

融合 Markov 法和 GO 法的轨道交通 安全主机安全性研究

潘洪亮^{1,2,3} 于成龙¹ 李 迪^{1,2} 王 昊¹ 孙敏达^{1,2}

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 201804, 上海; 2. 高速磁浮运载技术全国重点实验室, 201804, 上海; 3. 同济大学磁浮交通工程技术研究中心, 201804, 上海)

摘 要 [目的] 轨道交通安全主机是列车运行控制系统的核心, 有必要对轨道交通安全主机进行安全性研究。[方法] 介绍了三取二和二乘二取二两种安全主机系统架构, 提出融合 Markov 法与 GO 法的安全主机定量计算方法, 并进行了算例验证。[结果及结论] 在相同工作时间内, 电源模块的安全性下降最快, 在实际应用中, 应特别注意安全主机电源模块的安全性。在初始工作时间内, 二乘二取二安全主机的安全性高于三取二安全主机的安全性, 但两种安全主机的安全性差异不大; 随着工作时间的增加, 两种安全主机的安全性均有所下降。采用所提 Markov-GO 联合模型能够实现安全主机的安全性定量分析。

关键词 轨道交通; 安全主机; 安全性研究

中图分类号 U270; U298.1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.12.010

Safety Research on Rail Transit Safety Hosts by Integrating Markov Method and GO Method

PAN Hongliang^{1,2,3}, YU Chenglong¹, LI Di^{1,2},
WANG Hao¹, SUN Minda^{1,2}

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, 201804, Shanghai, China; 2. State Key Laboratory of High-speed Maglev Transportation Technology, 201804, Shanghai, China; 3. Tongji University Maglev Transportation Engineering Technology R & D Center, 201804, Shanghai, China)

Abstract [Objective] Rail transit safety hosts are the core of the train operation control system, and it is necessary to conduct safety research on the rail transit safety hosts. [Method] The system architectures of the 2-out-of-3 safety host and the double 2-vote-2 safety host are introduced. A quantitative calculation method for the safety hosts that combines Markov method and GO method is proposed and verified through actual example. [Result & Conclusion] Within the same working period, the safety of the power module decreases the fastest. So in practical applications, special attention should be paid to the safety of the power module in the safety hosts. In the initial

working period, the security performance of the double 2-vote-2 safety host is higher than that of the 2-out-of-3 safety host, but the difference in security performance between the two safety hosts is not significant; with the increase of working time, the security performance of both safety hosts decreases. Adoption of the proposed Markov-GO joint model can achieve safety quantitative analysis of the safety hosts.

Key words rail transit; safety host; safety research

轨道交通事故将导致重大生命财产损失, 因此轨道交通的安全性在轨道交通系统中扮演着重要的角色。列车运行控制系统是实现轨道交通系统超速防护、紧急制动、故障导向安全等功能的重要系统, 轨道交通安全主机是列车运行控制系统的核心, 即使在发生安全故障的情况下, 也能够实现故障导向安全的计算机系统^[1]。因此, 安全主机在轨道交通系统的安全性问题中发挥着举足轻重的作用, 安全主机的安全性研究已成为了研究热点。

安全主机有三取二和二乘二取二两种典型架构类型。三取二表示系统由 3 个功能相同的模块和 1 个表决器组成, 只要 3 个模块中任意 2 个模块的输出一致, 则表决器的输出与这两个模块的输出相同。二乘二取二表示系统中有主系和次系两个子系统, 每个子系统有 2 个独立的模块, 经二取二表决器后对外输出结果。当主系故障时, 次系输出整个系统的运算结果。

安全性研究的常用方法为 FMECA (故障模式、影响分析和危害性分析)、故障树、Markov 法、GO 法及 Monte Carlo 仿真模拟法等^[2]。Markov 法在安全主机单模块安全性研究中的应用较为广泛, 应用效果较好, 能全面建立单模块安全性模型, 获得单模块安全性时变曲线, 但针对整体建立的 Markov 模型存在模型复杂、计算结果不准确、忽视安全主机部件间的关联等不足之处。GO 法是针对系统整体, 以系统安全运行行为导向的安全性分析方法, GO

