

研
究
开
发RAMS 在轨道车辆网络控制系统
设计中的应用唐献康^{1,2}, 刘晓冰¹, 田雅华², 王万雷³(1. 大连理工大学 管理与经济学部, 辽宁 大连 116024;
2. 中国北车股份有限公司大连电力牵引研发中心 辽宁 大连 116022;
3. 大连民族学院 机电信息工程学院, 辽宁 大连 116600)

作者简介：唐献康（1965-），男，博士研究生，高级工程师（教授级），长期从事轨道交通装备电力牵引与控制产品的研究开发和相关管理工作。

摘 要：分析了RAMS的构成要素之间的关系以及轨道车辆网络控制系统的结构、各组成单元的功能，提出了针对网络控制系统的RAMS设计方法，包括系统的可用性设计，系统可靠性的分配与预计方法，系统的可维修性分配与预计方法，系统的可维修性验证方法。建立了基于RAMS的网络控制系统设计流程，在满足合同指标的条件下改善了产品的设计流程。

关键词：轨道车辆；网络控制系统；RAMS

中图分类号：U26；TP393 文献标识码：A 文章编号：1000-128X(2012)03-0006-05

The Application of RAMS in Network Control System Designing of Rail Vehicles

TANG Xian-kang^{1,2}, LIU Xiao-bing¹, TIAN Ya-hua², WANG Wan-lei³

(1. Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. CNR Dalian Electric Traction R&D Center, Dalian, Liaoning 116022, China;

3. College of Electromechanical Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: RAMS element relationship, structure and the component functions of the rail vehicle network control system were analyzed. RAMS designing method for network control system was introduced, including availability designing, reliability assigning and predicting, maintainability assigning and predicting method, and maintainability verification. Based on RAMS, a corresponding network control design flow chart was put forward, which improved product design flow chart with contract index satisfied.

Key words: rail vehicles; network control system; RAMS

0 引言

随着铁路的不断提速，我国铁路的运营能力也在不断提升。铁路提速的同时，我国的城市轨道交通也得到了迅速发展，各大城市大力发展地铁和轻轨项目，这些项目的发展对轨道交通系统可靠性、安全性也提出了越来越高的要求，轨道交通装备业也因此面临着严峻的考验。轨道车辆的RAMS（可靠性Reliability、可用性Availability、维修性Maintainability、安全性Safety的缩写）是列车经过长期运用所表现出来的特性，是在系统的整个寿命周期中，通过已有的工程概念、方法、工具和技术而获得的，它反映出系统能够保证在指定的时间内，安全达到轨道交通运输规定水平的置信度^[1]。

应用RAMS理论对企业产品的设计与生产过程进行有效组织，使企业各项活动能规范运行，是轨道交通装备业深化管理、提高产品竞争力、站稳轨道交通市场的必经之路。

国外学者对RAMS的研究起步较早，目前的研究主要集中在RAMS参数的评估、RAMS分析方法学、基于RAMS的产品设计、支持与生命周期成本管理、基于RAMS的仿真与建模方面。例如：文献[2-4]研究了针对RAMS的设计和维修环节进行多目标的优化方法问题，为企业满足RAMS要求提供了一定的优化理论方法；文献[5-8]把RAMS与产品设计、产品生命周期成本管理联系起来，从产品设计和全生命周期成本管理方面对RAMS的各项指标进行了分析，给出了产品设计和开发过程中需要考虑到RAMS因素；文献[9-13]针对RAMS问题提出了基于Markov的可靠性模型并建立了设备有效性在缺乏维护条件下的一般模型。我国目前对RAMS的研究主要针对军工产品。随着我国高速

收稿日期：2011-12-06

基金项目：国家自然科学基金资助项目（61034003）

铁路的发展,一些学者对RAMS在铁路产品的设计中的应用进行了研究,如文献[14]研究了铁道机车车辆电子产品的RAMS,对电子产品危害出现的频度进行了量化,并对各种电子产品可能引发的危害严重等级进行了细化;文献[15]将RAMS方法应用于城市轨道交通牵引供电系统的单个设备、各子系统及整个系统,建立了针对牵引供电系统的RAMS管理模式;文献[16]利用可信度理论以及模糊理论对铁路牵引供电系统进行了RAMS评估。以上的研究成果对RAMS在我国轨道交通方面的应用起到了积极的推动作用。但是在针对RAMS理论在企业中具体应用方法方面缺少实质性的和具有指导意义的文献。本文结合轨道车辆网络控制系统的特点,对其应用RAMS理论进行设计过程管理进行探讨。根据具体案例说明RAMS在企业设计过程中的应用方法。

