

## 城市轨道交通

以可靠性为中心的维修在地铁  
车辆车门系统中的运用

曾 成, 苏锦华

(广州市地下铁道总公司 运营事业总部, 广州 广东 511430)

摘 要: 以地铁车门系统为例, 研究以可靠性为中心的维修在地铁中的运用方法。通过对车门各子系统的功能、故障模式、关键性及故障率等的分析, 提出提高可靠度的措施, 制定了相应的维修策略。

关键词: 可靠性; 维修; 地铁车辆; 车门系统

中图分类号: U231

文献标识码: B

文章编号: 1000-128X(2011)06-0061-03

以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, 简称RCM)是目前国际上通用的、用以确定资产预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程方法<sup>[1]</sup>。根据系统部件的故障模式, 故障规律以及故障后果, 制定相应的维修策略, 避免“多维修, 多保养, 多多益善”和重要器件故障后再维修的传统维修思想, 制定更加科学合理的维修策略。

如今以可靠性为中心的维修(RCM)经历长期的发展, 已经在军工和航空航天领域得到广泛使用, 其获得的显著的经济效果使得RCM也在民用领域逐步推广。目前在国内轨道交通领域的运用型企业, 如各铁路局和地铁公司, 也在关注维修模式的优化, 注重可靠性分析方法在制定维修策略时的使用。

城轨车辆是复杂的机电一体化产品, 购置和维修成本非常高, 购置成本约占整个轨道交通建造成本的10%、维修成本约占总维修成本的40%<sup>[2]</sup>。因此, 建立合适的车辆维修模式, 在保证车辆运行可靠性的前提下, 降低运营成本, 具有十分重要的实际意义。同时由于地铁线路的不断延长与行车间隔的不断缩小, 车辆数量随之增加。检修作业量加大, 生产一线对检修效率的要求逐步提高, 而随着车辆数量的增加, 要保持线路的高可靠性运行, 对车辆质量、状态要求也就进一步地增加。由此形成的矛盾也促使现行的维修过程需要不断地改进。

同时, 地铁车辆部件的供货商相对稳定, 不同批次的产品质量也相对一致, 故障模式较为稳定, 而对地铁运行高可靠性的追求, 使得在地铁车辆检修中运用以可靠性为中心的维修方法是值得实践的。

本文以广州地铁3号线车辆车门系统为例, 研究以

可靠性为中心的维修在其运用中的方法。

## 1 车门系统结构及分析

广州地铁3号线车辆车门系统总体上分为机械执行机构、电气执行机构(门控器、电机等)、控制电路、检测电路4个子系统, 各子系统间的工作逻辑如图1。

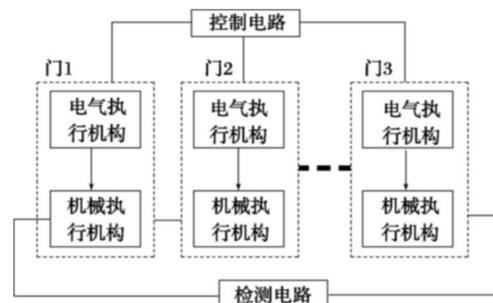


图1 车门系统逻辑关系图

## 1.1 各子系统功能和故障模式

控制电路可以生成若干个开关信号或者由ATO信号接管控制工作, 其故障极低, 目前无预防性维修计划, 仅仅做故障修完全可以满足使用可靠性要求。

检测电路负责监视所有车门的状态, 反馈VCU车门状态信息给司机, 并提供牵引使能命令。故障表现为列车运行过程中错误判断车门打开, 产生紧急制动或无法动车, 操作屏幕显示车门全关但车门全关指示灯不亮, 只能打车门旁路, 造成晚点的可能性较大。电路中的继电器1、2故障率较高。车门控制检测电路的工作逻辑结构如图2。