法在系统整体安全性分析中具有建模方便、计算结果准确的优点。

基于此,本文融合 Markov 法和 GO 法,对已有三取二、二乘二取二的安全主机开展研究,分析三取二、二乘二取二安全主机的工作原理,将其工作原理图进行 GO 模型转换,采用 Markov-GO 联合模型对两种安全主机进行安全性分析。其中,采用 Markov 法对安全主机中的单模块进行安全性时变分析,采用 GO 模型对整体进行安全性时变分析,进

$$P(X(t_n) \leq x_n | X(t_1) = x_1, X(t_2) = x_2, \dots, X(t_{n-1}) = x_{n-1}) = P(X(t_n) \leq x_n | X(t_{n-1}) = x_{n-1}) \quad (1)$$

此处 $x_n \in \mathbf{R}$, 则称 $\{X(t), t \in T\}$ 为 Markov 过程, 简称马氏过程。

给定 Markov 链 $\{X_s, s \geq 0\}$ 如果对一切非负整数 s , 一切系统状态 $i, j \in E = \{1, 2, \dots, n\}$, s 步转移概率 $P(X_{s+b} = j | X_b = i)$ 与起始时刻 b 无关, 则称 $\{X_s, s \geq 0\}$ 为齐次 Markov 链, 或时齐 (即时间齐次) Markov 链。

本文中使用的模型为齐次 Markov 链, 对于齐次 Markov 链 $\{X_s, s \geq 0\}$, 记 $p_{ij}(s) = P(X_{s+b} = j | X_b = i)$, 则它与起始时刻无关, 而只与起始时刻、终止时刻的时间间隔有关, 于是有 $p_{ij}(s) = P(X_s = j | X_0 = i)$, 当 $s=1$ 时, 称 $p_{ij}(1)$ 为一步转移概率, 通常记 $p_{ij}(1) = p_{ij}$, 当 $s=0$ 时作如下规定:

$$p_{ij}(0) = P(X_0 = j | X_0 = i) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}(s) = [p_{ij}(s)] \quad (3)$$

式 (3) 即为状态转移矩阵, 转移概率有以下性质:

1) s 步转移概率矩阵 $\mathbf{P}(s)$ 的全体元素介于 0 与 1 之间, 且每一行元素相加永远是 1^[3]。

2) 对于有限齐次 Markov 链, $\mathbf{P}(s)$ 是一个有限阶矩阵, 否则 $\mathbf{P}(s)$ 是一个无限阶矩阵。则有限齐次 Markov 链的 s 步转移概率矩阵为:

$$\mathbf{P}(s) = \begin{bmatrix} p_{11}(s) & p_{12}(s) & \cdots & p_{1n}(s) \\ p_{21}(s) & p_{22}(s) & \cdots & p_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1}(s) & p_{n2}(s) & \cdots & p_{nn}(s) \end{bmatrix} \quad (4)$$

3) 当 $s=1$ 时, 称 $\mathbf{P}(1)$ 为一步转移概率矩阵, 记 $\mathbf{P}(1) = \mathbf{P}$, 则一步转移概率矩阵为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

而获得安全主机的整体安全性情况。

1 安全性方法原理及安全主机工作机理

1.1 Markov 模型

给定随机过程 $\{X(t), t \in T\}$, $X(t)$ 为 t 时刻下的系统状态。如果对任意的正整数 $n \geq 3$, 任意的 $t_1 < t_2 < \cdots < t_n, t_a \in T, a = 1, 2, \dots, n$, 任意时刻下的系统状态 $x_1, x_2, \dots, x_{n-1} \in E$ (E 为 $X(t)$ 的状态空间), 总有:

1.2 GO 模型

安全性的主要技术指标为可靠度、失效概率密度、累计失效概率、失效率及维修率等。GO 法是一种以成功为导向的系统分枝概率技术, 其基本思想是把系统图或工程图直接转换成 GO 模型并进行 GO 运算^[4]。GO 法中的 GO 模型与系统实际元器件对应, 具有结构简洁、算法简单等优点^[5]。GO 模型主要由操作符和信号流构成, 操作符主要代表系统中的构件或逻辑关系, 操作符之间用信号流连接, 代表具体的物流或逻辑上的进程。

