

研
究
开
发

中低速磁悬浮列车运行电磁环境的分析

齐洪峰

(北京控股磁悬浮技术发展有限公司, 北京 100124)



摘 要: 采用电磁场有限元法对悬浮电磁铁和直线牵引电机的泄漏磁场分布进行仿真计算, 并将计算结果与中国科学院电工所对CMS04型中低速磁悬浮列车电磁辐射现场测试报告进行详实的比较分析, 从而证明了中低速磁悬浮列车交通系统是一种电磁环境良好的绿色城市轨道交通系统。

关键词: 磁悬浮列车; 悬浮电磁铁; 直线牵引电机; 电磁环境; 电磁场测试

中图分类号: U292.91*7

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)05-0062-04

作者简介: 齐洪峰 (1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 现从事中低速磁悬浮交通电气系统的设计与研究工作。

Electromagnetic Operation Environment Analysis of Middle-low-speed Maglev Train

QI Hong-feng

(Beijing Enterprises Holdings Maglev Technology Development Co., Ltd., Beijing 100124, China)

Abstract: With electromagnetic finite element method, leakage magnetic field distribution of electromagnets and linear traction motor was simulated and calculated, the results of which were compared to test reports of electromagnetic radiation field of CMS04 middle-low-speed maglev train carried out by Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, which proved that middle-low-speed maglev train transport system was a kind of green urban rail transit system with good electromagnetic environment.

Key words: maglev train; suspension electromagnet; linear traction motor; electromagnetic environment; electromagnetic field detection

0 引言

磁悬浮列车作为一种新型的轨道交通工具, 近年来迅速发展。2002年12月31日世界上第一条高速磁悬浮商业运行线——上海磁悬浮示范运营线首次进行单线试运营, 2005年5月开始商业运营。日本中低速HSST磁悬浮车也于2005年3月投入商业运营。上海磁悬浮示范运营线和日本名古屋东部丘陵线的成功运行表明磁悬浮交通技术正在通过示范运营走向市场。

然而, 目前国内民众对规划磁悬浮线路防护隔离带距离存在疑问, 认为中低速磁悬浮列车产生电磁辐射将影响人们的身体健康。本文针对目前这一问题, 通过对CMS04型中低速磁悬浮列车电磁场进行数值仿真计算, 并将理论计算结果与中国科学院电工所对

CMS04型中低速磁悬浮列车电磁辐射现场测试报告进行详实的比较分析, 从而证明了中低速磁悬浮列车交通系统是一种电磁环境良好的绿色城市轨道交通系统。

1 电磁场分析

1.1 列车运行产生的电磁场

1.1.1 直流磁场

磁悬浮电磁铁的励磁绕组输入直流电流产生静磁场, 除去磁浮力所需要的气隙磁场之外, 在电磁铁的侧面、上方及下方也将产生泄漏磁场, 泄漏磁场随着距离的增加迅速衰减, 为了保持悬浮间隙基本恒定, 悬浮控制器调节悬浮电磁铁励磁绕组的直流电流。

1.1.2 交流磁场

交流磁场源主要包括: 直线电机绕组、悬浮控制器、主变流器、滤波电抗器、辅助变流器、高压柜等电气设备。

直线感应电机绕组输入三相交流电流且电流频率

收稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAG02B05)

在0~100 Hz之间变化,属于似稳电磁场范围,位移电流可以忽略不计,初级绕组中的三相电流只能沿输电导体传播,电磁感应产生的涡电流也只能在次级铝板中导通。尽管直线感应电机存在交变磁场,但是极微小到完全可忽略的位移电流,不能激发出有效的涡旋磁场,形成电磁波,也就不可能向外部空间辐射电磁能量。直线电机的牵引功率只是用来产生牵引力,驱动列车前行。

主变流器和牵引控制器属于电力电子设备,实际工作频率约为500 Hz,也会产生一定能量的交变电磁场。滤波电抗器是一个带铁心的电感,工作时也会产生交变电磁场和直流磁场。车载设备放置在车厢下方,一般采用一定厚度的铁板做机箱,机箱对于车载设备产生的电磁场有屏蔽作用,能够满足相应的电磁兼容标准的要求。

