

# 可靠性参数设计中评价方法和优化方法的应用研究

张毅坤 章 迅 黄西平 徐 平 西安理工大学自动化与信息工程学院 (710048)

**【摘要】** 可靠性参数设计中实用、高效的评价方法和优化方法的研究是当前对参数设计进行应用研究的关键之一。本文对常见的一些方法进行了比较研究,阐述了绝对偏差法和序贯淘汰水平法(SEL)与其它评价方法和优化方法相比的优势所在和不足之处。最后提出了以SEL法与绝对偏差法结合为基础的变间隔迭代法的参数设计方法。

**【关键词】** 可靠性参数设计 优化方法 评价方法

## 0 引言

三次设计(系统设计、参数设计及容差设计)是由日本田口玄一(G. Taguchi)博士提出的一种致力于减少产品质量波动、解决高可靠性与低成本之间矛盾的一种优化设计技术,它(特别是其关键技术——参数设计)作为一种通用技术,为产品可靠性的提高提供了一种良好的思路。但怎样使这一通用技术与电路计算机辅助设计CAD相结合,提高其可操作性、通用性,使之能普遍应用到工程实践中去,仍有许多的实际问题需要研究。

根据田口的质量观,产品的质量就是该产品给社会带来的损失,设质量指标为 $y$ ,目标值为 $T$ ,则 $y$ 偏离 $T$ 就会给用户带来损失。田口建议用平方损失函数 $L(y) = K(y - T)^2$ 去度量上述损失(其中 $K$ 为与质量特性 $y$ 无关的常数),因 $y$ 及 $L(y)$ 的随机性,所以应以平均损失 $E[L(y)]$ 作为产品的质量水平。

$$E[L(y)] = KE(y - T)^2 = K[(EY - T)^2 + VarY] \quad (1)$$

据此可知,要使产品质量高,就要使偏离( $EY - T$ )和波动( $VarY$ )都要小。由于大多数场合减少波动要难于减少偏离,所以传统的试验设计主要致力于减少偏离,而田口则从减少波动出发,将影响质量特性 $y$ 的因子分成可控因子( $C$ ) (技术上人为能够选择和控制的的质量因子,如元器件的中心值和变化水平等)和噪声

因子( $N$ ) (引起产品功能波动的干扰因子,如使用条件、环境条件的波动、老化现象等),其参数设计的基本思想是用可控因子 $C$ 与噪声因子 $N$ 间的交互作用 $C \times N$ 去抑制噪声,减小波动,并把 $C$ 和 $N$ 各放在一张正交表上,分别称为内表与外表,用外表放噪声因子,以模拟噪声因子的影响,内表放可控因子,用内外表直积法安排试验,找出尽可能最佳的可控因子的某个水平组合,使得 $y$ 在内外干扰引起参数波动的情况下,相对于 $T$ 的偏离和波动都较小。

由于田口博士只是给出了参数设计的一般框架,它首先致力于减少波动,在波动得以控制的条件下,再设法减少偏离,并且是面向工程实际而产生的,因而对“参数设计”方法的理论研究还显得不足。近年来,针对参数设计中存在的问题,国内外展开了激烈而有益的讨论<sup>[1][2]</sup>,从很大程度上促进了参数设计的理论研究。本文主要是从现代电控产品可靠性工程参数设计与计算机软件相结合的角度,对参数设计应用研究中的评价方法和优化方法两方面进行了探讨性应用研究。

## 1 关于评价方法的研究

在参数设计中,噪声因子 $N$ 是产生波动的源泉,因此平均损失 $E[L(y)]$ 中的期望值是通过 $N$ 的概率密度函数 $h(N)$ 求得的,即

$$E[L(y)] = \int (y - T)^2 h(N) dN \quad (2)$$

在(2)式中,由于 $y = y(C, N)$ 是由可控因

子  $C$  和噪声因子  $N$  确定的一个与具体对象有关的未知函数,再加上  $h(N)$  的不易获得,故在实际使用中平均损失常被一个目标函数所代替,作为内表指标,来衡量平均损失的大小。这就产生了采用什么作为内表指标(评价指标)的方法问题。

田口在提出参数设计的同时,借用通讯理论提出了信噪比  $SN$  作为评价指标

$$SN = 10 \log \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} \quad (3)$$

