

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.02.04

离心-温度复合试验箱温度精密控制方法

李颖奇¹, 孟晓风¹, 董雪明²

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191;

2. 中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 研究用于加速度计计量校准的离心-温度复合试验箱地面温度控制方法。首先提出实现试验箱高低温环境的温控系统设计方案, 进而针对气体温度大惯性、大延迟的特点, 提出将预测 PI 控制方法和串级控制相结合的新型预测 PI-PID 串级控制技术应用于离心-温度复合试验箱的温度控制, 它既克服了单纯 PID 鲁棒性差的特点, 又克服单纯预测 PI 控制由于单层结构而抗二次干扰差的问题, 两者的结合提高了系统控制性能, 克服了纯滞后对系统的不良影响。仿真结果表明: 预测 PI-PID 串级控制系统具有较好的鲁棒性及良好的调节性能, 其总体性能优于单纯 PID 控制和传统 PID-PI 串级控制系统。

关键词: 离心-温度复合试验箱; 气体温度; 预测 PI-PID 控制

中图分类号: TP273; TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795 (2015) 02-0015-04

Centrifugal-temperature Composite Chamber Temperature Precision Control Method

LI Yingqi¹, MENG Xiaofeng¹, DONG Xueming²

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: A temperature control method is designed for centrifugal-temperature composite chamber for calibration of accelerometers. A design scheme is proposed for the temperature control system at first. And then, aiming at gas temperature large inertia and large delay characteristics, a Predictive PI-PID cascade control method is proposed that Predictive PI control and cascade control method are combined for the temperature control of the centrifugal-temperature composite chamber. It overcomes the poor robustness of simple PID and the adverse effects of pure delay system. The results show that: predictive PI-PID cascade control system is robust and has good regulation performance, and the performance is better than the PID and traditional PID-PI cascade control system.

Key words: centrifugal-temperature composite chamber; gas temperature; predictive PI-PID cascade control

0 引言

加速度计往往工作在复杂环境下。研究复合环境参数对加速度计计量校准结果的影响, 是提高加速度计准确度和完善量值溯源体系的关键步骤^[1]。由于气体温度大惯性、大延迟的特点, 应用传统的控制方法如 PID 控制, 难以达到期望的控制效果。本文基于离心-温度复合试验箱为背景, 设计出一种实现试验箱高低温控制的温控系统, 为加速度计提供离心-温度复合

校准环境。提出将预测 PI 控制方法与串级控制相结合的新型预测 PI-PID 串级控制方法, 主回路采用预测 PI 控制, 该方法不需要对被控对象建立精确的数学模型, 对模型失配有较强鲁棒性的同时, 可以较好地克服纯滞后对系统的不良影响, 而副回路采用 PID 控制, 可以快速抑制二次干扰, 起到补偿校正作用, 提高控制性能^[2]。

1 离心-温度复合试验箱温控系统方案设计

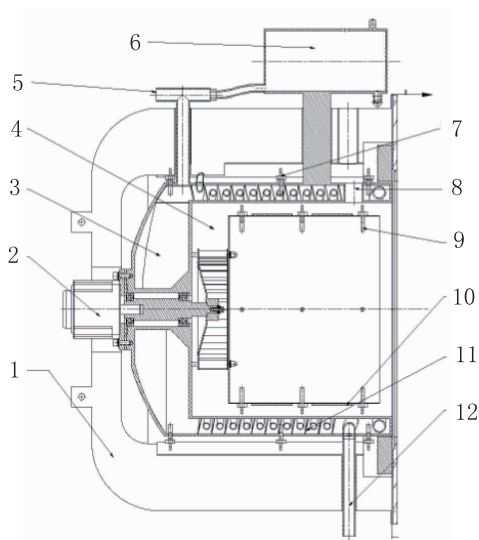
由于进行加速度计的离心-温度复合计量校准试验时, 需要将整个试验箱置于转速最大可达 20 g 的离心机上, 因此对试验箱的结构和强度有特殊的要求, 本文所采用的温度试验箱结构如图 1 所示, 试验箱主要由四个部分组成: 保温腔、载温腔、内腔、风机系统,

