

文章编号:1006-2106(2015)02-0054-06

中低速磁浮轨道系统特点及工程适应性分析^{*}

蔡文锋^{**} 颜 华 杨 平

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:研究目的:本文以中低速磁浮轨道系统特点为研究对象,研究当前国内外三种典型的中低速磁浮轨道结构形式,介绍各重要组成部件的主要技术特征及设计应注意的问题,并对其工程适应性进行简要分析,从而加深对中低速磁浮轨道系统特点及工作特性的理解和认识,为完善中低速磁浮轨道结构设计提供参考。

研究结论:(1)中低速磁浮轨道系统一般包括轨道设备及其支承结构,并组成断面为“T”形的结构形式,合理的轨道结构形式设计的关键在于良好的处理轨道与轨道梁的相互关系;主动控制的磁轨关系对于轨道系统的设计有决定性影响;磁浮系统稳定性要求轨道设计满足大质量、大阻尼和小变形要求;小间隙悬浮对轨道系统提出了严格的高精度要求;(2)针对实际工程应用:HSST 系统轨道有相对较多的实际应用经验,但无法实现 F 轨的灵活调节;无轨枕直连式轨道经济性较差;整体式道床轨道通过设置道床调整层和上承式扣件系统实现轨道结构的高度整体性和良好的几何形位保持性,符合中低速磁浮交通系统技术要求;(3)本研究成果可为中低速磁浮交通运营线轨道设计提供参考。

关键词:中低速磁浮交通;轨道结构;HSST;磁轨关系;电磁力

中图分类号:U213 **文献标识码:**A

Analysis of the Characteristics and Engineering Adaptability of Track System for Medium and Low Speed Maglev Transit

CAI Wen-feng, YAN Hua, YANG Ping

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract; Research purposes: In this paper, by taking the particularities on medium and low speed maglev traffic as the research object, the author advanced the research of three typical structure forms in current domestic and international of medium and low speed maglev traffic industry, introduced the technical features, the important components and the key points concerning the design and have a brief analysis of engineering adaptability on this basis. In order to provide a reference to improve the track structure design in medium and low speed maglev transit, further analyzing and realizing the system features and working characteristics of track system for medium and low speed maglev transit.

Research conclusions: (1) Generally, track system of the low speed maglev transit system includes rail equipment and its supporting structure, and composition of the section in structure of "T" shape, the key point for reasonable form of track structure design is a good deal with the relationship between rail and rail beam; active control of magnet/rail relationship have a decisive influence to the design of the track system; maglev system's stability require big quality, large damping and small deformation; small clearance suspended on the track system raised strictly and precisely requirement. (2) For the actual engineering application: the track of HSST system has more practical application experience, but was unable to realize the flexible adjustment of F rail; the bad economy of non-sleeper direct track

^{*} 收稿日期:2014-04-11

^{**} 作者简介:蔡文锋,1984 年出生,男,工程师。

connection; monolithic ballast track realized the highly structure integrity and good geometry properties by setting the new adjustment layers and deck type fastener system, all of above meet the requirements of the technology in low speed maglev traffic system. (3) The research results can provide references for the track design of the medium and low speed maglev traffic operating lines.

Key words: medium and low speed maglev transit; track structure; High Speed Surface Transport (HSST); magnet/rail relationship; electromagnetic force

1 概述

中低速磁浮交通采用常导电磁悬浮技术实现悬浮导向,通过直线感应电机实现牵引和电制动,最高运行速度 120 km/h^[1],是一种新型的城市轨道交通系统。中低速磁浮交通技术近十年来发展迅速,日本、韩国已相继成功进入商业运行阶段,我国也已开始启动了多条中低速磁浮示范运营线的建设^[2-3]。

