

# 基于 RCM 的轨道交通车辆计划维修任务确定方法研究

任广强<sup>1</sup>, 万国强<sup>1</sup>, 刘余<sup>2</sup>, 徐志锋<sup>2</sup>

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术中心, 山东 青岛 266000;

2. 上海慧程航空科技有限公司 技术部, 上海 200241)

**摘要:** RCM (以可靠性为中心的维修) 分析是目前制定高端装备计划维修要求的主流方法, 旨在保证装备固有安全性及服务可靠性前提下, 最大限度降低维修成本; 依据我国轨道交通产品 (如高速动车组) 运维特点, 阐述了基于国际标准的轨道交通产品 RCM 分析方法, 并结合具体分析案例, 通过 RCM 分析结果与现有检修规程计划维修任务对比分析, 说明了应用 RCM 分析开发检修规程的优越性。

**关键词:** 轨道交通; 计划维修; 以可靠性为中心的维修; 维修成本

## General Research on RCM Based Railway Vehicle Scheduled Maintenance Task Determination Method

Ren Guangqiang<sup>1</sup>, Wan Guoqiang<sup>1</sup>, Liu Yu<sup>2</sup>, Xu Zhifeng<sup>2</sup>

(1. Technology Center, CRRC Qingdao Sifang Co., LTD., Qingdao 266000, China;

2. Technology Department, Shanghai H-Visions Aviation Technology Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

**Abstract:** RCM (Reliability Centered Maintenance) analysis is currently the primary method used for high-end equipment scheduled maintenance requirement development, as it can effectively improve the maintenance cost competitiveness while maintaining the inherent safety and service reliability. Based on the operation and maintenance characteristics of domestic railway industry product, e. g. high-speed train, this article generally introduces the applicable RCM analysis method developed in accordance with the related international standards and interprets the advantages through comparing the analysis results with current scheduled maintenance program.

**Keywords:** railway industry; scheduled maintenance; RCM; maintenance cost

## 0 引言

在保证轨道交通产品安全可靠运行的前提下, 能够最大限度地降低维修成本, 是衡量检修规程先进性的重要标准。目前, 国产轨道交通车辆检修规程的制定多以工程经验判断为主, 普遍缺乏分析及数据支撑, 导致检修规程的制定不够体系化, 系统及部件存在过度维修, 检修费用高等问题<sup>[1-2]</sup>。

RCM 分析方法起源于民用航空业, 是制定计划维修要求的首选方法<sup>[3-4]</sup>。经过多年发展, 该方法逐渐通用化与标准化, 并广泛应用于在军事、核能、轨道交通、电力、航空、航天、船舶、化工、电子、机械等各行业。典型的 RCM 分析标准包括美国船舶局《RCM 指南》, 美国航空航天局 (NASA)《设施及相关设备 RCM 指南》, 国际电工技术委员会标准 IEC 60300-3-11, 美国航空运输协会 ATA

MSG-3, 美国国防部标准 MIL-STD-3034, ASD (欧洲航宇与防务工业协会) S4000P 等。

RCM 将预防性维修、修复性维修及可靠性管理完美融合, 通过一整套体系保证了产品运行的安全性、可靠信息给与经济性, 如图 1 所示。RCM 分析基于终端产品故障影响定义维修任务, 打破了传统针对部件的定时预防维修的理念, 认为不是维修间隔越短越好, 维修任务越多越好, 而是在保证装备或产品安全的基础上, 以可靠性为中心, 使得维修内容简单而有效。

对国际 RCM 相关标准<sup>[5-8]</sup>进行了深入研究, 结合轨道交通行业特点, 给出了适用的系统 RCM 分析方法, 并结合某型号动车组分析案例说明了该方法可行性与优越性。

## 1 国内外研究及应用现状

国外轨道交通行业, 日本高速列车主要采用以可靠性为中心的预防修制度, 注重对设备性能和可靠性周期的优化, 并合理优化其维修策略和周期<sup>[2,9]</sup>。德国 ICE 动车组同样实行以可靠性为中心的维修, 将定期检测、保养与状态修结合, 采用部件互换修和主要部件集中修相结合的方法<sup>[10]</sup>。法国高速列车 TGV 的维修制度也大致类似, 以计划预防修为主体, 分为运营检查、定期检查、定期部件更换