1 RAMS 构成要素分析

RAMS由以下要素组成:

可靠性(Reliability):产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的能力。可靠性的概率度量亦称可靠度。

可用性(Availability):可以维修的产品在某时刻具有或维持规定功能的能力。也就是说,产品在任一随机时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度。可用性的概率度量亦称可用度。

维修性(Maintainability):产品在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和资源进行维修时,能够完成规定维修工作的能力,或称保持或恢复到规定状态的能力。维修性的概率度量亦称维修度。

安全性(Safety):不发生不可接受损害风险的可能性。

轨道车辆网络控制系统的RAMS是其可靠性、可用性、维修性和安全性的总称。其RAMS主要取决于可用性和安全性,取决于可用性和安全性之间技术要求的处理。而系统运用中的安全性和可用性目标,只能通过满足系统的可靠性和维修性技术要求,控制当前和长期的运用、维修工作和环境来达到。系统的可用性与可靠性和维修性的关系主要体现在系统的可靠性和维修性会对系统的可用性产生影响,如:系统发生故障,无法在规定的时刻或时间间隔内完成所要求的功能;系统维修过程中所花费的时间直接决定了系统的可用性。系统可靠性和维修性也直接影响系统的安全性,例如:导致

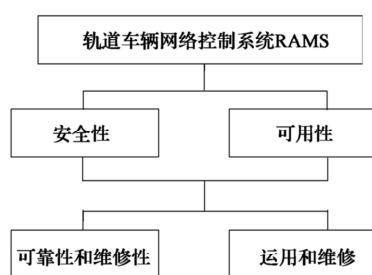


图1 RAMS各组成部分之间的相互关系

可靠性问题的故障模式中会存在一部分产生安全性问题;安全性和维修性的关系主要表现在对可能产生危及安全的故障模式的系统与部件进行维修时的状况,包括维修的方便性与维修过程中发生错误的概率等。RAMS组成部分之间的关系如图1所示。

2 轨道车辆网络控制系统的RAMS设计

TCN(Train Communication Network)网络控制技术是目前国际和国内轨道车辆网络控制技术的主流,该技术符合国际上最先进的列车网络通信标准IEC61375。TCN标准定义了2种用于列车车载数据通信的现场总线:多功能车辆总线(Multifunction Vehicle Bus, MVB)和绞线式列车总线(Wire Train Bus, WTB)。其中MVB总线主要用于车辆级网络通信,WTB总线主要应用于列车级网络通信。TCN网络控制系统包括TCN网关、车辆控制单元VCU、故障诊断单元DVCU、远程I/O单元、智能显示单元IDU、MVB总线中继器、MVB/CAN转换单元、MVB/RS485转换单元、MVB/ETHERNET转换单元和MVB终端器等,系统结构拓扑图如图2所示。

网络控制系统由WTB和MVB两级总线构成,在车辆不重联情况下整车仅为MVB通信,VCU、DVCU、HMI分别放置在2台头车,对称布置,IO单元、MVB网关等分别放置在各个车厢内,中继器RPT放置在车辆中间,起到对MVB信号的放大和调理作用,提高了网络系统的可靠性。同时,其中1台头车安装了1个GPRS的设备,可以以无线数据传输形式将车辆的相关信息发送到地面控制中心。

2.1 网络控制系统各单元功能分析

TCN网关GATEWAY属于IEC61375-1中规定的五类设备(最高级别设备),能够访问WTB、MVB或其他总线,具有设备状态查询、过程数据通信、消息数据通信、监控数据通信和总线管理功能。

车辆控制单元VCU1编程环境符合IEC61131-3国际标准。VCU负责MVB网络控制系统的总线管理监控,同时作为控制核心,执行控制系统的所有控制功能。

VCU2作为VCU1的热备设备,当VCU1发生故障时,VCU2接管总线管理和应用控制功能。

诊断DVCU的编程环境同样符合IEC61131-3国际标准,具有故障诊断、故障记录功能,并支持以太网或RS232通信下载功能,可通过TCMS维护终端软件下载到PC机进行数据分析和报表输出打印。

