

AtLoop PID 自动整定软件包—原理与算法

吴 刚 薛美盛 张志刚 孙德敏

(中国科学技术大学自动化系·合肥, 230026)

摘要: 本文阐述了 PID 自动整定软件包 AtLoop 的基本原理与算法. AtLoop 适用于各种计算机控制系统 PID 调节器参数的自动整定, 三个不同的软件分别适用于不同的用户和被控回路. AtLoop 软件包已经在几个大型工业装置上成功使用了五年多.

关键词: PID 自动整定; 相关系数; 自适应 PID; 继电器反馈; 软件包

AtLoop PID Auto-Tuning Software Package—Principle and Algorithm

Wu Gang, Xue Meisheng, Zhang Zhigang and Sun Demin

(Department of Automation, University of Science and Technology of China·Hefei, 230026, P. R. China)

Abstract: This paper describes the fundamental principles and algorithms of PID Auto-Tuning Software Package—At-Loop. AtLoop can be applied for the auto-tuning of PID regulator parameters in any kind of computer controlled system. The software package consists of three parts, each of which is suitable for different users and control goals.

Key words: PID auto-tuning; correlation coefficient; adaptive PID; relay feedback; software package

1 引言 (Introduction)

尽管现代控制理论已得到长足发展, 但在现代工业生产中, 绝大多数控制回路仍采用 PID 调节器控制^[1]. PID 控制回路的正常工作是保证生产装置安全、平稳、长周期、满负荷运行的基础, 同时也是实施先进控制和优化的必要条件.

PID 参数的最优整定是保证良好控制效果的前提. 据某厂调查统计^[2], 用集散控制系统代替模拟仪表后, 仍有 20% ~ 40% 的回路无法闭环控制, 控制效果不理想的回路更多. 其中大多数并不是因为工艺、设备的原因, 80% 以上的回路是因为 PID 参数没有整定好.

人工整定 PID 参数费时、费力, 且整定效果严重依赖于整定者的经验. 我们利用计算机实现 PID 调节器参数的自动整定, 开发了 PID 自动整定软件包 AtLoop. 它由三个软件组成: 相关系数法、自适应 PID 和继电器反馈法, 分别适用于不同知识背景的用户和不同特性的控制回路. AtLoop 软件包已经在几套大型工业装置上成功应用了六年多^[1].

2 相关系数法 (Correlation coefficient approach)

本软件是针对工艺技术人员和操作工设计的. 软件包括相关系数辨识法建模和 PID 参数最优整定两部分, 运行简单, 操作方便.

2.1 相关系数辨识法 (Correlation coefficient identification approach)

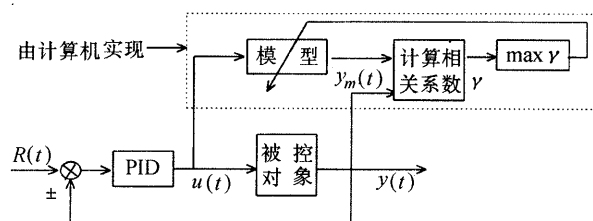


图 1 相关系数辨识法原理图

Fig. 1 Principle diagram of correlation coefficient identification approach

相关系数辨识法建模的原理如图 1 所示. 其基本原理为^[3]: 采集回路实时运行数据, 得到控制量 $u(t)$ 和系统输出 $y(t)$; 数据采集完成后, 经过有效性检验和必要的处理, 用控制输入序列 $\{u(t)\}$ 激励数学模型, 得到模型输出 $y_m(t)$; 软件给出 11 种模型结构供用户选择, 缺省值为一阶惯性加纯滞后环节; 模型结构确定后, 对一组模型参数可以得到一个模型输出序列 $\{y_m(t)\}$, 计算系统输出序列与模型输出序列之间的子样相关系数 γ :

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^N \{[y(i) - \bar{y}][y_m(i) - \bar{y}_m]\}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [y(i) - \bar{y}]^2 \sum_{i=1}^N [y_m(i) - \bar{y}_m]^2}} \quad (1)$$

其中, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(i), \bar{y}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_m(i)$.

子样相关系数越大,系数输出与模型输出拟合效果越好;采用坐标轮换法^[4]取对应最大子样相关系数的模型作为系统的数学模型.

