

可变温热风源装置的研制

朱楠, 李小宁

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要:针对许多场合需要流量可调、温度可控热风源的需求,研制一种可变温热风源装置,能够通过节流阀实时调节系统的设定流量值;通过 LCD 触摸屏实时调节系统的预设温度值。流量调节范围 40~80 m³/h,温度调节范围 25 ℃~80 ℃。试验结果表明:在流量为 80 m³/h、环境温度 10 ℃ 的条件下,达到最大设定温度 80 ℃ 的时间为 210 s,温控精度在±0.6 ℃ 以内。流量调节范围、温度设定范围及温控精度都达到技术要求的指标。

关键词:可变流量;整流;加热;可变温;温度控制

中图分类号:TP272 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)02-0042-04

Design of Variable Temperature and Hot Air Source System

ZHU Nan, LI Xiaoning

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To meet demands of hot air sources with adjustable flow and control led temperature, a variable temperature and hot air source device is developed, which can adjust the set flow value of the system in real time through the throttle valve and the preset temperature value of the system in real time through the LCD touch screen. The flow adjustment range is 40~80 m³/h, and the temperature adjustment range 25 ℃~80 ℃. The test results show that under the conditions of a flow rate at 80 m³/h and an ambient temperature of 10 ℃, the time to reach the maximum set temperature of 80 ℃ is 210 s, and the temperature control accuracy is within ±0.6 ℃. The flow adjustment range, temperature setting range and temperature control accuracy all meet the technical requirements.

Keywords: variable flow; rectification; heating; variable temperature; temperature control

0 引言

许多场合需要流量可调、温度可控的热气流作为工作气流,例如干衣机或洗干一体机研发过程中的模拟测试。因此,针对此需求开发出一种流量可调、温度可控的热风源装置是具有实际研究应用价值的。某洗衣机企业对该装置的主要技术要求是:加热温度可以人工设定、自动调节,出口气流的温度调节范围为 25 ℃~80 ℃,温度调节的偏差在±1 ℃ 内;流量调节范围为 40~80 m³/h;整个装置尽量小型化。根据实际技术要求,研发了一种电加热方式的热风源装置。

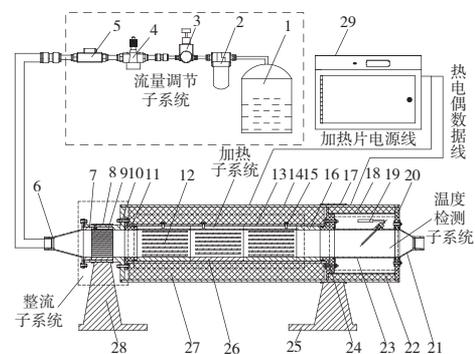
1 可变温热风源装置结构

1.1 热风源装置总体结构

所研发的可变温热风源装置包括流量调节子系统、加热子系统、整流子系统、温度检测子系统、绝缘隔热保护部件及控制箱,图 1 为系统的总体结构。

工作时,气体由压缩气源 1 产生,通过流量调节子系统进行流量调节,再从入口 6 进入热风源装置的主体部分,分别经过整流器子系统、加热子系统以及温度检测子系统,经过加热后形成的热气流最终再从出口 21 流出。

由加热子系统和温度检测子系统内分别引出加热片电源线与热电偶数据线至控制箱 29 内,与控制器相连接,实现系统温度的闭环控制。热风源装置的整体结构长、宽、高尺寸为 891×267×300 mm。



- 1—压缩气罐;2—过滤器;3—减压阀;4—节流阀;5—流量传感器;
- 6—入口;7—前套筒;8—前段上支架;9—整流器;10—整流器外壳;
- 11—绝缘隔热左法兰;12—电加热片;13—主结构管;14—保护管;
- 15—定位螺钉;16—后套筒;17—后端上支架;18—保温套垫板;
- 19—热电偶传感器;20—尾部隔热法兰;21—出口;22—保温套;
- 23—传感器固定件;24—绝缘隔热右法兰;25—后端下支架;
- 26—加热片外壳;27—绝缘保温套;28—前段下支架;29—控制箱。

