基于蒙特卡洛分析的数据中心可用性计算方法研究

可用性是数据中心用户关注的核心指标，目前可用性计算主要有实际观测法、解析法及蒙特卡洛分析法。前两种方法在工程实际应用中存在较大的局限性，影响了行业对数据中心设计可用性的量化分析和应用。对几种可用性计算方法进行了分析比较，推荐一种新的基于蒙特卡洛分析的可用性仿真计算方法。该方法通过建立分析对象的仿真模型实现可用性自动计算、单点故障分析以及短板分析，进而可以对不同解决方案的设计可用性量化比较。该方法具备简单、高效和易于实现等优点，是一种非常适合工程实际应用的数据中心可用性计算方法。

詹贤庆／中国电信杭州分公司

詹贤庆／高级工程师

关键词／Keywords
数据中心·
可用性·
蒙特卡洛·
方框图法·
状态空间法·

0 引言

数据中心可用性是指数据中心系统可以正常使用的时间与总时间之比。可用性是数据中心用户关注的核心指标。根据2013年Ponemon Institute对美国67个典型数据中心样本近两年运行状况的调研，意外宕机每分钟平均总成本为7 908美元。

可用性指标是客户比较数据中心解决方案性价比的重要参考依据。提高可用性的措施贯穿于规划、建设、试运行以及运营等各个阶段。规划和设计阶段提出的可用性指标，即可用性的设计值，是可用性的优化目标。对可用性指标进行量化分析是优化数据中心可用性的前提。可用性量化分析方法主要有基于实际运营经验的观测法、基于可靠性理论的解析法。解析法又可以分为可靠性框图法（RBD）和状态空间法（Markov）。上述方法在工程实际应用中都存在较大局限性，导致数据中心在确定解决方案架构时，除了成本可以量化，设计可用性很难量化，不同解决方案性价比的比较不够充分，制约了行业发展进步，迫切需要一种工程实用的可用性计算方法。

观测法是通过观测记录数据中心运行的实际数据，获得可用性数据的方法。Uptime Institute发布了基于Tier等级的数据中心可用性参数。该参数是基于对16个数据中心5年运行时间观测得到的。观测法的优点是，数据准确，可靠。缺点是耗时较长，属于事后分析，分析结果对数据中心的早期设计、建设以及后期维护没有直接帮助。

基于方框图法[1]（RBD法）的系统可用性模型由子系统组成，这些子系统以串联或并联或以两者组合的形式来组织。串联和并联混合系统的模型如图1所示。

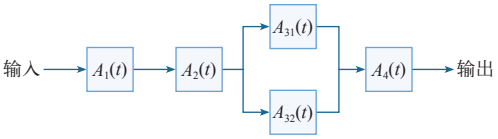

图1 串并联混合系统示意图

图1中，$A_n(t)$（$n=1,2,3,\cdots$）是各个环节的可用性，该混合系统的可用性$A_s(t)$为

$$A_s(t)=A_1(t)A_2(t)\{1-[1-A_{31}(t)]\times[1-A_{32}(t)]\}A_4(t) \quad (1)$$

方框图法计算可用性的准确度取决于功能模块的逻辑功能建模准确性，准确地建立复杂系统的方框图模型很困难。工程实际应用中通过串并联关系计

算出复杂系统的可用性也很难实现。因此，方框图法适用于逻辑简单的系统。

状态空间法[2-3]（Markov法）是通过建立系统的状态空间转换图，找出系统可能处于的所有运行状态，根据系统中各个元件的故障率和修复率数据，利用Markov过程建立概率微分方程组，求解系统处于各个状态的概率。再将系统处于正常运行状态的概率相加，就得到系统的可用性。状态空间法既可以求系统稳态可用性，也可以求系统暂态可用性、系统故障率和修复率等指标。状态空间法的优点是可以通过公式计算出系统处于任意状态的瞬时概率，且计算结果准确，可以将部件切换失败的概率考虑到状态空间转换图中；缺点是需要列出系统所有状态。对于复杂系统，由于系统的运行状态非常多，很难全部列举出来，因此工程实际应用中也有较大的局限性。

