

# 低速磁浮轨道几何参数测量系统\*

周文武, 吴峻, 李中秀, 张兴华

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**轨道几何状态是影响低速磁浮列车运行安全性和舒适性的重要指标,因此,必须定期测量轨道几何参数,并根据测量结果开展轨道维护,使轨道状态保持良好。利用 FMS01 完成了唐山 1.5km 低速磁浮轨道线路几何参数测量,结果表明,以水准仪的精密测量高低结果为参考,FMS01 的高低测量最大误差不超过  $\pm 0.7\text{mm}$ ;以多次测量的平均值为参考,各参数测量的最大误差不超过  $\pm 0.2\text{mm}$ 。

**关键词:**F 轨;轨道几何参数;惯性基准法;低速磁浮列车

**中图分类号:**TP274.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)04-0051-05

## A track geometry measurement system for low speed maglev

ZHOU Wenwu, WU Jun, LI Zhongxiu, ZHANG Xinghua

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:**The quality of F track has a critical influence on the safety and comfort of low speed maglev transportation. Therefore, track geometry must be measured termly. And Appropriate maintenance of F track will be carried out according as the measurement results to keep track all right. In order to maintain maglev guideway efficiently, FMS01 is a F track geometry measurement system made by National Univ. of Defense Technology and the first one in China, and it can be operated to measure track geometry fast and accurately, including vertical deviation, lateral deviation, track gauge and level difference when maglev train travel at 20-100km/h. Vertical and lateral deviation can be measured based on inertial principle. The measurements of the 1.5km long line in Tangshan was carried out using FMS01. The experimental results show that maximum error of vertical deviation is less than  $\pm 0.7\text{mm}$  in reference to fine measurement using level gauge and maximum error of track geometries is less than  $\pm 0.2\text{mm}$  in reference to the average of measurements using FMS01.

**Keywords:**F track; track geometry; inertial principle; low speed maglev train

低速磁浮列车的发展已经有三十多年的历史<sup>[1]</sup>,2005年3月6日,日本爱知世博会上投入运营的TKL线标志着低速磁浮列车已经进入商业运营阶段<sup>[2]</sup>。以国防科技大学为代表的我国磁悬浮列车技术在近30年的研究中,取得了进展,目前应用该技术的北京S1线已进入开工建设阶段。

低速磁浮列车作为零高度飞行器,它的稳定悬浮及运行与F型轨道(以下简称“F轨”)的状态是否正常有着紧密的联系。而且轨道质量状态严重影响低速磁浮列车运行的安全性和舒适性,适当的轨道维护是保持良好轨道状态的手段之一,而轨道维护的基础是轨道几何参数测量。铁路轨道几何参数检测已开展数年,对轨道几何参数检测技术行了深入研究,目前,国内外的轨检车已经发展到第五代。但是现有铁路轨道检测技术很难直接用于磁浮列车系统。一方面由于磁浮列车的轨道和铁路的轨道在这车-轨系统中有很多

的不同,主要是磁浮列车与轨道不接触,列车通过电磁力与轨道作用,通过间隙传感器来反映列车与轨道垂向位置关系;这就导致磁浮列车对轨道要求与轮轨有很多不同;因此,测量系统的结构、传感器布置以及数据融合等均有不同。因而,有必要研究F轨几何参数测量技术,并研制F轨几何参数测量系统。国防科技大学从2009年开始研究F轨几何参数测量技术,取得了一系列研究进展<sup>[3-5]</sup>。为了实现对轨道线路快速准确的测量,研制成功了国内第一台F轨几何参数测量系统(以下简称“FMS01”),它可以直接搭载在运营磁浮车上运行,对轨道的几何参数实施快速动态的测量;也可以与一辆独立的车辆及相应的数据处理设备组合,形成一辆磁浮轨道检测车。

### 1 F轨的基本形式及其主要几何参数

低速磁浮轨道主要包括水泥梁和轨排两部分,其中两根F型钢轨通过工字形轨枕连接组成

\* 收稿日期:2012-12-16

基金项目:北京市科技计划项目(BKW20111006030103)

