

# 城市轨道交通车辆均衡检修模式分析研究<sup>\*</sup>

刘佳 李瑞荣

(广州铁路职业技术学院机车车辆学院, 510430, 广州//第一作者, 工程师)

**摘要** 针对城市轨道交通车辆检修制度中存在的车辆供车率过低、车辆运营成本和维修成本过高等问题,国内的城市轨道交通企业逐步将传统的计划检修模式调整为均衡检修模式。均衡修对传统计划修的检修任务进行拆分,均衡安排到不同的维修周期内,利用列车运行窗口期进行检修。建立了均衡修下的工作流程,对均衡修的维修优势、影响因素进行了分析。研究表明:均衡修能显著减少车辆的扣车检修时间,有效提高车辆的供车率。

**关键词** 城市轨道交通; 车辆; 均衡修; 检修策略

**中图分类号** U279

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2022.03.024

## Analysis and Research on the Balanced Maintenance Mode of Urban Rail Transit Vehicle

LIU Jia, LI Ruirong

**Abstract** In view of the problems of low vehicle supply rate, high vehicle operation cost and maintenance cost in urban rail transit vehicle maintenance system, domestic urban rail transit enterprises are gradually transiting from the conventional planned maintenance mode to balanced maintenance mode. The balanced maintenance mode breaks down the tasks in conventional planned maintenance and arranges them in different maintenance cycles which uses the ‘window period’ of train operation to carry out the maintenance. The workflow under balanced maintenance is established. The advantages and influencing factors of balanced maintenance are analyzed. The research shows that balanced maintenance can significantly reduce the vehicle detaining maintenance time and effectively improve the vehicle supply rate.

**Key words** urban rail transit; vehicle; balanced maintenance; maintenance strategy

**Author’s address** Locomotive and Rolling Stock College, Guangzhou Railway Polytechnic, 510430, Guangzhou, China

我国城市轨道交通线路大多采用压缩行车间隔的方法来提高线路运能。列车长期超负荷运营

将导致车辆故障的绝对数增加,车辆扣车检修(以下简称“扣修”)时间增长,供车率(可上线列车数与配属列车数的比值)下降。为缓解此矛盾,许多城市轨道交通企业进行了积极的探索,车辆均衡检修(以下简称“均衡修”)模式是目前较为成熟的车辆维修策略。

## 1 城市轨道交通车辆预防性计划检修制度

我国城市轨道交通车辆检修制度基本沿用干线铁路的经验,采用日常维修和定期检修结合的预防性计划修(以下简称“计划修”)模式。随着车辆运用和维修经验的积累,通过对车辆故障的统计分析、研究车辆零部件的损伤规律,能不断优化车辆的检修修程。以某地铁线路的A型车为例,其车辆检修周期如表1所示。车辆检修修程以走行公里数或时间间隔为基准,达到检修周期的车辆即扣修,计划性检修的扣修时间较长,列车上线率难以提高。

表1 某地铁线路A型车检修周期表

Tab. 1 Maintenance periodic table of type-A vehicle of certain metro line

修程	检修周期		扣修时间	维修地点
	走行公里数/万 km	时间间隔		
日检		1 d	1.5 h	检修库或停车场
月检	1	1 个月	5.0 ~ 6.0 h	检修库
半年检	6	6 个月	3 d	检修库
年检	12	1 年	5d	检修库
架修	60	约 5 年	约 30 d	检修基地
大修	120	约 10 年	约 40 d	综合维修基地

## 2 传统计划修模式对供车率的影响

### 2.1 检修车对供车率的影响

城市轨道交通线路的车辆配属是根据设计阶

<sup>\*</sup> 广州铁路职业技术学院课题(GTXYY2117)

