

文章编号: 1001-0920(2007)11-1255-04

基于信息对称的简捷控制

张显库, 金一丞

(大连海事大学 航海动态仿真与控制实验室, 辽宁 大连 116026)

摘要: 阐述信息对称对控制理论应用的重要意义. 通过简化复杂的鲁棒控制算法和加强算法的执行来增加系统的信息对称, 使复杂系统实现简捷控制. 从仿真结果可以看出, 简捷控制也可达到无超调、无静差、调节时间快、对模型摄动具有鲁棒稳定性. 简捷控制的准确性好, 可靠性高, 鲁棒性强, 易于达到信息对称, 因此可用性强, 实际应用前景广阔.

关键词: 控制理论; 简捷控制; 信息对称; 闭环增益成形

中图分类号: TP11 **文献标识码:** A

Simple and direct control based on symmetric information

ZHANG Xian-ku, JIN Yi-cheng

(Laboratory of Marine Simulation and Control, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China. Correspondent: ZHANG Xian-ku, E-mail: zhangxk@dlnu.edu.cn)

Abstract: Momentous significance of symmetric information to control theory is proposed. The symmetric information of a system is strengthened by simplifying a complex robust control algorithm and guaranteeing the actuating of the algorithm so that a complex system has a simple and direct control (SDC). The simulation results show that the simple and direct control can also reach rapid settling time without overshoot and steady-state error, and has satisfactory robust stability to model perturbation. The simple and direct control has satisfactory accuracy, high reliability and strong robustness. It is simple to reach symmetric information, its feasibility is fine, and its application prospect is wide.

Key words: Control theory; Simple and direct control (SDC); Symmetric information; Closed-loop gain shaping

1 引言

在自动控制近百年的发展过程中, 人们对被控过程的认识由浅到深, 可实施控制的系统也由简单到复杂, 而简单有效的控制方法一直是人们不断追求的目标.

起初人们只能对一些简单的系统进行一些简单的控制, 如比例控制; 然后是可简化的复杂系统用简单的控制方法来控制, 如 PID 控制; 后来是简单或可简化的复杂系统用复杂的控制方法进行控制, 如最优控制; 再后来是复杂的系统尤其是有模型摄动的系统用复杂的控制方法来控制, 如鲁棒控制; 最后发展成为复杂的系统用有复杂理论支持的简捷控制, 如闭环增益成形算法^[1,2]. 人们试图将简单有效的 PID 算法复杂化, 以期提高其控制精度. 如具有适应性的 PID, 具有鲁棒性的 PID, 具有智能的 PID

等^[3].

在控制的发展进程中, 数学模型的建立起到了重要作用. 起初是对简单的系统建立简单的数学模型; 后来是对复杂系统简化, 建立简单的数学模型; 再后来是对复杂系统建立复杂的数学模型; 最后是对复杂系统建立复杂的数学模型后, 简化为稍简捷的数学模型. 对于某些系统甚至可以不建立数学模型, 即采用先进的控制算法进行控制. 建模方法也由最初的按机理的数学推导和实验方法, 发展为系统辨识法、键图法、神经网络训练法、模糊优化法、人工智能辅助法、综合法等^[4].

控制也由最初的节省劳动力、安全性等走向高精度、快速、节能等人无法完成的功能. 所有的控制方法要想在实际工程中好用, 必须有信息对称作为保证. 如果高深的复杂控制理论因为人们难于理解, 就很难在实际中广泛应用; 先进的算法如果用于旧

收稿日期: 2006-06-12; 修回日期: 2006-11-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474014, 60504017); 国家 973 计划项目(2002CB312103).

作者简介: 张显库(1968—), 男, 辽宁辽阳人, 教授, 博士生导师, 从事船舶运动控制、鲁棒控制等研究; 金一丞(1944—), 男, 浙江上虞人, 教授, 博士生导师, 从事交通信息工程、动态仿真等研究.

的执行器,就不能达到所希望的控制效果^[5].

现在的理论研究多半是把简单的道理复杂化,尤其是在控制界,大多数理论为数学家所提出,许多权威的控制学术期刊发表的论文,数学推导太多,该领域的专家、教授和博士都很难看懂.这里有两方面原因:(1)研究时缺乏对实际工程背景的理解和掌握,没有实际工程的经验,故不能从本质上解决问题,而是绕弯,最后导致算法复杂化;(2)数学家的介入使得问题进一步数学化,实际工程人员看不懂,难以应用和简化,有些学术期刊拒稿的原因竟是因为数学不够复杂和深奥,有些人为了发表论文故意将一些已经搞清楚的问题数学化.

