

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织

国 际 局

(43) 国际公布日

2020 年 2 月 13 日 (13.02.2020)

WIPO | PCT



(10) 国际公布号

WO 2020/029715 A1

(51) 国际专利分类号:

B60L 13/04 (2006.01) B61B 13/08 (2006.01)

(21) 国际申请号:

PCT/CN2019/094131

(22) 国际申请日:

2019 年 7 月 1 日 (01.07.2019)

(25) 申请语言:

中文

(26) 公布语言:

中文

(30) 优先权:

201810884767.3 2018年8月6日 (06.08.2018) CN

(71) 申请人:江西理工大学(JIANGXI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) [CN/CN]; 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。

(72) 发明人: 杨斌 (YANG, Bin); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。 杨杰

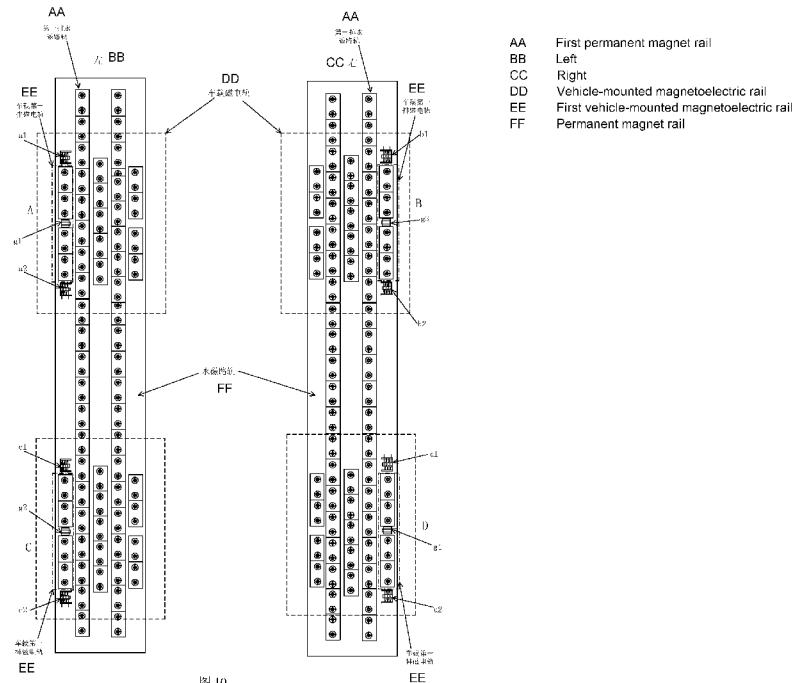
(YANG, Jie); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。 张振利 (ZHANG, Zhenli); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。 胡海林(HU, Hailin); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。 邓永芳(DENG, Yongfang); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。 石恒(SHI, Heng); 中国江西省赣州市红旗大道86号, Jiangxi 341000 (CN)。

(74) 代理人: 北京润平知识产权代理有限公司 (RUNPING & PARTNERS); 中国北京市海淀区北四环西路9号银谷大厦515室, Beijing 100190 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,

(54) Title: SUSPENDED RAIL TRANSPORT DEVICE AND MAGNETIC-ELECTRIC HYBRID SUSPENSION RAIL SYSTEM THEREOF

(54) 发明名称: 悬挂式轨道交通设备以及其中的磁电混合悬浮轨系统



(57) Abstract: A suspended rail transport device and a magnetic-electric hybrid suspension rail system thereof. The suspended rail transport device comprises a control unit, rails, and vehicle-mounted magnetoelectric rails. The vehicle-mounted magnetoelectric rails comprise at least two vehicle-mounted permanent magnet arrays, electromagnets, and distance sensors arranged in a traveling direction of a vehicle. The rail comprises a rail permanent magnet array. The rail permanent magnet array and the vehicle-mounted permanent magnet array are spaced apart from each other in an offset manner, and mutually-repulsive magnetic poles thereof ensure self-stabiliza-

[见续页]



BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

tion of the rail and the vehicle-mounted magnetoelectric rail. In addition, the distance sensor, the control unit, and the electromagnet form a closed-loop control system. The control unit uses data of the distance sensor to control the magnitude of an excitation current in the electromagnet, and the excitation current excites a magnetic field to ensure that the rail permanent magnet array does not contact the vehicle-mounted permanent magnet array, so as to achieve suspension. In the present invention, suspension rigidity is high, and the rail and the vehicle-mounted magnetoelectric rail form a self-stabilizing system, thereby reducing vibration during loaded traveling.

(57) 摘要: 一种悬挂式轨道交通设备以及其中的磁电混合悬浮轨系统, 包括控制单元、路轨和车载磁电轨。所述车载磁电轨, 包括至少两列沿所述轿厢的运行方向排列的车载永磁体阵列、电磁铁以及距离传感器; 所述路轨, 包括有路轨永磁体阵列, 所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错, 通过互斥的磁极使所述路轨和车载磁电轨实现自稳。同时, 所述距离传感器、控制单元和电磁铁形成闭环控制系统, 其中的控制单元通过距离传感器的数据控制电磁铁中的励磁电流的大小, 使所述励磁电流激发磁场保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触, 以实现悬停。本发明悬停刚度大, 路轨和车载磁电轨构成自稳的系统, 载重时振动小。

悬挂式轨道交通设备以及其中的磁电混合悬浮轨系统

技术领域

本发明涉及轨道交通领域，尤其涉及利用磁悬浮驱动的轨道交通设备。

5

背景技术

轨道交通，因其线路相对独立，调度便捷，承载能力可观等优势，逐渐受到广泛关注。而利用磁悬浮技术驱动的轨道交通设备，则因其速度快、爬坡能力强、转弯半径小及其在经济环保等方面的优势，普遍被认为是 21 世纪交通工具的发展方向。

10 目前技术比较成熟的磁悬浮轨道交通设备，按照其电磁力作用原理进行划分，主要包括有以下两种驱动方式：电磁悬浮驱动，和电动悬浮驱动。电磁悬浮（Electromagnetic suspension，简称 EMS），是利用常导电磁铁与强导磁体之间的吸引力来实现悬浮。EMS 型磁悬浮列车的悬浮高度一般为 8-12mm，此种悬浮方式，通过车载位于轨道下方的电磁铁与轨道产生电磁吸引力从而实现列车的悬浮。但，EMS 型列车不能自稳定悬浮。

15 采用 EMS 驱动的轨道交通设备必须以较大励磁电流激励电磁铁中产生与轨道相匹配的磁场，才能实现列车的稳定悬浮。虽然现在大部分的磁悬浮列车都是采用 EMS 型悬浮方式，例如德国的 TR 型磁悬浮列车、日本的 HSST 型磁悬浮列车。但，EMS 型磁悬浮列车耗能较高。并且，由于电磁装置必须承载较大励磁电流才能维持稳定悬浮，而励磁电流会在电子器件上产生较大热量，因此，EMS 方式驱动的轨道交通设备较难在长时 20 间内维持其内各种悬浮传感器稳定工作。

25 另一种磁悬浮方式是电动悬浮（Electrodynamics suspension，简称 EDS），此种悬浮力产生的原理是：变化的电磁场在金属导体中感应涡流，涡流磁场与原磁场的激励磁场方向相反，产生排斥力。EDS 型磁悬浮列车的悬浮间隙较大，一般为 100-150mm。但，EDS 型磁悬浮列车无法实现静浮，列车必须达到一定运行速度后才能产生足够的悬浮力使列车悬浮起来。因此通常需要额外的机械结构以避免涡流导体因相互接触而磨损。

30 基于上述的磁悬浮技术，悬挂式轨道列车交通运输系统正悄然走近人们的生活。区别于传统的、在铁轨上运行的列车，悬挂式轨道交通设备的轨道由钢梁或者混凝土浇筑的立柱支撑在空中，悬挂式轨道交通设备的轿厢由上述轨道支撑，吊起在空中运行。悬挂式轨道列车交通运输系统，因其占地面积少，有利于改善城市公共交通环境，并且能够给乘客带来良好的空间视觉感受，使乘客有很好的乘车体验，而被广泛关注。

但是，由于 EMS 悬浮方式无法实现自稳，而 EDS 悬浮方式无法静浮，因此，目前的悬挂式轨道列车还需要轮轨支承来实现悬停。但轮轨支承，运行时机械磨损大，维修难度高，运行过程中也经常因轮轨摩擦而产生噪音，影响乘车体验。

35 因此，目前急需一种能够克服上述驱动方式弊端的、能够应用于悬挂式轨道交通设备的磁悬浮技术。

发明内容

本发明的目的是克服 EMS 悬浮方式和 EDS 悬浮方式各自存在的弊端，将两者有效

地运用在一起，从而应用于悬挂式轨道交通设备上，以解决轮轨支承，运行时机械磨损大，维修难度高，运行过程中也经常因轮轨摩擦而产生噪音，影响乘车体验的问题。

首先，为实现上述目的，提出一种悬挂式轨道交通设备，包括：支撑结构；悬挂天梁，由所述支撑结构支撑在空中；轿厢；转向架，所述转向架的第一端设置于所述悬挂天梁内，所述转向架的第二端连接所述轿厢；控制单元，用于控制所述轿厢沿所述悬挂天梁运行；所述悬挂天梁的内壁设有路轨；所述转向架的表面，与所述路轨相对的位置设有车载磁电轨；所述车载磁电轨包括：至少两列沿所述轿厢的运行方向排列的车载永磁体阵列；所述车载永磁体阵列上，沿所述轿厢的运行方向还对称地设有至少一对电磁铁；所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器；所述电磁铁和所述距离传感器分别与控制单元连接；所述路轨包括：至少一列路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥；所述距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙，或用于检测车载永磁体阵列与所述悬挂天梁的内壁之间的间隙，所述距离传感器根据所述间隙的大小输出电信号至所述控制单元；所述控制单元还用以根据所述距离传感器的电信号控制所述电磁铁中的励磁电流的大小，所述励磁电流激发磁场保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

优选地，所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列在垂直方向上分别包括：至少两层永磁体，且相邻的两层所述永磁体之间还设有环氧树脂隔层。

优选地，所述电磁铁的至少一侧设有橡胶弹簧。

优选地，所述路轨至少设置两条，且相互平行设置；

所述车载磁电轨至少设置四组；

转向架的第一端包括有横梁和构架，各组车载磁电轨通过所述横梁和所述构架连接。

优选地，控制单元分别接收所述各组车载磁电轨中的距离传感器的电信号，根据所述电信号获得所述各组车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n ，其中， n 表示所述车载磁电轨的组数；

