



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109214112 A  
(43)申请公布日 2019.01.15

(21)申请号 201811150107.9

(22)申请日 2018.09.29

(71)申请人 武汉船用电力推进装置研究所(中国船舶重工集团公司第七一二研究所)

地址 430064 湖北省武汉市洪山区南湖汽校大院

(72)发明人 周蕾 袁斌 范晶 夏丰杰 张海波

(74)专利代理机构 武汉凌达知识产权事务所 (特殊普通合伙) 42221

代理人 刘念涛 宋国荣

(51)Int.Cl.

G06F 17/50(2006.01)

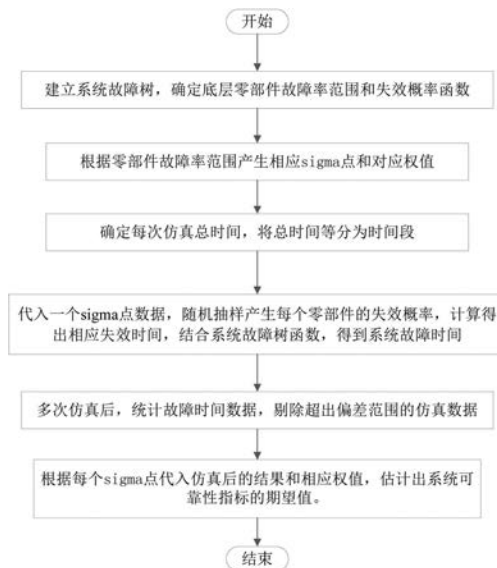
权利要求书3页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法及系统

(57)摘要

本发明公开了一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法及系统,方法具体步骤为:建立系统故障树,确定底层零部件故障率范围和失效概率函数,根据零部件故障率范围确定地产生相应sigma点和对应权值,确定每次仿真总时间,将总时间等分为时间段,代入一个sigma点数据,随机抽样产生每个零部件的失效概率,计算得出相应失效时间,结合系统故障树函数,得到系统故障时间,多次仿真后,统计故障时间数据,剔除超出偏差范围的仿真数据,根据每个sigma点代入仿真后的结果和相应权值,估计出系统可靠性指标的期望值;本发明方法克服了无迹变换对于高度非线性系统计算精度大为降低的弱点,也大大减少了蒙特卡洛仿真次数,节约了时间和硬件成本。



1. 一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于:包括以下步骤

步骤一,建立底层零部件数量为M的系统故障树,由零部件的故障规律确定每个零部件的失效概率函数 $F_i(t)$ 和每个零部件的故障率变化范围 $[\lambda_{iL}, \lambda_{iU}]$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ),进而得到系统结构函数P,通过函数P可获知每个基本零部件失效后系统能否正常运行;所述的系统结构函数 $P = x_1x_2 + x_3x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + \dots + x_{34} + x_{35}$ ,其中用 $x_i$ 表示每个零部件工作状态: $x_i=0$ 表示零部件正常, $x_i=1$ 表示零部件故障;

步骤二,根据零部件故障率的概率分布特征确定地产生 $(2M+1)$ 个sigma点作为无迹变换方法的采样点,每个sigma点对应一个故障率向量 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ ,并产生每个sigma点的相应权值 $W_i$ ;

步骤三,对于每一个sigma点,将零部件的故障率向量作为蒙特卡洛仿真的已知输入,对系统可靠性指标进行N次仿真,将仿真总时间 $T_{max}$ 指定为T小时,对 $T_{max}$ 等分为n个时间段: $\{(0 \sim T_1), (T_1 \sim T_2), (T_2 \sim T_3), \dots, (T_{n-1} \sim T_n)\}$ ;

步骤四,每次仿真中,对M个零部件的失效概率进行随机抽样,计算出零部件失效时间 $t_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ),结合系统结构函数P,计算出系统无故障运行时间t;

步骤五,得到N次仿真中每一次系统无故障运行时间 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ ,根据概率论的中心极限定理和质量控制标准剔除 $t_1 \sim t_N$ 中超出偏差范围的数据,剩余V次仿真的数据;

步骤六,对于每一个时间段 $(0, T_d)$  ( $d=1, 2, 3, \dots, n$ ),统计 $t_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, V$ )中小于等于 $T_d$ 的个数 $C_d$ ,则系统失效概率函数为:

$$F(T_d) = \frac{C_d}{V} \quad ;$$

系统平均无故障运行时间MTBF为:

$$MTBF = \frac{\sum_{k=1}^V t_k}{V} \quad ;$$

步骤七,将 $(2M+1)$ 个sigma点分别代入,重复步骤三~步骤六,求得 $(2M+1)$ 组可靠性指标;按照如下公式对指标值进行加权处理,估计出系统可靠性指标的期望值:

$$\overline{MTBF} = \sum_{i=0}^{2M} MTBF_i \times W_i \quad .$$

2. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,所述零部件数量M为35,由电堆单元、气体管理单元、水热管理单元和监控单元四部分组成;所述的电堆单元包括膜电极、双极板与密封件、集流板与绝缘板、端板与紧固件;所述的气体管理单元包括电磁阀1、电磁阀2、电磁阀3、电磁阀4、电磁阀5、电磁阀6、压力传感器1、压力传感器2、汽水分离器1、汽水分离器2;所述的水热管理单元包括温度传感器1、温度传感器2、压力传感器、流量传感器1、流量传感器2、电导率传感器1、电导率传感器2、水泵1、水泵2、水箱、去离子设备1、去离子设备2、换热器;所述的监控单元包括电流传感器、接触器1、接触器2、二极管及散热器、放电电阻、电压传感器、主控制器、单电压巡检板。

3. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,设定每个零部件的故障规律均符合指数分布,则第i个零部件的失效概率函数 $F_i(t)$ 为:

$$F_i(t) = 1 - e^{-\lambda t}。$$

4. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,所述步骤二中sigma点和相应权值根据如下公式产生:

$$s_0 = \bar{\lambda} \quad s_i = \bar{\lambda} + \left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0} P_\lambda}\right)_i \quad s_{(i+M)} = \bar{\lambda} - \left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0} P_\lambda}\right)_i$$

$$W_0 = 0 \quad W_i = \frac{1-W_0}{2M} \quad W_{(i+M)} = \frac{1-W_0}{2M} \quad i=1,2,\dots,M$$

式中, $s_0$ 为中心采样点, $s_i$ 和 $s_{(i+M)}$ 为第*i*对对称的采样点; $\bar{\lambda}$ 为零部件故障率的均值向量, $P_\lambda$ 为零部件故障率的协方差矩阵,向量维数 $M=35$ , $\left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0} P_\lambda}\right)_i$ 表示矩阵的平方根的*i*行或第*i*列; $W_i$ 为每个sigma点的权值,且满足 $\sum_{i=0}^{70} W_i = 1$ 。

5. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,所述步骤三中*n*个时间段的等分时间间隔为1h。

6. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,所述步骤四中对于每一个sigma点,根据蒙特卡洛随机抽样原理,在第*k* ( $k=1,2,3,\dots,N$ )次仿真模拟中,对每一个底层零部件的失效概率在 $[0,1]$ 内进行随机抽样,得出零部件的失效概率分别为 $\varepsilon_{ik}$  ( $i=1,2,3,\dots,M$ ),由 $F_i(t)$ 的反函数 $F_i^{-1}(\varepsilon_{ik})$ 可计算得出零部件的失效时间 $t_{ik}$ ,将 $t_{ik}$ 按照从小到大的顺序排列 $t'_{1k} \leq t'_{2k} \leq t'_{3k} \leq \dots \leq t'_{35k}$ ,结合系统结构函数 $P$ ,按时间先后依次计算 $t'_{1k}, t'_{2k}, t'_{3k}, \dots, t'_{35k}$ 时刻系统状态 $P$ ;若某一时刻系统状态 $P=0$ ,则继续计算下一时刻系统状态;若某一时刻系统状态 $P \neq 0$ ,则第*k*次仿真结束,记录下失效时间 $t_k$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其特征在于,所述

步骤五中由样本平均值 $\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N}$ 和方差 $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1}$ ,按照 $3\sigma$ 准则,根据下列公式剔除

超出偏差范围的数据,剩余*V*次仿真的数据:

$$|t_k - \bar{t}| \leq 3 \times \sigma \quad。$$

8. 一种实现权利要求1所述方法的燃料电池系统的可靠性仿真分析系统,其特征在于,包括:

sigma点采样模块,用于确定地产生能体现零部件故障率分布规律的向量,具体为:由零部件故障率的概率分布特征确定地产生 $(2M+1)$ 个sigma点作为无迹变换方法的采样点,每个sigma点对应一个故障率向量 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ ,并产生每个sigma点的相应权值 $W_i$ ;

失效概率随机抽样模块,用于随机产生每次仿真中*M*个零部件的失效概率,具体为:对每一个系统故障树底层零部件的失效概率在 $[0,1]$ 内进行随机抽样,得到*M*个零部件的失效概率分别为 $\varepsilon_i$  ( $i=1,2,3,\dots,M$ );如此重复生成 $N \times (2M+1)$ 组随机失效概率;

系统失效时间计算模块,用于求解每次仿真中系统无故障运行时间:根据抽样得到的*M*

个零部件的失效概率 $\varepsilon_i$ 和其失效概率函数 $F_i(t)$ 的反函数 $F_i^{-1}(\varepsilon_i)$ ,计算得出零部件的失效时间 $t_i$ ,结合系统结构函数 $P$ ,计算出系统无故障运行时间 $t$ ;

数据处理模块,用于剔除仿真结果中超出偏差范围的数据并对结果进行加权处理:对于每一个sigma点,计算得到 $N$ 次仿真中每一次系统无故障运行时间 $t_1、t_2、t_3、\dots、t_N$ ;根据 $3\sigma$ 准则剔除 $t_1\sim t_N$ 中超出偏差范围的数据,剩余 $V$ 次仿真的数据,进行计算得出系统可靠性指标;将 $(2M+1)$ 个sigma点分别代入,可求得 $(2M+1)$ 组可靠性指标;按照每个sigma点的权值对指标值进行加权处理,可估计出系统可靠性指标的期望值。

