

文章编号:1001-2486(2011)06-0159-04

EMS型低速磁浮列车U型电磁铁设计方法研究*

李云钢,张 晓,龙 娟,刘恒坤

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对EMS型低速磁浮列车的U型电磁铁,研究其气隙磁密及结构参数的设计方法。气隙磁密应选为铁芯材料的磁导率下降到其最大值的90%时所对应的磁密。结构参数包括极长、极高、窗宽、窗高和轭厚,极长影响牵引效率及过弯能力,极宽影响承载能力和导向刚度,窗宽和窗高影响重量,但随轨宽而定,轭厚按磁轭与磁极的磁密相等的原则来选取。

关键词:低速磁浮列车;U型电磁铁设计;气隙磁密;结构参数

中图分类号:U292.917 **文献标识码:**A

Research on the Design of the U-shaped Electromagnet for Low-speed EMS Maglev Trains

LI Yun-gang, ZHANG Xiao, LONG Juan, LIU Heng-kun

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

Abstract: The magnetic flux density in the clearance and the structural parameters were designed for the U-shaped electromagnet of Low-speed EMS Maglev Trains. The magnetic flux density in the clearance was chosen as the magnetic flux density when the permeability of the iron core material decreased to ninety percent of its maximum value. The related structural parameters are the length and the width of the magnetic pole, the width and the height of the window, and the depth of the yoke. It was represented that the length of the magnetic pole has effects on the turning capability of the maglev train, the width of the magnetic pole has effects on the carrying capacity and the guiding stiffness of the train, the width and height of the window has influence on the weight of the train, which should be determined by the width of the guide way, and the depth of the yoke should be chosen according to the principle that the magnetic flux density in the magnetic yoke equals to that in the magnetic pole.

Key words: low-speed maglev train; design of the U-shaped magnet; magnetic flux density in the clearance; structural parameters

磁浮列车是一种新型的轨道交通工具,它没有轮子,运行时和轨道无机械接触,具有低噪音、无磨损、易维护、节能等一系列优点。在EMS型磁浮列车中,取代轮子支撑力的是电磁铁与轨道之间的电磁吸力,因此,电磁铁是磁浮列车的重要部件。低速磁浮列车采用一套U型电磁铁同时实现悬浮和导向功能,相比高速磁浮列车采用的独立悬浮电磁铁和导向电磁铁结构,具有体积小、重量轻、简单高效等明显优势。U型电磁铁在磁浮列车及相关领域具有强大的生命力,值得重点研究。U型电磁铁早期主要是研究其设计步骤和结构参数选择方法。陈贵荣^[1]研究了U型电磁铁的设计方法和步骤,重点研究了气隙磁密、电磁铁长度、和气隙大小等参数的选择方法,设计了承

载750kg的U型电磁铁;后来陈贵荣^[2]又研究了该电磁铁的磁轭饱和问题,通过适当加厚磁轭,将其承载能力提高到1000kg;兴涛^[3]研究了U型电磁铁的磁路分布模型,可用于气隙磁密分析。近年来的研究主要是利用有限元软件对电磁参数进行数值计算,为设计和改进提供数据和参考。罗芳^[4]用有限元软件计算了气隙大小、水平错位及侧滚角对U型电磁铁的悬浮力、导向力和侧滚力矩的影响;倪鸿雁^[5]用有限元分析了U型电磁铁的3维电磁场,表明侧移对悬浮力影响不大而对侧向力影响较大,在气隙8mm,左偏8mm时,导向力所占悬浮力的比重约为23%;刘少克^[6]用有限元分析出U型电磁铁的滚动会减小其悬浮力等。在实际应用中,电磁铁设计既要考虑自身优化,也

* 收稿日期:2011-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60874015)

作者简介:李云钢(1969—),男,研究员,博士。

要考虑应用环境的约束,因此,本文以 U 型电磁铁在磁浮列车中的应用为例,系统地研究其优化设计问题。

1 低速磁浮列车 U 型电磁铁的结构及设计目标

如图 1 所示,在低速磁浮列车中,U 型电磁铁安装在转向架上,转向架上还安装有牵引电机,转向架通过空气弹簧等与车体相连。U 型电磁铁中通常安装有多个线包,有 4 个线包的 3 维造型见图 2。

