

地铁信号系统可靠性评估解析方法研究

莫志刚, 骆汉宾

(华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 地铁信号系统的可靠性是保证其安全性、可用性、可维护性的决定性因素。针对信号系统工程项目设计阶段缺乏可靠性定量分析方法的问题, 提出基于矢量模型与概率知识推导出 CBTC 联锁子系统可靠性部分评估解析计算方法, 并以实例论证了其可行性。

关键词: 地铁信号; 可靠性; 安全性; 维修策略

中图分类号: U231⁺.7; U285.21⁺1

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.005

Research on Reliability Evaluation Method of Metro Signal System

MO Zhigang, LUO Hanbin

(School of Civil Engineering & Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The reliability of metro signal system is the decisive factor to ensure the safety, availability and maintainability. Aiming at the lack of signal system RAMS evaluation methods, based on vector data model and statistics analysis methods, CBTC interlock reliability index and sensitivity calculation formula was proposed, which was validated by the real example.

Keywords: metro signal; reliability; safety; maintenance strategy

0 引言

RAMS^[1-7]作为系统工程技术之一, 法国、日本、英国、德国、美国等发达国家和地区均在轨道机车车辆方面成功地实施了RAMS工程。其中以欧洲国家为代表, 不仅仅建立了RAMS系列标准, 使RAMS工程实现了系统化发展, 还在其产品技术平台推广RAMS工程, 使轨道交通产品的可靠性、维修性和安全性等指标得到了显著提高。IEC 61508是国际电工委员会(IEC)制定的《电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全》国际标准, 我国也将IEC 61508(轨道交通, 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例)引入国内, 经过修订而成为我国国家标准GB/T 21562。

虽然国内外行业协会及专家、学者在轨道交通工

程RAMS管理研究方面取得了一定的成果, 制定了系统的规范与标准, 信号系统RAMS评估标准基本完整, 但信号系统工程项目设计阶段缺乏可靠性定量分析的方法, 所以有必要基于矢量模型与概率知识推导出信号系统可靠性部分评估指标。

1 基于矢量模型的可靠性指标定义与推算

1.1 基于矢量模型的信号系统的可靠性指标

设信号联锁组件K的每年故障次数 λ_k , 每年修复次数 μ_k , 平均每次修复时间为 τ_k , 则组件K的无效率 $u_k=P(S_k=0)$ 和有效度 $a_k=P(S_k=1)$ 可表示为:

$$a_k = \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k} = \frac{8760}{\lambda_k \tau_k + 8760} \quad (1)$$

$$u_k = \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \mu_k} = \frac{\lambda_k \tau_k}{\lambda_k \tau_k + 8760} \quad (2)$$

信号系统的可靠性指标用统一的表达式为

$$E(F) = \sum_{x \in X} F(x)P(x) \quad (3)$$

收稿日期: 2017-12-11

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划专项(2016YFB1200401-102B)

式中: x 为在某时刻联锁子系统所有组件的状态矢量, 设 S_k 为第 k 个组件的状态, 则随机状态矢量 $x=(S_1, \dots, S_k, \dots, S_n)$, 假设 S_k 只有正常运行与故障退出 2 种状态, 当组件正常运行时, S_k 取 1 值, 否则, 取 0 值; X 为状态空间集, 描述 x 状态组合的各种可能; $F(x)$ 表示以状态元素 x 为未知量的可靠性指标测试函数; $P(x)$ 为状态随机量各种状态出现的概率。

如系统由 n 个组件构成, 各组件的状态独立且随机概率为

$$P(S)=P(S_1)\cdots P(S_k)\cdots P(S_n) \quad (4)$$

1.2 信号系统的可靠性各指标定义及解析式

基于上述定义, 下面给出信号系统可靠性指标的定义及其解析表达式。

①联锁故障概率 L_{LWP} (Loss of Wayside Probability, 简称 LWP): 表示由于信号机、转辙机、道岔、计轴、电缆、站台门、接地装置等轨旁组件故障导致某个信号联锁子系统故障的可能性, 有

$$L_{LWP}=\sum_{x \in X} \delta(x)P(x) \quad (5)$$

式中: $\delta(x)$ 为联锁控制状态 x 的 0~1 函数, 若 x 表征的联锁处于正常工作状态, $\delta(x)$ 为 0; 若 x 表征的联锁处于故障状态, $\delta(x)$ 为 1。