GO 法使用操作符来代表单元的功能及输入、输出之间的逻辑关系, 单元主要指系统中的元件、部件或子系统。目前, 已经进行标准定义的操作符有 17 种^[6], 用数字 1~17 表示, GO 法模型操作符示意图如图 1 所示。一定类型的操作符代表一定的单元功能, 不同类型的操作符具有不同的运算规则。

信号流用于表征系统单元的输入、输出及单元之间的关联, 信号流连接 GO 操作符形成 GO 图, 信号流的属性是状态值和状态概率。GO 法可以应用于多状态系统, 但始终满足以下关系:

$$\sum_{k=1}^N P_k = 1 \quad (6)$$

式中:

k ——系统状态, $1 \leq k \leq N$;

P_k ——系统处于 k 状态的概率。

安全主机共有两种状态, 状态 1 代表成功, 状态 2 代表故障, 系统处于故障状态和成功状态的概率分别为 P_1 和 P_2 , 则有 $P_1 + P_2 = 1$ 。

假设安全主机的 GO 法模型中操作符为 γ , 输入信号为 δ 的状态概率为 $P_\delta(\gamma)$, 输出信号为 δ 的状态概率为 $Q_\delta(\gamma)$, 操作符 γ 的状态概率为 $A_\gamma(\delta)$, 其中 $\delta = 1, 2$, 在 GO 法模型中始终存在:

$$\begin{cases} P_{\delta=1}(\gamma) + P_{\delta=2}(\gamma) = 1 \\ Q_{\delta=1}(\gamma) + Q_{\delta=2}(\gamma) = 1 \end{cases} \quad (7)$$

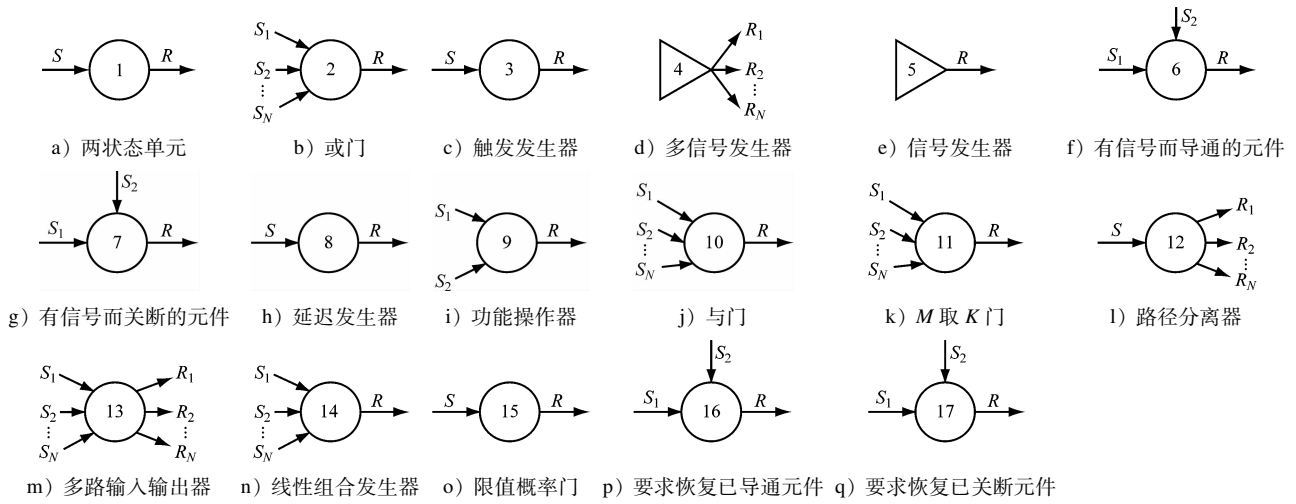


图 1 GO 法模型操作符示意图

Fig. 1 Schematic diagram of GO model operators

式中:

$P_{\delta=1}(\gamma)$ ——操作符 γ 输入信号为状态 1 的概率;

$P_{\delta=2}(\gamma)$ ——操作符 γ 输入信号为状态 2 的概率;

