

文章编号:1674-2869(2018)02-0214-05

无线传感器网络的光伏供电系统设计

马忠明^{1,2},文小玲^{*1,2},王 栋²,张双华²,李小三²

1. 湖北省视频图像与高清投影工程技术研究中心,湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学电气信息学院,湖北 武汉 430205

摘 要:为了充分利用光伏发电和混合储能技术来解决无线传感器网络系统的供电电源问题,设计了以超级电容器和锂电池为混合储能装置的独立光伏供电系统。首先根据负载情况选择相应规格的超级电容器、锂电池组和光伏电池,同时采用双向DC-DC变换电路作为系统充放电主电路,并对充放电过程采用电压和电流双闭环控制。最后,利用MATLAB/Simulink对所设计的供电系统进行仿真建模与分析,仿真结果表明基于超级电容器和锂电池混合储能的光伏供电系统不仅能为无线传感器网络系统提供稳定的电源,还能有效地保护锂电池、延长其使用寿命。

关键词:无线传感器网络;光伏供电系统;混合储能;双向DC-DC电路

中图分类号:TM615 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1674-2869.2018.02.018

Design of Photovoltaic Power Supply System for Wireless Sensor Networks

MA Zhongming^{1,2}, WEN Xiaoling^{*1,2}, WANG Dong², ZHANG Shuanghua², LI Xiaosan²

1. Hubei Research Center of Video Image and High Definition Projection Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: To make full use of photovoltaic power generation and hybrid energy storage technology to provide power supply in the Wireless Sensor Network (WSN) system, we designed an independent power supply system with the supercapacitor and lithium battery as hybrid energy storage device. First, the supercapacitor, lithium battery and photovoltaic cell of corresponding specifications were selected according to the condition of loading, then, a bi-directional DC-DC converting circuit was utilized as the main charging and discharging circuit of system, and the double closed-loop control of voltage and current was adopted in the charging and discharging process. Finally, the simulation modeling and analysis of the designed power system with the aid of MATLAB/Simulink were conducted. The results showed that the photovoltaic power system based on the hybrid energy storage of supercapacitor and lithium battery not only provided stable power supply for WSN systems, but also effectively protected the lithium battery to extend its service life.

Keywords: wireless sensor network; photovoltaic power supply system; hybrid energy storage; bi-directional DC-DC converting circuit

我国最新的十三五规划中把推动农业现代化列为八大重点工作之一,而无线传感器网络技术在推动我国实现农业现代化的进程中起到不可替

代的作用,但是无线传感器网络系统常需要部署在野外或环境恶劣的偏远地区,由于在这些地区铺装电网供电线路的难度系数大且成本高,因此

收稿日期:2017-11-27

基金项目:武汉工程大学研究生创新基金(CX2017061)

作者简介:马忠明,硕士研究生。E-mail:mzm_mail@qq.com

*通讯作者:文小玲,硕士,教授。E-mail:whwxl_2004@163.com

引文格式:马忠明,文小玲,王栋,等.无线传感器网络的光伏供电系统设计[J].武汉工程大学学报,2018,40(2): 214-218.

能量供应成为制约其生存和推广使用的主要瓶颈。而太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源,且符合当下倡导的“绿色”和“可持续性”的发展理念,故利用光伏发电为无线传感器网络系统提供电能不失为一种很好的选择。

文献^[1-2]为农业信息跟踪、环境信息监测等野外环境下的无线传感器网络节点设计了太阳能供电电源,并利用锂电池作为储能元件。文献^[3]为户外无人值守的物联网传感器节点设计了一种带不接地防雷保护电路的太阳能供电电源,并使用磷酸铁锂电池储能。磷酸铁锂电池在过充、过放、高温的情况下不会起火爆炸和析气膨胀,安全系数高。文献^[4]为大棚无线传感器网络监控系统设计了一种市电与光伏电池发电、锂电池储能的互补供电电源,该系统能根据太阳能与市电的优先级来选择供电方式,增加了系统的鲁棒性。

