DOI: 10.7667/PSPC151959

基于改进 SSP 抽样技术的发输电系统可靠性评估

黄 超，李孝全，刘 帅

（空军工程大学防空反导学院，陕西 西安 710051）

摘要：针对传统发输电系统可靠性评估方法抽样次数多、耗时长等问题，提出一种基于分层自寻优抽样技术的状态空间分割方法。通过合理划分全状态空间，选用解析法和模拟法对两个子空间分别进行状态选择，并通过分层自寻优抽样方法改进模拟法的抽样技术，优化分配高重故障状态的抽样次数，减小状态空间分割法的抽样方差。使用可靠性测试系统 IEEE-RTS 79 以及修改后的测试系统对所提方法进行验证。仿真算例结果分析表明，该方法不仅适用于不同规模的系统评估，而且提升了传统状态空间分割法的计算效率。

关键词：电力系统；状态空间分割法；分层抽样；蒙特卡洛法；可靠性评估

Transmission system reliability evaluation based on the improvement of state space partition method of sampling technology

HUANG Chao, LI Xiaoquan, LIU Shuai

(Air force Engineering University, College of Air and Missile Defense, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the problem that the reliability evaluation method of traditional transmission system has a high sampling frequency and a big time consuming, this paper proposes an improved state space partitioning based on automatic optimization stratified cluster sampling method. Through reasonable division of the whole state space, the method selects the analytic method and Monte Carlo Sampling to state choice in two subspaces, and through the automatic optimization stratified cluster sampling method, the method improves the optimal allocation of heavy fault space sampling times of simulation method and reduces the sampling variance of state space partitioning. The IEEE reliability test system is used to test the proposed methodology. Simulation results show that the method is not only suitable for different sizes of system evaluation, but also improves the computational efficiency of traditional state space partition method.

Key words: power system; state space partitioning; stratified sampling; Monte Carlo Sampling; reliability evaluation

0 引言

目前电力系统可靠性评估中主要有两种方法[1-4]：解析法(枚举法)[5]和蒙特卡洛模拟法[6-7](Monte Carlo Sampling, MCS)。解析法在元件故障概率较小或者系统负荷水平较低的系统中更加有效，当系统规模增大时其计算量急剧增加；蒙特卡洛模拟法适用于大型电力系统评估，但其计算时间随着指标误差精度的调高而急剧增加，存在着计算时间和计算精度的矛盾问题。当前针对改进 MCS 法抽样技术，减小其方差，提高其收敛速度的方法主要有分层抽样法[8]、重点抽样法[9]、控制变量法[10]等，这些方法一定程度上解决了 MCS 方法计算效率低下的问题，但当电力系统规模发生变化时，这些方法不具有通用性[11]。文献[12]提出了一种将分层抽样法和重点抽样法优势相结合的新方法应用于可靠性评估抽样，这种方法虽然进一步提高了 MCS 方法的抽样效率，但方法过于复杂限制了其广泛的应用，且其无法适用于不同规模的电力系统可靠性评估；文献[13]提出了一种将解析法和蒙特卡模拟法相结合的新方法：状态空间分割法(State Space Partitioning, SSP)，并将其应用于风电场的运行风险评估中，该方法优势在于适用于不同规模的电力系统，且计算效率比传统 MCS 法高，但实质上传统 SSP 法的抽样技术依旧为原始的 MCS 法抽样，因此 SSP 的抽样技术存在着较大的改进提升空间[9]。

为了进一步提高传统 SSP 方法的计算效率，本文通过改进传统 SSP 的抽样技术，在 SSP 方法中的蒙特卡洛模拟法步骤中引入分层自动寻优抽样技术，对应属于 MCS 抽样的子空间 S_M 内的高重故障

进行合理分层抽样，并通过定义“自动寻优函数”降低抽样方差，对各层空间的抽样次数进行不断的优化分配，从而提高整个 SSP 算法的计算效率和收敛速度，通过国际上通用的 IEEE-RTS 79 测试系统和改进后的系统验证了该方法的有效性。