$Q_{\delta=1}(\gamma)$ ——操作符 γ 输出信号为状态 1 的概率;

$Q_{\delta=2}(\gamma)$ ——操作符 γ 输出信号为状态 2 的概率。

本文使用到的操作符简介如下:

1) 类型 1 操作符——两状态单元。两状态单元可以表示为:

$$\begin{cases} Q_{\delta=1}(1) = P_{\delta=1}(1)A_{\delta=1}(1) \\ Q_{\delta=2}(1) = 1 - Q_{\delta=1}(1) \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$A_{\delta=1}(1)$ ——操作符 1 为状态 1 的概率。

2) 类型 2 操作符——或门。或门表示多个输入与一个输出之间的逻辑关系,或门的输出信号状态取决于多个输入信号中的最小状态值,可以表示为:

$$Q_{\delta=1}(2) = 1 - \prod_{n=1}^{M_2} P_{\delta=2}(\gamma_n) \quad (9)$$

式中:

γ_n ——第 n 个操作符;

M_2 ——操作符 2 的输入信号个数。

3) 类型 6 操作符——有信号而导通的元件。该操作符能够模拟有两个信号输入才有输出的元

件,输入信号主要分为主输入信号和次输入信号,可以表示为:

$$Q_{\delta=1}(6) = P_{S_1;\delta=1}(6)P_{S_2;\delta=1}(6)A_{\delta=1}(6) \quad (10)$$

式中:

$P_{S_1;\delta=1}(6)$ ——操作符 6 的主输入信号 S_1 为状态 1 的概率;

$P_{S_2;\delta=1}(6)$ ——操作符 6 的次输入信号 S_2 为状态 2 的概率。

4) 类型 10 操作符——与门。与门表示多个输入与一个输出之间的逻辑关系,与门的输出信号状态取决于多个输入信号中的最大状态值,可以表示为:

$$Q_{\delta=1}(10) = \prod_{n=1}^{M_{10}} P_{\delta=1}(10) \quad (11)$$

式中:

M_{10} ——操作符 10 的输入信号个数。

5) 类型 12 操作符——路径分离器。该操作符具有一个输入信号, M_{12} 个输出信号,输入信号可以选择从某一路径输出,当选择某一路径输出时,其他路径均无输出,可以表示为:

$$Q_{R_m;\delta=1}(12) = P_{\delta=1}(12)A_{R_m;\delta=1}(12) \quad (12)$$

式中:

m ——路径编号, $1 \leq m \leq N$;

$Q_{R_m;\delta=1}(12)$ ——操作符 12 选择输出路径 R_m 的概率;

$A_{R_m;\delta=1}(12)$ ——操作符 12 输出路径为 R_m 的概率。

1.3 轨道交通安全主机

安全主机(二取二、三取二)主要由 CPU(中央处理器)主板、电源、双路 RS422 通信板、双路 CAN(控制器局域网总线)通信板、双路光纤通信板、双路以太网通信板、背板总线等部件组成。二取二安全主机内部含有 2 块 CPU,计算结果通过二取二表决器输出;三取二安全主机内部含有 3 块 CPU,计算结果通过三取二表决器进行输出。二乘二取二安全主机由两台互为冗余的二取二安全主机组成,

即两台安全主机同时工作,一台为工作机,另一台为冗余机。两台安全主机计算状态及结果相同,在工作机发生故障时,通过两台安全主机之间的通信模块进行冗余机切换,进而实现故障导向安全,保障列车正常运行。在实际应用工程中,三取二、二乘二取二安全主机为典型配置,因此本文对这两种安全主机进行对比研究。三取二及二乘二取二安全主机工作原理示意图如图 2 所示。

