

高压饱和空气发生装置饱和室控制系统数学建模^①

马思思, 何建忠, 王文华

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: 对高压饱和空气发生装置中的饱和室进行控制系统的数学建模研究, 利用热力学及传热学数学公式, 推导出饱和室气体的压力--流量控制系统和温度控制系统的传递函数, 并根据对模型的分析给出控制方案, 作出 matlab 仿真图, 通过仿真试验证明采用此传递函数的控制策略能够获得良好的控制效果。

关键词: 控制系统数学建模; 模型分析; matlab 仿真图;

Mathematical Modeling of Control System in High Pressure Saturated Air Generator of Saturated Room

MA Si-Si, HE Jian-Zhong, WANG Wen-Hua

(College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: It is about high pressure saturated air generator of saturated room. It researched the mathematical modeling of control system about the saturated room. Using of the mathematical formula of thermodynamics and heat transfer deduced the transfer function of pressure--flow and temperature control process. According to the analysis of model are given control plan, make matlab simulation diagram. The result of simulation proves good control effect of this control strategy which based on the model.

Key words: mathematical modeling of control system; model analysis; matlab simulation diagram

湿度的物理学标定是湿度仪器仪表重要的精确校准方法, 湿度仪器仪表广泛应用于气象及其它众多领域, 而国际上只有少数发达国家研制湿度仪器仪表的物理标定仪器. 国内正在研制的湿度计量标准装置是物理学湿度标定的一种重要仪器, 高压饱和空气发生装置作为湿度计量标准装置的子系统, 提供温度、压力、流量分别可控的高压饱和湿气.

高压饱和空气发生装置的核心部分是饱和室气体发生子系统, 饱和室内各控制系统之间相互关联, 制定控制方案前, 基础首要工作是确定各个控制系统的数学模型. 本文主要建立了在稳态下饱和室气体温度控制系统数学模型和压力--流量控制系统数学模型, 并结合模型分析建立相应的控制方案, 并作出 matlab 仿真图.

1 系统概述

1.1 设备系统分析

饱和室内使用冷壁管道对高温气体降温, “迷宫式”结构使气体与水面有充分接触, 保证饱和湿度. 饱和室气体出口处有压力传感器、流量计和温度计各一个, 分别测量该处的压力、流量及温度, 位于电加热器后的温度传感器测量载冷剂的进口温度. 饱和室工艺示意图如下图 1^[1]所示.

1.2 饱和室被控对象特点分析

高压饱和空气发生装置可提供流量为 0~400 L/MIN, 压力在 300pa~2.6mpa 连续可调, 温度范围-70℃~80℃, 其中流量的控制分辨率为 1/256, 压力控制范围平均 0.2%, 温度控制精度±0.2℃.

饱和室内气体的压力、流量和温度三个被控对象

^① 基金项目: 上海市委 2010 年度初创企业创新基金(1006H171900)

收稿时间: 2011-12-21; 收到修改稿时间: 2012-03-18

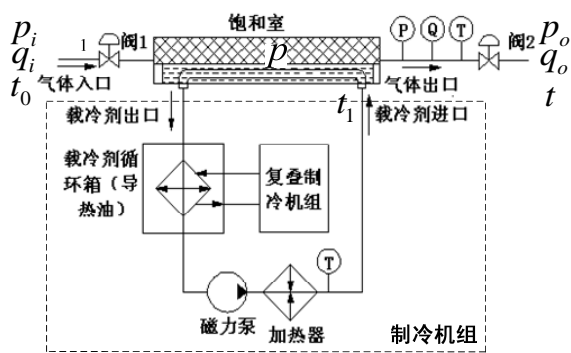


图 1 饱和室工艺示意图

之间存在相互耦合，需对各个被控对象进行合理的假设与简化，同时考虑到实际投运时，首先进行温度回路的调节，再进行压力回路和流量回路的调节，因此，耦合关联强的压力、流量作为一个子系统分析，耦合关联弱的温度作为一个子系统进行分析。