1　状态空间分割法及其缺陷

传统 SSP 方法的基本思想是将系统的全状态空间分割为两个不想交的子空间 S_{F} 和 S_{M}，对其分别采用解析法和模拟法进行状态选择。假设目标在于求可靠性指标的期望

$$E(F)=\sum_{X\in S}F(X)P(X) \tag{1}$$

将可靠性标志函数的期望值用条件概率的形式表示如下：

$$E(F)=\alpha\cdot E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{F}}]+(1-\alpha)\cdot E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{M}}] \tag{2}$$

$$\alpha=\sum_{X\in S_{\mathrm{F}}}P(X) \tag{3}$$

式中，α 为子空间 S_{F} 的上限概率，概率 α 决定了 SSP 的效率， 就可在解析法和 MCS 之间实现灵活的切换。当 $\alpha=0$ 时，SSP 退化为传统的蒙特卡洛模拟法；当 $\alpha=1$ 时，SSP 退化为全状态空间上的解析法[8]。 $E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{F}}]$ 和 $E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{M}}]$ 分别为基于子空间 S_{F} 和 S_{M} 的条件期望：

$$E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{F}}]=\sum_{X\in S_{\mathrm{F}}}F(X)\frac{P(X)}{\alpha} \tag{4}$$

$$E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{M}}]=\sum_{X\in S_{\mathrm{M}}}F(X)\frac{P(X)}{1-\alpha} \tag{5}$$

设 X_i 为随机抽样产生的第 i 个系统状态样本，式(4)可用传统状态枚举法进行计算，设结果为 μ_{F}，式(5)采用传统 MCS 进行估计，设结果为 μ_{M}，则标志函数期望值的估计可写为

$$\mu=\alpha\mu_{\mathrm{F}}+(1-\alpha)\mu_{\mathrm{M}} \tag{6}$$

枚举法可准确计算出式(6)中的 μ_{M}，故式中 $\alpha\mu_{\mathrm{F}}$ 项是个常数。因此估计值 μ 的不确定性是由模拟法即 $(1-\alpha)\mu_{\mathrm{M}}$ 项引起的，故 μ 的方差为

$$V(\mu)=(1-\alpha)^2\cdot V(\mu_{\mathrm{M}}) \tag{7}$$

设 $N_{S_{\mathrm{M}}}$ 为从子空间 S_{M} 抽取的样本数目，其中，$V(\mu_{\mathrm{M}})$ 为估计值 μ_{M} 的方差

$$V(\mu_{\mathrm{M}})=\upsilon_{\mathrm{M}}/N_{S_{\mathrm{M}}} \tag{8}$$

其中，$\hat{\upsilon}_{\mathrm{M}}$ 为子空间 S_{M} 上的条件方差，可由下式估计：

$$\hat{\upsilon}_{\mathrm{M}}=\frac{1}{N_{S_{\mathrm{M}}}-1}\sum_{i=1}^{N_{S_{\mathrm{M}}}}(F(x_i)-\mu_{\mathrm{M}})^2 \tag{9}$$

这样，方差系数 β 可计算如下：

$$\beta=\frac{\sqrt{V(\mu)}}{\mu}=\frac{(1-\alpha)\sqrt{\hat{\upsilon}_{\mathrm{M}}}}{\mu\cdot\sqrt{N_{S_{\mathrm{M}}}}} \tag{10}$$

则计算所需抽样样本数 $N_{S_{\mathrm{M}}}$ 与方差系数 β 的关系可表示为

$$N_{S_{\mathrm{M}}}=\frac{(1-\alpha)^2\hat{\upsilon}_{\mathrm{M}}}{\mu^2\cdot\beta^2} \tag{11}$$

由式(11)可知，在 SSP 中所需抽样样本数 $N_{S_{\mathrm{M}}}$ 与方差系数 β^2 成反比，例如，对电力不足期望值 EDNS 所言，当其数量级为 10^{-3} 时，为达到 10^{-1} 的精度要求，经计算大约需要 10 万次的抽样，抽样次数越多则计算时间就越长，且这么多次抽样过程中存在着对重复系统状态的重复抽样，可见传统 SSP 依然存在着抽样次数过多，计算效率低下的问题，为解决此缺陷，在传统 SSP 中的 MCS 抽样阶段引入分层自寻优抽样技术解决 SSP 方法效率低下的问题。

