(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国 际 局

(43) 国际公布日
2019 年 7 月 11 日 (11.07.2019)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2019/134258 A1

(51) 国际专利分类号:
H02J 3/00 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2018/079377

(22) 国际申请日: 2018 年 3 月 17 日 (17.03.2018)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201810008453.7 2018年1月4日 (04.01.2018) CN

(71) 申请人: 浙江大学 (ZHEJIANG UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(72) 发明人: 丁一 (DING, Yi); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。 林雨 (LIN, Yu); 中国浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号, Zhejiang 310058 (CN)。

(74) 代理人: 杭州求是专利事务所有限公司 (HANGZHOU QIUSHI PATENT OFFICE CO., LTD.); 中国浙江省杭州市西湖区玉古路147号黄鸿年科技综合大楼215室 / 林超, Zhejiang 310013 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,

(54) **Title:** RELIABILITY APPROXIMATION CALCULATION METHOD FOR LARGE-SCALE MULTI-STATE SYSTEM HAVING CASCADING STRUCTURE

(54) 发明名称: 一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法

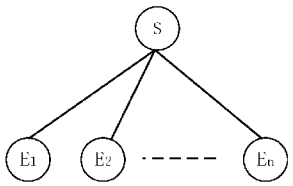


图 1

(57) **Abstract:** Disclosed is a reliability approximation calculation method for a large-scale multi-state system having a cascading structure. In a multi-state system having a cascading structure, connection structures between any parent node and all child nodes pertaining to the given parent node are divided into four types, and then different techniques are used for processing the four types. The four types are used to sequentially calculate state probability distributions of parent nodes at each layer of a complete tree structure starting from leaf nodes at the ends of the structure and moving upwards one by one, so as to finally obtain, according to the parent nodes, the state probability distribution of the entire multi-state system having a cascading structure, thereby obtaining the reliability of the multi-state system having a cascading structure. The present invention achieves reliability approximation calculation for a large-scale multi-state system having a cascading structure, and realizes a balance between calculation accuracy and computational efficiency. Computational complexity is upgraded from exponential complexity of an original exact calculation to binomial complexity, such that calculation speed is greatly improved.

(57) 摘要: 本发明公开了一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法。针对多状态串并联系统, 将任一父节点与其下属的所有子节点之间的连接结构分为四类, 然后针对四类采用不同方式进行处理, 通过上述四种分类对完整树结构从末端的叶节点开始向上递进对各个层次的父节点的状态概率分布依次进行计算, 最终能获得整个多状态串并联系统的根端父节点的状态概率分布, 从而获得多状态串并联系统的可靠性。本发明实现了大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算, 实现了计算精度和计算效率的平衡, 将计算复杂度从原先精确计算的指数式复杂度提升到二次项式, 大大提高了计算速度。

WO 2019/134258 A1

[见续页]

NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法

技术领域

本发明涉及多状态串并联系统的可靠性评估，特别是一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法。

背景技术

多状态系统作为二元状态系统的推广，能够更加细致地描述实际工程中的复杂系统。而串并联结构是一种最常见的系统结构，广泛地应用于电力系统、传输系统等领域；同时，基于串并联系统的装机问题、备用设计问题等都是时下热门的研究方向。因此，多状态串并联系统的可靠性评估在实际工程中有着重要的作用。

而随着工业水平的发展，工程系统的规模逐步扩大。在大规模多状态串并联系统中，系统的元件与状态数量都非常庞大。比如，随着新能源的快速发展，越来越多的风力发电机连接到电网中，而一个风机的可靠性就需要数十个、上百个状态来精细地刻画。因此，大规模多状态串并联系统对可靠性的计算效率提出了极高的要求。

传统的多状态串并联系统的评估方法，比如 UGF 方法、迭代法(recursive method)、蒙特卡洛模拟法等，在计算大规模系统时都因为计算效率而受局限。由于精确计算系统可靠性往往需要指数式的计算复杂度，这种计算负担对大规模系统是无法承受的。所以寻找一种既计算高效、有结果准确的大规模多状态串并联系统可靠性评估的近似计算方法就成为了当务之急。

发明内容

本发明的目的是克服当前大规模系统可靠性评估方法的不足，提出了一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，采用连续离散近似方式来快速高效地近似计算大规模多状态串并联系统的可靠性，并且提供一个相对准确、误差可接受的近似结果。

本发明的大规模是指串并联系统中的系统元件达到百个及以上元件规模的串并联系统。当元件达到或者超过这个量级时，传统的系统可靠性精确评估法计算耗时将十分巨大、而且计算效率低下。