蒙特卡洛仿真法（Monte Carlo Simulation）应用于可用性计算时，根据每个单元组件的故障率（1/MTBF）和修复率（1/MTTR）及二者的统计分布特性，建立系统数学模型。仿真过程中，随机产生0～1之间的随机数表示当前组件发生故障及修复的概率。根据概率数据，按照统计特性计算出组件故障时间和修复时间，根据可用性计算公式算出系统可用性。仿真计算机理如下。

1）首先确定仿真对象的参数和设置仿真时间，参数设置包括MTBF和MTTR及服从的概率分布，MTBF和MTTR可从业界权威文献获取，电子元器件的MTBF和MTTR一般服从指数分布规律（$\lambda=1/\text{MTBF}$或$\lambda=1/\text{MTTR}$），对应的概率密度函数$f(t)$和分布函数$F(t)$计算公式如式（2）和式（3）所示。仿真时间设置要保证仿真总时间t_{set}远大于系统中最可靠元件的MTBF。

$$f(t)=\lambda e^{-\lambda t} \tag{2}$$

$$F(t)=\int_0^t f(t)dt=1-e^{-\lambda t} \tag{3}$$

2）确定MTBF和MTTR分布函数$F(t)$的对应数值，可通过计算机自动产生0～1之间的随机数实现。

3）将分布函数$F(t)$对应的随机数和λ代入式（4），可以求解出对应的故障时间t_{MTBF_i}和修复t_{MTTR_i}（$i=1,2,3,\cdots$）。

$$t=G[F(t)]=\frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right) \tag{4}$$

4）计算累计持续的系统仿真时间$t_i=t_{i-1}+t_{MTBF_i}+t_{MTTR_i}$，其中$t_{i-1}$为上次的计算值。

重复步骤2）～4），当第$i+1$次的持续时间t_{i+1}大于仿真设置时间t_{set}时，仿真停止，可以计算出系统故障次数为i次，系统可用性为

$$A=\frac{t_{MTBF_i}}{t_{MTBF_i}+t_{MTTR_i}} \tag{5}$$

上述过程可通过编程或软件仿真的方式实现，使用蒙特卡洛法计算系统可用性不需要列举出系统的各个状态，是一种具备较好工程实用性的可用性计算方法。

1 基于蒙特卡洛分析的可用性仿真计算方法

蒙特卡洛法既可以采用编程实现，也可以使用相关软件[4]实现。如澳大利亚Powertechnic公司开发的Analyst Enterprise 软件，可用于供配电系统和暖通空调系统的可用性仿真。软件中每个组件都定义了可靠性参数（MTBF，MTTR），以及相应的设备参数。该仿真软件可以体现柴油发电机起动时间、电池备电时间、柴油发电机或电池起动成功率等参数对可用性的影响。该软件还具有单点故障分析以及短板分析功能，该方法已经用于某些数据中心供电方案的研究。

蒙特卡洛可用性仿真涉及到系统建模、仿真参数设置以及系统控制逻辑编程等几个关键环节。建模完成后，可以进行系统可用性分析计算、系统的单点故障分析以及系统短板分析。

1.1 系统建模

系统中提供了常见供电系统和空调系统的基本组件模型，如电网、柴油发电机、自动转换开关（ATS）和阀门等组件，也包含一些现有的系统模型，如不间断电源系统（UPS）、直流供电系统以及冷却塔等。建模时将模型拖入到绘图区域，根据电气工程单线图绘制规则，完成各元件的布

局和连接。以并联冗余（$N+1$）UPS配置系统为例，其系统模型如图2所示。与常用的电路仿真系统Saber、Pspice类似，符合工程习惯。

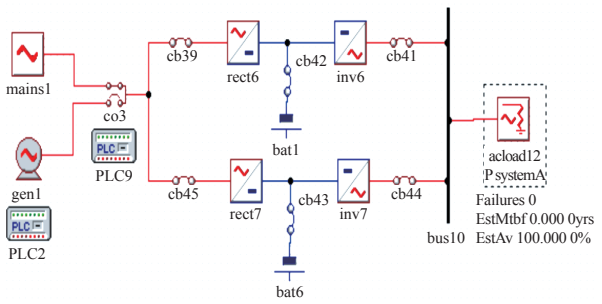

图2　并联冗余（$N+1$）UPS配置系统蒙特卡洛仿真分析系统模型

完成系统连接之后，需将“System”元件加入，将可用性的分析对象框入到“System”中。

1.2　仿真参数设置、准确度及收敛性分析

蒙特卡洛仿真的收敛性、准确度和效率与仿真参数的设置密切相关。仿真参数的设置主要包括基本参数、电气参数、可靠性参数以及仿真时间。基本参数如设备的三相、单相及效率等。电气参数如额定电压、电流及功率等。可靠性参数如设备的MTBF、MTTR及故障告警方式等，可靠性参数是可用性分析的关键参数，可参考业界权威文献获取，如IEEE。

