

## 基于模型设计的上光机干燥控制系统研究

杨梅<sup>1,2</sup>, 张梅蕊<sup>1,2</sup>, 朱茜琳<sup>1,2</sup>, 张明鸣<sup>1,2</sup>, 靳露<sup>3</sup>, 张宏轩<sup>1,2</sup>, 焦慧敏<sup>1,2</sup>  
(1.北京印刷学院, 北京 102600; 2.数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京 100005;  
3.厦门华夏学院, 厦门 361024)

**摘要:** **目的** 因干燥系统的控制参数具有时滞性、非线性而难于控制, 文中尝试一种更适用于干燥对象的控制策略优化控制效果。**方法** 通过分析上光机水性上光油干燥的工作原理, 建立包含印品传输速度和送风量等因素的干燥模型, 构造上光机干燥系统仿真平台, 设计适合滞后被控参数的 Smith 预测及 PID 复合控制算法。依据水性上光油干燥需求设计以 S7-1500 为控制核心、碳系发热板为热源的干燥硬件系统, 利用基于模型设计方法开发 PLC 的温度控制程序。**结果** 文中将 Smith 预测算法引入了上光干燥系统, 使干燥系统温度响应达到超调量为 0, 无稳态误差, 相对于 PID 控制大大缩减了调节时间。运用模型设计方法, 设计和实现了基于 PLC 的干燥控制系统, 将基于碳系材料的发热源应用于水性上光油干燥系统中。**结论** Smith 预测算法适用于带有延迟因子的上光机干燥系统, 在印刷干燥领域引入基于模型的设计方法, 便于先进控制策略在印刷包装行业中的研究与开发。

**关键词:** 上光机; 干燥系统; 基于模型设计; S7-1500

**中图分类号:** TS803.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)17-0116-07

**DOI:** 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.015

## Drying Control System of Glazing Machine Based on Model Design

YANG Mei<sup>1,2</sup>, ZHANG Mei-rui<sup>1,2</sup>, ZHU Xi-lin<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming-ming<sup>1,2</sup>, JIN Lu<sup>3</sup>,  
ZHANG Hong-xuan<sup>1,2</sup>, JIAO Hui-min<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China; 2. Beijing Key Laboratory of Digitalized Printing Equipment, Beijing 100005, China; 3. Xiamen Huaxia University, Xiamen 361024, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a control strategy more suitable for drying object to optimize the control effect aiming at the problem that the control parameters of drying system are time-delayed, nonlinear and difficult to control. The working principle of water-based glazing machine drying system was analyzed to establish a drying model including factors such as printing speed and air supply, construct a simulation platform for the drying system of the glazing machine, and design Smith-PID algorithm suitable for the time-delayed controlled parameters. According to the drying requirements of water-based glazing oil, a drying hardware system with S7-1500 as the control core and carbon heating plate as heat source was designed, and a PLC temperature control program was developed by the model-based design method. The Smith prediction algorithm was introduced into the glazing drying system to make the temperature parameter of the drying system reach an overshoot of 0, without steady state error, which greatly reduced the adjustment time compared to PID control. The model design method was used to design and realize the PLC-based drying control system,

**收稿日期:** 2021-11-09

**基金项目:** 北京印刷学院基础研究重点项目 (Ea202003); 北京印刷学院重点教改项目 (22150121002/008); 北京印刷学院校级项目 (Ee202206); 国家级大学生创新创业项目 (22150122007); 北京印刷学院横向项目 (D-2013-52); 北京印刷学院学科建设项目 (21090122002)

**作者简介:** 杨梅 (1977—), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为印刷机控制系统及干燥控制。

which was applied to the water-based glazing process based on heat source of carbon materials. Smith prediction algorithm is suitable for glazing machine drying system with delay factor. The introduction of advanced model-based design methods in the field of printing and drying can improve the efficiency and safety of system development, and facilitate the research and development of advanced control algorithms in the printing and packaging industry.

