

文章编号:1671-1637(2012)02-0112-07

磁悬浮列车跨系统运行 Petri 网模型

郑 伟

(北京交通大学 轨道交通运行控制系统国家工程研究中心,北京 100044)

摘 要:根据磁悬浮列车跨系统运行需求,研究了其运行控制系统的总体框架,明确了需要增加的功能子系统。基于系统理论,采用 Petri 网对系统关键属性、列车运行过程及各子系统的功能进行了层次化的建模。最高层模型描述系统整体关键属性,低层模型描述列车运行过程及可靠性。此模型可用来定量分析磁悬浮列车系统层面上跨系统运行时,失败率与各子系统部件可靠性之间的关系。如每年磁悬浮列车跨系统运行失败次数不超过 1 次,则连接相邻列控系统的 2 个通信网,其失效率都需低于 10^{-6} 次 \cdot h $^{-1}$ 。当列车跨系统运行触发时间分别为 0.2、2.0 min,步进时间分别为 4、16 min 时,则跨线运行失败率分别为 1.95×10^{-5} 、 1.65×10^{-5} 次 \cdot h $^{-1}$ 。仿真结果表明:列车跨系统失败率随 a 网和 b 网可靠性的提高而降低,同时随着跨系统触发时间和步进时间的增加而降低。层次化建模分析方法可以根据系统层面的关键属性要求,定量确定各子系统部件的可靠性需求。

关键词:交通控制;磁悬浮列车;跨系统运行;Petri 网;系统理论;层次化模型;可靠性

中图分类号:U266.4

文献标志码:A

Petri net model of maglev train running across different control systems

ZHENG Wei

(National Engineering Center of the Rail Transport Operation Control System,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The general framework of running control system on maglev train was studied according to the running requirements of maglev train running across different control systems. Functional subsystems need to be added was defined. The hierarchical models of system key attributes, maglev operation procedures and the subsystem function were built based on the system theory by using Petri net. The key attributes of whole system were described by the highest model, and the operation procedures of maglev train and the reliabilities of subsystems were presented in the lower level model. The relationship between the failure rates of maglev train running across different control systems and the reliabilities of subsystem components was quantitatively analyzed with the model. It is pointed that the loss ratio of network connecting neighbouring control systems should be lower than 10^{-6} times per hour when the required failure number of maglev train running across different systems is no more than 1 time per year. The failure rates of maglev train running across different control systems are 1.95×10^{-5} and 1.65×10^{-5} times per hour when the triggering times equal 0.2 and 2.0 min respectively, and the stepping times equal 4 and 16 min respectively. Simulation result shows that the failure rates of train running across the boundary decrease when the reliabilities of a and b networks are improved, or

收稿日期:2011-11-17

基金项目:国家自然科学基金项目(60634010);国家 863 计划项目(2011AA010104);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011JB2004)

作者简介:郑 伟(1975-),男,黑龙江哈尔滨人,北京交通大学副教授,工学博士,从事高速轨道交通运行控制系统研究。

the triggering time and stepping time of train are prolonged. The reliability requirements of subsystem components based on the required key attributes of system level are quantantatively identified by using the proposed approach. 9 figs, 14 refs.

Key words: traffic control; maglev train; running across boundary; Petri net; system theory; hierarchical model; reliability

Author resume: ZHENG Wei(1975-), male, associate professor, PhD, +86-10-51684971, wzheng1@bjtu.edu.cn.

0 引言

磁悬浮列车作为一种新型交通工具,与既有轨道交通系统在结构与功能上有所区别,同时具有节能、环保、低噪声等优点^[1]。2002年中国在上海首次建成总长度为31 km的磁悬浮商业运营线。随着中国磁悬浮交通系统的发展及线路规划的需求,将既有线路扩展为长大干线是下一步的研究目标,如在既有龙阳路—浦东机场线路的基础上,从浦东机场延伸至上海临港新城地区。既有线路列控系统无法直接控制新增线路的运行列车,因此,新增线路需要重新配置列控系统。为使磁悬浮列车可以从龙阳路直接运行至临港新城,需要解决列车在多个列控系统之间连续运行,即列车跨系统运行中的技术问题。目前,国内外针对磁悬浮的研究主要集中在磁悬浮的悬浮及电机控制方面^[2-3],在磁悬浮列车长大干线多列控系统分析设计方面的研究尚处于空白状态。