仿真时间设置包括仿真轮数（Num Runs）和每轮仿真的小时数（Hrs Per Run）两项设置，其中Num Runs代表仿真运行几轮，Hrs Per Run代表每轮仿真运行的小时数。系统仿真的总时间＝(Num Runs)×(Hrs Per Run)，要保证一个实际的系统仿真是收敛的，必须保证仿真中的Hrs Per Run大于系统中可靠性最高元器件的MTBF，这样才能保证蒙特卡洛算法的收敛性。

图3是并联冗余供配电系统将Hrs Per Run分别设置为10^5、10^6、10^7以及10^8，Num Runs设置为1时的可用性仿真结果。横坐标表示第几次仿真，纵坐标用百分数表示可用性仿真结果。由于并联冗余（$N+1$）UPS配置系统中蓄电池的MTBF是14万h，因此当Hrs Per Run为10^5Hrs的时候，几次重复运行的仿真结果出现很大的波动，最高达到

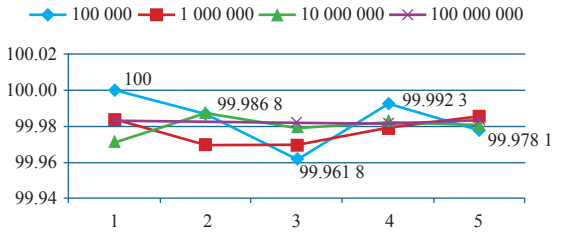

图3　并联冗余（$N+1$）UPS配置系统不同Hrs Pre Run设置的仿真结果比较

100%，最低达到99.961 8%。图3表明，随着Hrs Per Run的增加，仿真结果逐渐趋于稳定，当达到10^8的时候，已经非常稳定了。

仿真时间如果远大于最可靠元器件的MTBF，仿真更容易收敛、仿真准确度更高，但仿真的时间会大大加长，对于简单的系统没有太大问题，但是对于复杂的系统，就不能设置得过长，以免导致仿真效率低下，因此需要在准确度和效率之间进行平衡。

当Num Runs大于1的时候，最终的结果是各轮仿真次数的平均值。

1.3　系统控制逻辑

蒙特卡洛算法分析可用性时是根据系统中组件的控制逻辑、MTBF和MTTR参数及其分布规律模拟系统中各个组件故障，然后确定组件故障是否会导致分析对象故障，最终统计出分析对象的可用性。因此，蒙特卡洛分析和系统的控制逻辑密切相关，如果系统控制逻辑不正确，那么蒙特卡洛分析的结果就会出现很大的误差。

系统控制逻辑功能主要通过可编程序逻辑控制器（PLC）元件实现。其设置包括“触发条件”和“执行动作”，当设备满足触发条件时即执行相应逻辑动作。

以图4中的并联冗余（$N+1$）UPS配置系统为例，当电网掉电时，柴油发电机延时190 s起动；当电网恢复供电时，柴油发电机关闭。通过上面的逻辑编程可以控制柴油发电机的起停，同样，可以通过PLC编程实现整个系统的各个部分的逻辑切换。

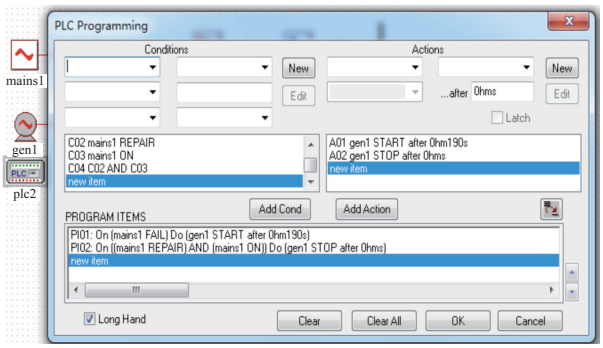

图4 并联冗余（$N+1$）UPS配置系统柴油发电机起停逻辑控制界面

1.4 可用性仿真结果分析

完成系统建模和仿真参数设置后，可以对系统进行仿真分析，仿真可以实现系统的可用性分析、单点故障分析以及短板分析。

蒙特卡洛算法根据组件的MTBF、MTTR参数，模拟各个组件的故障和修复。以图5中的并联冗余（$N+1$）UPS配置系统为例，研究负载供电的可用性。电网故障时，在柴油发电机起动供电前，由电池逆变供电，柴油发电机起动后，柴油发电机供电。