**KEY WORDS:** glazing machine; drying system; model-based design; S7-1500

上光是印刷中一项重要的印后加工工艺, 通过在印刷品上涂布上光涂料, 经物理、化学反应在印品上形成牢固透明薄膜的过程<sup>[1]</sup>。上光技术增加了包装印刷品的美观性、耐用性和艺术性。目前, 常用的上光方式有水性上光方式和 UV 上光。对于油墨和上光油, 印刷领域常用的干燥方式有红外干燥、热风干燥、UV 干燥、微波干燥和射频干燥等方式<sup>[2]</sup>, 水性上光油和油性油墨采用红外线、热风干燥的方式; UV 上光油和 UV 油墨采用 UV 干燥的方式<sup>[3-4]</sup>。水性上光涂料因其无毒环保, 已经逐渐取代传统的有机溶剂上光涂料, 在上光复合领域占有重要一席, 但因其干燥固化条件要求苛刻, 使得水性上光机干燥系统的研发存在技术难点。李雪峰<sup>[1]</sup>尝试将模糊 PID 应用于基于红外线的上光油干燥系统, 李海超<sup>[4]</sup>设计了基于单片机的纳米碳上光油固化控制系统。

基于模型设计 (Model-Based Design, MBD) 方法是一种开发动态系统的先进设计方法。在整个项目开发过程中, 包括需求分析、设计、实现和测试等环节, 始终以系统模型为核心, 还可对其不断进行改进。基于模型设计方法借助计算机仿真技术建立系统仿真模型, 利用代码生成技术编写嵌入式 CPU 的目标可执行文件, 该设计方法很大程度地减轻了开发人员的负担。相对于传统的系统开发方法, 具有开发周期短、研发效率高、代码准确度高、系统更安全可靠等优点, 被广泛应用于航空航天、机器人、汽车、冶金、电力电子等领域<sup>[5-10]</sup>。至今, 将该设计方法用于印刷行业的相关文献很少。

在上光过程中, 由于干燥温度、传输速度、风量大小、印品材质、幅宽、涂布厚度等不相同, 使得干燥对象根据具体情况不同而发生改变, 同样令上光干燥系统的控制器设计和参数调节变得复杂。传统干燥系统控制器的研发方法, 影响了一些先进控制算法在该领域的尝试与应用, 制约了印刷干燥控制系统的发展; 利用基于模型的设计方法可根据不同的干燥参数和工艺要求, 快捷地改变控制器的控制原理及参数, 能优化干燥控制系统开发流程, 缩短产品研发周期。文中研发水性上光油干燥控制系统的硬件系统, 分析干燥系统的工作原理, 利用模型设计方法开发适用于干燥温度滞后参数的控制算法, 并将其应用于可编程逻辑控制 (Programmable Logic Controller, PLC) 系统中。

## 1 上光干燥的工作原理

水性上光油上光机主要包含给纸、上光涂布压合、输送承印物、干燥固化、收纸等环节, 见图 1,

其中上光干燥系统作为上光机的重要环节, 它的控制效果直接影响着印刷品的上光质量和经济效益, 上光干燥技术受到业界越来越多的关注<sup>[1]</sup>。光干燥系统主要负责快速干燥、固化那些经过上光涂布印品的上光涂料, 满足上光工艺要求, 主要参照光泽度差值和附着牢度这 2 个参数, 完成在印品表面均匀、牢固、平整地附着上透明薄膜<sup>[4]</sup>。

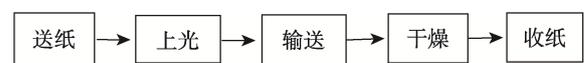


图 1 上光机工作流程

Fig.1 Working diagram of glazing machine

### 1.1 上光干燥系统

上光干燥系统中包含承印物传动机构、干燥执行机构和检测机构。通常传送机构由电机带动传动带完成; 检测机构主要用于温度检测和电机转速检测环节, 负责干燥系统中环境温度的采集和电机运行的检测; 干燥执行机构根据干燥对象的不同而不同, 水性上光涂料的上光机干燥系统通常采用红外干燥和热风干燥相结合的方式, 加热源执行机构可以是红外材料、金属电热材料和碳系材料<sup>[4]</sup>, 风机执行机构可采用恒速电机和调速电机。

文中设计的上光机中物料传送带由伺服电机驱动, 通过伺服驱动器改变涂布材料的传输速度, 如果上光机与印刷单元相连, 则与前续的印刷速度相匹配。控制器控制变频器调节电风扇的转速, 改变干燥箱内的热风速度。干燥箱内安装测量热风的温度传感器, 将温度信号传递给控制器, 干燥控制器根据上光的工艺要求, 调节碳发热板的供电电压, 改变执行机构的表面供热温度, 通过风扇及保温部件改变干燥箱中环境温度, 促使印刷品的光油快速干燥固化<sup>[11]</sup>。

