

# 全自动运行列车驾驶台显控器件的配置与分级<sup>\*</sup>

张 宝<sup>1,2</sup> 陈悦源<sup>3</sup> 任 菲<sup>1,2</sup> 庞 颖<sup>1,2</sup>

(1. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 100068, 北京;

2. 城市轨道交通全自动运行系统与安全监控北京市重点实验室, 100068, 北京;

3. 北京交通大学轨道交通控制与安全国家重点实验室, 100044, 北京//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 针对全自动运行列车驾驶台显控器件的合理布置问题,提出一种基于层次任务分析的全自动运行列车驾驶台显控器件配置与分级方法。通过建立行车任务库,在层次任务分析的基础上构建“场景-任务-器件”模型,探究器件的使用特性,并结合显控器件配置原则对其进行重新配置筛选。在此基础上,基于 K-Means 聚类分析划分器件等级,为器件的布局优化设计提供基础。以北京地铁燕房线为例,采用所提方法提出改进方案,为未来全自动运行列车的驾驶台设计提供参考建议。

**关键词** 城市轨道交通; 全自动运行; 驾驶台显控器件布局

**中图分类号** U231.6

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.09.007

## Configuration and Classification of Control Stand Display Device of FAO Train

ZHANG Bao, CHEN Yueyuan, REN Fei, PANG Ying

**Abstract** Targeting configuration and layout of the FAO (fully automatic operation) train control stand display device, a control stand display device configuration and classification method for FAO train based on hierarchical task analysis is proposed. By establishing driving task database, based on the hierarchical task analysis, the ‘scene-task-device’ analysis model for exploring the use characteristics of device is constructed. Then the configuration of device is reselected considering the configuration principle. Next, the K-Means clustering analysis is used to classify the device level, which provides the basis for the device layout design optimization. Taking Yanfang Line of Beijing Metro as an example, the improvement scheme is proposed by using this method. It will provide suggestions for the control stand design of FAO train in the future.

**Key words** urban rail transit; fully automatic operation; control stand display device layout

**First-author's address** Beijing Metro Construction Administration Co., Ltd., 100068, Beijing, China

全自动运行(FAO)系统通过智能化、自动化联动作业实现了列车无人驾驶,通常无需设置驾驶台,仅需要设置极其简易的动车功能以备应急之用(某些项目为了特殊需要依旧设置了驾驶台)。

目前,全自动运行列车驾驶界面的设计存在一些问题:台面器件种类及数量繁多,器件布置缺乏科学合理的依据,且若在列车驾驶室前端设置逃生门,将导致驾驶台尺寸缩减,台面可布局面积将大幅减少,这使得台面器件数量、布置形式与台面尺寸之间产生冲突。驾驶界面显控器件的布局若不能够很好地适应司机在全自动运行模式下的操作需求,不仅会增加司机日常驾驶中的视觉负担及任务难度,也不利于在应急与模式降级场景下准确、快速地完成作业,给行车安全带来诸多隐患。因此,迫切需要研究适用于全自动运行列车的驾驶台器件配置和设计方法,以保障司机的高效作业和列车的安全运营。

本研究通过调研访谈,探究 FAO 系统的作业需求,采用任务分析与主观问卷相结合的方法,定性和定量地对器件的重要性和频次性展开研究。结合人因原则对器件重新配置,筛选关键器件并通过聚类分析划分器件等级,可为全自动列车驾驶台器件的布局优化设计提供理论基础。

## 1 国内外的研究现状

自 21 世纪开始,国外众多轨道交通组织都愈发重视列车的人因设计研究。英国铁路安全与标准委员会、英国国家铁路路网公司及美国联邦铁路局

<sup>\*</sup> 北京市轨道交通建设管理有限公司“双创”基金项目(SCJJ2019001)

相继成立了人因研究部门,人因规范逐渐融入列车驾驶台设计中。随着国际运输愈发重要,为应对和谐化设计及区域性运输需求,EUDD(欧洲跨境运输用司机台)研究获得了欧盟的支持,致力于开发可方便欧洲铁路跨境运输用的模块化结构驾驶台<sup>[1]</sup>。自此,欧洲多国驾驶台的设计均朝着模块化、功能化和界面标准化发展,提升了驾驶台设计的可用性与安全性。

