

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2021068

中密度纤维板铺装成型技术与装备研究进展

张国梁^{1,2,3}, 张栋^{1,3}, 侯晓鹏⁴, 任燕珍², 沈明哲^{1,3}

(1. 河北农业大学机电工程学院, 河北保定 071001; 2. 河北农业大学林学院, 河北保定 071000;

3. 河北省智慧农业装备技术创新中心, 河北保定 071001; 4. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)



摘要: 铺装成型是中密度纤维板工业化生产的重要工序。针对中密度纤维板工业化铺装成型的机械结构与质量控制, 分析纤维计量仓、机械式铺装头、均平与扫平装置、成型皮带、铺装质量、连续预压致密与预压高度同步升降控制、速度同步性控制等方面的技术特点和现存问题, 提出工业化铺装成型技术进一步的研究方向, 为中密度纤维板铺装成型技术研究和创新设计提供参考。

关键词: 中密度纤维板; 铺装成型; 机械结构; 质量控制

中图分类号: TS64; TS653.6; S784

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 02-0018-08

Review on Mat-Forming Technology and Machinery of Medium Density Fiberboard

ZHANG Guo-liang^{1,2,3}, ZHANG Dong^{1,3}, HOU Xiao-peng⁴, REN Yan-zhen², SHEN Ming-zhe^{1,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei, China;

2. College of Forestry, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China;

3. Technology Innovation Center of Intelligent Agricultural Equipment, Baoding 071001, Hebei, China;

4. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The mat-forming is an important process in the industrial production of medium density fiberboard (MDF). In order to review the mechanical structures and quality control of MDF mat-forming technology, technical characteristics and existed problems were expounded with seven aspects including the fiber measuring chute, the mechanical forming head, leveling roll and sweeping roll mechanism, the forming belt, the weight control, the synchronous control system of the continuous precompression and prepressing height lifting, and the synchronous speed control. The development trend of the pavement forming technology for the industrialization was pointed out to provide references for the research and innovative design of MDF mat-forming technology.

Key words: MDF; forming; mechanical structure; quality control

中密度纤维板 (medium density fiberboard, MDF) 的铺装成型是将施胶木纤维均匀铺撒成一

定厚度规格, 并压制成为一定密实度的带状板坯的过程, 包括铺装和预压致密两个组成部分, 是 MDF 生产中的重要工序^[1]。铺装及预压成型质量和精度直接影响 MDF 成品板的质量、产量及成本^[2]。20 世纪 90 年代, 市场上纤维板生产用的铺装机通常有两类: 真空气流铺装机和机械式铺装机^[3]。1999 年美卓公司 (Metso) 将纤维板铺装机的铺装

收稿日期: 2021-05-26; 修改日期: 2021-09-20

基金项目: 河北省自然科学基金项目“低品质单板卷曲重组‘原木’辊压热成型机理研究”(C2021204003); 河北农业大学大学生创新创业项目“耙辊式纤维铺装机构刚柔耦合虚拟样机设计与运动仿真分析”(s202010086042)。

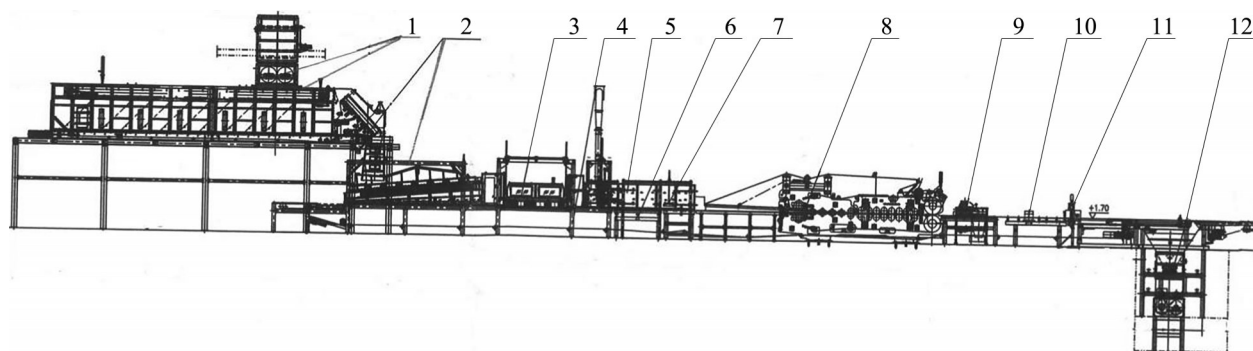
作者简介: 张国梁 (1983—), 男, 副教授。Email: lxyzhgl@hebau.edu.cn

