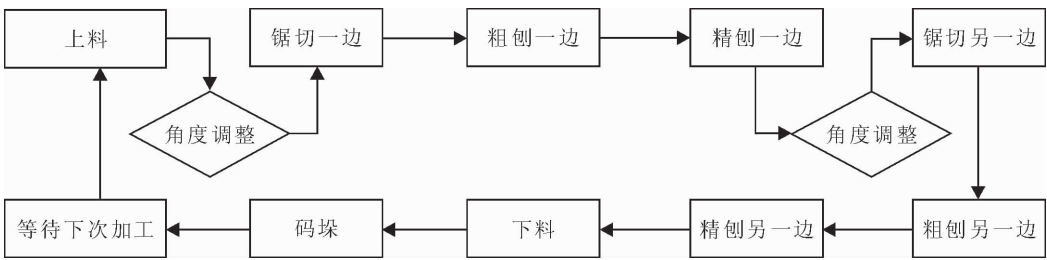


图 3 小径木梯形板加工工艺流程

Fig. 3 Process of producing trapezoidal plates from small-diameter lumber

2 小径木梯形板锯刨机总体结构设计

通过分析小径木梯形板的工艺流程,设计小径木梯形板锯刨机的整体结构(图 4)。整台机器的核心组件由锯切组件、粗刨组件、精刨组件、上压辊组件、下传动辊台、以及进给台构成,在加工过程中主要对梯形板进行锯裁、粗刨、精刨加工,其加工过程的稳定性会对小径木梯形板的加工质量产生影响,因此整个加工结构、定位结构的设计是整台设备设计的关键所在。

置便在梯形板上表面划出一条基准红线,此基准红线即是最佳锯路位置。如图 5 所示,此时进给台带动板材沿纵向导轨移动,将要去除材料部分与所留部分沿此最佳锯路处分开,同时锯切组件沿导轨方向移动,将锯片对准锯路位置。此动作完毕后,进给台横向移动,将梯形板送至下压辊处,上压辊下压与下传动辊共同作用将板材送入锯切工位,锯切组件开始工作,锯切完成后,位于锯切组件后部的上定位压辊开始下压,令梯形板保持住原方位并横向传输,在粗刨位置处的上压辊与下传动辊共同作用下进入粗刨工位,粗刨刀架调整进给量并开始粗刨加工,梯形板前端粗刨完毕后进入精刨工位,精刨刀架调整进给量并进行精刨加工,粗刨、精刨加工相继完毕后,加工组件、定位组件相继复位。

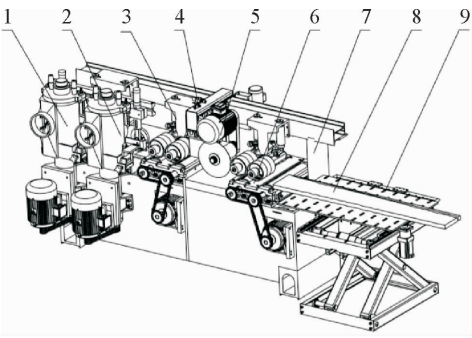


图 4 小径木锯刨机总体结构

Fig. 4 Overall structure of small-diameter lumber sawing planer

结合工艺流程分析小径木梯形板锯刨机的加工原理,上料设备将梯形板置于进给台上,激光划线装

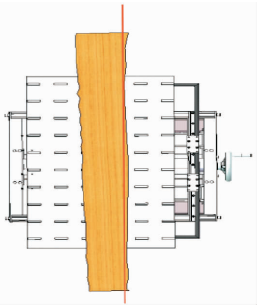


图 5 最佳锯路示意图

Fig. 5 Optimal sawing path diagram

### 3 锯切组件设计

#### 3.1 锯切原理分析

纵向锯切梯形板时,首先锯齿向木材运动,主刃在垂直纤维方向端切锯路底部的木材纤维,锯端前后齿面开始压缩木材,将其剪裂并弯断成切屑,同时前齿面横纹压缩与其接触的木材,当压力足够大时,锯路两侧的纤维平面被剪裂。锯齿不断深入并将切屑抛出,此时锯路内的木材被一片一片地切成碎屑并抛出,重复此过程,最终木材被锯开。这一过程中的受力分析如图 6 所示。