通过引入联锁关键组件 k 的故障 λ_k 、修复率 μ_k , 其解析式为:

$$K_1=\sum_{x \in X, S_k=1} \delta(x)P(S_1)\cdots P(S_{k-1})P(S_{k+1})\cdots P(S_m) \quad (6)$$

$$K_2=\sum_{x \in X, S_k=0} \delta(x)P(S_1)\cdots P(S_{k-1})P(S_{k+1})\cdots P(S_m) \quad (7)$$

$$L_{LWP}=\sum_{x \in X} \delta(x)P(x)$$

根据 K_1 与 K_2 值定义可得:

$$L_{LWP}=a_k K_1+u_k K_2=a_k(K_1-K_2)+u_k=$$

$$\frac{u_k}{\lambda_k+u_k}(K_1-K_2)+K_2$$

由式 (1) 代入可得

$$L_{LWP}=\frac{\mu_k}{\lambda_k+\mu_k}(K_1-K_2)+K_2=\frac{8760}{\lambda_k r_k+8760}(K_1-K_2)+K_2 \quad (8)$$

式 (6) 是以 λ_k 和 μ_k 为变量的函数表达式, 在网络结构确定的具体信号系统中, K_1 表示假设组件 k 在任何时候都处于正常运行状态的条件下, 由系统其他组件的随机故障问题所引起的联锁故障概率, 即

$$K_1=L_{LWP}|_{S_k=1} \text{ 且 } 0 \leq K_1 \leq 1$$

K_2 表示假设组件 k 在任何时候处于故障状态的条件下, 由系统其他组件的随机故障问题所导致的联锁故障概率, 即

$$K_2=L_{LWP}|_{S_k=0} \text{ 且 } 0 \leq K_2 \leq 1$$

K_1 和 K_2 为常值, 其取值只与联锁系统结构与故障定义有关, 与组件参数无关, 当组件可靠性参数改变时,

可通过上述解析式计算得到。

对组件 K 故障率 λ_k 、有效度 a_k 及修复率 μ_k 灵敏度偏微分有:

$$\frac{\partial L_{LWP}}{\partial \lambda_k}=\frac{a_k(K_2-K_1)}{\lambda_k+\mu_k} \quad (9)$$

$$\frac{\partial L_{LWP}}{\partial a_k}=K_1-K_2 \quad (10)$$

$$\frac{\partial L_{LWP}}{\partial \mu_k}=\frac{u_k(K_1-K_2)}{\lambda_k+\mu_k} \quad (11)$$

由以上偏微分结果分析可知, L_{LWP} 与组件 K 有效度呈线性关系。从物理意义上看, 由于 L_{LWP} 将随着组件 k 的有效度 $a_k=p(S_k=1)$ 增大而变小, $K_1-K_2 \leq 0$ 将成必然。若组件 k 是否工作对系统没有任何影响, 此时 $K_1=K_2$, 若组件处于系统重要部位, 一旦故障发生, 将会使整个系统处于失效状态, K_2 值将接近正整数 1。所以在系统设计过程中此类组件尽量选用高可靠性的。

②联锁失效频率 L_{LWF} (Loss of Wayside Frequency, 简称 LWF): 表示因组件故障联锁子系统平均每年失效的次数, 定义为

$$L_{LWF}=\sum_{x \in X} \left(\delta(x) \sum_{k=1}^m \theta_x^{\text{in}}(k) \right) P(x) \quad (12)$$

式中: $\theta_x^{\text{in}}(k)$ 为组件 k 的变量影响因子, 其解析表达式为

$$\theta_x^{\text{in}}(k)=\begin{cases} +\mu_k & S_k=0 \\ -\lambda_k & S_k=1 \end{cases}$$

