第 26 卷 第 2 期　　中 国 电 机 工 程 学 报　　Vol.26 No.2 Jan. 2006
2006 年 1 月　　Proceedings of the CSEE　　©2006 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号：0258-8013（2006）02-0165-05　　中图分类号：TM56　　文献标识码：A　　学科分类号：470·40

开关电源的建模与优化设计研究

余明杨，蒋新华，王　莉，唐建湘

（中南大学信息科学与工程学院，湖南省 长沙市　410075）

Modeling and Optimization Design for Switching Power Supply

YU Ming-yang，JIANG Xin-hua，WANG Li，TANG Jian-xiang

（School of Information Science and Engineering，Central South University，
Changsha 410075，Hunan Province，China）

ABSTRACT: Aimming at the incapacity of establishing an accurate mathematic model for the switch mode power supply, an efficient method of engineering-oriented design is studied. A topology of switch mode power supply has been described. A method is presented, which is based on the experiment and simulation result to establish a neural network model for the switch mode power supply in Matlab. The process of circuit parameters optimizing is shown, which has combined the nonlinear neural network model with the genetic algorithm. A prototype which is based on the theory mentioned above has been made. Simulation and experiment have been taken to analyze the optimized model and the prototype. The result shows that the dynamic and the static performance of the prototype, which is designed by the new method, achieved the expected success.

KEY WORDS: Power electronincs; Switching power supply; Neural network; Genetic algorithm

摘要：针对目前无法建立开关电源精确数学模型的情况下，研究一种有效的开关电源工程化设计方法。给出了一种开关电源拓扑结构，详细介绍了采用实验和仿真结果建立基于 Matlab 环境下的开关电源神经网络模型的方法，以及利用该非线性神经网络模型结合遗传算法理论对开关电源的电路参数进行优化设计的过程。在此基础上研制了开关电源样机，并对开关电源优化模型和样机进行了仿真与试验研究分析。结果表明，采用这种优化设计方法制造的开关电源的动态性能、静态性能均达到了预期指标。

关键词：电力电子；开关电源；神经网络；遗传算法

1　引言

近年来许多领域，例如电力系统、邮电通信、军事装备、交通设施、仪器仪表、工业设备、家用电器等都越来越多地应用开关电源，取得了显著效益。这是因为新的电子元器件、新电磁材料、新变换技术、新控制理论及新的软件不断地出现并应用到开关电源上，使开关电源具有频率高、效率高、功率密度高、功率因数高、可靠性高等特点。

开关电源根据其使用状况的不同，有不同的拓扑结构，大功率的开关电源普遍采用全桥变压器隔离式结构[1-2]，如图 1 所示。这种结构中，开关元件承受较小的开关电压和电流强度，因此广泛被采用。

这种结构原理比较简单，控制方式多种多样，关键技术在于主电路每一个元件参数都直接影响开关电源的性能[3-4]，如电磁兼容性能、电气性能等。以往在工程设计中采用的方法是首先用工程估算和 Matlab 仿真进行参数设计，再在试验运行过程进行调试、改变参数以期达到某些指标。一般情况下，开关电源设计的第二个过程较长，有时还需要进行拓扑结构的调整，材料的消耗也很大。

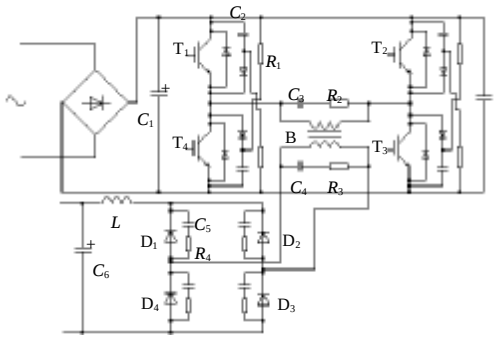


图 1　开关电源的拓扑结构

Fig. 1　The topology of switching mode power supply

采用这种设计方法的根本原因主要在于目前还无合适的理论用于建立开关电源的准确模型，仅利用 Matlab 仿真无法作到电源的优化设计，使得开关电源在设计和制造过程中有比较大的不确定性。