所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小：

其中，位于一侧的所述电磁铁中的励磁电流：

$$I_l \propto k_p(s_i - s_0) + k_i \int (s_i - s_0) dt + k_d \int (s_i - s_0)^2 dt, \quad l \in [1, n],$$

其中， s_i 表示该电磁铁所在的车载磁电轨所对应的间隙；

位于另一侧的所述电磁铁中的励磁电流：

$$I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s_0) dt + k_d \int (\bar{s} - s_0)^2 dt, \quad m \in [1, n],$$

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad N \leq n$$

其中， \bar{s} 表示所有电磁铁所在车载磁电轨的平均间隙；

所述位于另一侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_m 和位于一侧的所述电磁铁中的

励磁电流 I_l 分别激发方向相反的磁场，所述方向相反的磁场分别产生互斥的作用力，使所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触；其中， k_p 为比例系数， k_i 为间隙积分反馈系数， k_d 为微分系数， s_0 为额定导向间隙；所述比例系数 k_p ，所述间隙积分反馈系数 k_i ，所述微分系数 k_d ，所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

优选地，转向架的外侧还连接有导向轮；悬挂天梁的内壁，与所述导向轮相对的位置还设有轮轨，所述导向轮与所述轮轨之间留有空隙。

本发明还提供了一种磁电混合悬浮轨系统，包括控制单元，还包括：路轨和车载磁电轨，所述路轨和所述车载磁电轨相对设置；所述车载磁电轨包括至少两列车载永磁体阵列；所述车载永磁体阵列上还设有至少一个电磁铁，所述电磁铁的磁极垂直于所述路轨的方向；所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器；所述电磁铁和所述距离传感器分别与所述控制单元连接；所述路轨包括至少一列路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥；所述距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙 s ，并根据所述间隙 s 的大小输出电信号至所述控制单元；所述控制单元还连接有斩波器；所述控制单元用以根据所述距离传感器的电信号输出占空比信号至所述斩波器；所述斩波器连接所述控制单元与所述电磁铁，所述斩波器用以根据所述占空比信号输出相应大小的励磁电流至所述电磁铁，所述励磁电流激发磁场，保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触；

所述占空比信号的占空比：

$$PWM = k_p(s - s_0) + k_i \int (s - s_0) dt + k_d \int (s - s_0)'' dt,$$

其中， k_p 为比例系数， k_i 为间隙积分反馈系数， k_d 为微分系数， s_0 为额定导向间隙；所述比例系数 k_p ，所述间隙积分反馈系数 k_i ，所述微分系数 k_d ，所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

优选地，所述路轨的表面设有不锈钢固定板；所述路轨永磁体阵列通过不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面；车载磁电轨的表面设有不锈钢固定板；所述车载永磁体阵列由不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面。

优选地，所述距离传感器的数量至少为 2 个，所述电磁铁包括相对设置的至少 2 对；

所述控制单元分别接收所述各距离传感器的电信号，根据所述电信号获得所述车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n ，其中， n 表示所述距离传感器的数量；所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小：

其中，位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流为：

$$I_l \propto k_p(s_l - s_0) + k_i \int (s_l - s_0) dt + k_d \int (s_l - s_0)'' dt, \quad l \in [1, n],$$

其中， s_i 表示位于前侧的所述距离传感器所采集到的间隙大小；

位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流为：

$$I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s_0) dt + k_d \int (\bar{s} - s_0)'' dt, \quad m \in [1, n],$$

$$\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad N \leq n$$

其中， \bar{s} 为所有间隙的平均值。

5 所述位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_l 和所述位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_m 分别激发方向相反的磁场，所述方向相反的磁场分别产生互斥的作用力，使所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

10 优选地，所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列分别包括：至少两层钕铁硼永磁体层；相邻两层所述钕铁硼永磁体层之间设有环氧树脂隔层，所述环氧树脂隔层的厚度至少为所述钕铁硼永磁体厚度的 $3/10$ ；其中，每层所述钕铁硼永磁体层包括：沿直线排列的至少一列钕铁硼永磁体，每一列中的相邻两个所述钕铁硼永磁体之间留有间隙。

本发明具有如下有益效果：

15 本发明通过路轨和车载磁电轨悬浮的系统，以及应用该系统的悬挂式轨道设备。所述车载磁电轨，包括至少两列沿所述轿厢的运行方向排列的车载永磁体阵列、至少一对电磁铁以及距离传感器；所述路轨，包括有路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，通过互斥的磁极使所述路轨和车载磁电轨实现自稳。同时，所述距离传感器、控制单元和电磁铁形成闭环控制系统，其中的控制单元通过距离传感器的数据控制电磁铁中的励磁电流的大小，使所述励磁电流20 激发磁场保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触，以实现悬停。

由于本发明永磁体阵列本身构成了自稳的悬浮系统，因此，载重运行时振动更小。并且，由于闭环控制，电磁铁能够通过较小的励磁电流激发互斥的磁场以保证所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触，可保护本发明不会出现吸死的现象，器件机械磨损以及电热损耗更小，使用寿命更长。

25 本发明的其它特征和优点将在随后的说明书中阐述，并且，部分地从说明书中变得显而易见，或者通过实施本发明而了解。

附图说明

附图用来提供对本发明的进一步理解，并且构成说明书的一部分，并与本发明的30 实施例一起，用于解释本发明，并不构成对本发明的限制。在附图中：

图 1a 是本发明的两层永磁体磁阵列右视结构图；

图 1b 是本发明的两层永磁体磁阵列主视结构图；

图 2 是本发明的悬挂式磁悬浮列车的车载磁电轨俯视图；

图 3 是本发明的悬挂式磁悬浮列车的转向架示意图；

35 图 4 是本发明的安装在悬挂式磁悬浮列车天梁内的永磁路轨；

图 5a 是本发明的车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中的截面图；

图 5b 是本发明的车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中的三维图；

图 6 是本发明的车载磁电轨在 x 反方向吸死永磁路轨的截面图；

图 7 是本发明的车载磁电轨在 x 正方向吸死永磁路轨的截面图；

图 8 是本发明的悬挂式磁悬浮列车的悬挂天梁及磁电混合悬浮轨截面图；

5 图 9a 是本发明采用机械导向的车载磁轨俯视图；

图 9b 是本发明采用机械导向的车载磁轨插入到永磁路轨中的三维图；

图 10 是本发明安装在悬挂式磁悬浮列车转向架 ABCD 四个位置的车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中所构成的四个磁电混合悬浮轨俯视图；

图 11 是本发明的磁电混合悬浮轨系统的导向控制系统原理结构图；

10 图 12 是本发明的两组三角形悬挂构架结构图；

图 13 是本发明空气弹簧位置俯视图。

具体实施方式

以下结合附图对本发明的优选实施例进行说明，应当理解，此处所描述的优选实施例仅用于说明和解释本发明，并不用于限定本发明。

以下首先对本发明提供的悬挂式轨道交通设备进行详细描述，其中，如图 8 所示，本发明中提供的悬挂式轨道交通设备包括：

支撑结构 1；悬挂天梁 2，由支撑结构支撑在空中；轿厢 3，轿厢 3 顶部设置有若干根轿厢吊杆 13，轿厢吊杆 13 的顶端和底端均设置有接扣；转向架 4，转向架的第一端设置于所述悬挂天梁内，转向架的第二端连接轿厢 3，通过吊杆 13 衔接悬浮转向架 4 与轿厢 3。

支撑结构 1 包括立柱 14 和悬挂梁 15，立柱 14 的顶部朝向一侧弧形过渡形成水平的悬挂梁 15，天梁 2 悬挂在悬挂梁 15 下方，立柱 14 的底部与地面接触固定。

如图 13 所示，轿厢吊杆 13 之间设置有若干个空气弹簧 12，空气弹簧 12 从悬浮转向架 4 的一侧倾斜链接到轿厢 3 的相对侧，悬浮转向架 4 的中间也设置空气弹簧 12 接扣，连接转向架和轿厢前后（行进方向为前）从轿厢吊杆 13 的顶端连接到另一个轿厢吊杆 13 的底端。

轿厢 3 的顶部设置有轿厢机顶盒，轿厢机顶盒通过机顶盒控件固定在轿厢 3 的顶部，轿厢机顶盒设置有若干个空气弹簧 12，该空气弹簧 12 沿轿厢 3 前进方向倾斜，且其上端通过空气弹簧 12 接扣与悬浮转向架 4 连接。

如图 12 所示，轿厢还设置有吊挂接扣 8，吊杆 13 的接扣与轿厢吊挂接扣 8 连接，吊杆 13 与轿厢之间设置有两组三角形悬挂构架 6，三角形悬挂构架 6 的一个短边相对布置，且沿轨道延伸方向布置，三角形悬挂构架 6 的每个顶点均设置有球绞结构 9，在三角形悬挂构架 6 的两端设置有与轨道延伸方向垂直的水平布置的横梁 10，三角形悬挂构架 6 相对布置的短边公用一个横梁 10，三角形悬挂构架 6 通过与横梁 10 的中心或者两侧连接，每个横梁 10 的两端均位于悬浮点 11 上方。

控制单元 5，用于控制所述轿厢沿所述悬挂天梁运行；其中，所述悬挂天梁的内壁设有路轨 21；所述转向架的表面，与所述路轨相对的位置设有车载磁电轨 41；所述车载磁电轨，包括至少两列沿所述轿厢的运行方向排列的车载永磁体阵列 411；所述车载

永磁体阵列上，沿所述轿厢的运行方向还对称地设有至少一对电磁铁 412；所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器 413；所述电磁铁和所述距离传感器分别与所述控制单元连接；所述路轨，包括至少一列路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥；所述 5 距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙，或用于检测车载永磁体阵列与所述悬挂天梁的内壁之间的间隙，并根据所述间隙的大小输出电信号至所述控制单元；所述控制单元还用以根据所述距离传感器的电信号控制所述电磁铁中的励磁电流的大小，所述励磁电流激发磁场保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