智能显示单元IDU1、IDU2支持图形化组态功能,用于显示正常运行的状态信息,正常的设备工作状态,显示即时发生的故障信息,提示发生故障的设备及其故障处理方法等,并将故障发生时的有关数据记录,以支持故障查询。

远程I/O单元负责以下功能:采集司控台和各个车厢内门控系统、空调系统等的数字量和模拟量等输入

信号,同时执行VCU传送过来的命令驱动司控台的模拟仪表及显示灯;采集控制柜内输入信号通知VCU,同时执行VCU传送过来的命令驱动控制柜的继电器。

MVB中继器负责放大和调整MVB总线上的信号,以提高信号质量。

MVB终端器位于MVB物理总线的两端,负责防止信号反射等干扰现象。MVB终端器一般放置在2台头车上。

TCN网络控制系统还包括MVB/CAN、MVB/RS485、MVB/RS232等接口转换单元,用于连接其他智能网络设备。

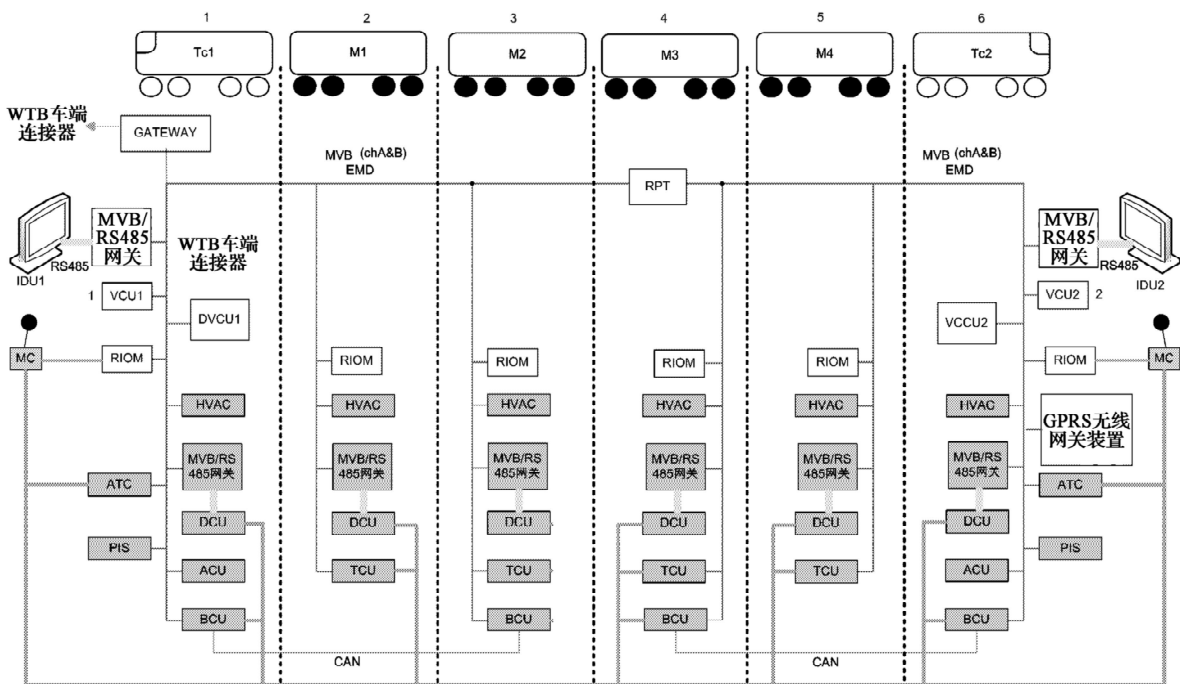


图2 典型6辆编组轨道车的网络拓扑图

同时TCN网络控制系统还支持WLAN、GPRS、GSM-R将TCN网络控制平台的数据无线传送到远程控制中心,进行远程实时监控。

2.2 系统的可用性设计

轨道车辆网络控制系统的可用性是系统可靠性和维修性的综合表征。用户总是希望其工作时间要长,非工作时间要短。因此不仅要关心系统不易出现故障的可能性如何,而且要关心系统一旦出现故障应能尽快修复,使其早日投入正常运行。分析系统的可用性需要分析产品在其生命周期内的时间分配关系。在产品的整个生命周期内分为总工作时间和非工作时间。非工作时间包括该产品存贮和运输等方面的时间,在这个时间内产品未进入工作状态,因此与可用性无关。在总工作时间内,包含能工作时间和不能工作时间两部分。能工作时间又由实际使用时间和虽能使用但未使用的待机时间组成。不能工作时间则由总维修时间和用于行政管理和后期供应等方面的非维修时间组成。总维修时间中包含非计划维修总时间和计划维修总时间。非维修时间中又包含非计划维修和计划维修所需的非维修时间^[1]。具体关系如图3所示。