目前,我国列车驾驶台器件的配置与布局设计尚缺少统一标准,但诸多学者从人因学角度,对驾驶台的人性化设计展开研究。文献[2]通过功能性臂长的测定和仿真,界定了最大作业范围和最舒适作业区域。文献[3]通过分析重要度和使用频次链值将器件分为3个等级,为布局设计提供基础。文献[4]对驾驶室内环境及显控设备进行了合理配置。文献[5]基于人机设计准则,对器件布局开展优化设计。但这些研究均针对传统人工驾驶操纵台,未考虑FAO系统的驾驶特性,且对于人因规范和准则的使用也停留在理论指导和主观评价层面,缺乏从任务出发针对器件特性展开定量分析来指导器件配置及优化布局的研究。

基于对全世界已投入使用全自动运行技术的线路调研,综合分析多个地区及国家全自动列车驾驶台设计可知,其设计具有以下几个特点:①列车前端通常设有逃生门,驾驶台尺寸减小,器件可布置面积减少;②驾驶台面器件数量较少;③器件布置不止局限于驾驶台面和机柜中;④大多数情况下,驾驶台盖板闭合。

基于我国全自动运行列车前端设有逃生门的

现状,为解决器件数量与有限可布局面积间的冲突,本文提出一种基于层次任务分析的全自动运行列车驾驶台显控器件配置与分级方法,旨在满足全自动运行系统驾驶任务的需求,并进一步提高驾驶界面的人机适配性。

## 2 驾驶台器件配置与分级方法

### 2.1 层次任务分析

HTA(层次任务分析)是一种描述目标及其子目标层次体系的方法,具有灵活便捷、分析全面和通用性强等优点,已广泛应用于过程控制、航空、驾驶和公共技术等领域<sup>[6-7]</sup>。

结合FAO列车的任务特点,基于HTA的任务分析首先应明确分析目的,定义所分析的任务。本文研究的分析目的是保证列车安全运营,所分析的任务需涵盖包括日常运营、应急处置及列车救援在内的所有场景任务。采用专家访谈、观察、文献分析和问卷调查等方法开展相关数据收集工作,收集任务流程、使用技术、交互方式和行为限制等特定数据。HTA顶层为整体目标,以FAM(全自动运行模式)下列车出段场为例进行分析,如图1所示。由图1可知,“列车出段场”任务下仅包含“列车出库”一个次目标,而将次目标进一步分解是任务细化的关键,该过程需要一直持续分解至具体行为操作,最后将所有操作按照一定规程制定执行计划。大多数情况下,可将此任务分解的行为操作情况按照计划顺序排列,但并非所有计划均为线性,也可存在条件循环的情况。