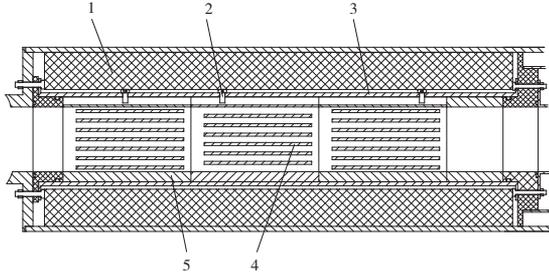
图 1 系统总体结构图

第一作者简介:朱楠(1996—),男,江苏太仓人,硕士研究生,研究方向为气动控制技术。

1.2 加热子系统

1) 结构设计

加热子系统是可变温热风源装置的关键子系统,图2是加热子系统的结构示意图。



1—绝缘保温套;2—周向定位螺钉;3—主结构管;
4—电加热片;5—加热外壳。

图2 加热子系统结构简图

加热子系统内安装有3组电加热器,分别称为组I、组II、组III,3组电加热器内部加热片的布置结构各不相同。相邻两组电加热器内部电热片采用了错位的布置形式,此结构形式能够弥补前组电加热器内相邻两片加热片中间部位温度较低的情况,这样使层流状的气体能够被均匀地加热,从而提高加热的速度。

2) 加热片的参数选择理论分析

由于加热片的功率一般在单位面积内为一定值,设加热片在单位面积内的功率为 p_i ,热风源装置达到稳态状态时的传热微分方程为

$$a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{2a}{\sigma^2} \cdot T = -\frac{p_i}{\rho c \sigma} \quad (1)$$

式中: a 为气体的热扩散系数, m^2/s ; T 为加热片热边界层表面的温度, $^\circ\text{C}$; v 为管内流体的平均流速, m/s ; σ 为热边界层的厚度, m ; c 为空气比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; ρ 为空气密度, kg/m^3 。

经过数学推导,可得热风源装置的入口与出口的温度差值为:

$$T(\Delta) = \frac{\sigma \cdot p_i}{2\lambda} \cdot \left[\frac{n_2 \cdot e^{(n_1+n_2)L} - n_1 \cdot e^{(n_1+n_2)L}}{n_1 \cdot e^{n_1 L} - n_2 \cdot e^{n_2 L}} + 1 \right] \quad (2)$$

式中 λ 为气体导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{k})$;

$$n_1 = \frac{v + \sqrt{v^2 + \frac{8a^2}{\sigma^2}}}{2a} \quad (3)$$

$$n_2 = \frac{v - \sqrt{v^2 + \frac{8a^2}{\sigma^2}}}{2a} \quad (4)$$

当管内气体的流动状态充分发展为稳态时,热边界层厚度 σ 可以由下式^[1]求得:

$$\sigma = \left(\frac{15R^2 x}{2PrRe} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

式中: Pr 为空气的普朗特数; Re 为空气的雷诺数; x 为加热片中心距管道入口的距离, m ; R 为管道的流道半径, m 。

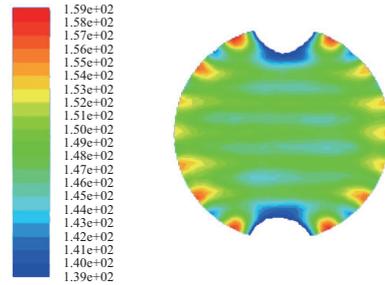
将参数 $\lambda = 0.02624 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, $v = 6.91 \text{ m}/\text{s}$, $a = 2.23 \times$

$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $Pr = 0.691$, $Re = 28659$, $x = 0.154 \text{ m}$, $R = 0.032 \text{ m}$ 分别带入式(2)~式(5)中,可得

$$T(\Delta) = 8.95 \times 10^{-3} \cdot p_i \quad (6)$$

热风源装置的最大工作温度为 80°C ,装置所处的最低环境温度为 10°C ,考虑到低温环境下热量损耗和尽量缩短加热时间的需要,在加热片功率确定时要有充分的裕度。因此在选定加热片功率时,将系统的最大功率确定为基本功率的2.5倍,将此值代入式(6),可得 的值为 $21229.1 \text{ W}/\text{m}^2$,以常用选型单位表示为 $2.1229 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

