

基于频率特性的控制器优化设计

王德金, 蒋 珉, 汪 峥

(东南大学 自动化学院 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘 要:在控制系统的设计过程中,通常需要加入调节器或控制器,才能使系统满足稳定性、准确性和快速性等性能指标。调节器或控制器的参数选择恰当与否对系统性能的影响非常大,因此,对控制系统调节器或控制器参数的优化设计十分重要。文中在给定控制器结构的前提下,不改变控制系统原设计,依靠系统的频率特性采用单纯形调优法,适当改变系统调节器或控制器的参数,使得实际的控制性能与期望的控制性能之间的差别最小化,就可以使优化后的控制系统的动态性能得到明显改善,具有优良的有效性和通用性。

关键词:参数优化;目标函数;单纯形法

中图分类号:TP31

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)05-0160-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.05.039

Optimization Design of Controller Based on Frequency Characteristic

WANG De-jin, JIANG Min, WANG Zheng

(Key Laboratory of Measurement and Control of Complex Engineering Systems of Ministry of Education, School of Automation, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract:In the process of designing an automatic control system, usually need to add some controllers or adjusters so that the control system can satisfy the performance index of stability, accuracy and rapidity. Whether the parameters of controllers or adjusters are appropriate or not influences the performance of control system greatly, so it is very important to optimize these parameters. Under the premise of the given controller structure, without changing the original design of control system, relying on the frequency characteristics of the system use the simplex optimization method to change parameters of controller or adjusters, making the actual control performance with the desired control performance minimize the difference, which can make the optimized control system dynamic performance is significantly improved, with good validity and generality.

Key words:parameter optimization; object function; simplex method

0 引 言

在科学技术发展的过程中,自动控制技术起着极为重要的作用。所谓自动控制就是在无人参与的情况下,通过控制器或调节装置使被控对象或过程自动地按照预定的要求运行。导弹能够正确命中目标,人造卫星能够按照预定轨道运行并返回地面,航天飞船能够准确在月球着陆,自动控制技术都起到了极为重要的作用。以前在控制系统不是很复杂的情况下,也许并不一定需要通过仿真实验去获得最优的系统设计方案或最佳的系统运行参数等,人们可以凭经验简单地安排几次仿真实验或在实际系统上做几次实验,就能确定基本满足工程要求的方案或参数。但是随着科学

技术的发展,系统越来越复杂,要求越来越高,人们的经验已经不够用了,而且人们也意识到方案的优良程度,参数最佳与否,对系统的品质有着显著的影响,所以人们开始追求最优的目标,最优化技术也随之而产生^[1]。

1 控制系统的频率分析

1.1 被控对象的频率特性计算

由于被控对象一般是由微分方程进行描述的,而频率特性是由被控对象的传递函数确定的。例如某 SISO 系统根据微分方程进行 Laplace 变换,得到如下的形式: $A(s) * Q(s) = B(s) * U(s), Y(s) = C(s)$

收稿日期:2013-07-09

修回日期:2013-10-17

网络出版时间:2014-02-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60934008, 50875046)

作者简介:王德金(1989-),男,安徽滁州人,硕士研究生,研究方向为计算机仿真与 CAD;蒋 珉,副教授,研究方向为计算机仿真与 CAD;汪 峥,教授,研究方向为制造系统分析与控制。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140211.1450.018.html>