2　应用分层自寻优抽样技术的状态空间分割法

向量 $X=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$ 代表一个系统状态，x_i 为第 i 个元件的状态；$P(X)$ 为系统状态概率；$F(X)$ 为可靠性指标函数；代表了对系统状态的分析结果，可以计算不同的可靠性指标。设对应于子空间 S_{M} 的状态集合为 Ω，则在集合 Ω 中，电力系统可靠度指标的期望值可表示为

$$E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{M}}]=\sum_{\Omega}F(X)P(X) \tag{12}$$

以下利用 $E_{S_{\mathrm{M}}}$ 代替 $E[F(X)\,|\,X\in S_{\mathrm{M}}]$，因为集合 Ω 中的系统故障状态的故障重数不同，将式(12)分解为

$$E_{S_{\mathrm{M}}}=\sum_{k=1}^{N}F(X_{\Omega_k})P(X_{\Omega_k}) \tag{13}$$

对式(13)引入重要抽样技术，式(13)变为

$$E_{S_{\mathrm{M}}}=\sum_{k=1}^{N}\frac{F(X_{\Omega_k})P(X_{\Omega_k})}{P^*(X_{\Omega_k})}P^*(X_{\Omega_k})=\sum_{k=1}^{N}\frac{F^*(X_{\Omega_k})}{P^*(X_{\Omega_k})}P^*(X_{\Omega_k}) \tag{14}$$

式中：$F^*(X_{\Omega_k})=F(X_{\Omega_k})P(X_{\Omega_k})$，$F^*(X_{\Omega_k})$ 为对应于 $P^*(X_{\Omega_k})$ 的新的标志函数，即满足概率分布 $P^*(X_{\Omega_k})$ 的系统故障后果。因为某故障状态的概率为该重故障状态总数的倒数，故设定

$$P^*(X_{\Omega_k})=1/N_k \tag{15}$$

其中，N_k 为 k 重故障状态的总数量，系统的可靠性指标可表示为

$$E_{S_M}=\sum_{k=1}^{N}E\left[F(X_{\Omega_k})P(X_{\Omega_k})N_k\right]=\sum_{k=1}^{N}E_k \tag{16}$$

由式(15)和式(16)，采用 MCS 计算得到的可靠性指标的一个无偏估计量为

$$\hat{E}_{S_M}=\sum_{k=1}^{N}\frac{N_k}{n_k}\sum_{i=1}^{n_k}F(X_{\Omega_{ki}})P(X_{\Omega_{ki}})=\sum_{k=1}^{N}\hat{E}_k \tag{17}$$

其中，n_k 为 k 重故障状态子空间的抽样次数。随机状态 $X_{\Omega_{ki}}(i=1,2,\cdots,n_k)$ 相互独立且分布相同，得 E_{S_M} 的估计量方差为

$$V[\hat{E}_{S_M}]=\sum_{k=1}^{N}\frac{N_k^{\,2}}{n_k}V[F^*(X_{\Omega_k})] \tag{18}$$

式中，$V[\cdot]$ 为方差算子。

由式(18)可得，$V[\hat{E}_{S_M}]$ 的无偏估计量为

$$\hat{V}[\hat{E}_{S_M}]=\sum_{k=1}^{N}\frac{N_k^{\,2}}{n_k(n_k-1)}\cdot \left\{\sum_{i=1}^{n_k}[F^*(X_{\Omega_{ki}})]^2-\frac{1}{n_k}[\sum_{i=1}^{n_k}F^*(X_{\Omega_{ki}})]^2\right\} \tag{19}$$

采用分层自动寻优抽样法需要解决的最关键问题是：如何合理分配子空间 S_M 内各重故障状态的抽样次数 n_k 来减小方差，提高抽样效率。本文采用“自寻优”方式，对 S_M 空间内各重故障状态的抽样次数进行优化分配，并随着抽样不断进行，不断更新可靠性指标估计值，从而减小抽样方差，节省大量的抽样时间，提高收敛速度。设总抽样次数为 n，优化分配各重故障状态的抽样次数的目标函数为

$$\begin{cases}\min\{V[\hat{E}_{S_M}]=\sum_{k=1}^{N}\frac{N_k^{\,2}}{n_k}V[F^*(X_{\Omega_k})]\\ \text{s.t.}\sum_{k=1}^{N}n_k=n\end{cases} \tag{20}$$

用拉格朗日算子求解式(20)可得

$$n_k=n\frac{N_k\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_k})]}}{\sum_{t=1}^{N}N_t\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_t})]}} \tag{21}$$

