

最经济控制研究*

吴斌

(北京科技大学信息工程学院·北京, 100083; 西南工学院信息与控制工程系·四川绵阳, 621002)

涂序彦

(北京科技大学信息工程学院·北京, 100083) (西南工学院信息与控制工程系·四川绵阳, 621002)

吴坚

摘要: 最经济控制是以系统的技术性能指标为约束条件, 经济效益为目标函数的最优控制. 本文对最经济控制系统的概念、最经济结构综合、结构经济控制及闭环系统的最经济控制等问题给予综合介绍, 并提出了最经济智能控制的新概念.

关键词: 最经济控制; 结构综合; 闭环控制; 智能控制

Research on Most Economical Control

Wu Bin

(Information Engineering School, Beijing University of Science and Technology·Beijing, 100083, P. R. China;
Department of Information and Control Engineering, Southwest Institute of Technology·Sichuan Mianyang, 621002, P. R. China)

Tu Xuyan

(Information Engineering School, Beijing University of Science and Technology·Beijing, 100083, P. R. China)

Wu Jian

(Department of Information and Control Engineering, Southwest Institute of Technology·Sichuan Mianyang, 621002, P. R. China)

Abstract: The most economical control(MEC)is the optimal control under the given constraints of technical performance, economic efficiency as its goal function. In this paper, the concept of MEC, the MEC structure synthesis, structure economic control, and the closed-loop control are surveyed. The new concept of the most economical intelligent control is proposed.

Key words: most economical control; structure synthesis; closed loop control; intelligent control

1 最经济控制问题的提出(Formulation of the problem of most economical control(MEC))

通常控制理论的研究主要关心控制系统的技术性能, 如可控性、可观性、稳定性、鲁棒性、快速性、准确性和可靠性等, 而很少研究控制系统的经济性, 如控制设备的投资、系统的运行费用及系统投入运行后带来的经济效益等. 在最优控制理论中, 其目标函数经常是控制准确度最高, 控制过程最快等技术性能方面的最优化, 而不是经济代价最少的经济指标最优化. 在多变量控制系统设计中, 应该应用协调控制原理, 而不是盲目地解耦, 设法利用被控对象中的耦合作用, 简化控制机构或观测装置, 达到节约控制设备投资, 降低系统运行费用的目的. 在控制系统的设计中, 首要问题是系统的结构方案设计, 特别是最经济结构方案的设计问题. 另外, 如何将可观性与可控性的理论研究成果应用于控制工程实践. 同时, 我国尚处于社会主义初级阶段, 基于国情考虑, 控制系统的设计思想就应当是: 在满足控制任务的技术性能要求的前提下, 设计经济代价最小的控制系统, 即最经济控制系统. 于是 1981 年在中国自动化学会自动控制理论委员会召开的

全国控制理论及其应用学术交流会上, 文献[1]首次提出了“最经济结构综合”问题. 随后, 文献[2~4]先后提出了“最经济控制”、“最经济观测”、“分型能控性”、“分型能观性”等概念, 并讨论了控制系统的分型能控(能观)最经济结构综合问题.

最经济控制问题的一般提法如下:
设控制系统的方框图如图 1 所示.



图 1 控制系统方框图
Fig. 1 Block diagram of control system

已知被控制对象特性为:

$$\dot{x} = f_a(x, v, w, t), \tag{1}$$

需要设计控制机构, 观测装置, 反馈装置:

$$\dot{v} = f_b(v, u, z, t), \tag{2}$$

$$\dot{y} = f_c(x, u, t), \tag{3}$$

* 四川省科委应用基础研究专项经费资助项目。
本文于 1998 年 2 月 23 日收到, 1998 年 12 月 22 日收到修改稿。

$$\dot{z} = f_f(z, x, y, t), \tag{4}$$

满足给定的技术约束条件:

$$F_\tau(f_a, f_b, f_c, f_f) = k_\tau, \tau = 1, 2, 3, \dots, \tag{5}$$

使如下的经济目标函数 G_e 极小化:

$$G_e = \left(\begin{matrix} \$_B \\ \$_g \end{matrix} \right) \rightarrow \min. \tag{6}$$

在(1),(2),(3),(4)式中, x 为系统状态信号; y 为系统输出; z 为系统输出反馈信号; u 为系统给定输入; v 为控制信号; w 为系统扰动输入; t 为时间参数. (6) 式中, $\$_p$ 为经济代价(为实现控制系统而支付的代价); $\$_g$ 为经济收益(因采用控制系统而获得的经济收益).