1.2 悬浮电磁铁及直线牵引电机泄漏磁场数值仿真计算

从1.1节的分析可以看出,中低速磁悬浮列车与普通轮轨列车的区别在于采用磁浮导向电磁铁取代车轮,采用直线牵引电机取代了旋转电机。主变流器、牵引控制器、运行控制器等车载设备以及供电轨和车地通信设备,均与传统轮轨列车基本相同。为了深入研究中低速磁悬浮列车电磁辐射问题,需要计算中低速磁悬浮列车磁浮电磁铁和牵引电机的电磁场分布,特别是由于磁浮间隙的存在,可能导致产生的泄漏电磁场进行数值仿真计算。

1.2.1 悬浮电磁铁产生的泄漏磁场数值仿真计算结果

图1为电磁场仿真所用的电磁铁与轨道示意图,上部是轨道(简称F铁),下部是U型磁极,其上放置有励磁绕组。

本计算采用电磁场有限元法对该励磁磁极的泄漏

磁场分布,按照如下4种工况进行了仿真计算:

列车运行时,气隙8 mm,励磁电流25 A;

列车起浮时,气隙18 mm,励磁电流60 A;

列车运行时,气隙8 mm,且上、下磁极横向错位8 mm时,励磁电流27 A;

列车起浮时,气隙18 mm,且上、下磁极横向错位8 mm时,励磁电流60 A。

计算结果如表1所示。从励磁磁极泄漏磁场的仿真计算结果可看出,磁极外部的泄漏磁场随距离增加迅速衰减,临近磁极0.5 m处最大泄漏磁场仅有毫特(mT)量级,不到悬浮气隙磁场(0.6 T)的1%,且分布区域很小。

表1 磁极外部最大漏磁场计算结果 mT

气隙 δ /mm	距磁极右侧距离 /m			距磁极上部距离 /m			距磁极下部距离 /m		
	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
无错位时 8	1.282	0.370	0.099	0.700	0.273	0.088	1.334	0.391	0.107
无错位时 18	3.143	0.906	0.244	1.670	0.659	0.214	3.248	0.958	0.262
错位 8 mm 时 8	1.411	0.406	0.109	0.781	0.300	0.096	1.449	0.425	0.116
错位 8 mm 时 18	3.193	0.918	0.247	1.719	0.669	0.216	3.261	0.962	0.263

1.2.2 直线牵引电机泄漏磁场数值仿真计算结果

中低速磁悬浮列车每辆车安装10台直线电机,位于车厢的两侧,每侧各装5台电机。考虑到每台电机磁场分布基本相同和相邻电机之间的相互影响,可以简化为计算2台电机的磁场。图2是2台电机电磁场仿真时的计算场域示意图。

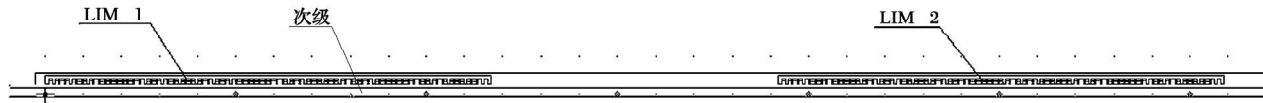


图2 2台直线感应电机计算场域示意图

图3是放大的其中一台电机电磁场仿真所用的截面示意图。牵引直线感应电机由车载初级(包括初级铁心及绕组)、次级反应板及次级铁心等组成,电机气隙11 mm。仿真计算可以得到电机初级上方、悬浮磁极

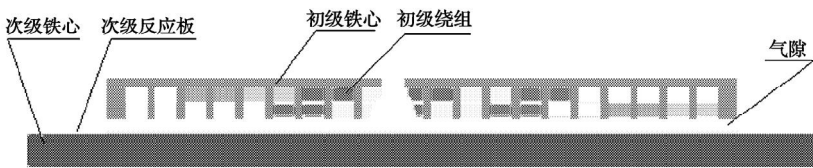


图3 1台直线感应电机截面示意图

下方磁场的分布及数值。

计算结果给出了2台电机上方与下方沿6条直线上的磁场分布。上方3条线分别距电机上方1.1 m、1.85 m和2.2 m,而下方3条线分别距悬浮磁极下平面1.5 m、1.8 m和2 m。采用有限元法按照2种工况,对直线牵引电机外部泄漏磁场进行仿真计算如下。