作者简介:周文武(1975—),男,四川蓬溪人,讲师,博士生,E-mail:z2wenwu@163.com

轨排。另外值得注意的是, F 轨外端面与轨道平面不是垂直的, 而是成一个锐角, 定义为外端边沿角  $\alpha$ , 它影响轨道部分参数测量。列车运行稳定性与轨道几何参数相关, 它们包括高低、轨向、轨距和水平<sup>[6-7]</sup>, 如图 1 所示。高低是指左右 F 轨分别沿纵向的垂向偏差, 有左高低和右高低之分。轨向是指左右 F 轨分别沿轨道纵向的横向偏差, 也有左轨向和右轨向之分。高低轨向是描述单股轨在空间分布上的表现出的变化, 也可统称为不平顺。轨距指轨道断面左右轨两磁极间中心点的距离, 用于描述左右两轨横向相对位置关系。水平指轨道断面左右两轨的高差, 用于描述左右两轨垂向的相对位置关系的偏差。

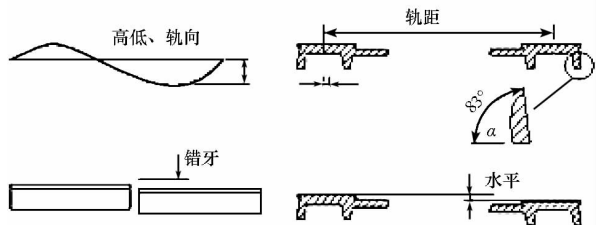


图 1 轨道几何参数示意图  
Fig. 1 Track alignment errors

## 2 F 轨几何参数测量系统

### 2.1 FMS01 的结构及传感器

转向架是磁浮列车车辆走行机构的最小单元, 由左右侧的两个悬浮模块和四片防滚梁组成, 两个悬浮模块通过防滚梁连接成一个转向架, 在车辆运行过程中, 左右悬浮模块相互解耦, 也不会出现单侧模块横滚。FMS01 是无独立的走行部件, 搭载在磁浮列车转向架上运行的装备系统。为了实现良好的搭载, 设计时充分考虑了转向架的自由度以及运动特点, 设计了图 2 所示的刚性测量架, 它由横梁、托臂、解耦机构以及支座构成。横梁和托臂组成一个刚性构件, 用于安装传感器; 支座是通过螺栓与转向架的托臂连接, 支撑整个测量系统; 解耦机构实现测量架与转向架之间的解耦。当转向架两侧模块发生相对运动时, 测量架中安装传感器的托臂和横梁组成的刚性构件不会出现扭曲等变形, 始终保持所有传感器处在同一个坐标下。这样, 实现不同传感器的结果无需坐标变换等中间环节可实现数据融合, 减少不必要的传递误差。图 2 中传感器详情见表 1。

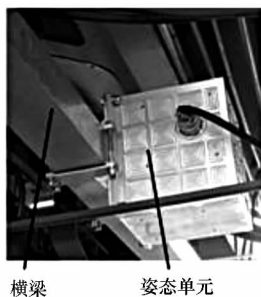
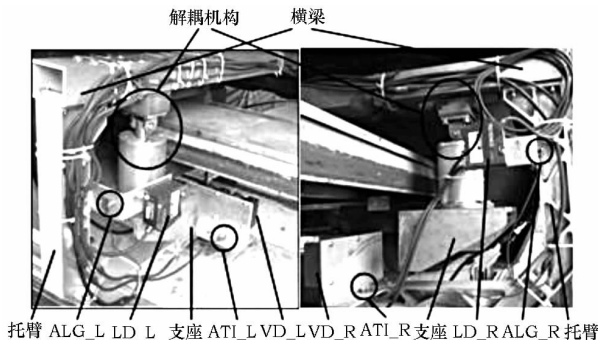


