

文章编号:1000-582X(2002)04-0022-04

基于知识的不确定性复杂系统的稳定性分析^{*}

李太福¹, 杨志², 盛朝强², 谢昭莉²

(1.重庆工学院电子工程系, 重庆 400050; 2.重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

摘要:稳定性概念是含糊的,但稳定性又是动态系统的基本特性,是各种控制系统正常运行的前提条件。对难于或不能建立数学模型的不确定性复杂控制系统要分析其稳定性至今还是挑战性的难题,很难借鉴稳定性数学判据直接判断一个系统运行是否稳定。采用将绝对稳定性和启发式搜索自锁定概念相结合的分析方法,可以在更大范围内对基于知识控制模型的不确定性控制系统通过调节自镇定回路的参数来分析系统的稳定性,工程实践表明,对不确定性复杂系统的稳定性分析方法在实际物理控制系统中是有效和可用的。

关键词:知识模型; 不确定性; 复杂控制系统; 稳定性分析

中图分类号:TP237;O231

文献标识码:A

传统的控制系统稳定性分析设计方法一般是在对象的数学模型基础上,根据对象的频域或时域特性,在系统校正环节对稳定性加以保证。只要设计中留有充分的稳定裕度,即使对象参数在一定范围发生变化,系统仍能稳定运行。但这种设计方法的前提是对象的数学模型必需精确已知,然后用稳定性(或不稳定性)定理判定系统的稳定性。由于稳定性只是一个定性的概念,为保证在参数等扰动情况下系统仍能正常运行,可根据对象特性及运行环境设计适当的稳定裕度,以确保即使在最恶劣的条件下系统仍能稳定运行。因为设计中既要保证控制系统的动静态控制过程的品质指标,又要保证系统的稳定运行,因此综合校正设计实质上是一个折衷过程。对不确定性复杂系统由于其控制模型主要不是基于数学模型,因此传统的分析稳定性的方法,如经典控制理论中的奈魁斯特稳定判据^[1]、近代控制理论中的李雅普诺夫稳定性分析方法^[2]等并不适用,但文献[3-4]却给人们以启示,可以把控制系统作为一个整体研究其外特性,即输入输出特性,如输入有界输出也有界那么系统就是稳定的。大量工程实践证明,这种分析稳定性的方法是有效而实用的。本文就有关问题作些讨论。

1 传统稳定性理论的局限性

随着科学技术的高速发展,控制系统的规模越来越

越大,系统结构和信息关系也愈来愈复杂,对自动化控制技术的要求也越来越高,传统控制理论在不同侧面都面临着新的挑战,其中控制系统的稳定性理论显得尤为突出。经典控制理论中的奈魁斯特判据是在单输入单输出的线性控制系统分析中导出的,对非线性控制系统不加修正或作某些技术处理就无法使用;在近代控制理论中李雅普诺夫稳定性理论既适合线性系统也适合非线性系统,不仅单输入单输出系统而且多输入多输出系统也同样适用,但分析稳定性问题的前提是系统必须有严格的数学模型。对不确定性复杂系统其模型很难说是严格的定量数学模型,其模型特性往往是采用微观与宏观相结合、结构与功能相结合、静态与动态相结合、决定性与模糊性相结合、确定性与随机性相结合以及数学解析模型和知识系统相结合的广义模型,它不是数学解析模型,因此传统的分析系统稳定性的定理、判据等对不确定性复杂系统原则上是不适合的。但是应该注意,系统的稳定性与能控能观性概念一样都是系统本身的特性,是由系统自身的结构与参数决定的,只要调整系统的结构与参数就可能改变系统的稳定性。因此在分析稳定性时,更多的现场控制工程师并不从稳定性定理或判据出发,而是强调稳定性的实质,只要在允许范围内,控制系统的输出能自动跟踪控制系统的输入(对定值控制一样适用),即控制系统的输入有界、其输出也有界,控制系统就是稳定

• 收稿日期:2002-01-10

基金项目:重庆市应用基础研究项目资助(6803)

