

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.02.014

多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定方法

陈建国, 黄立, 张积广, 王义强, 王宏利
(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 在分析现有 PID 控制器参数整定方法局限性的基础上, 提出并建立一种多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定方法。给出通过 Matlab 仿真分析筛选确定 PID 参数最优组合值的方法, 介绍其实用方案: 基于原始系统单位阶跃响应曲线估算 PID 初值的方法、制定多指标约束的方法、筛选 PID 优化值的具体方案和 Matlab 仿真软件流程图等, 最后给出多个代表性的实例分析。结果表明: 该方法能快速完成 PID 控制系统的优化设计, 并且不需要 PID 参数经验值和计算/调试 P 控制的临界振荡增益和周期。

关键词: PID; 整定; 优化; 动态指标; 极点; 稳定性; Matlab

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

A Method for Consolidated Optimizing and Quantitative Setting Under Multi-Index Constraint

Chen Jianguo, Huang Li, Zhang Jiguang, Wang Yiqiang, Wang Hongli
(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on analysis of the limitations of now-used PID control tuning methods, a method for consolidated optimizing and quantitative setting under multi-index constraint was proved and established. The method to select and determine the optimum values of PID parameters by Matlab simulation was given, and its practical scheme was introduced: the method for estimating initial values of PID parameters from the unit-step response curve of an initial system, the method for constituting dynamic performance criteria, the scheme for selecting the optimum values of PID parameters, the flow chart of simulating soft, etc. Finally, representative multiple examples are given. The results indicated that this method can quickly accomplish the optimal design for PID control systems, and needn't both utilize experiential data about PID parameters and calculate (or tune) the critical oscillation gain and period of a P controller.

Key words: PID; setting; optimizing; dynamic performance criteria; pole; stability; Matlab

0 引言

PID 参数整定可以追溯到 1942 年 Ziegler-Nichols 所做的研究工作^[1-2](简称 Z-N 法)。文献[3-14]论述了 PID 参数整定近期的研究和工程中通常使用的方法, 主要包括: 经验法、衰减曲线法、临界比例度法、反应曲线法^[8-9]; 或试凑法、扩充临界比例系数法、扩充响应曲线法^[12-14]。分析发现, 目前 PID 参数整定的具体做法包括 3 类: 1) 基于不同控制对象, 参考经验数据^[4-14]对 PID 参数进行初始设置, 反复调试, 最终实现整定; 2) 基于 Z-N 法, 首先施加增益控制, 调试或依据 Routh 判据^[4,12-14]计算获得临界振荡增益 K_{pc} 和周期 T_c , 再根据 Z-N 法或经验数据^[4-5,8-14], 计算出 K_p, T_i, T_d , 再进行调试。3) 在 1) 获得 K_p, T_i, T_d 初值的基础上, 依据单个性能指标进行 Matlab 仿真分析, 再进行 Nyquist 稳定性分析和(或)频率响应 Bode 图相角稳定性分析, 依次逐一反复筛选, 最终确定 $K_p, T_i,$

T_d ^[4,14-15]。

PID 控制器的 3 个参数对控制系统品质的影响是相互制约的、非线性的, 而不是独立的。在 K_p, T_i, T_d 3 个参数一定的范围内, 通过反复调试/设置要找到满足多项指标要求的最佳组合, 是非常困难的。而基于 Z-N 法求 K_p, T_i, T_d 参考值, 有时会出现无解的情况。如内环带速度反馈的位置控制系统 $G(s)=1/(s^2+s)$ ^[4], 用 Z-N 法, 依据 Routh 判据不能找到临界振荡频率和周期。因为加入增益控制后, 系统始终是稳定的。另外, 用 Z-N 法校正的结果有时与希望差距较大。如控制对象 $\frac{1}{s(s+1)(s+5)}$, 按 Z-N 法求得 $K_p = 18, T_i = 1.405, T_d = 0.35124$, 对应的超调量是 62%^[4]。

如果将 PID 控制系统阶跃响应的动态指标(如超调、上升时间和调节时间)和系统稳定性同时考虑, 用目前使用的方法要获得最佳 K_p, T_i, T_d 组合值

收稿日期: 2011-09-02; 修回日期: 2011-10-09

基金项目: 中国飞机强度研究所“十一五”、“十二五”大型控制系统研发项目专项资助(TPCO-B070344001, 0730-1042GD01CG01)

