

# 电解电容器特征参数提取方法研究

贾云涛 张建永 胡耀元 岳伟

(北京无线电计量测试研究所 北京 100854)

**摘要:** 研究电解电容器特征参数提取技术,提出了一种基于有限差分法与遗传算法的电解电容器特征参数提取方法,该方法可通过设置监测信号求得电解电容器特征参数值。以 Buck-Boost 电路为例,建立了电路模型,选择电流感经电流和电路输出电压作为监测信号,利用有限差分法对监测信号进行初步处理,然后结合遗传算法对电解电容器特征参数进行提取。实验结果表明,新方法能够有效实现电解电容器特征参数的提取。

**关键词:** 电解电容器;参数提取;有限差分法;遗传算法;Buck-Boost 电路

**中图分类号:** TP206+.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420.99

## Parameter identification of power electronic circuit

Jia Yuntao Zhang Jianyong Hu Yaoyuan Yue Wei

(Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China)

**Abstract:** Parametric identification method of power electronic circuits is studied in this paper. The electrolytic capacitors feature parameters can be obtained by setting the monitoring signals based on this method. The new method based on finite difference method and genetic algorithm for the parameter identification of power electronic circuits is proposed. Taking the Buck-Boost converter circuit as an example, the parameter identification of power electronic circuits is achieved. Firstly, the Buck-Boost converter's transfer function model is established. Secondly, the output voltage and the inductor input voltage are selected as monitoring signals. The finite difference method is used to preliminary calculate and the genetic algorithm is used to estimate the circuit's parameter. The experimental results show that the new method can be effectively applied in the parameter identification of power electronic circuits.

**Keywords:** electronic capacitor; parameter identification; finite difference method; genetic algorithm; Buck-Boost converter circuit

## 1 引言

电解电容器在电力电子设备系统中的失效率为 60%,是失效率最高的电子元器件<sup>[1]</sup>。主要失效机理是其等效串联电阻(equivalent series resistance, ESR)值随着使用时间的增加不断增大,当其值超过一定限度就会影响到整个电子系统的性能,研究表明,尤其应用在滤波电路中的电解电容器,其 ESR 增大将直接影响整个滤波电路的纹波电压指标<sup>[2-5]</sup>。因此研究电解电容器 ESR 值的在线辨识技术,对于评估电容器性能和健康状态进而监测整个电子系统的可靠性具有重要的意义,伴随着智能算法的快速发展,很多学者<sup>[6-7]</sup>将智能算法应用到电解电容器特征参数在线辨识技术上来。

提出了一种基于有限差分法结合遗传算法的电解电容

器特征参数提取算法,并以 Buck-Boost 电路为例,对电路中电解电容器特征参数进行了提取实验,验证了该方法的有效性和可行性。

## 2 有限差分结合遗传算法

应用有限差分法结合遗传算法对 Buck-Boost 电路中电解电容器进行 ESR 参数提取的过程为:首先通过建立电路工作的状态方程,然后通过状态方程以 ESR 为特征参数确定电路的监测信号。应用有限差分法将电路的状态方程离散后,应用遗传算法进行待估参数的求解,完成电路中电解电容器 ESR 参数的提取<sup>[8-9]</sup>。

Buck-Boost 电路原理图<sup>[10]</sup>如图 1 所示,其中电解电容器跟负载并联起到输出滤波<sup>[11]</sup>的作用。

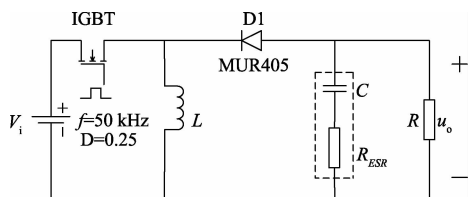


图1 Buck-Boost 电路原理

在开关导通,二极管关断阶段,对电容器支路部分进行分析得到电路方程为:

$$u_o(t) = ESRi_c(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt + u_c(t) \quad (1)$$

式中:  $u_o(t)$  为电路输出电压,  $i_c(t)$  为  $t$  时刻流过电容器的电流;  $u_c(t)$  为电容器模型两端电压。式(1)两边对  $t$  求导得到:

$$\frac{du_o(t)}{dt} = ESR \frac{di_c(t)}{dt} + \frac{i_c(t)}{C} \quad (2)$$

应用有限差分法将式(2)中连续方程离散化后,得到离散化后的电路模型为:

$$\frac{du_o(t)}{dt} \Big|_{t=t_k} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=0}^{n-1} [M_i u_o(t_k - iT_s)] \quad (3)$$

$$\frac{di_c(t)}{dt} \Big|_{t=t_k} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=0}^{n-1} [N_i i_c(t_k - iT_s)] \quad (4)$$