收稿日期: 2018-11-25; 修回日期: 2018-12-20。

**作者简介:** 任广强 (1980-), 男, 山东聊城人, 大学本科, 高工, 主要从事轨道车辆设计及检修运用技术方向的研究。

万国强 (1973-), 男, 江西南昌县人, 大学本科, 教授级高工, 主要从事轨道车辆设计及检修运用技术方向的研究。

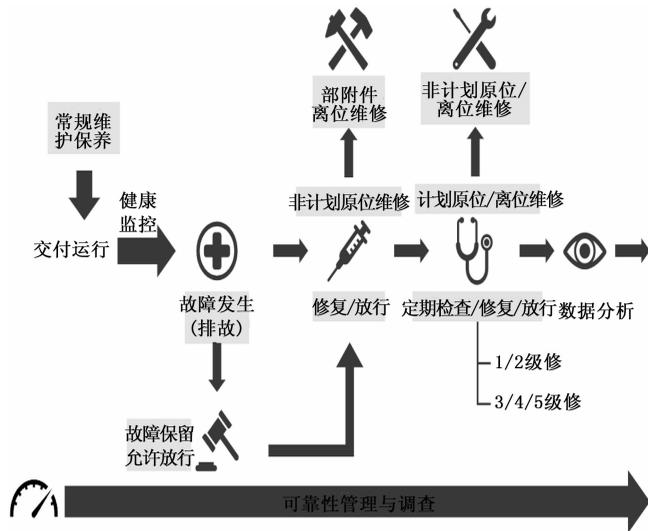


图 1 以可靠性为中心的维修

等等级修程<sup>[2,11]</sup>。

国内轨道交通行业也针对检修规程制定方法做了大量研究<sup>[2,12]</sup>，文献[2]通过吸收航空 ATA MSG-3 维修大纲制定理念，从部件角度出发给出了动车组维修策略制定流程。文献[12]以 FMEA 为基础，给出了通过 RCM 决断逻辑定义计划维修任务的方法。

综上，目前国内轨交行业在先进 RCM 分析方法的应用方面尚未全面推广与铺开，对与 RCM 分析方法的理解有一

定的局限性，没有从系统角度出发，通过自上至下的逻辑分析制定计划维修任务。另外，没有考虑到我国动车组数量多、运行线路繁忙的实际情况，没有将影响运行秩序类故障纳入到 RCM 分析逻辑，尚未形成标准化、规范化流程，工程应用尚不成熟。

## 2 系统 RCM 分析方法

依据对 RCM 国际标准<sup>[3-6]</sup>的剪裁，结合我国动车组运用与维修特点，基于 RCM 的轨道交通车辆系统计划维修任务决策逻辑如图 2 所示，RCM 分析过程主要包括以下 6 个步骤：

- 步骤 1: 维修重要项 (Maintenance Significant Item, MSI) 选择;
- 步骤 2: 分析数据准备 (MSI 描述);
- 步骤 3: 功能故障分析;
- 步骤 4: 故障影响分析;
- 步骤 5: 故障原因分析;
- 步骤 6: 维修任务定义。

### 2.1 MSI 选择

在轨道交通车辆产品分解基础上，结合故障后果，通过回答以下三个问题，自上而下进行 MSI 筛选：

- 1) 故障对正常履职的操作人员 (如司机、乘务员、机械师) 来说是无法发现或不易察觉的?
- 2) 故障影响使用安全、秩序或违反环境标准或法规吗? (包括安全/应急系统或者装置)