### 1.2 碳系干燥源

碳系导电填料是添加型电热复合材料导电物质的一种, 其中石墨烯、碳纳米管和碳纤维等导电填料的电热材料不仅具有良好的导电性, 还具有很好的发热性能, 可以快速发热<sup>[12-15]</sup>。陈新江<sup>[16]</sup>以碳材料加热膜作为加热核心, 其热效率达到 98%。碳系导电填料因其良好的发热特性被广泛用于各类发热产品, 如取暖地板、电热织物等<sup>[14-15]</sup>, 而在印刷干燥领域的应用很少。以碳系材料制成的发热源作为上光机干燥源, 相对于其他发热源或固化材料具有无毒气体释放、无明显光释放等优点, 对工作人员的健康更好, 对环境保护更有利; 同时

因其电热原理和高发热率对能源能高效利用,也便于节约更多的电能,大大减少了印刷上光的能量消耗。

上光干燥系统中发热碳板的功率可由发热板的面电阻和对其施加的电源电压或电流计算得到。干燥箱内所需能量不仅用于印刷品上光固化中水分的蒸发,还将消耗于干燥固化箱中排气损失、散热损失和传送带因温度变化造成的热量损失等<sup>[1]</sup>。干燥箱热源提供的热量要大于等于上光干燥箱中需要的热量,通过干燥箱所需热量可计算出系统要提供的发热碳板数量。不同的上光材质、涂布速度和干燥工艺,使得工作的发热碳板数量与持续通电时间不同,需要根据具体上光复合的需求来调节。

### 1.3 上光质量主要影响因素

上光机的干燥部分是上光系统的重要组成环节,干燥效果直接影响着上光固化质量,而干燥箱中的温度因素决定印刷品的干燥效果、上光复合效益。如果上光干燥温度过高,涂层表面过热易发黄,印品脆性变大,光泽度降低;干燥温度过低,会造成光油不干,平滑性变坏,附着性差,甚至会出现印品黏手的情况。

印刷品的传输速度直接影响了上光工艺的速度。上光机根据印刷工艺要求可以在印刷单元后联机工作,也可以单独进行上光涂布操作。待上光的印品传输速度可由前面的印刷单元综合来定,也可单独确定,不同的工作流程也决定了联机上光和涂布上光的涂布量不同。传输速度过快,会造成印品受热时间过短,上光涂料干燥不充分;传输速度过慢,使印品干燥过度,印品变脆。

上光机干燥系统中有吸风电机和排风电机,风机间相互的协调工作使干燥箱中热源产生的热量流动起来,均匀分布于干燥箱内,将水分和溶剂抽出箱外,促进承印物上光涂料的快速固化。送风速度影响上光油复合的环境与反应效果。

## 2 上光干燥控制系统数学模型

上光机的干燥部分是系统的重要组成,干燥箱的控制效果直接影响着上光复合的质量。上光机干燥控制系统由温度给定、控制器、执行机构、检测机构等组成,见图2,其中干燥温度给定部分综合了对系统影响较大的2个因素:上光承印物的传输速度和风机的送风量。

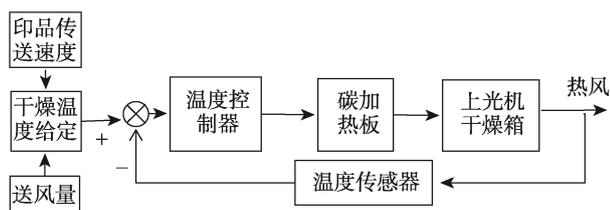


图2 上光机电热干燥控制系统原理

Fig.2 Schematic diagram of glazing machine electric thermal drying control system

### 2.1 干燥箱被控对象

在设计上光机干燥的控制系统前,首先分析被控对象的运行特性,构建干燥箱的数学模型。由于上光工艺、干燥箱机械结构、承印物的不同,使得建立其详细数学模型非常困难。上光机干燥系统通过改变碳加热板的工作功率,配以风机运转,改变干燥箱中印刷品温度,加速其固化复合过程,其主要控制参数是箱体中的空气温度。对于温度这类大滞后的物理参数,控制领域通常用带纯滞后的一阶惯性系统来模拟,见式(1)。

$$G(s) = \frac{K_m e^{-\tau s}}{1 + T_m s} \quad (1)$$

式中:  $K_m$  为系统增益;  $T_m$  为时间常数;  $\tau$  为纯滞后因子,单位为 s。具体参数由干燥箱内部空间结构、保温措施、空气流动速度、电气元件执行速度等综合决定,干燥箱内部空间越大,需加热的空气量越大,散热面积越大,纯滞后因子越大。当保温措施越得当、控制流动速度越快、器件执行速度越快,则环境温度达到期望值越迅速,时间常数越小。采用工程中的飞升曲线进行测试与机理建模,经拟合得到被控对象的表达式见式(2)<sup>[17-18]</sup>。

$$G(s) = \frac{2.2e^{-50s}}{1 + 80s} \quad (2)$$

文中干燥系统的参数经过多次给干燥箱施以阶跃温度给定信号,记录系统运行的响应曲线,取3个参数的平均值,得到  $K_m=2.2$ 、 $T_m=80$  s、 $\tau=50$  s。

