

真空热试验中闭环温度控制参数分析

顾苗, 刘劲松

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 为了满足航天器真空热试验温度控制的新要求, 文章通过对控制参数与温度控制设定目标值之间数值关系的分析与研究, 得出通过电阻性加热器加热、以辐射换热为主要加热途径的温控系统对象, 最优比例参数 K_c 值与目标设定温度成近似正比关系, 积分参数 T_i 值可取固定值, 微分参数 T_d 对控制动态品质影响可忽略。具有上述特性的系统可使用参数寻找方法: 即在真空热试验之前通过热响应曲线套用公式确定该对象的数学模型, 然后使用数值分析的方法, 寻找最优的 PID 参数。通过这种预先估计 PID 控制参数方法, 可以改善电阻特性类控温系统的控制品质。

关键词: 真空热试验; 数学模型; 温度控制; PID 控制

中图分类号: V416.5

文献标识码: B

文章编号: 1673-1379(2010)05-0611-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.05.014

0 引言

航天器部组件、整星的真空热试验中, 温度是测量与控制的关键参数。目前温度控制中又提出了斜率控制、稳定度等动态指标要求。在热试验温度控制过程中, 不仅每次试验对象不同, 其热特性也有较大差异, 而且试验之前温度控制不允许有调试过程, 对温度升降斜率与超调量指标的要求均比目前工业生产严格^[1]。这种依靠辐射换热的温度控制系统具有强非线性特性。因此, 按照 PID 控制算法原理, 对于每一个目标温度值均应寻找不同的最优 PID 参数。

当前常用的温度控制方法一般用于对象长期不变的工业温度控制过程^[2]或者可在线调整控制参数的自适应控制器研究^[3]。这两个研究对象与热试验过程有较大区别, 其中最为突出的是热试验过程中每次的试验对象特性差异大, 不可能有一个通用的最优参数。同时热试验过程中 PID 参数在线调整涉及因素多且复杂。本文的研究是根据调试经验寻找一组简便的 PID 参数确定方法。

1 热试验温度控制原理

1.1 热分区数学模型

热试验的航天器试验件处于真空、低温、冷黑

环境, 主要通过辐射进行换热。根据热辐射原理, 可得到其中一个热分区的机理方程

$$C_1[I(t)]^2 + C_3[Q_N(t) + Q_W(t)] = C_2 \frac{dT(t)}{dt} + T(t)^4 - T_0^4, \quad (1)$$

根据试验数据拟合可得

$$C_2 = a[T(t)]^4 + b. \quad (2)$$

(1)式中 $C_1(K^4/A^2)$ 、 C_3 表示与热分区电阻特性、试验件该分区的热容特性、热沉表面尺寸、热沉热特性有关的参数, 在试验件与热试验用容器与热沉均确定且加热器冷态和热态电阻变化很小的条件下可看作常量; C_2 为试验件时间常数的表征量, 通过众多试验数据拟合可得 C_2 与当前温度的 4 次方成正比, K^4 ; $I(t)$ 为该分区内的电流, A; $T(t)$ 为当前的温度, K; T_0 为热沉温度, K; $Q_N(t)$ 为当前该分区内热, W; $Q_W(t)$ 为相邻分区对该分区的热影响, W; t 为时间。

在上述机理表达式中, 只要给定不同的 C_1 、 a 、 b 、 C_3 即可代表不同试验件、不同热分区的热特性。特别注意, 该数学模型只适用于红外笼等冷态和热态电阻变化很小的温度控制系统。

因次, 对于某一个热试验对象, 只要根据每个分区的热响应测试曲线, 即可获得每个分区相应的特征模型, 从而为控制数值参数分析做好准备。

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2009-10-16

基金项目: 航天科技基金资助项目

作者简介: 顾苗(1982—), 女, 硕士学位, 主要从事航天器热真空试验测控技术研究。联系电话: (010) 68747257-823。

1.2 热试验温度控制算法

随着热试验要求的提高,温度控制要求温度升降斜率与温度误差在一定范围内。为了全面精确地控制各个部位的温度,可将航天器表面划分成不同的温区,在每个温区选择具有代表性的温度点作为温度反馈点,采用多路温度控制系统平行地对空间温度进行控制^[4],每一个控制回路的原理如图 1 所示。把某分区内的温度反馈点信号采集到计算机中与用户设定温度值比较,将得到的差值作为该回路控制器的参数,计算得出红外加热装置的输入,进行相应的控制,控制周期为 1 min。其中该分区干扰来自相邻分区的红外加热装置辐射的热量。

