

研
究
开
发基于 M3 磁悬浮车辆悬浮结构
与解耦设计研究

黄中荣, 奚华峰

(南车南京浦镇车辆有限公司 技术中心, 江苏 南京 210031)



作者简介: 黄中荣 (1963-), 男, 高级工程师, 从事电力机车总体线路设计和城轨车辆电气研发工作。

摘 要: 主要分析 M3 走行部方案中的解耦设计, 借鉴日本的 HSST 系列列车走行部的原理和结构解耦设计的经验, 提出改进方案, 并设计出一种完全解耦、结构简单、便于控制的悬浮架走行机构。

关键词: 磁悬浮; 走行机构; 解耦; 改进方案; H 型悬浮架

中图分类号: U292.91*7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)04-0044-05

Research on M3 Meglev Suspension Structure and Decoupling Design

HUANG Zhong-rong, XI Hua-feng

(Technology Center, CSR Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China)

Abstract: The decoupling design of M3 running mechanism was analyzed. By learning from HSST series train in Japan, improvement measures and running mechanism designs were presented with completely decoupled, simple-structured and convenient-controlled maglev bogie.

Key words: maglev suspension; running mechanism; decoupling; improvement scheme; H-type suspension bogie

0 引言

目前, 国内外对节能环保便捷的城市磁悬浮交通技术研究非常热门。其中具有小型轻量、运营灵活、经济节能、综合成本低等优点的中低速轻型单悬浮架永磁悬浮车辆是未来新型快捷的城市交通工具。为提高功率因数和效率, 降低建造成本, 实现城市磁悬浮交通, 美国磁动力公司开发了中低速直线同步驱动永磁悬浮与导向的单悬浮架车辆系统。该系统可由 2 辆编成, 也可由多节编组形成。

M3 系统由于目前没有建立 1:1 的试验车和试验线, 工程化技术还有待突破, 特别是设计一种结构简单、便于控制、完全解耦的悬浮架走行机构尤为关键, 以达到 M3 悬浮车辆通过小曲线的目标。

本文首先分析 M3 原理方案中走行机构解耦方案、牵引装置方案, 借鉴日本的 HSST 系列列车走行部的结构和解耦设计的经验, 应用轮轨转向架的成熟技术, 设计一种结构简单、完全解耦悬浮架走行机构。

1 M3 原理方案中的解耦设计分析

M3 磁悬浮车辆示意图如图 1。

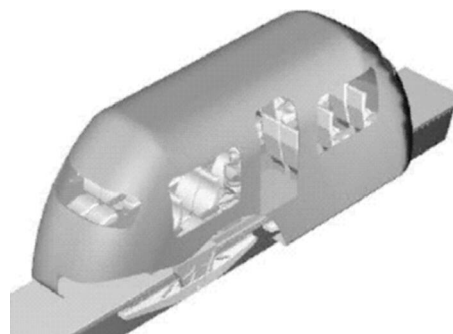


图 1 车辆概念示意图

M3 交通在设计思路采用单节小车灵活编组、高频率发车、中小运量形式, 采用单悬浮架车辆, 车辆长度 10 m 左右, 电磁铁长度 3 m, 要求通过最小 R25 m 的水平曲线(在 M3 车辆项目书中给出了通过最小 R18.3 m 曲线), 竖曲线为 1 000 m, 这与其他磁悬浮列车有很大的区别。因此车辆曲线通过的运动学关系和解耦并不简单。

美国磁动力公司 M3 车辆方案的走行机构原理是: 采用垂向转轴和横向转轴的结构来实现悬浮电磁铁水平横向转动和垂向上下转动, 满足线路水平曲线和竖曲线的解耦要求; 在结构设计和在悬挂中采用了大量的减振器来增加阻尼, 提高系统控制的稳定性。这