2.2 PID 参数最优整定 (PID regulator parameters optimal tuning)

PID 参数整定的目标函数是极小化如下二次型性能准则:

$$\min J = \sum_{k=0}^M \{ (1 - \alpha) e^2(k) + \alpha \hat{K}^2 [\Delta u(k)]^2 \}. \quad (2)$$

其中, α 为权系数, $0 \leq \alpha < 1$, 缺省值为 0.1; \hat{K} 为增益估计值; $\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$; $e(k) = R(k) - Z(k)$, $R(k)$ 为参考轨迹, $Z(k)$ 为模型响应; M 为评价域, T_0 为离散化采样时间, MT_0 为开环系统 97% 过渡过程时间.

将 PID 调节器和对象模型组成闭环系统,对一组 PID 调节器参数,计算闭环系统的单位阶跃响应,求得所对应的目标函数 J . 计算目标函数时,如果闭环系统不稳定,采用时域法;如果稳定,采用频域法^[5]. 采用 Hooke-Jeeves 模式搜索法优化 PID 调节器参数^[4].

3 自适应 PID (Adaptive PID)

自适应 PID 算法原理如图 2 所示^[6],由模型辨识、辨识监督级、PID 参数最优整定、调节器监督级等四部分组成. 本软件既可以作为一次性整定工具,也可以进行在线自适应 PID 控制.

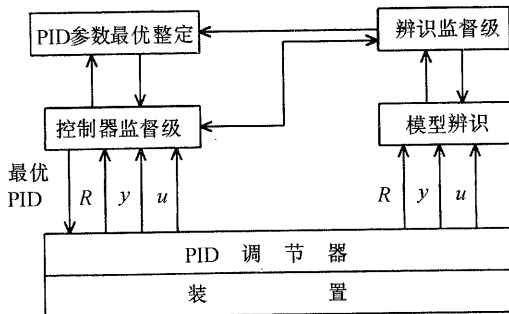


图 2 自适应 PID 原理图
Fig. 2 Principle diagram of adaptive PID

3.1 自适应 PID 算法 (Adaptive PID algorithm)

假设单输入单输出系统在稳态工作点附近可以用 CARMA 模型描述:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - \tau_d) + C(q^{-1})e(t). \quad (3)$$

其中: A, B, C 分别为 q^{-1} 的 n_a, n_b, n_c 阶多项式, $A,$

C 为首 1 多项式; $u(t), y(t)$ 分别为第 t 个采样时刻调节器和过程的输出; $\{e(t)\}$ 为不相关同分布随机变量序列,均值为零,方差有界; $\tau_d = \text{int}(\tau/T_s) + 1$, τ 为过程纯滞后, T_s 为采样周期.

采用带遗忘因子的递推增广最小二乘法在线估计模型参数. 模型结构由用户设定,软件给出缺省值. 辨识收敛后, PID 参数优化的目标函数和方法与相关系数辨识法相同.

3.2 监督级 (Supervisory)

在自适应 PID 软件中,设计了辨识监督级和调节器监督级^[6],其目的为:保证辨识的正常运行,判定参数估计是否收敛,以及收敛结果是否有物理意义;判断最优 PID 参数是否满足安全性的要求,决定是否投入最优 PID 参数,以及投运后控制效果评价与监督.

3.2.1 辨识监督级 (Identification supervisory)

辨识监督级由两部分组成,第一部分是保证辨识的正常运行,包括数据滤波、数据处理和信号激励性检验,以及 P 矩阵正定性的检验和保证;第二部分是辨识收敛情况的判断和处理,包括参数收敛性判断和收敛结果的检验.

由于无法知道参数真值,所以通过估计参数的波动范围来检验参数的收敛性. 参数收敛后,寻优得到一组 PID 参数,投用后如果调节器监督级判断实际控制效果改善,则认为第一次收敛成功,将模型参数赋给后备值. 以后,由于系统运行渐趋平稳,信号持续激励性减弱,收敛判断准则更加严格.

