中图分类号:TP391.9 文献标识码:A 文章编号:1009-2552(2011)06-0122-05

光伏阵列的仿真模型研究

王建华，韩 伟

(江苏科技大学，镇江 212003)

摘 要：应用仿真软件 MATLAB/Simulink 工具，在光伏阵列的物理数学模型的基础上，建立了一种光伏阵列的仿真模型。利用该模型，可以模拟任意太阳辐射强度、环境温度、光伏模块参数、光伏阵列串并联方式组合下的光伏阵列 I-V 特性，并结合 BOOST 升压电路，可得实际需要的电压。仿真结果表明，该光伏阵列模型输出与实际输出基本相似，能很好的用于光伏发电系统的动态仿真。

关键词：光伏阵列；MATLAB 仿真；BOOST 电路

Study on photovoltaic array simulation model

WANG Jian-hua, HAN Wei

(**Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang** 212003, **China**)

Abstract: In application of Simulink tools of simulation software MATLAB, based on the physical and mathematical models of photovoltaic array, a kind of photovoltaic array working simulation model was established. By the model, the I-V characteristics of photovoltaic array with different combinations can be simulated at any corresponding insolation level, ambient temperature and parameters of the photovoltaic model, also combining with BOOST chopper can get the voltage which the actual needs. The simulation result shows that photovoltaic array model output is similar as actual basically, while it can be used in the dynamic of photovoltaic systems.

Key words: photovoltaic array; MATLAB simulation; BOOST chopper

0 引言

光伏发电因其清洁环保、资源丰富等诸多优点成为当今可再生能源研究和应用的热点之一。但由于光伏阵列价格昂贵，电能输出受光照强度、温度等环境条件及负载变化等因素的影响较大，所以在构建光伏系统时，如果采用真实的光伏阵列，则成本会很高。特别是当被研究的光伏系统的功率在数百瓦甚至更大级别时，考虑到经济性和时效性，建立起通用的光伏阵列模型就显得非常有必要[1]。

光伏阵列模型可以模拟出任意太阳辐射强度、环境温度、光伏模块参数、光伏阵列串并联方式组合下的光伏阵列 I-V 特性，大大缩短光伏系统的研究周期，提高研究效率，增强研究结果的可信度，因此采用计算机软件仿真无疑是首选。研究主要是基于光伏阵列的物理机制的数学方程结合其等效电路特点构建光伏阵列的 Simulink 仿真模型。

1 光伏阵列的特性

由实验测得光伏阵列终端特性，得到实际使用的等效电路如图 1 所示[2]。

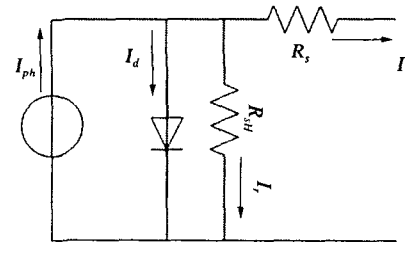


图 1 光伏阵列的等效电路模型

收稿日期：2010-11-12

作者简介：王建华(1954-)，男，副教授，主要研究方向为光伏发电。

典型的光伏阵列(电流 I－电压 V)、(功率 P－电压 V)特性如图 2－3 所示。图 2 表示 I－V、P－V 随光强变化而变化的规律。图 3 表示最大功率点功率、电流、电压随温度变化的规律。

