

环形加热炉最优炉温分布与控制

杨友良

潘德惠

(唐山工程技术学院自动化系·河北, 063009) (东北工学院工程系·沈阳, 110006)

摘要: 本文给出一种根据管坯传热模型确定以管坯出炉温度最佳和燃耗最低为综合最优性能指标的最优炉温分布的方法, 建立了加热炉的过程模型, 并在此模型基础上提出了用广义最小方差控制策略实现最优炉温分布的方法. 本文还给出了一组加热炉炉温的广义最小方差控制的计算机仿真结果.

关键词: 环形加热炉; 管坯传热模型; 最优炉温分布; 加热炉过程模型; 广义最小方差控制

1 引言

轧钢加热炉是轧钢生产过程的重要环节之一. 它不但影响着轧钢厂的能耗指标, 而且还直接制约着产品的产量和质量. 随着能源危机的日益加重和现代需求对产品质量要求的不断提高, 以降低能耗、提高产品质量为目的的加热炉控制受到了国内外学者的广泛重视. 建立具有实际意义的加热炉模型和实现基于数学模型的加热炉炉温最优控制是降低轧钢企业能耗提高企业经济效益的关键, 也是目前国内急待解决的科研课题.

本文以环形加热炉为对象, 研究了管坯传热模型、最优炉温分布、加热炉过程模型和炉温的广义最小方差控制.

2 管坯传热模型

假设炉气充满整个炉膛, 沿炉子半径方向炉温恒定, 则炉温的分布便是一维的, 即沿环形炉膛的位置 θ (通过炉膛内任一点的半径相对炉尾张开的圆心角) 分布. 如果把炉底的转动看作连续的, 钢坯随炉底转动连续加热, 钢坯沿炉子半径方向摆放, 则钢坯的加热时间 t 与该时刻钢坯所处的位置 θ 存在一一对应关系. 因此, 炉温随炉内位置 θ 的分布等价于随时间 t 的分布. 根据炉温一维分布的假设, 我们只需研究管坯任一截面的传热情况. 由于管坯下表面主要接受的是二次辐射, 所以管坯上下表面受热实际上是不对称的. 基于上述假设和分析, 根据傅立叶定律, 管坯传热模型可用二维抛物型分布参数系统描述.

$$\frac{\partial T_s(x, y, t)}{\partial t} = \frac{K(T_s)}{C_p(T_s)\rho(T_s)} \left[\frac{\partial^2 T_s(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_s(x, y, t)}{\partial y^2} \right] \quad (2.1)$$

初始条件

$$T_s(x, y, t)|_{t=0} = T_s(x, y, 0), \quad (2.2)$$

边界条件

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T_s}{\partial n} \right|_r = \xi \left\{ \frac{\varepsilon \sigma}{K(T_s)} [T_r^4 - T_s^4] + \frac{\alpha}{K(T_s)} [T_r - T_s] \right\}, \\ \xi = \begin{cases} 1, & y \geq 0, \\ \xi, & y < 0. \end{cases} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中 T_r, T_s 分别代表炉温和钢温; $K(T_s), C_p(T_s)$ 和 $\rho(T_s)$ 分别为钢坯的导热系数、比热和密度, 它们都是钢温 T_s 的函数, 在较小的温度区域内作常数处理; ξ 为炉膛下部温度修正系数 ($0 < \xi < 1$), 由实验确定; ε 为钢坯黑度; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数; α 是对流换热系数; r 是管坯截面边界; n 是截面法线方向。

分布参数系统 (2.1)~(2.3) 求解比较困难, 通常采用数值解法. 本文用有限元法进行空间离散, 用有限差分法进行时间离散。

由于管坯截面相对于炉膛很小, 认为管坯左右受热对称. 因此, 只需研究半个截面. 用三角形单元进行剖分, 得图 1 所示的单元剖分图. 图中共有 32 个节点, 40 个单元. 根据有限元加权余量法^[4], 经单元分析和总体合成, 得到系统 (2.1)~(2.3) 的以 32 个节点温度为状态变量的半离散状态方程

$$[K]\vec{T}_s + [N]\frac{\partial \vec{T}_s}{\partial t} = \vec{F}. \quad (2.4)$$