### 2.2 控制器 Smith 补偿法

针对干燥系统被控对象的时滞性,采用 Smith 预估补偿法来消除被控对象的延迟特性,使其等效被控对象中不含有纯滞后环节。通常 Smith 预估补偿器复合原控制器来控制被控对象。比例积分微分控制算法(Proportion Integration Differentiation, PID)是控制领域中使用最广泛、最有效的控制算法,文中为了对比 PID 与 Smith 预估补偿器的控制效果,与 Smith 相复合的算法也采用的是 PID,即 Smith-PID 复合算法<sup>[17]</sup>。纯滞后因子与采样周期的关系式为:

$$\tau \approx lT \quad (3)$$

令采样周期  $T=0.01$  s,则由式(3)计算可得  $l=5000$ 。上光机干燥计算机控制系统中被控对象为  $HG(s)$ ,不含纯滞后环节的被控对象为  $HG'(s)$ 。

$$HG(s) = H(s)G(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{K_m e^{-\tau s}}{1 + T_m s} = \frac{K_m (1 - e^{-Ts})}{s(1 + T_m s)} e^{-\tau s} = HG'(s)e^{-\tau s} \quad (4)$$

Smith 补偿器的连续表达式为:

$$D_r(s) = HG'(s)(1 - e^{-\tau s}) \quad (5)$$

将控制算法用于数字 CPU 得到数字控制器,将

其离散化得到 Smith 补偿器的离散表达式为:

$$D_r(z) = Z[HG'(s)(1 - e^{-\alpha})] = (1 - z^{-1})$$

$$\frac{K_m(1 - e^{-\frac{T}{T_m}})z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T}{T_m}}z^{-1}} = (1 - z^{-5000}) \frac{0.00022z^{-1}}{1 - 0.9999z^{-1}} \quad (6)$$

### 3 干燥系统仿真系统及运行

#### 3.1 上光机干燥仿真系统

上光机干燥系统的控制仿真见图 3, 分别由温度给定子模块、控制子模块和被控对象等模块组成。干燥系统被控对象因上光工艺和干燥运行环境的不同

而发生变化, 在设计仿真模型时, 考虑到仿真系统的普遍适用性, 对象的增益、时间常数及滞后时间等参数采用变量形式表示, 以便根据具体情况改变被控模型。系统采用数字控制器与连续被控对象相结合的混合仿真系统运行模拟试验, 令仿真系统更加贴近实际运行情况, 而且模型化设计法对应的执行 CPU 采用的是可编程逻辑控制器, 其中进行数字化运算, 仿真系统的控制算法采用数字化表达, 有利于后期 PLC 程序的实现。仿真系统采用的实验纸张尺寸为 307 mm×420 mm, 纸张定量为 130 g/m<sup>2</sup>, 印品传输速度最高为 5 000 张/小时, 吹风量最大为 3 m<sup>3</sup>/min, 干燥温度设定最高温度为 90 °C。