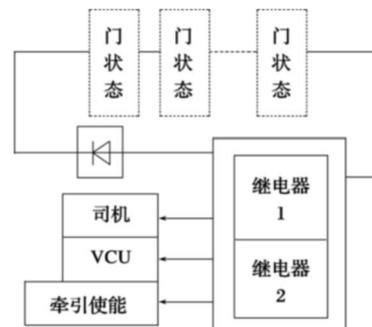


图2 车门检测电路工作逻辑图

电气执行机构中门控器(MDCU)负责接受操作指令, 自身有闭环控制与逻辑判断车门状态的能力, 直接传达指令给电机和车门锁闭装置。

机械执行机构固定门的运动范围与位置状态, 其故障模式可分为两类: 尺寸配合变化超过范围导致故障, 这种故障在早期可以被检测; 由于机械发生断裂或形变造成的故障, 这类故障目前还没有有效的检测手段。

## 1.2 各子系统的关键性分析

统计2009年1月至2011年5月的晚点原因, 其中因车辆车门系统造成的晚点占76%。为找出引起车门系统故障而造成晚点的主要原因, 采用构造主次图的方

法,如图3,在车门系统晚点故障中因车门检测电路故障引起的晚点占30.4%,机械执行机构故障占25.1%,所以该2项为主要原因。

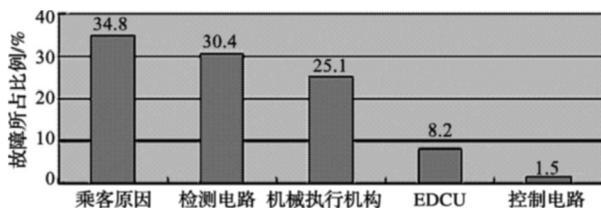


图3 车门系统中影响列车准点运营的主次图

再通过对各个子系统的故障对乘客的影响和生产

表1 各子系统的關鍵性分析(180s以下延误称为延误,180s以上称为晚点)

子系统	故障迹象	故障原因	对乘客影响	对生产的影响
控制电路	部分车门没有打开	指令信号丢失,或发出后消失太快	无	延误或无
检测电路	列车运行中紧急制动;无法牵引	电路中继电器1、2故障(卡滞或烧毁)	有较大安全隐患	晚点,终点站退出服务
电气执行机构	单个车门无法正常实现功能	门控器(MDCU)故障较多	较小,故障车门被切除	延误或晚点,继续运营
机械执行机构	单个车门无法正常实现功能	紧固件松动、丢失,车门尺寸超标,机械变形	较小,故障车门被切除	延误或晚点,继续运营

尺寸超标被及时地发现和预防<sup>[2]</sup>。目前其最小维修间隔为半年,占用的停机时间较小,对因尺寸配合超标而引起的故障有很好的预防效果。

控制电路目前故障率极小,且就目前观察来看其故障随机性较大,对正线影响很小。目前无预防性维修计划,故障维修模式完全能够满足运营可靠性要求。

### 2.2 车门检测电路的维修策略及故障机理

就车门检测电路而言,故障大部分都发生在最后2个执行继电器1、2上,主要故障原因是继电器卡滞与烧毁。由于继电器的运用状态目前还无法监控,不能采用状态维修模式。同时因为车门检测电路的关键性,又不宜采取故障维修。因此,制定合理的预防性维修(报废)计划或者进行改造和换型很有必要。由于继电器等电气元件故障时间有着较强的统计学规律,所以很适合采用建立概率模型进行可靠性分析、故障模式分析,制定相应维修策略或改进措施。

自广州地铁3号线列车调试完成开始运营至2010年10月,车门检测电路的首故障公里数如表2。

表2 各车门检测电路首次故障时的运用公里数

运行里程 / × 10 <sup>3</sup> km	故障次数
0~100	3
101~200	9
201~300	10
301~400	9
401~500	3
501~600	5
600 以上	1