式中 $[K], [N]$ 都是 32×32 方阵, 分别称为温度刚度矩阵和变温矩阵。

$$\vec{T}_s = [T_{s1}, T_{s2}, \dots, T_{s32}]^T, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \vec{T}_s}{\partial t} = \left[\frac{\partial T_{s1}}{\partial t}, \frac{\partial T_{s2}}{\partial t}, \dots, \frac{\partial T_{s32}}{\partial t} \right]^T, \quad (2.6)$$

$$\vec{F} = [f_1, f_2, \dots, f_{32}]^T. \quad (2.7)$$

$T_{s1}, T_{s2}, \dots, T_{s32}$ 是节点温度; $\vec{T}_s$ 为节点温度列向量, 即系统的状态向量; $\vec{F}$ 是由边界条件确定的列向量, 即系统的控制向量。

用隐式差分格式对 (2.4) 进行时间离散, 得系统的全离散状态方程。

$$([K] + \frac{1}{\Delta t}[N])\vec{T}_s|_t = \vec{F}|_t + \frac{1}{\Delta t}[N]\vec{T}_s|_{t-\Delta t}. \quad (2.8)$$

式 (2.8) 就是所求管坯传热模型. 式中 Δt 为时间步长。

3 最优炉温分布

3.1 炉温分布的参数化

根据生产实际经验和环形加热炉的具体情况, 令

$$T_r(t) = a - be^{-\alpha \cos dt}. \quad (3.1)$$

式中 a, b, c, d 为待定参数。

为了降低能耗, 应尽量降低炉尾温度. 取 $T_r(0) = 973 \text{ K } (700^\circ \text{C})$. 炉首是均热段的末端, 炉子对钢坯的加热作用不大, 只要使炉温不低于钢温即可. 因此, 取 $T_r(t_f)$ 等于理想出炉钢温 T_s^* . 这时 (3.1) 式中第二项已几乎衰减到零, 故取 $a = T_s^*, b = T_s^* - T_r(0)$, 则

$$T_r(t) = T_s^* - [T_s^* - T_r(0)]e^{-\alpha \cos dt} \quad (3.2)$$

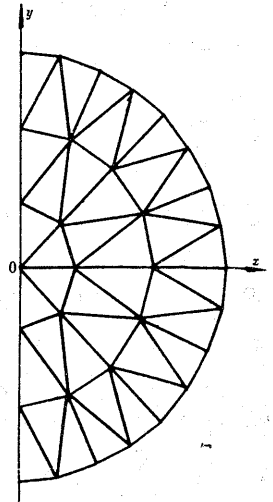


图 1 单元剖分图

3.2 最优性能指标

以管坯出炉温度最佳和燃耗最低作为综合最优性准则,建立指标泛函如下

$$J = Q \iint_b (T_s|_{t_f} - T_s^*)^2 dx dy + R \int_0^{t_f} T_f^2(t) dt. \quad (3.3)$$

式中 Q, R 为加权系数. 将 (3.3) 离散化得

$$J = Q(\vec{T}_s|_{t_f} - \vec{T}_s^*)^T [N](\vec{T}_s|_{t_f} - \vec{T}_s^*) + R \int_0^{t_f} T_f^2(t) dt. \quad (3.4)$$

为了便于优化,我们希望将 (3.4) 写成 T_f 的显式形式. 为此令

$$J_1 = (\vec{T}_s|_{t_f} - \vec{T}_s^*)^T [N](\vec{T}_s|_{t_f} - \vec{T}_s^*). \quad (3.5)$$

根据 (2.8) 和边界条件 (2.3), J_1 可表示为

$$J_1 = a_1 + a_2 T_f + \dots + a_9 T_f^8. \quad (3.6)$$

给出 m 组 (c, d) 值, 可由 (3.2) 确定出 m 个相应的 T_f 值, 同时可由模型 (2.8) 解出 m 个相应的节点温度列向量 $\vec{T}_s|_{t_f}$, 再由 (3.5) 式计算出 m 个 J_1 值. 根据系统辨识理论, 只要 $m \gg 9$, 就可以估计出 (3.6) 式中的系数 $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_9$. 用 $\hat{J}_1$ 代替 J_1 , 则最优性指标泛函化为

$$J = Q \sum_{i=1}^9 \hat{a}_i T_f^{i-1} + R \int_0^{t_f} T_f^2(t) dt. \quad (3.7)$$