收稿日期: 2012-05-29

在原理上是可行的,但在M3车辆方案的工程化方面,还存在一些需要解决的问题。M3车辆在过曲线时,左、右电磁铁间距随曲线半径变小,走行机构左、右电磁铁间需要解耦;同时车体与走行机构间采用斜向安装减振器传递牵引力、制动力不可靠,需要一套专用牵引装置。以下就这些问题分别进行分析。

1.1 M3原理方案中的走行机构解耦分析

美国磁动力公司提出的M3走行机构的原理设计如图2所示。由1个矩形构架4端点的垂直转轴来支持4个电磁铁悬浮臂单元,每个电磁铁通过横向转轴与各自悬浮臂连接。

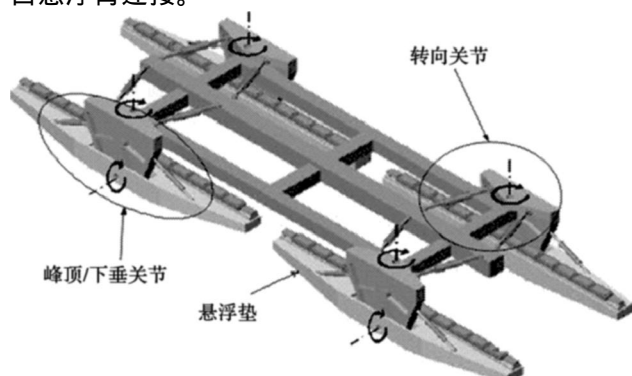


图2 M3走行机构原理设计

在图2的M3走行机构原理设计中,左右悬浮臂上的电磁铁可以绕垂向转向关节作水平横向转动,能很好地适应线路水平曲线,同时左、右侧悬浮磁铁阵列可以绕横向轴峰顶/下垂关节作垂向上下转动,能很好地适应线路竖曲线和缓坡的扭曲。通过在悬浮磁铁阵列与悬浮臂之间设计一对相应的减振器,增加其垂向转动的阻尼;通过在悬浮臂与构架之间设计一对水平的减振器,提高其水平转动的阻尼,实现系统运行的稳定性。

但是,M3单悬浮车辆通过曲线时,由于其走行机构的前后左右4个悬浮臂的垂向转轴固定在构架一个平面的4个端点上(如图2),前后左右电磁铁阵列的位置和间距会随曲线大小变化(如图3);当曲线半径很小时,左、右侧悬浮电磁铁的间距 h 显然会比直线上小得多,或者说,由左、右侧悬浮电磁铁位置决定的所谓“轨距” h 将比直线段显著减小。要么在曲线线路上采用按一定规律变窄的轨距;要么保持直线、曲线轨距不变,但要改进车辆走行机构的设计。要实现车辆顺利通过曲线,前后左右电磁铁的走行机构就必需完全解耦,以实现电磁铁阵列较好地贴合线路,或其间距会随曲线自适应变化。以下分析左、右电磁铁间距 h 随曲线变化规律。

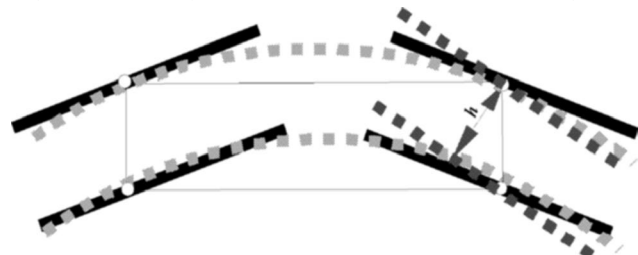


图3 M3车辆曲线通过时电磁铁与轨道的位置关系

1.2 M3车辆通过小曲线时左、右电磁铁间距

在图3中左、右侧电磁铁的间距为 $h:h=l \cdot \cos\alpha$,式中 l 为名义轨距(即平直道时左、右侧电磁铁的间距,取值为1700mm), α 为曲线弯道时偏角,该角度也可按悬浮车辆前、后电磁铁转动点距离之半再除以曲线中心线的半径: $\alpha \approx (2/R) \cdot (180/\pi)^\circ$,M3前后转动点距离为4m,当 $R=18.3$ m时即为 6.26° 。据此可得出不同曲线上左、右侧间距相对名义尺寸的缩减量,见表1。图4直观显示了曲线上左、右电磁铁间距缩减量随曲线半径的变化规律。