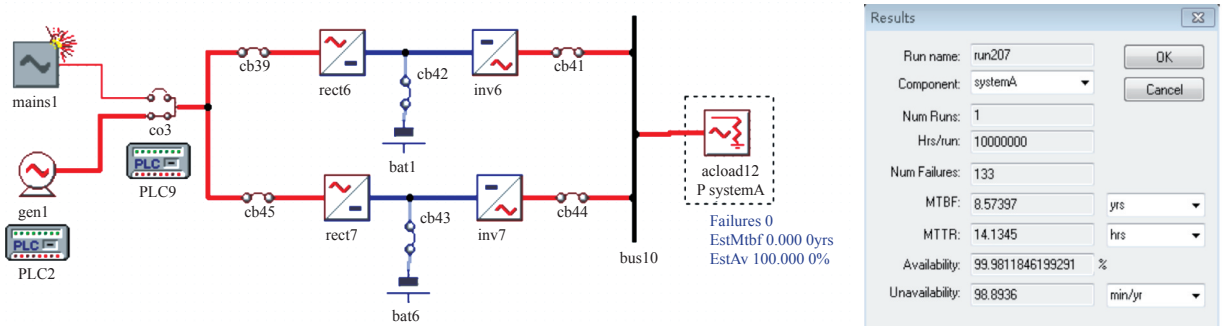

图5 并联冗余（$N+1$）UPS配置系统可用性仿真

算法根据设置的仿真时间进行蒙特卡洛分析，最终给出分析结果，系统可用性是99.981 2%。

系统中的单点故障通常是提高可用性的瓶颈，特别是针对复杂的系统，通过蒙特卡洛分析可以快速找到系统的单点故障点，对提高系统可用性会有很大帮助。进行单点故障分析时，逐个器件进行“Fail”和“Repair”操作，如果是单点故障点，那么就会直接导致系统输出掉电。

如图6所示，当配电柜或ATS（co3）故障的时候，系统就会宕机，通过该功能可以快速找到系统的单点故障点，如果更换更可靠的ATS或配电柜，系统的可用性会明显提高。

实际数据中心供配电系统的设计可能存在短板，这些短板往往会导致系统可用性降低，如何找到系统的可用性短板，以往只能依靠设计人员的经验。蒙特卡洛仿真算法提供了系统短板分析

