



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 111762028 A

(43) 申请公布日 2020.10.13

(21) 申请号 202010718516.5

(22) 申请日 2020.07.23

(71) 申请人 苏州英磁新能源科技有限公司
地址 215027 江苏省苏州市苏州工业园区
苏虹中路200号综合保税区A区环普国
际产业园三期3A厂房

(72) 发明人 裴瑞琳 高凌宇 张航 张翔健

(74) 专利代理机构 上海世圆知识产权代理有限
公司 31320

代理人 王佳妮

(51) Int. Cl.

B60L 13/04 (2006.01)

E01B 25/30 (2006.01)

E01B 25/32 (2006.01)

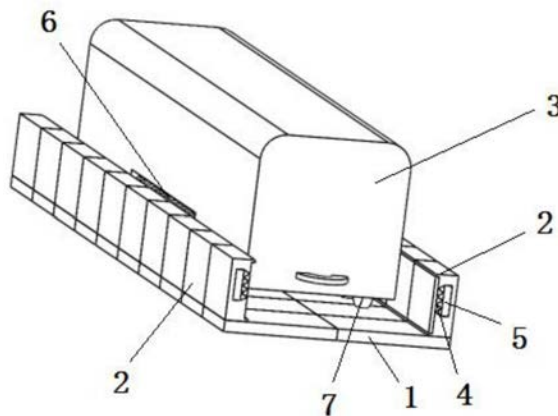
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道

(57) 摘要

一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,包括并行排列的两根轨道,其特征在于所述两根轨道内嵌有永磁体阵列和超导驱动模块,所述超导悬浮列车的两侧对应位置设置有悬浮与驱动并用的超导悬浮线圈;所述永磁体阵列由若干个不同充磁方向的多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形。本发明采用不同充磁方向的永磁体拼接形成永磁体阵列,通过三角形、矩形等的不同拓扑结构,不仅仅可以完成水平、竖直方向的磁钢充磁,还可以完成与水平方向不同角度的充磁。通过充磁角度的调整,轨道截面有规律排布的永磁体的充磁方向将可以更逼近空气中自由传播的磁场方向,以实现更好效果的磁场增强。



1. 一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,包括并行排列的两根轨道、超导悬浮列车,其特征在于所述两根轨道内嵌有永磁体阵列和超导驱动模块,所述超导悬浮列车的两侧对应位置设置有悬浮与驱动并用的超导悬浮线圈;所述永磁体阵列由若干个不同充磁方向的多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形。

2. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于所述多边形永磁体为三角形、矩形、和六边形中的一种或多种的组合。

3. 如权利要求2所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于所述永磁体阵列由若干块等边三角形永磁体上下相扣,组装方便。

4. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于对于单排等边三角形永磁体阵列,永磁体个数 Z 满足 $Z=4*n+3$, ($n \in \mathbb{N}^*$)。

5. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于所述永磁体阵列有若干块正六边形永磁体拼接而成,在相邻两块六边形永磁体的间隙部位设置正三角形永磁体。

6. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于超导悬浮线圈采用超导带材进行缠卷冷却并充磁制成,以提供超强的稳定磁场。

7. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于,所述轨道包括轨道底板,位于轨道两侧的轨道侧板,超导悬浮列车位于轨道底板上方,且位于两个轨道侧板之间,所述轨道侧板内嵌入有永磁体阵列,超导驱动模块采用驱动用直线电机定子线圈,驱动用直线电机定子线圈设置于永磁体阵列外侧,超导悬浮列车侧面对应位置设置有超导悬浮线圈,所述超导悬浮列车底部设有可收缩辅助轮。

8. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于,所述永磁体阵列中,相邻的多边形永磁体充磁方向不同,并且相邻磁钢的充磁方向形成一定的夹角 β , $\beta \leq 90^\circ$ 。

9. 如权利要求1所述的磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,其特征在于,所述多边形永磁体采用钕铁硼永磁体或钕钴永磁体制成。

一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道

技术领域

[0001] 本发明涉及超导磁悬浮技术领域,具体为一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道。

技术背景

[0002] 目前通用的超导体为第二类超导体,其在混合状态中表现的迈斯纳效应并不完全,较薄的超导体会在内部形成量子化的磁通管道,以使得磁力线得以通过。通过的这部分磁力线将对超导材料实现钉扎作用,若产生位置偏离,磁力线将以更长的路径穿过磁通管道,则根据第一定理,会产生使超导材料回复到原有位置的作用力。因此,第二类超导体的高温超导悬浮系统具有自稳定的性质,而且并不需要额外的控制系统。

[0003] 现有技术中,实现的高温超导材料悬浮是指常用的钇钡铜氧超导体(YBCO)、钐系氧化物超导体(GdBaCuO)等与稀土类ReBaCuO超导体的悬浮。悬浮过程通常为在恒定磁场中使得材料冷却至临界温度以下,被恒定磁场捕获,以实现超导体对于磁通的钉扎作用,此时的超导悬浮为自稳定的无源系统。

[0004] 传统超导悬浮模型中的永磁体导轨,仅通过永磁体以N-S的方式排列,以形成稳定磁场,达到使超导材料悬浮的目的,普通方案中为了增强永磁轨道上方的磁场,通常永磁体选用稀土永磁体,即使是这样,其轨道提供的表面磁场强度也非常低,对于超导体悬浮力的增强作用十分有限。