作者简介:李太福(1971-),男,四川资阳人,重庆工学院讲师,重庆大学博士研究生,主要从事智能信息处理与系统故障诊断方向的研究。

的。为保证系统可靠地稳定运行,人们对控制系统的绝对稳定性给予了更多的关注。下面简略提及一下控制系统的绝对稳定性概念,从中可以得到某些有益的启迪。

2 控制系统的绝对稳定性

考虑方程组

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + \varphi(\sigma)b \\ \frac{d\xi}{dt} = \varphi(\sigma), \sigma = e^T x - v\xi \end{cases} \quad (1)$$

其中 x 是 n 维向量,表示控制系统的某种状态,一般称为状态变量, ξ 是辅助变量, σ 是反馈信号,常量 v 和向量 b 、 e 是控制参数,函数 $\varphi(\sigma)$ 表示非线性特征,它满足:

$$\begin{cases} 1^\circ \varphi(\sigma) \text{ 连续}, \varphi(0) = 0, \text{ 而当 } \sigma \neq 0 \text{ 时}, \sigma\varphi(\sigma) > 0 \\ 2^\circ \Phi(\sigma) = \int_0^\sigma \varphi(\sigma) d\sigma \rightarrow \infty \text{ (当 } |\sigma| \rightarrow \infty \text{)} \end{cases} \quad (2)$$

只要函数 $\varphi(\sigma)$ 满足式(2),则式(1)的零解 $x = 0$ 是全局渐近稳定的,即零解 x 稳定且对于所有取任意初始向量的解 $x(t)$,当 $t \rightarrow \infty$ 时均趋于 $x = 0$ 。满足上述条件的式(1)称为绝对稳定的^[5]。

若式(1)中 $v = 0$ 则可简化为

$$\frac{dx}{dt} = Ax + \varphi(e^T b) \quad (3)$$

相应的控制系统称为直接控制系统。而当 $v \neq 0$ 时式(1)所对应的控制系统则称为间接控制系统。

对 $v \neq 0$ 的式(1)可以化为含 x 和 σ 的导数的形式,即

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + \varphi(\sigma)b \\ \frac{d\sigma}{dt} = e^T Ax + \rho\varphi(\sigma), \rho = e^T b - v \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中变量 x 、 σ 共有 $n+1$ 个,故其绝对稳定的含义变为满足条件式(1)的任意函数 $\varphi(\sigma)$,式(4)的零解 $x = 0, \sigma = 0$ 是全局渐近稳定的。

本文的目的不是去研究式(1)、式(2)、式(3)、式(4)的解,而是想通过分析确定性控制系统绝对稳定性的必要条件和充分条件,说明调节系统的结构和参数可以改变系统的稳定性,从而得到有指导意义的结论。为此有必要简略提及一下稳定性分析的简单过程。

间接控制系统的式(1)亦即其等价组式(4)绝对稳定的必要条件是不难导出的,必要条件是矩阵 A 没有正实部的特征值,也没有零特征值;当矩阵 A 的特

征值均有负实部时,要求控制参数 $v > 0$ 。要讨论充分条件说明全局渐近稳定性,可构成合适定理条件的李雅普诺夫函数,并解李雅普诺夫矩阵方程和应用李雅普诺夫第二定理,如果能找到一个负定的对称矩阵 C ,而由矩阵方程 $A^T B + BA = C$ ($C = C^T < 0$) 所确定的 B 满足式(5)

$$\begin{cases} d = Bb + \frac{1}{2} A^T e \\ \rho = e^T C^{-1} d \end{cases} \quad (5)$$

则式(4)是绝对稳定的。

例如,某个间接控制系统,当 $v = 3/4, \rho = -1$,其方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} = -2x_1 - 3x_2 + \frac{1}{4}\varphi(\sigma) \\ \frac{d\sigma}{dt} = 2x_2 + kx_2 - \varphi(\sigma), \sigma = (k-3)x_1 - x_2 - \frac{3}{4}\xi \end{cases} \quad (6)$$

对应式(4),有

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/4 \end{bmatrix}, e = \begin{bmatrix} k-3 \\ -1 \end{bmatrix}$$

由于 A 的特征值为 $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -2$,对负定对称矩阵可由矩阵方程求得对称矩阵 $C = \begin{bmatrix} -4 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 可由矩阵方程 $A^T B + BA = C$ 求得对称矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 1 & 1/2 \end{bmatrix}, \text{ 由式(5)可求得 } d = \begin{bmatrix} 5/4 \\ k/2 + 1/8 \end{bmatrix} \text{ 和}$$