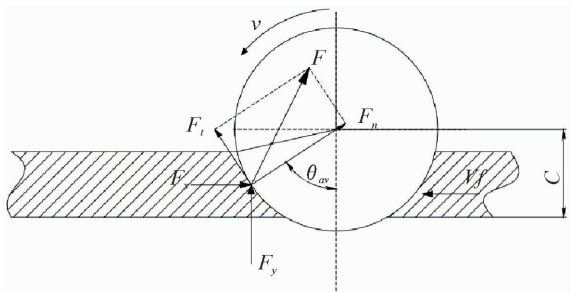


图 6 纵锯时受力分析

Fig. 6 Force analysis diagram during longitudinal sawing

锯切过程中锯片受到的作用力可以分解成法向力  $F_n$  和锯切力  $F_t$ ,其中其锯切力  $F_t$  是锯切时的主要切削力,是计算切削功率的主要依据,而法向力  $F_n$  直接影响锯片工作时的稳定性刚度和磨损。当研究木材纤维受力情况时,可以将  $F_n$ 、 $F_t$  正交分解成沿  $x$  向的  $F_x$  与垂直进给方向的力  $F_y$ 。

#### 3.2 锯片切削力的计算

以东北地区种植的小径木为原材料,其纵解切削力<sup>[9]</sup>为:

$$F_c = \sum F_t = (P_t \cdot b \cdot \sin\theta_{av} + a_\lambda H) \frac{f_z \cdot H}{t} \quad (1)$$

式中,  $F_t$  为每齿切削力(N);  $P_t$  为单位切削力(MPa),这里取  $a > 0.1$  mm 的情况计算;  $b$  为锯路宽度(mm);  $\theta_{av}$  为运动遇角( $^\circ$ );  $f_z$  为每齿进料量(mm);  $H$  为锯路高度(mm);  $t$  为齿距(mm);  $a_\lambda$  为拨料时的影响摩擦力变化强度系数。

已知:纵向锯片外径为  $D=315$  mm,锯片齿数  $Z=60$ ,切削角度  $\delta=60^\circ$ ,锯片厚度  $S=2.2$  mm,进料速度  $V_f=32$  m/min,锯路宽度选为 3.2 mm,锯路高度  $H=30$  mm,锯片转速  $\eta=2\,850$  r/min,锯片中心到工作台面高度  $C=75$  mm。

##### 1)单位切削力

$$P_t = \frac{C_p \cdot f'_{//-\perp}}{a} + (A_{//-\perp} \delta + B_{//-\perp} V - C_{//-\perp}) \quad (2)$$

式中,  $A_{//-\perp}$ 、 $B_{//-\perp}$ 、 $C_{//-\perp}$  是过渡修正系数;  $C_p$  为变顿系数,这里由于锯齿锋利,取  $C_p=1.0$ ;  $V$  为切削速度(m/s);  $f'_{//-\perp}$  为修正系数,由松木经验公式进行计算;  $a$  为切屑厚度。

##### 2)运动遇角

纵解原锯锯切时:  $\varphi = \theta_{av}$

$$\theta_{av} = \arccos \left[ \frac{C + \frac{H}{2}}{R} \right] = 55.2^\circ \quad (3)$$

式中,  $R$  为锯片半径;  $C$  为圆锯中心到工作台表面的总高度。

##### 3)切削速度

$$V = \frac{\pi D n}{6 \times 10^4} = 46.98 \text{ m/s} \quad (4)$$

式中,切削速度  $V$  对单切削力的影响在不同的速度范围内不同,当  $V < 70$  m/s 时,式(4)以  $90-V$  的数值带入。

##### 4)锯片齿距 $t$

$$t = \frac{\pi D}{Z} = 16.49 \text{ mm} \quad (5)$$

将上述计算结果带入(2)式中,求出单位切削力  $P_t=38.60$  MPa,将所有计算结果带入式(1)中得到  $F_c=47.06$  N

#### 3.3 锯切主轴功率的计算

根据 3.2 所计算出的切削力,计算其切削功率为:

$$P_c \approx \sum F_t \cdot V \cdot 10^{-3} = 2.06 \text{ kW} \quad (6)$$

选取机床传动效率  $\eta=0.75 \sim 0.85$ ,这里取为 0.75,则电机功率为:

$$P_e = P_c / \eta = 2.75 \text{ kW} \quad (7)$$

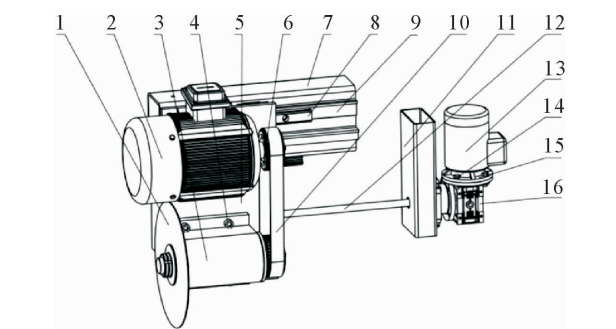
根据上述功率选取锯切主轴电机额定功率 3 kW,额定转速为 3 000 r/min,电机型号为 Y100L-2。