图 2 FMS01 测量系统  
Fig. 2 FMS01 measurement system

表 1 传感器列表  
Tab. 1 List of sensors

名称	类别	信号缩写
左横向位移计	激光位移计	LD_L
右横向位移计	激光位移计	LD_R
左横向加速计	加速计	ALG_L
右横向加速计	加速计	ALG_R
左垂向加速计	加速计	ATI_L
右垂向加速计	加速计	ATI_R
左垂向位移计	激光位移计	VD_L
右垂向位移计	激光位移计	VD_R
滚动倾角传感器	倾角传感器	INCL_X
俯仰倾角传感器	倾角传感器	INCL_Y
摇头速率陀螺	光纤陀螺	GYR_Z
俯仰速率陀螺	光纤陀螺	GYR_Y
滚动速率陀螺	光纤陀螺	GYR_X

### 2.2 FMS01 中各轨道参数的测量方法

如图 3 所示, FMS01 采用模拟 - 数字混合处理的体系, 作为搭载设备, 与运营车辆的关联越少越好, 采用独立的电池供电, 独立的数据采集记录系统; 模拟预处理板主要完成信号调理以及抗混叠滤波; 在 PC 中, 基于 NI 公司的 LabView 实现数字信号的数据融合; 轨枕定位系统为数据采集卡提供间隔 24mm 的采样脉冲; 在空间域中为等间隔采样, 而在时间域中, 由于列车速度不同, 对应的采样率不同, 因此为非均匀采样, 列车速度越快, 对应的采样率越高; 由于抗混叠滤波器为模拟滤波器, 其截止频率固定, 根据香农定理, 为了保

证足够高的采样率,设备正常工作时对列车运行有最低速度要求。

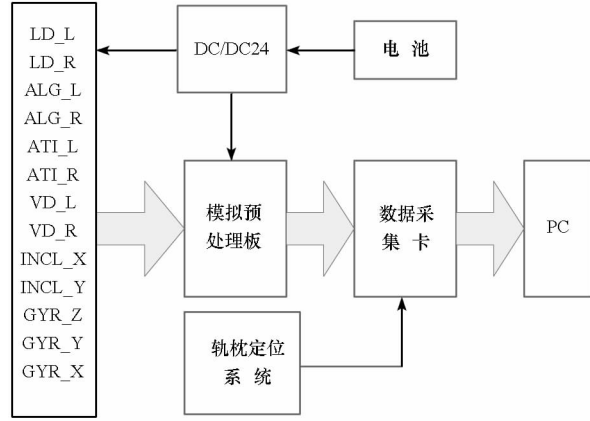


图3 测量系统硬件框图

Fig.3 Hardware structure of FMS01

2.2.1 测量架的姿态角测量方法

姿态角测量的信号处理方法如图4所示,其中,  $H_1(z)$  为高通滤波器,  $L_1(z)$  为低通滤波器。测量架的横滚角  $\theta_c$  利用滚动陀螺 GYR\_X 测量  $\theta_c$  中的高频成分  $\theta_{ch}$  和利用倾角计 INCL\_X 测量  $\theta_c$  中的低频成分(包括静止时测量架的倾角)  $\theta_{cl}$ 。同理,测量架的俯仰角  $\theta_p$  利用倾角计 INCL\_Y 和俯仰陀螺 GYR\_Y 测量分别测量  $\theta_{pL}$  和  $\theta_{pH}$ 。