由于方差 V 未知，故式(21)可化为

$$\frac{N_1\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_1})]}}{n_1}=\frac{N_2\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_2})]}}{n_2}=\cdots=\frac{N_N\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_N})]}}{n_N}=\frac{\sum_{t=1}^{N}N_t\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_t})]}}{n} \tag{22}$$

其中，$V[F^*(X_{\Omega_t})]$ 可由式(23)计算。

$$V[F^*(X_{\Omega_t})]=\frac{1}{n_k-1}\{\sum_{i=1}^{n_k}[F^*(X_{\Omega_{ki}})]^2-\frac{1}{n_k}[\sum_{i=1}^{n_k}F^*(X_{\Omega_{ki}})]^2\} \tag{23}$$

在电力系统运行过程中，不同重数的故障状态(不同规模的故障)对系统的影响程度不同[11]，故障重数高的系统故障状态对系统影响更大，但是因为属于概率低的稀有事件，所以被抽样出来的概率也相对较低，故分配抽样次数的原则是故障重数越大的系统状态分得的抽样次数越多。由定义和式(23)可知，$V[F^*(X_{\Omega_t})]$ 只可抽样得出，通过对全系统状态进行预抽样，可得到 $V[F^*(X_{\Omega_t})]$ 的近似估计值，设预抽样次数为 n_0，选用指数函数表示 k 重故障状态对系统的影响 $r(k)=C^k$，C 的取值可大于 1。在预抽样中，k 重故障状态预抽样次数为

$$n_k=\frac{n_0C^kN_k}{\sum_{t=1}^{N}C^tN_t} \tag{24}$$

定义自动寻优函数 $A_S(k)$：

$$A_S(k)=\frac{N_k\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_k})]}}{n_k} \tag{25}$$

将与抽样得到的 $\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_k})]}$ 的初值代入 $A_S(k)$，比较 $A_S(k)$，选取 $A_S(k)$ 值最大的 k 重故障状态抽样，然后更新 $\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_k})]}$ 的估计值，进而更新该重故障状态的自动寻优函数 $A_S(k)$，根据更新后的 $A_S(k)$ 决定下次抽样的 k 重故障状态，结果逐渐逼近式(22)。此算法可实现对故障重数较多的系统状态进行更多的抽样，在不断优化更新的过程中，可不断对 $\sqrt{V[F^*(X_{\Omega_k})]}$ 的估值进行修正，减小方差，调高抽样精确度。

3 算法流程

应用分层自寻优抽样技术的状态空间分割法的发输电系统可靠性评估分两步进行，步骤如下：

1) 采用快速排序法[13]对系统内所有的状态按状态概率降序进行排序，当所有排序的状态故障概率累计概率之和达到子空间 S_F 的上限概率 α 的值时停止排序，这些应用快速排序法所选择出来的系统状态的集合构成了解析法的子空间 S_F，应用解析法分析这些子空间 S_F 内的系统状态。

2) 子空间 S_F 内的系统状态绝大部分是正常状态，1 重故障状态，剩余未考虑进来的系统状态为 2 重及其以上故障状态，构成了 MCS 评估的子空间 S_M，应用分层自寻优抽样技术对蒙特卡洛法的抽样方法进行改进，应用新的抽样方法对子空间 S_M 内的状态进行分析评估。

算法流程中还需要重点注意以下两个问题：

1) 子空间 S_F 的上限概率参数 α 决定了解析法和 MCS 的混合度水平，最优上限概率 α 的值取决于待评估的系统的规模、可靠性水平等自身特性，通过调整上限概率 α 的值使状态空间分割法应用于不同规模的电力系统可靠性评估，对可靠性较高的电力系统，应采用较大的 α；对于规模较大的电力系统，应采用较小的 α。

2) 在本方法第二个阶段的分层自寻优更新过程中要注意不断判断指标精度 β 是否满足要求和抽样次数是否大于总设定次数，如果满足，输出计算指标精度和可靠性指标数据，抽样结束。

