

城市轨道交通关键设备判别方法研究^{*}

赵 扬¹ 王福田¹ 安 茹²

(1. 北京交通大学轨道交通与控制安全国家重点实验室, 100044, 北京;

2. 深圳市城市轨道交通规划设计研究中心股份有限公司交通科学研究院, 518063, 深圳//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对目前城市轨道交通运营企业对关键设备的定义和判别标准不明确、缺乏统一判别方法的问题, 基于城市轨道交通设备管理的特点, 提出了城市轨道交通关键设备的定义。通过分析城市轨道交通关键设备的判别要素, 提出故障率、购置价格、伤亡人数、服务中断时间、环境影响程度、设备维修复杂系数及设备故障后的影响范围等7项判别指标, 并给出了故障率、伤亡人数、服务中断时间等3项指标的管理阈值。以北京轨道交通信号专业为例, 阐述了对关键设备进行判别的过程。

关键词 城市轨道交通; 关键设备; 判别指标; 管理阈值

中图分类号 U231.94

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.043

Research on Method of Judging Key Equipment in Urban Rail Transit

ZHAO Yang, WANG Futian, AN Ru

Abstract At present, the definition and judgement criteria of key equipment for urban rail transit operation companies are not clear, and there is no unified judgement method. Based on the characteristics of urban rail transit equipment management, definition of key equipment for urban rail transit is proposed. By analyzing key factors in recognizing key equipment, 7 judgement indicators are proposed, including failure rate, purchase price, casualty number, service intermitting time, environment influencing level, equipment maintenance complex coefficient and equipment failure impact range, and the management threshold for 3 indicators are listed, including failure rate, casualty number and service intermitting time. Beijing rail transit signaling profession is taken as example to expound the key equipment judging process.

Key words urban rail transit; key equipment; judgement indicator; management threshold

First-author's address State Key Lab of Rail Traffic Control & Safety, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

0 引言

城市轨道交通设备涉及线路、车辆、供电、通信、信号与机电等多个专业, 种类及数量繁多。关键设备的运行状态对城市轨道交通的运营安全、运营成本及服务质量均有重要影响。但是, 目前在城市轨道交通关键设备管理实践中, 不同专业、不同部门缺乏统一的关键设备判别方法, 造成了一定的管理混乱。

出现上述问题的主要原因是目前城市轨道交通运营企业对关键设备的定义和判别不明确, 缺乏统一的标准, 在设备实际管理过程中缺乏重点, 难以合理地将有限的资源应用于最关键的设备上, 容易导致对关键设备的维修重视程度不足, 影响企业的安全管理水平。

目前, 一些专家和学者已经对不同专业的关键设备进行了相关研究。文献[1-2]指出, 轨道作为城市轨道交通的主要设施之一, 是行车的基础, 一旦发生病害, 不仅会影响乘客的乘车质量, 严重时还将造成线路故障或列车脱轨, 将极大地影响行车秩序, 危害旅客生命安全。文献[3-5]指出, 列车运行控制系统是城市轨道交通的重要设备, 能提高运输效率, 保障行车安全, 且其购置成本及后期维护成本较高。文献[6-8]指出, 屏蔽门系统是城市轨道交通系统不可或缺的设备, 能保障乘客安全乘车, 降低能耗, 节约成本。文献[9-10]指出, 制动控制系统是城市轨道交通车辆的核心部件之一, 是保证列车安全运行的关键设备, 关系到每个人的人身安全。文献[11]指出, 走行系统是车辆的关键设备, 一旦发生故障会严重影响列车运行安全, 甚至发生脱轨等行车事故。文献[12]指出, 低压配电系统是城市轨道交通的关键系统, 能为车站和设备房

^{*} 国家自然科学基金项目(51578057); 国家自然科学基金-青年科学基金项目(71801010)

间的照明提供电能,保障行车安全。

本文基于城市轨道交通设备管理的特点,提出城市轨道交通关键设备的定义,并研究城市轨道交通关键设备的判别要素、判别指标,以及北京轨道交通关键设备判别指标的管理阈值,在此基础上研究分析北京轨道交通信号专业的关键设备判别问题。

1 城市轨道交通关键设备的判别要素及指标

1.1 城市轨道交通关键设备的概念和判别要素

根据既有研究成果^[13],结合城市轨道交通设备管理的实践经验,本文将城市轨道交通关键设备定义为:在城市轨道交通生产管理过程中起主导、关键作用,对城市轨道交通的生产、成本、安全、维修性等方面有重大影响的设备。