综合分析上述供电电源的特点,设计了一种以锂电池为主级储能、超级电容器为次级储能的光伏供电系统,利用超级电容器与锂电池在功率密度和能量密度上的互补特性,既能在太阳光时变性较强的环境下更好地存储电能,又能减少锂电池充放电次数、延长其使用寿命。最后,利用MATLAB/Simulink软件平台对设计的供电电源进行了仿真建模与分析。

1 系统设计

以湖北潜江虾稻共作示范区为基地,为实现基地环境监控功能的无线传感器网络系统设计了独立光伏供电电源,供电系统总体架构如图1所示。

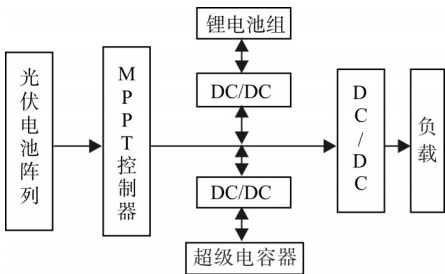


图1 光伏供电系统总体结构框图

Fig. 1 Block diagram of photovoltaic power supply system

该系统主要包括光伏电池阵列、光伏最大功率点跟踪模块(MPPT)、双向DC/DC变换电路、超级电容器、锂电池储能模块。根据负载情况分别对超级电容器和锂电池组混合储能装置、光伏电池阵列、充放电主电路及其控制器进行了相关设计。

1.1 混合储能装置的相关设计

虾稻共作环境监控系统包括传感器与数据采集模块、智能网关、视频与图像采集模块和信息传输模块等,经实验测得该系统的平均负载功率为20 W。可根据式(1)和式(2),设计超级电容器和锂电池组的规格分别为12 V / 10 F、12 V / 400 Ah就能满足本系统的设计要求。

$$C_{Li} = \frac{S \times P_L \times T \times d \times T_t}{H_{DOD} \times U_{Li}} \tag{1}$$

$$C_{sc} = \frac{S \times P_L \times T \times d \times T_t}{0.5 \times H_{DOD} \times U_{sc}^2} \tag{2}$$

其中, C_{Li} 为锂电池的容量, C_{sc} 为超级电容器的容量; S 为安全系数,通常取1.1~1.4之间,本文取1.2; P_L 为负载平均功率20 W; T 为每天工作时间24 h; d 为锂电池和超级电容器的供电天数,为保证物联网系统在连续阴雨天气条件下仍能持续不间断地工作,取锂电池组的供电天数为7 d、超级电容器的供电天数为1 d; T_t 为温度补偿系数,一般在0℃以上取1; H_{DOD} 为放电深度,超级电容器取0.9,锂电池取0.85; U_{sc} 、 U_{Li} 分别为超级电容器、锂电池组的额定工作电压。

1.2 光伏电池阵列串并联数的相关设计

根据无线传感器网络系统负载的电压等级情况知,本系统可选取100 W / 18 V的光伏板组件为光伏电池组的基本组成单元,则光伏电池组无需对光伏板组件进行串联,通过DC-DC变换器升压后就能满足负载电压等级要求。

100 W/18 V 光伏板组件日均发电量 W_{pv} 为:

$$W_{pv} = A \times I_N \times h \tag{3}$$

式(3)中, A 为光伏组件的修正系数,一般取0.9; I_N 为光伏板组件的最大功率电流5.5 A; h 为当地平均峰值日照时间取6 h;则 $W_{pv} = 29.7$ Ah。

供电系统在经历了最长的阴雨周期后,要求超级电容器和锂电池组的能量能得到快速的补充,如给定能量的补充时间为15天,则光伏板组件的并联数 N_p 为:

$$N_p = \frac{W_{Li} + W_{sc} + W_L \times d_{recharge}}{W_{pv} \times d_{recharge}} \tag{4}$$

式(4)中, W_{Li} 和 W_{sc} 分别为锂电池组和超级电容器储存的总能量; W_L 为负载一天消耗的总能量; $d_{recharge}$ 为定能量的补充天数;经计算得 $N_p = 2$,即所设计的光伏电池组阵列由两块标准光伏电池板并联组成。

1.3 主电路设计

根据前面选定的光伏板、超级电容器、锂电池组和负载的电压等级及其参数,本文选择经典双向 DC-DC 变换器作为超级电容器和锂电池组的充放电主电路,其拓扑结构如图 2 所示^[5]。