段对近、远期的客流预测和车辆检修制度综合考虑确定的。配属列车数  $N_p$  根据运用方式的不同,可分为运用列车数  $N_y$ 、备用列车数  $N_b$  和检修列车数  $N_j$ ,其相互关系的计算式为:

$$N_p = N_y + N_b + N_j \quad (1)$$

对于已开通运营的城市轨道交通线路而言,在  $N_p$  固定、 $N_b$  相对固定(一般为 1~2 列)的情况下,如要增加  $N_y$ ,只有减少  $N_j$ 。 $N_j$  包括架大修送修的列车数  $N_s$ 、镟修列车数  $N_x$ 、临修列车数  $N_l$  及库停检修列车数  $N_k$ ,其数量关系为:

$$N_j = N_s + N_x + N_l + N_k \quad (2)$$

分析式(2)可知, $N_s$ 、 $N_x$ 、 $N_l$  均有固定的配比,因而,检修车中唯一可调整的只有  $N_k$ 。以某地铁线路为例,该线的列车数据为: $N_p = 30$ , $N_b = 1$ , $N_s = 1$ , $N_x = 1$ , $N_l = 1$ ,则  $N_y + N_k = 26$ 。由此可知,要增加  $N_y$ 、提高供车率,就必须减少  $N_k$ ,而  $N_k$  取决于车辆检修周期及各级检修的扣修时间。

## 2.2 车辆年扣修总时间及供车率分析

城市轨道交通车辆的年扣修总时间  $T_z$  由车辆的各级修程扣修时间  $T_i$  计算而得:

$$T_z = \sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n t_i m_i \quad (3)$$

式中:

$T_i$ ——每级修程的年扣修时间之和;

$t_i$ ——每级修程每次扣修的时间;

$m_i$ ——每级修程每年扣修的次数;

$i$ ——自然数序列;

$n$ ——修程的级数(不含架大修)。

以表 1 为例计算,该线路列车的年检修计划包括年检、半年检和月检,则每列车年扣修时间为:

$$T_z = t_1 m_1 + t_2 m_2 + t_3 m_3 \quad (4)$$

式中:

$t_1$ ——年检扣修时间;

$t_2$ ——半年检扣修时间;

$t_3$ ——月检扣修时间;

$m_1$ ——年检的扣修次数;

$m_2$ ——半年检的扣修次数;

$m_3$ ——月检的扣修次数。

该线路实际的车辆检修计划分别为:①年检的扣修时间为 5 d,扣修次数为 1 次;②半年检的扣修时间为 3 d,扣修次数为 2 次;③月检的扣修时间为 1 d,扣修次数为 12 次。由于高等级修程涵盖低等级修程中的检修内容,因此应扣除低等级修程中重

复计算的扣修次数。由此可得: $t_1 = 5$ , $m_1 = 1$ ; $t_2 = 3$ , $m_2 = 1$ ; $t_3 = 1$ , $m_3 = 10$ 。将  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  分别代入式(4),可得到该线每列车年扣修时间  $T_z$  为 18 d。

全线所有列车的年扣修时间  $T$  的计算式为:

$$T = T_z N_p \quad (5)$$

该线的  $N_p = 30$ ,则  $T$  为 540 d。设年工作日为  $T_g$ ,则每天扣修列车数  $N_k$  的计算式为:

$$N_k = T/T_g \quad (6)$$

采用轮班工作制时  $T_g$  取 365 d,采用非轮班工作制时考虑节假日因素  $T_g$  取 250 d。由此可得到  $N_k$  的取值在 1.5~2.2 列之间, $N_k$  取整数为 2 列。该线的  $N_s = 1$ , $N_x = 1$ , $N_l = 1$ ,由式(2)可得  $N_j = 5$ ,则进一步计算得到该线的供车率为 83%。

由此可见,计划修下若线路的每日停运列车数量较多,将导致供车率偏低。随着线路客流量的增加、行车间隔的进一步缩短,在配属列车数不增加的前提下,计划修已无法满足线路供车数量的要求。