对中低速磁浮轨道的研究往往将其与下部支承桥梁合并简化成简支梁考虑,而忽略 F 轨、轨枕和扣件等具体、关键轨道系统构件对磁浮车辆的影响,目前国内外对中低速磁浮轨道系统工作机理、计算理论、结构设计和优化方法的研究还比较欠缺。针对上述问题,本文以中低速磁浮轨道系统特点作为研究对象,围绕中低速磁浮轨道结构特点、磁轨关系与稳定性、系统精度等方面展开研究,在此基础上进一步研究了当前国内外三种典型的中低速磁浮轨道结构形式,介绍各重要组成部件的主要技术特征及设计应注意的问题,并对其工程适应性进行简要分析。目的是通过这些研究加深对中低速磁浮轨道系统特点及工作特性的理解和认识,为完善中低速磁浮轨道结构设计提供参考,从而促进中低速磁浮交通的推广和应用。

2 中低速磁浮轨道系统的特点

中低速磁浮轨道作为支承和引导列车运行的固定结构,除具有承受和传递列车重力、导向力、牵引力和制动力的功能外,还应与车上安装的电磁铁、直线感应电机和传感器构成电磁回路,实现悬浮、导向以及牵引、制动及悬浮间隙测量的功能。从设计概念上讲,中低速磁浮轨道与传统铁路轨道结构有本质的差别。

2.1 主要结构特点

中低速磁浮交通采用电磁悬浮 EMS 技术,其悬浮特征决定了车辆环抱轨道运行,轨道结构与下部承轨结构共同组成整体横断面为“T”形的结构形式;这种结构体系在构造上保证了不会发生脱轨、翻车等事故,安全性较好,但对于轨道及承轨结构体系的制造安装精度及变形控制要求很高。因此,合理的轨道结构形式设计的关键是良好的处理轨道与轨道梁的相互

关系。

2.2 磁轨关系

中低速磁浮列车与轨道之间的耦合作用由电磁铁与轨道相互作用实现,磁轨关系在本质上确定了磁浮列车的动力特性。主动控制的磁轨关系与轨道、电磁铁的结构和悬浮控制算法密切相关,对轨道系统的设计有决定性影响。

2.2.1 悬浮力

针对中低速磁浮列车电磁力计算问题,国内外学者尝试了不同的建模方法对基于一维、二维分布的电磁力计算开展了一定的研究工作。一般以单电磁铁悬浮控制系统为例进行分析,系统模型如图 1 所示^[4]。

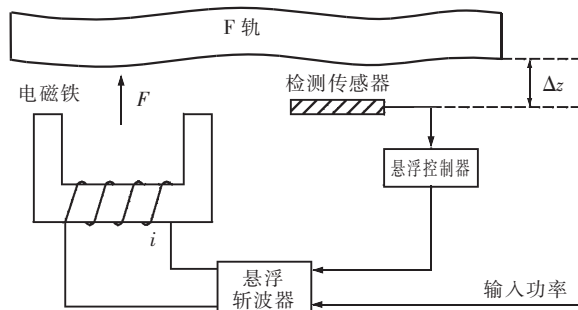


图1 单电磁铁悬浮控制系统模型图

参考文献[4,5],考虑如下假设:电磁铁极面和 F 轨极面面积均为 S 且平行正对,小间隙悬浮,气隙均匀分布,在忽略磁场边端效应的前提下,电磁悬浮力计算公式为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i}{\Delta z} \right)^2 \quad (1)$$

式中 μ_0 ——空气磁导率;

S ——磁极面积;

N ——电磁铁线圈匝数;

i ——电磁铁线圈电流;

Δz —— z 轴方向的悬浮间隙。

由于空气磁导率是一个定值,从式(1)可以看出,悬浮力主要取决于磁极的物理参数、励磁线圈匝数、电流和悬浮间隙;考虑轨道弹性和不平顺,其对悬浮力的根本影响在于轨道干扰引起的悬浮间隙的波动。

2.2.2 牵引力

中低速磁浮列车采用单边型直线感应电机,根据感应电机原理,通过车载的初级电磁线圈与轨道次级感应板的相互作用产生电磁推力。根据参考文献[2],其驱动力、制动力可通过下式确定:

$$F_n = K \cdot A \cdot S_{vs} \cdot B_m^2 \cdot \delta_2 \cdot d_2 \quad (2)$$

式中 A ——直线电机定子、转子的相向面积;