#### 3.4 锯切组件结构设计

小径木梯形板锯刨机锯切总成如图 7 所示,支撑梁、焊架均联接在小径木梯形板锯刨机的龙门架上,电机与锯切基座安装在滑动台面之上,滑动台底部通过燕尾形导轨副与支撑梁相联接,步进电机组件通过螺纹联接置于焊架之上,这样整个锯切总成就被固定在龙门架之上,步进电机通过驱动丝杠转动来控制锯切轴系的移动<sup>[10]</sup>。

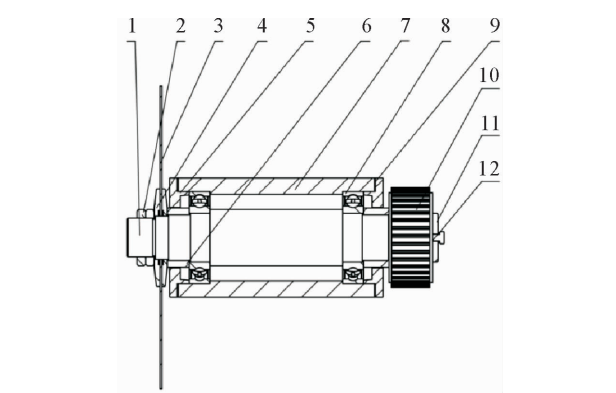
锯切轴系内部固定方式如图 8 所示,锯切轴通过 2 个对称布置的角接触球轴承将其固定在轴套内,两端的套筒顶住轴承内圈对轴进行轴向固定,阶梯轴右端开有紧固螺纹孔,轴端挡圈抵住带轮,并由紧固螺钉将其锁紧<sup>[11]</sup>,带轮被紧紧固定在轴上。锯片左右两侧分别置有锯片压块,在锯片右端的套筒

与锯片左端两个圆螺的共同作用下,锯片压块将锯片轴向固定。当电机通过同步带将动力传递给锯切轴系,锯切轴系便可带动锯片转动对小径木梯形板进行锯切加工。



注:1.锯片;2.电机;3.锯切基座;4.螺钉;5.滑动台;6.同步带轮;7.支撑梁;8.导轨;9.导轨座;10.同步带;11.焊架;12.丝杠;13.步进电机;14.紧固螺钉;15.法兰盘;16.减速器。

图 7 锯切总成  
Fig. 7 Saw cutting assembly



注:1.锯切主轴;2.圆螺母;3.锯片压块;4.锯片;5.端盖;6.套筒;7.锯切基座;8.角接触球轴承;9.垫片;10.同步带轮;11.轴端挡圈;12.锁紧螺钉。

图 8 锯切轴系内部联结方式  
Fig. 8 Saw cutting shafting internal coupling mode

## 4 刨削组件设计

### 4.1 刨削原理分析

在木材的切削过程中,通常将刨削看成是主运动在进给线上分运动的方向与进给运动方向相反的逆铣过程<sup>[12]</sup>,如图 9 所示。在切削过程中,刨刀高速旋转,同时压板挤压木料,通过上、下送料辊使物料与刨刀充分接触,完成刨削。

刨削过程中,刀具绕中心进行回转,受力分析时可将其看成刨刀做圆周运动,由于转速很高,可以近似看做是一个高速切削的圆周进行切削,任取一点 A 进行受力分析,如图 10 所示,对木材的作用力有主铣削力  $F_x$  和垂直铣削分力  $F_y$ ,而进给力  $F_v$  可以分解成沿切线方向的进给分力  $F_{v2}$  和沿法线方向的进给分力  $F_{v1}$ , $F_{v2}$  的方向与刀具回转方向相反,其大