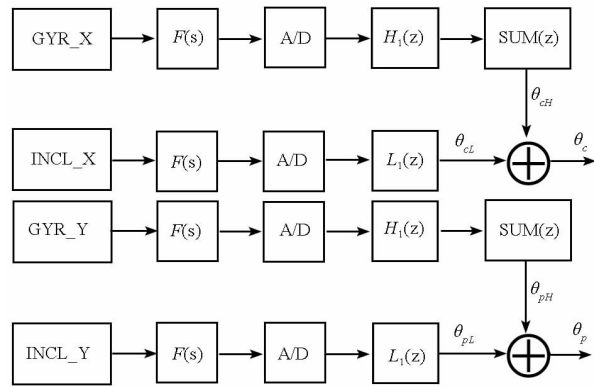


图4 测量架横滚角和俯仰角测量方法

Fig.4 Measuring scheme for rolling and pitching angle of measurement bogie

2.2.2 高低和轨向的测量方法

高低和轨向均采用惯性基准法测量<sup>[8-12]</sup>,其测量原理如图5所示。其中,  $k$ 、 $c$  分别表示测量架与电磁铁间等效的垂向弹簧和阻尼系数;  $\delta$  是电磁铁与轨道间的距离;  $Z_0$  为测量架与基准线间的距离;  $Z_1$  为测量架与轨道间的距离;  $z$  为轨道与基准线间的距离; ATI 为垂向加速度计,其输出为测量架垂向加速度  $a_z$  与重力加速之和。

根据图5所示的位置关系可得

$$z = z_0 - z_1 \quad (1)$$

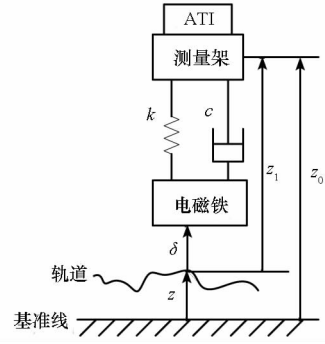


图5 单自由度动态系统

Fig.5 Mono-freedom dynamic system

另外,  $a_z = \frac{d^2 z_0}{dt^2}$ , 因此式(1)可以改写为

$$z = \iint_t a_z d\tau d\tau - z_1 \quad (2)$$

从式(2)可以看出,去掉加速度计中重力分量,二次积分后减去测量架与轨道间距离即可得到轨道相对参考基准线垂向的位置。

根据高低的定义,高低只是  $z$  中影响车辆运行的部分频率分量。如图6所示, FMS01 中仅测量对列车运行有影响的高低分量,令为  $\Delta z$ 。因此,引入高通数字滤波器  $H_2(z)$ ,它不仅滤掉不关心的低频分量,并且可滤掉使得二次数字积分器  $S^2(z)$  不稳定的近零频分量。另外,为了消除测量架姿态对加速度的影响,利用测量架的横滚角  $\theta_c$  和俯仰角  $\theta_p$  修正加速度计输出信号中重力分量。左右两轨的高低测量方法相同,图6所示的 ATI 分别对应加速度计 ATI\_L 和 ATI\_R, VD 分别对应 VD\_L 和 VD\_R。

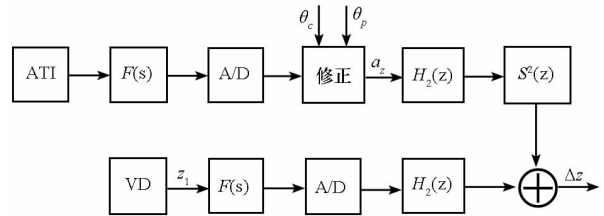


图6 高低测量框图

Fig.6 Measuring scheme for vertical deviation

轨向的测量与高低测量类似,不同之处是由于激光位移计的测量面有一定倾斜,运行中测量架的上下起伏运动会影响横向位移计的输出了。为了克服影响,采用图7所示的方法,利用垂向位移计的变化修正横向位移计的输出了。其中  $z_{10}$  为垂向位移计的初值,  $p = \cot\alpha$ ,  $\alpha$  为外端边沿角。左右轨向的测量方法相同,图7中的 ALG 分别对应加速度计 ALG\_L 和 ALG\_R, LD 分别对应 LD\_L 和 LD\_R。