本发明的目的是通过以下步骤的技术方案实现的：

针对已转换为用树结构表示的多状态串并联系统，然后将任一父节点与其下属的所有子节点之间的连接结构分为四类，第一类为仅由多个元件作为子节

点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第二类为由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第三类为仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，第四类为由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统；

若父节点的下属连接方式为串联，则父节点下属的子节点的下属连接方式不可能为串联，是由于下属连接方式为串联的子节点下属的元件全部都可等价地视为下属连接方式为串联的父节点下属的元件；同理，若父节点的下属连接方式为并联，则父节点下属的子节点的下属连接方式不可能为并联，是由于下属连接方式为并联的子节点下属的元件全部都可等价地视为下属连接方式为并联的父节点下属的元件。

针对四类采用不同方式进行处理：

A）针对如图 2 所示的仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值（continuation value）并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；

B）针对如图 4 所示的由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值（continuation value）并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用 C）或者 D）方式进行相同处理获得；

B）具体实施是将每个下属连接方式均为串联的节点均看做一个元件，再采用 A）方式进行相同处理获得父节点的状态概率分布。

C）针对如图 1 所示的仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，采用 UGF 方法计算获得父节点的状态概率分布；

D）针对如图 3 所示的由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，首先对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化判断和处理，元件节点的状态概率分布都是离散的不需要进行离散化处理，使得父节点下属的所有子节点均为离散化状态，然后用 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A)或者 B)方式进行相同处理获得；

D）具体实施是将每个下属连接方式均为并联的节点均看做一个元件，再采用 C）方式进行相同处理获得父节点的状态概率分布。

由于用树结构表示的多状态串并联系统均可细分为上述四种分类情况的组

合，因此通过上述四种分类对完整树结构从末端的叶节点开始向上递进对各个层次的父节点的状态概率分布依次进行计算，最终能获得整个多状态串并联系统的根端父节点的状态概率分布，从而获得多状态串并联系统的可靠性。

本发明中，任意的多状态串并联系统转化为一棵树结构，而这棵树结构的串联或并联层具有图 3 或者图 4 所示的结构，即：任意具有并联下属连接方式的父节点P只有具有串联下属连接方式的子节点S和代表元件的子节点E；反之，任意具有串联下属连接方式的父节点S只有具有并联下属连接方式的子节点S和代表元件的子节点E。系统结构树表示法，可以简单明了地体现串并联系统的结构信息，并将串并联系统分割成不同层次的串联子系统和并联子系统。

本发明方法实施前已将将多状态串并联系统转换为用树结构表示，分为不同层次的串联子系统和并联子系统。

所述的树结构中，树结构末端的每个叶节点记录有一个元件的状态概率分布信息，一个叶节点对应一个元件，并且树结构末端均为叶节点，父子节点中的父节点记录父节点与下属的所有子节点之间的下属连接方式。

元件代表的叶节点和所有其他节点均具有多种状态，各个状态具有各自的概率。初始情况下，元件的状态概率分布是已知的，元件的叶节点以外的其他节点的状态概率分布均是未知，需要通过本发明方法进行计算获得。不同的元件或者节点的状态种类和数量可以不同，而导致了各个节点的状态概率分布的可以不同。

父节点与其下属的所有子节点之间的连接方式仅有一种，为串联或者并联。如图 2 中，若父节点为P，则表示父节点与其所有子节点以并联方式连接；如图 1 中，若父节点为S，则表示父节点与其所有子节点以串联的方式连接。

所述的元件是指多状态系统中的工作元件，例如：发电系统中的火力发电机、风力发电机、光伏太阳能板等；传输系统中的传输带、管道、输电线等；机械系统中的各类器件等。

所述 A）针对仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点（即该父节点具有并联下属连接方式）而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q=\prod_{i=1}^{n}|E_i|$$

其中，Q 表示连续化值，$|E_i|$表示各个元件所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q<Q_0$，则认为当前计算复杂度较小，采用通用生成函数法（UGF，Universal

Generating Function）方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q \geq Q_0$则认为当前计算复杂度较高，采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

所述 A）针对仅由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点（即该父节点具有并联下属连接方式）而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q = \prod_{i=1}^{n} |E_i| \times \prod_{j=1}^{m} |S_j|$$

其中，$|E_i|$表示第 i 个元件节点所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；$|S_j|$表示第 j 个下属连接方式均为串联的节点所具有的状态数量（若节点下还有其他子节点，将所有状态数量取并集，重叠出现相同的状态合并为一个状态来计算），j 表示下属连接方式均为串联的节点的序数，m 表示下属连接方式均为串联的节点的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q < Q_0$，则认为当前计算复杂度较小，采用通用生成函数法（UGF，Universal Generating Function）方法方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q \geq Q_0$则认为当前计算复杂度较高，采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