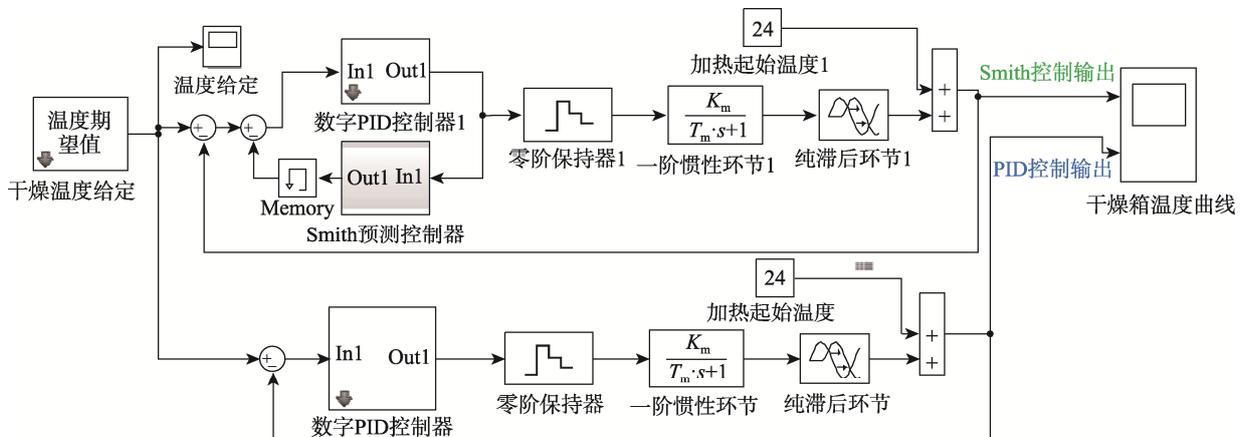


图 3 上光机干燥控制系统仿真图

Fig.3 Simulation diagram of drying control system of glazing machine

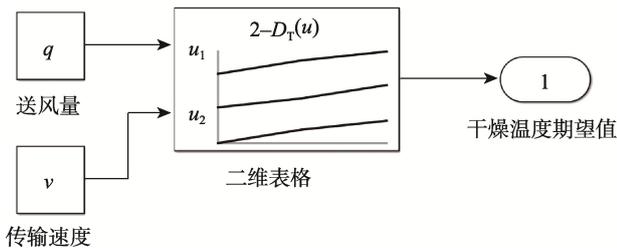


图 4 干燥系统温度给定模块仿真  
Fig.4 Simulation module of the drying system temperature setting

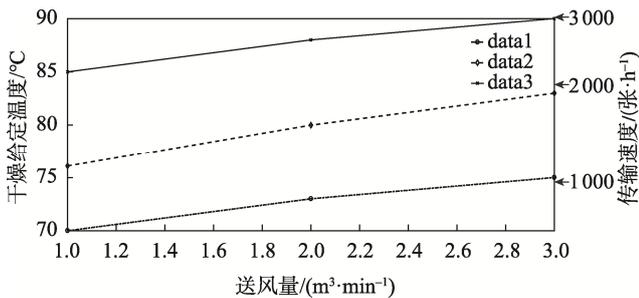


图 5 干燥温度与印品传递、送风量的关系  
Fig.5 Relationship among the drying temperature, printed product transfer and air supply

#### 3.2 干燥温度给定子模块

干燥系统的温度给定值是根据具体的上光工艺、印品传输速度和送风速度而定的, 仿真系统的温度给定模块设计见图 4。该仿真系统综合考虑了上光机的送风量与传输速度, 根据相互关系 (图 5), 在不同的送风量和传输速度情况下得到干燥系统的温度期望值。通常随着送风量的增加, 印品传输速度的增加, 干燥箱的给定温度增加, 如系统中, 当印品传输速度为 1 000 张/小时、风量为 1 m<sup>3</sup>/min 时, 对应的参考干燥温度为 70 °C; 当传输速度为 2 000 张/小时、风量为 2 m<sup>3</sup>/min 时, 对应的参考干燥温度为 80 °C。

#### 3.3 仿真系统运行结果

运行如图 3 仿真系统, 采用龙格库塔法定步长仿真算法, 得到上光机干燥控制系统在控制器分别为数字 PID 控制算法和 Smith 预测控制算法下系统的干燥温度响应曲线, 见图 6。采用试凑法, 根据系统响应反复调试数字 PID 的控制参数, 最后得到系统在超调量、调节时间和稳态误差等方面都比较理想的控制参数 ( $K_p=0.7$ 、 $K_I=0.0001$ 、 $K_D=0$ ), 为对比 2 种控制

算法的控制效果, Smith-PID 中的 PID 控制参数与数字 PID 的控制参数一致。由图 6 可得, 采用数字 PID 的干燥系统温度参数超调量为 38%, 而复合了 Smith 预测环节的干燥系统温度响应没有超调量, 系统调节时间也大大缩短, 系统在 300 s 时就达到了无静差。相对于单纯的数字 PID, 含 Smith 补偿器复合数字 PID 对滞后对象的控制, 效果改进了很多。Smith 补偿器将被控对象的纯滞后特性用控制算法的形式补偿在数字 PID 的反馈通道, Smith 与 PID 2 种控制算法结合成 Smith-PID 控制器, 作用于具有纯滞后性的被控对象上, 使得系统的等效闭环传递函数中不含有滞后环节, 从而在系统响应中消除了纯滞后因子对系统的超调量和调节时间的影响。

