

文章编号: 0258-7025(2004)05-0543-04

强激光设施能源系统电路的容差设计与分析

孙 权¹, 吴 集¹, 赵建印¹, 周经伦¹, 魏晓峰², 张小民²

¹ 国防科技大学系统工程研究所, 湖南 长沙 410073

² 中国工程物理研究院高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 系统可靠性设计使用电路容差分析技术来保证电路特性获得稳定而可靠的输出, 对于稳定性和可靠性要求高的系统进行容差分析尤其必要。能源系统作为惯性约束聚变(ICF)激光装置的重要组成部分, 其可靠性直接关系到激光装置的稳定运行。能源系统电路的容差设计与分析, 是激光装置可靠性设计分析必不可少的工作项目之一, 对提高能源系统的可靠性进而保证整个激光装置的稳定运行具有重要意义。给出了能源系统电路设计图及其规定功能, 然后在对容差设计模型进行一般性描述的基础上, 利用随机优化设计方法, 建立了能源系统电路容差设计随机优化模型, 并对模型的设计变量、随机参数、设计准则、约束条件等进行了详细说明, 最后给出了计算机仿真方法求解模型的流程及模型的可行解集。

关键词 电子技术; 可靠性; 惯性约束聚变激光装置; 能源系统; 容差分析; 随机优化模型

中图分类号 TB 114.3; TN 245 **文献标识码** A

Tolerance Optimizing Design and Analysis for Power Conditioning System Circuit of High Power Laser Facility

SUN Quan¹, WU Ji¹, ZHAO Jian-yin¹,

ZHOU Jing-lun¹, WEI Xiao-feng², ZHANG Xiao-min²

¹ System Engineering Research, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² National Key Laboratory of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Circuit tolerance design for circuit systems is an important technology for system reliability analysis, it can make the output of the circuit stably and reliable. Being one important part of high power laser facility, power conditioning system should be designed with high reliability. Circuit tolerance design of power conditioning system is an important part of reliability analysis of high power laser facility. In this paper, the function and circuit diagram of power conditioning system are presented. Then based on the general model of circuit tolerance design, by the use of stochastic optimizing design method, a mathematical model is set up which will be used in the tolerance analysis of power condition system circuit and explain the design variable, random parameter, design rule and constraint of the model. In the end, the flow chart of computer simulation solution for stochastic optimizing model and the set of feasible result are represented.

Key words electronic technique; reliability; ICF laser facility; power conditioning system; stochastic optimizing model; tolerance analysis

1 引 言

系统可靠性设计使用电路容差分析技术来保证

电路特性获得稳定而可靠的输出, 对于稳定性与可靠性要求高的系统进行容差分析尤其必要。系统性能参数的变化主要是性能不稳定、参数发生漂移和

收稿日期: 2002-12-09; 收到修改稿日期: 2003-03-28

基金项目: 国家 863 高技术发展计划(编号: 2003AA845023)资助项目。

作者简介: 孙 权(1973—), 男, 国防科技大学系统工程研究所讲师, 博士生, 主要从事可靠性工程、作战效能评估研究。

E-mail: sun. quan@china. com

退化,其原因在于:1) 元器件参数公差的存在会引起电路参数超出容限;2) 元器件参数因为环境因素发生漂移也可导致电路参数超出容限;3) 随使用时间推移,元器件参数发生退化。因此,必须对元器件的容差进行分析、设计,以获得“稳定、可靠、经济”的设计方案^[1]。

能源系统是惯性约束聚变(ICF)设施的重要组成部分,包括若干个相同的能源模块,负责向聚变设

施放大器模块的数千盏抽运氙灯提供能量。其供能过程分为预电离过程和主充放电过程,首先对能源模块的储能组件(电容器)进行充电,然后进行预电离,以检验氙灯部分是否有故障,即对氙灯初始放电;最后进行主放电。供能过程中所有控制均由控制台完成^[2,3]。图1为一个能源模块的电路图。作为聚变设施的重要组成部分,能源模块应具有高可靠性。