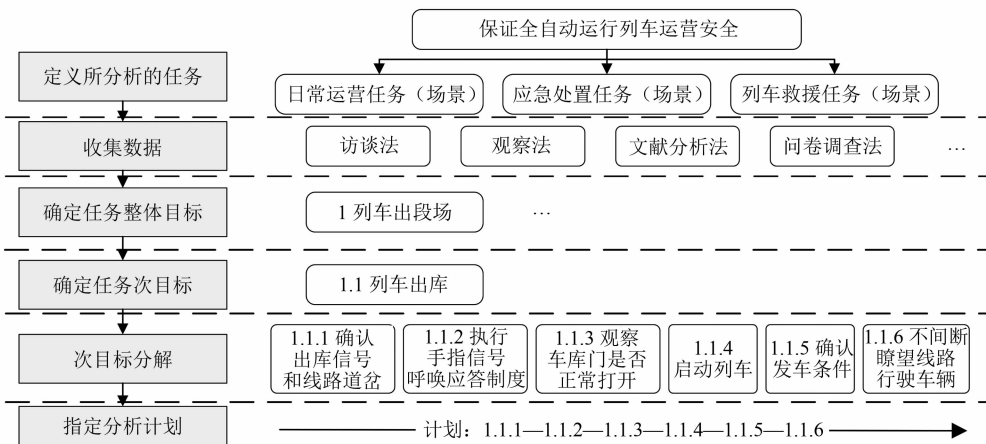


图1 全自动运行列车层次任务分析示例

Fig. 1 Example of hierarchical task analysis for FAO train

2.2 显控器件使用特性分析

由于显控器件众多,无法使各器件均布置在最佳位置,所以依据其重要性和频次性原则展开台面显控器件的重新配置及分级研究,以获得最佳的整体布局效果。

重要性原则即评估器件对实现系统目标的重要程度,将重要设备放置在便于操作的位置。设计 5 级李克特量表通过专家打分获取各器件的重要性。评估以“如果延迟或遗漏使用该设备,对行车安全造成不同等级的危险”来衡量,1~5 表示重要

等级从低到高。频次性原则用于评估各设备的使用频次,并将使用频次高的器件放置在便于操作的位置。在 HTA 基础上,将“次目标分解”层进一步细化,分析执行某个任务的具体行为操作,创建“行为操作”层,建立任务与器件的关联关系,构建“场景-任务-器件”模型。以 FAM 正常行车时的出段场作业为例进行分析,如图 2 所示。对所分析的场景及其任务依次建模,并统计各器件数量,可以获得某器件单次任务下的使用频次。

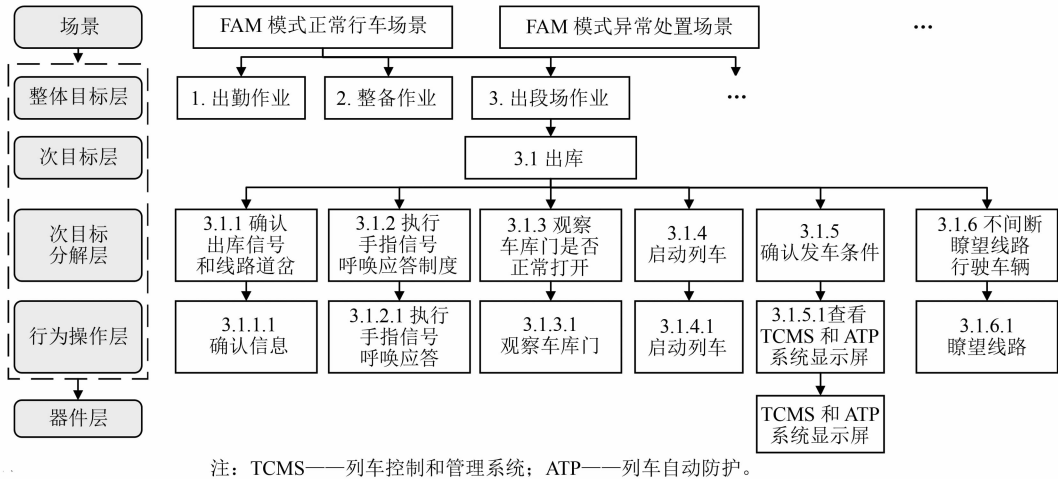


图 2 “场景-任务-器件”模型分析示例  
Fig. 2 Example of ‘scene-task-device’ model analysis

定义目标层任务集合  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_i\}$ , 获取每日发车车次  $N_{\text{tra}}$  及站台数量  $N_{\text{sta}}$ , 统计各类任务的执行频次  $F_T = [F_{t_1} \ F_{t_2} \ \dots \ F_{t_i}]$ 。定义驾驶台器件的集合  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_j\}$ , 则执行一次任务  $t_i$  过程中器件  $d_j$  的使用频次集合为:

$$f_T = [f_{t_1} \ f_{t_2} \ \dots \ f_{t_i}] = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \dots & f_{1j} \\ f_{21} & f_{22} & \dots & f_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ f_{i1} & f_{i2} & \dots & f_{ij} \end{bmatrix} \quad (1)$$