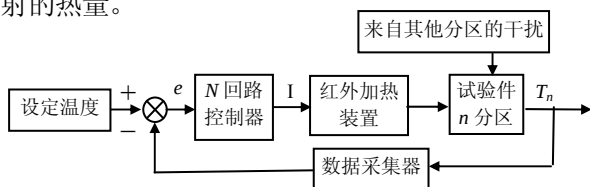


图 1 温度控制原理图

Fig. 1 Flowchart of temperature control

由某分区的控制原理可以得出,每一个分区的温度控制精度取决于该回路控制器参数,参数选择的合理性直接影响该过程控制的动态偏差、斜率偏差、稳定性、过渡时间、静差等控制品质。目前热试验温度控制器均采用 PID 算法,控制过程采用积分分离法,克服积分饱和和缺陷。控制原理为

$$u(t) = K_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right), \quad (3)$$

式中: $u(t)$ 为根据该算法所得的控制器输出; K_c 为控制器增益; e 为温度反馈点的温度偏差; T_i 为积分时间; T_d 为微分时间。该控制器的控制效果也取决于 K_c 、 T_i 、 T_d 这 3 个参数的选择。如何根据对象的特点以及温度阶段来选择这 3 个参数,也是本文研究的重点所在。

2 热试验温度控制参数与被控过程的关系

2.1 控温过程的数值模型

以某个试验对象的某个分区为例,该分区无内热,相邻分区对此分区的热影响功率远小于该分区的加热装置的加热功率。观察该试验过程的阶跃响应可知,当加热电流不变、时间足够长时温度会趋于稳定,且在目标温度增高时,温度的上升时间也会随之增长。设试验对象的边界条件为:当 $t \rightarrow \infty$ 时,温度稳定不变, $T_0 = 73 \text{ K}$, $I = 4 \text{ A}$, $T_\infty = 373 \text{ K}$;该试验分区的上升时间在 30~60 倍的 Δt 。控制器采用式(3)所示的控制策略,控制输出限制在 4 A 之间。

根据上述的边界条件、动态特性、控制算法以及该对象的控制输出区域等,对照分区的理论数学模型,通过计算并结合 LabView 软件编程调试,可确定公式(1)、(2)中的参数值对于该对象表示为 $C_1 = 1.2 \times 10^9 \text{ K}^4/\text{A}^4$, $C_2 = 0.05121 \text{ T}^4 + 8.546 \times 10^6 \text{ K}^4$ 。

按照以上的数值关系,利用 LabView 建立该试验对象分区控温闭环系统的数值模型,如图 2 所示。

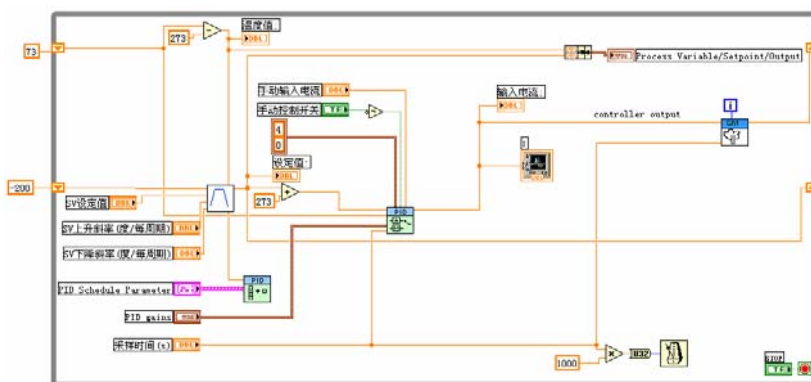


图 2 某试验分区温度控制系统的 LabView 数值分析模型

Fig. 2 The numeric analysis model of a certain test part in LabView

2.2 控制算法中 3 个控制参数与控温过程的关系

整个控温过程中,该分区的控制品质完全取

决于控制算法中的 3 个控制参数,即比例参数 K_c 、积分参数 T_i 、微分参数 T_d 。

2.2.1 K_c 与控温过程的关系

为了观察 K_c 对整个闭环控温过程的影响, 把 T_i 、 T_d 置为零, 从低温区至高温区选择出 3 个典型的设定温度值 SV, 得到 50 °C、0 °C、-50 °C 时不同 K_c 所对应的控温响应过程 (图 3)。