辨识收敛后,还要判断收敛结果的正确性,即所得模型是不是对象的合理描述. 这一点,对特定的系统容易实现,对不同回路则很难. 首先,大多数石化过程不包含不稳定极点,极个别特例则属于很难用 PID 控制好的回路;因此,模型如果包含不稳定极点,则认为辨识失败. 其次,判断稳态增益是否合理;正过程的稳态增益应大于零;反过程的稳态增益应小于零;增益的绝对值应满足: $0.05 \leq |\text{稳态增益}| \leq 20$. 如果违反这些条件,则认为辨识失败. 再次,判断模型时间常数是否合理,即: $3T_s \leq \text{时间常数} \leq 1000T_s$.

如果辨识失败,则将 P 矩阵赋初值,参数向量赋后备值,重新辨识;如果辨识成功,将模型参数估计值送 PID 参数最优整定模块.

3.2.2 调节器监督级 (Regulator supervisory)

调节器监督级要保证寻优过程的正常运行,判断最优 PID 参数是否满足安全性要求,确定是否投

用最优 PID 参数,投用后实际运行效果评价与监督.寻优过程中,首先必须保证 PID 参数不能超过约束范围;其次,要设计一组合理的 PID 参数初值;再次,根据闭环稳定性检验,确定选择目标函数计算的时域法或频域法.寻优结束后,必须判断最优 PID 参数是否符合安全性要求,例如:闭环稳定性、稳定裕量、参数是否越界等.最优 PID 参数投用后,要判断实际运行效果是否比原 PID 参数控制有所改善,否则要切换到原参数.

4 继电器反馈法(Relay feedback approach)

在回路中插入一个具有继电器特性的非线性环节,使控制量产生有限振幅的波动;当振荡稳定后,

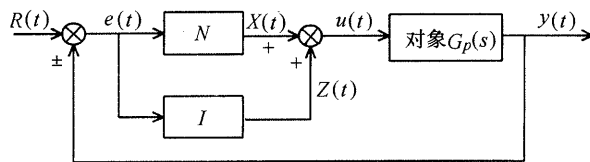


图3 继电器反馈法系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of relay feedback approach

记录 20 个采样周期的过程运行状况,将输出滤波、平均后作为设定值,滤波、平均后的控制量作为初值.继电器信号的产生过程如下:

误差信号

$$e(t) = \begin{cases} y(t) - R, & \text{正作用调节器,} \\ R - y(t), & \text{反作用调节器.} \end{cases} \quad (4)$$

积分环节输出

$$Z(t) = Z(t-1) + T_s/T_I e(t). \quad (5)$$

继电器输出

$$X(t) = \begin{cases} d \times \text{sgn}[e(t)], & |e(t)| \geq \epsilon, \\ X(t-1), & |e(t)| < \epsilon. \end{cases} \quad (6)$$

控制量

$$u(t) = X(t) + Z(t). \quad (7)$$

以上公式中, T_I 为积分时间常数, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数.参数缺省值: d 为 5%, ϵ 为 0.2%, T_I 为 200 秒, T_s 为 1 秒.

继电器输出两次切换之间为一个半波,当连续三个半波宽度相差不超过平均值的 50% 时,则认为振荡已经稳定.通过过零检测,计算波动周期 T ;采用面积来估算波动幅度.

波动幅度

$$a = \sqrt{2S/T}. \quad (8)$$

一个波动周期 T 内 e^2 的面积

$$S = \int_0^T e^2(t) dt. \quad (9)$$

计算波动的周期和幅值,并估计系统临界振荡周期和临界增益;利用改进的 Ziegler-Nichols 公式设计 PID 调节器参数^[7].继电器反馈法适用于纯滞后较大、非线性较强等特性复杂的回路.软件包括测试和 PID 参数设计两部分,适合于大批 PID 调节器参数的快速整定或 PID 调节器参数的初始整定.

4.1 继电器反馈信号测试(Relay feedback test)

测试过程包括继电器信号的产生和施加、波形检测和计算两部分.测试时系统结构如图 3 所示.图中, N 为带滞环的理想继电器,使系统产生持续的有限幅度的振荡,其特性如图 4 所示, ϵ 为滞环宽度, d 为幅值; I 为积分环节.