10 上述的设备中，由于其中的磁电混合悬浮轨系统，可依靠间隔交错的永磁阵列实现悬浮列车悬浮，依靠电磁铁的绕组产生电磁力，电磁力和永磁体侧向力共同实现列车导向，由此构成永磁悬浮和磁电混合导向的为一体的一种新型磁电混合悬浮轨系统。此种磁电混合悬浮轨主要分为车载磁电轨和永磁路轨，车载磁电轨的俯视图和三维图如图 2、图 2b 所示，车载磁电轨由多组永磁阵列、传感器和电磁绕组等组成；永磁阵列如图 1a 和图 1b 所示，永磁阵列由两层永磁体叠加构成。如图 8 所示，车载磁电轨安装在悬挂式磁悬浮列车的转向架上，永磁路轨安装在悬挂天梁内的底座上；如图 5a、图 5b 所示，将车载磁电轨处于正中间悬浮位置无接触的插入到永磁路轨中，由此在 y 方向产生排斥力 F_y 使悬挂式列车稳定悬浮，当车载磁电轨在正中间位置悬浮时在 x 正方向会产生吸引力 F_{+x} ，在 x 反方向也会产生吸引力 F_{-x} ，此时 $F_{+x} = F_{-x}$ ；在车载磁电轨不施加电磁导向 15 调节的情况下，车载磁电轨向 x 反方向偏离正中间悬浮位置时 $F_{-x} > F_{+x}$ ，此时车载磁电轨会如图 6 所示吸死在永磁路轨上；车载磁电轨向 x 正方向偏离正中间悬浮位置时 $F_{+x} > F_{-x}$ ，此时车载磁电轨会如图 7 所示吸死在永磁路轨上。车载磁电轨上施加电磁导向力的作用就是保持其在额定导向间隙运行，且不吸死轨道。

20 可选的，上述的悬挂式轨道交通设备中，所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列在垂直方向上分别包括有至少两层永磁体 73，所述各层永磁体之间还设有环氧树脂隔层 72。由此可确保永磁体能够提供足够的悬浮力以及悬浮结构简单化。本专利选用型号为 N48 的钕铁硼永磁材料，按图 1a 和图 1b 示意图所示，将两块材料牌号为 N48 钕铁硼永磁体通过不锈钢螺栓 71 固定在一起构成两层永磁体磁阵列结构，根据悬浮载重的需要也可以构成三层或多层磁阵列结构，本发明以两层永磁阵列展开叙述，两块永磁体 25 30 73 之间用厚度为 3mm 的环氧树脂板隔开，其目的是避免上下两层永磁体的磁场线被过度短路。其中螺栓为不锈钢螺栓，其目的是不锈钢为非铁磁性材料，可减少对永磁体磁路的影响。

在一个优选地实施方式中，所述钕铁硼永磁体为长为 30mm，宽为 15mm，厚为 10mm 的长方体。当然该尺寸并不是固定不变的，可以根据实际的使用情况进行调节。

35 可选的，上述的悬挂式轨道交通设备中，所述电磁铁 412 的至少一侧设有橡胶弹簧。

可选的，上述的悬挂式轨道交通设备中，所述路轨包括相互平行的至少两条，所

述车载磁电轨包括至少四组；所述转向架的第一端还包括有横梁 43 和构架 42，所述各组车载磁电轨通过所述横梁和所述构架连接。

可选的，上述的悬挂式轨道交通设备中，所述控制单元分别接收所述各组车载磁电轨中的距离传感器的电信号，根据所述电信号获得所述各组车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n ，其中， n 表示所述车载磁电轨的组数；所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小：其中，位于一侧的所述电磁铁中的励磁电流 $I_l \propto k_p(s_i - s_0) + k_i \int (s_i - s_0) dt + k_d \int (s_i - s_0)^2 dt, l \in [1, n]$ ；其中， s_i 表示该电磁铁所在的车载磁电轨所对应的间隙；位于另一侧，例如左侧或前侧，的所述电磁铁中的励磁电流 $I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s) dt + k_d \int (\bar{s} - s)^2 dt$ ， $\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, N \leq n$ ，其中， k_p 为比例系数， k_i 为间隙积分反馈系数， k_d 为微分系数， s_0 为额定导向间隙；所述比例系数 k_p ，所述间隙积分反馈系数 k_i ，所述微分系数 k_d ，所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

作为一种可选的实施方式，本发明可选择如图 5a、图 5b、图 8 和图 10 所示，将车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中构成一个磁电混合悬浮轨系统，该系统在竖直 y 方向能够稳定悬浮，且有很强的悬浮刚度。但是在 x 方向上不能构成稳定的导向悬浮，只要车载磁电轨偏离中间悬浮位置就会吸死在永磁路轨上。如图 6 所示为车载磁电轨向 x 反方向偏离后吸死在永磁路轨上，图 7 所示为车载磁电轨向 x 正方向偏离后吸死在永磁路轨上。为对列车进行导向，避免吸死，本发明可通过控制电磁铁中的电流大小，从而控制电磁铁中磁场大小，最终控制电磁铁的电磁力大小，使车载磁电轨保持在额定导向间隙运行。其中，因为永磁磁阵列的宽度为 15mm，两排永磁路轨间的距离为 21mm，当车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中处于正中间位置时，车载磁电轨与两排永磁路轨的间隙为 3mm，将此间隙设定为额定导向间隙。

具体如图 10 所示，对于安装在悬挂式磁悬浮列车转向架 A、C 两处的车载磁电轨采用等间隙控制，使得 A、C 两处的车载磁电轨保持额定的导向间隙运行；安装在悬挂式磁悬浮列车转向架 B、D 两处的车载磁电轨则综合 B、D 两处车载磁电轨的状态进行协同控制，使得 B、D 两处的车载磁电轨的导向平均间隙保持为额定的导向间隙运行。如图 10 所示，A、C 两处的间隙传感器 g1、g3 分别测量的是左边第一排永磁路轨和 A 端第一排车载磁电轨的导向间隙、左边第一排永磁路轨和 C 端第一排车载磁电轨的导向间隙；B、D 两处的间隙传感器 g2、g4 分别测量的是右边第一排永磁路轨和 B 端第一排车载磁电轨的导向间隙、右边第一排永磁路轨和 D 端第一排车载磁电轨的导向间隙。其导向控制系统原理图结构如图 11 所示，首先将转向架 A 端的电磁铁 a1、a2 串联起来，使其等效为一个单电磁铁，同理分别将转向架 B 端 b1、b2，转向架 C 端的 c1、c2，转向架

D 端的 d1、d2 也分别串联起来使各端的两个电磁铁等效为一个电磁铁。间隙传感器 g1 测量得到转向架 A 端的导向间隙 s_1 , 导向控制器根据导向间隙 s_1 通过控制算法 $PWM.A = k_p(s_1 - s_0) + k_i \int (s_1 - s_0)dt + k_d \int (s_1 - s_0)''dt$ 得到转向架 A 端电磁铁的控制量

k_p 为比例系数, k_i 为间隙积分反馈系数, k_d 为微分系数, s_0 为额定导向间隙。将

5 PWM.A 以 PWM 波的形式输出到导向斩波器 A, 控制转向架 A 端电磁铁 a1、a2 电流大小, 进而控制转向架 A 端电磁力大小, 保证转向架 A 端在额定导向间隙运行; 间隙传

感器 g2 测量得到转向架 C 端的导向间隙 s_2 , 导向控制器根据导向间隙 s_2 通过控制算法

$PWM.C = k_p(s_2 - s_0) + k_i \int (s_2 - s_0)dt + k_d \int (s_2 - s_0)''dt$ 得到转向架 C 端电磁铁的控制量

PWM.C, 将 PWM.C 以 PWM 波的形式输出到导向斩波器 C, 控制转向架 C 端电磁铁 c1、

10 c2 电流大小, 进而控制转向架 C 端电磁力大小, 保证转向架 C 端在额定导向间隙运行;

间隙传感器 g3 测量得到转向架 B 端的导向间隙 s_3 , 间隙传感器 g4 测量得到转向架 D 端的导

向间隙 s_4 , 导向控制器根据导向间隙 s_3 和 s_4 通过控制算法

$PWM.B = k_p(s_{34} - s_0) + k_i \int (s_{34} - s_0)dt + k_d \int (s_{34} - s_0)''dt$ 得到转向架 B 端电磁铁的控制量

PWM.B, 将 PWM.B 以 PWM 波的形式输出到导向斩波器 B, 控制转向架 B 端电磁铁 b1、

15 b2 电流大小, 进而控制转向架 B 端电磁力大小, 保证转向架 B 端在额定导向间隙运行。

s_{34} 为转向架 B、D 端的平均导向间隙, $s_{34} = \frac{s_3 + s_4}{2}$ 。导向控制器根据导向间隙 s_3 和 s_4 通

过控制算法 $PWM.D = k_p(s_{34} - s_0) + k_i \int (s_{34} - s_0)dt + k_d \int (s_{34} - s_0)''dt$ 得到转向架 D 端电磁铁的控制量

PWM.D, 将 PWM.D 以 PWM 波的形式输出到导向斩波器 D, 控制转向架 D 端电磁铁 b1、b2 电流大小, 进而控制转向架 D 端电磁力大小, 保证转向架 D 端在额定导

20 向间隙运行。同时悬浮控制器将各个导向间隙的状态实时传输给车载总控系统, 车载总控系统会实时监控列车的导向状态。通过车载总控系统向导向控制器发送复位及停止等指令。

可选的, 上述的悬挂式轨道交通设备中, 转向架的外侧还连接有导向轮; 所述悬

25 挂天梁的内壁, 与所述导向轮相对的位置还设有轮轨, 所述导向轮与所述轮轨之间留有空隙。如图 9a 所示, 为采用机械导向轮导向的车载磁轨, 在车载磁电轨的四端安装上

导轮即可实现机械方式的导向。如图 9b 所示, 为采用机械导向的车载磁轨插入到永磁路轨中从而实现悬浮和导向。车载磁电轨安装导向轮的机械导向方式和车载磁电轨安装

电磁铁的电磁导向方式能够使悬挂式磁悬浮列车在沿运行方向受到侧向力较小时提供

30 导向作用, 当侧向力较大时由转向架上的导向调整轮给列车提供导向, 使其能够平稳运行, 其结构如图 8 所示。本发明的悬挂式磁悬浮列车采用电磁导向的车载磁电轨对列车进行悬浮支撑和导向。

同时, 本发明还提供一种磁电混合悬浮轨系统, 包括控制单元 5 以及: 路轨 21 和

车载磁电轨 41, 所述路轨和所述车载磁电轨相对设置; 所述车载磁电轨, 包括至少两列

车载永磁体阵列 411; 所述车载永磁体阵列上还设有至少一个电磁铁 412, 所述电磁铁

的磁极垂直于所述路轨的方向；所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器 413；所述电磁铁和所述距离传感器分别与所述控制单元连接；所述路轨，包括至少一列路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥；所述距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙 s ，并根据所述间隙 s 的大小输出电信号至所述控制单元；所述控制单元还连接有斩波器 51；所述控制单元用以根据所述距离传感器的电信号输出占空比信号至所述斩波器；所述斩波器连接所述控制单元与所述电磁铁，所述斩波器用以根据所述占空比信号输出相应大小的励磁电流至所述电磁铁，所述励磁电流激发磁场，保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触；所述占空比信号的占空比 $PWM = k_p(s-s_0) + k_i \int (s-s_0)dt + k_d \int (s-s_0)''dt$ ，其中， k_p 为比例系数， k_i 为间隙积分反馈系数， k_d 为微分系数， s_0 为额定导向间隙；所述比例系数 k_p ，所述间隙积分反馈系数 k_i ，所述微分系数 k_d ，所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