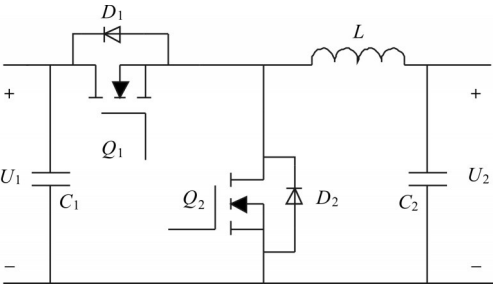


图 2 双向 DC-DC 变换器拓扑图

Fig. 2 Topology of bidirectional DC-DC converter

为保证双向 DC-DC 变换器工作在 Buck 和 Boost 状态时能处于电感电流连续模式(CCM)下,应该按以下公式计算储能电感 L 和电容 C 的值:

$$L_{\text{Buck}} = \frac{U_2(1-D)}{2f_s I_{\text{Omin}}} \tag{5}$$

$$L_{\text{Boost}} = \frac{U_1 D(1-D)^2}{2f_s I_{\text{Omin}}} \tag{6}$$

$$L \geq \max(L_{\text{Buck}}, L_{\text{Boost}}) \tag{7}$$

$$C = \frac{\Delta U(1-D)}{8Lf_s^2 U} \tag{8}$$

其中, L_{Buck} 、 L_{Boost} 分别为 Buck 和 Boost 电路在 CCM 模式下电感的临界值, L 、 C 分别为双向变换器中电感和电容的实际取值, D 、 I_{Omin} 、 U_1 、 U_2 分别为系统的占空比、电感电流最小值、Boost 和 Buck 电路输出端电压。由上述公式可得,当设定负载的电压纹波 $\Delta U/U$ 小于 1%,开关频率 f_s 为 20 kHz 时,电感 L 和电容 C 的值可分别取 0.5 mH 和 500 μF 。

1.4 控制策略及其控制器的设计

1.4.1 锂电池组充电控制 锂电池组采用恒压限流的充电方式^[5-8],其充电控制结构框图如图 3 所示。

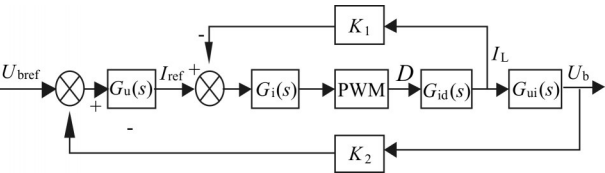


图 3 锂电池组充电控制结构框图

Fig. 3 Block diagram of lithium battery charging control

用状态空间平均法对锂电池组充电过程进行小信号模型分析得:

$$G_{\text{id}}(s) = \frac{SU_{\text{bus}}C_b}{LC_bS^2 + R_bC_bS} \tag{9}$$

$$G_{\text{Ui}}(s) = \frac{R_b(SR_cC_2 + 1)}{SC_2(R_c + R_b) + 1} \tag{10}$$

式(9)~(10)中, U_{bus} 为直流母线电压; C_c 和 R_b 分别为锂电池组的等效电容和电阻; C_2 和 R_c 是滤波电容值及其等效内阻。

对电流和电压选择单零-极点校正网络,则可设计其电流和电压控制器分别为:

$$G_i(s) = \frac{K_i(1 + \frac{S}{\omega_{iz}})}{S(1 + \frac{S}{\omega_{ip}})} = \frac{55.5(1 + 5.7 \times 10^{-3}S)}{S(1 + 8 \times 10^{-5}S)} \tag{11}$$

$$G_u(s) = \frac{K_u(1 + \frac{S}{\omega_{uz}})}{S(1 + \frac{S}{\omega_{up}})} = \frac{55.5(1 + 1.6 \times 10^{-4}S)}{S(1 + 7.86 \times 10^{-4}S)} \tag{12}$$

1.4.2 超级电容器充电控制 超级电容器采用恒流限压的充电方式^[9],并实时监测超级电容器的充电电流和端电压,当超过最大限定值时,停止充电,其恒流充电控制结构框图如图 4 所示。