磁悬浮列车长大干线运行控制跨系统交接技术,是指在配置多个列车运行控制系统的线路上,列车运营时需要跨越系统边界,实现其在两个系统之间的交接,同时满足列车跨越时系统的安全及效率需求。磁悬浮列车跨系统交接的总体目标如下。

(1)列车的跨系统运行可以随时由原系统提出,目标系统根据目前本系统车辆运行的密度,判断是否可以安排新列车的运营,之后人工或自动拒绝,或接受原系统的列车跨系统运营请求。

(2)如果列车可以进入目标系统,那么列车可以在不停车、不减速情况下,通过列车的步进过程直接进入目标系统,在目标系统内按照运行图中的既定运行计划运行。

(3)在列车跨系统运行过程中,如果列车超速运行,原系统及目标系统可以合作保证列车安全停车。

(4)在列车进行跨系统运行过程中,两系统中的任何部件发生故障,都有安全的处理方式,可以保证列车安全停车到原系统或目标系统内部的指

定停车点。

(5)列车在下一个系统中可以正常运行。

为了保证列车能够顺利从一个系统跨越到另一个系统,需要对列车的跨越流程进行详细的分析,了解影响列车跨越的因素,确定跨系统运行的系统规范及指导原则。

本文描述了磁悬浮列车跨系统运行的系统结构设计方法,基于系统理论及形式化建模语言 Petri 网,对跨系统过程进行了描述,分析了列车跨系统运行的成功率与系统设备可靠性需求之间的定量关系。

1 总体目标与系统设计

1.1 控制系统设计

既有龙阳路—浦东机场的磁悬浮示范线列车运行控制系统由中央控制系统(Centralized Control System, CCS)、分区控制系统(Decentralized Control System, DCS)及车载控制系统(Vehicle Control System, VCS)组成。中央控制系统主要包括操作终端系统(Operation Terminal System, OTS)、参考计算机(Reference Computer, RC)和列车自动运行(Automatic Train Operation, ATO);分区控制系统包括分区控制计算机(Decentralized Control Computer, DCC)、分区安全计算机(Decentralized Safety Computer, DSC)、分区牵引切断(Decentralized Propulsion Shut-off, DPS)、分区道岔模块(Decentralized Switch Module, DSM)、分区传输计算机(Decentralized Transmission Computer, DTC)、分区无线电系统(Decentralized Radio System, DRS);车载控制系统的主要控制部件为车载安全计算机(Vehicle Safety Computer, VSC)、车载传输计算机(Vehicle Transmission Computer, VTC)及车载无线电系统(Vehicle Radio System, VRS)。浦东机场—临港新城的磁悬浮列车运行控制系统设置与既有示范线保持一致。杨光等对比分析了德国及日本的磁悬浮列控系统结构^[4];张明详细介绍了上海磁悬浮运营线信号系统的总体结构^[5],见图1。

