

应用于高速磁浮滑橇系统的常导电磁铁 结构与优化*

刘 凯, 徐 杰, 徐敦煌

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 采用常导磁悬浮技术来解决传统高速滑橇系统中滑橇磨损严重、橇体振荡剧烈等问题。阐述了一套以浮重比为优化目标、纯励磁与混合励磁式通用的常导悬浮电磁铁的设计流程, 建立了悬浮电磁铁的等效磁路模型, 并根据悬浮系统的设计输入要求完成了纯励磁和混合励磁式悬浮电磁铁的初步设计; 在此基础上, 借助 Ansoft 有限元仿真软件, 完成了两种悬浮电磁铁结构的优化。对比分析两者的设计参数, 结果表明: 在铁心饱和磁密为 1.8 T 的限制条件下, 电磁铁的磁极截面为正方形时, 其浮重比最高; 对于混合励磁式电磁铁而言, 永磁体的加入大幅减小了电磁铁的体积与自重, 显著提高了电磁铁的浮重比, 能够增加系统的有效载荷, 且降低系统的能耗。

关键词: 高速滑橇系统; 常导悬浮电磁铁; 结构设计; 有限元仿真

中图分类号: U 266.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)12-0066-08

Structural Design and Optimization of the Normal Conductive Electromagnet for High Speed Maglev Test Track System*

LIU Kai, XU Jie, XU Dunhuang

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In conventional high speed test track systems, there exist some problems such as serious skid wear and sharp oscillation of the skid. Normal conductive electromagnet technology was used to solve these problems. A design process which was suitable for both electromagnetic suspension and hybrid suspension was put forward for the electromagnet structure, taking the ratio of levitation force to gravity as the optimization objective. The equivalent magnetic circuit model of the electromagnet was established, and the preliminary design was completed for electromagnetic suspension and hybrid suspension schemes based on the design requirements of the levitation system. Both structures were further optimized using the Ansoft finite element simulation software. By analyzing the design parameters of both schemes, it was shown that when the magnetic pole section of electromagnet was square, the ratio of levitation force to gravity was the highest; with the addition of permanent magnets, the volume and weight of electromagnets were greatly reduced, the ratio of levitation force to gravity was largely improved, the effective load of the system was increased, and the power loss was reduced.

Key words: high speed test track system; normal conductive levitation electromagnet; structural design; finite element simulation

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51690181, 51477180, 51377086, 51507181)

作者简介: 刘 凯(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为磁悬浮系统的电磁设计与控制技术。

徐 杰(1986—), 男, 助理研究员, 研究方向为磁悬浮控制与应用超导技术。

徐敦煌(1992—), 男, 博士, 研究方向为永磁电机优化设计。

0 引言

高速滑橇(火箭橇)系统是一种用于测试多种装备在高速运行环境下工作性能的大型地面动态模型试验系统,广泛应用于航空、航天、兵器等高端技术领域,近年来得到了快速发展^[1-2]。开展高速滑橇系统研究,提高滑橇运行速度是相关科研人员一直追求的目标。目前只有美国、中国、俄罗斯、英国和印度拥有高速滑橇试验平台,其中美国的高速滑橇试验技术发展最为成熟和先进^[3]。2003年,美国新墨西哥州霍洛曼空军基地(Holloman AFB)在一次高速滑橇测试中,创造了世界最快的地面轨道系统运行速度 $2\ 884.7\ \text{m/s}$ ^[4],但受环境和设备的影响,Holloman AFB高速滑橇系统常规试验速度很难超越 $2.5\ \text{km/s}$ 。究其原因,高速滑橇系统的运行速度不仅受限于橇体质量、阻力和火箭推力,在超高速环境下橇体还会发生严重磨损并产生剧烈振动,限制了滑橇的运行速度,影响了试验数据的可靠性。针对上述问题,可以利用现有成熟的磁悬浮技术取代橇体与导轨之间的支撑滑块,避免机械接触造成的磨损和阻力,从而减少橇体与滑轨之间的共振。

磁悬浮系统有着无接触、无磨损、使用周期长等优点,与之相关的技术研究比较广泛且在不少工程项目中得到了成功的应用。其中,德国TR型常导高速磁浮列车早在2003年就已经在上海实现了商业化运行,而近年来国内具有完全自主知识产权的长沙和北京两条低速磁浮线也相继投入了商业示范运营,上述两种磁浮列车均属于电磁吸力(Electromagnetic Suspension, EMS)型^[5]。此外,日本超导电动斥力(Electrodynamic Suspension, EDS)型磁悬浮车也基本完成了山梨试验线上的全部运行测试,目前正积极推广应用至中央新干线工程^[6]。美国Hollman AFB完成了超导高速磁浮火箭橇的研制,最高试验速度可达 $0.8\ \text{马赫}$ ^[7-8]。美国加利福尼亚州的劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)提出将永磁电动悬浮结构应用于航天助推发射,目前已完成试验样机研制^[9]。国内关于低速磁浮列车的研究比较热门,但是高速磁悬浮技术的研究报道与工程应用项目相对较少^[10]。在高速磁浮滑橇研究领域,只有国防科技