3.3 最优炉温分布

求解最优炉温分布问题可表达为如下的数学命题:

$$\min J = \min \left\{ Q \sum_{i=1}^9 \hat{a}_i T_f^{i-1} + R \int_0^{t_f} T_f^2(t) dt \right\}. \quad (3.8)$$

Subject to

$$\hat{g}(c, d) \geq 0. \quad (3.9)$$

$\hat{g}(c, d)$ 是约束条件, 由工艺要求决定. 解此优化问题便可确定出最优炉温分布:

$$T_f^*(t) = T_s^* - [T_s^* - T_f(0)] e^{-c^* t} \cos d^* t. \quad (3.10)$$

为了直观, 将 t 换成位置角 θ , 得

$$T_f^*(\theta) = T_s^* - [T_s^* - T_f(0)] e^{-\frac{t_f}{\theta_f} c^* \theta} \cos\left(\frac{t_f}{\theta_f} d^* \theta\right). \quad (3.11)$$

式中 θ_f 为炉首(出钢口)所对应的位置角.

本文以直径为 120mm 的 40 号碳素钢无缝钢管管坯为例, 求得最优炉温分布 ($t_f = 1$ 小时)

$$T_f^*(\theta) = T_s^* - [T_s^* - T_f(0)] e^{-\frac{4.96}{\theta_f} \theta} \cos\left(\frac{3.28}{\theta_f} \theta\right). \quad (3.12)$$

式中, $T_s^* = 1553\text{K}$, $\theta_f = 120^\circ$. 图 2 给出了最优炉温分布曲线及在最优炉温分布下管坯的升温曲线.

3.4 轧制节奏变化时最优炉温分布的修正

最优炉温分布是在一定的轧制节奏下求得的. 生产实际中, 轧制节奏往往在一定的允许范围内变化, 这就要求对最优炉温分布进行修正.

轧制节奏变化, 相当于加热时间 t_f 变化, 通常 t_f 的变化范围是已知的, 只要确定出规

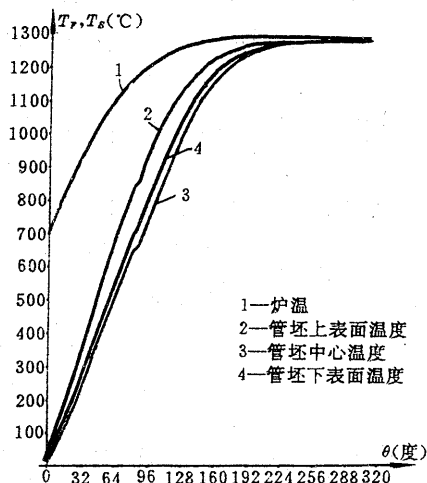


图 2 最优炉温分布

定加热时间 t_{fdes} 、最小加热时间 t_{fmin} 和最大加热时间 t_{fmax} 分别对应的最优炉温分布 T_{fdes}^* , T_{fmin}^* 和 T_{fmax}^* , 然后, 用 T_{fdes}^* 与 T_{fmin}^* 或 T_{fmax}^* 的线性插值来逼近任一加热时间 $t_f \in [t_{fmin}, t_{fmax}]$ 的最优炉温分布, 便得到对应于 t_f 的准最优炉温分布

$$T_f^*(\theta) = \begin{cases} \sigma_1 T_{fmin}^*(\theta) + (1 - \sigma_1) T_{fdes}^*(\theta), & t_f \in [t_{fmin}, t_{fdes}], \\ \sigma_2 T_{fmax}^*(\theta) + (1 - \sigma_2) T_{fdes}^*(\theta), & t_f \in [t_{fdes}, t_{fmax}]. \end{cases} \quad (3.13)$$

式中

$$\sigma_1 = \frac{t_{fdes} - t_f}{t_{fdes} - t_{fmin}}, \quad \sigma_2 = \frac{t_f - t_{fdes}}{t_{fmax} - t_{fdes}}.$$

于是, 通过在线检测加热时间 t_f , 利用 (3.13) 或 (3.14) 进行修正, 就可使炉温分布适应轧制节奏变化这一生产实际情况.

4 加热炉过程模型

加热炉过程模型这里是指炉温分布与燃料(混合煤气)流量之间的关系模型. 假设煤气和空气的压力恒定, 空燃比恒定(实际应用时应加恒压控制和空燃比控制). 本文研究的加热炉有两个加热段和一个均热段. 如果将各段的煤气流量作为输入量(由于空气与煤气按定比供应, 根据建模的吝啬性原则, 不另作输入量), 各段炉温作为输出量, 那么, 加热炉过程可看作一个三输入三输出的多变量过程.

