

全自动驾驶车辆车门系统的方案设计

杜岩琰

(上海轨道交通设备发展有限公司, 201100, 上海//工程师)

**摘 要** 通过对 OMPD(运营模式 and 规则定义)的功能分解,解析出适用于全自动驾驶的车门系统功能。根据车门系统的功能,初步完成车门系统的方案设计,并通过可靠性计算验证车门系统。

**关键词** 地铁车辆; 车门系统设计; 内藏门; 运营模式和规则定义

**中图分类号** U270

**DOI:**10. 16037/j. 1007 - 869x. 2021. 05. 049

Design of Door System for Fully Automatic Driving Metro Vehicles

DU Yanyan

**Abstract** Through the functional decomposition of operation modes and principles definition (OMPD), the function of door system suitable for fully automatic driving metro vehicles is analyzed. According to door system functionality, the preliminary design of the door system is completed, and is verified by reliability calculation.

**Key words** metro vehicle; door system design; sliding door; operation modes and principles definition (OMPD)

**Author's address** Shanghai Rail Transportation Equipment Co., Ltd., 201100, Shanghai, China

全自动无人驾驶车辆采用自动化等级 GoA3 或 GoA4,分别适用 DTO(有人值守)或 UTO(无人值守)的列车运行方式。本文以上海某采用无人值守的全自动无人驾驶项目为例,运用 OMPD(运营模式和规则定义)的方法来分析定义运营需求,从而明确全自动无人驾驶车辆的车门系统功能设计,并提出可靠性计算方法验证车门系统的可靠性。

1 OMPD 定义

OMPD 共分为 3 大运营场景:正常场景、故障场景、应急场景。各运营场景分别定义了场景描述、基本流程、注意事项和功能分配 4 部分。

正常场景是指系统正常运行情况下从早间运营前的准备,到车辆回库休眠的一系列正常工作场

景下,车辆、信号、综合监控、通讯、其他机电设备的功能实现和联动要求,以及运营、客服和检修等专业工作人员应执行的工作内容。

故障场景描述整个全自动驾驶系统在执行正常场景功能时发生故障,为保证系统的可用性和安全性,系统自动处置的动作、应具备的功能和联动机制。

应急场景中描述突发事件的应急处置预案,使整个全自动驾驶运营系统具备自动对突发事件的处置能力,最大限度地预防和减少突发事件的发生及其造成的损失。

2 OMPD 与车门功能解析

2.1 车门系统功能配置

每种场景下所需的车门系统功能如表 1 ~ 表 3 所示。

表 1 正常场景

场景	车门系统功能
列车唤醒	车门上电自检功能
列车进站停车	
停站作业	
列车站台发车	各模式下列车开关门功能(零速保护功能、车辆非正确侧误开门功能、区间内的开门防护功能)、安全互锁回路功能
列车折返	
列车清客	
列车站台扣车	
ATP 防护下各类车 有人驾驶模式	开、关门控制电路采用硬线优先,网络冗余的控制方式

表 2 故障场景

场景	车门系统功能
	电解锁
	紧急解锁
车门故障	机械隔离功能
	对位隔离功能
站台门故障	对位隔离功能

表 3 应急场景	
场景	车门系统功能
火灾	紧急解锁功能
列车疏散	紧急解锁功能
夹人夹物	障碍物检测功能

## 2.2 车门功能设计优化

结合 OMPD 定义,针对 GoA4 等级列车出库、运行无乘务员值守的情况,即当出现故障时,OCC(运营控制中心)仅能通过车载设备进行处理,或列车进站后工作人员登乘处理。因此,对车门的自动唤醒、出现故障乘务员蹬车、门系统出现故障自动隔离等需求进行了功能优化。

1) 对列车唤醒阶段中需求:“在全自动运行模式下,必需的列车功能执行综合自检(包括车辆设备自检、车载信号设备自检以及开关车门、施放制动等联合测试)”。针对上述需求,重新设计了车门上电自检功能。

车门上电自检功能如下:收到 TCMS(列车控制与管理系统)发送的自检信号,车门系统将进行自检检测,检测门控器内部的硬件及软件是否工作正常,并将结果信号反馈给 TCMS。