大学提出了一种应用于高速滑橇的电动悬浮系统概念^[11]。国内尚未建立高速磁浮滑橇试验线路,经常使用的只有位于湖北襄阳的一条传统火箭橇试验线路,2006年该线路的最高试验速度可达 $2.8\ \text{马赫}$ ^[12]。因此,在我国高速滑橇领域开展磁悬浮应用技术研究的需求已十分迫切。

从国内外高速磁浮的研究现状来看,常导EMS型和超导EDS型磁悬浮技术相对成熟。从磁浮技术应用情况来看^[13-14],常导EMS相比于超导EDS型磁浮列车对轨道的精度要求较高、悬浮气隙控制较复杂,但可以通过主动控制拥有更稳定的悬浮性能;而超导EDS型磁浮列车则可实现较大气隙的悬浮,但其在静止时不能产生悬浮力,需要在牵引系统的助推下达到一定速度后才能起浮,且该系统仅是临界稳定,需要外加阻尼才能维持系统的安全运行。

本文采用常导高速磁悬浮技术来解决传统高速滑橇系统中滑橇磨损严重、橇体振荡剧烈等问题,简述了高速磁浮滑橇系统的悬浮原理;另外,考虑电磁铁的结构尺寸将直接影响高速滑橇的浮重比、功耗以及系统承载有效载荷的能力。本文在常用的常导U型电磁铁结构基础上进行了优化设计及方案对比,为常导磁悬浮技术应用于高速滑橇系统奠定基础。

1 高速磁浮滑橇系统的悬浮原理

相比传统高速滑橇系统,高速磁浮滑橇系统采用常导电磁悬浮技术来取代原有的接触式支撑滑块。参考长沙低速和上海高速磁悬浮列车的悬浮系统结构,其系统悬浮结构设计如图1所示。在图1中,坐标 x 轴为前进方向, y 轴为导向方向, z 轴为悬浮方向。4个悬浮电磁铁固定在橇体上,橇体放置于两U型导轨下方,试验件(如导弹)可放置于橇体上部的固定槽上。

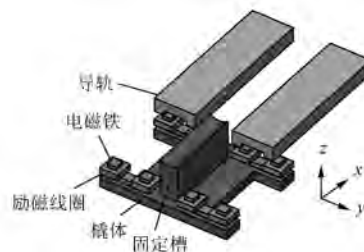


图1 高速磁浮滑橇系统悬浮结构示意图

在系统工作时,励磁线圈通入励磁电流,在电磁铁与导轨之间形成闭合的磁场,使得电磁铁对导轨产生电磁吸力从而带动整个滑橇处于悬浮状态,可以通过控制励磁电流的大小来调节滑橇的悬浮高度和载重。由于电磁铁和导轨都采用 U 型结构,使滑橇拥有一定的自主导向能力。

可以看出,悬浮电磁铁主要由励磁线圈、导轨和铁心组成。其结构设计将直接影响滑橇系统的功耗、浮重比以及悬浮稳定性。为此有必要仔细分析悬浮模块的各结构尺寸关系,以便在现有的常导电磁铁基础上进行优化设计。

2 常导悬浮电磁铁的结构设计

2.1 设计思路

本文吸取了前人的研究经验^[15-18],阐述了一套常导电磁铁设计流程。为理清设计思路,将其归纳如图 2 所示。



图 2 常导悬浮电磁铁的设计思路

2.2 常导悬浮电磁铁的结构形式对比分析

目前常导纯励磁式悬浮电磁铁的励磁线圈的放置方式主要有轭部集中式和磁极分布式两种^[19],如图 3 所示。

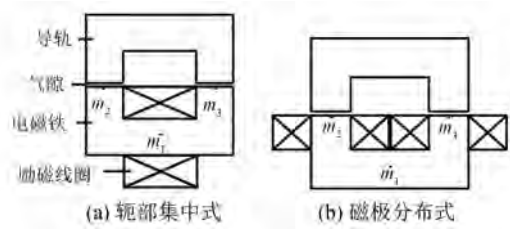


图 3 纯励磁式悬浮电磁铁结构示意图

在导轨、铁心尺寸以及气隙大小相同的情况下,对比图 3 中的两种励磁结构形式的 Ansoft 有限元仿真结果,如表 1 所示。

表 1 两种纯励磁式结构有限元仿真对比

参数名称	轭部集中式	磁极分布式
电流安匝数/At	10 000	10 000(每极 5 000)
m_1 点磁密/T	1.042	0.767
m_2 点磁密/T	0.373	0.374
m_3 点磁密/T	0.373	0.374
悬浮力/N	440.7	488.7

从表 1 可以看出,因前者励磁线圈集中放置于铁心轭部,其轭部磁密(如 m_1 点)相比于磁极分布式要高,漏磁略大,导致轭部集中式电磁铁产生的悬浮力要略小于磁极分布式。在相同的悬浮力设计输入要求下,前者电磁铁的轭部易发生磁密饱和。因此将图 3(b)作为后文纯励磁式悬浮电磁铁优化设计的基本拓扑结构。