图3为热风源装置在此加热功率条件时,在最大流量、最低环境温度下仿真分析所得的温度分布情况。仿真表明在理论计算所得加热片的加热功率下,系统能够达到所设定的温度大小,且具有较快的升温速率。



Contours of Static Temperature (c)

图3 流量为 $80 \text{ m}^3/\text{h}$ 、环境温度为 10°C 时出口的温度分布云图

1.3 整流子系统

由于气源输入接口的管径通常比较小,而加热装置的管径则比较大,因此加热器入口形成了扩散管结构,气体在扩散管内流动的流态不是理想的层流状态。气流会在管壁处形成逆流旋涡区,这不利于之后对于气流的均匀加热。一种最简单的解决方案是在扩散管段后让气流在截面形状和大小不变的直管道内稳定地流过一定距离,但这会显著增加装置流道的长度。图4为仿真分析的热风源装置在无整流器时气流达到层流状态时所需的流道长度,表明其长度至少为 120 mm ,这不利于小型化的要求。

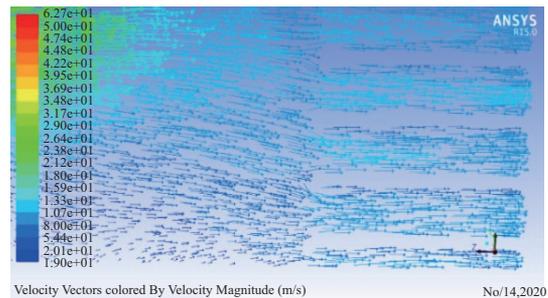
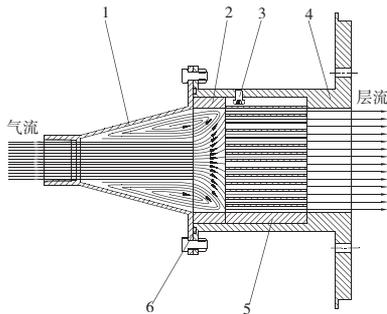


图4 流道长度为 120 mm 时的速度矢量分布图

另一种方法是在扩散管段后增加一个整流结构,以改善气流进入加热区之前的流动状态。所设计的整流器开孔方式采用矩形孔式,图5为整流子系统的结构示意图。



1—入口;2—套筒;3—周向定位螺钉;4—整流器外壳;
5—矩形整流器;6—O型密封圈。

图5 整流子系统的结构示意图

图6为具有整流器时的的速度矢量分布图,可见长度为50mm的整流器就可以使气流形成层流状态,这能有效减小装置的轴向长度。



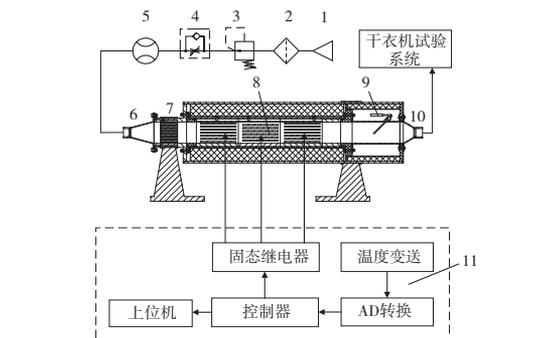
Velocity Vectors Coloured By Velocity Magnitude (m/s) Dec 23,2020 ANSYS Fluor 15.0 (3d,gbns,ske)

图6 整流器长度为50mm时的速度矢量分布图

2 热风源装置工作原理及控制策略

2.1 工作原理

可变温热风源装置的工作原理如图7所示,系统由温度传感器、温度变送器、5V/24V电源模块、电加热片、固态继电器、STM32控制器、漏电保护开关、总开关、LCD显示模块、弱电控制开关等组成。



