

# 高速隧道监控系统的故障诊断设计分析与改进

陶聪凌<sup>1,2,3,4</sup>, 牛建超<sup>1,2,3,4</sup>, 邦志礼<sup>1,2,3,4</sup>, 吴栋<sup>1,2,3,4</sup>, 赵靖<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610;

2. 广东省电子信息产品可靠性技术重点实验室, 广州 510610;

3. 广东省电子信息产品可靠性与环境工程技术研究开发中心, 广州 510610;

4. 电子信息产品可靠性分析与测试技术国家地方联合工程中心, 广州 510610)

**摘要:** 高速隧道监控系统控制设备有着种类多、数量大、难管理、易损坏的特点, 且隧道内空间封闭, 环境恶劣, 一旦高速隧道监控系统发生故障, 将对高速公路的安全产生危害; 因此良好的监控系统故障诊断能力对于高速公路的安全至关重要; 文章结合军用产品测试性设计分析的流程和方法, 提出了一套针对高速隧道监控系统的故障诊断分析与改进提升方法, 根据系统设计架构进行故障模式与影响分析, 得出系统故障模式以及故障率、严酷度等信息, 进而针对性地开展 BIT 诊断电路设计改进, 使故障诊断对故障率和严酷度高的故障覆盖率达到 80%, 为高速隧道监控系统设计开发提供更高效率的思路和技术途径。

**关键词:** 监控系统; 故障诊断; 测试性; 设计优化

## Fault Diagnosis Design Analysis and Improvement of High-Speed Tunnel Monitoring System

Tao Congling<sup>1,2,3,4</sup>, Niu Jianchao<sup>1,2,3,4</sup>, Kuang Zhili<sup>1,2,3,4</sup>, Wu Dong<sup>1,2,3,4</sup>, Zhao Jing<sup>1,2,3,4</sup>

(1. CEPREI, Guangzhou 510610, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Electronic Information Products Reliability Technology, Guangzhou 510610, China; 3. Guangdong Provincial Research Center of Electronic Information Products Reliability and Environment Engineering Technology, Guangzhou 510610, China; 4. National Joint Engineering Research Center of Reliability Test and Analysis for Electronic Information Products, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** The control equipment of high-speed tunnel monitoring system has the characteristics of many kinds, large quantity, difficult to manage and easy to damage. The space in the tunnel is closed and the environment is bad. Once the high-speed tunnel monitoring system breaks down, it will harm the safety of the expressway, so the good fault diagnosis ability of the monitoring system is very important to the safety of the expressway. Combined with the flow and method of test design analysis of military products, this paper presents a set of fault diagnosis analysis and improvement methods for high-speed tunnel monitoring system, according to the system design architecture, the fault mode and impact analysis are carried out and the failure rate and severity of the fault are obtained. The BIT diagnostic circuit design is improved to increase its fault diagnosis ability and make the fault coverage rate of high fault rate and severity reach 80%, which provides a more efficient way of technology for the design and development of high-speed tunnel monitoring system.

**Keywords:** monitored control system; fault diagnosis; testability; design optimization

## 0 引言

高速隧道监控系统结构复杂, 故障频发且安装在偏远地区, 检测与维修定位较为困难, 因此行业内对提高其故障诊断能力有着迫切的需求。良好的故障诊断能力有助于使用方及时掌握设备的状态, 方便进行维修活动, 从而降低寿命周期费用。

目前国内也有一些学者对高速隧道监控系统的设计优化进行了研究。文献 [1] 设计优化监控系统的软件, 实现

在上位机中对隧道系统进行监控; 文献 [2] 采用全新组网方式并通过数据筛选器筛选有效数据将分布式光纤感温火灾报警系统集成到隧道监控系统中; 文献 [3] 采用“互联网+高速公路”方式, 优化隧道控制系统, 构建隧道智能管控平台; 以上文章为监控系统的故障诊断软件改进提供了参考。但是, 国内对监控系统的故障诊断分析方法和设计优化方面的研究尚属空白。在设备故障诊断分析方法和设计优化这方面, 军用产品开展了大量的研究与应用。文献 [4] 通过军用产品飞行采集器开展测试性分析, 得出故障诊断信息分析表, 为高速隧道监控系统故障诊断方法提供了借鉴思路。文献 [5] 通过介绍军用产品雷达的测试性设计优化, 为高速隧道监控系统故障诊断设计优化提供了借鉴思路。本文结合军用产品测试性分析流程提出一套针对高速隧道监控系统的故障诊断分析方法, 并通过分析后