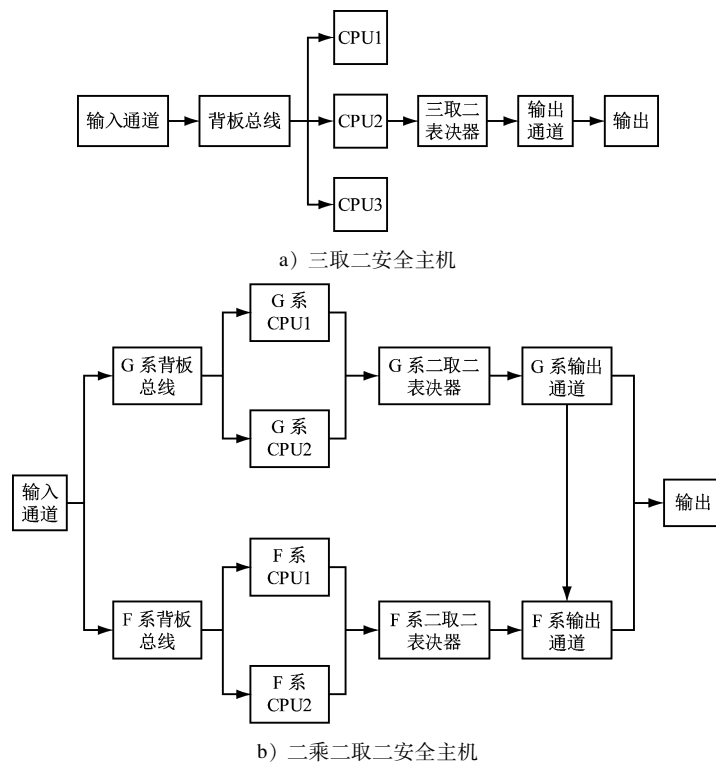


图2 三取二及二乘二取二安全主机工作原理示意图

Fig. 2 Working principle diagram of 2-out-of-3 safety host and double 2-vote-2 safety host

在安全主机中,CPU 主板拥有 2 块或 3 块 CPU,每块 CPU 对输入数据进行计算,计算结果通过二取二或三取二表决器表决,将结果输出至输出通道,用于控制轨道交通列车运行。但当安全主机计算错误时,安全主机不输出,此时,列车可能会发生危险。而二乘二取二安全主机由 G 系二取二安全主机(以下简称“G 系主机”)、F 系二取二安全主机(以下简称“F 系主机”)组成,若 G 系主机计算结果正确(本文假设 G 系主机为工作机,F 系主机为冗余机),则计算结果直接输出;若 G 系主机计算产生故障,则通过双路 RS422 通信板进行工作机切换,从而保证列车的安全运行。

单一方法对安全主机安全性分析存在模型理

想化、系统潜在风险不确定、人为主观性强等局限性,而 Markov 方法针对简单系统具有较好的应用效果,GO 法对系统整体具有较好的应用效果,因此本文提出 Markov-GO 联合模型,对安全主机的安全性进行分析。

2 融合 Markov 法和 GO 法的安全性算法

2.1 Markov-GO 联合模型

本文所提 Markov-GO 联合模型,即在安全主机进行安全性分析时,对各模块建立 Markov 模型,对各模块安全性进行时变分析。由于安全主机模块较多,冗余性较强,将安全主机工作原理图转换为 GO 图,将各模块的 Markov 模型计算结果输入 GO

图,求解整体系统的安全性。

2.2 单模块 Markov 模型

考虑安全主机中单模块发生故障具有可修复性,因此单部件工作状态有三种,针对安全主机中的单部件运行过程,本文给出如下定义:

定义 $X(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时刻系统工作} \\ 2, & t \text{ 时刻系统故障} \end{cases}$, 其中 $X(t)$

为单模块在时刻 t 的工作状态,为齐次 Markov 链。单部件状态转移概率示意图如图 3 所示。

定义安全主机各部件的工作初始时刻为 0,即初始时刻各状态转移概率为:

$$p_{ij}(0) = P(X_0 = j | X_0 = i) = \begin{cases} 1, & i = j, i, j \in \{1, 2, 3\} \\ 0, & i \neq j, i, j \in \{1, 2, 3\} \end{cases} \quad (13)$$

$[p_1(t) \ p_2(t) \ p_3(t)] = [p_1(t-1) \ p_2(t-1) \ p_3(t-1)]P = [p_1(0) \ p_2(0) \ p_3(0)]P^s$ (15)

式中:

$p_1(0)$ ——初始状态 1 的概率,即系统处于工作状态,取为 1;