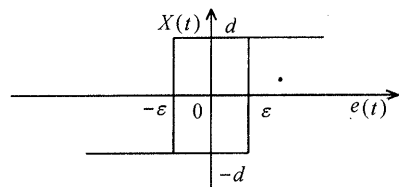


图4 带滞环继电器特性

Fig. 4 Character of relay with hysteresis circle

4.2 临界振荡周期 T_c , 临界增益 K_c 的计算(Computation of critical oscillation period T_c and critical gain K_c)

图 4 所示带滞环继电器可以用描述函数分析.考虑到图 3 的系统结构,非线性环节和积分环节的综合增益为:

$$N(a, j\omega) = A e^{-j\varphi} \quad (10)$$

其中

$$A = \left[\left(\frac{4d}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - \epsilon^2} \right)^2 + \left(\frac{4d\epsilon}{\pi a^2} + \frac{T}{2\pi T_I} \right)^2 \right]^{1/2},$$

$$\varphi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{8d\epsilon T_I + Ta^2}{8dT_I \sqrt{a^2 - \epsilon^2}} \right],$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

当系统产生高频振荡时,不失一般性,对象可以用积分加纯滞后模型近似:

$$G_p(s) = e^{-\tau s} / T_I s. \quad (11)$$

可以得到临界振荡周期 T_c 和临界增益 K_c :

$$T_c = 4\tau = (1 - 2\varphi/\pi) T, \quad (12a)$$

$$K_c = T_I \omega_c = A\pi / (\pi - 2\varphi). \quad (12b)$$

4.3 PID 参数整定(PID parameters tuning)

著名的 Z-N 公式最大的贡献或许是:根据最少的对象信息,如何设计较好的调节器.在工业环境中,由于得到的调节器控制作用太强,通常很少采用 Z-N 公式整定 PID.因此,我们给出修正的 Z-N 公式

整定 PID 参数。

算法中给出了一个用户可以调整的权系数 β 。以 PI 调节器为例,权系数 β 与增益裕量 K_g 和相位裕量 ϕ_m 的关系为:

$$K_g = 1/\delta = 1/(0.5 - 0.3\beta), \quad (13a)$$

$$\phi_m = (1 - \delta) \times 90^\circ - 15^\circ, \quad (13b)$$

其中, $0 \leq \beta \leq 1$, 缺省值为 0.1.

此时,依下式计算 PI 参数:

$$\begin{cases} P = \frac{50\pi}{K_C} \times \frac{1 - \delta^2}{(\delta - \delta^2)\pi/2 + \delta^2\phi_m}, \\ I = \frac{\pi T_c}{16} \times \frac{(1 - \delta^2)^2}{[(\delta - \delta^2)\pi/2 + \delta^2\phi_m][(1 - \delta)\pi/2 - \phi_m]}. \end{cases} \quad (14)$$

当 $\beta = 0$ 时, 所得结果近似 Z-N 公式.

5 工业应用 (Industrial application)

AtLoop 软件包有两种版本, 小型机版本采用 FORTRAN 77 编程; 微机版本最初采用 Quick BASIC 3.0 编程, 现已用 Visual C++ 移植到 Windows 95 下

运行。

AtLoop 软件已经在几个大型工业装置上连续运行了六年多时间, 使用对象包括乙烯、催化裂化、丙烯腈、丁辛醇造气、工业锅炉、造纸机、加热炉等装置。

采用相关系数辨识法整定了四效蒸发器压力控制回路; 图 5 为整定前运行曲线, 压力波动剧烈, 经常违反工艺约束; 图 6 为整定后运行曲线, 压力控制平稳; 该回路的良好运行对整个四效蒸发器的平稳起了很大作用. 采用自适应 PID 整定和控制了氨汽提塔釜液位, 图 7 为自适应 PID 投运前后的运行曲线. 采用继电器反馈法整定了吸收塔吸收水温度控制回路; 该回路纯滞后很大、增益很小, 并伴随严重的非线性和时变特性, 工艺要求控制在 4°C 到 8°C 之间; 图 8 为整定前运行曲线, 温度波动大, 经常违反约束; 图 9 为整定后运行曲线, 温度波动长时间不超过 0.5°C ; 该回路的平稳运行, 对提高产品产量和质量的关系甚大.