式中:  $T_s$  表示采样周期;  $n$  指采样得到  $n$  个监测数据。

$M_i, N_i$  则为需要遗传算法求解的未知矩阵。首先对  $v_c(t_k - iT_s), i_c(t_k - iT_s)$  在  $t = t_k$  时刻展进行泰勒级数展开:

$$\frac{du_o(t)}{dt} \Big|_{t=t_k} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=0}^{m-1} M_i \sum_{j=0}^m \frac{(-iT_s)^j}{j!} u_o^j(t_k) + E_1(t) \quad (5)$$

$$\frac{di_c(t)}{dt} \Big|_{t=t_k} = \frac{1}{T_s} \sum_{i=0}^{n-1} N_i \sum_{j=0}^m \frac{(-iT_s)^j}{j!} i_c^j(t_k) + E_2(t) \quad (6)$$

式中:  $E_1(t), E_2(t)$  表示泰勒展开中的高阶项,其值可忽略不计。

取  $n, m$  分别为 4 和 3, 得到展开的泰勒级数为:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1!/T_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -2 & -3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & -1 & -8 & -27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1!/T_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -2 & -3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & -1 & -8 & -27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_0 \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

解方程组得出:

$$\begin{bmatrix} M_0 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} \approx \frac{1}{6T_s} \begin{bmatrix} 11 \\ -18 \\ 9 \\ -2 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} N_0 \\ N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} \approx \frac{1}{6T_s} \begin{bmatrix} 11 \\ -18 \\ 9 \\ -2 \end{bmatrix}$$

代入式(5)和式(6)化简后得到电路中离散差分方程的一般形式:

$$y(t) = \phi(t)^T \theta + \frac{i_c(t)}{C} + E \quad (9)$$

式中:

$$y(t) = \frac{1}{6T_s} [11u_o(t) - 18u_o(t-1) + 9u_o(t-2) - 2u_o(t-3)]$$

$$\phi(t) = [\phi_1(t), \phi_2(t)] = \left[ \frac{1}{6T_s} (11i_c(t) - 18i_c(t-1) + 9i_c(t-2) - 2i_c(t-3)), i_c(t) \right]^T$$

$$\theta = [\theta_1, \theta_2] = [ESR, \frac{1}{C}]^T$$

式中:  $E$  为忽略掉的总误差。

得到了电路一般状态方程式(9), 然后应用遗传算法对  $\theta$  进行估计, 其算法流程如图 2 所示。

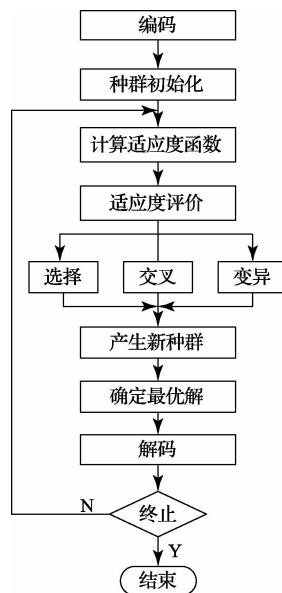


图2 遗传算法流程

编码方案: 采取二进制编码方式, 用遗传基因代表待估参数  $\theta$ 。

适应度函数与适应度评估: 选取合适的适应度函数, 在遗传进化中通过不断优化适应度函数值进行不断进化。

遗传操作: 是在进化过程中对遗传基因不断优化的过程, 包括染色体的交叉变异等。

种群生成: 首先随机生成初始种群, 通过适应度函数的大小评价种群优劣, 然后种群遵循“轮盘赌比例选择法”, 随机选择两个个体进行遗传操作, 以生成两个新个体。

进化终止条件: 一般选取达到进化次数或者达到要求的进化精度。

最优染色体解码: 对二进制染色体解码得到最优解  $\theta$ 。

### 3 模型实验验证

以图 1 所示 Buck-Boost 电路为例,通过在仿真软件 Pspice 中设置合适的参数进行实验仿真,然后在 MATLAB 中编程进行电解电容器特征参数辨识来验证方法的可行性与有效性。