所以 L_{LWF} 的解析表达式为

$$L_{LWF}=\frac{\lambda_k \mu_k}{\lambda_k+\mu_k}(K_2-K_1)+\frac{\mu_k}{\lambda_k+\mu_k}(K_3-K_4)+K_4=$$

$$\frac{8760 \lambda_k}{\lambda_k \tau_k+8760}(K_2-K_1)+\frac{8760}{\lambda_k \tau_k+8760}(K_3-K_4)+K_4 \quad (13)$$

$$K_3=\sum_{x \in X, S_k=1} \delta(x) \left(\sum_{i=1, i \neq k}^m \theta_x^{\text{in}}(i) \right) P(S_1)\cdots P(S_{k-1}) \cdot P(S_{k+1})\cdots P(S_m) \quad (14)$$

$$K_4=\sum_{x \in X, S_k=0} \delta(x) \left(\sum_{i=1, i \neq k}^m \theta_x^{\text{in}}(i) \right) P(S_1)\cdots P(S_{k-1}) \cdot P(S_{k+1})\cdots P(S_m) \quad (15)$$

则有:

$$\frac{\partial L_{LWF}}{\partial \lambda_k}=a_k^2(K_2-K_1)-\frac{a_k(K_3-K_4)}{\lambda_k+\mu_k} \quad (16)$$

$$\frac{\partial L_{LWF}}{\partial \mu_k}=u_k^2(K_2-K_1)-\frac{u_k(K_3-K_4)}{\lambda_k+\mu_k} \quad (17)$$

③组件故障修复时间 L_{TFUR} (Time of Fault Unit Repaired, 简称 EFUR): 表示平均每年联锁子系统功能

修复关联设备的维修时间, 定义为

$$L_{TFUR} = \sum_{x \in X} \delta(x) T_c(x) P(x) \quad (18)$$

式中: T_c 表示在联锁故障状态下, 为使联锁系统恢复到可接受安全风险范围内的供列车运行状态故障组件修复的最短时间, min。

则解析表达式为:

$$L_{TFUR} = \frac{\mu_k}{\lambda_k + \mu_k} (K_5 - K_6) + K_6 \quad (19)$$

$$K_5 = \sum_{x \in X, S_k=1} \delta(x) T_c(x) P(S_1) \cdots P(S_{k-1}) P(S_{k+1}) \cdots P(S_m) \quad (20)$$

$$K_6 = \sum_{x \in X, S_k=0} \delta(x) T_c(x) P(S_1) \cdots P(S_{k-1}) P(S_{k+1}) \cdots P(S_m) \quad (21)$$

则有:

$$\frac{\partial L_{TFUR}}{\partial \lambda_k} = \frac{a_k (K_6 - K_5)}{\lambda_k + \mu_k} \quad (22)$$

$$\frac{\partial L_{TFUR}}{\partial \alpha_k} = k_5 - k_6 \quad (23)$$

$$\frac{\partial L_{TFUR}}{\partial \mu_k} = \frac{u_k (K_5 - K_6)}{\lambda_k + \mu_k} \quad (24)$$

④ CBTC 故障概率 L_{CFP} (CBTC Fault Probability, 简称 CFP): 表示在不考虑外部因素影响及其他子系统的可靠性和行车越站行驶的特殊情况下, 因为线路上某相邻的 2 个及以上的联锁子系统同时失效导致信号系统丧失 CBTC 功能的可能性的。设 $S_i=1$ 表示第 i 个联锁设备正常运行, $S_i=0$ 表示第 i 个联锁失效, 则它的解析表达式为:

$$L_{CFP} = \sum_{i=1}^n P(S^i = 0) - \sum_{i=1}^n P(S^i = 0 | (S^{i-1} = 1) \cap (S^{i+1} = 1))$$

$$L_{CFP} \cong L_{LWP}^1 L_{LWP}^2 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} L_{LWP}^i L_{LWP}^{i+1} + L_{LWP}^{n-1} L_{LWP}^n \quad (25)$$