收稿日期: 2014-08-17; 修回日期: 2014-10-23

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(J052012B001)

作者简介: 李颖奇(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为测控技术; 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。

各部分相互隔离密封。保温腔由保温材料填充；载温腔内由宽温度范围的载温液填充；内腔为加速度计校准所在的空气腔；风机系统保证内腔气体温度均匀性^[1]。



1—保温腔；2—风机系统；3—载温腔；4—内腔；5—载温腔内液体出口；6—膨胀腔；7—液体温度传感器；8—电缆出口；9—气体温度传感器；10—导流罩；11—液体循环槽；12—载温腔内液体进口

图1 试验箱结构图

基于所设计的离心-温度复合试验箱，提出一种离心-温度复合试验箱温控系统设计方案，该方案原理框图如图2所示。载温液恒温槽内液体温度控制恒定，通过循环管道与试验箱载温腔相连，由恒温槽循环泵完成载温腔内液体与恒温槽液体的循环，载温腔内液体与内腔气体之间通过载温腔内壁进行热交换。通过控制流量调节阀的开度，控制恒温槽与载温腔内液体热交换的液体流量，改变载温腔内液体提供的加热(制冷)功率。当内腔气体吸收热量与耗散热量动态平衡时，内腔气体温度保持恒定。当内腔气体温度控制到目标温度后，完成温度试验箱在静止状态下的温度控制，下一步可进行离心-温度复合试验箱在离心机旋转状态下的温度控制及加速度计计量校准实验。

2 预测 PI-PID 串级控制方法原理

2.1 预测 PI 控制基本原理

温度系统是非线性、不确定的控制对象，建立精确的数学模型比较困难，并且由于存在大惯性滞后，往往会造成对象不稳定。若采用传统的控制方法如 PID 控制，一般难以获得满意的控制效果。因此引入控制算法来克服这些特殊动态特性对系统造成的不良影响。预测 PI 控制有两部分组成：一部分是 PI 控制项，另一

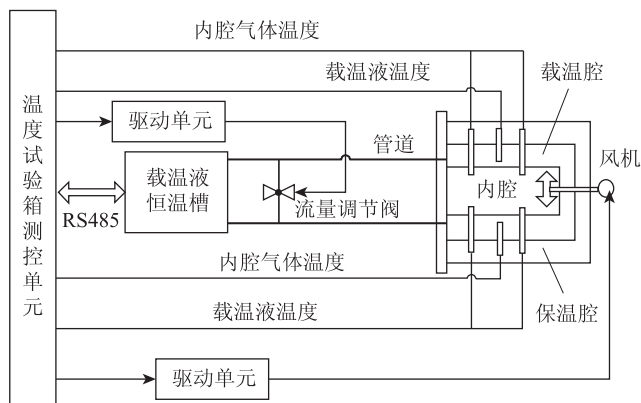


图2 试验箱温控方案框图

部分是预测控制项。PI 控制项可以提高控制系统的鲁棒性和抗干扰性；预测控制项可以预测将来的控制量^[3]，从而克服纯滞后的影响。预测 PI 控制无需知道过程的精确模型，只需知道大概的模型，并且可以通过设置不同的控制参数来获得满意的结果。

现实中大多数温度控制对象都可以近似为一阶加纯滞后的模型，其传递函数为

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

式中： K 、 T 、 τ 为不确定参数，相应的标称值为 K_0 、 T_0 、 τ_0 。

假设控制系统所期望的闭环传递函数为

$$G_0 = \frac{e^{-\tau_0 s}}{\lambda T_0 s + 1} \quad (2)$$

式中： λ 为可调参数。如果 $\lambda < 1$ ，则控制系统的闭环相应时间比开环相应时间要快，通过设置合适的 λ 可以得到期望的控制效果。

由期望闭环传递函数和开环传递函数推算，有

$$G_0 = \frac{e^{-\tau_0 s}}{\lambda T_0 s + 1} = \frac{\frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau_0 s} G_c}{1 + \frac{K_0}{T_0 s + 1} e^{-\tau_0 s} G_c} \quad (3)$$