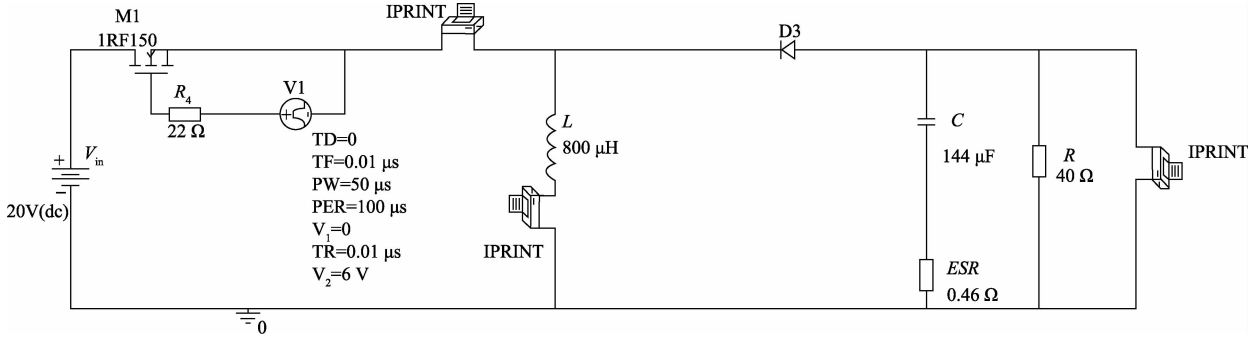


图 3 在 Pspice 软件 Buck-Boost 电路中的仿真电路

流值和 IGBT 开关状态信号监测,设置采样频率为  $10^7$ 。其仿真电路图如图 3 所示。

Buck-Boost 电路中各元器件的设置参数如表 1 所示。

表 1 Buck-Boost 电路仿真参数设置

$V_{in}/V$	$C/\mu F$	$L/\mu H$	$R/\Omega$	$ESR/\Omega$	D
20	144	800	40	0.46	0.5

在 MATLAB 编程软件中根据图 2 编写电解电容器特征参数提取的遗传算法。

假设仿真中使用的某型号电解电容器在  $40^\circ C$  下使用寿命为 100 h,根据电解电容器的寿命模型,得到该电解电容器等效串联电阻随时间变化为:

$$ESR(t) = \frac{0.46}{1 - 2.2 \times 10^4 \cdot t \cdot e^{-15.01}} \quad (10)$$

ESR 随工作时间曲线如图 4 所示。

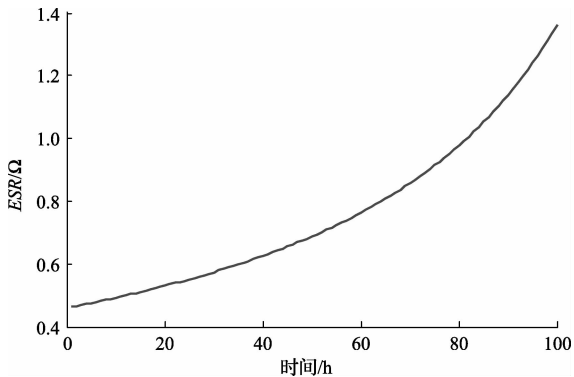


图 4 ESR 随工作时间变化曲线

结合式(10),对电解电容器 ESR 每隔 5 h 进行一次数据仿真,得到 50 h 内电容器变化趋势如表 2 所示,分别在

### 3.1 电路仿真实验

在仿真软件 Pspice 中建立 Buck-Boost 电路原理图。为了方便研究电解电容器等效串联电阻参数,电路图中用理想电容串联等效串联电阻的简易模型代替实际电解电容器。设变换电路的开关频率为  $10^4$ ,对输出电压值、电感电

仿真电路中对每一时刻 ESR 值仿真,并对监测信号进行采样。

表 2 电容器特征参数 ESR 的实际值

序号	ESR 值/mΩ	序号	ESR 值/mΩ
1	475.76	6	574.06
2	492.63	7	598.82
3	510.74	8	625.79
4	530.24	9	655.31
5	551.28	10	687.76

### 3.2 监测参数的获取方法

监测信号电容电压值可根据原理图得到:

$$U_C = V_{out} \quad (11)$$

监测信号电容电流值在实际中不能直接测量得到,可以通过 IGBT 开关状态结合电感电流信号得到:

$$I_D = I_L \times (1 - D_r) \quad (12)$$

$$I_o = \frac{V_{out}}{R} \quad (13)$$

$$I_C = I_D - I_o \quad (14)$$

布尔型变量  $D_r$  代表开关的状态,当其为 1 时代表开关导通,否则代表开关断开。

### 3.3 遗传算法编程设置

在 MATLAB 中按图 2 流程图进行电解电容器 ESR 提取的遗传算法编程。

1) 编码及初始化

根据差分方程确定待辨识未知量为电解电容器电容值和 ESR 值。采用二进制编码,设置 10 个基因位代表一个未知量,则需要一个 20 基因位的染色体表示电容值和 ESR 值。染色体中各基因位含义如表 3 所示。