## 一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法及系统

### 技术领域

[0001] 本发明涉及输入量非定值的非线性复杂系统可靠性分析技术领域,具体涉及一种质子交换膜燃料电池长时运行时使用概率模型仿真分析其可靠性的方法及系统。

### 背景技术

[0002] 燃料电池是一种电化学能源转化装置,它将燃料和氧化剂的化学能经电化学反应方式直接转化为电能和热能以供应能量,不经过热机过程,不受卡诺循环的限制,能量转化效率高;环境友好,反应物清洁,无氮氧化物和硫氧化物排放;配置机动灵活,振动和噪声小。因此,燃料电池被认为是21世纪能源技术开发的热点。

[0003] 燃料电池系统复杂,其电子设备和元器件种类繁多,电磁干扰环境恶劣,在实际运行或台架实验中难免会发生各种故障。燃料电池中大部分组成部件是早已应用于其它领域的成熟产品,因此,燃料电池特性应从部件着手,进行综合分析。

[0004] 燃料电池性能衰减主要从各个部件的退化开始,质子交换膜、催化剂、电极、双极板和密封材料等都可能发生老化,而电池的辅助单元包含气、水、热管理单元,以及电池的监控单元更是高度复杂的动态系统。任何一个设备或元器件的失效都会影响燃料电池系统正常运行。因此,对燃料电池开展可靠性研究,对促进其今后的产业化发展具有重大意义。

[0005] 可靠性是指产品或设备在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力,系统可靠性评估一直是可靠性工程的重要研究内容之一。由于燃料电池系统联调试验耗费时间和各种成本;且系统复杂,仅通过试验不利于排查故障,无法分析基本设备、元器件可靠性对于系统可靠性的影响,因此需借助于仿真模拟方法来分析其可靠性。燃料电池系统规模较大,难以用数学模型直接描述;并且其中元件故障率受各种因素影响会在一定范围内波动而非定值,因此,燃料电池系统可靠性指标难以精确求得解析值,可采用概率方法得到估计值。

[0006] 无迹变换作为一种将已知概率分布的输入变量通过非线性变换得到函数值的期望和协方差的方法,对于一般非线性函数计算精度较高,但是燃料电池系统输入变量包括各元件故障率和失效概率,属于高度非线性系统,单纯采用无迹变换方法并不适用。

[0007] 蒙特卡洛作为一种将已知概率分布的输入变量进行随机抽样,将统计处理结果作为问题近似解的方法,当各元件故障率和失效概率同时作为输入变量时,抽样和仿真次数过多,计算效率低。

### 发明内容

[0008] 针对上述问题,本发明的目的之一是提供一种基于概率分布模型的燃料电池系统的可靠性仿真分析方法。

[0009] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是:一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,具体包括下述步骤:

[0010] 步骤一,建立底层零部件数量为M的系统故障树,由零部件的故障规律确定每个零

部件的失效概率函数 $F_i(t)$ 和每个零部件的故障率变化范围 $[\lambda_{iL}, \lambda_{iU}]$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 进而得到系统结构函数 $P$ , 通过函数 $P$ 可获知每个基本零部件失效后系统能否正常运行; 所述的系统结构函数 $P = x_1x_2 + x_3x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + \dots + x_{34} + x_{35}$ , 其中用 $x_i$ 表示每个零部件工作状态:  $x_i = 0$ 表示零部件正常,  $x_i = 1$ 表示零部件故障;

[0011] 步骤二, 基于无迹变换方法产生零部件故障率向量对应的sigma点和对应权值: 根据零部件故障率的概率分布特征确定地产生  $(2M+1)$  个sigma点作为无迹变换方法的采样点, 每个sigma点对应一个故障率向量  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ , 并产生每个sigma点的相应权值 $W_i$ ;

[0012] 步骤三, 对于每一个sigma点, 将零部件的故障率向量作为蒙特卡洛仿真的已知输入, 对系统可靠性指标进行 $N$ 次蒙特卡洛仿真, 将  $(2M+1)$  个sigma点分别代入, 对应仿真总次数为 $N \times (2M+1)$ ; 在程序中将仿真总时间即 $N$ 次仿真中系统运行的最长时间 $T_{\max}$ 进行 $n$ 等分, 可得到 $n$ 个时间段:  $\{(0 \sim T_1), (T_1 \sim T_2), (T_2 \sim T_3), \dots, (T_{n-1} \sim T_n)\}$ ;

[0013] 步骤四, 每次仿真中, 对 $M$ 个零部件的失效概率进行随机抽样, 计算出零部件失效时间 $t_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 结合系统结构函数 $P$ , 计算出系统无故障运行时间 $t$ ;

[0014] 步骤五, 对于每一个sigma点, 将步骤四重复 $N$ 次, 得到 $N$ 次仿真中每一次系统无故障运行时间 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ , 根据概率论的中心极限定理和质量控制标准 (例如 $3\sigma$ 准则、 $6\sigma$ 准则) 剔除 $t_1 \sim t_N$ 中超出偏差范围的数据, 剩余 $V$ 次仿真的数据;