2 信息对称理论

研究的本质是将实际问题数学化,用理论进行分析,然后把理论应用于解决实际工程问题.在解决实际问题的过程中,除了理论本身以外,还要对实际问题进行研究,理论与工程之间还有信息对称及传递的问题.目前,控制理论的研究非常深入,而控制工程的研究则有所欠缺,在控制理论与控制工程之间建立信息传递通道,即进行信息对称的研究还非常少.造成的局面是控制理论的研究非常繁荣,而控制工程90%还在应用PID控制.

信息对称化理论的实质是拨开复杂理论的云雾看清本质,找到其精髓所在,将其简化,使之工程上可用;或给深奥复杂的理论以新的解释,使其物理意义更明显,更易理解和掌握;或使先进的理论配以先进的执行机构,使信息的传递对称化.

实际工程应用时需要将复杂的道理简单化,这包含两方面含义:(1)从工程意义上简化理论的算法,使之工程上可用;(2)用明显的物理意义或深刻的物理理解重新解释现有理论,从而达到理论与应用之间的信息对称.

经济学中有一种信息不对称理论,论述的是当信息不对称时市场会产生逆向选择^[5].在控制界,信息对称同样重要,否则,先进的控制算法因难于理解而只能被束之高阁,难以应用于实际工程;或者应用于实际工程,却因未得到良好的执行,影响了其控制

效果.

3 基于闭环增益成形算法的简捷控制

闭环增益成形算法是H鲁棒控制理论的工程应用简化^[1,6],其本质是利用H鲁棒控制理论混合灵敏度算法的结果(即灵敏度函数 S 和补灵敏度函数 T 的形状),用构造的方法设计出鲁棒控制器,且所用参数都有工程意义,最终的算法比较简捷,易于达到信息对称.文献[3]证明了一阶闭环增益成形算法就是PID算法,并给出其应用;文献[2]是闭环增益成形算法应用于MIMO系统的实例;文献[7]是闭环增益成形算法应用于SIMO系统的实例;文献[8]是闭环增益成形算法应用于不稳定系统的实例;文献[9,10]是闭环增益成形算法应用非线性系统的实例.

H鲁棒控制算法通过对闭环传递矩阵的范数优化问题求解控制器,在演绎上是处理矩阵的奇异值,而不是传递矩阵本身,因而不得不引用艰深的数学工具,求解过程复杂;而其理论严密性优势的发挥,最终取决于颇具任意性的加权矩阵的选取,进而使灵敏度矩阵 S 和补灵敏度矩阵 T 成形,以保证系统的鲁棒性和鲁棒稳定性.闭环系统具有实际工程意义的参数,如带宽频率、关门斜率和闭环频谱峰值与权函数之间的关系模糊,因而其鲁棒控制器的设计需要权函数迭代的经验^[6].

闭环增益成形算法处理传递矩阵时,利用了H鲁棒控制的结果,并用具有工程意义的4个参数构造鲁棒控制器,简化了理论.通过引入二阶深严格真被控对象,将一阶闭环增益成形算法变成PID控制^[3];通过引入镜像映射的概念,将闭环增益成形算法应用于不稳定系统^[8].文献[9,10]通过对非线性系统理论的深入理解,得出非线性控制器设计的本质是系统的非线性项加上一个线性的控制器.这一结论适用于SISO系统的基于精确反馈线性化的非线性控制和基于Backstepping的非线性控制,从而使闭环增益成形算法变成工程上可用的算法,是一种信息对称的简捷控制算法.

表1给出了4类控制算法的优缺点、可用性及

表1 4类控制的对比

	优点	缺点	可用性	目前状况
简单系统 简单控制	易于理解 方便应用	精度稍低	易于达到信息对称 可用性强	实际应用广泛
简单系统 复杂控制	准确性好	较难理解和掌握	不易达到信息对称 可用性较差	实际应用较少
复杂系统 复杂控制	较为准确	难以理解和掌握	难以达到信息对称 可用性很差	实际应用很少
复杂系统 简捷控制	准确性好,可靠 性高,鲁棒性强	要掌握复杂的理论 抓住本质将其简化	易于达到信息对称 可用性强	应用前景广阔

目前状况的对比. 从表 1 可以看出, 复杂系统的简捷控制, 因其准确性好、可靠性高、鲁棒性强和易于达到信息对称的优点, 使其在实际中可用, 具有广阔的应用前景.

4 系统的仿真结果

本文以闭环增益成形算法的特例为 PID 算法及其应用实例, 说明基于信息对称的简捷控制的有效性.

定义 1 如果二阶严格真对象 $G = \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$ 的系数 $b_1 = 0$, 则称 G 为二阶深严格真对象.

