

供排风系统中全域自适应焓湿控制算法的设计

李敏强, 杨湘荣, 胡建桥, 黄龙武, 刘立东

(一汽-大众汽车有限公司佛山分公司, 广东 佛山 528000)

摘要: 本研究旨在探讨全域自适应焓湿控制算法在工业供排风系统中的应用, 以提高系统的节能性能。送排风系统通过加热段、冷水段、加湿段的协同工作, 使整个控制系统达到工艺要求。传统送排风系统通过 PID 调节, 该调节过程存在加热与加湿互相耦合的现象, 能源浪费巨大。全域自适应焓湿算法通过 ICT 模块对外界气候秒级检测, 对外界温湿度进行智能分区, 每个温区设定最优目标控制。针对每个温区建立最优的控制模型, 通过多目标和多模型控制可有效完成温湿度控制的解耦, 可以显著降低能源消耗。

关键词: 工业供排风; 全域自适应; 焓湿控制

中图分类号: TQ639 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)08-0030-03

Design of Global Adaptive Enthalpy and Humidity Control Algorithm for Air Supply and Exhaust System

LI Min-qiang, YANG Xiang-rong, HU Jian-qiao, HUANG Long-wu, LIU Li-dong

(Faw-Volkswagen Automotive Co., Ltd., Foshan Branch, Foshan 528000, Guangdong, China)

Abstract: The purpose of this study is to explore the application of global adaptive enthalpy and humidity control algorithm in industrial air supply and exhaust system. In the air supply and exhaust system, the heating section, cold water section and humidification section work together to make the whole control system meet the process requirements. The traditional air supply and exhaust system is regulated by PID. In this regulation process, heating and humidification are coupled with each other, and there is a huge waste of energy. The global adaptive enthalpy and humidity algorithm detects the outside climate in seconds through the ICT module, makes intelligent partition of the outside temperature and humidity, and sets the optimal target control for each temperature zone. The optimal control model is established for each temperature zone, and the decoupling of temperature and humidity control can be effectively completed through multi-objective and multi-model control, which can significantly reduce energy consumption.

Key words: industrial air supply and exhaust; global adaptive; enthalpy and humidity control

0 引言

涂装作为汽车制造领域的四大工艺之一^[1], 由于涂料中可能含有挥发性有机化合物 (VOC) 等有害物质, 涂装车间需要配备通风系统以保证生产环境的清洁和员工的健康, 此外, 供排风系统对油漆质量也有着重要影响, 例如影响油漆的干燥速度, 进而影响涂层的

厚度和光滑度; 同时油漆黏度的稳定性也与温湿度控制关系密切, 油漆黏度可确保油漆在喷涂过程中流动性良好, 涂装均匀, 避免出现涂层厚薄不均和起泡等质量问题。涂装车间可能同时进行不同颜色或者不同种类油漆的涂装作业, 供排风系统可以通过良好的空气流动控制, 避免不同油漆之间的交叉污染。因此, 为了保证涂装质量, 涂装车间通常会有严格的环境控制要求, 如温度、湿度、尘埃等方面的控制。

涂装车间的环境保证主要以工业送排风系统为基础。供排风工艺是保障涂装质量、作业安全及环保合规

收稿日期: 2024-03-06

作者简介: 李敏强(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事汽车面漆涂装领域的研究工作。E-mail: go.net@163.com。

的关键环节,其设计需综合考虑气流组织、温湿度控制、污染物处理等因素。供排风系统包含送风系统和排风系统。送风系统包含新风过滤段、温湿度处理段、风机段、送风管道及风口。新风过滤段主要通过初效(G4)、中效(F8)过滤器去除空气中的尘埃、颗粒物,高洁净区需增设高效过滤器(H13)。温湿度调控段通过加热器(蒸汽或电加热)升温,加湿器(干蒸汽或超声波)加湿;通过表冷器(冷水或制冷剂)降温除湿,配合再热器控制湿度。气流组织,采用顶部送风、侧部送风等方式,确保车间内风速均匀(通常 0.3~0.5 m/s),避免气流死角。排风系统包含排风风口、漆雾捕集装置、废气处理设备、风机与排风管道、排放烟囱等主要组件。漆雾捕集系统,在喷漆室底部设置水幕、水帘或干式过滤纸,通过水流或过滤材料拦截漆雾颗粒(捕集效率 $\geq 90\%$)。干式喷漆室采用折流板和过滤棉,湿式喷漆室通过循环水冲洗漆雾。废气处理主要针对 VOC,常用工艺包括活性炭吸附(适用于低浓度废气)、催化燃烧(RCO,处理效率 $\geq 95\%$)、蓄热式燃烧(RTO,热回收率 $\geq 90\%$)。排风动力,通过离心风机将处理后的废气高空排放,烟囱高度需符合环保规范(通常 ≥ 15 m)。工业送排风系统可以将新鲜的空气送入车间,以补充车间内部的空气,同时也可以控制车间内的温度和湿度,保持恒温恒湿的工作环境。而排风系统则可以将车间内部的污浊空气、废气和有害物质排出车间,保证车间空气的流通和清洁,降低工人和设备的操作风险,同时也可以减少涂装过程中产生的异味和粉尘等有害物质对环境的污染。