收稿日期: 2020-03-27; 修回日期: 2020-04-25。

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2017B090903006); 广东省重点领域研发计划项目(2019B090916001)。

作者简介: 陶聪凌(1990-), 男, 广西南宁人, 主要从事装备测试性技术方向的研究。

的结果对其进行故障诊断设计改进, 为高速隧道监控系统的故障诊断研究提供参考。

### 1 故障诊断及改进工作流程

测试性是指系统或设备能够及时、准确地确定其状态(可工作, 不可工作或性能下降)并隔离其内部故障的一种设计特性<sup>[6]</sup>。测试性的概念最先应用于军用产品之中, 美国最先将测试性分析及设计应用于空军的一代综合航电系统中, 实现了对整个航电系统的状态监测、故障诊断和故障隔离, 极大提高了整个系统的测试性能力。近年来国内军工领域掀起了测试性技术应用的热潮, 很多装备在设计过程中应用测试性分析、仿真、试验等手段, 大大提高了装备的故障诊断能力, 从而减少对维修保障资源的依赖, 降低全寿命周期费用。

本文结合军用产品的测试性工作流程方法<sup>[7]</sup>, 针对高速隧道监控系统, 提出了故障诊断设计分析及改进的流程如图 1 所示。整个流程是:

- 1) 明确系统的物理结构和功能, 为系统任务可靠性分析奠定基础;
- 2) 完成系统任务可靠性分析, 为系统按照故障诊断层次划分提供条件;
- 3) 划分清晰明确的系统故障诊断层次, 为各层级进行故障模式分析及故障严酷度划分提供条件;
- 4) 进行故障模式及影响分析、故障严酷度划分, 为设计改进提供指导和帮助;
- 5) 依据故障诊断分析结果对系统进行设计改进, 提升系统故障诊断能力。

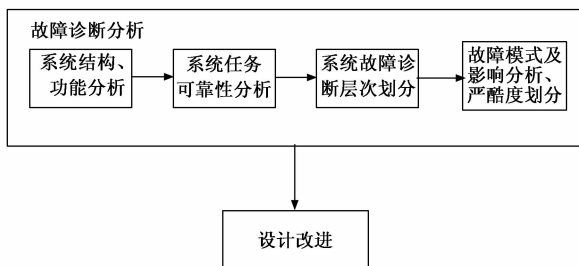


图 1 高速隧道监控系统故障诊断设计分析及改进流程图

## 2 高速隧道监控系统故障诊断设计分析

### 2.1 高速隧道监控系统的结构和功能

高速隧道监控系统主要由信息收集模块(摄像头、车检器、声音传感器)、控制模块(控制电路、屏显器、PC 机)、执行模块(灯具、报警器)和电缆等部分组成。整个高速隧道监控系统中核心的部分为控制模块, 该模块主要由收集信息电路、电源电路、控制电路组成。其中, 收集信息电路通过信息收集部件采集各类高速公路上的车辆状态信息, 电源电路为系统内各个模块供电, 控制电路通过收集模块传递的相关信息对执行部件进行管理。整个监控系统功能是通过信息收集模块接收到车辆驶入隧道信息后,

发送至控制模块, 控制模块收集电路接收到相关信息, 传送至 PC 机、屏显器, 控制模块控制电路根据 PC 机下发的指令或内部编制好的指令控制执行模块完成一系列开关灯、火灾报警等操作。