这里, 技术约束条件具有多种形式, 如可控性、可观性条件、稳定性条件、准确度条件、快速性指标等; 经济目标函数是复杂的、多目标的; 控制对象、控制机构、观测装置、反馈装置的特性是非线性的、时变的.

2 最经济结构综合 (Most economical structural synthesis(MESS))

2.1 概念 (Conception)

最经济结构综合是最经济控制系统结构设计问题, 是重要而简化的最经济控制问题.

对于线性定常系统, 在只考虑控制机构 B 和观察装置 C 以可控性、可观性为技术约束条件, 以控制设备投资最小为经济目标函数的结构综合问题的提法如下^[2]:

已知被控制对象特性:

$$\dot{X} = AX + V, \tag{7}$$

需要设计控制机构 B , 观察装置 C :

$$\begin{cases} V = BU, \\ Y = CX, \end{cases} \tag{8}$$

满足可控性、可观性技术约束条件:

$$\text{rank} [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n, \tag{9}$$

$$\text{rank} [C \ CA \ CA^2 \ \dots \ CA^{n-1}] = n, \tag{10}$$

使经济目标函数 G_e 极小化:

$$G_e = (\$B + \$C) \rightarrow \min. \tag{11}$$

在(7)式和(8)式中, X 是系统状态矢量; U 为输入矢量; V 是控制矢量; Y 为输出矢量; A 为对象矩阵; (9), (10) 式中的 $\text{rank}[\cdot]$ 为求矩阵的秩; (11) 式中的 $\$B, \C 分别为控制机构 B 与观测装置 C 的设备投资.

对经济目标函数进一步简化, 设所有控制单元或观测单元的投资都相同, 则得如下的结论:

1) 最经济控制结构综合

已知被控对象 A , 综合控制机构 B , 满足可控性条件使控制矩阵 B 中“非零元”的个数最少.

2) 最经济观察结构综合

已知被控对象 A , 综合观测装置 C , 满足可观性条件使观测矩阵 C 中“非零元”的个数最少.

2.2 综合方法 (Methods of synthesis)

最经济结构综合的常用方法有:

1) 利用分型可控性、分型可观性的概念进行综合^[2-4];

2) 利用对象的特征根及一些矩阵的秩进行最经济控制问题的求解^[5];

3) 利用图论的有向图分析法求解线性系统的最经济结构综合的有向图解法^[6];

4) 利用分型能控的最小输入向量数求解分型最经济结构综合解^[7,8];

5) 利用 Jordan 标准形的满秩相似变换阵寻找综合解的代数方法^[9,10].

2.3 最经济结构综合解的适定性 (Adaptability of MESS)

任何实际物理系统的参数不可能是完全确定的, 在建立其数学模型时总会有一定的误差, 而且计算的精度也是有限的, 实际上在系统综合时所能得到的只是摄动后的状态矩阵, 因而对于解得的最经济结构在状态矩阵有小的摄动时是否仍能满足原来要求的技术约束条件, 即完全能控(能观)性? 这就提出了“最经济结构综合解的适定性”概念, 简而言之, 把在给定的某类摄动下仍能保持完全能控(能观)性的原来的综合解称为具有“适定性”的.

采用“能控性程度变动量 $\Delta\rho_{c,\epsilon}$ ”和“能控性余度 q_c ”来定量分析和描述综合解的适定性^[11]:

$$\rho_{c,\epsilon\min} = \rho_c - \Delta\rho_{c,\epsilon\max}, \tag{12}$$

$$q_c = (\rho_{c,\epsilon\min}/\rho_c) \times 100\%, \tag{13}$$

式中, ρ_c 为能控性程度, $\rho_{c,\epsilon\min}$ 是在某类摄动 ϵ 下系统的最小能控性程度, $\Delta\rho_{c,\epsilon\max}$ 是能控性程度的最大变动量.

当在某类摄动 ϵ 下由综合解构成的系统能控性余度 $q_c > 0$, 则该综合解是适定的.

能控性程度的最大变动量 $\Delta\rho_{c,\epsilon\max}$ 可按对象的特征值或行列式来进行估计.

3 结构经济控制^[12,13] (Structural economical control)

对于一个给定的 $A \in S^{n \times n}$, 若能确定 $B \in S^{n \times m}$, 使 $\{A, B\}$ 结构可控且 B 中变元个数 $N(B)$ 为最少, 则称 B 为 A 的一个结构经济控制阵.