以某涂装车间为例,其车间工艺空调的控制温度范围为 21~23 °C,相对湿度范围为 60%~70%,控制采用定点控制即温度 23 °C、相对湿度 65%,温湿度控制主要通过燃气加热、喷淋加湿和冷冻水降温 3 种方式,控制方式为 PID 调节,整个控制过程存在大量加热和降温同时开启的过程,温度和湿度也存在耦合,有大量的能源浪费。

1 存在问题

目前的供排风系统采用定点控制模式,温度控制目标为 23 °C,相对湿度控制目标为 65%。工艺要求是一个区间,只要温湿度在区间范围内,即可满足生产要求,但是,精准控制的温湿度存在冗余空间,目前温湿度随着外界气象条件不断变化,如何快速、精准地根据外界变化调整温湿度控制目标,使整个供排风系统达到最节能的运行状态是一个重要课题。

供排风系统对湿湿度的控制主要包括加热段、加湿段、表冷段。加热段通过燃气进行加热,提高空气温度,加湿段通过喷淋泵进行喷水加湿,表冷段通过调节

冷水的流量进行降温。目前 3 个过程均采用 PID 进行调节。调节过程中经常存在既有燃烧器加热和表冷段降温,加热与加湿同时开启的互斥过程,温度和湿度也存在耦合,整个控制模型只是满足了湿湿度的基本控制需求,并非最优的控制模型。

2 应对策略

2.1 全域自适应焓湿控制算法

焓湿图^[2]是一种用于表示湿空气(干空气与水蒸气的混合物)状态参数及其变化关系的图,是空调、通风、供热等领域的重要分析工具。它通过图形化方式直观展示湿空气的热力学性质,帮助工程师计算和优化空气处理过程(如冷却、加热、加湿、除湿等)。它以空气的干球温度和相对湿度为坐标轴,并通过等焓线和等湿线展示了空气的热力学性质。焓湿图包含不饱和区($\varphi < 100\%$),干球温度 $>$ 湿球温度 $>$ 露点温度,空气可继续吸收水蒸气。饱和区($\varphi = 100\%$)干球温度=湿球温度=露点温度,空气无法再容纳水蒸气,冷却会导致冷凝。任意湿空气状态可由两个独立参数(如焓值与含湿量、干球温度与相对湿度等)唯一确定,对应图中一个交点。

焓湿图上的等焓线代表了具有相同热含量的空气状态,而等湿线则代表了具有相同绝对湿度的空气状态。通过查找焓湿图上的点,可以得到与该点对应的空气状况参数,如绝对湿度、湿球温度、露点温度等。这些参数对于空气处理系统的设计和运行非常重要,例如确定适当的空气加热、冷却、加湿或除湿操作。在空气处理过程中,焓差直接反映热交换量,含湿量差反映湿交换量,二者是独立的状态参数。

等焓过程(如绝热加湿)和等焓湿量过程(如干加热/冷却)是常见处理流程。等焓加湿是指在加湿过程中,空气的焓值保持不变的加湿方式。其核心原理是利用水的蒸发或湿物料的水分扩散,使空气湿度增加,同时由于蒸发过程吸收的热量来自空气本身,导致空气温度下降,但焓值(总热量)维持恒定。等焓加湿通过水的蒸发实现空气湿度提升,过程中焓值不变、温度降低,是一种节能的加湿方式,广泛应用于对温度精度要求不高的工业、农业及空调系统中。等焓加湿过程,在实际工程中优化温湿度控制方案,平衡能耗与效果。冷却除湿是通过降低空气温度至露点温度以下,使空气中的水蒸气凝结为液态水析出,从而减少空气含湿量的过程。其核心原理基于水蒸气分压与温度的关系:空气温度降低时,水蒸气的饱和分压下降,当实际水蒸气分压超过饱和值时,多余的水蒸气便会冷凝成水,实现除湿效果。冷却除湿通过制冷系统将空气降温至露点以下,使水蒸气冷凝析出,是工业与民用场景中最常用

的除湿方式之一。其优势在于效率高、成本低,适合常温和高湿环境,但在低温或超低湿度需求下需结合其他技术。理解冷却除湿的热力学原理和设备特性,有助于在工程设计中优化系统配置,平衡除湿效果与能耗成本。