* $Q(s)$, 其中 $A(s)$ 是 $n \times n$ 维矩阵, $Q(s)$ 是 $n \times 1$ 维矩阵, $B(s)$ 是 $n \times 1$ 维矩阵, $Y(s), U(s)$ 是标量, $C(s)$ 是 $1 \times n$ 维矩阵, 这样可求得 $Q(s) = A(s)^{-1} * B(s) * U(s)$ 。由于 $A(s)$ 是复数矩阵, 所以 $A(s)^{-1}$ 不能直接求出, 必须通过求实数矩阵逆的间接方法求出, 进而得到传递函数 $G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = C(s) * A(s)^{-1} * B(s)$ [2]。如一般方程 $A(s) * X(s) = B(s)$ 进行如下分解

$$\begin{aligned} (\text{Re}_A + j\text{Im}_A) * (\text{Re}_X + j\text{Im}_X) &= \\ (\text{Re}_B + j\text{Im}_B) & \\ (\text{Re}_A * \text{Re}_X - \text{Im}_A * \text{Im}_X) + & \\ j(\text{Re}_A * \text{Im}_X + \text{Re}_X * \text{Im}_A) &= \\ \text{Re}_B + j\text{Im}_B & \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{Re}_A * \text{Re}_X - \text{Im}_A * \text{Im}_X = \text{Re}_B \quad (2)$$

$$\text{Re}_A * \text{Im}_X + \text{Re}_X * \text{Im}_A = \text{Im}_B \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Re}_A & -\text{Im}_A \\ \text{Im}_A & \text{Re}_A \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \text{Re}_X \\ \text{Im}_X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}_B \\ \text{Im}_B \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = A(s)^{-1} * B(s) = \text{Re}_X + j\text{Im}_X \quad (5)$$

就如同求解一般方程一样求解得到 Re_X, Im_X , 进而求出用实数表示的 $A(s)^{-1} * B(s)$ 的值。从而求出传递函数的表达式。

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)} = C(s) * (A(s)^{-1} * B(s)) = \\ (\text{Re}_C + j\text{Im}_C) (\text{Re}_X + j\text{Im}_X) & \end{aligned} \quad (6)$$

式中, Re_A, Im_A 分别是 $A(s)$ 的实部和虚部; Re_B, Im_B 分别是 $B(s)$ 的实部和虚部; Re_C, Im_C 分别是 $C(s)$ 的实部和虚部; Re_X, Im_X 分别是 $X(s)$ 的实部和虚部。

1.2 控制器(调节器)的一般结构

对于某系统其控制器结构已经确定, 通常是由振荡环节和二阶微分环节构成的, 其传递函数通常具有如下的形式:

$$W(s) = \prod_{k=1}^n \frac{\frac{s^2}{\omega_{k1}^2} + 2\frac{\xi_{k1}s}{\omega_{k1}} + 1}{\frac{s^2}{\omega_{k2}^2} + 2\frac{\xi_{k2}s}{\omega_{k2}} + 1} \quad (7)$$

进而得到加上控制器之后系统的传递函数为 $G(s) * W(s)$, 通过所求的传递函数绘制对数幅频和相频特性曲线, 以便分析控制性能。同时, 还可以根据期望的性能指标(稳定性指标、稳态性能、暂态性能), 对控制器的结构、参数、工作时段进行优化设计 [3]。

在编写程序时要注意如果相邻两个频率点处的幅频值或者相频值差的太大就需要缩小步长, 这个可能是由于在峰值处引起的。同时要注意相频可能在相邻两个频率点处的值会产生突变, 此时需要进行一些补偿使其在所要求的范围内。

2 控制器(调节器)的系数优化设计

绝大部分控制系统都由控制器(调节器)与控制对象组成。所谓控制系统参数最优化, 一般是指: 控制对象已知, 控制器(调节器)的结构也已确定, 需要调整或寻找控制器(调节器)的某些参数, 使系统按某种性能指标意义达到最优。控制系统参数最优化需要解决两方面的问题: 合适的目标函数和适当的寻优策略 [4]。

2.1 目标函数的建立

在给定控制器结构的情况下, 控制器优化设计的目标是通过优化控制器参数 ($\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n$), 使得实际的控制性能与期望的控制性能之间的差别最小化。