对线性定常系统有: 定义 $G(A)$ 为以状态变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为顶点, 以 A 为邻接矩阵的 n 阶标定有向图; 定义 $G(A, B)$ 为以状态变量和控制输入变量 $\{x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为顶点, 以 $\begin{bmatrix} A & B \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in S^{(n+m) \times (n+m)}$ 为邻接矩阵的 $n+m$ 阶标定有向图. 这样可以将系统结构可控的条件与有向图是否强连通和有无膨胀的条件对应起来.

对于给定 $A \in S^{n \times n}$, 在 $B_0 \in S^{n \times m_0}$ 的前提下, 若 $\{A, B_0\}$ 结构可控且 $N(B_0)$ 最少时, B_0 就是 A 的一个列最少结构经济控制阵. 其中 $m_0 \triangleq \max\{n - p_R(A), 1\}$, 而 $p_R(A)$ 是 A 的所有实现所能达到的最大秩. 一旦找到任一 $B_0 \in B_0(A)$ 就可由其推出 A 的列数为 m 的结构经济控制阵 B , 进而将 B 中所有变元均任取一非零值, 得到 B 的实现 \bar{B} . 如果 $\text{rank} [\bar{B} \ \bar{A}\bar{B} \ \dots \ \bar{A}^{n-1}\bar{B}] = n$, 则 \bar{B} 就是 A 的一个实现 \bar{A} 的最经济控制阵.

这样, 利用结构经济控制阵同样可求得 $\bar{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 的最经济控制阵 \bar{B} .

4 分散控制系统的^[8]最经济控制 (MEC of decentralized control system)

对于分散控制系统:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + B_1U + B_2U, \\ Y_1 = C_1X, \\ Y_2 = C_2X, \end{cases} \quad (14)$$

分散控制系统的^[8]最经济控制是以分散能控性作为技术约束条件,以输入向量数或输出向量数作为经济目标函数.即已知状态矩阵 A 和观测阵 C_1, C_2 ,要求综合控制矩阵 B_1 和 B_2 ,使系统在分散信息结构下能控,且 B_1 和 B_2 列向量的总数为最少;或者是已知 A, B_1, B_2 ,要求综合出 C_1 和 C_2 ,使系统在分散信息结构下能观,且 C_1 和 C_2 的行向量总数为最少.

可以证明,分散能控系统的控制矩阵 B 的列向量总数(即输入向量的总数)最小值为状态矩阵 A 的循环指数.

5 闭环控制系统的^[14,15]最经济控制 (MEC of closed loop control system)

5.1 静态的状态反馈和输出反馈的最经济结构综合 (MESS for static state feedback and output feedback)

对于完全能控的闭环系统, A 阵不含有已解耦的子阵,状态反馈 K 中有 n 个待定参数,可以任意配置 n 个极点的 K 阵,在结构上必须满足的条件是:

- 1) n 个元素所占据的行数与列数均不得小于 A 阵不平凡不变因子的个数 x_0 ;
- 2) $| - A + BK | \neq 0$;
- 3) K 阵中至少有一个待定参数位于 $B \times K$ 阵的主对角线上;
- 4) 若 $B \times K$ 阵的主对角线上仅有一个 K 阵待定参数,则 $(\lambda * I - A + B \times K)$ 阵非对角线上的含有 K 阵的诸元素中,至少有一个元素在它的转置位置上对应着非零元素,即或是 A 阵的非零元素或是 $B \times K$ 的非零元素;
- 5) 若在 $(\lambda * I - A)$ 阵的第 i 行(或列),除主对角线的元素外其它元素为零,则 $B \times K$ 中的待定参数必须在第 i 行(或列)上出现.从 $(\lambda * I - A)$ 中划去第 i 行和第 i 列,得到新阵 $(\lambda * I' - A')$,对这个新阵仍用这一条件检查, $B \times K$ 的非零元素仍必须在具有上述性质的行或列上出现.

如果 A 阵可划分为两个解耦子阵的直和,则系统可以看作两个独立的闭环系统,于是相应的也必须满足上述条件.

当一个完全可控系统是不稳定时,要把不稳定极点 λ_i 配置到所需位置的状态反馈阵 K 须满足的结构条件是:

- ① K 阵至少含有 $J_0 = \sum_{i=1}^{\alpha} J_i$ 个待定参数, J_i 为不变因子 $\delta_i(\lambda)$ 的次数, α 为不稳定极点所属的不变因子的个数;
- ② K 阵非零行(或列)数均不得少于 α ;
- ③ 至少有一个待定参数位于 $B \times K$ 阵的主对角线上.