列车启动时:车速为0,初级频率3 Hz,初级相电流有效值400 A,计算结果如表2、表3所示。

表2 启动时电机上部最大磁场分布 μT

电机位置	电机上方 1.1 m 处	电机上方 1.85 m 处	电机上方 2.2 m 处
LIM1 左端部	42.36	20.13	16.95

表3 启动时悬浮电磁铁下部最大磁场分布 μT

电机位置	电磁铁 下方 1.0 m	电磁铁 下方 1.5 m	电磁铁 下方 1.8 m	电磁铁 下方 2.0 m
LIM2 右端部	5.80	4.79	4.32	4.10

列车额定运行时:车速60 km/h,初级频率60 Hz,初级相电流有效值270 A,计算结果如表4、表5所示。

表4 60 km/h运行时电机上部最大磁场分布 μT

电机位置	电机上方 1.1 m 处	电机上方 1.85 m 处	电机上方 2.2 m 处
LIM1 左端部	32.88	14.23	11.66

表5 60 km/h运行时悬浮电磁铁下部最大磁场分布 μT

电机位置	电磁铁 下方 1.0 m	电磁铁 下方 1.5 m	电磁铁 下方 1.8 m	电磁铁 下方 2.0 m
LIM1 左端部	6.30	5.62	5.10	4.94

从2种运行工况直线牵引电机的外部泄漏磁场的仿真计算结果可以看出,直线牵引电机外部的泄漏磁场随着距离增加迅速衰减,临近电机1.1 m处最大泄漏磁场仅有10微特量级,还不到实现电能向机械能转换的气隙磁场(0.4 T)的万分之一,且分布区域很小。

2 电磁辐射测试结果分析

2.1 5 Hz ~ 32 kHz交流磁场测试分析

2.1.1 车辆内部

图4对列车行驶时车内乘客坐时头部高度的各频段交流磁场与ICNIRP电磁辐射标准进行了比较,各频段的磁场均不超过ICNIRP公众标准,图中大括号上的星号表示该频段现场实测的综合磁感应强度。

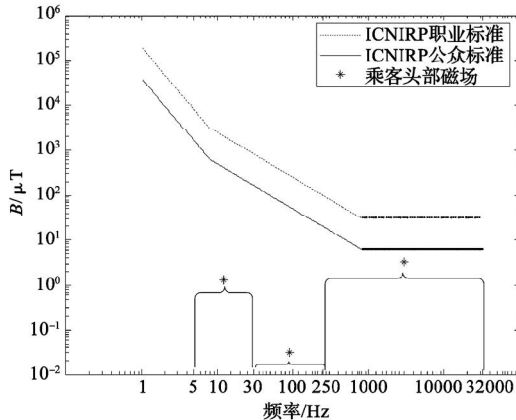


图4 车辆内部磁场与ICNIRP交流磁场标准的比较

2.1.2 车辆外部

距轨道1 m站台乘客头部高度磁场最大值为2.6 μT ,距离轨道5 m以外的交流磁场不超过1.4 μT ,均不超过ICNIRP电磁辐射标准(按800 Hz~150 kHz的公众标准为6.25 μT)。具体测量值与ICNIRP标准对比如表6所示。

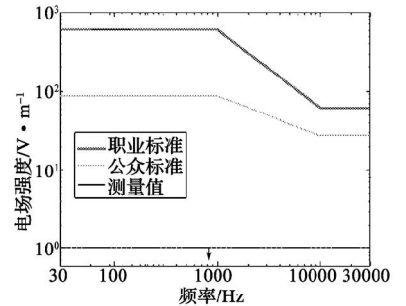
表6 车外交流磁场测量值与ICNIRP标准

位置	测量值/ μT	ICNIRP 公众标准
距轨道1 m 站台乘客头部高度	2.6	6.25 μT (800 Hz~150 kHz)
距轨道5 m 与悬浮轨道持平	1.4	6.25 μT (800 Hz~150 kHz)
距轨道10 m 与悬浮轨道持平	0.24	6.25 μT (800 Hz~150 kHz)
距轨道15 m 与悬浮轨道持平	0.09	6.25 μT (800 Hz~150 kHz)

