

# 高速磁浮交通车辆检修制度优化研究<sup>\*</sup>

魏德豪 李 艳

(中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都//第一作者, 工程师)

**摘 要** 高速磁浮交通车辆现行检修制度大多采用预防性计划维修模式。计划修模式下, 高速磁浮交通车辆的检修能力利用率较低, 这在一定程度上影响了列车运行的可靠性和线路的运力, 导致配属列车数和车辆基地规模的增加, 为此亟需进行检修制度的优化。简述了现行高速磁浮交通车辆检修制度, 分析其存在的不足。对高速磁浮交通车辆运行特点及零部件技术特征进行了分析, 明确了高速磁浮交通车辆与传统轮轨车辆间的本质区别, 二者的车辆故障规律差异很显著。基于高速磁浮交通车辆的设备特征及故障特征, 对其采用均衡修的适应性及可行性进行分析。高速磁浮交通车辆具备在线诊断系统, 可随时收集车辆各部件的运转状态, 能适应优化后更为精益的检修制度。高速磁浮交通车辆维修工作中应引入均衡修策略, 根据零部件不同的故障规律及故障影响情况, 建立以零部件为重点检修对象的均衡修制度。可参考成都地铁的车辆均衡修模式, 将高速磁浮交通车辆双周检、三月检及定修的检修内容拆分到月检和专项修中, 以此减小车辆的维修频次, 压缩列车扣修时间, 提高列车利用率。

**关键词** 高速磁浮交通; 车辆检修; 均衡修

**中图分类号** U279.3<sup>+</sup>3; U292.91<sup>+</sup>7

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2023.05.016

## Research on Maintenance System Optimization of High-speed Maglev Transit Vehicle

WEI Dehao, LI Yan

**Abstract** Current maintenance system of high-speed maglev transit vehicle mainly adopts preventive planned maintenance mode. Under this mode, the utilization rate of high-speed maglev transit vehicle maintenance capacity is low, which would affect train operation reliability and line capacity to some degree and also lead to the increase in the number of allocated trains and the scale of vehicle base, thus it is urgent to optimize the maintenance mode. The current high-speed maglev transit vehicle maintenance system is briefly described, and the shortcomings are analyzed. Through analyzing the operation characteristics and component technical characteristics of high-speed

maglev transit vehicles, the essential difference between them and conventional wheel-rail vehicles is clarified, the difference in vehicle failure law between the two is also significant. Based on the equipment characteristics and failure characteristics of high-speed maglev transit vehicles, the adaptability and feasibility of balanced maintenance are analyzed. High-speed maglev transit vehicle is equipped with an online diagnosis system, which can collect the operation status of all vehicle parts at any time and can adapt to the optimized leaner maintenance system. It is recommended to introduce balanced maintenance strategy into the maintenance work of high-speed maglev transit vehicle, and establish a balanced maintenance system focusing on parts and components according to their different failure law and failure impact. By referring to the balanced maintenance mode of Chengdu Metro, the maintenance contents of bi-weekly inspection, three-month inspection and scheduled maintenance are divided into monthly inspection and special maintenance, so that vehicle maintenance frequency and train maintenance time are reduced, and train utilization rate is improved.

**Key words** high-speed maglev transit; vehicle maintenance; balanced maintenance

**Author's address** China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China

作为全球唯一的高速磁浮商业运营线, 上海市磁浮列车示范运营线自 2002 年底开通以来已安全运行 20 年。该线的磁浮系统利用电磁悬浮技术, 实现了列车在无机机械摩擦、无接触受电等条件下的高速运行, 向世人展示了电磁悬浮、计算机控制及新材料等高新技术的应用成果, 也为高速磁浮交通的推广和发展提供了有力的依据。

上海市磁浮列车示范运营线列车与轨道的悬浮间隙需控制在 10 mm 以内, 以满足列车以 430 km/h 最高速度“贴地飞行”的要求。高速磁浮交通车辆技术先进但造价高昂, 其良好的运行状态

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划项目 (2016YFB1200602-38)

需依赖可靠的检修制度。从目前采用的车辆维修制度及修程看,车辆的检修能力利用率较低,这在一定程度上影响了列车运行的可靠性和线路的运力,还会导致配属列车数和车辆基地规模的增加,进而导致线路运营成本的增加。为此,本文对如何进一步优化高速磁浮交通车辆检修制度进行研究。