其中:  $S_m = \overline{ny^2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j^2$ ,

$$V_e = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2$$

并试图将波动与偏离集中于一个指标(信噪比)加以研究。信噪比实质上是一种度量波动大小的指标。确有一些实例表明使用信噪比是成功的<sup>[3]</sup>。但也有不少例子表明使用信噪比不能得到满意的组合<sup>[4]</sup>。Leon 等人和 Box 从损失函数角度对指标提出了一般的原则性建议,并在一定模型下对信噪比进行研究,发现只有  $y$  的方差与其均值的平方成正比,且其比例因子不依赖于调节因子时,使用信噪比方能奏效,这确是一个很大的限制。田口自己也发现单用信噪比作评价指标,往往不能奏效,于是提出了“二步法”,即用灵敏度(田口常用的灵敏度为  $y_j$ )去调节均值,而信噪比仅用来调节波动。但由于在二步法中仍存在信噪比的局限性,该方法未得到广泛的承认和使用。

为此, Madhav phadke 提出“对新型的工程问题定义相应的信噪比<sup>[1]</sup>”。有不少学者沿用了田口信噪比的概念,而对信噪比的表达式进行了改进,都在某些具体的实例中取得了比田口的信噪比令人满意的结果,其中 Alan Winterbottom 提出的 GSN<sup>[5]</sup> (Generalized Signal-to-Noise ratio) 充分利用具体对象提供的信息,对于具体对象每一次使用的正交表分别以  $\log \bar{y}_i$  作横坐标,  $\log V_{e_i}$  作纵坐标画图,通过线性回归求出直线的斜率,然后以  $\ln(\bar{y} / V_e)$  作

为衡量波动的指标,以  $\bar{y}$  ( $= 1 - \bar{y}$ ) 作为衡量偏离的指标,通过验证试验表明该方法具有比田口的信噪比更好的适应性且效率更高。张建方<sup>[6]</sup> 则指出田口的  $SN$  比存在以下两个问题:

外表中无法保证  $y_{ij}$  是简单随机样本;  
 $\frac{1}{n} (S_m - V_e)$  可能会出现负值,直接加绝对值不妥。

提出采用  $= 10 \log (\bar{y}^2 / V_e)$  ( $V_e = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y})^2$ ) 作为评价指标。

另一种思路是避开争议较大的  $SN$  比,另寻评价指标。其中较为典型的有现场统计研究会<sup>[4]</sup> 提出的偏差均方  $V = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - T)^2$ , 该评价指标在很多实例中取得了较好的选优结果,得到了广泛的应用,但该文献中也有实例表明,在实际使用中偏差均方作为内表指标常常找不到使波动较小的最佳可控因子水平组合。

候小丽等<sup>[7]</sup> 在研究了其它评价指标的基础上指出: 偏差均方等具有平方项的评价指标将使可控因子间的交互作用增加; 由于平方项的影响,使  $|y_{ij} - T| > 1$  的项经平方后增加特快,而  $|y_{ij} - T| < 1$  的项经平方后又缩小过多,致使平方和失真,扩大了交互作用的影响,对选优造成严重干扰。从结构上看,田口提出的信噪比以及其他学者提出的改进的信噪比,都没有摆脱平方项所引起的问题,故该文献把损失改用绝对损失  $L = |y - T|$ , 用其平均绝对损失

$$B = E / |Y - T| = \int |y - T| h(N) dN \quad (4)$$

来度量一个水平组合的好坏,并选用噪声因子水平组合上均匀分布作为  $h(N)$  的估计。以  $B(i)$  作为评价指标,而以  $B^+(i)$ ,  $B^-(i)$  作为调节指标进行调节,有

$$B(i) = B^+(i) + B^-(i) \quad (5)$$

其中,  $B^+(i) = \frac{1}{n} \sum_{y_{ij} > T} (y_{ij} - T)$ ;