上述系统中，车载磁电轨的俯视图和三维图如图 2a、图 2b 所示，将车载磁电轨安装在如图 3 所示的转向架 A、B、C、D 四个位置，构成四点悬浮系统，但是也可以通过实际悬挂式磁悬浮列车的转向架结构和载重要求构成六点或者多点悬浮系统。以四点悬浮系统为例，永磁路轨如图 4 所示，应用于悬挂式磁悬浮设备时，可将永磁路轨可安装在悬挂天梁内部，将车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中，由此产生排斥力使列车稳定悬浮。车载磁电轨插入到永磁路轨的截面图和三维图如图 5a、图 5b 所示，在悬挂式磁悬浮列车的悬挂天梁内磁电混合悬浮轨的截面图与悬挂列车转向架和其他装置的截面图如图 8 所示。车载磁电轨插入到永磁路轨后构成一个磁电混合悬浮轨系统，该系统在 y 方向上有很高的稳定性，刚度大，载重悬浮时不会产生较大振动。但是在该磁电混合悬浮轨的 x 方向上会造成车载磁电轨偏离悬浮中心位置后吸死在永磁路轨上，如图 6、图 7 所示，图 6 为车载磁电轨偏离中心悬浮位置后吸死在 x 反方向的永磁路轨上，图 7 为车载磁电轨偏离中心悬浮位置后吸死在 x 正方向上的永磁路轨上。吸死会带来很严重的后果，不仅会对磁轨产生危害，而且对运行中的悬浮列车也会带来安全隐患。为解决吸死问题，本方案在车载磁电轨上安装电磁铁和间隙传感器，电磁铁和间隙传感器的安装位置示意图如图 2 所示，之所以电磁铁和间隙传感器采用图 2 所示的安装位置排列方式是因为安装了车载磁电轨的悬挂式磁悬浮列车转向架在悬挂天梁内是对称的，电磁铁和间隙传感器采用图 2 所示的排列方式易于控制电磁铁，从而使悬挂式磁悬浮列车在额定的导向间隙运行。间隙传感器测量车载磁电轨与永磁路轨在 x 方向上的相对距离，通过调节电磁铁中电流的大小控制电磁铁产生磁场的大小，最终控制电磁铁在 x 方向上的电磁力大小，由此达到对车载磁电轨导向的作用，使悬浮列车在 x 方向上保持额定的导向间隙运行。除了采用电磁导向的方式外，还可以采用机械导向的方式。

可选的，如上所述的磁电混合悬浮轨系统中，所述路轨的表面设有不锈钢固定板 7；所述路轨永磁体阵列通过不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面；车载磁电轨的表面设有不锈钢固定板；所述车载永磁体阵列由不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面。如图 2 所示，可选择将两层永磁体磁阵列结构用不锈钢螺栓安装固定在一块厚 5mm 的不锈钢钢板表面，不锈钢钢板板上共安装 3 排图 1a 所示的永磁阵列，第一排永磁阵

列与第二排永磁阵列间隔 21mm, 第二排永磁磁阵列与第三排永磁阵列间隔 21mm; 如图 2 所示, 第一排与第三排各安装 4 组永磁磁阵列, 且各组永磁阵列间隔 1mm; 第二排安装 5 组永磁磁阵列, 且各组永磁阵列间隔 1mm。在第一排的永磁磁阵列中还要安装电磁铁和间隙传感器。间隙传感器安装在第一排永磁磁阵列的中间位置, 电磁铁安装在第一排永磁磁阵列的两端构成一个两点的电磁导向系统, 同时电磁铁的一极固定在橡胶弹簧 414 上, 达到减振效果, 电磁铁的另一极则为工作极产生电磁力, 进而提供导向力。距离传感器可具体采用一种间隙传感器, 其作用是测量车载磁电轨和永磁路轨间的距离, 从而给控制系统提供一个导向间隙反馈量, 达到控制电磁铁中电流的目的, 实现悬挂式磁悬浮列车稳定导向的目的。车载磁电轨安装在列车转向架上是通过橡胶弹簧连接。

如图 4 所示, 将两层永磁体磁阵列结构用不锈钢螺栓固定在一块厚 5mm 的不锈钢钢板上面得到永磁路轨。永磁路轨由两排永磁磁阵列构成, 两排永磁磁阵列间距为 21mm, 各组永磁阵列沿列车行进方向间隔 1mm。需要说明的是这个数据并不是确定不变的, 可以根据实际的情况进行调整, 所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列的固定方式也并不是只有不锈钢螺栓固定这一种, 只要可以将其稳定地固定在不锈钢固定板上即可, 可以理解为上述方案本发明只是提供一种优选的实施方式。

可选的, 如上所述的磁电混合悬浮轨系统中, 所述距离传感器的数量至少为 2 个, 所述电磁铁包括相对设置的至少 2 对。具体至本实施例, 可选择将车载磁电轨安装在悬挂式磁悬浮列车的转向架的 A、B、C、D 四个位置, 构成一个四点磁悬浮系统, 然后将车载磁电轨无接触的插入到永磁路轨中构成一个磁电混合悬浮轨系统, 从而实现列车的悬浮。所述控制单元分别接收所述各距离传感器的电信号, 根据所述电信号获得所述车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n , 其中, n 取 4, 表示所述距离传感器的数量; 所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小: 其中, 位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流:

$$I_l \propto k_p(s_i - s_0) + k_i \int (s_i - s_0) dt + k_d \int (s_i - s_0)^2 dt, \quad l \in [1, n],$$

其中, s_i 表示位于前侧的所述距离传感器所采集到的间隙大小; 位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流:

$$I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s_0) dt + k_d \int (\bar{s} - s_0)^2 dt, \quad m \in [1, n],$$

其中, $\bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad N \leq n$; 所述位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_l 和所述位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_m 分别激发方向相反的磁场, 所述方向相反的磁场分别产生互斥的作用力, 使所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

可选的, 所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列分别包括: 至少两层钕铁硼永磁体层; 相邻两层所述钕铁硼永磁体层之间设有环氧树脂隔层, 所述环氧树脂隔层的厚度至少为所述钕铁硼永磁体厚度的 3/10; 其中, 每层所述钕铁硼永磁体层包括: 沿直线排列的至少一列钕铁硼永磁体, 每一列中的相邻两个所述钕铁硼永磁体之间留有间隙。

本发明的优势在于:

悬挂式磁悬浮列车在竖直 y 方向上能够稳定悬浮，y 方向具有很大的悬浮刚度，在 y 方向上不需要人为的控制即可稳定悬浮。

磁电混合悬浮轨系统采用模块化方式加工生产，结构简单、调试方便，易安装、维修方便。

5 磁电混合悬浮轨系统由永磁体提供悬浮力，由安装在车载磁电轨上的电磁铁的电磁力、永磁体在 x 方向的吸引力 F_{+x} 、永磁体在 x 反方向吸引力 F_{-x} 提供导向力，该系统耗能低，符合现代“绿色交通”理念。

10 以上结合附图详细描述了本发明实施例的可选实施方式，但是，本发明实施例并不限于上述实施方式中的具体细节，在本发明实施例的技术构思范围内，可以对本发明实施例的技术方案进行多种简单变型，这些简单变型均属于本发明实施例的保护范围。

另外需要说明的是，在上述具体实施方式中所描述的各个具体技术特征，在不矛盾的情况下，可以通过任何合适的方式进行组合。为了避免不必要的重复，本发明实施例对各种可能的组合方式不再另行说明。

15 此外，本发明实施例的各种不同的实施方式之间也可以进行任意组合，只要其不违背本发明实施例的思想，其同样应当视为本发明实施例所公开的内容。

权利要求

1、一种悬挂式轨道交通设备，包括：

支撑结构（1）；

悬挂天梁（2），由所述支撑结构支撑在空中；

5 轿厢（3）；

转向架（4），所述转向架的第一端设置于所述悬挂天梁内，所述转向架的第二端连接所述轿厢；

控制单元（5），用于控制所述轿厢沿所述悬挂天梁运行；

其特征在于，

10 所述悬挂天梁的内壁设有路轨（21）；

所述转向架的表面，与所述路轨相对的位置设有车载磁电轨（41）；所述车载磁电轨包括：至少两列沿所述轿厢的运行方向排列的车载永磁体阵列（411）；所述车载永磁体阵列上，沿所述轿厢的运行方向还对称地设有至少一对电磁铁（412）；所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器（413）；所述电磁铁和所述距离传感器分别与控制单元连接；

15 所述路轨包括：至少一列路轨永磁体阵列，所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错，所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥；

所述距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙，或用于检测车载永磁体阵列与所述悬挂天梁的内壁之间的间隙，所述距离传感器根据所述间隙的大小输出电信号至所述控制单元；

20 所述控制单元还用以根据所述距离传感器的电信号控制所述电磁铁中的励磁电流的大小，所述励磁电流激发磁场保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

25 2、如权利要求 1 所述的悬挂式轨道交通设备，其特征在于，所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列在垂直方向上包括：至少两层永磁体，且相邻的两层所述永磁体之间还设有环氧树脂隔层。

3、如权利要求 1 或 2 所述的悬挂式轨道交通设备，其特征在于，所述电磁铁（412）的至少一侧设有橡胶弹簧（414）。

30 4、如权利要求 3 所述的悬挂式轨道交通设备，其特征在于，所述路轨至少设置两条，且相互平行设置；

所述车载磁电轨至少设置四组；

转向架的第一端包括有横梁和构架，各组车载磁电轨通过所述横梁和所述构架连接。

35 5、如所述权利要求 4 所述的悬挂式轨道交通设备，其特征在于，控制单元分别接收所述各组车载磁电轨中的距离传感器的电信号，根据所述电信号获得所述各组车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n ，其中， n 表示所述车载磁电轨的组数；

所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小：

其中，位于一侧的所述电磁铁中的励磁电流 $I_l \propto k_p(s_i - s_0) + k_i \int (s_i - s_0) dt + k_d \int (s_i - s_0)'' dt$, $l \in [1, n]$; 其中, s_i 表示该电磁铁所在的车载磁电轨所对应的间隙;