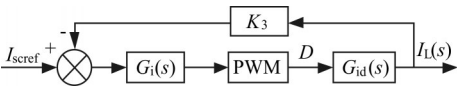


图 4 超级电容器充电控制结构框图

Fig. 4 Block diagram of supercapacitor charging control

用状态空间平均法对超级电容器充电过程进行小信号模型分析得:

$$G_{\text{id}}(s) = \frac{U_{\text{bus}}(R_LC_{\text{SC}}S + 1)}{LR_LC_{\text{SC}}S^2 + (L + R_sR_LC_{\text{SC}})S + R_s + R_L} \tag{13}$$

式(13)中, U_{bus} 为直流母线电压; L 为储能电感值; R_s , R_L 和 C_{SC} 分别为超级电容器充电模型的等效串并联电阻和等效电容值。

对电流采用单零-极点进行补偿设计电流控制器为:

$$G_i(s) = \frac{K_i(1 + \frac{S}{\omega_{iz}})}{S(1 + \frac{S}{\omega_{ip}})} = \frac{2.5(1 + 2.6 \times 10^{-2}S)}{S(1 + 7.9 \times 10^{-5}S)} \tag{14}$$

1.4.3 超级电容器和锂电池组放电控制 超级电容器和锂电池组均采用稳压限流放电方式,当光伏电池输出或负载发生突变时,限制锂电池组的电流输出,使用超级电容器提供大冲击电流^[10],其放电控制结构框图如 5 所示。

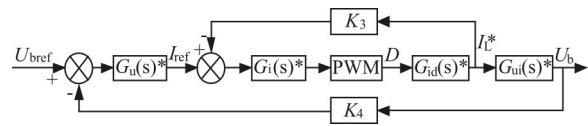


图5 超级电容器和锂电池组放电控制结构框图
Fig. 5 Block diagram of supercapacitor and lithium battery discharge control

$$G_{id}(s)=\frac{U_{bus}}{D^2}\left(\frac{2}{R_L}+SC_1\right) \tag{15}$$
$$\frac{LC_1}{D^2}S^2+\frac{L}{R_LD^2}S+1$$

$$G_{ui}(s)=\frac{R_L}{SR_LC_1+1} \tag{16}$$

对电流选择双零-极点,电压选择单零-极点校正网络,则其电流和电压控制器分别为:

$$G_i(s)^*=\frac{K_i(1+\frac{S}{\omega_{iz1}})(1+\frac{S}{\omega_{iz2}})}{S(1+\frac{S}{\omega_{ip1}})(1+\frac{S}{\omega_{ip2}})}= \tag{17}$$

$$\frac{2.698\times10^{-3}S^2+1.967S+344.8}{2.618\times10^{-7}S^3+8.183\times10^{-3}S^2+S}$$

$$G_u(s)^*=\frac{K_u(1+\frac{S}{\omega_{uz}})}{S(1+\frac{S}{\omega_{up}})}=\frac{627.98(1+1.69\times10^{-2}S)}{S(1+7.86\times10^{-4}S)} \tag{18}$$

2 系统仿真建模及结果分析

通过 MATLAB/Simulink 搭建基于超级电容器和锂电池混合储能的光伏供电系统的仿真模型^[11-15],其中超级电容器选择 12 V / 10 F,0.1 Ω;锂电池组选择 12 V / 20 Ah,1 Ω;开关频率为 20 kHz;根据本系统的工作环境,有如下三种工作模式。

模式一:在光照充足的情况下,光伏电池的输出功率除直接提供给物联网系统使用外,其余的能量将通过超级电容器和锂电池组储存起来。则系统的仿真波形图如图 6 所示,设定仿真时间 5 s,从上至下分别为直流母线电压、超级电容器充电电压和电流、锂电池充电电压和电流波形。

由图 6 可知,超级电容器进行恒流充电,充电电流大小为 4 A,其端电压由设定的初始值 8.5 V 升高至 12 V 后维持稳定,不再上升。锂电池组进行恒压限流充电,其端电压维持恒定,充电电流逐渐减小。期间母线电压一直维持在 24 V 恒定,表明控制器能很好的实现预先设想的结果。