[0015] 步骤六, 对于每一个时间段  $(0, T_d)$  ( $d=1, 2, 3, \dots, n$ ), 统计 $t_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, V$ ) 中小于等于 $T_d$ 的个数 $C_d$ , 则系统失效概率函数为:

$$[0016] \quad F(T_d) = \frac{C_d}{V} \quad ;$$

[0017] 系统平均无故障运行时间MTBF为:

$$[0018] \quad \text{MTBF} = \frac{\sum_{k=1}^V t_k}{V} \quad ;$$

[0019] 步骤七, 将  $(2M+1)$  个sigma点分别代入, 重复步骤三~步骤六, 求得  $(2M+1)$  组可靠性指标; 按照如下公式对指标值进行加权处理, 估计出系统可靠性指标的期望值:

$$[0020] \quad \overline{\text{MTBF}} = \sum_{i=0}^{2M} \text{MTBF}_i \times W_i \quad .$$

[0021] 所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法, 其零部件数量 $M$ 为35, 由电堆单元、气体管理单元、水热管理单元和监控单元四部分组成; 所述的电堆单元包括膜电极、双极板与密封件、集流板与绝缘板、端板与紧固件; 所述的气体管理单元包括电磁阀1、电磁阀2、电磁阀3、电磁阀4、电磁阀5、电磁阀6、压力传感器1、压力传感器2、汽水分离器1、汽水分离器2; 所述的水热管理单元包括温度传感器1、温度传感器2、压力传感器、流量传感器1、流量传感器2、电导率传感器1、电导率传感器2、水泵1、水泵2、水箱、去离子设备1、去离子设备2、换热器; 所述的监控单元包括电流传感器、接触器1、接触器2、二极管及散热器、放电电阻、电压传感器、主控制器、单电压巡检板。

[0022] 进一步, 设定每个零部件的故障规律均符合指数分布, 则第 $i$ 个零部件的失效概率函数 $F_i(t)$ 为:  $F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t}$ 。

[0023] 所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其步骤二中sigma点和相应权值根据如下公式产生:

$$[0024] \quad s_0 = \bar{\lambda} \quad s_i = \bar{\lambda} + \left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda\right)_i \quad s_{(i+M)} = \bar{\lambda} - \left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda\right)_i$$

$$[0025] \quad W_0=0 \quad W_i = \frac{1-W_0}{2M} \quad W_{(i+M)} = \frac{1-W_0}{2M} \quad i=1,2,\dots,M$$

[0026] 式中, $s_0$ 为中心采样点, $s_i$ 和 $s_{(i+M)}$ 为第*i*对对称的采样点; $\bar{\lambda}$ 为零部件故障率的均值向量, $P_\lambda$ 为零部件故障率的协方差矩阵,向量维数 $M=35$ , $\left(\sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda\right)_i$ 表示矩阵的平方根的第*i*行或第*i*列; $W_i$ 为每个sigma点的权值,且满足 $\sum_{i=0}^{70} W_i = 1$ 。

[0027] 所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其步骤三中*n*个时间段的等分时间间隔为1h。

[0028] 所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其步骤四中对于每一个sigma点,根据蒙特卡洛随机抽样原理,在第*k* ( $k=1,2,3,\dots,N$ )次仿真模拟中,对每一个底层零部件的失效概率在 $[0,1]$ 内进行随机抽样,得出零部件的失效概率分别为 $\varepsilon_{ik}$  ( $i=1,2,3,\dots,M$ ),由 $F_i(t)$ 的反函数 $F_i^{-1}(\varepsilon_{ik})$ 可计算得出零部件的失效时间 $t_{ik}$ ,将 $t_{ik}$ 按照从小到大的顺序排列 $t'_{1k} \leq t'_{2k} \leq t'_{3k} \leq \dots \leq t'_{35k}$ ,结合系统结构函数 $P$ ,按时间先后依次计算 $t'_{1k}$ 、 $t'_{2k}$ 、 $t'_{3k}$ 、 $\dots$ 、 $t'_{35k}$ 时刻系统状态 $P$ ;若某一时刻系统状态 $P=0$ ,则继续计算下一时刻系统状态;若某一时刻系统状态 $P \neq 0$ ,则第*k*次仿真结束,记录下失效时间 $t_k$ 。

[0029] 所述的一种燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,其步骤五中由样本平均值

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^N t_i}{N} \text{ 和方差 } \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}{N-1},$$

按照 $3\sigma$ 准则,根据下列公式剔除超出偏差范围的数据,剩

余*V*次仿真的数据:

$$[0030] \quad |t_k - \bar{t}| \leq 3 \times \sigma \quad .$$

[0031] 本发明的目的之二是提供一种考虑元件故障率变化的燃料电池系统可靠性仿真分析系统,包括:

[0032] sigma点采样模块,用于确定地产生能体现零部件故障率分布规律的向量,具体为:由零部件故障率的概率分布特征确定地产生 $(2M+1)$ 个sigma点作为无迹变换方法的采样点,每个sigma点对应一个故障率向量 $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ ,并产生每个sigma点的相应权值 $W_i$ ;

[0033] 失效概率随机抽样模块,用于随机产生每次仿真中*M*个零部件的失效概率,具体为:对每一个系统故障树底层零部件的失效概率在 $[0,1]$ 内进行随机抽样,得到*M*个零部件的失效概率分别为 $\varepsilon_i$  ( $i=1,2,3,\dots,M$ );如此重复生成 $N \times (2M+1)$ 组随机失效概率;