目前已有诸多文献针对混合式悬浮结构的控制特性进行了分析,肯定了混合式悬浮结构“零功率”悬浮的可行性^[20-21]。从这些文献中可以看出永磁体的放置位置一般为磁极表贴式和轭部内置式两种,如图 4 所示。前者的优势在于安装固定方便,但存在永磁体易撞击问题;后者对永磁体起到了很好的保护作用,但永磁体的截面面积受限制,面积太大会影响电磁铁的体积与重量,且系统安装不便。

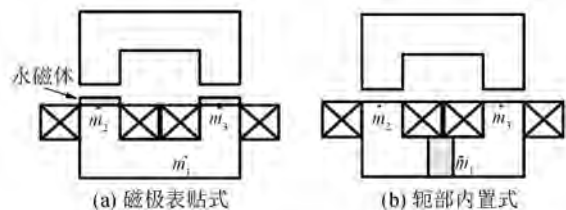


图 4 混合励磁式悬浮电磁铁结构示意图

在导轨、铁心尺寸以及气隙大小相同的情况下,对比图 4 两种励磁结构形式的 Ansoft 有限元仿真结果,如表 2 所示。

表 2 两种混合励磁式结构有限元仿真对比

参数名称	磁极表贴式	轭部内置式
电流安匝数/ At	0	0
永磁体厚度/mm	20(每极 10)	20
m_1 点磁密/T	0.638	0.794
m_2 点磁密/T	0.699	0.316
m_3 点磁密/T	0.699	0.316
悬浮力/N	1 355.2	282.4

从表 2 可以看出,因轭部内置式的永磁体漏磁太大,导致其产生的悬浮力远小于磁极表贴式,且磁极表贴式铁心磁密分布更均匀。在相同的悬浮力设计输入要求下,磁极表贴式的永磁体材料消耗更少,也无需增大电磁铁铁心轭部的厚度;对于磁极表贴式永磁体的保护问题,可采用弹性护罩进行保护,一定程度上也能起到永磁体与导轨之间防吸死的作用。为此将图 4(a)作为下文混合励磁式悬浮电磁铁优化设计的基本拓扑结构。

2.3 悬浮电磁铁的等效磁路模型

由于可以将纯电励磁式悬浮电磁铁看成是混合励磁式结构中永磁体厚度为零的一种特殊形式,利用等效磁路法只建立混合励磁式悬浮电磁铁的数学模型。

在开始分析之前,先作如下假设:(1)忽略励磁线圈和永磁体的漏磁通;(2)在混合励磁式悬浮电磁铁的磁路中,认为铁磁材料的磁导率无穷大,即忽略铁心和导轨中的磁阻,磁势均匀地降落在气隙和永磁体上。则混合励磁式悬浮电磁铁的等效磁路模型如图 5 所示。

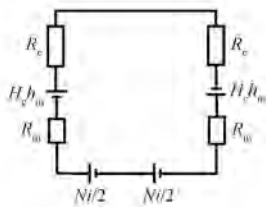


图 5 混合励磁式悬浮电磁铁的等效磁路模型

在图 5 中, R_c 为每个气隙的磁阻, R_m 为永磁体的磁阻, i 为励磁线圈电流, N 为励磁线圈总匝

数, $Ni/2$ 为每个铁心磁极上励磁线圈产生的磁势, h_m 和 H_c 分别是永磁体厚度和矫顽力, $H_c h_m$ 为永磁体磁势。与计算电阻的方法类似,气隙和永磁体的磁阻计算表达式为

$$\begin{cases} R_c = \frac{z}{\mu_0 S} \\ R_m = \frac{h_m}{\mu_m S} = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_r S} \end{cases} \quad (1)$$

式中: z ——悬浮气隙大小;

μ_0 ——真空磁导率;

μ_m ——永磁体磁导率;

μ_r ——永磁体相对磁导率;

S ——电磁铁单个磁极的横截面积。

则由磁路模型计算磁通表达式为

$$\Phi(i, z) = \frac{Ni + 2H_c h_m}{2R_c + 2R_m} = \frac{\mu_0 S (Ni + 2H_c h_m)}{2z + \frac{2h_m}{\mu_r}} \quad (2)$$

气隙中的磁感应强度为

$$B = \frac{\Phi(i, z)}{S} = \mu_0 \frac{Ni + 2H_c h_m}{2z + \frac{2h_m}{\mu_r}} \quad (3)$$

进而计算混合励磁式电磁铁与导轨的电磁吸力为

$$f_m = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \mu_0 S \left(\frac{Ni + 2H_c h_m}{2z + \frac{2h_m}{\mu_r}} \right)^2 \quad (4)$$

