

讨论与建议

木材干燥设备的控制工程基础

张钟光

(青岛大学, 青岛 266071)

摘要: 应用控制论思想,以木材干燥设备为系统,以供给系统的条件为输入、系统的环境指标为输出,可以确定具有可比性的干燥设备的性能指标。从工程控制理论角度,分析了木材干燥设备的保温性、密封性和排湿能力。

关键词: 控制论;系统;输入;输出;木材干燥窑;保温性;密封性;排湿能力

中图分类号:S782.31 文献标识码:A 文章编号:1001-8654(2003)03-0019-03

Engineering Cybernetics Basis of Wood Drier

ZHANG Zhong-guang

(Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: Applying the theory of cybernetics, regarding a wood drier as a system, provided conditions for the system as an input, an environment parameter of the drier as an output, the comparable performance indexes of the drier can be obtained. This paper analyzed the thermal insulation, airtight and ventilating capability of wood driers from the view of engineering cybernetic.

Key words: Cybernetics; System; Input; Output; Wood drier; Thermal insulation; Airtight property; Ventilating capability

木材干燥的过程是木材中水分从内部向外迁移的过程,涉及到传热、传质等复杂的物理现象,不同树种的木材与干燥有关的物理性质(例如密度、渗透性、干缩系数等)往往差别很大。为达到理想的干燥要求,一个多世纪以来,科技工作者对其基本理论探索、工艺和设备设计等诸多方面做了大量的工作,但迄今对木材干燥的研究往往是经验多于理论,缺乏建立在较精确的数学模型和动态分析基础上的理论分析,对干燥设备和干燥基准之间的优劣缺乏令人信服的比较标准。

木材干燥学的主题是提高干燥速度和干燥质量,故对木材加热和木材中水分扩散速度的可控性研究应该是木材干燥研究的重点。本文在木材干燥研究成果的基础上,汲取其他学科不同角度的研究理念,寻求新的学科交叉,从工程控制论的角度,提出确定木材干燥设备的隔热性、气密性和排湿能力的比较指标,以期对木材干燥的理论研究和实际设计提供新的突破口。

1 木材干燥与控制论的结合是一个现实的科研方向

控制论是研究各类系统的调节和控制规律的科学,其基本思路是把任何事物,无论是具体的物理装置还是抽象的社会形态都看作系统,给此系统以某种输入,就会有特定的输出。研究输入、输出和系统三者之间的关系,可以得到系统的动态特性,从而提出改进系统有效的途径和方法。利用传递函数、频率特性、预测、滤波、系统辨识等手段和方法,可以使长期在工程中停留在经验阶段的认识提高到理性上来。从原来几何的、静止的观点提高到动力学的观点,利用信息的传递、加工处理并利用反馈来解决工程中的问题^[1,2]。

日本学者寺沢真^[3]提出的百度试验法是一种制定不同树种、不同规格木材干燥基准的方法。其方法是将标准试材,即尺寸为200 mm×100 mm×20 mm、含水率高于50%的弦切板竖直放置在温度为100℃的烘箱内干燥至含水率小于1%,根据干燥过程中试材含水率变化、开裂情况等来确定适合该树种的干燥基准。百度试验法行之有效,其重要意义在于它是控制论思想在木材干燥领域中最早、最基本的应

收稿日期:2002-12-30

作者简介:张钟光(1945—),男,青岛大学副教授,工学硕士。

用,具有系统辨识的雏形,即利用系统的输入、输出信号建立系统数学模型的理论和办法。百度试验法把试材作为系统,忽略了湿度的变化(相对湿度保持为零),给系统施加一个最简单的阶跃输入(烘箱里的恒定干燥温度),从而根据输出(试材的含水率变化和开裂情况),确定系统(这里可以认为是试材树种)的干燥特性,据此制定合适的干燥基准。

