

应用于高速滑橇的电动悬浮和电磁推进系统设计*

李冠醇, 李 杰, 陈 强

(国防科技大学 磁浮技术工程研究中心, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 针对目前高速滑橇系统滑块磨损严重、橇体振动剧烈、测试成本高、实验周期长的问题, 提出一种适用于高速滑橇平台的电动悬浮和电磁推进系统。采用数值计算方法建立系统的仿真模型, 对系统的悬浮和推进特性进行分析。仿真分析结果表明, 系统最大浮重比是电磁吸力型(EMS)悬浮系统的11倍, 推进系统需要橇体携带的重量仅占整个橇体质量的4.2%, 具有很高的有效载荷。文中所提出的系统较传统的采用滑块支撑、火箭发动机作为动力的高速滑橇系统具有明显优势。

关键词: 高速滑橇; 电动悬浮; 电磁推进

中图分类号: V439⁺.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2017) 07-1468-07

DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2017. 07. 004

Design of an Electrodynamic Suspension and Electromagnetic Propulsion System for High Speed Test Track

LI Guan-chun, LI Jie, CHEN Qiang

(Engineering Research Center of Maglev Technology, National University of Defense Technology,
Changsha 410073, China)

Abstract: In order to achieve the higher velocity, reduce vibration, eliminate slipper wear and save costs, an electrodynamic suspension and electromagnetic propulsion system for high speed test tracks were discussed. The techniques for the design and analysis of an electrodynamic suspension and electromagnetic propulsion were described. By using 3-D finite-element analysis, suspension and propulsion characteristics were predicted. The results show the force-weight ratio of system is 11 times higher than EMS system, the weight of propulsion on the sled accounted for 4.2% of the total weight. The high speed test track with electordynamic suspension and electromagnetic propulsion is superior to traditional high speed test track.

Key words: High speed test track; Electrodynamic suspension; Electromagnetic propulsion

1 引 言

高速滑橇系统是一种用于测试各种航空装备的地面试验系统,如弹射救生、降落伞测试、导弹精确制导等。高速滑橇橇体由滑块支撑,采用火箭发动机作为推进动力,是世界上最快的地面轨道试验系统。目前具备高速滑橇试验平台的有美国、中国、俄罗斯、英国和印度。其中美国是高速滑橇技术水平最高的国家,尤以位于美国新墨西哥洲霍洛曼空军

基地(Holloman AFB)的中央惯性制导实验室(CIGTF)试验技术最为成熟和先进^[1]。2003年Holloman空军基地高速滑橇系统在一次测试中曾达到过2884.7m/s的最高地面运行速度^[2]。理论上,高速滑橇系统的运行速度受限于橇体质量,阻力和推力。实际上橇体滑块的磨损和超高速环境下橇体强烈的振动同橇体质量、阻力和推力一样限制高速滑橇系统的运行速度。目前Holloman空军基地高速滑橇系统常规试验速度一般小于2.5km/s,速度超过2.5km/s