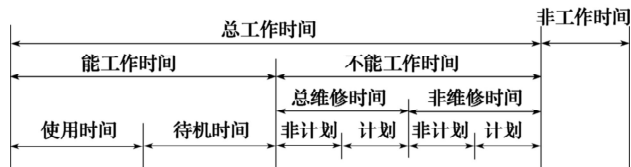


图3 产品生命周期内时间分配简图

轨道车辆网络控制系统的可用性指标用可用度来表达,系统的可用度根据所选的工作时间不同可以分为固有可用度、可达可用度和使用可用度。其中固有可用度和可达可用度对制造商有意义,一般作为采购时合同规定的指标,而使用可用度对用户有意义,不作为合同规定的指标。这里只讨论可达可用度。

系统的可达可用度用下式表示:

$$\text{系统的可用度} = \frac{\text{系统使用时间}}{\text{系统使用时间} + \text{系统维修时间}}$$

其中维修时间为计划维修时间与非计划维修时间之和。

轨道车辆网络控制系统的可用性取决于系统的可靠性与维修性,系统的可用度可以通过系统的故障以及维修分布函数进行度量。

2.3 系统的可靠性设计

轨道车辆网络控制系统的设计决定了其固有可靠性,因此系统的可靠性设计应起始于产品研发阶段。系统的可靠性设计过程是一个反复迭代的过程,在进行设计工作时首先需要做到确定与费用和性能目标相一致的可靠性指标要求,指标确定过程中要充分考虑系统寿命周期费用,以及可靠性对全部费用和系统效能的影响。系统可靠性设计的主要内容包括可靠性分配与可靠性预计。

2.3.1 可靠性分配

可靠性分配采用工程综合法进行。首先根据国内

外统计的轨道车辆网络控制系统的故障数据,划分出各子系统故障率占整车的百分比,按合同要求的MTBF指标进行分配。轨道车辆网络控制系统作为复杂电子产品,其寿命可认为服从指数分布,且根据工程经验,采用指数分布模型进行可靠性分配是偏于保守的。

轨道车辆网络控制系统的基本可靠性是一个串联模型,因此通过所有的子系统故障率的总和可以得到系统故障率。

$$R_s(t) = R_1(t)R_2(t) \cdots R_n(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$$

式中: $R_s(t)$ 为系统的可靠度; $R_i(t)$ 为第 i 子系统的可靠度。

$$R_s(t) = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} \cdots e^{-\lambda_n t} = e^{-\lambda_s t}$$

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

式中: λ 为系统的故障率; λ_i 为第 i 子系统的故障率。

系统的故障率 λ_s 是组成串联系统的子系统的故障率之和。整车的平均无故障时间为

$$MTBF = \int_0^{\infty} R_s(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_s t} dt = 1/\lambda_s$$

整体的故障率:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

$$\frac{1}{MTBF} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{MTBF_i}$$

2.3.2 可靠性预计

可靠性预计是根据组成系统的单元的可靠性来推测系统的可靠性,主要方法是运用过去的工程经验、故障数据,根据当前的技术水平来预测产品实际可能达到的可靠度。轨道车辆网络控制系统利用可靠性工程法进行可靠性预计,用于预估整体的失效率,从而为是否需要采取必要的纠正措施提供决策,帮助设计人员进行各种设计方案之间的比较,找到满足系统可靠性指标的设计方案,并为选择系统的部件、元器件、零件和材料提供依据。

可靠性预计是自下而上、从局部到整体的一个系统综合的过程,可靠性预计的目的和用途是:

在设计早期评价能否达到用户的可靠性指标要求;

在方案论证阶段,作为设计方案优选的一个方面;

在设计中,通过预计发现影响产品可靠性的主要因素和薄弱环节,以便采取设计和工艺措施实施改进;

作为可靠性分配的依据之一;

为可靠性增长试验、鉴定试验确定统计试验方案等提供依据;