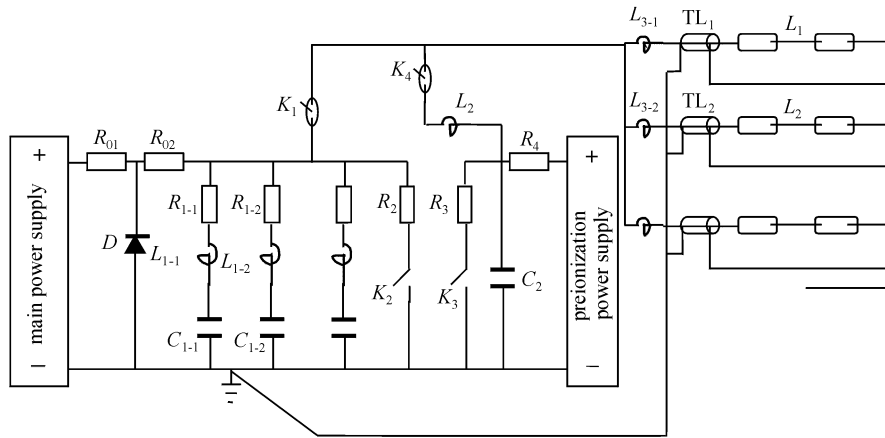


图1 能源模块电路

Fig.1 Energy module circuit

可靠性定义为系统在规定时间内和条件下,完成规定功能的能力^[4]。具体到能源模块,所指规定功能为:1) 输出总储能标称值为 E_0 , 偏差小于 r_E ; 2) 放电脉冲宽度标称值为 τ_0 , 偏差小于 r_τ ; 3) 回路阻尼系数 α_0 落在规定区间内, 记为 $[\alpha_L, \alpha_U]$; 4) 各放电回路抽运能量的符合一致性要求。电路参数的容差设计首先要保证这些性能要求的完全实现^[5]。根据实际情况可确定满足这些性能约束的置信度均为 99.73% (3 σ 规则)。

2 容差设计模型建立

2.1 容差设计模型的一般描述

沿用规划的思想,容差设计中含有随机设计变量 x 和随机参数 ω 时,其优化设计的数学模型一般可表达为如下形式

$$\left. \begin{aligned} &x \in (\Omega, F, P) \subset R^n \\ &z(x^*) = \max(\min) \quad F\{f(x, \omega)\} \\ &\text{s. t.} \quad D_\xi(x) = \{x \mid P\{g_u(x, \omega) \leq 0\} \geq \xi_{0u}; \\ &\quad \quad \quad u = 1, 2, \dots, m\} \\ &\omega \in (\Omega, F, P) \subset R^k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 x 为 n 维随机设计变量; ω 为 k 维随机参数; $z(x^*)$ 为目标函数; $f(x, \omega)$ 为产品技术特性; $F\{f(x, \omega)\}$ 为描述产品技术特性影响的泛函; $D_\xi(x)$ 为优化问题解的随机可行域; $P\{\cdot\}$ 表示取约束函数 $g_j(x, \omega) \leq 0$ 满足的概率值, 而 ξ_{0u} ($u = 1, 2, \dots, m$) 为规定要求满足的最小允许概率值, 其值在 $[0, 1]$ 范围内取。此时问题可描述为, 只要随机可行域 $D_\xi(x)$ 存在且非空, 那么总可以求得一组参数 x^* 使目标函数 $F\{\cdot\}$ 以最大限度嵌入可行域, 即

$$P\{F(x^*) \in D_\xi(x)\} \rightarrow 1 \quad (2)$$

在工程应用中, 由设计特性所定义的 $F\{f(x, \omega)\}$ 通常反映产品费用、性能稳定性和可靠性指标, 如在田口方法中 $F\{f(x, \omega)\}$ 取为质量损失函数^[6]。

2.2 能源系统容差设计模型建立

由电路分析理论, 有: 1) 电容器储能 $E_C = \frac{1}{2}CV^2$, 式中, C 为电容器电容值, V 为充电电压值; 2) 放电脉冲宽度 $\tau = 3\sqrt{LC}$, 式中 L 为回路电感; 3) 回路阻尼系数 $\alpha = K_0(VZ)^{-1/2}$, 式中 Z 为回路特性阻抗, 有 $Z = \sqrt{L/C}$, K_0 为抽运氙灯常数, 有 $K_0 = 1.27\left(\frac{p}{450}\right)^{0.2}\left(\frac{2l}{d}\right)$, 式中 p 为抽运氙灯充气气压, l

为氙灯弧长, d 为氙灯灯管内径, 已知 $K_0 = 94.48$ 。系统设计已经给出了回路电容、电感和充电电压的标称值 C_0, L_0, V_0 及充电电压的容差 r_V , 接下来确定 C 和 L 的容差等级。由已知条件, 可以建立如下的容差优化设计模型。