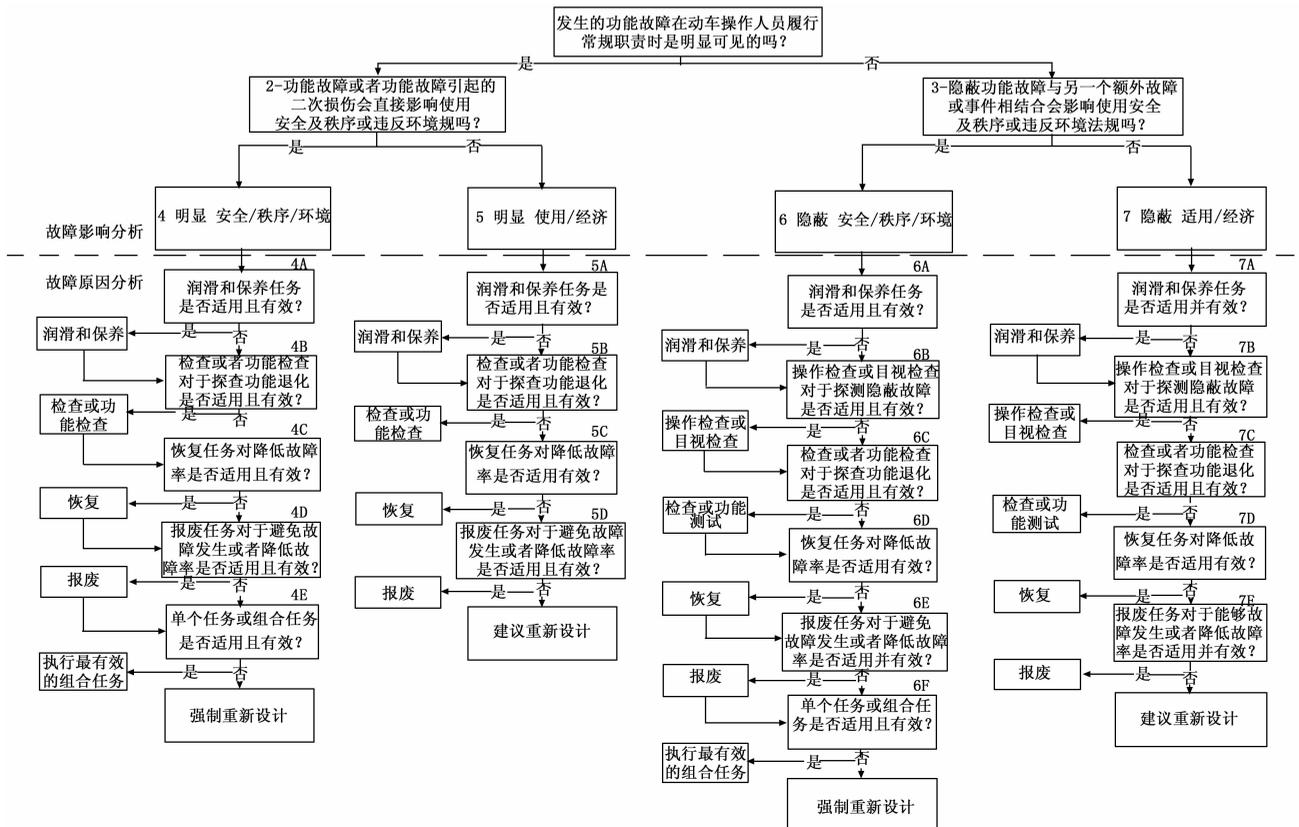


图 2 RCM 分析逻辑决断图

3) 故障是否会影响使用性能?

当以上三个问题,有一个回答为是的时候,可判断为是 MSI。要特别注意的是,在 RCM 分析中 MSI 为最高可管理层,通常为 LRU (在线可更换单元)的上一级。MSI 等级需足够高,以避免不必要的功能分析,但等级也不能过高,确保经过适当的分析就能包括其所有的功能、故障和引起故障的原因。

2.2 分析数据准备

分析数据准备需要给出 MSI 功能、故障指示、部件描述、MSI 间接口关系、组成该 MSI 的可靠性数据等方面详尽的信息,以支撑后续分析工作的开展。例如,故障指示用于判断功能故障的明显与隐蔽,MSI 接口用来支撑故障原因的转移决策,实现 RCM 分析的集成化,可靠性数据用于后续计算或决策维修任务间隔。

2.3 功能故障分析

功能故障分析针对 MSI 的各个功能进行,依次对各个功能的故障、故障影响、故障原因等进行详细分析与判断。

- 1) 功能一项目常规特征行为及作用;
- 2) 功能故障一项目不能履行其指定的功能;
- 3) 故障影响一功能故障的后果是什么;
- 4) 故障原因一为什么发生功能故障。

功能故障分析从 MSI 功能角度出发,由上至下进行分析(不同于以往 FMEA 分析,基于部件由下至上进行分析),考虑功能故障对整车的影响,以及系统间的接口关系,如图 3 所示。每个 MSI 功能可能有多个功能故障,每个功能故障仅有一个故障影响,每个功能故障可能由一个或多个故障原因引起。

2.4 故障影响分析

故障影响分析用于确定功能故障影响类别,依据国产轨道交通车辆运行特点,故障影响类别可分为以下四类:

- 1) 明显安全/秩序/环境(4类),即 MSI 功能故障是明显的,且会对车辆运行安全、秩序或环境造成不利影响;
- 2) 明显使用/经济(5类),即 MSI 功能故障是明显的,

且会对车辆运行能力造成不利影响,或造成经济性惩罚;

3) 隐蔽安全/秩序/环境(6类),即 MSI 功能故障是隐蔽的,且该功能故障与相关系统或部件的故障相结合,会对车辆运行安全、秩序或环境造成不利影响;

4) 隐蔽使用/经济(7类)即 MSI 功能故障是隐蔽的,但该功能故障与相关系统或部件的故障相结合,不会对车辆运行安全、秩序或环境造成不利影响。

故障影响分析以 MSI 功能故障为对象,分析得到的故障影响类别决定了故障原因分析逻辑。

2.5 故障原因分析

故障原因分析基于故障影响分析结果,依据不同决断逻辑定义维修任务。针对所有类别故障(4,5,6,7类),润滑和保养、检查与功能测试、恢复、报废任务均适用。针对安全、秩序、环境影响类别(4,6类)故障,在制定任务时考虑了多任务组合,以通过多个维修任务预防故障后果。针对隐蔽任务类别故障(6,7类),在制定任务时考虑了操作检查及目视检查来发现故障。在执行决断逻辑时,针对安全类影响的故障原因,需要回答逻辑图中所有的问题,而非安全影响类故障,除了润滑和保养外,当得到一个适用并有效的维修任务后逻辑即终止,无需进一步分析。因为润滑和保养任务仅能减缓故障发生,而不能防止故障发生,故即使某一功能故障定义了润滑和保养任务,也要继续执行后续任务制定逻辑判断。当通过故障原因分析无法得到适用并有效的维修任务时,需要给出设计更改建议。特别地,当故障原因所对应的故障影响类别为 4、6 类,且无法得到适用并有效的维修任务时,须进行强制设计更改。

2.6 维修任务定义

当完成故障原因分析后,我们通常会得到一系列维修任务。此时需要在该 MSI 内部按照故障影响类别,所得到维修任务的维修目的、范围等,对维修任务进行必要的合并,得到最终针对该 MSI 的维修任务。

对于每个维修任务需要进一步地进行维修任务编号,给出任务目的、任务描述、任务执行的基本步骤等信息,以便进行进一步的维修任务分析。

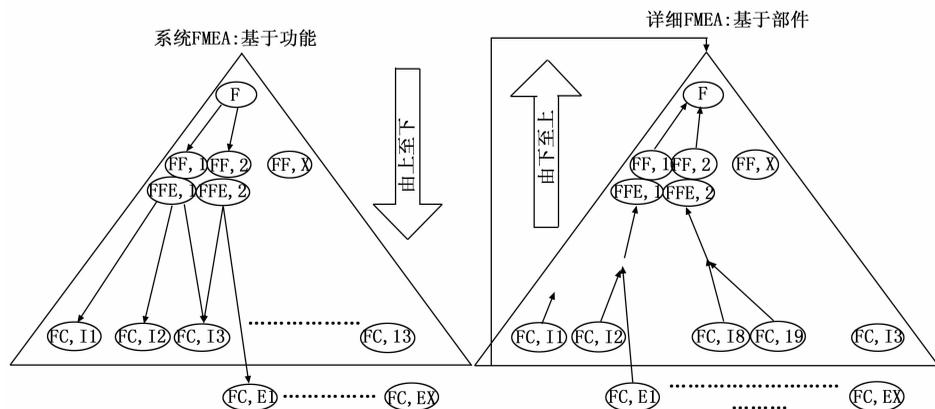
3 RCM 分析案例

下面以 CRH380A 主供电系统下 MSI 4100 “高压受流”为例,进一步阐述 RCM 分析过程。

3.1 MSI 选择

针对 MSI 4100 “高压受流”,MSI 判断问题回答如下:

- 1) 某些故障对列车操作人员而言是隐蔽的,比如:受电弓阻尼器漏油;
- 2) 某些故障对行车安全有影响,比如:当受电弓结构破裂,可能造成异物飞出伤人;
- 3) 某些故障对使用有影响,比