### 1 现行高速磁浮交通车辆检修制度不足

目前国内城市轨道交通车辆的检修制度基本上沿用了铁路的经验,根据走行公里和检修间隔时间这两个指标数据,采用预防性“计划维修”和列车发生故障后“故障维修”相结合的维修策略<sup>[1-2]</sup>。

按照现行的建标 161—2012《高速磁浮交通建设标准(试行)》的规定,高速磁浮交通车辆的修程如表 1 所示,分为日检、周检、月检、季检、半年检、年检、三年检、六年检及大修等九个等级<sup>[3]</sup>。日常维修(包括日检、周检、月检及季检)在列车完成每日的运营计划后进行,而高级维修(包括半年检、年检、三年检、六年检及大修)则按走行公里或检修间隔时间启动全面的修理。由于不同的零部件有不同的使用寿命,这样的维修制度必将导致部分零部件得不到及时维护或被过度维护的情况。

表 1 高速磁浮交通车辆的修程

Tab. 1 Maintenance procedure of high-speed maglev vehicle

检修等级	启动不同检修等级的判断指标值	
	走行公里/万 km	检修间隔时间
日检	0.2~0.3	1 d
周检	1.5~2.0	7 d
月检	6.0~9.0	1 个月
季检	20.0~25.0	3 个月
半年检	40.0~50.0	6 个月
年检	80.0~100.0	1 年
三年检	250.0~300.0	3 年
六年检	500.0~600.0	6 年
大修	800.0~900.0	10 年

### 2 设备故障率曲线

设备的故障率曲线反映其故障规律,不同的设备其故障曲线不同。早期人们通过对设备故障进行统计,发现大部分的设备故障率遵循图 1 所示的曲线,这种曲线被称为设备故障浴盆曲线。根据该曲线,设备故障率随运行时间的增长可分为早期故障期、偶发故障期及耗损故障期三个阶段<sup>[4]</sup>。其中,偶发故障期是设备的最佳状态期,此阶段设备性能稳定,故障率最低。

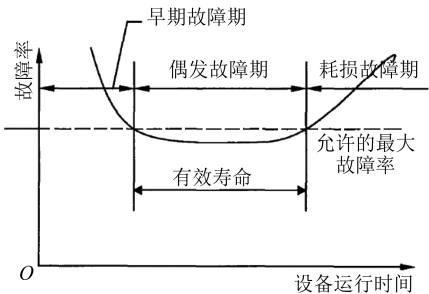


图 1 设备故障率浴盆曲线

Fig. 1 Bathtub curve of equipment failure rate

随着电子技术及自动化技术等新技术的广泛应用,设备的结构及各零部件间的关系越来越复杂。复杂设备的故障规律也不再遵循浴盆曲线。美国联合航空公司做了大量关于设备可靠性的研究,发现除了典型的浴盆曲线外,还有五种设备故障率特征曲线,如图 2 所示。

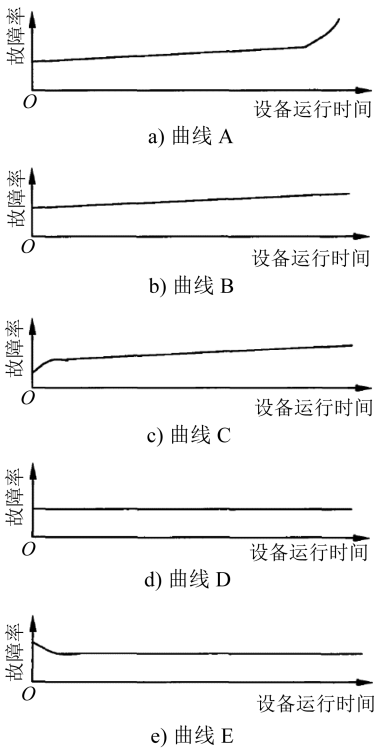


图 2 五种设备故障率特征曲线

Fig. 2 Characteristic curves of five types of equipment failure rates

曲线 A 在到达某一时间点后斜率骤然上升,表现出明显的加速磨损期;曲线 B 有缓慢且稳定的故障率增长趋势;曲线 C 显示设备新出厂时具有较低的故障率;曲线 D 表明设备的故障率恒定,其故障主要为偶然因素引起;曲线 E 则表示设备的故障率

