

基于人工蜂群算法的 Boost 型 DC/DC 转换器的控制器设计

闵 闰,熊 钦,刘政林,童乔凌

(华中科技大学 光学与电子信息学院,湖北 武汉 430074)

摘 要: 为简化 Boost 型 DC/DC 转换器的控制器设计,减小其传输函数的非线性带来的影响,将人工蜂群算法用于其控制器参数整定.通过调整目标函数、蜂群及迭代次数,算法可以较快地收敛于最优解.优化后的控制器对系统的非线性及负载的变化均表现出良好的适应性.仿真结果表明,相比经典方法的设计,基于人工蜂群算法设计的 PID 控制器能够有效消除由输入阶跃信号引起的超调,同时缩短 80% 的调节时间;当负载加重一倍时能够缩短 50% 的调节时间.

关键词: 人工蜂群算法;非线性;DC/DC;PID;参数整定

中图分类号: TP183

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0027-04

The Controller Design for Boost Convertor Based on Artificial Bee Colony Algorithm

MIN Run, XIONG Qin, LIU Zheng-lin, TONG Qiao-ling

(School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, China)

Abstract: To simplify the controller design for a Boost convertor, and to reduce the effect of the nonlinearity of its transfer function, an artificial bee colony algorithm was used to optimize the controller parameters. The convergence speed of the algorithm can be accelerated by adjusting the target function, the colony and the iteration number. The optimized controller can be adaptive to the nonlinearity and the load regulation. The simulation results show that, compared to the classical design methods, the controller optimized by artificial bee colony algorithm can eliminate the overshoot caused by the step signal, and decrease the regulation time by 80 percent. It also reduces the regulation time by 50 percent when the load doubles.

Key words: artificial bee colony algorithm; nonlinearity; DC/DC; PID; parameter tuning

1 引言

Boost 型 DC/DC 转换器传递函数存在的非线性问题,一直是其稳定性设计的一大难点,目前国内学者提出了多种解决方案,它们都能在一定条件下实现对 DC/DC 变换器的良好控制,这些解决方案包括:二次型最优 PID 控制^[1]、预测电流控制^[2]、模型预测控制^[3]、滑膜变结构控制^[4]等.

文献[1]提出的参数整定方法消除了稳态误差及超调,但牺牲了上升时间,调节时间也未得到改

善;预测电流控制可以改善电流环的响应速度,但外环控制的非线性问题依然未得到解决;模型预测控制能有效克服过程的不确定性和非线性,但控制策略复杂,不易实现;滑膜变结构控制设计出的变换器对于系统内部参数的不确定性及外部扰动都不敏感,且静态性能较好,但其固有的抖振现象也带来了新的问题.

本文采用人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC)^[5] 对 Boost 型 DC/DC 转换器作了优化设计,该方法简单可靠,参数适应性强,可用于

收稿日期: 2012-07-20; 修回日期: 2012-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(61176026, 60973034); 华中科技大学自主创新研究基金(2011QN004)

离线参数整定. 仿真表明, 优化后的转换器具有良好的静动态性能, 可适应大幅度负载变化.

2 Boost 型 DC/DC 转换器的环路设计

Boost 电路是一种能实现升压的开关电源, 它主要通过对电感的充放电来实现升压, 其原理图如图 1 所示.

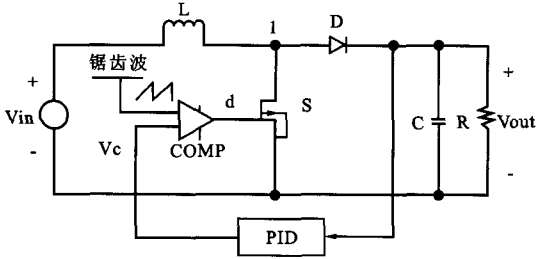


图 1 Boost 电路原理图

其中, d 是占空比, S 是开关, D 是二极管, V_c 是控制电压. V_c 通过脉冲宽度调制调节着占空比 d , 从而控制着 S 的通断, 进而决定了转换器的升压比. 升压比与 d 成正比, 理论上讲, Boost 电路的升压比可以从 1 变化到无穷大.