头改进为上下活动式^[4]，铺装头角度可根据铺装板坯厚度自由调整，并改变计量料仓壁的材料组成，采用隔热材料，降低因凝结水粘连纤维对铺装质量的影响。21世纪初辛北尔康普（Siemplkamp）研发的新型MDF铺装机，纤维从料仓底部的计量输送带和出口前端的盘式疏散辊进入，再经增加的疏散辊后输送到齿形辊式机械铺装头，齿形辊的倾斜度和速度可调节，以保证横纵方向铺装的均匀性^[5-6]。经过几十年的快速发展，人造板的铺装成型技术已经取得了进步^[7-8]，但纤维质量的多样性对MDF铺装成型的技术提出了更高的要求。

本文主要从MDF铺装成型装置的机械结构、质量控制等方面进行综述分析，以期为我国MDF铺装成型技术的进一步提升提供参考。

1 MDF铺装成型工段设备构成

在MDF生产过程中，纤维经过旋风分离器后随即进入铺装成型工段。MDF铺装成型工段的典型工艺流程为：纤维计量、疏散、铺装整平、含水率测定、质量称量、预压，板坯纵向齐边、金属探测剔除、密度检测和废板回收，设备构成如图1所示。



1 纤维计量仓;2 机械铺装机;3 均平/扫平装置;4 成型皮带运输机;5 含水率测定仪;6 板坯秤;
7 永磁除铁器;8 连续式预压机;9 纵向齐边装置;10 金属探测仪;11 密度检测仪;12 废板回收装置。

图1 MDF铺装成型工段设备构成

Fig.1 Equipment composition of MDF mat-forming process

纤维经过旋风分离器之后先通过摆动下料器进入计量料仓，再被输送到疏散装置；疏散纤维进入铺装头被铺撒在成型皮带上，经均平/扫平装置整平；然后依次经过含水率测定仪、板坯秤后进入连续式预压机被压缩致密。纵向齐边装置按照工艺要求的板坯宽度裁切板坯，两侧余料由除尘吸口带走；金属探测仪和永磁除铁器探测和剔除铁质金属杂质；之后密度检测仪检测板坯的堆积密度是否达标，不合格的板坯（包括有金属杂质的板坯）通过废板回收装置处理，合格的板坯通过板坯运输机/装板皮带运输机进入热压工序。

不同生产线的设备略有不同，如有的在计量料仓之前布置摆动下料器；对于薄板生产线，在热压机之前还配置重型辊式预压机，如图2所示为Siemplkamp集团的重型辊式预压机。



图2 薄板生产用辊式预压机

Fig.2 Roll-type pre-presser used for the thin MDF

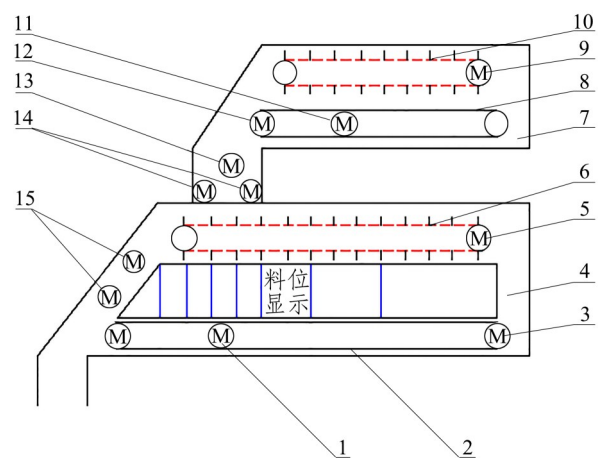
2 MDF铺装成型的机械结构与质量控制

2.1 纤维计量仓

纤维计量仓用于储存从旋风分离器下来的纤维，作为生产工序间的缓冲，以保证铺装板坯的

均匀性和生产的连续性,因此纤维计量仓应有强的密封性,以及足够大的强度、刚度和容积。配置多个旋风分离器的铺装机,为保证铺装纤维堆积密度的均匀性,还可增加过渡料仓。

包含过渡料仓的纤维计量仓如图3所示。过渡料仓内置有传送带,由变频电机驱动,可设定运行速度和运行方向;为避免纤维在仓内静止结团并辅助调节纤维的输送量,过渡料仓内设置回耙齿链,由普通三相异步电机驱动,单向运行。过渡料仓通过摆动下料器与计量料仓相连通。