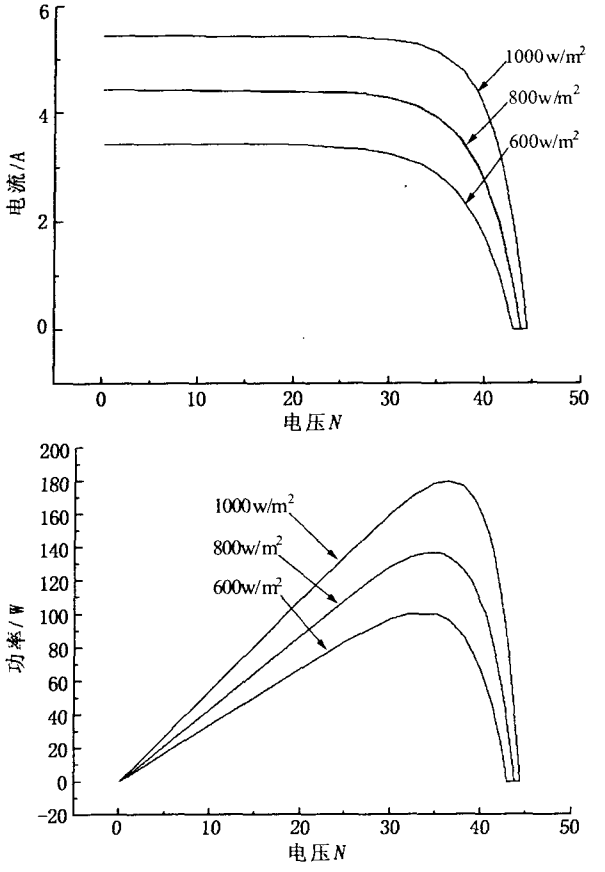


图 2　不同光照强度下的光伏组件 I－V 曲线和 P－V 曲线

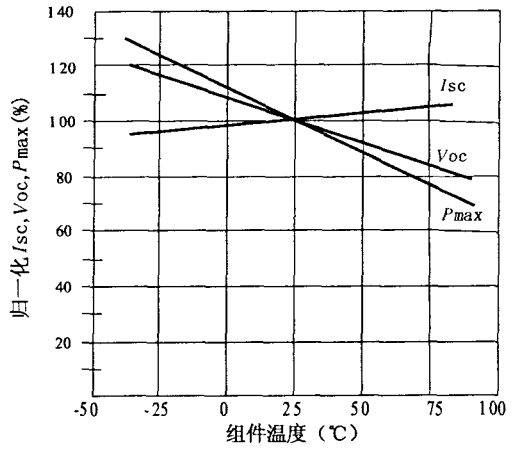


图 3　最大功率点功率、电流、电压随温度变化曲线

由图 2 可知:在高电压区,光伏阵列可视为工作在恒压源区;在低电压区,光伏阵列可视为工作在恒流源区。随着光强的减弱,光伏阵列的输出电流减少,输出功率也减少。由图 3 可知:当光强不变时,随着温度的升高,开路电压降低,短路电流略有增加,最大功率减少[3-5]。

2　光伏阵列模型的建立

图 1 是光伏阵列等效电路,其工作原理为:当光照恒定时,由于光生电流 I_{ph} 不随光伏阵列的工作状态而变化,因此在等效电路中可以看作是一个恒流源。光伏阵列的两端接入负载后,光生电流流过负载,从而在负载两端建立起端电压 V。负载端电压反作用于光伏阵列的 P－N 结上,产生一股与光生电流反方向的电流 I_d。此外,R_s 为串联电阻,一般小于 1。它主要是由光伏阵列的体电阻、表面电阻、电极导体电阻、电极与硅表面间接触电阻和金属导体电阻等组成。R_{sh} 为旁路电阻,一般为几千欧姆。它主要是由阵列表面污浊和半导体晶体缺陷引起的漏电流所对应的 P－N 结泄漏电阻和阵列边缘的泄漏电阻组成[6]。

由等效电路图可得光伏阵列的特性的一般公式:

$$I = I_L - I_0\{\exp[\frac{q(V+R_SI)}{AkT}] - 1\}\frac{V+R_sI}{R_{sh}} \qquad (1)$$

通常情况下,式(1)中的$(V + R_sI) / R_{sh}$项远小于光伏阵列输出电流,因此该项可以忽略。

由于单个光伏阵列产生的电压很小。因此,在实际中,需要通过对多个小单位的光伏阵列的串、并联交替组合来得到期望的直流电压或电流。据此可得到简化的光伏阵列模型的输出特性方程:

$$I = n_PI_L - n_PI_0\{\exp[\frac{q(V+R_sI)}{n_sAkT}] - 1\} \qquad (2)$$

相应的光伏阵列模块中,在考虑到光强和温度变化的情况下,分析光伏阵列的工作原理可得:

$$I_L = I_{SC}[1 + \alpha(T - T_{ref})]\frac{G}{G_{ref}} \qquad (3)$$

当光伏阵列处于开路状态时 $I = 0, V = V_{OC}$。代入式(2)可得反向饱和电流的表达式为:

$$I_0 = n_PI_L/[\exp(\frac{qV_{OC}}{n_SAkt}) - 1] \qquad (4)$$

$$V_{OC} = V_{OC,ref}[1 + \beta(T - T_{ref})] \qquad (5)$$

当光伏阵列模块工作在最大功率点时,由式(2)可求得 R_s 和 V_m:

$$R_s = \frac{\frac{n_SAkT}{q}\ln(\frac{n_PI_L - I_m}{n_PI_0} + 1) - V_m}{I_m} \qquad (6)$$

$$V_m = \frac{n_SAkT}{q}\ln(\frac{n_PI_L - I_m}{n_PI_0} + 1) - R_sI_m \qquad (7)$$