虽然,FAO 系统能够实现全天的全自动驾驶,考虑到司机技能保持的需求,全自动运营线路每天依旧需要留有一定的非 FAM 运营时间,即列车自动防护系统下的 AM(列车自动运行模式)和 CM(编码列车驾驶模式),通过调研运营模式可获得驾驶模式权重  $M = [m_{\text{FAM}} \ m_{\text{AM/CM}}]$  ( $m_{\text{FAM}}$  为 FAM 驾驶权重,  $m_{\text{AM/CM}}$  为 AM/CM 驾驶权重),进而可以计算得到单日内执行任务  $t_i$  时,显控器件的使用频次  $P = F_{t_i} f_{t_i} M$ 。

2.3 显控器件配置原则

FAO 系统使得司机从原本的驾驶作业转变为长时间监控作业,同时要应对各种突发情况,因此以能够满足应急故障处置、系统降级后的人工驾驶及司机技能培训与保持的需求为目的,提出以下配置原则。

1) 瞭望需求原则:驾驶室内司机的一个重要任务为瞭望作业,通过时刻监控路段信息来判断是否能够继续安全行车。因此在执行瞭望作业时,所操作的器件必须位于驾驶台面上方,以保障列车安全行驶。可基于频次性原则,统计执行瞭望作业任务时所使用的器件频次,剔除频次为 0 的器件。

2) 瞬时反应原则:对应急处置方案中发生紧急或故障情况进行瞬时操作的器件,如紧急制动按钮和蜂鸣器等,必须放置在驾驶台面上。

3) 筛除冗余原则:对于原本存在冗余设计且只需要单个器件就能实现功能的器件,如 ATO(列车

自动运行)按钮等,可将具有相同功能的冗余器件剔除。

## 2.4 器件分级方法

基于重要性和频次性原则划分器件等级,用以指导优化布局结果,提高作业高效性和舒适性。然而,有限的最佳布局位置使得两个原则很难同时兼顾,因此采用聚类分析同步考虑两个原则,以最小化二者间的冲突。结合器件操作域的特点(舒适操作、有效操作和可扩展操作区),可将器件划分为3个等级。采用  $K$ -Means 聚类分析,将通过重新配置筛选获得的器件重要性等级和使用频次作为分类指标,获得台面显控器件的分级结果。完整的全自动运行列车驾驶台显控器件配置与分级方法的流程如图3所示。

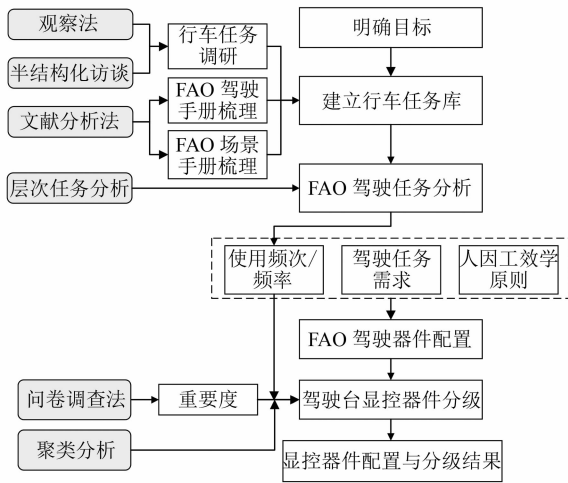


图3 全自动列车驾驶台器件配置与分级方法

Fig. 3 Method of configuration and classification of FAO train control stand devices

## 3 案例研究

运用所提方法对北京地铁燕房线展开分析。当前的燕房线列车驾驶台设计仅是将自动驾驶器件安放在传统驾驶台面上而形成的布置。台面共有51个器件,布置方案缺乏科学理论依据,忽视了应急处置与切换驾驶模式后的需求。

通过跟车观察、调研访谈及行车规范文件分析,对各运行模式正常行车场景的12项任务、19个应急处置、15个车辆故障处置及22个车载信号故障处理场景进行梳理,构建行车任务库。基于HTA展开任务分析并构建“场景-任务-器件”模型,统计各器件的使用频次。