* 收稿日期: 2016-03-18; 修订日期: 2016-06-21。

基金项目: 总装备部武器装备预研基金(9140A20101015KG01)。

作者简介: 李冠醇,男,博士生,研究领域为超高速悬浮推进技术。E-mail: liguanchun_9@aliyun.com

的试验偶尔进行,但是成功率有限,其主要问题是滑块磨损严重和撬体过高的振动环境^[3]。当前高速滑橇系统均采用火箭发动机作为动力,大大限制了高速滑橇系统的有效试验载荷,增加了撬体质量,而且存在推重比低、试验成本高,试验准备周期长、不可重复利用等问题。针对这些问题,最有效的方法是以悬浮形式取代滑块支撑,采用电磁推进代替火箭发动机推进。目前高速磁悬浮系统研究比较广泛且技术较为成熟,其中德国和日本高速悬浮系统针对载人轨道交通应用,均以达到商业运行标准。美国位于加利福尼亚州的 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 以航天助推发射作为应用背景提出永磁电动悬浮结构,目前已经完成实验室样机验证^[4~8]。美国 Holloman 空军基地采用超导电动悬浮形式,已经对其高速滑橇轨道的一段进行悬浮系统改造。改造后的系统以火箭发动机作为推进动力进行过六次测试,最高运行速度达到 186.9m/s^[3,9~12]。电磁推进技术多集中于航天辅助发射、飞机弹射系统和电磁炮领域。美国 LLNL 提出一种利用永磁体作为励磁的推进系统,由于项目资助等问题,一直未有进展,仅完成实验室样机测试,速度达到 40m/s^[4]。Stumberger G 教授提出一种采用高温超导块材同步电机用于飞机弹射系统,其设定弹射速度为 103m/s^[13]。电磁炮技术研究非常广泛,其出口速度可达到 5.9km/s,但其弹丸通常较轻,一般在 10kg 以内^[14]。目前,针对大质量超高速的电磁推进研究较少^[15],Holloman 空军基地应已经将电磁推进纳入研究计划但尚未见诸报道^[3]。

本文以高速滑橇系统作为应用平台,提出一种集成电动悬浮和电磁推进的高速滑橇系统概念,描述了系统悬浮和推进原理,采用数值仿真方法对系统的悬浮性能和推进能力进行评估。

2 高速滑橇电动悬浮和电磁推进系统设计

系统设计的基本原则是悬浮系统和推进系统相互独立,减少耦合;系统结构简单,减少撬体携带设备。系统示意图见图 1 所示,坐标轴 y 方向是前进方向, z 方向是垂直方向, x 方向是横向。4 个超导磁体安放于高速滑橇撬体,撬体骑跨在推进轨道上,两对铜反应板嵌入两侧的两座支撑壁内。推进线圈以螺线管形式缠绕在推进轨道上。系统工作时,推进线圈通入直流脉冲电流,脉冲电流与超导磁体作用产生推进力。运动的超导磁体在铜反应板内感应出涡流,涡流与超导磁体相互作用产生悬浮和导向置中力。高速滑橇体由四个超导磁体支撑悬浮,防止撬

体在运动过程中由于力矩不平衡产生滚动和俯仰。整个系统中超导磁体的强磁场同时用于悬浮和推进,具有较高磁体利用率较高。

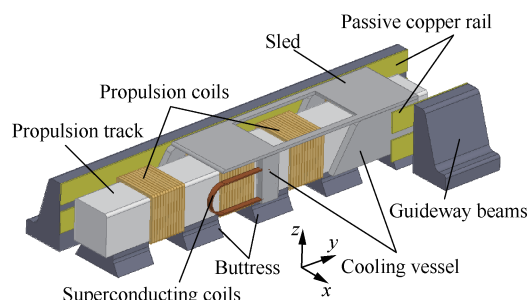


Fig. 1 Suspension and electromagnetic propulsion system concept

2.1 推进系统

目前高速滑橇通常以化学发射器作为动力,如火箭发动机等。化学发射器低利用相关化学推进剂产生高温高压气体推进物体至高速,其显著的优点是具有很高的瞬时功率,能够将大质量物体短时间加速至声速或超声速。但其受化学燃料的限制,有效载荷很低,火箭发射的有效载荷仅为火箭自重的 1% 左右^[15]。相对于化学推进,电磁推进不仅可以做到结构轻便,增大有效载荷,而且不存在化学推进的滞止声速限制。通过合理的结构设计和高功率的供电电源,电磁推进具有优秀的推进性能。