2) 对无人驾驶列车降级运行的需求:列车在 ATP(列出自动保护系统)防护下以有人驾驶模式(AM、CM 或 RM 模式)运行优化了电解锁功能。

电解锁功能如下:工作人员可通过主控钥匙,在列车任何区间内操作解锁登车。

3) 对故障模式下,如车门或屏蔽门出现故障无法正常开关门,列车到站对位后,对应的屏蔽门或车门则保持关闭,不会打开,设计优化了对位隔离功能。

对位隔离功能如下:

1) 门系统故障。全自动驾驶情况下,门控器可以自动将无法开/关门的故障信息和门的地址信息上传给 TCMS。TCMS 再将故障信息和门地址发送给信号系统和列车广播系统,通过信号系统控制实现下一站屏蔽门对位切除;通过列车广播系统触发相对应的隔离车门上方的动态地图 LCD 显示器,显示此门不打开的信息,点亮红色指示灯,并进行车门隔离故障广播,如图 1 所示。

2) 屏蔽门系统故障。当前方站台单个或多个屏蔽门故障时,通过信号系统在车辆进站前将对应

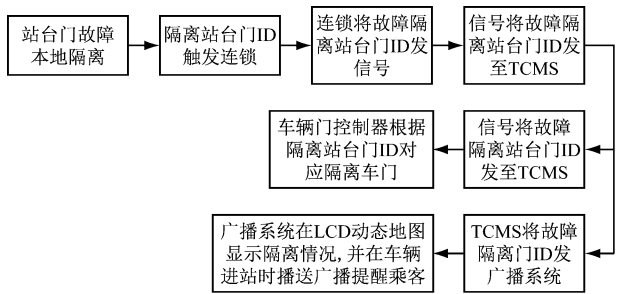


图 1 门系统故障对位隔离示意图

车门切除信息和地址信息传送给车载信号设备,车辆的信号系统再通过 TCMS 系统按照地址信息将切除指令发送给对应的门控器和车载 PA 系统。门控器在开关门时保持切除状态,此时车门内侧切除显示灯点亮,提前提示乘客此门不打开;通过车载 PA 系统触发相对应的故障车门上方的动态地图 LCD 显示器,显示此门不打开的信息,点亮红色指示灯,并进行车门故障广播,如图 2 所示。

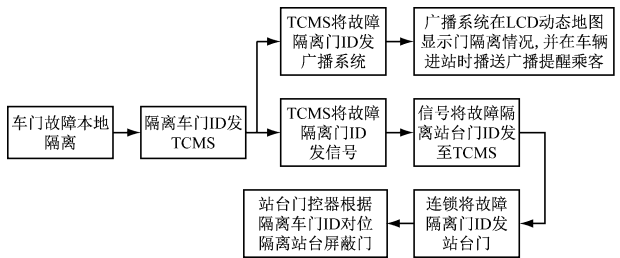


图 2 屏蔽门故障对位隔离示意图

通过对场景文件的梳理,共对车门系统 8 个功能进行了优化或新增,从根本上保证了车门系统在使用功能上满足用户的实际需求。

## 3 车门系统方案设计

根据上文中总结出的功能需求及设计方案,配置车门系统的硬件。本项目车门系统采用的是一种电动双开内藏门系统,主要由承载机构、驱动机构、门页、内外门槛、辅助支撑、内外紧急解锁、电解锁装置、门控器等组成,如图 3 所示。

每节车厢有 10 套门,分居两侧,每侧 5 套。每套门均由一台门控器来控制。1 号和 2 号配备以太网接口和 MVB(多功能车辆总线)网卡,它们作为主门进行 RS485 通讯。门 3 到 10 作为 S485 网络的从门,其中,TC 车的 1 号车门、2 号车门配有电解锁和外紧急解锁,9 号车门、10 号车门配有外紧急解锁,其余车型仅在 1 号门、2 号门配有外紧急解锁。