当 $h_m = 0$ 时,可得纯电励磁式电磁铁悬浮力计算公式为

$$f_c = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \frac{\mu_0 S}{4} \left(\frac{Ni}{z} \right)^2 \quad (5)$$

2.4 悬浮电磁铁的电磁设计

电磁设计前,先根据悬浮系统设计输入要求设定初始条件,具体如下。

(1) 单电磁铁悬浮总重为 M_z 。

(2) 电磁铁运动特性。电磁铁能以 $1g$ 的最大加速度上下起浮与降落,到达额定气隙时可以保持稳定悬浮,其中 g 为重力加速度。(说明:由于电磁铁最大的下降加速度不超过 $1g$,则考虑控制的对称性,设定悬浮电磁铁在起浮位置也能以 $1g$ 的加速度起浮。)

(3) 气隙工作范围。额定气隙的选取将直接影响电磁铁的自重和造价。由于悬浮力与气隙大

小的平方成反比,因此气隙应愈小愈好,但考虑加工误差、安全因素以及目前已实现商业运营的高、低速磁浮列车的气隙选取情况^[22],将悬浮电磁铁的额定气隙选为 $z_e = 10 \text{ mm}$,起浮气隙选为 $z_q = 20 \text{ mm}$,整个工作气隙范围处于 $0 \sim 20 \text{ mm}$ 。

(4) 额定气隙磁密 B_e 。选取合适的气隙磁密有助于电磁铁在控制过程中拥有较大的可控范围和较好的稳定性。对于比较典型的铁磁材料(如硅钢),其饱和磁密为 $1.5 \sim 1.8 \text{ T}$,本文假定电磁铁铁心的最大磁密为 1.8 T 。由于漏磁影响,使得气隙饱和磁密只能达到约 1.2 T 。为使电磁铁工作在材料磁特性曲线($B-H$ 曲线)的线性段,且允许有 50% 的过载裕度,这里选取 0.6 T 作为气隙的额定磁密。

2.4.1 纯电励磁式悬浮电磁铁的设计

(1) 铁心磁极截面面积 S_c 。根据悬浮要求,电磁铁在额定气隙下,悬浮力等于悬浮总重(含电磁铁自重与外加负载),则由式(5)可使电磁铁铁心磁极的截面面积 S_c 满足如下方程:

$$\frac{B_e^2 S_c}{\mu_0} = M_z g \quad (6)$$

(2) 线圈最大电流安匝数 $N_{i_{\text{cmax}}}$ 。根据悬浮要求,电磁铁在起浮气隙 z_q 下,其起浮加速度应有 $1g$,则由式(5)可得线圈起浮电流安匝数 $N_{i_{\text{cq}}}$ 满足如下方程:

$$\mu_0 S_c \left(\frac{N_{i_{\text{cq}}}}{2z_q} \right)^2 = 2 \frac{B_e^2 S_c}{\mu_0} \quad (7)$$

根据悬浮要求,电磁铁在额定气隙 z_e 下能保持稳定悬浮,则由式(5)可得线圈额定电流安匝数 $N_{i_{\text{ce}}}$ 满足如下方程:

$$\mu_0 S_c \left(\frac{N_{i_{\text{ce}}}}{2z_e} \right)^2 = \frac{B_e^2 S_c}{\mu_0} \quad (8)$$

根据悬浮要求:电磁铁需达到 $1g$ 的下降加速度,而在不通电的情况下,纯电励磁电磁铁发生自由落体,其下降加速度可达 $1g$ 。

显然 $z_q > z_e > 0$,线圈最大电流安匝数 $N_{i_{\text{cmax}}} = N_{i_{\text{cq}}}$ 。

(3) 线圈最小截面面积 S_{cxmin} 。考虑起浮只是个瞬态过程,电磁铁主要在额定气隙下长时间稳定悬浮,因此纯电励磁线圈将以额定气隙下所需线圈安匝数 $N_{i_{\text{ce}}}$ 作为线圈最小截面面积的设计标准。若已知线圈槽满率(包含绝缘部分)为 k 、

励磁线圈电流密度为 J_e ,则单个线圈最小截面面积 S_{cxmin} 为

$$S_{\text{cxmin}} = \frac{N_{i_{\text{ce}}}}{2J_e k} \quad (9)$$

2.4.2 混合励磁式悬浮电磁铁的设计

(1) 铁心磁极截面面积 S_h 。假定永磁体截面尺寸和铁心磁极截面尺寸相同,则气隙磁路截面面积依然等于电磁铁铁心磁极截面面积 S_h ,因此在不改变电磁铁悬浮总重和额定气隙磁密的情况下,混合励磁与纯电励磁式的电磁铁磁极截面面积相同(即 $S_h = S_c$)。这也证明了混合励磁与纯电励磁式悬浮电磁铁的磁路模型的兼容性。