根据本文给出的方法，并注意以上两个问题，具体算法流程如图 1 所示。

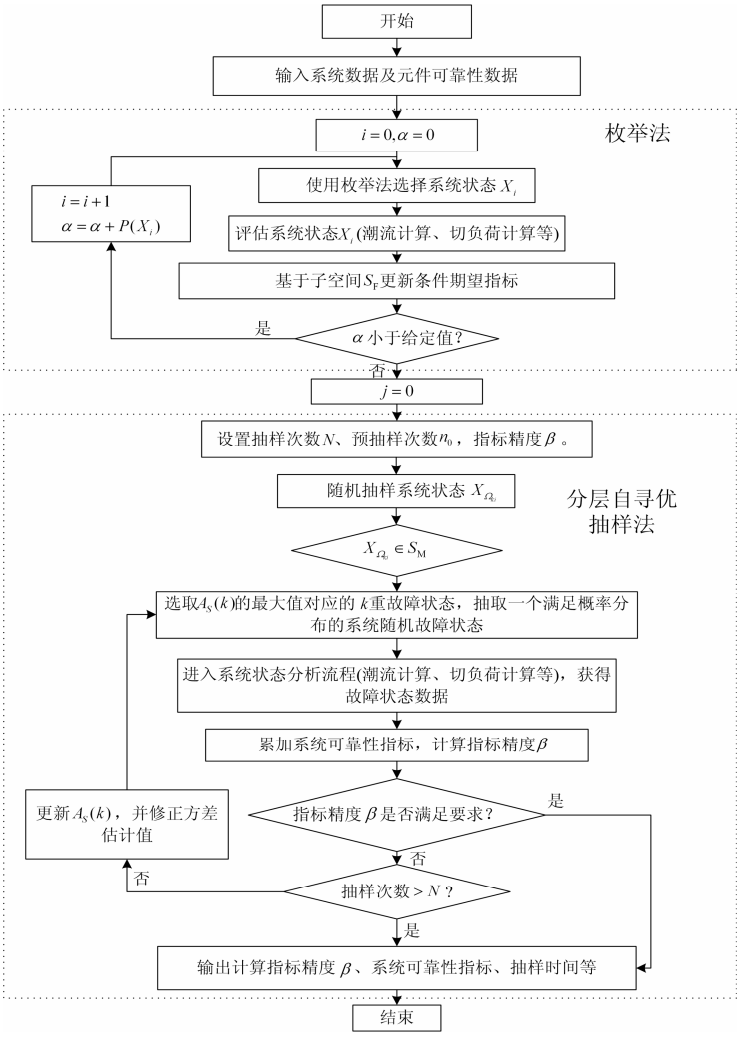

图 1 改进后的状态空间分割法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved SSP method

4 算例分析

应用传统 MCS[14](方法 A)、传统 SSP[13](方法 B)和本文方法(方法 C)对 IEEE-RTS 79 系统的发输电部分[15]和改进后的 IEEE-RTS 79 系统的发输电部分进行可靠性评估的仿真测试，计算的可靠性评估指标为电力不足期望值 E_{EDNS}、失负荷概率 λ_{LOLP}。收敛条件为设定方差系数 β_{EDNS}。仿真环境为 Intel Core i3-3240 3.40 GHz 处理器，内存 4 g，仿真软件为 Matlab7.1。

对比分析表 1 中的数据可知，相同计算精度要求下(即相同的方差系数)，3 种方法所需的抽样次数

和时间各不同，SSP 较传统的 MCS 抽样次数和时间都显著减少，本文方法改进自 SSP，较之抽样次数和时间又有大幅度缩短，以方差系数 0.01 标准进行比较，本文方法效率最高，抽样次数较方法 A 的减少了 85%，较方法 B 减少了 48%，所需抽样时间较方法 A 减少了 77%，较方法 B 减少了 61%。

表 1 方差系数相同下三种方法抽样结果比较

Table 1 Sampling results comparison of the three methods under the same variance coefficient

β_{EDNS}	方法	E_{EDNS}/MW	λ_{LOLP}	抽样次数	耗时/s
0.1	A	21.043	0.134 1	2 247	127.524
	B	19.457	0.128 7	1 203	99.457
	C	18.574	0.122 4	657	84.024
0.075	A	20.754	0.118 7	3 751	192.458
	B	19.024	0.125 7	1 742	149.250
	C	18.172	0.119 9	1 054	122.578
0.05	A	18.661	0.127 4	9 012	430.587
	B	18.523	0.114 7	3 952	341.025
	C	17.952	0.110 9	2 204	210.247
0.025	A	18.754	0.107 4	26 945	1 578.514
	B	18.249	0.127 4	14 213	992.540
	C	18.221	0.116 5	7 420	784.254
0.01	A	19.024	0.116 4	194 251	8 602.478
	B	18.745	0.124 1	54 870	3 178.214
	C	18.971	0.117 8	28 460	1 979.321

