

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209553

国产重型燃气轮机控制系统可靠性分析^{*}

仲心萌¹, 陈远野¹, 房方¹, 王巍², 刘玉升²

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院 北京 102206; 2. 国核自仪系统工程有限公司 上海 200241)

摘 要:提升可靠性是国产化重型燃气轮机控制系统研发需要解决的核心问题。硬件冗余是控制系统可靠性的重要保障,可在功能上实现容错,其成本与故障修复相比更低,已在工业应用中占据主导地位。由于我国重型燃气轮机控制系统的研制还处于攻关阶段,对其可靠性的研究几乎处于空白状态。分析了国产重型燃气轮机 NuCON 控制系统的冗余策略,采用马尔可夫(Markov)模型构建该冗余策略下的可靠性模型;运用概率模型检测器 PRISM 对可靠性模型进行定量计算和检验,仿真表明,在一定修复时间和冗余结构下,采用最小硬件配置的 NuCON 控制系统的不可用率为 1.616×10^{-4} ,满足系统可靠性设计要求。同时对比分析了不同修复时间、不同系统结构和不同系统规模对系统不可用率的量化影响结果。

关键词: 重型燃气轮机;国产控制系统;可靠性;Markov 模型;概率模型检测器

中图分类号: N945.17 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Reliability analysis for the domestic control system of the heavy-duty gas turbine

Zhong Xinmeng¹, Chen Yuanye¹, Fang Fang¹, Wang Wei², Liu Yusheng²

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Nuclear Power Automation System Engineering Company, Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: The improvement of reliability is a key problem to be solved in the research and development of the domestic control system of the heavy-duty gas turbine. Hardware redundancy is an important guarantee for enhancing reliability of the control system, which can realize fault tolerance in function. Its cost is lower than repair. It has occupied a dominant position in industrial application. However, the development of domestic control system of the heavy-duty gas turbine is still at the early stage. Hence, the research on its reliability is almost blank. This article analyzes redundancy strategy of the domestic NuCON control system of the heavy-duty gas turbine, which uses Markov model accordingly to formulate the reliability model. The probabilistic model checker PRISM is utilized to calculate and test the reliability model quantitatively. The simulation shows that the unavailability of minimum hardware configuration of the NuCON control system is 1.616×10^{-4} , which meets the design requirement of system reliability. Meanwhile, the quantitative effects of different repair time, different system structure and different system scale on the unavailability of the system are compared and analyzed.

Keywords: heavy-duty gas turbine; domestic control system; reliability; Markov model; probabilistic model checker

0 引 言

截至 2021 年底,在世界范围内,燃气发电量大约占有所有发电方式发电总和的 22.9%,并且保持平稳增长,已经成为仅次于煤电的第二大发电方式^[1]。我国的燃气发电起步较晚但发展迅速,尤其是重型燃气轮机及其联合循环

系统得到了广泛应用^[2]。2020 年,我国的燃气发电量达到 247 TW·h,在全国发电总量中居第 6 位^[3],发电量排名仅次于美国和俄罗斯,居世界第 3 位。由国家发改委和国家能源局发布的《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》^[4]中指出,为了达成 2030 年我国能源产业与生态环境协调可持续发展,进入世界能源技术强国行列这一目标,重点任务之一就是高效燃气轮机技术创新。

收稿日期:2022-04-04 Received Date: 2022-04-04

^{*} 基金项目:国家航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究(2017-V-0010-0061)、中央高校基本科研业务费专项资金(2021MS015)项目资助

控制系统是重型燃气轮机在各种工况下安全高效运行的重要保障。随着控制系统所需要用到的硬件数量增长,复杂度提高,由其硬件故障引起的重型燃气轮机紧急停机事件时有发生^[5],因此控制系统的可靠性研究已经成为重型燃气轮机国产化攻关的关键问题。

目前工业控制系统可靠性的研究主要针对核电机组,并且已经取得了一系列成果,具有参考价值。核电机组早期的安全评价方法中,以故障模式及影响分析(failure mode and effects analysis, FMEA)、故障树分析(fault tree analysis, FTA)、可靠性框图(reliability block diagram, RBD)等为代表。FMEA^[6-7]通过逐一分析系统的硬件或功能,找出所有潜在的薄弱环节,预先采取适当措施,消除或减轻故障对系统的影响。但是其作为一种定性分析方法缺少量化过程,无法确定系统可靠性的确切情况。FTA^[8]从系统故障事件自上而下逐层推溯所有可能导致故障的原因,形成树形图,其基于可视化图形计算系统的失效概率,将定性分析和定量分析相结合。RBD^[9-11]是一种从可靠性角度研究系统与部件之间逻辑关系的示意图,相比于 FTA 的树形图,RBD 用框图表示出系统各个部分的逻辑关系,将定性分析和定量分析相结合,可与 FTA 相互转化。

为了解决早期安全评价方法只能作静态分析这一问题,动态流图(dynamic flowgraph methodology, DFM)、动态故障树(dynamic fault tree, DFT)、Markov 模型法等相继被提出。DFM^[12]考虑了多种故障状态,可以描述系统各个参量之间的关系,更适用于规模日益扩大的复杂工业控制系统。DFT^[13-14]被用于系统动态行为的分析研究,与建模过程复杂的 DFM 相比,DFT 更加简便。Markov 模型法^[15-16]将实际物理系统抽象为完全由状态表示的概率模型,模型中各种状态的转移是完全随机的。与用来分析不可修复系统的 DFM 和 DFT 相比,Markov 模型法能够进行可修复系统的可靠性分析,因此具有更广泛的用途。