B_m ——定子、转子空隙处最大磁束密度;

S_{vs} ——移动速度;

d_2 ——感应板导体厚度;

δ_2 ——导电率;

K ——与电机形状、感应板表面效果有关的修正系数。

直线感应电机磁场分布复杂,由于其特有的大气隙和边端效应的特性,列车运行时电机气隙的动态变化、沿线轨道感应板的不一致性、感应板的不连续性以及列车速度的不同都会造成电机前后端动态边端效应的变化和电机定转子间耦合力的变化^[6]。

2.3 稳定性

磁浮车辆静悬失稳、钢梁上车轨共振及低速过岔振动剧烈、特定工况下车辆横向摇摆是国内外试验线上曾出现的失稳现象。中低速磁浮列车由于采用常导电磁悬浮方式,其本质上是一个相对不稳定的系统,需要施加主动控制才能使列车稳定悬浮在轨道上,因此也为系统设计包括轨道的设计提出了稳定性方面的要求。

中低速磁浮交通系统是土、机、电、控耦合于一体的大系统,车辆、轨道、控制系统参数匹配不合理以及外部环境影响作用等都有可能引起系统动力失稳,根

据已开展的磁浮车辆-轨道系统稳定性分析研究表明^[7]:在悬浮控制和车辆结构确定条件下,增加轨道(含承轨梁)质量、减小车轨质量比,增大轨道频率,增大轨道阻尼都能使系统更易满足稳定性条件,有利于提高系统稳定性。

2.4 系统精度

中低速磁浮车辆通过控制电磁铁模块与轨道的间隙量来控制列车悬浮、导向的稳定性,由于悬浮间隙平均保持在 8 mm 左右,为保证车辆运行的安全性和舒适性,系统对于轨道的设计、制造及施工都提出了严格的高精度要求。

具体而言,根据悬浮架的技术特征:左右模块相互解耦,因此车辆对轨道的水平和轨距不平顺并不敏感;而由于悬浮间隙传感器灵敏度比较高以及车辆的被动导向方式,轨道在高低和轨向上的不平顺对稳定悬浮有较大影响^[8];同时,悬浮控制系统对于 F 轨接缝错位限值也有着极为严格的要求。

3 三种典型中低速磁浮轨道结构形式

目前比较有代表性的中低速磁浮轨道结构形式主要有三种类型:HSST 系统轨道结构、无轨枕直连式轨道结构和整体式道床轨道结构。

3.1 HSST 系统轨道结构

HSST 系统轨道自上而下主要由感应板、F 轨、轨排接头、钢轨枕、扣件系统、道床(承轨台)等组成,如图 2 所示。其采用了类似于传统铁路轨道的多层组合结构形式,结构比较简单,在当前国内外中低速磁浮试验线及运营线建设中应用较广。