### 2.2 高速隧道监控系统的任务可靠性框图

对监控系统的结构及功能分析后, 下一步故障诊断分析是把监控系统划分为具有独立功能的模块并做出整个系统及各个模块的任务可靠性框图。由于任何一个模块失效都将引起整个监控系统的失效, 所以监控系统的任务可靠性框图为串联关系。以控制模块为例, 整个任务可靠性框图流程依次是电源电路板(201)→收集电路板(202)→控制电路板(203)→PC 机(204)→屏显器组件(205)。监控系统任务可靠性框图如图 2 所示。控制模块任务可靠性框图如图 3 所示。

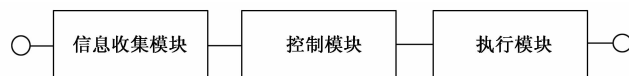


图 2 高速隧道监控系统任务可靠性框图

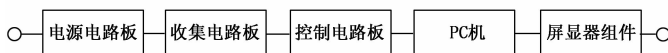


图 3 控制模块任务可靠性框图

### 2.3 高速隧道监控系统的故障诊断层次划分

对高速隧道监控系统进行功能结构及任务可靠性分析后, 其工作原理和影响任务完成的因素得以提炼出来。在此基础上, 对其进行故障诊断层次划分。整个系统的故障诊断层次划分是确保故障诊断分析的正确性和有效性的关键, 直接影响到高速隧道监控系统的故障诊断和隔离。

故障诊断层次的划分遵循一定的原则。这些原则<sup>[8]</sup>是:

- 1) 采用自顶向下的原则, 依次进行划分;
- 2) 适应故障诊断分析的要求;
- 3) 各层级根据功能和结构特性分别定义故障模式;
- 4) 符合系统各部分功能结构之间逻辑关系。

依照故障诊断层次划分原则, 将高速隧道监控系统划分为 5 个层次。即初始约定层次(系统层级): 高速隧道监控系统; 约定层次 3(模块层级): 信息收集模块、控制模块、执行模块; 约定层次 2(电路板层级): 控制电路板等; 约定层次 1(功能电路层级): 电源滤波、转换电路等; 最低约定层次(元器件层级): 电阻、电容等。高速隧道监控系统故障诊断层次划分如图 4 所示。故障诊断层次划分的技术难点和关键点就在于对整个系统的故障发生层级的定位和对各层级影响的归类, 只有明确划分清楚才能为各层级故障模式及影响分析提供良好的支撑。

### 2.4 高速隧道监控系统故障模式及影响分析

高速隧道监控系统完成故障诊断层次的划分之后, 下一步就是要得出元器件层、功能电路层、电路板层、模块层以及系统层的故障模式及影响分析并对故障模式进行严酷度划分。系统故障模式及影响分析可参照 GJB/Z 1391—