[0005] CN106240399 B、CN2027345548 U、CN105463957 B、CN102717725 A以及CN105803872 B、CN201049595 Y、以及CN106240398 B等发明为一个系列,在这一系列发明中,可以看出对上述永磁体阵列的永磁轨道的改进。传统永磁体阵列的充磁方向为竖直方向相反,这一系列发明中,永磁体的充磁方向不但有竖直方向相反,而且在水平方向相反,以起到对于传统永磁导轨磁上方磁场强度的增益。这些发明中所描述的用于超导列车悬浮的永磁体导轨均为特定的矩形磁钢,以沿水平、竖直两个方向上的特定充磁方向进行排列,以达到增加轨道上方磁场强度的目的。这些发明中对5块、7块、9块矩形磁钢的排列方式也进行了介绍,但其中的区别仅在于不同的磁钢排列产生单峰与多峰的磁场的区别。这一系列发明中不仅对矩形磁钢的长宽比,矩形磁钢与不同软磁材料的组合以及不同矩形磁钢组合之后的再组合进行了保护,其共同的目的与本发明相同,都是为了增加永磁体导轨上表面的磁场强度。这一系列发明仅就所选用的矩形磁钢进行了限定,并未限定磁钢可以使用不同拓扑结构,而且更没有涉及因为多边形拓扑结构磁钢的选择,永磁体可以有更多的充磁方向。

[0006] 发明CN106218441B为上述特定充磁方向组合成的永磁体制成导轨的应用,因为导轨本身的拓扑结构不同,所以应用原理不同,且本发明描述的永磁体导轨由于特定排列方式,会产生比此种方案更强的磁场,提供单位体积下更大的悬浮力。CN106671822A、CN206327183U也为超导悬浮列车的发明,与本发明属于相同的技术领域。

[0007] 悬浮列车也可以分为电磁吸力悬浮系统EMS(Electromagnetic Suspension)与电磁斥力悬浮EDS(Electrodynamical Suspension)。EMS系统成本较低,但需要实现对电磁力的

精确控制以达到悬浮效果,EDS悬浮稳定,且超导体悬浮可以通过钉扎效应提供导向力,是自稳定系统。

发明内容

[0008] 本发明的目的是针对上述现有技术存在的不足而提供一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道。

[0009] 本发明技术方案是:一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,包括并行排列的两根轨道、超导悬浮列车,其特征在于所述两根轨道内嵌有永磁体阵列和超导驱动模块,所述超导悬浮列车的两侧对应位置设置有悬浮与驱动并用的超导悬浮线圈;所述永磁体阵列由若干个不同充磁方向的多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形。

[0010] 进一步地,所述永磁体阵列中,相邻的多边形永磁体充磁方向不同,并且相邻磁钢的充磁方向形成一定的夹角 β , $\beta \leq 90^\circ$ 。

[0011] 进一步地,所述多边形永磁体为三角形、矩形、和六边形中的一种或多种的组合。

[0012] 进一步地,所述永磁体阵列由若干块等边三角形永磁体上下相扣,组装方便。

[0013] 进一步地,对于单排等边三角形阵列永磁体个数即永磁体个数 Z 满足 $Z = 4 * n + 3$, ($n \in \mathbb{N}^*$)。

[0014] 进一步地,所述永磁体阵列有若干块正六边形永磁体拼接而成,在相邻两块六边形永磁体的间隙部位设置正三角形永磁体。

[0015] 进一步地,超导悬浮线圈采用超导带材进行缠卷冷却并充磁制成,以提供超强的1-10T的稳定磁场,不但与永磁体阵列配合提供超导悬浮作用,还与驱动用直线电机定子线圈配合构成同步直线电机,超导悬浮线圈产生的超强稳定磁场作为该同步直线电机的动子,以实现超导悬浮列车的驱动。

[0016] 根据本发明的一个实施例,所述轨道包括轨道底板,位于轨道两侧的轨道侧板,超导悬浮列车位于轨道底板上方,且位于两个轨道侧板之间,所述轨道侧板内嵌入有永磁体阵列,超导驱动模块采用驱动用直线电机定子线圈,驱动用直线电机定子线圈设置于永磁体阵列外侧,超导悬浮列车侧面对应位置设置有超导悬浮线圈,所述超导悬浮列车底部设有可收缩辅助轮。

[0017] 驱动用直线电机定子线圈产生的驱动磁场峰值远小于永磁体阵列退磁曲线的膝点值,使得永磁体阵列不会永久性退磁,且驱动直线电机定子产生的驱动磁场与悬浮磁场在空间中彼此相垂直,不会相互影响。

[0018] 所述永磁体阵列由若干个不同充磁方向的多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形,其目的在于通过不同充磁方向的组合,模拟磁感线在空气中自由的能量传导路线,以最大程度的增强其表面单边磁场。