本文拟从工程控制论的角度,就确定木材干燥设备的隔热性、气密性和排湿能力的比较指标提出一些新的思路,有关介质运动的均匀性拟另文论述。

2 木材干燥设备隔热性、气密性和排湿能力的控制工程指标

定义1:以热源带入窑内的热量 Q_1 (来自散热器、喷蒸管和风机的机械能^[4])为输入,以窑内干球温度 T 为输出,把进排气口封闭、风机运转的空窑定义为系统I。

定义2:以待干木材排出的水蒸气和喷蒸管通入的水蒸气形成的较高的相对湿度为输入,以由排气管和其它逸出环节排出介质的相对湿度(实指系统内部的相对湿度)为输出,把开启所有的风机、关闭了窑门和进、排气管的空窑定义为系统II。

定义3:以系统的最大介质循环动力为输入,以系统内部介质的相对湿度为输出,把开启所有的风机及完全开启进、排气管的空窑定义为系统III。

应说明的是,尽管系统I、系统II和系统III描述的是同一个木材干燥窑,但由于输入和输出的位置不同,是具有不同数学模型的不同系统^[5]。

2.1 系统I

为使问题简化,假定单位时间里系统I获得的热量相同,且窑内温度均匀。

由于窑内外介质温度、运动状态不同,干燥窑将通过排气口、窑门、窑壁、窑底等各环节向周围环境散发热量 Q_2 。当系统I平衡,即 $Q_1=Q_2$ 时,干球温度 T 维持定值。此时若增加 Q_1 ,平衡被破坏, T 将升高,导致系统I向周围环境散发的热量 Q_2 变大,最后当 $Q'_1=Q'_2$ 时,建立起输入和输出新的平衡关系,系统I内干球温度将维持一个新的定值 T' 。冷却时亦然,只是各项加一个负号。因此可以建立系统I的热量 Q 与干球温度 T 之间的微分方程

$$Q_1 - Q_2 = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中: C 为系统I的平衡热容量。系统平衡时,系统I的各部分与环境之间将有一个近似直线的温度梯度,

C 值不能简单地由系统I内各种材料的比热与其质量相乘求得。若按系统I内温度计算,平衡热容量 C 可以近似地计算为窑内各种材料的比热与其质量乘积的1/2。而

$$Q_2 = \sum K_i \cdot A_i \cdot (T_i - T_e) \quad (2)$$

式中: K_i 和 A_i 为各个环节的传热系数和与外界环境接触处的外表面积; T_i 为各环节与外界环境接触处的温度; T_e 为外界环境温度。

设系统I内介质干球温度在第 i 环节与外界环境接触处温差为 T_{i1} ,即 $T - T_e = T_{i1}$, (1)式可以写成

$$Q_1 - \sum K_i \cdot A_i \cdot (T - T_e) + \sum K_i \cdot A_{i1} \cdot T_{i1} = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

令 $G = \sum K_i \cdot A_i \cdot T_{i1}$,并定义为梯度保持热量,则(3)式变为

$$Q_1 - \sum K_i \cdot A_i \cdot (T - T_e) + G = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

令 $R = \frac{1}{\sum K_i \cdot A_i}$,并定义其为系统I的热阻,除了与系统I本身的几何尺寸和隔热性有关外,也与外界介质的运动情况有关。故(4)式可写成

$$Q_1 - \frac{T - T_e}{R} + G = C \cdot \frac{dT}{dt} \quad (5)$$

写成增量形式的微分方程并进行变换,得

$$R \cdot C \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = R \cdot \Delta Q_1 + \Delta T_e + R \cdot \Delta G \quad (6)$$

式中: ΔQ_1 、 ΔT_e 、 ΔT 和 ΔG 分别为偏离某一平衡状态 Q_{10} 、 T_e 、 T_{e0} 和 G_0 的增量。

若 $\Delta T_e = 0$,并忽略 G 的变化,(6)式变为

$$R \cdot C \cdot \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = R \cdot \Delta Q_1 \quad (7)$$