自2010年4月28日,3号线列车开始由之前的3节编

效率的影响进行分析比较(表1)可以确定,检测电路和机械执行机构在车门系统中关键性等级最高。

## 2 制定相应的维修策略

### 2.1 机械执行机构与控制电路的维修策略

广州地铁3号线采用的是塞拉门系统,系统结构复杂。其中大部分机械结构的故障率符合“浴盆”曲线。

由于尺寸配合超标引起的故障可以被有效地监控预防,并且其检测方法耗费的人工成本与物料成本都相对较小。对此类型问题,宜采用预防性维修与状态维修相结合的维修方式,以保证大量零散机械故障和

组运营改为6节编组运营,C车门检测电路弃用,产生15个截尾数据。同年10月停止数据的收集产生25个截尾数据。

分别采用不同的分布函数对首故障公里数进行拟合,选择最优的分布,发现车门检测电路的首故障公里数最佳服从威布尔分布。故障率和可靠度如下:

$$\text{故障率 } \lambda(t) = \frac{\beta}{\theta} \left( \frac{t}{\theta} \right)^{\beta-1}$$

$$\text{可靠度 } R(t) = e^{-(t/\theta)^\beta}$$

其中: $\beta=1.289$ ;  $\theta=784.6^\circ$ 。

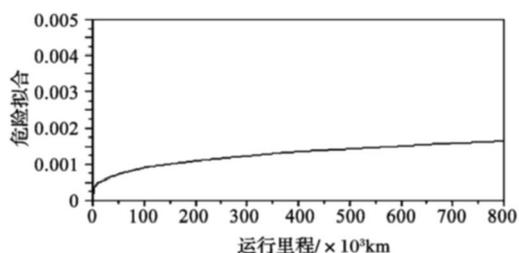


图4 车门检测电路的故障率曲线

在列车运行60万km数时(临近架修),车门检测电路的可靠度为 $R(600)=0.493$ ,平均故障前时间(单位×10<sup>3</sup>km)为

$$MTTF = \theta \cdot \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = 725.9$$

该检测电路在临架修时可靠度已经很低。故障公里数虽然服从威布尔分布,但其故障模型形状参数 $\beta$ 接近1。若采用预防性维修,定期更换(报废)电路中的

继电器 1、2, 为达到可靠性要求, 维修周期将会被设置得很短, 这样经济性将会降低。按以下模型进行计算, 有预防性维修周期下的可靠度  $R_m(t)$  为

$$R_m(t) = R(T)^n R(t - nT), nT \leq t \leq (n+1)T$$

式中:  $T$  为预防性维修周期。

可见, 即便采用 12 万 km(约 8 个月) 预防性维修(报废)周期, 到临架修时检测电路的可靠度  $R_m(600)$  也只有 0.641(见表 3), 相比无预防性维修情况下临架修的可靠度没有太大的提高。因此, 即便是故障率服从增函数的威布尔分布的部件, 如果模型的形状参数接近 1, 说明故障模式中随机因素所占比例较大<sup>[3]</sup>, 考虑到经济性, 没有必要对其制定预防性维修(报废)计划。故一般考虑在故障维修模式下, 采用增加冗余等改进提高系统可靠性减小停机时间, 或者更换可靠度更高的关键部件来达到运用可靠性要求。

表 3 不同的预防性维修周期下的临架修时可靠度

$n$	$T/ \times 10^3 \text{km}$	$R(T)$	临架修时的可靠度 $R_m(600)$
1	600	0.493	0.493
2	300	0.749	0.560
3	200	0.842	0.597
4	120	0.915	0.641

目前采用的是使用新工艺制造的继电器取代原来电路中的继电器 1、2, 并且规定了新的安装工艺以提高其可靠度, 取得了 16 万 km 内无故障发生的良好运用效果。

### 2.3 门控器 (MDCU) 的故障分析及备件策略

对于门控器 MDCU 来说, 其对整个车门系统而言关键性相对较低。且门控器运用状态无法监控, 无法做到状态维修。加之其价格昂贵, 目前所采用的故障维修模式是合理并且经济的。制定科学合理的备件策略, 便成为保证车门系统持续稳定运用的重要前提。