1) 从图 3(a) SV=50 °C 中可以得出:

① 当 K_c 从 0.01 变化到 0.2 时, 明显减少了控温过程的静差;

② 当 K_c 从 0.2 变化到 100 时, 对控温过程没有改善, 还引起小幅振荡;

③ 在此设定温度下, 为了综合保证该分区控温系统的响应速度、超调量、无振荡、静差, $K_c \approx 0.2$ 时为最佳。

2) 从图 3(b) SV=0 °C 中可以得出:

① 当 K_c 从 0.01 变化到 0.1 时, 明显减少了控温过程的静差;

② 当 K_c 从 0.1 变化到 10 时, 对控温过程没有改善, 还引起小幅振荡;

③ 综合考虑控温过程的特性, 可得最佳 K_c 值为 $K_c \approx 0.1$ 。

3) 从图 3(c) SV=-50 °C 中可以得出:

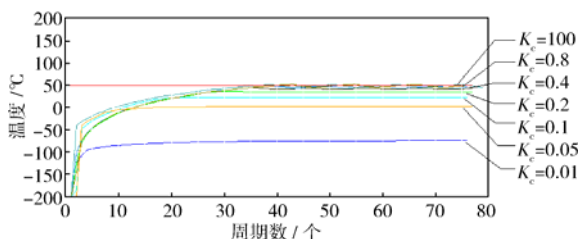
① 当 K_c 从 0.005 变化到 0.1 时, 明显减少了控温过程的静差;

② 当 K_c 小于 0.02 时, 控温过程没有超调;

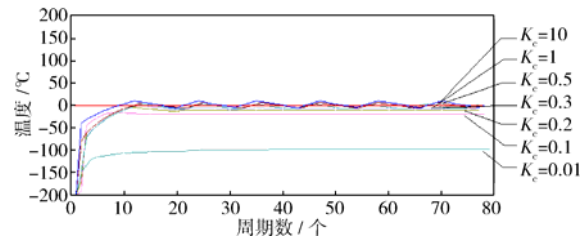
③ 当 K_c 从 0.1 变化到 10 时, 对控温过程没有改善, 还引起小幅振荡;

4) 综合考虑超调率与响应的快速性, 可得最佳 K_c 值为 $K_c \approx 0.02$ 。

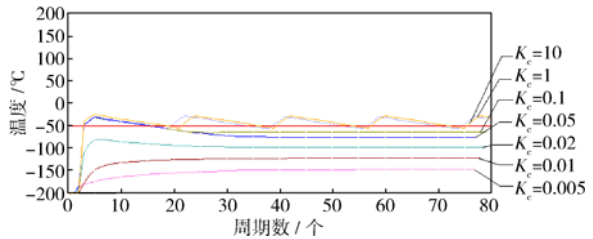
根据更多设定温度值的分析可以得到图 4 所示的设定温度与 K_c 最佳值之间的关系曲线。根据该曲线可知热试验的控温过程是一个变增益的过程, 且增益随着温度的升高不断增大, 与温度近似成正比关系。



(a) SV = 50 °C, $T_i = 0$, $T_d = 0$



(b) SV = 0 °C, $T_i = 0$, $T_d = 0$



(c) SV = -50 °C, $T_i = 0$, $T_d = 0$

图 3 不同 SV 和 K_c 对应的控制响应曲线

Fig. 3 Closed-loop response curve with different K_c and SV

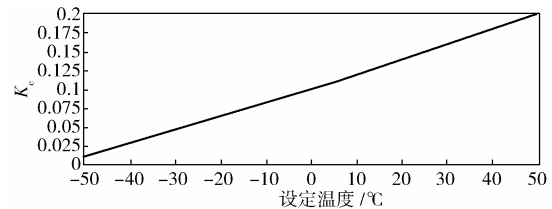
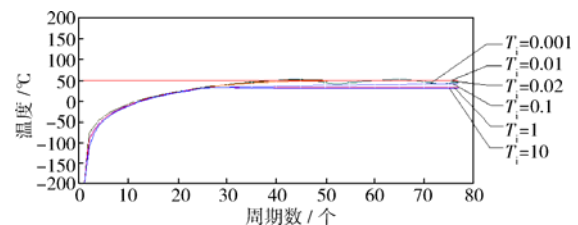