令 $R \cdot C = \tau_1$, $R = k_1$,将(1~7)式进行拉氏变换,可以得到系统I的传递函数

$$H(s) = \frac{k_1}{\tau_1 s + 1} \quad (8)$$

这一数学模型描述了系统I的动态特性,即系统I是一个一阶惯性系统, $\tau_1 = R \cdot C$ 是系统I的时间常数, $k_1 = R$ 是系统I的增益。

在加热系统I时,可以认为输入的热量是恒值的单位阶跃信号1/S,将此信号与系统I的传递函数 $H(s)$ 相乘便得到输出的拉氏变换式。对此式进行拉氏反变换,即得到系统I的阶跃响应:

$$T(t) = k_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (9)$$

记录加热过程系统I的温度变化,可以得到与

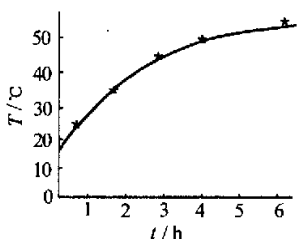


图 1 加热过程系统 I 干球温度的时间响应

Fig. 1 Dry bulb temperature-time curve in system I

(9)式非常吻合的曲线。图 1 是对一个烟气干燥密进行微火烘密时实测得到的 $T-t$ 曲线^[6]。

显然,系统 I 的热阻 R 影响着时间常数 τ_1 和增益 k_1 ,而平衡热容量 C 仅影响时间常数 τ_1 。

如果把系统 I 变为装满了待干木材的系统 I',这时的 Q_1-T 和 $T-t$ 关系将与系统 I 有较大的不同。系统 I' 的热量支出除了上述热量以外,还包括木材水分汽化时吸收的汽化潜热和使结合水脱离细胞壁所需要的润湿热,平衡热容量 C 则为系统 I 的平衡热容量与干木材、木材中液态水的平衡热容量之和,而液态水的质量又是时间的函数。系统 I' 的热平衡方程式可以写成:

$$Q_1 - Q_2 = C(t) \cdot \frac{dT}{dt} + h(t) \cdot m(t) \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中: $C(t)$ 为木材干燥密和待干木材热容量之和; $m(t)$ 为在加热过程中汽化了的水的质量; $h(t)$ 为汽化潜热和润湿热(润湿热与温度和含水率均有关)。

(10)式是一个时变微分方程,也是一个近似的一阶惯性系统。与系统 I 比较, τ 要大得多,而且随时间变化。对系统 I' 进行深入的研究,可按待干木材的含水率水平确定离散的工作点,作出假设,得到近似的定常线性微分方程,求得若干个工作点附近的传递函数。图 2 为上述烟气干燥密堆放了 15 m^3 泡桐齐边材(板厚 25 mm,初含水率 60%)后实测的 $T-t$ 曲线。实测时,进气口关闭,排气口打开,风机运转^[6]。

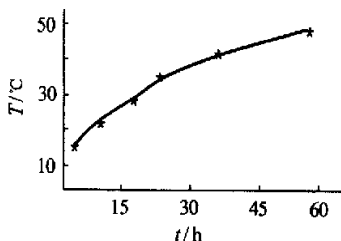


图 2 加热过程系统 I' 干球温度的时间响应

Fig. 2 Dry bulb temperature-time curve in system I'

系统 I' 的 Q_1-T 关系与其中木材的材积、树种、规格、含水率以及加热工艺(预热、喷蒸或干燥)有关,即其是与干燥条件有关的动态特性,并不主要取决于干燥密本身的特性。因此,干燥密本身的性能可以由系统 I 的时间常数 τ 和增益 k 来评价,无须涉及系统 I'。系统 I 的 τ_1 越小,温度的时间响应越快; τ_1 与 C 的关系比较直观,但由 $\tau_1 = R \cdot C$,似乎 R 越大则 τ_1 也越大,与其相反, R 越大 I' 温升越快,这是由(9)式得

$$T(\tau_1) = k_1 \cdot (1 - e^{-1}) = 0.632k_1 \quad \dots\dots\dots (11)$$

(11)式指出时间常数的物理意义是响应达到稳定值所需要的时间。因为 $k_1 = R$,热阻 R 增加时增益也增加,即输出的稳定值增加了。例如有系统 I_{1A} 和系统 I_{1B}, $R_A < R_B$,系统 I_{1A} 的时间常数较小,响应较快,但其温升速度却小于系统 I_{1B}(图 3)。