本发明中，认为所有元件均满足条件：各个元件之间是独立的；元件的状态概率分布是离散的；元件的状态限定在一个有限范围内，则所有各独立元件的并联后组成的子系统的状态概率分布趋近于高斯分布。

所述采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布，具体为：

采用以下公式计算获得父节点的期望值和方差值，并由父节点的期望值和方差值构成父节点的高斯分布，并作为父节点的状态概率分布：

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \bar{w}_i \ , \ \sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} s_i^2$$

其中，μ表示父节点的期望值，$\bar{w}_i$表示父节点下属的第 i 个子节点的状态概率加权平均值，σ^2表示父节点的方差值，s_i^2表示父节点下属的第 i 个子节点的方差值，i 表示父节点下属的子节点的序数，n 表示父节点下属的子节点的总数。

状态概率加权平均值$\bar{w}_i$是由子节点下所有状态与各自的状态概率值相乘后再相加取平均的值，方差值s_i^2是由子节点所有状态与各自的状态概率值计算获得的方差。

所述 D）中，对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化

判断和处理，具体为：

首先，进行判断：

如果子节点的状态概率分布是离散的，则不进行离散化处理；

如果子节点的状态概率分布是不离散的，则子节点的状态概率分布一定为高斯分布，因此采用以下方式进行离散化处理：

然后，将位于$[\alpha-3\cdot\beta,\alpha+3\cdot\beta]$区间段内的子节点的状态概率分布等分成$D$个子区间段，$\alpha$表示子节点状态概率分布中的期望值，$\beta$表示子节点状态概率分布中的标准差，取相邻子区间段之间的端点和两侧子区间段的外端点所在的状态为离散状态，获得$D+1$个离散状态，再采用以下公式进行概率归一化得到最终状态概率分布：

$$w_k = \max\left(\alpha-3\cdot\beta,0\right)+k\times 6\beta / \mathrm{D}$$

$$p_k = \frac{f\left(w_k\right)}{\sum_{l=0}^{D} f\left(w_l\right)}, \mathrm{k}\in\left\{0,1,...,\mathrm{D}\right\}$$

其中，$f(\cdot)$为子节点的高斯分布的概率分布函数，w_k和p_k分别为概率归一化后的第k个离散状态以及离散状态的概率。

所述B）中，每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用C）或者D)方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为串联的节点（如图1所示）的状态概率分布采用C）方法进行处理获得，下属有元件和多个下属连接方式均为并联的子节点且自身下属连接方式为串联的节点（如图3所示）的状态概率分布采用D）方法进行处理获得。

所述 D）中，每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A）或者B）方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为并联的节点（如图 2 所示）的状态概率分布采用 A）方法进行处理获得，下属包含有元件和多个下属连接方式均为串联的子节点且自身下属连接方式为并联的节点（如图3所示）的状态概率分布采用B）方法进行处理获得。

本发明的有益效果：

本发明以大规模多状态串并联系统为分析对象，提出连续离散近似法来近似计算系统的可靠性。

本发明通过预先设定的连续化阈值和离散化值调整计算过程，以实现计算精度和计算效率的平衡。并且本发明将计算复杂度从原先精确计算的指数式复杂度提升到二次项式，大大提高了计算速度。

因此，本发明具有计算效率高、结果误差小、计算灵活强、适用范围广的

特点。本发明为大规模电力系统可靠性分析的快速计算提供了一条行之有效的技术途径。

附图说明

附图 1 为本发明多状态串并联系统典型结构之一的示意图。

附图 2 为本发明多状态串并联系统典型结构之二的示意图。

附图 3 为本发明多状态串并联系统典型结构之三的示意图。

附图 4 为本发明多状态串并联系统典型结构之四的示意图。

附图 5 为本发明实施例的多状态串并联系统结构的示意图。

附图 6 为实施例以$D=11$的连续离散方法得到的可靠性分布函数与其精确分布的对比图。

附图 7 为实施例以$D=30$时连续离散方法得到的可靠性分布函数图。

具体实施方式

本发明以下结合实施例及其附图作进一步说明如下。

本发明具体实施中，针对已转换为用树结构表示的多状态串并联系统，然后将任一父节点与其下属的所有子节点之间的连接结构分为四类，第一类为仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第二类为由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第三类为仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，第四类为由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统；

若父节点的下属连接方式为串联，则父节点下属的子节点的下属连接方式不可能为串联，是由于下属连接方式为串联的子节点下属的元件全部都可等价地视为下属连接方式为串联的父节点下属的元件；同理，若父节点的下属连接方式为并联，则父节点下属的子节点的下属连接方式不可能为并联，是由于下属连接方式为并联的子节点下属的元件全部都可等价地视为下属连接方式为并联的父节点下属的元件。