## 3 城市轨道交通车辆的均衡修模式

### 3.1 城市轨道交通车辆均衡修建立的基础

#### 3.1.1 城市轨道交通车辆修程的特点

月检、半年检和年检这三级修程主要是进行车辆设备的外观、功能检查,简单的维护、保养以及基本的测量、测试,具有检修程度浅的特点,大部分的检修内容对车辆的系统设备和车辆的整体功能没有直接影响。可利用这一特性调整维修时机,建立均衡修模式。

均衡修是依据原有车辆检修修程中对检修周期和扣修时间的规定,提出将原来集中在某几个检修时间段内进行的月检、半年检或年检任务分散到列车在运营期间的不上线时段或较低级别的修程中,使得整个检修工作分散而均匀。

#### 3.1.2 城市轨道交通列车运行窗口期

城市轨道交通线路的运营时间一般为 5:00—24:00,线路客流量在高峰、平峰、低峰不同时段各具特点。在客流的早、晚高峰时段和非高峰时段,城市轨道交通线路的上线列车数各有不同,因此,在非高峰时段有一定数量的列车将退出正线运营。本文将列车在运营期间的不上线时段定义为列车运行窗口期。

以上文的地铁线路为例,该线的  $N_p$  为 30 列,图 1 为该线不同时段的上线列车数。与计划修将车辆

扣停全天不同,均衡修针对非高峰期退出服务的列车,利用其运行窗口期实施检修。该线早高峰时段为6:30—9:30,晚高峰时段为16:30—19:30,考虑出入库时间后,列车在早、晚高峰之间的运行窗口

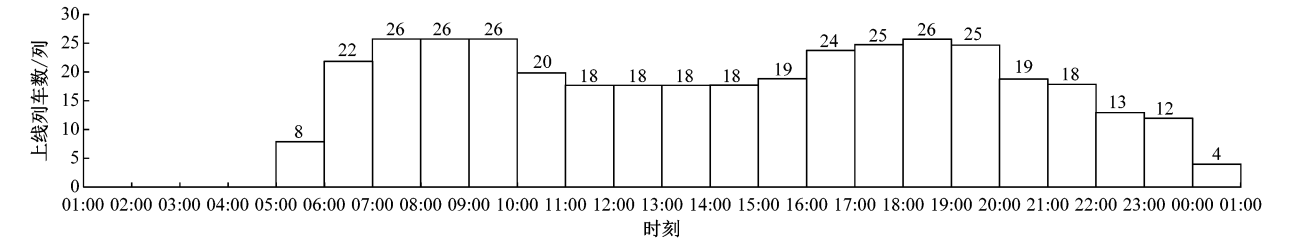


图1 案例线路不同时段的上车列车数

Fig. 1 Number of vehicles on line at different times of case line

3.2 建立城市轨道交通车辆均衡修的工作流程

构建均衡修工作流程的基本前提是在不降低检修强度的基础上拆分原有计划修模式下的检修内容。均衡修的确立可以分为5个阶段,其检修内容的整合如表2所示。

表2 均衡修模式对城市轨道交通车辆检修内容的整合  
Tab. 2 Integration of urban rail transit vehicle maintenance content by balanced maintenance mode

月份	计划性下的检修内容			均衡修下的检修内容
	月检	半年检	年检	
1	月检	半年检内容1	年检内容1	均衡修内容1
2	月检	半年检内容2	年检内容2	均衡修内容2
3	月检	半年检内容3	年检内容3	均衡修内容3
4	月检	半年检内容4	年检内容4	均衡修内容4
5	月检	半年检内容5	年检内容5	均衡修内容5
6	月检	半年检内容6	年检内容6	均衡修内容6
7	月检	半年检内容1	年检内容7	均衡修内容7
8	月检	半年检内容2	年检内容8	均衡修内容8
9	月检	半年检内容3	年检内容9	均衡修内容9
10	月检	半年检内容4	年检内容10	均衡修内容10
11	月检	半年检内容5	年检内容11	均衡修内容11
12	月检	半年检内容6	年检内容12	均衡修内容12

