

电路中心值设计的一种改进方法

刘志镜 郝跃

(西安电子科技大学计算中心 西安 710071)

摘要 基于 R. S. Soin 和 R. Spence (1980) 提出的电路中心值设计的统计最优化方法, 文中提出了一种改进的重心游移法。该方法系统地解决了成功点集为空集时的参数中心值设计问题, 给出了两个改进策略和系统连接问题, 以电路设计为例证明了该方法的可行性和实用性。

关键词 电路中心值设计, 统计最优化, 电路最优化设计

1 引言

在分立和集成电路的设计中, 应考虑到元件的参数值在制造过程中不可避免的随机性。因此, 考虑参数是有设计容差的统计最优化方法对提高产品的成品率和降低成本是十分重要的。R. S. Soin 和 R. Spence^[1] 提出了电路中心值设计的心游移法。该方法以蒙特卡罗法为基础, 无需假设可接受域是凸域或是单连通的, 且收敛次数不受设计变量维数的限制。因此, 它一提出就受到了电路设计者的重视和研究。但该方法只有在容差域与可接受域相交时, 才能使用, 否则无法重心游移。然而, 在工程设计中, 对设计者不可能一次设计就保证容差域与可接受域相交。所以它有一定的局限性。本文针对这一问题作了进一步的研究和改进, 提出了如何解决此问题的方法, 使其具有实用性。

2 最优中心设计和重心游移法

假设某个电路, 其性能由 k 个参数决定 (如 R, L, C), 这些参数用矢量 P 表示: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}^T$, 由于元件加工的随机性, 这些参数是随机变量。用上标 “ $\circ$ ” 表示其设计值 (称中心值), 矢量 $P^\circ = \{p_1^\circ, p_2^\circ, \dots, p_k^\circ\}^T$, 应是独立量。容差矢量定义为 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}^T$, 则电路在参数空间的容差域可表为

$$R_T = \{P \mid |p_i - p_i^\circ| \leq t_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k\}. \quad (1)$$

如设电路服从的 m 个性能要求为

$$f_i^L \leq f_i(P) \leq f_i^H, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (2)$$

常数 f_i^L 和 f_i^H 分别是电路的第 i 个性能函数允许的上下限; 特性函数 $f_i: R^k \rightarrow R$ 可以是任何静态频域或时域电路特性。电路的可接受域由一系列电路指标约束向量参数空间的映射构成, 它的参数空间为一 m 维超立方体, 可表示为

1993-03-30 收到, 1993-07-20 定稿

刘志镜 男, 1957 年生, 工程师, 现从事电路计算机辅助设计、电路优化设计和计算机图形学等方面的研究工作。

郝跃 男, 1958 年生, 教授, 现从事微电路 CAD、IC 可制造性和统计优化、模型和模拟等方面的研究工作。

$$R_A = \{P | f_i^l \leq f_i(P) \leq f_i^u, i = 1, 2, \dots, m\}.$$

显然在参数空间映射为一闭包体。

当电路各元件值与设计中心值较接近时,域 R_T 和 R_A 相交,记为 $R_C = R_T \cap R_A$, R_C 的边界由 R_T 和 R_A 域的边界共同构成。这时电路的成品率可表为一多维积分:

$$Y = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(P) u(P) dP. \quad (3)$$

当用蒙特卡罗方法产生的随机点模拟这个积分时,如果 P 的随机性服从某个概率分布,中心值设计问题可以表示为

$$\begin{aligned} \text{Max}_{P^0} Y(P^0) &= \int_{R_A} \dots \int \varphi(P - P^0) dP \\ &= \int_{R^n} \dots \int \varphi(P - P^0) u(P) dP = E(u(P)), \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\varphi(P - P^0)$ 为 P 的随机联合概率密度函数, $E(\cdot)$ 表示统计平均值, $u(P)$ 为

$$u(P) = \begin{cases} 1, & P \in R_A; \\ 0, & P \notin R_A. \end{cases}$$

中心值设计问题主要解决两个问题:(1)成品率的估算,(2)新中心值 P^0 的选择。由于优化设计变量的个数对于各种电路并不一样,因此参数空间的维数也是不确定的,所以用确定的数值积分法是无法实现容量估算的。