固定占空比的开环 Boost 电路的静动态性能欠佳, 为了克服这一缺点, 就要引入反馈, 对其进行闭环控制. 从 V_c 到 V_{out} 的传输函数为^[6]:

$$G(s) = \frac{dV_{out}}{dV_c} = -\frac{V_{IN}}{V_{RAMP}(1-d)^2 L_{eq} C} \cdot \frac{1-s \frac{L_{eq}}{R}}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{L_{eq} C}} \quad (1)$$

其中, V_{RAMP} 是锯齿波的最大值, L_{eq} 是等效电感. 式中包含 d , 因此 Boost 的传输函数实际上是非线性的, 另外, 分子项还存在一个右半平面零点 (RHP 零点), 这会直接限制环路的穿越频率, 给设计带来困难. 为了优化系统动态性能, 消除稳态误差, 就必须在反馈中引入 PID 控制, PID 控制需要整定 $\{P, I, D\}$ 三个参数, 环路传输函数:

$$G(s)H(s) = -\frac{V_{IN}D}{V_{RAMP}(1-d)^2 L_{eq} C} \cdot \frac{1-s \frac{L_{eq}}{R}}{s^2 + s \frac{1}{RC} + \frac{1}{L_{eq} C}} \cdot \frac{(s^2 + \frac{P}{D}s + \frac{I}{D})}{s} \quad (2)$$

为了在保持稳定的前提下最大化带宽, 让穿越频率等于 $1/10$ 的 RHP 零点, 并让 PID 带来的零点恰好抵消 LC 网络的双重极点, 可以得到:

$$\begin{cases} P = \frac{1}{RC}D = \frac{1}{10} \frac{V_{RAMP}(1-d)^2}{V_{IN}} \\ I = \frac{1}{10} \frac{RV_{RAMP}(1-d)^2}{L_{eq} V_{IN}} \\ D = I * L_{eq} C = \frac{1}{10} \frac{RCV_{RAMP}(1-d)^2}{V_{IN}} \end{cases} \quad (3)$$

3 ABC 算法

PID 控制可以提升系统的静动态性能, 然而对于 Boost 电路, 经典方法整定的 PID 参数存在一定局限. 首先, Boost 电路的传输函数实际上是非线性的, 经典方法要求设 d 为常量, 将其在工作点附近近似考虑为线性系统, 结果是 PID 参数只能在较小的范围内适用; 其次, 经典方法只能假定负载 R 是常数, 如果 R 发生变化, PID 参数就不再适用. 因此经典方法存在很多局限, 而 ABC 算法则可以很好地解决这一问题.

3.1 目标函数

目标函数是一个能够用来评价输出波形优劣的函数, 函数值可以是正比或反比于系统性能, 所以建立目标函数后, 就转换成寻找目标函数的最大值或最小值. 为了能够提取尽可能多的波形信息, 全面地评价输出波形, 使用下式建立目标函数^[7]:

$$J = \int_0^{\infty} [\omega_1 |e(t)| + \omega_2 |e_d(t)|^2 + \omega_4 |e_{\Delta}(t)|] dt + \omega_3 t_u \quad (4)$$

其中, $|e(t)|$ 是输出电压的误差, $|e_d(t)|$ 是占空比的误差, $|e_{\Delta}(t)| = |V(t) - V(t-\Delta t)|$ 是相隔 Δt 的输出之差, t_u 是输出的上升时间, $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 是权重系数. 式中 $\omega_1 |e(t)|$ 、 $\omega_2 |e_d(t)|^2$ 、 $\omega_4 |e_{\Delta}(t)|$ 、 $\omega_3 t_u$ 分别表征了输出电压的误差量、控制的误差量、输出的波动量和上升时间. 算法目标是找到一组参数, 使 J 达到最小.

3.2 ABC 算法流程

ABC 算法模拟实际蜜蜂采蜜的机制寻找最优解, 将目标函数的解和函数值分别抽象为蜜源的位置和质量, 最小的目标函数 J 就是要寻找的最优蜜源. 我们将 J 取倒数来代表蜜源的适合度, 用 fit 表示. 下面首先介绍三种蜜蜂各自的行为, 然后给出搜索流程.

(1) 雇佣蜂 (Employed bee)

她始终占据着记忆中的最优蜜源, 并且在每个遗传周期根据式 (5) 进行邻域搜索:

$$V_{ij} = x_{ij} + \varphi(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5)$$

式中, V_{ij} 为新蜜源的位置, x_{ij} 为雇佣蜂的第 j

维位置, x_{kj} 为随机选择的另一只雇佣蜂的第 j 维位置, φ 为 $[-1, 1]$ 间的随机数. 当 x_{ij} 的变动减小时, x_{ij} 与 x_{kj} 之差也就减小^[8]. 一只雇佣蜂按式(5)搜索新蜜源, 如果新蜜源更优, 则替代原有的蜜源, 否则该雇佣蜂的 Bas 加 1, Bas 代表该雇佣蜂未能搜到更优蜜源的次数, 当 Bas 超过一定次数 limit 时, 表示该蜜源很难再度优化, 因此为了防止落入局部最优解, 就要将相应雇佣蜂升级为侦查蜂.