[0019] 所述多边形永磁体采用钕铁硼永磁体或钕钴永磁体制成。

[0020] 本发明采用永磁体阵列作为提供悬浮作用的悬浮导轨,超导悬浮列车搭载超导悬浮线圈,所述超导悬浮线圈采用超导带材进行缠卷冷却并充磁以提供超强的2-10T的稳定磁场,不但提供超导悬浮作用,还与超导驱动导轨构成直线电机,超导悬浮线圈产生的超强

稳定磁场作为该同步直线电机的定子,以实现超导悬浮列车的驱动。驱动用直线电机定子产生的驱动磁场峰值远低于永磁体导轨的退磁曲线的膝点值,使得永磁导轨不会永久性退磁,且驱动直线电机定子产生的驱动磁场与悬浮磁场在空间中彼此相垂直,不会相互影响。同时,采用不同充磁方向的永磁体拼接形成永磁体阵列,通过三角形、矩形等的不同拓扑结构,不仅仅可以完成水平、竖直方向的磁钢充磁,还可以完成与水平方向不同角度的充磁。通过充磁角度的调整,轨道截面有规律排布的永磁体的充磁方向将可以更逼近空气中自由传播的磁场方向,以实现更好效果的磁场增强。

附图说明

- [0021] 图1是本发明的一种用于演示超导悬浮列车原理的模型的效果图。
- [0022] 图2为该模型的局部放大图之一。
- [0023] 图3为该模型的局部放大图之二。
- [0024] 图4为该模型的局部放大图之三。
- [0025] 图5为该模型的局部放大图之四。
- [0026] 图6为现有技术中永磁体阵列的一种充磁方向示意图。
- [0027] 图7为本发明所述永磁体阵列的第一实施例的充磁方向示意图。
- [0028] 图8为本发明所述永磁体阵列的第二实施例的充磁方向示意图。
- [0029] 图9为采用软磁材料的永磁体阵列。
- [0030] 图10为导轨截面上方磁密通过有限元计算的优化结果图,每一条曲线代表不同的充磁角度。
- [0031] 图11为传统与多边形边数为3的等边三角形截面永磁体阵列磁力线对比。
- [0032] 图12为导轨上方10mm,传统矩形截面磁钢与三角形截面磁钢的磁场对比。
- [0033] 图13为导轨上方10mm,优化后的传统矩形截面磁钢与三角形截面磁钢的磁场对比。
- [0034] 图14为不同种多边形永磁体组成到导轨的示意图。

具体实施方式

- [0035] 下面结合附图对本发明做进一步说明。
- [0036] 一种磁悬浮列车系统及其悬浮轨道,包括轨道,所述轨道包括轨道底板1,位于轨道两侧的轨道侧板2,超导悬浮列车3位于轨道底板1上方,且位于两个轨道侧板2之间,其特征在于所述轨道侧板2内侧嵌入有永磁体阵列4,所述轨道侧板内还设有超导驱动模块5,所述超导驱动导轨采用驱动用直线电机定子线圈,超导悬浮列车3的两侧对应位置设置有悬浮与驱动并用的超导悬浮线圈6,所述超导悬浮列车底部设有可收缩辅助轮7。超导悬浮列车底部的可收缩辅助轮7,用于低速及停止时的支撑,当其进入高速悬浮状态时可收起。
- [0037] 超导悬浮列车想要正常沿直线方向行驶,需要两种力,一个是利用永磁体阵列为超导悬浮线圈提供悬浮力,使得列车不受摩擦力;还有一个是利用直线电机定子线圈和超导悬浮线圈配合提供驱动力,驱动超导悬浮列车加减速。本发明旨在增加导轨上方磁场以对超导悬浮线圈提供更大的悬浮力。
- [0038] 超导悬浮线圈采用超导带材进行缠卷冷却并充磁制成,以提供超强的2-10T的稳

定磁场,不但与永磁体阵列配合提供超导悬浮作用,还与驱动用直线电机定子线圈配合构成同步直线电机,超导悬浮线圈产生的超强稳定磁场作为该同步直线电机的动子,以实现超导悬浮列车的驱动。

[0039] 整个超导带材绕制而成的动子需要采用冷却液进行冷却。冷却可采用低温杜瓦,冷却液的选择可以选用但不局限于液氮液氦,冷却杜瓦内部的温度为1K-88K,优选的为4-30K。同时需要定期对超导悬浮线圈进行充磁维护,因为充好磁的超导悬浮线圈相当于超级永磁体,但是超导带材电阻并不完美的等于0,因此会有电流损耗,需要定期维护。维护时需向低温杜瓦加冷却液并控制内部压强,同时向超导悬浮线圈内通入电流充磁。

[0040] 驱动用直线电机定子线圈产生的驱动磁场峰值远小于永磁体阵列的退磁曲线的膝点值,使得永磁导轨不会永久性退磁,且驱动直线电机定子产生的驱动磁场与悬浮磁场在空间中彼此相垂直,不会相互影响。

[0041] 为了增加导轨上方磁场以对超导悬浮线圈提供更大的悬浮力,本发明的永磁体阵列由若干个不同充磁方向的多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形。本发明中,在平面中彼此相邻排列的磁钢块,不仅能实现水平和竖直方向的磁场方向,还可以通过拓扑结构的不同实现与平面内不同角度的磁场方向。相邻的磁钢充磁方向不同,相邻的磁钢充磁方向存在夹角 β , $\beta \leq 90^\circ$,这里的磁钢充磁方向可以不止上、下、左、右,更可以选择与水平线形成各个夹角的角度,比如 30° 、 45° 和 60° ,单排并列的多边形磁钢,相邻的磁钢充磁方向可以从左边第一块磁钢开始,沿着顺时针转动一定角度,比如转动 15° 、 30° 或者 60° 等。