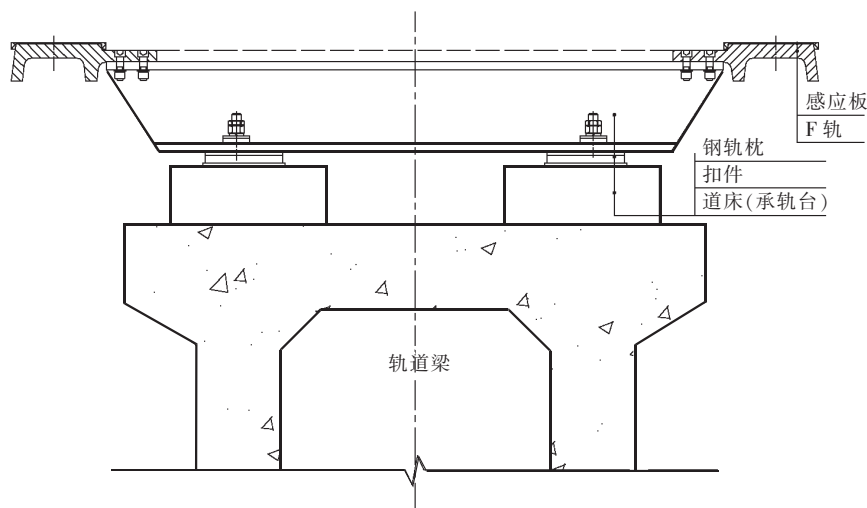


图 2 HSST 系统轨道结构横断面示意图

3.1.1 F 轨

F 轨是承受磁浮车辆悬浮力、导向力及牵引力的

导磁钢轨,是轨道结构最重要的部件。F 轨断面为“F”形钢结构,由内腿、外腿、腹板和翼板组成。其中

与悬浮电磁铁对应的 F 轨内、外腿分别为 F 轨的内磁极和外磁极,磁极下部的两个端面为磁极面,F 轨腹板下表面为悬浮检测面。

为了约束车辆悬浮状态以保证磁浮车辆安全、平稳、舒适运行,F 轨必需尽可能提供连续、平顺、稳定的磁极面,使得 F 轨磁极面与电磁铁磁极面两两对应,形成较为封闭的磁路,具有均匀的悬浮间隙。因此,F 轨设计就是通过选取合理的结构形式以及合适的加工工艺,获得可长期可靠保持高精度功能面的导磁钢轨结构。

F 轨横断面设计通常与电磁铁结构设计同时进行,当电磁铁结构方案确定后,F 轨与电磁铁的几何形状匹配要有利于形成封闭的磁路,减少磁通泄露,尽量提高电磁铁的悬重比。同时,为便于磁路流通、减小温度变化时感应板与 F 轨两者之间的相对变形以及加工制造的方便,一般将直线感应电机次级铁芯与 F 轨腹板合二为一设计。

目前,实际工程设计中主要采用焊接或轧制-机加工成型的 F 轨,在曲线地段采用厂制曲线 F 轨,F 轨单元长度根据下部基础结构及线路平纵断面条件等因素确定。

3.1.2 感应板

感应板作为车辆牵引用直线感应电机次级的组成部分,是非磁性导电材料,安装在 F 轨的腹板上部基面上。其结构、材质、安装及运行时的气隙大小都直接影响到整个系统的技术经济指标。

感应板设计主要考虑车辆牵引系统要求以及与 F 轨之间的复合形式、连接强度和平整度要求。感应板一般采用铝合金板材制造,在坡度较大等需要较大牵引力的区域根据计算可采用铜板或其他导电材料,通过侧面销钉和顶面沉头螺钉来实现与 F 轨的机械连接。

3.1.3 钢轨枕

目前钢轨枕主要有 H 型轨枕和方(矩)形轨枕两种形式。轨枕结构设计主要是检算其截面惯性矩及板厚能否满足使用要求,并优化轨枕截面尺寸。轨枕间距的设置主要受 F 轨悬挑变形及其连接螺栓强度的限制。

3.1.4 扣件系统

与无砟轨道相似,中低速磁浮轨道的弹性基本上取决于扣件系统,轨道精度也要靠扣件来调整 and 保持,科学合理的扣件设计是轨道工程设计时的关键。在 HSST 系统轨道中,扣件设置在轨枕与道床之间,轨排整体调整,扣件需要具有多维调节功能;同时,由于悬浮控制系统对于轨排双向的高频周期性振动作用等受

力特点,扣件结构设计时应予特别重视。目前国内外中低速磁浮轨道扣件根据结构形式和特点可以分为两种:弹性不分开式扣件及分开式扣件,均通过螺栓将轨枕固定。

3.1.5 道床(承轨台)

道床采用支承块式承轨台结构,处于下部轨道梁与轨枕之间;承轨台可根据施工工艺的不同采用预制或梁面二次浇筑结构。

3.1.6 轨排接头

中低速磁浮轨道按有缝线路设计,轨排接头是相邻 F 轨之间的连接装置。根据接头结构及可实现伸缩量的大小主要分为单轨缝结构的 I 型接头、双轨缝结构的 II 型接头以及组合形式的 III 型接头共三种类型。需要注意的是,现有一般轨排接头最大仅能提供不超过 40 mm 的伸缩量,无法适用于大跨桥梁地段;应研究适合于大跨桥上使用的轨道伸缩调节器,提高中低速磁浮交通的系统适应性。