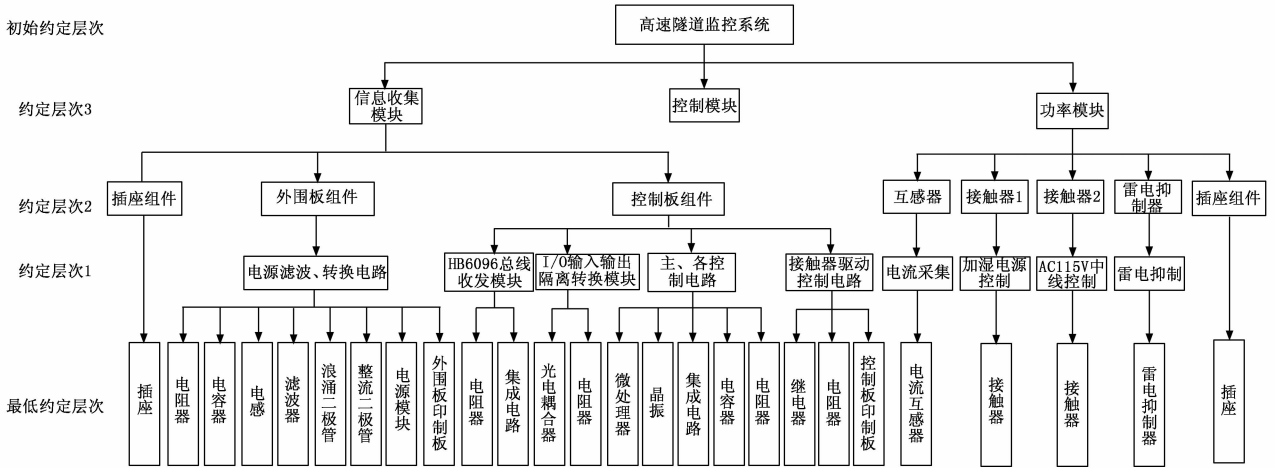


图 4 高速隧道监控系统故障诊断层次划分

2006《故障模式、影响及危害性分析指南》<sup>[9]</sup>，结合实际情况开展。

### 2.4.1 故障模式故障率计算及传递

对各个层级故障模式故障率具体计算原则如下：

- 1) 根据系统划分框图，依据从下至上的原则进行各层级产品的故障率计算；
- 2) 元器件级各个故障模式故障率计算参照 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》<sup>[10]</sup>进行。
- 3) 若选用的供应商提供了元器件故障模式信息，可不参照 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》进行故障率计算；
- 4) 根据 GJB/Z 299C—2006《电子设备可靠性预计手册》

对各个元器件进行元器件失效模式及其频数比分析；

5) 完成元器件级各个故障模式分析后，依据故障模式的分类，分析对上一层功能电路级的影响，形成故障模式的收敛与传递，得出功能电路级的故障模式。后续电路板级、模块级以及系统层级的故障模式依据这一方法逐步得到。以电源电路功能层级为例，如表 1 所示。

6) 完善整个层级链路的功能输入输出关系表，从而得出整个高速隧道监控系统更加具体清晰的输入输出分析。以模块层级功能输入输出为例，如表 2 所示。

### 2.4.2 故障模式严酷度分类

完成故障模式及影响分析后，需要对故障模式严酷度进行划分。故障模式严酷度分类具体的定义如下：

表 1 控制模块电源电路故障模式表

功能电路名称	故障模式	故障原因	对电路板级影响	最终影响	工作模式	故障率 $\lambda_p$ (10 <sup>-6</sup> /h)	故障模式频数比(×100%)	故障率 $\lambda_p$ 来源	备注
电源电路	12V 电源无输出	电容 C1 短路 电阻 R1 开路	控制板无电源输入	系统无法工作	全工作模式	0.54	0.0114	元器件级传递	
	12V 电源输出超差±10%	电容 C1 参数漂移 电阻 R1 参数漂移	控制板无电源输入超差	系统无法工作	全工作模式		0.0114		
	12V 电源指示灯不亮	二极管 V1 开路	无影响	无影响	全工作模式	0.53	0.0003		
	...	...	...	...	...	...	...		

表 2 模块级功能输入输出关系表

模块名称	数量	功能描述	输入	输出	故障判据
信息收集模块	1	通过相关传感器收集摄像头数据、车检器信息、声音传感器信息，向控制模块提供相关数据，	1 路 12V 直流工作电源、3 路离散量信号	1 路 RS485 总线信号	RS485 通讯发送中断；故；电连接器引脚短路或者断路；模块工作电源信号故障；离散量采集通路故障；
控制模块	1	根据接收到的摄像头数据、车检器信息、声音传感器信息和 PC 机指令信号，向执行模块提供开关灯具控制信号，并采集执行模块输出的电流值，实现对灯具状态监控	1 路 RS485 总线信号、1 路 12V 直流工作电源、4 路离散量信号、1 路灯具电流反馈信号	1 路 RS485 总线信号、1 路灯具控制离散量信号	RS485 数据接收中断或接收数据不成功；RS485 通讯发送中断；灯具控制信号控制失效；灯具回采电流信号、模块工作电源信号故障；主控电路不工作或工作报故；电连接器引脚短路或者断路；
...	...	...	...	...	...