考虑到重型燃气轮机控制系统具有可修复性,为了对系统修复率、不可用率等重要指标进行量化研究,本文借鉴核电机组可靠性评价的相关理论和方法,分级建立了重型燃气轮机控制系统硬件的 Markov 模型;基于概率模型检测器 PRISM^[17-18]对所建立的模型进行定量分析,计算系统的不可用率;对比分析了不同修复时间、不同系统结构和不同系统规模对不可用率的影响。以上成果为控制系统的可靠性设计提供了参考。

1 系统组成

与美国 GE 公司 MARK-VI、德国西门子公司 TXP 等成熟的燃气轮机控制系统相比,国产重型燃气轮机控制

系统的研发尚处于起步阶段,已见报道的有中国华电集团有限公司自主研发的“华电睿蓝”TCS 控制系统,还有国核自仪系统工程有限公司开发的 NuCON 控制系统。“华电睿蓝”针对 E 级机组研发,NuCON 针对 F 级机组研发。本文主要针对 NuCON 开展研究。

NuCON 控制系统硬件部分主要由控制器、I/O 模块、温度采集模块、交换机、电源等组成。图 1 所示为 NuCON 控制系统最小硬件配置,由控制器、交换机、6 种 I/O 功能模块、继电器等 23 个部件组成,输入模块采集现场信号,并送入控制器中进行运算处理,运算结果通过输出模块送给执行机构。

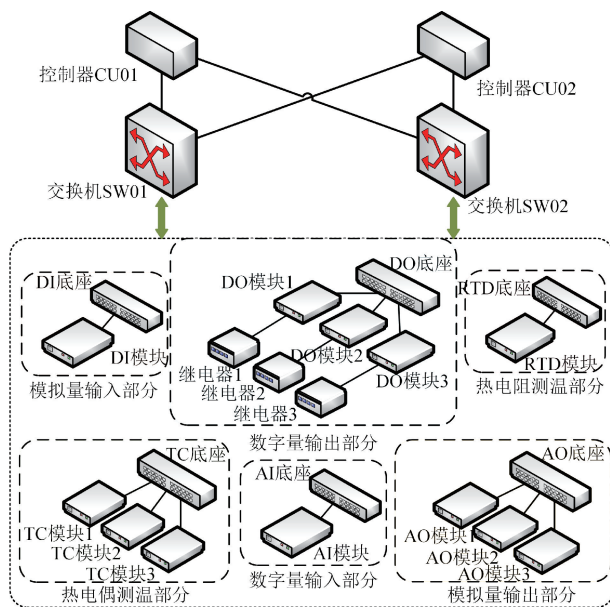


图 1 NuCON 最小硬件配置示意图

Fig. 1 Diagram of minimum hardware configuration of the NuCON

1) 控制器 CU, NuCON 控制系统的核心部件,通过交换机 SW 与 I/O 功能模块连接并进行双向数据传输。NuCON 控制系统的输入输出控制、报警检测、逻辑计算等功能都在 CU 中完成。同时 CU 还具有自诊断和冗余容错能力^[19]。

2) 交换机 SW, 标准的实时数据网络硬件配置,负责广播数据、传递信息和指令,从而实现控制器 CU 与 I/O 功能模块之间的数据交换。

3) I/O 功能模块,包括模拟量输入 AI/输出 AO 模块、数字量输入 DI/输出 DO 模块、温度采集热电偶 TC/热电阻 RTD 模块。在 NuCON 最小硬件配置的设计中,重点模块 AO、DO 和 TC 采用三冗余设计,3 个功能模块与 1 个对应的三冗余底座相连接,其余模块无冗余,功能模块直接与对应的单底座相连接。上述所有 I/O 功能模块通过底座直接与总线通信。DO 模块输出端与继电器连接,实现信号隔离。

2 可修复系统的数学模型构建

可修复系统是指当系统失效后,操作人员对故障部件进行修复,可以使之恢复功能的系统。对可修复系统的不同状态加以定义,即可运用随机过程理论建立可修复系统的 Markov 模型。

可修复系统的可靠性指标包括瞬时可用率 $A(t)$ 、稳态可用率 A 、瞬时不可用率 $F(t)$ 等。

$$A = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (1)$$

式中:瞬时可用率 $A(t)$ 指的是系统在时刻 t 处于运行状态的概率,稳态可用率 A 是瞬时可用率的极限,不可用率 $F(t)$ 和可用率 $A(t)$ 的和始终为 1。为了便于进行数据处理和分析,本文主要对 NuCON 的不可用率进行研究。

2.1 Markov 模型

Markov 模型是由苏联科学家安德烈·马尔可夫研究并提出的,是一种无后效性的随机过程。假设 $\{X(t), t \geq 0\}$ 是取值在 $E = \{0, 1, \dots, N\}$ 上的一个随机过程。如果对任意自然数 n , 及任意 n 个时刻点 $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_n$, 均有:

$$P\{X(t_n) = i_n | X(t_1) = i_1, \dots, X(t_{n-1}) = i_{n-1}\} = P\{X(t_n) = i_n | X(t_{n-1}) = i_{n-1}\}, i_1, i_2, \dots, i_n \in E \quad (2)$$