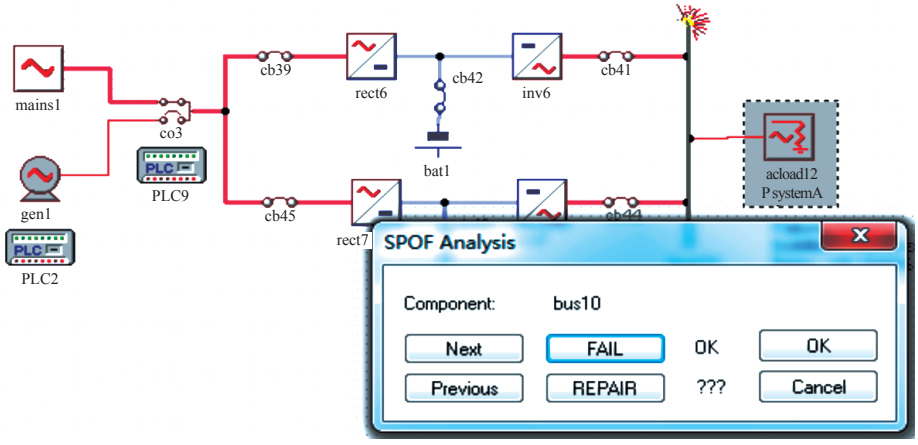

图6 并联冗余（$N+1$）UPS配置系统单点故障分析

功能，可以统计出系统故障次数中哪些故障是出现频次最多的，即是系统的短板。

以图7中的并联冗余（$N+1$）UPS配置系统为例，系统的总故障数为118次，其中有87次是ATS（co3）故障，导致电池1和电池6放电亏进而最终导致系统负载掉电。短板2是13次配电柜（bus10）故障导致系统掉电，与前面的单点故障点分析结果一致。ATS和输出配电柜都是系统的单点故障点。因此，如果要提高系统的可用性，要从解决系统短板入手。可以采用可用性更高的ATS，或延长电池的备电时间，如果将备电时间由原来的7 min提高到30 min，可用性可从原来的99.981 7%，提高到99.988 6%。系统短板1的故障几率从87次降低为84次。

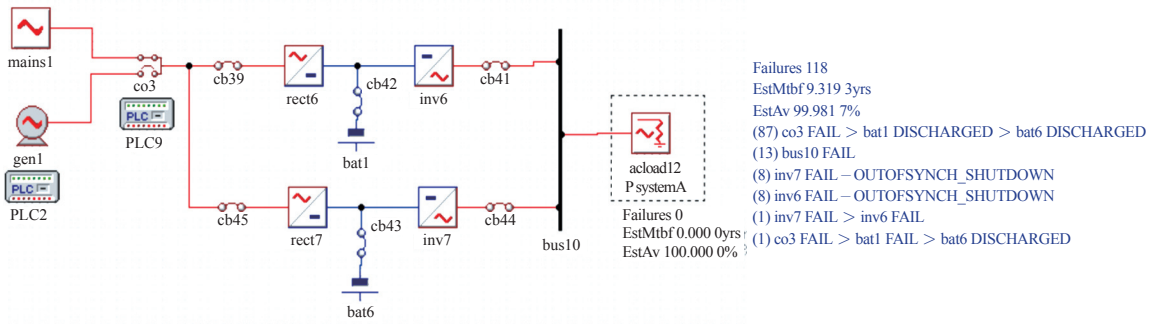

图7 并联冗余（$N+1$）UPS配置系统短板分析

2 蒙特卡洛分析法与其他可用性计算方法的应用比较

为了进一步比较几种可用性计算方法的优势，本文以图8所示的常用的三种数据中心供配电系统为例，对方框图法、状态空间法以及蒙特卡洛仿真法计算可用性的过程和结果进行比较[10-11]。

单模块UPS配置的方框图可用性计算模型如图9所示。

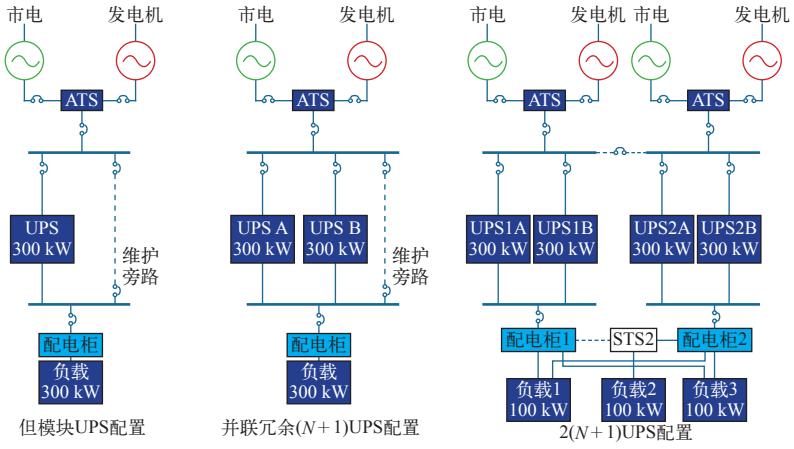

图8 三种常用数据中心供配电系统结构图

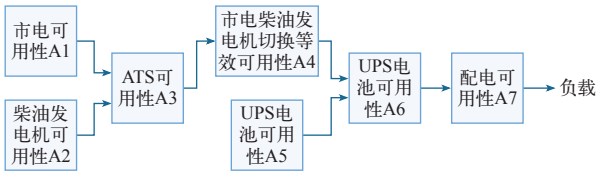

图9 单模块UPS配置系统方框图

其系统可用性解析表达式为

$$A=[1-(1-A_{1.4})(1-A_5)]A_6A_7 \quad (7)$$

其中$A_{1.4}$为

$$A_{1.4}=[1-(1-A_1)(1-A_2)]A_3A_4 \quad (8)$$

A_n代表各个组件的可用性，将各部件的可用性参数A_n代入解析式，即可求出系统的可用性。方框

图法只考虑组件间的串并联关系，没有考虑其他因素，如柴油发电机、电池起动成功率等因素，计算过程简洁，但误差较大。图8中的三种供配电系统的方框图法计算结果如表1所示。