可以得到控制器的传递函数为

$$G_c = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{T_0 s + 1}{K_0 (\lambda T_0 s + 1 - e^{-\tau_0 s})} \quad (4)$$

因此可得控制器的输入输出关系式为

$$U(s) = \frac{1}{\lambda K_0} \left(1 + \frac{1}{T_0 s}\right) E(s) - \frac{1}{\lambda T_0 s} (1 - e^{-\tau_0 s}) U(s) \quad (5)$$

式中： $(1/(\lambda K_0)) (1 + 1/(T_0 s)) = G_{c1}(s)$ 为预测 PI 控制器的 PI 控制项，由比例项和积分项组成； $(1/$

$(\lambda T_0 s))(1 - e^{-\tau_0 s}) = G_{c2}(s)$ 为预测 PI 控制器的预测控制项, 即基于时间区间 $(t - \tau_0, t)$ 的控制作用来预测 t 时刻系统的输出值。因此, 可以得到预测 PI 控制器的结构。如图 3 所示。 $G_p(s)$ 为广义对象。

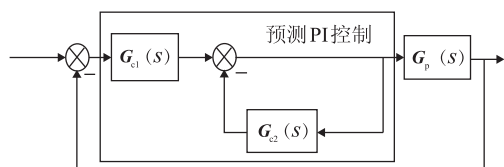


图3 预测 PI 控制器结构图

2.2 预测 PI-PID 串级控制方法设计

预测 PI-PID 串级控制设计结构图如图 4 所示。副回路采用 PID 控制, 可以快速抑制二次干扰, 起到补偿校正作用。主控制器采用预测 PI 控制, 提高控制器的鲁棒性和系统控制性能。图中 $G_{副}(s)$ 为副控制对象, $G_{主}(s)$ 为主控制对象。主副控制对象和副回路 PID 控制器组成广义对象。

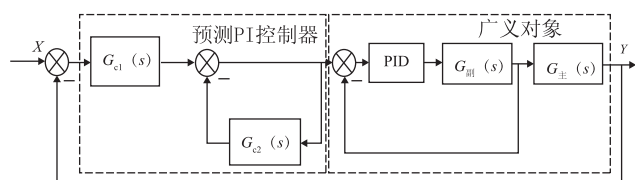


图4 预测 PI-PID 串级控制器结构图

3 离心-温度复合试验箱预测 PI-PID 串级控制系统结构及仿真研究

3.1 试验箱预测 PI-PID 串级控制结构

将预测 PI-PID 串级控制方法应用于离心-温度复合试验箱温度控制系统中, 系统控制原理框图如图 5 所示, 副回路由液体温度变送器、PID 控制器和副控制对象载温腔构成, 主回路由气体温度变送器、预测 PI 控制器、副回路 PID 控制器、调节阀、副控制对象和主控对象内腔气体构成。

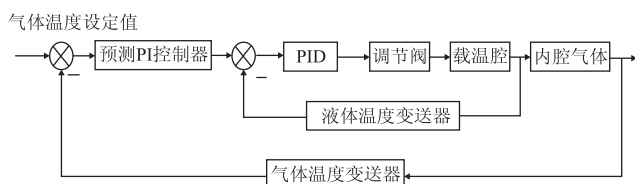


图5 试验箱 PI-PID 串级控制结构图

3.2 主副控制对象特性测试与建模

主控制对象为内腔气体, 主控制变量为气体温

度。液体温度影响气体温度。主控制对象模型可用一阶惯性加延时环节来描述, 当载温腔内液体与内腔气体温度热交换平衡时, 即液体与气体温度基本不变, 此时改变液体温度, 可以得到气体温度阶跃变化曲线。实验中, 将载温腔内液体温度从稳定 31.7°C 拉到 8.6°C , 经过热交换内腔气体温度从 32.5°C 降到 6.5°C 并稳定。根据气体温度阶跃变化曲线, 由阶跃曲线两点法建模^[4]求得气体温度在液体温度阶跃激励下的延时时间和响应速度, 从而求得主控对象的传递函数:

$$G_{\pm}(s) = \frac{0.94}{816s + 1} e^{-558s} \quad (6)$$

副控制对象为载温腔液体, 副控制变量为液体温度。在恒温槽温度恒定条件下, 液体温度主要受调节阀的开度影响, 将副控制对象模型用一阶惯性加延时环节来描述, 当恒温槽液体温度与载温腔液体温度恒定后, 改变阀的开度, 可得到载温腔液体温度变化曲线。低温实验中, 阀的开度由 0 到 50% 变化时, 由于阀的反作用, 载温液温度由 -43.23°C 变化到 -42.56°C , 由两点法建模求得液体温度响应延时时间和响应速度, 从而求得副控对象的传递函数:

$$G_{副}(s) = \frac{0.0067}{96s + 1} e^{-36s} \quad (7)$$

3.3 仿真研究分析

根据图 4, 对广义对象用 Simulink 搭建控制系统仿真模型, 采用 Simulink 中 PID 模块自整定可以找到最佳 PID 参数, 将副回路和主控对象内腔气体视为广义被控对象, 则在仿真中广义对象的传递函数为

$$G_p(s) = \frac{0.94}{886.7s + 1} e^{-88.2s} \quad (8)$$

取 $K_0 = 0.94$, $T_0 = 886.7$, $\tau_0 = 88.2$, λ 取 0.5。由 2.1 节可得到 $G_{c1}(s)$, $G_{c2}(s)$, 因此可以得到预测 PI 控制器。根据所设计的预测 PI 控制器, 分别对预测 PI-PID 串级控制系统与单纯 PID、普通 PID-PI 串级控制系统进行仿真研究。从图 6~8 中可以看出, 在对阶跃激励的动态响应特性方面, 预测 PI-PID 串级控制相对其他两种控制方法, 响应速度更快; 在二次脉冲扰动作用下, 预测 PI-PID 串级控制对扰动能够快速响应并较快地达到稳定; 普通 PID-PI 串级控制次之; 单纯 PID 控制抗干扰能力最差。在模型失配时, 预测 PI-PID 串级控制响应平稳, 而普通 PID-PI 串级控制与单纯 PID 控制在模型失配时, 响应不平稳有较大超调。