式中，I 为光伏阵列的输出电流；I_L 为 PN 结电流；I_0 为反向饱和电流；V 为输出端电压；T 为绝对温度(K)；q 为单位电荷，其值为 $1.6\times10^{-19}C$；k 是波尔兹曼常数，其值为 1.38×10^{-23}J/K；A 为二极管理想常数，其值介于 1～2 之间变化；n_p，n_s 分别为光伏阵列模块中光伏阵列并联和串联的个数；I_{SC}为标准测试条件下测得的光伏阵列的短路电流；G 为光强；α 为光伏阵列的短路电流温度系数；T_{ref}和 G_{ref}分别是指光伏阵列的绝对温度和光强的参考值，即分别为 298K 和 1000W/m^2；V_{OCref}为标准测试条件下测得的光伏阵列的开路电压；β 为光伏阵列的开路电压温度系数。

基于上述的数学模型，在 MATLAB/Simulink 环境下建立光伏电池阵列的通用仿真模型，其内部结构如图 4 所示。同时创建子系统，并在其内部封装 I_m、V_m、I_{SC}、V_{OC}以及 n_p、n_s 等参数，这些参数可见于产品数据中。仿真实验时，可以方便的对不同的光伏阵列进行参数设置。

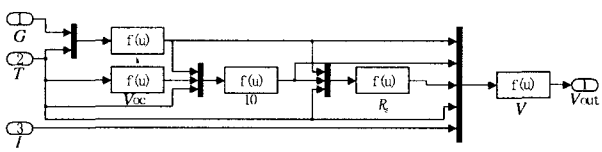


图 4　光伏阵列仿真模型内部结构图

光伏阵列仿真模型内部结构如图 4 中所示，利用 Simulink 工具，在光伏阵列的物理数学模型基础上，建立起光伏阵列的仿真模型。其中模块的输入为温度 T、光强 G、电流 I；输出为工作电压 V。

3　BOOST 电路的原件选择和参数计算

由于单个光伏阵列的输出直流电压、电流较低，因此，在实际中，需要通过对多个小单位的光伏阵列的串、并联交替组合，同时将光伏阵列模型接入 BOOST 升压电路中来得到期望的直流电压或电流。

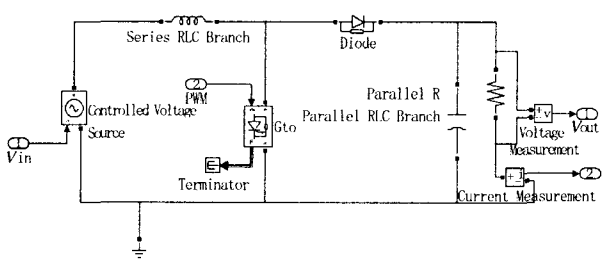


图 5　BOOST 升压电路模块

BOOST 升压电路模块如图 5 所示，升压斩波电路由 L/Tc/D/C 等原件构成，参数的选择通过如下计算得到[7-8]：

①电感 L BOOST 升压电路工作在电流连续工作模式 CCM，电感电流需保持连续状态。在开关管 Tc 为导通期间，二极管 D 处于截止状态，流经电感 L 和开关管电流逐渐增大，电感 L 两端电压为 E_S，考虑到开关管 Tc 集电极对公共端导通压降 U_S，即为 E_S-U_S。通过电感的电流增加部分 ΔI_{Lon}满足式(8)。

$$\Delta I_{Lon}=\frac{(E_S-U_S)t_{on}}{L} \tag{8}$$

式中，U_S 为开关管导通时压降，约 0.6～0.9V；t_{on}为导通时间。

在开关管 Tc 截止期间，二极管 D 处于导通状态，储存在电感 L 中能量提供给输出，流经电感 L 和二极管 D 电流处于减少状态，设二极管 D 正向电压为 U_f，电感 L 两端电压为 $U_O+U_f-E_S$，电流减少部分 ΔI_{Loff}满足式(9)。