位于另一侧的所述电磁铁中的励磁电流

$$I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s_0) dt + k_d \int (\bar{s} - s_0)'' dt, m \in [1, n], \text{ 其中, } \bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, N \leq n;$$

所述位于另一侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_m 和位于一侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_l 分别激发方向相反的磁场, 所述方向相反的磁场分别产生互斥的作用力, 使所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触;

其中, k_p 为比例系数, k_i 为间隙积分反馈系数, k_d 为微分系数, s_0 为额定导向间隙;

所述比例系数 k_p , 所述间隙积分反馈系数 k_i , 所述微分系数 k_d , 所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

6、如所述权利要求 1 或 4 所述的悬挂式轨道交通设备, 其特征在于, 转向架的外侧还连接有导向轮 (22);

15 悬挂天梁的内壁, 与所述导向轮相对的位置还设有轮轨 (23), 所述导向轮与所述轮轨之间留有空隙。

7、一种磁电混合悬浮轨系统, 包括控制单元 (5), 其特征在于, 还包括:

路轨 (21) 和车载磁电轨 (41), 所述路轨和所述车载磁电轨相对设置;

20 所述车载磁电轨包括至少两列车载永磁体阵列 (411); 所述车载永磁体阵列上还设有至少一个电磁铁 (412), 所述电磁铁的磁极垂直于所述路轨的方向; 所述车载永磁体阵列上还设有距离传感器 (413); 所述电磁铁和所述距离传感器分别与所述控制单元连接;

25 所述路轨包括至少一列路轨永磁体阵列, 所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列间隔交错, 所述路轨永磁体阵列的磁极与所述车载永磁体阵列的磁极互斥;

所述距离传感器用于检测所述车载永磁体阵列与所述路轨永磁体阵列之间的间隙 s , 并根据所述间隙 s 的大小输出电信号至所述控制单元;

所述控制单元还连接有斩波器 (51); 所述控制单元用以根据所述距离传感器的电信号输出占空比信号至所述斩波器;

30 所述斩波器连接所述控制单元与所述电磁铁, 所述斩波器用以根据所述占空比信号输出相应大小的励磁电流至所述电磁铁, 所述励磁电流激发磁场, 保持所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触;

$$\text{所述占空比信号的占空比 } PWM = k_p(s - s_0) + k_i \int (s - s_0) dt + k_d \int (s - s_0)'' dt,$$

其中, k_p 为比例系数, k_i 为间隙积分反馈系数, k_d 为微分系数, s_0 为额定导向间隙;

所述比例系数 k_p , 所述间隙积分反馈系数 k_i , 所述微分系数 k_d , 所述额定导向间隙 s_0 均预设于所述控制单元内。

8、如权利要求 7 所述的磁电混合悬浮轨系统, 其特征在于,

5 所述路轨的表面设有不锈钢固定板; 所述路轨永磁体阵列通过不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面;

车载磁电轨的表面设有不锈钢固定板; 所述车载永磁体阵列由不锈钢螺栓固定于所述不锈钢固定板的表面。

10 9、如权利要求 7 所述的磁电混合悬浮轨系统, 其特征在于, 所述距离传感器的数量至少为 2 个, 所述电磁铁包括相对设置的至少 2 对;

所述控制单元分别接收所述各距离传感器的电信号, 根据所述电信号获得所述车载磁电轨中车载永磁体阵列与路轨永磁体阵列之间的间隙 s_1, s_2, \dots, s_n , 其中, n 表示所述距离传感器的数量;

15 所述控制单元根据所述间隙 s_1, s_2, \dots, s_n 控制所述各电磁铁中的励磁电流的大小; 其中, 位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流为:

$$I_l \propto k_p(s_i - s_0) + k_i \int (s_i - s_0) dt + k_d \int (s_i - s_0)'' dt, \quad l \in [1, n],$$

其中, s_i 表示位于前侧的所述距离传感器所采集到的间隙大小;

位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流为:

$$I_m \propto k_p(\bar{s} - s_0) + k_i \int (\bar{s} - s_0) dt + k_d \int (\bar{s} - s_0)'' dt, \quad m \in [1, n],$$

$$\text{其中, } \bar{s} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i, \quad N \leq n;$$

所述位于前侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_l 和所述位于后侧的所述电磁铁中的励磁电流 I_m 分别激发方向相反的磁场, 所述方向相反的磁场分别产生互斥的作用力, 使所述路轨永磁体阵列与所述车载永磁体阵列不接触。

25 10、如权利要求 8 所述的磁电混合悬浮轨系统, 其特征在于, 所述路轨永磁体阵列和所述车载永磁体阵列包括: 至少两层钕铁硼永磁体层; 相邻两层所述钕铁硼永磁体层之间设有环氧树脂隔层, 所述环氧树脂隔层的厚度至少为所述钕铁硼永磁体厚度的 3/10; 其中,

