

基于遗传算法的加速度控制 PID 参数自整定研究

周云端, 何志勇, 赵瑞国
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 详细介绍了加速度试验系统加速度 PID 参数自整定方法。首先利用过程辨识将控制系统数学模型近似为二阶振荡环节形式, 得到传递函数表达式, 然后利用遗传算法进行 PID 参数整定, 使整定精确度和效率得到很大提高。

关键词: 加速度控制; 过程辨识; 遗传算法; 自整定

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 04-0068-04

Study on genetic algorithm based auto-tuning of acceleration control PID parameters

ZHOU Yun-duan, HE Zhi-yong, ZHAO Rui-guo
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The method of PID parameter auto-tuning for the acceleration test system is introduced. A mathematic model of the control system is approximated to second-order oscillation element type to get a transmit function expression by utilizing the process identification, and then the PID parameter auto-tuning is carried out by utilizing the genetic algorithm. This method improved the auto-tuning accuracy and efficiency greatly.

Keywords: acceleration control; process identification; genetic algorithm; auto-tuning

0 引言

飞机或火箭飞行过程中, 由于加速或减速会对其所携带的产品等产生惯性加速度, 因此通常需要在地面试验中考核产品承受惯性加速度的能

力。由于航空航天产品均为精密贵重产品, 试验系统加速度控制的精确程度直接影响着产品的质量, 因此需要利用先进的控制方法实现加速度的精密控制。加速度试验系统的动态特性比较复杂, 如果采用数学建模方法, 很难获得精确的数学模型, 难以满足控制理论的分析要求。PID 控

收稿日期: 2012-02-01; 修回日期: 2012-03-06

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2006JY04)

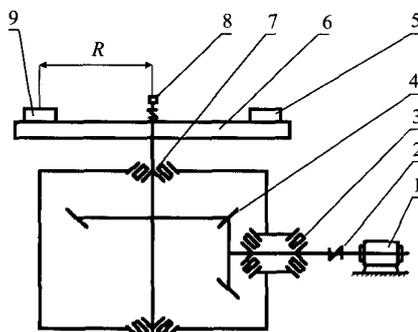
作者简介: 周云端 (1976—), 男, 工程师, 研究领域为力学环境技术

制由于具有原理简单、易于实现、适用面较宽等优点, 被采用作为加速度控制的方法。但是, PID 的参数整定一直是项费时费力的工作, 需要现场调试, 且精度不高; 另一方面, 当被控对象因某种原因发生变化时, 原来整定好的参数就需要根据变化及时重新整定。因此, 尽管有许多 PID 调节器参数整定的方法可以借鉴, 但从使用角度来看, 希望参数整定越简单越好, 最好是实现 PID 参数自整定。本文介绍一种基于过程辨识和遗传算法的 PID 控制器的参数自整定方法。

1 过程辨识

加速度试验系统加速度控制结构如图 1 所示, 电机通过减速机构驱动转臂转动, 从而对安装在转臂上的试验产品产生惯性加速度。加速度实质上采用的是半闭环控制, 闭环控制转臂转速, 试验产品的加速度根据 $a=\omega^2R$ (ω 为转臂转速) 通过计算机计算。加速度试验系统采用直流电机驱动, 转臂转速与电机控制电压的传递函数可以用二阶振荡环节来表示, 即:

$$G(S) = \frac{K}{\left(\frac{S}{\omega}\right)^2 + 2\xi\frac{S}{\omega} + 1} \quad (1)$$



1-驱动电机; 2-联轴器; 3-轴承; 4-减速齿轮泵; 5-配重; 6-转臂; 7-轴承; 8-转速传感器; 9-试验件

图 1 加速度试验系统结构图

Fig. 1 Structure of acceleration test system

将加速度控制过程看成一个黑箱。为了求得该黑箱的近似传递函数, 运用频率响应实验方

法, 对电机控制电压输入幅值为 A 的扫频正弦信号 $S(t)=A \sin(\omega t)$, 记录各频率点处的转臂转速输出信号, 绘制输出信号的幅值比和相位差的对数频率特性曲线, 从低频段起将所得的对数幅频曲线用斜率为 0dB/dec , $\pm 20\text{dB/dec}$, $\pm 40\text{dB/dec}$ 的直线分段近似, 获得对数幅频渐进特性曲线。式 (1) 的传递函数频率响应曲线如图 2 所示, 可以根据曲线确定传递函数的参数 K , ω 和 ξ 。

参数 K 由公式 $20 \lg K=A_1$ 计算得出。参数 ω 根据从图 2 中相频曲线过 -90° 的频率直接读出。

参数 ξ 根据 $A_2-A_1=20 \lg \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$ 计算得出。

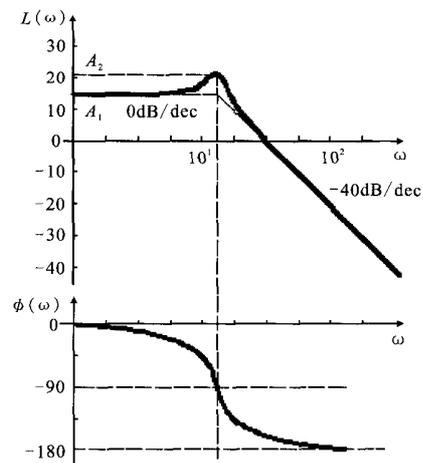


图 2 频率响应曲线

Fig. 2 Curves of frequency response

2 遗传算法整定 PID 参数

在计算机控制系统中, 设定值常常由控制仪表上的键盘用数字方式直接给定, 当设定值迅速变化时, 在 PID 算式中会引起控制变量的过大增长, 对系统造成冲击, 影响系统的动态品质, 因此我们采用微分先行的 PID 算法^[3]。其设计思想是, 微分作用项将设定值的因素排除在外, 仅对测量值起作用。图 3 为微分先行的控制系统。

由图 3 可得:

$$\frac{z(s)}{y(s)} = 1 + T_d S \quad (2)$$

其增量型算式为:

$$\Delta u(k) = k_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_s} [2y(k-1) - y(k) - y(k-2)] - \frac{T_d}{T_i} [y(k) - y(k-1)] \right\} \quad (3)$$

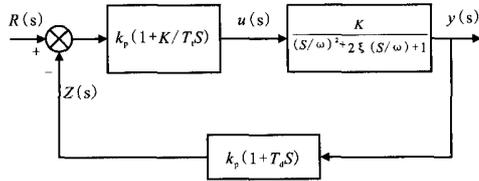


图3 微分先行的控制系统

Fig. 3 Control system of differential-first PID

在过程模型和 T_s 已知的情况下, PID 控制器只有 3 个参数需要确定, 分别为 k_p , T_i 和 T_d 。PID 参数整定就是要确定最佳 k_p , T_i 和 T_d , 使控制系统的某一性能指标达到最佳。本文选取 ISE (Integral Squared Error)^[2,5] 判据:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt = \sum_{k=1}^N [r(k) - y(k)]^2 T_s \quad (4)$$

其中 T_s 为前文提到的采样周期; N 为采样次数 (即上文提到的响应达到稳态时的采样次数), 给定值

$$r(k) = \begin{cases} 1, & k \geq 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases}$$

将过程传递函数离散化: $\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{ke^{-\tau s}}{TS+1}$ 对应的微分方程 (初值条件为 0) 为:

$$Ty'(t) + y(t) = ku(t - \tau) \quad (5)$$

对式 (5) 求导得:

$$Ty''(t) + y'(t) = ku'(t - \tau) \quad (6)$$

对式 (6) 两边取增量离散化得:

$$\frac{T+T_s}{kT_s} y(k) - \frac{2T+T_s}{kT_s} y(k-1) + \frac{T}{kT_s} y(k-2) = \Delta u(k - \frac{\tau}{T_s}) \quad (7)$$

同理, 对式 (2) 离散化可得:

$$z(k) = (1 + \frac{T_d}{T_s}) y(k) - \frac{T_d}{T_s} y(k-1) \quad (8)$$

又 $e(k) = r(k) - z(k)$, 代入式 (8), 并与式 (3) 和 (7) 联立, 假设按定值系统设计, $r(k+i) = \text{const}$, $i=1, 2, \dots$

得:

$$y(k) = \frac{k k_p T_s}{T+T_s} \left[\frac{T_i+T_s}{T_i} r(k-p) - r(k-p-1) - (1 + \frac{2T_d}{T_s} + \frac{T_s+2T_d}{T_i}) y(k-p) + (1 + \frac{4T_d}{T_s} + \frac{2T_d}{T_i}) y(k-p-1) - \frac{2T_d}{T_s} y(k-p-2) \right] + \frac{1}{T+T_s} [(T_s+2T)y(k-1) + T y(k-2)] \quad (9)$$

式中: $p = \tau/T_s$ 。

联立式 (4), (8) 和 (9) 便可得到 $ISE(k_p, T_i, T_d, k, T, \tau)$, 即目标函数表达式。

由于遗传算法具有处理一些诸如目标函数不可导、不连续的功能, 能避开局部最优解而找到全局最优解和收敛速度快等特点^[6], 因此本文采用遗传算法优化 k_p, T_i 和 T_d , 其具体步骤如下:

① 参数编码。采用二进制多参数编码方案, 把每个参数先进行二进制编码得到子串, 再把这些子串串联成一个完整的染色体, 即个体。设定参数范围 $k_p \in [k_{p\min}, k_{p\max}]$, $T_i \in [T_{i\min}, T_{i\max}]$, $T_d \in [T_{d\min}, T_{d\max}]$, 根据精度要求确定各子串的长度, 分别为 L_p , L_i 和 L_d 。子串译码后对应的无符号整数范围为 $(0, 2^L)$, L 分别为 L_p , L_i 和 L_d 。两者之间存在映射关系, 而映射的精度以 k_p 为例为:

$$\delta_p = \frac{k_{p\max} - k_{p\min}}{2^{L_p} - 1}$$

对应的编码形式如下: $|k_1 k_2 \dots k_{L_p} | i_1 \dots i_{L_i} | t_1 \dots t_{L_d} |$, 编码中 k_i, i_i, t_i 取 0 或 1。

② 适应度函数确定。由于 PID 参数优化是求目标函数 $ISE(k_p, T_i, T_d, k, T, \tau)$ 的极小值问题, 因而需对该函数进行改造, 将极小值转化为极大值问题, 则适应度函数取为:

$F = Q_{\max} \cdot ISE$, 式中 Q_{\max} 可在统计过程中求得, 使得在各种情况下为非负值。

③ 控制参数确定。如群体规模、交叉概率 P_0 以及变异概率 P_m 。

④ $t=0$, 根据群体规模生成初始群体 $P(0)$ 。

⑤ 应用复制、交叉和变异算子对种群 $P(t)$ 进行操作, 产生下一代种群 $P(t+1)$ 。

⑥ 重复④和⑤, 直至参数收敛或终止条件满足。

优化出 k_p, T_i 和 T_d 后, 根据

$$k_i = k_p \frac{T_s}{T_i}, \quad k_d = k_p \frac{T_d}{T_s}$$

求得 k_i 和 k_d 。

3 结束语

某加速度试验系统的加速度 PID 控制系统采用该算法进行 PID 参数整定。首先, 对加速度控制系统进行辨识, 采样周期为 $T_s=0.1$ s, 得到控制系统的模型为:

$$G(S) = \frac{1.842}{\left(\frac{S}{21.3}\right)^2 + 0.185S + 1} \quad (10)$$

根据经验, k_p, T_i 和 T_d 的参数范围均为 $[0, 5]$, 参数采用 10 位二进制编码。群体规模为 80, 交叉概率 $P_0=0.85$, 交叉变异概率 $P_m=0.001$, 最大进化代数 300。PID 参数遗传算法寻优结果为 $k_p=4.46, k_i=1.15, k_d=2.15$ 。

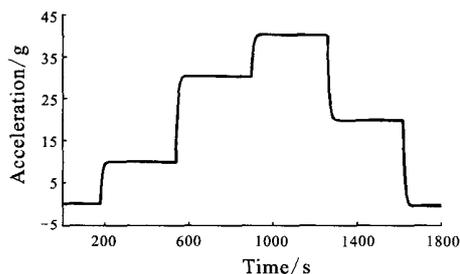


图 4 加速度 PID 控制试验曲线

Fig. 4 PID control test curve of acceleration

图 4 是利用遗传算法进行参数自整定的加速

度控制试验曲线, 加速度过度相对比较平稳, 调节时间较少, 收敛速度和解的质量都非常理想。在加速度试验系统投入使用前极大地提高了整定效率, 取得了良好的控制效果。该方法也适合其他常见的 PID 控制系统参数自整定, 具有较高的实际工程应用价值。

参考文献:

- [1] 方崇智, 萧德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 薛定宇. 控制系统仿真与计算机辅助设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [3] 苏金林. 基于 PID 控制方法的制动器试验台的数学模型研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2011 (2): 63-66.
- [4] 郑永凌, 马龙华, 钱积新. 鲁棒 PID 控制器参数的整定方法[J]. 化工自动化与仪表, 2001, 28(5): 14-17.
- [5] 李益民. 电机与电气控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [6] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- [7] 王松涛, 刘勋, 周逊, 等. 低压涡轮低雷诺数条件下的气动性能分析[J]. 汽轮机技术, 2011 (5): 324-327.
- [8] 范威, 栾希亭, 韩先伟, 等. 混合室对零二次流环形超声速引射器性能的影响[J]. 火箭推进, 2011 (3): 24-27+39.
- [9] 徐晓霞. 模糊 PID 控制光电跟踪系统的抗干扰性分析[J]. 电子设计过程, 2011 (22): 180-183.
- [10] 王文龙, 赵政社, 混平, 等. 应变测试技术应用于发动机质心偏移研究[J]. 火箭推进, 2011 (2): 78-82.
- [11] 刘小民, 周海洋, 王星, 等. 低压透平叶片表面合成射流非定常流动控制机理研究[J]. 西安交通大学学报, 2011 (3): 95-101.
- [12] 廖爱华. 压气机超速制造过程的数值仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2011 (6): 104-106.
- [13] 韩进, 王国华, 张欣豫. 基于神经网络的某仓储库气体质量预测系统[J]. 电子设计过程, 2011 (18): 83-85.

(编辑: 王建喜)