$$\Delta I_{Loff}=\frac{(U_O+U_f-E_S)t_{off}}{L} \tag{9}$$

式中：U_O 为输出电压；U_f 为整流二极管正向压降，快恢复二极管约 0.8V，肖特基二极管约为 0.5V；t_{off}为截止时间。

在电路稳定状态下，电流连续变化，$\Delta I_{Lon}=I_{Loff}$，由式(8)和式(9)可得：

$$\frac{t_{off}}{t_{on}}=\frac{E_S-U_S}{U_O+U_f-E_S} \tag{10}$$

定义占空比 D = ton/T，则：

$$D=\frac{U_O+U_f-E_S}{U_O+U_f-U_S}\approx\frac{U_O-E_S}{U_O} \tag{11}$$

如果忽略电感损耗，电感输入功率等于输出功率，即

$$E_S\times I_{L(ave)}=U_O\times I_O \tag{12}$$

式中，$I_{L(ave)}$为电感平均电流。

由式(11)和式(12)：

$$I_{L(ave)}=\frac{I_O}{1-D} \tag{13}$$

同时由式(8)得电感器纹波电流：

$$\Delta I_L=\frac{(E_S-U_S)D}{Lf} \tag{14}$$

式中，f 为开关频率。

为保证电流连续，电感电流应满足：

$$I_{L(ave)}\geq\Delta I_L/2 \tag{15}$$

考虑到式(13)，式(14)和式(15)，可得到满足电流连续情况下的电感值为：

$$L\geq\frac{(E_S-U_S)D(1-D)}{2I_Of} \tag{16}$$

另外，由 BOOST 升压电路结构可知，开关管电流峰值 $I_{Tc(max)}$，二极管电流峰值 $I_{Dc(max)}$，电感器电流峰值 I_{LP} 是相等的，因此：

$$I_{LP} = I_{L(ave)} + (\Delta I_L/2) \tag{17}$$

代入数据：$D = 0.5$，$U_S = 0.9V$，$I_O = P_O/U_O = 550/220 = 2.5A$，$f = 49kHz$，同时考虑在 10% 额定负载以上电流连续情况，实际设计时可以假设电路在额定输出时，电感纹波电流为平均电流的 20% ~ 30%，因增加 ΔI_L 可以减小电感值 L，但为不增加输出纹波电压而须增大输出电容 C，取 30% 为平衡点，即：

$$\Delta I_L = 30\% \times I_{L(ave)} = 30\% \times \frac{I_O}{1-D} = 30\% \times \frac{25}{1-0.5} = 1.5A \tag{18}$$

由式(14)，式(17)可得：

$$L = \frac{(E_S - U_S)D}{\Delta I_L f} = \frac{(110-0.9)\times 0.5}{1.5\times 49000} \approx 742\mu H \tag{19}$$

流过电感 L 的峰值电流由式(13)和(17)得：

$$I_{LP} = I_{L(ave)} + (\Delta I_L/2) = 5.75A \tag{20}$$

L 可选用电感量为 1000H 且通过 6A 以上电流不会饱和的电感。电感的设计包括磁芯材料、尺寸、型号选择及绕组匝数计算、线径选用等。电路工作时重要的是避免电感饱和、温度升高。磁芯和线径的选择对电感性能和温升影响和大，材质好的磁芯如环形铁粉磁芯，承受峰值电流能力较强。而选用较粗的导线绕制电感，能有效降低电感温升。

②开关管 Tc。Tc 开关管电流峰值由式(15)得，$I_{Tc(max)} = I_{LP} = 5.75A$，开关管耐压：

$$U_{dTc} = U_O + U_f = 220 + 0.8 = 220.8V \tag{21}$$

按 20% 的安全裕量，可选用 6A/300V 以上开关管。

③输出二极管和输出电容，升压电路中输出二极管 D 必须承受和输出电压值相等反向电压，并传导负载所需最大电流。二极管峰值电流 $I_{Dc(max)} = I_{LP} = 5.75A$，本电路可选用 6A/300V 以上快恢复二极管，若采用正向压降低肖特基二极管，整个电路效率将得到提高。