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

本文利用实验数据、Matlab 仿真数据和神经网络理论对大容量开关电源建模进行了探讨和实现，利用建立的开关电源模型指导 110V 大功率开关电源的优化设计和制作。

2 开关电源的仿真模型

由于开关电源在本质上是一个离散的，非线性系统，所以要建立统一的传函在实现上很困难。Matlab 是一个高级的数学分析软件，Simulink 是运行在 Matlab 环境下，用于建模、仿真和动态分析系统的软件包，利用 Simulink 软件中的电力系统工具箱对开关电源进行仿真分析是开关电源设计过程的一个重要步骤[5-6]。开关电源主电路中主要有以下元器件：高频变压器、二极管、开关管、电阻、电容和电感等等，这些元件可以利用 PSB 中现成的或组合起来的元件进行模拟，从而可对开关电源的工作状态进行直观和高效的仿真，仿真模型如图 2 所示。

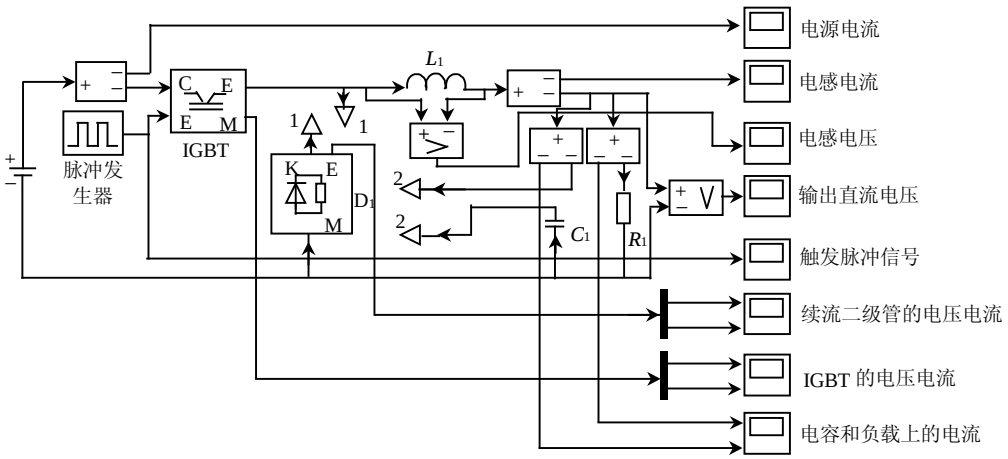


图 2 开关电源的 Simulink 仿真模型

Fig. 2 The Simulink model of switching power supply

在仿真之前需要设定 Simulink 的解题器（Solver）的参数。PSB 将仿真计算过程建立在基本的电路原理和微分方程数值求解的基础上。PSB 针对主回路建立的常微分方程组形式如下

$$x' = Ax + f(t) \tag{1}$$

其中，A 为 $m \times m$ 矩阵，由于 PSB 准确模拟了 IGBT 和二极管的动态性能，因此 PSB 针对开关电源建立的常微分方程是刚性方程组，即矩阵 A 的特征值相差十分大。针对这种情况，仿真算法采用可变阶次的数值微分公式（NDFS），即 ode15s 算法，该方法适合解决用 Runge-Kutta 法不能解决的刚性问题。仿真步长选择变步长方式，可由 PSB 根据需要自动调节，以保证解的稳定性和计算速度。

3 基于神经网络的开关电源输入输出映射关系的建立

3.1 神经网络的结构与算法

开关电源工程优化设计就是在一组参数中寻求一个最优解，用这组最优解设计电路，可以使电路的某些性能或技术经济指标达到最优，即满足某个目标函数。所以在工程优化设计的过程中，开关电源模型的建立显得十分重要。如果能够利用神经网络的学习能力在要设计的参数和最后的目标函数之间建立某种非线性的联系，使这种非线性的联系通过神经网络的学习以后保存在神经网络的结构和权中，就能得到基于神经网络的开关电源工程设计的模型[7-8]。

Matlab6.1 下的神经网络工具箱提供各种结构的神经网络，其中以三层 BP 神经网络模型应用最为广泛，如图 3 所示，当输入节点数为 N，则隐含层的节点数一般取为 $2N+1$。