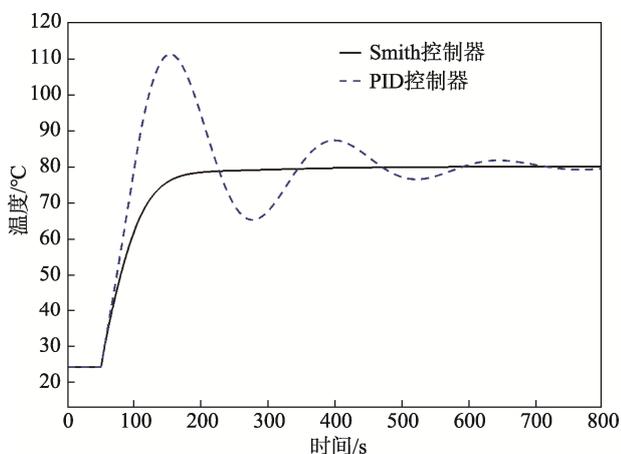


图 6 上光机干燥控制系统温度响应曲线  
Fig.6 Temperature response curve of glazing machine drying control system

### 4 基于模型设计的 S7-1500 干燥系统

传统的可编程 CPU 控制系统开发过程要求设计人员具有良好的软件开发能力, 系统需在现场被控对象中运行调试其控制参数, 调试中具有不可估计的损失。基于模型设计方法开发的 CPU 系统软件是基于实际系统的仿真模型运行正常的前提才可以实施, 控制器的设计与参数调节更加贴合实际系统, 极大地缩减控制系统的开发与调试周期。由于控制器的参数调节结果在仿真环节中容易得到, 建立的模型越接近实物系统, CPU 控制系统的调节效果就越优良, 由于参数不合理造成的危害可能性就更小, 大大提高了系统安全性。第 2、3 节中干燥模型建立与系统仿真, 为基于模型设计做好理论分析与系统开发依据, 为支持该设计方法的 CPU, 即 PLC 的软件系统设计提供控制算法的原型。

#### 4.1 基于 PLC 的干燥控制系统

上光机干燥系统采用西门子 S7-1500 为控制核

心, 配以电源、CPU、数字量输入 (DI)、数字量输出 (DQ)、模拟量输入 (AI)、模拟量输出 (AQ) 等环节, PLC 系统通过以太网与触摸屏人机界面 (Human Computer Interface, HMI) 进行通讯, 可对系统运行状态进行实时检测和初始运行参数设置, 详细见图 7。该控制系统实现了上光干燥系统中的箱体温度闭环控制、风机转速调节、传送带运动控制和安全监测故障处理等功能。S7-1500 的 CPU1511-1 不仅支持传统的梯形图 (Ladder Diagram, LAD) 编程, 同时支持结构化控制语言 (Structured Control Language, SCL) 编程。SCL 是符合国际 IEC61131-3 标准的结构化文本, 能够支持输入与输出信号之间更复杂的逻辑关系, 接近高级语言的表达形式, 有利于先进控制算法的实现, 为采用模型化设计方法奠定了编程语言基础。

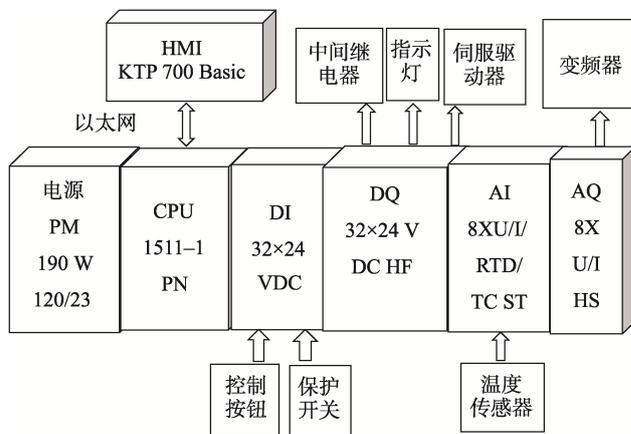


图 7 以 s7-1500 为控制核心的印刷机系统硬件框图  
Fig.7 Hardware block diagram of the printing press system with s7-1500 as control core