1) 设计变量: 待定的变量只有回路电容、电感的容差, 记为 r_C, r_L 。因此, 取设计变量为

$$x = [x_1, x_2]^T = [r_C, r_L]^T \quad (3)$$

2) 随机参数: 随机参数为充电电压 V , 其设计标称值为 V_0 , 容差为 r_V 。可以证明, 如果产品在制造过程中受到很多随机因素影响时, 其最终输出服从正态分布。取 V 均方差为 $V_0 r_V / 3$, 此时 V 落在容差区间的概率为 99.73%, 从而有

$$V \sim N\left(V_0, \frac{V_0 r_V}{3}\right) \quad (4)$$

3) 设计准则: 能源系统的设计准则多于一个, 首先要考虑系统性能稳定性, 元器件容差的合理分配及元器件的成本。显然, 当系统输出特性的统计均值接近于标称值且方差尽可能小, 系统稳定; 对于元器件容差“合理分配”, 即希望在考虑各类元器件工艺和对电路输出影响的条件下, 容差等级差别应尽量小。这些设计准则具体为如下目标函数

$$\min f = Z_E + Z_\tau + Z_\alpha + W^r |W_C r_C - W_L r_L| + W^Y \cdot Y(r_C, r_L) \quad (5)$$

式中

$$\begin{aligned} Z_E &= W_1^E \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_C^i - E_0 \right)^2 \right] + \\ &W_2^E \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_C^i - \bar{E}_C)^2 \right] \\ Z_\tau &= W_1^\tau \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau^i - \tau_0 \right)^2 \right] + \\ &W_2^\tau \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\tau^i - \bar{\tau})^2 \right] \\ Z_\alpha &= W_1^\alpha \left[\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha^i - \alpha_0 \right)^2 \right] + \\ &W_2^\alpha \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\alpha^i - \bar{\alpha})^2 \right] \end{aligned}$$

其中 W_1^E, W_2^E 为描述指标重要程度的权, $\bar{E}_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_C^i$ 为电容总储能的统计均值, N 的值为进行计算机求解时的仿真次数。

(5) 式中 $W^r |W_C r_C - W_L r_L|$ 含义是在考虑了对容差“合理”分配重要程度、元器件本身对系统输出影响的重要程度情况下, 两个元器件容差等级差别应尽量小。 W^r, W_C, W_L 为与工程实际有关的权。 $W^Y \cdot Y(r_C, r_L)$ 含义是与元器件容差密切相关的成

本函数, 应尽量小, W^Y 为实际对成本问题关注的权重。

4) 约束条件: 对于能源系统四个规定功能, 这里只考虑前三个, 这是因为能源系统抽运均匀性受能源系统外的氙灯内阻的影响, 目前这方面数据和资料较为缺乏。对应这三个规定要求, 可描述为约束

$$g_1(x, \omega) = |(E_C - E_0) - E_0 \times r_E| \leq 0$$

$$g_2(x, \omega) = |(\tau - \tau_0) - \tau_0 \times r_\tau| \leq 0$$

$$g_3(x, \omega) = \left| \alpha - \frac{(\alpha_L + \alpha_U)}{2} \right| - \frac{(\alpha_U - \alpha_L)}{2} \leq 0$$

由满足规定功能的置信度要求为 99.73%, 有概率约束

$$P\{g_1(x, \omega) \leq 0 \cap g_2(x, \omega) \leq 0 \cap g_3(x, \omega) \leq 0\} \geq 0.9973^3 \quad (6)$$

结合 (3) ~ (6) 式, 及 $C \sim N\left(C_0, \frac{r_C}{3}\right), L \sim N\left(L_0, \frac{r_L}{3}\right)$, 即为描述能源系统电路的容差设计的随机优化模型。

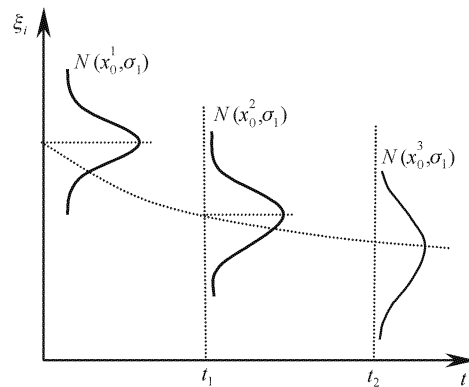


图 2 分布参数随时间推移的变化

Fig. 2 Distribution parameters degradation

5) 模型说明: 在假设元器件值服从正态分布并不考虑元器件值随使用条件、使用时间而发生漂移的情况下, 事实上, 如图 2 所示, 元器件的标称值和均方差均会随时间的推移发生变化。考虑参数随时间漂移的情况, 必须充分研究元器件的老化模型。另外, 对于 3 个输出性能参数值均服从正态分布的假设, 可以通过使用计算机数字仿真方法, 由随机参数模拟产生特性样本值作输出性能直方图来验证。

3 模型求解

对于(1)式随机优化模型的求解, 可采用机会约

束法进行求解^[7],其基本思想是将目标函数和约束函数在随机变量均值处展开,将随机模型转化为等价的确定型模型进行求解,其基础是把随机设计变量和随机参数及其函数全假定为服从正态分布。另外,还可以使用计算机数字仿真方法,基本思想是以设计变量为搜索变量,使用计算机模拟^[8]随机设计变量和随机参数的分布并进行抽样,使用随机设计变量和随机参数样本值结合约束求出解的可行域,最后由目标函数验证最优解。