F: 功能;FF: 功能故障;FFE: 功能故障影响;FC, I: 故障原因, 产品内部;FC, E: 故障原因, 产品外部

图 3 RCM 分析逻辑决断图

如:受电弓降弓继电器(Pan DWR)故障在断开位,会导致一致排气,使受电弓无法升起,影响正常使用。

### 3.2 分析数据准备

高压受流 MSI,包含受电弓总成、控制旋钮、及逻辑控制继电器组成,能够实现升降弓控制、自动降弓、受流功能。受电弓组成及原理如图4所示。

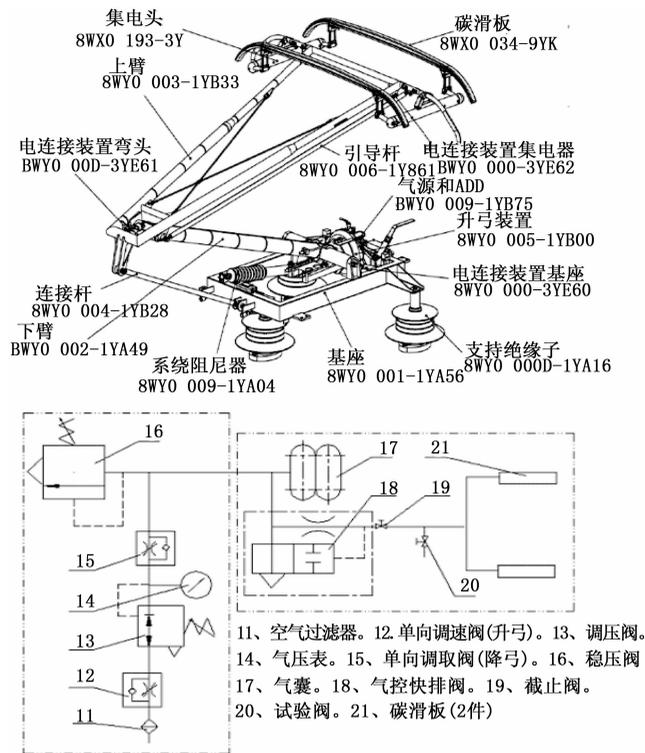


图4 受电弓组成与原理

受电弓控制信号由司机室操纵台的降弓按钮(PanDS),配电盘上的升弓操作开关(PanUS)及切换开关(PanCGS)发出,通过直流线路传输信号,可控制相关继电器,实现对受电弓电磁阀作动控制。控制命令也可通过司机室MON屏幕远程切换控制。

受电弓升弓控制命令发出后,升弓电磁阀(12)得电作动,压缩空气经阀板内调压阀(13)、稳压阀(16)调节压力后由供气管路送至升弓气囊(17),同时一路经自动降弓装置气控快排阀(18)向集电头上碳滑板(21)内气腔充气。当气压达到一定压力时,受电弓开始升弓,并持续向气囊(17)供气,与接触网接触实现受流。

受电弓降弓控制命令发出后,电磁阀失电,气囊(17)中压缩空气压力迅速降低,压缩气体经电磁阀口排向大气,受电弓靠自重落弓,受电弓阻尼器吸收冲击载荷,确保受电弓不会因下降速度过大发生损坏。

受电弓自动降弓,压缩空气通过受电弓装置进入到带有气腔的碳滑板(21),当碳滑板发生磨损或异物击打而破坏漏气,压缩气体从气控快排阀(18)中迅速排出,从而实现自动降弓。能够有效避免弓网故障进一步扩大。

针对该MSI的其它详细描述由于篇幅所限,不再赘述。

### 3.3 功能故障分析

基于3.2描述内容,4100高压受流MSI部分功能及其功能故障分析结果如表1所示。

针对高压受流MSI,提供单侧司机室受电弓控制命令的功能,功能故障之一是不能提供单侧司机室冗余的受电弓控制命令,因为可通过冗余方式(MON屏或升弓旋钮)升弓,故对整车而言无影响。故障原因要给出具体部件的具体故障模式,如升弓旋钮卡滞或触点故障。

针对高压受流MSI,提供单弓升降功能,功能故障之一是降弓过快,因为受电弓降弓过快时,受电弓仍能降下,不会影响受电弓使用,故障原因之一为阻尼器漏油或阻尼变小。

### 3.4 故障影响分析

针对3.3中功能故障影响1A1进行功能故障影响分析判断,依据图1RCM决断逻辑问题回答如下:

问题1:发生的故障在动车操作人员履行常规职责时是明显可见的吗?

回答为“是”,该功能故障对动车组操作人员是明显可见的,因为司机可通过司机室MON屏查看受电弓是否升起。

问题2:功能故障或者功能故障引起的二次损伤会直接影响使用安全、秩序或违反环境法规吗?