图 4 K_c 最佳值与设定温度之间的关系图

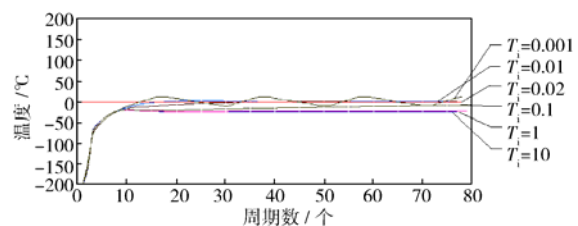
Fig. 4 Relationship between K_c and the setting temperature

2.2.2 T_i 与控温过程的关系

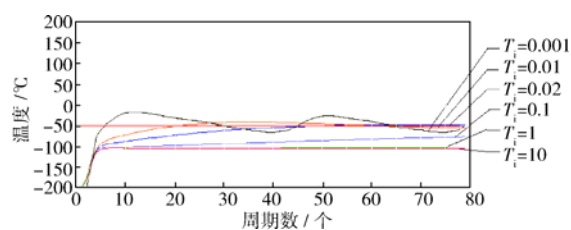
由 K_c 的分析过程可以得出在某一个设定温度值时, 选取一定的 K_c 值, 能够达到整个控制过程的动态要求; 但是当控温过程稳定时, 仍然存在着一一定的静差, 因此需适当选取 T_i 值。为了分析 T_i 值的选取, 列出典型设定温度值, 固定 K_c 为最优值的 0.8 倍时 (由于增加了积分作用, 为了避免输出值过大, 引起振荡), 不同 T_i 时的控制曲线如图 5 所示。



(a) SV = 50 °C, $K_c = 0.16$, $T_d = 0$



(b) SV = 0 °C, $K_c = 0.08$, $T_d = 0$

(c) $SV = -50^{\circ}\text{C}$ 、 $K_c = 0.016$ 、 $T_d = 0$ 图 5 不同 SV 和 T_i 对应的控制响应曲线Fig. 5 Closed-loop response curve with different SV and T_i

从图 5 可以得出:

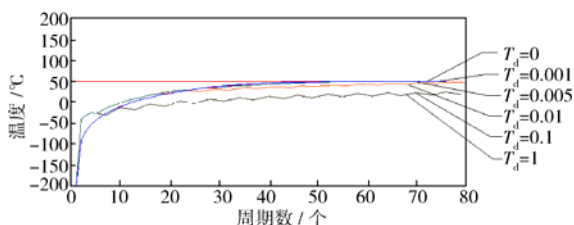
- 1) 当取最优 K_c 值, 设定温度取 50°C 、 0°C 、 -50°C 时, 使得控制品质最优的 T_i 均是 0.02;
- 2) 在控制的上升阶段, T_i 的变化对控制的过程没有影响。

上述(b)图现象的原因是采用了积分分离法去除“积分饱和”的作用, 在控温的初期由于温度偏差 e 较大, 由 PID 算法计算所得的输出 $u(t)$ 超出 (0, 4) 的控制器输出区间, 这是由于 T_i 被置 0、积分作用被屏蔽引起的。

通过对 T_i 的分析可以得出结果, 在比例参数 K_c 确定的情况下, 对于不同的设定温度可取同样的 T_i 值, 均可获得最好的控制品质。

2.2.3 T_d 与控温过程的关系

从理论上来说, T_d 的加入可以改善控制过程的动态特性 (如上升时间等)。在该热试验温度控制中, 微分参数 T_d 对试验过程的影响如图 6 所示。由于当 $SV = 0^{\circ}\text{C}$ 与 $SV = -50^{\circ}\text{C}$ 出现的现象与图 6 相同, 因此图 6 中只列出了 $SV = 50^{\circ}\text{C}$, K_c 、 T_i 均取最优值时, 不同 T_d 所对应的控温过程曲线。