[0042] 具体来说,本发明用最少量的多边形永磁体(比如等腰三角形、等腰梯形或者等腰六边形),通过对磁钢的充磁方向和排列方向进行调整形成特定阵列拓扑结构,增大导轨上方磁场强度和磁场强度有效面积,达到在上方产生单边更强的磁场,以增加在其上方悬浮的超导体的载重能力。

[0043] 如图所示,在本实施例中,所述永磁体阵列4由7块三角形永磁体上下相扣,组装方便。但是本领域技术人员应当理解,永磁体阵列4可以由若干个不同充磁方向是多边形永磁体拼接而成,所述多边形永磁体为可以通过平面旋转排列以填充整个平面的多边形组合或单一多边形,其目的在于通过不同充磁方向的组合,模拟磁感线在空气中自由的能量传导路线,以最大程度的增强其表面单边磁场。本发明所选用的永磁体为磁能积较大的稀土类永磁体,包括但不限于钕铁硼永磁体、钕钴永磁体等。

[0044] 图6所示的永磁体阵列采用的矩形磁钢不同充磁方向的平面排列结构,能实现水平和竖直方向的磁场方向。

[0045] 如图7所示,根据本发明的第一实施例,永磁体阵列采用等边三角形的平面排列结构,如图所示,该导轨由七块等边三角形永磁体正反相扣拼接而成的正梯形结构,其中每一块等边三角形永磁体的充磁方向指向不同方向不同位置,可实现平面内不同角度的磁场方向,此结构在三角形的每个顶角均需顶角处施加倒角,倒角曲率的大小会影响有磁场的空间分布,所述倒角需 $\geq 0.5\text{mm} \times 45^\circ$ 。

[0046] 如图8所示,根据本发明的第二实施例,永磁体阵列采用是由七块等边三角形正反相扣拼接而成的倒梯形结构,其中前三块的充磁方向从不同位置指向同一点,后三块是从同一点指向不同位置,最中间一块则是水平指向。这种排列方式较前一种排列方式较差,因

为实际生产中相同磁极汇聚到一起会造成三角形截面的磁钢产生部分退磁,从而影响单表面上的磁场分布,但是实验结果显示,其相对对比文献中的永磁体阵列结构仍能取得8~42%的磁场增益。

[0047] 本发明选用的具体实施案例为等边三角形、底角为60°的等腰梯形,但本发明保护范围不仅仅局限于此,例如底角为120°的六边形拓扑结构的磁钢也能在三维排列中发挥较好的效果。

[0048] 对于单排三角形阵列永磁体个数即磁钢块数Z满足 $Z=4*n+3$, ($n \in \mathbb{N}^*$)。

[0049] 永磁体的拓扑结构还可以为可以充满平面的多边形及多边形组合。优选的方案之一为,实施案例中的正三角形以及三角形与六边形组合,如图14所示。

[0050] 在满足上述公式的多边形磁钢组成的导轨中,第 $4*n$, ($n \in \mathbb{N}^*$)块多边形永磁体可以采用软磁材料进行替换,如图9所示,其中采用7块多边形永磁体构成的导轨中,第4块可以用软磁材料替换。

[0051] 对本发明所涉导轨各多边形磁钢的充磁方向进行推广,应先规定导轨上方边线平行的方向为水平方向,面对导轨截面,与水平方向垂直且指向右方的矢量方向为正方向,充磁角度 θ 角为与水平方向经逆时针正方向变化后的角度。上述永磁体导轨局部坐标系为右手系。 α 为本发明中阵列的第一块磁钢的充磁方向与水平向右方向的夹角,在本发明的第一实施例中,左边第一块磁钢的充磁方向为沿水平方向向右逆时针转动30°,然后从第一块磁钢开始,除第四块磁钢外,其余磁钢的充磁方向符合以下规律,即依次向右的每块磁钢的充磁方向较前一块磁钢的充磁方向逆时针转动60°,而第四块磁钢的充磁方向为水平向左,这样布设临近的磁钢的充磁方向不会造成磁极的汇聚和部分退磁现象的发生,可以清楚的看到图中,磁感线汇聚到一起形成磁场汇聚,起到进一步增强磁场的作用。

[0052] 作为推广,若规定从左往右第一块三角形磁钢的底边为水平方向,第一块三角形磁钢的充磁方向与水平向右方向的夹角为 α ($\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}]$), 整个永磁体阵列的每块磁钢的充磁方向与水平向右方向的夹角 θ ($\theta \in \mathbb{R}$), 夹角逆时针方向为正,则第 i 块磁钢 ($i \in \mathbb{N}^*$) 的充磁方向 $\theta(i) = \left(\left[\frac{i}{4} \right] + \left[\frac{i+3}{4} \right] \right) * \alpha + \left(\left[\frac{i+1}{4} \right] + \left[\frac{i+2}{4} \right] \right) * \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right)$, 函数中的 $[]$, 为取整函数。