3.2 无轨枕直连式轨道结构

无轨枕直连式轨道直接将轨道功能部件安装在轨道梁的顶部两侧,采用了与德国常导高速磁浮 TR 系统和上海磁浮线一致的轨道功能区设计思路。轨道功能部件主要由感应板、倒 U 型悬浮轨及以预埋或螺栓连接方式直接固定在梁上的固定架结构组成^[9],如图 3 所示。

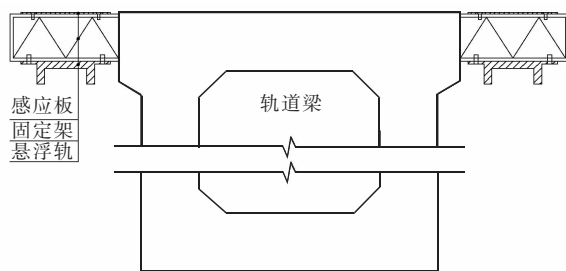


图3 无轨枕直连式轨道结构横断面示意图

3.3 整体式道床轨道结构

整体式道床轨道结构自轨道梁而上主要包括整体式道床板、与铁路无砟轨道相似的双块式钢筋混凝土轨枕、上承式扣件系统、F 轨和感应板,如图 4 所示。

4 轨道结构形式比较及工程适应性分析

参考德国磁浮线路规范对于轨道结构的技术要求,主要从轨道功能需求、结构可靠性、系统动力特性、几何形位保持性及养护维修等方面对三种主要轨道结构形式进行比较分析。

HSST 系统轨道总体上是一个较为“开放”、“松

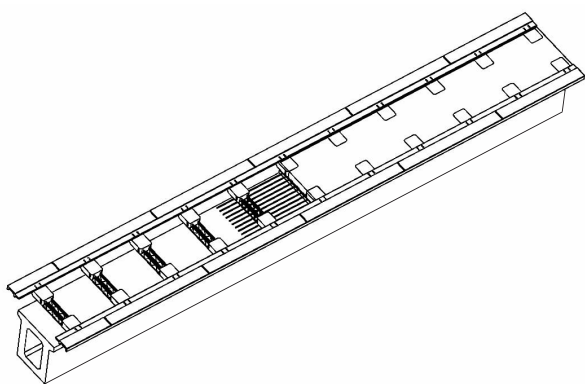


图 4 整体式道床轨道结构组成示意图

散”的结构,可以预防雪、雨的积聚;轨道结构简单、技术成熟,有较多的实际应用经验。但这种结构存在如下几点不足:F 轨、轨枕、承轨台和轨道梁之间多层组合、多处连接,轨道结构整体性较差,不利于保持轨排长期的高精度和高稳定性,轨道整体故障率增加;道床为开放式结构,给线路日常维护以及紧急情况下旅客疏散带来困难;轨枕采用钢结构,车辆电磁铁与 F 轨之间形成的闭合磁路中的部分磁力线会经过钢质轨枕,磁力线被分散,影响车辆悬浮特性;由 F 轨等组成的轨排是一个整体结构,扣件设置在轨枕下部只能以轨排为单位整体调节精度,无法实现针对每个节点处 F 轨面的精细化调节,无论是轨道铺架或者运营维护阶段都存在这样的问题,难以达到中低速磁浮车辆对于轨道系统的高精度要求。

无轨枕直连式轨道结构去掉了钢轨枕,磁力线不会泄露,提高了车辆的悬浮功率和能力,轨道梁上表面可在紧急时刻作为乘客疏散通道,左右两侧独立的轨道功能区便于实现具体节点处的轨道精度调节。但这种结构对于轨道梁的设计、制造及安装要求苛刻,生产工艺复杂,经济性较差。