式中: $X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n)$ 为状态序列,则称 $\{X(t), t \geq 0\}$ 为离散状态空间 E 上的连续时间 Markov 模型。该式表明,过程在 t_n 时刻的状态仅与过程在 t_{n-1} 的状态有关。

Markov 模型可以用状态转移图表示,如图 2 所示,其中的白色圆圈表示非失效 Markov 状态,深色圆圈表示部件失效的 Markov 状态,有向弧线表示状态发生了转移。如某一个单部件, s_0 表示非故障状态, s_1 表示发生故障失效,处于 s_0 状态的部件发生故障后转移到 s_1 状态, λ 表示故障率;处于 s_1 状态的部件经过修复转移到 s_0 状态, μ 表示修复率。

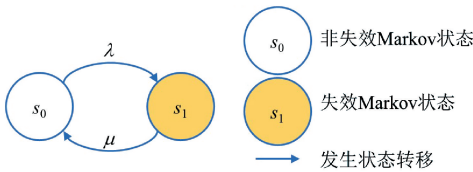


图2 单部件 Markov 模型状态转移

Fig. 2 Markov model state transition of single part

该单部件的寿命和故障修理时间满足指数分布 $1 - e^{-\lambda t}, t \geq 0$ 和 $1 - e^{-\mu t}, t \geq 0$, 其中 $\lambda, \mu > 0$ 。由全体转移概率组成的矩阵为状态转移矩阵,所以该单部件的

状态转移矩阵即为:

$$T = \begin{bmatrix} 1 - \lambda & \lambda \\ \mu & 1 - \mu \end{bmatrix} \quad (3)$$

状态方程的系数矩阵为 $A = T - I$, 其中 I 为对应维数的单位矩阵。结合初始状态 $p_0(0) = 1, p_1(0) = 0$, 可求得微分方程组:

$$\begin{cases} \dot{p}_0(t) = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \dot{p}_1(t) = \lambda p_0(t) - \mu p_1(t) \end{cases} \quad (4)$$

单系统的瞬时不可用率 $F(t)$ 和稳态不可用率 F 为:

$$F(t) = p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (5)$$

$$F = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (6)$$

2.2 串联 Markov 模型

NuCON 控制系统中各模块和底座间的连接可建立为串联 Markov 模型,不同部分之间也可建立为串联 Markov 模型。

如图 3 所示,系统共有 $n+1$ 个状态,除 s_0 外其余 n 个状态为失效状态。 n 个不同部件的故障率和修复率分别为 λ_i 和 $\mu_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。结合初始状态 $p_0(0) = 1, p_i(0) = 0, i = 1, 2, \dots, n$ 得到方程组:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_0(0) \\ \dot{p}_1(0) \\ \vdots \\ \dot{p}_n(0) \end{bmatrix} = (T - I)^T \begin{bmatrix} p_0(0) \\ p_1(0) \\ \vdots \\ p_n(0) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} p_0(0) \\ p_1(0) \\ \vdots \\ p_n(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

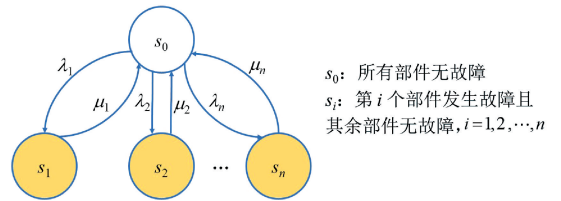


图3 串联系统 Markov 模型状态转移图

Fig. 3 Markov model state transition of the series system

通过拉氏变换法推出系统的瞬时不可用率 $F(t)$ 和稳态不可用率 F 为:

$$F(t) = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}} - \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{j=1}^n (s_i + \mu_j)}{s_i \prod_{j=1, j \neq i}^n (s_i - s_j)} e^{s_i t} \quad (8)$$

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}}{1 + \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j}} \quad (9)$$

当系统的瞬时不可用率已经求出,可进一步求得稳态不可用率。然而在很多情况中,瞬时不可用率的求解比较困难,因此可由下列引理1直接求出稳态不可用率。

引理1 系统的稳态可用率为:

$$A = \sum_{j \in W} \pi_j \quad (10)$$

其中, $\pi_j, j \in W, W$ 为系统的工作状态集合,满足式(11):

$$\begin{cases} [\pi_0, \pi_1, \dots, \pi_N] \mathbf{A} = \mathbf{0} \\ \pi_0 + \pi_1 + \dots + \pi_N = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为 Markov 模型状态方程的系数矩阵, $\mathbf{A} = \mathbf{T} - \mathbf{I}$ 。对于串联系统,运用引理1也可以求得系统的稳态不可用率,与式(9)求得的结果相同。

2.3 表决 Markov 模型

NuCON 中 AO 模块、DO 模块和 TC 模块都为三冗余结构,采用“三取中”或“三取二”表决机制得到最终值,可构建为表决 Markov 模型。

如图4所示, m/n 表决系统由 n 个相同的部件组成,当至少有 m 个部件正常时,系统才能正常工作,当系统的故障部件数达到 $n-m+1$,系统发生故障停止工作,期间剩余 $m-1$ 个正常工作的部件也停止工作,直到故障部件中有一个部件被修复,系统才能恢复正常工作。