考虑到管坯的进炉、出炉、空气、煤气压力、流量的波动等随机扰动都会影响加热炉的状态, 将过程的各种随机扰动看作零均值有色噪声, 且是具有有理谱密度的平稳高斯过程. 根据表示定理, 它可用一个输入为白噪声的渐近稳定的线性系统来描述. 于是, 加热炉过程可用如图 3 所示的结构图来表示. 图中, $\vec{U}(k)$ 和 $\vec{Z}(k)$ 分别为过程的输入向量和输出向量; $\vec{W}(k)$ 是白噪声向量. 各向量都是三维的.

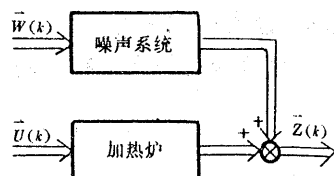


图 3 加热炉过程

根据上述假设和分析, 加热炉过程可用如下模型来描述

$$A(q^{-1})\vec{Z}(k) = B(q^{-1})\vec{U}(k) + C(q^{-1})\vec{W}(k). \quad (4.1)$$

式中 $A(q^{-1})$ 是系统的特征多项式, 设为 q^{-1} 的 n 阶多项式, 记作

$$A(q^{-1}) = 1 + a(1)q^{-1} + \cdots + a(n)q^{-n}, \quad (4.2)$$

$B(q^{-1})$ 和 $C(q^{-1})$ 为 q^{-1} 的多项式矩阵,

$$B(q^{-1}) = [B_{ij}(q^{-1})]_{3 \times 3}, \quad (4.3)$$

$$B_{ij}(q^{-1}) = q^{-d_{ij}}[b_{ij}(0) + b_{ij}(1)q^{-1} + \cdots + b_{ij}(n-1)q^{-(n-1)}], \quad (4.4)$$

$$C(q^{-1}) = [C_{ij}(q^{-1})]_{3 \times 3}, \quad (4.5)$$

$$C_{ij}(q^{-1}) = \begin{cases} 1 + c_{ij}(1)q^{-1} + \cdots + c_{ij}(n)q^{-n}, & i = j, \\ 0, & i \neq j. \end{cases} \quad (4.6)$$

式中 $q^{-d_{ij}}$ 为第 i 个输出对第 j 个输入的响应滞后因子, d_{ij} 为正整数, q^{-1} 是单位滞后算子.

根据由现场实测的实验数据, 用依子系统数据一次完成递推算算法^[6]辨识得模型 (4.1) 的全部参数(模型阶次 $n=2$). 表 1 给出了辨识结果. 该模型与实测数据拟合得很好, 最大拟合误差不超过 0.2%.

表 1 依子系统数据一次完成算法辨识结果

子系统 i	模 型 参 数									
	$a(1)$	$a(2)$	$b_{11}(0)$	$b_{11}(1)$	$b_{12}(0)$	$b_{12}(1)$	$b_{13}(0)$	$b_{13}(1)$	$c_{ii}(1)$	$c_{ii}(2)$
1	-1.23169	0.25329	0.05738	-0.05197	0.04030	-0.03380	0.03793	-0.03615	-0.66712	0.31637
2	-1.23169	0.25329	0.03005	-0.02445	0.08670	-0.07990	0.04340	-0.03992	-0.65298	0.30243
3	-1.23169	0.25329	0.04070	-0.03626	0.04924	-0.04321	0.08678	-0.07835	-0.67103	0.32543

表 1 说明:

- 1) 辨识数据为 175 组, 每组六个数据;
- 2) $d_{11}=d_{22}=d_{33}=1$; $d_{12}=d_{23}=d_{32}=2$; $d_{13}=d_{31}=3$; $n=2$;
- 3) 方差估计为 $V_{ar}=0.127$;
- 4) 辨识精度为 $P_{rec}=0.078$.

5 炉温的广义最小方差控制

加热炉炉温最优控制问题也就是最优炉温分布的实现问题. 由于各种随机扰动的作用, 加热炉内各点的炉温不可能始终保持在最优值上不动, 而必然是在最优值附近波动. 本文设想构造一个随机控制器, 使得炉温在最优值附近的波动尽可能地小些. 最小方差控制能很好地实现这一构想. 为了提高系统的强健性, 本文采用广义最小方差控制策略.