1) I 类 (灾难的): 引起系统的主要或关键功能全部丧失, 或对空间环境、工作环境或工作人员造成危害的故障模式;

2) II 类 (致命的): 丧失系统部分主要功能或部分关键功能;

3) III 类 (临界的): 引起系统部分功能丧失, 但不影响主要功能的执行;

4) IV 类 (轻度的): 引起系统的性能降低及设备的非计划性维护或维修。

按照上面严酷度划分准则, 结合系统层级故障模式, 将整个单元的故障严酷度等级统计如表 3 所示。

表 3 故障严酷度分类表

严酷度类别	系统层级故障
I	系统停止工作。
II	系统采集信息数据功能完全丧失; 系统丧失控制执行部件能力; 不能接通电源; 不能断开电源。
III	主控通讯功能丧失; 主控制器控制功能丧失; 主控制器采集监控功能丧失。
IV	系统抗干扰能力下降; 系统雷电防护能力下降; 系统维护功能降低; 系统监控功能降低。

通过上述的故障诊断设计分析, 得出清晰明确的系统层次、各层次的故障模式故障率、影响以及严酷度等级。为系统故障诊断设计改进提供了依据, 具有重大意义。在高速隧道监控系统中, 考虑到工程的成本以及难易程度等问题, 并不是所有的故障都需要进行故障诊断的设计, 因此其故障诊断设计改进应综合权衡故障模式故障率、影响和严酷度来进行。

### 3 高速隧道监控系统故障诊断改进

通过对高速隧道监控系统故障诊断分析, 得知控制模块中控制电路的电源故障、采集数据故障和控制执行部件故障的故障率较高且对系统的影响巨大, 涵盖了所有的 I、II 类严酷度的故障模式。因此, 针对这三方面的故障进行故障诊断的设计改进。

目前故障诊断设计的测试方式分为自动测试设备 (ATE) 和机内测试 (BIT)。自动测试设备是指通过外部测试仪器、工具或设备对被测对象进行检测和隔离的测试; 机内测试又叫嵌入式测试, 是指系统或设备能够自己完成对系统、组件或功能模块的状态检测、故障诊断以及性能测试。对高速隧道监控系统故障诊断的改进主要通过对系统增加 BIT 功能来完成。BIT 按照测试时机, 一般分为上电 BIT、周期 BIT 和维护 BIT。上电 BIT 为系统接通电源后自动按规定的测试内容, 进行检测不需要外部提供信号; 周期 BIT 为系统周期或持续地检测关键功能特性; 维护 BIT 为维护人员通过按钮启动系统进行的检测。

#### 3.1 控制模块 BIT 电路改进

由故障诊断分析得知: 电源故障模式有无输出, 输出超差; 采集数据的故障模式有数据无输出, 输出错误; 执

行部件的故障模式有执行部件不受控制。控制模块在之前的设计中并没有对这些故障进行检测, 监控系统也没有相应的措施处理。下面对这些故障检测进行 BIT 电路设计, 提高系统故障诊断能力。

针对电源故障模式的 BIT 电路设计如图 5 所示。控制模块中的电源是 12 V 的直流电源, 通过利用 LM393 比较器搭建一个信号电压比较电路, 主控 STM32F4 实时检测 LM393 输出信号  $V_o$ , 判断控制模块的电源电压是否正常。

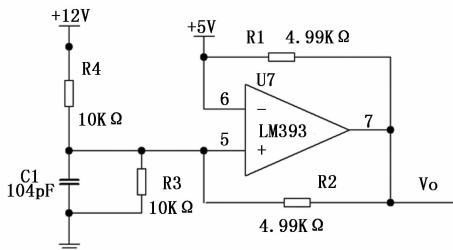


图 5 电源 BIT 电路改进设计图

针对采集数据故障模式 BIT 电路设计如图 6 所示。采集数据进入控制电路后, 使同样的数据分成两路处理。一路数据通过光耦和阻容网络隔离滤波电路处理, 另一路数据采用开关去抖电路处理。主控 STM32F4 先检测滤波电路数据信息输出信号  $V_o$ , 然后检测去抖电路数据信息输出信号  $V_o$ , 进行一致性对比, 判断是否发生数据故障。