(2) 跟随蜂(Onlookers)

她在每个周期按照式(6)赌轮盘, 选择需要跟随的雇佣蜂:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{k=1}^n fit_k}$$

(6)

式中, fit_i 是第 i 只雇佣蜂的适合度值. 跟随蜂赌一只雇佣蜂, 然后根据式(5), 在被跟随雇佣蜂的领域搜索蜜源, 如果找到更好的蜜源, 则取代该雇佣蜂所占有的蜜源, 否则被跟随雇佣蜂的 Bas 加 1. 这里, 一只雇佣蜂可以被多只跟随蜂重复选择, 因此适合度大的雇佣蜂被选择的几率更大, 更新次数更多.

(3) 侦查蜂(Scout)

她根据式(7)搜索新的蜜源:

$$x_{ij} = lb_j + \text{rand}[0, 1](ub_j - lb_j)$$

(7)

式中, lb_j 是第 j 维位置的下界, ub_j 是第 j 维位置的上界.

下面给出搜索流程:

- ①初始化, 雇佣蜂和跟随蜂都找到各自的蜜源;
- ②雇佣蜂进行领域搜索, 按照式(5)更新蜜源;
- ③跟随蜂按照式(6)赌轮盘, 帮助被赌中的雇佣蜂更新蜜源;
- ④如果雇佣蜂的 Bas 超过 limit, 则她放弃所占有的蜜源, 同时升级为侦查蜂;
- ⑤如果蜜蜂遗传超过规定代数, 则结束循环并输出最优解, 否则回到第②步.

搜索流程图如图 2 所示.

4 仿真结果与分析

考虑一个 10V 升 20V 的 Boost 系统, $L = 250\mu\text{H}$, $C = 66\mu\text{F}$, $R = 40\Omega$, $f = 50\text{kHz}$. 在工作点处有 $d = 0.5$, 带入式(3)可以得到: $P = 0.0025$, $I = 100$, $D = 6.6\text{e}-6$; 按照这组参数抽取目标函数, 得到的 fit 等于 48.0025.

下面来给出 ABC 算法的参数和搜索结果. 确定搜索区域时可参考经典方法整定的参数, 对其扩大

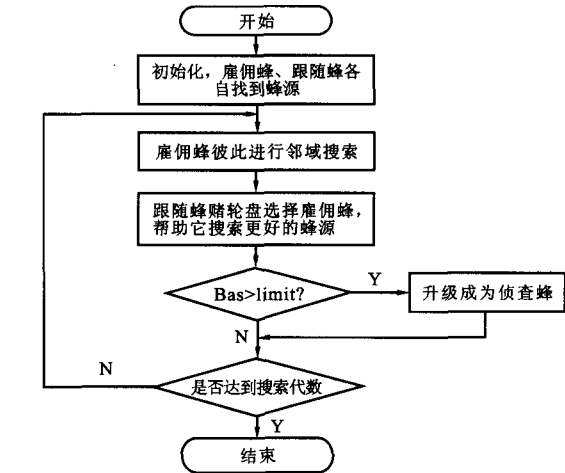


图 2 ABC 算法流程享

一定倍数; 为了能让算法具有一定的稳定性及收敛性, 蜂群数量及遗传代数要充足; limit 的大小应当设定为雇佣蜂数乘以搜索维数. 仿真设定的 ABC 参数如表 1 所示.

表 1 ABC 算法参数

目标函数	$w1=5, w2=1000, w3=10, w4=50$
蜂群数量	雇佣蜂、跟随蜂各 15 只
蜂群遗传代数	20 代
雇佣蜂升级侦查蜂条件	$\text{Bas} \geq \text{limit}, \text{limit}=45$
P 搜索范围	0 到 0.1
I 搜索范围	0 到 1000
D 搜索范围	0 到 $1\text{e}-4$

重复进行 20 次实验, 结果表明, ABC 算法最终收敛在较小的一块区域. 被整定参数 P 落在区间 $[0.0723, 0.1]$, I 落在区间 $[117.48, 119.96]$, D 落在区间 $[1.5\text{e}-5, 2.4\text{e}-5]$, 得出的适合度值在 $[247.3836, 257.5713]$ 区间内. 得到的 fit 均远大于经典方法得到的 fit, 这表明进行 20 次实验均找到了比经典方法更好的解.