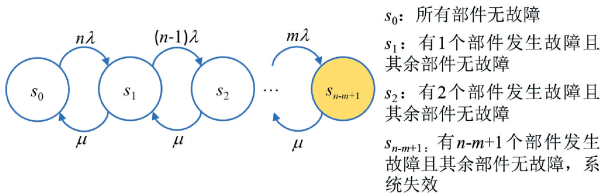


图4 表决系统 Markov 模型状态转移图

Fig. 4 Markov model state transition of the voting system

针对 $m=n-1$ 的情况,结合初始状态 $[p_0(0), p_1(0), p_2(0)] = [1, 0, 0]$ 可得到微分方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_0(t) \\ \dot{p}_1(t) \\ \dot{p}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n\lambda & n\lambda & 0 \\ \mu & -(n-1)\lambda - \mu & (n-1)\lambda \\ 0 & \mu & -\mu \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} p_0(t) \\ p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

通过求解式(12)可得该 $(n-1)/n$ 表决系统的瞬时不可用率 $F(t)$ 和稳态不可用率 F 为:

$$F(t) = p_2(t) = \frac{n(n-1)\lambda^2}{s_1 s_2} + \frac{n(n-1)\lambda^2}{s_1(s_1-s_2)} e^{s_1 t} + \frac{n(n-1)\lambda^2}{s_2(s_2-s_1)} e^{s_2 t} \quad (13)$$

$$F = \frac{n(n-1)\lambda^2}{s_1 s_2} = \frac{n(n-1)\lambda^2}{n(n-1)\lambda^2 + n\lambda\mu + \mu^2} \quad (14)$$

其中, s_1 满足 $s_1^2 + ((2n-1)\lambda + 2\mu)s_1 + (n(n-1)\lambda^2 + n\lambda\mu + \mu^2) = 0$; s_2 满足 $s_2^2 + ((2n-1)\lambda + 2\mu)s_2 + (n(n-1)\lambda^2 + n\lambda\mu + \mu^2) = 0$ 。

2.4 热备 Markov 模型

在 NuCON 控制系统中,控制器 CU 和交换机 SW 采用热备结构,可构建为热备 Markov 模型。

如图5所示,热备系统由两个部件 X 和 Y 组成,当两个部件都正常时, X 处于工作状态, Y 处于备用状态。当工作部件发生故障时,热备部件转为工作状态,当热备部件发生故障时,工作部件继续工作状态不变,当两个部件都发生故障,热备系统失效。X 的故障率和修复率为 λ_1 和 μ_1 , Y 的故障率和修复率为 λ_2 和 μ_2 , 系统共有 5 种不同的状态。应用引理1得到该热备系统的稳态不可用率。

$$F = \pi_4 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)} \quad (15)$$

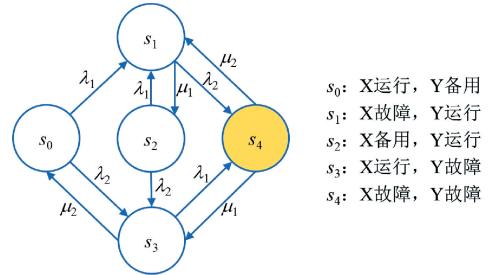


图5 热备系统 Markov 模型状态转移图

Fig. 5 Markov model state transition of the hot standby system

3 算例及性能分析

3.1 算例概况

基于上述 Markov 模型,以 NuCON 控制系统为算例进行分析。NuCON 硬件布置如图6所示,共有两个 DCS 机柜,其中标注部分为 NuCON 最小硬件配置选用的卡件。NuCON 控最小硬件配置抽象化后的可靠性逻辑结构框图如图7所示,其中双线框表示模块化的控制系统各个部分,各双线框间用实线连接表示逻辑串联关系。双线框中黑色单线框表示硬件模块,黑色单线框下的带斜线框表示硬件模块对应的状态集合,虚线框表示在软件算法中完成的控制功能,带箭头实线表示信号流及方向。卡件所处的状态可分为运行状态和故障状态,对于有热备的控制器和交换机来说,所处状态分为运行状态、备用状态和故障状态。整个控制系统所处的状态为运行状态和失效状态。表1为国核自仪系统工程有限公司的卡件实测故障率数值。

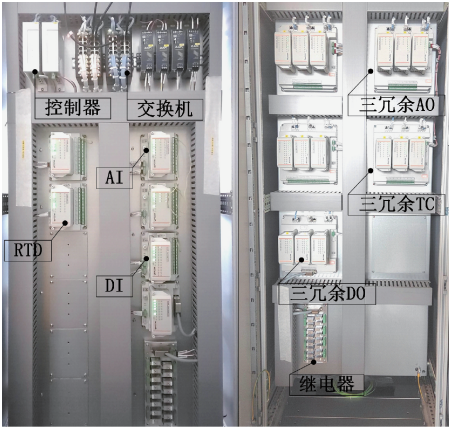


图 6 NuCON 控制系统硬件机柜

Fig. 6 Physical cabinet of the NuCON control system

在 NuCON 控制系统中,AI、DI 和热电阻测温部分都为逻辑串联结构。以 AI 为例,“AI 底座”和“AI 模块”为串联,即两者中任意一个发生故障,AI 都会失效,NuCON 控制系统也会因此失效停机,图 8 所示为该部分的 Markov 模型,AI 模块的故障率和修复率分别用 λ_{ai} 和 μ_{ai} 表示,AI 底座的故障率和修复率分别用 λ_{aib} 和 μ_{aib} 表示,各故障率数据如表 1 所示。