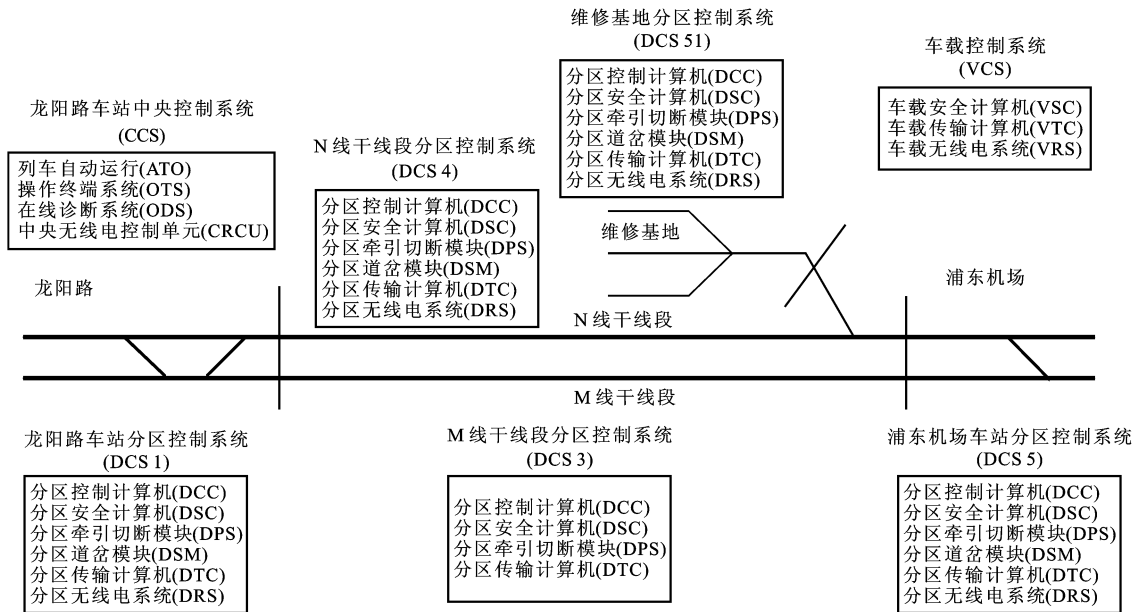


图1 运行控制系统设备配置

Fig.1 Equipment configuration of operation control system

中央控制系统与分区控制系统之间通过控制网络进行连接,分区系统内部各部件通过安全防护网络进行连接,为保证列车的跨线运行,需要在两系统的中央控制系统及相邻分区系统之间进行通信。列控系统的地面结构及增加的通信部分见图2。将发送系统1与目标系统2的中央控制系统分别表示为CCS-1、CCS-2,两系统中的分区控制计算机、分区安全计算机以及分区牵引切断模块也采用相同的表示方式。a网与b网是为列车能够顺利执行跨系统运行而增加的通信网络设备。

1.2 列车跨系统运行过程

根据磁悬浮列车运行的基本原理,列车跨系统运行过程见图3,列车将由发送系统进入到目标系统中运行。在图3中:A为跨系统运行触发点;B为

跨系统步进触发点;C、E为停车点;D为最小速度曲线根部。

(1)当列车运行到跨系统运行触发点A时,CCS-1与CCS-2通过a网开始交换跨系统运行的必要数据;系统1的CCS-1向系统2的CCS-2发送移交列车预告信息和进路请求命令。预告信息包括车次号、列车编组、列车质量、列车长度等信息,进路请求信息包括进路中线路数据、轨道区段数据等。CCS-2接收到CCS-1的进路请求信息后,向CCS-1发回应答,同时通知DSC-2根据联锁系统的信号授权在系统2内排出进路,之后DSC-2向系统1的DSC-1发送进路信息。CCS-1收到CCS-2的应答后,向DCC-1、DSC-1、VSC发送列车准备跨系统运行命令。