通过对现场故障数据的收集整理, 发现 MDCU 的故障公里数服从减函数的威布尔分布(见图 5)。可以通过老练筛选来有效地提高 MDCU 的可靠度。因此, 在后来与 MDCU 国产化厂家康尼公司进行设计联络时, 已经明确提出增加和优化 MDCU 出厂时的老练筛选过程。目前的装车试验结果显示 MDCU 可靠度已大幅度提高。

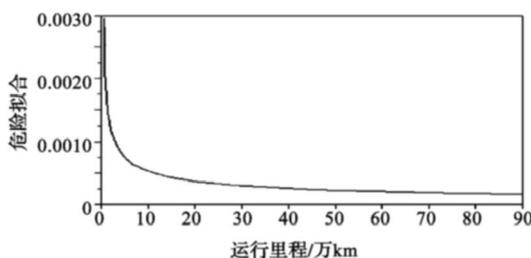


图 5 由现场故障数据拟合的 MDCU 故障率曲线

3 号线运用中的 MDCU 共有 240 个, 如果在更新过程中故障 MDCU 会立刻有新部件替代, 那么它会使系统达到稳态过程<sup>[4]</sup>, 由所有这些 MDCU 组成的整体的故障次数在一定时间后将是常数。就目前观察到的情况来看也的确如此, 系统故障率的稳态值为

$$\lambda = 240 \times \frac{1}{\text{MTTF}_i} = 0.0104$$

其中  $\text{MTTF}_i$  为单个 MDCU 的平均故障前时间。

在时间段  $0-t$  内发生故障不超过  $n$  次服从泊松累积分布:

$$R_n(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}$$

由于门控器 MDCU 的一个经济的采购周期为 11 个月, 同时计算得到在 11 个月中(列车运营公里数约为  $t=19$  万 km) MDCU 发生故障不多于  $n=6$  次的概率为  $R_6(190)=0.995$ 。因此可以确定 MDCU 的最低库存量为 6 件。

### 3 结语

车辆出厂时其可靠性已经确定, 检修工作仅能将车辆可靠性保持在出厂时已经确定的可靠性范围内的较高水平, 同时有效地控制成本, 并不能再提高其可靠性。因此, 运用部门在与厂家进行设计联络与审查、生产监造时严格把关, 投入更大的精力与人力, 才是提高车辆可靠性的根本途径, 也是控制车辆运营维护成本的最有效的方法。

就维修模式而言, 车辆系统由于本身的复杂性, 大量机械部件的故障率符合“浴盆”曲线, 因此, 整体上统一的预防性维修仍可以保证大量部件故障或状态不良可以被有效地预防和发现。

但同时存在着大量系统、部件的故障率类型不同, 故障模式不同, 关键性不同。在车辆维修计划的制定中, 建议在保持现有的预防性维修的大框架下, 通过分析故障数据适当地引入 RCM, 针对不同系统、部件的各异的故障模式、故障-时间分布和关键性, 适度地进行以各个子系统或部件为中心的 RCM, 其独立于车辆整体的维修计划, 使得维修过程更加灵活高效和科学, 在保证运用可靠度的同时有效地控制了成本。

### 参考文献:

[1] 钟云峰, 谭树彬. 以可靠性为中心的维修[J]. 机械工程师, 2006(3): 80.

[2] 许平洋. 基于可靠性的城轨车辆维修模式及应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31(6): 44.

[3] 贺国芳, 许海宝. 可靠性数据的收集与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[4] 于乃术. 关于机车电器可靠性检修探讨[J]. 电力机车与城轨车辆, 2009, 32(6): 48.