在运行初期较高,随后逐步趋于稳定。设备故障浴盆曲线可视作曲线 A、曲线 D 及曲线 E 的组合。

由此可知:设备故障浴盆曲线中,处于损耗设备故障期的设备使用时间越长,其磨损越严重。但该阶段设备故障率迅速上升的特征并不完全适用于所有设备。对于符合曲线 E 特征的设备,经常性地对设备进行修理或定期实施设备大修,不一定能防止故障发生,反而可能将初期的高故障率延伸至故障率较低的阶段,进而导致设备总故障率增加。

### 3 高速磁浮交通车辆采用均衡修的适应性及可行性

#### 3.1 城市轨道交通车辆均衡修策略

城市轨道交通车辆均衡修是建立在充分掌握列车可靠度和零部件故障周期基础上的一种修程制度。通过调整列车的检修修程,可缩短列车的停修时间,提高列车的利用率。城市轨道交通车辆计划修策略与均衡修策略的对比如图 3 所示。与计划修需列车停运数日集中检修有所不同,均衡修将车辆维修工作进行拆分,把维修任务分摊到较长时间内完成,车辆的日维修时间仅仅需数小时。均衡修在修程上强调以零部件的寿命周期为依据,在维修作业上强调充分利用运营窗口时间。通过实施均衡修策略,可显著提高列车的上线率水平。

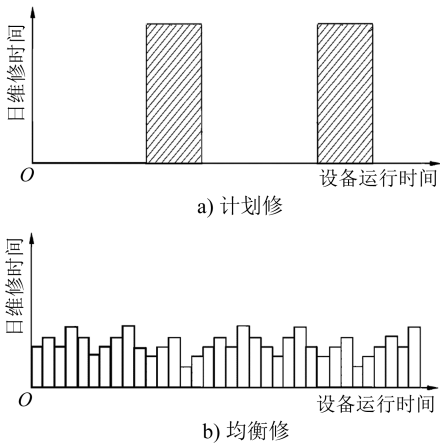


图 3 城市轨道交通车辆计划修策略与均衡修策略对比示意图  
Fig. 3 Comparison of planned maintenance strategy and balanced maintenance strategy of urban rail transit vehicle

#### 3.2 城市轨道交通车辆均衡修模式实施案例

目前,我国各城市轨道交通运营单位在借鉴国内外相关检修经验及总结自身管理经验的基

础上持续优化其车辆检修模式。以成都地铁为例,成都地铁 2 号线在 2015 年 9 月选取了 2 列地铁列车试点均衡修,并于 2016 年 3 月起全线所有列车均实施均衡修;成都地铁 3 号线列车在 2016 年 4 月试点均衡修后也全面实施均衡修;成都地铁 1 号线所有列车也于 2017 年 2 月开始实施均衡修<sup>[5]</sup>。成都地铁车辆均衡修将双周检、三月检及定修的内容拆分到月检和专项修中,以此减少车辆维修频次,压缩列车扣修时间,提高列车利用率。

以成都地铁 2 号线列车为例,两列试点列车(试点时间为半年)均衡修扣修时间和计划修预排扣修时间的对比如表 2 所示。由表 2 可看出,这两列试点列车采用均衡修后,其列车扣修时间比原计划修程分别节省了 7 d 和 9 d。此外,采用均衡修模式后,成都地铁 2 号线还达到了节省作业物料、减少作业班组及降低列车故障率等目的。

表 2 试点列车均衡修扣修时间和计划修预排扣修时间的对比

Tab. 2 Comparison between balanced maintenance and scheduled maintenance withholding time of pilot trains

列车	计划修下列车扣修时间/d				均衡修下列车扣修时间/d			均衡修较计划修节约的列车扣修时间/d
	双周检	三月检	定修	总计	月检	专项修	总计	
28 号车	9	3	11	23	7	9	16	7
36 号车	10	6		16	7		7	9

#### 3.3 高速磁浮交通车辆采用均衡修的适应性及可行性

车辆是高速磁浮交通系统中最活跃、最核心的设备之一。与传统的轮轨交通车辆相比,高速磁浮交通车辆具有以下特点:①高速磁浮交通车辆与轨道间无机械接触,也无轮对、齿轮箱等旋转部件,取而代之的是悬浮电磁铁、导向电磁铁等电子电气元件,故其设备故障规律并不完全遵循设备故障浴盆曲线;②高速磁浮交通车辆系统复杂、设计制造标准高、先进设备较多,其维修成本较传统轮轨车辆更高;③高速磁浮交通车辆具有大量的电子电气元件,且具备在线诊断系统,可随时收集车辆各部件的运转状态,在记录各零部件的寿命和维护周期的同时,为检修维护工作提供指导。