通过模型降阶或 Bode 图近似等方法, 一个实际的工程对象可化成二阶深严格真对象. 由奇异值曲线分析可知, 实际的被控对象一般都是低通的, 将其化成二阶深严格真对象, 意味着在低频段用奇异值为常数而高频段用关门斜率 -40 dB/dec 或 -20 dB/dec 加 -40 dB/dec 的奇异值曲线来近似. 这样的近似在实际工程应用中是可行的, 如图 1 所示.

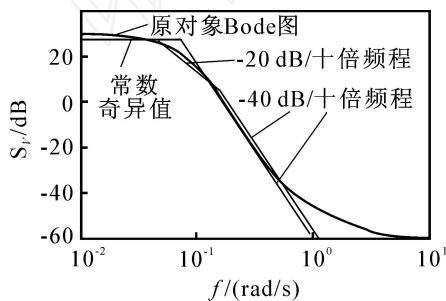


图 1 原对象的奇异值曲线近似由一阶闭环增益成形算法^[1-3]得

$$K = \frac{1}{GT_1 s} = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_0 T_1 s} = \frac{a_1}{b_0 T_1} + \frac{a_0}{b_0 T_1 s} + \frac{a_2 s}{b_0 T_1} \quad (1)$$

其中 T_1 为根据系统的带宽确定的时间常数.

可以看出, 式(1) 是一个标准的 PID 控制器, 其参数为

$$k_p = \frac{a_1}{b_0 T_1}, k_i = \frac{a_0}{b_0 T_1}, k_d = \frac{a_2}{b_0 T_1}.$$

于是, PID 参数便可由式(1) 通过理论推导得出.

考虑如下被控对象^[11]:

$$G(s) = 1/(s + 1)^5. \quad (2)$$

将式(2) 降为 2 阶, 即

$$G(s) = 1/(2s + 1)^2. \quad (3)$$

图 2 给出了数学模型降阶前后的 Bode 图比较. 其中: 曲线 为降阶前的 Bode 图, 曲线 为降阶后的 Bode 图. 从图中可以看出, 在低频范围内 ($< 1 \text{ rad/s}$), 二者的频谱基本重合, 说明降阶模型

是合理的. 将式(3) 代入(1), 并取截止频率 $1/T_1 = 1/4.8 \text{ rad/s}$, 便可得到鲁棒 PID 控制器的各参数.

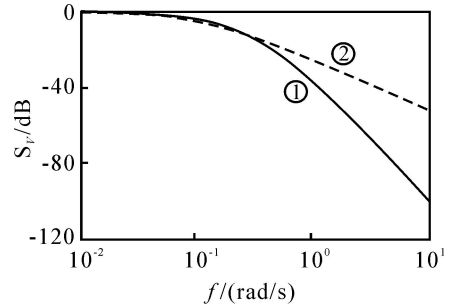


图 2 Bode 图比较

将鲁棒 PID 控制器与式(2) 构成的闭环用 Matlab5.2 中 Simulink 进行仿真, 并与文献[11] 用 ISTE 方法求得的最优 PID 控制器的仿真结果进行比较. 最优 PID 控制器的参数为

$$k_p = 1.618, k_i = 0.307, k_d = 1.386.$$

图 3 给出了鲁棒 PID 算法和 ISTE 最优 PID 算法的仿真结果. 其中: 曲线 为 $1/T_1 = 1/4.8 \text{ rad/s}$ 时鲁棒 PID 算法的仿真结果, 曲线 为 $1/T_1 = 1/3 \text{ rad/s}$ 时鲁棒 PID 算法的仿真结果, 曲线 为 ISTE 最优 PID 算法的仿真结果. 给出曲线 的目的是为比较鲁棒 PID 算法取 ISTE 最优 PID 算法同样上升时间的仿真结果.

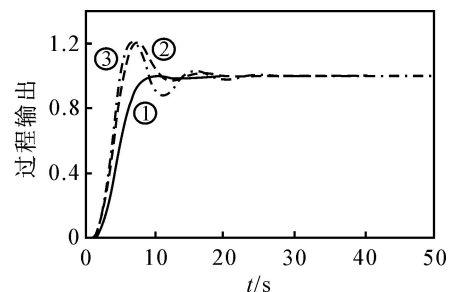


图 3 仿真结果比较

图 4 给出了最优 PID 算法和鲁棒 PID 算法在 $1/T_1 = 1/4.8 \text{ rad/s}$ 时的鲁棒稳定性仿真结果, 即将原数学模型加上一个 e^{-2s} 纯滞后环节而控制器参数不变的仿真结果. 其中: 曲线 为鲁棒 PID 算法的稳定性, 曲线 为最优 PID 算法的稳定性.