2 控制系统数学建模

2.1 饱和室气体温度控制系统数学建模

饱和室在某段时间内可以看作是一个恒温空间，其进出口气体压力和质量流量也稳定在某一常值。假设腔体热量均匀传播，传热系数、比热容变化忽略不计，腔体内壁密封良好没有热量损失。根据能量守恒定律，饱和室内温度变化与出入饱和室的能量有关：

$$C \frac{dt}{d\tau} = q_{in} - q_{out} \quad (1)$$

式中， C 表示饱和室的热容，对于质量为 M ，比热容为 σ 的物体，热容 $C = M\sigma$ ； t 表示饱和室出口气体的温度； q_{in} 表示单位时间内进入饱和室的热量； q_{out} 表示单位时间内流出饱和室的热量。

饱和室内载冷剂对气流降温属于对流传热过程。对流传热通常可以用牛顿冷却公式(2)来描述，单位时间内的降温热量可以表示为：

$$\Phi = hA(t_f - t_w) \quad (2)$$

式中， Φ 表示热流量， h 表示对流传热系数； A 表示与流体接触的壁面面积； t_f 为降温主体温度； t_w 为冷壁温度。

根据热对流公式(2)可得进入饱和室的热量(3)和流出饱和室的热量(4)：

$$q_{in} = hA(t - t_1) + c_2qt_0 \quad (3)$$

$$q_{out} = c_2qt \quad (4)$$

式中， t_1 表示饱和室载冷剂的进口温度； c_2 表示饱和室饱和湿空气的比热容； q 表示饱和室进出口气体的质量流量； t_0 表示饱和室入口气体的温度。

将式(3)和式(4)代入式(1)得：

$$C \frac{dt}{d\tau} = hA(t_1 - t) + c_2q(t_0 - t) = \frac{1}{R}(t_1 - t) + c_2q(t_0 - t)$$

式中 R 表示载冷剂与饱和室之间夹层的热阻， $R = \frac{1}{hA}$ 。

对上式进行初始条件为零的拉氏变换得：

$$T(s) = \frac{1}{1 + \frac{RC}{1 + Rc_2q}s} T_1(s) + \frac{\frac{Rc_2q}{1 + Rc_2q}}{1 + \frac{RC}{1 + Rc_2q}s} T_0(s) \quad (5)$$

简化上式(5)，令： $K_1 = \frac{1}{1 + Rc_2q}$ ，

$D_1 = \frac{RC}{1 + Rc_2q}$ ， $K_0 = \frac{Rc_2q}{1 + Rc_2q}$ ，得到温度控制系

统的方框图如下：

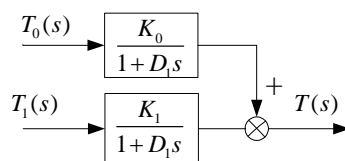


图 2 饱和室气体温度控制系统方框图

由图 2 可得：饱和室气体的出口温度 t 为被控量，饱和室载冷剂的进口温度 t_1 为操纵量，饱和室气体的进口温度 t_0 为干扰量。系统对饱和室出口气体的温度控制是通过调节载冷剂进口温度实现的。

2.2 饱和室气体压力--流量控制系统数学建模

由图 2 可看出，气体经阀门 1 进入饱和室，经阀门 2 流出饱和室，本装置中阀门采用电子膨胀阀，可以精确控制流量。建模时忽略进出口管线的阻力损失，假设饱和室温度保持恒定。

设饱和室气体压力为 p ，进入阀 1 的气体压力为 p_i ，质量流量为 q_i ，流出阀 2 的气体压力为 p_o ，质量

流量为 q_o ，饱和室气容为 C ， m 为气体质量。

$$C = \frac{dm}{dp} = \frac{(q_i - q_o)d\tau}{dp} \quad (6)$$

增量式为：

$$C \frac{d\Delta p}{d\tau} = \Delta q_i - \Delta q_o \quad (7)$$

式中， Δp 为饱和室内气体压力变化， Δq_i 为输入流量变化， Δq_o 为输出流量变化。

根据文献[3]给出的流体经过电子膨胀阀的流量计算公式如下：

$$q_i = C_d r_{v1} \sqrt{2\rho\Delta p_1} = C_d r_{v1} \sqrt{2\rho(p_i - p)} \quad (8)$$

$$q_o = C_d r_{v2} \sqrt{2\rho\Delta p_2} = C_d r_{v2} \sqrt{2\rho(p - p_o)} \quad (9)$$