输出电容 C 选定取决于对输出纹波电压要求，纹波电压与电容等效串联电阻 ESR 有关，电容容许纹波电流要大于电路中纹波电流，输出纹波噪声取 1%，电容 $ESR < \Delta U_O/\Delta I_L = 220\times 1\%/1.5 = 1.47\Omega$。另外，为满足输出纹波电压相对值要求，滤波电容量应满足：

$$C \geqslant \frac{U_O^2 D}{\Delta U_O I_O f} = \frac{220^2\times 0.5}{4\times 2.5\times 49000} = 0.0494F \tag{22}$$

根据计算出的 ESR 值和容量值选取电容器，由于低温时 ESR 值较大，故应按低温下 ESR 来选择电容，因此，选用 49.4mF/300V 以上频率特性电解电容可满足要求。

4 仿真结果及分析

根据现有的相关资料，设置光伏阵列仿真模型参数及其输出模块如图 6 - 7 所示。

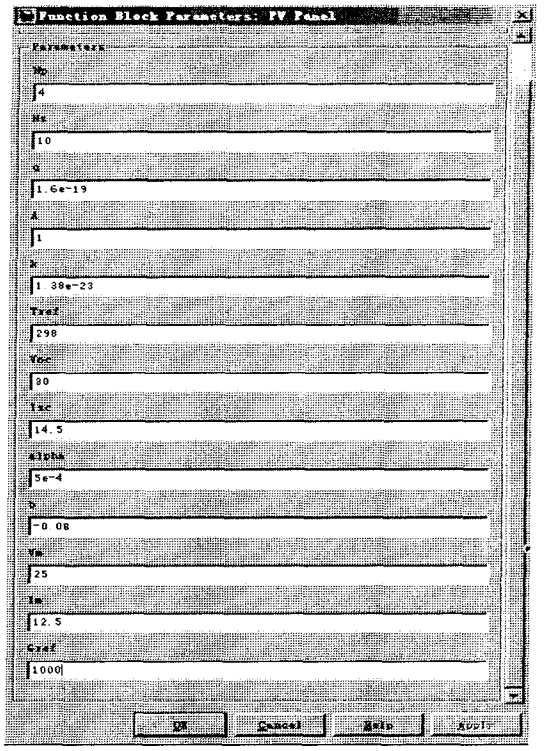


图 6　光伏阵列 MATLAB 仿真模型设置参数界面

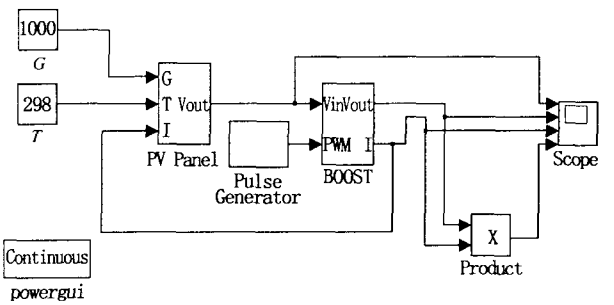


图 7　含 BOOST 电路的光伏阵列仿真输出模块

按要求设置好光伏阵列和 BOOST 参数，运行并观测其输出，输出电压、电流、功率波形如图 8 - 10 所示。由结果看，其输出纹波较小，符合实际电路设计的要求。

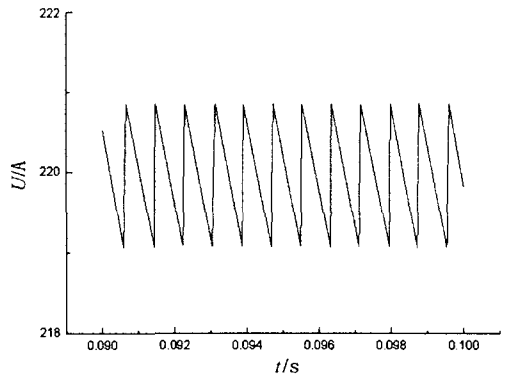


图 8　BOOST 电路输出电压波形

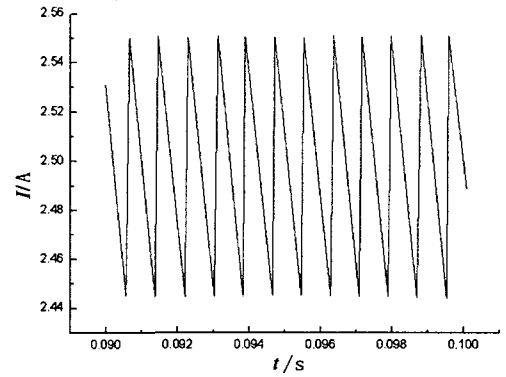


图 9　BOOST 电路输出电流波形

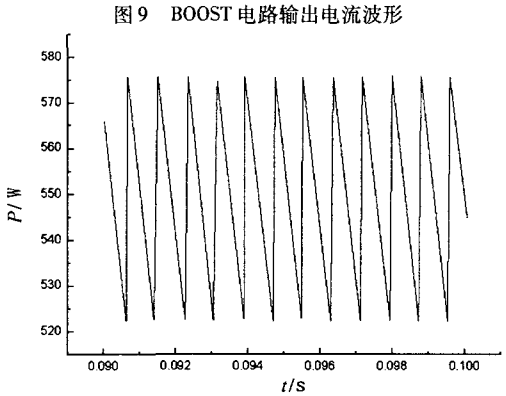


图 10　BOOST 电路输出功率波形

5　结束语

光伏阵列实际上是一个与多参数相关的非线性直流电源，能否准确得出其 I－V 特性是关键。通过分析光伏阵列内部原理及其等效电路，建立其物理数学模型，应用 Simulink 进行仿真实验。仿真结果表明：模型参数的设置方便、仿真速度快。模型的输出与实际输出基本相似，能为光伏发电系统的进一步仿真研究提供了较好的激励源。

参 考 文 献：

[1] 赵争鸣，刘建政，孙晓瑛，等. 太阳能光伏发电及其应用[M]. 北京：科学出版社，2005：109－131.

[2] 茆美琴，余世杰，苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报，2005，17(5)：1248－1251.

[3] Sachin Jain, Vivek Agrwal. A Single-Stage Grid Connected Inverter Topology for Solar PV Systems with Maximum Power Point Tracking [J]. IEEE Power Electronics, 2007, 22(05).

