

多参数智能木材干燥监控系统实现

孙丽萍,张少如*,张任甫,孙禹,卢俊佟

(东北林业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:针对木材干燥种类繁多、工艺复杂以及国内用户的实际使用环境,根据当前我国木材干燥全自动控制系统还存在着功能性单一、费时、耗能,干燥效果不理想等不足,本研究吸取当今木材干燥全自动控制系统的优势,将干燥系统各组件进行整合,运用多项有效的系统设计及触摸屏界面设计技术,结合 MODBUS 通讯、触摸屏和变频器等优势,实现了节能新型木材干燥智能监控系统;同时首次将材芯温度参与控制,配合干球温度、湿球温度、木材含水率等参数,形成了多参数智能控制模式。有效地提高了木材干燥的控制精度和质量,加快了木材干燥过程,节约了干燥成本,为木材干燥控制实现智能化、模块化、低碳化奠定了技术和理论基础。

关键词:多参数;材芯温度;智能监控系统;木材干燥

中图分类号:S782.31 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)01-0266-06

A Multi-parameter Intelligent Monitor and Control System for Wood Drying

SUN Li-ping,ZHANG Shao-ru*,ZHANG Ren-fu,SUN Yu,LU Jun-tong

(College of Mechanical and Electrical Engineering,Northeast Forestry University,Harbin,Heilongjiang 150040,China)

Abstract:Currently,there are many different kinds of wood drying methods that are complex in technical process at home,in which shortcomings exist in automatic control system,such as lack of flexibility,single function,time and energy consuming,and unsatisfactory drying effects. To solve these problems,based on the practical environment of the users at home,the authors absorbed the advantages of current wood drying automatic control system and integrated the modules of drying system to make the new energy-saving wood drying intelligent monitoring system come true after applying multiple effective system design and touch-screen interface design measures,and combining with the advantages of the MODBUS communication,touch panel,and frequency converter. Meanwhile,the index of wood center temperature was added to this control strategy for the first time. And it constituted a multi-parameter intelligent control mode to associate with parameters of dry-bulb temperature,wet-bulb temperature and moisture content. This proposed system efficiently improved the control accuracy and quality of wood drying,accelerated the drying process,hence saved costs,and laid the technical and theoretical basis for the control of wood drying intelligent,modular,low-carbon.

Key words:multi-parameter; wood center temperature; intelligent monitor and control system; wood drying

木材干燥直接影响木材的质量和利用率,是木材加工生产重要环节之一,在森林资源日见匮乏的今天尤显重要。采用新型合理的木材干燥窑体设计和新型木材干燥控制技术是保证木材干燥质量、降

低能源消耗和成本的重要措施,也是国内外学者广泛关注的研究课题^[1-2]。目前,国内一些干燥设备公司通过技术引进和部分自主创新实现了木材干燥控制系统全自动控制。如哈尔滨亚特干燥设备公司引

收稿日期:2016-05-06 修回日期:2016-06-01
基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201304502)。
作者简介:孙丽萍,女,博士生导师,教授,研究方向:智能检测、模式识别、木材科学与技术。E-mail:zdhsplp@163.com
*通信作者:张少如,男,硕士研究生,研究方向:控制理论与控制工程。E-mail:zsr624419816@163.com

进了意大利霍斯 M800B 型木材干燥窑微机电脑全自动控制系统,该控制系统将几种常用的干燥基准固化到控制器内核中,可通过下载程序更改干燥基准。广州科凌电气有限公司研发的最新一代 T509A 木材干燥全自动控制系统将专家控制引入到了控制系统中,并且可以灵活地更改干燥基准,一次性可存储 20 种干燥基准,循环风机的转速可随干燥基准的执行而进行人工调节。总的来说,国内的全自动木材干燥系统干燥效果并不理想,缺乏灵活性和节能性,不能适应如今的低碳、环保及高效的要求^[3-5]。

为了进一步提高木材干燥质量,增加干燥基准存储量及应用的灵活性,增强触摸屏显示丰富性、直观性,降低干燥能耗。本研究将 PLC 控制、电气柜控制、信号采集、执行机构、系统管理集成为一体化设备,针对木材干燥种类繁多、工艺复杂以及国内用户的实际使用环境,结合 MODBUS 通讯、触摸屏和变频器的优势,实现了节能新型木材干燥智能监控系统。该监控系统首次将材芯温度参与控制,配合