$p_2(0)$ ——初始状态 2 的概率,即冗余模块中单模块处于故障状态,取为 0;

$p_3(0)$ ——初始状态 3 的概率,即冗余模块全部处于故障状态,取为 0;

$p_1(t-1)$ —— $t-1$ 时刻状态 1 的概率;

$p_2(t-1)$ —— $t-1$ 时刻状态 2 的概率;

$p_3(t-1)$ —— $t-1$ 时刻状态 3 的概率;

$p_1(t)$ —— t 时刻状态 1 的概率;

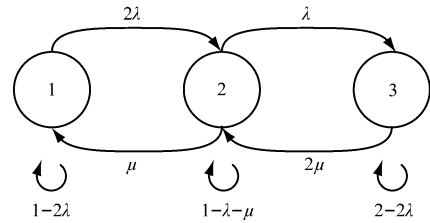
$p_2(t)$ —— t 时刻状态 2 的概率;

$p_3(t)$ —— t 时刻状态 3 的概率。

2.3 整体 GO 模型

采用 GO 法模型将安全主机工作原理图转换为 GO 图,将原理图中的模块转化为操作符,并用信号流连接操作符,求出系统的安全性。由图 2 转化的安全主机 GO 模型如图 4 所示。其中,每个操作符均有 2 种状态,0 代表正常工作状态,1 代表故障状态。图 4 的 GO 模型中使用了 1、2、5、6、10、12 共计 6 种操作符。

安全主机的信号数据为输入模块、电源模块,用操作符 5 代表;在三取二安全主机中,若最终输出正常,即表示整个系统正常,因此使用操作符 1 作为输出模块。在二乘二取二安全主机中,G 系主机、F 系主机任一输出正常,即表示系统正常,因此使用操作符 2 代表两台安全主机的输出逻辑,G 系主机



注: λ 为单模块失效概率; μ 为单模块修复率。

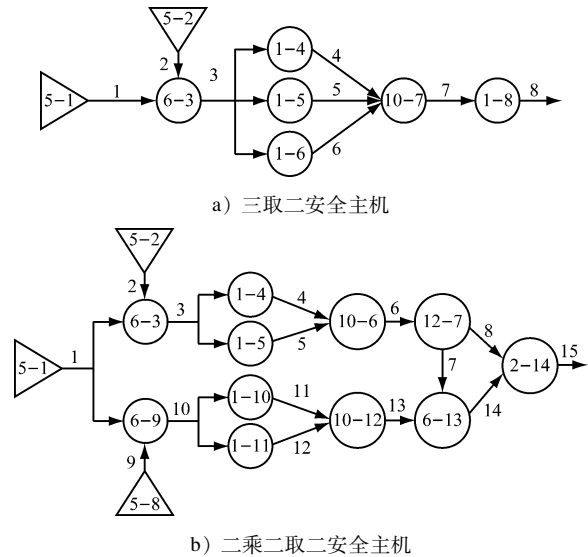
图 3 单部件状态转移概率示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single component state transition probability

单模块状态转移概率矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 1-2\lambda & 2\lambda & 0 \\ \mu & 1-\lambda-\mu & 0 \\ 0 & 2\mu & 1-2\mu \end{bmatrix} \quad (14)$$

因此,单模块在 s 步的概率矩阵为:



b) 二乘二取二安全主机

注:信号流上的数字表示信号流编号,操作符中前一个数字代表操作符类型,后一个数字代表操作符编号,例如 5-1 中的 5 表示操作符 5,1 表示第 1 个操作符。

图 4 三取二及二乘二取二安全主机 GO 图

Fig. 4 GO diagram of 2-out-of-3 safety host and double 2-vote-2 safety host

为工作机,F 系主机为冗余机。当 G 系主机的计算结果正确时,输出结果;否则,工作机切换至 F 系主机,因此使用操作符 12 来代表 G 系主机输出通道。

3 算例验证

3.1 基础数据

为解决安全主机各模块安全性数据难以获取的问题,本文假设安全主机各模块不同品牌但类型

相同的元器件失效率相同,所有元器件修复率均为 0.1。对各模块元器件数目进行统计,并将单模块元器件数目输入 ISOgraph 软件的 Prediction 模块,求解单模块的故障概率。三取二及二乘二取二安全主机系统操作符数据如表 1 和表 2 所示。