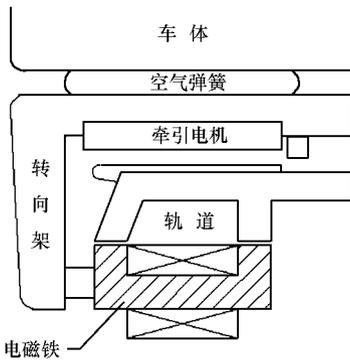


图 1 低速磁浮列车的 U 型电磁铁安装结构示意图
Fig.1 Installation diagram of the U-shaped electromagnet of low-speed maglev vehicles



图 2 U 型电磁铁 3 维造型图
Fig.2 Diagram of the U-shaped electromagnet in 3D

磁浮列车电磁铁的优化设计,就是在保证提供足够悬浮力和导向力的前提下,尽可能减小体积重量,并尽可能节能。因此,在设计中,应将电磁铁提供的悬浮力和导向力作为边界条件,将减重和节能作为目标。

2 U 型电磁铁的气隙磁密选取问题研究

EMS 型磁浮列车的悬浮力,就是磁铁和轨道之间的吸引力,不妨假设电磁铁极面和轨道极面面积均为 S 而且正对,且磁极表面磁场均匀分布,那么,这两个极面之间的吸力 F_m 的计算公式为^[7]

$$F_m = \frac{B^2}{2\mu_0} S \tag{1}$$

其中 B 为磁极表面的气隙磁密, μ_0 为真空磁导率。

为了充分发挥铁磁材料具有高磁导率的优势,设计时总是要选取较大的磁密 B ,而通过减小 S ,来减小铁芯的体积和重量。

但是,对于磁浮列车,不能将气隙磁密选为材料的饱和磁密 B_s 。电磁铁的最大吸力应远大于车重。电磁吸力可分为静态部分和动态部分,静态部分用于抵消车重,动态部分用于对车的垂向运动进行调节。动态调节力的大小与悬浮系统的工作状态有关,例如,测试表明^[8],HSST-100 在 100km/h 速度下,气隙波动为 $\pm 2\text{mm}$,满载时达 $\pm 4\text{mm}$;以 $\pm 2\text{mm}$ 计算,设波动频率为 8Hz,那么波动加速度的幅值约为 $A\omega^2 = 0.002 \times (16\pi)^2 = 5.05\text{m/s}^2$,若车重为 m ,则克服该波动所需要的动态调节力应为 $m \cdot A\omega^2 = 5.05 \cdot m$,相当于车重的一半。如果将气隙磁密选为饱和磁密,那么磁铁就不能提供动态调节力了。此外,在弯道上,电磁铁极面和轨道极面不能正对时,也将导致一定的磁力损失。因此,磁浮列车的气隙磁密都远小于饱和磁密。

通常根据材料的磁导率,来选取气隙磁密 B 。铁磁物质的磁导率不是常数,初始磁导率较小,磁场强度增加时,磁导率开始变化不大,后来增加较快,然后达到最大磁导率 μ_M ,磁场强度再增加时,磁导率变小,饱和时接近真空磁导率^[9]。在最大磁导率点,励磁电流的效率最高,但此时磁密 B 较小,不符合前述尽可能选取较大磁密的要求。经验方法是,在磁化曲线上,当磁导率下降到 μ_M 的 90% 时,选取此时的磁密作为电磁铁的气隙磁密。

该方法源于以下事实。电磁铁可分为铁芯和线圈两部分,磁极面积 S 是铁芯的横截面积,它越大则铁芯越重,磁密 B 需要通过励磁来产生,它越大则所需线圈越重,在磁密接近饱和时,线圈重量增加很多,磁密才能稍微增加。可见,如果将气隙磁密选为接近饱和磁密,则对减重和节能都不利。

3 U 型电磁铁的结构参数选取问题研究

参照图 3,影响 U 型电磁铁的吸力大小的结构参数主要有极面长度 L_m 、极面宽度 W_m 、绕线窗口宽度 W_w 、绕线窗口高度 H_w 和磁轭厚度 H_e ,以下分别简称为极长、极宽、窗宽、窗高和轭厚。下面讨论这些参数的计算和选择方法。