#### 4.2 模型设计法的 SCL 代码

上光机干燥控制系统采用基于模型的设计方法。首先成功运行上光机干燥仿真系统, 然后将控制算法转换成 S7-1500 可运行的控制代码, 接着在上光机干燥系统中进行干燥箱温度控制, 实现上光油干燥过程。由实际系统运行现象与上光干燥品质来验证模型的准确性及效果, 并进行修正与系统改进。该系统选择的目标集成开发环境 IDE 是支持西门子 PLC 的编译器, 以便生成 S7-1500 的运行代码。为了避免代数环问题, 将 Smith 控制算法拆成 2 个部分, 一部分是数字 PID 仿真子模块, 一部分是消除纯滞后的补偿模块, 命名为 Smith 预测控制器, 并且在反馈环节添加一个滞后环节。

干燥控制仿真系统中生成的 Smith 控制算法虽然基于离散系统进行的设计, 但输出的碳加热板的控制量幅值为连续形式, 而对应上光机 PLC 干燥控制系统中的输出控制量将作用于中间继电器, 需要调整输出形式。干燥系统通过继电器的通、断控制碳加热

源的工作功率,以调节干燥箱热空气的温度。根据 S7-1500 上光机干燥系统的硬件配置,调整仿真系统 Smith 控制量的输出形式为 PWM 脉冲,与 PLC 的 DQ 输出形式相一致。为了使仿真系统代码中控制量的数据类型与 PLC 运行系统输出相匹配,在仿真系统和 PLC 编译环境中需做一些设置,即在仿真系统中添加一个数据类型转换模块。

### 4.3 S7-1500 控制软件

对仿真系统进行试验运行,调节控制参数直至试验结果符合干燥需求,运行控制程序子模块运行代码编辑功能,仿真系统生成相应的 SCL 文件,并对其检查和测试。在 S7-1500 的开发环境载入 SCL 文件,根据软件系统整体性要求对调入的文件进行修改,将其生成的 Smith 算法 FB 函数块,在程序块 OB 中进行调用,与其他 LAD 编程代码汇合,实现上光机的干燥系统控制,PLC 控制干燥箱的工作流程见图 8。

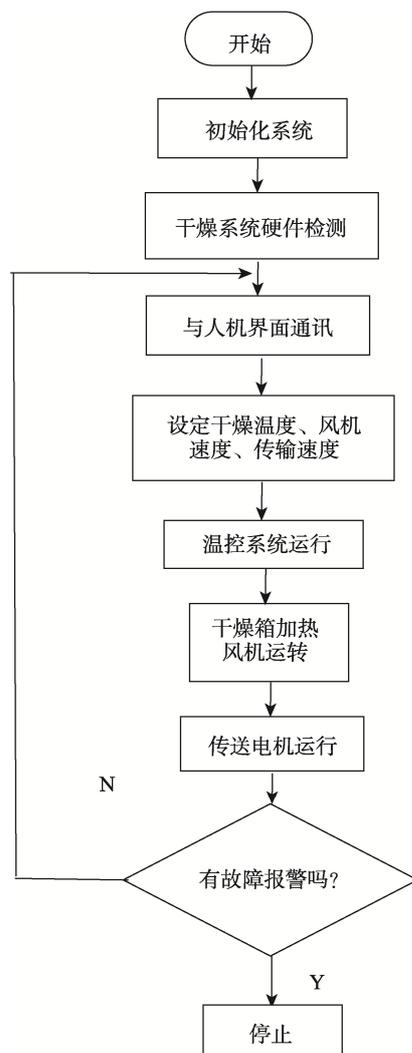


图 8 上光机干燥系统流程

Fig.8 Flow chart of glazing machine drying system

## 5 结语

文中以碳系发热板作为水性上光油固化的热源,相对于传统干燥方式具有更节能、环保的优势,其高发热率会为印刷业节约更多的能源。上光油干燥被控对象是受干燥工艺、上光材质综合影响的时滞性对象,Smith-PID 控制算法较 PID 算法更适用于水性上光干燥控制,更具有针对性。模型设计方法使复杂算法在上光油干燥 PLC 控制系统中的实现更具可靠性,控制算法的实现和参数的调节更加方便。文中通过建立涵盖较多因素的被控对象,使其更接近实际干燥过程,在此平台设计控制算法也更具有工程意义。将模型设计方法应用于印刷干燥研究领域,可以提高研发效率,促使复杂的控制策略便捷地应用于实际系统,增加上光机干燥的控制精度与速度。

