# 控制系统的最经济智能实现*

吴 斌**

（西南科技大学信息与控制工程学院 绵阳 621002）

【摘要】提出了一种基于现场总线控制系统的最经济智能实现结构，建立了控制系统的经济目标函数，讨论了系统结构设计和局部控制器参数优化设计的智能方法。实践表明，该方法能缩短系统的开发周期，提高系统的可靠性，可取得显著的社会经济效益。

关 键 词 控制系统； 智能； 分层递阶； 遗传算法； 优化设计

中图分类号 TP273

我国有一大批中小型企业，其生产设备的自动化程度较低，且经济实力有限。为了在激烈的市场竞争中能够生存和发展，迫切需要利用高新技术来改造现有的落后设备，实现关键技术设备的局部智能自动化，从而达到以最少的投资换来最高经济收益的目的。

70年代末期和80年代初期人们提出了最经济控制的思想[1]，并在理论和应用方面做了大量的研究和探索工作[2~5]。但随着控制理论和技术的发展，最经济控制的不足也逐渐显现出来。首先最经济控制研究不是针对基于网络环境下的复杂控制系统，而是针对局部控制系统；其次它不是面向智能控制的，而是面向常规控制的。同时，在智能控制的研究中，很少涉及智能控制系统的经济性，即从经济的角度来研究智能控制；而低成本自动化LCA的研究，主要集中在具体实现技术上，尚缺少理论探讨。本文在最经济控制、低成本自动化和智能控制已有成果的基础上，提出了控制系统最经济智能实现的概念、设计方法和技术。

## 1 结构方案

控制系统的最经济智能实现是将最经济控制与智能控制相结合，以技术性能(如系统的能通性、稳定性、可靠性等)指标为约束条件，以经济代价(包括建立系统所需投资及系统运行后带来的收益两个方面)最优为目标函数的智能控制的优化研究，即研究智能控制的低成本实现问题。

由大系统控制论可知[6]，控制系统的递阶控制兼有集中控制和分散控制的优点：控制有效性和运行可靠性高、设计具有简易性和技术可实现性、经济性好和易于维护。在80年代末90年代初出现了用于过程自动化、制造自动化、楼宇自动化等领域的将现场仪表和控制室仪表连接起来的全数字化、双向、多站的互连通信网络——现场总线技术[7~10]，它用数字信号取代模拟信号，以提高系统的可靠性、精确度和抗干扰能力，并延长信息传输的距离。现场总线既是一个开放的通信网络，又是一种全分布的控制系统，是一种新型的网络集成自动化系统，它以现场总线为纽带，将挂接在总线上相关的网络节点组成自动化系统，实现基本控制、补偿计算、参数修改、报警、显示、综合自动化等多项功能。因此，控制系统的最经济智能实现采用分层递阶的体系结构，包括组织管理级、优化协调级、现场执行级三级，如图1所示。

组织管理级主要对控制任务进行任务规划、组织决策，将生产任务转化为各生产设备的具体行为要求，同时对任务完成情况进行监督和评价，并将评价结果反馈给更高一级的智能系统或操作管理人员。

优化协调级主要完成数据处理、优化控制、监督协调控制等功能。

2001年2月27日收稿
* 教育部高等学校骨干教师资助计划经费资助项目
** 男 36岁 博士 副教授

现场执行级完成具体的控制任务，采用现场总线技术实现，由智能变送器、智能控制器及智能执行器等智能现场设备组成。

## 2　目标函数

控制系统最经济智能实现的目标函数是经济性的，该函数包含控制系统的建设和运行费用及带来的经济收益两部分。根据文献[1,11]，控制系统的经济目标函数$G_e$定义为

$$G_e = \frac{\$_g}{\$_p} \to \max$$

式中　$\$_p$为系统寿命周期成本；$\$_g$为经济收益，即采用控制系统后获得的经济收益。

控制系统的总目标是使经济目标函数$G_e$为极大，也就是使$\$_g$取极大，$\$_p$取极小，即总目标可以分解为两个子目标：

1) 使系统寿命周期成本：$\$_p \to \min$；

2) 使所获得的经济收益：$\$_g \to \max$。

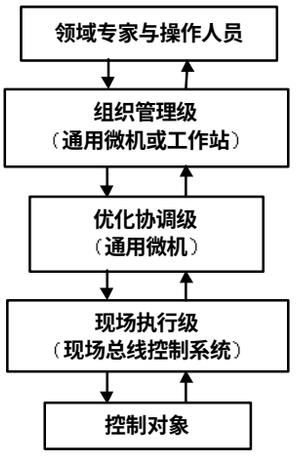


图1　控制系统的最经济智能实现结构

### 2.1　系统寿命周期成本

定义 1　系统寿命周期成本是指从系统的研究、开发、设计开始，经过调试、安装和长期使用，直至被废弃为止的整个系统寿命周期内所花费的全部费用，记为$\$_p$。

系统寿命周期成本$\$_p$可描述为

$$\$_p = \$_{hp} + \$_{kp} + \$_{yp} \tag{1}$$

式中　$\$_{hp}$表示装置成本和配套成本之和，即硬件成本；$\$_{kp}$为设计成本和实施成本，即开发成本；$\$_{yp}$为使用成本、维护成本和管理成本，即运行成本。

硬件成本$\$_{hp}$可进一步表示为

$$\$_{hp} = \$'_{hp} + \$''_{hp} - \Delta\$_{op} \tag{2}$$

式中　$\$'_{hp}$为装置成本，$\$''_{hp}$为配套成本，可依据各装置和配套设备的数量与单价解析表示；$\Delta\$_{op}$为控制系统的网络结构经优化后在现场执行级节省的硬件投入。

### 2.2　系统经济收益

评价企业经济收益的主要指标有：质量指标、经营工作指标、人员、工时和设备利用指标、物资能源利用指标、资金使用和周转指标等[11]。其中质量指标和物资能源利用指标与生产设备的先进性有关，并且这两个指标是经济收益评价首先要考虑的问题。产品质量差，物资能源消耗高，经济收益低是我国生产建设中长期普遍存在的问题。产品质量越好，其市场竞争能力就越强，同时也能有较好的价格回报；另外，消耗的物资和能源越少，生产同样数量产品的经济收益就更好。当然，经济收益还与生产出来的产品是否满足市场和消费者的需求密切相关，故控制系统投入运行后带来的经济收益，可以简单地认为是产品质量状况的改善和物资能源消耗的减少。

为了保证产品的质量和减少物资能源消耗，就要求控制系统具有良好的性能，而控制系统的性能是由系统的各项控制参数所决定。为了使系统具有良好的性能，要求控制系统的各项控制参数处于最优或次优状态。这样，对系统经济收益的要求就转化为对控制系统控制参数的要求。要使控制系统的经济收益最好，则要求控制系统相关控制参数最优或次优。

## 3 控制系统的结构优化设计

控制系统的结构优化设计主要是优化现场执行级的结构，其目的是为了降低系统寿命周期成本$\$_p$中的硬件成本$\$_{hp}$。

根据文献[12]，选择控制系统的信息通道结构能通性作为技术约束条件来优化设计现场执行级的结构。优化方法是：1) 用信息通道结构图和信息通道结构阵建立控制系统的信息通道结构模型；2) 利用快速遗传算法进行优化设计，在保证信息通道结构能通和其他束的前提下，使系统的信息通道结构最优或次最优。

在系统的信息通道结构阵中，各元素的取值仅为0和1，因此算法的编码采用二进制形式。编码的长度$L$根据系统的信点个数$k$确定为：$L=\dfrac{k(k+1)}{2}$；由于系统信息通道结构的可靠性和经济性是密切相关的，可靠性越高，经济性也就越好。同时考虑到约束条件，适应度函数$f$设定为

$$f=\begin{cases}\dfrac{\overline{Q}(S)}{s(S)+e} & \text{当}S\text{满足所有约束条件时}\\ 0 & \text{当}S\text{不满足所有约束条件时}\end{cases}$$

式中 $\overline{Q}(S)$为种群中各个体对应构成的信息通道结构阵$S$的平均信息通道结构强度；$s(S)$为相应的信息通道结构分布方差；$e$为系数，是为避免$s(S)$为0时，$f$的分母为零，其取值范围为开区间$(0,1)$。种群的大小和算法结束的迭代次数将按实际优化控制系统的规模来确定。

## 4 控制系统的参数优化设计

控制系统的参数优化设计是对现场执行级中各局部控制器的控制参数进行优化，以保证控制系统投入运行后能获取最大的经济收益。由于PID控制器原理简单、易于实现、鲁棒性强和适用面广等优点使其在计算机过程控制中仍得到广泛的应用[13]。因此现场执行级各局部控制器采用PID控制算法，将改进的遗传算法与PID参数的工程设计方法结合起来[14]，以找到最优的PID控制参数，实现智能PID控制。

### 4.1 控制参数取值范围的确定

现有的确定PID控制器参数的方法是人们在长期实际工作中总结出来的经验，但这些方法往往只给出了各参数（比例系数$K_p$，积分时间常数$T_i$，$T_d$微分时间常数）的大致范围，具体的取值还要通过实验反复试凑。因此将这些经验与遗传算法结合起来，利用先确定待优化参数的一个大致取值范围，再用遗传算法寻找具体的值，可以减少遗传算法的搜索空间，提高搜索效率。

### 4.2 适应度函数$f$的确定

采用误差泛函积分评价指标来作为控制系统的品质指标评价函数[15]。通过比较分析后，选取控制系统参数选择的目标函数如下

$$J=J_{op}(ITAE)=\int_0^{\infty}t\left|e(t)\right|\mathrm{d}t\to\min \tag{3}$$

式中 $J_{op}(\cdots)$表示误差函数$e(t)$加时间$t$之后的积分面积；$I$表示积分；$T$代表时间；$A$表示绝对值；$E$为误差。

由于遗传算法的适应度函数要求大于零且取极大值，故适应度函数定义为

$$f_i=\frac{J_{\max}-J_i}{J_{\max}J_i}+\frac{J_{\max}-J_{\min}}{J_{\max}J_{\min}N} \tag{4}$$

式中 $i$为种群中的第$i$个个体；$J_{\min}$和$J_{\max}$分别是种群中最小和最大的目标函数值；$N$为种群的大小。

### 4.3　遗传算法参数的选择

在快速遗传算法中，需要事先确定的参数有个体编码方式与长度$K$、种群规模$N$和停止进化代数$M$。本文采用十进制的编码方式，且每个待优化的控制系统参数均用四位编码，共有3个需优化的参数，所以个体的编码长度$K=12$，种群规模$N=3K=36$，停止进化代数$M=N/3=12$。

利用遗传算法进行现场执行级局部控制器的参数优化设计，其方法简单、快速，得到的控制系统性能较理想，实现了控制系统的智能化。

## 5　结 束 语

在MR-100/150M$^3$混凝土搅拌设备控制系统的开发中成功地应用了控制系统最经济智能实现的设计思想，并将该系统投入到高速公路的建设中，整个系统在现场运行正常，其可靠性和性能也得到了提高。系统投入运行后，不仅节省铺设路面混凝土的投资，同时加快了工程的进度，缩短了工期，获得了显著的社会经济效益。

控制系统的最经济智能实现，通过采用先进的基于网络的现场总线技术构造分层递阶体系结构和利用遗传算法对系统现场执行级的拓扑结构及局部控制器参数的智能优化设计，降低了系统的硬件投入、开发与维护费用，并保证了系统投入运行后能获得较高的经济收益。它把面向常规控制系统的最经济控制推广到基于网络的智能控制系统中，同时在智能控制系统的设计中引入最经济控制的思想，实现了最经济控制与智能控制的结合，为智能控制的研究和应用进行了新的探索，为低成本智能自动化系统设计提供了新的理论方法。该项研究有助于我国广大中小型企业利用高新技术进行现场改造，实现低成本智能自动化，提高企业在市场经济中的竞争能力。

## 参 考 文 献


1　吴　斌，涂序彦，吴　坚．最经济控制研究．控制理论与应用，1999, 16(5): 625~629

2　刘　维．线性闭环控制系统最经济结构综合：[学位论文]．北京：中国科学院自动化研究所, 1982

3　孙维正．最经济结构综合问题的间接解法与最经济解耦控制：[学位论文]．北京：中国科学院自动化研究所，1982

4　霍　伟．线性系统的结构经济控制：[学位论文]．北京：北京航空航天大学，1983

5　王庆国．造纸机控制系统最经济结构综合：[学位论文]．杭州：浙江大学，1984

6　涂序彦．大系统控制论．北京：国防工业出版社，1994

7　陈铁君．九五期间现场总线及其开放自动化系统规划要点和发展方针．微计算机信息，1997, 13(3): 4~6

8　刘　文，费敏锐．现场通信技术及其对我国传统产业改造的影响．上海大学学报(自然科学版)，1997, 3(增): 248~252

9　张广川．现场总线基金会及现场总线网络标准．微计算机信息，1996，12(4): 5~9

10　马少梅．现场总线与分散控制系统．化工自动化与仪表，1997，24(4): 3~6

11　裘宗舜，秦荣生．经济效益学．北京：中国财政经济出版社，1990

12　Wu Bin, Wang Xin. Analysis and optimization of information tunnel in fieldbus control system. Jouranl of University of Electronic Science and Technology of China, 2000, 29(5): 525~530[吴　斌，王　欣．现场总线控制系统信息通道结构分析与优化设计．电子科技大学学报, 2000, 29(5)：525~530]

13　王锦标，方崇智．过程计算机控制．北京：清华大学出版社，1992

14　Wu Bin, Wu Jian, Tu Xuyan. Research of fast genetic algorithm. Jouranl of University of Electronic Science and Technology of China, 1999, 28(1): 49~53[吴　斌，吴　坚，涂序彦．快速遗传算法研究．电子科技大学学报，1999, 28(1):49~53]

15　项国波．ITAE 最佳控制．北京：机械工业出版社，1986

# Most Economical Intelligent Realization of Control System

Wu Bin

(School of Information and Control Engineering，SWUST Sichuan Mianyang 621002)

**Abstract** Based on the fieldbus, an architecture of the most economical intelligent realization of the control system is put forward, and the economic goal function of the control system is presented in this paper. The intelligent optimization of the design of the system structure and the local controller parameters are discussed as well. The application indicates that the method can shorten the designing circle, improve the reliability of the system and gain conspicuous social economic benefits.

**Key words** control system；intelligence；hierarchical architecture；genetic algorithm；optimal design

---

**·科研成果介绍·**

## 数字多波形信号产生系统研究

**主研人员：向敬成 姒 强 陈辅新 蔡英杰 武剑辉 贺知明 吕幼新**

**数字波形产生系统具有高稳定性、可靠性和可集成性的特点，可以产生高精度、相干性极好的信号波形，还可方便地进行波形捷变，对提高系统的灵活性极为有益。**

**本课题针对所需的多模、多波形信号特点，利用数字合成技术研制了一套波形产生器，并且开发了一系列波形产生系统。**

**该系统基于波形数字存储直读法产生多模式、多波形脉冲压缩信号，具有波形捷变能力强、信号质量高、系统体积小、耗电低等优点，在脉冲压缩体制雷达中具有广泛的应用潜力，而宽带中频信号产生更具有实际应用价值。**

## W频段微带隔离器

**主研人员：喻梦霞 薛良金 徐 军 徐锐敏 延 波 李桂萍 罗慎独 薛 泉**

**W频段微带隔离器采用具有高单轴各向异性内场的六角晶系铁氧体材料，利用微带电路制作而成，通过理论分析、电路优化妥善解决了电路中的不连续性及器件焊接，电路统调等工艺和技术问题。**

**·项 曦·**