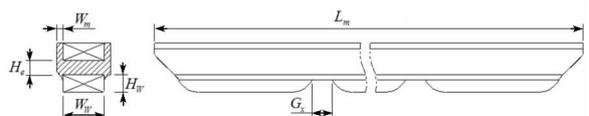


图 3 U 型电磁铁的结构图
Fig.3 Structural diagram of the U-shaped electromagnet

3.1 极面长度 L_m

由图2可见,极长就是悬浮电磁铁的长度,在磁浮列车上,悬浮电磁铁通常是一个一个紧密相连的,因此,车有多长极面就有多长,主要应考察的是单位长度上的悬浮能力。比如,HSST的悬浮能力约为3.0t/m,TR08约为2.6t/m。所以,对于承载能力而言,极长是一个无关紧要的参数。

美国AMT公司进行过一次创新,车辆沿长度方向只有2/3安装悬浮电磁铁,另外1/3安装牵引电机^[10]。为了能提供足够的悬浮力,加大了极宽。这会导致很多问题,比如,电磁铁很重,轨道极面也得加宽而造价大增,车辆蛇形运动幅度大,等等。

尽管极长对承载能力而言无关紧要,但它会影响牵引效率。从图1知,在转向架上同时安装有电磁铁和牵引直线电机,为了充分利用空间,它们的长度应大致相等。直线电机的边端效应是导致其牵引力损失的重要因素^[11],为了减小边端效应,应采用尽量长的直线电机,这要求转向架或电磁铁的长度不能太短。

电磁铁也不能太长。一方面,在弯道上,电磁铁将成折线排列,电磁铁极面和轨道极面不能正对,这将导致力损失,电磁铁越长,损失的力就越大,因此,如果弯道半径较小,应采用较短的电磁铁。另一方面,由于电磁铁要承载列车的全部重量及动态力,因此结构上要考虑其强度和刚度问题,电磁铁越长,受力时形变越大。

3.2 极面宽度 W_m

如前所述,设计电磁铁时首先确定了气隙磁密,并对极长进行归一化处理,此时,列车的承载能力完全取决于电磁铁的极宽。比如,假设选取气隙磁密 B 为0.8T,要得到3.0t/m的承载,可以计算出磁极宽度 W_m 为29.4mm。

低速磁浮列车U型电磁铁的重要优点之一,在于它提供悬浮力的同时,还提供侧向力,相比TR型高速磁浮列车采用单独的导向电磁铁,在减重和节能方面十分有利。单独的导向电磁铁不仅本身十分笨重,而且还需要对应的控制系统及供电系统,并要消耗能量。U型电磁铁提供的侧向力可分为静态力和动态力。静态力主要用于克服恒定侧风以及弯道超高条件下的重力分量的影响,出于车辆安全的考虑,磁浮列车通常要求在有超高的弯道上,它能静止悬浮。磁浮列车运行时,车体和电磁铁都会发生左右摇摆,这称为蛇形运动^[12],此时,电磁铁会给车体提供动态的侧向力。

设计U型电磁铁时,应使其侧向力满足车辆侧向运动的要求。

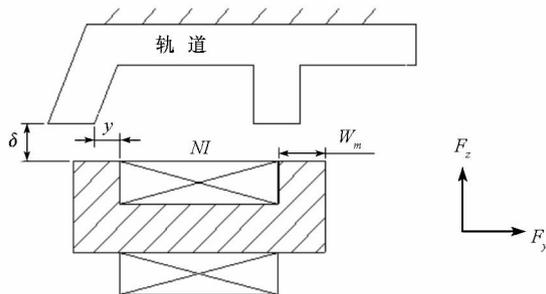


图4 U型电磁铁发生侧偏时的悬浮力与导向力
Fig. 4 The levitation and guidance force when there is deflection of the U-shaped electromagnet