$$B^-(i) = \frac{1}{n} \sum_{y_{ij} < T} (T - y_{ij})$$

提出了所谓的“绝对偏差法”。该方法的具体做法是:首先根据  $B^+(i)$ ,  $B^-(i)$  及  $B(i)$ , 计算出各因子的偏差平方和的比值  $\frac{B^+(i)}{B(i)}$  和  $\frac{B^-(i)}{B(i)}$  (称为贡献率), 并依据贡献率将可控因子分为: Ⅰ类因子, 即该因子的某一位级能使  $B^+$ ,  $B^-$  均减小; Ⅱ类因子, 即该因子  $\frac{B^+}{B} > \frac{B^-}{B}$ , 主要用来减少  $B^+$ ; Ⅲ类因子, 即该因子  $\frac{B^+}{B} < \frac{B^-}{B}$ , 主要用来减小  $B^-$ 。然后进行调节: Ⅰ选取一组较为理想的因子组合, 将所有的 Ⅰ类因子皆取为好水平; Ⅱ依据  $B^+$  与  $B^-$  的大小关系分别调节 Ⅱ类因子或 Ⅲ类因子中贡献率最大的因子, 使其为最好水平。

“绝对偏差法”提出了一种减小可控因子间交互作用对选优影响的良好思路, 并在实际中取得了较为理想的结果, 证明该方法是高效的。但“绝对偏差法”中可控因子的分类尚待讨论, 调节方法亦有待进一步研究。

## 2 关于参数优化方法的研究

参数优化方法, 是指一种研究参数选优的实施步骤的方法。常用的方法是内外表直积法, 它的一个突出优点是在一张不太大的正交表上可安排较多的因子, 并且还可以考察部分交互作用, 所进行的设计分析简单易行。这一优点在因子间的交互作用不显著时尤为明显, 此时可大量的减少试验次数。节省试验费用。同时应用田口提倡的主效应分析法对试验数据进行统计分析也较为简单, 所获得的因子最佳水平组合也较符合实际。但是, 对于某个具体对象, 事先我们并不清楚有哪些交互作用存在。在正交表表头设计中, 若考虑可控因子间交互作用的影响, 则需一个很大的正交表, 大大增加了实验次数<sup>[8][9]</sup>。对待这种情况, 一般采用一张适当的正交表, 让它能容纳各因子则可, 而不管交互作用是否混杂(不论其存在与否)<sup>[4]</sup>。这时传统所用的统计方法主要有主效应分析法(算一算)和直接比较法(看一看)。主效应分析法是通过计算因子各水平对应特性值的均值, 通常选取对应均值较小(常用的评价指标是越小越好)的水平作为“好水

平”, 对因子组合进行重组。但在正交表上只安排各因子, 而不考虑其交互作用时, 主效应分析法往往在判断最佳水平组合上是不成功的, 因此有人建议改用直接比较法, 即直接比较各次试验结果, 对应最好试验结果的水平组合被认为是最佳的, 另外还有采用直接比较法与主效应分析法相结合, 哪一个确定的水平组合最好就取哪一个。

对此, 茆师松教授等研究了一个适应正交表的整齐可比性的补救措施——序贯淘汰水平法(SEL)<sup>10</sup>。SEL法撇开传统试验设计基于“平均”的概念(主效应分析或交互效应分析)和设法建立某种经验模型(响应曲面分析等)的思想, 靠淘汰掉各因子的劣水平而使试验范围很快地收敛于最佳点附近。其实施步骤如下(假设在淘汰水平时所用的统计量为  $A$ ):

- (1) 对每个因子淘汰它的一个水平(或几个水平), 这个水平对应的  $A$  使特性值  $y$  对目标值  $T$  的偏离和波动较大;
- (2) 对剩下的水平重新选择一张正交表, 在新的正交表中对出现的新组合进行补充运算;
- (3) 若有必要, 可重复上述步骤, 直至每个因子只剩下一个较好水平为止。

以淘汰水平时所采用的统计量为同一水平下几个试验结果的平均值、最小值等的不同, SEL法又分为 SEL(mean)及 SEL(mini)法等。序贯淘汰水平法实质上是在传统的优选方法上, 每一轮增加了若干组的可控因子组合, 而利用不同的评判标准尽量增加确实好的因子组合, 使试验范围更快地集中于最佳点附近。但实际应用中采用什么标准淘汰水平、如何选取最佳组合还需进一步研究。