电磁推进的基本原理是通过电磁作用产生机械力^[16]。强磁场和大电流是产生大推力的基础。常规电磁牵引会采用铁磁材料或永磁体提高机电转换效率,但铁磁材料和永磁的磁场有限。例如一般铁磁材料的饱和磁场大约为 1.2T,永磁体剩磁也只有 1.4T 左右。这就限制了其在超高速大推力推进系统中的应用。而空心线圈的磁场仅与线圈电流和安匝数有关,大电流即可产生强磁场。因此采用空芯线圈结构是构建大推力电磁推进系统的一个重要思路。超导材料具有很高的电流密度,以超导材料绕制磁体能够以小线圈体积产生强磁场。另外电源功率是限制超高速大推力电磁推进系统的另一关键因素。供电电源在超高速工况下除需克服很大的反电势外,还需要高电压来克服线圈电感作用以达到更快的电流响应速度,这就需要缩短电枢供电长度来减小电枢电感。从电机原理来说,直流电机与交流电机相比不存在功率因数低的问题^[17],更适合超高速的工况。目前比较成熟的轨道炮即是借鉴直流电机的原理。

基于上述分析,本文以超导线圈为励磁磁源,按照直流电机的工作原理,设计一种应用于高速滑橇

系统的推进系统。系统一个作用单元见图2所示。其基本原理是:超导磁体产生指向推进线圈的径向磁场 B ,与推进线圈上的环向电流 J 作用,根据安培力 $J \times B$ 可知,系统会产生主要沿轴向的推进力和较小的沿径向导向力。一个推进单元两侧的超导磁体通入相反方向的电流,使得两个超导磁体产生相同方向的推进力。同时单个超导磁体受到的径向导向力会产生一个扭转的力矩使超导磁体发生偏航,但是可以通过设计合适的机械结构连接前后两个超导磁体来抵消这个偏航力矩。当推进系统工作时,通过定位装置,如沿轨道安装霍尔传感器等方法,检测超导磁体的运动位置。将超导磁体对应的轨道线圈注入脉冲电流就能不断产生推进力,驱动撬体前进。

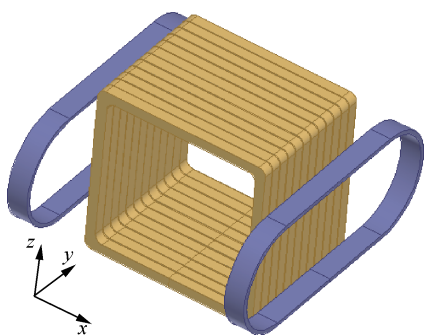


Fig. 2 Unit of propulsion

2.2 悬浮系统

目前成熟的悬浮系统主要分为电磁吸力型(EMS)和电动斥力型(EDS)。EMS型系统利用通电后的电磁铁与轨道之间的电磁吸力实现物体的悬浮^[18],并通过控制算法调整电磁铁电流保证稳定的悬浮间隙。EMS型悬浮系统的主要优势是稳定可控的悬浮性能。其间隙波动范围、垂向振动加速度能通过设计控制算法控制在很小范围内,因此大多数载人磁浮轨道交通系统多采用EMS型悬浮结构,例如上海浦东机场高速磁浮线、北京S1低速磁浮线、长沙机场高铁低速磁浮线、韩国仁川机场线等。其中上海浦东机场高速磁浮线采用德国TR08技术,最高运行时速在550km左右^[19]。EMS型磁浮系统运行时,电磁铁与轨道的快速相对运动会在轨道中感应出涡流,涡流产生的磁场会大大削弱悬浮磁场,造成悬浮能力下降。中低速磁浮系统轨道为实心结构,速度为216km/h时,前端一个电磁铁模块悬浮力衰减约47%^[20]。德国TR08磁浮系统,轨道采用碟片结构,但也不能完全消除涡流效应。EMS型系统靠主动控制保证悬浮,悬浮电磁铁必须是有源的。中低速磁浮列车采用受流轨接触供电,超高速工况下不可避免会存在

磨损、熔融等问题。高速磁浮TR08采用非接触式供电,由悬浮电磁铁磁体中内嵌的发电线圈提供车辆自身所需的全部电力^[19],但需车载较多电气设备,使得车体很重。例如上海TR08高速磁浮载重64.4t,车重50.3t^[21],悬浮电磁铁重10.5t,则悬浮电磁铁浮重比只有为6.13。因此EMS型悬浮结构涡流效应和供电问题限制了其在超高速工况的应用。

