

doi: 10.7690/bgzd.2015.02.011

一种电路容差分析实施对象选择决策方法

李华府, 张尚珠

(中国空空导弹研究院第十六研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为了从一批电路中准确判断哪些电路更需要开展容差分析, 提出一种基于模糊数学和灰色关联分析理论的电路容差分析实施对象选择决策方法, 建立了复杂装备系统开展电路容差分析实施对象选择决策数学模型。通过计算各电路容差分析实施对象到相对最优、劣容差分析电路的模糊灰色关联系数, 来确定各电路容差分析实施对象的相对优势灰色关联度, 并依据相对灰色关联度对各实施对象的优先程度进行排序, 实现电路容差分析实施对象选择决策。通过案例分析验证了该模型的有效性。

关键词: 容差分析; 模糊数学; 灰色关联分析; 多属性决策

中图分类号: TJ760.3 **文献标志码:** A

A Method of Circuit Tolerance Analysis Object Decision Making

Li Huafu, Zhang Shangzhu

(No. 16 Institute of China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to decide which one needs circuit tolerance analysis from numbers of circuits, a circuit tolerance analysis object choosing decision-making method based-on fuzzy math and grey relational analysis theory is proposed. Establish decision making circuit tolerance analysis implementation object based on fuzzy math and grey relation analysis theory. Through calculating fuzzy grey relation index of every circuit tolerance analysis object to relative best or worst tolerance analysis circuit, ensure relative advantage grey relative degree of every circuit tolerance analysis implantation object. Then, carry out priority scheduling of implantation object according to grey relative degree, and realize circuit tolerance analysis implantation object decision making. Through case analyzed to verify the validity of the model.

Keywords: tolerance analysis; fuzzy math; grey relational analysis theory; multi-attribute decision making

0 引言

电路容差分析主要是研究在规定的使用条件范围内电路各组成单元的参数偏差对电路性能的影响, 预测影响电路性能稳定性的关键环节, 为产品设计优化提供支持。

在工程上, 对所有电路都进行容差分析不但会严重消耗产品的研制资源, 而且会严重影响产品的研制进度, 不利于产品市场的占有、装备战斗力的形成。因此, 对于复杂电路系统而言, 在开展容差分析之前, 需要依据相关标准和产品研制经验对实施对象进行科学的分析、甄选是很有必要的。

GJB/Z89—97《电路容差分析指南》中明确了容差分析实施对象的确定一般准则^[1]。在实际工程应用中, 对精度要求比较高的电路在电路系统中通常会被设计师重点关注, 它对参数波动的容差能力在某种意义上决定了整个电路系统的容差水平。同时, 还需要考虑较敏感的电路、精度要求比较高的电路和测试时经常超差的电路。

如何从一批电路中判断出哪些更需要开展容差分析, 并给出各电路的优先级排序是典型的多属性决策问题^[2]。但是, 该问题有它的特殊性, 主要体现在所涉及的因素, 如任务成功性、敏感程度、精度要求等都属于定性指标, 难以定量描述^[3]。这就为工程实际操作过程中带来了困难, 利用主观“拍板”进行决策可能会潜在一定的风险。

针对这一问题, 笔者基于模糊数学^[4]和灰色理论^[5]进行了研究。

1 问题描述及相关定义

笔者用 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 表示参与决策的电路容差分析实施对象集, 用 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_8\}$ 表示由对安全性要求、任务成功性要求、制作成本、实现难度、特殊的防护要求、对环境的敏感等级、精度以及稳定性等构成的因素集, 对实施对象 x_i 的评价因素 a_j 的取值 $(r_{ij}^L, r_{ij}^M, r_{ij}^R)$ 来表示, 据此, 对于 n 个实施对象的综合权衡矩阵可表示为:

收稿日期: 2014-09-14; 修回日期: 2014-10-20

基金项目: 航空科学基金资助项目(2010ZD12008)

作者简介: 李华府(1984—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事装备可靠性系统工程研究。

$$R = \begin{matrix} & a_1 & a_2 & \cdots & a_8 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} (r_{11}^L, r_{11}^M, r_{11}^R) & (r_{12}^L, r_{12}^M, r_{12}^R) & \cdots & (r_{18}^L, r_{18}^M, r_{18}^R) \\ (r_{21}^L, r_{21}^M, r_{21}^R) & (r_{22}^L, r_{22}^M, r_{22}^R) & \cdots & (r_{28}^L, r_{28}^M, r_{28}^R) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (r_{n1}^L, r_{n1}^M, r_{n1}^R) & (r_{n2}^L, r_{n2}^M, r_{n2}^R) & \cdots & (r_{n8}^L, r_{n8}^M, r_{n8}^R) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_8)$ 表示容差分析实施对象各评价因素的权重。