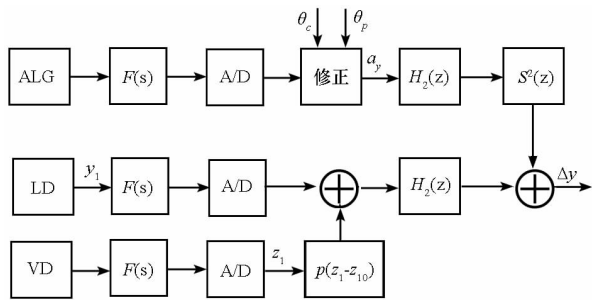


图 7 轨向测量框图

Fig. 7 Measuring scheme for lateral deviation

2.2.3 轨距的测量方法

轨距测量方法如图 8 所示,由于轨道外端面有一定倾斜,运行中测量架的上下起伏运动,导致横向激光位移计测量点发生变化,这样会引入测量误差。为了克服测量架起伏对测量的影响,修正方法与轨向测量中一致,其中  $L_0$  为常数。

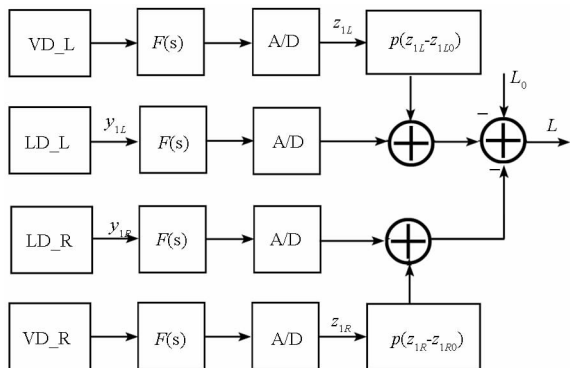


图 8 轨距测量框图

Fig. 8 Measuring scheme for gauge

2.2.4 水平的测量方法

本项主要是为了测量左右两轨之间是否存在异常的水平高差,因此,图 9 所示的方法中引入了高通滤波器  $H_2(z)$  滤掉了低频部分,也就是轨道在弯道处设计引入的正常超高。图中,  $\theta_{cl}$  是沿轨道纵向测量架与轨道面的夹角;轨道横滚角  $\theta_t$  是沿轨道纵向轨道面与水平面夹角,  $D$  为左右垂向位移计间的距离。

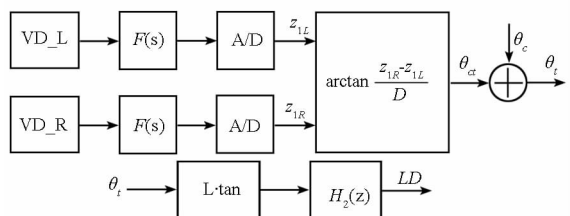


图 9 水平测量框图

Fig. 9 Measuring scheme for level difference

3 实验结果和结论

将 FMS01 搭载在 CMS04 磁浮列车上对唐山基地 1.5km 试验线的轨道进行了测量试验。(1) 为了验证 FMS01 测量情况的可行性和测量结果的可信度,特邀请中南大学土木工程检测中心采用水准仪对唐山 1.5km 试验线高程进行精密测量,并按线路位置对偏差进行拟合得全线高低,以此作为参考;(2) 为了验证不同速度情况下 FMS01 测量的重复性以及分析列车速度对测量的影响,列车分别按照最高时速 40km/h、60km/h 和 70km/h 运行,其速度位置曲线如图 10 所示。