干球温度、湿球温度、木材含水率等参数,形成了多参数控制模式,解决了现已有的木材干燥方法只利用干球温度、湿球温度(或平衡含水率或相对湿度)和木材含水率进行干燥过程控制,造成木材的内部和表面发生不同程度开裂的问题。该方法已应用于木材干燥控制系统实际的生产中,结果表明,该系统可以有效地提高木材干燥质量,加快木材干燥过程,节约干燥成本,降低能耗。

1 设计原理

本系统主要包括核心控制器 PLC(LE5708)1 个、干湿球温度传感器各 2 个、材芯温度传感器 6 个、风阀 6 个、电磁阀 2 个、加热电动调节阀 1 个、喷蒸电动调节阀 1 个、触摸屏 1 个、循环风机变频器 1 个、排湿风机变频器 1 个、含水率分析仪 1 个、循环风机 3 个、排湿风机 2 个、木材含水率传感器 6 个、含水率温度补偿传感器 2 个。图 1 为本系统的总体设计框架图。

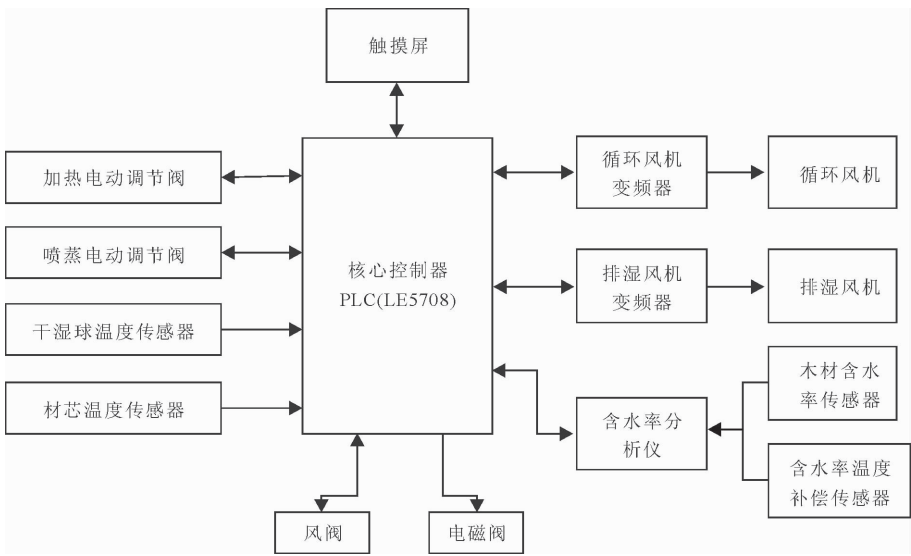


图 1 系统的总体设计框架

Fig. 1 The overall system design framework

2 设计与验证

2.1 硬件设计

2.1.1 集成化控制模块 LE5708 LE5708 是和利时 PLC 的 LE 系列智能控制模块,自带 24 通道数字量输入,此通道信号主要来自正向进气阀、正向排气阀、反向进气阀、反向排气阀、进气总阀和排气总阀等阀门的开关是否到位的反馈信号;20 通道数字量输出,此通道经继电器输出控制各阀位的开关;4 通道模拟量输出用于控制加热电动调节阀、喷蒸电动调节阀,4 通道模拟量输入用于采集电动调节阀

的反馈信号,尽量减少模拟量的输入输出,避免现场复杂环境的干扰;10 通道 NTC 输入信号主要用来采集进口的干湿球温度和出口的干湿球温度及六组材芯温度;3 路 RS-485 通讯口用于下载工程、HMI 通讯、控制变频器及与含水率分析仪通讯;电源采用 24 伏供电。

2.1.2 变频节能——采用 2 台变频器 在木材干燥中电机是最大的耗电机构,对其进行节能至关重要^[6]。该变频器采用欧姆龙的 3GEMX2-A 型,其中一个 15 kW 的变频器采用一拖三方式控制 3 台正反向循环风机,另外一个 5.5 kW 的变频器采用

一拖二方式控制 2 台正反向排湿风机(变频器的
大小可根据实际情况而进行更改)。

2.1.3 小型集成化的木材含水率分析仪 该木材
含水率分析仪含水率检测范围是 3.0%~99.9%,
温度测量范围:-50.0~120℃,温度传感器的类型
是 PT100。含水率分析仪和 PLC 的数据交换是通
过 RS-485 通讯实现的,电源和 PLC 共用 24 V 开
关电源,数据显示可以在系统触摸屏上实现,优化了配
置设计。