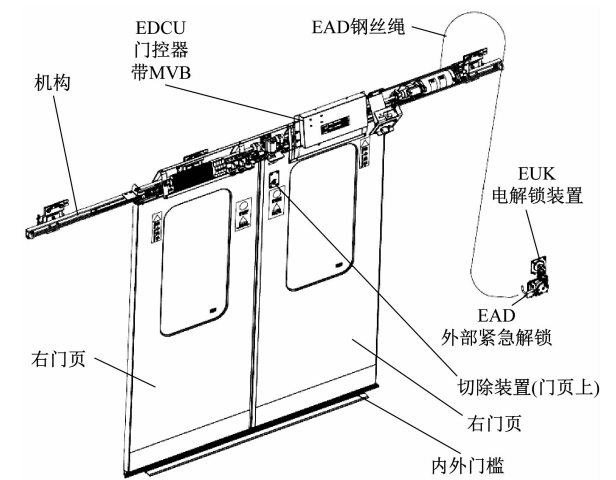


图3 车门系统硬件方案

4 车门系统硬件系统 RAMS 计算

车门系统可靠性预计是在设计阶段对客室侧门的可靠性进行定量的估计,是根据历史的产品可靠性数据、系统的构成和结构特点、系统的工作环境等因素估计组成系统的部件及系统可靠性<sup>[1]</sup>。根据重新配置后的车门系统硬件,验算已满足功能需求的车门系统是否达到已下发的车门系统的RAMS(可靠性、可用性、可维护性和安全性)指标。

4.1 车门系统 RAMS 指标分配

为保证整车设计达到用户招标文件中可靠性需求,整车可靠性指标需分配到各子系统。整车RAMS团队基于比例分配法,对子系统可靠性分配。车门系统可靠性指标分配如表4所示。

表4 可靠性指标分配				
门系统	权重比/ %	A类故障 MTBF/h	B类故障 MDBF/km	C类故障 MDBF/km
乘客室门	20.6	$1.5 \times 10^3$	$1.5 \times 10^6$	$6.7 \times 10^6$

- 故障定义如下:
- 1) A类故障,是指无法实现某一特定功能而造成车辆非正常停车/部分功能的丧失而不能正常运转,元器件因为失效而更换或修复。
  - 2) B类故障,是指因某一特定功能不能实现而导致列车晚点,列车甚至不能投入或继续维持商业运营。运营故障包含:救援(即需要另外一列车将故障列车拖回车辆段)、清客(需要疏散乘客,列车空车返回车辆段)、晚点(列车因故障在线路上停车时间超过2 min,对商业运行造成了影响,不能投入商业运营)。

3) C类故障,是指造成列车5 min及以上运营晚点的故障。

4.2 发布可靠性信息

列车基本运营信息如表5所示。

表5 基本运营信息	
名称	数值
每年平均运行距离/(km/a)	150 000
每年平均上电运行时间/(h/a)	6 935
平均运行时间每天/(h/d)	19
距离-上电运营时间比/(km/h)	21.63
车辆客室车门数量/(套/辆)	10
列车车辆数量/(辆/列)	6

4.3 故障模式、影响及危害性分析(FMECA)更新及故障类别识别

根据最新配置的车门系统硬件设备,重新更新FMECA中可更换单元,同时参考以往供应商经验数据初步更新对应的故障率,作为可靠性计算的数据来源。

依据FMECA中每个可更换单元的故障模式栏,分析确定故障影响后果及其导致的延误时间,判断是否计入B类故障或C类故障。

4.4 可靠性框图

对系统各零部件功能进行分析,系统的基本可靠性模型符合串联系统,可靠性框图如图4所示。

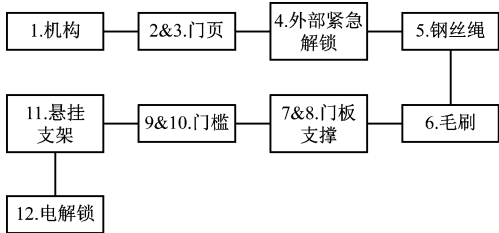


图4 可靠性框图

4.4.1 数学模型<sup>[2]</sup>

故障率为:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \tag{1}$$

式中:

$\lambda$ ——系统的故障率;