表1 不同曲线左、右侧间距缩减量

R/m	18.3	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
Δh /mm	10.14	8.49	5.44	3.78	2.77	2.12	1.68	1.36	1.12	0.94	0.80	0.69	0.60

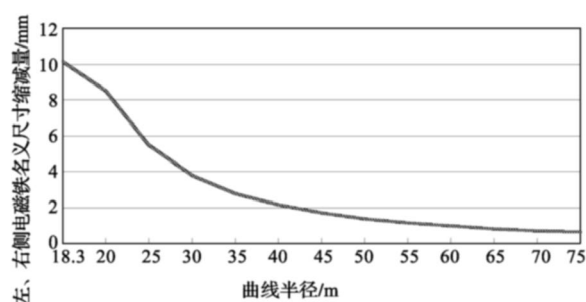


图4 曲线上左、右电磁铁横向间距相对名义尺寸的缩减量

1.3 车体与悬浮架的传力与解耦分析

M3车辆原理方案设计中,走行机构与车体连接的原理方案和悬浮关系如图5所示。由于M3车辆的车厢采用了大空气簧垂向支承,并辅助设置4个斜向安装的减振器,这一设计可以实现走行机构和车体间的相对运动,达到解耦和实现平稳性的目的。

但是,牵引装置既是传统车辆的重要部件,也是磁悬浮车辆的重要部件,承担传递走行机构和车体间牵引力、制动力等较大纵向力的功能,同时又不能约束走行机构和车体间除纵向之外的其他方向的相对运动。通过4个斜向安装的减振器来传递牵引力、制动力是不合适的,也不安全、不可靠,易造成减振器故障失效,需要增设牵引装置这种传递纵向力的重要部件。

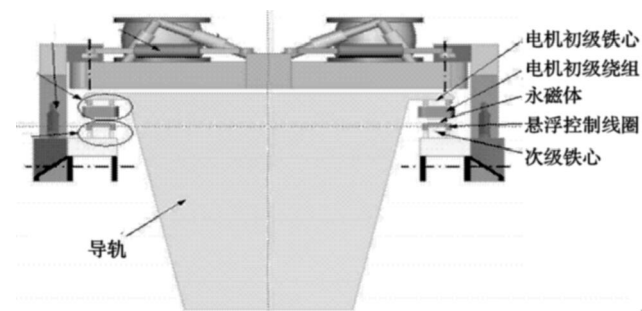


图5 M3悬浮架—车体连接原理方案和悬浮关系

2 HSST系列磁悬浮列车的解耦设计

针对M3方案工程化问题,在此借鉴日本的HSST系列列车的结构和解耦设计的经验。

HSST系列中低速磁悬浮列车主要用于城市交通,因此要求走行机构通过的最小水平曲线半径为50 m库线,正线最小水平曲线半径为70 m,竖曲线为1 500 m。日本HSST型式的列车投入示范运用接近10年,上海磁浮公司、南车株洲电力机车有限公司和北控集团、韩国Rotom公司相继以该列车为基本形式研制了各自的中低速磁悬浮列车。这些应用和研究表明,HSST系列中低速磁悬浮列车走行部结构解耦设计是比较成功的。

2.1 HSST系列磁悬浮列车走行部结构与解耦设计特点

HSST系列中低速磁悬浮列车每节车厢下有5对悬浮电磁铁,该部件同时承担了悬浮与导向功能,5对电磁铁分别安装在5个模块上。如图6所示为车厢下的一个模块及相邻模块。其解耦设计特点体现在以下几个方面:

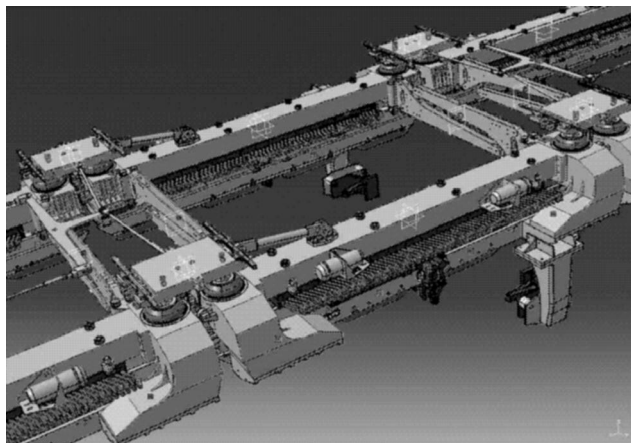


图6 HSST 走行机构及电磁铁

在滑台上安装线性轴承,利用线性轴承的滑动解除车厢与走行机构之间的横向相对运动。车体与端部滑台之间的横向相对滑动量很大,在50 m半径的曲线上达到单侧约300 mm^[1],这也制约了车体横向宽度的设计范围。

由于滑动轴承不能提供复原力,因此又增设了一套迫导向机构,如图7所示。各模块4个端点的滑台能在保持平行的情况下自行转向,即通过滑台和迫导向机构,各模块保持平行的自行转向,满足中低速小曲线通过的横向解耦和左右间距的自适应调整。这套迫导向机构运行证明其设计是很成功的,但结构设计很复杂。

滑台除横向外的其他运动与车体相同,靠轴承传递车体与走行机构的纵向力,因此在滑台与模块之间又增设了牵引杆来实现车体与模块之间的垂向相对运动;每节车厢通过20个小空气弹簧支承滑台,可以缓解轨道不平顺和负载不均的垂向振动。但空气弹簧均匀承载以实现悬浮力的均匀分布,对制造和组装工艺都提出了较高要求。