根据加热炉过程模型 (4.1), 构造一个随机向量 $\vec{Y}(k)$, 满足如下差分方程

$$\vec{Y}(k) = \xi(q)\vec{Z}(k). \quad (5.1)$$

式中 $\xi(q)$ 是模型 (4.1) 所描述的系统的传递函数矩阵 $T(q^{-1})=B(q^{-1})/A(q^{-1})$ 的关联矩阵. $\xi(q)$ 满足

$$\det \xi(q) = q^m, \quad m \text{ 是一个正整数}, \quad (5.2)$$

$$\lim_{q \rightarrow \infty} \xi(q)T(q^{-1}) = K_T. \quad (5.3)$$

K_T 是一个非奇异矩阵.

根据 Goodwin 给出的一个定理^[2], 只要对随机向量 $\vec{Y}(k)$ 施以最小方差控制, 就可实现 $\vec{Z}(k)$ 的最小方差控制. 因此, 构造广义最小方差控制准则泛函如下

$$J[\vec{U}(k)] = E[\|\vec{Y}(k) - \vec{Y}^*(k)\|^2 + \vec{U}^T A \vec{U}(k)]. \quad (5.4)$$

$$\text{式中} \quad \vec{Y}^*(k) = \xi(q)\vec{Z}^*(k). \quad (5.5)$$

$\vec{Y}^*(k)$ 是 $\vec{Y}(k)$ 的最优值; $\vec{Z}^*(k)$ 是最优炉温向量, 即由最优炉温分布在三个观测点的值构成的向量; A 是正定权矩阵, 取为对角阵, 记作

$$A = \text{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3]. \quad (5.6)$$

随机控制的关键是随机过程的最优预报. 根据 (4.1) 不难导出随机向量 $\vec{Y}(k)$ 的最优预报方程

$$\bar{C}(q^{-1})\vec{Y}^0(k|k) = \bar{a}(q^{-1})\vec{Z}(k) + \bar{\beta}(q^{-1})\vec{U}(k). \quad (5.7)$$

$\bar{C}(q^{-1})$, $\bar{a}(q^{-1})$ 和 $\bar{\beta}(q^{-1})$ 都是 3×3 多项式矩阵.

$$\bar{C}(q^{-1}) = I + C_1 q^{-1} + C_2 q^{-2} + \cdots + C_{n1} q^{-n1}, \quad (5.8)$$

$$\bar{a}(q^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 q^{-1} + \alpha_2 q^{-2} + \cdots + \alpha_{n2} q^{-n2}, \quad (5.9)$$

$$\bar{\beta}(q^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \beta_2 q^{-2} + \cdots + \beta_{n3} q^{-n3}. \quad (5.10)$$

其中 β_0 是非奇异矩阵. 由 (5.7) 解出 $\vec{Y}^0(k|k)$, 并用它代替 $\vec{Y}(k)$ 代入 (5.4), 不难推得广义最小方差控制策略

$$\begin{cases} \vec{U}(k) = -(\beta_0^T \beta_0 + \Lambda)^{-1} \beta_0^T \vec{L}(k), \\ \vec{L}(k) = \bar{\alpha}(q^{-1}) \vec{Z}(k) + \bar{\beta}_1(q^{-1}) \vec{U}(k) - \bar{C}(q^{-1}) \xi(q) \vec{Z}^*(k). \end{cases} \quad (5.11)$$

式中

$$\bar{\beta}_1(q^{-1}) = \bar{\beta}(q^{-1}) - \beta_0. \quad (5.12)$$

图 4 给出了炉温广义最小方差控制的闭环系统计算机仿真结果. 仿真结果表明, 该闭环控制系统能准确地跟踪最优炉温设定值.

6 结束语

计算机仿真结果表明, 用广义最小方差控制策略实现最优炉温分布是可行的. 该控制系统结构简单, 易于工程实现.