$\lambda_i$ ——各单元的故障率。

平均无故障间隔时间(MTBF)为:

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \tag{2}$$

式中：  
 $t_{\text{MTBF}}$ ——系统平均无故障间隔时间。  
在进行列车可靠性计算中将采用以下公式：

$$t_{\text{MTBF}} = T_1 / N_1 \tag{3}$$

式中：  
 $t_{\text{MTBF}}$ ——平均无故障间隔时间；  
 $T_1$ ——列车运行的时间总和；  
 $N_1$ ——在  $T_1$  时间内发生的故障总数。  
在进行列车可靠性计算中将采用以下公式：

$$L_{\text{MDBF}} = L_i / N_i \tag{4}$$

式中：  
 $L_{\text{MDBF}}$ ——平均故障间隔里程；  
 $L_i$ ——所有运营列车在正线上运行总里程；  
 $N_i$ ——在  $L_i$  距离内所有运营列车上所发生的列车运营故障总数。

4.4.2 计算结果

将 FMECA 中故障率数据代入式(1),得到 A 类故障可靠性图框,如图 5 所示。

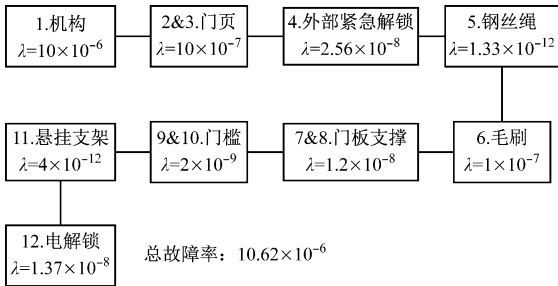


图 5 A 类故障可靠性框图

将 FMECA 中导致 B 类故障的故障率代入式(1),得到 B 类故障可靠性图框,如图 6 所示。

由于车门系统中并无更换单元的失效会导致造成列车 5 min 及以上运营晚点的故障,因此无 C 类故障。

将上述单门计算结果转换成一列车车门故障率,代入式(2),计算出每种故障的  $t_{\text{MTBF}}$ 。

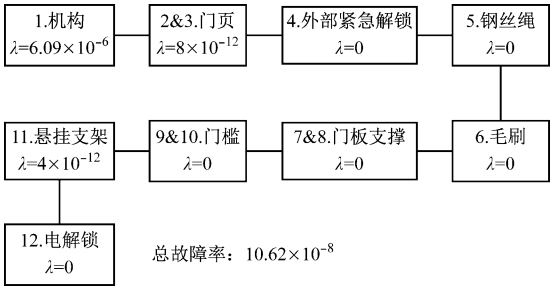


图 6 B 类故障可靠性框图

将每年平均运行距离、每年平均上电运行时间、 $t_{\text{MTBF}}$ 代入式(3)、式(4),计算出每种故障的  $t_{\text{MTBF}}$ 及  $L_{\text{MDBF}}$ ,计算结果如表 6 所示。

表 6 各故障类型故障率			
车门系统	A 类故障	B 类故障	C 类故障
每套门故障率	$10.62 \times 10^{-6}$	$6.09 \times 10^{-8}$	0
每列车故障率	$637.24 \times 10^{-6}$	$3.65 \times 10^{-6}$	0
$t_{\text{MTBF}}$ (每列车)/h	1 569	273 972	0
$L_{\text{MDBF}}$ (每列车)/km	33 937	5 926 027	0
目标值(分配值)	1 500 h	1 500 000 km	6 700 000 km
结论	满足要求	满足要求	满足要求

5 结语

本文通过对 OMPD 深入解析,从而明确车门系统功能需求,对车门系统功能进行了优化;初步通过可靠性计算,验证了车门系统方案的可靠性,从而明确了车门系统的方案设计,为后续的系统设计打下基础。

参考文献

[1] 刘爱明. 轨道交通车辆门系统可靠性设计技术的研究与应用[D]. 南京:南京理工大学,2008.  
[2] 谢少锋,张增照,聂国健. 可靠性设计[M]. 北京:电子工业出版社,2015.

(收稿日期:2019-07-08)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》  
服务热线 021—51030704