该木材含水率分析仪可连续在线检测 6 点木材
含水率。系统采用电阻法对木材含水率进行检测,
木材含水率传感器和温度传感器都接有耐高温屏蔽
线与控制系统连接^[7]。利用检测到的木材材芯温度
对木材干燥窑出口 3 点和入口 3 点共计 6 点的在线
含水率值进行补偿,3 点含水率值用一点材芯温度
值进行补偿,以确保含水率分析仪输出值的精确性,
经实验证明:该种补偿方式和一点含水率值用一点
材芯温度值补偿这种一对一相比差距微乎其微,考
虑实际生产的方便性,故采用 3 点含水率值用一点
材芯温度值的补偿方式。

2.1.4 可视化的数据监测、管理系统——触摸屏
该触摸屏采用的是和利时最新系列的 HT8A00T,
采用断电保持的 FLASH 作为 ROM,存取速度快,
容量达到 128 M;支持 U 盘 SD 卡导出数据,支持 U
盘 SD 卡更新工程,支持 U 盘 SD 卡更新配方的设
计方案。

2.2 软件设计

2.2.1 多参数监控设计及主控制器 PLC 的程序流
程图

2.2.1.1 多参数监控设计 目前已有的木材干燥
方法只利用干球温度、湿球温度(或平衡含水率或相
对湿度)和木材含水率进行干燥过程控制,会造成木
材内部和表面在干燥过程中发生不同程度的开裂。
而多参数监控方式是在现已有的设计基础上加入材
芯温度值参与控制:首先在干燥窑内选取 6 个材芯
温度检测点,然后通过温度传感器采集窑内材芯温
度数据,将得到的材芯温度与干球温度、湿球温度
(或平衡含水率或相对湿度)、木材含水率应用于木
材干燥过程控制的各个阶段,从而实现多参数木材
干燥过程监控,具体实施方式包括以下步骤。

步骤一:选定木材干燥窑内长度方向上靠近前
壁面和靠近后壁面的 2 个位置点作为 2 个干湿球温
度监测点;沿待干燥木材长度方向上均匀选定 6 个
材芯监测点;每个干湿球温度监测点设置 1 个干球
温度传感器和 1 个湿球温度传感器;每个材芯监测
点设置 1 个材芯温度传感器和 1 个木材含水率传感

器;设定待干燥木材的干燥基准及控制参数。

步骤二:采集所有监测点传感器的初始检测数
据。

步骤三:使待干燥木材的材芯温度为 0℃ 以上,
进入升温阶段;在升温阶段中,采用时间基准,利用
干球温度、湿球温度和材芯温度参与控制,在该阶段
中干球温度基准设定值应等于湿球温度基准设定
值。启动循环风机,关闭排湿,保持干燥窑内相对湿
度为 90%~100%,确保干湿球当前温度值相等,使
干燥窑内当前干球温度平均值和当前材芯温度平均
值保持为预设的基准值^[8-9],调整干燥窑内当前干球
温度平均值和当前材芯温度平均值的温差 b ,实现
对待干燥木材升温速率和内外应力的控制,克服因
为升温过程中内外温差过大而造成的木材内部或表
面开裂^[10-11]。

步骤四:进入干燥阶段和中间处理阶段,并使 2
个阶段交替进行,直至实现预期干燥基准控制目标;
对于一些在干燥阶段后无需进行中间处理的待干燥
木材,可在中间处理阶段中不设置基准值。

在干燥阶段采用含水率基准,利用干球温度、湿
球温度和木材含水率参与控制。关闭喷蒸,使干燥
窑内当前干球温度平均值维持在此阶段的基准设定
值,当前湿球温度平均值与预设基准湿球温度值的
差>阈值 a 时,关闭加热,开风道,排湿启动;当预设
基准湿球温度值与当前湿球温度平均值的差>阈值
 a 时,停止排湿,关风道,开启加热。

在中间处理阶段,采用时间基准,利用干球温
度、湿球温度和材芯温度参与控制。关闭排湿,使当
前干球温度平均值和当前材芯温度值维持在此阶段
的基准设定值,当此阶段基准湿球温度值与当前湿
球温度平均值的差>阈值 a 时,启动喷蒸;当此阶段
基准湿球温度值与当前湿球温度平均值的差<阈值
 a 时,停止喷蒸。