1—气源;2—过滤器;3—减压阀;4—节流阀;5—流量传感器;
6—装置入口;7—整流器;8—电加热片;9—温度传感器;
10—装置出口;11—控制箱。

图7 系统工作原理图

系统工作原理如下:通过调节入口处节流阀4的开口大小来控制系统的流量值。出口附近有一个热电偶传

感器9,用于检测出口横截面的实时温度值。传感器测得的电压值经过温度变送器,转换成4~20mA的电流信号,再发送至STM32内,经过内部的AD模块转化为对应的数字量信号。经过计算,可得出出口横截面内的实测温度值。STM32将实测的出口温度值与预设温度值进行对比,通过模糊自整定PID算法,得到对应的输出量来控制固态继电器的通断,从而控制加热片的平均功率,实现系统温度的闭环控制。

2.2 可变温热风源装置控制策略研究

温度控制系统是一种非线性、大滞后、时变的控制系统,且不同环境温度以及不同工作状态都会影响出口温度的控制特性。因此,单独采用固定参数的PID控制、模糊控制都无法达到满意的控制效果,需将PID和模糊控制结合起来,采用模糊控制来自整定PID参数。此控制器将PID控制器的动态跟踪品质与模糊控制鲁棒性强、超调小的优点相结合,它以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,可以满足不同时刻的 e 和 ec 对PID参数自整定的要求^[2-3]。

图8为系统的控制原理图。

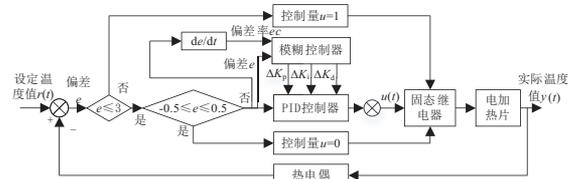


图8 系统的控制原理图

3 热风源装置温控试验结果与分析

分别在环境温度为10℃、25℃条件下进行试验,考察热风源装置在极限工作条件下的温控性能指标,设定热风源装置的温度为80℃,流量分别为40m³/h、80m³/h。

图9即为热风源装置在不同环境温度、不同工作流量条件下出口温度随时间的变化曲线。可以发现,当环境温度为25℃、工作流量为40m³/h时,系统达到最大设定温度80℃所用时间为80s,温控精度在±0.4℃以内。此时系统具有最大的超调量,但出口温度波动较小,系统仍然

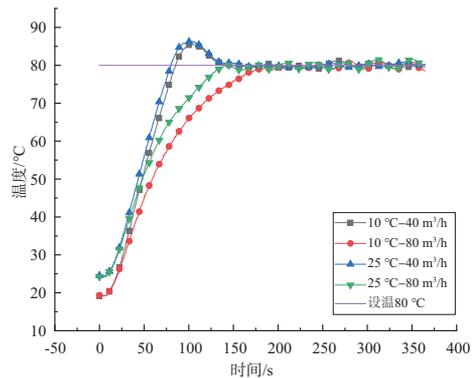


图9 不同环境温度、工作流量条件下出口温度的变化曲线

具有较好的控制精度与稳定性。当环境温度为 10℃、工作流量为 80 m³/h 时,系统达到最大设定温度 80℃所用时间为 210 s,温控精度在±0.6℃以内。此时系统的温升速率最小,系统达到稳定状态所用时间相对较长,但出口温度仍能在 4 min 内达到稳定状态,且具有较好的控制精度。

综上所述,热风源装置在控制精度以及响应速度方面都具备了较好的控制性能,满足技术要求的指标,具有实际的应用价值。

4 结语

本文研制的可变温热风源装置具有结构简单、体积小等特点,能够通过 LCD 触摸屏实时调节系统的预设温度值,通过节流阀实时调节系统的设定流量值。当环境温度为 25℃、工作流量为 40 m³/h 时,系统达到最大设定温

度 80℃所用时间为 80 s,温控精度在±0.4℃以内。当流量为 80 m³/h、环境温度为 10℃的条件下,达到最大设定温度 80℃的时间为 210 s,温控精度在±0.6℃以内。流量调节范围、温度设定范围及温控精度都达到了企业的实际需求,具有应用价值。