[0053] 针对图8即第二实施例的充磁方式产生的问题,可以用软磁材料对中间部分的磁钢进行替换,具体实施方法如图9所示,图中灰色部分为替代的软磁材料,其内部磁通方向大体趋近于水平方向,添加软磁材料,将会大大降低左右两个磁极的磁场强度,这样就会减少相同磁极汇聚起来导致的退磁问题。但是,由于采用软磁材料对永磁体进行了替换,因此其表面的磁场强度将大幅降低,与本发明第一实施例的排列方式相比,其上方10mm的磁场强度下降15-30%,因此其对对比文献中的磁体阵列上方的磁场强度仅能达到 $\leq 12\%$ 的增益。而第一实施例则并不适用于使用软磁材料的优化方式,因为相邻的两个等边三角形截面的永磁体由于拓扑结构而使得磁场产生更大的旋度,所以若使用软磁材料进行磁通传导,则其内部会形成一涡旋的磁场,大大造成了能量的浪费,并降低表磁。

[0054] 图11所示为对比文献与图7所示的三角形截面永磁体的磁力线分布对比,经与传统的长方形磁钢相比,左边是传统的长方形磁钢组成的永磁体阵列磁力线,长方形磁钢的

充磁方向为上、下、左、右,右边是第一实施例的正三角形截面永磁体阵列磁力线,可以明显看出,采用的三角形截面永磁体将导轨上方磁场更好的汇聚成了单峰,对导轨上方磁场表现出更强的增强效果。

[0055] 通过对轨道上方10mm处的磁场分布情况进行有限元仿真计算,可以明显的看出本发明永磁体阵列对于传统永磁体阵列的增强效果,根据图10的计算结果,在相同永磁体截面积的情况下,即控制永磁体用量一定时,本发明达到的上方10mm磁场分布与传统矩形截面永磁体阵列上方10mm磁场分布对比如下。根据结果可以看出,磁场最大值从0.54T提升至0.9T,与传统方案的增益值可以达到惊人的67%,在考虑实际加工工艺影响以及倒角影响的情况下,增益能达到40-60%;图中,横轴为导轨水平距离,纵轴为导轨上方10mm处的磁通密度。

[0056] 为了进一步验证本发明所述充磁方式对于导轨上方10mm处磁场的增益程度,本发明中还对矩形截面永磁体的长宽比进行了优化,优化结果显示,在确定1260mm²截面积不变的情况下,传统矩形截面永磁体垂直方向充磁的永磁体宽度最优为9.1mm,水平方向充磁的永磁体矩形截面宽度为29.4mm,导轨的高度为14.6mm,其上方10mm达到的磁场强度最大值从0.54T提高至了0.63T,证明了优化方法的可行性。如图13所示,图中的横轴为导轨水平距离,纵轴为导轨上方10mm处的磁通密度,虚线为传统矩形最优充磁方案,经过尺寸优化后所能达到的最大磁密,实线为本发明第一实施例的等边三角形截面的永磁体阵列上方10mm的磁场分布,可以看出相比传统矩形最优充磁方案,本发明的增益效果依然能达到43%。排除加工工艺与倒角产生的影响,其增益效果依然能达到25%-40%。

[0057] 对导轨上方的悬浮力的计算方法为:

$$[0058] \quad F_B = \int_0^H \int_{L/2-\delta}^{L/2+\delta} \int_{W/2-\delta}^{W/2+\delta} J_c B_z dx dy dz$$

[0059] 其中 J_c 为临界电流密度; B_z 为垂直方向磁通密度; L 、 W 、 H 为悬浮的高温超导块材的长宽高; δ 为磁场穿透深度。

$$[0060] \quad \delta = \frac{B_z - \bar{B}}{\lambda \mu_0 J_c}$$

[0061] 其中 \bar{B} 为超导块捕获场; λ 为长岗系数; μ_0 为真空磁导率。

[0062] 从以上公式可以看出,悬浮轨道提供的悬浮力大小与导轨上方的磁场强度有关,因此本方案采用特殊的聚磁结构以增加导轨上方单侧的磁场,提供更大的悬浮力。

[0063] 如图14所示为不同种多边形永磁体组成到导轨的示意图。所述永磁导轨有若干块正六边形永磁体拼接而成,在相邻两块正六边形永磁体的上下间隙部位设置正三角形永磁体。其中正六边形的充磁方向为水平和垂直方向,而三角形永磁体的充磁方向则与水平方向呈30°夹角,且对应的上下两个正三角形充磁方向平行。