考虑到一个控制器要适用于一定的时间范围, 因此要研究一定时间范围内的控制器优化设计问题。设考虑的时间范围为 $[t_b, t_f]$ 。令 $L_{ii}(\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n)$ 和 $\Phi_{ii}(\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n)$ [5] 分别表示由控制器参数 ($\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n$) 决定的姿态控制系统在时间 t 的 m_i 个关键频率 $\omega_{t1}, \dots, \omega_{tm_i}$ 上的幅频特性和相频特性。假定对时间 t 的幅频特性和相频特性的要求为:

$$L_{ii} \in (L_{ii}^D, L_{ii}^U), \Phi_{ii} \in (\Phi_{ii}^D, \Phi_{ii}^U) \quad i = 1, \dots, m_i, t = t_b, t_b + 1, \dots, t_f$$

这里, 幅频和相频的上下界 $L_{ii}^D, L_{ii}^U, \Phi_{ii}^D, \Phi_{ii}^U$ 可能是 ∞ 或 $-\infty$ 。定义函数 [6]

$$F_{ii}(L_{ii}) = \begin{cases} L_{ii}^D - L_{ii}, & \text{if } L_{ii} \leq L_{ii}^D \\ 0, & \text{if } L_{ii}^D \leq L_{ii} \leq L_{ii}^U \\ L_{ii} - L_{ii}^U, & \text{if } L_{ii} > L_{ii}^U \end{cases} \quad (8)$$

$$G_{ii}(\Phi_{ii}) = \begin{cases} \Phi_{ii}^D - \Phi_{ii}, & \text{if } \Phi_{ii} \leq \Phi_{ii}^D \\ 0, & \text{if } \Phi_{ii}^D \leq \Phi_{ii} \leq \Phi_{ii}^U \\ \Phi_{ii} - \Phi_{ii}^U, & \text{if } \Phi_{ii} > \Phi_{ii}^U \end{cases} \quad (9)$$

$$i = 1, \dots, m_i, t = t_b, t_b + 1, \dots, t_f$$

调节器的优化设计问题可定为使式(10)(目标函数)的值为0, 或与要求相比在误差允许范围之内, 则控制系统的幅频特性和相频特性的要求得到满足。

$$\sum_{t=t_b}^{t_f} \sum_{i=1}^{m_i} \{ F_{ii}[L_{ii}(\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n)] + G_{ii}[\Phi_{ii}(\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, k = 1, \dots, n)] \} \quad (10)$$

2.2 单纯形优化方法

可用单纯形算法来解决这一优化设计问题, 单纯形法的基本思想是: 在寻优参数空间中构造一个超几何图形, 计算此图形各顶点的目标函数值并比较它们的大小, 然后抛弃最坏点(即目标函数值最大的点), 代之以超平面上的新点, 从而构成一个新的超几何图形, 循环往复, 逐步逼近于极小值点 [7]。

根据以往的设计经验来选定初始的控制器参数。

$$\alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_n^{(0)}) = (\omega_{k1}, \xi_{k1}, \omega_{k2}, \xi_{k2}, \dots, \omega_{k+1}, \xi_{k+1}, \omega_{k+2}, \xi_{k+2}) \quad (11)$$

已选定 $\alpha^{(0)}$ 和任意两点之间的距离 a (即正规单纯形的边长), 于是 $(n+1)$ 个点的坐标为

$$\begin{cases} \alpha^{(0)} = (\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, \dots, \alpha_n^{(0)}) \\ \alpha^{(1)} = (\alpha_1^{(0)} + p, \alpha_2^{(0)} + q, \alpha_3^{(0)} + q, \dots, \alpha_n^{(0)} + q) \\ \dots \\ \alpha^{(i)} = (\alpha_1^{(0)} + q, \alpha_2^{(0)} + q, \dots, \alpha_i^{(0)} + p, \dots, \alpha_n^{(0)} + q) \\ \dots \\ \alpha^{(n)} = (\alpha_1^{(0)} + q, \alpha_2^{(0)} + q, \dots, \alpha_{n-1}^{(0)} + q, \alpha_n^{(0)} + p) \end{cases} \quad (12)$$