这就是以系统稳定为约束条件,状态反馈阵 K 的代价最少为目标函数的闭环系统的最经济结构综合问题.

另外,文献^[16]还讨论了最经济结构的可稳定性和闭环最经济结构综合的可稳定性.

5.2 镇定系统和配置系统极点的经济信息结构综合^[17-19] (Synthesis of economical information structure for stabilization and pole assignment of the system)

对于很大一类系统,控制器的投资及系统的运行费用近似等于 $\mu * N(K^*)$,其中 μ 是每个信息通道的设备投资及运行费用, $N(K^*)$ 是信息结构 (Information Structure, IS) K^* 中的信息通道个数, K^* 为 $r \times m$ 维信息结构阵.在满足给定技术性能指标的前提下,对具有最少信息通道的 IS 实施的控制将是最经济的.当系统在 K^* 下可被镇定(或极点可被配置),且对于任意 ISH^* ,当 $N(H^*) < N(K^*)$ 时,系统在 H^* 下必不可被镇定(或极点不可被配置),这样的 K^* 就是镇定系统(或配置系统极点)的经济信息结构 (Economical Information Structure, EIS).

系统 (C, A, B) 存在镇定系统(或配置系统极点)的 EIS 的充要条件是系统可稳定和可检测(或系统完全可控可观),即 $M_{Cor\bar{O}}^{us}(C, A, B) = \Phi$ 或 $M_{C\bar{O}O}^{us}(C, A, B) = \Phi$.

EIS 的综合方法之一是固定模法,就是寻找一个 $r \times m$ 维的结构矩阵 K^* ,使 K^* 中存在若干非奇异子结构矩阵 \bar{K}_i^* ($i = 1, 2, \dots, N$),相应的非奇异正规子系统 $(\bar{C}_i, A, \bar{B}_i)$,满足 $\{\bigcap_{i=1}^N T_Z(\bar{C}_i, A, \bar{B}_i)\} \cap S_p^{us}(A) = \Phi$ (镇定系统) 或 $\{\bigcap_{i=1}^N T_Z(\bar{C}_i, A, \bar{B}_i)\} \cap S_p(A) = \Phi$ (配置系统极点),且结构元素个数少于 K^* 的结构元素个数的任意 $r \times m$ 维结构矩阵,都不具备上述性质,那么 K^* 就是镇定系统(配置系统极点)的 EIS.

EIS 的另一综合方法是分解合成法,其实质就是对开环系统的每个不相等的特征值,首先求信息通道为最少的 IS,在每个这样的 IS 下,系统的等于该特征值的极点可被配置,这是 EIS 综合的分解;然后,把所求得 IS 以一定方法加以合成,得在其下系统的全体极点可被配置的 EIS,这为 EIS 综合的合成过程.

6 应用研究 (Application aspects)

前面所述控制系统的^[8]最经济结构综合得到的系统 $\{A, B_s, C_s\}$, B_s 和 C_s 与原系统本身的 B 和 C 无联系,二者有时差别很大.为了使综合的系统变成一个实际的物理系统,就不得不对原系统进行生产设备的改造,使 $\{B, C\}$ 成为 $\{B_s, C_s\}$,从而付出额外的经济代价,同时由于技术或经济原因,这样的改造还不一定都具有可能性,从而综合出来的结果缺乏实用价值^[20].

6.1 不需要改进生产设备的综合 (Synthesis without improving the equipment)

设 $B(p)$ 是 B 中 p 个不同的列向量所组成的矩阵, $C(q)$ 是 C 中 q 个不同行向量所组成的矩阵,当 $\{A, B, C\}$ 给定时,综合 $B(p)$ 和 $C(q)$,使 $\{A, B(p)\}$ 能控, $\{A, C(q)\}$ 能观,并使 p 和 q 为最小值 p_{min} 和 q_{min} .这样综合的 $B(p_{min})$ 和 $C(q_{min})$ 取自原系统的 B 和 C ,因而实施这样的系统不需要改进生产设备,即意味着从原系统的 m 个输入和 l 个输出中取出 p_{min} 个输入和 q_{min} 个输出来构成的能控能观的结构最简单的系

统.其综合方法就是先设 $p = 1 (q = 1)$, 判别任意 p 个输入 (q 个输出) 下的系统能控性(能观性).若能控(或能观),则 $p = p_{\min} (q = q_{\min})$, 结束综合;否则 $p(q)$ 增加 1, 重复上述过程.