整体式道床轨道结构主要有以下技术特点:轨道结构在垂向和纵横向都实现了高度整体性,刚度得到加强,改善了结构受力特性,结构稳定性好,整体道床表面简洁、平整,便于线路维护走行和紧急情况下的乘客疏散;通过采用双块式钢筋混凝土轨枕及其埋入式结构,消除了钢枕对磁力线的影响;通过在轨排与梁面之间设置混凝土整体道床作为调整层,大大降低了轨道梁的制造及安装精度要求;上承式扣件系统设置在 F 轨与轨枕之间,可以精确实现每个扣件节点处的空间调整,确保轨道结构的高平顺性;通过采用连续整体道床结构,在轨道梁几何设计受到环抱式限界严格约束的情况下,可有效增加单位长度梁重,提高了轨道梁的一阶固有频率,有助于抑制或减少中低速磁浮车轨

耦合振动的发生。

5 结论

(1) 中低速磁浮轨道在设计概念上与传统铁路轨道结构有本质的差别。其特殊性有以下几方面:轨道系统一般包括轨道设备及其支承结构,并组成断面为“T”形的结构形式,合理的轨道结构形式设计的关键在于良好的处理轨道与轨道梁的相互关系;主动控制的磁轨关系与轨道、电磁铁的结构和悬浮控制算法密切相关,对轨道系统的设计有决定性影响;磁浮系统稳定性要求轨道设计满足大质量、大阻尼和小变形要求;小间隙悬浮对轨道系统提出了严格的高精度要求。

(2) 针对实际工程应用:HSST 系统轨道在当前国内外中低速磁浮交通工程中应用较广,有相对较多的实际应用经验,但该结构无法实现 F 轨的灵活调节;无轨枕直连式轨道对于轨道梁的设计、制造和安装精度要求较高,且经济性较差;整体式道床轨道通过设置道床调整层和上承式扣件系统实现轨道结构的高度整体性和良好的几何形位保持性,是一种符合中低速磁浮交通系统技术要求新型轨道结构形式,建议进一步改进细节设计并加强相关的试验研究,以确保磁浮列车稳定悬浮、平稳运行,满足我国中低速磁浮交通运营线建设需求。

参考文献:

- [1] CJ/T 375—2011, 中低速磁浮交通车辆通用技术条件 [S].
CJ/T 375—2011, General Technical Specification for Medium and Low Speed Maglev Vehicles [S].
- [2] 魏庆朝, 孔永健, 时瑾. 磁浮铁路系统与技术(第二版) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
Wei Qingchao, Kong Yongjian, Shi Jin. System and Technology for Maglev Transit (Second Edition) [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [3] 张佩竹. 我国中低速磁浮交通工程的自主创新技术研究 [J]. 铁道工程学报, 2009(10): 90—94.
Zhang Peizhu. Research on the Technology for the Self-innovation of Low/Medium-speed Maglev Traffic Engineering [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009(10): 90—94.
- [4] 郑文文. 中低速磁悬浮列车电磁悬浮系统分析 [J]. 科技信息, 2010(23): 576—577.
Zheng Wenwen. Research on Electromagnetic Suspension System of Mid-low Speed Maglev Vehicles [J]. Science & Technology Information, 2010(23): 576—577.
- [5] Brezina W, Langerhole J. Lift and Side Forces on