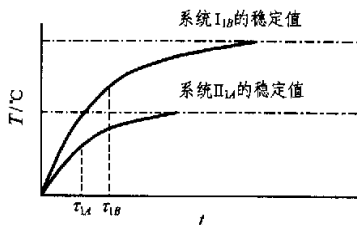


图 3 不同增益干燥密温度响应、时间常数和温升速度之比较

Fig. 3 Comparison of temperature response, time constant and temperature-rising rate between kilns with different gain

显然,系统 I 的 τ_1 和 k_1 仅与干燥密本身有关,与测试条件无关。换言之,对某一特定的干燥密,无论测试条件如何,或者说无论是快速加热还是缓慢加热,其时间常数 τ_1 和增益 k_1 将保持定值。对于干燥密进行空密加热或冷却测试,可以根据测得的密温曲线求出干燥密的时间常数 τ_1 和增益 k_1 ,这为制定干燥密的标准和鉴别密的隔热性优劣提供了量化的指标。

系统的保温性在某种程度上反映了系统的密封性、增湿能力和排湿能力,但对这两项指标仅作上述考察显然不够。通过试验可以看出,其数学模型与上面的数学模型类似,都是典型的一阶系统,相关数学推导过程从略。

2.2 系统 II

通过喷蒸管给系统 II 通以常压饱和蒸汽,以当时大气相对湿度为基础,观测密内相对湿度的变化。把系统 II 的湿度由试验开始($t=0$)到其相对湿度刚刚达到 100%所需要的时间作为增湿时间常数 τ_2^* (加 * 号以示与系统 II 的实际时间常数相区别)。由于向密

内强行通入了饱和蒸汽,因此不同试验状况下,大气实际相对湿度的差异对试验数据的影响可忽略不计。

图4是对某小型干燥窑进行实测的窑内相对湿度的变化曲线^[7]。曲线显示,系统II仍然是一个典型的一阶系统,输出的时间响应是一条指数曲线。这样的 τ_2^* 实际上表征了系统的密封性和增湿能力。

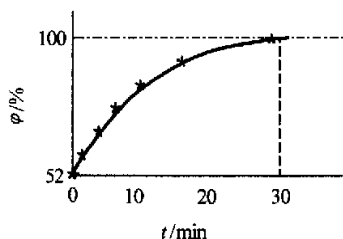


图4 某干燥窑加湿过程相对湿度随温升速度的变化

Fig. 4 Relative humidity-time curve in system II when steaming

2.3 系统III

将湿度为100%、关闭排气口的系统II在开启所有风机的情况下打开所有的进、排气口即为系统III。考察系统的相对湿度由100%达到某一确定湿度(如90%)所需的时间,由此定义窑的排湿准时间常数 τ_3^* 。

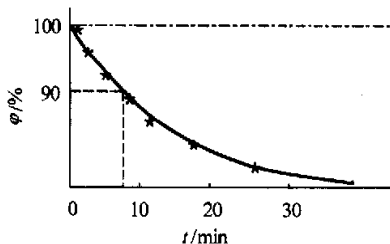


图5 干燥窑排湿过程相对湿度的变化

Fig. 5 Relative humidity-time curve in system when drying

图5是对同一干燥窑进行实测的窑内相对湿度的变化曲线^[7],显然也是一个一阶系统。 τ_3^* 描述了系统的排湿能力。 τ_1 、 τ_2^* 和 τ_3^* 分别描述了系统的保温性、密封性和排湿能力。对于干燥能力相同的不同系统,可以用此三个指标作为干燥设备性能优劣比较指标;但干燥能力不同时,这三个指标还需和系统的干燥能力结合考虑。设系统的材积为V,评价指标是:

$$\eta_1 = \frac{V}{\tau_1} \dots \dots \dots (12)$$

$$\eta_2 = \frac{V}{\tau_2^*} \dots \dots \dots (13)$$

$$\eta_3 = \frac{V}{\tau_3^*} \dots \dots \dots (14)$$

可以将 η_1 、 η_2 和 η_3 分别定义为木材干燥窑的隔热性能系数、增湿性能系数和排湿性能系数。

3 结语

从上述讨论可以看出,木材干燥设备实际上是一个一阶惯性系统,设备性能的优劣仅与系统本身的参数有关,与干燥工艺相同与否无关。

参考文献:

- [1] Norbert Winner. Cybernetics or Control, and Communication in the Animal and Machine[M]. New York, 1949.
- [2] 绪方胜彦. 现代控制工程[M]. 卢伯英, 佟明安, 罗维铭译. 北京: 科学出版社, 1978.
- [3] 寺沢真. 木材乾燥基準簡易決定法[J]. (日) 木材工業, 1965, 20(5): 2(216)-7(221).
- [4] 张钟光. 成材窑干热平衡和能源利用分析[J]. 南京林产工业学院学报, 1982(1): 85-104.
- [5] 苗平, 顾炼百. 马尾松木材在高温干燥中的水分扩散性[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 103-107.
- [6] 杜国兴, 顾炼百. 低温预干二次窑干联合干燥窑性能测试初步[J]. 南京林业大学学报, 1996, 20(1): 77-80.
- [7] 顾炼百, 杜国兴. 木废料能源联合干燥工艺试验研究[J]. 南京林业大学学报, 1996, 20(4): 49-52.

《木材工业》杂志征稿简章

1 来稿应论点明确,数据真实,文字精炼,且必须是除本刊外未投过任何其它刊物的稿件。

文章应有中、英文摘要和关键词,阐明目的、方法、结果或结论。研究报告、论文、综述类文章以6000字为宜;其它文章4000字以内。

2 书写顺序:标题→作者姓名(限5人)、单位、邮编→中文摘要(200字以内)、关键词(2~5个)→英文题目→作者姓名(拼音)、单位英文名称、邮编→英文摘要(800字符以内)、关键词→正文→致谢词(选项)→参考文献(10篇以内)。

3 投稿形式:以电子文稿为主(磁盘或Email附件)用word文档格式编写,并附打印稿1份。请勿用手写稿以及复印、油印及传真稿件。

4 二、三级层次标题采用“1.1”“1.1.1”的形式,左起顶格,序号后空一格写层次标题。图题、表题目均需提供相应的英文题目。

4.1 插图用电子文件提交,或提供激光打印墨稿。

4.2 表格设计应合理、紧凑,表中空格表示未测项或无此项;一表示无结果;

4.3 计量单位、符号以国标为准,按要求使用大小写、正斜体。

5 参考文献:在文中引文处用[]加注于右上角,按在文中出现的先后排序。文种仅限中、英文两种(其他语种需译成中文或英文)。

6 审稿:按程序送审,自收稿之日起3个月内答复作者刊用与否,审稿期间不得改投他刊。恕不退稿,请自留底稿。

7 来稿附言:①第一作者的出生年、性别、单位名称及职务、职称、学位及基金项目名称;②主要联系人的电话、传真及Email地址。③请申明该稿件从未投过其它刊物。

8 出版费:研究报告、论文及部分综述栏目的文章按50元/千字收取,其它栏目酌情考虑。付费者发表优先、稿费从优。

附加费:对插图、表格及文字数超出本刊要求时需收超版费;要求提前发表的文章酌收加急费。

9 本刊所支付的稿费中已含本刊电子版稿酬,并已扣除个人所得税。