作者简介: 陈建国(1963—), 男, 重庆人, 工学硕士, 高级工程师, 从事控制技术、疲劳与可靠性研究。

难度相当大，不但需要大量的理论计算和分析，而且需要多次仿真分析，以及仿真和分析交替进行。另外，在 PID 控制系统调试过程中，经常出现参数设置不当而造成系统振荡或控制对象(含执行机构)损坏或险情；再者，实际交付运行的 PID 控制系统也常发生振荡。

由于系统辨识技术和仿真技术的高度发展和成功使用，对于工程中 LTI(线性时不变系统)或近似 LTI，采用 Levy 方法^[16]或 Prony 算法^[17]可以获得较高精度的控制对象传递函数。

为解决上述问题，笔者提出并建立一整套基于 PID 控制系统极点位置、上升时间、超调和调整时间等多项指标约束条件下的 PID 参数统一优化定量整定方法。该方法较好地解决了 PID 控制的定量优化整定问题，而且无须较复杂的计算或调试来确定初值或临界值，无需经验数据。

1 PID 控制与 K_p, T_i, T_d 作用分析

图 1 为 PID 控制系统， $G(s)$ 和 $H(s)$ 是控制对象和反馈传递函数。对 LTI 系统， $G(s)$ 和 $H(s)$ 是 s 的有理分式。PID 控制器传递函数的标准形式^[4,15]为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (1)$$

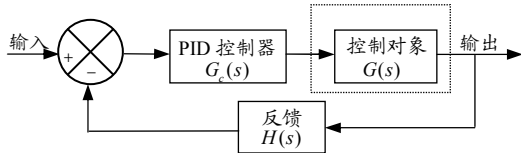


图 1 PID 控制系统传递函数框图

PID 控制系统的闭环传递函数为^[4,15]

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)H(s)} = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{s - (-p_i)} \quad (2)$$

式中： $-p_i$ 是 PID 控制系统闭环极点，为复数。实际应用中，图 1 虚线框内可能是带有内环反馈的子系统。

表 1 K_p, T_i, T_d 对控制系统性能指标的影响

参数变化	上升时间	超调量	调节时间	稳态误差
K_p 增加	减少	增大	微小变化	减少
T_i 减小	减少	增大	有减小作用	减少或消除
T_d 增加	微小变化	减少	减少	微小变化

对于控制系统来说，单位阶跃输入是较为严格的工作条件，所以，通常以单位阶跃响应的动态性能指标(上升时间 T_r 、峰值时间 T_p 、超调量 $\sigma(\%)$ 、调节时间 T_s 、稳态误差 e_{ss} 等)和稳定余量来评价系统的控制品质。文献[4,12-14]从 PID 控制器原理分析了 PID 参数对控制系统性能指标的影响，总结得

到如表 1。

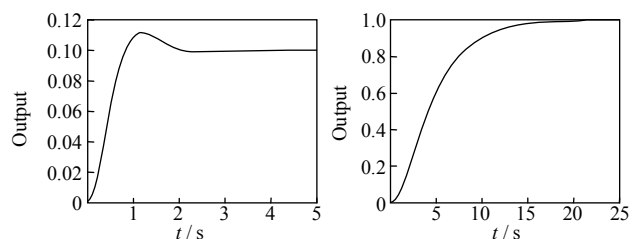
PID 控制和设计的目标是：通过 PID 参数 K_p, T_i, T_d 的选择(整定)，使控制系统具有稳、准、快的控制品质。但因为 K_p, T_i, T_d 对系统响应和性能指标的影响是相互制约的，并且各项性能指标与 K_p, T_i, T_d 之间的关系是非线性的，相对来说， K_p 对上升时间的影响、 T_i 对超调的影响、 T_d 对调节时间的影响要更大一些。表 1 仅能作为参考。所以，依据表 1，通过独立调试或仿真筛选，要获得高品质控制要求的 K_p, T_i, T_d 参数组合非常困难。如果要求满足多个性能指标和高度的稳定性，将更加困难。

2 多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定方法

多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定方法是在系统阶跃响应的多项性能指标(如上升时间、超调和调节时间等)和闭环系统极点合理位置约束下，制定合理的筛选方案(包括 PID 参数初值和筛选区间的确定)，通过 Matlab 仿真分析，筛选确定使 PID 控制系统满足约束条件的 K_p, T_i, T_d 最佳组合值，实现 PID 参数统一优化定量整定的目的。

2.1 确定 K_p, T_i, T_d 的初值

自衡原始系统($G_c(s)=1$ 时)的单位阶跃响应将趋于稳定^[16]，图 2(a)、(b)分别代表有超调和无超调的自衡原始系统阶跃响应，这里允许稳定前有振荡。