小等于  $F_x$  与  $F_y$  在切线方向上的分力, $V_f$  是进料速度,其方向为进料方向。

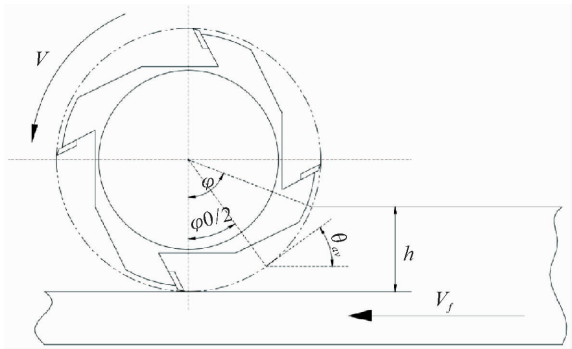


图 9 刨刀逆铣示意图  
Fig. 9 Schematic diagram of plane cutter reverse milling

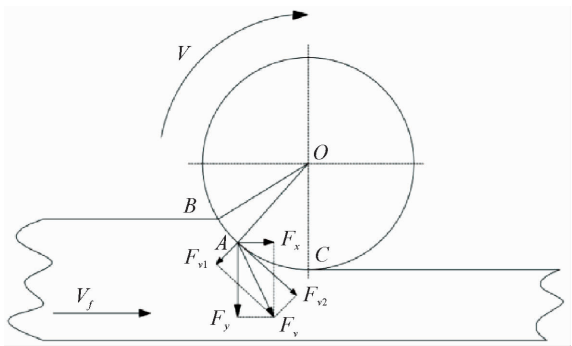


图 10 刨切切削力分析  
Fig. 10 Planing cutting force analysis

### 4.2 刨刀切削力的计算

木材切削力的大小与切屑厚度、树种、含水率、切削速度、刀具锐利程度、切削角、后角等存在一定函数关系,计算过程中多采用文献[9]中的切削力公式并结合一些实际数据而得到的经验公式。

以东北地区种植的小径松木为例,刨刀转速  $n$  为 6 000 r/min,切削角  $\delta=30^\circ$ ,木材含水率为 15% 时,木材含水率修正系数  $a_w=1.0$ ,取工时为 3 h 的刀具锐利系数  $a_q=1.15$ 、 $a_h=1.60$ ,切削圆直径  $D=135$  mm,纵向取  $A_{//}=0.020$ 、 $B_{//}=0.007$ 、 $C_{//}=0.55$ 、 $H_{//}=0.066$ ,刨削厚度为 5 mm。求解参数如下:

1)单位切削力

$$K=9.807a_w\left[a_q(A\delta+BV-C+\frac{a_hH}{e})\right] \quad (8)$$

2) 切削速度

$$V=\frac{\pi \cdot D \cdot n}{6 \times 10^4} \quad (9)$$

3) 主铣削力

$$F_x=Ke \quad (10)$$

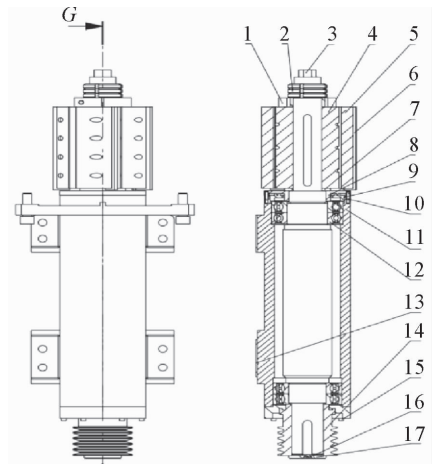
将上述参数带入式(9)求得  $V=42.39$  m/min,带入式(8)求得单位切削力为  $K=4.307$  MPa,带入式(10)求得主铣削力为  $F_x=21.535$  N/mm。



由于刨切前已经有一道锯切工序,因而这部分所下尺寸并不大。其作用一是将锯切工序残留下来的各种缺陷刨削干净,作用二是通过精刨将其表面质量提高到所需要的程度<sup>[13]</sup>。

4.3 刨削轴系的结构设计

小径木梯形板在刨削过程中会受到轴向和径向载荷,为使其在传动过程中更加平稳,采用了 2 对陶瓷球角接触球轴承对称布置将主轴径向固定,以提高其加工精度<sup>[14]</sup>。刨削轴系内部结构如图 11 所示,刀具轴向挡圈和刀具套筒将刀具架进行轴向固定,并由 3 圆螺母将其锁紧,2 组角接触球轴承将刨切主轴轴向固定在刀具套筒内,刨切主轴开有 2 个键槽,大键槽通过键联接将动力传递给刀具架,带动刨刀刨削梯形板,小键槽通过键联接将带轮的功率转化成刨削主轴的动力,沉头螺钉与轴端挡圈将带轮固定在刨削主轴上,内端盖与外端盖之间构成机械曲路密封,采用润滑效果良好的润滑脂进行填充,既保证润滑效果,也增强了密封效果。