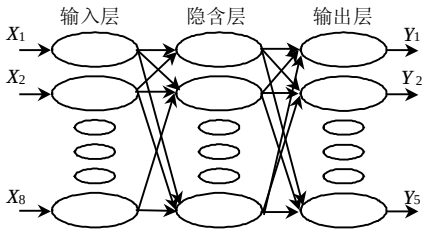


图 3 三层 BP 神经网络结构

Fig. 3 The schematic diagram of three layer back propagation network

为提高 BP 神经网络学习速度并增加了算法的可靠性，系统采用了 BPX 算法，BPX 算法降低了网络对于误差曲面局部细节的敏感性，考虑到以前

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

积累的经验，即以前时刻的梯度方向，有效地抑制网络陷于局部极小

$$w(t+1)=w(t)+h(t)[(1-a)D(t)+aD(t-1)] \quad (2)$$

式中　$w(t)$ 为权值向量；$h(t)$ 为 t 时刻的学习率；$D(t)$ 为 t 时刻的负梯度，其计算公式如下

$$D(t)=\frac{-\partial E}{\partial w(t)} \quad (3)$$

$$h(t)=2^{l}h(t-1) \quad (4)$$

$$l=\mathrm{sign}[D(t)D(t-1)] \quad (5)$$

3.2　BP 神经网络的训练

当多层网络的结构确定且所需要的训练数据准备好以后，就可以应用 BP 算法对网络进行训练。在 Matlab6.1 神经网络工具箱中 BP 训练步骤如下：

（1）用小的随机数对每一层的权值 w 和偏差 b 初始化，以保证网络不被大的加权值所饱和；

（2）设定训练参数值期望误差最小值、最大循环次数、修正权值的学习速率 lr；

（3）从 1 开始的循环训练：for epoch=1：最大循环次数；

（4）计算网络各层输出矢量 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_2$ 以及网络误差；

（5）计算各层反向传播的误差变化 D_2 和 D_1，并计算各层权值以及新的权值；

（6）再次计算权值修正后的误差平方和；

（7）检查 SSE 是否小于设定的期望误差最小值，若是，训练结束；如果 SSE 还没有小于设定的期望误差最小值，则继续。

3.3　BP 神经网络学习样本的设计

在开关电源的仿真过程中，使用不同的电路参数组合设定仿真的参数，这些电路参数也同样是 BP 神经网络的输入。电路参数包括：主电路电感 L，主电路电容 C_6，缓冲回路电阻 R_2，缓冲回路电容 C_3，交流侧 EMI 滤波器的 C_x、C_y、L_1、L_2 共 8 个电路参数。开关电源的性能指标，即 BP 神经网络的输出为：输出电压波动ΔV_o，IGBT 承受的峰值电压 U，上升时间 T_r，调节时间 T_s，超调量s % 共 5 个参数。BP 神经网络采用 3 层结构，隐含层节点数取为 20 个，设总的误差e为 0.01。用 Matlab6.1 的神经网络工具箱函数生成神经网络，生成的神经网络用 switch 命名，采用 trainlm 算法进行训练。训练结束时网络的权值存储在 switch 中。

此 BP 神经网络的输入输出可表示为

输入为

$$\boldsymbol{P}_i=[L,C_6,R_2,C_3,C_X,C_Y,L_1,L_2]_i$$

输出为

$$\boldsymbol{y}_i=[\Delta V_O,U,T_r,T_S,s\ \%]_i$$

式中　i 为训练对，一对输入对应一对输出。

训练数据的输入矩阵 $\boldsymbol{p}_{500\times8}$，行数代表训练对数，每一行即代表一个 $\boldsymbol{p}$；输入数据是计算出的电路可行设计参数的附近利用 Matlab 的随机函数产生的。训练数据的输出矩阵 $\boldsymbol{y}_{500\times5}$，行数代表训练对数，每一行即代表一个 $\boldsymbol{y}$；训练数据的输出通过 Simulink 仿真得到。$\boldsymbol{p}$ 和 $\boldsymbol{y}$ 一一对映。输入输出数据之中蕴涵内在的联系，利用神经网络的目的就在于学习这种内在的联系。