定义 1 相对最优(劣)容差分析电路 x_0^+ (x_0^-)。是指由容差分析实施对象集的各实施对象中评价因素的相对最高(低)值所组成的理想对象电路。

定义 2 相对灰色关联度 δ 是指各容差分析实施对象 x_i 到相对最劣容差分析电路 x_0^- 的紧密程度。

通常, 各属性指标中成本可以通过具体的投入估算得到, 而对因素如对环境的敏感等级、精度以及稳定性等只能通过定性评价获得, 如优、良、中、一般等^[6]。在这里, 用三角模糊数来描述各定性指标, 如表 1 所示。

表 1 容差分析对象评价因素等级与三角模糊数的映射

因素评价等级	三角模糊数
优	0.95, 0.97, 1.00
良	0.85, 0.90, 0.94
中	0.80, 0.82, 0.84
一般	0.70, 0.76, 0.79

2 决策模型

1) 对容差分析综合权衡矩阵 R 的因素值进行规范化^[7]处理, 得规范化矩阵

$$B = [b_{ij}] \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8)$$

因评价容差分析实施对象电路优先级的属性指标都属于积极性指标, 即指标值越高、实施的必要性越大, 所以, 选择效益型属性指标的归一化方法对指标进行归一化处理为:

$$\begin{cases} b_{ij}^L = \frac{r_{ij}^L}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{ij}^R)^2}} \\ b_{ij}^M = \frac{r_{ij}^M}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{ij}^M)^2}} \\ b_{ij}^R = \frac{r_{ij}^R}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (r_{ij}^L)^2}} \end{cases}, (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (1)$$

2) 确定加权矩阵 B' 。

$$B' = [(\omega_j b_{ij}^L, \omega_j b_{ij}^M, \omega_j b_{ij}^R)], \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (2)$$

3) 相对最优、劣容差分析电路 x_0^+ 、 x_0^- :

$$x_0^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^L, \max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^M, \max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^R), j = 1, 2, \dots, 8\} \quad (3)$$

$$x_0^- = \{(\min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^L, \min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^M, \min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^R), j = 1, 2, \dots, 8\} \quad (4)$$

4) 计算各容差分析实施对象电路 x_i 到相对最

优、劣容差分析电路 x_0^+ 、 x_0^- 的灰色关联系数 γ_{i0}^+ 、 γ_{i0}^- 。

将相对最优、劣容差分析电路 x_0^+ 、 x_0^- 作为基准进行对比分析计算。

① 容差分析实施对象电路 x_i 到相对最优容差分析电路 x_0^+ 的灰色关联系数 γ_{i0}^+ :

$$\Delta_{ij}^+ = |(\max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^L, \max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^M, \max_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^R) - (\omega_j b_{ij}^L, \omega_j b_{ij}^M, \omega_j b_{ij}^R)| \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (5)$$

关联系数为

$$\gamma_{i0}^+ = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij}^+ + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}^+}{\Delta_{ij}^+ + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}^+} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (6)$$

② 容差分析实施对象电路 x_i 到相对最劣容差

分析电路 x_0^- 的灰色关联系数 γ_{i0}^- :

$$\Delta_{ij}^- = |(\min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^L, \min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^M, \min_{1 \leq i \leq n} \omega_j b_{ij}^R) - (\omega_j b_{ij}^L, \omega_j b_{ij}^M, \omega_j b_{ij}^R)| \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (7)$$

关联系数为

$$\gamma_{i0}^- = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij}^- + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}^-}{\Delta_{ij}^- + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}^-} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, 8) \quad (8)$$

其中 $\zeta \in [0, 1]$, 通常 ζ 取值不大于 0.5。

5) 计算各容差分析实施对象电路 x_i 到相对最劣理想容差分析电路 x_0^- 的相对灰色关联度 G :

$$G = \{g_i\}, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

其中 $g_i = \frac{\gamma_{i0}^-}{\gamma_{i0}^- + \gamma_{i0}^+}$ 。

6) 基于相对关联度 G 确定各容差分析实施对象电路的优先程度。

3 案例分析

某型机载航空武器系统的电路系统复杂，需开

展容差分析的电路较多，而且各电路的容差分析优先程度评价集中各因素指标如表 2 所示。

表 2 某机载航空武器系统电路容差分析优先程度评价因素指标

电路/指标	安全性 a_1	任务成功性 a_2	制作成本 a_3	实现难度 a_4	防护要求 a_5	敏感性 a_6	精度 a_7	稳定性 a_8
电路 1(x_1)	高	高	中	非常高	非常高	高	高	高
电路 2(x_2)	非常高	高	中	非常高	高	中	高	中
电路 3(x_3)	高	非常高	高	高	中	非常高	非常高	非常高

影响电路容差分析实施对象选择决策的关键因素有很多，本案例重点考虑了对安全性、任务成功性和可实现性的影响。因此，通过征询专家意见，

确定权重 $\omega = [0.25, 0.2, 0.05, 0.2, 0.05, 0.1, 0.1, 0.05]$ 。基于此，本案例综和权衡如下：

1) 建立容差分析实施对象综合权衡矩阵

$$R = \begin{bmatrix} (0.85, 0.90, 0.94) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.80, 0.82, 0.84) & (0.95, 0.97, 1.0) & (0.95, 0.97, 1.0) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.85, 0.90, 0.94) \\ (0.95, 0.97, 1.00) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.80, 0.82, 0.84) & (0.95, 0.97, 1.0) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.80, 0.82, 0.84) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.80, 0.82, 0.84) \\ (0.85, 0.90, 0.94) & (0.95, 0.97, 1.00) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.85, 0.90, 0.94) & (0.80, 0.82, 0.84) & (0.95, 0.97, 1.0) & (0.95, 0.97, 1.00) & (0.95, 0.97, 1.00) \end{bmatrix}$$

2) 将决策者的权重 ω 纳入到综合权衡矩阵中，建立加权矩阵

$$B = \begin{bmatrix} (0.127, 0.140, 0.155) & (0.102, 0.112, 0.124) & (0.078, 0.084, 0.090) & (0.112, 0.119, 0.126) & (0.059, 0.063, 0.066) & (0.053, 0.059, 0.063) & (0.051, 0.056, 0.062) & (0.027, 0.029, 0.031) \\ (0.142, 0.153, 0.163) & (0.102, 0.112, 0.124) & (0.071, 0.084, 0.090) & (0.112, 0.119, 0.126) & (0.052, 0.058, 0.063) & (0.058, 0.063, 0.069) & (0.051, 0.056, 0.062) & (0.029, 0.031, 0.035) \\ (0.127, 0.140, 0.155) & (0.113, 0.122, 0.131) & (0.076, 0.092, 0.101) & (0.100, 0.109, 0.120) & (0.049, 0.052, 0.056) & (0.050, 0.053, 0.056) & (0.057, 0.061, 0.066) & (0.025, 0.027, 0.028) \end{bmatrix}$$

3) 利用公式 (3) 和 (4) 确定的相对最优、劣容差分析电路 x_0^+ 、 x_0^- ：

$$x_0^+ = \{(0.142, 0.153, 0.163) \quad (0.113, 0.122, 0.131) \quad (0.078, 0.091, 0.101) \quad (0.112, 0.118, 0.126) \quad (0.059, 0.063, 0.066) \quad (0.058, 0.063, 0.067) \quad (0.056, 0.061, 0.066) \quad (0.029, 0.032, 0.034)\}$$

$$x_0^- = \{(0.127, 0.140, 0.155) \quad (0.102, 0.112, 0.124) \quad (0.072, 0.084, 0.090) \quad (0.100, 0.109, 0.120) \quad (0.049, 0.052, 0.056) \quad (0.051, 0.054, 0.059) \quad (0.051, 0.056, 0.062) \quad (0.026, 0.027, 0.290)\}$$

4) 利用公式 (5)~(9) 确定各容差分析实施对象电路 x_i 到相对最劣容差分析电路 x_0^- 的相对灰色关联度集 G ：

$$G = \{0.663 \quad 0.778 \quad 0.791\}$$

5) 结合步骤 4) 所得到的相对灰色关联度 G ，不难看出 $g_3 > g_2 > g_1$ ，则可得开展容差分析的电路优先级排序：电路 3 优先于电路 2，电路 2 优先于电路 1。

4 结论

针对复杂装备系统开展电路容差分析实施对象选择问题，笔者结合工程实践完善了电路容差分析实施对象评价准则，并基于模糊数学和灰色关联分析理论提出了一种电路容差分析实施对象选择综合权衡方法，给出了该方法的理论基础和实施步骤。应用结果表明：该研究成果能够有效支持复杂系统电路容差分析实施对象确定过程中的不确定性问

题，在工程实践中可以为该类问题提供支撑。

参考文献：

- [1] GJB/Z89—97 电路容差分析指南[S]. 北京：国防科技工业委员会批准，1997.
- [2] Hwang C L, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making-Methods and Applications: A State-of-the-Art Survey. New York: Springer-Verlag, 1981: 1-12.
- [3] 曾声奎, 李华府, 任羿, 等. 考虑随机性的可靠性与性能多属性决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(10): 2541-2543.
- [4] Maciej Nowak. INSDECM-an Interactive Procedure for Stochastic Multi-criteria Decision Problems[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 175: 1413-1430.
- [5] DENG Julong. Prediction and decision-making using grey theory[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002: 204-206.
- [6] 杨留猛, 俞建宁, 安新磊, 等. 一个混沌系统保密通信电路的构造[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(1): 101-104.
- [7] 徐泽水. 对方案有偏好的三角模糊数型多属性决策方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(8): 9-12.