(a) 有超调单位阶跃响应 (b) 无超调单位阶跃响应

图 2 自衡原始系统阶跃响应

对图 2，在单位时间内(一般取 0~1 s)的最大输出值、超调、调节时间分别用 U_1, σ_F, T_{SF} 表示，可通过目测得到，不需精确计算。自衡原始系统 PID 控制器参数 K_p, T_i, T_d 的初值(筛选时用)计算如下：

1) 有超调情况

$$K_{p0} = \frac{1.25}{U_1}, T_{i0} = \frac{0.25}{\sigma_F}, T_{d0} = \frac{1}{T_{SF}} \quad (3)$$

2) 无超调情况

$$T_{i0} = \sqrt{\frac{1.25}{3U_1}}, K_{p0} = 3T_{i0}, T_{d0} = \frac{1}{T_{SF}} \quad (4)$$

式 (3)、(4) 的初值选取/估算是依据 PID 调节原理、文中第 1 部分的分析 and 大量实际控制对象模型的仿真分析总结而得到的。

2.2 制定多指标约束

将约束分成极点约束(确保稳定性)和单位阶跃响应动态指标约束 2 大类:

1) 极点约束: 依据主导极点的思想^[4,15]预定一个负实数 $\delta < 0$, 对于每组 K_p, T_i, T_d 取值得到 PID 控制闭环传递函数式 (2), 要求

$$\max\{real(-p_1), \dots, real(-p_N)\} \leq \delta \quad (5)$$

式中: $real(-p_j)$ 表示极点 $-p_j$ 的实部, δ 可取 -1, -0.8, -0.5, -0.3 等, 根据具体控制系统来决定。通常 $-p_j$ 是 K_p, T_i, T_d 和 $G(s), H(s)$ 中参数的连续函数, 取适当的 δ 有利于加强系统抵抗模型误差、时变性和非线性对稳定性的影响, 提升系统在运行过

程中的稳定性。

2) 单位阶跃响应动态指标约束

① 超调 σ 约束: 设定超调取值范围。允许超调的系统, σ 常取 25%。 σ 参考取值区间 [0.2, 0.3], [0.1, 0.2], [0, 0.1], [-0.02, 0], 最后一项用于不允许超调系统。

② 上升时间 T_r 约束: 根据具体控制要求设定 T_r 。如 T_r 可取 0.5 s、1.0 s、1.5 s 等。

③ 调节时间 T_s 和稳态误差 e_{ss} : 根据控制要求, 确定 e_{ss} 和 T_r 这 2 个值是相互关联的, 如 e_{ss} 可取 0.1%、1%、3% 或 5% 等, 对应的 e_{ss} 可取 5 s、4 s、2 s、1 s 等。通常, 对于稳定的 PID 控制系统, $e_{ss}=0$ 。上述 e_{ss} 是为了确定 T_s 而设定的值。