重心游移法则根据蒙特卡罗法,将每个取样电路分为“合格”与“不合格”。并由此确定“合格”与“不合格”样本,在参数空间中的重心,分别设为 G_P, G_F 。令 P^0 移动方向为 $(G_P - G_F)$,如果用下标 m 和 $m+1$ 表示两次连续的迭代,则新旧中心值之间的关系为

$$P_{m+1}^0 = P_m^0 + \lambda(G_{P_m} - G_{F_m}), \quad (5)$$

式中 λ 是步长因子, $\Delta G_m = (G_{P_m} - G_{F_m})$ 表示两重心之间的距离, $\Delta g_1, \Delta g_2, \dots, \Delta g_k$ 是 ΔG_m 的坐标。

下一步是选择步长,经过大量的实验发现,通过 P_m^0 点做平行于 ΔG_m 的单方向延伸以发现成品率的最大值的方向是不大恰当的,而每次迭代选择一单值 λ ,并仅当不能进一步增大成品率时,停止迭代(如 $Y_{m+1} \leq Y_m$)是可取的。步长选择准则为^[1]

$$\prod_{i=1}^k 2t_i - \prod_{i=1}^k (2t_i - \lambda \Delta g_{mi}) \leq 1 - Y_m. \quad (6)$$

由于对可接受域的形状一般了解的很少,很难获得更精确的 λ 选择准则。又因(6)式不能直接求解而得到 λ 值,通常的方法是用几个 λ 值(一般用步长 0.1,从 0.1 开始到 1.5 计算 $(1 - Y_m)$),然后选择一个满足(6)式的 λ 值。实践证明该方法是可行的。

使用该方法遇到的问题是,由于可接受域形状、大小各一,当初始 P^0 给定后,很难保证第一次成品率不为零。当初始成品率为零时,意味着“合格”点的集合为一空集,此时重心 G_P 将无法获得,因而进一步的优化方向将无法确定。过去的解决方式是根据设计者的经验重新给定初始的 P^0 ,直至初始成品率不为零。显然这带有极大的经验性和盲目性。下面提出的改进的方法正是要解决这一问题,同时还保证设计的正确性。

3 改进的重心游移法及其优化策略

为了解决“合格”点集为空集状态下,确定进一步优化方向,引入了改进重心游移法的两个策略。

3.1 容差域伸缩策略

当初始 P° 的成品率 $Y(P^\circ)$ 为零时,可采用图 1 所示的容差域伸缩策略。若设计容差域为 $T = (t_1, t_2, \dots, t_k)^T$, 则容差域伸缩策略步骤为

(a) 令 $T^\circ = T$, 置 $\alpha > 1$ (通常取 $\alpha = 2 - 5$), $m = 1$ 。

(b) $T^m = T^\circ + \alpha T^\circ$ 。

(c) 构成新的容差域 $R_{T_m} = \{P \mid |P - P^\circ| \leq T^m\}$ 。

(d) 计算 $Y_m(P^\circ)$, 并判断: 若 $Y_m(P^\circ) \neq 0$, 则 $Y^\circ = G_{P_m}$, $T^m = T$; 伸缩步骤结束。以 G_{P_m} 作为初始点, 容差域恢复为 T , 开始正常的成品率优化, 否则继续。

(e) 令 $T^\circ = T^m$, $m = m + 1$ 转到 (b)。

容差域伸缩策略是 $Y(P^\circ) = 0$ 时, 将 T 延伸, 直至 $R_T \cap R_A \neq \emptyset$ (空集), 容差域此时又自动压缩到原来状态, 以保证优化的顺利进行和设计的正确性。这是一个非常重要的步骤。