为FMECA分析和产品的维修性、测试性设计提供依据。

可靠性预计是针对产品成熟期的可靠性水平进行

的,在预计时考虑了设计、工艺改进的潜力和整个研发过程中的可靠性增长。

2.4 系统的可维修性设计

系统在设计过程中必须考虑系统可维修性,系统的可维修性设计可以根据合同要求的系统维修性指标,按照需要分配到更低层次的部件上。产品初步设计完成后就需要对产品设计满足维修性目标值的程度进行早期评估,确定需要改进设计的部件,再进一步完善设计并进行权衡。在产品研制周期的后期或在系统初始运行阶段,需要对早期生产的部件进行维修性验证。

2.4.1 维修性分配与预计

系统的维修性分配方法与可靠性分配方法类似,由于系统的平均修复时间取决于每个子系统的修复时间分布。系统MTTR(Mean Time To Repair)可以通过计算子系统MTTR的加权平均值得到,根据子系统或部件的故障率来确定加权系数的大小。设MTTR_i为第 i 个子系统的平均修复时间, f_i 为第 i 个子系统在系统设计寿命期内的故障次数, q_i 为子系统 i 的数量,则系统平均修复时间为

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n q_i f_i MTTR_i}{\sum_{i=1}^n q_i f_i}$$

从设计权衡的观点出发,对维修时间越长的部件,需要设计较高的可靠性。

在设计过程中,可能需要反复进行分配计算才能得到满意的系统MTTR值。此外,还可以通过可用性目标值来对维修性进行分配,这里不再讨论。

2.4.2 维修性验证

维修性验证属于系统设计阶段试验部分的内容。其目的是为了验证所设计的系统是否达到了合同要求的维修性目标,同时维修性验证还可以发现系统设计、测试设备过程中存在的其他问题。

维修性验证在类似于系统正常使用时的工作条件 and 环境条件下进行,试验内容包括模拟系统故障、维修人员进行的系统检测、必要的修复性维修、记录维修时间和维修困难等问题。

2.5 系统安全性设计

安全性设计的目的是要制定消除危险的措施,减少有关的风险。由于轨道车辆网络控制系统不参与列车控制,不会直接影响列车安全,故障分析不涉及影响安全的故障。因此本文在讨论基于RAMS的轨道车辆网络控制系统的安全性设计的问题主要关注以下几方面:

物料方面:将物料分类,将具有危险因素的物料与其他的物料进行隔离放置;

设备方面:考虑设备的位置安排,使人员的操作活动具有足够的安全性保障,例如避免高压电、电磁辐射或设备尖锐部分等造成的危险;

环境方面：尽量减少恶劣环境条件所导致的危险；

人因方面：尽量降低人为差错所引起的风险；

设计方面：设计具有软件控制或监测功能，以减少危险事件和事故的发生。

在安全性设计时所采取的安全措施，其优先顺序为^[1]：首先考虑在设计上消除风险，其次考虑安全防护措施，再次考虑采用报警装置来检测风险，最后考虑采用制定专用规程和对人员进行安全知识培训。

3 基于RAMS的设计流程分析

轨道车辆网络控制系统的设计决定了其RAMS指标，因此从产品开发和研制阶段就要重视其RAMS的各项指标，不仅要按照合同要求的可靠性指标进行可靠性设计，而且还要充分考虑维修性指标，考虑故障诊断的测试性、维修人员的可接近性、维修过程的安全性、良好的互换性以及人机工程方面设计要求；同时还要将维修数据、可靠性数据综合起来，用以评价系统的可用度。本文以可靠性设计为例说明系统的设计流程。步骤如下：

Step 1：开始。

Step 2：分析设计系统所包含的组件、数量及设备故障率和来源。

Step 3：各组件发生故障带来的后果，导致列车 2 min 以上延误和不能继续服务。

Step 4：计算每个故障在 1 年时间内的故障次数（= 故障率 × 部件数量 × 操作时间）。

Step 5：根据以上步骤计算各子系统的MTBF。

Step 6：计算系统的MTBF，并判断是否满足合同的可靠性要求，如果满足则输出系统的RAMS 指标文件，分析过程结束，如果不满足则需要更改设计，返回 Step 2 重新开始计算。