30 每层所述钕铁硼永磁体层包括: 沿直线排列的至少一列钕铁硼永磁体, 每一列中的相邻两个所述钕铁硼永磁体之间留有间隙。

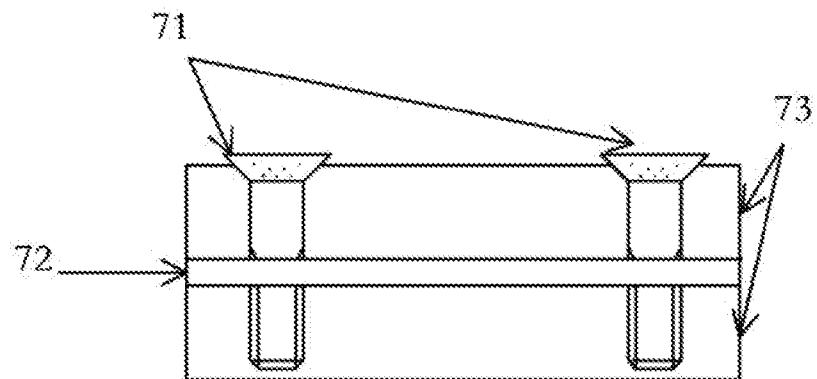


图 1a

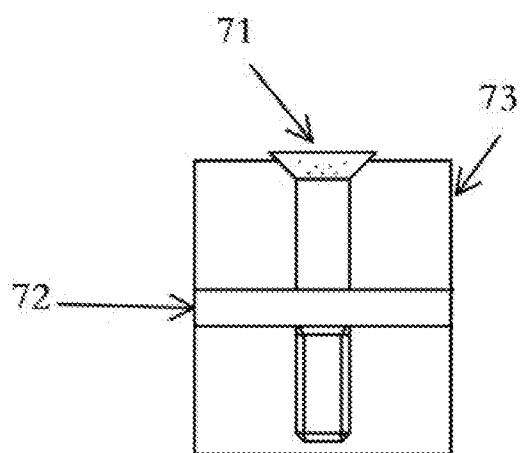


图 1b

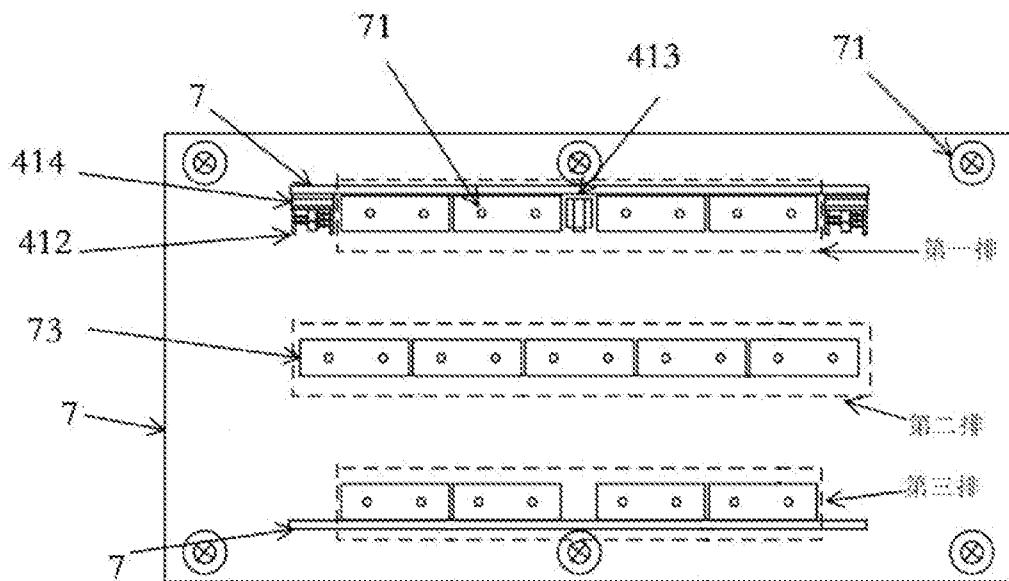


图 2

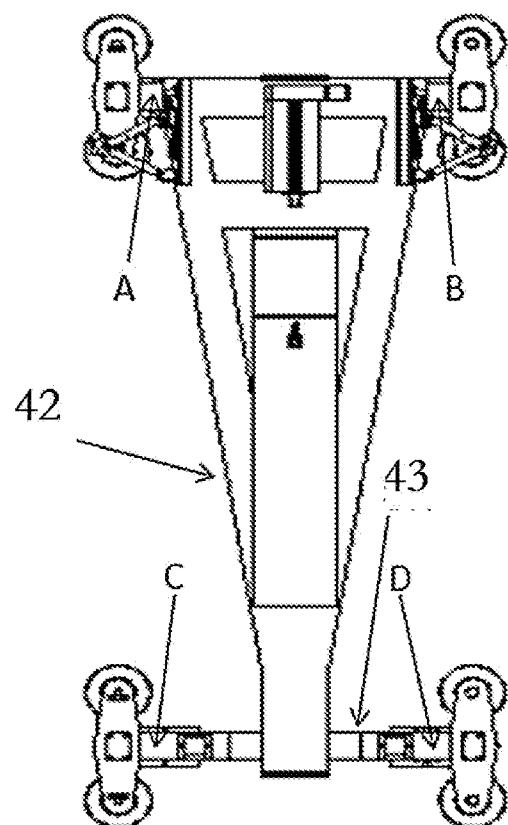


图 3

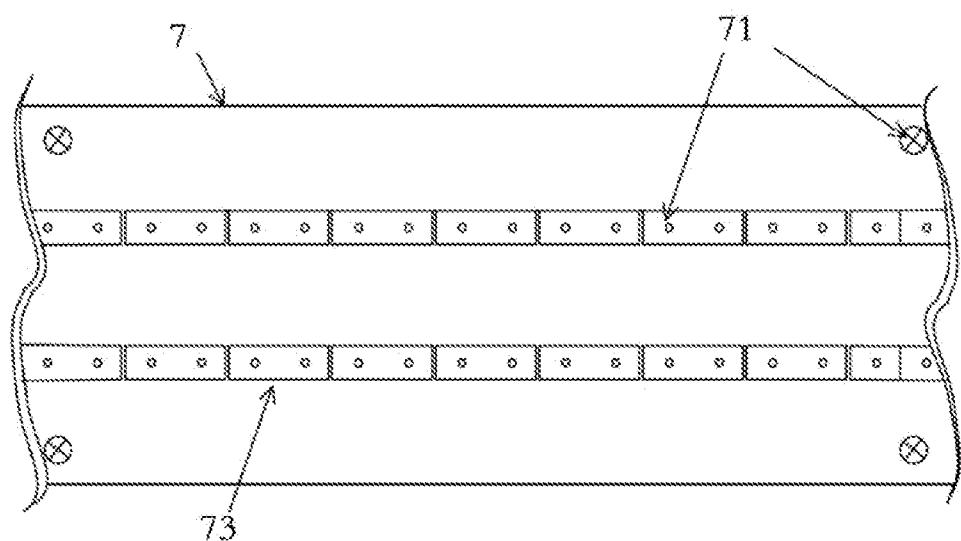


图 4

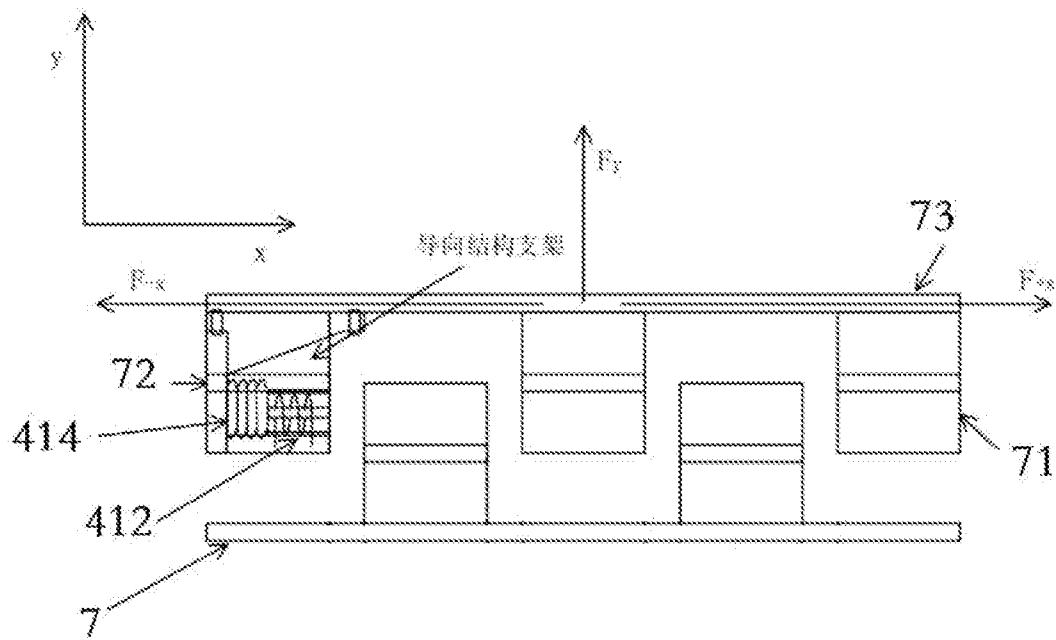


图 5a

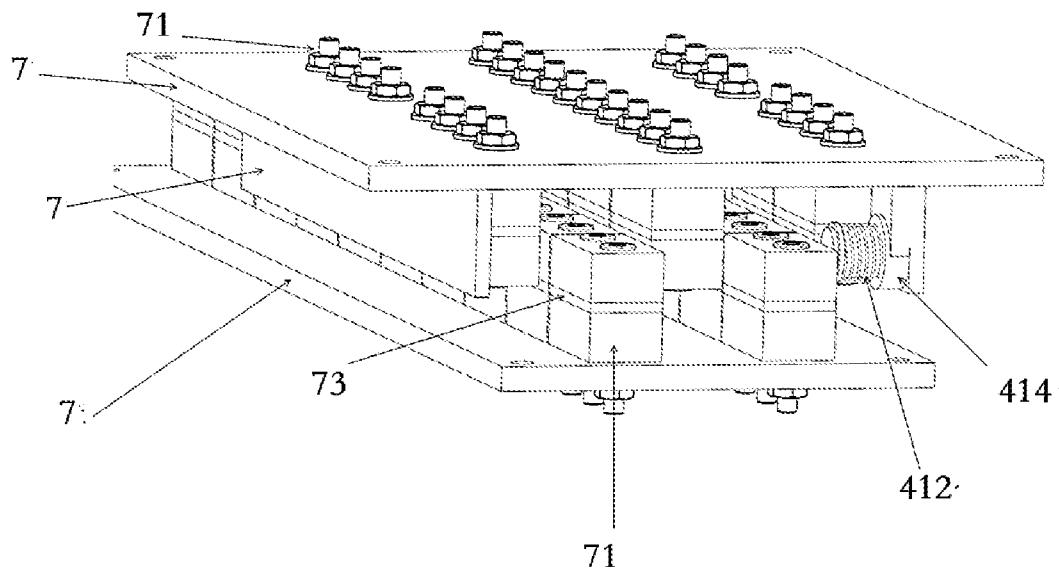


图 5b

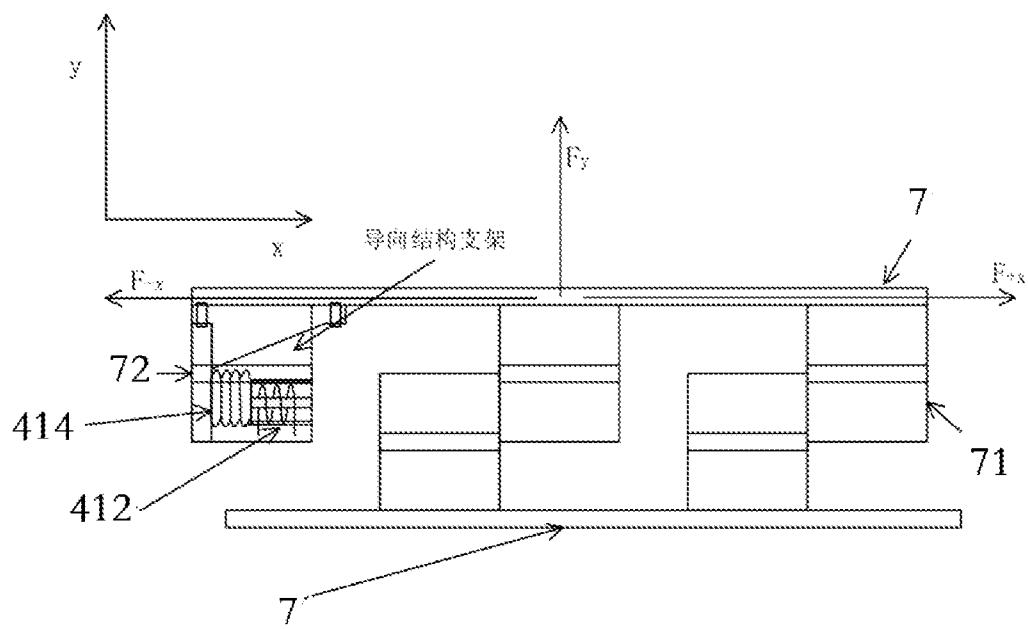


图 6

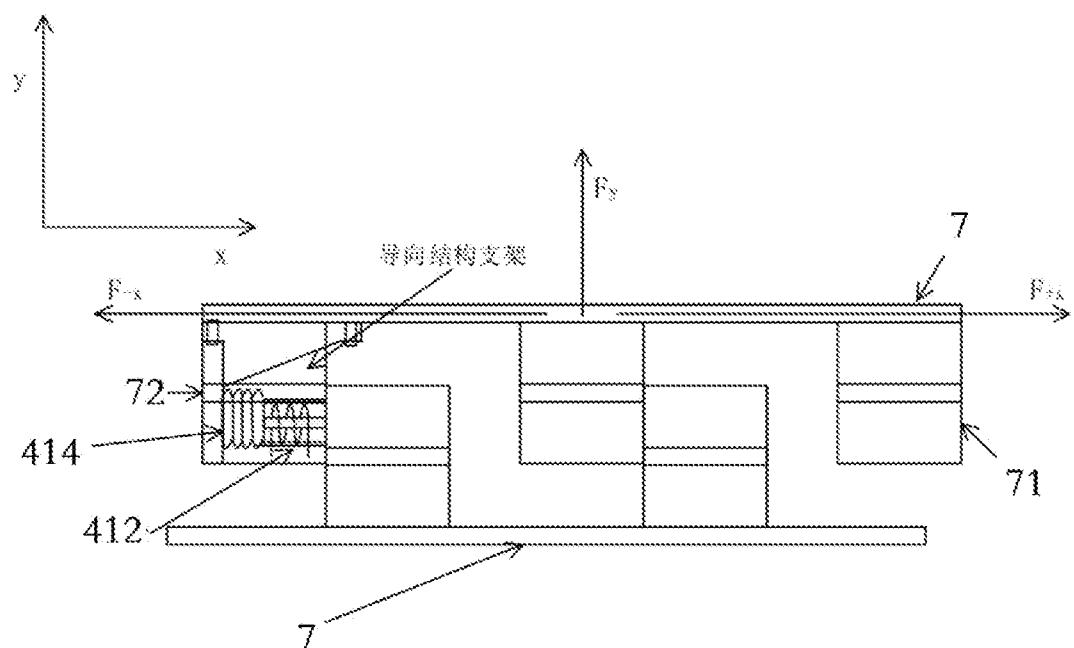


图 7

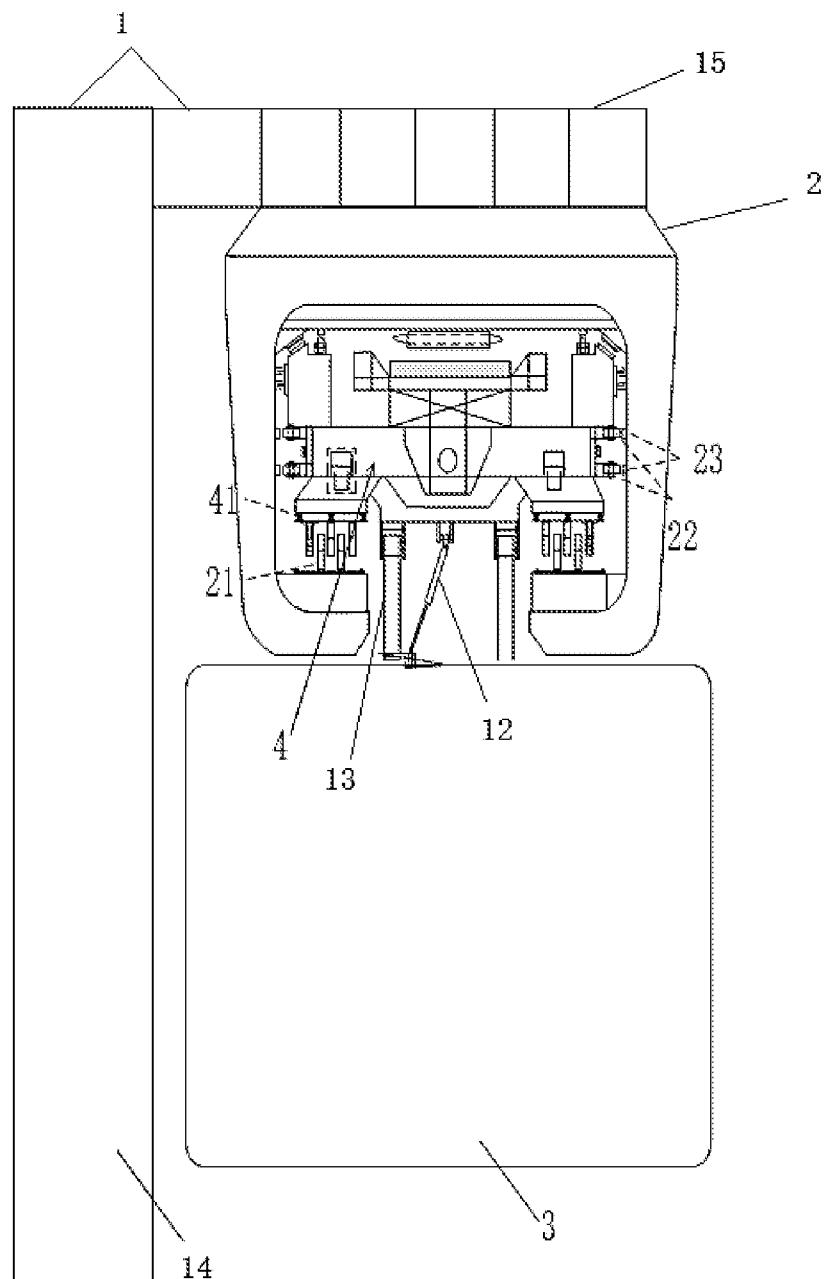


图 8

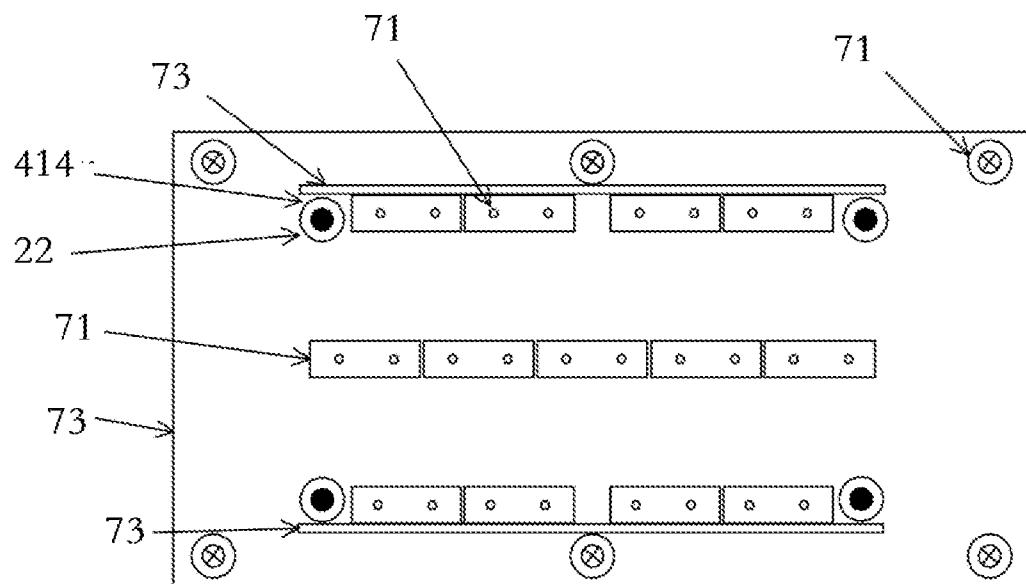


图 9a

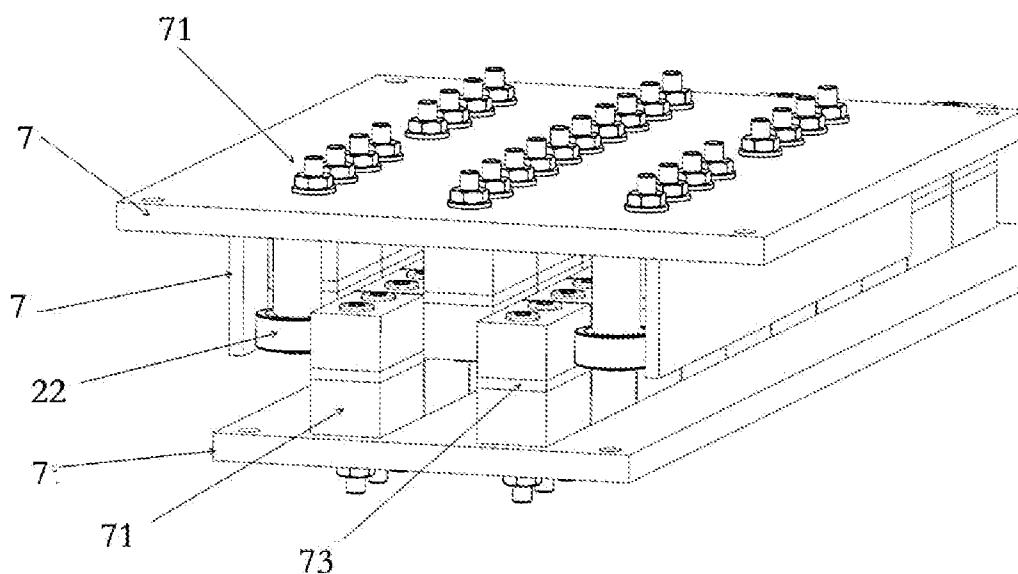


图 9b

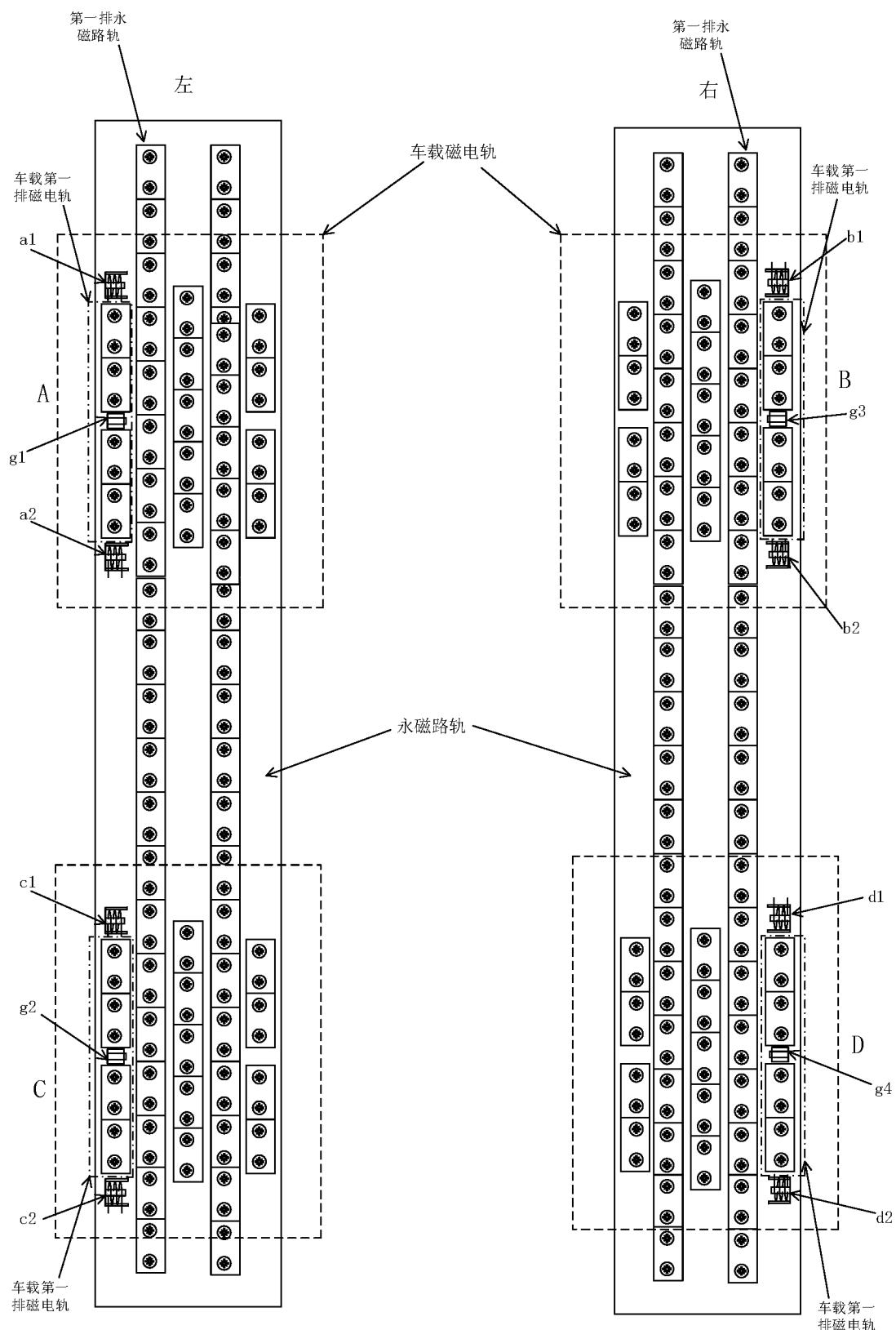


图 10

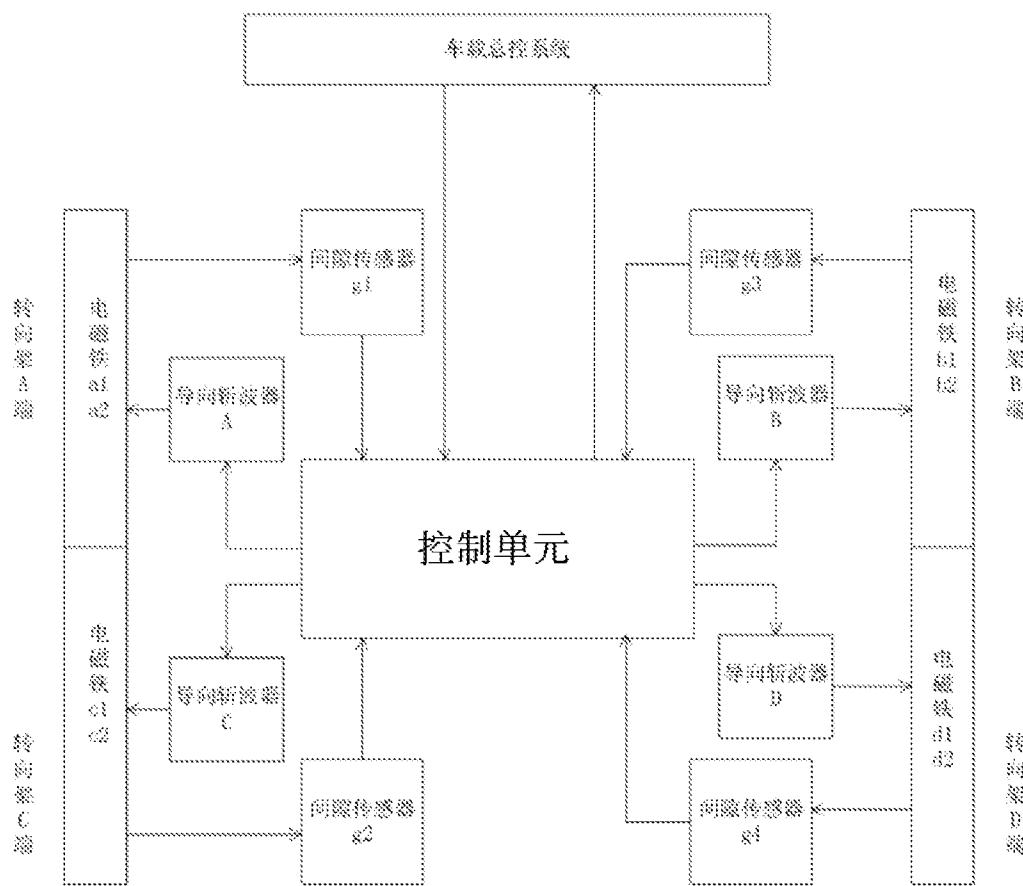


图 11

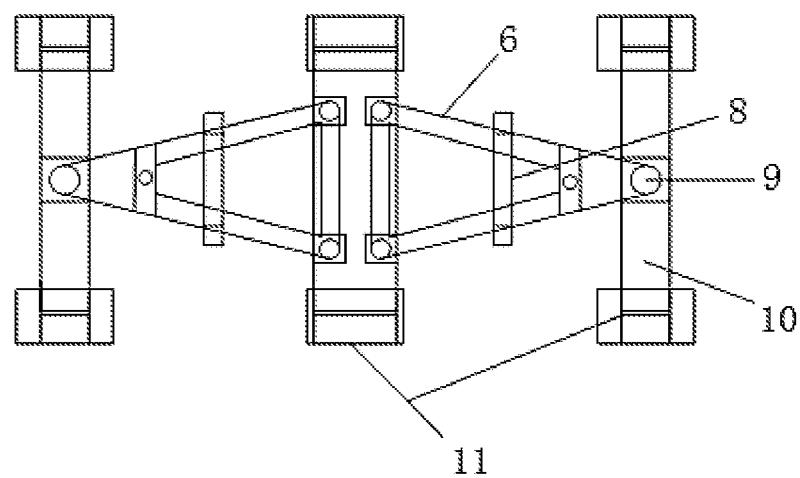


图 12

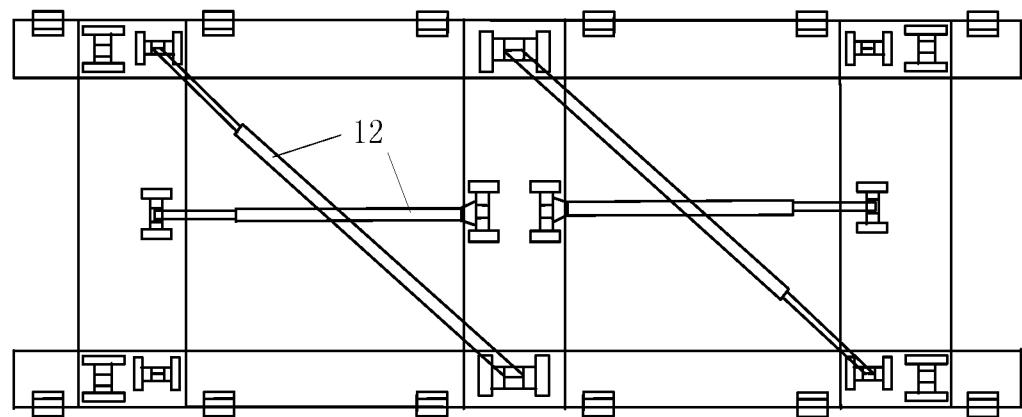


图 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/094131

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B60L 13/04(2006.01)i; B61B 13/08(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B60L; B61B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS, CNTXT, CNKI: 悬挂, 互斥, 车, 探测, 检测, 距离, 间隙, 相斥, 测量, 排斥, 磁, 传感; VEN, WOTXT, EPTXT, USTXT: hing, car+, ostraciz+, opposit+, detect+, distance, gap, magnet, suspend+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 109094422 A (JIANGXI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY) 28 December 2018 (2018-12-28) description, paragraphs 41-60, and figures 1-13	1-10
A	CN 1833907 A (LI, LINGQUN) 20 September 2006 (2006-09-20) description, paragraphs 71-92, and figures 1-3	1-10
A	CN 107791882 A (CRRC QINGDAO SIFANG CO., LTD.) 13 March 2018 (2018-03-13) entire document	1-10
A	CN 1470417 A (SHANGHAI MAGNETIC SUSPENSION TRAFFIC DEVELOPMENT CO., LTD.) 28 January 2004 (2004-01-28) entire document	1-10