1.1.1 生产方面

在生产方面,城市轨道交通关键设备的判别要素应包括以下两点:

1) 故障率相对较高,且其故障会影响城市轨道交通正常运营。例如,北京地铁道岔设备在运营中常发生尖轨不密贴基本轨、无法扳至定位等故障,造成列车较长延误。

2) 出故障后影响城市轨道交通运营范围大。例如,牵引供电系统发生故障后,将有可能导致城市轨道交通系统瘫痪。

1.1.2 成本方面

在成本方面,城市轨道交通关键设备的判别要素为设备的购置价格高、性能高、效率高,即设备在所处专业中经济价值相对较大。工务专业的钢轨与道岔、信号专业的列车运行控制系统等均为其专业的关键设备。

1.1.3 安全方面

在安全方面,城市轨道交通关键设备的判别要素应包括以下两点:

1) 出现故障后严重影响人身安全。例如,钢轨发生折断会导致列车倾覆,将对乘客的人身安全造成极大影响。

2) 对环境保护及作业有严重影响。例如,当钢轨发生较为严重的磨损病害时,可能会造成较为严重的噪声污染。

1.1.4 维修性方面

在维修性方面,城市轨道交通关键设备的划分

要素应包括以下两点:

1) 结构复杂、精密,故障后不易修复。例如,道岔系统结构复杂、精密,故障后不易修理。

2) 停修期长。例如,接触轨一旦发生故障,修复时间长,且严重影响列车运营。

1.2 城市轨道交通关键设备判别指标

依据城市轨道交通关键设备判别要素,考虑到当前城市轨道交通设备管理的实际水平及所列指标的可计算性等因素,本文将城市轨道交通关键设备判别指标确定为故障率、购置价格、伤亡人数、服务中断时间、环境影响程度、设备维修复杂系数及设备故障后的影响范围等7项。

1) 故障率反映了设备是否经常发生故障。对于故障频发的设备应将其视作关键设备进行重点关注。

2) 服务中断时间反映了设备发生故障后对服务的影响程度,也反映了设备的维修恢复时间这一维修性方面的要素。对于与列车运行直接相关的设备,应主要考虑设备故障造成的行车服务中断时间;对于与车站服务直接相关的设备,应主要考虑设备故障造成的车站服务中断时间。

3) 伤亡人数和环境影响程度反映了设备发生故障后对人身安全以及环境安全的影响程度。

4) 设备维修复杂系数反映了设备维修复杂程度和维修时工作量的多少,能够度量设备维修的复杂程度,是维修性方面的要素。一般情况下,设备的结构越复杂、加工精度越高,维修复杂系数也就越大。应将维修复杂系数高的设备判别为关键设备进行重点关注。

5) 设备故障后的影响范围反映了设备发生故障后对设备自身、设备所处系统以及城市轨道交通运营系统的影响程度。可根据设备发生故障后的影响层面,将影响范围划分为系统级、设备及部件级、元件及零件级,并将故障影响层面为系统级的设备判别为关键设备进行重点关注。

1.3 北京轨道交通关键设备判别指标管理阈值

依据判别指标对关键设备进行判别时,需要先根据管理阈值对各指标进行等级划分,再利用设备的实际历史数据来量化计算出该设备的各指标等级,从而确定其是否应被判断为关键设备。

在上述7个指标中,故障率、服务中断时间及伤亡人数为量化指标,直观而重要。本文基于目前的相关研究现状和北京轨道交通管理实际,给出了北

京轨道交通关键设备 3 项划分指标的管理阈值,并对其他 4 项的管理阈值进行定性讨论。

1.3.1 故障率指标管理阈值

我国干线铁路在对设备设施故障概率的评价准则^[14]中将设备故障率划分为高、中、低、很低和不太可能等 5 个等级,并给出了每个等级相应的管理阈值;GB/T 21562—2008《轨道交通 可靠性、可用性、可维修性和安全性规范及示例》^[15]将设备故障率定性地划分为频繁、经常、有时、很少、极少和不太可能等 6 个等级。

由于城市轨道交通的设备运行状态和管理要求与铁路存在差异,且目前缺少对城市轨道交通设备故障率进行划分的相关标准规范,因此本文基于北京轨道交通的历史数据中设备故障出现的频度,参考上述标准规范,将设备故障率指标划分为 5 个等级,并给出了每个等级相应的管理阈值,具体如表 1 所示。故障率等级为高的设备可判别为关键设备。

表 1 故障率指标按管理阈值的等级划分		
故障率等级	等级特征描述	故障率/(次/h)
高	故障持续性出现	$10^{-2} \sim <10^0$
中	故障经常性出现	$10^{-5} \sim <10^{-2}$
低	故障较少出现	$10^{-7} \sim <10^{-5}$
很低	故障几乎不出现	$10^{-9} \sim <10^{-7}$
不太可能	故障不太可能出现	$0 \sim <10^{-9}$

1.3.2 伤亡人数指标管理阈值

GB/T 5438—2007《地铁运营安全评价标准》^[16]考虑了伤亡人数这一指标,将事故划分为特大重大事故、重大事故、大事故、险性事故及一般事故等 5 个等级,并对伤亡人数的等级进行了相应的划分;《生产安全事故报告和调查处理实施条例》^[17]将事故划分为特大重大事故、重大事故、较大事故及一般事故等 4 个等级,同样对伤亡人数的等级进行了相应的划分;北京市地铁运营有限公司的文件《运营事故处理规则》^[18]中将地铁运营事故划分为 6 个等级,包括重大事故、大事故、险性事故、A 类一般事故、B 类一般事故和 C 类一般事故,相应地对伤亡人数进行了划分。以上 3 个标准或文件中均给出了每个等级相应的管理阈值。

基于近年来我国城市轨道交通运营管理安全数据,本文不考虑乘客人身伤亡 1 人以上或重伤 3 人以上的情况。根据北京轨道交通的历史数据,参

考相关规定,将伤亡人数指标划分为 3 个等级,如表 2 所示。按设备发生故障后可能造成的最大伤亡人数来判断其指标等级。对于伤亡人数指标等级为 A 的设备,可判别为关键设备。

表 2 伤亡人数指标管理阈值		
伤亡人数指标等级	对应事故等级	伤亡人数指标阈值/人
A	重大事故	1(死亡);2(重伤)
B	较大事故	0(死亡);1(重伤)
C	一般事故	0(伤亡)

1.3.3 服务中断时间指标管理阈值

DB11/T 1166—2015《城市轨道交通运营安全管理规范》^[19]考虑了服务中断时间这一指标,将地铁运营事故划分为一级运营事件、二级运营事件和三级运营事件等 3 个等级,并对服务中断时间的等级进行了相应的划分。北京市交通委员会发布的《北京市轨道交通设备设施故障管理办法(试行)》^[20]根据服务中断时间将故障划分为重大故障、较大故障和一般故障等 3 个等级。北京市地铁运营有限公司的《运营事故处理规则》^[18]考虑了服务中断时间这一指标,将地铁运营事故划分为重大事故、大事故、险性事故、A 类一般事故、B 类一般事故和 C 类一般事故等 6 个等级。

本文基于北京轨道交通的历史数据,参考上述资料,将服务中断时间指标分为 6 个等级,如表 3 所示。对于造成服务中断时间等级为 A 或 B 的设备,可判别为关键设备。

表 3 服务中断时间指标按管理阈值的等级划分		
服务中断时间指标等级	对应事故等级	服务中断时间/min
A	特大事故	≥ 90
B	重大事故	$60 \sim <90$
C	较大事故	$40 \sim <60$
D	大事故	$20 \sim <40$
E	一般事故	$10 \sim <20$
F	轻微事故	$5 \sim <10$

1.3.4 其他指标的管理阈值

对于购置价格及环境影响程度等其他指标,其管理阈值与每类设备所属的专业以及所处的空间位置等关系较为密切,难以进行量化。建议以高、中、低 3 个等级对指标进行划分,本文不再赘述。

划分的管理阈值需结合并根据不同设备的专业属性和空间位置属性进行个性化地制定。

在实际管理过程中,可根据具体情况,结合已

有的设备数据和各类指标的评价结果,综合判别某类设备是否为关键设备。

2 案例分析

本文依据关键设备的定义、划分指标和 3 项重要指标管理阈值,基于信号专业设备生产数据,判别北京轨道交通信号专业的关键设备,最终确定信号专业的关键设备包括 ATS(列车自动监控)设备、转辙机、联锁设备、ATP(列车自动防护)地面设备、计轴设备等。限于篇幅,本文仅对故障率指标和服务中断时间指标举例说明。