产品可靠性分析流程如图 4 所示。

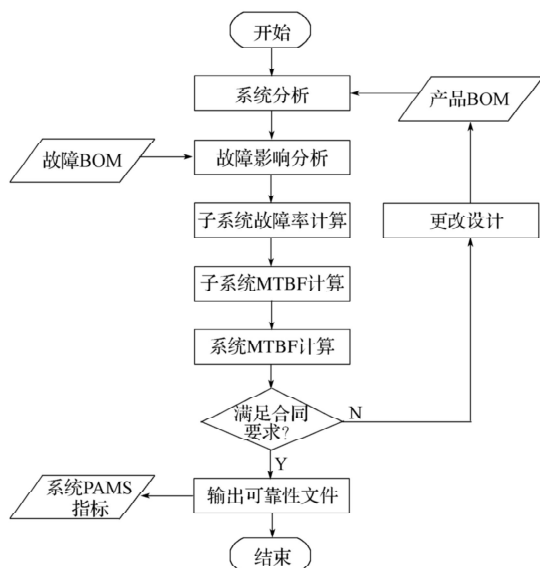


图 4 产品可靠性分析流程

系统的可维修性分析流程与可靠性分析流程类似，这里不再赘述。

4 应用实例

笔者所在项目组在某对外项目上采用了RAMS 设计方法，设计结果满足合同要求。RAMS 指标预计值与合同值对比如表 1 所示。

表 1 RAMS 指标预计值与合同值对比

指标	说明	合同目标值	预计值	合同要求	单位
可靠性	2 min 或以上之初始延误	1.48	0.468	满足	故障每百万车公里
	不适合继续服务 / 未能发送	≤ 0.41	≤ 0.409	满足	故障每百万车公里
可维修性	可更换组件	≤ 0.5	≤ 0.5	满足	小时
	矫正维护（不需起车作业）	≤ 4	≤ 2.77	满足	小时
	矫正维护（需起车作业）	≤ 6	≤ 5.97	满足	小时
可用性	可达可用度	98%	98%	满足	

5 结语

轨道交通装备的RAMS 说明了系统能保证在指定的时间内安全地达到轨道交通运输规定水平的置信度，轨道交通装备的RAMS 对交付给用户的产品运行质量有明显的影响。轨道车辆网络控制系统的质量问题归根结底是产品的可靠性、可用性、可维修性和安全性（RAMS）问题，本文在分析轨道车辆网络控制系统结构及各组成单元功能的基础上，提出了针对网络控制系统的RAMS 设计方法，建立了基于RAMS 的网络控制系统设计流程，在满足合同指标的条件下改善了产品的设计流程。

参考文献：

- [1] 董锡明. 轨道列车可靠性、可用性、维修性和安全性（RAMS）[M]. 北京：中国铁道出版社，2009.
- [2] Sebasti á n Martorell, Ana S á nchez, Sof í a Carlos, Vicente Serradell. Alternatives and challenges in optimizing industrial safety using genetic algorithms[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 86:25-38.
- [3] Martorell S, Villanueva J F, Carlos S. RAMS + C informed decision-making with application to multi-objective optimization of technical specifications and maintenance using genetic algorithms [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 87:65-75.
- [4] Marseguerra M, Zio E, Martorell S. Basics of genetic algorithms optimization for RAMS applications[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2006, 91:977-991.
- [5] Joseph R Fragola. Reliability and risk analysis data base development: an historical perspective[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 51:125-136. （下转第36页）

得大于 250 N, 一般选择在 150~180 N。

2) 微动开关的空隙 h

当按下紧急制动按钮时, 挡块带动 223 螺栓按下微动开关, 推动微动开关动作。这里面微动开关离上面的 223 螺栓下部的距离就是一个关键问题, 距离过大, 按下的时候可能不能正常触动微动开关, 而距离过小, 则有可能导致把微动开关压坏或者让紧急按钮按不到底。所以在装配时, 要求按下紧急按钮之后, 微动开关也按到底, 此时微动开关离 223 螺栓下部还有 1~2 mm 的距离, 这样就能保证准确触发并且不会出现上面所述的问题, 保证微动开关正常工作, 参见图 4。

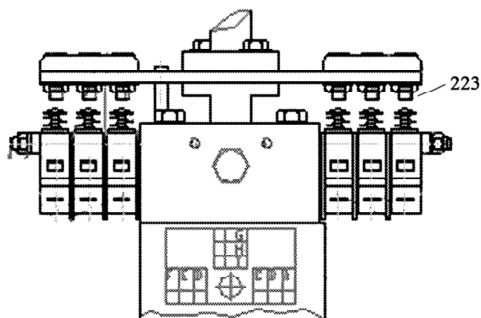


图 4 微动开关装配图

3) 对泄漏量的检测

紧急按钮要有良好的气密性, 在没有按下紧急按钮的时候, 不能有太大的泄漏, 如果泄漏过大, 可能会引起意外的紧急制动。根据气密性要求, 泄漏量不得超过 1.4 kPa/min。