就能源系统而言, L 和 C 的容差不是随意给定,而是从已有的几个精度不同的品种规格中挑选。将 L 和 C 的容差划分为五个等级:A,B,C,D,E,对应的容差为:2%,4%,6%,8%,10%。此时,元器件组合数较小($5 \times 5 = 25$)。基于这些特点,且考虑到参数调整的灵活性、灵敏度分析及工程的实际需求,可采用计算机数字仿真方法进行求解。为此编制了能源系统的容差设计模型求解程序,图3即为程序的流程。

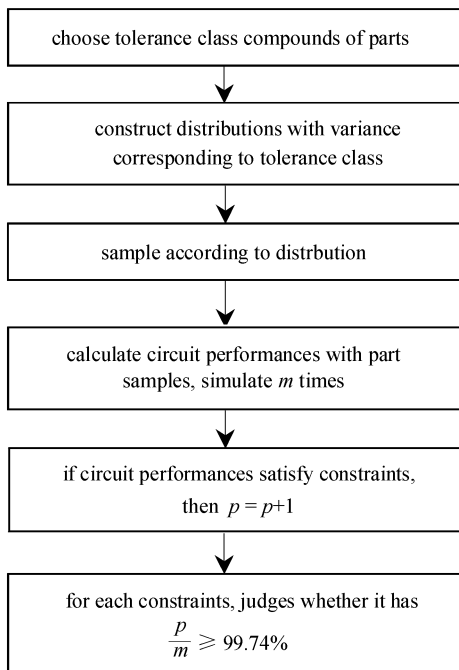


图3 能源系统容差设计模型求解程序的流程
Fig.3 Flow chart for energy system tolerance design model solution program

运行程序仿真每一组合仿真10000次,求出表1的可行的 L,C 组合及其对应满足全部约束的概率。表中列出的可行解结合(4)式给出的设计准则,可以得到问题的最优解。能源系统设计准则的各个

权重,需要由工程设计人员进行确定,从可行解中挑选最适合的设计方案。

表1 能源系统容差设计模型可行解
Table 1 Energy system tolerance design model adoptable solutions

No.	Tolerance class of inductance, L	Tolerance class of capacitor, C	Probability of solution to satisfy all constraints
1	D	B	0.9850
2	D	A	0.9999
3	C	B	0.9870
4	C	A	0.9999
5	B	B	0.9850
6	B	A	0.9999
7	A	B	0.9880
8	A	A	0.9999

参 考 文 献

- 1 Yang Weimin, Yuan Lian, Yu Zhao *et al.*. *Pandects on Reliability & Maintainability & Supportability* [M]. Beijing: National Defence Industrial Publishing Company, 1995
杨为民,阮 镰,俞 沼等. 可靠性·维修性·保障性总论 [M]. 北京:国防工业出版社,1995
- 2 Li Yizheng, Zhou Peizhang, Chen Xigang *et al.*. High power laser conditioning system preionization experimental research [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **12**(2):178~180
力一铮,周丕璋,薛锡刚等. 强激光能源系统预电离实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 1998, **12**(2):178~180
- 3 C. Harjes, M. Wilson, G. Mowrer *et al.*. Development and testing of the NIF prototype module [R]. NTIS No. DE00008467/XAB, 1999
- 4 K. C. Majumdar, C. E. Annese, A. T. MacIntyre *et al.*. Systems reliability analysis for the national ignition facility [R]. NTIS No. DE96011627/HDM, 1996
- 5 M. Newton, M. Wilson. Main amplifier power conditioning for the National Ignition Facility [R]. NTIS No. DE98058703/XAB, 1998
- 6 Chen Lizhou, He Xiaofeng, Weng Haishan *et al.*. *Optimizing Design Techniques for Engineering Stochastic Variables—Principle and Application* [M]. Beijing: Science Press, 1997. 7
陈立周,何晓峰,翁海珊等. 工程随机变量优化设计方法—原理与应用[M]. 北京:科学出版社,1997. 7
- 7 Yang Weiming, Sheng Yixing. *Digital Simulation for System Reliability* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990. 5
杨为民,盛一兴. 系统可靠性数字仿真 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1990. 5
- 8 Cheng Xiaofeng, Jing Feng, Zhang Xiaomin *et al.*. Computer simulation method research for energy spread of high power pulse laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(s1):206~208
程晓峰,景 峰,张小民等. 高功率脉冲激光器能量离散的计算机模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(s1):206~208