[0034] 系统失效时间计算模块,用于求解每次仿真中系统无故障运行时间,具体为:将*M*个零部件的失效概率 $\varepsilon_i$ 分别代入其失效概率函数 $F_i(t)$ 的反函数 $F_i^{-1}(\varepsilon_i)$ 中,计算得出零部件的失效时间 $t_i$ ,结合系统结构函数 $P$ ,计算出系统无故障运行时间*t*;

[0035] 数据处理模块,用于剔除仿真结果中超出偏差范围的数据并对结果进行加权处理,具体为:对于每一个sigma点,计算得到N次仿真中每一次系统无故障运行时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $\dots$ 、 $t_N$ ;根据 $3\sigma$ 准则剔除 $t_1 \sim t_N$ 中超出偏差范围的数据,剩余V次仿真的数据,进行计算得出系统可靠性指标;将 $(2M+1)$ 个sigma点分别代入,可求得 $(2M+1)$ 组可靠性指标;按照每个sigma点的权值对指标值进行加权处理,可估计出系统可靠性指标的期望值。

[0036] 本发明方法根据燃料电池基本设备和元器件故障率变化范围和概率分布特征,例如期望、协方差等来确定地产生一组sigma点以及相应权值;将sigma点作为系统可靠性分析的已知输入量,通过蒙特卡洛方法对元器件失效概率进行随机抽样,然后对系统构成进行逐层分解后分析出其无故障运行时间,从而得到无迹变换的样本点,变换后的sigma点可用来估计非线性燃料电池系统可靠性指标的期望值。

[0037] 采用上述仿真方法和系统所产生的有益效果在于:无需建立燃料电池系统可靠性的数学模型,依据概率统计方法量化系统可靠性指标;仿真程序简单,计算快,结果精度高;对待分析系统的维数、复杂度不敏感,适用于各类复杂系统的可靠性分析。

### 附图说明

[0038] 图1为本发明方法仿真流程图;

[0039] 图2为实现本发明方法的系统结构示意图;

[0040] 图3为燃料电池系统故障树;

[0041] 图4为燃料电池系统失效概率曲线。

### 具体实施方式

[0042] 为进一步阐述本发明内容、特点和有益效果,将通过下面的实施例对本发明予以进一步说明,但并不因此而限制本发明。

[0043] 参照图1所示,本发明涉及一种基于概率分布模型的燃料电池系统的可靠性仿真分析方法,属于非线性系统可靠性分析技术领域,具体实施步骤如下:

[0044] 1,建立燃料电池系统故障树,如图3所示。燃料电池系统分为四个子系统:电堆单元、气体管理单元、水热管理单元和监控单元,各子系统又可分解为若干设备和元器件。除了水泵和去离子设备采用一备一用并联模式,其他设备和元器件均采用串联模式。底层零部件数量为35个,用 $x_i$ 表示每个零部件工作状态:

$$[0045] \quad x_i = \begin{cases} 1 & (\text{零部件故障}) \\ 0 & (\text{零部件正常}) \end{cases} \quad (1)$$

[0046] 若 $x_1$ 、 $x_2$ 分别代表两个水泵状态, $x_3$ 、 $x_4$ 分别代表两个去离子设备状态,则系统结构函数P为:

$$[0047] \quad P = x_1 x_2 + x_3 x_4 + x_5 + x_6 + x_7 + \dots + x_{34} + x_{35} \quad (2)$$

[0048] 可知 $P \neq 0$ 时代表系统故障。

[0049] 其中35个燃料电池零部件故障包括

[0050] 电堆单元故障:膜电极故障,双极板与密封件故障,集流板与绝缘板故障,端板与紧固件故障;



[0051] 气体管理单元故障:电磁阀故障(包括电磁阀1故障、电磁阀2故障、电磁阀3故障、电磁阀4故障、电磁阀5故障和电磁阀6故障),压力传感器故障(包括压力传感器1故障和压力传感器2故障),汽水分离器故障(包括汽水分离器1故障和汽水分离器2故障);

[0052] 水热管理单元故障:温度传感器故障(包括温度传感器1故障和温度传感器2故障),压力传感器故障,流量传感器故障(包括流量传感器1故障和流量传感器2故障),电导率传感器故障(包括电导率传感器1故障和电导率传感器2故障),水泵故障(包括水泵1故障和水泵2故障),水箱故障,去离子设备故障(包括去离子设备1故障和去离子设备2故障),换热器故障;

[0053] 监控单元故障:电流传感器故障,接触器故障(包括接触器1故障和接触器2故障),二极管及散热器故障,放电电阻故障,电压传感器故障,主控制器故障,单电压巡检板故障。

[0054] 2,根据浴盆曲线可知每个零部件的故障率在主要生命周期内可认为是不随时间变化的常数,但因为环境干扰等因素,零部件故障率会在一定范围内波动,假定每个零部件的故障率变化范围分别为 $[\lambda_{iL}, \lambda_{iU}]$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 35$ )并且零部件的故障规律均符合指数分布,则第*i*个零部件的失效概率函数 $F_i(t)$ 为:

$$[0055] \quad F_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t} \quad (3)$$

[0056] 3,根据公式(4)产生零部件故障率进行标准无迹变换的sigma点和相应权值:

$$[0057] \quad \begin{aligned} s_0 &= \bar{\lambda} & s_i &= \bar{\lambda} + \left( \sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda \right)_i & s_{(i+M)} &= \bar{\lambda} - \left( \sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda \right)_i \\ W_0 &= 0 & W_i &= \frac{1-W_0}{2M} & W_{(i+M)} &= \frac{1-W_0}{2M} \quad i=1, 2, \dots, M \end{aligned} \quad (4)$$