6.2 部分改进生产设备的综合(Synthesis with improvement of the equipment partly)

对于给定的 $\{A, B, C\}$, 综合 B_s (或 C_s) 使 $\{A, B_s\}$ 能控(或 $\{A, C_s\}$ 能观), 且 $\Delta B \triangleq B_s - B$ (或 $\Delta C \triangleq C_s - C$) 中非零元素的个数最少, 即只部分改进生产设备的综合, 而尽量利用原系统的内在物理特征.

目前最经济控制已经在造纸^[20,21]、化工^[22]、电力^[23]等多种行业得到广泛的研究与应用.

7 结语(Conclusion)

目前的最经济控制是以传统的控制理论(经典控制理论和现代控制理论)为基础的, 即事先必须建立控制对象的数学模型. 而许多实际系统是很难建立准确的数学模型, 甚至是根本不能建立数学模型的. 因为这些系统是时变的、高度非线性的、不确定的、复杂的, 有的控制还是定性的, 为此人们提出了智能控制. 但现有的智能控制研究尚未考虑控制系统的经济性与实用性, 由于智能控制系统的复杂性, 多数仍停留在理论研究上. 为此, 我们提出了将智能控制与最经济控制相结合的最经济智能控制(Most Economical Intelligent Control, MEIC). MEIC 是智能控制系统的经济优化问题, 即以系统的性能指标为约束条件, 经济指标为目标函数的优化问题. 智能控制系统的性能指标既包含了传统控制系统的性能指标(如稳定性、准确度、快速性等), 同时又具有一些新的性能指标(如智能性).

MEIC 的结构采用基于现场总线技术的分级递阶的结构, 其中执行级为现场总线控制系统, 组织级与协调级由相应的计算机实现. 整个系统的经济性反映在: ①硬件的投入; ②系统开发与维护费用; ③系统投入运行后带来的经济效益. 因此 MEIC 的经济目标函数既要考虑系统本身的投资费用, 也要考虑系统正常运行时的维护费用和采用该控制系统后所带来的经济效益等三方面的因素.

1) 由于 MEIC 的执行级为现场总线控制系统, 而现场总线控制系统是以网络为基础的, 因此现场总线控制系统网络的结构和规模将决定执行级的硬件投入, 而组织级和协调级的硬件无多大的变化. 为此提出网络结构信息能通性作为 MEIC 的一个性能指标, 并以此为技术约束条件, 利用广义自适应遗传算法^[24]为优化方法对现场总线控制系统的网络结构进行优化研究, 以减少执行级的硬件投入, 亦即整个系统的硬件投入.

2) 随着劳动力成为商品, 知识在生产科研开发过程中的价值不断得到重视和认可, 其在系统的设计开发与维护费用中所占的比例日益增加. 因此如何缩短开发周期, 减少维护工作, 以节约系统开发与维护费用, 从而保证整个系统的经济性最优就显得更重要了. 经分析现场总线技术的特点, 并与传统的集散控制系统 DCS 进行比较研究后, 可知现场总线技术的开发周期短、可靠性高、易于维护, 更能有效的保证

系统的经济性.

3) 具体而详细地分析系统投入运行后带来的经济效益将是极其复杂而又困难的问题. 为此, 我们将系统投入运行后带来的经济效益分析简化为对产品质量状况改善的分析, 因为产品的质量越好, 其市场竞争能力就越强, 同时也能有较好的价格回报. 因此经济效益就对应为产品的质量, 而产品的质量是由系统的各种控制参数所决定的, 因此应用遗传算法对各参数进行优化研究以保证找到最优的控制参数, 从而保证生产出质量最好的产品, 以获得最大的经济效益.

MEIC 的研究, 一方面说明并非所有智能控制系统都是昂贵复杂的, 而另一方面证明现场总线控制系统比 DCS 更经济, 从而从经济的角度为智能控制系统和现场总线控制系统的发展提供依据, 以推动它们的研究和发展, 实现二者的有效结合. MEIC 将把最经济控制研究中的成果推广到智能控制中, 同时将智能控制的理论应用到最经济控制中, 以开展智能控制的应用研究, 从而为低成本自动化开辟一条新的途径.