模式二:当光伏电池的光照条件突然变差时,例如太阳光被突然飘过的乌云或其它物体遮住时,光伏电池输出的电能不再满足物联网系统的用电要求。此时,可利用超级电容器功率密度大

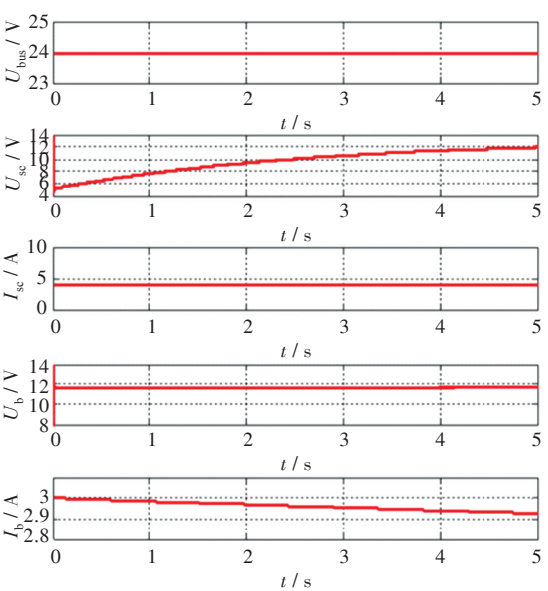


图6 系统工作模式一的仿真波形图
Fig. 6 Simulation waveforms of system operating mode one

的特点,使用超级电容器来维持系统直流母线电压的稳定。系统的仿真波形如图 7 所示,设定仿真时间 5 s,从上至下分别为直流母线电压、超级电容器充电电压和电流、锂电池组充电电压和电流波形。

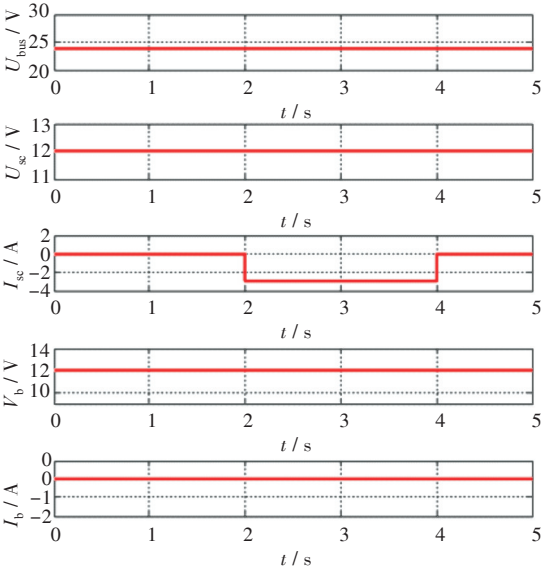


图7 系统工作模式二的仿真波形图
Fig. 7 Simulation waveforms of system operating mode two

由图 7 可知,在 2 s 时光照突然变差,超级电容器立即以稳压限流的方式释放电能,放电电流大小为 3 A,4 s 后光照恢复正常,超级电容器停止放电。期间母线电压和锂电池组的状态维持在稳定状态,表明在光照条件变化极端的情况下,系统仍能维持稳定运行,实现预先设想的结果。

模式三:在夜晚或长时间光照不足的情况下,先由超级电容器释放电能来维持系统直流母线电压的稳定,当超级电容器的电压下降至其放电电压下限值时,超级电容器停止放电,再由锂电池组释放电能来维持系统直流母线电压的稳定。为显示超级电容器释放电能至电压下限值后停止放电的状态,设定超级电容器的电压初始值为 5.5 V。系统的仿真波形图如图 8 所示,从上至下分别为直流母线电压、超级电容器充电电压和电流、锂电池组充电电压和电流波形。