EDS型系统通过源磁场与轨道之间的相对运动在轨道内产生感应电流,而感应电流与源磁场的相互作用会产生斥力实现悬浮^[18]。其中源磁场通常采用超导磁体或永磁体,日本MLU高速磁浮列车就是典型的采用超导磁体作为磁源的电动斥力型悬浮系统。EDS悬浮系统在静止时没有悬浮力,随着速度增加悬浮力逐渐增大。EDS悬浮系统本质是欠阻尼的,导致其悬浮特性不如EMS平稳,但是其主要优势是在高速工况下能够提供很高的悬浮阻力比,具有很高的悬浮效率^[22]。同时EDS悬浮系统通常不需要挂载电源设备,这大大减轻了自身重量,提高浮重比。基于上述分析,高速滑撬悬浮系统采用电动力型悬浮系统,结构如图3所示。当安装于撬体的超导磁体沿轨道前进,运动的磁场在铜反应板中感应出涡流。涡流与超导磁体磁场相互作用产生垂向和横向的电磁,同时产生阻碍前进的电磁阻力。这些电磁力受运行速度、超导磁体磁感应强度和超导磁体与铜反应板的距离影响。同侧铜反应板上下分开放置,当超导磁体偏离上下铜板的中心位置时,涡流与超导磁体作用产生的电磁力表现为使超导磁体回到上下两块铜反应板中心位置的置中力。而两侧铜板对称安装,其产生的横向电磁力相互抵消。当发生横向偏移时,趋向一侧涡流效应增强,远离一侧的涡流效应减弱其电磁力仍表现为使超导磁体回到横向中心位置的恢复力。

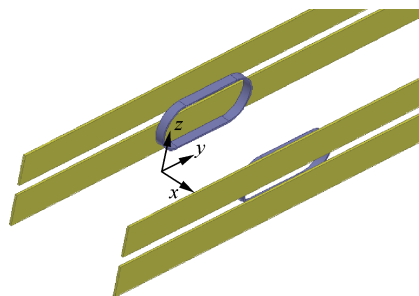


Fig. 3 Unit of suspension

3 系统建模

通过有限元方法(AnsysMaxwell软件)建立高速

滑撬电动悬浮和电磁推进系统仿真模型。由于网格剖分很大程度上影响仿真结果的精度,从最初的软件自划定的网格密度,不断对其进行细化,每次增加50%网格数量。并对比细化前后两次仿真结果的差别,当仿真结果差别在1%时,采用最后的网格剖分进行系统仿真计算。

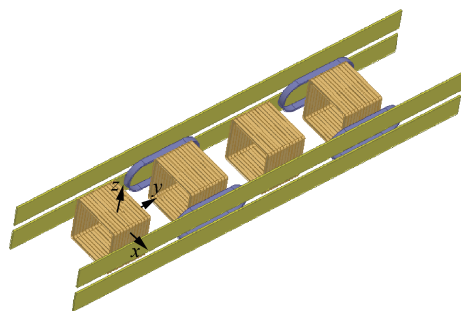


Fig. 4 Numerical analysis model

系统中各种支撑固定结构采用非导磁导电材料,因此不会对悬浮和推进系统产生影响,所以仿真模型中将其忽略,模型见图4所示。仿真模型推进线圈导线截面积为 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$,一组推进线圈共12匝,一组推进线圈尺寸为 $262\text{mm} \times 340\text{mm} \times 340\text{mm}$ 。超导磁体形状为跑道型,整个尺寸为 $40\text{mm} \times 516\text{mm} \times 216\text{mm}$,工作电流为514800安匝,重约 54.4kg ^[10]。感应板材料为铜,尺寸为 $10\text{mm} \times 2800\text{mm} \times 150\text{mm}$,同侧上下感应板间隙为50mm。在 x 轴方向(横向)超导线圈与推进线圈间隙为30mm,与感应板间隙为39mm。悬浮系统采用瞬态场电磁场求解,牵引系统采用静态电磁场求解。边界条件设定为纽曼边界条件,使得接触面磁场强度 H 的切向分量和磁感应强度 B 的法向分量保持连续。仿真模型网格划分如图5所示。