对比两种方法整定参数后的输出, 电路启动时的输出电压如图 3 所示.

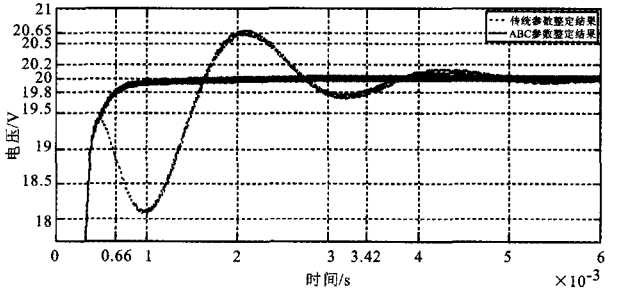


图 3 电路启动时的电压响应

定义调节时间是响应达到并保持 $\pm 1\%$ 波动内所需的时间, 超调量为最大偏离误差量与终值之比,

则两条曲线稳态误差和上升时间相近,而经典方法整定的结果有 3.25%超调量和振荡,调节时间大约 3.42ms;ABC 搜出的结果超调量为 0,调节时间大约 0.66ms.

考虑负载加重一倍的情况,ABC 搜出的结果依然更优,如图 4 所示. 两条曲线稳态误差相近,而经典方法整定的结果伴随着振荡,有 1.5%超调量,调节时间大约 1.7ms;ABC 搜出的结果更好,超调量为 0,调节时间大约 0.8ms.

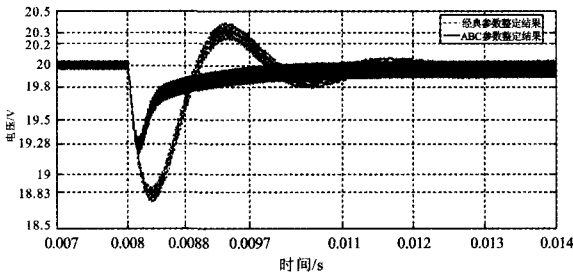


图 4 负载加重一倍时的电压响应

表 2 列出了两种方法得出结果的性能参数. 结果表明,ABC 算法能够有效消除由输入阶跃信号引起的超调,同时缩短了 80%的调节时间;负载加重一倍时则缩短了 50%的调节时间.

表 2 两种方法设计获得的性能参数

	启动时		负载增大 1 倍时	
	经典设计	ABC 优化设计	经典设计	ABC 优化设计
超调量	3.25%	无	1.50%	无
调节时间/ms	3.42	0.66	1.7	0.8
稳态误差/V	<0.001	<0.001	<0.1	<0.1

5 结束语

本文使用 ABC 算法对 Boost 型 DC/DC 转换器的 PID 控制作了参数整定,并与经典方法的设计作了仿真对比. 仿真结果表明,ABC 算法整定的 PID 参数可以大幅改善系统动态性能,对负载的变化也表现出良好的适应性. 该方法简单可靠,为开关电源转换器控制器的设计提供了一种新的思路.

参考文献:

[1] 尹丽云, 陆益民, 林小峰. DC/DC 变换器无静差二次型最优 PID 参数整定[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 191-194.

[2] Chen Jingquan, Prodic A, Erickson R W, et al. Predictive digital current programmed control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 18(1): 411 - 419.

[3] Bemporad A, Borrelli F, Morari M. Model predictive control based on linear programming—The explicit solution[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(12): 1974 - 1985.

[4] 王俊, 程龙. Boost 变换器滑模变结构控制策略的研究[J]. 电源世界, 2011, (7): 21-23.

[5] Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization[R]. Kayseri: Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.

[6] Sanjaya Maniktala. 精通开关电源[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 196-197.

[7] Gao Fei, Qi Yibo, Yin Qiang, et al. An novel optimal PID tuning and on-line tuning based on artificial bee colony algorithm [C]//International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE 2010). Wuhan: IEEE press, 2010: 1-4.

[8] Karaboga D, Akay B. A comparative study of artificial bee colony algorithm[J]. Applied Mathematics and Computation, 2009, 214(1): 108-132.

作者简介:

闵 闰 男, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为开关电源转换器的控制.

熊 钦 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为开关电源转换器的控制.

刘政林 男, (1968-), 教授, 硕士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.

童乔凌 男, (1981-), 讲师, 硕士生导师. 研究方向为超大规模集成电路设计.