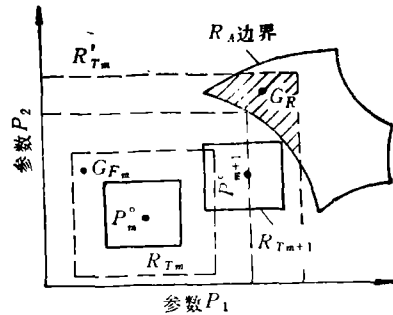


图1 容差域伸缩策略示意图

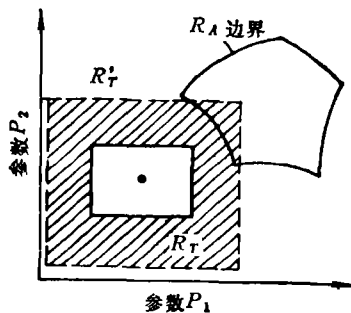


图2 区间套舍选抽样策略

3.2 区间套舍选抽样策略

当进行容差域伸缩而 $m > 1$ 时, 若 $Y_m(P^\circ) = 0$; 这说明此域 R_{T_m} 将不再有“成功”点。因此, 当容差域扩展至 $R_{T_{m+1}}$ 时, 可以不再对 R_{T_m} 域抽样, 从而保证同样的抽样次数下“成功”点抽样效率提高。另外, 由于 R_{T_m} 的扩展很可能形成若干个点 $P_i^m \leq 0$ (例如某个电阻或电容值小于零)。这种情况是不符合工程设计物理意义的。因此, 抽样时应将这些点排除。若设 $R_{T_{m+1}}$ 域抽样点为 β , 则区间套舍选抽样策略如图 2 所示。图中

阴影部分为区间套抽样空间。其步骤为

(a) 由 $[0, 1]$ 分布的均匀随机数产生 $R_{T_{m+1}}$ 区域的 $\varphi(P - P^\circ)$ 分布随机数 r 。

(b) 判断: 若 $r \in R_{T_m} \cup R_A = \{P \mid P_i \leq 0, \forall i \in u = \{1, 2, \dots, k\}\}$, 则转到 (a); 否则继续。

(c) $\beta = r$, 即产生一个 $m + 1$ 次成品率分析的抽样点。继续直到产生所有抽样点的随机数。

实验表明, 区间套舍选抽样可以提高优化速度, 减少容差域伸展次数, 是十分有效的策略。

4 算法应用例证

图 4 给出了需优化的低频低噪声运算放大器 (XD1531) 的电路原理图。需优化的电路指标为开环增益 $A_v \geq 4500$, 电路功耗 $P_w \leq 100\text{mW}$, 输入等效噪声电压 $E_n \leq 5.2\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, 输入失调电压 $V_{os} \leq 3\text{mV}$ 。优化的参数为晶体管放大系数 B_F , 基区薄层电阻 R_s 和电阻 R_7 , 其优化结果如表 1 所示。

从结果可以看出,虽然按设计者初始给定的参数值进行分析,其成品率为零,不满足优化要求。利用改进的重心游移法对其进行优化设计,经 5 次迭代后,其成品率上升到了 73%,使得电路性能很好地满足了设计指标。

5 结论

本文对电路中心值设计的统计最优化方法,作了较仔细的研究,针对其有较大的局限性和不足之处作了相应改进,提出了两个改进策略和系统连接问题,使其成为适合电路优化设计的工程设计的算法,大大地减少了设计人员的经验性和盲目性。该文的结论已应用于“海燕 CS54E-3-R”型彩电 CAD 设计和集成电路 XD1531 等设计中。实验证明,该方法有较强的应用性。由该方法设计出的 CAD 系统可应用于彩电 CAD, 集成电路 CAD 和其他的电子线路 CAD 系统中。

参 考 文 献

- [1] Soin R S, Spence R. IEE Proc.-G, 1980, 127(6): 260—269.
- [2] Brayton R K, Spence R. Proc. IEEE, 1981, 69(10): 1334—1362.

A NEW MODIFIED TECHNIQUE FOR CIRCUIT DESIGN CENTERING

Liu Zhijing Hao Yue

(Computational Center, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Based on the statistical optimization method of circuit design centering proposed by Soin and Spence (1980), a modified yield maximization technique, moving center of gravity, is suggested. This method is satisfactory in solving circuit yield maximization when the circuit initial yield is zero. The two modified strategies are given. Finally, in order to show feasibility and usability of this method, examples of the TV circuit (CS54E-3-R) and IC(XD1531) optimal yield are given.

Key words Centering design of circuits, Statistical optimization, Optimization design of circuits