1) 第1阶段:确立车辆最小维修间隔时间,计算均衡修项目个数。如表2所示,被拆分检修作业中,最高级别为年检,最低级别为月检,则车辆的最小维修间隔时间为1个月。

2) 第2阶段:分析计算列车运行窗口期的检修能力。保持月检的检修内容不变,将半年检的检修任务按工时拆分为6份,将年检的检修任务按工时拆分为12份。

期为10:00—16:00,时长为6 h。由于运行窗口时间较短,无法完成月检、半年检及年检所有的检修项目,因此将月检、半年检及年检三级修程的检修内容拆分,分散到多个列车运行窗口期内完成。

3) 第3阶段:为保证原有检修强度,将2次半年检检修内容、1次年检检修内容与月检内容拼接,以确保所有车辆在1年内完成12次月检、2次半年检和1次年检所有的检修内容。如表2所示,以1月份为例,该月的车辆执行均衡修内容1包括了月检、半年检内容1和年检内容1所对应的检修项目。

4) 第4阶段:根据实际情况,科学、合理地调整每个均衡修的检修内容,删除同一车辆中设备和部件的重复性、低级别的检修内容,根据车辆检修工艺流程重组生成新的检修工艺文件。

5) 第5阶段:对初步完成的12个修程计划进行微调及优化,注意计划完成时间的平衡性,以保证扣修时间的最大化利用。注重修程各项目之间的关联性,尽量避免重复修、过度修。

3.3 检修周期对城市轨道交通车辆均衡修的影响

均衡修是将计划修下以列车作为检修对象转换为以车辆各系统设备、零部件作为检修对象,因此,车辆设备及零部件的检修周期直接影响均衡修项目的设置。对于拆分为12个批次的均衡修项目,只有当车辆设备及零部件的检修周期时间为12的公约数时,才能将该设备及部件的检修内容列入均衡修项目,形成周期性的预防性检修。当车辆设备及零部件的检修周期不满足上述要求时,为了有效地执行预防性维修,可另行设置针对某一设备或部件的“专项修”。

4 实施均衡修的优点及制约因素

4.1 均衡修的优点分析

4.1.1 提高了车辆部门的供车率

与计划修相比,执行均衡修缩短了车辆的库停

检修时间,单列车全年所需的检修时间由原来的 18 d 减少到 12 d,供车率由原来的 83% 提升至 90% (见表 3),可在配属车辆数不变的前提下最大限度地增加运用列车数,为在客流高峰时段缩短行车间隔、提高运能创造条件。

表 3 计划修与均衡修下的供车率对比  
Tab.3 Comparison of vehicle supply ratio between planned and balanced maintenance

项目	计划修	均衡修
配属列车数 $N_p$ /列	30	30
备用列车数 $N_b$ /列	1	1
架大修列车数 $N_s$ /列	1	1
临修列车数 $N_l$ /列	1	1
镟修列车数 $N_x$ /列	1	1
月检、半年检、年检的列车数 $N_k$ /列	2	2
高峰时段运用列车数 $N_y$ /列	24	26
供车率/%	83	90

注:月检、半年检、年检的列车数中,计划修下的 2 列须在库内扣修无法上线;均衡修下的 2 列在高峰时段可上线运行。

4.1.2 简化了检修工作计划

将全年的车辆检修工作均衡拆分到 12 个月中,每个月所有车辆执行同一份检修规程(如 1 月份执行均衡修内容 1),改变了以往 1 个月执行多份修程的现象,大幅降低了编排检修作业计划的工作强度。

4.1.3 提高了检修的灵活性

各均衡修任务间为并列关系,可根据当地的地域和气候特点科学、合理地安排均衡修项目内容。例如,在重大节假日前进行设备普查,在南方潮湿天气来临前进行电气设备的清洁维护,在夏季高温前完成车辆空调检修,走行部换油等作业量大的车底作业尽量避开高温酷暑季节等。这样,一方面可减少因客流变化和设备超负荷运行而造成故障集中爆发,减少正线运行车辆的故障率;另一方面也可改善检修工作环境,体现对检修人员的人文关怀。