为了验证本文方法适用于不同规模的系统，在高可靠性系统中具有更高的收敛速度和计算效率，将 IEEE-RTS 79 系统进行改进，在其原始系统的元件乘以大于 1 的规模系数，适当扩大其系统规模，并将其机组故障率降低为原来的一半，提高其整体可靠性，再利用上述 3 种方法进行可靠性评估，结果如表 2 所示。

表 2 修改后测试系统中三种方法抽样结果比较

Table 2 Sampling results comparison of the three methods in the modified system

β_{EDNS}	方法	E_{EDNS} / MW	λ_{LOLP}	抽样次数	耗时/s
0.1	A	2.908 7	0.012 7	25 431	584.214
	B	2.894 5	0.014 0	6 210	284.254
	C	2.876 5	0.012 8	2 370	181.245
0.075	A	2.747 5	0.011 7	56 357	852.361
	B	2.802 7	0.011 2	11 031	362.714
	C	2.783 1	0.012 9	3 427	298.514
0.05	A	2.812 0	0.012 3	140 154	1 798.325
	B	2.804 5	0.012 7	19 065	1 351.254
	C	2.796 2	0.012 0	7 421	647.251

比较分析表 2 数据，计算得到的指标 E_{EDNS} 和 λ_{LOLP} 与表 1 数据结果相比，都有不同程度的减小，这是因为系统整体规模较大且可靠性水平较高的原因。在方差系数为 0.05 情况下，本文方法抽样次数较方法 A 减少了 94.7%，抽样次数较方法 B 减少了 61.7%，抽样时间较方法 A 减少了 64%，较方法 B 减少了 52%。在改进的 IEEE-RTS 79 测试系统的仿真结果中，三种方法的抽样次数与方差系数的变化关系如图 2 所示，在方差系数 β_{EDNS} 为 0.5~0.25 时，本文所提出的方法较传统 SSP 方法效率提升不明显，但是当随着抽样次数的增多，本文方法收敛速度相比 SSP 方法有了明显的提高。总体来看，本文所提出的方法较原始 MCS 方法和传统 SSP 方法收敛速度有了很大的提升。

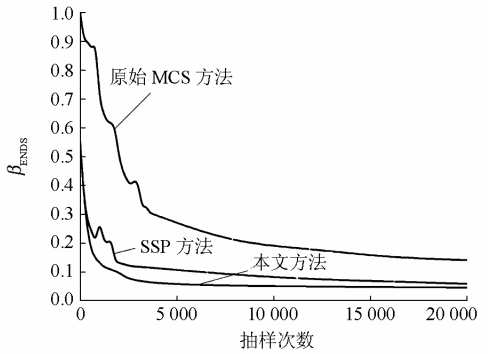

图 2 在改进系统中三种方法的抽样次数与方差系数的变化关系

Fig. 2 Change curve of three methods sampling frequency and the coefficient in improving the system

在高可靠性系统测试中本文方法计算效率优势更加明显，因为高可靠性系统中可能发生的高重故障状态更多，低重故障状态更少，而本文方法不仅可以避免对低重故障的重复抽样，而且可以优化分配高重故障状态的抽样次数，因此本文方法不受系统可靠性变化的影响，抽样效率较其他两种方法更高。

5 结论

本文通过改进传统 SSP 方法的抽样技术，提出了一种基于分层自寻优抽样的 SSP 方法，并将其应用于发输电系统可靠性评估中。该方法具有以下两个优势：

1) 本方法继承了传统 SSP 方法的优势：对重数不同的故障状态进行合理分类，并选用两种特点不同的方法(解析法和 MCS)对其进行抽样评估，避免了 MCS 方法对低重故障抽样的时间浪费。

2) 通过在状态空间分割法第二个阶段蒙特卡洛模拟法中添加分层自寻优抽样技术，利用自动寻优函数合理优化分配各阶高重故障状态的抽样次数，避免大量重复的抽样，减少抽样次数，提高了整个算法的抽样效率和收敛速度。

参考文献

[1] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

[2] 蒋程, 刘文霞, 张建华, 等. 含风电接入的发输电系统风险评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 261-270.
JIANG Cheng, LIU Wenxia, ZHANG Jianhua, et al. Risk assessment of generation and transmission systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 261-270.