(2) 永磁体厚度 h_m 。根据悬浮要求,电磁铁在额定气隙 z_e 下,悬浮力等于悬浮总重。混合励磁式主要悬浮力都来自永磁体,为实现“零功率”悬浮(即线圈额定电流安匝数 $N_{i_{\text{he}}} = 0$),则由式(4)可使永磁体厚度满足如下方程:

$$\mu_0 S_h \left(\frac{N_{i_{\text{he}}} + 2H_c h_m}{2z_e + \frac{2h_m}{\mu_r}} \right)^2 = \frac{B_e^2 S_h}{\mu_0} \quad (10)$$

(3) 线圈最大电流安匝数 $N_{i_{\text{hmax}}}$ 。根据悬浮要求,电磁铁在起浮气隙 z_q 下,其起浮加速度应有 $1g$,则由式(4)可使线圈起浮电流安匝数 $N_{i_{\text{hq}}}$ 满足如下方程:

$$\mu_0 S_h \left(\frac{N_{i_{\text{hq}}} + 2H_c h_m}{2z_q + \frac{2h_m}{\mu_r}} \right)^2 = 2 \frac{B_e^2 S_h}{\mu_0} \quad (11)$$

根据悬浮要求,电磁铁在额定气隙下需保持稳定悬浮,而此时悬浮力都来自于永磁体,因此励磁电流为零。

根据悬浮要求,电磁铁在悬浮过程中能以 $1g$ 加速度快速降落,表明线圈电流安匝数足以抵消永磁体磁势,则由式(2)可使线圈电流安匝数 $N_{i_{\text{hj}}}$ 满足如下方程:

$$N_{i_{\text{hj}}} = 2H_c h_m \quad (12)$$

则线圈最大电流安匝数 $N_{i_{\text{hmax}}} = \max \{ N_{i_{\text{hj}}}, N_{i_{\text{hq}}} \}$ 。

(4) 线圈最小截面面积 S_{hxmin} 。混合励磁式气隙主磁场来自永磁体,而励磁线圈起调节控制作用,只是暂时通电。因此,励磁线圈将以最大线圈电流安匝数 $N_{i_{\text{hmax}}}$ 作为线圈最小截面面积设计标准,且其电流密度 J_h 取值可以略大一些,则单个线圈最小截面面积 S_{hxmin} 为

$$S_{h_{\min}} = \frac{Ni_{h_{\max}}}{2J_h k} \quad (13)$$

2.5 悬浮电磁铁的结构设计与优化

混合励磁式悬浮电磁铁的结构如图 6 所示。纯电励磁式悬浮电磁铁应在混合励磁式结构的基础上去掉永磁体。本文假定导轨与电磁铁铁心形状材料均相同,因此下文将只对电磁铁进行结构设计,默认导轨的形状尺寸与电磁铁铁心相同。

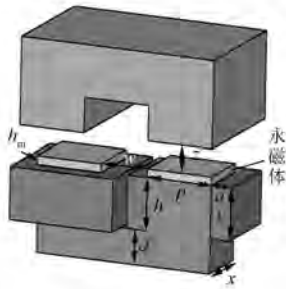


图 6 混合励磁式悬浮电磁铁结构简图

假定悬浮电磁铁的初始设计参数如表 3 所示。

表 3 悬浮电磁铁的初始设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
悬浮总重 M_z/kg	250	永磁体密度 $\rho_3/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 500
额定气隙 z_e/mm	10	永磁体矫顽力 $H_c/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$	9.79×10^5
起浮气隙 z_q/mm	20	永磁体相对磁导率 μ_r	1.05
额定气隙磁密 B_e/T	0.6	真空磁导率 $\mu_0/(\text{H}\cdot\text{m}^{-1})$	$4\pi\times 10^{-7}$
线圈槽满率 k	0.7	重力加速度 $g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
铁心密度 $\rho_1/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 850	纯电励磁式线圈电流密度 $J_c/(\text{A}\cdot\text{mm}^{-2})$	1.5
励磁线圈密度 $\rho_2/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 700	混合励磁式线圈电流密度 $J_h/(\text{A}\cdot\text{mm}^{-2})$	8.0

注:电磁铁由硅钢片叠压而成;励磁线圈采用铝导线;永磁体材料为牌号 N45SH 的钕铁硼。

将表 3 参数代入式(6)~式(13),则可得纯电励磁与混合励磁式悬浮电磁铁的设计参数,如表 4 所示。

基于表 4 的电磁设计参数,以浮重比为目标

表 4 电磁铁的设计参数

参数名称	纯电励磁式	混合励磁式
铁心磁极截面面积/ mm^2	8 552.1	8 552.1
线圈最大电流安匝数/ At	27 009	20 891
线圈额定电流安匝数/ At	9 549.3	0
线圈最小截面面积/ mm^2	4 547.3	1 865.3
永磁体厚度/ mm	-	18.2(每极 9.1)