则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{CFP}}{\partial \lambda_k} &= \frac{\partial L_{LWP}^1}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^2 + \frac{\partial L_{LWP}^2}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^1 + \\ &2 \sum_{i=2}^{N-1} \left(\frac{\partial L_{LWP}^i}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^{i+1} + \frac{\partial L_{LWP}^{i+1}}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^i \right) + \\ &\frac{\partial L_{LWP}^{n-1}}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^n + \frac{\partial L_{LWP}^n}{\partial \lambda_k} L_{LWP}^{n-1} \end{aligned} \quad (26)$$

式中: N 表示单线地铁联锁的个数; L_{LWP}^i 表示第 i 个联锁失效的概率。

⑤ CBTC 失效频率 L_{LCCF} (Loss of CBTC Capacity Frequency, 简称 LCCF), 表示地铁列车每年 CBTC 功能失效的平均次数。

其解析表达式为

$$L_{LCCF} \cong L_{LWF}^1 L_{LWF}^2 + 2 \sum_{i=2}^{n-1} L_{LWF}^i L_{LWF}^{i+1} + L_{LWF}^{n-1} L_{LWF}^n \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L_{LCCF}}{\partial \lambda_k} &= \frac{\partial L_{LWF}^1}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^2 + \frac{\partial L_{LWF}^2}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^1 + \\ &2 \sum_{i=2}^{n-1} \left(\frac{\partial L_{LWF}^i}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^{i+1} + \frac{\partial L_{LWF}^{i+1}}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^i \right) + \\ &\frac{\partial L_{LWF}^{n-1}}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^n + \frac{\partial L_{LWF}^n}{\partial \lambda_k} L_{LWF}^{n-1} \end{aligned} \quad (28)$$

⑥ 地铁运营延误期望 L_{EMSI} (Expected of Metro System Delay, 简称 EMSD): 表示平均每年由于 CBTC 失效导致整条线路延误的累积时间, 单位为 min。

$$L_{EMSI} = L_{LMF} \times L_{TFUR} \times 8760 \times 60 \quad (29)$$

1.3 信号系统的可靠性各指标的系统联系

L_{LWP} 、 L_{LWF} 、 L_{EFUR} 是某个信号联锁子系统的可靠性指标, 当信号系统的结构和可靠性评估的深度与广度 (如转辙机故障阶数, 信息传输组合故障阶数) 确定之后, 结构参数 $K_1 \sim K_6$ 是常数。解出这些参数后, 当系统结构不发生变化时, 仅系统元器件的可靠性参数发生变化时, 就可以利用上述解析表达式直接计算出元器件变化后联锁子系统、CBTC 系统的可靠性指标。 L_{LWP} 、 L_{LWF} 、 L_{EFUR} 是子系统级的可靠性评估指标, L_{CFP} 、 L_{LCCF} 、 L_{LMSI} 为系统级可靠性的评估指标, 是基于前 3 个指标的基础上推导得出的针对整条地铁信号系统的可靠性指标。

2 联锁子系统组件灵敏度计算实例

以南宁地铁 1 号线联锁站组织架构为例, 一个联锁集中站负责管理 3 个站的轨旁设备及室内机房设备。一个车站轨旁设备接入联锁子系统拓扑图如图 1, 其他站的轨旁设备接入同理。