系统阶跃响应的性能指标有 6 个参数, 也可以增加对峰值时间 T_p 和延迟时间 T_{dd} 的约束。

2.3 筛选方案与 Matlab 仿真软件设计

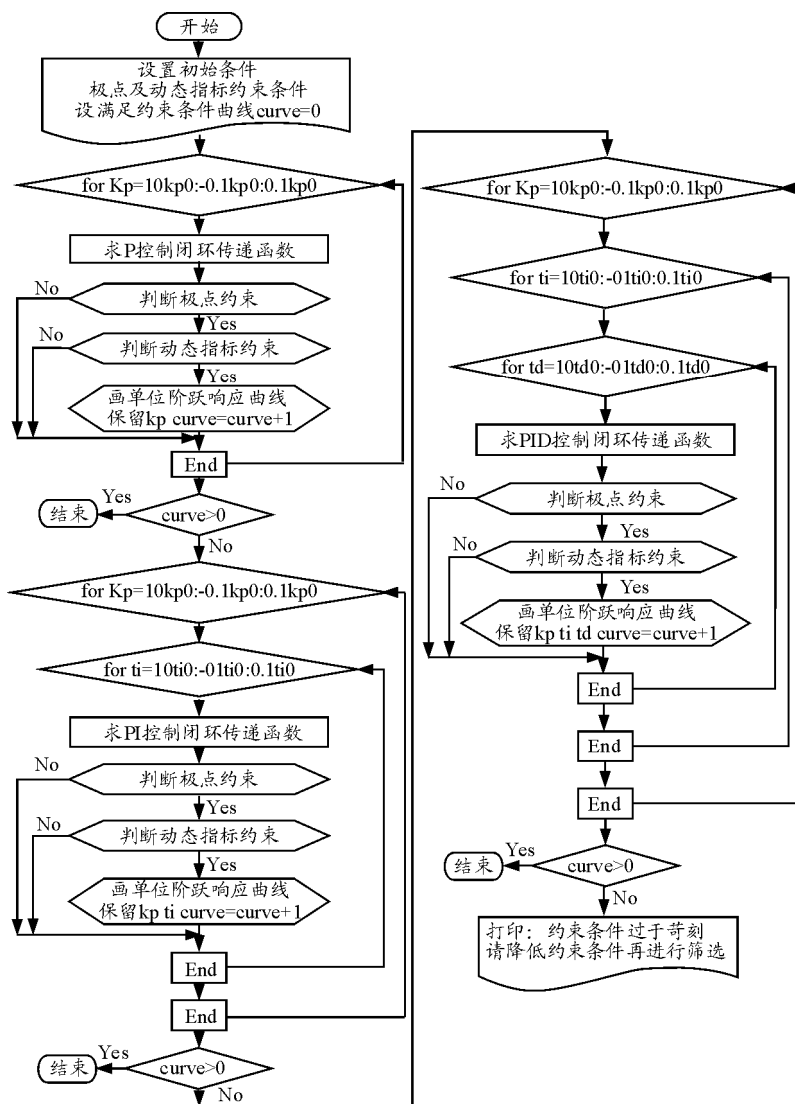


图 3 Matlab 仿真求解多指标约束下 PID 参数流程图

将 K_p, T_i, T_d 的取值分别限制在 K_{p0}, T_{i0}, T_{d0} 的 10% 和 10 倍之间, 即

$$\begin{cases} K_p \in [0.1K_{p0}, 10K_{p0}] \\ T_i \in [0.1T_{i0}, 10T_{i0}] (\text{P控制时 } T_i = \infty) \\ T_d \in [0.1T_{d0}, \max_T_d] (\text{P和PI控制时 } T_d = 0) \\ \max_T_d = \max(10T_{d0}, 1) \end{cases} \quad (6)$$

取筛选步长 (P 控制无 ΔT_i 和 ΔT_d , PI 控制无 ΔT_d)

$$\Delta K_p = 0.1K_{p0}; \Delta T_i = 0.1T_{i0}; \Delta T_d = 0.1T_{d0}$$

依次进行 P、PI 和 PID 控制筛选。对于给定的约束条件, P 控制筛选满足, 不再进行 PI 和 PID 控制筛选; 如不满足, 进行 PI 控制筛选; 依次类推, 即能筛选找到满足 2.2 节约束条件的 P 或 PI 或 PID 参数, 这正是需要求解的优化 PID 参数值 (或组合值)。对 PID 控制筛选, K_p, T_i, T_d 的步长取式 (6) 区间的均分 30~50 次即可。

如果 P、PI 和 PID 3 种控制方式均不能满足约束条件, 则需要适当修改约束条件、步长或筛选区间, 再进行筛选。经过对大量实际控制对象模型的 PID 控制, 用文中上述筛选方案进行多指标约束的 PID 参数优化筛选, 完全能获得满足约束条件 PID 统一优化组合值。

图 3 是用文中提出的方法进行 Matlab 仿真分析求解多指标约束下 PID 参数统一优化定量整定的优化组合值的程序流程图。

3 Matlab 仿真分析

下面利用笔者建立的方法来求 PID 参数最佳值。图 4~图 9 的横坐标单位为 s; 纵坐标为无量纲的标准化单位, 随输入量纲和标准化单位约定而决定, 如输入 1 个单位表示 100 N, 那么输出纵坐标 1 个单位即是 100 N。

例 1 $G(s) = \frac{1}{s^2 + 3.6s + 9}, H(s) = 1。$

闭环系统原始单位阶跃响应见图 2(a), 目测得到

$$U_1 = 0.11, \sigma_F = 0.01 \div 0.1 = 0.1 = 10\%, T_{SF} = 3 \text{ s}$$

根据式 (3) PID 的初值

$$K_{p0} = 11.4, T_{i0} = 2.5, T_{d0} = 0.33$$

设定多指标约束条件

$\delta = -1, 20\% \leq \sigma \leq 25\%, T_r = 0.5 \text{ s}, T_{SS} = 3 \text{ s}$ (3 s 后误差小于 2%) 用文中的方法筛选, PI 控制满足要求, 最佳响应曲线有 3 条, 如图 4, 对应的 3 组数据为: $K_p = 20.52, T_i = 0.75; K_p = 21.66, T_i = 0.75; K_p = 22.88, T_i = 0.75。$