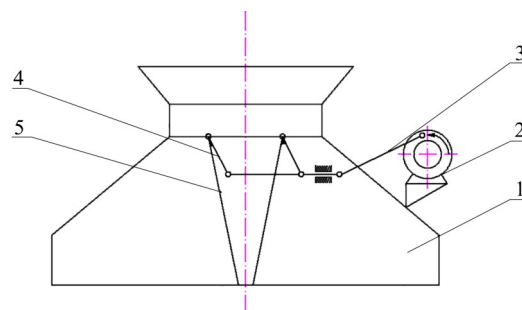
- 1 计量带清扫电机;2 计量带;3 计量带驱动电机;
4 计量料仓;5 计量料仓回耙驱动电机;6 计量料仓回耙链;
7 过渡料仓;8 过渡皮带;9 过渡料仓回耙驱动电机;
10 过渡料仓回耙链;11 过渡皮带清扫电机;
12 过渡皮带驱动电机;13 摆动下料器驱动电机;
14 疏散装置驱动电机;15 疏散辊驱动电机。

图3 纤维计量仓

Fig.3 Fiber measuring chute

摆动下料器的结构形式可采用曲柄连杆结合平行四边形机构^[9],如图4所示;也可以采用扇形链条式,如图5所示。

工作时,摆动下料器的驱动电机通过曲柄连杆3驱动摆板5绕轴往复左右摆动(图4)或通过链轮驱动与其相啮合的链条,从而带动内轴往复摆动(图5),使施胶纤维沿计量料仓横向均匀分布下落。此过程中,精确地控制摆板运动过程中的速度变化至关重要,摆板的摆动速度与计量带运行速度相关^[10]。通过试验研究建立以摆动下料量的横向偏差为目标函数,以摆角、摆动速度、摆板长度等为参数的调控模型,提高纤维下落至计量料仓的横向密度均匀性。



- 1 仓体;2 减速电机;3 曲柄连杆;4 平行四边形;5 摆斗(板)。

图4 连杆式摆动下料器

Fig.4 Connecting rod swing fiber feeder



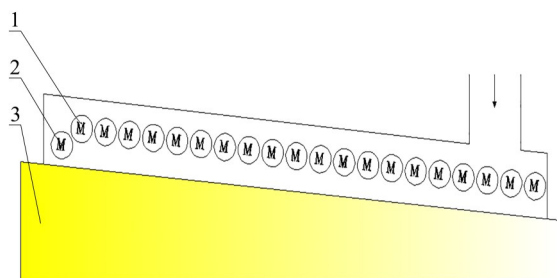
图5 链条式摆动下料器

Fig.5 Chain swing fiber feeder

同过渡料仓相似,计量料仓内通过计量带将纤维输送至料仓出口,计量带电机依靠首末端对称配置的两个变频电机驱动,并配有计量带清扫装置;同样在计量料仓内设置回耙齿链辅助计量带进行体积计量,计量料仓出口位置设置纤维疏散辊用于疏散纤维。为确保生产安全性,安装温度检测传感器和火花报警器;此外,计量料仓内还设有称重传感器,有些称重传感器还可能承担着料位器的作用,依称重传感器的厂家和型号而定;当然,也有生产线采用阻旋式料位器和接近光电管等作料位器用,如果采用接近光电管作为料位器,还需要考虑使用过程中的清洁并防止错误指示。为避免料位传感器错误指示及可能引起的误操作和误动作,可引入可靠性技术^[11],既要基于传感器本身寿命指标进行可靠性分析,又可将用于料位检测的各相关元件视为一个系统并作为研究对象,将该系统中与感应距离或感应角度/面积相关的若干参数视为随机变量^[12],建立料位器错误指示的可靠性数学模型,继而计算料位器误指示的失效概率。

2.2 机械式铺装头

机械铺装头以圆盘辊为单元, 多根平行排列并成一定倾角, 如图6所示, 铺装辊电机变频调速, 且可正反转, 保证所有铺装辊上的纤维均匀布散; 在铺装头末端可配置排料螺旋, 排走没有铺落的比较粗大的纤维或纤维团。铺装辊的结构形式包括针辊式和齿盘式等, 以齿盘辊为例, 结构上以芯轴为中心, 多个齿形圆盘以定位套间隔并通过键连接, 以保证圆盘齿位于同一直线, 多个铺装辊的旋转速度和方向可调节。铺装辊转速、轴间距、多轴布置的倾角、齿形圆盘间距和直径影响纤维的铺装均匀性, 可结合流体力学等方法通过试验设计探寻较优的参数组合。