注:1. 刀具轴向挡圈;2. 圆螺母;3. 刨削主轴;4. 刀架;5. 压刀垫块;6. 刨刀;7. 刀具套筒;8. 外端盖;9. 内端盖;10. 紧定螺钉;11. 刀轴套筒;12. 角接触球轴承;13. 套筒壁沿;14. 带轮;15. 螺钉;16. 沉头螺钉;17. 轴端挡圈。

图 11 刨切轴系内部剖视图

Fig. 11 Internal sectional view of planed shafting

5 锯切主轴的静力学分析

在小径木梯形板锯刨机中,锯切是首道工序,其加工质量关系到后面的粗刨和精刨的质量,因此对其锯切主轴进行静力学分析并校核很有必要。在分析之前,首先根据主轴工作情况判断其受到的径向载荷、轴向载荷方向以及转矩<sup>[15]</sup>,受力分析如图 12 所示。

主轴材料选用 45 号钢,由《机械设计手册》中计算带轮段压轴力为  $F_{R1}=642.527\text{ N}$ ,带轮段扭矩为  $T=10.502\times 10^3\text{ N}\cdot\text{mm}$ ,锯切轴段所受到锯切力

为  $F_{R2}=47.06\text{ N}$ ,锯切轴段扭矩为  $T=10.502\times 10^3\text{ N}\cdot\text{mm}$ 。将 SolidWorks 的三维主轴模型保存成 .x\_t 文件,通过 ANSYS15.0 导入(图 13)。

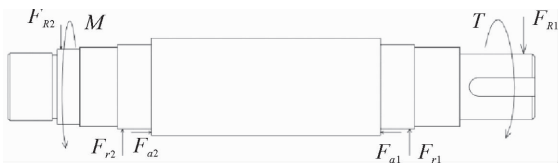


图 12 锯切主轴受力分析

Fig. 12 Force analysis diagram of sawing spindle

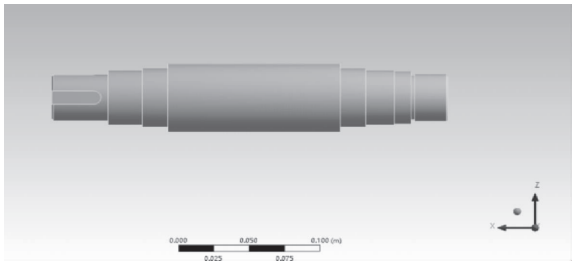


图 13 锯切主轴有限元三维模型

Fig. 13 Finite element three-dimensional model of sawing spindle

首先进行网格划分<sup>[16]</sup>,这里取划分的节点为 94 600 个,划分单元为 54 996 个,划分网格如图 14 所示。

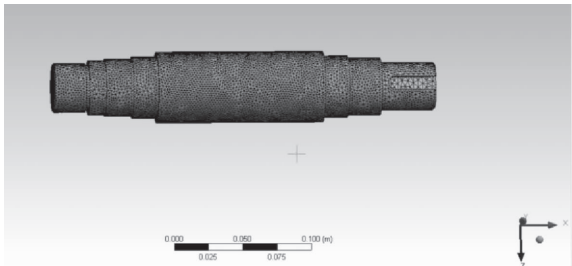


图 14 锯切主轴有限元模型网格划分

Fig. 14 Finite element meshing of sawing spindle

通过实际的载荷分析,对锯切主轴进行添加边界约束条件,施加载荷<sup>[17]</sup>,即可得到加载示意图(图 15)。

上述操作完毕,对其进行求解计算,依次生成应力、应变和主轴最大变形云图<sup>[18]</sup>(图 16)。

由图 16 可以看出,锯切主轴最大的应力为 7.435 MPa,此应力集中处是带轮安装轴段,取安全系数  $[S]=2$ ,屈服强度为  $\sigma_s=355\text{ MPa}$ ,最大许用应力为  $\sigma_s=177.5\text{ MPa}$ ,远大于锯片的最大应力,因此锯切主轴的结构设计合理,能够满足锯切加工时的强度要求。由图 16(b)可以看出,锯切主轴的最大应变为 0.042 316 mm/m,远小于此锯切主轴的挠度值 2.65 mm/m;由图 16(c)可以看出,锯切主轴的最大变形量为 0.002 178 8 mm,一般主轴工作时传动累计误差应保证在 0.25~0.75 mm 范围内,因此锯切主轴的加工精度可以保证,能够满足对工件加工精度的要求。

