

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.01.03

双级气流场压力解耦控制研究

何畔, 孟晓风

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对温度、压力、湿度多参数复合计量检定装置中双温双压法湿度发生的上级饱和气体压力和下级实验舱气体压力控制具有强耦合关系, 提出了一种基于对角矩阵的双极气流场解耦方法。该方法利用理想气体状态方程和调节阀流量特性建立双输入双输出气流场控制模型, 运用对角矩阵法将原系统变为两个独立的单输入单输出控制系统, 消除两者之间的耦合关系。实验结果表明: 该方法取得了很好的效果, 饱和器和实验舱的压力控制稳态精度都得到大幅度提高。

关键词: 压力; 饱和器; 实验舱; 解耦控制

中图分类号: TP273; TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)01-0014-03

Decoupling Control Research of Double-level Air Current Field

HE Pan, MENG Xiaofeng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To solve the strong coupling influence between the upper air pressure and the lower air pressure in the temperature, pressure and humidity composite metrological verification device, a double-level air current field decoupling control method based on diagonal matrix was presented. With the state equation of ideal gas and the flow characteristics of the valve, the double input and double output airflow field control model was built. Using diagonal matrix method, the original control system became two independent single input single output control systems. The coupling relationship was eliminated well. The experiment results indicate that this method is effective in improving the air pressure control precision of the saturator and experiment box.

Key words: pressure; saturator; experiment box; decoupling control

0 引言

气象预报越来越影响着人们的生活, 提高预报准确性也变得更加重要。气象预报的准确性取决于对大气湿度、压力、温度和太阳辐射等参数的观测与分析, 而数据观测依赖于气象探测仪器的计量、校准与考核, 因此, 研制一套温度、压力和湿度多参数综合控制的计量检定装置对气象探测仪器的性能评估具有重要意义。本装置采用双温双压法进行湿度发生, 上游饱和气体压力和下游实验舱气体压力的独立精密控制是检定装置的重要组成部分, 也是难点之一。由于上下游

两级气压控制是串联关系, 上游控制系统的输出气体为下游控制系统的输入气体, 上游的气压波动会影响下游的气压, 下游的气压波动也会影响上游的气压, 两者相互干扰, 存在着很强的耦合关系, 构成了双输入双输出双极气流场系统。因此需要研究合适的控制方法实现上游和下游气压的解耦控制, 将双输入双输出双级气流场系统变为两个独立的单输入单输出系统^[1]。本文针对双极气流场的控制方法展开了研究, 并进行了实验验证。

1 系统整体结构

双温双压法湿度发生可以同时调节饱和器和实验舱的温度、压力, 有利于拓展湿度发生器的量程, 控制方法灵活, 准确度高。检定装置基于双温双压法进行湿度发生, 由饱和器产生一定温度和压力的饱和湿气, 进入实验舱, 然后在实验舱中改变湿气的温度和压力, 得到需要的相对湿度的气体。本文主要讨论饱

收稿日期: 2014-11-20

基金项目: 国家公益性行业(气象)科研专项资助(GYHY 200706003)

作者简介: 何畔(1989-), 男, 四川人, 硕士研究生, 主要研究方向为测试计量与控制; 孟晓风(1955-), 男, 江苏滨海人, 教授, 主要研究方向为测试计量技术、信号处理。

和器和实验舱气体压力的控制,从压力控制角度来看,系统的整体结构如图1所示。

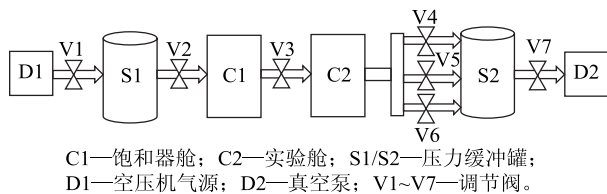


图1 气路结构示意图

系统主要由空压机气源、饱和器舱、实验舱、压力缓冲罐和真空泵五部分组成,采用绝压递减的连接结构。气体需要保持一定流量的流动,从而提高实验舱内气体温度、压力和湿度的均匀性。气体的这种流动性给舱内压力控制带来了困难,本系统使用比例调节阀作为控制执行机构,通过调节阀门开度改变气路的有效导通面积,从而改变输入与输出气体的流量,实现饱和器和实验舱压力精密控制的目的。为了解决调节速度和分辨力这一矛盾,设计了粗调阀和精调阀并联结构。暂态过程使用粗调阀,减小调节时间;稳态过程使用精调阀,提高控制精度。

如图1所示,上游饱和器C1以S1作正压源,以C2作负压源,通过V1, V2控制饱和器压力;下游实验舱C2以C1作正压源,以S2作负压源,通过V3, V4, V5, V6, V7控制实验舱压力。可以看出,饱和器压力与实验舱压力在控制过程中是相互影响的,彼此不是独立的,具有很强的耦合关系。饱和器与实验舱压力控制框图如图2所示。