不仅各个部分中的底座和模块为逻辑串联,各个部分之间也为逻辑串联。具有逻辑串联关系的模块或部分均可建模为串联 Markov 模型。

控制器 CU 和交换机 SW 都采用热备结构。以控制器 CU 为例,在正常工作中当控制器 CU01 发生故障时,不用切断电源即可切换至 CU02,此时 CU02 由热备状态

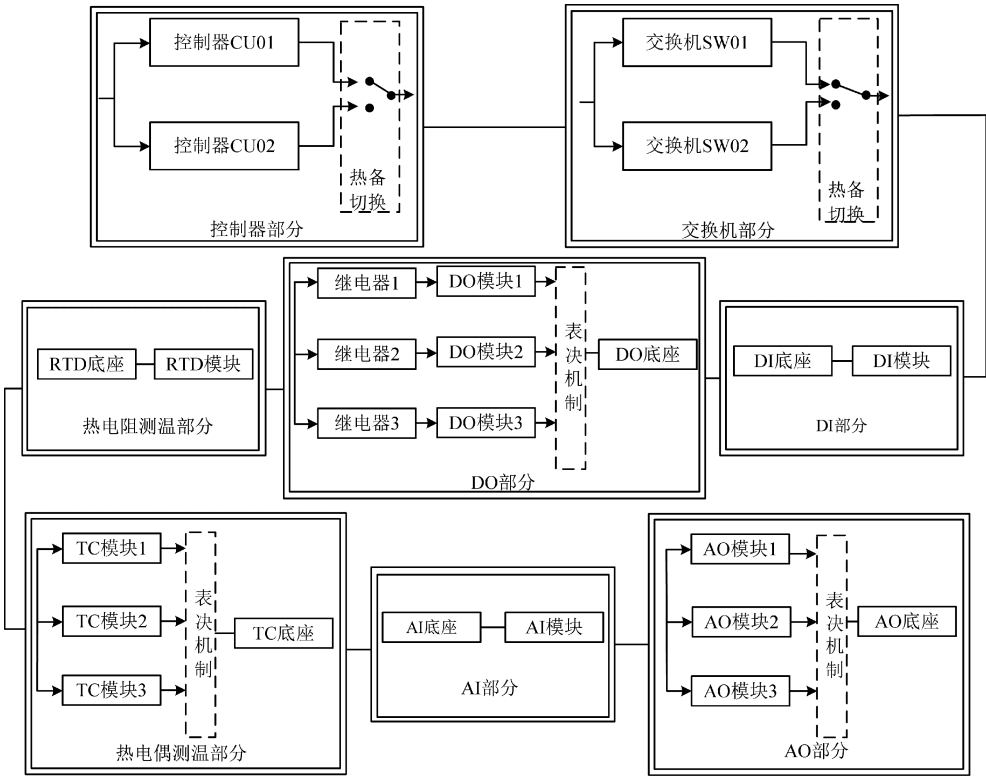


图 7 NuCON 最小硬件配置可靠性逻辑结构框图

Fig. 7 Reliability logic structure block diagram of minimum hardware configuration of NuCON

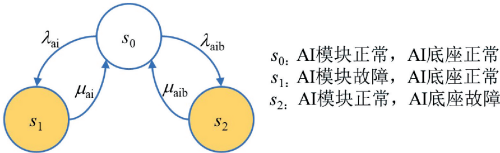


图 8 AI Markov 模型状态转移图

Fig. 8 State transition of the AI Markov model

CU02 发生故障,不会影响 CU01 的正常工作。图 9 所示为控制器 CU 的 Markov 模型,CU01 的故障率和修复率分别为 λ_{cu1} 和 μ_{cu1} ,CU02 的故障率和修复率分别为 λ_{cu2} 和 μ_{cu2} 。

AO、DO 和热电偶测温部分同时有表决结构和串联结构。以最复杂的 DO 为例,3 个继电器和 3 个 DO 模块分别串联,形成 3 个串联支路,并采取“三取二”的表决机制输出表决结果。当 3 个串联支路中的 1 个支路发生故障时,其余两个支路正常工作,不影响表决结

转为工作状态,CU01 修复后进入热备状态;当热备件

表 1 各模块故障率数据

Table 1 Failure rate data of each module

模块名称	故障率 ($\times 10^{-6}/\text{h}$)	模块名称	故障率 ($\times 10^{-6}/\text{h}$)
控制器 CU	4.62	AI 模块	5.452
交换机 SW	0.499	AI 底座	3.063
AO 模块	4.022	DI 模块	6.183
AO 底座	5.632	DI 底座	2.043
DO 模块	4.661	RTD 模块	6.569
DO 底座	5.432	RTD 底座	1.532
TC 模块	7.637	继电器模块	4.49
TC 底座	4.49		

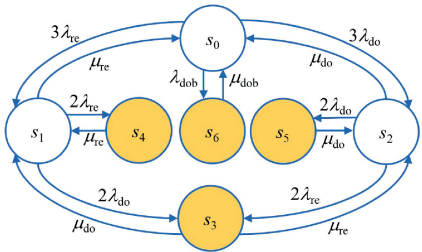


图 10 DO Markov 模型状态转移图

Fig. 10 State transition of the DO Markov model

3.2 概率模型检测器 PRISM

概率模型检测器 PRISM^[17-18]可用于分析具有概率行为的系统,并进行形式化验证,运行原理是基于二元决策图(binary decision diagrams, BDDs)和多终端二进制决策图(multi-terminal binary decision diagrams, MTBDDs)的符号数据结构和算法。支持多种概率模型:离散时间 Markov 链(discrete time Markov chain, DTMC)、连续时间 Markov 链(continuous time Markov chain, CTMC)、Markov 决策过程(Markov decision process, MDP)、概率定时自动机(probabilistic timed automata, PTA)。