对电磁铁进行结构优化。浮重比是指悬浮力与电磁铁自身重力之比,是用于衡量系统悬浮性能的关键指标之一。电磁铁自重、浮重比与其结构尺寸相关,计算过程如下。

铁心质量:

$$M_1 = \rho_1 [(w + 2p)(d + h) - wh]x \quad (14)$$

式中: p, x ——铁心磁极的极宽与极长;

w, h ——铁心凹槽的槽宽与槽高;

d ——铁心轭部厚度。

单个混合悬浮电磁铁质量:

$$M_z = M_1 + M_2 + M_3 \quad (15)$$

励磁线圈质量:

$$M_2 = 2\rho_2 ac(2x + 2p + 4a) \quad (16)$$

永磁体质量:

$$M_3 = 2\rho_3 pxh_m \quad (17)$$

式中: a, c ——励磁线圈截面的宽度与长度。

浮重比:

$$\zeta = \frac{f_m}{M_z g} \quad (18)$$

利用参数变量法对电磁铁结构进行 Ansoft 有限元分析,以获取其设计规律,为结构优化积累经验。

2.5.1 纯电励磁式悬浮电磁铁

(1) 凹槽槽深 h 与槽宽 w 。从图 3 可知,励磁线圈截面的长度 c 与宽度 a 将直接决定电磁铁凹槽的槽深 h 与槽宽 w 。其换算关系为: $h=c, w=2a$ 。从式(14)~式(18)可知 a, c, h, w 的变化不仅决定着电磁铁自重 M_z ,还影响着浮重比 ζ 的大小。文献[16]通过理论计算表明:在保证励磁线圈截面面积 ac 等于定值的情况下,当 $a:c=1:1$ 时, M_z 取得最小值。但本文是以浮重比为优化目标, ζ 的取值不仅与 M_z 有关,还与电磁铁悬浮力 f_m 直接相关。

为进一步分析励磁线圈截面尺寸对浮重比的

影响,基于表 4 纯电动励磁式电磁铁的设计参数,假定一组电磁铁设计参数如表 5 所示,通过 Ansoft 有限元仿真分析得到 ζ 与 a 的关系曲线,如图 7 所示。

表 5 电磁铁假定参数(励磁线圈截面尺寸变化)

参数名称	参数值	参数名称	参数值
磁极极宽 p/mm	92.5	磁极极长 x/mm	92.5
轭部厚度 d/mm	92.5	额定气隙 z_c/mm	10.0
额定电流安匝数/ At	9 549.3	线圈截面面积/ mm^2	4 547.3

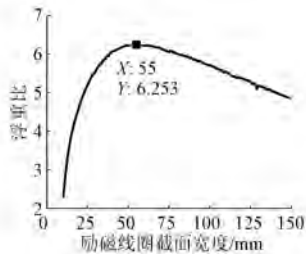


图 7 浮重比与励磁线圈截面宽度的关系曲线

从图 7 可以看出,随着 a 的增加, ζ 先快速上升,后平缓下降;在 $a = 55.0 \text{ mm}$ 时, ζ 取最大值 6.253。因此,依据上述分析可预设电磁铁的励磁线圈极面尺寸为 $55.0 \text{ mm} \times 82.7 \text{ mm}$,电磁铁凹槽尺寸为 $55.0 \text{ mm} \times 165.4 \text{ mm}$ 。

(2) 磁极极宽 p 、轭部厚度 d 。从式(14)可知,磁极极宽 p 和轭部厚度 d 都影响着电磁铁自重 M_z ,而 p 和 d 的选取又决定着铁心磁密的分布,因此 p 和 d 需同时进行优化设计。为提高电磁铁的浮重比,采用与电磁铁凹槽相同的优化方法,通过 Ansoft 有限元软件对 p 和 d 进行参数化扫描,获得在额定气隙下不同 p 、 d 组合产生的悬浮力,再通过式(14)~式(18)换算得到浮重比(如图 8 所示)。

考虑电磁铁涡流损耗问题,其磁极极宽 p 不

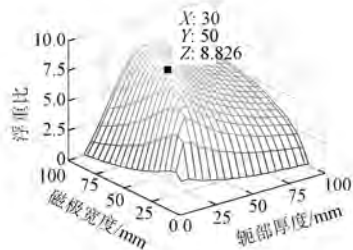


图 8 纯电动励磁式电磁铁磁极极宽-轭部厚度与浮重比的关系

应大于极长 x ,则 p 的取值范围为 $(0, 92.5]$ 。从图 8 可知,当 $p = 50.0 \text{ mm}$ 、 $d = 30.0 \text{ mm}$ 时,浮重比取最大值。

(3) 结构检验。为了达到电磁铁的结构设计要求,应使优化后的电磁铁在任何气隙下都不发生磁密饱和问题。纯电动励磁式电磁铁在起浮气隙下加最大电流安匝数时,容易发生磁密饱和问题,为此采用 Ansoft 有限元软件对设计后的结构进行磁密检查,磁密分布如图 9 所示。结构检验前后两种电磁铁的有限元仿真对比如表 6 所示。