回答为“否”,功能故障对使用安全或环境没有直接不利影响,因为司机可通过冗余的方式给出受电弓升起控制命令。

综上,故障影响类别是5类,明显使用/经济。

针对3.3中功能故障影响2A1进行功能故障影响分析判断,依据图1RCM决断逻辑问题回答如下:

问题1:发生的故障在动车操作人员履行常规职责时是明显可见的吗?

回答为“否”,该功能故障对动车组操作人员来说是不可察觉的,因为没有受电弓升降时间监控,降弓读秒也不是司机正常履职范围。

问题3:隐蔽功能故障与另一个额外故障或事件相结合会影响使用安全、秩序或违反环境法规吗?

回答为“否”,该功能故障与其它任何附加的故障组合对使用安全或环境没有不利的影晌,因为仍受电弓仍可降下。

综上,故障影响类别是7类,隐蔽使用/经济。

### 3.5 故障原因分析

针对功能故障原因1A1B“受电弓切断继电器1—重置(Pan COR1—R)线圈故障”,按照5类影响进行故障原因分析,逻辑决断如图5所示。

根据RCM分析逻辑回答结论,针对“受电弓切断继电器1—重置(Pan COR1—R)线圈故障”,没有得到适用且有效的润滑或勤务、检查/功能检查、恢复或报废任务,且无需重新设计。

针对功能故障原因2A1A“阻尼器故障(漏油),阻尼变小”,按照7类影响进行功能故障原因分析,逻辑决断如图6所示。

表 1 功能故障分析样例

功能		功能故障		故障影响		故障原因	
1	提供单侧司机室受电弓控制命令	1A	不能提供单侧司机室冗余的受电弓升弓控制命令。	1A1	无影响,可通过冗余方式提供受电弓升弓控制命令。	1A1A	受电弓升弓旋钮卡滞或触点故障
						1A1B	受电弓切断继电器 1-重置(Pan COR1-R)线圈故障
						1A1C	终端装置故障转移至 MSI;车辆信息控制
						.....	.....
2	提供单弓升降功能。	2A	降弓过快。	2A1	无影响,受电弓仍可降下。会增加受电弓降下的冲击力,增加故障可能性。一旦受电弓故障,可换弓运行。	2A1A	阻尼器故障(漏油),阻尼变小
						.....	.....

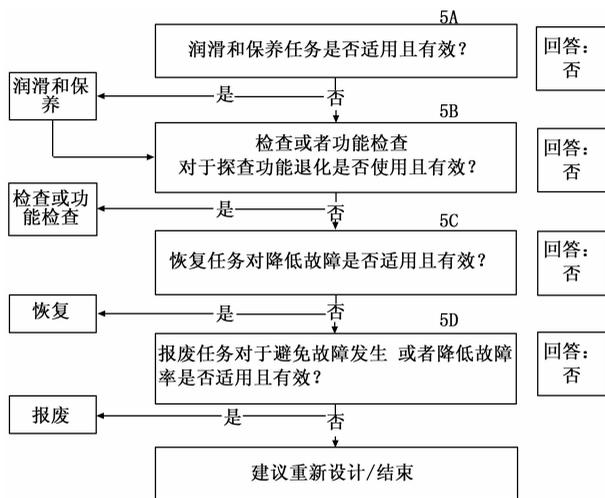


图 5 功能故障原因分析-1A1B

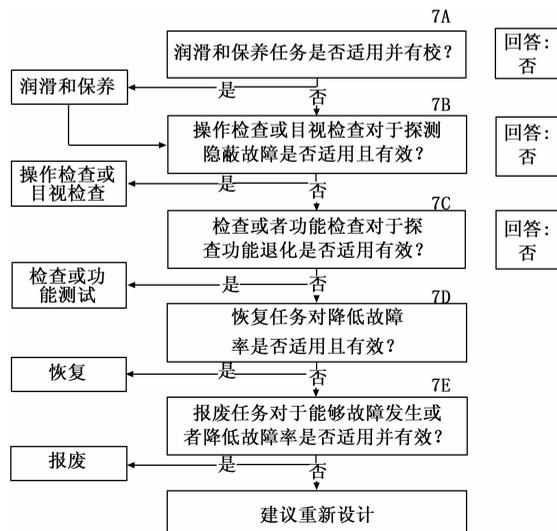


图 6 故障原因分析-2A1A

根据 RCM 分析逻辑回答,对阻尼器进行一般目视检查是适用且有效的,因为可发现阻尼器漏油,并定义任务 4100-14-001 一般目视检查(GVI)受电弓阻尼器。特别要注意的是,在回答第二个问题“操作检查或目视检查对