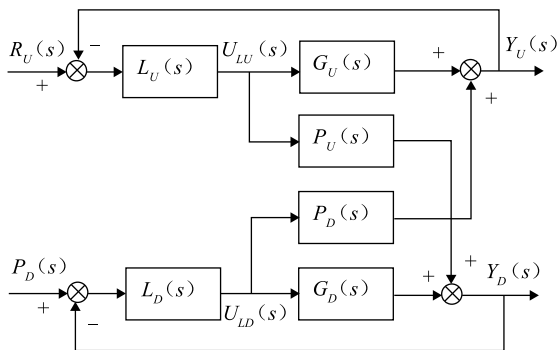


图2 饱和器与实验舱压力控制结构框图

假定饱和器和实验舱压力控制对象的传递函数分别为 $G_u(s)$, $G_D(s)$; 对应的控制器传递函数分别为 $L_u(s)$, $L_D(s)$; $R_u(s)$, $R_D(s)$ 分别表示饱和器和实验舱的压力阶跃输入; $U_{Lu}(s)$, $U_{LD}(s)$ 分别表示控制器输出; $Y_u(s)$, $Y_D(s)$ 分别表示实际输出; $P_u(s)$ 表示饱和器压力对实验舱压力的扰动, $P_D(s)$ 表示实验舱压

力对饱和器压力的扰动^[2]。

2 系统建模

压力控制的执行机构是比例调节阀,调节阀通过调节阀门开度大小改变通过的气体流量,容器的压力变化与流入和流出的气体流量差成正相关。因此,分析调节阀的流量与开度关系,就可以建立调节阀与压力的模型。

本文以理想气体为研究对象,由理想气体状态方程:

$$pV = nRT = \frac{mRT}{M} \quad (1)$$

式中: p 为容器内压力; V 为容器体积; n 为气体摩尔数; m 为气体质量; M 为气体分子量; R 为气体常数; T 为气体温度。

则在气体体积 V 、温度 T 不变的情况下,单位时间 Δt 内压力的变化 Δp 正比于流入流出的气体质量差 Δm , 即

$$\Delta p = \frac{RT}{MV} \Delta m = \frac{\rho RT \Delta t}{3600 MV} (Q_i - Q_o) \quad (2)$$

式中: Q_i 和 Q_o 分别为流入和流出容器的质量流量。

根据公式(1)和公式(2)可得

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p}{3600V} (Q_i - Q_o) \quad (3)$$

调节阀作为执行机构,其流量特性为

$$q = \frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{l_{\max}}\right) \quad (4)$$

式中: $l/l_{\max}$ 为调节阀相对开度; Q 为流过调节阀的流量。气体流过调节阀时有非阻塞流(公式(5))和阻塞流(公式(6))两种情况^[3], 流量计算公式分别为

$$Q_{\max} = N_{a1} K p_1 Y \sqrt{\frac{X}{MTZ}} \quad (5)$$

$$\text{其中, } Y = 1 - \frac{X}{3FX_c}, \quad X = \frac{p_1 - p_2}{p_1}.$$

$$Q_{\max} = N_{a2} K p_1 \sqrt{\frac{X_c}{MTZ}} \quad (6)$$

式中: N_{a1} 和 N_{a2} 为考虑到具体单位的数值常量; p_1 为阀前压力; p_2 为阀后压力; K 为调节阀固有流量系数; X_c 为临界压差比; F 为气体比热系数; M 为气体分子量; T 为气体温度; Z 为压缩因子。

设饱和器输入流量为 Q_{ui} , 饱和器输出流量为 Q_{uo} ; 实验舱输入流量为 Q_{di} , 实验舱输出流量为 Q_{do} , 则饱和器压力 p_u 与实验舱压力 p_D 的动态方程可以表示为

$$\frac{dp_U}{dt} = \frac{p_U}{3600V_U}(Q_{U_i} - Q_{U_o}) \quad (7)$$

$$\frac{dp_D}{dt} = \frac{p_D}{3600V_D}(Q_{D_i} - Q_{D_o}) \quad (8)$$

进入稳态调节后, 调节阀 V3 开度保持不变, 饱和器输出流量 Q_{U_o} 与实验舱输入流量 Q_{D_i} 相等, 则得到饱和器压力 p_U 与实验舱压力 p_D 扰动量关系为

$$\frac{V_D}{p_D} \frac{dp_D}{dt} + \frac{V_U}{p_U} \frac{dp_U}{dt} = \frac{Q_{D_i} - Q_{U_o}}{3600} \quad (9)$$

3 解耦控制

针对图 2 中饱和器和实验舱压力控制中的耦合问题, 本文设计了对角矩阵法来进行解耦控制, 对角阵解耦的实质是让被控对象的传递函数矩阵与解耦矩阵的乘积等于对角阵^[4], 即

$$\begin{bmatrix} G_U(s) & P_D(s) \\ G_D(s) & P_U(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{U1}(s) & N_{U2}(s) \\ N_{D1}(s) & N_{D2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PU}(s) & 0 \\ 0 & G_{PD}(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