此外, 为减少试验次数, Shoemaker等提出使用容纳两类因子的组合表, 即用一张表去安排两种因子。吴建福(Jeff.wu)以试验点的成本作为比例准则, 亦对此作了研究, 文献<sup>[11]</sup>提出了一些有用的复合设计(compound designs)方法。张建方从外表设计的角度提出, 三水平正交设计的外表设计方法完全可以

用平均试验次数比它少一半而估计精度与它相当的二水平正交设计的外表设计方法所取代。以上这些方法对提高参数优化设计方法的效率和可靠性都起到了很大的作用。

### 3 SEL 法与绝对偏差法结合的变间隔迭代搜索法

通过对参数设计评价方法和优化方法的探讨性研究,我们提出了以 SEL 法与绝对偏差结合法为基础的自动变间隔迭代搜索法<sup>[12]</sup>。该搜索方法尽可能集合了 SEL 法和绝对偏差法的优点,最大程度地减小可控因子间交互作用对选优的影响;针对 SEL 法中选取当轮最佳、次佳组合时存在的问题,提出选取最佳、次佳时应综合考虑 SEL 法实施过程中所出现的所有组合,而不能仅仅考虑最后一组,通过改进使该方法实施更为可靠。对于绝对偏差法中可控因子分类、调节方法中尚待讨论的问题,我们提出了一种补救措施,即每一步次调节完成后所得的  $B$  值皆与调节前的进行比较, $B$  若减小则保存,否则取消该次调节,并且提出在调节贡献率最大的因子出现“过头”现象时,改为调节贡献率次大的因子,实例研究证明效果很好,运算更为可靠;其次根据工程实际我们还提出并实践以电阻、电容标称值系列上的格点为搜索格点,根据需要可在不同的标称值系列上进行选优,增强了算法的适应性,达到了自动选取因子格点、调节格点间距、靠近标称值的目标。另外,我们还采取了诸如自动结束循环等一些方法最大程度地减少了选优过程中的人工干预,增强了该算法的通用性和可操作性。在对“稳压电源”,“OTL 推挽电路”,“惠斯登电桥”等典型电路的实例

研究,及“惠斯登电桥”的实验验证中皆取得了较好的结果。实践证明它是一种效率较高、算法可靠,具有较好的可操作性的参数优化方法。

参数设计中评价方法和优化方法能否高效、实用地应用到工程实践中去,还需做大量深入、细致地研究。

#### 参考文献

- 1 Vijayan N. Nair. Taguchi' s Parameter Design : A Panel Discussion Technometrics. Vo1. 34 No. 2 may,1992
- 2 茆诗松等. 参数设计思想与方法的研究. 应用概率统计,Vo1.9 No.4 1993,11
- 3 韩之俊. 三次设计. 机械工业出版社,1992. 1
- 4 中国现场统计研究会三次设计组编. 可计算性项目的三次设计. 北京大学出版社,1985
- 5 Alan Winterbottom. The use of a generalized signal - to - noise ratio to identify adjustment and dispersion factors in Taguchi experiments. Quality and Reliability Engineering International. 8(1) :45-56,1992
- 6 张建方. 外表设计及其安全研究( ). 数理统计与管理,Vo1. 15 No. 1 1996. 1
- 7 候小丽等. 参数设计的绝对偏差法. 应用概率统计,Vo1. 10 No. 3 1994, 8
- 8 上海市科学技术交流站组编. 正交试验设计法. 上海人民出版社,1975
- 9 Box. Statistics for Experimenters, New York, John Wiley. 1978
- 10 茆诗松等. 序贯淘汰水平法——一种利用正交表的搜索方法. 应用概率统计,Vo1. 6 No. 2 1990. 5
- 11 Paul R. Rosenbaum. Some Useful Compound Dispersion Experiments in Quality Design. Technometrics, Vol. 38 No. 4 Nov, 1996
- 12 张毅坤等. 基于 SEL 法与绝对偏差法的参数设计方法研究

#### THE APPLICATION STUDY OF ESTIMATING AND OPTIMIZING METHODS IN PARAMETER DESIGN OF RELIABILITY

zhang yikun Zhang xun Huang xiping Xu ping

(Automatic and Information Engineering Institute of Xian University of Technology ,Xian ,710048)

**Abstract** In reliability parameter design ,the study in applicable and highly efficient estimating method and optimizing method is one of the keys in recently application study of parameter design. The

paper compares and studies some common methods ,explains what the advantages and shortcoming are in SEL and absolute - bias approach compares with the other estimating method and optimizing method. Finally ,proposes parameter design approach - the variable compartment itevation searching method ,which based on combination of SEL and absolute - bias approach.