图 6 $SV = 50^{\circ}\text{C}$ 、 $K_c = 0.16$ 、 $T_i = 0.02$ 时, 不同 T_d 对应的控制响应曲线Fig. 6 Closed-loop response curve with different T_d when $SV = 50^{\circ}\text{C}$, $K_c = 0.16$, $T_i = 0.02$

从图 6 中可以看出:

- 1) 在上升阶段, 由于温度偏差 e 较大, 输出被限幅, 所以控温曲线上升的初期不受 T_d 变化的影响;

2) 当 $T_d \geq 0.01$ 时, 控温过程振荡, 不符合控制要求;

3) 当 $T_d < 0.01$ 时, 控温曲线基本与 $T_d = 0$ 时重合, 明显表现为上升时间等动态特性未得到改善。

从以上现象可以得知, T_d 的调节对于控温品质改善作用很小, 可以忽略。

2.3 控制参数选择

由上一节的分析可以得知, 对于不同的控制目标温度, 控制参数也有所不同, K_c 按照比例增长、 T_i 取常数、 T_d 取 0 值最适合热温度控制过程。

对于本文中示例对象, 按照本文分析方法同样获得 -200°C 、 -150°C 、 -100°C 、 100°C 、 150°C 、 200°C 时最优控制参数, 可得表 1 所示 PI 控制最优参数表。表 1 中 K_c 为 P 控制算法最优值的 0.8 倍, T_i 取最优值, T_d 取 0。

表 1 控制参数与设定目标温度值的关系

Table 1 Relationship between the control parameters and the set temperature

温度值/ $^{\circ}\text{C}$	K_c	T_i	T_d
-200	0.0008	0.02	0
-150	0.004	0.02	0
-100	0.008	0.02	0
-50	0.016	0.02	0
0	0.08	0.02	0
50	0.16	0.02	0
100	0.4	0.02	0
150	0.8	0.02	0
200	8	0.02	0

根据表 1, 设定目标温度分别为 -50°C 、 0°C 、 50°C , 上升斜率 $1^{\circ}\text{C}/\text{周期}$, 控制过程如图 7(a) 所示。图 7(b) 的 3 幅图显示了采用固定参数 PID 时的控制时域曲线图, 固定的 K_c 、 T_i 、 T_d 分别为 0.16、0.02、0, 0.08、0.02、0, 0.016、0.02、0。从图 7(b) 可以得出, 采用固定参数算法时, 会引起低温段时域曲线不稳定, 最大振幅达 15°C , 以及可能的严重滞后, 平均滞后达 10 倍采样时间, 最大滞后达 15 倍采样时间。

由图 7(a) 可知, 通过优化后的算法, 在低温控制区域内消除了不稳定部分, 且把最大滞后减少到 6 倍采样时间, 平均滞后减少到约 1 倍的采样时间。且由图中可以得出控制过程静差为 0, 最大超调量小于 2°C , 温度上升斜率偏差小, 能够较好地改善控温过程动态性能要求与静态指标要求。

