工程表决子系统的可靠性模糊优化设计◦

张淑华[1] 王光远[2]

[1](青岛海洋大学, 山东 青岛 266003)
[2](哈尔滨建筑大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 冗余系统在工程系统中是广泛存在的, 本文初步定性地探讨了冗余系统在工程系统中存在的条件, 指出了目前工程优化设计中片面追求降低当前造价的弊端, 提出了在优化目标中进一步考虑广义维修费用的方法, 探讨了系统中各单元造价与可靠度间关系所应具备的性质。在作了某些假定的情况下, 初步建立了广义维修费用期望值与各单元可靠度间的关系, 在此基础上以表决系统为例给出了综合考虑模糊性因素、随机性因素的工程表决子系统可靠性模糊优化设计数学模型及求解方法。
关键词 工程系统优化 造价与可靠度间的关系 广义维修费用与可靠度间的关系 冗余系统存在的条件

Fuzzy Optimization Design of Engineering r-out-of-n Subsystem on Reliability

Zhang Shuhua[1] Wang Guangyuan[2]

[1](Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003)
[2](Harbin Architectural University, Harbin 150001)

Abstract Redundant systems are exitensively exisiting in engineering systems. In this paper, the existing condition of redundant system in engineering system is discussed preliminarily and qualitatively; the defect to partially pursue to reduce the present cost is advanced; the method with extensive repair cost is given under the optimization object; the nature of the relationship between the cost in every element of the system and reliability is discussed. Under the condition of given some assumption, the expression of the relationship between the expected value of the extensive repair cost and the reliability of every element is formed. On the base of the above discussion, with r-out-of-n system, under the synthetical consideration fuzzy factor and stochastic factor, the mathematical models and its solving methods about fuzzy optimization design of engineering r-out-of-n subsystem on reliability are presented.
Keywords engineering system optimization; the relationship between cost and reliability; the relationship between extensive repair cost and reliability; the existing condition of redundant system

1 问题的提出

表决系统是指构成系统的 n 个单元中, 当有大于等于 r 个单元有效时系统有效, 换句话说当系统的失效单元数大于等于 $(n-r+1)$ 时系统失效, 这样的系统称为 r/n 表决系统 (r 为正整数, $1\le r\le n$)。

许多工程系统都可以看成是简单系统如串联系统、并联系统等的组合。而串联系统、并联系统都是表决系统的特例。当 $r=1$ 时表决系统退化为并联系统, 当 $r=n$ 时退化为串联系统。因此研究表决系统更具

◦ 本文于 1997 年 3 月 10 日收到

有普遍意义。

1.1 冗余系统存在的条件

r/n 表决系统($r \neq n$)属于冗余系统。冗余系统在机械、电子、土建等许多领域的工程系统中都是广泛存在的。特别是与人民的生命财产相关的、重要的、影响重大的工程系统中更有其存在的必要性。通过对大量冗余系统的考察分析,我们发现工程系统中存在冗余子系统的条件有二:

1) 单元的成本比起系统失效将带来的经济损失微不足道。

2) 提高某一单元的可靠度至某一值所需费用较建立冗余子系统使该冗余子系统的可靠度达到同一值所需费用高得多。

虽然冗余系统的存在将使工程系统变得更加复杂,但它是目前科技发展水平条件下提高工程系统安全性的有效手段。

1.2 工程系统优化数学模型的改进

以往的工程优化设计,过于强调降低工程造价,其结果是增加了在未来使用期间的维修费用。这也是为什么优化设计方法没能在实际工程设计过程中得到普遍推广应用的原因之一。为了提高工程优化设计结果的实用性,有必要将工程系统的当前造价和使用期间的维修费用等总费用作为优化目标。此时以可靠度作为优化设计变量,不仅能对工程系统的安全性有个明确的定量认识,而且可靠度越高,当前造价越大,维修费用越少,所以也是工程系统当前造价与维修费用的最佳协调。由于系统失效后,除了有维修费用外,还有因失效造成的其它引发损失,故总损失为维修费用与引发损失之和,我们称之为广义维修费用。系统的维修费用与单元的失效准则有关,它是系统中不同单元失效这个离散随机变量的函数,故应取其期望值;而系统的引发损失与维修好系统所用时间,系统失效影响的范围、程度、受影响物的性质等因素有关,它是系统各失效模式这个离散随机变量的函数,故也应取其期望值。所以广义维修费用作为系统优化目标之一以广义维修费用期望值的形式出现。