$k < \frac{\sqrt{39}-1}{4}$,即只要 k 小于 $\frac{\sqrt{39}-1}{4}$,式(6)就是绝对

稳定的。如选 $C = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$,则调节参数 k 的范围

将缩小为 $k < \frac{3\sqrt{94}-4}{24}$ 。

通过上述较为简单的非线性系统稳定性分析说明:1)稳定性分析是相当繁琐的,而得出的只是一个定性分析结论,能构造出满足定理需要的李雅普诺夫函数是绝对稳定的,但由于种种原因未能构造出满足需要的李雅普诺夫函数,这个系统未必是不稳定的,因为李雅普诺夫第二定理只是一个充分条件;2)系统稳定与否是由系统参数(包括调节参数)决定的,参数不同稳定范围也不同,实际的物理系统可以在调试系统时通过调整结构参数保证控制系统的绝对稳定性。

3 基于知识的稳定性分析方法

要使系统稳定化,其涵义是要对系统作稳定性分

析和稳定性综合。前者是判断系统是否稳定,给出系统稳定的条件,估计稳定区域或范围,评价系统稳定性能高低;后者是进行系统稳定性设计,寻求使系统稳定的方法、研究满足稳定条件、扩展稳定区域、提高稳定性能的系统设计方案和实现技术。

在上节讨论间接控制系统的绝对稳定性时,给出的仅是一个简单的判定非线性系统的算例,虽其分析过程中给出了满足系统结构和参数应满足的稳定性条件,并对稳定区域给出了明确结论,但 C 阵的选择不同,参数 k 的调节范围是不同的。这种分析方法对于复杂的大系统,在研究其稳定化问题时存在不少困难。主要表现在:1) 缺乏数学模型。由于复杂大系统往往信息不完备,系统的参数和结构不确定,系统环境和条件存在未知的、多变的因素,所以,无法建立适用的数学模型,因而,也不能应用基于数学模型的、各种常用的稳定性分析与综合方法。2) 数学模型复杂,即使能建立系统的数学模型,也往往十分复杂,如非线性、变参数、变结构、分布参数、高阶、高维的数学模型。在这种情况下直接对系统的稳定性进行分析和综合,存在计算方法和设计实现方面的技术问题。为了实现不确定性复杂系统的稳定化,需要研究非传统的稳定性分析与综合的新方法和新技术。文献[4]提出了稳定性监控的概念,文献[3]提出了基于知识的自镇定系统和利用神经网络的自镇定系统,其实质都是调节系统的参数使系统是绝对稳定的,它们都很少涉及对象特性的数学描述,调节时更多应用的是知识和经验,调试及运行中直接观测系统的输出响应看是否有界或收敛于期望的状态即可判定系统的稳定性。事实上在基于知识的稳定化过程中,是将稳定性分析和综合同时进行的,在稳定化实现时只要调节镇定参数即可。

4 不确定性复杂系统稳定化的技术实现

对于大型的不确定性复杂系统,要直接从整体上对系统稳定性进行分析和综合是很困难的,一般是将大系统首先分解为若干便于处理的子(小)系统,先分别研究处理各子(小)系统的稳定化问题,将各小系统结集为大系统,再协调处理大系统的稳定化。对各子(小)系统用输入输出绝对稳定性概念,分别调节各子系统参数使子系统稳定。对大系统求各子(小)系统相互联系应满足的组合条件,设计组合方式与关联结构,选择组合强度系数与关联参数,实现大系统的稳定化。

在实际工程中设计控制系统时,人们对于被控制对象的特性和系统运行的环境条件,并非一无所知,而是不确知。即:没有准确地、全面地了解,可能是部分已

知(白箱)、部分未知(黑箱)、部分略知(灰箱)。如主要的对象特性和基本的环境条件已知,某些参数或结构变化不能预知,某些数据只知其变化范围。在这种情况下可采取控制理论与人工智能相结合的设计思想按如下步骤进行:1) 根据已知的主要对象和基本环境建立数学模型。应用控制理论及稳定性理论,设计控制系统的基础回路,含可调参数。2) 利用控制专家和有关领域专家的知识经验,建立知识模型。应用人工智能及专家系统的方法,设计控制系统的辅助镇定回路。对不确定的数据或未知的参数可作启发式搜索,寻求使系统满足绝对稳定的参数。基于知识的绝对稳定控制系统的结构框图如图 1 所示,图中基础回路中的可调参数由辅助镇定回路对参数进行启发式搜索确定。