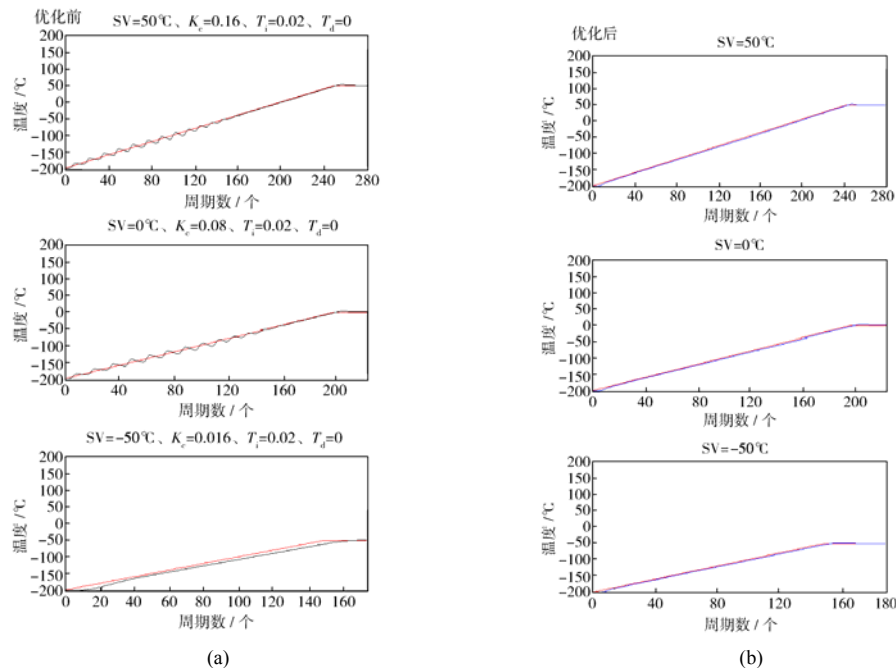


图7 当设定目标温度分别为-50℃、0℃、50℃时, 优化前后的温度控制曲线
Fig. 7 Temperature control curve before and after the optimization when SV is -50℃, 0℃, and 50℃

3 试验验证

在某次调试试验中, 共计10个控温回路, 采用Keithley的2750作为数采仪器。当目标温度为-100℃时, 采用了上述数值方法预先估计该目标温度下的PID参数, 得到控制参数值 $K_c=0.1$ 、 $T_i=20$ 、 $T_d=0$ 。使用该组参数可得到较好的控温效果。其中1号控温回路的温度控制曲线如图8所示, 温度稳定后控温曲线如图9所示。

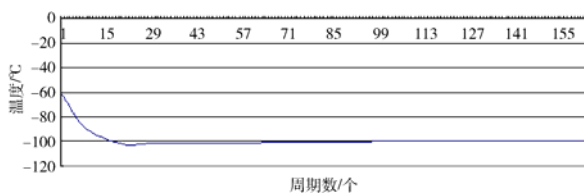


图8 某次闭环温度控制试验1号回路控温曲线
Fig. 8 Control curve of the No.1 closed loop

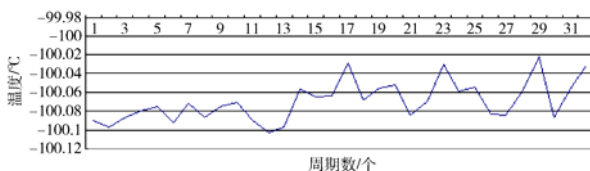


图9 温度稳定后温度变化曲线
Fig. 9 Temperature curve after stabilization

从以上两图中可以看出, 根据以上方法获得的控制参数组能够得到较好的闭环控温效果, 且本次调试经历1h左右, 该回路的稳态控温精度达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

4 结束语

本文通过PID控制参数与控制过程关系的数值分析与研究, 从调试经验中提炼出控制参数与控制过程之间的量化关系。对于冷态和热态电阻变化很小的主要依靠辐射进行换热的控温系统, 最优 K_c 值与目标设定温度成近似正比关系, T_i 值可取固定值, T_d 对控制动态品质影响很小可忽略。文中还指出一种PID控制参数的获得方法, 即先通过热响应试验预先确定该对象的特征参数 C_1 、 C_2 , 后通过该模型进行数值仿真计算得出目标温度的控制参数, 最终在真空热试验中应用这些控制参数以改善控制品质。经过实际试验验证, 这种控制参数寻找方法能够有效地提高温度控制系统的稳态控制精度, 使其在经历较长的稳定时间之后达到 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。由于目前常用的红外笼、加热片等加热器均具有冷态和热态电阻变化很小的特性, 所以这种控制参数数值预估与调节方法对于真空热试验具有一定的适用性。

参考文献 (References)

- [1] GJB 1033—1990, 卫星热平衡试验方法[S]
- [2] 凌云, 李毅梅, 何丽平. 模糊自适应在真空烧结炉温度控制中的应用[J]. 制造工业自动化, 2007, 29(9): 69-71; 75
- [3] 徐今强, 肖睿, 冯自平, 等. 空调温控的鲁棒自适应fuzzy-PID控制器[J]. 计量学报, 2007, 28(3A): 236-239
- [4] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 90