4　基于遗传算法的开关电源的最优化设计

遗传算法在非线性的寻优问题中使用广泛，其特点是具有极强的鲁棒性和全局寻优能力，它还具有隐含的并行性[9-10]。

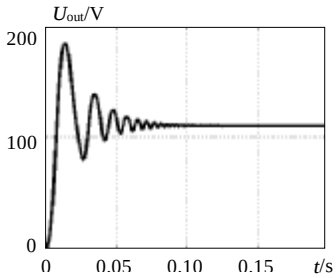
基于 Matlab 的遗传算法工具箱能使在计算机上方便的实现标准遗传算法[11-15]。利用工具箱编写的解决开关电源优化设计问题的关键代码见附录。

5　仿真与试验

经过 Matlab 的 Simulink 软件中的电力系统工具箱、实验数据、神经网络工具箱和遗传算法工具箱，建立了开关电源的最优仿真模型。利用这个模型进行仿真研究，指导开关电源参数设计，使开关电源的性能指标满足相关国家标准。开关电源的试验包括电磁兼容试验和型式试验两大项共 14 子项，文中仅列出型式试验中动态性能试验和静态性能试验一个子项的仿真及试验结果，所有试验数据都由国家变流技术工程中心提供。

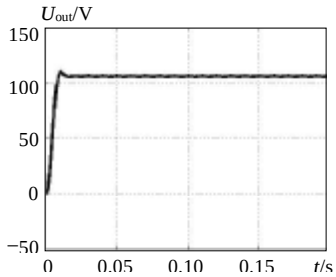
（1）启动性能试验（型式试验中动态性能）

国家标准（直流 110V 机车控制电源柜技术条件）规定，负载电流由 5.5A 上升至 50A，超调量≤10%、超调时间≤0.1s。图 4 为可行性设计和最优设计仿真启动及输出电压波形。利用最优设计指导制造的开关电源在型式试验中的实际波形如图 5 示。



(a) 可行性设计

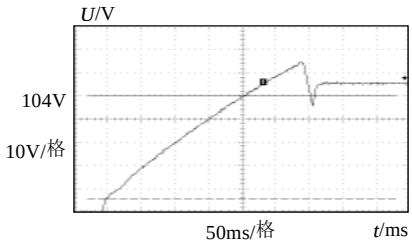
PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn



(b) 最优设计

图 4 可行性设计和最优设计仿真启动及输出电压波形

Fig. 4 The startup waveform of output voltage based on feasibility design and optimal design



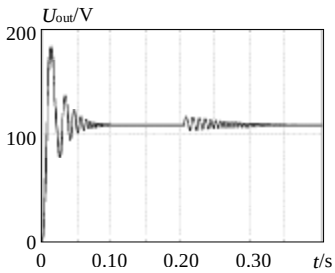
注：超调量为 9.2%、超调时间为 0.08 s

图 5 型式试验中启动时输出电压波形

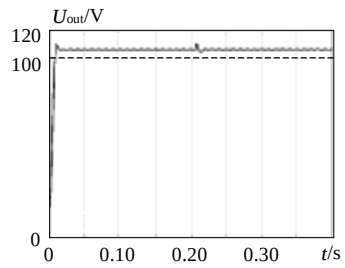
Fig. 5 The startup waveform of output voltage in type tests

（2）负载突变（型式试验中动态性能）

国家标准规定，负载电流由 50A 突变至 5.5A 或相反，超调量≤10%、超调时间≤0.1s。图 6 为可行性设计和最优设计仿真负载突变开关电源输出电压波形。



(a) 可行性设计

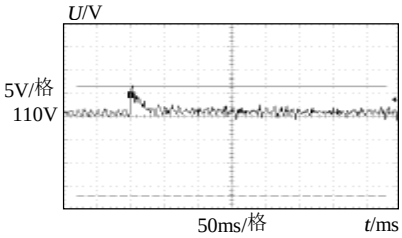


(b) 最优设计

图 6 可行性设计和最优设计负载突变时的仿真输出电压波形

Fig.6 The feasibility design and optimal design based simulation waveform of output voltage under load change