A	CN 1958365 A (LI, LINGQUN) 09 May 2007 (2007-05-09) entire document	1-10
A	JP S6392205 A (ULVAC CORP.) 22 April 1988 (1988-04-22) entire document	1-10
A	JP H11122716 A (NIPPON KOKAN KK) 30 April 1999 (1999-04-30) entire document	1-10

 Further documents are listed in the continuation of Box C. See patent family annex.

- * Special categories of cited documents:
- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
- "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search 29 August 2019	Date of mailing of the international search report 27 September 2019
Name and mailing address of the ISA/CN China National Intellectual Property Administration (ISA/CN) No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088 China	Authorized officer
Facsimile No. (86-10)62019451	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2019/094131

Patent document cited in search report				Publication date (day/month/year)		Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)	
CN	109094422	A	28 December 2018	None					
CN	1833907	A	20 September 2006	CN	100377912	C	02 April 2008		
				DE	102006012423	B3	12 October 2006		
				US	7380508	B2	03 June 2008		
				US	2006219128	A1	05 October 2006		
CN	107791882	A	13 March 2018	WO	2019062121	A1	04 April 2019		
CN	1470417	A	28 January 2004	CN	1273324	C	06 September 2006		
CN	1958365	A	09 May 2007	CN	100391770	C	04 June 2008		
				US	7587982	B2	15 September 2009		
				DE	102006052194	B4	05 February 2009		
				DE	102006052194	A1	06 June 2007		
				US	2007095245	A1	03 May 2007		
JP	S6392205	A	22 April 1988	JP	2547403	B2	23 October 1996		
JP	H11122716	A	30 April 1999	None					

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2019/094131

A. 主题的分类