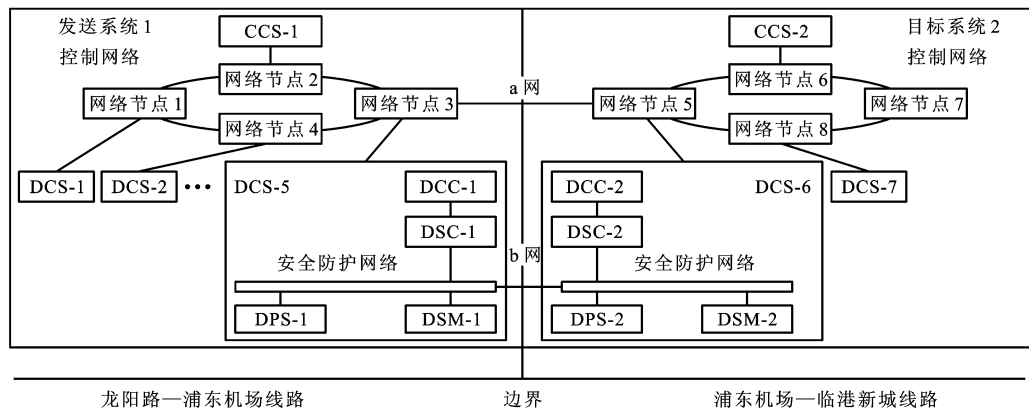


图2 发送系统与目标系统之间的连接方式

Fig.2 Connection framework of transmitting system and target system

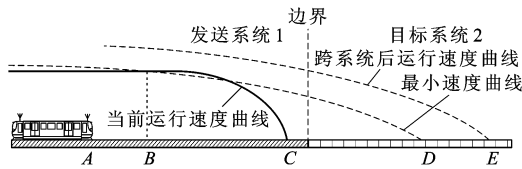


图 3 运行原理

Fig. 3 Running principle

(2)CCS-1 与 CCS-2 通过 a 网交换必备的数据后,列车在点 B 实现跨系统运行的步进步骤。此时列车当前的运行速度大于系统 2 内步进点对应的最小速度曲线的速度,执行步进过程,按照点 E 对应的跨系统后列车运行曲线运行。如果列车在运行到点 B 之前 a 网失效,则列车跨系统运行失败。

(3)从点 B 到边界的过程中,需要 DSC-1 与 DSC-2 通过 b 网保持通信,才可以保证列车安全步进到系统 2 中。在此过程中,如果 b 网失效,则列车跨系统运行失败。

由列车跨系统运行过程可知,a 网和 b 网的可靠性将影响到列车跨系统运行的成功率。杨光等详细说明了高速磁悬浮列车安全速度防护曲线的求解过程以及最小速度曲线、运行速度曲线及最大速度曲线之间的关系^[6]。

2 建模过程

2.1 系统理论

由于经典物理学中的某些限制,Von Bertalanffy 于 1949 年提出系统理论概念,目的是通过对系统的分割分别对子模块进行分析^[7]。在系统理论体系下,可以把要分析的系统,依据其结构、功能和性能,分为不同的子部分,从而分别进行分析。

Leveson 于 2002 年将系统理论应用在软件安全设计领域,并提出了系统理论事故模型和过程

(Systems- theoretic Accident Model and Processes, STAMP)建模方法,继而提出基于 STAMP 的危险分析方法 (STAMP-based Hazard Analysis, STPA)。在 STAMP 建模方法中,事故被认为是系统级的结果,与单个部件的失效无直接关系^[8]。Leveson 用 STAMP 方法对 2000 年发生在加拿大沃克顿镇的水污染事件进行分析,确定了该镇饮用水管理过程中的漏洞,并对美国国家航空航天局的星球计划进行了风险分析。

与安全相关的系统属性如事故,是对整个系统层面上的定义及描述,在系统理论中用紧急特性 (Emergent Property) 来代表,因此,采用系统理论可以对系统进行层次化的建模,将不同层面上的属性,在不同层次的模型上体现。基于系统理论的层次化建模描述见图 4。库所及各类变迁的图形表示见图 5。

另外,系统理论的层次化特性可以采用 Petri 网进行描述,Petri 网中的库所和变迁描述子系统层面上的个体状态和功能。子系统 Petri 网模型的相互作用及制约,形成了系统层面上的 Petri 网模型。

2.2 Petri 网模型

Petri 网作为一种建模语言,广泛应用在交通工程、机械工程、软件工程等领域的系统可靠性及安全性分析中。Vernez 等给出了 Petri 网应用于工业控制的方法^[9];Zheng 等将 Petri 网应用在平交道口及计算机联锁系统安全防护的建模及分析中^[10-11];林闯等对随机 Petri 网的性能评估功能进行了分析^[12-13]。相对于采用数值分析对交通系统进行建模^[14],基于 Petri 网的模型具有更好的可视化界面,同时有相应的工具支持对于系统可靠性的定量分析。本文选择扩展确定性随机 Petri 网 (Extended