步骤五:进入平衡处理阶段、终了处理阶段,采
用时间基准,利用干球温度、湿球温度和材芯温度参
与控制。此阶段与中间处理阶段的执行方法一致,
处理的时机和次数要依据具体的情况而定。

步骤六:进入降温阶段,采用时间基准,利用干
球温度、湿球温度和材芯温度参与控制。

在木材干燥控制的全过程中,还可以包括预热
阶段^[12-13],该阶段针对寒冷地区,使待干燥木材进入
升温阶段前,进行预热解冻。

2.2.1.2 主控制器 PLC 的程序流程 主控制器
PLC 的程序流程见图 2。

2.2.2 触摸屏程序界面设计

2.2.2.1 系统主监控界面 系统以触摸屏为数据

管理控制系统的主体,如图 3(左)所示,木材干燥工艺界面可以完成监测正反向干湿球温度、6 点木材在线含水率、平均含水率、2 点材芯温度(其余 4 点在其他界面显示)、循环风机及排湿风机的转速及时间、蝶阀是否开关到位等现场数据^[14]。触摸屏还用于显示基准编号、现阶段执行的阶段号、时间基准执行的剩余时间、喷蒸阀和加热阀的开度等执行参数。另外,如图 3(右)所示,设定操作界面可以完成基准设定、循环风机设定、排湿换气设定、加热设定、热湿

处理设定。此外,在树种选择界面可以选择具体木材树种种类及规格和含水率检测木材树种分组;数据表格界面对各数据即进出口干湿球温度、6 点材芯温度、6 点含水率、平均含水率、循环风速、排湿风速每 10 min 记录 1 次,可随时导出历史数据。12 M 的存储空间,可存储 46 个月的干燥数据,便于查询;监控曲线界面可随时观察个数据的走势,便于分析;含水率手动控制界面可以随时剔除不合理的含水率点。