2.1 故障率指标

以某年北京地铁信号专业实际故障数据为例,分析故障率指标。该年北京轨道交通运营线路的信号设备故障数共计 1 279 件,其中 ATS 设备的故障数占信号设备总故障数的 47%,其故障率为 0.069;ATP 地面设备的故障数占总故障数的 13%,其故障率为 0.019;联锁设备的故障数占总故障数的 12%,其故障率为 0.018;转辙机的故障数占总故障数的 10%,其故障率为 0.015;计轴设备的故障数占总故障数的 7%,其故障率为 0.01;信号机的故障数占总故障数的 5%,其故障率为 0.007;电源的故障数占总故障数的 2%,其故障率为 0.003。依据表 1,结合企业运营管理实际经验可得,ATS 设备、联锁设备、转辙机、ATP 地面设备及计轴设备的故障率指标等级为“高”,信号机和电源的故障率指标等级为“中”。据此,ATS 设备、联锁设备、转辙机、ATP 地面设备及计轴设备被判别为关键设备。

2.2 服务中断时间指标

以 2017 年北京地铁信号专业设备故障导致的服务延时数据为例,分析服务中断时间指标。转辙机故障导致的最大延误时间为 68 min;信号 UPS(不间断电源)故障导致的最大延误时间为 48 min;联锁设备故障导致的最大延误时间为 40 min;ATP 地面设备故障导致的最大延误时间为 23 min。依据表 3,转辙机故障导致的服务中断时间指标等级为 B,信号 UPS 故障和联锁设备故障所导致的服务中断时间指标等级均为 C,ATP 地面设备故障导致的服务中断时间指标等级为 D。据此,将转辙机判别为关键设备。

3 结语

本文基于城市轨道交通设备管理的特点,提出

了城市轨道交通关键设备的定义,并从生产、成本、安全、维修等 4 个维度确定了城市轨道交通关键设备的判别要素。基于判别要素及实际管理经验,确定了城市轨道交通关键设备划分指标为故障率、购置价格、伤亡人数、服务中断时间、环境影响程度、设备维修复杂系数以及设备故障后的影响范围等 7 个指标,并着重分析了故障率、伤亡人数及服务中断时间等 3 项判别指标的管理阈值。以北京轨道交通信号专业为例,阐述根据故障率和服务终端时间指标对关键设备进行判别的过程。

参考文献

- [1] 孙壮志,张伟.基于 ITS 的城市轨道交通设施运行状态监测方法初探[C/OL]//世界轨道交通发展研究会年会.第九届世界轨道交通发展研究会年会论文集.北京:2012[2019-09-02]:10. <https://d.wanfangdata.com.cn/conference/7908373>
- [2] 李新.高速铁路无砟轨道—路基系统耦合振动研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [3] 孟凡江,尹逊政.一种基于多传感器融合的冗余测速测距系统设计[J].铁路计算机应用,2018(1):46.
- [4] 张重.城市轨道交通联锁系统可靠性及安全性分析研究[D].兰州:兰州交通大学,2014.
- [5] 亓叔虎.基于自适应控制列车 ATO 调速系统的若干研究[D].北京:北京交通大学,2013.
- [6] 于鑫,夏德春,王志飞,等.城市轨道交通屏蔽门控制系统关键技术[J].中国铁道科学,2015(3):137.
- [7] 杜宏民,吕馨,高莉萍,等.地铁屏蔽门绝缘安装相关问题探讨[J].都市快轨交通,2012(1):78.
- [8] 李开成,刘丽娟.视景仿真的屏蔽门系统在地铁列控系统中的应用[J].北京交通大学学报,2009(5):46.
- [9] 于振忠.城市轨道交通车辆生产的质量控制[J].铁路技术创新,2009(2):19.
- [10] 张玮.试析地铁列车空气制动系统仿真模型[J].中国机械,2015(8):98.
- [11] 李球,朱士友,龙静.地铁车辆在线监测系统的设计和应用[J].城市轨道交通研究,2013(11):45.
- [12] 丁潇.浅谈自投自复功能在城市轨道交通低压配电系统中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2013(28).
- [13] 中国设备管理协会.设备管理 定义和术语:PMS/T 3—2016[R/OL].2016[2019-09-02]. <https://max.book118.com/html/2017/0129/87252364.shtml>
- [14] 董锡明.轨道交通安全风险管理[M].北京:中国铁道出版社,2014.
- [15] 中国国家标准化管理委员会.轨道交通可靠性、可用性、可维护性和安全性规范及示例:GB/T 21562—2008[S/OL].2008[2019-09-02]:12. <http://www.jianbiaoku.com/webarbs/book/21207/610606.shtml>

(下转第 236 页)