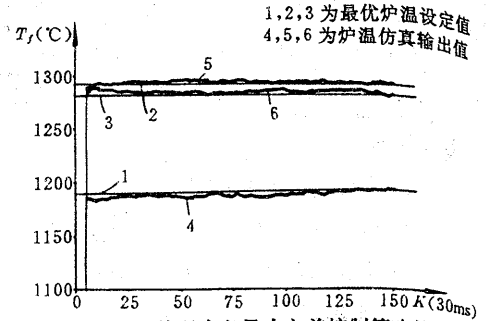


图 4 炉温广义最小方差控制策略的计算机仿真结果

参 考 文 献

- [1] Hollander, F. . Design, Development and Performance of Online Computer Control in a 3-Zone Reheating Furnace. Iron and Steel Engineer, Jan. ,1982, 59(1), 44—52.
- [2] Goodwin, G. C. and Kwai Sang Sin. Adaptive Filtering, Prediction and Control. Prentice-Hall, New Jersey, 1984, 422—426
- [3] Kawata, S. , Kanoh, H. and Masubuchi, M. . 连续加热炉的最小方差自校正控制. IFAC 第九届世界大会冶金自动化译文集. 1985, 44—54
- [4] 孔祥谦编著. 有限元法在传热学中的应用. 第二版, 北京: 科学出版社, 1986, 60—113
- [5] 潘德惠著. 数学模型的统计方法. 沈阳: 辽宁科学出版社, 1986
- [6] 方崇智, 萧德云编著. 过程辨识. 北京: 清华大学出版社, 1989, 424—432

The Optimal Furnace Temperature Distribution and Control of a Circular Reheating Furnace

YANG Youliang

(Department of Automation, Tangshan Institute of Engineering and Technology • Hebei, 063009, PRC)

PAN Dehui

(Administration College, Northeast University of Technology • Shenyang, 110006, PRC)

Abstract: In this paper, we present a method to determine the optimal furnace temperature distribution of a circular reheating furnace based on the heat conducting model of tubular steel blanks heated in the furnace under the composite optimity criterion—optimizing the temperature of the blank at the exit of the furnace and minimizing the fuel consumption. Based on the furnace process model, we use the Generalized Minimum Variance Control Strategy to realize the optimal furnace distribution. In the end, we give the computer simulation result for the con-

rol strategy.

Key words: circular reheating furnace; heat-conducting model of tubular steel blanks; optimal temperature distribution; furnace process model; generalized minimum variance control

本文作者简介

杨友良 1961年生. 1983年河北矿冶学院机电系大学毕业. 1991年3月东北工学院控制理论及应用专业硕士研究生毕业, 现任唐山工程技术学院自动化系讲师. 目前研究领域是分布参数系统的辨识与最优控制. 研究兴趣是控制理论的应用与计算机控制.

潘德惠 1928年生. 东北大学理学院东北大学三部1949年毕业于. 东北工学院管理工程系教授, 自动控制理论及应用专业博士研究生导师. 中国数学学会理事. 曾多年从事应用数学的研究, 后转入自动控制理论及应用方面的教学与研究工作. 现在的研究领域是, 分布参数系统的模型辨识与最优控制.

(上接第287页)

习, 读者对智能控制能够得到全面和系统的了解, 并扩大知识面.

2. 实用性

初看起来似乎该书较为抽象和偏重理论, 其实不然, 该书比较注重理论联系实际. 书中以近一半篇幅介绍知识表示方法、搜索与推理技术和智能型编程语言, 并专列一章举例分析智能控制的各应用. 书末所列218篇参考文献, 一部分涉及应用实例, 可对读者进一步提供有价值的信息, 可供读者进行实际应用课题或专题研究的参考.

3. 新颖性

本教材基本上反映了国内外智能控制研究与应用的最新进展, 与各种传统的自动控制相比, 智能控制的原理与方法也大不相同, 具有较明显的新意.

4. 可读性

本书虽为导论性教材, 但仍有相当难度. 作者努力将问题表述与物理内涵结合起来, 有益于读者对基本概念的理解. 对于一些比较难的数学推演, 初读时可以跳过, 暂不学习, 不会影响对后续章节的学习.

作为第一本教材和专著, 该书难免存在着不足之处. 例如, 如何把基础知识深入渗透到应用实例中去, 是个值得进一步解决的问题. 又如, 近两年来发展起来的基于神经网络的智能控制, 应在本书修订时考虑增补进去.

《智能控制》的编写和出版, 无疑会对我国智能控制和整个自动控制的发展起到一定的推动作用.

(张钟俊)