在超高缓和竖曲线上,模块的左、右侧不能绕横向轴相对转动,其适应线路扭曲的能力与电磁铁长

度有关,而国内在该型车的设计中电磁铁采用了弹性连接,但弹性支承件扭曲的能力满足不了线路扭曲的要求,也产生了一些问题,有待验证优化。

悬浮设计没有冗余,一旦个别悬浮控制点失效,整列车将不能正常悬浮,因此,设计了支承轮结构和救援装置。

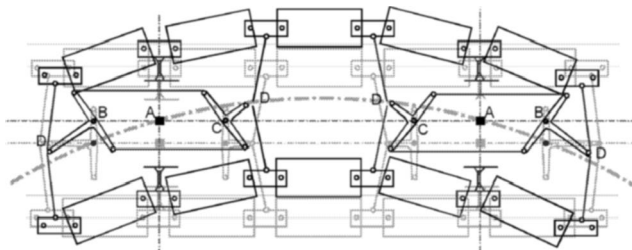


图7 弯道上各滑台保持平行模块成菱形

2.2 HSST 磁悬浮列车左、右侧结构解耦连接设计

在中低速磁悬浮列车走行机构设计中,模块的左、右侧应允许产生形成平行四边形的相对运动,因此左右电磁铁要求相对运动,但相对运动的大小由滑台决定。

左、右侧结构采用了独立部件,再由连接杆件组合起来,一个左、右侧悬浮模块组装后的走行机构如图8所示。

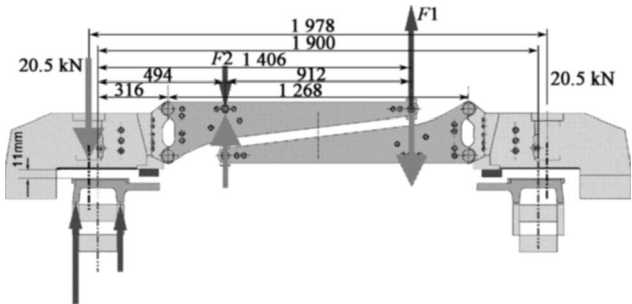


图8 HSST 左、右侧悬浮模块及其连接

图8中两侧模块允许横向变宽或变窄的相对运动,如果不考虑吊杆弹性的话,两侧的模块就不允许有相对横向轴转动的自由度,如果考虑吊杆中设置有一定的弹性元件,则允许在弹性范围内的两侧有一定的绕横向轴转动能力。但是分析HSST的结构表明,吊杆中没有弹性元件,尽管在国内中低速磁悬浮列车走行机构中设置了吊杆弹性元件,它所带来的问题是当整车落下时由于空气簧与支承不在同一条纵向线上,会使模块产生向轨道外侧的翻转,直线电机存在与轨道感应板发生接触隐患,但这独特的解耦结构设计非常经典巧妙。

3 基于M3原理车辆走行部的悬浮结构改进设计

基于M3车辆方案的特点和问题,借鉴轮轨铁路转向架和HSST列车走行部的成熟经验,对M3车辆方案走行部的悬浮结构进行改进设计。详细的零部件结构尺寸、圆簧参数和减振器阻尼参数在后续项目工程化时进行设计和运动学分析再确定。

3.1 走行部的前后悬浮单元解耦改进设计

在M3车辆转弯原理的视频中,显示了模型车辆在弯道上可灵活转弯,如图9所示。但M3原理车的设计与该模型车完全不同,模型车的车体架在2个悬浮块上,这2个悬浮块位于线路径向位置,车体2个支点相当于悬浮块的固定转动点(参见后图12)。

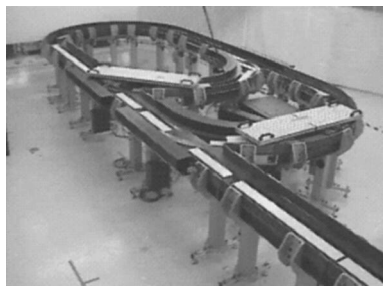


图9 M3转弯演示模型车及转弯时电磁铁、轨道、车体的位置

由于M3车辆方案通过曲线时的关系位置见图3所示,其原理与图9不同,当曲线半径很小时,左、右侧悬浮磁铁阵列的间距 h 显然会比直线上小得多。图3 M3车辆方案中的框架结构,约束了M3车辆过曲线时形成梯形和轨距的变化。在走行部结构改进设计时取消框架结构,根据M3车辆转弯原理的视频中的模型车辆,分成2个悬浮架单元支持车体,形成2个类似轮对式H型悬浮架走行机构,车体与悬浮块的固定转动点设在2个悬浮架单元位于线路径向位置。如图10所示。

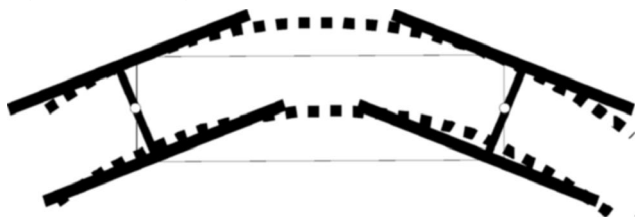


图10 按图9原理改进的车辆设计方案

同时,借鉴轮轨铁路转向架设计经验,引入轮轨转向架摇枕结构连接左右悬浮电磁铁,在摇枕的中心位置上设置中心销牵引结构,使之具有图10的结构形式,形成2个类似轮对式H型悬浮架走行机构(见图11),实