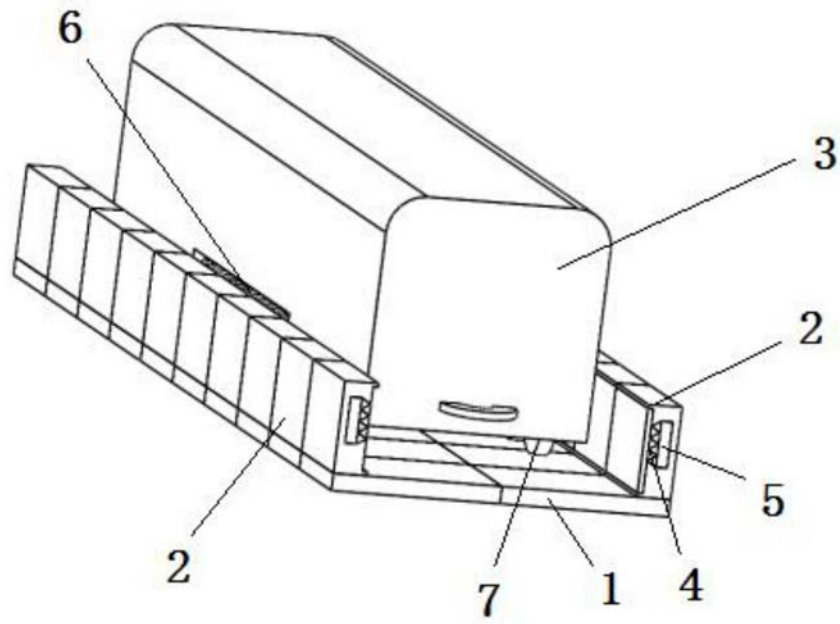


图1

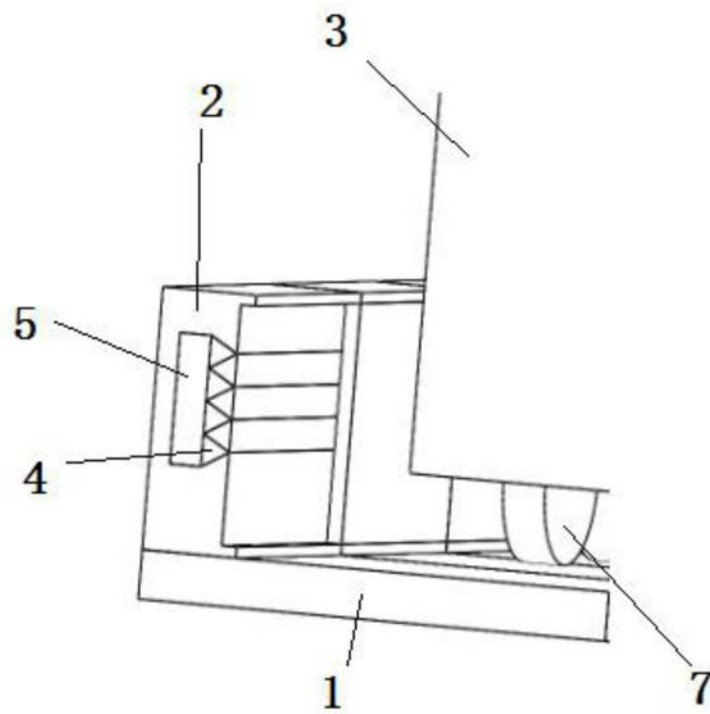


图2

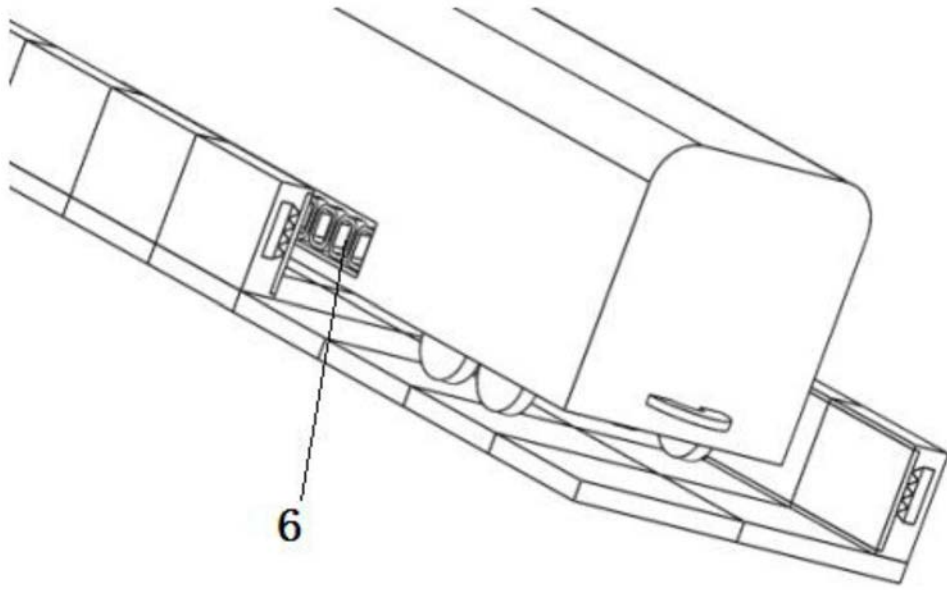


图3

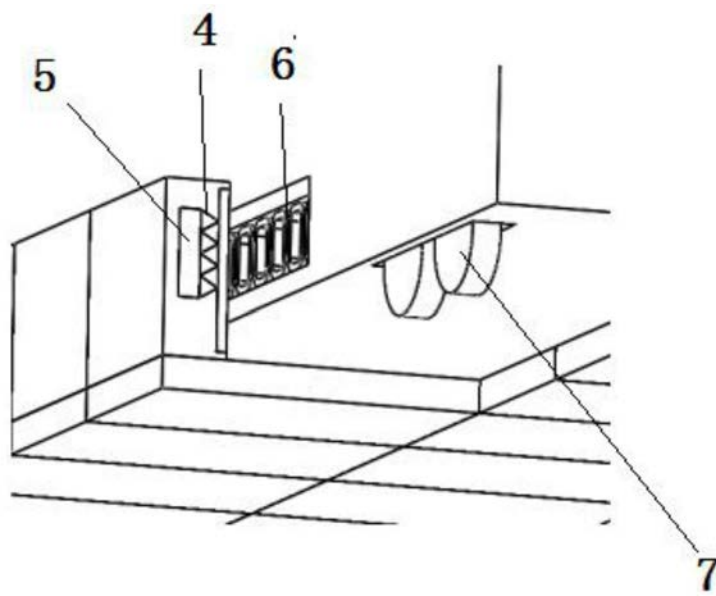


图4

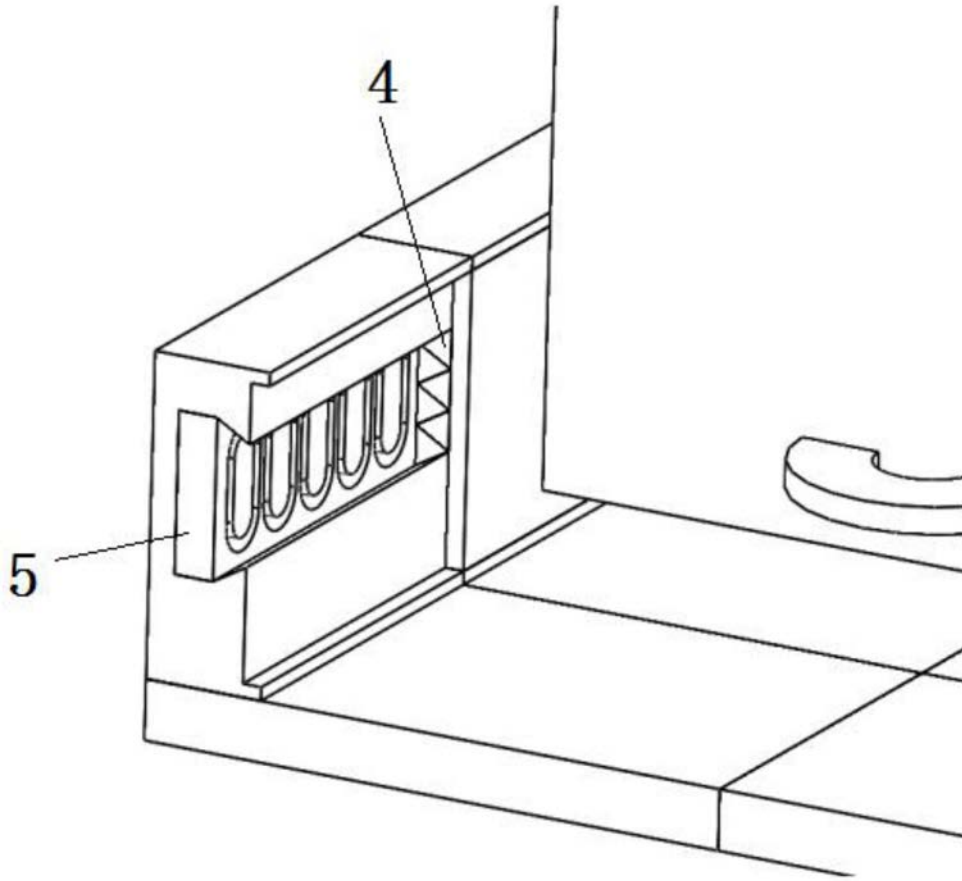