本发明中，任意的多状态串并联系统转化为一棵树结构，而这棵树结构的串联或并联层具有图 3 或者图 4 所示的结构，即：任意具有并联下属连接方式的父节点P只有具有串联下属连接方式的子节点S和代表元件的子节点E；反之，任意具有串联下属连接方式的父节点S只有具有并联下属连接方式的子节点S和代表元件的子节点E。系统结构树表示法，可以简单明了地体现串并联系统的结构信息，并将串并联系统分割成不同层次的串联子系统和并联子系统。

针对四类采用不同方式进行处理：

A）针对如图 2 所示的仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值（continuation value）并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；

所述 A）针对仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点（即该父节点具有并联下属连接方式）而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q=\prod_{i=1}^{n}|E_i|$$

其中，Q 表示连续化值，$|E_i|$表示各个元件所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q<Q_0$，则认为当前计算复杂度较小，采用通用生成函数法（UGF，Universal Generating Function）方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q\geq Q_0$则认为当前计算复杂度较高，采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

所述 A）针对仅由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点（即该父节点具有并联下属连接方式）而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q=\prod_{i=1}^{n}|E_i|\times\prod_{j=1}^{m}|S_j|$$

其中，$|E_i|$表示第 i 个元件节点所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；$|S_j|$表示第 j 个下属连接方式均为串联的节点所具有的状态数量（若节点下还有其他子节点，将所有状态数量取并集，重叠出现相同的状态合并为一个状态来计算），j 表示下属连接方式均为串联的节点的序数，m 表示下属连接方式均为串联的节点的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q<Q_0$，则认为当前计算复杂度较小，采用通用生成函数法（UGF，Universal Generating Function）方法方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q\geq Q_0$则认为当前计算复杂度较高，采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

所述采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布，具体为：

采用以下公式计算获得父节点的期望值和方差值，并由父节点的期望值和方差值构成父节点的高斯分布，并作为父节点的状态概率分布：

$$\mu = \sum_{i=1}^{n} \overline{w}_i \ , \ \sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} s_i^2$$

其中，μ 表示父节点的期望值，$\overline{w}_i$ 表示父节点下属的第 i 个子节点的状态概率加权平均值，σ^2 表示父节点的方差值，s_i^2 表示父节点下属的第 i 个子节点的方差值，i 表示父节点下属的子节点的序数，n 表示父节点下属的子节点的总数。

状态概率加权平均值 $\overline{w}_i$ 是由子节点下所有状态与各自的状态概率值相乘后再相加取平均的值，方差值 s_i^2 是由子节点所有状态与各自的状态概率值计算获得的方差。

B）针对如图 4 所示的由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值（continuation value）并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用 C）或者 D）方式进行相同处理获得；

B）具体实施是将每个下属连接方式均为串联的节点均看做一个元件，再采用 A）方式进行相同处理获得父节点的状态概率分布。

每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用 C）或者 D)方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为串联的节点（如图 1 所示）的状态概率分布采用 C）方法进行处理获得，下属有元件和多个下属连接方式均为并联的子节点且自身下属连接方式为串联的节点（如图 3 所示）的状态概率分布采用 D）方法进行处理获得。

C）针对如图 1 所示的仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，采用 UGF 方法计算获得父节点的状态概率分布；

D）针对如图 3 所示的由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，首先对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化判断和处理，元件节点的状态概率分布都是离散的不需要进行离散化处理，使得父节点下属的所有子节点均为离散化状态，然后用 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A)或者 B)方式进行相同处理获得；

D）具体实施是将每个下属连接方式均为并联的节点均看做一个元件，再采用 C）方式进行相同处理获得父节点的状态概率分布。

对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化判断和处理，具体为：

首先，进行判断：

如果子节点的状态概率分布是离散的，则不进行离散化处理；

如果子节点的状态概率分布是不离散的，则子节点的状态概率分布一定为高斯分布，因此采用以下方式进行离散化处理：

然后，将位于$[\alpha-3\cdot\beta,\alpha+3\cdot\beta]$区间段内的子节点的状态概率分布等分成$D$个子区间段，$\alpha$表示子节点状态概率分布中的期望值，$\beta$表示子节点状态概率分布中的标准差，取相邻子区间段之间的端点和两侧子区间段的外端点所在的状态为离散状态，获得$D+1$个离散状态，再采用以下公式进行概率归一化得到最终状态概率分布：

$$w_k=\max(\alpha-3\cdot\beta,0)+k\times 6\beta/\mathrm{D}$$

$$p_k=\frac{f(w_k)}{\sum_{l=0}^{D}f(w_l)},\mathrm{k}\in\{0,1,\ldots,\mathrm{D}\}$$