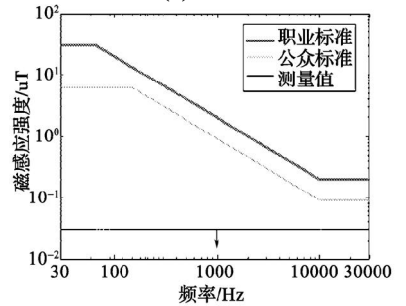
2.2 30 kHz ~ 30 MHz交流磁场测试分析

实际测量30 kHz ~ 30 MHz交流磁场最大有效值在

25 nT左右,电场最大约1 V/m,与背景场相比无明显差别。图5(a)图5(b)为实测的30 kHz ~ 30 MHz交流电磁场的最大有效值与ICNIRP相应标准的比较,可以看出实际测量值均远低于ICNIRP标准。图5中所示的值为有效值,根据ICNIRP标准,100 kHz ~ 30 MHz的值是6 min的平均值。



(a) 电场



(b) 磁场

图5 30 kHz ~ 30 MHz交流电磁场的最大有效值与ICNIRP相应标准的比较

2.3 直流磁场测试分析

2.3.1 车辆内部

车内地板处的直流磁场不超过国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)推荐的静磁场暴露标准(40 mT),而且车内直流磁场低于3 mT,环境中的金属物不会因为受磁场力而对乘客产生危害。对于心脏起搏器植入患者ICNIRP推荐标准为500 μT ,在车内地板上的直流磁场低于此标准,具体测量值与ICNIRP标准对比如表7所示。

表7 车内直流磁场测量值与ICNIRP标准对比

车内位置	测量值/ μT	ICNIRP 直流磁场标准
客室/地板	250	公众标准 40 mT, 心脏起搏器患者 500 μT
客室/坐时心脏高度	120	公众标准 40 mT, 心脏起搏器患者 500 μT
驾驶室/地板	240	职业标准 200 mT
驾驶室/坐时心脏高度	140	职业标准 200 mT

2.3.2 车辆外部

距离悬浮轨道F铁距离大于1 m后,直流磁场趋于地磁场水平。列车悬浮后距车1 m处的直流磁场不超过350 μT ,低于ICNIRP标准(40 mT),距轨道1 m站台乘客

心脏高度的磁场低于80 μT ,与列车距离大于3 m处的直流磁场约为40 μT ,趋于地磁场水平。具体测量值与ICNIRP标准对比如表8所示。

表8 车外直流磁场测量值与ICNIRP标准对比

位置	测量值 / μT	ICNIRP 直流磁场 公众标准
距轨道 1 m 站台乘客 心脏高度	80	公众标准 40 mT , 心脏 起搏器患者 500 μT
距轨道 3 m 与轨道持平	40	公众标准 40 mT , 心脏 起搏器患者 500 μT
距轨道 5 m 与轨道持平	38	公众标准 40 mT , 心脏 起搏器患者 500 μT

3 结论

本文通过对于中低速磁悬浮交通系统电磁辐射机理分析、数值仿真计算和现场测试 ,得出如下结论 :
中低速磁悬浮列车运行时车内外30 kHz~30 MHz 交流电磁场与未通电时的背景电磁场相比均无明显差异 ,表明中低速磁悬浮列车系统没有额外的高频电磁辐射。
中低速磁悬浮列车运行时 ,车内直流磁场不超过国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)的静磁场暴露