除了建模分析的功能,PRISM 还集成了一个离散事件模拟引擎^[20],该引擎具有基于蒙特卡洛方法的仿真验证功能。

3.3 NuCON 控制系统可靠性分析

基于 PRISM 可以得到 NuCON 控制系统最小硬件配置情况下的不可用率曲线,如图 11 所示。由图 11 可知,随着时间 t 的增加,不可用率将趋于定值,即为系统的稳态不可用率,结果表明系统的稳态不可用率约为 1.616×10^{-4} ,稳态可用率约为 99.984%。

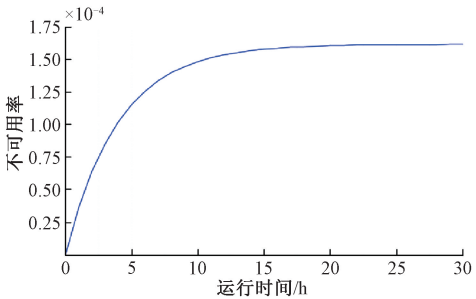


图 11 NuCON 控制系统不可用率曲线

Fig. 11 Unavailability curve of the NuCON control system

参考《DL/T 659—2006 火力发电厂分散控制系统验收测试规程》中“自开始计算系统可用率的时间起,分散控制系统连续运行 60 d,即 1 440 h,其间累计故障停用时间小于 1.4 h,即可认为完成可用率试验”对 NuCON 控制系统进行连续运行测试,实际测试结果为 NuCON 控制系

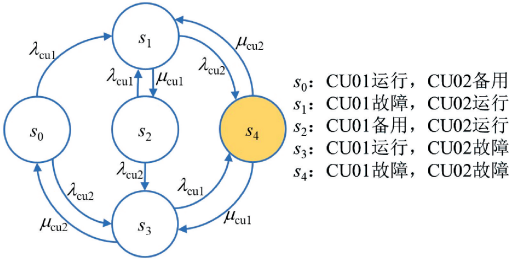


图 9 CU Markov 模型状态转移图

Fig. 9 State transition of the CU Markov model

果。但是当两个支路都有模块发生故障,DO 失效,控制系统失效停机,这 3 个支路组成的表决部分和 DO 底座形成串联关系。为了更加直观地展示,表 2 为 DO 的状态信息,图 10 所示为 DO 的 Markov 模型状态转移图,继电器的故障率和修复率用 λ_{re} 和 μ_{re} 表示,DO 模块的故障率用 λ_{do} 和 μ_{do} 表示,DO 底座的故障率和修复率用 λ_{dob} 和 μ_{dob} 表示。

表 2 DO 状态信息

Table 2 Status information of DO

状态表示	详细状态信息
s_0	DO 底座正常,DO 模块正常,继电器正常
s_1	DO 底座正常,DO 模块正常,一个继电器故障
s_2	DO 底座正常,一个 DO 模块故障,继电器正常
s_3	DO 底座正常,一个 DO 模块和与其非串联的一个继电器故障
s_4	DO 底座正常,DO 模块正常,两个继电器故障
s_5	DO 底座正常,两个 DO 模块故障,继电器正常
s_6	DO 底座故障,DO 模块正常,继电器正常

统在 1 440 h 内可以连续无故障运行,表明 NuCON 控制系统满足该可靠性验收要求。

由于进一步实际测试需要经过上万小时运行才能得到可用率结果,具有实测难度大、耗时长、与人机接口站联合测试成本高的问题,因此采用 PRISM 中的模拟引擎进行仿真分析。运用该离散事件模拟引擎,直接仿真 NuCON 控制系统运行的过程,得到控制系统 PRISM 模型正常工作时间和修复时间,统计这些时间以判断是否达到 NuCON 控制系统 99.9% 的可用率指标。基于《DL/T 659—2006 火力发电厂分散控制系统验收测试规程》设置仿真时间为 2 880 h,进行 500 次仿真,结果如图 12 所示。由图 12 可知,系统共有 41 次失效,这 41 次失效中修复时间分布在 0.12~17.32 h,平均不可用率为 1.068×10^{-4} ,平均可用率为 99.989%,两种不同的方式得到的结果具有很高的一致性。

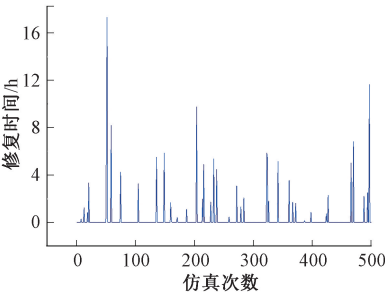


图 12 修复时间分布
Fig. 12 Distribution of repair time

3.4 灵敏度分析

为了全面分析不同条件下 NuCON 控制系统的可靠性,分别做了如下 3 方面的灵敏度测试:1)改变部件的修复时间;2)增减热备和冗余部件数量;3)扩大系统规模。

如图 13 所示,当部件的平均修复时间增长,系统的不可用率也随之增加。对比各个部件的平均修复时间可知,当修复时间大于等于 25 h 时,不满足可用率不小于 99.9% 的技术目标,与部件修复时间为 25 h 时系统的不可用率 1.009×10^{-3} 相比,24、12、4 h 的不可用率分别降