式中： r_{v1} 表示阀 1 的流通面积， r_{v2} 表示阀 2 的流通面积，取决于阀门的开度； C_d 为流量系数，根据阀门的结构参数确定； Δp 为阀压降； ρ 为气体密度。

在平衡点处利用偏导数对上述(8)、(9)两个方程进行线性化和增量化计算：

$$\Delta q_i = \left(\frac{\partial q_i}{\partial r_{v1}} \right) \Delta r_{v1} + \left(\frac{\partial q_i}{\partial p_i} \right) \Delta p_i + \left(\frac{\partial q_i}{\partial p} \right) \Delta p \quad (10)$$

$$\Delta q_o = \left(\frac{\partial q_o}{\partial r_{v2}} \right) \Delta r_{v2} + \left(\frac{\partial q_o}{\partial p_o} \right) \Delta p_o + \left(\frac{\partial q_o}{\partial p} \right) \Delta p \quad (11)$$

设 λ_{ij} 为稳态下的上述各偏导值，将式(10)及(11)带入式(7)解得：

$$C \frac{d\Delta p}{dt} - (\lambda_{13} - \lambda_{23})\Delta p = \lambda_{11}\Delta r_{v1} - \lambda_{21}\Delta r_{v2} + \lambda_{12}\Delta p_i - \lambda_{22}\Delta p_o \quad (12)$$

对上式(12)进行拉氏变换：

$$P(s) = \frac{K_{o1}}{T_o s + 1} R_{v1}(s) + \frac{K_{o2}}{T_o s + 1} R_{v2}(s) + \frac{K_{f1}}{T_o s + 1} P_i(s) + \frac{K_{f2}}{T_o s + 1} P_o(s) \quad (13)$$

同理得出流量的拉氏变换：

$$Q_o(s) = \frac{K_{o3}}{T_1 s + 1} R_{v1}(s) + \left(\frac{K_{o4}}{T_1 s + 1} - \lambda_{21} \right) R_{v2}(s) + \frac{K_{f3}}{T_1 s + 1} P_i(s) + \left(\frac{K_{f4}}{T_1 s + 1} - \lambda_{22} \right) P_o(s) \quad (14)$$

式中，设 K 、 T 分别作为变量前的放大系数。

将上式(13)、(14)简化成矩阵形式，作出压力—流量控制系统的方框图：

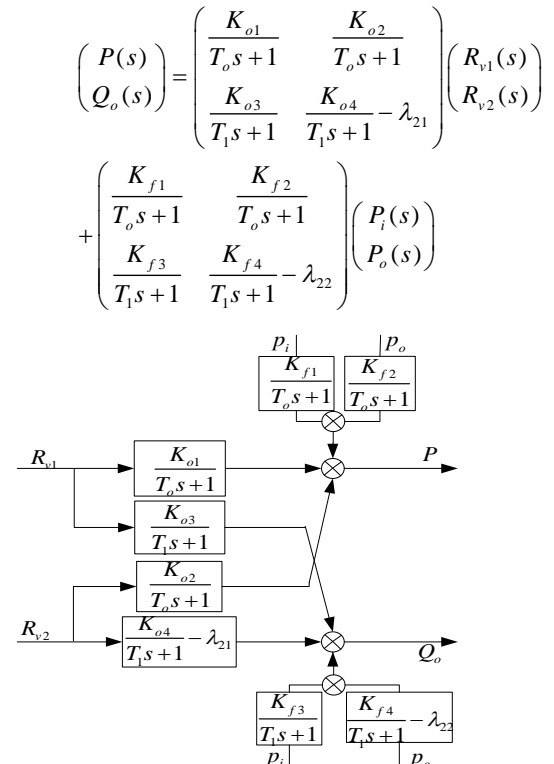


图 3 饱和室气体压力--流量控制系统方框图

由图 3 可得：阀门开度函数 r_{v1} 和 r_{v2} 为控制系统操纵量，饱和室内气体的压力 p 、流量 q_o 为被控量，进口阀前压力 p_i ，出口阀后压力 p_o 为系统干扰量。对饱和室出口气体的压力--流量控制是通过调节阀门 1 和阀门 2 的开度来实现的。

3 数学模型应用

根据温度控制系统的模型分析，参考实际试验参数，提出了饱和室温度串级 PID 控制方案，以饱和室温度作为主对象，载冷剂温度作为副对象。如下图 4 所示，其控制效果如图 5 所示。