全域自适应焓湿控制算法以焓湿图为理论基础。首先,通过温湿度传感器对外界温湿度检测,收集相关的环境参数。然后根据收集到的参数,确认当前空气在焓湿图的位置,进而确认当前空气的焓值、湿度等参数。根据这些状态点数据,可以通过等焓线和等湿线来了解空气在不同条件下的热力学性质,比如湿、比容等。利用智能焓湿算法,根据空气的热湿状态把气候条件划分不同的温区,每个温区根据热湿条件选择最优的制冷或加热方式。最后,根据设备的运行工况,对每个温区控制模型进行优化,达成最优状态。动态地根据外界温区的变化,激活不同的控制模块,每个模块根据焓湿区间对控制策略进行调整,从而形成最优的控制策略。

2.2 ICT 控制模块

传统工业供排风系统中,以 PLC 作为核心的控制部件,以加湿泵、燃烧器、冷水泵作为执行机构,通过温湿度传感器进行温湿度采集,以 PID 算法作为温湿度调整的核心算法,来完成目标温湿度的调节。在调节过程中,由于其无法给定多目标值,只能进行单点调节,控制目标主要以达成目标点的响应速度为主要的目标,能源效率难以兼顾。

ICT 控制模块的引入,为传统工业供排风系统提供了多目标调节^[3]的可能。外界温湿度首先进入 ICT 智能温控模块,ICT 智能温度模块根据外界温湿度通过自适应焓湿控制算法计算出当前环境条件下最优的控制目标,并把相应的控制目标发送给 PLC。同时,ICT 模块把所有的气候条件进行温区划分,不同的温区匹配不同的控制方式,针对性地调整 PLC 的控制策略,达到每个 PLC 控制模型的优化。通过多目标控制和不同温区最优控制模型的建立,从而使整个供排风系统以最节能的方式达成控制目标。

3 效果验证

3.1 ICT 模块的硬件安装及配置

ICT 模块是本团队自主设计的 PCB 板,主要包含 RS485 通信模块、电源模块、单片机模块、显示屏等模块。外部温湿度通过温湿度传感器进行采集,采集的数据通过西门子 Modbus 通信模块输入至 ICT 模块 RS485 通信模块,数据通过单片机内部的算法输出控制策略,通过 RS485 总线传输至西门子 PLC,激活对应的控制区域。

温湿度传感器采用 E+E 品牌,相对湿度测量范围

为 0~100%,温度范围为-40~180 °C。测试湿度精度为±1.3%,温度精度为±0.2 °C。西门子 PLC 控制系统:PLC 型号为 CPU319 系列,1 个 ET200S 从站,4 个 DI/DO 模块,4 个 F-DI/DO 模块,电源模块等。通过对上述硬件的组态形成一套完整的工控系统,外界温湿度通过 ICT 模块的算法计算出所处温区,激活西门子 PLC 控制系统的相应的控制模型完成多目标的最优模型控制。

3.2 ICT 模块的现场应用

以某涂装车间为例,该涂装车间共有两条 30 JPH 线体,其中一线供排风系统采用 ICT 控制模块单元进行温湿度控制,二线线体供排风系统采用传统的 PID 控制模式。该车间的供排风系统主要包含燃气加热段、冷水降温段以及喷淋加湿段。三大核心执行机构作为能耗的主要载体分别对应燃气耗量、冷水耗量以及加湿泵的耗电。分别选取燃气功率、冷水阀门开度、冷水流量、加湿泵频率四大参数来表征供排风系统的能耗指标,以二线传统 PID 控制模式作为对照组来衡量 ICT 模块的能耗效率。

以外界温度 27.76 °C、相对湿度 78.30%的气候条件为例,其所处的温区为 A 区,A 区作为典型的南方夏季模式,特征为温度高、湿度大。传统的控制模式需要大量的冷冻水进行降温,并且由于设定的目标温度、湿度较低,其降低到露点温度后,还需要持续降温,才能保证达到湿度目标。然后通过燃烧器的开启进行等湿加热,才能保证达成温度目标。通过自适应焓湿控制,首先会根据当前的温湿度所处的区间,设定最优的目标温湿度,该目标温度比之前的设定值范围更大,使得降温过程下降幅度大幅降低。此外,温湿度的平衡状态建立在最小的燃气阀门开度和喷淋加湿开度,从而使得稳态处于最优模式。调取现场一线和二线的冷水耗量曲线,改造之前在相同的气候条件下,一线和二线的冷水耗量曲线差别不大。完成改造后二者存在较大的差异,其中二线的冷水流量平均值为 100 m³/h,一线冷水的流量仅为 47 m³/h,冷水的节约量改造后下降幅度为 50%左右。

对不同的温区进行数据分析发现各能源指标均有大幅度的优化。如表 1 所列,通过不同温区的数据统计,在 A、B、C、D、E 已经跟踪到的温区,各能耗指标都得到了很好的优化,综合能耗数据优化下降超过 30%。

4 结语

研发设计 ICT 智能温区模块,能对外界温湿度进行秒级监控与运算,自动跳转最节能的温区对空调机械单元进行控制。通过 ICT 智能温区模块可实现自适应外界气候调节,并实现温湿度的解耦,最大限度节约能源。通过在某涂装车间的实际应用(下转第 55 页)