图 7 为型式试验中负载突变时开关电源的输出电压波形。



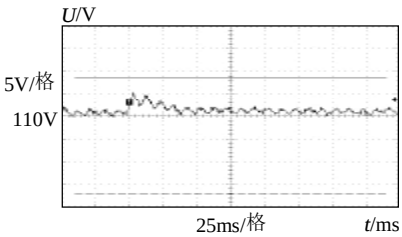
注：超调量为 9.1%、超调时间为 0.04 s

图 7 型式试验中负载突变时的输出电压波形

Fig. 7 The waveform of output voltage under load change in type tests

（3）网压突变试验（型式试验中动态性能）

国家标准规定，网压由 277V 突增至 396V 及 495V 突降至 396V，超调量≤10%、超调时间≤0.1s。图 8 为型式试验网压突变时开关电源输出电压波形。



注：超调量为 4.5%、超调时间为 0.04 s。

图 8 型式试验中网压突变时的输出电压波形

Fig. 8 The waveform of output voltage under voltage disturbance in type tests

（4）静态试验（型式试验）

表 1 为开关电源静态试验数据。

表 1 开关电源静态试验数据

Tab.1 The data from static tests of switching power supply

交流试验电压(网压)/V	直流输出电压标准（负载电流 5.5~50A）/V	直流电压试验结果/V
277	108.9~111.1	109.3~110.5
396	108.9~111.1	109.3~109.9
495	108.9~111.1	109.4~109.9

6 结论

从国家标准可以看出，机车用开关电源使用环境相当恶劣，没有优化模型的指导，仅通过不断实验调试，设计和制造周期将是漫长的。在系统设计过程中，课题组首先设计和制造了一台样机，同时建立 Matlab 模型，通过样机的实验数据和 Matlab 模型仿真数据对神经网络模型进行训练，建立针对开关电源的某些具体动态、静态性能参数的遗传算法优化模型，利用优化所得到的结果，指导样机参数的修改。采用这样的设计方法，虽然在设计和制造过程中增加了建立神经网络模型和优化模型的过程，但大量地节约了系统调试时间和设计过程的反复，同时也节约了调试和试验成本，达到了事半工倍的效果。样机一次通过了国家变流技术工程中

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn

心组织的电磁兼容试验和型式试验共 14 个试验项目。试验表明样机输出电压控制精度达到 110±1V，输出功率 8kW，电磁兼容等特性满足国家标准，产品现正在多个铁路机务段试运行，运行情况良好。

参考文献

[1] Tseng Ching-Jung，Chen C L．Passive lossless snubbers for DC/DC converters[J]．IEE pro-circuits syst，1998，145(6)：369-401．

[2] 邓焰，吴燮华，何湘宁，等．一种新型高功率逆变桥臂无源无损耗吸收电路[J]．中国电机工程学报，2000，20(3)：5-9．
Deng Yan，Wu Xiehua，He Xangning，et al．A novel passive lossless snubber for power inverter bridge legs[J]．Proceedings of the CSEE，2000，20(3)：5-9．

[3] 陈文洁，杨旭，杨拴科，等．分立元件构成的电力电子集成功率模块的设计[J]．中国电机工程学报，2003，23(12)：104-110．
Chen Wenjie，Yang Xu，Yang Shuanke，et al．A design of discrete components based integrated power modules[J]．Proceedings of the CSEE，2003，23 (12)：104-110．

[4] 裴雪军，康勇，熊健，等．PWM逆变器共模传导电磁干扰的预测[J]．中国电机工程学报，2004，24(8)：83-88．
Pei Xuejun，Kang Yong，Xiong Jian，et al．Prediction of common mode conducted EMI in PWM inverter[J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(8)：83-88．

[5] Hanselman D，Littlefield B．Mastering matlab6 a comprehensive tutorial and reference[M]．张航等译．北京：清华大学出版社，2002．

[6] 张加胜，张磊．四象限变流器的一种统一性建模及分析方法研究[J]．中国电机工程学报，2004，24(8)：39-44．
Zhang Jiasheng，Zhang Lei．Research on an general unified modeling and analysis approach of 4-quadrant converters [J]．Proceedings of the CSEE，2004，24(8)：39-44．