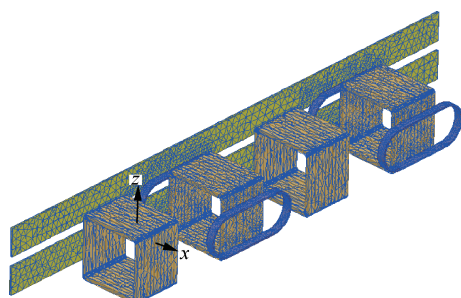


Fig. 5 Meshing of model

4 仿真结果分析

4.1 悬浮系统特性

设定超导磁体偏离上下铜板中心位置2cm,图6

为单侧两个超导磁体产生的悬浮力和磁阻力与运动速度的关系。图中蓝色曲线表示悬浮力,可以看出系统的悬浮力随速度增大而增加,但当速度大于180m/s时逐渐趋于饱和,增幅变缓,最大悬浮力约为71kN。则整个撬体(4个超导磁体)最大悬浮力约为142kN,超导磁体总重217.6kg,则悬浮磁体的浮重比最大可达66.59,约是TR08高速磁浮的11倍。从浮重比方面比较,系统具有明显优势。

图6中青色曲线表示磁阻力。阻力曲线存在拐点速度,在拐点速度之前,磁阻力随速度递增,拐点速度之后,磁阻力递减。峰值阻力约为25kN。也就是说电磁阻力在低速时非常明显,高速时阻力作用趋于减弱。这个变化趋势是涡流磁阻力的特性,在EMS和EDS系统都存在,所不同的是EMS磁阻效果非常弱,以CMS04型中低速磁浮列车为例,其单悬浮模块在拐点速度的峰值电磁阻力约为109N,悬浮力约为22kN,其浮阻比约为202^[23]。图6中浮阻比最大出现在360m/s,比值约为11。电磁阻力过大是EDS型悬浮系统一个不足,但可以通过对感应板结构和形式的设计提高其浮阻比^[24],在此不做论述。

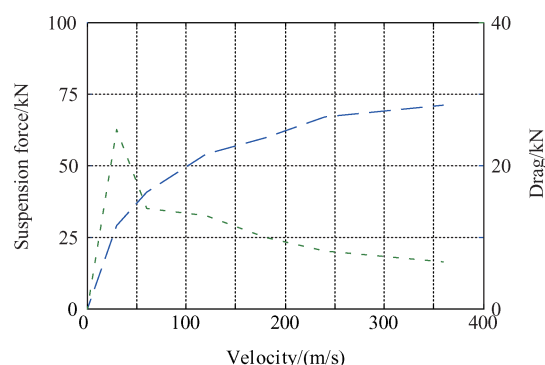


Fig. 6 Suspension force dependence on the velocity

悬浮系统不仅要提供悬浮力,还需要保证撬体在发生滚动、偏航、俯仰时具有恢复力矩。分别设定三种情况进行仿真。结果显示,俯仰 $\pm 5^\circ$ 时,会相应产生约 $1.26\text{kN} \cdot \text{m}$ 恢复力矩;滚动 $\pm 5^\circ$ 时,会相应产生约 $7.43\text{kN} \cdot \text{m}$ 恢复力;偏航 $\pm 5^\circ$ 时,会相应产生约 $5.87\text{kN} \cdot \text{m}$ 恢复力。悬浮系统表现出自恢复能力。

4.2 推进系统特性

对推进系统进行静态仿真,设定一组推进线圈串联连接,驱动电源为电流源,电流大小为15000A。相对位置范围 $y=0 \sim 778\text{mm}$,表示沿前进方向超导磁体刚进入推进线圈到完全脱离超导线圈。则四个超导线圈产生的电磁力与相对位置的曲线如图7所示。从图中绿色曲线可以看出,峰值推力出现在超