其中，$f(\cdot)$为子节点的高斯分布的概率分布函数，w_k和p_k分别为概率归一化后的第 k 个离散状态以及离散状态的概率。

每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A）或者 B）方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为并联的节点（如图 2 所示）的状态概率分布采用 A）方法进行处理获得，下属包含有元件和多个下属连接方式均为串联的子节点且自身下属连接方式为并联的节点（如图 3 所示）的状态概率分布采用 B）方法进行处理获得。

本发明实施例如下：

本实施例以一个简化的电力系统为例，该系统的系统结构树如图 5 所示。该电力系统分为发电系统和电力传输系统两个部分。发电系统由 7 个机组并联组成，分别是 2 个 A 型机组和 5 个 B 型机组，各机组的状态分布见表 1。传输线系统由 3 根相同的传输线组成，每条传输线正常运行时的传输容量为 285kW，其故障概率为 0.03。本实施例采用连续离散近似法评估该电力系统的可靠性，并将近似结果和精确结果对比。在本实施例的计算过程中，取连续化阈值$Q_0=1000$。

表 1 电力系统各机组的状态分布

A 型机组		B 型机组	
输出功率（/kW）	概率	输出功率（/kW）	概率
0	0.04	0	0.04
8.25	0.5664	2.85	0.3744
24	0.1248	36	0.4512
40.5	0.096	69	0.1152
56.25	0.0768	100.5	0.0135

72	0.096	133.5	0.0057

采用本发明提出的连续离散近似法计算该电力系统可靠性。该系统可以分成传输子系统P_1和发电子系统P_2。传输子系统的连续化值小于连续化阈值$Q=2^3<Q_0$，而发电子系统的连续化值大于连续化阈值$Q=6^7>Q_0$，因此，传输子系统采用UGF方法计算其精确结果，而发电子系统采用高斯近似计算其高斯函数。然后，再将高斯函数离散化得到的概率状态分布与传输子系统的概率状态分布，采用UGF方法计算二者串联的结果，即可得到该电力系统的可靠性分布。

本实施例采用不同的离散化值D会有不同的效果。该实施例电力系统若采用精确计算，需要2261个不同的状态来表示系统最终的可靠性分布结果，而采用本发明的连续离散方法，所需要的状态数量会大大降低。图6给出当$D=11$的连续离散方法得到的可靠性分布函数与其精确分布的对比图。当$D=11$时，只需要13个状态来表示该系统，而在这13个状态处的可靠性绝对误差的平均值为0.0212。图7给出了当$D=30$时连续离散方法得到的可靠性分布函数。此时，连续离散近似法采用32个状态来表示最终的结果，而在这32状态处的可靠性绝对误差的平均值为0.0111。对比图6和图7，可知提高参数D可以提升计算结果的准确程度。

由此可见，本发明可以高效地计算电力系统的可靠性，并且得到的近似结果的精度较高。当处理大规模系统时，本发明在计算效率和计算精确性方面的优势将更加明显。而通过调整预设定参数Q_0和D，可以调整计算复杂度和计算精确度；而参数的选定可根据所处理的系统规模和可利用的计算资源等实际情况而定。

最后应当说明的是，以上实例仅用于说明本发明的技术方案和效果，而非对其使用范围的限定。

权 利 要 求 书

1、一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：

针对已转换为用树结构表示的多状态串并联系统，将任一父节点与其下属的所有子节点之间的连接结构分为四类，第一类为仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第二类为由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，第三类为仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，第四类为由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统；

针对四类采用不同方式进行处理：

A）针对仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；

B）针对由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，先计算连续化值并比较，然后采用高斯近似法或者 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用 C）或者 D）方式进行相同处理获得；

C）针对仅由多个元件串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，采用 UGF 方法计算获得父节点的状态概率分布；

D）针对由多个元件和多个下属连接方式均为并联的节点作为子节点串联连接到同一父节点而形成的串联子系统，首先对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化判断和处理，使得父节点下属的所有子节点均为离散化状态，然后用 UGF 方法进行计算获得父节点的状态概率分布；其中每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A）或者 B）方式进行相同处理获得；

通过上述四种分类对完整树结构从末端的叶节点开始向上递进对各个层次的父节点的状态概率分布依次进行计算，最终能获得整个多状态串并联系统的根端父节点的状态概率分布，从而获得多状态串并联系统的可靠性。

2、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：所述的树结构中，树结构末端的每个叶节点记录有一个元件的状态概率分布信息，父子节点中的父节点记录父节点与下属的所有子节点之间的下属连接方式。

3、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：所述 A）针对仅由多个元件作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q=\prod_{i=1}^{n}|E_i|$$

其中，Q 表示连续化值，$|E_i|$表示各个元件所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q<Q_0$，则采用通用生成函数法方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q\geq Q_0$，则采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