单模块UPS配置的Markov可靠性模型如图10所示。系统的可能状态有10种（市电正常供电、市电掉电电池供电、柴油发电机供电和ATS故障电池供电等），其中系统可用的状态有5种，不可用的状态也有5种。状态之间的转移由设备的故障率、修复率、切换成功率以及转换时间决定。例如由市电正常供电转移到市电掉电电池供电的概率为：市电故障率×(1－电池起动失败率)。得到状态转移图后，根据相应的计算矩阵可以得出系统可用度。

对于简单的系统，状态空间法的状态及切换已经比较复杂，当系统结构进一步复杂时，状态大幅增加，逻辑切换复杂，计算难度大大增加。蒙特卡洛仿真法的系统建模和模型都较简单，单模块UPS配置系统的蒙特卡洛仿真模型如图11所示。

表1　蒙特卡洛仿真法、方框图法及状态空间法可用性计算结果对比

系统配置	方块图法（RBD）	状态空间法（Markov）	仿真法（Monte Carlo）
配置1：单模块UPS配置	0.999 85（3个9）	0.999 2（3个9）	0.999 139（3个9）
配置2：并联冗余（$N+1$）UPS配置	0.999 89（3个9）	0.999 3（3个9）	0.999 891（3个9）
配置3：2（$N+1$）UPS配置	0.999 999 987（7个9）	0.999 999 7（6个9）	0.999 990 13（5个9）