超导磁体与推进线圈正对位置附近,约为73kN,且在一段区域内推力几乎维持在峰值。根据上节悬浮力速度曲线,如果设定起浮速度30m/s,对应悬浮力约为25kN,则撬体质量可达2.55t,单个超导磁体重54.4kg,也就说推进系统由撬体携带的重量仅占整个撬体质量的4.2%。而目前用于高速滑撬推进的超级走鹃(SRR)火箭发动机,峰值推力93.4kN,燃烧时间1.4s,推进剂质量比80%^[25]。电磁推进的荷重比远远优于火箭推进。4个超导磁体产生的瞬时推力虽不如火箭发动机,但增加磁体数即可调整输出推力。以4个磁体的仿真数据计算,6个超导磁体能够产生109.5kN的推力,大于SRR火箭发动机。从静态推力特性角度对比,所设计电磁推进具有取代目前火箭发动机的能力,且具有更高的有效载荷。图7中蓝色曲线和红色曲线分别表示推进系统在垂直方向和横向产生的电磁力。从图中可以看出推进系统在垂向和横向几乎不产生电磁力,也就是说推进系统对悬浮系统不产生影响,两个系统相互独立。

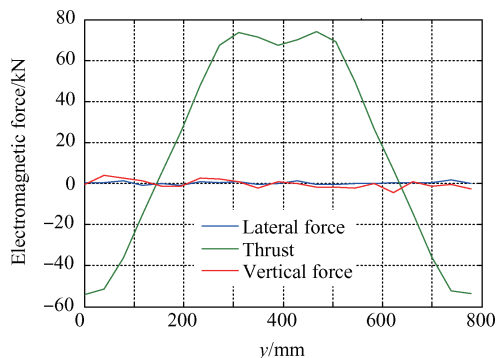


Fig. 7 Thrust dependence on the position y

图8是超导磁体受到的绕 z 方向的偏航力矩。绿色曲线为单个超导磁体受到的偏航力矩,蓝色曲线表示一对超导磁体受到的偏航力矩。图中看出,单个超导磁体与轨道线圈正对时,滚动力矩最大,为4.7kN·m。对侧两个超导磁体力矩相互抵消,对外表现出很小的滚动力矩,可以通过悬浮系统自恢复能力来克服。

由于推进系统中轨道线圈和超导磁体都是有源的,限制了其运动工况的仿真,下面通过解析方法计算超导线圈在推进线圈中感应的反电势。轨道线圈和超导磁体都是空芯的,其推进力和反电势的表达式分别为^[17]

$$F_y = n_0 I_0 I_1 \frac{\partial M}{\partial y}$$

$$\varepsilon = -\frac{n_0 I_0 \partial M}{\partial t} = -\frac{n_0 I_0 \partial M}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{n_0 I_0 \partial M}{\partial y} v$$

式中 F_y 为电磁推进力, ε 为一匝推进线圈感应的电压, n_0 为超导磁体匝数, I_0 为超导磁体电流, I_1 为推进线圈电流, v 为运动速度, M 为超导线圈和推进线圈之间的互感。

其中互感可由黎曼公式求出^[26]

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{l_1} \oint_{l_2} \frac{dx dx' + dy dy' + dz dz'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}}$$

(x, y, z) 和 (x', y', z') 是两个点的坐标,其中一个点在推进线圈上,另一个点在超导线圈上,而 l_1 和 l_2 是两个线圈的周界线。

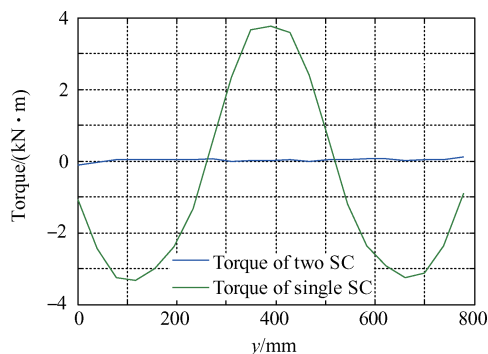


Fig. 8 Torque of superconducting coil dependence on the position y

图9所示是用有限元方法(FEM)和解析方法计算得到静态电磁推力的对比。图中可以看出两种方法计算结果变化趋势几乎一致,各个位置处电磁推力最大误差在15%以内,说明有限元计算结果和解析计算结果较好的吻合。