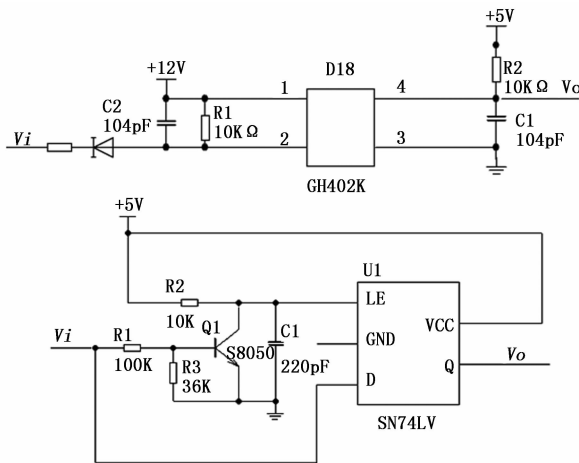


图 6 采集数据 BIT 电路改进设计图

针对执行部件故障模式 BIT 电路设计如图 7 所示。主控 STM32F4 对执行部件的电流回采电路输出信号  $V_o$  进行

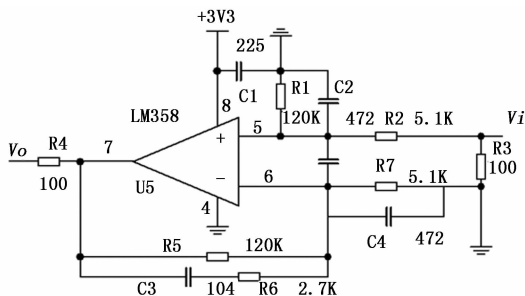


图 7 电流回采 BIT 电路改进设计图

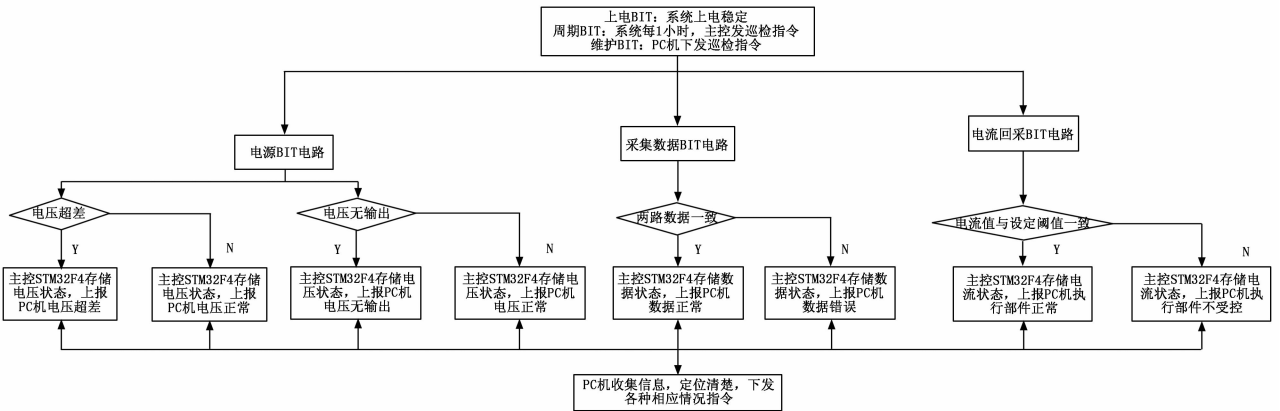


图 8 故障诊断 BIT 逻辑设计改进流程图

表 4 系统故障诊断能力对比

故障模式	对系统影响	严酷度类别	原系统是否可检	改进后系统是否可检
12V 电源无输出	系统停止工作	I	否	上电 BIT/周期 BIT/维护 BIT 可检
12V 电源输出超差 ±10%	系统停止工作	I	否	上电 BIT/周期 BIT/维护 BIT 可检
采集数据无输出	系统采集信息数据功能完全丧失	II	否	上电 BIT/周期 BIT/维护 BIT 可检
采集数据错误	系统采集信息数据功能完全丧失	II	否	上电 BIT/周期 BIT/维护 BIT 可检
执行部件不受控	系统丧失控制执行部件能力	II	否	上电 BIT/周期 BIT/维护 BIT 可检