U型电磁铁的极宽对磁浮列车的侧向运动有重要影响。考虑图4所示的简单情况,假设悬浮间隙为 δ ,侧向偏移为 y ,线圈的安匝数为 NI ,忽略铁芯磁阻,则电磁铁的垂向力和侧向力分别为^[13]

$$F_z = \frac{\mu_0}{4} \left(\frac{NI}{\delta} \right)^2 \cdot \left(W_m - y + \frac{2\delta}{\pi} + \frac{2y}{\pi} \cdot \tan^{-1} \frac{\delta}{y} \right) \cdot L_m \quad (2)$$

$$F_y = -\frac{\mu_0 (NI)^2 L_m}{2\pi\delta} \cdot \tan^{-1} \frac{y}{\delta} \quad (3)$$

式中, μ_0 为真空磁导率, π 为圆周率。此外,电磁铁在滚动、偏航及俯仰运动下,悬浮力和侧向力都会有轻微变化,但不影响本文分析。

磁浮列车的电磁铁和车体之间通过二次系连接,二次系是一套弹簧阻尼系统,它给电磁铁相对于车体提供一定的运动自由度,以满足弯道和坡道上的运动学和动力学要求。由于电磁铁和车体之间存在相对运动,它们的蛇形运动应分别进行分析。车体由于质量大,其蛇形运动的频率较低,而电磁铁蛇形运动的频率较高。

对于车体而言,定义车体侧向刚度为

$$K_{ny} = \frac{F_y/F_z}{y} \quad (4)$$

在此式中,分子取为侧向力与垂向力的比值,垂向力代表车重,该式表达了侧向力作用于车体时,其作用效果应相对于车重而言才有意义。从式(2)、(3)、(4)可以看出,垂向力基本上与极宽成正比,而侧向力与极宽无关,因此,车体侧向刚度与磁宽大致成反比。

车体侧向刚度越大,在侧向干扰力作用下的运动幅值就越小,因此,采用较窄极面可以减小车体蛇形运动的幅度。但采用较窄极面势必会减小车辆的承载能力。可见,选取极宽时,要在承载能力和车体蛇形运动幅度之间进行折中。

车体的侧向干扰力来源于外力,比如阵风、空气阻力等,对于空载和满载,车体受到的干扰力差

别不大,但满载下质量较大,因此蛇形运动较小。

对于电磁铁而言,定义电磁铁侧向刚度为

$$K_{my} = \frac{F_y / G_{magnet}}{y} \quad (5)$$

在此式中,分子取为侧向力与电磁铁重量 G_{magnet} 的比值。易知,电磁铁侧向刚度与极宽没有关系。

根据式(2),如果结构和气隙已定,满载下将具有较大的 NI 值,此时所对应的侧向力 F_y 也较大,当它作用于质量不变的电磁铁时,将导致其运动幅度加大,而且刚度变大会导致运动频率加快。电磁铁越轻,这个问题越突出。由于电磁铁的轻量化是其设计目标,因此应通过增加电磁铁和车体之间的运动阻尼的方法,来减小电磁铁的蛇形运动。

3.3 窗宽 W_w 和窗高 H_w

选定气隙磁密 B 后,如果忽略铁磁材料的磁阻,对于 U 型电磁铁,根据磁路欧姆定律,可以得到绕线窗口的面积 S_w 为

$$S_w = \frac{2\delta \cdot B}{\mu_0 \cdot J \cdot \eta} \quad (6)$$

式中新出现的符号, J 为导线电流密度,需根据导线材料和散热条件来选取, η 为线圈填充系数,取决于绕线工艺。

首先考虑重量因素。在绕线窗口内填充的主要是导线,当窗口面积确定后,选取不同的窗宽 W_w 和窗高 H_w ,只要 $W_w \cdot H_w = S_w$,导线部分的重量基本不变。但是,参照图 3 可知, W_m 越大,磁轭也越宽,电磁铁的总重就越大。需注意的是, W_m 增加时,轨道也要加宽,因此轨道造价会增加。

但 W_m 也不能太小,如果两侧磁极靠得太近,漏磁会增大。在设计阶段,可以用有限元软件来检查漏磁的大小,在试制阶段,可以用对比法检查漏磁是否超过设计标准。从减重角度看,窗宽设计的基本准则是,在漏磁允许的条件下尽量取较小的值。