于探测隐蔽故障是否使用且有效”时,我们发现其实阻尼器故障完全可以通过降弓操作判断冲击发现,也就是说操作检查任务是适用的。但由于降弓操作每天都在进行,因此该任务是无效的。

同理,针对功能故障原因 1A1A,根据下层逻辑分析没有定义出维修任务,针对功能故障原因 1A1C,转移至车辆信息控制 MSI,无需进行下层分析。

#### 4 试验结果与分析

本方法基于 RCM 理念制定,RCM 的维修理念<sup>[3-8]</sup>总结如下:

1) 维修只能维持或恢复产品的固有可靠性而不能提高其可靠性,产品可靠性与安全性是由设计赋予的固有属性。频繁维修会带来人为差错并导致早期故障。

2) 根据产品功能故障影响后果,结合故障规律,采用不同的维修策略和维修时机。故障后果是否可接受是确定计划维修任务的出发点,针对轨交车辆行业,不影响安全、秩序或环境的故障(尤其采用冗余设计规避了安全或秩序影响时),可从经济性角度加以权衡,采取故障后维修。而针对没有耗损性故障规律的产品或部件,定时拆修或报废并不能改变故障后果,也不能降低故障率,应通过检查或功能检查任务,视情维修。

3) RCM 提出了潜在故障。所谓潜在故障是指对运行中的设备如不采取预防性维修和调整措施,再继续使用到某个时候会发生的故障,也就是说潜在故障是一种功能故障即将发生的可识别的状态。当潜在故障能够识别且与功能故障间具有稳定的间隔(小时、公里、次数等)时,可通过对产品潜在故障进行检查,视情维修,可实现安全且经济的维修。

4) RCM 提出了隐蔽故障和多重故障概念,隐蔽故障也叫隐蔽功能故障,是指一个单独的故障模式的影响针对正常操作者来说不是明显的。多重故障是指由连贯发生的两个或多个独立故障所组成的故障事件,它会造成其中任何单点故障不能引起的后果。隐蔽故障若没有及时发现则可能导致多重故障,RCM 分析通常对隐蔽故障定义故障发现任务,来排除隐蔽故障,防止多重故障发生。

本方法将 RCM 维修理念融入计划维修任务制定决断逻辑 (如图 2 所示) 中, 结合分析案例结果具体说明如下:

1) 从功能、功能故障、故障影响、故障原因角度, 由上至下进行分析, 考虑了隐蔽故障和多重故障。针对每个功能故障, 判断是否为隐蔽故障, 若为隐蔽故障则考虑多重故障后果。比如: 功能故障 2A1 降弓过快对车上操作人员来说是隐蔽的, 当此故障 (降弓过快) 与其他故障或事件相结合时 (多重故障) 的影响, 经判断该功能故障影响为“隐蔽使用/经济”类, 后续按照不同的故障影响类别进行维修任务制定 (任务决断逻辑如图 2 所示);

2) 根据故障影响后果, 结合故障规律, 采用不同的维修策略和维修时机。比如升弓控制旋钮和继电器 (Pan COR1-R) 均采用冗余设计, 且故障不会影响行车安全和秩序, 可采取故障后维修策略, 再结合具体任务决断逻辑判断是否需要维修任务; 比如 Pan COR1-R 故障影响为使用经济, 其故障规律表现为无记忆性 (无耗损), 在寿命期内不会表现出明显的退化特征, 故针对图 5 中问题 5B/5C/5D 回答均为“否”, 同时继电器没有消耗品 (如润滑剂) 可补充, 问题 5A 回答为“否”, 根据图 2 中决断逻辑, 无需制定计划维修任务, 采用事后维修 (故障修) 策略;

3) 采用不同的维修策略和方式, 减少维修费用。针对使用/经济类的故障, 除了润滑和保养外, 当得到一个适用并有效的维修任务后逻辑即终止, 无需进一步分析。此种维修策略可在维持车辆固有可靠性基础上, 大幅降低维修成本。比如受电弓阻尼器, 当 7C 问题回答为“是”, 后续 7D/7E 则无需回答 (无需制定恢复及报废任务), 采用视情维修即可。