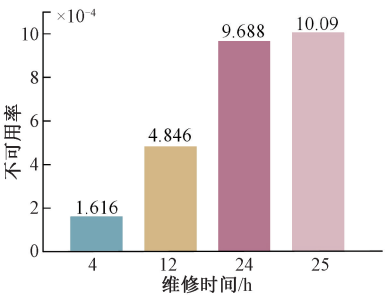


图 13 不同平均修复时间下的不可用率
Fig. 13 Unavailability under different repair time

低了 3.98%、51.97%、83.98%,最终平均修复时间参考核电机组仪控系统的修复时间要求^[15],选择了 4 h。

如图 14 所示,根据控制器 CU 和交换机 SW 有/无热备,模块 AO、DO 和 TC 有/无表决冗余进行对比测试。当系统既没有热备结构也没有表决结构时,系统的不可用率约为 3.263×10^{-4} 。在上述系统中仅增加热备结构、仅增加表决结构、同时增加热备和表决结构,不可用率分别降低了 6.28%、44.22%、50.48%。

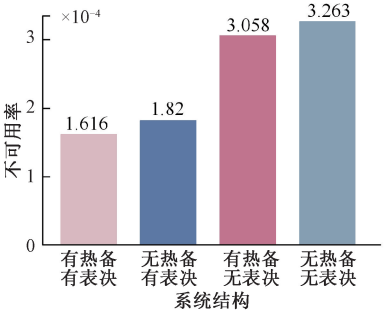


图 14 不同系统结构下的不可用率
Fig. 14 Unavailability under different system structure

综合图 13 和 14 可知,通过减少修复时间和增加冗余、热备部件,可以降低 NuCON 控制系统不可用率,提升容错能力,进而提高系统整体可靠性。

上述分析都是针对 NuCON 控制系统最小硬件配置的情况。为了进一步研究控制系统的整体规模对可靠性的影响,在原来的最小系统之上分 3 种情况进行测试,此时系统的不可用率如表 3 所示,与原系统相比分别增长了 13.86%、27.85%、34.96%。由不可用率数据可以看出,通常系统整体的规模越大、包含 AI、AO 等 I/O 功能模块越多,控制系统的不可用率越高。

表 3 不同系统规模测试情况	
Table 3 Test of different system scale	
系统规模	不可用率($\times 10^{-4}$)
最小硬件配置	1.616
最小硬件配置串联一个 AO	1.84
最小硬件配置串联两个 AO	2.066
最小硬件配置串联一个 AO 和一个 AI	2.181

4 结 论

本文建立了国产重型燃气轮机 NuCON 控制系统可靠性的 Markov 模型,在此基础上开展系统可靠性研究,分析得出以下结论。串联、表决、热备等 Markov 模型可以有效表征 NuCON 控制系统的各个组成部分,相比于只

考虑故障率的 DFM、DFT 等方法,Markov 模型法进一步考虑修复率,从而得到不可用率,对于控制系统可靠性研究具有模型完备、实用性强的优势。PRISM 对于计算分析控制系统可靠性具有优势,可以把理论方法与工程应用相结合。尽管 Markov 模型体量大,但是运用 PRISM 对其进行模块化建模,并组合各个模块,仍可以得到与 Markov 模型对应的 PRISM 模型。对控制系统不可用率产生影响的主要因素是部件的故障率、修复率,虽然部件的故障率为定值,但是可以通过增加热备、表决等冗余结构和缩短部件的修复时间,降低系统的不可用率,提升系统的可靠性。