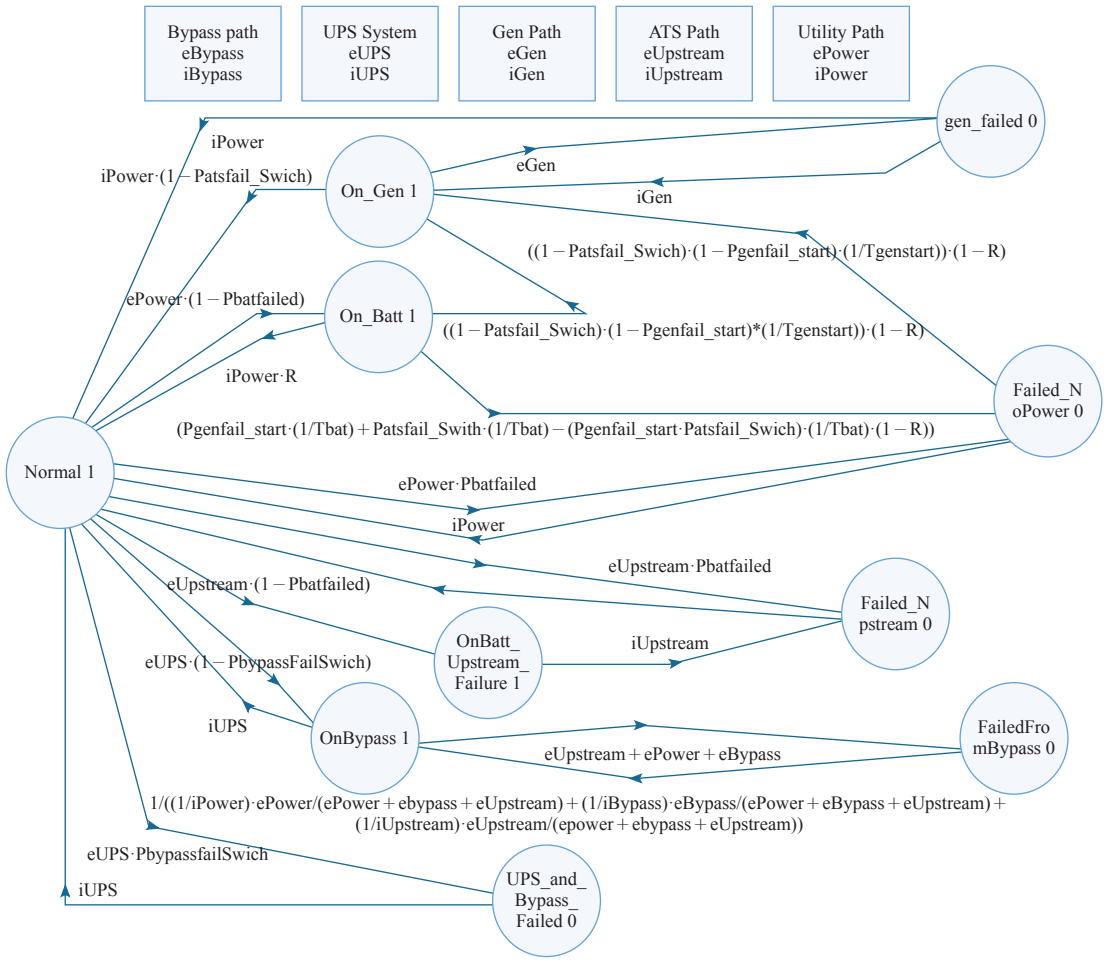

图10　单模块UPS配置系统的Markov可靠性模型

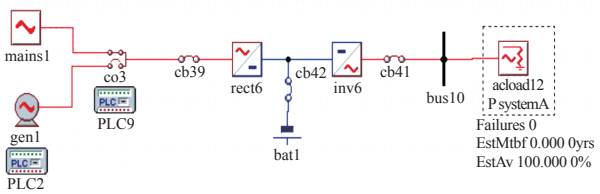

图11　单模块UPS配置系统的蒙特卡洛仿真模型

分析表1发现，方框图法考虑的因素较少，计算准确度偏低，状态空间法考虑的因素较多，计算结果更接近真实值，蒙特卡洛仿真法考虑因素全面、更接近实际应用环境，计算过程简洁，计算结果更接近真实值。

表2从其他几个维度对蒙特卡洛仿真法、方框图法以及状态空间法进行了综合比较。

蒙特卡洛仿真法具备明显的优势，是一种较好的可用性工程计算方法。

表2　蒙特卡洛仿真法、方框图法及状态空间法的综合比较

比较项 / 计算方法	适应系统	计算过程复杂程度	计算准确度	其他分析功能
方块图法（RBD）	简单	根据模型复杂程度确定	较低	无
状态空间法（Markov）	简单	根据模型复杂程度确定	较高	无
仿真法（Monte Carlo）	不限	简单	较高	单点故障分析、短板分析

3　结束语

数据中心可用性是一个非常关键的指标。本文对现有数据中心可用性计算方法进行了分析和比较，得出如下结论：

1）方框图法适合对简单的系统进行可用性计算，系统较复杂时，方框图法表示的系统逻辑关系较复杂，工程实用性较差，准确度较低。

2）状态空间法考虑因素更全面，计算准确度较高，但计算过程也比较复杂，工程实用性较差。

3）蒙特卡洛仿真法是一种较好的计算方法，该方法不需要进行复杂的状态划分和状态转移判定，只需要建立仿真模型即可，不仅能够计算可用性，还能够针对系统的短板进行分析，是一种非常适合工程应用的可用性分析计算方法，该方法对于数据中心的可用性量化设计有重要意义。

参考文献

[1] 钟景华，曹播，丁麒钢，等．新一代绿色数据中心的规划与设计 [M]．北京：电子工业出版社，2010．

[2] Billinton R，Wang P．Teaching distribution system reliability evaluation using monte carlo simulation [J]．IEEE Transactions on Power Systems，1999，14 (2)：397-403．

[3] Fraser A M．Hidden Markov models and dynamical systems [M]．SIAM，2008：1-5．

[4] Wisudawan A，Hadiwidodo Y S，Rosyid D M．Development of Scilab-based structural reliability analysis software using Monte Carlo simulated finite element method [C]．IEEE International Conference on Technology，Informatics，Management，Engineering，and Environment (TIME-E)，2013：165-170．

（收稿日期：2017－08－16）EA

欢迎订阅　欢迎投稿　欢迎刊登广告