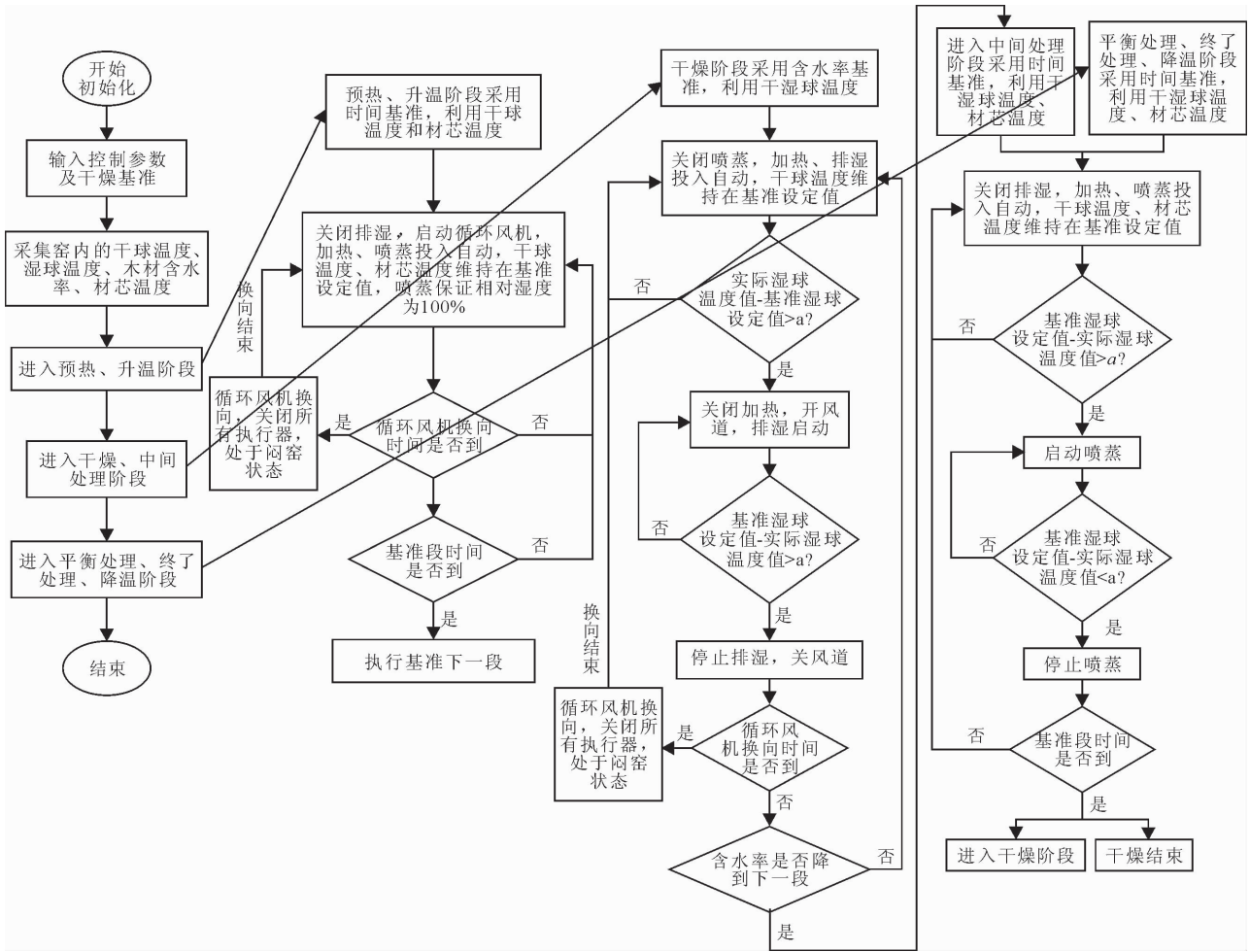


图 2 主控制器 PLC 的程序流程

Fig. 2 The program flow chart of main PLC controller

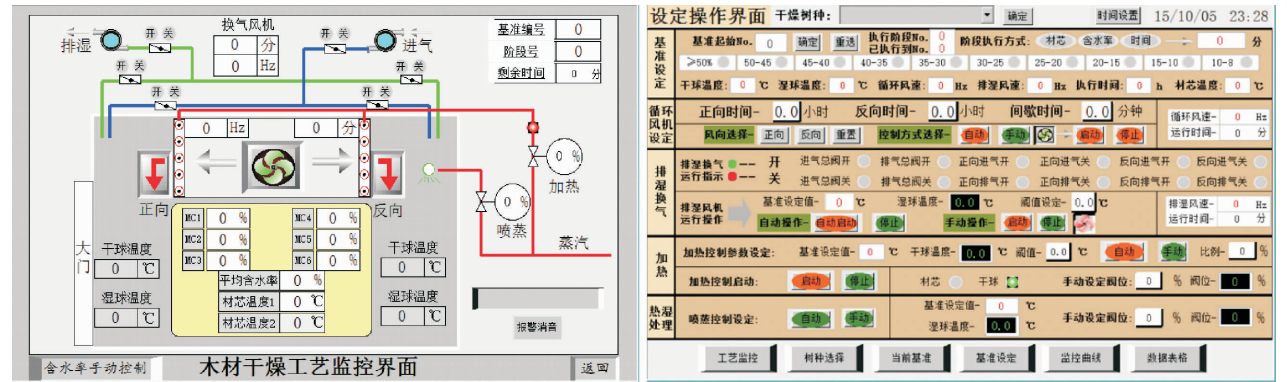


图 3 木材干燥工艺监控界面和设定操作界面

Fig. 3 The monitoring interface of wood drying process and the settings interface

2.2.2.2 灵活友好的干燥基准输入界面 受木材种类、地域差异、外部环境甚至不同季节的影响,木材干燥基准也不尽相同。基准设定界面里可存储150种干燥基准,每个干燥基准将干燥过程细分为

40个阶段,分3页显示,图4(左)为一种干燥基准的第16阶段到30阶段,每个干燥基准可通过界面随时更改。当前基准界面可查看当前运行的基准是否有误,以免造成不必要的损失,如图4(右)。



图 4 干燥基准设定和显示界面

Fig. 4 The drying benchmarking and display interface

2.3 实例验证

2.3.1 温、湿度控制曲线分析 将本研究所说的控制系统应用于本溪某制造有限公司中的第7号干燥窑,干燥的木材选取柞木。对柞木进行一窑的干燥,并记录过程数据。数据是在下述条件下获得:干燥时间为2015年7月15日。第7号干燥窑容积约为120 m³,可装50 m³木材。所用的柞木试材是在自然条件下风干6个月以上,从而保证装窑的柞木含水率降到了23%~25%左右,要干燥的柞木板具体尺寸:1 000 mm×35 mm×90 mm。窑内装72堆柞木,每堆柞木约0.7 m³,在材堆的每层试材之间用一定高度的隔条隔离。窑内的传感器分布见上文所述。干燥的起始温度为27.5℃,在干燥过程中每隔10 min采集1次数据,数据均是在系统正常运行的情况下获得。