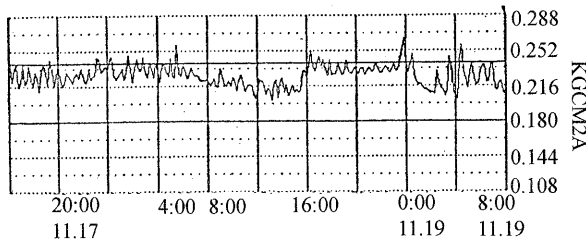


图 5 四效蒸发器压力运行曲线(整定前)

Fig. 5 Pressure curve of quadruple effect evaporator (before tuning)

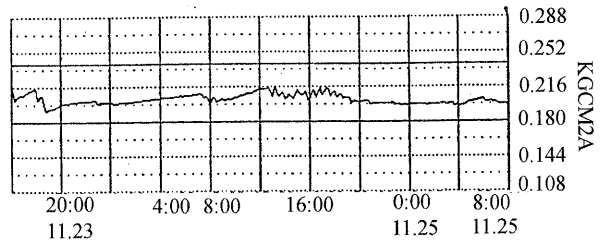


图 6 四效蒸发器压力运行曲线(整定后)

Fig. 6 Pressure curve of quadruple effect evaporator (after tuning)

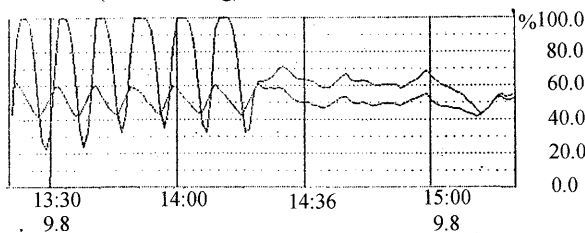


图 7 氨汽提塔釜液位自适应PID投运前后

Fig. 7 Level of ammonia tower bottom under adaptive PID control

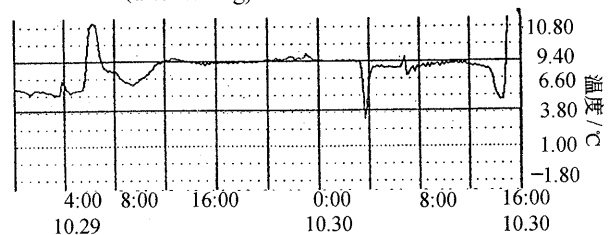


图 8 吸收塔吸收水温度运行曲线(整定前)

Fig. 8 Absorbing water temperature of absorbing tower (before tuning)

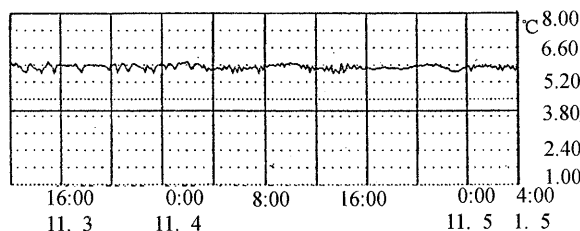


图 9 吸收塔吸收水温度运行曲线(整定后)

Fig. 9 Absorbing water temperature of absorbing tower (after tuning)

参考文献 (References)

- 1 杨彬彦, 王吉溪, 孙德敏等. AtLoop PID 自整定软件包的开发与应用. 化工自动化及仪表, 1995, 22(5): 17-22
- 2 Sun Demin, Wu Gang, Wu Fuming et al. Auto-Tuning of PID Parameters and Its Applications in Industrial Processes, Proc. of HKIWNDCM'94, Hong Kong, 1994, 117-122
- 3 孙德敏, 吴刚等. 相关系数辨识法 PID 自动整定软件及其工业应用. 中国科学技术大学学报, 1995, 25(4): 425-430
- 4 孙德敏. 工程最优化方法及应用(修订版). 合肥: 中国科学技术大

学出版社, 1997, 103 - 108

- 5 Åström, K J. Introduction to Stochastic Control Theory, New York: Academic Press, 1970, 116 - 138
- 6 Wu Gang, Zhang Zhigang, Zhang Yuzhu et al. Adaptive PID control software based on intelligent supervisor and its application to an acrylonitrile plant. Chinese Journal of Automation, 1994, 6(2): 125 - 130
- 7 Hang C C, Åström K J and Ho W K. Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula. IEE Proceedings-D, 1991, 138(2): 111 - 118

本文作者简介

吴刚 1964年生. 现为副教授. 已发表学术论文40余篇, 获省部级科技进步奖3项. 现主要从事自适应控制, 先进控制和优化的研究.

薛美盛 1969年生. 现为讲师, 博士研究生. 现主要从事自适应控制, 先进控制和优化的研究.