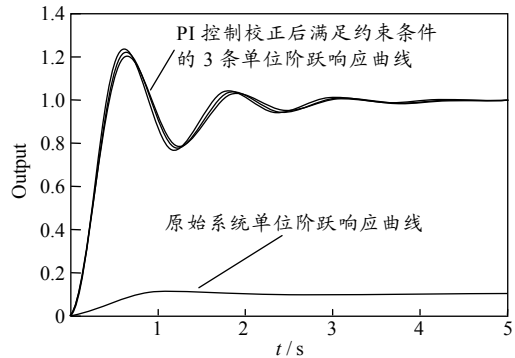


图 4 例 1 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

例 2 $G(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+5)}, H(s) = 1。$

闭环系统原始单位阶跃响应见图 2(b), 目测得到

$$U_1 = 0.1, \sigma_F = 0 (\text{无超调}), T_{SF} = 25 \text{ s}$$

根据式 (4) PID 的初值

$$K_{p0} = 6.12, T_{i0} = 2.04, T_{d0} = 0.04$$

设定多指标约束条件

$\delta = -0.6, 20\% \leq \sigma \leq 25\%, T_r = 1.0 \text{ s}, T_{SS} = 4 \text{ s}$ (4 s 后误差小于 2%) 用文中的方法筛选, PID 控制满足要求, 最佳响应曲线超过 47 条, 如图 5, 下面提供 2 组优化数据:

$$\begin{aligned} K_p &= 26.8668, T_i = 2.2236, T_d = 0.7676; \\ K_p &= 31.9158, T_i = 2.8968, T_d = 0.8008. \end{aligned}$$

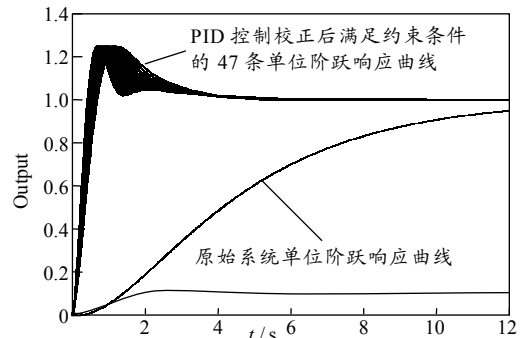


图 5 例 2 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

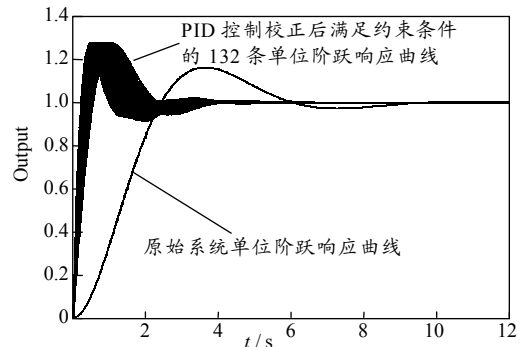


图 6 例 3 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

例 3 $G(s)=\frac{1}{s(s+1)}, H(s)=1。$

设定约束条件

$\delta=-1, 25\% \leq \sigma \leq 28\%, T_r=0.6 \text{ s}, T_{SS}=3.5 \text{ s}$ (3.5 s 后误差小于 2%) 按照文中的方法筛选, PID 控制满足要求, 最佳响应曲线 132 条, 如图 6, 下面提供 2 组优化数据:

$K_p=31.30, T_i=1.026, T_d=0.1915;$
 $K_p=9.0927, T_i=1.026, T_d=0.373。$

例 4 $G(s)=\frac{1.2}{0.36s^3+1.8s^2+2.5s+1}, H(s)=1。$

设定约束条件

$\delta=-0.5, 10\% \leq \sigma \leq 15\%, T_r=1.5 \text{ s}, T_{SS}=6 \text{ s}$ (6 s 后误差小于 2%) 按照文中的方法筛选, PID 控制满足要求, 最佳响应曲线 310 条, 如图 7, 下面提供 2 组优化数据:

$K_p=3.3021, T_i=2.1111, T_d=0.4225;$
 $K_p=7.0833, T_i=3.0278, T_d=0.7360。$

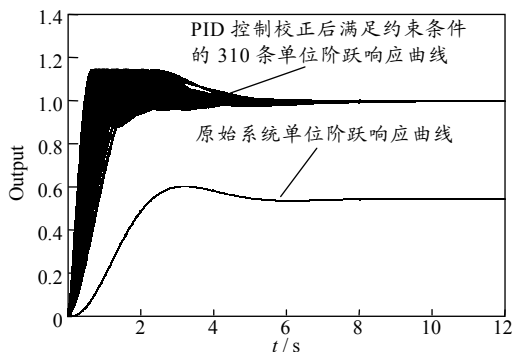


图 7 例 4 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

例 5 $G(s)=\frac{500}{(s^2+5s)(s+10)}, H(s)=1。$

设定约束条件

$\delta=-0.5, 15\% \leq \sigma \leq 25\%, T_r=1.5 \text{ s}, T_{SS}=6 \text{ s}$ (6 s 后误差小于 2%) 按照文中的方法筛选, P 控制满足要求, 最佳响应曲线 1 条, 如图 8, $K_p=0.294。$

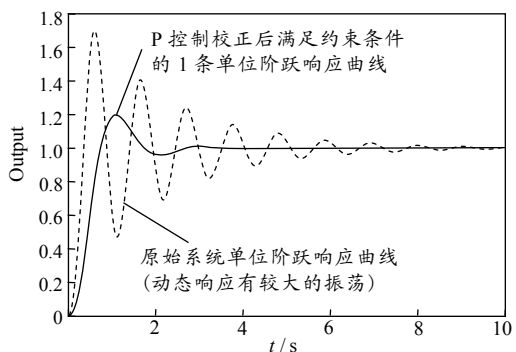


图 8 例 5 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

例 6 $G(s)=\frac{4}{(2s+1)((0.5s+1)}, H(s)=\frac{1}{0.05s+1}。$

设定约束条件

$\delta=-1, 3\% \leq \sigma \leq 10\%, T_r=1.0 \text{ s}, T_{SS}=3.5 \text{ s}$ (3.5 s 后误差小于 2%) 按照文中的方法筛选, PID 控制满足要求, 最佳响应曲线 356 条, 如图 9, 下面提供 2 组优化数据:

$K_p=1.8922, T_i=1.632, T_d=0.383;$
 $K_p=4.4702, T_i=1.1568, T_d=0.416。$

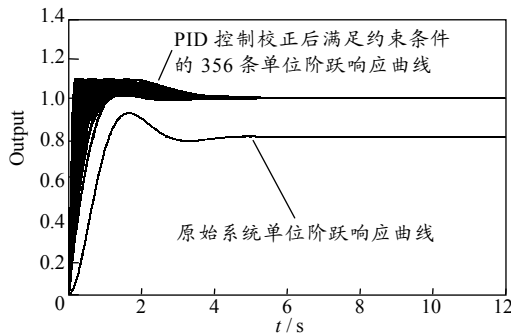


图 9 例 6 用本法校正前后的单位阶跃响应 Matlab 仿真

下面对文中的方法进行简要的总结:

- 1) 对于给定的约束条件, P、PI 或 PID 参数整定值如有解, 应有无穷组, 筛选提供的只是有限组, 是因为筛选参数 K_p, T_i, T_d 的步长所致;
- 2) 一般情况下, 超调越大, 调节时间越短, 主导极点离虚轴越远, 超调会增大, 制定约束条件时对此需要考虑;
- 3) 制定约束条件需要考虑具体的控制对象和环境, 按此制定约束条件和选择筛选出的 K_p, T_i, T_d 组合值, 再考虑执行结构的执行能力进行选择使用。

4 结束语

基于控制对象传递函数、原始系统阶跃响应曲线和 Matlab 工具软件, 笔者在多指标约束下, 通过仿真分析统一求解 PID 控制系统, 以获得满足多指标约束条件的 PID 3 个参数优化组合值。这一工作在 PID 控制系统调试前完成, 可以大大减小调试时参数设置不当带来的调试风险, 节省调试时间, 并且简洁、实用。

该方法筛选得到的满足约束条件的 PID 参数优化组合值, 差别较大的常常有数十组, 实际使用时可将代表性的 PID 几组值直接设置输入, 观察、比较 PID 闭环控制系统单位阶跃响应曲线, 即能确定实际最佳 PID 取值。

目前, 该方法已对文献[4,15]中的 500 多个实际控制模型进行了仿真分析, 其实用性和有效性得到了很好的验证。该方法的使用有助于 PID 控制系统的快速优化设计, 以及提升 PID 控制系统使用稳定性。