[3] 白浩, 苗世洪, 钱甜甜, 等. 联合发电系统用于含电动汽车的配网可靠性评估研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 127-137.
BAI Hao, MIAO Shihong, QIAN Tiantian, et al. Reliability assessment based on combined power generation system for distribution system with electric vehicle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 127-137.

[4] 赵洪山, 赵航宇. 考虑元件故障率变化的配电网可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 56-62.
ZHAO Hongshan, ZHAO Hangyu. Distribution system reliability analysis considering the elements failure rate changes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 56-62.

[5] 周静, 边海峰, 贾晨, 等. 基于分区的含 DG 配电网实时无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 117-124.
ZHOU Jing, BIAN Haifeng, JIA Chen, et al. Real-time reactive power optimization in distribution network with DG based on partitions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 117-124.

[6] 葛少云, 张鑫, 刘洪, 等. 基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 91-100.
GE Shaoyun, ZHANG Xin, LIU Hong, et al. Active distribution network probabilistic reliability evaluation based on point estimation method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 91-100.

[7] 别朝红, 李更丰, 谢海鹏. 计及负荷与储能装置协调优化的微网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 64-73.
BIE Zhaohong, LI Gengfeng, XIE Haipeng. Reliability evaluation of microgrids considering coordinative optimization of loads and storage devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 64-73.

[8] 王晓滨, 郭瑞鹏, 曹一家, 等. 用于系统可靠性评估的各阶故障独立重要抽样算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 24-31.
WANG Xiaobin, GUO Ruipeng, CAO Yijia, et al. Algorithm evaluating power systems reliability with separate importance sampling to each state subspace of different contingencies order[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 24-31.

[9] 王斌, 赵渊, 刘威. 基于分裂最优乘子重要抽样的电网可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 30-34.
WANG Bin, ZHAO Yuan, LIU Wei. Power system reliability assessment using importance sampling method with splitting optimal multiplier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 30-34.

[10] 杜江, 郭瑞鹏, 李传栋, 等. 电力系统可靠性评估中的重要控制法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 69-74.
DU Jiang, GUO Ruipeng, LI Chuandong, et al. An importance-control method for power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(5): 69-74.

[11] 宋晓通, 谭震宇. 基于自适应算法的电力系统可靠性评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(增刊 1): 1040-1044.
SONG Xiaotong, TAN Zhenyu. Power system reliability evaluation based on an adaptive algorithm[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47(S1): 1040-1044.

[12] 王晓滨, 郭瑞鹏, 曹一家, 等. 电力系统可靠性评估的自适应分层重要抽样法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(3): 33-38.
WANG Xiaobin, GUO Ruipeng, CAO Yijia, et al. A self-adapting stratified and important sampling method for power system reliability evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(3): 33-38.

[13] 何剑, 孙华东, 刘明松. 基于扩展状态空间分割法的含风电场电力系统运行备用风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 257-263.
HE Jian, SUN Huadong, LIU Mingsong. Extended state-space partitioning based operating reserve risk assessment for power grid connected with wind farms[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 257-263.

[14] 王景辰, 李孝全, 杨洋, 等. 基于交叉熵的蒙特卡洛法在发电系统充裕度评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 75-79.
WANG Jingchen, LI Xiaoquan, YANG Yang, et al. Application of Monte Carlo simulation based on cross-entropy methods in generating system adequacy evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 75-79.

[15] Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

收稿日期：2015-11-08；　修回日期：2015-12-29

作者简介：

黄　超(1991-)，男，硕士研究生，主要从事电力系统可靠性评估研究；E-mail: 379068078@qq.com

李孝全(1968-)，男，副教授，硕士生导师，主要从事电力系统可靠性、健康管理与故障诊断研究；E-mail: LXQ542@126.com

刘　帅(1990-)，男，硕士研究生，从事电力系统可靠性研究。E-mail: 316044603@ qq.com

（编辑　魏小丽）