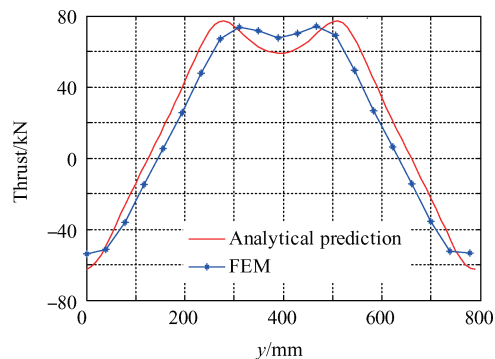


Fig. 9 Comparison of analytical and FEM results for thrust

图10为运动速度 $v=300$ m/s时,各个相对位置处超导线圈在推进线圈中感应的反电势。图中可以看出感应电压与电磁推力的变化趋势是一致的,但正负相反。电磁推力大时,电磁作用剧烈,产生的反电势也同样大。图10两幅中一组推进线圈的总安匝数为180kA,上图为为一组推进线圈12匝时反电势的变

化曲线,下图为推进线圈720匝时反电势的变化曲线。图中可以看出一组推进线圈共12匝,则超导磁体在一组推进线圈中产生的反电势最大为0.8kV,推进线圈中的电流15kA,需电源功率12MW;若推进线圈720匝,推进线圈电流只需要250A,但是线圈中产生的反电势高达46kV。也就是说推进线圈通过设计不同匝数,采用大电流小电压或则小电压大电流的供电方式。但是由于线圈匝数增多线圈电感也会增加,大大影响电流的相应速度,不利于高速工况下的控制,且高压对设备的耐压性能要求比较严格。因此采用脉冲大电流供电更为合适。

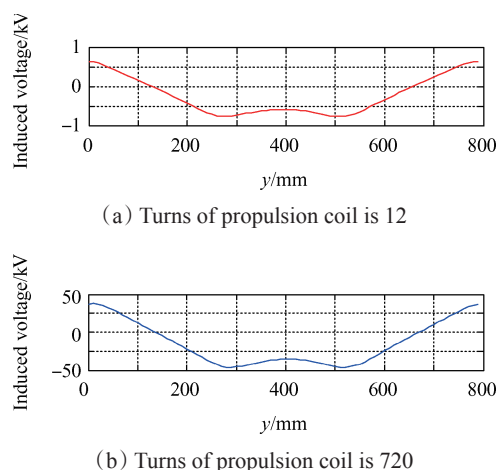


Fig. 10 Induced voltage dependence on the position y

5 结论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)悬浮系统具有较高的浮重比,是EMS型高速磁浮系统浮重比的11倍;悬浮系统同时会产生电磁阻力,对牵引系统产生不利影响。仿真表明磁阻力在低速时作用明显,跃过速度拐点,磁阻力会逐渐减小。

(2)推进系统的静态力特性显示,能够达到火箭发动机的瞬时推力,推进系统需要撬体携带的重量仅占整个撬体质量的4.2%。

(3)推进系统除推进方向外,在垂向和横向两个方向几乎不产生电磁力,几乎对悬浮系统不产生影响。

本文所设计的高速滑撬悬浮和推进系统具有足够电磁力特性,满足高速滑撬系统的试验要求,具有很好的应用潜质。文中对推进系统仅进行了静态分析,其运动特性仍要进一步仿真研究。目前试验平台在搭建中,后续会开展试验测试验证工作,进一步验证论文中的仿真数据。