窗宽的选择还应考虑外部因素。就低速磁浮列车而言,轨道的上表面用于安装直线感应电机的次级铝反应板,而铝反应板的宽度由牵引需求决定,如果牵引所需的铝反应板较宽,那么压缩电磁铁的窗宽就没有意义了。

选定窗宽之后,窗高 H_w 按下式确定:

$$H_w = \frac{S_w}{W_w} \quad (7)$$

3.4 磁轭厚度 H_e

在 U 型电磁铁中,套在线包中间的铁磁材料称为磁轭。磁轭厚度选取的基本原则是,磁极截面和磁轭截面应具有相同的磁密。如果磁轭厚度

不够,那么磁轭将先于磁极饱和,导致电磁铁的承载能力达不到设计值;如果磁轭厚度过大,那么磁极饱和时磁轭还没有充分发挥作用,白白增加了磁轭和线包的重量。文献[2]中的实验充分说明了这两种情况。

总有一部分磁通量穿过磁轭而不穿过磁极,因此,尽管磁轭截面和磁极截面的磁密相等,但它们的面积并不相等。考虑漏磁因素,磁轭截面可保留约 5% 的余量。

以图 2 所示的 4 线包电磁铁为例,可得磁厚 H_e 为

$$H_e = \frac{L_m \cdot W_m}{L_m - 8H_w - 4G_x} \times 1.05 \quad (8)$$

式中 G_x 为两个线包之间的接缝长度。由式(8)可见,由于线包高度 H_w 和接缝长度 G_x 压缩了磁轭的长度,因此磁轭比磁极厚一些。

4 总结

本文以悬浮和导向力的要求为边界条件,以减重和节能为目标,系统地研究了 EMS 型低速磁浮列车的 U 型电磁铁的优化设计问题,给出了关键参数的选择方法。在设计电磁铁时,其气隙磁密应首先确定,选取较高磁密有利于减小铁芯重量,但还要兼顾电磁铁动态调节能力的需要以及磁密对线圈重量的影响,因此选取其为材料的磁导率下降到其最大值的 90% 时所对应的磁密。 U 型电磁铁的结构参数主要有磁极长度、磁极宽度、绕线窗口宽度、绕线窗口高度和磁轭厚度。在磁浮列车中,电磁铁的极长与车长相等,因此,列车单位长度上的承载能力与极长无关,其选取应重点考虑牵引效率及过弯能力方面的要求。对于车辆而言,由于极长无可选择,而磁密已定,那么其承载能力完全取决于极宽;但 U 型电磁铁的极宽还影响列车的导向能力,静态导向力要克服侧风及超高引起的侧向力,动态导向力要兼顾车体及电磁铁的蛇形运动,这些约束导致极宽不能随意选择。以上参数一旦选定,绕线窗口的面积也就随之确定,而为了减重,窗宽应在漏磁允许的条件下尽量取较小的值,但对于低速磁浮列车而言,由于轨宽主要取决于牵引因素,窗宽也就随之而定。轭厚按照磁轭与磁极的磁密相等的原则来选取,但考虑到漏磁影响,磁轭截面应保留 5% 的余量。本文系统全面分析了 U 型电磁铁设计的约束条件,对其具体设计与实现具有重要指导意义。

图 6 展示了投送能力中空投能力的演化。演化视图涉及 3 类核心概念:能力、装备、项目,视图中的时间点选自能力构想中的时间点。该视图涉及两类映射,一是装备或装备组合到能力列表的映射,二是项目到装备的映射。按照限定时间内能够最大投送装甲车辆的数量,将空投能力分为 3 个等级。X 型运输机编队的投送能力为 20 辆,该系列装备的使用寿命为矩形框 1 所跨的时间间隔。X+型运输机编队的投送能力能同时满足 20 辆、50 辆两种投送需求,项目 1 研制的装备提供小规模的投送能力,项目 2 研制的运输装备同时提供 50 辆、90 辆的投送能力,矩形框 3、4 的起始位置表示装备的预期列装时间。从图 6 可以发现项目 3 应该提前进度,因为矩形框 2 和矩形框 3 之间存在空白区域,表示这段时间不具备空投能力。



图 6 装甲装备体系能力演化视图(部分)

Fig.6 Armored equipment system-of-systems capability evolution (partial)

4 结束语和讨论

本文研究了武器装备体系能力建模问题,提

出了基于本体的能力视图构建方法,建立了 6 个能力视图的元模型,并以装甲装备体系能力建模为例,展示了方法的应用。基于体系能力视图的能力需求获取、能力差距分析、能力评估、能力规划等是下一步研究的内容。

参考文献:

[1] DoD Quadrennial Defense Review Report[R]. Washington D. C. : DoD, 2001.