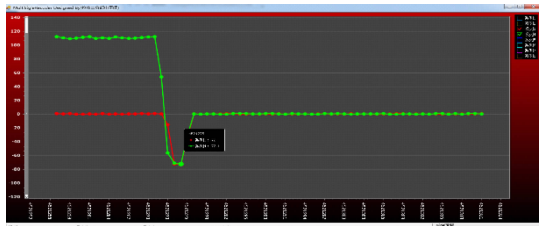


图2 34-K301 接触器断开瞬间的 34-V304 二极管正负极电压波形截图

2.4 故障原因分析

网关阀与压力开关对主风管压力(0.9 MPa)检测不同步,当压力开关动作较慢时,34-K301 接触器会在断电瞬间由于线圈续流作用而产生 1 个对地超过 -70 V 的反向电动势,经由压力开关进入紧急牵引列车线,使紧急牵引列车线的反向电压超过 -70 V 。

因网关阀对反向电压未定义,故会随机判断该电压为高电平或低电平。若某个网关阀判断为高电平,则该单元报出电制动切除信息。若 2 个单元均有网关阀判断为高电平,则全车电制动切除。

3 解决措施

基于上述分析的故障原因,本文提出解决措施为:修改 34-K301 接触器的取电点,防止反向电动势通过压力开关串入紧急牵引列车线,导致网关阀误检测而进入紧急牵引模式切除电制动。

根据 2 号线的实际运行情况,将紧急牵引工况下空压机控制接触器取电由原紧急牵引列车线取电改为压缩机控制处取电。保持原有空压机控制逻辑不变,将压力开关整定值由 0.75 MPa 调整为 0.68 MPa。

4 效果验证

4.1 对紧急牵引回路的影响

34-K301 接触器由紧急牵引列车线取电是为了满足列车在网络失效时,启动空压机控制的要求。因此,取消原来的压力开关取电点对紧急牵引功能

无影响。

4.2 对空压机控制回路的影响

新的取电点的微动开关电流为 6 A,容量满足要求,不受网络失效影响。列车激活后就有 110 V 电源供给,能保证紧急牵引模式时对空压机的控制。

列车正常运行时通过网络来控制空压机进行单个启动。当压力低于 0.68 MPa 时,则列车线和网络同时控制两端空压机启动,不改变原有控制逻辑。

改造后的 A5 型车运行了 12 个月,期间未再发生电制动异常切除故障。这证明,该硬件改造方案能有效解决电制动异常切除问题,且对列车本身功能无不良影响,可以推广使用。

5 结语

A5 型车在 2 号线正线运营时频繁出现 1 个单元或整列车异常切除电制动的现象。经分析,接触器在断电瞬间会产生 1 个对地超过 -70 V 的反向电动势,而网关阀有可能会误判断该电压为高电平,进而切除电制动。对此,本文提出了改造空压机控制接触器取电点的解决措施,杜绝了反向电动势引起的网关阀误诊断问题。

目前,2 号线 A5 型车已全部完成了电路改造。改造后类似故障未再发生,验证了解决措施的有效性。运营部门在与车辆供货商进行设计联络与审查时,要关注反向电动势对列车其他系统的影响,也要注意列车设备对高低电平电压的定义,对各项参数、电路设计必须严格规范。

参考文献

- [1] 朱士友. 车辆检修工[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2009.
- [2] 南车株洲电力机车有限公司. GML1&2&8 电动车组维修手册[Z]. 株洲:南车株洲电力机车有限公司,2009.
- [3] 南车株洲电力机车有限公司. GML1&2&8 电气原理图[Z]. 株洲:南车株洲电力机车有限公司,2009.

(收稿日期:2019-11-28)

(上接第 208 页)

- [16] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 地铁运营安全评价标准:GB/T 50438—2007[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [17] 中华人民共和国国务院. 生产安全事故报告和调查处理条例:国务院令 493 号[S]. 北京:中华人民共和国国务院,2007.
- [18] 北京市地铁运营有限公司. 运营事故处理规则[A]. 北京:

北京市地铁运营有限公司,2009.

- [19] 北京市质量技术监督局. 城市轨道交通运营安全管理规范:DB 11/T 1166—2015[S/OL]. 2015[2019-09-02]. <https://max.book118.com/html/2021/0116/5002224144003111.shtml>
- [20] 北京市交通委员会. 北京市交通委员会关于印发北京市轨道交通设备设施故障管理办法(试行)的通知:京交轨道发[2017]136 号[A]. 北京:北京市交通委员会,2017.

(收稿日期:2019-09-02)