图5

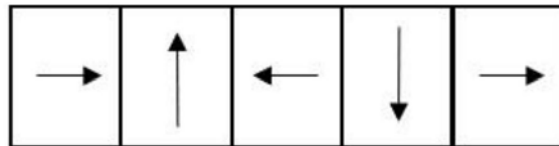


图6

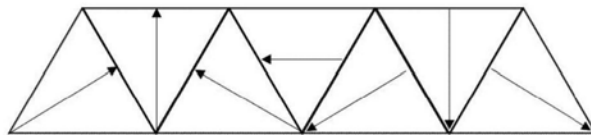


图7

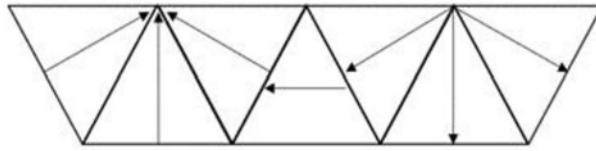


图8

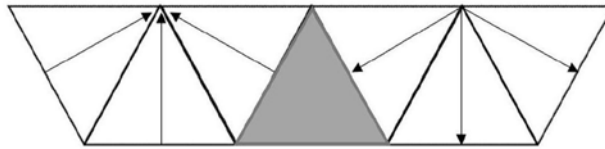


图9