4、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：

所述 A）针对仅由多个元件和多个下属连接方式均为串联的节点作为子节点并联连接到同一父节点而形成的并联子系统，具体采用以下方式进行处理：

首先，采用以下公式计算获得并联子系统的父节点的连续化值：

$$Q=\prod_{i=1}^{n}|E_i|\times\prod_{j=1}^{m}|S_j|$$

其中，$|E_i|$表示第 i 个元件节点所具有的状态数量，i 表示元件的序数，n 表示元件的总数；$|S_j|$表示第 j 个下属连接方式均为串联的节点所具有的状态数量，j 表示下属连接方式均为串联的节点的序数，m 表示下属连接方式均为串联的节点的总数；

然后，将计算得到的连续化值Q与预先设定的连续化阈值Q_0比较：

若$Q<Q_0$，则采用通用生成函数法方法计算得到父节点的状态概率分布；

若$Q\geq Q_0$，则采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布。

5、根据权利要求 3 或 4 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：所述采用高斯近似方法计算得到父节点的状态概率分布，具体为：采用以下公式计算获得父节点的期望值和方差值，并由父节点的期望值和方差值构成父节点的高斯分布，并作为父节点的状态概率分布：

$$\mu=\sum_{i=1}^{n}\overline{w}_i\ ,\ \sigma^2=\sum_{i=1}^{n}s_i^2$$

其中，μ表示父节点的期望值，$\overline{w}_i$表示父节点下属的第 i 个子节点的状态概率加权平均值，σ^2表示父节点的方差值，s_i^2表示父节点下属的第 i 个子节点的方差值，i 表示父节点下属的子节点的序数，n 表示父节点下属的子节点的总数。

6、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算

方法，其特征在于：所述 D）中，对下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布进行离散化判断和处理，具体为：

首先，进行判断：

如果子节点的状态概率分布是离散的，则不进行离散化处理；

如果子节点的状态概率分布是不离散的，则采用以下方式进行离散化处理：

然后，将位于$[\alpha-3\cdot\beta,\alpha+3\cdot\beta]$区间段内的子节点的状态概率分布等分成$D$个子区间段，$\alpha$表示子节点状态概率分布中的期望值，$\beta$表示子节点状态概率分布中的标准差，取相邻子区间段之间的端点和两侧子区间段的外端点所在的状态为离散状态，获得$D+1$个离散状态，再采用以下公式进行概率归一化得到最终状态概率分布：

$$w_k = \max\left(\alpha-3\cdot\beta,0\right)+k\times 6\beta / \mathrm{D}$$

$$p_k = \frac{f\left(w_k\right)}{\sum_{l=0}^{D} f\left(w_l\right)}, \mathrm{k}\in\left\{0,1,...,\mathrm{D}\right\}$$

其中，$f(\cdot)$为子节点的高斯分布的概率分布函数，w_k和p_k分别为概率归一化后的第 k 个离散状态以及离散状态的概率。

7、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：所述 B）中，每个下属连接方式均为串联的节点的状态概率分布采用 C）或者 D)方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为串联的节点的状态概率分布采用 C）方法进行处理获得，下属有元件和多个下属连接方式均为并联的子节点且自身下属连接方式为串联的节点的状态概率分布采用 D）方法进行处理获得。

8、根据权利要求 1 所述的一种大规模多状态串并联系统的可靠性近似计算方法，其特征在于：所述 D）中，每个下属连接方式均为并联的节点的状态概率分布采用 A）或者 B）方式进行相同处理获得，具体为：下属仅有元件且下属连接方式为并联的节点的状态概率分布采用 A）方法进行处理获得，下属包含有元件和多个下属连接方式均为串联的子节点且自身下属连接方式为并联的节点的状态概率分布采用 B）方法进行处理获得。