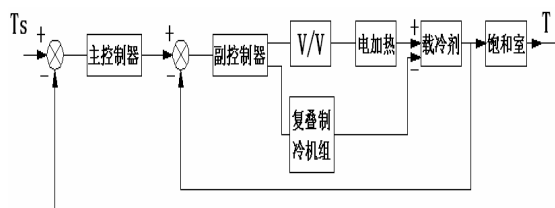


图4 饱和室温度串级PID控制方案

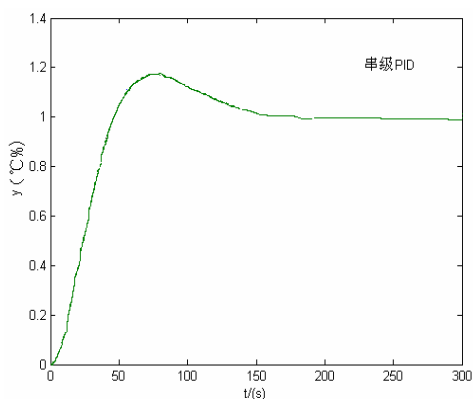


图5 饱和室温度变量的串级PID阶跃响应曲线

根据压力—流量控制系统数学模型分析,提出压力—流量子系统静态解耦的专家控制方案,控制器取专家控制器,如图6所示,带入实际参数得到仿真图7,可看到控制系统取得较好的解耦控制效果。

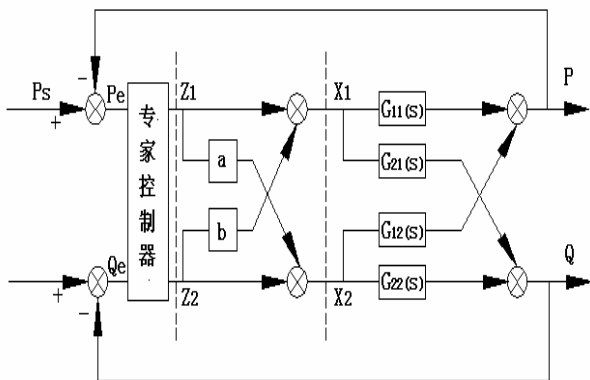
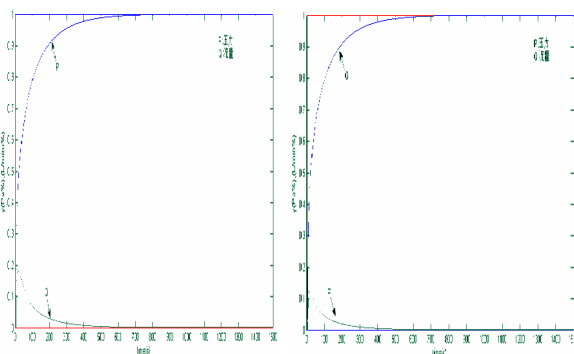


图6 压力—流量子系统静态解耦的专家控制方案



(a) $R=[1;0]$ (b) $R=[0;1]$

图7 静态解耦压力—流量阶跃响应曲线

4 结语

对高压饱和空气发生装置中的饱和室气体进行了数学模型分析,得到了温度控制系统和压力—流量控制系统的传递函数,并对参考模型分析设计的控制系统方案进行了 Matlab 仿真,得到很好的控制效果.正确的建立出控制系统数学模型为下一步控制系统设计和控制系统分析及控制系统仿真奠定了基础。

参考文献

- 1 王文华,何建忠,孙权. 高压饱和气体制备系统饱和室多变量控制研究.计算机系统应用,2012,20(3):91-95.
- 2 王树青.工业过程控制工程.北京:化学工业出版社,2002.
- 3 马善伟,张川,等.电子膨胀阀制冷剂质量流量系数的试验研究.上海交通大学学报,2006.2.
- 4 谷俊杰,李建强,等.热工控制系统.北京:中国电力出版社,2011.
- 5 Ahmed SS, Majid MS, Novia H, et al. Fuzzy logic based energy saving technique for a central air conditioning system. Energy, 2007,32(7):1222-1234.
- 6 Bell SA. The NPL Primary Gravimetric Hygrometer. Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture, National Physical Laboratory, UK, 1998. 20-24.