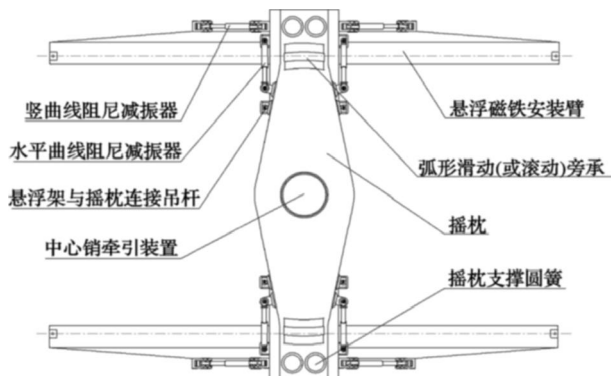


图11 轮对式H型悬浮架走行机构结构图

现前后悬浮单元完全解耦。解除小曲线通过时梯形的摆动约束,能够体现模型车辆通过曲线的原理。

但是,考虑一定宽度的车体底架在其中心线上仅存在2个支承点,这又会使底架的支承变得不稳定,在车辆走行机构进行改进设计中,借鉴HSST磁悬浮列车走行部结构解耦的线性轴承和轮轨转向架摇枕上摩擦旁承的经验,在悬浮架对应轨道中心上设置以弧形滑动(或滚动)旁承的方式承接车体,同时实现悬浮架与车体之间能绕悬浮架牵引销作水平转动。图12为走行部结构与车体联接图。解决构架稳定支承和过弯道时相对运动的问题,是否需在悬浮架和弧形滑动(或滚动)旁承之间增加弹性支撑元件,在具体后续设计和运动学分析后决定。

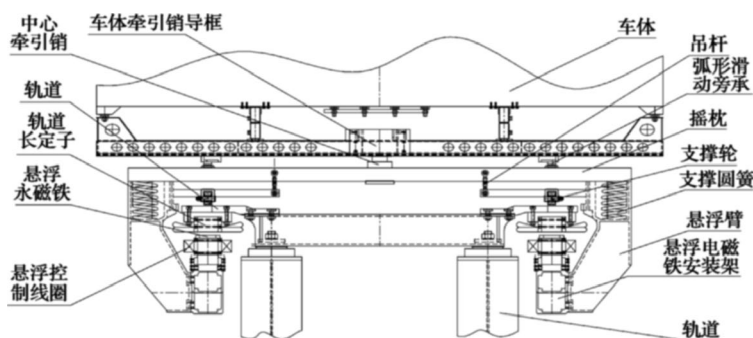


图12 走行部结构与车体连接示意图

3.2 走行部的左、右侧悬浮结构解耦改进设计

借鉴HSST左、右侧悬浮结构的设计经验,将左、右侧悬浮结构设计成独立部件,通过吊杆与摇枕连接,并在两侧悬浮臂的空腔内设置圆形钢簧(或橡胶弹簧)支撑摇枕两端,如图11、图12所示。车辆曲线通过时和在梯形动态形成过程中,通过圆形钢簧(或橡胶弹簧)位移,来实现左、右侧悬浮结构在轴向动态自适应调节。由此实现左、右侧悬浮结构完全解耦的目的。

同时车体减振系统,取消了图5中大空气弹簧垂向支承车体的结构,改用在悬浮臂的空腔内设置圆形钢簧(或橡胶弹簧)来支撑摇枕的结构。这样既解决了M3小型车辆需为空气弹簧专门配备风源系统的问题,又节约走行部悬浮结构与车体的连接空间,降低车辆高度,提高车辆运行的稳定性,减少车辆系统的工程造价。

4.3 车体与悬浮架的传力与解耦的改进设计

前文分析M3车辆原理方案设计中采用斜向安装的减振器来传递牵引力、制动力是不安全的和不可靠的。因此在车体与悬浮架的传力与解耦的改进设计中,采用机车车辆牵引装置结构——导框+中心销装置,如图13。在H型悬浮架的摇枕中心设置中心牵引销装

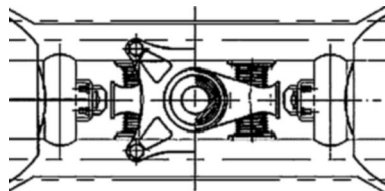


图13 导框+中心销牵引装置

置如图 11 所示,在车体对应牵引销位置安装牵引导框装置如图 12 中所示。实现既传递纵向力又不约束走行机构和车体间其他方向相对运动的目的。

4 结语

M3 原理车方案设计中采用了左、右侧悬浮电磁铁图 2 所示的销接方式,电磁铁可绕垂向轴和水平横向轴转动,进一步实现了各悬浮点的解耦,能很好地适应线路水平曲线、竖曲线和超高的扭曲,较均匀地贴合线路。但由于 M3 车辆采用了 4 个支点固定在构架上一个平面的方式,不能实现在小曲线上左、右侧电磁铁间的垂直距离(轨距)的变化。