只要知道两点间的距离 a , 就可以求出 p 和 q 的值, 从而求出 $\alpha^{(0)}, \alpha^{(1)}, \dots, \alpha^{(n)}$ 。

$$q = \frac{\sqrt{n+1}-1}{n\sqrt{2}}a, p = \frac{\sqrt{n+1}+n-1}{n\sqrt{2}}a \quad (13)$$

就可以确定正规单纯形 $(n+1)$ 个顶点的坐标。显然, $\alpha^{(0)} - \alpha^{(1)}, \alpha^{(0)} - \alpha^{(2)}, \dots, \alpha^{(0)} - \alpha^{(n)}$ 为 n 个线性无关的向量^[8]。

当正规单纯形的 $(n+1)$ 个顶点确定后, 便可以在 n 维参数空间中进行寻优搜索。原始单纯形法在大多数情况下以固定步长 a 进行翻转操作, 收敛速度较慢。为了便于实用并能有较快的收敛速度, 通常会对原始单纯形法作一些改进。

改进单纯形调优法的基本思想是: 给定初始点 $\alpha^{(0)}$, 产生初始单纯形 S_0 , 通过反射、扩张、压缩、收缩一系列动作将单纯形翻滚、变形, 从而产生一系列单纯形 S_1, S_2, S_3, \dots , 逐渐向最小点靠拢。当满足精度指标时, 迭代停止, 取当前单纯形的最好顶点 (目标值最小) 作为极小点的近似^[9]。

根据上述系统参数优化和单纯形法的原理以及绝大多数控制系统的类型建立的控制器 (调节器) 参数最优优化控制系统一般如图 1 所示^[10]。

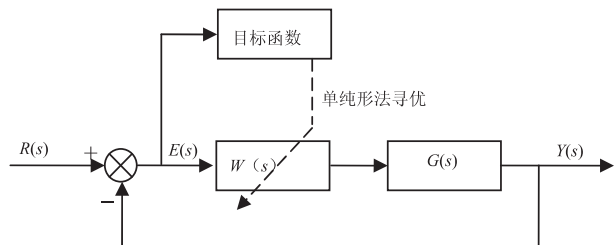


图 1 参数优化控制系统结构

其中, $W(s)$ 为控制器 (调节器) 的传递函数, $G(s)$ 为被控对象的传递函数。

3 实验结果

由于实际系统中会关心频率特性在一些关键频率

点范围内是否满足最低的裕度要求^[11], 所以需要从初始条件来调节控制器参数使其最坏的点也满足要求。

关键频率点通常取以下这些点: 控制器幅频与被控对象幅频的交点对应的频率点, 控制器相频与被控对象相频的交点对应的频率点, 被控对象幅频峰值所对应的频率点, 被控对象相频峰值所对应的频率点。

例如对某航空箭体控制器参数优化, 使得系统在下述频率范围: $[1.9 \text{ Hz}, 2.2 \text{ Hz}]$, $[4.2 \text{ Hz}, 6.2 \text{ Hz}]$, $[17.1 \text{ Hz}, 20.1 \text{ Hz}]$, $[21.0 \text{ Hz}, 23.0 \text{ Hz}]$, $[48.7 \text{ Hz}, 50.7 \text{ Hz}]$, $[71.2 \text{ Hz}, 73.2 \text{ Hz}]$, $[100.8 \text{ Hz}, 102.8 \text{ Hz}]$, $[129.8 \text{ Hz}, 131.8 \text{ Hz}]$ 处的幅频范围分别为 (单位: dB)

$(-3, 3)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$, $(-\infty, -10)$

相位范围分别为 (单位: 度):

$(-150, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$, $(-\infty, \infty)$