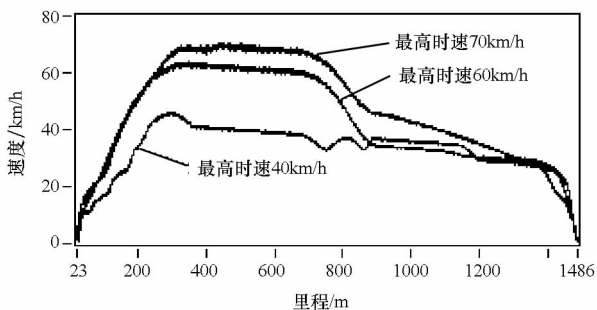


图 10 速度位置曲线

Fig. 10 Velocity-distance curve

从图 10 可以看出,列车在 350 ~ 700m 区间达到最高速度,而且速度相对比较稳定。因此,选择该区间部分测量结果进行对比。

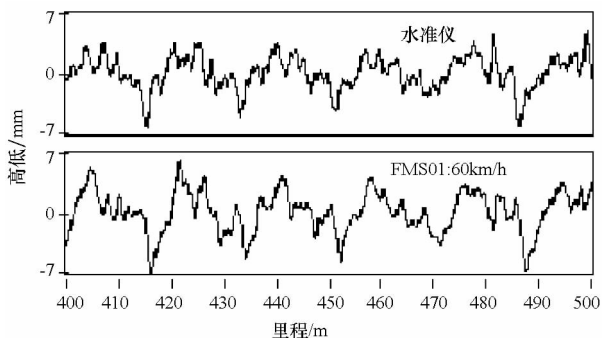


图 11 水准仪测量与 FMS01 测量结果对比

Fig. 11 Comparison of measurements using level gauge and FMS01

图 11 表明,以水准仪测量结果为参考, FMS01 测量的高低最大误差不超过 0.7mm,两者测量结果基本一致,达到了设计要求,验证了惯性基准法用于低速磁浮轨道不平顺测量可行性。

从图 12 可以看出,各参数在 40km/h、60km/h 和 70km/h 情况下测量结果基本一致。以上三次测量结果的平均为参考,各参数测量的最大误差不超过 0.2mm,表明 FMS01 测量不受列车速度等外界因素的影响。从各参数变化幅度来看,轨向、

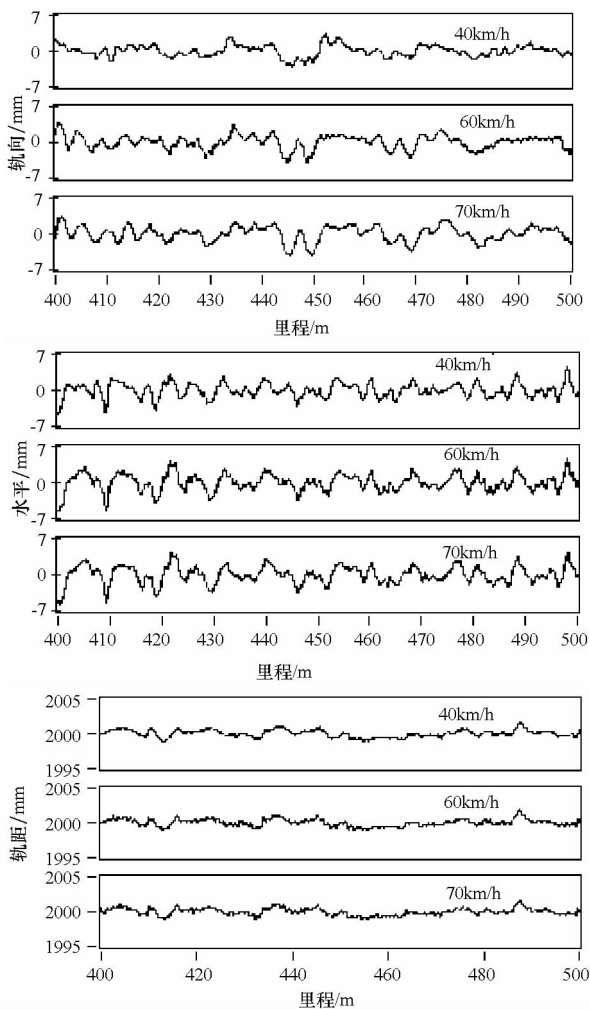


图 12 采用 FMS01 测量轨道几何参数结果

Fig. 12 Track geometries measured with FMS01

轨距变化较小,而高低、水平变化较大;这个特征也符合 F 轨实际情况:横向刚度大,轨道横向精度较高;列车运行以及轨道自然沉降对垂向精度影响较大,垂向变化相对横向更大。

综上所述,FMS01 为国内研制的第一套低速磁浮轨道几何参数测量系统,设计最高测量速度为 100km/h,测量精度为 0.7mm,重复精度 0.2mm,达到了设计要求,满足低速磁浮轨道测量需求。

### 参考文献 (References)

[1] 吴祥明. 磁浮列车 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.  
WU Xiangming. Maglev train [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2003. (in Chinese)

[2] Tejima Y, Liu Z. Commercialization of HSST, an access line of for the 2005 word exposition in Aichi, Japan [J]. Converter Technology & Electric Traction, 2005, 3: 50 - 52.