致谢:感谢崔鹏老师对课题研究中给予的支持,感谢贺光博士在论文撰写中给予的帮助。

参考文献:

- [1] 夏刚,李丹东,陈效真. 惯测系统与火箭橇试验[J]. 导航与控制, 2005, 1: 1-4.
- [2] Daniel A Bergeron. Holloman High Speed Test Track Maglev Program Update[R]. AIAA 2010-1707.
- [3] Haney J W, Lenzo J. Issues Associated with a Hypersonic Maglev Sled[C]. Florida: 3rd International Symposium on Magnetic Suspension Technology, 1996.
- [4] Tung L S, Post R F, Martinez-Frias J. Final Progress Report for the NASA Inductrack Model Rocket Launcher at the Lawrence Livermore National Laboratory [R]. UCRL-ID-144455.
- [5] Toshiaki Murai, Hitoshi Hasegawa. Electromagnetic Analysis of Inductrack Magnetic Levitation[J]. Electrical Engineering in Japan, 2003, 142(1): 1049-1054.
- [6] Louann T. LLNL Inductrack Progress Report [R]. UCRL-CR-138459.
- [7] Post R F, Ngyuen L. The Design of Halbach Arrays for Inductrack Maglev Systems[R]. LLNL-CONF-406791.
- [8] Richard Freeman Post, Walnut Creek CA. Inductrack Magnet Configuration[P]. US: 6664880 B2, 2003-12-16.
- [9] Michael D Hooser. The Holloman High Speed Test Track Magnetically Levitated (MAGLEV) Sled Six Degree-of-Freedom Model[R]. AIAA 2010-1706.
- [10] Bosmanjian N, Minto D, Holloand L. Status of the Magnetic Levitation Upgrade to the Holloman High Speed Test Track [C]. Denver: 21st AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2000.
- [11] Venkatesh A, Jeter P. Guideway Steel Fiber Reinforced Concrete Hybrid Girder Design[C]. Dresden: 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2006.
- [12] Hsu Y, Langhorn A, Donald Ketchen, et al. Magnetic Levitation Upgrade to the Holloman High Speed Test Track[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2009, 19(3): 2074-2077.
- [13] Gorazd Stumberger, MehmetTimur Aydemir, Damir Žarko, et al. Design of a Linear Bulk Superconductor Magnet Synchronous Motor for Electromagnetic Aircraft Launch Systems[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2004, 14(1): 54-62.

- [14] 李 军, 严 萍, 袁伟群. 电磁轨道炮发射技术的发展与现状[J]. 高压电技术, 2014, 40(4): 1052-1064.
- [15] 朱英伟. 多极矩场电磁推进模式研究与系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [16] 王 莹. 空间的电磁推进技术[J]. 推进技术, 1987, 8(4): 49-54.
- [17] 叶云岳. 直线电机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] 贺 光. 基于 Halbach 结构的永磁电动与电磁混合悬浮技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [19] 李晓龙. 高速磁浮列车悬浮控制及信号处理关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [20] Hiroyuki Ohsaki, Jian Du. Influence of Eddy Current Induced in Steel Rails on Electromagnetic Force Characteristics of EMS Maglev Systems[C]. Shanghai: 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2004.
- [21] 张 丽. 超高速直线驱动方案初步研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [22] Jianliang He, Howard Coffey. Magnetic Damping Forces in Figure-Eight-Shaped Null-Flux Coil Suspension Systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(5): 4230-4232.
- [23] 莫双鑫. 中低速磁浮列车行阻力及牵引节能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
- [24] Hoburg J F, Post R F. A Laminated Track for the Inductrack System: Theory and Experiment [R]. UCRL-CONF-201819.
- [25] David W Minto. The Holloman High Speed Test Track Hypersonic Upgrade Program Status[C]. St.Louis: 22nd AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2002.
- [26] 龙遐令, 朱维衡, 徐善纲, 等. 直线电机[M]. 北京: 科学出版社, 1982.

(编辑: 朱立影)