根据木材干燥工艺^[15]及该公司的实际应用要求,在干燥的升温阶段,要求窑内温度每小时升3℃,相对湿度保持90%~100%,*b*设为3。初始含水率为23%~25%,故要求升温到54℃。图5为实际升温曲线与理想升温曲线对比。从中可以看出,加入材芯温度控制的升温曲线能够按照要求随理想曲线平滑稳定的上升,且稳定在较高的精度范围内,与理想曲线有很高的吻合度,均方误差仅为0.020 7,拟合优度高达0.979 7。

木材干燥过程进入干燥阶段后,选取木材含水率在20%~15%阶段的数据。根据木材干燥工艺^[15]及该公司的实际应用要求,在该阶段温度保持在57℃,相对湿度设定值为65%(即湿球温度为48℃),实际应用考虑风阀等排湿机械结构不能频繁动作,故要求相对湿度比设定值高4%开始排湿,比设定值低4%停止排湿(即*a*设为1)。图6为分别

选取含水率在20%和15%时的20组实测数据值与计算值的对比图。由图可知,当含水率为20%、15%时,实测值曲线和计算值曲线具有较好的拟合度,且随着木材含水率的下降,该阶段木材的出水速率变慢,排湿速率也相应变慢。由分析数据可知,当含水率为20%时,最大相对误差为1.44%,均方误差为0.280 4,曲线拟合优度为0.965 6;当含水率为15%时,最大相对误差为1.40%,均方误差为0.226 0,曲线拟合优度为0.965 7。由此可知,多参数智能木材干燥控制系统对湿度的精准控制具有良好的作用。

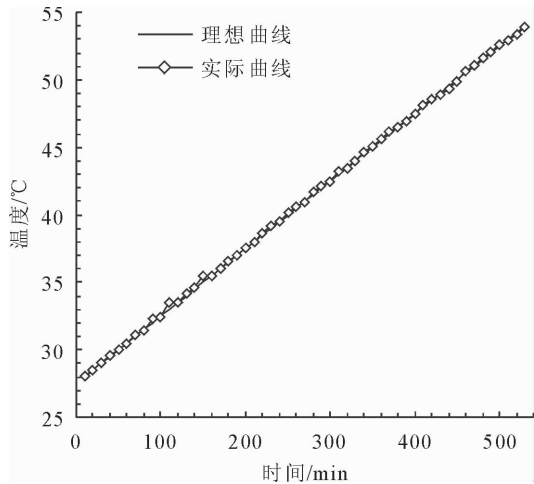


图 5 实际升温曲线与理想升温曲线对比

Fig. 5 A comparison of the actual temperature curve and the expected one

2.3.2 能耗与干燥结果分析 将该公司的第7号干燥窑和第6号干燥窑同时开始干燥一窑柞木,第7号干燥窑采用的是本研究所说智能控制系统,第6号干燥窑采用的是哈尔滨某公司的全自动控制系统。第6号干燥窑的试验条件与前述的第7号干燥

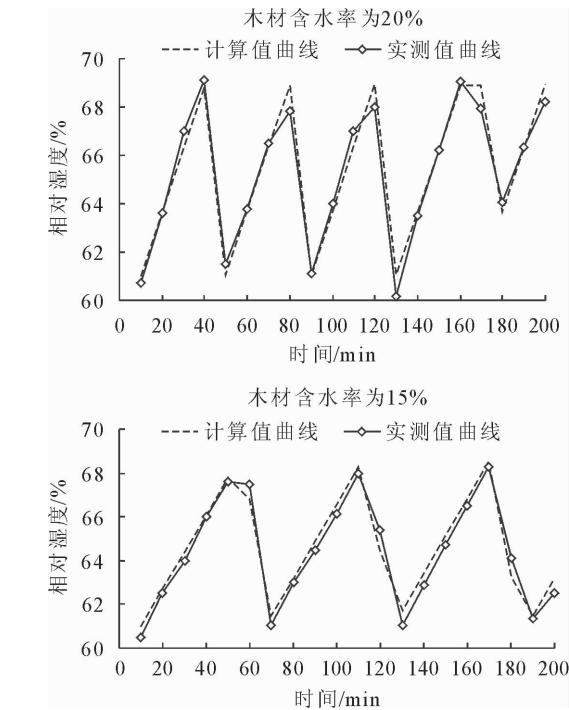


图 6 相对湿度实测值与计算值对比

Fig. 6 A comparison of the measured values of relative humidity and the calculated