4.2 保证措施

按下按钮所需力的大小是在设计和结合大量实际应用经验总结出来的, Faiveley Transport 公司对生产的紧急制动按钮都做了详细的应用记录, 实践表明该力的大小应选在 90~250 N。对生产的每个紧急制动按钮都要做力的测试, 并且为了防止在应用的过程中由于内部磨损或者生锈等意外原因导致压力增大

或者减小, 在机车每次进车辆段检修的时候都要对按钮做相关的测试, 保证按压力 F 在规定的范围之内, 否则更换。

微动开关的间隙 h 也是相当关键的, 因此要求也很严格, 在按下紧急制动按钮时, 能完全按下微动开关, 微动开关离触头还有 1~2 mm 的距离, 必须严格控制该值, 在装配时该值是控制的关键值之一, 并且要通过试验台做试验以检测其可靠性, 最后还有质量检测严格把关, 保证其符合要求。

紧急制动按钮的气密性直接影响到列车管的压降问题, 如果气密性不够好, 将会额外地引起制动甚至是紧急制动, 所以, 要求在生产过程中通过做气密性试验, 检测其泄漏率, 保证其气密性满足要求。

5 结语

在 HXD2 电力机车制动控制系统中应用的新型带 F 型微动开关的紧急制动按钮, 设计新颖, 构造简单, 其灵敏度高, 性能好, 能够快捷地实现紧急制动和紧急制动的缓解, 故障率低, 便于维修保养。实际上该按钮是在 Faiveley Transport 公司大量应用实践的基础上不断改进而来的, 因此有更强的实用性, 但在智能控制方面还有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 王俊勇. 准高速 DF₁₁ 机车制动系统研究与分析[J]. 西南交通大学学报, 1997, 32(6): 637-642.
- [2] 刘凡, 王俊勇, 袁锦林. F8 型空气分配阀及其电空制动机[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [3] 王俊勇, 全雷, 王海平. HXD2 电力机车制动系统[J]. 机车电传动, 2008(5): 8-14.
- [4] 王俊勇, 杨美传. 大秦线 2 万吨重载组合列车制动计算分析[J]. 内燃机车, 2008(4): 5-7.
- [10] Heung-Suk Hwang. A Performance Evaluation Model for FMS Based on RAM and LCC Using FACTOR/AIM[J]. Computers Industry Engineering, 1996, 31(3/4): 593-598.
- [11] Carlos Tapia, Javier Dies, Anna Calvo, et al. Developing the IFMIF RAM Planning[J]. Fusion Engineering and Design, 2009, 84: 1823-1826.
- [12] Rajiv Kumar Sharma, Sunand Kumar. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 891-897.
- [13] Maurice Lemaire. Reliability and mechanical design[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1997, 55: 163-170.
- [14] 严云升. 铁道机车车辆电子产品的 RAMS[J]. 机车电传动, 2003(6): 1-4.
- [15] 吴婵, 邵明. RAMS 在城市轨道交通牵引供电系统中的应用[J]. 都市快轨交通, 2009, 22(2): 114-117.
- [16] 杨媛, 吴俊勇, 吴燕. 基于可信性理论的电气化铁路牵引供电系统 RAMS 的模糊评估[J]. 北京交通大学学报, 2008, 32(5): 89-93.

(上接第 10 页)

- [6] Martorell S, Sanchez A, Carlos S. A tolerance interval based approach to address uncertainty for RAMS+C optimization[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2007, 92: 408-422.
- [7] Mary Ann Lundteigen, Marvin Rausand, Ingrid Bouwer Utne. Integration RAMS engineering and management with the safety life cycle of IEC 61508[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94: 1894-1903.
- [8] Hyunki Kim, Hyeuntae Lee, Keyseo Lee. The design and analysis of AVTMR(all voting triple modular redundancy) and dual-duplex system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2005, 88: 291-300.
- [9] Herder P M, Van Luijk J A, Bruijnooge J. Industrial application of RAM modeling development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan plant at GE Industrial, Plastics[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2008, 93: 501-508.