B60L 13/04 (2006.01)i; B61B 13/08 (2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

B60L; B61B

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNABS, CNTXT, CNKI:悬挂,互斥,车,探测,检测,距离,间隙,相斥,测量,排斥,磁,传感; VEN, WOTXT, EPTXT, USTXT:hing, car+, ostraciz+, opposit+, detect+, distance, gap, magnet, suspend+

C. 相关文件

类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 109094422 A (江西理工大学) 2018年 12月 28日 (2018 - 12 - 28) 说明书第41-60段, 附图1-13	1-10
A	CN 1833907 A (李岭群) 2006年 9月 20日 (2006 - 09 - 20) 说明书第71-92段, 附图1-3	1-10
A	CN 107791882 A (中车青岛四方机车车辆股份有限公司) 2018年 3月 13日 (2018 - 03 - 13) 全文	1-10
A	CN 1470417 A (上海磁悬浮交通发展有限公司) 2004年 1月 28日 (2004 - 01 - 28) 全文	1-10
A	CN 1958365 A (李岭群) 2007年 5月 9日 (2007 - 05 - 09) 全文	1-10
A	JP S6392205 A (ULVAC CORP) 1988年 4月 22日 (1988 - 04 - 22) 全文	1-10
A	JP H11122716 A (NIPPON KOKAN KK) 1999年 4月 30日 (1999 - 04 - 30) 全文	1-10

其余文件在C栏的续页中列出。见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期 2019年 8月 29日	国际检索报告邮寄日期 2019年 9月 27日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451	受权官员 胡春平 电话号码 86-(20)-28950706

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2019/094131

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
CN	109094422	A	2018年 12月 28日		无		
CN	1833907	A	2006年 9月 20日	CN	100377912	C	2008年 4月 2日
				DE	102006012423	B3	2006年 10月 12日
				US	7380508	B2	2008年 6月 3日
				US	2006219128	A1	2006年 10月 5日
CN	107791882	A	2018年 3月 13日	WO	2019062121	A1	2019年 4月 4日
CN	1470417	A	2004年 1月 28日	CN	1273324	C	2006年 9月 6日
CN	1958365	A	2007年 5月 9日	CN	100391770	C	2008年 6月 4日
				US	7587982	B2	2009年 9月 15日
				DE	102006052194	B4	2009年 2月 5日
				DE	102006052194	A1	2007年 6月 6日
				US	2007095245	A1	2007年 5月 3日
JP	S6392205	A	1988年 4月 22日	JP	2547403	B2	1996年 10月 23日
JP	H11122716	A	1999年 4月 30日		无		

表 PCT/ISA/210 (同族专利附件) (2015年1月)