表 1 三取二安全主机系统操作符数据

Tab.1 Operator data of 2-out-of-3 safety host system

编号	操作符类型号	模块名称	故障概率
1	5	输入通道	10×10^{-6}
2	5	电源	50×10^{-6}
3	6	背板总线	20×10^{-6}
4	1	CPU1	5×10^{-6}
5	1	CPU2	5×10^{-6}
6	1	CPU3	5×10^{-6}
7	10	三取二表决表	25×10^{-6}
8	1	输出通道	10×10^{-6}

表 2 二乘二取二安全主机系统操作符数据

Tab.2 Operator data of double 2-vote-2 safety host system

编号	操作符类型号	模块名称	故障概率
1	5	输入通道	10×10^{-6}
2	5	G 系主机电源	50×10^{-6}
3	6	G 系主机背板总线	20×10^{-6}
4	1	G 系主机 CPU1	5×10^{-6}
5	1	G 系主机 CPU2	5×10^{-6}
6	10	G 系主机二取二表决表	15×10^{-6}
7	12	G 系主机输出通道	10×10^{-6}
8	5	F 系主机电源	50×10^{-6}
9	6	F 系主机背板总线	20×10^{-6}
10	1	F 系主机 CPU1	5×10^{-6}
11	1	F 系主机 CPU2	5×10^{-6}
12	10	F 系主机二取二表决表	15×10^{-6}
13	12	F 系主机输出通道	10×10^{-6}
14	2	或门	

3.2 结果分析

二乘二取二安全主机由两台二取二安全主机组成,因此在对单模块使用 Markov 模型进行安全性时变分析时,只需考虑单一安全主机中的各模块,以及三取二表决表模块的安全性即可。根据式(13)、式(14)、式(15),以及表 1、表 2 中的单模块失效率数据,获得的单部件可靠度曲线如图 5

所示。

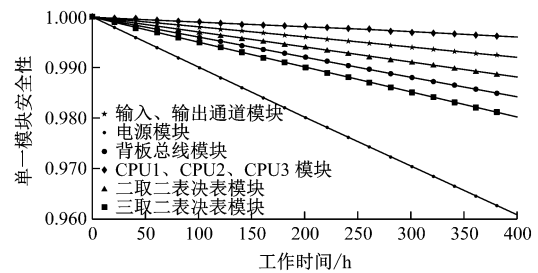


图 5 单部件可靠度曲线

Fig.5 Reliability curves of single component

由图 5 可知:输入通道、输出通道、电源、背板总线、CPU1、CPU2、CPU3、二取二表决表、三取二表决表模块的安全性随着工作时间逐渐下降;在相同时间内,相比于其他模块,电源模块的安全性下降最快,其他模块的安全性下降较缓慢。安全主机为多模块协调工作的整体系统,任何一个模块的故障都会引起安全主机的非正常工作,进而导致轨道交通列车危险运行,因此应提升安全主机系统整体安全性的薄弱环节,即提升电源模块的安全性。

将安全主机各模块的安全性输入 GO 模型(仅计算当前时刻安全主机的安全性),根据单模块 Markov 模型安全性计算结果,使用 GO 模型对安全主机整体进行安全性时变分析。两种安全主机的安全性曲线如图 6 所示。

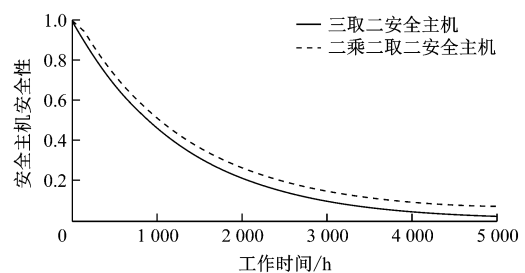


图 6 两种安全主机的安全性曲线

Fig.6 Security curves of two safety hosts

由图 6 可知:初始工作时间内,二乘二取二安全主机的安全性高于三取二安全主机的安全性,但两种安全主机的安全性差异不大;随着工作时间的增加,两种安全主机的安全性均有所下降。出现这一现象的主要原因为二乘二取二安全主机的两台安全主机工作时长相同,冗余状态安全主机虽处于工作状态,但不参与当前运行控制工作;随着工作时间的增长,G 系主机和 F 系主机的安全性均逐渐下降,导致二乘二取二安全主机的整体安全性比三取