工程系统中存在着大量的不确定性因素。如电子元件的使用寿命,机械、土建结构所受的载荷,材料性能等都有随机性;单元失效准则、系统使用期间可能遇到的灾害等都有较强的模糊性。严格说来工程系统的造价也有随机性,它受到一个国家或地区的经济发达程度、资源状况、供需关系的影响。因此有必要综合考虑这些不确定性因素,对工程系统进行可靠性模糊优化设计。

2 工程系统的当前造价与可靠度的关系 $C(\Psi)$

工程系统的当前造价是系统中各单元当前造价之和;而系统的可靠度与系统中各单元可靠度间的关系由系统的功能逻辑性质决定,虽然对不同的系统这种函数关系的形式可能不同,但对每一个具体的系统这种函数关系是确定的,唯一的;所以系统的当前造价 C 与可靠度 Ψ 的关系总可以归结为系统中各单元的当前造价 C_i 与可靠度 Ψ_i 间关系 $C_i(\Psi_i)$ 的函数。

系统中各单元(如可以是电子元件、机械构件、土建结构等)的造价与可靠度关系的建立是困难的,原因有以下三点;

1) 缺乏足够的统计数据。

2) 一个对任何单元都有效的函数关系式是不可能有的。单元材料、型式有多种选择和组合,而单元的造价与可靠度都与材料、型式有关。故单元采用不同材料和型式时其造价可靠度关系也不会相同。

3) 影响单元造价可靠度关系的因素很多,除材料和型式外,还有加工质量、环境、生产力发展水平和人力物力资源等,因此严格说来造价可靠度关系不是一一对应的。尤其是近年来相当一部分造价都不是用来提高其可靠性的,如土建结构的内外装修、生活设施的改善等,使造价可靠度间更不具有一一对应关系。

为此,我们定义单元的造价可靠度关系为:单元的可靠度达到某一值所需的最小造价或在单元造价一定时把该费用充分用于提高其可靠度所达到的最大可靠度。即:

$$c_i(\Psi_i) = \min c(\Psi) \quad \text{或} \quad \Psi_i(c_i) = \max \Psi(c)$$

这样 c_i 与 Ψ_i 间就一一对应了,由上述两个定义的对偶性知 $c_i(\Psi_i)$ 是唯一的。

目前为止, 有关单元造价可靠度间关系的公开发表文献还很少见到。文献[2]指出, 单元的 $c_i(\Psi_i)$ 具有下列基本性质:

① 一个低可靠度单元的成本较低

② 一个高可靠度单元的成本很高

③ 成本是可靠度的单调递增函数

④ 成本对可靠度的导数是一个单调递增函数。

由前述系统的 $c(\Psi)$ 与单元的 $c_i(\Psi_i)$ 间的关系可知, 系统的 $c(\Psi)$ 不一定满足上述的四个基本性质。

在这里, 我们采用文献[1]提供的单元造价可靠度关系式:

$$c_i(\Psi_i) = c_{0i}\left[1 - \frac{1}{\alpha_i}\ln(1 - \Psi_i)\right] \tag{1}$$

对于 r/n 表决系统, 其系统造价可靠度关系可间接表达为:

$$c = \sum_{i=1}^{n} c_i = \sum_{i=1}^{n} c_{0i}\left[1 - \frac{1}{\alpha_i}\ln(1 - \Psi_i)\right] \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\Psi = &\left(\prod_{i=1}^{n}\Psi_i\right)\cdot\left[1 + \sum_{j_1=1}^{n}\left(\frac{1}{\Psi_{j_1}} - 1\right) + \sum_{j_1=1}^{n-1}\sum_{j_2=j_1+1}^{n}\left(\frac{1}{\Psi_{j_1}} - 1\right)\left(\frac{1}{\Psi_{j_2}} - 1\right) + \right.\\ &\left.\cdots + \sum_{1\le j_1<j_2<\cdots<j_{n-r}\le n}\left(\frac{1}{\Psi_{j_1}} - 1\right)\cdots\left(\frac{1}{\Psi_{j_{n-r}}} - 1\right)\right]\end{aligned} \tag{3}$$

在这里, 假设系统中各单元失效相互统计独立。

3 系统广义维修费用期望值与可靠度间的关系

系统广义维修费用期望值由二部分组成, 维修费用期望值是系统在未来整个寿命期内使用维护费的平均度量, 引发损失期望值是系统本身的工作状态对系统功能发挥的影响的平均度量。二者的和是系统在未来使用寿命期内总失效损失的平均度量。

对于维修费用期望值 L_1, 其计算可表达为:

$$L_1 = \sum_{i=1}^{n}(1 - \Psi_i)\cdot D_i^{(1)} \tag{4}$$

对于引发损失期望值 L_2, 设失效模式数为 m, 每一失效模式的失效概率为 P_j, 对应的损失值为 E_j, 则

$$L_2 = \sum_{j=1}^{m} P_j E_j \tag{5}$$

故广义维修费用期望值 L 为:

$$L = L_1 + L_2 = \sum_{i=1}^{n}(1 - \Psi_i)\cdot D_i^{(1)} + \sum_{j=1}^{m} P_j E_j \tag{6}$$

式中 $D_i^{(1)}$ 为系统第 i 个单元失效后的维修费用, E_j 为系统第 j 个失效模式发生引起系统失效造成的引发损失值。它们应按单元及其系统的具体性质评估。$D_i^{(1)}$ 只与单元的失效准则即单元被破坏的程度、修复的难易有关, 评估起来较容易; E_j 与失效模式中的失效单元数、单元的失效准则、对多个失效单元修复的修复方法及受系统失效影响的外部系统的性质、受灾程度等, 故评价较复杂。为此我们作两点假设:

1) 一个失效模式中的多个失效单元是一个一个依次修复的。

2) 系统失效造成的引发损失与修复该系统所需时间成正比。

这样, 系统失效造成的引发损失可以按系统中各失效单元修复所需时间分配到各失效单元, 而各单元修复所需时间是一定的, 使评估工作大大简化。故:

$$E_j = \sum_{k=1}^{l} D_k^{(2)} \tag{7}$$

式中 l 为系统第 j 个失效模式中含有的失效单元数。$D_k^{(2)}$ 为第 k 个单元修复时间内受系统失效影响的外部系统损失值。

对于 r/n 表决系统, 只要有 r 个单元有效而不管具体是哪 r 个单元有效系统就有效, 故从优化的观点出发, 人们当然选择所有失效单元中最容易修复的单元修复, 故 r/n 表决系统的引发损失期望值可统一表达为:

$$L_2=\sum_{1\le j_1<j_2<\cdots<j_{n-r+1}\le n} P\Big(\bigcap_{\substack{i=1\\ \ne j_1\ne j_2\ne\cdots\ne j_{n-r+1}}}^{n}\Omega_i\cap\overline{\Omega}_{j1}\cap\cdots\cap\overline{\Omega}_{j_{n-r+1}}\Big)\cdot\min\{D_{j1}^{(2)},D_{j2}^{(2)},\cdots,D_{jn}^{(2)}\}$$

$$+\sum_{1\le j_1<\cdots<j_{n-r+2}\le n} P\Big(\bigcap_{\substack{i=1\\ \ne j_1\ne j_2\ne\cdots\ne j_{n-r+2}}}^{n}\Omega_i\cap\overline{\Omega}_{j_1}\cap\cdots\cap\overline{\Omega}_{j_{n-r+2}}\Big)\cdot$$

$$\min\{D_{j_1}^{(2)},D_{j_2}^{(2)},\cdots,D_{j_{n-r+2}}^{(2)}\text{任意两两之和}\}$$

$$+\cdots+P\Big(\bigcap_{i=1}^{n}\overline{\Omega}_i\Big)\cdot\min\{D_1^{(2)},D_2^{(2)},\cdots,D_n^{(2)}\text{任意 } r \text{ 个之和}\}\tag{8}$$

式中 Ω_i 为系统第 i 个单元有效事件, $\overline{\Omega}_i$ 为系统第 i 个单元失效事件。P 为概率。若假设系统各单元失效相互统计独立, 则(8) 式可简化为:

$$L_2=\Big[\prod_{i=1}^{n}(1-\Psi_i)\Big]\cdot[\min\{D_1^{(2)},D_2^{(2)},\cdots,D_n^{(2)}\text{任意 } r \text{ 个之和}\}+$$

$$\sum_{j_1=1}^{n}\frac{\Psi_{j_1}}{1-\Psi_{j_1}}\cdot\min\{\text{除 } j_1 \text{ 单元外的其余所有单元之 } D^{(2)} \text{ 的任意}(r-1)\text{ 个之和}\}+$$

$$\cdots+\sum_{1\le j_1<\cdots<j_{r-1}\le n}\frac{\Psi_{j_1}}{1-\Psi_{j_1}}\cdot\frac{\Psi_{j_2}}{1-\Psi_{j_2}}\cdot\cdots\cdot\frac{\Psi_{j_{r-1}}}{1-\Psi_{j_{r-1}}}\cdot$$

$$\min\{\text{除 } j_1,\ j_2,\ \cdots,\ j_{r-1} \text{ 各单元外的其余所有单元的 } D^{(2)}\}]\tag{9}$$

由式(6)、(9) 和式(3) 可得到广义维修费用期望值 L 与可靠度 Ψ 间的间接关系。

4　表决系统可靠性模糊优化设计数学模型

当考虑工程系统中各单元存在的模糊性时, 各单元的可靠度变为广义可靠度(由文献[1]知模糊性也能单独引起可靠性问题, 模糊性和随机性共存时的可靠度为广义可靠度), 但因为我们不直接去研究系统中各单元的可靠度计算, 而只是从整个系统的分析出发研究系统中各单元间的可靠度分配, 故可以只考虑单元以上层次中存在的模糊性因素。即环境条件、材料性能等存在的模糊性和随机性可不用具体考虑, 只考虑系统失效准则的模糊性即可, 单元层次中的模糊性待这步工作完成, 转为在满足单元可靠度达到系统分配给该单元的可靠度要求的条件下进行具体单元的设计中去考虑。

关于系统失效准则的模糊性, 可简单说明如下。设使用单位对系统的设计可靠度提出的要求是不小于 0.996, 而当系统的设计可靠度为 0.995999 时所设计的系统不可用。这显然是不合理的, 而且可能会漏掉一个很理想的设计方案。其原因在于系统失效是个渐变过程, 而对它的认识以突变形式表现。为此需将失效准则也以渐变形式表达, 即考虑失效准则的模糊性。

至此, 在上述各项准备工作的基础上, 在假设系统中各单元失效相互统计独立的条件下, 可以写出表决系统可靠性模糊优化设计的数学模型为:

$$\begin{aligned}&\min C(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)+L_1(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)+L_2(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)\\&\text{s.t.}\quad \Psi(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)\in\underset{\sim}{G}\end{aligned}\tag{10}$$

即:

$$\min\sum_{i=1}^{n}c_{0i}\Big[1-\frac{1}{\alpha_i}\ln(1-\Psi_i)\Big]+\sum_{i=1}^{n}(1-\Psi_i)\cdot D_i^{(1)}+$$

$$\Big[\prod_{i=1}^{n}(1-\Psi_i)\Big]\cdot[\min\{D_1^{(2)},D_2^{(2)},\cdots,D_n^{(2)}\text{任意 } r \text{ 个之和}\}+$$

$$\sum_{j_1=1}^{n}\frac{\Psi_{j_1}}{1-\Psi_{j_1}}\cdot\min\{\text{除 } j_1 \text{ 单元外的其余所有单元之 } D^{(2)} \text{ 的任意}(r-1)\text{ 个之和}\}+$$

$$\cdots+\sum_{1\le j_1<\cdots<j_{r-1}\le n}\frac{\Psi_{j_1}}{1-\Psi_{j_1}}\cdot\frac{\Psi_{j_1}}{1-\Psi_{j_2}}\cdot\cdots\cdot\frac{\Psi_{j_{1-1}}}{1-\Psi_{j_{r-1}}}\cdot$$

$$\min\{\text{除 } j_1,\ j_2,\ \cdots,\ j_{r-1} \text{ 各单元外的其余所有单元的 } D^{(2)}\}]$$

$$\text{s.t.}\left(\prod_{i=1}^{n}\Psi_i\right)\cdot\left[1+\sum_{j_1=1}^{n}\left(\frac{1}{\Psi_{j_1}}-1\right)+\cdots+\sum_{1\le j_1<\cdots<j_{n-r}\le n}\left(\frac{1}{\Psi_{j_1}}-1\right)\cdots\left(\frac{1}{\Psi_{j_{n-r}}}-1\right)\right]\mathrel{\tilde{\in}}\tilde{G} \tag{11}$$

式中$\tilde{\in}$表示模糊属于，$\tilde{G}$为模糊允许域，此为系统可靠度约束条件下的系统总费用最小模型。根据给定的问题不同，表决系统的可靠性模糊优化设计数学模型也可以表达为系统总费用约束条件下的系统可靠度最大模型，即:

$$\max\ \Psi(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)$$

$$\text{s.t.}\ C(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)+L_1(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)+L_2(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)\mathrel{\tilde{\in}}\tilde{G}' \tag{12}$$

数学模型(10)和(12)是互为对偶的，其解相同。

这是具有普通模糊约束的优化问题，可采用水平截集解法。

1) 系统可靠度约束条件下的系统总费用最小模型。

根据可靠度约束条件的性质，即可靠度不小于给定值 Ψ_a，设模糊区间为 d^L，则可将模糊允许域$\tilde{G}$取为(见图 1):

$$\mu_G(\Psi)=\begin{cases}1.0 & 1.0\ge\Psi\ge\Psi_a\\ \dfrac{1}{d^L}(\Psi-\Psi_a+d^L) & \Psi_a-d^L\le\Psi\le\Psi_a\\ 0 & 0<\Psi<\Psi_a-d^L\end{cases} \tag{13}$$

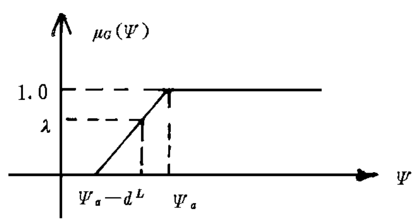

图 1

设约束水平为 λ，则由 $\mu_G(\Psi)\ge\lambda$ 解得: $\Psi\ge\Psi_a-(1-\lambda)d^L$。于是模糊优化问题转化为一系列具有不同约束水平 λ 的普通优化问题，即:

$$\min\ C+L_1+L_2$$

$$\text{s.t.}\ \Psi(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)\ge\Psi_a-(1-\lambda)d^L \tag{10'}$$

2) 系统总费用约束条件下的系统可靠度最大模型。

由系统总费用不得超过给定值 W_a，设模糊区间为 d^u，则可将模糊允许域$\tilde{G}$ 取为(见图 2):

$$\mu_{G'}(W)=\begin{cases}1.0 & W\le W_a\\ \dfrac{1}{d^U}(W_a+d^U-W) & W_a\le W\le W_a+d^U\\ 0 & W>W^a+d^U\end{cases} \tag{14}$$

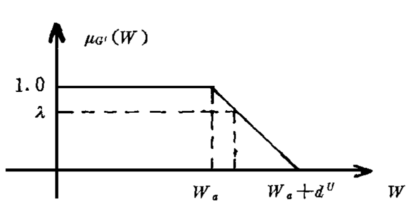

图 2

仍设约束水平为 λ，则由 $\mu_{G'}(W)\ge\lambda$ 解得: $W\le W_a+(1-\lambda)d^u$，则模糊优化问题转化为一系列具有不同约束水平 λ 的普通优化问题:

$$\max\ \Psi(\Psi_1,\Psi_2,\cdots,\Psi_n)$$

$$\text{s.t.}\ W=C+L_1+L_2\le W_a+(1-\lambda)d^u \tag{12'}$$

5　算例

某工程系统的一个子系统由五个单元组成，由工程设计所规定的载荷和失效准则，评估了各单元的参数 C_{0j}，α_j，$D_j^{(1)}$ 和 $D_j^{(2)}$ ($j=1, 2, \cdots, 5$)，列于表 1，工程系统的全局优化分配给该子系统的可靠度 $\Psi_a=0.99999$。当该子系统分别为并联系统、2/5 表决系统、3/5 表决系统、4/5 表决系统及串联系统时，试求解各种系统的最优可靠度分配。

解：利用 Kuhn-Tucker 局优性条件，求出优化数学模型(10)的最优解满足的必要性条件，利用迭代法导出迭代公式及迭代步骤，编制程序，得到最优解后判断该解的 Hessen 矩阵的正定性可知该解是否为真正的最优解(详见文献[4])。将得到的最优解也一并列入表 1(取约束水平 $\lambda=1$)。

表 1

系统	单元号 / 参数及结果	NO.1	NO.2	NO.3	NO.4	NO.5
已知参数	c_{oj}	0.8	0.75	0.7	0.65	0.60
	α_j	8.8	8.3	7.8	7.3	6.8
	$D_j^{(1)}$	0.9	0.85	0.80	0.75	0.70
	$D_j^{(2)}$	2.8	2.6	2.5	2.3	2.0
并联系统	Ψ_j^*	0.90998	0.90533	0.90018	0.89447	0.88808
	$C=4.5322$　$L=0.3989$　$W=4.9310$					
2/5 表决系统	Ψ_j^*	0.96488	0.96361	0.96229	0.96061	0.95889
	$C=4.96763$　$L=0.15105$　$W=5.11867$					
3/5 表决系统	Ψ_j^*	0.989927	0.989924	0.989934	0.989961	0.990002
	$C=5.56218$　$L=0.04024$　$W=5.60242$					
4/5 表决系统	Ψ_j^*	0.998982	0.998990	0.998998	0.999007	0.999018
	$C=6.59620$　$L=0.00401$　$W=6.60021$					
串联系统	Ψ_j^*	0.99999797	0.99999798	0.99999799	0.99999801	0.99999803
	$C=9.383$　$L=3.24\times10^{-5}$　$W=9.3830324$					

从优化结果可得出如下结论：

1) 由相同单元组成的具有不同逻辑性质的系统，当约束条件相同即系统可靠度要求相同时，随着系统由并联系统变为表决系统、串联系统，对系统中各个单元的可靠度要求也随之逐渐提高。这是符合系统随着冗余度的减少对系统中单元的要求提高的性质的，也表明本文的数学模型及求解过程的正确性。

2) 随着系统由并联系统变为表决系统、串联系统，系统的当前造价逐渐增加、损失期望逐渐减小、总费用逐渐增加。这是因为对系统中各单元的可靠度要求逐渐提高、失效概率逐渐下降，故成本迅速提高而各单元的自身损失值 $D_j^{(1)}$ 和引发损失值 $D_j^{(2)}$ 不变时损失期望当然下降。当总费用不变时损失期望的变化与此相反。

3) 不论是哪种系统，各单元随着单元号的增加，其最优可靠度的分配也随之增大，即 2/5 表决系统的最优可靠度分配较并联系统的最优可靠度分配，单元 2 比单元 1 可靠度增加的多，单元 3 比单元 2 可靠度增加的多，依此类推。这是因为 α_j 的含义是每增加单位可靠度所需增加的成本的对数比，即 α_j 越大，成本增加的速率越大。从已给数据 α_j 随 j 递减，故系统优先增加 j 大的单元的可靠度以减缓成本的增加，C_{0j} 的含义是单元可靠度接近于零时的基础成本。

(下转第 130 页)

从上表可以看出，第一类城市的资金和产值利税率比第四类城市分别高出 18.5 和 4.8 个百分点，成本利润率高出 4.9 个百分点，全员劳动生产率多 4315 元，全部流动资金周转次数多 1.1 次，百元产值流动资金占用率少 89.1 个百分点，百元固定资产原值实现的利税和产值分别高出 18.3 和 152.2 个百分点。

这说明我们用综合主成分来评判是有效的，而且用系统聚类法分割出的四类城市间的工业经济效益差异是明显的，我们可以按上述几点分析，各城市针对性地制定相应政策，发挥原有优势，弥补不足，以提高综合经济效益。

3 对应用方法的思考

我们用了多元统计方法的综合主成分分析和系统聚类分析对全国 35 个城市的全市全部独立核算工业企业的经济效益进行综合排序和分类。

本文采用综合评判方法，其最大的优点是考虑了所有成分包含的信息，因而比传统采用累积贡献率≥0.85 的主成分法更全面、更准确。当然其信息之间的汇总采用加权求和的经验法缺乏理论基础。

从本文中算出的主成分可以看出，其最终结果的经济意义并不明确，这一方面是源于主成分方法自身的理论局限，如主成分只是对初始指标的线性组合，同时主成分分析对样本量的要求比较苛刻，尤其是指标多时，要求样本量远远大于指标个数才能得到有意义的结果；另一方面，经济效益的模糊性也有一定的影响。

尽管如此，我们用系统聚类法对综合主成分量进行最优分割再求各类平均值并进行分析后，可以认为，作为多元统计分析方法的综合主成分法，仍不失为综合评价经济效益的有效方法。

参 考 文 献

1 M．肯德尔．多元分析．科学出版社，1983：16～58
2 呼和浩特市、包头市、银川市统计局．92 年全国部分重点城市经济社会资料简编，1993：41～42
3 孟生旺．用主成分分析法进行多指标综合评价应注意的问题．统计研究，1992(4)
4 彭家生，陈述云，黄茹．经济效益评价的灰色多元方法．统计与决策，1992(2)

(上接第 43 页)

参 考 文 献

1 王光远．工程软设计理论．北京：科学出版社，1992
2 张淑华等．串联系统的模糊可靠性．系统工程理论与实践，1994，14(9)
3 张淑华．考虑结构失效相关性工程系统的全局优化．哈尔滨建筑大学博士学位论文，1993
4 王光远，张淑华．串联工程系统的全局优化．哈尔滨建筑大学学报，1991(4)
5 王光远，张淑华．考虑结构失效相关时串联工程系统造价可靠度间的关系．哈尔滨建筑大学学报，1992(4)
6 张淑华，王光远．工程并联子系统的优化．哈尔滨建筑大学学报，1993(6)