则被控对象的输入输出关系为

$$\begin{bmatrix} Y_U(s) \\ Y_D(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{PU}(s) & 0 \\ 0 & G_{PD}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{LU}(s) \\ U_{LD}(s) \end{bmatrix} \quad (11)$$

一般地, 传递函数矩阵为非奇异阵, 可以得到解耦矩阵为

$$\begin{bmatrix} N_{U1}(s) & N_{U2}(s) \\ N_{D1}(s) & N_{D2}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_U(s) & P_D(s) \\ G_D(s) & P_U(s) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} G_{PU}(s) & 0 \\ 0 & G_{PD}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_U(s)G_D(s)}{G_U(s)G_D(s) - P_D(s)P_U(s)} & \frac{-G_D(s)P_D(s)}{G_U(s)G_D(s) - P_D(s)P_U(s)} \\ \frac{-G_U(s)P_U(s)}{G_U(s)G_D(s) - P_D(s)P_U(s)} & \frac{G_U(s)G_D(s)}{G_U(s)G_D(s) - P_D(s)P_U(s)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

根据以上推导的结果, 设计解耦控制系统如图 3 所示。在控制器输出与传递函数之间加入解耦矩阵, $U_{LU}(s)$ 与 $Y_D(s)$, $U_{LD}(s)$ 与 $Y_U(s)$ 之间的耦合关系都分别得到消除, 成为两个彼此独立的控制系统^[5]。

4 实验结果

课题要求实验舱压力检定范围: 45 ~ 130 kPa, 稳态精度: 10 Pa。定义稳态精度为控制进入稳态后气压不超出目标值的最大幅度。在气体温度为 25℃ 下, 设定实验舱控制目标为 90 kPa, 饱和器控制目标为 180 kPa, 在其他条件不变的情况下, 分别进行无解耦压力控制与有解耦压力控制实验。本文主要关注压力控制

的稳态特性, 因此对于控制过程的暂态特性不进行分析。实验结果如图 4 和图 5 所示, 采样周期为 100 ms。

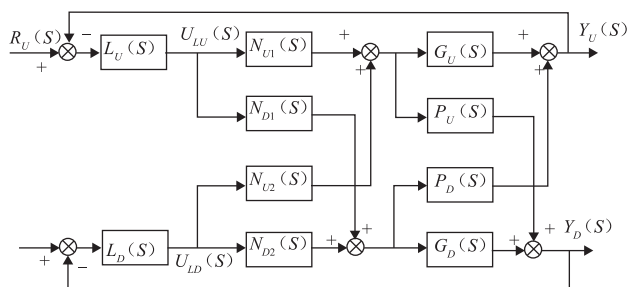


图 3 对角阵矩阵法解耦控制系统框图

图 4 为解耦前后饱和器的稳态压力对比图, 可见, 解耦后稳态精度提高了 3 倍。图 5 为解耦前后实验舱稳态压力对比图, 可以发现, 解耦后实验舱压力稳态精度提高了一个数量级, 稳态精度在 6 Pa, 达到了课题要求。

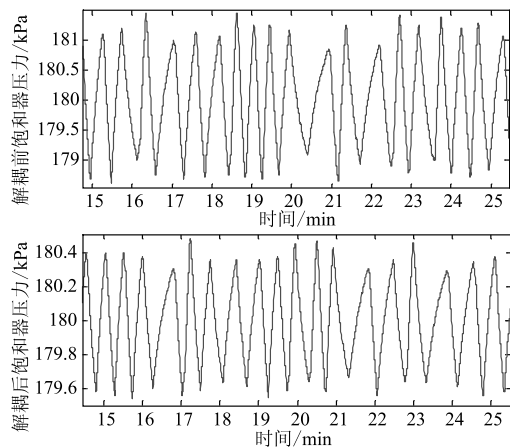


图 4 解耦前后饱和器压力稳态精度对比

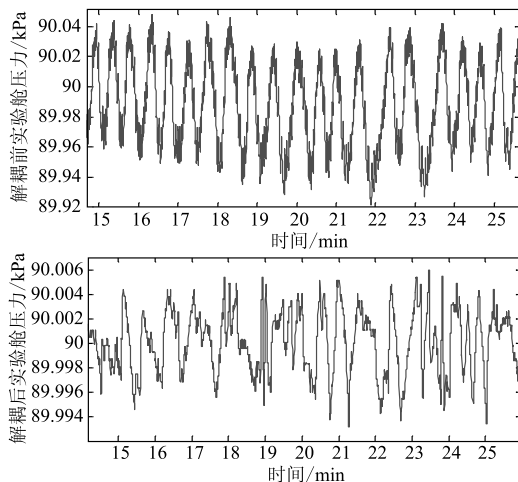


图 5 解耦前后实验舱压力稳态精度对比

(章苗红 报道)