二安全主机的安全性减少幅度小。

4 结语

本文提出一种融合 Markov 法与 GO 法的安全主机安全性计算方法,以安全主机各组成模块为研究对象,采用 Markov 模型对单模块进行安全性时变分析,采用 GO 模型对安全主机系统整体进行安全性时变分析,避免了 Markov 模型在系统整体建模时模型复杂、转移状态复杂、计算量大等缺点,克服了 GO 模型中单模块状态变化考虑欠缺的不足。

参考文献

- [1] 申竹林,代飞. 轨道交通安全计算机可靠性分析[J]. 机车电传动, 2021(1): 151.
SHEN Zhulin, DAI Fei. Reliability analysis of vital computer in railway[J]. Electric Drive for Locomotives, 2021(1): 151.
- [2] 施玲. 城轨车辆制动系统故障及可靠性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
SHI Ling. Fault and reliability analysis of braking system of urban rail vehicles[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [3] 董皓,王何斐,雷佳祺. 基于马尔可夫链的旅游轨道交通客流分配模型[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(9): 38.
DONG Hao, WANG Hefei, LEI Jiaqi. Passenger flow assignment model of tourist rail transit based on Markov chain[J]. Urban

Mass Transit, 2022, 25(9): 38.

- [4] 沈祖培,高佳. GO 法原理和改进的定量分析方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(6): 16.
SHEN Zupei, GAO Jia. Principle of GO method and improved quantitative analysis method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(6): 16.
- [5] 赵云云,李海燕,靳守杰,等. 基于 GO 法的广州某地铁同相牵引供电系统可靠性分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(6): 162.
ZHAO Yunyun, LI Haiyan, JIN Shoujie, et al. Reliability analysis of cophase traction power supply system of Guangzhou metro based on GO method[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(6): 162.
- [6] 赵志博,多依丽,王博,等. 基于 GO 法与 DBN 的冗余系统可靠性分析[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2020, 40(5): 66.
ZHAO Zhibo, DUO Yili, WANG Bo, et al. Reliability analysis of redundant systems based on GO method and DBN[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2020, 40(5): 66.

· 收稿日期:2022-10-03 修回日期:2023-02-21 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-03 Revised:2023-02-21 Published:2024-12-10
· 通信作者:潘洪亮,副研究员,12139@tongji.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 60 页)

- [2] 李策,王士民,王承震,等. 基于实测内力的大直径水下盾构隧道荷载反演分析[J]. 土木工程学报, 2020, 53(3): 103.
LI Ce, WANG Shimin, WANG Chengzhen, et al. Back analysis of load of large underwater shield tunnel based on measured internal force[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 103.
- [3] 周济民,何川,方勇,等. 黄土地层盾构隧道受力监测与荷载作用模式的反演分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 165.
ZHOU Jimin, HE Chuan, FANG Yong, et al. Mechanical property testing and back analysis of load models of metro shield tunnel lining in loess strata[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 165.
- [4] 肖明清,封坤,李策,等. 复合地层盾构隧道围岩压力计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1836.
XIAO Mingqing, FENG Kun, LI Ce, et al. A method for calculating the surrounding rock pressure of shield tunnels in compound strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

2019, 38(9): 1836.

- [5] 石少刚. 施工荷载下盾构隧道管片力学响应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
SHI Shaogang. Mechanical response analysis of shield tunnel segment under construction load[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [6] 孙俊. 量子行为粒子群优化算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2009.
SUN Jun. Research on quantum behavior particle swarm optimization algorithm[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009.

· 收稿日期:2022-10-23 修回日期:2023-05-02 出版日期:2024-12-10
Received:2022-10-23 Revised:2023-05-02 Published:2024-12-10
· 第一作者:王文和,高级工程师,wangwenhe@shenzhenmc.com
通信作者:徐一帆,助理工程师,swjtuxyf@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license