[2] TTCP JSA-TP3. Guide to Capability-based Planning [R]. 2008: 1 -14.

[3] Bernier F, Couture M, Dussault G, et al. CapDEM-toward Capability Engineering Process[R]. DRDC Ottawa, 2005.

[4] DoD. Department of Defense Architecture Framework 2.0 [S]. 2009.

[5] MOD. MODAF Handbook v1. 2. 003[S]. 2008.

[6] 赵青松,谭伟生,李孟军. 武器装备体系能力空间描述研究[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(1): 135 -140.

[7] Lu Y J, Chang L L, Yang K W, et al. Study on System of Systems Capability Modeling Framework Based on Complex Relationship Analyzing[C]//Proceedings of IEEE Conference on Systems Engineering, San Diego, CA ;2010:23 -28.

[8] 董庆超,王智学,朱卫星. 面向 C⁴ISR 能力分析的领域特定描述语言[J] 系统工程理论与实践,2011, 31(3): 552 -560.

[9] 张维明,段采宇. C⁴ISR 需求开发新途径:基于本体建模[J]. 国防科技大学学报,2007, 29(6): 86 -92.

[10] UML 2. 1. 2 Infrastructure Specification & Superstructure Specification [S]. 2007.

上海科学技术出版社, 1992.

[10] Deodhar A, Bawab S. Development and Validation of a Dynamic Model of the Maglev Transportation System at Old Dominion University[C]//The 20th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Dec 15 -18, 2008, San Diego, California, USA.

[11] Davey K, et al. The Old Dominion University/American Maglev Demonstration System[M]. American Maglev Technology. 2001.

[12] 闫宇壮,李云钢,程虎. 电动电磁混合磁浮悬浮稳定性及技术特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 53 -56.

[13] 李云钢,常文森,闫宇壮. 美国新型结构磁悬浮交通技术分析[比较]. 机车电传动, 2006(3): 6 -9.

[14] Nozaki Y, Koseki Y, Masada E. Multipurpose Design Optimization of Linear Induction Motors for EMS Type Maglev Vehicles [C]//The 18th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, Shanghai, China; 834 -842.

[15] 崔鹏. 低速磁浮列车车辆导向动力学研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2010.

[16] 谢云德. EMS 型磁浮列车系统动力学建模与仿真的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1998.

(上接第 162 页)

参考文献:

[1] 陈贵荣,常文森,尹力明. 磁悬浮列车悬浮电磁铁设计研究[J]. 国防科技大学学报, 1993, 15(4): 10 -15.

[2] 陈贵荣. 磁悬浮列车电磁铁的磁场饱和与承载能力分析[J]. 机车电传动, 1998, (3): 15 -17.

[3] 兴涛,杨建波,郭永献. U 型磁铁磁路分布与气隙磁感应强度[J]. 机械设计与制造, 2008 (7): 82 -83.

[4] 罗芳,张昆仑. 磁悬浮列车 U 型悬浮电磁铁电磁力的数值计算与分析[J]. 机车电传动, 2002 (3): 32 -35.

[5] 倪鸿雁. 磁悬浮列车悬浮电磁铁电磁场三维有限元分析[J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(5): 40 -42.

[6] 刘少克,倪鸿雁,张葵葵. 中低速磁悬浮列车电磁铁滚动情况下的受力特性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2007: 22 -25.

[7] 冯慈璋. 电磁场[M]. 北京:人民教育出版社, 1980.

[8] Masski F, Takeshi M. Total Test Operation of HSST-100 and Planning Project in Nagoya [C]//14th International Conference Magnetically Levitated Systems. 1995: 129 -133.

[9] 上海市电子电气技术协会. 常用电工材料手册[M]. 上海: