

· 电路与控制 ·

## 电路容差分析在设计中的应用

石永山<sup>1</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 刘铭<sup>1</sup>

(1. 海军驻锦州地区军事代表室, 辽宁 锦州 121000; 2. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘要:** 阐述了电路容差分析的基本概念, 探讨了导致元器件参数漂移的因素及参数漂移对设备质量影响的方式, 强调了电路容差分析在设备研制过程中的运用对提高设备设计质量的重要性. 简要分析了电路容差分析流程, 重点探讨了3种电路容差分析方法的优缺点、使用环境要求及应用方法. 最后展望了电路容差分析的应用前景.

**关键词:** 设备质量; 容差分析; 参数漂移

**中图分类号:** TN709

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)06-0049-04

## Application of Circuit Tolerance Analysis to the Design

SHI Yong-shan<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, LIU Ming<sup>1</sup>

(1. Resident Representative Office of Navy in Jinzhou, Jinzhou 121000, China;

2. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The basic conception of the circuit tolerance analysis was described and the factors of the parameter drift of devices and the methods that the parameter drift influences the quality of equipments were discussed. The essentiality that the application of circuit tolerance analysis to the process of equipments developing increases the quality of equipments design was stressed. The flows of the circuit tolerance analysis were introduced briefly, the advantages and disadvantages for three methods of the circuit tolerance analysis, the requirements of the application environments and application methods were analyzed mainly. At last, the application prospects of the circuit tolerance analysis were prospected.

**Key words:** quality of equipments; tolerance analysis; parameter drift

设备研制过程中由于电路设计不完善及可靠性分析方法未能有效运用, 元器件参数漂移导致的质量问题带给设计者与维护人员很大的麻烦和困惑, 设备功能时好时坏, 在施加环境应力时设备出现故障, 而撤销环境应力时设备又恢复正常, 难以实现故障定位和排除, 延长了设备维修保障时间, 增加了维护成本. 因此, 在设备研制过程中推广电路容差分析技术、避免因电子元器件参数漂移导致设备故障是十分必要的.

电路容差分析开始于设计阶段, 并在设备研制过程中针对设备的设计完善而反复迭代, 直至设备满足全部功能、可靠性、安全性、维修性、测试性等要

求. 因此, 可以说电路容差分析是贯穿设备研制全过程的可靠性和安全性分析方法之一.

### 1 元器件参数漂移原因分析

在排除元器件质量问题的前提下, 设备质量问题主要是由于元器件参数漂移引发的累积偏差而导致. 该类质量问题主要是在设备设计过程中对元器件参数漂移可能引发的质量问题重视不够、分析不到位, 未采用相应的设计措施加以控制; 在生产过程中元器件质量控制环节薄弱(对元器件参数漂移范围的控制)所导致. 因此, 有必要对元器件产生参数

收稿日期: 2010-10-14

作者简介: 石永山(1969-), 男, 河北人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电子工程.

漂移的原因进行分析,以利于采用相应的设计措施解决该类因素所导致的设备质量问题.经分析,产生元器件参数漂移的因素主要有三种.

#### (1) 元器件生产

元器件在生产过程中将形成的固有参数偏差和参漂系数.

#### (2) 环境影响

由于元器件固有的参漂系数,环境因素将元器件的参数发生变化.例如具有负温度系数的元器件参数将随着温度升高而降低,具有正温度系数的元器件参数将随着升高而增加.

#### (3) 退化效应

随着时间的积累,元器件质量将逐渐下降,元器件参数会发生变化并有可能超出标称值和允许的公差范围.

## 2 容差分析流程

电路容差分析是一种非常繁琐、工作量浩大的可靠性、安全性分析方法.在设备研制过程中如何化繁为简,并形成具有工程实际应用价值的分析方式值得探讨.容差分析流程见图 1.

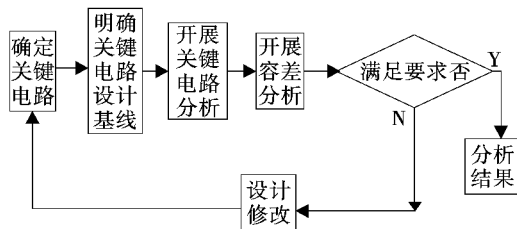


图 1 电路容差分析程序流程图

### 2.1 确定关键电路

开展设备功能及任务重要性分析,明确主、次功能和任务,使用故障模式、影响及危害度分析方法(FMECA)或故障树(FTA)分析方法确定设备中的关键电路,对关键电路进行容差分析.确定关键电路的主要原则有:

- (1) 严重影响安装平台安全性的电路;
- (2) 严重影响设备任务完成的电路;
- (3) 需要特殊保护的电路.

### 2.2 明确关键电路设计基线

开展关键电路分析,明确关键电路的设计需求和设计基线.关键电路设计基线主要包括如下四方

面:

- (1) 被分析电路的功能和使用寿命;
- (2) 电路性能参数及偏差要求;
- (3) 电路使用的环境应力条件(或环境剖面);
- (4) 元器件参数的标称值、偏差值和分布.

### 2.3 关键电路分析

开展关键电路设计分析,明确关键电路在各种工作方式下的性能参数、输入量和元器件参数之间的关系.

### 2.4 容差分析

开展关键电路的容差分析,主要包括如下两方面:

- (1) 根据已确定的待分析关键电路的具体要求和条件,适当选择分析方法;
- (2) 根据已明确的关键电路设计基线,按选定的分析方法对关键电路进行容差分析,求出被分析关键电路输出性能的偏差范围,找出对关键电路敏感度影响较大的参数并进行控制,使电路满足要求.

### 2.5 分析结果判别

将电路容差分析所求得的电路性能参数的偏差范围与电路性能指标要求相比较,如果满足,分析结束;如果不满足要求,按需修改设计(重新选择电路组成部分参数或其精度等级或更改原电路结构),设计修改后仍需进行容差分析,直至电路性能参数的偏差范围完全满足电路性能指标.

## 3 容差分析方法

电路容差分析法主要有最坏情况试验分析法、最坏情况分析法(该种分析方法亦可分为线性展开法和直接代入法 2 种)和蒙特-卡罗法 3 种分析方法,可根据设计实际情况选择采用.各种分析方法特点及适应范围见表 1.

### 3.1 最坏情况试验法

最坏情况试验法是使被测电路处于温度、大气压力、电源电压、电网频率、元器件参数、信号源幅度和频率等主要因素均为上、下限值的条件下,测试电路性能参数偏差的方法.一般在电路可靠性要求高、成本不严格限制时采用此分析方法.

表 1 各种分析方法比较

名称	电路模型	应用方式	电路组成部分参数取值	分析结果	适用范围	优缺点
最坏情况 试验法	无	试验测试	额定偏差值 (包括标准值 和偏差范围)	测试数据	适用于可靠性要求 高的电路	不需要建立电路数学 模型,但必须在实际电 路上才能进行试验
最坏情况 分析法	建立电 路数学 模型	手工计算 或软件仿 真	额定偏差值 或寿命结束 时的极限值	电路性能 参数偏差	线性展开法适用于分析 精度要求较低的电路; 直接代入法适用于分析 精度要求较高的电路.	简便、直观,能用仿真软 件,但分析结果偏于保守
蒙特-卡罗 分析法	建立电 路数学 模型	软件仿真	额定偏差的 分布值	电路性能 参数的分 布特性	可靠性要求较高的 电路	最接近实际情况,能用仿 真软件,但计算较复杂

### 3.2 最坏情况分析法

最坏情况分析法是分析在电路组成部分参数最坏组合情况下的电路性能参数偏差的一种非概率统计方法.它利用已知元器件参数的变化极限来预计电路性能参数变化是否超过了允许范围.在预计电路性能参数变化范围时,元器件参数的变化取它们的上、下极限值.如果预计的电路性能参数在规定的范围内,可以确信该电路有较高的稳定性.如果预计值超出规定的允许变化范围,可能发生漂移故障.

采用最坏情况分析法需首先给出电路的网络参数,其表达式为

$$Y = f(X_1, \dots, X_n) \quad (1)$$

式中,  $Y$  是电路性能参数;  $X_1, \dots, X_n$  是电路组成部分及其他有关量参数在工作点附近展开并取偏导值.

#### 3.2.1 线性展开法

线性展开法是将电路的网络参数  $Y = f(X_1, \dots, X_n)$  在工作点附近展开并取偏导数,简化为线性关系式,求出电路性能参数的变化范围,用下式表示

$$\Delta Y = \sum_n |\partial Y / \partial X_i|_{\text{工作点}} \cdot |\Delta X_i| \quad (2)$$

当考虑到有补偿和负反馈时,  $\Delta X_i$  是电路组成部分参数的原偏差、补偿偏差和负反馈偏差等绝对值之和.

当  $f(X_1, \dots, X_2)$  在工作点可微,且变化较小、容差分析精度要求不高、设计参数变化范围较小时,可采用此法.

#### 3.2.2 直接代入法

直接代入法是将设计参数的偏差值按最坏情况组合直接代入电路的网络参数表达式中,求出性能参

数的上限值和下限值.具体做法是将偏导数为正的电路组成部分参数及输入量的上偏差、偏导数为负的电路组成部分参数及输入量的下偏差代入  $f(X_1, \dots, X_2)$  中,求出电路性能参数的上限值;将偏导数为正的电路组成部分参数及输入量的下偏差、偏导数为负的电路组成部分参数及输入量的上偏差代入  $f(X_1, \dots, X_2)$  中,求出电路性能参数的下限值.当  $f(X_1, \dots, X_2)$  在工作点可微,且变化较大时、容差分析精度要求较高、设计参数变化范围较大时,可采用此法.

### 3.3 蒙特-卡罗分析法

系统性能保持在规定公差范围内的概率,或系统性能保持在规定极限内的概率,称为系统性能可靠度.采用蒙特-卡罗分析法可确定系统的性能偏差是否满足要求,也可以计算出系统的性能可靠度.

蒙特-卡罗分析方法的基本思想是:当所求解的问题是某个事件出现的概率时,可以通过抽样试验的方法得到这种事件出现的频率,把它作为问题的解.在电路容差分析中,当电路组成部分的参数服从某种分布时,可以采用蒙特-卡罗分析法由电路组成部分参数抽样值分析电路性能参数偏差,并得到直方图作为统计结果,根据直方图可以进一步计算性能可靠度.

具体做法是:按电路包含的元器件及其他有关量的实际参数  $X$  的分布,对  $X$  进行第一次随机抽样  $X_{11}$ ,该抽样值记作  $(X_{11}, \dots, X_{1m})$ ,并将它代入性能参数表达式,得到第一个随机值  $Y_1 = f(X_{11}, \dots, X_{1m})$ ,如此反复  $n$  次,得到  $Y$  的  $n$  个随机值,从而就可对  $Y$  进行统计分析,画出直方图,求出不同容许偏差范围内的出现概率.在  $n$  次抽样中,如果系统性能值落在允许范围的次数为  $k$ ,则系统的性

能可靠度为  $P = k/n$ 。

随机抽样按如下方法产生:由确定的抽样次数产生伪随机数,由伪随机数产生均匀分布伪随机数,由该均匀分布伪随机数产生网络元件参数分布的伪随机数,再由此产生电路元器件值的随机抽样值序列,计算电路性能参数。在进行电路抽样分析时,抽样次数应该满足统计分析的精度要求。蒙特卡罗分析法的流程如图 2 所示。

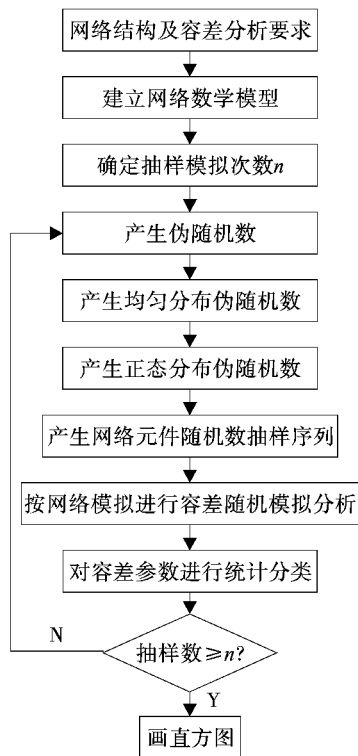


图 2 蒙特卡罗分析流程图

抽样次数  $n$  用下式求得

$$n = \frac{1-P}{P} \left[ \Phi^{-1}(x) \left( \frac{1+\gamma}{2} \right) / \epsilon \right]^2 \quad (3)$$

式中,  $P$  是性能可靠度;  $\Phi^{-1}(x)$  是正态分布函数,  $\Phi(x)$  的反函数;  $\gamma$  是置信水平;  $\epsilon$  是  $P$  达到的相对精度。

由式(3)可得出,抽样次数  $n$  跟电路的性能可靠度及其置信度以及仿真所得出的性能可靠度与实际性能可靠度的误差有关。对于固定的性能可靠度,

$n$  越大,其仿真精度和可信度越高。一般要求是手工计算时  $n$  不小于 120,计算机仿真时  $n$  不小于 334。

蒙特卡罗分析法适用于可靠性较高的电路,由于该算法计算量大一般采用计算机仿真方式。

### 3.4 辅助分析工具

近年来,随着以 CAD(computer aided design)为基础的 EDA(electronic design automatic)技术的发展,出现了许多以 EDA 技术为内核的电子系统仿真软件。在这些仿真软件基础上进行电路容差分析,大大减轻了建立电路模型的工作量和避免了对复杂运算的处理,不但能实现以 EDA 技术为基础的通用电路容差分析技术和方法,而且能够实现电路性能和可靠性的并行设计分析。

## 4 结束语

元器件参数漂移在电子设备中普遍存在,电子设备在一定的环境条件下由于部分或众多元器件参数发生漂移,由此累积的参数偏差将对电路性能产生影响,并最终导致产品性能超差或出现故障。在设备研制过程中开展电路容差分析,能发现并解决设备电路设计中存在的容差容限偏小、设计参数不合理或元器件质量不满足要求等问题,可以有效提高设备质量。电路容差分析作为设备可靠性设计措施和可靠性分析方法之一,在设备研制过程中的有效运用可以较好地解决设备设计容差配合不合理导致的质量问题,对提高设备设计质量有很大的帮助,因此该项分析技术具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 罗廷孝,郑鹏洲.可靠性设计与分析[M].北京:国防工业出版社,1997.
- [2] 曾声奎.系统可靠性设计分析教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [3] 黄进咏,莫郁薇.装备质量与可靠性问题的应对措施[J].电子产品可靠性与环境试验,2008(5):26-155.
- [3] 王斌.自动机运动规律测试技术研究[D].太原:中北大学,2009.
- [4] 黄成亮,郑宾,黄公亮. MATLAB 与 Labwindows/CVI 接口技术在自动机测试中的应用[J].自动化与仪器仪表,2010(5):58-59.
- [5] 裴益轩,郭民.滑动平均法的基本原理及应用[J].火炮发射与控制学报,2001,(1):21-23.

(上接第 17 页)

### 参考文献

- [1] 刘吉,周汉昌.自动机运动规律测试系统研制[J].光学与光电技术,2007,5(5).
- [2] 林渊,肖锋,郑宾,等.小波变换阈值降噪方法及在武器自动机数据处理中的应用[J].电子测量技术,2009,32(1):128-130.