[7] 楼顺天，施阳．基于MATLAB的系统分析与设计(神经网络) [M]．西安：西安电子科技大学出版社，1998．

[8] 周昊，朱洪波，茅建波，等．大型四角切圆燃烧锅炉NO_x排放特性的神经网络模型[J]．中国电机工程学报，2002，22(1)：34-37．
Zhou Hao，Zhu Hongbo，Mao Jianbo，et al．An artificial neural network model on NO_x eiss10n property of a high capacity tangentlally firing boiler[J]．Proceedings of the CSEE，2002，22(1)：34-37．

[9] Krishnakumar K，Goldberg D E．Control System optimization using genetic algorithms[J]．Journal of Guidance，Control and Dynamics，1992，15(3)：735-740．

[10] Varsek A，Urbacic T， Filipic B．Genetic algorithms in controller design and tuning[J]．IEEE Trans. on Sys．Man and Cyber，1993，23(5)：1330-1339．

[11] Mühlenbein H ，Schlierkamp-Voosen D．Predictive Models for the Breeder Genetic Algorithm[J]．Evolutionary Computation，1993，1(1)：25-49．

[12] Chipperfield A J．Fleming P J．The Matlab genetic algorithm toolbox [C]．IEE Colloquium on Applied Control Techniques Using MATLAB，1995．

[13] Chipperfield A J，Fleming P J， Fonseca C M．Genetic algorithm tools for control systems engineering[C]．Proc．Adaptive Computing in Engineering Design and Control，Plymouth Engineering Design Centre，UK，1994．

[14] Syswerda G．Uniform crossover in genetic algorithms [C]．Proceeding of Third International Conference on Genetic Algorithms and Their Applications，Morgan Kauffman，1989．

[15] 王育槐，吴建华，杨仕友，等．多目标矢量优化的改进遗传算法及其在电磁装置优化设计中的应用[J]．中国电机工程学报，2004，24(7)：215-218．
Wang Yuhuai，WU Jianhua，Yang Shiyou，et al．An improved genetic algorithm for vector optimization and its application to design optimizations of electromagnetic devices[J]. Proceedings of the CSEE，2004，24(7)：215-218．

附　录

```
NIND=40;            %个体的数目（初始群体数目的设定）。
MAXGEN=300;    %最大的遗传代数
NVAR=8;             %优化设计中变量的个数
FieldD=[rep([PRECI],[1,NVAR]);...
[0.88,0.003075,1,0.1,1,0.022,0.5,0.5;5,0.0088,100,1,5,0.0047,.
3,3];rep([1;0;1;1],[1,NVAR])];
Chrom=crtbp(NIND,NVAR*PRECI);
gen=0                % 设定记数器
ObjV=objfun2(bs2rv(Chrom,FieldD))；% 计算初始群体的目标函数
while gen<MAXGEN；% 进化的开始
    FitnV=ranking(ObjV)；      % 使用选择算子进行
    SelCh=select('sus',Chrom,FitnV,GGAP);      % 使用杂交算子
    SelCh=recombin('xovsp',SelCh,0.7);          % 使用突变算子
    SelCh=mut(SelCh);     % 计算下一代群体的目标函数
    ObjVSel=objfun2(bs2rv(SelCh,FieldD)); % 将适应度高的个体插入到父代中
    [Chrom,ObjV]=reins(Chrom,SelCh,1,1,ObjV,ObjVSel);
    gen=gen+1;
end
FitnV=ranking(ObjV)；%进化结束后计算每个个体的适应度
phen=bs2rv(Chrom,FieldD)；%将代表个体的二进制位串转化为优化设计中的变量
```

代码中的 phen 为遗传算法计算出的实际电路的优化参数，它提供了一组经过遗传算法处理的电路参数，从中可以选出适应度最高的一个个体，将其作为最优设计。

收稿日期：2005-08-25。

作者简介：

余明杨（1964-），男，副教授，从事轨道交通与电力电子技术研究；

蒋新华（1956-），男，教授，博士生导师，从事智能控制与交通信息工程研究；

王　莉（1963-），女，副教授，从事电力电子技术及其工业控制应用研究；

唐建湘（1972-），男，讲师，从事轨道交通与电力电子技术研究。

（责任编辑　韩　蕾）

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.com.cn