标准限值 ;车外距离轨道 1 m 以外直流磁场不超过 ICNIRP 的静磁场暴露标准限值。车外大于3 m处的直流磁场趋于地磁场水平。
中低速磁悬浮列车停靠站台过程中 ,站台处的直流和5 Hz~32 kHz各频段交流磁场均不超过ICNIRP电磁辐射公众标准值。
中低速磁悬浮列车运行时 ,车内5 Hz~32 kHz 各频段交流磁场不超过 ICNIRP 电磁辐射公众标准限值 ;车外5 Hz~32 kHz各频段交流磁场均不超过ICNIRP电磁辐射公众标准限值。
综上所述 ,中低速磁悬浮列车交通系统是一种电磁环境良好的绿色城市轨道交通系统。

参考文献：

[1] 北京控股磁悬浮技术发展有限公司. CMS04 型中低速磁浮交通电磁辐射测试报告[R] 北京：北京控股磁悬浮技术发展有限公司 ,2010.
[2] 国际非电离辐射防护委员会. ICNIRP 电磁辐射公众标准 (1998 [S] 国际非电离辐射委员会 ,1997.
[3] 国际非电离辐射防护委员会. ICNIRP 静磁场暴露标准 (2009 [S] 国际非电离辐射委员会 ,2008.
[4] 北京控股磁悬浮技术发展有限公司. CMS04 中低速磁浮列车总体设计技术条件[M] 北京：北京控股磁悬浮技术发展有限公司 ,2007.

(上接第61页)

表4 电抗器电磁场数值

测量仪器	测量点高度 / m			
	0.05	0.8	1.15	1.7
直流磁场测试仪 , 250Hz , 30 μT/300 mT	0.45 mT	0.3 mT	0.09 mT	0.055 mT
交流磁场测试仪 EMS - 100(5 Hz~400 kHz)	59.03 μT	10.00 μT	10.05 μT	6.65 μT
交流磁场测试仪 EMR - 300 (3 kHz~30 MHz)	0.020 6 A/m	0.014 7 A/m	0.014 2 A/m	0.012 4 A/m

由表4实测数据可知 ,直流磁场测试仪在0.8 m处测量值为0.3 mT ,低于国际非电离辐射委员会(ICNIRP)推荐的静磁场暴露标准40 mT ,也低于心脏起搏器植入患者的推荐标准0.5 mT。ESM-100 5 Hz~400 kHz交流磁场测试仪器在0.8 m处测试点最大值为10.03 μT ,小于国际非电离辐射委员会(ICNIRP)推荐的职业暴露限值30.7 μT(0.82~65 kHz)。ESM-300 3 kHz~30 MHz在0.8 m处测试最大值为0.014 7 A/m 小于ICNIRP职业暴露推荐限值0.53 A/m (均方根限值) ,完全符合国际非电离辐射防护委员会ICNIRP电磁辐射标准要求。

4 结语

本文通过对磁悬浮空心电抗器技术要求的分析 ,

明确了空心电抗器的技术关键点 ,并对空心电抗器电感量、温升进行设计计算 ,对电抗器的机械结构进行优化 ,着重对空心电抗器的电磁场屏蔽进行三维模拟分析及现场在线实测。模拟分析及在线检测都充分表明 ,采用组合式屏蔽板 ,极好地解决了磁悬浮列车电抗器电磁场辐射超标的问题。此产品已应用到北京S1线中低速磁悬浮列车、南车磁悬浮列车项目中。
空心电抗器的电磁辐射直接关系到轨道车辆运行的可靠性和安全性 ,针对电抗器的电磁屏蔽设计还应进行深入的理论研究、运行试验 ,必要时还应采用新型的高导磁性材料 ,以彻底解决电抗器的电磁辐射问题。
参考文献：
[1] 卡兰塔罗夫 n n ,采伊特林 n A. 电感计算手册[M] 北京：机械工业出版社 ,1992.
[2] 崔立君. 特种变压器理论与设计[M] 北京：科学技术文献出版社 ,1995.
[3] 杨士元. 电磁屏蔽理论与实践[M] 北京：国防工业出版社 ,2006.
[4] 刘少克 ,倪鸿雁. 中低速磁悬浮列车悬浮电磁铁线圈电感计算[J] 机车电传动 ,2008(1).
[5] 鲁 力. 地铁牵引电传动系统空心滤波电抗器的国产化研制[J] 机车电传动 ,2011(1).