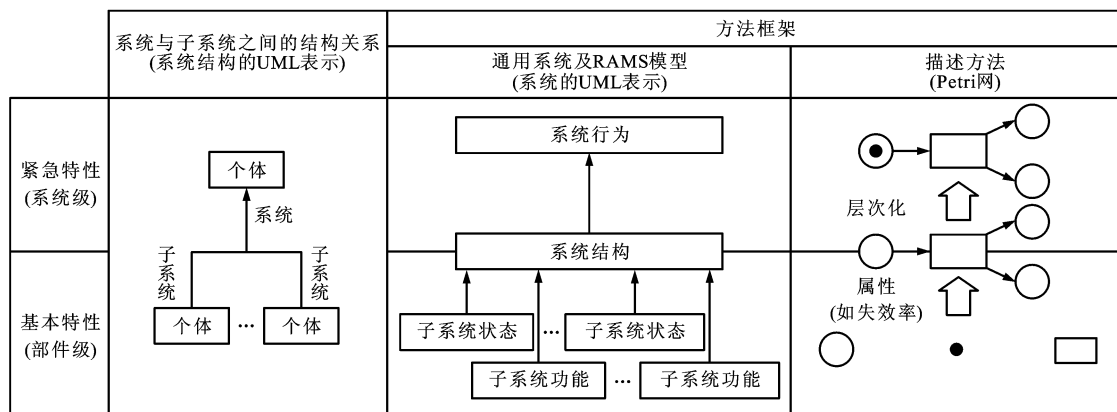


图 4 基于系统理论的层次化模型

Fig. 4 Hierarchical model based on system theory

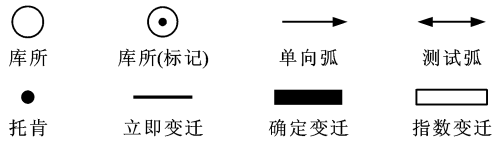


图 5 EDSPN 中各元素

Fig. 5 EDSPN elements

Deterministic and Stochastic Petri Nets, EDSPN) 作为建模工具。基于时间参数 θ , EDSPN 采用 4 种变迁来描述暂态系统的行为。

(1)立即变迁中 θ 为 0, 这种变迁在输入条件满足后马上触发, 没有延迟。它可以用来描述不考虑暂态时间的系统状态之间的因果关系。如果多个立即变迁同时发生, 可以通过调整概率权值的方式确定发生的概率。这个变迁可以用来描述人的行为或事件的结果。