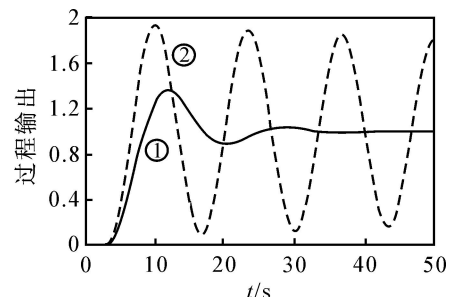


图 4 鲁棒稳定性比较

分析图 3 和图 4 可得出以下结论: 1) 鲁棒 PID 控制效果比文献[11] 的最优 PID 控制好; 2) 当

被控对象的数学模型发生变化时,鲁棒 PID 算法的控制性能变差,但超调量仍小于 40%,系统稳定,而最优 PID 控制器开始出现周期振荡,说明鲁棒 PID 算法比最优 PID 算法具有更好的鲁棒稳定性;3) 本文提出的鲁棒 PID 算法简捷,易于达到信息对称,因此较为实用。

5 结 论

本文旨在阐述信息对称对控制理论应用的重要意义,强调还原复杂理论的本来面目,看清本质,找到其精髓所在,将其简化,使之工程上可用;或给深奥复杂的理论以新的解释,使其物理意义更明显,更易理解和掌握。通过简化复杂的鲁棒控制算法及加强算法的执行来增加系统的信息对称,使复杂系统实现简捷控制。从仿真结果可以看出,简捷控制也可达到无超调、无静差、调节时间快、对模型摄动具有鲁棒稳定性。简捷控制的准确性好,可靠性高,鲁棒性强,因其简捷而易于达到信息对称,所以可用性高,实际应用前景广阔。

参考文献(References)

- [1] Zhang X K, Jia X L. Simplification of H mixed sensitivity algorithm and its application[J]. Automatic Control and Computer Sciences, 2002, 36(3): 28-33.
- [2] Zhang X K, Jin Y C. Control of a multivariable high purity distillation column based on closed-loop gain shaping algorithm[J]. Int J of Information Technology, 2005, 11(5): 116-123.
- [3] 张显库, 贾欣乐. 求 PID 参数新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(8): 4-5.
(Zhang Xian-ku, Jia Xin-le. A new method for solving PID parameters [J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(8): 4-5.)
- [4] 张显库, 金一丞. 控制系统建模与数字仿真[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2004: 29-86.
(Zhang Xian-ku, Jin Yi-cheng. Modelling and digital simulation for control system [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2004: 29-86.)
- [5] 张显库. 不对称信息理论在船舶运动控制中的应用[J]. 中国造船, 2006, 47(1): 55-59.
(Zhang Xian-ku. Unsymmetric information theory and its application in ship motion control[J]. Shipbuilding of China, 2006, 47(1): 55-59.)
- [6] 贾欣乐, 张显库. 船舶运动智能控制与 H 鲁棒控制[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002: 247-297.
(Jia Xin-le, Zhang Xian-ku. Intelligent control and H robust control for ship motion [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2002: 247-297.)
- [7] Zhang X K, Jin Y C. A kind of robust rudder roll-damping system[C]. Proc of Int Symp on System and Control in Aerospace and Astronautics. Harbin, 2006: 1151-1154.
- [8] Zhang X K. New method on design of robust controller for unstable process[C]. Proc of Int Conf on Machine Learning and Cybernetics. Guangzhou, 2005: 643-648.
- [9] 张显库, 杨盐生. 不对称信息理论与非线性鲁棒控制算法[J]. 控制与决策, 2005, 20(11): 1241-1244.
(Zhang Xian-ku, Yang Yan-sheng. Asymmetric information theory and nonlinear robust control algorithm[J]. Control and Decision, 2005, 20(11): 1241-1244.)
- [10] 张显库, 郭晨, 杜佳璐, 等. 不对称信息理论与非线性逆推鲁棒控制算法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 66-71.
(Zhang Xian-ku, Guo Chen, Du Jia-lu, et al. Asymmetric information theory and nonlinear backstepping robust control algorithm[J]. J of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 66-71.)
- [11] Zhuang M, Atherton D P. Automatic tuning of optimum PID controllers[J]. IEE Proc D, 1993, 140(3): 216-224.

2007 CDC 年会论文全部被 ISTP 检索

本刊讯 由《控制与决策》编辑部编辑出版的《2007 中国控制与决策学术年会论文集》,已正式进入美国 ISTP 检索系统,所有文章全部被检索,请作者自行查询。这是对本次会议论文集的肯定与支持,对广大作者也是一个好消息。希望广大作者与我们共同努力,进一步提高论文集的学术水平和出版质量,以保持会议论文集的强劲发展势头!