- Rectangular Pole Pieces in Two Dimensions [J].
Journal of Applied Physics, 1974(4):1869-1872.
- [6] 郑琼林,赵佳,樊嘉峰. 直线电机轮轨交通牵引传动系统 [M]. 北京:中国科学技术出版社,2010.
Zheng Qionglin, Zhao Jia, Fan Jiafeng. Traction and Drive System for Linear Motor Rail Transit [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [7] 谢云德,常文森,尹力明. 磁悬浮列车系统轨道动力学分析与试验研究[J]. 国防科技大学学报,1997(5):58-63.
Xie Yunde, Chang Wensen, Yin Liming. Dynamics Analysis and Test Research of Track of Electromagnetic Suspension Vehicle System [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1997(5):58-63.
- [8] 张耿,李杰,杨子敬. 低速磁浮轨道不平顺功率谱研究 [J]. 铁道学报,2011(10):73-78.
Zhang Geng, Li Jie, Yang Zijing. Estimation of Power Spectrum Density Track Irregularities of Low-speed Maglev Railway Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2011(10):73-78.
- [9] 连级三. 中低速磁浮列车轨道:中国, CN 2869102Y [P]. 2007-02-14.
Lian Jisan. Medium and Low Speed Maglev Rail: China, CN2869102Y [P]. 2007-02-14.
- (编辑 赵立兰)

~~~~~  
(上接第4页 From P.4)

## 参考文献:

- [1] 赵海宽. 基于运力资源优化配置和运输组织创新的铁路编组站合理布局[J]. 铁道运输与经济, 2009(12):4-7.  
Zhao Haikuan. Discussion on Reasonable Layout of Railway Marshalling Stations Based on Transport-capacity Resource Allocation Optimization and Transport Organization Innovation [J]. Railway Transport and Economy, 2009(12):4-7.
- [2] 邱健,周路时. 以现代物流理念提升铁路货运站功能 [J]. 铁道工程学报, 2006(7):91-95.  
Qiu Jian, Zhou Lushi. Improvement of Railway Freight Station Function by Means of Concept of Modern Materials Circulation [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2006(7):91-95.
- [3] 徐利民,侯敬. 铁路大型装车点发展与货运物流化研究 [J]. 铁路运输与经济, 2011(5):42-46.  
Xu Limin, Hou Jing. Study on Development of Railway Large Loading Points and Freight [J]. Railway Transport and Economy, 2011(5):42-46.
- [4] 吴汪友,朱如瑾. 关于铁路货运场站建设的研究[J]. 铁道采购与物流, 2007(1):31-32.  
Wu Wangyou, Zhu Rujin. Study on the Construction of the Railway Cargo Station [J]. Railway Purchase and Logistics, 2007(1):31-32.
- [5] 丁红,张诚. 铁路货运向第三方物流转型的可行性分析 [J]. 铁道运输与经济, 2009(1):78-80.  
Ding Hong, Zhang Cheng. Feasibility Study on Transforming Railway Freight to the Third Party Logistics [J]. Railway Transport and Economy, 2009(1):78-80.
- [6] 韩伯领,陈娅娜,周茵,等. 铁路综合物流基地布局研究 [J]. 铁道运输与经济, 2008(10):73-76.  
Han Boling, Chen Yana, Zhou Yin, etc. Study on the Layout of Railway Comprehensive Logistics Parks [J]. Railway Transport and Economy, 2008(10):73-76.
- [7] 王德占,韩伯领,何世伟. 促进铁路现代物流业发展的策略分析[J]. 铁道货运, 2006(12):1-3.  
Wang Dezhan, Han Boling, He Shiwei. Strategic Analysis on Promoting Development of Railway Modern Logistics Industry [J]. Railway Freight Transport, 2006(12):1-3.
- [8] 王德占,何世伟. 铁路物流园区相关特性的研究[J]. 铁道运输与经济, 2007(9):58-60.  
Wang Dezhan, He Shiwei. Study on the Characteristics of Railway Logistics Park [J]. Railway Transport and Economy, 2007(9):58-60.
- [9] 王德占,王耀球. 加快铁路“白货”物流经营的研究[J]. 中国铁路, 2008(7):54-57.  
Wang Dezhan, Wang Yaoqiu. Study on Ways to Develop Railway Logistics Management of Goods Excluding Coa [J]. Chinese Railways, 2008(7):54-57.
- [10] 郑芳. 铁路货物运输融入现代物流的探讨[J]. 铁道运输与经济, 2006(10):83-85.  
Zheng Fang. Discussion on Integrating Railway Freight Transportation into Modern Logistics [J]. Railway Transport and Economy, 2006(10):83-85.
- [11] 张诚. 国外铁路发展现代物流的典型举措与启示[J]. 铁道运输与经济, 2006(10):62-65.  
Zhang Cheng. Typical Measures on Developing Railway Modern Logistics in Foreign Countries and Revelations [J]. Railway Transport and Economy, 2006(10):62-65.
- (编辑 曹淑荣)