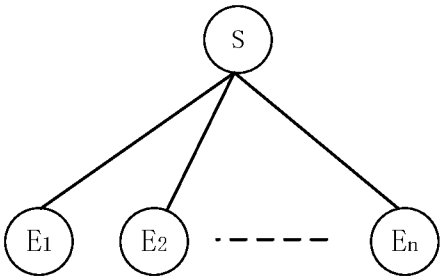

S
E1
E2
En

图 1

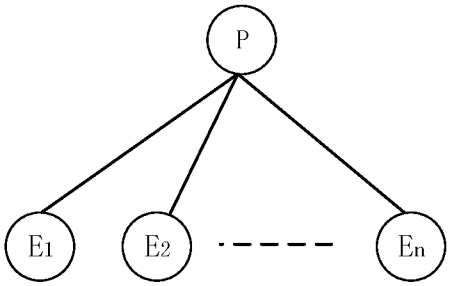

P
E1
E2
En

图 2

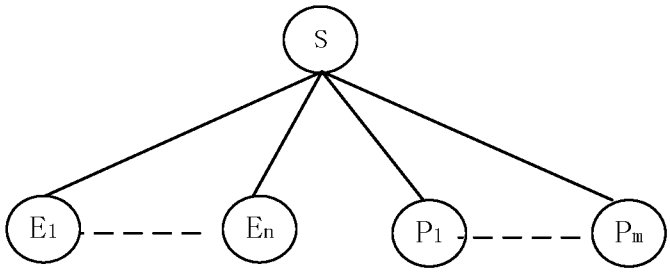

S
E1
En
P1
Pm

图 3

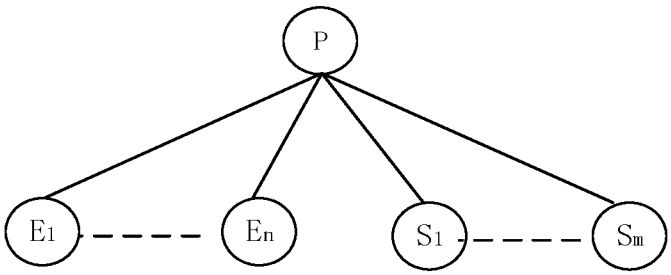

P
E1
En
S1
Sm

图 4

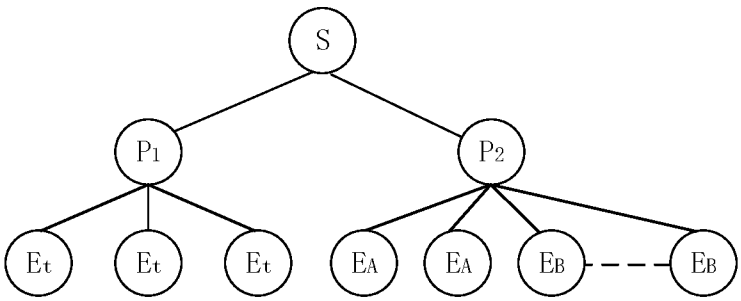

S
P1
P2
Et
Et
Et
EA
EA
EB
EB

图 5

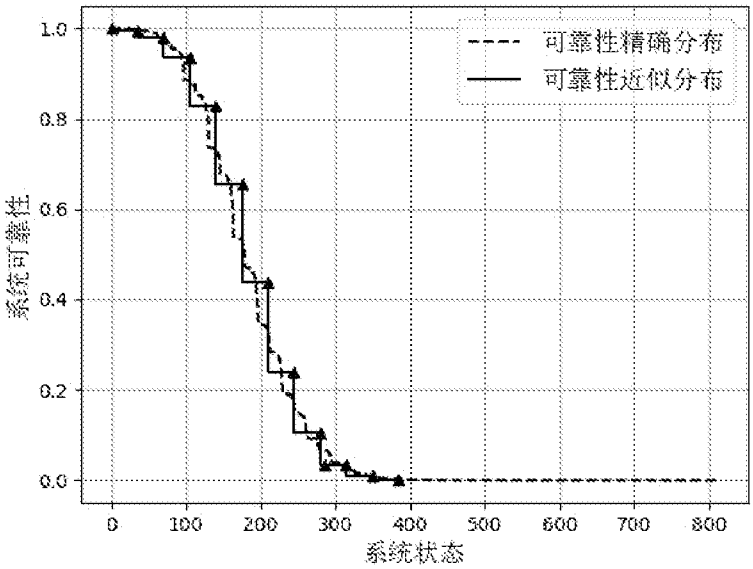

可靠性精确分布
可靠性近似分布
系统可靠性
系统状态
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
400
500
600
700
800

图 6

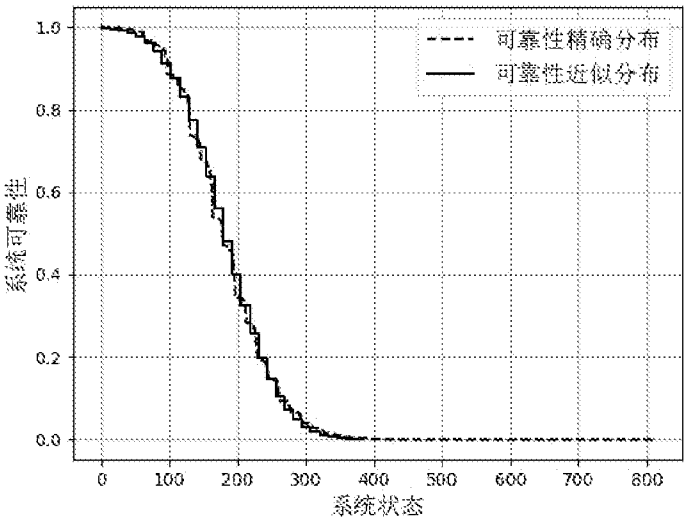

可靠性精确分布
可靠性近似分布
系统可靠性
系统状态
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
0
100
200
300
400
500
600
700
800