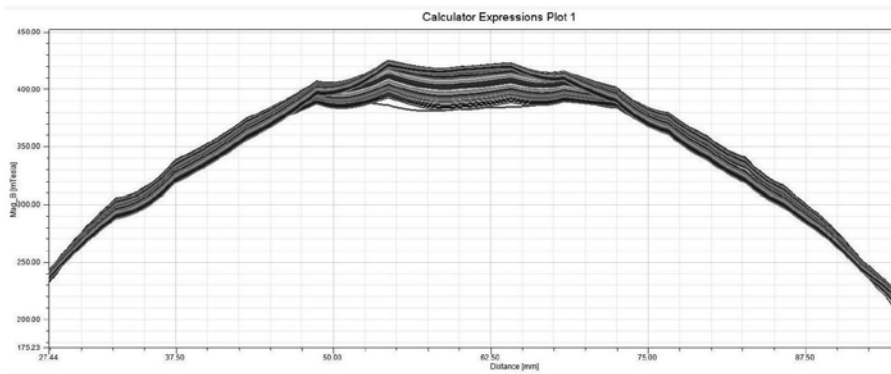


图10

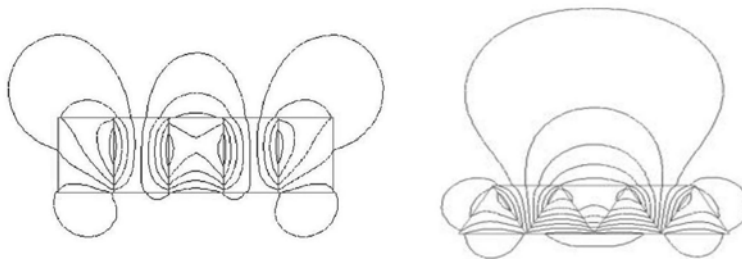


图11

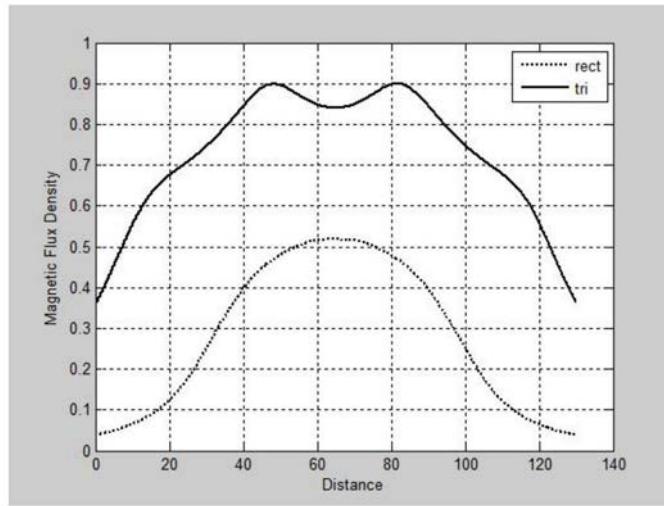


图12

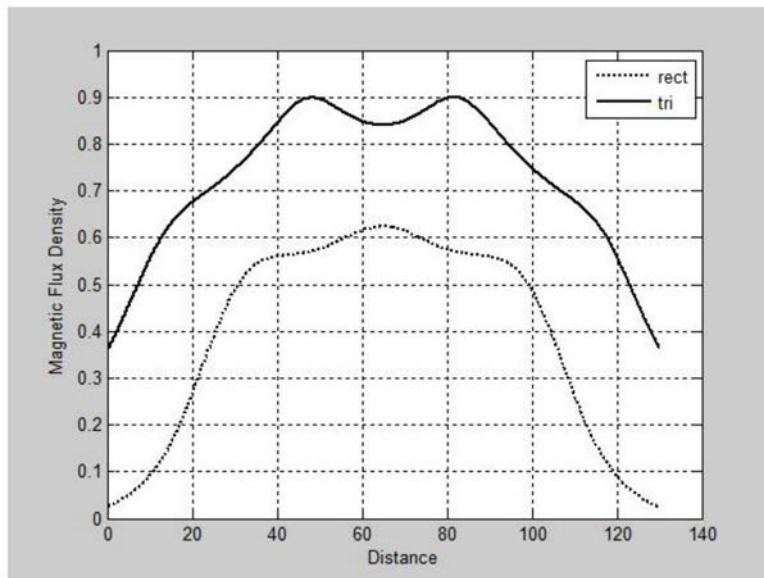


图13

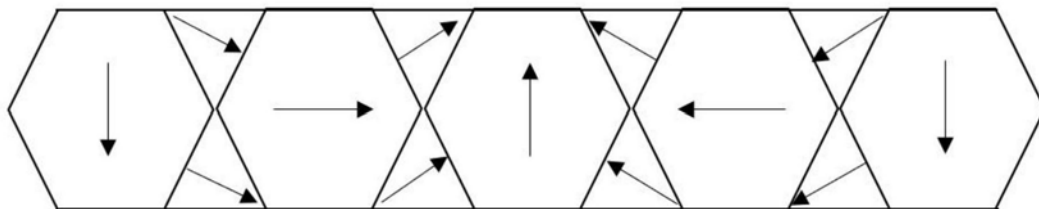


图14