实时监控,通过电路电流回采值与设定的阈值偏差,判断执行部件是否受控。

### 3.2 控制模块 BIT 逻辑改进

在 BIT 电路设计完成的基础上,对其进行上电 BIT、周期 BIT 和维护 BIT 逻辑设计。上电 BIT(周期 BIT 或维护 BIT)流程是:系统上电稳定后(系统每运行 1 小时或 PC 机下发巡检指令),主控 STM32F4 巡检电压,并将收集到的电压与设计好的门限值进行比对,如发现电压超出设定门限的 10%,则判定为电压发生超差故障。如发现电压超出设定门限的 50%,则判定电压发生无输出故障。主控 STM32F4 巡检数据,将两路数据进行对比,如发现两路数据不一致,则判定采集数据故障。主控 STM32F4 巡检回采电流,并将收集到的电流与设计好的门限值进行比对,如发现超出 20%,则判定发生执行部件不受控故障。各项数值状态存入指定状态寄存器,供上级 PC 机查询,同时向 PC 机报送巡检结果。PC 机设计故障状态和故障发生点报警机制,若巡检发现异常状态,PC 机迅速得知发生故障的状态和故障发生点。PC 机还设计有查调主控模块信息机制,随时可以巡视主控模块中的状态寄存器,为后续维修保障工作开展提供支撑。

整个上电 BIT、周期 BIT 和维护 BIT 逻辑设计的流程图如图 8 所示。

### 4 高速隧道监控系统故障诊断改进结果分析

通过上述的设计改进,故障诊断 BIT 设计覆盖了故障率较高且严酷度为 I、II 类的故障模式,提高了整个系统的故障诊断能力。系统故障诊断能力对比如表 4 所示,设计改进后系统对故障率较高且严酷度为 I、II 类的故障模式超过了 80%,满足了现阶段对监控系统的故障定位和维修的主要需求。

### 5 结束语

本文对高速隧道监控系统进行了故障诊断设计分析,提出一套针对高速隧道监控系统故障诊断设计分析方法,理清了高速隧道监控系统的功能结构、任务可靠性框图、故障诊断层次、故障模式、影响以及故障严酷度,并以此开展相应故障诊断设计改进,提高了整个系统的故障检测和隔离能力,满足高速隧道监控系统故障定位和维修的主要需求,可为类似产品开展故障诊断设计研究提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 胡振昌. 高速公路隧道监控系统方案设计[J]. 工程建设与设计, 2016(9): 88-91.
- [2] 岳鹏程. 高速隧道分布式光纤感温火灾报警系统[J]. 电子测量技术, 2018, 17: 70-73.
- [3] 李林. 隧道智能化管理平台的构建探索与应用[J]. 中国交通信息化, 2019(S1): 243-245.
- [4] 吴传贵. 基于 FMECA 的飞参采集器维修性信息分析[J]. 计算机测量与控制, 2016(3): 170-173.
- [5] 欧爱辉. 基于雷达的测试性设计优化方法应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2019(2): 110-113.
- [6] 蒋超利. 舰船综合电力系统机内测试研究[J]. 计算机测量与控制, 2018(8): 5-9.
- [7] 孙萍. 飞航装备测试性设计分析及故障诊断实施策略工程应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2017(3): 11-14.
- [8] 蒋超利. 某型舰船变流机组的测试性研究[J]. 船电技术, 2018(9): 44-48.
- [9] GJB/Z 1391-2006.《故障模式、影响及危害性分析指南》[S].
- [10] GJB/Z 299C-2006.《电子设备可靠性预计手册》[S].