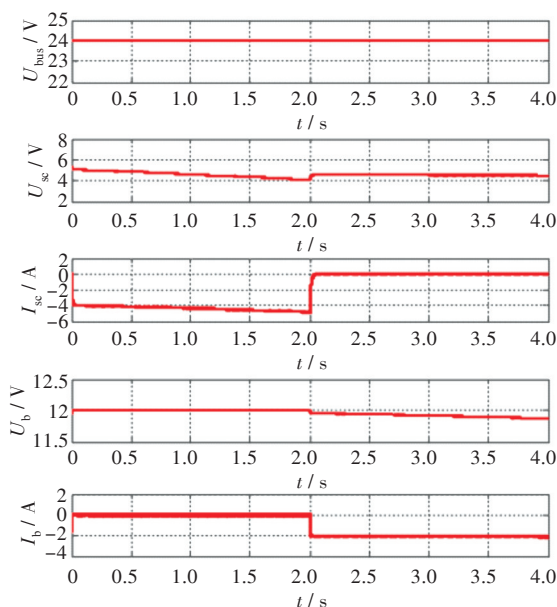


图 8 系统工作模式三的仿真波形图

Fig. 8 Simulation waveforms of system operating mode three

由图 8 可知,超级电容器的端电压由初始值 5.5 V 降低至 4 V 后停止放电,此时锂电池组接着放电,其端电压初始设定值 12 V 逐渐下降。表明控制器能很好的保护超级电容器,避免出现过放现象。

3 结 语

利用超级电容器和锂电池组合作为系统的储能装置,为集环境监控和水质监测为一体的无线传感器网络监控系统设计了一套独立的光伏供电电源,并对其进行了仿真建模与分析,仿真结果表明:

1) 基于超级电容器和锂电池混合储能的光伏供电系统采用基于双向 DC-DC 变换电路的充放电控制器具有较好的动态性能和鲁棒性,能在光照条件突变时快速准确的作出反应,使直流母线电压稳定维持在 24 V 不变,且能避免负载承受大电

流的冲击,从而能为无线传感器网络负载提供持续稳定的电能。

2) 利用超级电容器功率密度高和锂电池的能量密度高的互补特性实现混合储能,可以有效减少锂电池的充放电次数、延长其使用寿命,使得独立电源系统整体的性价比更高。同时用清洁环保的新能源替代了无线传感器网络系统的传统供电电源,可以有效解决在农场中铺装电网线路的问题,使农业物联网系统能被广泛的推广使用。

参考文献:

- [1] 王战备. 基于太阳能的无线传感器网络传感器节点供电系统设计[J]. 渭南师范学院学报, 2013, 28(12): 64-68.
- [2] 王小强, 欧阳骏, 纪爱国. 无线传感器网络节点太阳能供电系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012(3): 56-58.
- [3] 谭成龙, 陈祖爵, 鲍熙, 等. 防雷型无线传感器网络节点太阳能电源系统[J]. 数据通信, 2014(4): 23-25.
- [4] 潘洋, 郑紫薇, 李攀. 无线传感器网络大棚监控的太阳能供电系统的设计[J]. 数据通信, 2016(2): 49-55.
- [5] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
- [6] 王武, 张元敏. 一种基于混合储能的风电功率平抑系统协调控制[J]. 电工电气, 2017(2): 24-26.
- [7] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
- [8] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程报, 2012, 32(7): 1-6.
- [9] 蒋玮, 陈武, 胡仁杰, 等. 光伏发电系统中超级电容器充电策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 43(12): 31-37.
- [10] 孙谊. 碳基超级电容器单体性能相关理论与应用技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [11] 宫娅宁, 苏舒, 林湘宁, 等. 独立光伏发电储能系统能量管理与经济调度研究[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 3-9.
- [12] 王晓兰, 王正花, 张晓英, 等. 离网型混合发电系统的分布式预测控制[J]. 太阳能学报, 2017, 38(9): 2403-2411.
- [13] 刁颖, 陶国彬, 王中钰, 等. 自动跟踪太阳能光伏发电系统设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(12): 93-96.
- [14] 范哲超, 吴永亮. MATLAB 软件在电力电子技术实践中的应用[J]. 价值工程, 2014(28): 239-240.
- [15] 文小琴, 毕淑娥. 基于 MATLAB 的电力电子技术仿真平台设计[J]. 电气电子教学学报, 2014(4): 105-106.

本文编辑: 陈小平