### 参考文献:

- [1] 李雪峰. 环保节能型上光机干燥固化系统的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 8-21.  
LI Xue-feng. Research on Drying and Curing System of the Glazing Machine with Environmental Protection and Energy Conservation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011: 8-21.
- [2] SAAD E, AYDEMIR C, ZSOY S A, et al. Drying Methods of the Printing Inks[J]. Journal of Graphic Engineering and Design, 2021, 12(2): 29-37.
- [3] ZUR D, DES E. Environmental Pollution Reduction by Using VOC-Free Water-Based Gravure Inks and Drying Them with a New Drying System Based on Dielectric Heating[D]. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2008: 5-16.
- [4] 李海超. 基于碳纳米的绿色上光机干燥系统研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2020: 1-19.  
LI Hai-chao. Research on the Drying System of Green Polishing Machine Based on Carbon Nano[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2020: 1-19.
- [5] REHBEIN J, WRUTZ T, BIESENBAACH R. Model-based Industrial Robot Programming with MATLAB/Simulink[C]// 2019 20th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), Wels, 2019: 1-5.
- [6] PHILIPPE S, STEVEN D W, ANNEMARIE K, et al. Using Code Generated by MATLAB for the Mold Level Control System of a Continuous Slab Caster in ArcelorMittal Gent[C]// 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Zaragoza, 2019: 1497-1500.

- [7] 刘璋, 吴朝俊, 黄天鹏, 等. 基于模型设计的SVPWM调制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(12): 66-71.  
LIU Zhang, WU Chao-jun, HUANG Tian-peng, et al. Research on SVPWM Modulation Strategy Based on Model Design[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(12): 66-71.
- [8] 黄雷. 基于模型设计方法的两级式光伏并网系统开发[J]. 电气传动, 2020, 50(11): 95-100.  
HUANG Lei. Development of Model-Based Design of Double Stage Grid Connected PV System[J]. Electric Drive, 2020, 50(11): 95-100.
- [9] BERGMANN A. Benefits and Drawbacks of Model-based Design[J]. KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology, 2014, 7(3):15-19.
- [10] DALTON W S, WAGNER F, BERGMANN A and BOCK B. Using MATLAB V&V-Toolbox for Target-Specific Model-Based Design[C]// 2018 Third International Conference on Engineering Science and Innovative Technology (ESIT), North Bangkok(TH), 2018: 1-5.
- [11] 陈杰. 一种上光机风干装置: 中国, 108437625A[P]. 2018-08-24.  
CHEN Jie. Glazing Machine Air-Drying Device: China, 108437625A[P]. 2018-08-24.
- [12] QIAN Ting-ting, ZHU Shi-kun, WANG Hong-liang, et al. Comparative Study of Carbon Nanoparticles and Single-Walled Carbon Nanotube for Light-Heat Conversion and Thermal Conductivity Enhancement of the Multifunctional PEG/Diatomite Composite Phase Change Material[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(33): 29698-29707.
- [13] HE Xu-hua, YU Xin, WANG Yue-chuan. Significantly Enhanced Thermal Conductivity in Polyimide Composites with the Matching of Graphene Flakes and Aluminum Nitride by in Situ Polymerization[J]. Polymer Composites, 2020, 41(2): 740-747.
- [14] 田文祥. 典型电热聚合物基复合材料的设计与热性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 1-6.  
TIAN Wen-xiang. Design and Thermal Properties of Typical Electrothermal Polymer Matrix Composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 1-6.
- [15] 郭佩, 崔学民, 林朝旭, 等. 地聚物基碳系电热涂料的制备与性能研究[J]. 陶瓷学报, 2019, 40(4): 469-476.  
GUO Pei, CUI Xue-min, LIN Chao-xu, et al. Study on Preparation of Geopolymer-Carbon Based Electrothermal Coatings and Its Performances[J]. Journal of Ceramics, 2019, 40(4): 469-476.
- [16] 陈新江. 一种远红外电加热元件: 中国, 207869425U[P]. 2018-09-14.  
CHEN Xin-jiang. Far Infrared Electricity Heating Element: China, 207869425U[P]. 2018-09-14.
- [17] 何克忠, 李伟. 计算机控制系统[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 259-272.  
HE Ke-zhong, LI Wei. Computer Control System[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 259-272.
- [18] 唐凡森. 凹版印刷机热风型干燥系统的智能控制装置设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 259-272.  
TANG Fan-sen. The Design of Intelligent Control Device for Hot Air Drying System of Gravure Press[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 259-272.

责任编辑: 曾钰婵