4) 装备的固有可靠性与安全性是由设计制造赋予的特性。图 2 中下层故障原因分析决断逻辑引入了影响产品设计思想, 当功能故障影响安全和秩序时, 没有维修任务制定则强制进行设计更改, 以提高车辆的固有可靠性水平;

5) 基于 RCM 的车辆计划维修任务制定方法考虑了 MSI 间接口关系, 确保分析完整性。比如: 1A1C 终端装置故障时, 司机无法通过 MON 屏发送升/降弓命令, 该终端装置不属于高压受流 MSI, 但也需作为故障原因加以考虑, 确保分析完整性。

以 CRH380A 为例, 基于 RCM 制定的修程与传统维修理念制定的修程进行对比, 现有修程存在过度修情况, 能做预防性维修任务均定义预防性维修任务, 而 RCM 方法采用不同的维修策略和方式, 可以大幅降低维修费用。以分析案例中提及的 Pan COR1-R、受电弓阻尼器为例, 现有修程规定每 480 万公里或 12 年更新 (报废), 而 RCM 分析方法从安全性和经济性角度, 综合考虑了故障影响、维修策略、维修时机, RCM 分析表明 Pan COR1-R 和受电弓阻尼器无需报废, 采用不同的维修策略 (Pan COR1-R 无预防性维修, 故障后维修策略; 阻尼器采用目视检查任务, 视情维修策略), 结合部件退化特征, 定义适用且有效的维修任务 (技术可行性与经济可行性), 避免直接依据工程判

断得到维修任务, 保证了维修任务的完整性与正确性, 节约了大量的维修成本。

## 5 结论

构建了 RCM 系统计划维修任务定义方法, 通过案例表明其适用性, 通过 RCM 分析与原有检修规程对比, 证明其先进性。形成研究结论如下:

1) 基于国际标准研究, 结合轨道交通行业特点, 给出了标准化规范化的 RCM 系统计划维修任务定义方法, 引入了秩序类影响, 符合我国轨道交通行业现状;

2) 基于 RCM 的系统计划维修任务定义方法, 不同于以往基于 FMEA 对部件由下至上的分析方法, 从系统功能角度出发, 由上至下进行分析, 充分考虑了系统间接口关系, 确保了分析完整性, 避免由于部件角度容易遗漏和无法综合考虑对整车的故障影响问题;

3) 基于 RCM 的系统计划维修任务定义, 根据功能故障影响来选择任务定义路径, 针对使用经济类故障, 除了润滑和保养外制定一个任务后逻辑终止, 无需进一步分析。此种维修策略, 通过故障影响来平衡事后维修与预防性维修, 能够大幅避免预防性维修成本, 具有一定先进性;

4) 通过案例对比分析, 针对原修程存在过度修、维修费用高的问题, 通过本方法可避免由于无效任务 (如继电器等无耗损性电子部件, 恢复及报废任务) 造成成本浪费, 可大量降低维修成本。

## 参考文献:

- [1] 张 皓. 当前动车组维修体制现状分析及展望 [J]. 机械化工, 2018, 157.
- [2] 周 斌, 谢明源, 吴克明. 动车组维修体制现状分析及展望 [J]. 机车电传动, 2017 (1): 17-21.
- [3] Marvin R. Reliability-Centered Maintenance [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1998, 60 (2): 121-132.
- [4] Smith A M. Reliability-Centered Maintenance [M]. New York: Mc Graw Hill Inc, 1993.
- [5] MSG-3 Operator/Manufacturer scheduled maintenance development; Air transport association of America, 2015.
- [6] S4000P International specification for developing and continuously improving preventive maintenance, 2014.
- [7] IEC 60300-3-11, 2009, Dependability management Part 3-11; Application guide Reliability centered maintenance [Z].
- [8] Reliability Centered Maintenance (RCM) Handbook - R1 [Z]. 2007.
- [9] 王勇智. 日本新干线铁路车辆检修 [J]. 机车电传动, 2003 (5): 27-29.
- [10] 冯双洲. 德国 ICE 高速动车组及其检修技术 [J]. 机车电传动, 2002 (4): 4.
- [11] 张欣元. 法国 TGV 高速列车的检修 (三) [J]. 国外铁道车辆, 1999 (3): 39.
- [12] 韩 强. 基于 RCM 的 HXD1 型电力机车维修策略研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2018.