北京地铁燕房线当前共设12个站台,在工作日和周末采用不同的运营计划:正常运营秩序下,工作日和周末每日分别运行300和262个车次,即  $N_{\text{tra\_d}} = 300$  车次,  $N_{\text{tra\_w}} = 262$  车次。工作日平峰时段,调配7辆列车上线运营;早晚高峰时,加调4列列车以提高运行密度;高峰时段后,再调配4辆列车退出运营。由此可知,工作日出入库作业频次  $F_{\text{出入库\_d}} = 15$  次,周末无加开列车,  $F_{\text{出入库\_w}} = 7$  次。不同任务的执行频次有所差别,以站台作业为例,单日所有车次站台作业器件频次  $P_{\text{站台作业}}$  可以表示为:

$$P_{\text{站台作业}} = M[N_{\text{sta}} f_{\text{站台作业}} \cdot (5N_{\text{tra\_d}} + 2N_{\text{tra\_w}})] / 7 \quad (2)$$

式中:

$f_{\text{站台作业}}$  —— 单次站台作业器件使用频次。

同理可得,区间作业器件频次  $P_{\text{区间作业}}$ 、折返作业器件频次  $P_{\text{折返作业}}$  及其他作业(出勤、整备、出段场、回段场、休眠、退勤、洗车与调车作业)器件频次  $P_{\text{其他作业}}$  可以表示为:

$$P_{\text{区间作业}} = M[f_{\text{区间作业}} \cdot (5N_{\text{tra\_d}} + 2N_{\text{tra\_w}})(N_{\text{sta}} - 1)] / 7 \quad (3)$$

$$P_{\text{折返作业}} = M[5(2N_{\text{tra\_d}} - 1) + 2f_{\text{折返作业}}(2N_{\text{tra\_w}} - 1)] / 7 \quad (4)$$

$$P_{\text{其他作业}} = M[f_{\text{其他作业}} \cdot (5F_{\text{出入库\_d}} + 2F_{\text{出入库\_w}})] / 7 \quad (5)$$

式中:

$f_{\text{区间作业}}$  —— 单次区间作业器件使用频次;

$f_{\text{折返作业}}$  —— 单次折返作业器件使用频次;

$f_{\text{其他作业}}$  —— 单次其他作业器件使用频次。

根据运营时间可知,FAM 与非 FAM 模型的运营比例为 43:57,通过计算获得各显控器件的使用频次并将其转化为使用频率。基于显控器件的配置原则筛选器件,获得27个显控器件及各器件的正常运营与应急场景使用频率。采用问卷调查法,由3名驾龄3年以上的司机填写。台面器件使用特性如表1所示。

采用  $K$ -Means 聚类分析对台面27个器件分级,如图4所示。原布置于驾驶台面的51个显控器件,除布置于台面的27个以及删减的7个器件外,剩余17个器件可根据司机室的设计布置于侧墙或机柜内侧。

表 1 驾驶台面器件使用特性

Tab. 1 Operation characteristics of driver console devices

序号	器件	正常频率	应急频率	重要度
1	TCMS 显示屏	0.108 51	0.049 29	4.67
2	ATP 显示屏	0.480 20	0.091 06	4.33
3	方向手柄	0.015 28	0.045 56	5.00
4	级位手柄	0.179 80	0.127 06	5.00
5	激活钥匙孔	0.006 48	0.026 73	5.00
6	无线电台主机	0.005 80	0.503 53	4.00
7	紧急制动	0.000 76	0.057 25	5.00
8	模式升级	0.000 27	0.000 20	4.67
9	模式降级	0.000 27	0.000 00	4.67
10	模式确认	0.044 68	0.005 43	4.67
11	电笛	0.000 71	0.000 00	4.33
12	高加速	0.000 00	0.000 00	2.33
13	自动折返	0.008 22	0.000 00	4.00
14	开左门	0.000 07	0.000 64	4.33
15	关左门	0.000 07	0.002 57	4.33
16	开右门	0.000 07	0.000 64	4.33
17	关右门	0.000 07	0.002 57	4.33
18	解钩	0.000 00	0.006 99	3.67
19	高速断路器分	0.000 36	0.001 28	4.33
20	ATO 按钮	0.052 47	0.000 40	4.33
21	强迫缓解	0.000 00	0.001 28	5.00
22	蜂鸣器	0.000 00	0.000 64	4.00
23	门选开关	0.026 73	0.043 37	3.67
24	开门模式选择	0.002 68	0.009 51	4.33
25	门关好	0.059 70	0.001 28	5.00
26	雨刷器	0.000 36	0.000 00	3.00
27	前照灯	0.006 48	0.022 73	4.33