表3 遗传算法染色体各位含义

染色体(位)	1-10	11-20
含义	电解电容 ESR 值/mΩ	电解电容 C /μF

为了有效地找到最优解,对遗传算法中初始化为:100个初始种群个数进行400次遗传进化。进化中满足60%的交叉概率和1%的变异概率。

2)适应度函数选取及评价

实验选取遗传算法每次进化中种群最优的实际值与计算值误差和的倒数作为适应度函数。可以发现,待测参数电容C和ESR值都和适应度函数有关,因此选取误差和的倒数作为适应度函数,随着遗传进化可以得到待测参数的最优解。

3)选择、交叉和变异

本程序中遗传算法染色体选择与复制采用轮盘赌法进行,染色体的交叉采用单点交叉法,并通过不断减小小变异概率的方法进行变异进化。

4)终止条件判断

本文选择达到初始设置的遗传代数作为终止条件,即当叠代达400次后结束遗传进化。

3.4 电解电容器特征参数结果及分析

根据实验设置电路进行监测信号数据采集,先用有限差分法对采集数据进行处理,然后应用遗传算法对电解电容器特征参数进行提取,最后得到电容器特征参数ESR提取结果如表4所示。

表4 有限差分法-遗传算法对电解电容器特征参数的提取结果

时刻	真实值 /mΩ	提取值 /mΩ	绝对误差 /mΩ	相对误差 r (%)
1	475.76	475.87	0.11	0.023 1
2	492.63	492.73	0.10	0.020 3
3	510.74	510.85	0.11	0.021 5
4	530.24	530.42	0.18	0.033 9
5	551.28	551.14	0.14	0.025 4
6	574.06	574.16	0.10	0.017 4
7	598.82	598.92	0.10	0.016 7
8	625.79	625.89	0.10	0.016 0
9	655.31	655.41	0.10	0.015 3
10	687.76	687.85	0.09	0.013 1

同样条件下该方法与文献[11]方法的特征参数提取结果对比如图5所示。

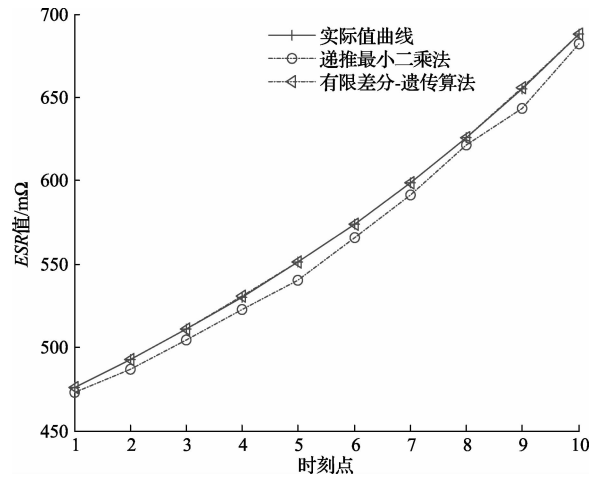


图5 有限差分-遗传算法与递推最小二乘法结果对比

由图5可以看出,本算法能够有效的进行电解电容器特征参数的提取,并且比递推最小二乘法具有更高的精度和适用性。

4 结 论

提出了一种基于有限差分结合遗传算法的电解电容器特征参数提取算法。首先建立了电路的等效模型,对电路进行时域分析,然后通过有限差分法简化微分运算,最后通过把电路参数辨识转化成目标优化问题,利用遗传算法优化搜索实现电解电容器的特征参数提取,通用性较好。本文提出的电解电容器特征参数提取方法不仅原理简单易于实现,而且精度较高具有很好的通用性。

参考文献

[1] PANG M H, BRYAN P M H. A life prediction scheme for electrolytic capacitors in power converters without current sensor [C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE. IEEE, 2010: 973-979.

[2] SHETTY P, MYLARASWAMY D, EKAMBARAM T, et al. A hybrid prognostic model formulation system identification and health estimation of auxiliary power untis [C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, Big Sky, Montana, USA, 2006:10.

[3] 张志学, 马皓, 毛兴云. 基于混杂系统模型和事件辨识的电力电子电路故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 49-53.

(下转第77页)