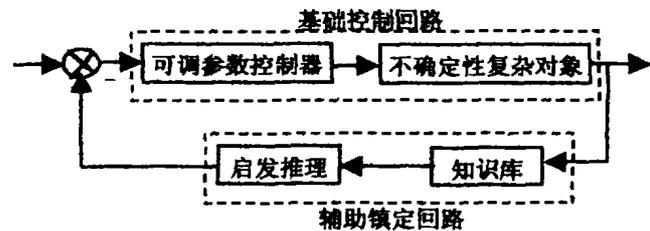


图 1 基于知识的绝对稳定控制系统

5 结束语

笔者用实际工程实例在文献[6]中,用上述判定控制系统的绝对稳定性收到了良好的效果,事实上,如果被控对象不是特别复杂和庞大,可以采用输入有界输出有界的稳定性分析和综合方法,根据系统误差、误差的导数等直接调整可调参数使控制系统达到绝对稳定。仿人智能控制器在众多控制器中之所以受到特别关注,就因为它使用特别简单,采用开闭环结合,多模态切换,可调参数少,特别适合对不确定性复杂对象实施控制,而且稳定性分析与综合只要适当调整控制算法中的增益 K 和抑制系数 k 即可完成,还可以兼顾各个性能指标的要求。

参考文献:

- [1] 绪方胜彦著. 现代控制工程[M]. 卢伯英译. 北京: 科学出版社, 1981.
- [2] TIMOTHY L K, BONA B E. State Space Analysis: an introduction [M]. New York: McGraw - Hill Book Company, 1968.
- [3] 涂序彦. 大系统控制论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 李祖枢. 仿人智能控制 20 年[C]. 中国智能自动化学术会议论文集(上). 北京: 清华大学出版社, 1999, 20 - 31.

- [5] 王照林. 现代控制理论基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1983.
- [6] 杨志, 郭兵, 李太福, 等. 一类基于仿人智能的高炉出铁水

冲渣自动跟踪系统[C]. 自动化科学技术及应用学术会议论文集. 北京:电子工业出版社, 2001.

Analysis on Stability for Uncertainty Complex Control System Based on Knowledge

*LI Tai-fu*¹, *YANG Zhi*², *SHENG Chao-qiang*², *XIE Zhao-li*²

(1. Electronic Engineering Department, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China;

2. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Concept of stability is vague, but it is basic characteristic of dynamic system, and precondition that make all kinds of control system run normally. Today it is still a challenge to analyze stability for uncertainty complex control system, whose mathematic modeling is impossible or very difficult, so it is very hard to judge whether a system running is stable or not by mathematic stability criterion. A kind of analyzing method is presented, which combine absolute stability with self-locked concept of heuristic search, it may analyze system stability in more range through adjusting self-collected loop parameters for uncertain control system based on knowledge control model. It is shown that stability analyzing method is effective and suitable for practical physical system in the engineering project.

Key words: knowledge model; uncertainty complexity control system; stability analysis

(责任编辑 成孝义)

(上接第 18 页)

Power Model of Bond Graph and Dynamic Simulation of Hoist System for Multi-Flow Transmission

LIN Chao, *LI Run-fang*

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

Abstract: The double drive hoist reducer developed in the planetary gear is a new generation of energy saving and environment protecting hoist product. The multi-flow transmission system theory of hoist is analyzed. With the theory and method of bond graph, a bond graph model with coupled vibration is established for hoist multi-flow transmission system for the first time. The state equation of the system is developed and dynamic simulation analysis is also carried out. The internal changing law and relationship of the system for the state variable are got. Therefore, the dynamic properties and gearing features of this system are revealed comprehensively. The research results can provide the dynamic analysis method and design basis for multi-flow transmission system of hoist.

Key word: bond graph; simulation; multi-flow transmission; hoist machine

(责任编辑 张小强)