根据经验可知道控制器的参数的初始值:

$$\omega_{11}^0 = 20.0, \xi_{11}^0 = 0.03, \omega_{12}^0 = 5.0, \xi_{12}^0 = 0.7$$

$$\omega_{21}^0 = 50.0, \xi_{21}^0 = 0.03, \omega_{22}^0 = 20, \xi_{22}^0 = 0.7$$

$$\omega_{31}^0 = 70.0, \xi_{31}^0 = 0.03, \omega_{32}^0 = 20, \xi_{32}^0 = 0.7$$

$$\omega_{41}^0 = 100.0, \xi_{41}^0 = 0.03, \omega_{42}^0 = 30, \xi_{42}^0 = 0.7$$

然后根据系统方程求出整体传递函数并由关键频率点和裕度要求得出目标函数, 最后根据单纯形法得出满足裕度要求的控制器参数。

图 2 和图 3 是箭体加上控制器之后, 在参数优化前后的图形的对比。

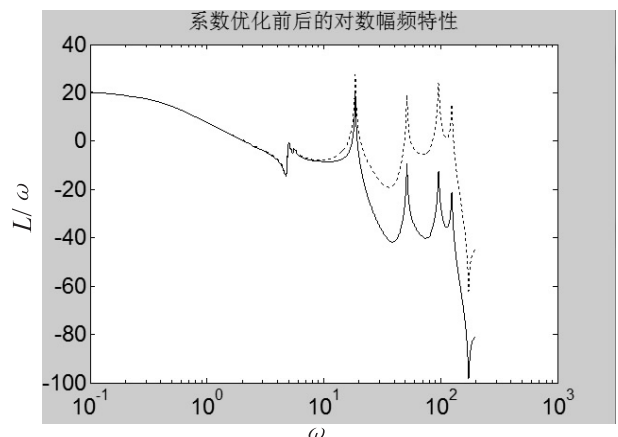


图 2 控制器系数优化前 (虚线)

后 (实线) 系统对数幅频特性

对于箭体幅频的主要性能由高频控制, 箭体相频由低频控制着。从图中可以看出一开始在某些关键频率点处系统存在不稳定的情况, 但优化后频率特性曲线整体基本向下移了, 系统不但稳定了而且裕度也变

大了。所以大多数情况下总可以通过调节控制器参数使系统的裕度满足要求。

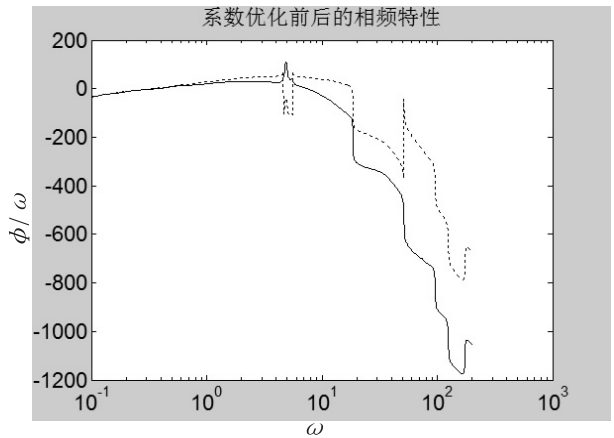


图3 控制器系数优化前(虚线)后(实线)系统相频特性

4 结束语

文中的优化方法采用的是改进的单纯形法。单纯形法具有物理概念清晰、算法简洁、控制参数收敛快、计算机工作量小等特点,适合于在线优化。

但是在对某些控制系统的优化过程中发现,并不是任意设置参数,都能获得较好的效果,单纯形算法也有很多缺点^[12-14]:

1) 寻优参数初始值的设定及优化参数的选择对搜索结果有很大的影响,当初值偏离最优值较远时,往往搜索不到最优值。

2) 在寻优参数较多以及目标函数较大的情况下,容易造成单纯形算法的迭代次数增多,收敛速度变慢。

3) 在迭代过程中,有时会出现单纯形最大边长较长,而单纯形体积却已接近于零这一病态现象,从而导致的退化现象和搜索失败。

所以根据经验所给出的控制器参数的初始值往往

会影响到整个寻优过程。

参考文献:

[1] 汪瑞芳,陈东义.连续系统仿真及应用技术[M].重庆:重庆大学出版社,2009.