张志刚 1970年生. 现为讲师. 现主要从事自适应控制、先进控制和优化的研究.

孙德敏 见本刊1999年第2期第261页.

变结构控制的新进展

——评《广义系统变结构控制》

1 前言

广义系统产生于电力网络、电路、神经网络、受限机器人、石油催化裂化、动态投入产出、卫星重返大气层、飓风预报等科学技术及大型工程的众多领域. 广义系统是比较正常系统更广泛的系统, 它具有正常系统所不具有的特性, 如解中含有脉冲与控制导数项、传递函数是非有理分式、具有无穷远极点、非因果性等, 因而广义系统的控制问题的研究变得更为复杂, 到目前为止, 国内外对广义系统控制问题的研究工作绝大多数都集中在广义线性定常控制系统, 并且假定系统的参数及其结构是已知的. 事实上, 实际系统不可避免地存在着各种随机因素的干扰, 如建模时往往忽略了许多次要因素及非线性因素的影响, 因而使现有控制方法精度不够造成系统失稳. 因此, 对广义系统的鲁棒控制及处于空白状态的非线性广义系统控制问题, 寻求一种抗干扰性能好, 又容易实现的新型控制策略及综合分析方法是十分必要的.

刘永清、温香彩所著的《广义系统的变结构控制》是国内外第一本广义系统变结构控制的专著, 刘永清、温香彩教授采用了具有抗干扰性和参数扰动不变性、能分解和降低系统维数优点的变结构控制方法, 系统地开展了广义系统变结构控制的研究.

2 内容简介

该书主要研究广义系统(连续和离散)的变结构控制理论及应用. 目标是给出可以应用于实际工程的变结构系统的设计方法. 因而, 对每一类系统(不确定广义线性定常系统、不确定广义线性时变系统、不确定广义非线性系统、不确定广义离散时间系统、广义分布参数系统), 研究了系统在所有状态信息均可测量得到的情况下或系统只有部分状态信息可以测量得到的情况下, 相应的变结构控制系统的设计问题. 全书概况如下:

第一章为绪论, 介绍了广义系统的实际背景及国内外研究概况; 第二章研究了广义不确定线性定常系统的变结构控制理论; 第三章讨论了广义不确定线性时变系统的变结构控制问题; 第四章讨论了滞后广义线性不确定系统的变结构控制问题; 第五章利用变结构方法, 研究了广义非线性系统的模型跟踪问题; 第六章首先对指标为 I 的广义非线性系统, 利用正常系统最优控制综合的 Lyapunov 方法研究了变结构控制问题; 第七章首次研究了不具有输入关联的大型广义线性定常系统和大型广义非线性不确定系统的变结构控制问题; 第八章首次研究了广义离散时间系统的拟滑动模控制问题; 第九章介绍了广义分布参数系统的变结构控制问题; 第十章介绍了广义非线性系统的线性及输入-输出解耦问题; 第十一章介绍了变结构控制在受限机器人中的应用.

3 该书特点

1) 包含的内容广泛. 本书主要取材于作者自1993年以来在国内外学术刊物上发表的研究成果, 研究了各种类型的广义系统的变结构控制系统的设计问题.

2) 内容新颖. 作者采用九十年代国内外控制界广泛关注的变结构控制理论来研究广义系统, 填补了这一研究领域的空白.

3) 方法独特. 书中的一些变结构设计方法在已有方法的基础推陈出新. 作者以扎实的功底对各种广义系统的滑动模、切换函数及控制律进行了完整而严密的设计, 思路开阔, 思维敏捷.

4) 实用性. 本书初看起来似乎较为抽象及偏重理论, 其实不然, 该书比较注重理论联系实际, 部分内容涉及实用实例并给出了仿真结果, 可供读者进行实际应用课题或专题研究参考.

纵观全书, 内容丰富, 结构完整, 具有较高的学术价值和工程应用价值. 不足的是作者在第四章对非线性系统解的存在性及唯一性方面所作的工作不够深入、完整. 该书可作为理工科大学学生和研究生(自动控制、系统工程、工业自动化、应用数学、运筹学与控制论等专业)的教学参考书或教材, 也可供有关科研工作者、工程技术人员和高等院校有关师生参考.

(田丽)