(2)确定性变迁中 θ 为常数, 当所有的输入条件满足时, 经过一个特定的时间 θ , 变迁触发。此变迁可以用来描述存在于铁路交通过程中确定性的暂态事件。

(3)指数分布变迁中

$$P(\theta \leq t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

式中: P 为经过特定的时间 θ , 变迁发生的概率; t 为系统的工作时间; λ 为指数分布函数的发生率。

指数分布变迁可以用来描述一个满足指数时间分布的事件, 也可以用来描述系统功能或技术部件的失效率。与触发条件相结合, 此变迁可以对潜在系统行为之间的关系进行建模。

(4)通用随机变迁中

$$P(\theta \leq t) = \Phi(t)$$

式中: $\Phi(t)$ 为通用随机分布函数。

此变迁可以用来描述满足指数分布外随机分布的随机事件。除了失效率, 也可以采用通用随机变迁描述铁路交通过程、旅途时间延迟或者维修过程。

基于图 3 的列车跨系统运行原理, 结合系统理论建模思路, 确定基于系统理论的列车跨系统运行关系及对应的 Petri 网模型分别见图 6、7。

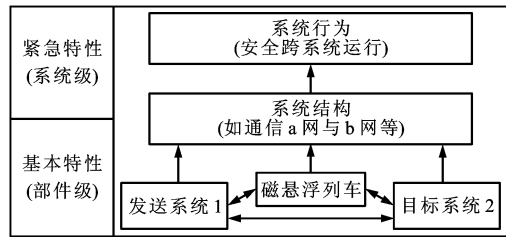


图 6 磁悬浮列车跨系统运行关系

Fig. 6 Relationship of maglev train running across boundary

基于系统理论的层次化建模思路, 列车跨系统运行过程可以在 3 个层面上进行描述: 系统层、子系统

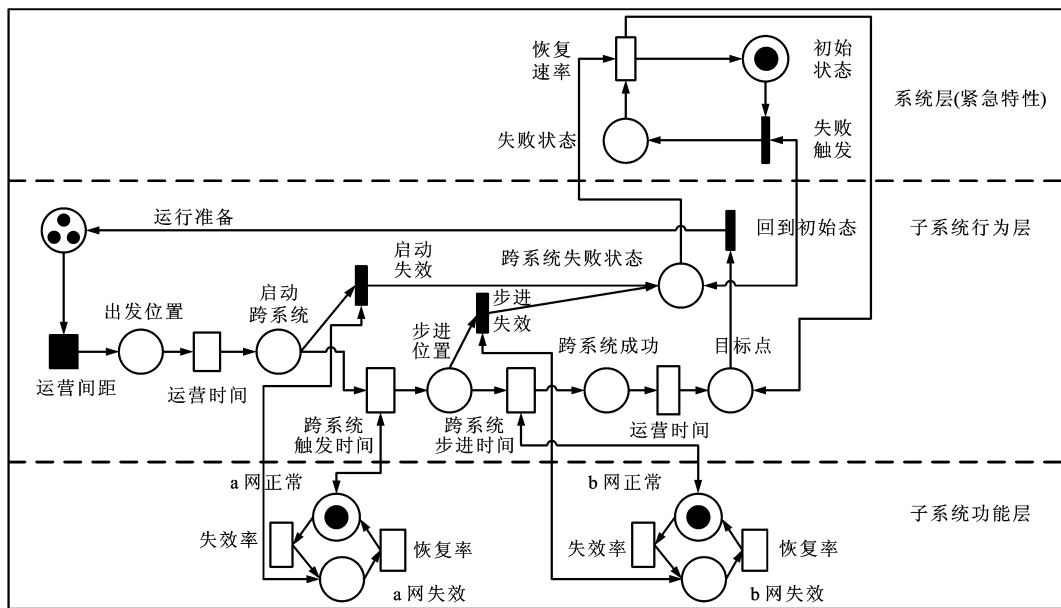


图 7 列车跨系统运行层次化模型

Fig. 7 Hierarchical model of maglev train running across boundary

统行为层与子系统功能层。由于本文考虑通信网络与系统整体特性之间的关系, 因此, 功能层只包含通信网络的模型。

2.2.1 系统层

系统属性在系统层进行描述。列车跨系统运行的结果为成功或失败, 由库所初始状态和失败状态

表示。当列车跨系统运行失败时,会促发变迁失败触发的发生,系统将由初始状态进入失败状态。故障系统维修正常后,系统由失败状态转回初始状态。变迁恢复速率表示系统修复时间。

2.2.2 子系统行为层

子系统行为层描述磁悬浮列车跨系统的整个运行过程。当列车由线路上的出发位置运行到启动跨系统位置时,如果在列车执行跨系统运行预备过程中 a 网功能正常,则列车将正常运行至线路上的步进位置。如果在列车执行步进过程中 b 网功能正常,则列车跨系统运行成功,进入跨系统成功状态,并最终到达目标点。

当列车处于启动跨系统位置时 a 网失效,导致发送系统 1 与目标系统 2 之间不能交换基本的线路数据,或者列车处于步进位置时 b 网失效,导致系统 1 与系统 2 之间不能进行列车的联合监控,则列车将进入跨系统失效状态,引发模型系统层中变迁失败触发的发生,系统进入失败状态,即表现出系统层的紧急特性。

在列车运行过程中,列车的状态由运行准备、出发位置、启动跨系统、步进位置、跨系统成功及目标点等库所组成,代表列车在不同时间所处的状态。由于运营列车的发车间隔一般是固定值,模型中的变迁运营间距为确定性变迁。变迁运营时间、跨系统触发时间、跨系统步进时间及运营时间设定为指数分布变迁,根据实际运营的统计数据确定其数值。变迁启动失效由库所 a 网失效触发,步进失效由库所 b 网失效触发。

2.2.3 子系统功能层

子系统功能层对 a 网与 b 网的正常状态、失效状态以及两种状态间的转换进行了描述。a 网与 b 网的功能及可靠性分别由库所 a 网正常和 a 网失效, b 网正常和 b 网失效组成。假定二者之间的变迁为指数分布变迁,其参数代表通信功能的失效率及恢复率。a 网负责实现跨系统触发阶段的通信功能,因此,库所 a 网正常和变迁跨系统触发时间通过测试弧相连,保证列车跨系统正常启动; b 网负责实现系统从步进点到系统边界这段运行过程的通信功能,其库所 b 网正常与变迁跨系统步进时间通过测试弧相连,保证列车完成跨系统运行过程。

3 仿真结果分析

基于 Windows 系统的 TimeNET4.0 软件是用于随机 Petri 网模型仿真的工具。对于图 7 的模型,

基于已经假定的参数,可以通过仿真得到库所失效状态的期望值。用这个期望值除以事故恢复时间,即为列车跨系统失败率。模型仿真参数为:列车发车间隔为 3 h;运营时间为 2 h;跨系统运行触发时间为 0.5 min;步进过程时间为 4.0 min;跨系统失败恢复时间为 2 h。通过仿真, a 网与 b 网的失效率与列车跨系统运行失败率之间的关系见图 8, F 为失效率。

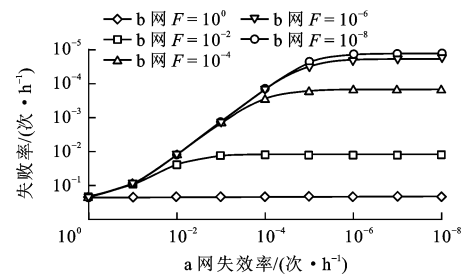


图 8 失效率与失败率的关系

Fig. 8 Relationships between loss ratios and failure rates

如图 8 所示,列车跨系统失效率随着 a 网和 b 网可靠性的提高而降低。假定列车运行时间间距为 30 min,列车执行一次跨系统运行,则在一年内,列车共执行跨系统运行次数为 17 520 次。如果每年允许一次跨系统运行失败,则跨系统运行失败率需要低于 5.7×10^{-5} 次 \cdot h $^{-1}$ 。从图 8 可知,为实现这一目标, a 网和 b 网的失效率都需要低于 10^{-6} 次 \cdot h $^{-1}$ 。目前,既有高速铁路的通信网络一般采用安全通信协议进行安全信息传输,在信源、信道都采用安全传输技术,信息传输失效率可以达到 10^{-10} 次 \cdot h $^{-1}$ 。由图 8 可知,如果 a 网与 b 网的失效率都达到 10^{-10} 次 \cdot h $^{-1}$,则列车跨系统失效率稳定在 10^{-5} 次 \cdot h $^{-1}$,即每 11.4 年列车跨系统运行失败 1 次。

由于列车跨系统运行失败率和跨系统触发时间及步进时间有关,假定 a 网及 b 网的失效率为 10^{-6} 次 \cdot h $^{-1}$,则列车跨系统失败率与跨系统触发时间及步进时间的关系见图 9, T 为跨系统运行触发时间。列车跨系统运行失败率随着跨系统触发时间及步进时间的增加而降低,当列车跨系统运行触发时间分别为 0.2、2.0 min,步进运行时间分别为 4、16 min 时,则跨线运行失败率分别为 1.95×10^{-5} 、 1.65×10^{-5} 次 \cdot h $^{-1}$ 。