**Keywords** parameter design of reliability estimating method optimizing method

(上接 50 页)

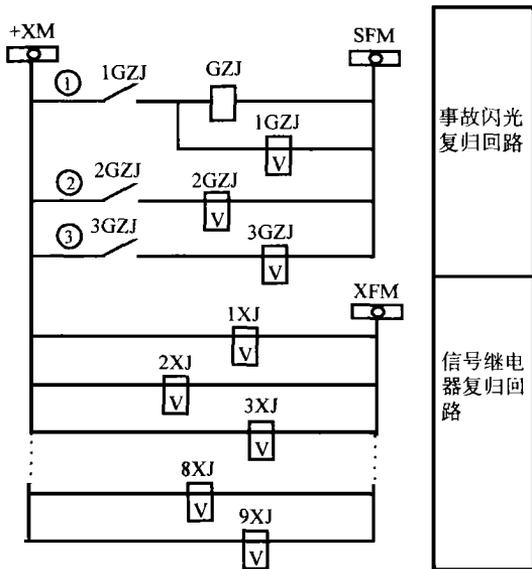


图 5 主变保护信号回路复归

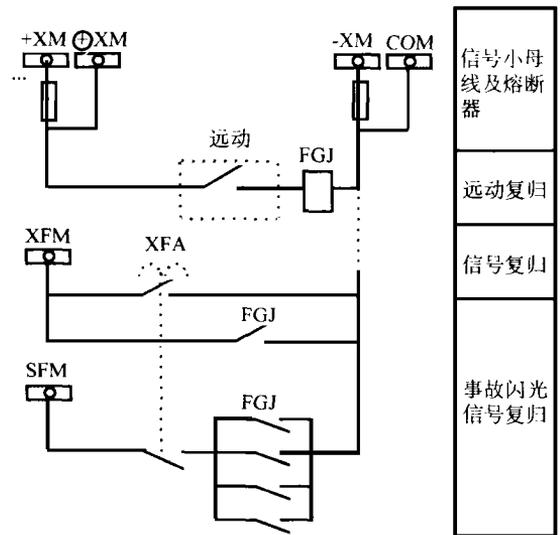


图 6 复归回路改进图

动合触点返回,切断闪光回路,事故闪光信号复归。将事故闪光回路分为回路 1、2、3,测量 GZJ 线圈内阻为 1.65k ,1GZJ、2GZJ、3GZJ 电压保持线圈内阻相同,约 1.6k ,可以算出回路 1 电流  $I_1 = 269\text{mA}$ ,回路 2 与回路 3 电流  $I_2 = I_3 = 138\text{mA}$ ,回路 1、2、3 并联,由图 4、图 5,远动复归时,“远动装置”动断触点开断 + XM - XM 的电流,即开断电流  $I_F = I_1 + I_2 + I_3 = 545\text{mA}$ ,而其允许工作电流  $I < 200\text{mA}$ ,必然会产生拉弧,并有可能被电弧烧损触点,构成事故隐患。

我们以图 6 方案对遥控复归出口回路进行改进,中继 FGJ 型号为 DZK—219,由“远动装置”动合触点起动 FGJ,FGJ 动合及动断触点动

作分别进行信号及事故闪光复归。需要说明的是在事故闪光复归回路改进时,最初接入中继电器一对动断触点,进行远动复归试验时仍有拉弧现象,采取并联中继 4 对动断触点进行分流的办法,则完全消除了拉弧现象,并增加了远动复归可靠性。

### 3 结语

湘黔线(娄大段)远动系统遥控出口回路存在不足经改进并进行试验后证明改进措施可行,现场运行没有再出现遥控出口触点烧损及拉弧现象。随着铁路电气化里程的逐步增加,远动系统的投运更加广泛,希望本文能给同行以参考,并起到抛砖引玉的作用。