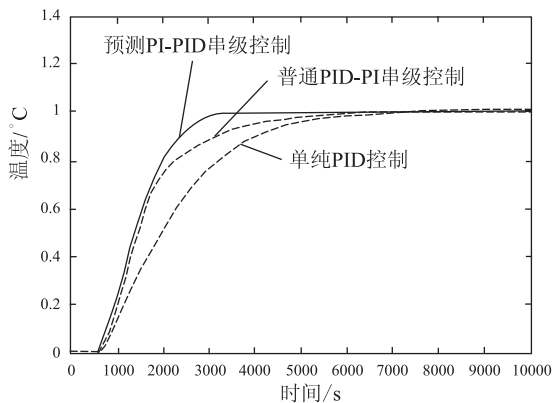


图6 阶跃动态响应曲线

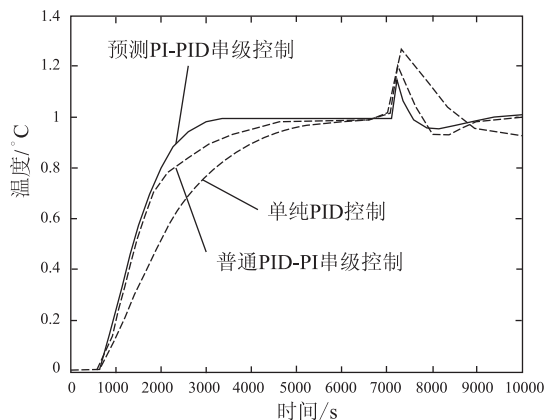


图7 脉冲扰动响应曲线

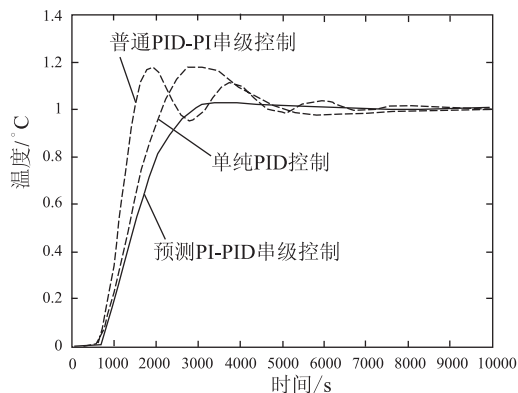


图8 模型失配响应曲线

4 结论

本文对离心-温度复合试验箱的地面温控系统进行阐述,并详细介绍了预测 PI-PID 串级控制方法。通过对比预测 PI-PID 串级控制系统与普通 PID-PI 串级控制系统、单纯 PID 控制系统在动态响应和抗干扰能力等方面的仿真结果发现,预测 PI-PID 串级控制方法总体上优于单纯 PID 和普通 PID-PI 串级控制方法,具有良好的调节品质和较强的抗干扰能力,对控制系统的鲁棒性也有

所提高。预测 PI-PID 串级控制方法应用到本文介绍的离心-温度复合试验箱温控系统中是可行的。

参考文献

- [1] 赵智忠, 孟晓风, 赵晓明. 离心-温度复合试验箱温度场模拟分析[J]. 计测技术, 2014, 34(1): 5-9.
- [2] Rad A Besharati, Lo, Wailun. Predictive PI controller [J]. International Journal of Control, 1994, 60(6): 953-975.
- [3] 何宝嘉. 基于预测原理的串级控制系统的设计及实现[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [4] 王再英, 刘淮霞, 陈毅静. 过程控制系统与仪表[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [5] Lee Y, Skliar M, Lee M. Analytical method of PID controller design for parallel cascade control[J]. Journal of Process Control, 2006(16): 809-818.
- [6] 任正云, 邵惠鹤, 张立群. 几种特殊动态特性对象的预测 PI 控制[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 615-619.
- [7] 齐蒙, 石红瑞. 预测 PI 控制在 PLC 中的实现及其应用[J]. 控制工程, 2013, 20(5): 170-172.

(上接第 10 页)

- [7] 孟峰, 张跃, 张智敏, 等. 脉冲式动态力校准装置发展动态[J]. 计量技术, 2011, (5): 47-50.
- [8] 何闻. 标准动态力发生装置国内外研究现状[J]. 机电工程, 1999, (2): 47-49.
- [9] 张力. 激光干涉法进行正弦力校准研究[J]. 计量学报, 2005, 26(4): 337-342.
- [10] Bartoli C. Traceable dynamic measurement of mechanical quantities: Objectives and first results of the European Project [C]// Proc. of IMEKO World Congress. Busan, Korea: IMEKO, 2012.
- [11] 商佳尚, 王宇. 动态力校准中需要规范的若干问题[J]. 计测技术, 2014, 34(2): 1-5.
- [12] 何闻. 大力值宽频带标准负阶跃力的产生机理和计量技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [13] 黄钦俊, 王效葵, 李行善, 等. 力传感器的动态重复性、线性度与性能改进的研究[J]. 计量学报, 1995, 16(1): 58-67.
- [14] 张训文, 肖跃华, 郭红日, 等. 100 kN 气动助推式负阶跃力校准装置[J]. 测试技术学报, 2004, 18(S0): 89-92.
- [15] 周小宁. 用动力学方法分析力传感器动态标定装置[J]. 航空计测技术, 1994, 14(2): 12-15.
- [16] 爰伟群. 从负阶跃响应到二阶系统传递函数[J]. 航空计测技术, 1992, 12(1): 21-25.
- [17] 国家质量技术监督局. JJF1053-1996 负荷传感器动态特性校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1996.
- [18] 徐科军. 冲击响应法动态标空中激励信号的研究[J]. 合肥工业大学学报, 1995, 18(3): 102-107.
- [19] 王宇, 张力, 张立喆, 等. 正弦力校准中质量块加速度分布影响的理论修正研究[J]. 计测技术, 2010, 30(3): 1-4.