通过统计的联锁子系统各组件的故障数据、CBTC 及联锁的各项年度指标, 计算各组件 k 的系数 $K_1 \sim K_6$,

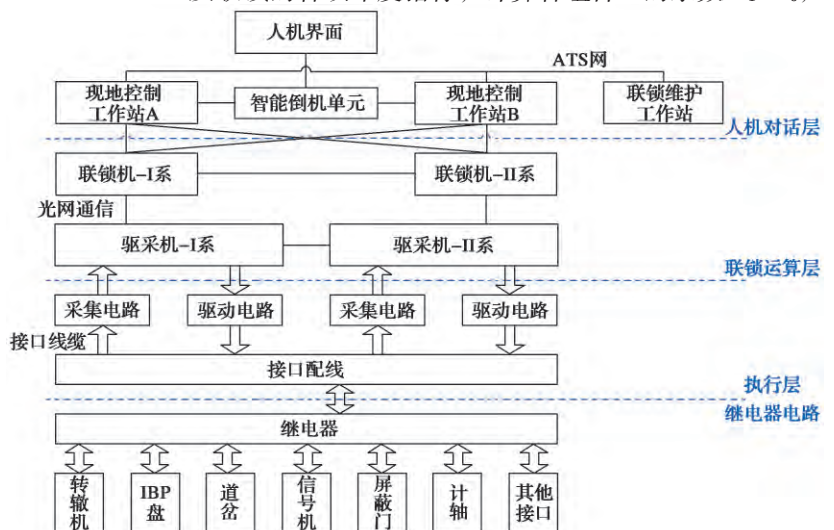


图 1 联锁架构系统图

计算结果见表 1~表 4。当改变组件 1_{ZZ1} （车站 A 端头的第 1 个转辙机）、 1_{ZZ2} （车站 A 端头的第 2 个转辙机）、 1_{DX1} （A 车站 A 端头的第 1 组道岔）、 1_{SG1} （车站 A 端头第 1 组信号机）、 1_{IBP} （车站的 IBP）、 1_{PSD} （车站的屏蔽门）、 1_{JZ1} （车站 A 端头的计轴）的可靠性参数时，通过解析式计算可得到 CBTC 系统的可靠性指标及运营服务水平指标。

根据信号联锁子系统架构特点，当道岔、转辙机、计轴、站台门中任一元件发生故障时，均会引起子系统故障；当 IBP、接地装置、信号机中某一个元件发生故障时，并不能引起子系统故障，现定义 IBP、接地装置、信号机中任意 2 个元件同时发生故障时才会引起子系统故障。

各元件的故障发生与否可以定义为表 1 所示矩阵形式，其中 1 表示元件发生故障，0 表示元件正常，× 既可表示故障又可表示正常，对整个系统是否故障影响不大。

表 1 各组件引起系统故障的表示

道岔	转辙机	计轴	站台门	IBP	接地	信号
1	0	0	0	×	×	×
0	1	0	0	×	×	×
0	0	1	0	×	×	×
0	0	0	1	×	×	×
0	0	1	1	×	×	×
0	1	0	1	×	×	×
0	1	1	0	×	×	×
1	0	0	1	×	×	×
1	0	1	0	×	×	×
1	1	0	0	×	×	×
0	1	1	1	×	×	×
1	0	1	1	×	×	×
1	1	1	0	×	×	×
1	1	1	1	×	×	×
0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	1	0
0	0	0	0	1	1	1

表 2 组件指标的原始数据

数据类型	道岔	转辙机	计轴	站台门	IBP	接地装置	信号机
1 故障率	1.126	2.518	3.512	0.163	7.635	1.135	2.263
2 故障率	11.232	7.240	5.431	6.256	8.527	3.237	2.137
1 每年故障次数	8	15	32	2	43	5	10
2 每年故障次数	8	16	30	2	45	6	10
1 修复时间 /min	15	15	20	25	12	15	12
2 修复时间 /min	15	13	18	25	15	13	15

表 3 CBTC 系统与联锁子系统年度指标

$10^6 L_{LWP}$	L_{LWF}	L_{TFUR}	$10^6 L_{CFP}$	L_{LCCF}	L_{EMSD}
543.87	8.35 次/a	845.23 min/a	35.8	6.62 次/a	189 min/a