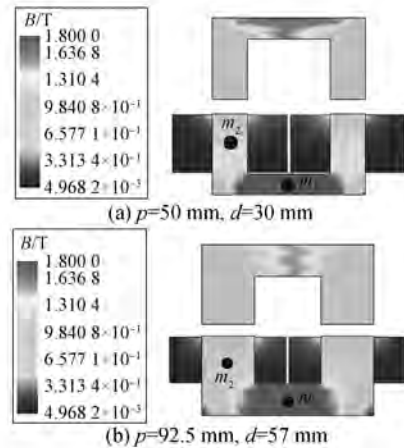


图 9 结构检验前后两种电磁铁起浮气隙下磁密图

表 6 结构检验前后两种电磁铁的有限元仿真对比

电磁铁结构	图 9(a)对应结构	图 9(b)对应结构
m_1 点磁密/T	1.978	1.786
m_2 点磁密/T	1.195	1.100

从图 9(a)、表 6 可知其铁心轭部磁密达到 1.978 T,而从悬浮要求可知电磁铁铁心的饱和磁密为 1.8 T,则可以通过增加电磁铁轭部厚度 d 来消除轭部磁密饱和问题。为此先增加 d ,并代入电磁铁磁极极宽-轭部厚度与浮重比的数据库(即图 8 仿真数据库),在同一 d 值下,选取 ζ 值最高的 p ,后将选取好的电磁铁结构尺寸代入 Ansoft 有限元软件进行结构检验,如此反复选取,直到电磁铁通过结构检验为止。最终得到 $p = 92.5 \text{ mm}$ 、 $d = 57.0 \text{ mm}$,其磁密如图 9(b)所示。

2.5.2 混合励磁式电磁铁

混合励磁式电磁铁与纯电动励磁式电磁铁结构设计方法相同,主要区别在于混合励磁式电磁铁在磁极上加入了永磁体,并根据励磁线圈最小截

面尺寸调节电磁铁凹槽大小。其设计结果如表 7 所示。

表 7 纯电励磁与混合励磁式电磁铁的结构设计参数对比

参数名称	纯电励磁式	混合励磁式
电磁铁磁极极宽 p/mm	92.5	92.5
电磁铁磁极极长 x/mm	92.5	92.5
电磁铁轭部厚度 d/mm	57.0	57.0
电磁铁凹槽槽宽 w/mm	165.4	58.3
电磁铁凹槽槽深 h/mm	55.0	32.0
永磁体厚度/ mm	—	9.1
悬浮模块自重/ kg	48.60	34.41
浮重比	8.40	13.11

3 纯电励磁与混合励磁式电磁铁的设计对比

将纯电励磁与混合励磁式悬浮电磁铁的结构设计参数以及浮重比进行对比分析,如表 7 所示。

从表 7 可以看出:(1) 优化后的混合励磁式电磁铁结构与纯电励磁式相比,主要区别在于电磁铁凹槽尺寸不同以及永磁体的加入,进一步表明磁极表贴式永磁体与纯电励磁式电磁铁结构拥有良好的兼容性;(2) 永磁体的加入使混合励磁式电磁铁凹槽面积不到纯电励磁式的 1/2,大幅减小了电磁铁体积与自重,提高了电磁铁的浮重比,增加了系统的有效载荷;(3) 在以浮重比为优化目标时,两种电磁铁磁极截面长宽之比均为 1:1。

4 结 语

本文针对高速磁浮滑橇系统提出了一套以浮重比为优化目标、纯电励磁与混合励磁通用的常导电磁铁设计流程,采用等效磁路法得到了电磁铁的数学模型,并根据悬浮系统的设计输入要求,完成了纯电励磁和混合励磁式悬浮电磁铁的设计。在此基础上,借助 Ansoft 有限元仿真软件,完成了上述两种悬浮电磁铁结构的优化。

分析两者的主要设计参数,结果表明:(1) 混合励磁式电磁铁可以由纯电励磁式改造而成,磁极表贴式的永磁体与纯电励磁式悬浮电磁铁的铁心结构之间具有良好的兼容性;(2) 永磁体的加入使混合励磁式电磁铁凹槽面积缩小一半,大幅

减小了电磁铁体积与自重,提高了电磁铁的浮重比,增加了系统的有效载荷;(3) 在铁心饱和磁密为 1.8 T 的限制条件下,电磁铁磁极的极长与极宽之比为 1:1 时,浮重比最高。

该设计流程借助 Ansoft 有限元分析软件对悬浮电磁铁进行了参数化仿真,方法简单,整个数据处理过程易操作。本文为实际工程中对常导电磁铁的结构设计提供了一定的参考,对基于常导电磁悬浮技术的高速滑橇系统的建立及其电磁结构的进一步优化设计具有一定的参考价值。