4 结 语

磁悬浮列车跨系统运行技术及可靠性需求分析方法是既有磁悬浮线路延伸为长大干线亟需研究的问题。本文的研究结果表明:基于系统理论的建模

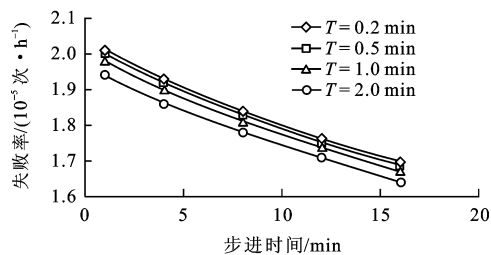


图9 触发时间、步进时间与失败率的关系

Fig. 9 Relationship of triggering times, stepping times and failure rates

方法可以对具有复杂动态过程的系统,建立清晰的层次化模型,而且每一层模型可以体现本层面可以表达的系统特性;为保证列车跨系统运行的成功率,控制设备的可靠性需要保持在一定的等级之上;列车跨系统触发时间及步进时间也对跨系统运行的成功率存在一定的影响。本文提出的建模与分析方法具有通用性,可以定量分析系统特性与其他子系统部件可靠性之间的联系。

参考文献:

References:

- [1] 杨光,唐祯敏.几种典型轨道交通运行控制系统的比较研究[J].铁道学报,2009,31(1):82-87.
YANG Guang, TANG Zhen-min. Analysis of similarities and differences of operation control systems among several typical modes of rail traffic[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(1):82-87. (in Chinese)
- [2] HOSSEINI M S, VAEZ-ZADEH S. Modeling and analysis of linear synchronous motors in high-speed maglev vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2010, 46(7): 2656-2664.
- [3] CHEN M Y, WANG M J, FU L C. Modeling and controller design of a maglev guiding system for application in precision positioning[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(3): 493-506.
- [4] 杨光,唐祯敏.高速磁悬浮列车运行控制系统体系结构研究[J].中国铁道科学,2006,27(6):68-72.
YANG Guang, TANG Zhen-min. Study on the operation control system framework for high-speed maglev train[J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 68-72. (in Chinese)
- [5] 张明.基于UML的高速磁悬浮列车分区运行控制系统建模[D].北京:北京交通大学,2007.
ZHANG Ming. Modeling of high-speed maglev train decentralized control system with UML [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007. (in Chinese)
- [6] 杨光,唐祯敏.高速磁悬浮列车的安全速度防护问题研究[J].北京交通大学学报,2007,31(2):38-42.
YANG Guang, TANG Zhen-min. Study on safety speed protection of the high-speed maglev train[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(2): 38-42. (in Chinese)
- [7] VON BERTALANFFY L. The history and status of general systems theory [J]. The Academy of Management Journal, 1972, 15(4): 407-426.
- [8] LEVESON N. A new accident model for engineering safer systems [J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.
- [9] VERNEZ D, BUCHS D R, PIERREHUMBERT G E, et al. MORM—a Petri net based model for assessing OH&S risks in industrial processes: modelling qualitative aspects[J]. Risk Analysis, 2004, 24(6): 1719-1735.
- [10] ZHENG Wei. Modeling and hazard analysis of railway station protection system based on stochastic Petri nets[C]//IEEE. The Proceeding of 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Chengdu: IEEE, 2009: 493-496.
- [11] ZHENG Wei, MUELLER J R, SLOVAK R, et al. Function modelling and risk analysis of automated level crossing based on national statistical data[C]//IEEE. The 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Wuhan: IEEE, 2010: 281-284.
- [12] 林闯,郑波.含有非马尔可夫过程的排队 Petri 网模型和性能分析[J].电子学报,2003,31(2):166-170.
LIN Chuang, ZHENG Bo. A model of queuing Petri net including non-Markovian process and performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 166-170. (in Chinese)
- [13] 林闯,曲扬,郑波,等.一种随机 Petri 网性能等价简化与分析方法[J].电子学报,2002,30(11):1620-1623.
LIN Chuang, QU Yang, ZHENG Bo, et al. An approach to performance equivalent simplification and analysis of stochastic Petri nets[J]. Acta Electronica Sinica, 2002, 30(11): 1620-1623. (in Chinese)
- [14] 李志纯,朱道立.随机动态交通网络可靠度分析与评价[J].交通运输工程学报,2008,8(1):106-112.
LI Zhi-chun, ZHU Dao-li. Analysis and evaluation of reliability for stochastic and dynamic transport network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(1): 106-112. (in Chinese)