[2] 蒋珉.MATLAB 程序设计及应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2010.

[3] 栗塔山.最优化程序原理与算法程序设计[M].长沙:国防科技大学出版社,2008.

[4] 蒋珉.控制系统计算机仿真[M].北京:电子工业出版社,2006.

[5] Hanselman D, Littlefield B. Mastering MATLAB7[M]. [s. l.]:Prentice Hall PRT,2004.

[6] Breton J L,Boudousq V,Rohmer J F,et al. A comparative study of Powell and Downhil 's simplex algorithms for a fast multimodal surface matching in brain imaging[J]. Computerized Medical Imaging and Graphics,2001,25(4):287-297.

[7] Seller K,Noelle F,Steffen B,et al. Investigation of mathematical methods for efficient optimization of aqueous two-phase extraction[J]. Journal of Chromatography B,2000,743(1-2):21-30.

[8] Headland P,Gustavsson A. Design and evaluation of an effective modified simplex method[J]. Analytica Chimica Acta, 1999,391(3):257-267.

[9] 孙亮.自动控制原理[M].北京:北京工业大学出版社,2010.

[10] 刘晓谦,王勇,穆顺勇.基于单纯形法的PID控制器参数优化设计[J].计算机仿真,2004,21(11):191-193.

[11] 陆会明,董艳.基于COM技术的控制系统优化组件的实现及应用[J].现代电力,2002,19(6):81-87.

[12] 邓勃,闵顺耕.几种单纯形优化方法优化性能的比较研究[J].分析化学,1994,22(3):272-277.

[13] 王宏,李洪,朱军.PID调节器参数优化设计的一种改进方法[J].黑龙江电子技术,1997,10(1):31-33.

[14] 孙锐睿,仇汝臣,周田惠.单纯形的加速算法[J].南京理工大学学报,2003,27(2):209-213.

(上接第159页)

实现[J].计算机工程与设计,2010,31(1):94-97.

[5] 秦贞远,马素霞,齐林海.电能质量数据交换平台的关键问题研究[J].计算机技术与发展,2011,21(4):206-209.

[6] 王玉标,饶锡如,何盼.异构环境下数据库增量同步更新机制[J].计算机工程与设计,2011,32(3):948-951.

[7] 李菲,张新家,袁林.基于Web Services的群组数据交换系统的研究与实现[J].计算机技术与发展,2011,21(12):186-190.

[8] Xu Jun, Lee W Y. Sustaining availability of Web services under distributed denial of service attacks[J]. IEEE trans on

computers,2003,52(2):195-208.

[9] Vimercati S, Marrara S, Samarati P. An access control model for querying XML data[C]//Proc of the workshop on secure web services. Fairfax, VA, USA:[s. n.],2005:36-42.

[10] 耿飙,宋余庆,梁成全,等.XML文档到关系数据库映射方法的研究[J].计算机应用研究,2010,27(3):951-954.

[11] 刘艳辉,董碧丹,张峰.数据交换平台的分布式应用研究[J].计算机工程与设计,2009,30(16):3780-3782.

[12] 孙丕石,曹占峰,王亚玲,等.国家电网公司数据交换平台研发与应用[J].电网技术,2008,32(22):62-67.

基于频率特性的控制器优化设计

作者：[王德金](#)，[蒋珉](#)，[汪峥](#)，[WANG De-jin](#)，[JIANG Min](#)，[WANG Zheng](#)

作者单位：[东南大学 自动化学院 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室](#), 江苏 南京, 210096

刊名：[计算机技术与发展](#)

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(5)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201405039.aspx