1 铺装辊驱动电机; 2 排料螺旋电机; 3 纤维板坯。

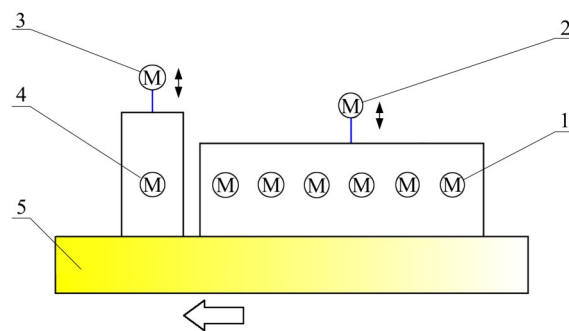
图6 机械式铺装头布置

Fig.6 Layout of mechanical forming head

2.3 均平与扫平装置

经过铺装的纤维沉积在底部成型皮带上形成板坯, 为了保证纵向和横向上的厚度一致, 沿板坯运行方向, 在铺装头后面设置均平和扫平装置(图7)。均平装置依靠多个均平辊调整板坯厚度, 均平辊驱动电机均为变频式, 在高度上通过升降电机和两侧的螺母丝杠机构调节, 可根据板坯厚度和压缩比等因素即时调节转速、转向。均平板坯再通过带反向旋转的扫平辊和升降调节机构的扫平装置, 进一步提高铺装质量的一致性。

MDF生产是先施胶后铺装, 含有一定水分和胶分的纤维物料在机械式铺装辊、均平辊和扫平辊表面会产生粘连、包覆现象。铺装辊表面自清洁技术可从两方面研究: 1) 基于仿生技术, 探索具有良好的防粘减阻特性的铺装执行部件^[13-14]; 2) 采用自抖动技术, 通过一定的振动方式和控制技术实现铺装辊均平辊和扫平辊表面粉尘的自脱落。



1 均平辊电机; 2 均平辊升降电机; 3 扫平辊升降电机;
4 扫平辊; 5 纤维板坯。

图7 均平与扫平装置示意图

Fig.7 Sketch of leveling roll and sweeping roll mechanism

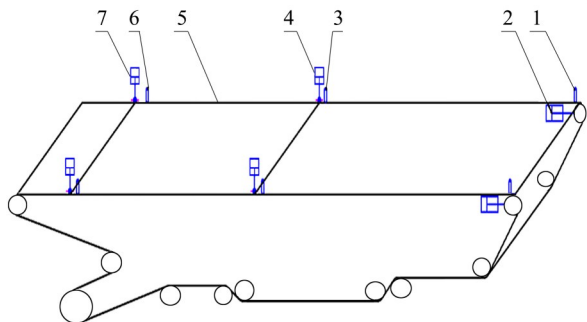
针对自清洁仿生铺装辊的探索研究, 可借鉴离散元理论^[15], 研究思路如下: 通过纤维粘附特性试验获得施胶纤维-铺装辊界面宏观粘附力, 标定施胶纤维的细观力学参数并进行试验验证^[16], 进一步基于机械铺装机的铺装特性, 计算分析不同铺装参数和工况下的铺装辊表面粘附力的影响规律, 以得到自清洁效果理想的铺装辊。

借鉴地面机械触土部件减粘降阻的方法, 具有振动清洁作用的铺装辊可采用受迫振动和自激振动两种作用方式^[17-18]。受迫振动基于振动原理实现铺装辊上纤维粉尘的自脱落, 通过振动机构如曲柄摇杆机构、偏心振子、齿轮变速箱等, 将铺装辊驱动电机转动的分动力转化为铺装辊在旋转同时的振动。若采用自激振动方式, 可探索将铺装辊内部设计成类似于木工压刨床的前进给辊筒的分段式, 依靠内部弹簧的伸长与压缩使铺装辊产生振动^[19], 如此则需要对分段数量、弹簧刚度、转速、纤维粉尘吸附量等参数进行试验分析, 以确定较优的激振参数。当然, 探索研究的前提是要保证和提高铺装辊的铺装均匀性, 以此为最主要的指标进行探索试验。

2.4 成型皮带

成型皮带从纤维计量仓的尾端一直延伸至废板回收装置处, 通过伺服控制的电机驱动皮带运行, 并在返回段的多个位置设置清扫装置。为保证板坯的稳定性, 成型皮带运行跑偏控制装置是不可或缺的, 往往在成型皮带尾部、中间和前部等多个位置设置跑偏检测传感器和对应的气动调

偏装置(图8)。相比于连续压机的钢带跑偏检测用的模拟量输出的位移传感器,成型皮带的跑偏检测传感器常用的是开关量输出的限位开关,分别作为跑偏和极限位检测,并辅助调偏电磁阀对作为执行机构的调偏气缸发出动作命令。



1 头部跑偏检测开关;2 头部调偏气缸;3 中部跑偏检测开关;
4 中部调偏气缸及压轮;5 成型皮带;
6 尾部跑偏检测开关;7 尾部调偏气缸及压轮。

图8 成型皮带调偏布置示意图

Fig.8 Layout of forming belt offset adjustment

成型皮带的强度和保持表面清洁不粘料亦很重要。当出现不合格板坯时,成型皮带末端需要在进给小车的拖动下前进或后退,以打开或关闭废板回收口,加之成型皮带中部和尾部靠气缸控制的压轮装置挤压皮带边缘实现调偏,易造成皮带的破坏。改善皮带调偏时的受力状况可减少皮带受损,如适当增加皮带中部和尾部的调偏点数量,并将跑偏感应器的位置与调偏气缸适当靠近;控制成型皮带头部的跑偏亦会减少其中部和尾部的调偏压力,将成型皮带头部的调偏执行机构由气动更换为机械丝杠或气动与丝杠组合方式,可提高其调偏的稳定性。当然,选用强度高、韧性好的皮带材料必将提高成型皮带的使用寿命,定期在皮带与压轮接触的边缘位置涂刷耐磨涂层亦行之有效^[20]。

2.5 铺装质量控制

板坯铺装精度主要依赖于单位面积上纤维质量的控制精度。影响铺装质量控制精度的因素包括:计量料仓中计量带的运行速度、纤维在计量带上的计量高度、扫平辊的扫平量(由扫平辊高度控制)、成型皮带速度等,其控制逻辑如图9所示。

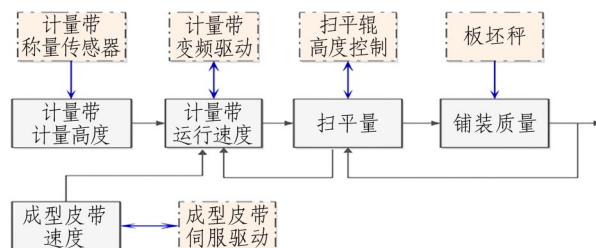


图9 铺装精度控制逻辑

Fig.9 Logic of forming precision control

计量料仓内在计量带的下方配置称重传感器,控制计量带上的纤维质量,使纤维堆积高度稳定在一定范围,以控制纤维的堆积密度并指示料位,保证纤维计量的准确性。此外,板坯通过均平和扫平装置后,会再次经过板坯秤连续称量,于人机交互界面显示单位面积的质量和板坯横向差值,此信号还作为扫平辊扫平高度调节的输入信号;成型皮带速度由皮带伺服驱动电机控制,并作为计量带运行速度的调节信号,计量带速度、铺装质量、扫平量、成型皮带速度之间互锁闭环控制。另外需要说明的是,为提高扫平辊对铺装质量偏差的响应速度,板坯秤与扫平辊的距离不应过大,有的MDF企业将此距离由原来的240 cm调整为65 cm后,有效提升了铺装均匀性^[21]。

纤维铺装成型皮带上,在一定幅面的宽度内,铺装厚度往往还存在差异,导致两侧板坯密度比中间位置的偏低,因此应进一步设计铺装质量精确调节系统。以广西三威林产岑溪市人造板有限公司为例^[22],其在成型皮带的交接位置安装了质量探测器,将成型皮带交接位置与板坯秤接触时的质量波动过滤,并将扫平辊的高度调节改为阶梯递进式,即铺装质量波动越大,扫平辊的调节速度越快,实践表明铺装质量的稳定性得以有效提高。对于铺装质量先检测后调整的控制方式,除了通过优化铺装质量的传递函数、PID参数等实现多变量的闭环耦合控制外,还可探索预测控制方法^[23-24]。以模糊预测系统建立过程为例,可尝试将铺装质量误差、铺装质量误差变化率的一个或两个的论域设置为可变并进行在线调整,以提高模糊预测系统的抗随机干扰能力,抑制可能出现的铺装质量的持续抖动;铺装质量的模糊判别输出值再反馈到扫平量的调控系统中,继而提高控制系统整体性能。

2.6 连续预压致密与预压高度同步升降控制

预压工艺的基本要求是通过加压使初始铺装的松散板坯压缩致密，形成宽度一致、具有一定紧实度的板坯，防止板坯在运输过程中断裂和破损，热压时板坯内空气外逸破坏板坯形状^[25]。根据板材类型，预压板坯厚度的压缩率通常为50%~90%，按加压方式主要有平压和辊压两种，现多用辊压方式。

采用辊压方式进行的预压往往依靠多组压力辊实现对板坯的压力压制^[26]，图10所示为镇江中福马机械有限公司开发的MDF连续式预压机。连

续式预压机的板坯进给执行部件包括上皮带、下皮带和上网带^[27]；在入口位置，上网带依靠升降机构调节成具有一定入口角度的“鳄鱼嘴”形状，以便于经过铺装成型且依靠带式运输机进给的板坯顺利进入预压机。板坯进入“鳄鱼嘴”后，在皮带和上下预压辊压力作用下，将板坯中的大量空气快速排出；当板坯进入保压区时，上下对称设置的多组保压辊和皮带仍对板坯保持着较高压力，从而进一步排出板坯内部的空气，同时保持板坯厚度的塑性变形，减小板坯离开预压机后的弹性恢复。



图10 连续式预压机

Fig.10 Continuous pre-press

松散板坯通过加压辊的高低位置调节实现压缩致密，而为了达到位置调节时的精度，对多个液压缸或者支撑丝杠等升降执行元件的同步控制至关重要。在同步控制系统中，位移传感器可能存在零点漂移，可用电流测量法校正升降位移传感器的零点，并通过测量主油缸实际位移和传感器返回的电流值对位移传感器进行线性标定，以达到预压机主油缸提升位移的一致性要求^[28]。在连续式预压机的控制系统设计中，可采用高精度纵、横倾角传感器检测辊压段上网带的水平状态及纵倾角度，并反馈给可编程序逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）形成闭环控制；并在预压机升降液压油缸比例阀的比例积分微分（proportion integration differentiation, PID）控制中，将纵、横倾角传感器的偏差及其偏差变化率作为模糊PID控制的输入变量。通过模糊逻辑算法整定出PID的三个参数，使其具有自适应性。对于液压系统中的多组多排油缸的同步升降控制，斜率式渐次逼近算法可使各升降系统在任意时刻

的位置误差都在理想范围内，从而达到同步升降目的^[29]。综合来看，预压高度同步升降同时依赖机械装置和控制的软硬件技术，并需重点考虑机构的可靠性和控制精度。

2.7 速度同步性控制

在MDF连续化生产的铺装成型过程中，各主要工序之间保持速度的同步性是保证纤维板坯铺装成型质量的关键。根据工业现场的实际控制逻辑，对成型皮带速度、计量带速度、扫平量等参数之间的典型关系可做如下描述。计量料仓中计量带的运行线速度 v_m （mm/s）为：

$$v_m = v_{fl}^p \cdot \frac{m_{fl} + m_{as}}{D_{exp} \cdot D_{cor} \cdot h_m} \cdot K \cdot C \quad (1)$$

式中： v_{fl}^T 、 v_{fl}^p —成型皮带的线速度设定值、伺服驱动后的实际值，mm/s； m_{fl} —板坯铺装总量，kg/m²； m_{as} —扫平辊的扫平量，kg/m²； K —扫平量修正系数； D_{exp} —板坯铺装密度，kg/m³； D_{cor} —密度修正系数； h_m —计量高度，m； C —计量带修正系数。

连续式预压机中，以成型线速度实际值为依

据,下皮带驱动电机与上皮带驱动电机实行主从控制,以下皮带驱动电机的频率为基准,对上皮带驱动电机进行跟踪调整。针对MDF连续生产线的速度同步和驱动控制,一般采用基于SINAMICS S120伺服控制器,将PLC与伺服控制器配合使用;随着应用的不断深入,集成了SINAMICS S120伺服驱动器的运动控制平台SIMOTION D成为有效方案,基于PROFIBUS DP等时同步的控制系统硬件组态和基于DRIVE-CLiQ的SINAMICS驱动控制器配置和总线结构可使各驱动单元之间实现载荷的有效分配^[30]。

3 结语

铺装成型是MDF工业化生产的重要环节,针对各工段在精度、效率等方面存在的问题,着眼于行业发展和技术进步,建议探索以下研究:

1) 进一步提高铺装效率、均匀性和精度。纤维铺装的效率和精度受多因素的影响,包括摆动下料、纤维计量仓的回耙和皮带计量、纤维疏散和铺装稳定性、均平和扫平量、成型皮带运行的稳定性、板坯秤的精度和可靠性等。单一工艺因素可应用深度学习算法等优化参数,更重要的是对上述所有工艺因素建立多变量的闭环耦合控制系统并保证其运行的可靠性,如此则可能优化2.7节中速度同步性控制的关系模型。

2) 优化连续式预压机的入口角度调节机构和压力压制的液压执行和控制系统,从而在一定范围内进一步增大预压板坯的压缩比,提高板坯的致密程度,利于后续热压生产效率提升,能耗降低。

3) 从节能降耗和保护设备的角度考虑,进一步研究包括成型皮带、铺装辊、均平辊和扫平辊等执行部件的表面清洁和自清洁技术,可借鉴地面机械触土部件的仿生理论,以不破坏铺装质量为前提,探索经济适用的解决方案。

4) 针对铺装成型全线的故障诊断和分析,建立基于边缘计算和云协同的故障诊断与预测方法,提高故障分析处理效率,也为远程故障分析和调控创建平台。

参考文献:

[1] 周定国,梅长彤.人造板工艺学[M].3版.北京:中国林业出版社,

2019: 181-197.

[2] 陆懋圣.再谈人造板生产线装备的改造升级[J].木材工业,2016,30(2): 37-40.

LU M S. Updating manufacturing equipment for wood-based panel production lines[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 37-40.

[3] 武卫东,易伟民.机械铺装:中密度纤维板制造的较好抉择[J].林产工业,1998,25(4): 46-47.

[4] 袁东,费本华,陈永光,等.世界人造板机械发展现状与趋势[J].世界林业研究,2007(2): 60-67.

YUAN D, FEI B H, CHEN Y G, et al. The status and trend of international wood-based panel machinery development[J]. World Forestry Research, 2007(2): 60-67.

[5] 陈德旺.中纤板板坯铺装质量控制的因子分析[J].木材工业,2002,16(4): 34-35.

CHEN D W. Factors for MDF mat forming quality control[J]. China Wood Industry, 2002, 16(4): 34-35.

[6] 路健,傅万四,张伟.国外人造板机械发展状况与技术特点[J].木材加工机械,2003,14(5): 1-7, 20.

LU J, FU W S, ZHANG W. The developing trend and technology feature of foreign WBP machinery[J]. Wood Processing Machinery, 2003, 14(5): 1-7, 20.

[7] 马岩.中国人造板机械发展趋势及供给侧改革方向探讨[J].木工机床,2018(3): 1-6.

MA Y. Development trend of Chinese wood-based panel machinery and discussion on supply side reform direction[J]. Woodworking Machinery, 2018(3): 1-6.

[8] 盛振湘.人造板机械智能化产品开发的控制策略与设计方法初探[J].中国人造板,2016,23(9): 1-5.

SHENG Z X. Preliminary study on control strategy and design method of intelligent product development of wood-based panels machinery[J]. China Wood-based Panels, 2016, 23(9): 1-5.

[9] 熊建军.刨花板之(12)机械式铺装机的原理与结构[J].中国人造板,2010,17(11): 20-25.

[10] 王方艳,孙光全,张钦.电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(4): 70-79.

WANG F Y, SUN G Q, ZHANG Q. Design and experiment of electric control cone type vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 70-79.

[11] 李晓雷.高档数控车床的可靠性设计及试验技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[12] 陈安强,冯蕴雯,薛小锋,等.用于机构位置监测的传感器误指示可靠性分析[J].西北工业大学学报,2012,30(6): 852-856.

CHEN A Q, FENG Y W, XUE X F, et al. An effective reliability analysis of erroneous indication of sensor applied to monitoring mechanism position[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(6): 852-856.

[13] 张鹏,郭志军,金鑫,等.仿生变曲率深松铲柄减阻设计与试验[J/OL].吉林大学学报(工学版)(2021-03-31)[2021-08-29]. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20201003.

ZHANG P, GUO Z J, JIN X, et al. Design and experiment of bionic subsoiler with variable curvature share shaft[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition) (2021-03-31) [2021-08-29]. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb20201003.

[14] 冯艳艳,唐亚鸣,时安德,等.仿生刀齿减阻性能数值模拟[J].机械设计与制造工程,2020,49(3): 1-4.

FENG Y Y, TANG Y M, SHI A D, et al. The numerical simulation on the drag reduction property of bionic dredging cutter teeth[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49(3): 1-4.

[15] 王涛,韩彦辉,朱永生.PFC2D/3D颗粒离散元计算方法及应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2020.

[16] 黄天宝.基于深海底质土粘附特性的仿生履齿自清洁机理研究[D].

- 湘潭: 湘潭大学, 2019.
- [17] 李霞, 张东兴, 王维新, 等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24.
- LI X, ZHANG D X, WANG W X, et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(21): 17-24.
- [18] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 71-78.
- ZHOU H, ZHANG W L, YANG Q J, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71-78.
- [19] 刘宏俊, 赵淑红, 谭贺文, 等. 基于刮削与振动原理的减粘降阻镇压装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 86-92.
- LIU H J, ZHAO S H, TAN H W, et al. Investigation on press device in reducing adhesion and resistance based on scrape and vibration principle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 86-92.
- [20] 苏青春, 刘帅, 王子璇, 等. 硼化钛耐磨涂层对织物性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(4): 56-62.
- SU Q C, LIU S, WANG Z X, et al. Effect of wear-resistant titanium boride coating on fabric properties[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(4): 56-62.
- [21] 黄武立. 中密度纤维板铺装称量系统改造[J]. 中国人造板, 2018, 25(2): 26-28, 32.
- HUANG W L. Technical reconstruction of pavement weighing system[J]. China Wood-based Panels, 2018, 25(2): 26-28, 32.
- [22] 黄伟雄, 韦盛永, 陆锋, 等. 中密度纤维板的密度稳定性分析——以广西三威林产岑溪市人造板有限公司为例[J]. 林业科技通讯, 2021(4): 63-66.
- HUANG W X, WEI S Y, LU F, et al. Density stability analysis of medium density fiberboard[J]. Forest Science and Technology, 2021(4): 63-66.
- [23] 姚建峰, 卢军, 郑一力, 等. 基于变论域模糊控制算法的树木年轮测量仪直流电机转速控制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 57-63.
- YAO J F, LU J, ZHENG Y L, et al. DC motor speed control of annual-ring measuring instrument based on variable universe fuzzy control algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(14): 57-63.
- [24] 陈昱衡, 吴鸿云, 边有钢. 基于滑模预测控制的海底采矿车轨迹跟踪算法[J]. 信息与控制, 2022, 51(1): 119-128.
- CHEN Y H, WU H Y, BIAN Y G. A sliding mode predictive control-based trajectory tracking algorithm for a seabed mining vehicle[J]. Information and Control, 2022, 51(1): 119-128.
- [25] 陈玲. 人造板预压工艺[J]. 国际木业, 2017, 47(1): 14.
- [26] LY/T 3079—2018, 连续式预压机[S].
- [27] 沈毅, 钟德志. 人造板生产线预压机的辊筒与网孔板组合预压装置: 中国, CN202123559U[P]. 2012-01-25.
- [28] 张国梁, 苗虎, 瞿国富, 等. 连续预压机升降位移传感器标定与应用[J]. 木材加工机械, 2015, 26(2): 16-18, 30.
- ZHANG G L, MIAO H, QU G F, et al. Calibration and application of lifting displacement sensor for continuous prepressing machine[J]. Wood Processing Machinery, 2015, 26(2): 16-18, 30.
- [29] 苗虎, 周玉成, 盛振湘, 等. 连续平压机热压板升降系统控制算法[J]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 333-339.
- MIAO H, ZHOU Y C, SHENG Z X, et al. Design and application of a control algorithm for hydraulic lifting system of the hot platen in continuous flat press[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 333-339.
- [30] 侯晓鹏, 张国梁, 王军峰, 等. 基于 SIMOTION D435 的连续平压热压机驱动控制系统设计[J]. 林业科学, 2018, 54(5): 116-126.
- HOU X P, ZHANG G L, WANG J F, et al. Driving control system design of continuous flat press based on SIMOTION D435[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(5): 116-126.

(本文编校 向 琴)