应用式（1）~式（28）分别计算南湖车站 A 端头联锁外接组的 L_{LWP} 、 L_{LWF} 、 L_{TFUR} 对可靠性指标的灵敏度，

表 4 $K_1 \sim K_6$ 解析表达式系数计算值

元件名称	$10^6 K_1$	$10^6 K_2$	$10^6 K_3$	$10^6 K_4$	$10^6 K_5$	$10^6 K_6$
1 道岔	65.58	418.76	63 603.00	63 331.00	65 591.00	17 783.00
1 转辙机	72.04	364.25	64 971.00	18 277.00	87 738.00	21 956.00
1 计轴	58.28	444.43	59 262.00	34 291.00	58 805.00	16 446.00
1 站台门	65.38	377.37	59 897.00	15 261.00	81 650.00	21 134.00
1 _{IBP}	56.35	659.30	58 701.00	11 610.00	53 936.00	8 150.20
1 接地装置	62.80	706.74	59 061.00	12 297.00	73 595.00	11 019.00
1 信号机	80.87	643.42	84 550.00	40 285.00	97 408.00	49 117.00
2 道岔	86.88	661.08	88 405.00	56 643.00	112 450.0	46 282.00
2 转辙机	2.569	12.292	128.425 0	156.845	30.822	506.934
2 计轴	2.644	12.392	132.175 0	187.400	34.365	563.612
2 站台门	17.278	28.886	8 402.630	8 796.600	234.492	2 944.700
2 _{IBP}	18.222	30.139	7 835.503	8 605.100	273.332	4 260.000
2 接地装置	8.666	39.366	2 107.151	2 486.000	117.608	1 886.300
2 信号机	10.548	23.365	2 267.799	3 239.100	137.123	2 200.800

计算结果见表 5。从表 5 可以看出影响南湖车站 A 端头联锁可靠性的主要因素为：① 1 号转辙机控制南湖车站 A 端头的交叉渡线，它的随机故障是导致南湖车站 A 端头联锁可靠性变差的主要因素，所以 1 号转辙机的 $\partial L_{LWP} / \partial \lambda_k$ 灵敏度在所有组件中最高。② 接地装置在组件的关键排名虽然靠后，但由于接地方式与接地环境影响接地效果，造成接地装置的可靠性较差，且不通过继电器接入联锁主机，当联锁出现故障时也必须检查接地装置，因此接地装置的 $\partial L_{LWP} / \partial \lambda_k$ 灵敏度较高。

表 5 车站 A 端头联锁子系统灵敏度指标计算值（ $\times 10^{-6}$ ）

元件名称	$\partial L_{LWP} / \partial \lambda_k$	$\partial L_{LWF} / \partial \lambda_k$	$\partial L_{TFUR} / \partial \lambda_k$	$\partial L_{LWP} / \partial \mu_k$	$\partial L_{LWF} / \partial \mu_k$	$\partial L_{TFUR} / \partial \mu_k$
转辙机	232.76	-19 981.10	18 877.75	1.74	-0.022	1.900
道岔	42.799	-2 693.590	185.974	0.808	-0.110	1.321
计轴	25.310	-2 776.450	102.256	0.701	-0.011	1.189
站台门	18.518	-3 406.230	101.706	0.679	-0.034	0.604
信号机	3.009 1	173.361 6	-6.447 4	-0.008 1	-0.000 7	-0.039 6
IBP	2.210 8	516.156 4	-63.426 3	-0.010 7	-0.000 3	-0.073 7
接地装置	0.224 84	11.010 31	9.046 72	-0.000 7	-0.000 2	-0.010 9

在此系统中 $K_1 \sim K_6$ 都是常数，通过计算解析表达式的系数便可得到各元件的灵敏度指标；利用这些解析表达式还可得到系统可靠性指标与元件可靠性参数之间的函数关系曲线（见图 2），以此可以分析各系统元件的可靠性参数在一定范围内变化时对系统可靠性的影响。

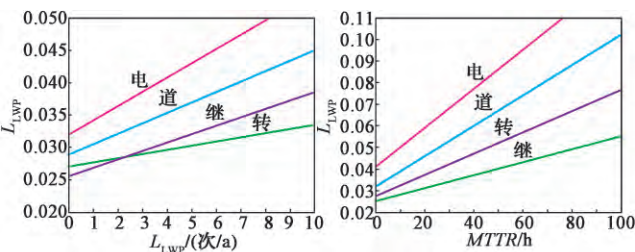


图 2 故障概率 L_{LWP} 和元件故障率 λ_k 及平均修复时间 MTTR 的关系图

由图 2 可以得出:

①系统隧道岔、转辙机、计轴、站台门的故障率和平均修复时间的增加而上升,这说明对道岔、转辙机、计轴、站台门进行精心维护以减少其故障率或缩短其平均修复时间,可显著提高系统的可靠性。

②由各元件灵敏度指标可以看出,转辙机和道岔的随机故障是导致系统可靠性差的最主要因素,因此其灵敏度在所有元件中较高,若发现系统故障应首先对转辙机和道岔的故障进行排除。

3 结语

构建概率统计分析、模糊判断、数据矢量模型等方法,系统分析信号系统在设计架构敏感度分析与可靠度变化的规律,推导信号系统架构的结构参数 $K_1 \sim K_6$ 。解出这些参数后,当系统结构不发生变化时,仅系统元器件的可靠性参数发生变化时,就可以利用上述解析表达式直接计算出元器件变化后联锁子系统、CBTC 系统的可靠性指标。利用计算式可以算出与某个节点相接的设备可靠性指标对故障率、有效度及维护次数的灵敏度。可靠性评估指标的定义与评估方法

的构建对信号系统可靠度设计与运营期的可靠度评估具有实际的工程意义。

参考文献:

- [1] 陈蕾.城市轨道交通引入 RAMS 管理的必要性[J].城市轨道交通研究,2007,10(5): 4-7.
- [2] 乌鲁木齐铁路局.铁路安全风险管理[M].北京:中国铁道出版社,2013.
- [3] 陶涛,龙静.可靠性管理在城市轨道交通车辆全寿命周期内的应用[J].城市轨道交通研究,2014,17(12): 4-7.
- [4] 王业飞.RAMS 的安全例证分析与应用[D].郑州:郑州大学,2013.
- [5] 刘琦.RAMS 标准在轨道交通设计阶段的应用[J].中国铁路,2012(2): 25-28.
- [6] 张玲霞.导航系统故障检测与诊断及其相关理论问题的研究[D].西安:西北工业大学,2004.
- [7] 陈蕾.城市轨道交通引入 RAMS 管理的必要性[J].城市轨道交通研究,2007,10(5): 4-7.

作者简介:莫志刚(1974-),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为工程管理。

(上接第 21 页)

针的可靠接触。

因此,在连接器应用现场,除应考虑外部接线、安装空间等因素外,还应尽量避免其振动薄弱方向处于外部环境振动严酷方向,以保证连接可靠。

4 结语

本文通过结构力学分析、有限元仿真和试验测试的方法,针对变流器常用电连接器的片簧式接触件展开性能与可靠性分析,主要结论有:

①通过理论计算和有限元插拔过程仿真对圆形片簧开槽接触件进行分析,得出了重载连接器圆形直槽接触件接触力值和应力云图。将接触力计算的仿真、理论计算和实测值进行对比,验证了仿真计算方法的可行性。

②通过 2 种结构、2 种镀层组合的 4 种接触件单脚分离力、机械寿命试验前后接触电阻及镀层厚度测试,量化对比分析了其接触性能。

③开展 2 种品牌欧式连接器的振动试验,观测到某连接器发生瞬断,并分析了两接触件悬臂结构差

异,指出了对称方形片簧接触件的振动薄弱方向,指导连接器应用与现场合理安装,以保证系统电连接的可靠性。

参考文献:

- [1] 潘骏,靳方建,陈文华,等.电连接器接触件结构分析与插拔试验[J].中国机械工程,2013,24(12): 1636-1641.
- [2] 张菊华,孔宪宝.低频电连接器失效模式的分析[J].机电元件,1989,9(1): 36-43.
- [3] 杨奋为.航天用电连接器的失效分析[J].机电元件,1996,16(1): 40-43.
- [4] 潘骏.航天电连接器振动可靠性建模与评估[D].杭州:浙江大学,2002.
- [5] 杨奋为.弹性接触件选用和可靠性研究[J].机电元件,2015,35(6): 50-56.
- [6] Robert S Mroczkowski. Electronic Connector Handbook[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.

作者简介:梁志伟(1985-),男,工程师,现从事电气物料技术研究工作。