因此,为降低运营成本、增加线路的供车数量,高速磁浮交通车辆进行精益检修的需求更为迫切,而均衡修可以满足这一需求。高速磁浮交通车辆

在线诊断系统能掌握绝大部分设备的工作状态,可为车辆检修作业提供有力支撑,使车辆检修的计划更为合理、质量更为可控。综上所述,均衡修在高速磁浮交通车辆检修工作中具有良好的适应性和可行性。

#### 4 高速磁浮交通车辆均衡修制度

上海市磁浮列车示范运营线有着 20 年的运营经验,其运营技术已相对成熟,车辆性能相对稳定,可在较长的运营期内维持较高的列车运用水平,车辆的故障规律及各零部件的使用寿命等也已得到了较为全面的掌握。在这种情况下,若仍机械地套用建设标准规定的预防性计划修制度,势必会增加车辆的维修成本,降低列车上线率,这对上海市磁浮列车示范运营线的运营及未来其他高速磁浮交通工程的推广是极其不利的,因此有必要针对高速磁浮交通车辆制定合适的均衡修制度。

高速磁浮交通车辆不同的设备在运行过程中所起的作用不一样,其材质差异很大,故障率曲线也不尽相同。可采用化整为零的方式,根据零部件不同的故障规律及故障影响等情况,建立以零部件为重点检修对象的均衡修制度:

1) 车辆上大部分机械设备的故障率曲线是符合设备故障浴盆曲线的。对于这类设备,传统的定期维修策略就能很好地维持设备的工作状态,应根据设备不同的有效寿命针对性地制定不同的检修周期。

2) 电气设备(包括电磁铁、悬浮控制器及车载发电机等)的故障规律是多种设备故障率曲线的组合,应根据具体的故障特征制定相应的维修策略。例如,对于具有曲线 A 特征的设备,应在其设备状态急剧恶化前安排维修;对于具有曲线 E 特征的设备,可对其备品备件预先进行老化处理,更换新设备后可有效避免其使用初期的高故障率。

3) 除了设备自身属性对车辆维修策略的制定有影响外,设备故障引起的后果也应是制定车辆维修策略时需要考虑的重要因素。因此,还应按照设备故障引发后果的严重程度对设备进行分类:①对于会导致严重故障后果的设备,应通过设备状态监控系统实时掌握其状态,并采取预防性的主动维修策略;②对于故障影响小的设备,可视设备实际运转情况采取更为经济的事后维修策略。

在掌握车辆各类设备的特性后,可参考成都地铁和广州地铁的做法,将年检、半年检及季检的修程内容统筹分解到月检中,形成新的月检修程。每个月的修程在内容上不尽相同,但均统称为均衡修。

#### 5 结语

高速磁浮交通列车与轨道间无机械接触,无轮对、齿轮箱等旋转部件,零部件机械磨损相对较少。高速磁浮交通车辆内大量采用了电子电气元件,其在线监测系统更有利于对列车运行状态进行监测,因此,可建立模型来精准预测零部件的使用寿命,从而实现按需修理。车辆均衡修的实施,可提高高速磁浮交通列车的可靠性和上线率,降低运营成本,有利于推动高速磁浮交通系统的进一步发展。

#### 参考文献

- [1] 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,2006,9(1):46.  
CHENG Zuguo, WANG Jukuan, CHEN Anlong, et al. Vehicle component failures and balanced-maintenance period[J]. Urban Mass Transit, 2006, 9(1): 46.
- [2] 曾全君,龚玲.计划修与状态修在广州地铁车辆维修运用中的必要性和适用性[J].铁道车辆,2002,40(7):27.  
ZENG Quanjun, GONG Ling. The necessity and applicability of planned repair and 'on condition' repair in inspection and repair operation of Guangzhou Metro cars[J]. Rolling Stock, 2002, 40(7): 27.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.高速磁浮交通建设标准:建标 161—2012[S].北京:中国计划出版社,2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standards of high-speed maglev transport construction: JB 161—2012[S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [4] 刘蓉.城轨车辆设备维修策略优化与决策模型[D].北京:北京交通大学,2010.  
LIU Rong. Maintenance strategy optimization and decision model of the urban railway car equipment[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [5] 万宇.成都地铁车辆均衡修探讨与应用[J].铁道机车车辆,2017,37(5):109.  
WAN Yu. Vehicle maintenance system optimization for Chengdu Metro[J]. Railway Locomotive & Car, 2017, 37(5): 109.

(收稿日期:2020-07-10)