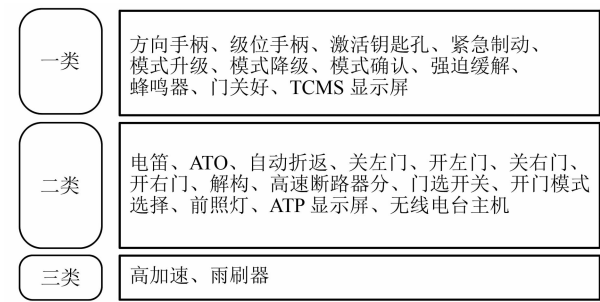


图 4 显控器件分级

Fig. 4 Classification of display and control devices

4 全自动驾驶显控界面探讨

随着轨道交通自动化程度的不断提升,自动化设备将逐步辅助并替代人的作用,最终实现无人值守的全自动运行(GoA4,GoA 为自动化等级)。目前,我国 FAO 列车的驾驶等级正处于 GoA3 到 GoA4 的过渡阶段,司机逐渐走出驾驶室从驾驶员变为乘务员。但轨道交通运行系统始终是一个人机混合系统,当 FAO 系统出现异常时,仍需司机上车处

置,人作为自动化系统的最后一道安全防线,对安全可靠的运营依旧起到至关重要的作用。FAO 系统的列车设计、开发及运营中的人-机关系不匹配,可能导致自动化自满、自动化讽刺、人员技能退化和情景意识缺失等问题<sup>[8]</sup>。因此,人因理论及方法在轨道交通自动化系统中发挥着重要作用。本研究正是从人与 FAO 系统的交互作业出发,针对 FAO 系统的人机交互特征,分析不同场景与驾驶模式下的任务,通过建立任务与器件之间的映射关系,对器件的使用频次展开量化分析,并对器件进行等级划分,进而为全自动运行列车驾驶台的布局优化设计提供基础。

本研究依旧处于对驾驶台既有显控器件的配置与分级探讨,在数字化趋势的推动下,驾驶台控制器件的设计也应朝数字化方向发展,如网压表、电压表等设备所示信息已在数字化界面呈现。实现物理控件的数字化设计能使 FAO 列车驾驶界面在保有健全功能的同时,减少驾驶员的作业负荷,也给驾驶台提供了更多的设计空间。然而,并非所有物理控件均能实现数字化集成,如紧急制动等需快速反应操作的控件,若采用显示控制会增加执行时间,反而给运营安全增加风险。此外,由于显示器尺寸有限,过多的功能集成使得界面设计愈发复杂,多级菜单的应用也会降低作业绩效,因此,对于全自动驾驶台物理控件的数字化集成设计将成为未来驾驶台设计的研究方向之一。

5 结语

本文基于全自动运行列车的司机作业特点,通过层次任务分析所构建的“场景-任务-器件”分析模型能够实现人因设计中频次性原则的量化应用。结合重要性原则与所提出的器件配置原则,实现全自动运行列车驾驶台显控器件的配置与分级,为未来全自动运行列车驾驶台显控器件的设计和后续驾驶人机界面布局优化奠定基础。

参考文献

[1] ZUBILLAGA X, BARTA M, MIGLIANICO D, et al. Usability testing of the future standardized European Driver's Desk under 'real world' conditions[C]//WCRR Proceedings of the 9th World Congress on Railway Research. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011:1.

[2] 张莉立,危朝勇.电力机车司机室人机界面的分析研究[J].电力机车技术,2000(1):11.