【参考文献】

- [1] 曾中坚,徐雅丽.火箭橇试验的应用和发展[J].航空与航天,2001(2): 29.
- [2] 杨兴邦.XB 高精度火箭橇试验滑轨[J].中国工程科学,2000,2(10): 98-104.
- [3] 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.
- [4] BERGERON D A. Holloman high speed test track maglev program update[R]. AIAA 2010-1707.
- [5] 李杰,吴峻,李晓龙,等.磁悬浮控制发展研究[R]. 2010-2011 控制科学与工程学科发展报告,2011.
- [6] MURAI T, HASEGAWA H. Electromagnetic analysis of inductrack magnetic levitation [J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 142(1): 67-74.
- [7] HOOSER M D. The Holloman high speed test track magnetically levitated (MAGLEV) sled six degree-of-freedom model[R]. AIAA 2010-1706.
- [8] GUROL H, KERCHEN D, HOLLAND L, et al. Status of the Holloman high speed maglev test track (HHSMTT) [C] // 30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2014: 2655.
- [9] LOUANN T. LLNL inductrack progress report [R]. UC-RL-CR-138459.
- [10] 邓自刚,李海涛.高温超导磁悬浮车研究进展[J].中国材料进展,2017,36(5): 329-334.
- [11] 李冠醇,李杰,陈强.应用于高速滑橇的电动悬浮和电磁推进系统设计[J].推进技术,2017,38(7): 1468-1474.
- [12] 鲜为人知的大国重器——火箭橇滑轨 [N/OL]. 中国航空报, 2018-04-26 [2018-06-14]. <http://www.cannews.com.cn/2018/0426/174773.shtml>

(下转第 96 页)

其他材料也可参考上述规定选取。

(2) 外筒壁强度计算。外筒壁临界压力 p_{cr} 计算:

$$p_{cr} = \frac{2[\sigma]^t \phi t_2}{D_2 + t_2} \quad (13)$$

式中: $[\sigma]^t$ ——材料在设计温度下的许用应力;

ϕ ——焊接接头系数;

D_2 ——外筒壁内径;

t_2 ——外筒壁厚。

对于常温下外筒壁材料许用应力 ($-20\text{ }^\circ\text{C} \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$) 计算为

$$[\sigma]^t = \min \left\{ \frac{\sigma_b}{n_b}, \frac{(\sigma)_{0.2}}{n_s} \right\} \quad (14)$$

式中: σ_b ——抗拉强度;

$\sigma_{0.2}$ ——屈服强度;

n_b ——抗拉强度系数;

n_s ——屈服安全系数。

常温下,碳钢和低合金钢的抗拉强度系数为 2.7;碳钢和低合金钢的屈服强度系数为 1.5。

根据 GB/T 150.1—2011《压力容器 第 1 部分:通用要求》4.5.2.2,钢制压力容器的焊接接头

系数规定如下。

(1) 双面焊对接接头和相对于双面焊的全焊透对接接头。全部无损检测,取 ϕ 为 1.0;局部无损检测,取 ϕ 为 0.85。

(2) 单面焊对接接头(沿焊缝根部全长有紧贴基本金属的垫板)。全部无损检测,取 ϕ 为 0.9;局部无损检测,取 ϕ 为 0.8。

4 结 语

通过对水冷电机水路结构介绍、水路结构参数及水路外壳强度的计算及分析,为行业设计人员在设计此类电机时提供依据,提高水冷电机设计的可靠性及准确性。

【参考文献】

- [1] YBC系列采焊机截割部用隔爆型三相异步电动机:MT/T 476—2011[S].
- [2] YBS系列输送机用隔爆型三相异步电动机:MT/T 478—2011[S].
- [3] 压力容器 第 1 部分:通用要求:GB/T 150.1—2011[S].

收稿日期:2018-07-01

(上接第 73 页)

- [13] 金志颖,杨仕友,倪光正,等.EMS型磁悬浮列车电磁系统动态电磁场的有限元分析及其悬浮与牵引力特性的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(10):133-137.
- [14] 王厚生,杜玉梅,夏平畴,等.电动式磁悬浮列车金属板轨道结构的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(7):162-165.
- [15] 陈贵荣,常文森.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.
- [16] 尹力明,陈贵荣.吸力型磁悬浮列车的悬浮电磁铁的设计原理和计算方法[J].机车电传动,1992(5):14-19.
- [17] 张颖,陈慧星,吴志添,等.电磁永磁混合磁悬浮列车的磁铁结构优化设计[J].机车电传动,2008(5):30-32.
- [18] 李云钢,张晓,程虎,等.EMS磁悬浮列车的零电流

型永磁电磁混合磁铁设计技术研究[J].机车电传动,2011(5):30-32.

- [19] 李云钢,闫宇壮,程虎.混合EMS型磁悬浮列车的悬浮磁铁设计与分析[J].国防科技大学学报,2006,28(5):94-98.
- [20] 李云钢,程虎,张鼎.EMS型电磁永磁混合悬浮控制问题[C]//第二十四届中国控制会议论文集,2005:871-873.
- [21] WANG L, YU P, LI J, et al. A practical magnetic flux density observer for hybrid suspension system of maglev train[C]//第36届中国控制会议论文集(G),2017:9926-9933.
- [22] 张瑞华,严陆光,徐善纲,等.几种典型的高速磁悬浮列车方案比较[J].电工电能新技术,2004,23(2):46-50.

收稿日期:2018-07-02