窑的试验条件一致,在装窑时分别选取每窑每堆中 2 块完好的柞木板做标记,即每窑均选取 144 块柞木板。待干燥完成出窑后,对做标记的 144 块柞木板进行干燥结果分析,第 6 号干燥窑 144 块柞木板的平均含水率为 10.2%,第 7 号干燥窑的平均含水率为 8.1%。表 1 为两窑中被标记的 144 块柞木板的开裂统计,从表 1 中可以看出第 6 号窑的柞木板有 8 处可见表裂,而第 7 号窑的柞木板干燥质量得到了显著提升,只有 4 块柞木板有端面小裂纹,在木材的生产加工中这种裂纹又可忽略不计。表 2 为两窑的能耗数据,可以看出应用本研究所提智能控制系统的第 7 号干燥窑比第 6 号干燥窑干燥时间缩短 45 h,电能节约 21.86%,蒸汽流量节约 15.54%。综上,该系统提高了干燥效果和节能效果。

表 1 第 6 号窑与第 7 号窑的标记柞木板开裂统计

开裂长度 /mm	第 6 号窑(开裂数目)		第 7 号窑(开裂数目)	
	端面裂	其他表裂	端面裂	其他表裂
1~10	12	5	4	0
>11	0	3	0	0

表 2 第 6 号窑与第 7 号窑的能耗数据

窑号	干燥时间/h	电度表示数/(kW·h ⁻¹)		蒸汽流量计累积示数/kg	
		干燥开始值	干燥结束值	干燥开始值	干燥结束值
第 6 号窑	686	34 051	37 464	89 483.59	109 936.21
第 7 号窑	641	24 964	27 631	56 048.44	73 322.72

3 结论与讨论

本系统将材芯温度参与控制形成了一种多参数控制模式。详细介绍了其实际应用的步骤,通过对实例中温、湿度控制曲线和能耗与干燥结果的分析可知,采用该控制模式的系统在实际的应用中提高了控制精度和干燥质量,缩短了干燥周期,节约了能源,在一定程度上解决了目前国内全自动木材干燥系统干燥质量不理想、产品成本高等问题。

本系统可存储 150 种干燥基准,大大扩展了干燥基准的存储数量,满足了当今木材加工企业对于多种规格木材的干燥需求,每个干燥基准又细分为 40 个阶段且可随时更改。循环风机和排湿风机的转速可随着干燥的进行根据设定值自动进行调节;监控及操作界面更加智能化,监测信息更加全面且可以存储 46 个月的干燥数据,便于了解木材干燥过程和查询故障。本系统在一定程度上增加了目前国内全自动木材干燥系统的灵活性,提高了智能化程度。

木材干燥业逐步向规模化、产业化发展已成为

不可逆的趋势,所以在今后的发展过程中,这种干燥效果好、节能性强、可靠性高、开放性强、控制功能全的智能控制系统必将成为木材干燥的首选控制设备,也必将在生产实践中广泛应用。

参考文献:

[1] 张璧光,谢拥群. 国际干燥技术的最新研究动态与发展趋势[J]. 木材工业,2008,22(2):5-7.
ZHANG B G,XIE Y Q. Progress of research and development of drying technology in the world[J]. China Wood Industry, 2008,22(2):5-7. (in Chinese)

[2] MUJUMDAR A S,WU Z H. Thermal drying technologies: new developments and future R&D potential[C]//The Proceeding of The 5th Asia-Pacific Drying Conference. Sun City: South Africa,2007:3.

[3] 张璧光. 我国木材干燥技术现状与国内外发展趋势[J]. 北京林业大学学报,2002,24(5):266-270.
ZHANG B G. Present status of wood drying technology in China and development tendency at home and abroad[J]. Journal of Beijing Forestry University,2002,24(5):266-270. (in Chinese)

[11] MIDHA N,MATHUR P K. Assessment of forest fragmentation in the conservation priority Dudhwa landscape,India using FRAGSTATS computed class level metrics[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2010, 38(3): 487-500.

[12] RAFAEL M S, FRANCISCO M S, JUAN M T R. National assessment of the evolution of forest fragmentation in Mexico [J]. Journal of Forestry Research, 2011, 22(2): 167-174.

[13] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等. 1954-2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3234-3244.

LIU J P, ZHAO D D, TIAN X Z, *et al.* Landscape pattern dynamics and driving forces analysis in the Sanjiang Plain from 1954 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(12): 3234-3244. (in Chinese)

[14] 高利峰,张磊,赵先贵. 基于 RS 和 GIS 的内蒙古自治区土地利用及景观格局变化[J]. 山西农业科学, 2016, 44(2): 255-259.

[15] 陈菁. 基于遥感和 GIS 的莆田市土地利用变化分析[J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2005, 30(1): 184-187.

CHEN J. Analysis of changes in land use in Putian City based on RS and GIS[J]. Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition, 2005, 30(1): 184-187. (in Chinese)

[16] 马建辉,刘淑苹. 基于 SPSS 的莆田市土地利用变化及其驱动力分析[J]. 长春大学学报: 自然科学版, 2009, 19(10): 71-74.

MA J H, LIU S P. Land use change in Putian City and its driving force analysis based on SPSS[J]. Journal of Changchun University: Natural Science Edition, 2009, 19(10): 71-74. (in Chinese)

[17] GUSTAFSON E J. Quantifying landscape spatial pattern: what is the state of the art[J]. Ecosystems, 1998, 1(2): 143-156.

[18] 林才添,郑祈全,王素芬. 遙測技術於台北市土地覆蓋變遷之研究[J]. 航測及遙測學刊, 2010, 15(2): 141-153.

[19] MAGURRAN A E. Ecological diversity and its measurement [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988: 179.

[20] CARLSON A, HARTMAN G. Tropical forest fragmentation and nest predation—an experimental study in an eastern arc montane forest, Tanzania[J]. Biodiversity & Conservation, 2001, 10(7): 1077-1085.

(上接第 271 页)

[4] 张璧光,高建民,伊松林,等. 我国木材干燥节能减排技术研究现状[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2009, 36(3): 38-42.

ZHANG B G, GAO J M, YI S L, *et al.* The present research situation of solar -heat pump and heat pipe technology on lumber drying in China[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2009, 36(3): 38-42. (in Chinese)

[5] 顾炼百,庄寿增. 我国木材干燥工业现状与科技需求[J]. 木材工业, 2009, 23(3): 24-27.

[6] 常建民,王东林,高建民. 木材干燥全自动控制系统的研制[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(2): 72-75.

CHANG J M, WANG D L, GAO J M. Intelligent auto-control system of wood drying[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2003, 25(2): 72-75. (in Chinese)

[7] 白雪冰,张佳薇,赵真非. 智能化木材含水率自动测试系统的开发[J]. 木材工业, 2006, 20(3): 35-37.

[8] WANG X S, CHENG Y H, WEI S. A proposal of adaptive PID controller based on reinforcement learning[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 17(1): 40-44.

[9] 丁馨曾,赵海龙,申珂楠,等. 声发射技术在木材干燥中的应用与发展[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(3): 242-244, 292.

DING X Z, ZHAO H L, SHEN K N, *et al.* Application of acoustic emission technique in wood drying [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(3): 242-244, 292. (in Chinese)

[10] DA COSTA SOUSA J M, KAYMAK U. Model predictive control using fuzzy decision functions[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2001, 31(1): 54-65.

[11] 刘宏达,高建民,陈瑶. 预热处理对改善尾巨桉木材干缩性和材色的研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 30(5): 176-180, 206.

LIU H D, GAO J M, CHEN Y. Effects of pre-heat treatment on improving the shrinkage and color of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 30(5): 176-180, 206. (in Chinese)

[12] 江涛,李秀荣,谢延军,等. 微波预处理对巨尾桉木材渗透性的影响[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 174-177.

JIANG T, LI X R, XIE Y J, *et al.* Effects of microwave pre-treatment on the permeability of *Eucalyptus grand* × *Eucalyptus urophylla* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 174-177. (in Chinese)

[13] 雷亚芳,常建民. 微波加热在木材加工中的应用[J]. 西北林学院学报, 2004, 19(3): 164-167.

LEI Y F, CHANG J M. The microwave drying of wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2004, 19(3): 164-167. (in Chinese)

[14] 田仲富,马国勇,黎粤华. 智能木材干燥控制系统的设计[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(10): 2973-2974.

[15] 杜国兴,李大纲. 木材干燥技术[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.