参考文献

- [1] PETROLEUM B. Statistical review of world energy 2022[R]. London: BP p.l.c., 2022.
- [2] 李璟. 燃气轮机控制系统的控制方法[J]. 设备管理与维修, 2020(10): 103-104.
- LI J. Control method of gas turbine control system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2020(10): 103-104.
- [3] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2021[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2022.
- China Electricity Council. Annual development report of China's Power Industry 2021[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2022.
- [4] 胡敏. 《能源技术革命创新行动计划(2016-2030年)》正式发布[J]. 炼油技术与工程, 2016, 46(7): 61.
- HU M. 《Action plan for energy technology revolution and innovation(2016-2030)》was officially released[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2016, 46(7): 61.
- [5] EKSTROM T E. Reliability/availability guarantees of gas turbine and combined cycle generating units[C]. Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, 1994: 2209-2225.
- [6] GAWARD H L, MURALI N, SWAMINATHAN P. Reliability analysis by FMEA method for object oriented distributed digital control system design model of nuclear power plant[C]. 2010 2nd International Conference on Reliability, Safety and Hazard-Risk-Based Technologies and Physics-of-Failure Methods, IEEE, 2010: 489-492.
- [7] 许高斌, 余智, 徐礼建, 等. 复杂环境电容式微加速度传感器可靠性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 154-159.
- XU G B, YU ZH, XU L J, et al. Reliability analysis for MEMS accelerometer under multiple environments[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 154-159.
- [8] 陈东宁, 许敬宇, 姚成玉, 等. 多维 T-S 故障树及重要度分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 54-64.
- CHEN D N, XU J Y, YAO CH Y, et al. Multi-dimension T-S fault tree and importance measure analysis methodology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 54-64.
- [9] 宗树枫, 胡立生, 韩寅驰, 等. 基于可靠性框图模型的核电站非安全级控制系统可靠性分析[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(4): 48-49, 52.
- ZONG SH F, HU L SH, HAN Y CH, et al. Nuclear power plant non-safety control system reliability analysis based on RBD[J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(4): 48-49, 52.
- [10] 殷勇, 叶顺流, 周勇. 基于数字化平台的柴油机电控系统可靠性计算[J]. 自动化仪表, 2021, 42(1): 67-72.
- YIN Y, YE SH L, ZHOU Y. Reliability calculation of diesel engine electronic control system based on digital platform[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(1): 67-72.
- [11] 朱耀东, 徐帅, 张建忠. 多电平变流器系统可靠性建模与分析[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 70-78.
- ZHU Y D, XU SH, ZHANG J ZH. Reliability modeling and analysis of multilevel converter systems[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 70-78.
- [12] 周世梁, 王浩, 田聪. 动态流图法对核电厂数字化仪控系统的可靠性评价[J]. 核科学与工程, 2018, 38(1): 88-98.
- ZHOU SH L, WANG H, TIAN C. Dynamic flowgraph methodology used in reliability analysis of digital instrumentation and control system in NPP[J]. Nuclear Science and Engineering, 2018, 38(1): 88-98.
- [13] 张栋良, 周佳磊. 基于动态故障树的核电站蒸汽发生器液位控制系统可靠性研究[J]. 原子核物理评论, 2021, 38(4): 479-486.
- ZHANG D L, ZHOU J L. Research on reliability of nuclear power plant steam generator liquid level control system based on dynamic fault tree[J]. Nuclear Physics Review, 2021, 38(4): 479-486.
- [14] 王月太, 吴文艾, 高贤辉. 基于动态故障树的车站计算机联锁系统冗余结构可靠性研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(4): 31-34.
- WANG Y T, WU W AI, GAO X H. Research on reliability of redundant structure of station computer interlocking system based on dynamic fault tree[J]. Automation & Instrumentation, 2021(4): 31-34.

- [15] 周世梁, 陈浠毓, 张磊, 等. 基于概率模型检测器的核电厂蒸汽发生器水位控制系统可靠性分析[J]. 核科学与工程, 2020, 40(6): 1019-1026.
ZHOU SH L, CHEN X Y, ZHANG L, et al. Reliability analysis of steam generator water level control system in nuclear power plant based on probabilistic model detection[J]. Nuclear Science and Engineering, 2020, 40(6): 1019-1026.
- [16] 马河涛, 黄守道, 饶宏, 等. 基于马尔可夫过程的柔性直流输电系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 10-16.
MA H T, HUANG SH D, RAO H, et al. Reliability analysis of VSC-HVDC system based on Markov process[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 10-16.
- [17] 侯翌, 杨培林, 徐凯. 概率行为树模型转化为模型检测模型方法研究[J]. 机械设计与制造, 2020(8): 94-98.
HOU Y, YANG P L, XU K. Research on conversion from probabilistic behavior tree model to formal model of model checking[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(8): 94-98.
- [18] 毛昕怡, 钮俊, 丁雪儿, 等. 基于模型检测的微服务组合平台 QoS 验证[J]. 计算机应用, 2020, 40(11): 3267-3272.
MAO X Y, NIU J, DING X ER, et al. QoS verification of microservice composition platform based on model checking[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(11): 3267-3272.
- [19] 李志强, 徐廷学, 安进, 等. 冗余系统共因失效动态贝叶斯网络建模[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 190-198.
LI ZH Q, XU T X, AN J, et al. Common cause failure modeling for redundant system based on dynamic Bayesian network [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 190-198.
- [20] KWIATKOWSKA M, NORMAN G, PARKER D. Advances and challenges of probabilistic model checking[C]. 2010 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Monticello, IEEE, 2010: 1691-1698.

作者简介



仲心萌, 2020 年于华北电力大学获得学士学位, 现为华北电力大学硕士研究生, 主要研究方向为重型燃气轮机控制系统可靠性。

E-mail: zxm_ncepu@163.com

Zhong Xinmeng received her B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2020. She is currently a master student at North China Electric Power University. Her main research interest is control system reliability of heavy-duty gas turbine.



房方 (通信作者), 分别在 1998 年和 2001 年于华北电力大学(保定)获得学士学位和硕士学位, 2005 年在华北电力大学获得博士学位, 现任华北电力大学教授、博士生导师, 主要研究方向为发电过程信息化智能化理论与技术、综合能源系统分析与优化、新能源发电自动化技术与系统等。

E-mail: ffang@ncepu.edu.cn

Fang Fang (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from North China Electric Power University (Baoding Campus) in 1998 and 2001, and received his Ph. D. degree from North China Electric Power University in 2005. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at North China Electric Power University. His main research interests include theory and technology of informatization and intelligence in power generation process, analysis and optimization of integrated energy system, automation technology and systems of new energy power generation etc.



王巍, 分别在 1997 年、1999 年和 2002 年于哈尔滨工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为国核自仪系统工程有公司正高级工程师, 主要研究方向为电站控制系统设计和重型燃气轮机控制技术。

E-mail: wangwei@snpas.com.cn

Wang Wei received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Harbin Institute of Technology in 1997, 1999 and 2002, respectively. He is currently a senior engineer at State Nuclear Power Automation System Engineering Company, Ltd. His main research interests include control system design of power station and control technology of heavy-duty gas turbine.