4.2 均衡修的影响因素

1) 配属车辆数  $N_p$ 。均衡修将检修任务安排在 1 个或多个列车的运行窗口时间内进行。然而,像蓄电池维护、继电器整改等任务所需耗时较长(如蓄电池维护时需要充电 3 次、放电 2 次,历时 2 d),无法在 1 个列车运行窗口内实施且不能分段进行,这就需要将列车扣停检修。因此,车辆检修部门仍需有足够的备用列车数,以确保正线运营。

2) 列车在正线的运营情况。均衡修下非高峰时段列车按计划退出正线、入库检修。但是,受正

线运营情况的影响,原定回库列车有可能无法正常回库,从而可能导致既定的检修任务无法按计划完成。因此,必须保证在列车的运行窗口期内检修能力富余,对于无法按计划执行均衡修任务的列车,应顺延至后续的运行窗口期完成其检修任务。

3) 列车运行窗口时间的检修能力。随着城市轨道交通线网的持续扩大,线网的配属车辆数不断增加,需要相应地增加列车运行窗口期的检修能力,以满足检修工作量扩大后的需求。考虑到人员变动及其他特殊情况,列车运行窗口期的检修能力可按其实际检修工作量 1.5 倍进行设置。检修能力的增加在一定程度上意味着检修人员数量的增加,也就意味着维护成本的增加。对拟采用均衡修的线路,必须严格计算列车运行窗口期的检修能力,分析现有检修能力能否完成配属车辆数的均衡修任务。

4) 检修人员的检修能力及工作效率。计划修模式下,检修班组按修程等级设置,其检修内容固定,检修人员只需完成对应级别的检修任务,因而对检修作业的流程较为熟悉、检修的熟练度较高,且各级修程预留有固定的扣修时间,检修工作时间安排也较宽裕;均衡修模式下,由轮值班组人员配合定修班组人员共同完成均衡修任务,车辆每月执行同一均衡修任务,但不同月份的检修任务各异,这在一定程度上造成检修人员对检修作业不够熟悉,不利于检修工作效率的提高。

5 均衡修模式存在的问题及改进方向

1) 采用均衡修需要科学的管理。为发挥均衡修的最大效能,需从以下 3 个方面入手:①加强车辆部件故障周期的统计管理,根据部件故障的周期变化特征及规律及时调整均衡修项目内容;②落实维修人员的修前培训,避免因对检修项目不熟悉造成人为失误;③加强检修设备和备品的管理,从物料、设备方面保证均衡修项目的顺利实施。

2) 车辆部件仍存在欠修或过修的问题。均衡修是在拆分计划修修程基础上形成的一种新的检修策略,其本质仍为预防性计划检修,并未从根本上改变车辆检修以预防为主的固有属性。由于车辆零部件具有不同的使用寿命和故障周期,且维修范围广、维修程度不一致,为便于车辆检修工作组织,使检修工作具有计划性,维修任务设置往往具有一定的冗余度,使得部分车辆零部件存在过修问

题。均衡修在车辆设备和部件的检修时机上并没有做出太大的改善,也不可能完全避免欠修和过修的情况。为进一步提高车辆的检修效率、降低维修成本,需要逐步引导车辆部件检修向状态修的方向发展。

## 6 结语

均衡修能够有效地减少车辆的库停检修时间,提高供车率,并创造良好的社会效益。然而,均衡修作为预防性计划检修制度的一种新的表现形式,在实施过程中需要进行科学的管理,这样才能发挥其最大效能。要真正实现城市轨道交通车辆的精益维修,必须确定车辆所有零部件的使用寿命和维修周期,对关键部件进行状态监测,并建立模型来精确预测车辆零部件的使用寿命,进而实行按需修理。因此,预防性状态修模式将是未来城市轨道交通车辆检修的发展方向。

## 参考文献

- [1] 李兆新,张海强,钟璇.基于状态检测的城市轨道交通车辆全服役期系统性维修研究[J].城市轨道交通研究,2018

(8):138.