图 7

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2018/079377

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/00(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H02J; G06F; G06Q

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNMED; CPRSABS; FRABS; CNABS; LEXIS; CPEA; TWMED; KRABS; DWPI; JPABS; ILABS; TWABS; HKABS; MOABS; DEABS; SIPOABS; SGABS; AUABS: 概率, 迭代法+递归法, 机组, 近似, 离散化, 串并联, 高斯, 电力+电网, 树结构, 多状态+多模+多波型, 评估, 连续化值, probability, discretization, alternate, gauss approximation algorithm, grid, machine, continuation value, series parallel, assess, assembly, electric force, network, tree structure, recursive, UGF, multimode, electric power, evalua+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 105449666 A (CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY) 30 March 2016 (2016-03-30) entire description	1-8
A	CN 106408107 A (UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA) 15 February 2017 (2017-02-15) entire description	1-8
A	CN 106960394 A (STATE GRID XINJIANG ELECTRIC POWER CO.; STATE GRID CORP CHINA) 18 July 2017 (2017-07-18) entire description	1-8
A	CN 102403716 A (SHANGHAI UNIVERSITY OF ELECTRIC POWER; EAST CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.) 04 April 2012 (2012-04-04) entire description	1-8
A	CN 103036230 A (SHANGHAI MUNICIPAL ELECTRIC POWER COMPANY,; EAST CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD.; STATE GRID CORPORATION OF CHINA) 10 April 2013 (2013-04-10) entire description	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
04 April 2018	**24 April 2018**

Name and mailing address of the ISA/CN	Authorized officer
State Intellectual Property Office of the P. R. China (ISA/CN) **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China**	
Facsimile No. **(86-10)62019451**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2018/079377

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN 105449666 A	30 March 2016	None	
CN 106408107 A	15 February 2017	None	
CN 106960394 A	18 July 2017	None	
CN 102403716 A	04 April 2012	None	
CN 103036230 A	10 April 2013	WO 2014089959 A1	19 June 2014
		CN 103036230 B	23 March 2016

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2018/079377

A. 主题的分类

H02J 3/00(2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

H02J; G06F; G06Q

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称，和使用的检索词（如使用））

CNMED;CPRSABS;FRABS;CNABS;LEXIS;CPEA;TWMED;KRABS;DWPI;JPABS;ILABS;TWABS;HKABS;MOABS;DEABS;SIPOABS;SGABS;AUABS:概率，迭代法+递归法，机组，近似，离散化，串并联，高斯，电力+电网，树结构，多状态+多模+多波型，评估，连续化值，probability，discretization，alternate，gaussapproximation algorithm，grid，machine，continuation value，series parallel，assess，assembly，electric force，network，tree structure，recursive，UGF，multimode，electric power，evalua+

C. 相关文件

类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	CN 105449666 A（中国农业大学）2016年 3月 30日 (2016-03-30) 说明书全文	1-8
A	CN 106408107 A（电子科技大学）2017年 2月 15日 (2017-02-15) 说明书全文	1-8
A	CN 106960394 A（国网新疆电力公司 国家电网公司）2017年 7月 18日 (2017-07-18) 说明书全文	1-8
A	CN 102403716 A（上海电力学院 华东电力试验研究院有限公司）2012年 4月 4日 (2012-04-04) 说明书全文	1-8
A	CN 103036230 A（上海市电力公司 华东电力试验研究院有限公司 国家电网公司）2013年 4月 10日 (2013-04-10) 说明书全文	1-8

☐ 其余文件在C栏的续页中列出。

☑ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型：

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件，或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件（如具体说明的）

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布，与申请不相抵触，但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件，单独考虑该文件，认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件，当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时，要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期	国际检索报告邮寄日期
2018年 4月 4日	2018年 4月 24日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 黄渊 电话号码 (86-10)86-010-62411769

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2018/079377

检索报告引用的专利文件			公布日（年/月/日）	同族专利			公布日（年/月/日）
CN	105449666	A	2016年 3月 30日	无			
CN	106408107	A	2017年 2月 15日	无			
CN	106960394	A	2017年 7月 18日	无			
CN	102403716	A	2012年 4月 4日	无			
CN	103036230	A	2013年 4月 10日	WO	2014089959	A1	2014年 6月 19日
				CN	103036230	B	2016年 3月 23日