参考文献(References)

- 1 涂序彦. 可控性、可观性的实用价值与最经济结构综合. 全国控制理论及其应用学术交流论文集. 北京: 科学出版社, 1981, 56 - 61
- 2 涂序彦. 最经济控制系统结构综合. 自动化学报, 1982, 8(2): 103 - 111
- 3 Tu Xuyan. The problem on the most economical control(MEC). Recent Development in Control Theory and Its Applications. Proceedings of the Bilateral Meeting on Control Systems. Beijing: Science Press, China; New York: Gordon and Breach Science Publishers, Inc., 1982, 133 - 144
- 4 涂序彦. 大系统控制论. 北京: 国防工业出版社, 1994, 265 - 281
- 5 涂薰生, 涂序彦. 线性最经济控制问题的一种解法. 自动化学报, 1984, 10(4): 345 - 349
- 6 汪定伟. 线性系统最经济结构综合的有向图解法. 自动化学报, 1988, 14(6): 454 - 457
- 7 陈兆宽, 刘维. 分型能控的最小输入向量数与分型最经济结构综合解. 山东大学学报(自然科学版), 1982, (2): 49 - 58
- 8 陈兆宽. 分散能控系统的最小输入向量数与最小观测向量数. 自动化学报, 1985, 11(4): 401 - 407
- 9 陈兆宽, 张荣祥. 线性控制系统最经济结构综合的代数方法. 自动化学报, 1981, 7(3): 171 - 178
- 10 黄琳, 生成元. 经济控制与线性多变量控制系统. 北京大学学报, 1981, (1): 25 - 35
- 11 张荣祥, 陈兆宽. 线性控制系统最经济结构综合解的适定性问题. 自动化学报, 1981, 7(4): 237 - 246
- 12 霍伟. 线性系统结构经济控制. 自动化学报, 1985, 11(4): 393 - 400
- 13 霍伟. 线性系统的结构经济控制: [硕士学位论文]. 北京: 北京航空航天大学, 1983
- 14 刘维. 闭环控制系统的最经济结构综合问题. 自动化学报, 1983, 9(1): 54 - 62
- 15 刘维. 线性闭环控制系统最经济结构综合: [硕士学位论文]. 北

- 京:中国科学院自动化研究所,1982
- 16 Chen Zhaokuan, Zhang Rongxiang. The problem on the stabilizable (MEC). Recent Development in Control Theory and Its Application. Proceedings of the Bilateral Meeting on Control Systems. Beijing: Science Press, China; New York: Gordon and Breach Science Publishers, Inc., 1982, 145 - 155
- 17 胡仰曾,蒋慰孙.关于经济信息结构综合方法的研究.自动化学报,1987,13(1):16-23
- 18 Hu Yangzeng, Jiang Weisun. The economical output feedback stabilization problem of linear multivariable system. Proceedings of the 9th IFAC World Congress. Budapest:Hungary, 1984, 239 - 244
- 19 胡仰曾.控制系统的经济设计:[博士学位论文].上海:华东化工学院,1984
- 20 王庆国,孙优贤等.控制系统最经济结构综合的应用研究.自动化学报,1986,12(4):347-352
- 21 王庆国.造纸机控制系统最经济结构综合:[博士学位论文].杭州:浙江大学,1984
- 22 陈兆莹.输油管道最经济运行控制:[硕士学位论文].北京:中国科学院自动化研究所,1984
- 23 张荣祥等.电力系统最佳控制中的最经济结构问题.山东工学院学报,1980,(1):67-76
- 24 吴斌,吴坚,涂序彦.广义自适应遗传算法.西南工学院学报,1998,13(4):1-6

本文作者简介

吴斌 1965年生.1985年毕业于长沙铁道学院自动控制专业,获学士学位;1993年毕业于北京科技大学计算机系,获硕士学位;现为西南工学院教师和北京科技大学工业自动化专业博士研究生,发表学术论文十余篇.主要研究方向是智能控制,模式识别等.

涂序彦 1935年生.教授,博士生导师,中国人工智能学会理事长,中国自动化学会常务理事.生物控制论,人工智能和大系统控制论方面学术专著3本,国内外发表学术论文100余篇.目前主要研究方向是智能管理与智能控制.

吴坚 1942年生.教授,博士生导师.长期从事工业过程控制的应用研究与开发,承担了多项省部级纵向和横向科研任务,发表学术论文30余篇.目前主要研究方向是计算机控制与应用.