LI Zhaoxin, ZHANG Haiqiang, ZHONG Xuan. Systematic maintenance of the whole service cycle of urban rail transit vehicle on detection state[J]. Urban Mass Transit, 2018(8):138.

- [2] 万宇.成都地铁车辆均衡修探讨与应用[J].铁道机车车辆,2018(8):138.

WAN Yu. Vehicle maintenance system optimization for Chengdu Metro[J]. Railway Locomotive & Car, 2018(8):138.

- [3] 沈国强,贺德强,刘旗扬,等.基于系统修的城市轨道交通车辆检修制度研究[J].装备制造技术,2017(5):190.

SHEN Guoqiang, HE Deqiang, LIU Qiyang, et al. Research on maintenance system of urban rail transit vehicle based on system repair[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(5):190.

- [4] 王长庚,张海强.车辆均衡修检修模式在广州地铁的应用与探讨[J].电力机车与城轨车辆,2016(3):85.

WANG Changgeng, ZHANG Haiqiang. Application and discussion of vehicle balanced maintenance mode in Guangzhou Metro[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2016(3):85.

- [5] 程祖国,王居宽,陈鞍龙,等.城市轨道交通车辆部件故障与均衡修修程周期[J].城市轨道交通研究,2006(1):46.

CHENG Zuguo, WANG Jukuan, CHEN Anlong, et al. Vehicle component failures and balanced-maintenance period[J]. Urban Mass Transit, 2006(1):46.

(收稿日期:2020-03-06)

(上接第110页)

### 5.2.4 对接发列车的控制

在确认前方发车区间空闲后,联锁站行车值班员应通过应急盘办理进路,并确认发车进路上的各道岔位置正确。车站行车值班员应使用直通电话通知司机“进路已排列好,请以60 km/h限速运行”,并通知站台岗发车。

## 6 应急盘的应用效果及注意事项

### 6.1 应用效果分析

长沙地铁在4号线长沙火车南站信号设备集中区设置了应急盘,经检验应急盘的应用效果显著。采用应急盘后,与传统的电话闭塞法人工扳动道岔耗时2 min相比,操作单组道岔仅需10 s,极大地缩短了办理道岔进路的时间。

### 6.2 注意事项

1) 现场工作人员在使用后备站控行车法时若出现错误判断或误操作,将直接引发行车风险。因此,在实际应用中必须严格执行“双人确认”制度。

2) MSS监视工作站显示的列车位置信息以计轴系统正常运行为前提。一旦发生计轴系统故障,相应的计轴区段将显示为红光带,此时不可通过计

轴系统来确定列车位置信息。

## 7 结语

本文提出在车站设置应急盘、采取“应急盘监控道岔+微机监视列车位置”的方式,既可有效解决无法对道岔进行监控的问题,也可解决列车在正线运行时的快速定位问题,对提升应急处置效率、降低人员错误操作道岔的风险有显著作用。

## 参考文献

- [1] 林瑜筠.铁路信号工程设计[M].北京:中国铁道出版社,2019:88.

LIN Yujun. Railway signal engineering design[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019:88.

- [2] 方晓.应急后备盘在地铁信号联锁瘫痪应急处置中的应用研究[J].智能城市,2020(4):138.

FANG Xiao. Research on the application of emergency backup plate in the emergency treatment of subway signal interlocking paralysis[J]. Intelligent City, 2020(4):138.

- [3] 韩恩索.新型道岔控制技术探讨[J].中国新通信,2016(10):130.

HAN Ensuo. Discussion on new turnout control technology[J]. China New Telecommunications, 2016(10):130.

(收稿日期:2020-03-10)