参考文献:

- [1] 张仲寅,乔志德. 粘性流体力学[M]. 北京:国防工业出版社,1982.
- [2] 王海青,姬长英,刘同召,等. 模糊自整定 PID 温度控制系统的建模与仿真[J]. 计算机工程,2012,38(7):233-235,239.
- [3] QIU Z C, WANG B, ZHANG X M, et al. Direct adaptive fuzzy control of a translating piezoelectric flexible manipulator driven by a pneumatic rodless cylinder[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 36(2):290-316.

收稿日期:2021-01-15

(上接第 11 页)

激励力幅频曲线如图 10 所示,在激振器不同输入电压下,激励力幅值在共振频率(60.4 Hz)附近发生了力跌落,随着输入电压的增加,频率逐渐向右偏移,并且激励力幅频曲线出现了交叉现象,从仿真测试中观测到了第二类力跌落现象(激励力幅频曲线出现交叉),证实了强非线性结构与激振器耦合时,激励力幅值出现第二类力跌落现象。

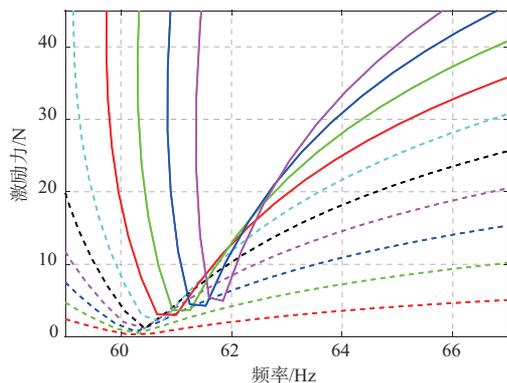


图 10 激振器不同输入电压下激励力幅值

4 结语

以电磁激振器 ET-160 为例,通过模态试验,辨识了激振器机电参数(质量、刚度、阻尼、力电流常数、电阻、电感)。建立了电磁激振器与单自由度线性结构、单自由度强非线性结构的耦合动力学模型。对于激振器与线性结构耦合,激励幅值在结构共振频率发生了力跌落现象,激励幅频曲线不会出现交叉现象,即不会出现第二类力跌落现象;对于强非线性结构与电磁激振器耦合,激励幅值出现了第二类力跌落现象,这是属于强非线性系统特有的现象。

参考文献:

- [1] VAQUEIRO F J. Dynamic response analysis of structures with nonlinear components [D]. London: Imperial College London, 1998.
- [2] TOMLINSON G R. Force distortion in resonance testing of structures with electro-dynamic vibration exciters [J]. Journal of Sound and Vibration, 1979, 63(3):337-350.
- [3] TOMLINSON G R. A simple theoretical and experimental study of the force characteristics from electrodynamic exciters on linear and nonlinear systems [C]. [S. l.]: Proceedings of the 5 International Modal, 1987.
- [4] NOËL J P, RENSON L, KERSCHEN G. Complex dynamics of a nonlinear aerospace structure: experimental identification and modal interactions [J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(12):2588-2607.
- [5] SEN H. Dynamic analysis of assembled structures with nonlinearity [D]. London: Imperial College London, 2007.
- [6] ZHANG G B, ZANG C P, FRISWELL M I. Measurement of the multivalued phase curves of a strongly nonlinear system by fixed frequency tests [J]. Archive of Applied Mechanics, 2020, 90(11):2543-2560.
- [7] MARTINO J, HARRI K. Virtual shaker modeling and simulation, parameters estimation of a high damped electrodynamic shaker [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2019, 151:375-384.
- [8] VAROTO P S, OLIVEIRA L P R D, LEOPOLDO P R. Interaction between a vibration exciter and the structure under test [D]. São Carlos, Brazil: University of São Paulo, 2002.
- [9] LANG G F. Electrodynamic Shaker Fundamentals [M]. San Jose: [s.n.], 1997.

收稿日期:2021-01-14