在借鉴 HSST 方案和轮轨铁路转向架的经验,本文从 3 个方面提出了走行部创新技术方案:通过改进基本结构,取消 M3 车辆方案中的框架结构,引入摇枕结构吊杆连接左右悬浮电磁铁;通过引入弧形线性滑动(或滚动)旁承、中心销牵引装置等新型结构,解除了曲线通过时车厢对走行机构的梯形约束;以悬浮臂的空腔内圆形钢簧(或橡胶弹簧)支撑摇枕端部

的方式取代空气弹簧搭接方式来承载车厢,减免每辆小车均需配备的一套风源装置,并减少了走行部与车体的连接空间,同时降低了车辆运用维护成本和系统的工程造价。这种改进对于实现未来新型快捷的单悬浮架永磁悬浮城市交通有着重大意义。

参考文献:

- [1] 何灼馥,罗世辉,马卫华. 低速磁浮车动力学建模及平行四边形机构分析[J]. 电力机车与城轨车辆,2009(2).
- [2] 刘少克,常文森. 日本磁悬浮列车 HSST-100 运行试验综述[J]. 机车电传动,1997(6).
- [3] 杨子敬,张 钊,李 杰. CMS-04 型中低速磁悬浮转向架在缓和曲线上的运行状态分析[J]. 机车电传动,2010(6).
- [4] MAGNEMOTION INC (US), Suspending, guiding and propelling vehicles using magnetic forces, US: US2006130699[P].
- [5] R Thornton, T Webber. MagneMotion Maglev System[EB/OL]. (2005-09-08 [2012-05-20]) <http://www.fta.dot.gov/documents/>.
- [7] R Thornton, T Clark, B Perreault. Linear Synchronous Motor Probulsion of Small Transit Vehicles[EB/OL]. (2004-04-06) [2012-05-20] <http://www.fta.dot.gov/documents/>.

(上接第 25 页)

参考文献:

- [1] 米彩盈. 铁道机车车辆结构强度[M]. 成都:西南交通大学出版社,2007:147-148.
- [2] UIC510-5, Technical Approval of Solid Wheels[S]. International Union of Railways,2003.
- [3] BS EN 13979-1-2003, Railway Application-Wheelsets and Bogies-Monobloc Wheels-Technical Approval Procedure-Part1: Forged and Rolled Wheels[S]. European Committee for Standardization,2003.

- [4] 王 军,李永华,张永辉. HX₃B 型大功率机车车轮疲劳强度分析[J]. 科技创新导报,2011(10):113-115.
- [5] 唐道武. 列车车轮疲劳强度安全评定的研究[J]. 机车电传动,2008(5):31-33.
- [6] 尚德广,王德俊. 多轴疲劳强度[M]. 北京:科学出版社,2007:110-111.
- [7] 朱正宇,何国求,陈成澍,张卫华. 多轴非比例加载高周疲劳研究进展[J]. 同济大学学报,2006(9):1222-1223.
- [8] E Charkaluk. Revisiting the Dang Van Criterion[J]. Pricedia Engineering,2009(1):143-149.

动态消息

《机车电传动》编辑部电子邮箱改为 edl@csrzic.com

为适应公司内外网分离的管理需要,《机车电传动》编辑部电子邮箱改为 edl@csrzic.com。2013 年 7 月以后原电子邮箱 edl@teg.cn 仅在公司内部使用,从现在到 2013 年 7 月这段过渡时期这 2 个电子邮箱都可使用。

《机车电传动》编辑部