[4] Seulki Kim, Jinhong Jeon, Changhee Cho, et al. Modeling and simulationof a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis[J]. Solar Energy, 2008(10)：1－15.

[5] 吴忠军，刘国海，廖志凌. 硅太阳阵列工程用数学模型参数的优化设计[J]. 电源世界，2007，31(11)：87－900.

[6] NAKANISHI F, IKEGAMI T, EHIHARA K, et al. Modeling and Operation of a 10kW Photovoltaic Power Generator using Equivalent-Electric Circuit Method[C]. IEEEtheTwenty-Eight, 2000：1703－1706.

[7] Nivedita. Dasgupta, Ashish. Pandey, Ashok. K. Voltage-sensing-based photovoltaic MPPT with improved tracking and drift avoidance capabilities[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells. 2008, 92：1552－1558.

[8] Esram. T, Chapman. P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques[J]. IEEE T. Energy Conver, 2007, 22 (2)：439－449.

责任编辑：张禹

（上接第 121 页）

3　结束语

本文分析了 Linux 系统中基于 Netfilter 功能框架的 AODV－UU 路由协议的设计与实现方法，解析了每个功能模块的作用，阐述了在 AODV－UU 实现中的路由体系结构以及对接收和发送数据包的处理过程，必将为 Ad-Hoc 路由协议的实现提供重要的参考价值。

参 考 文 献：

[1] Porting AODV-UU implementation to ns-2 and enabling trace-based simulation[Z]. Uppsala master's thesis in Computer Science, 2002.

[2] Chakeres, I. D. Belding. Royer, E. M. AODV Routing Protocol Implementation Design[C]//24th international Conference on 2004：698－703.

[3] 刘焕敏. Linux 平台 AdHoc 网络按需路由协议实现技术研究：硕士学位论文[D]. 长沙：国防科学技术大学，2005.

[4] 邵薇. AODV 路由协议研究及其在无线测试床平台上的实现与应用[D]. 硕士学位论文：长沙：国防科学技术大学，2007.

[5] DHANDAPAN I. G SUNDARESAN A Netlink Sockets Overview[Z]. University of Kansas, 1999.

责任编辑：么丽萍