[0058] 式中, $S_0$ 为中心采样点, $S_i$ 和 $S_{(i+M)}$ 为第*i*对对称的采样点; $\bar{\lambda}$ 为零部件故障率的均值向量, $P_\lambda$ 为零部件故障率的协方差矩阵,向量维数*M*等于零件数量35, $\left( \sqrt{\frac{M}{1-W_0}} P_\lambda \right)_i$ 表示矩阵

的平方根的第*i*行或第*i*列; $W_i$ 为每个sigma点的权值,且满足 $\sum_{i=0}^{70} W_i = 1$ 。

[0059] 由各零部件故障率在变化范围内均匀分布并且相互独立,则有:

$$[0060] \quad \begin{aligned} \bar{\lambda}(i) &= \frac{(\lambda_{iL} + \lambda_{iU})}{2} & i &= 1, 2, \dots, 35 \\ P_\lambda(i, i) &= \frac{(\lambda_{iU} - \lambda_{iL})^2}{12} & P_\lambda(i, j) &= 0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (5)$$

[0061] 4,将一个sigma点故障率向量作为已知输入,对系统可靠性指标进行蒙特卡洛仿真,假定仿真次数为*N*次,在程序中将仿真总时间*T*指定为*N*次仿真中系统运行的最长时间 $T_{\max}$ ,将*T*进行等分,等分时间间隔为1h。

[0062] 5,第*k* ( $k \leq N$ )次仿真中,由35个零部件失效概率的随机抽样值 $\varepsilon_{ik}$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 35$ ),并由公式(3)的反函数:

$$[0063] \quad t_{ik} = \frac{-1}{\lambda_i} \ln(1 - \varepsilon_{ik}) \quad (6)$$

[0064] 可计算得出零部件的失效时间 $t_{ik}$ ,将 $t_{ik}$ 按照从小到大的顺序排列 $t'_{1k} \leq t'_{2k} \leq t'_{3k} \leq \dots \leq t'_{35k}$ ;根据公式(2),按时间先后依次计算 $t'_{1k}$ 、 $t'_{2k}$ 、 $t'_{3k}$ 、 $\dots$ 、 $t'_{35k}$ 时刻系统状态 $P$ ;若某一时刻系统状态 $P=0$ ,则继续计算下一时刻系统状态;若某一时刻系统状态 $P \neq 0$ ,则第 $k$ 次仿真结束,记录下失效时间 $t_k$ 。

[0065] 6,重复步骤5,得到 $N$ 次仿真中每一次燃料电池系统无故障运行时间 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $\dots$ 、 $t_N$ ;由样本平均值 $\bar{t} = \frac{\sum_{l=1}^N t_l}{N}$ 和方差 $\sigma^2 = \frac{\sum_{l=1}^N (t_l - \bar{t})^2}{N-1}$ ,按照 $3\sigma$ 准则,根据公式(7)剔除超出偏差

范围的数据,剩余 $V$ 次仿真的数据。

$$[0066] \quad |t_k - \bar{t}| \leq 3 \times \sigma \quad (7)$$

[0067] 7,对于每一个时间段 $(0, T_d)$  ( $d=1, 2, 3, \dots, n$ ),统计 $t_k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, V$ )中小于等于 $T_d$ 的个数 $C_d$ ,则系统失效概率函数为:

$$[0068] \quad F(T_d) = \frac{C_d}{V} \quad (8)$$

[0069] 系统平均无故障运行时间MTBF为:

$$[0070] \quad MTBF = \frac{\sum_{k=1}^V t_k}{V} \quad (9)$$

[0071] 8,对于每一个sigma点,重复步骤4~步骤7,得到71组蒙特卡洛仿真结果;按照公式(10)对仿真结果进行加权处理,可估计出系统可靠性指标的期望值。

$$[0072] \quad \overline{MTBF} = \sum_{i=0}^{70} MTBF_i \times W_i \quad (10)$$

[0073] 取每一个sigma点对应仿真次数 $N=10000$ 。加权处理后的燃料电池系统失效概率曲线如图4所示。将本发明方法计算得出的系统MTBF值与理论推导值以及蒙特卡洛方法仿真得出的结果进行对比如表1所示。

[0074] 表1 不同方法计算结果对比

[0075]

	理论推导值	本发明方法 (无迹变换+蒙特卡洛)	蒙特卡洛方法
MTBF (h)	2137	2185	2095
相对误差 (%)	—	2.26	1.95
仿真次数	—	$7.1 \times 10^5$	$1 \times 10^8$

[0076] 可见本发明方法计算精度与蒙特卡洛方法基本相当,但仿真次数仅为蒙特卡洛方

法的7/1000,大为提高了计算效率。

[0077] 本发明方法计算程序简单,运算快,仿真精度高;且由于该方法对待分析系统的维数、复杂度不敏感,适用于各类复杂系统。

[0078] 参照图2所示,实现本发明可靠性仿真分析方法的系统,包括sigma点采样模块,失效概率随机抽样模块,系统失效时间计算模块和数据处理模块,其中:

[0079] sigma点采样模块用于确定地产生能体现零部件故障率分布规律的向量,具体为:由零部件故障率的概率分布特征确定地产生  $(2M+1)$  个sigma点作为无迹变换方法的采样点,每个sigma点对应一个故障率向量  $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M)$ ,并产生每个sigma点的相应权值  $W_i$ ;

[0080] 失效概率随机抽样模块用于随机产生每次仿真中  $M$  个零部件的失效概率,具体为:对每一个系统故障树底层零部件的失效概率在  $[0, 1]$  内进行随机抽样,得到  $M$  个零部件的失效概率分别为  $\varepsilon_i (i=1, 2, 3, \dots, M)$ ;如此重复生成  $N \times (2M+1)$  组随机失效概率;

[0081] 系统失效时间计算模块用于求解每次仿真中系统无故障运行时间:根据抽样得到的  $M$  个零部件的失效概率  $\varepsilon_i$  和其失效概率函数  $F_i(t)$  的反函数  $F_i^{-1}(\varepsilon_i)$ ,计算得出零部件的失效时间  $t_i$ ,结合系统结构函数  $P$ ,计算出系统无故障运行时间  $t$ ;

[0082] 数据处理模块用于剔除仿真结果中超出偏差范围的数据并对结果进行加权处理:对于每一个sigma点,计算得到  $N$  次仿真中每一次系统无故障运行时间  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ ;根据  $3\sigma$  准则剔除  $t_1 \sim t_N$  中超出偏差范围的数据,剩余  $V$  次仿真的数据,进行计算得出系统可靠性指标;将  $(2M+1)$  个sigma点分别代入,可求得  $(2M+1)$  组可靠性指标;按照每个sigma点的权值对指标值进行加权处理,可估计出系统可靠性指标的期望值。

[0083] 上述实施例是说明性的,而不是限定性的,本发明的保护范围不限于具体实施方式中所述的实施例,凡是根据本发明的技术方案得出的其它实施方式,同样属于本发明保护的范畴。

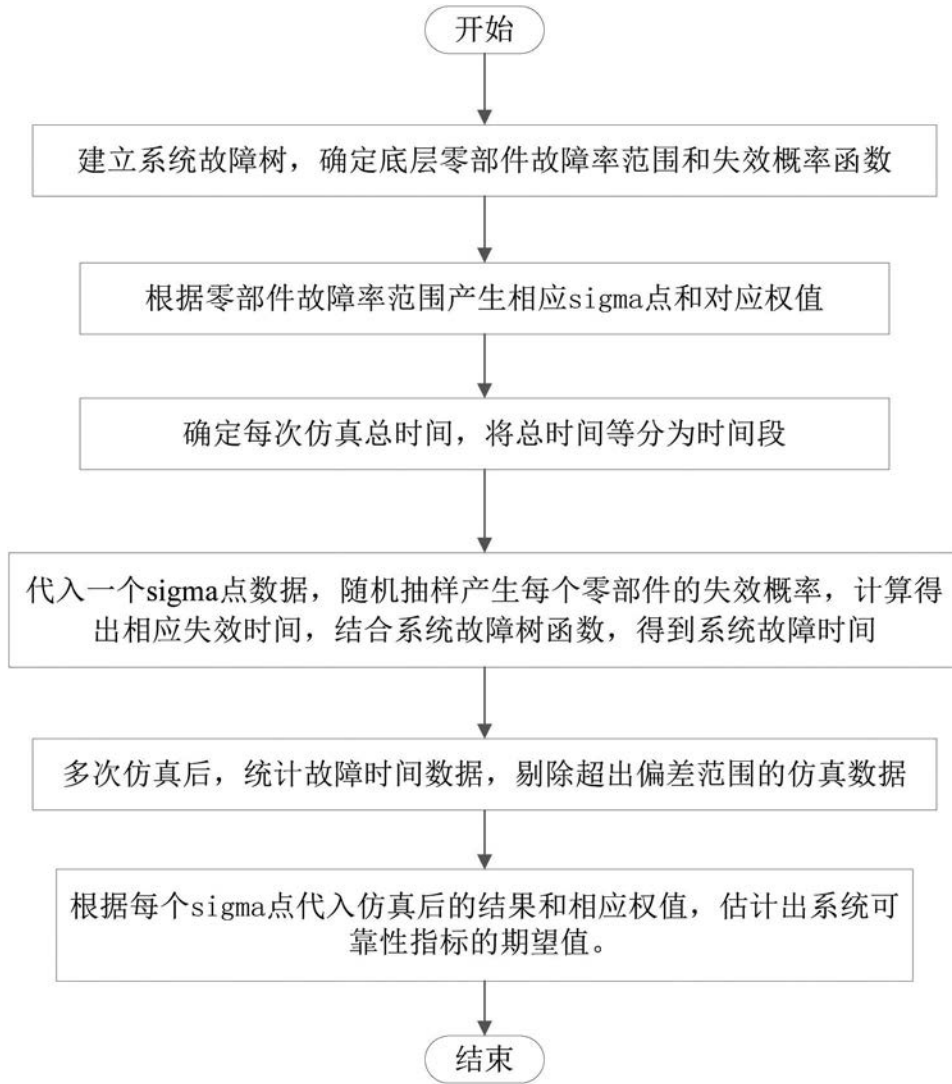


图1

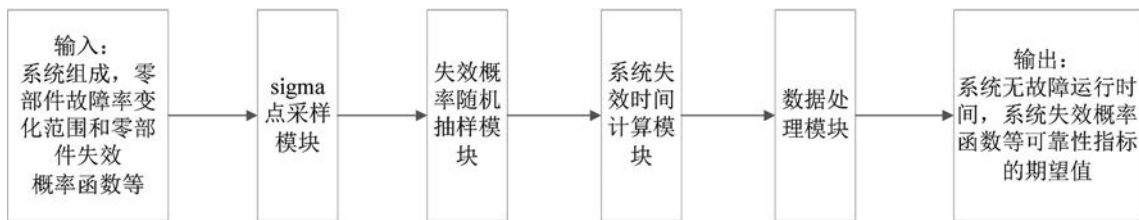


图2

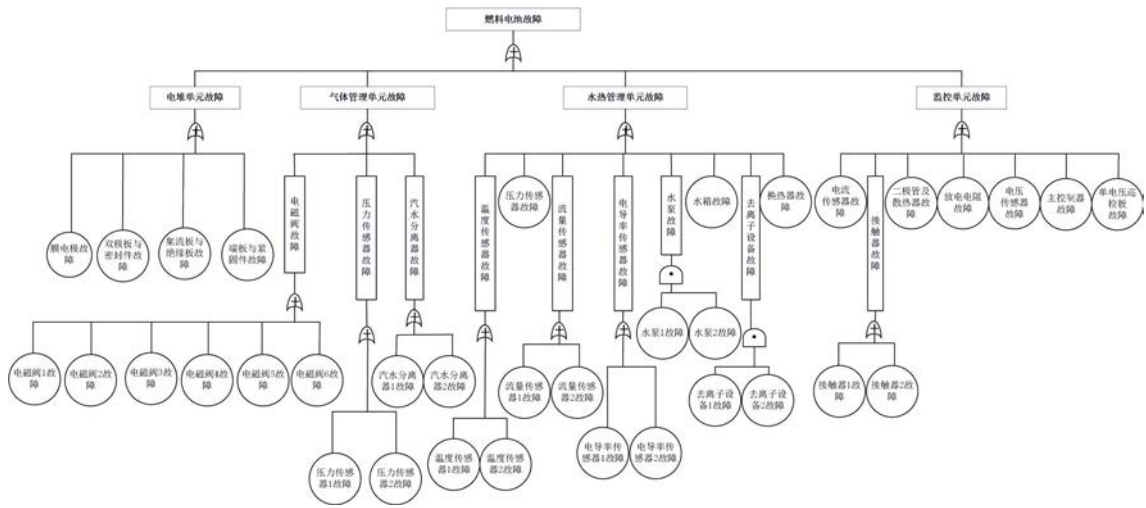


图3

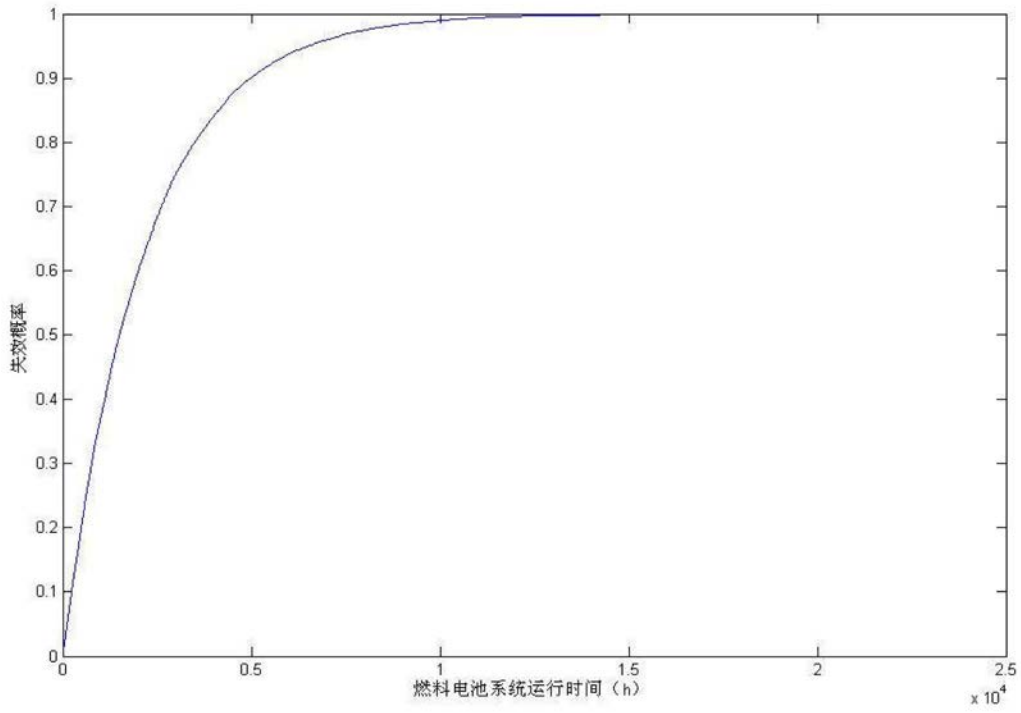


图4