[3] 吴峻,曹宏宇,周文武,等. 用于中低速磁悬浮 F 型轨的轨道检测仪 [P]. 中国. 发明专利, ZL201010022109.7, 2011.08.24.  
WU Jun, CAO Hongyu, ZHOU Wenwu, et al. Inspection instrument for F track of low speed maglev [P]. Chinese patent, ZL201010022109.7, 2011.08.24. (in Chinese)

[4] 吴峻,周文武,张兴华,等. 中低速磁悬浮列车用轨道动态检测设备的刚性台架装置 [P]. 中国. 发明专利, 申请号: 201110022859.9, 2011.09.07.  
WU Jun, ZHOU Wenwu, ZHANG Xinghua, et al. Instrumented bogie of dynamic inspection equipment for F track of low speed maglev [P]. Chinese patent, 201110022859.9, 2011.09.07. (in Chinese)

[5] 吴峻,周文武,李中秀,等. 中低速磁悬浮 F 型轨的轨道动态检测设备 [P]. 中国. 发明专利, 申请号: 201110022856.5, 2011.09.07.  
WU Jun, ZHOU Wenwu, LI Zhongxiu, et al. Dynamic inspection equipment for F track of low speed maglev [P]. Chinese patent, 201110022856.5, 2011.09.07. (in Chinese)

[6] Inho Yeo, Seung Yup Jang, Jun S Lee, et al. New guideway design for urban maglev in korea [C]. The 20th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives: Guideway and Infrastructure, 2008;20(7):71 - 75.

[7] Federal Transit Administration. Assessment of CHSST Maglev for U. S. Urban transportation (final report) [R]. July 2002.

[8] 杜鹤亭,高林奎,樊戈平. 数字滤波技术在轨道检测中的应用 [J]. 中国铁道科学, 1997, 18(1): 79 - 91.  
DU Heting, GAO Linkui, FAN Geping. The application of digital filter technology to track recording [J]. China Railway Science, 1997, 18(1): 79 - 91. (in Chinese)

[9] 范钦海. 高速常导磁浮车辆对轨道平顺性要求得探讨 [J]. 中国铁道科学, 2002, 23(1): 73 - 76.  
FAN Qin Hai. Discussion on the demand of high-speed EMS vehicle on guideway irregularity [J]. China Railway Science, 2002, 23(1): 73 - 76. (in Chinese)

[10] 刘兴初,曾长操,张建武. 磁浮轨检车横向振动及其对磁浮轨道几何参数测量精度的影响 [J]. 振动与冲击, 2007, 26(5): 52 - 53, 63.  
LIU Xingchu, ZENG Changcao, ZHANG Jianwu. Lateral vibration of a maglev track inspection vehicle and its effect on measurement accuracy of maglev track geometry parameters [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007, 26(5): 52 - 53, 63. (in Chinese)

[11] 杜鹤亭. 长波长轨道不平顺检测中的数字滤波方法 [J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 58 - 65.  
DU Heting. Digital filtering method for long wave track irregularity inspection [J]. China Railway Science, 2000, 21(4): 58 - 65. (in Chinese)

[12] 郑树彬,林建辉,林国斌. 基于惯性法的磁浮轨道长波不平顺监测及发现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007, 21(1): 61 - 65.  
ZHENG Shubin, LIN Jianhui, LIN Guobin. Implementation of detecting maglev track long wave irregularity based on inertial measurement principle [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2007, 21(1): 61 - 65. (in Chinese)