(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 7 月 30 日 (30.07.2020)

WIPO | PCT

(10) 国际公布号
WO 2020/151174 A1

(51) 国际专利分类号:
B60L 13/03 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/092470

(22) 国际申请日: 2019 年 6 月 24 日 (24.06.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
201910070636.6 2019年1月22日 (22.01.2019) CN

(71) 申请人: 南京航空航天大学 (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) [CN/CN]; 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。

(72) 发明人: 曹瑞武 (CAO, Ruiwu); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。
陆鸣航 (LU, Minghang); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。 苏恩超 (SU, Enchao); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。 沈丹妮 (SHEN, Danni); 中国江苏省南京市秦淮区御道街29号, Jiangsu 210016 (CN)。

(74) 代理人: 南京苏高专利商标事务所（普通合伙） (NANJING SUGAO PATENT AND TRADEMARK FIRM (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国江苏省南京市白下区中山东路198号龙台国际大厦1912室, Jiangsu 210005 (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, 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,

(54) **Title:** RAIL TRANSIT TRACTION SYSTEM BASED ON FLUX-SWITCHING PERMANENT MAGNET LINEAR MOTOR

(54) **发明名称:** 一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统

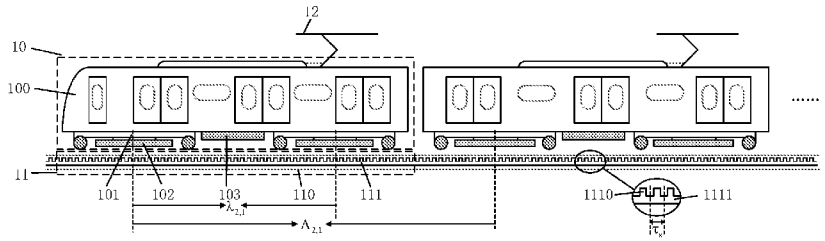

图 1

(57) **Abstract:** Disclosed in the present invention is a rail transit traction system based on a flux-switching permanent magnet linear motor. The rail transit traction system based on the flux-switching permanent magnet linear motor is composed of a plurality of subsystems. The subsystems of the urban rail transportation traction system based on the flux-switching permanent magnetic linear motor comprise a car, a rail, and a direct current power supply system. The car comprises a car body, bogies, $i*2^p$ primaries of the permanent magnet flux switching linear motor, an inverter, and a motor controller. The rail comprises a train guide rail and a secondary of the flux-switching permanent magnet linear motor. $j*2^q$ subsystems of the urban rail transit traction system based on the flux-switching permanent magnet linear motor constitute one whole traction system. The present invention features a simple secondary structure, high system efficiency, and a high system power factor, and rules for the setting of distance between primaries of the permanent magnet flux-switching linear motor in the traction system are provided. Fluctuations in system traction can be effectively reduced, thereby reducing noise during train operation, and improving stability.

(57) **摘要**: 本发明公开了一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统。基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统由若干子系统构成。基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统包括车厢、轨道和直流供电系统。车厢包括车厢主体、转向架、$i*2^p$个永磁磁通切换直线电机的初级、逆变器及电机控制器。轨道包括列车导轨以及永磁磁通切换直线电机的次级。$j*2^q$个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统。本发明具有次级结构简单、系统效率高、系统功率因数高的特点，并且提出了牵引系统中永磁磁通切换直线电机初级空间距离的设定规则，可以有效降低系统牵引力的波动，进而降低列车运行时的噪声，提高稳定性。

WO 2020/151174 A1

[见续页]

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))。

一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统

技术领域

本发明涉及的是一种基于永磁磁通切换直线电机驱动的列车系统，属于电机驱动与控制技术领域。

背景技术

在城市化进程中，轨道交通扮演着不可或缺的角色。由传统旋转电机驱动的列车需要依靠机械传动装置，将旋转力矩转换为黏着式牵引力，导致效率较低，并且输出牵引力受到轨道状况、摩擦系数等因素影响，因此爬坡能力与拐弯能力较差，路线规划不便，成本较高，其应用受到了一定的限制。与旋转电机相比，直线电机驱动系统直接产生电磁力，电磁力为非黏着牵引力，摆脱了轨道状况的影响，同时直线电机无需机械传动装置，因此体积小、功率密度高的优点，因此在轨道交通领域应用前景光明。

目前，直线感应电机在国内外轨道交通领域应用广泛。直线感应电机的次级仅由感应板与导磁板构成，初级由电枢绕组与铁心构成，具有结构简单，体积小，成本低的优点，但是直线感应电机涡流损耗较高，因此效率与功率因数较低，同时直线感应电机的控制较为复杂，因此其长期运营成本与系统成本较高。

传统永磁直线同步电机的效率、功率因数、功率密度均较高；然而该类电机的永磁体置于次级，沿轨道铺设，次级成本高昂，且定位力较大，同时，传统永磁电机的弱磁性能较差，难以实现高速下的恒功率控制，调速范围有限，这些缺点极大地限制了其在长行程领域的应用。

近年来，永磁磁通切换直线电机引起了国内外学者的广泛关注，该类电机次级结构简单，仅由导磁材料构成，成本较低、便于维护，同时具有功率密度高、功率因数高、效率高的显著优点。研究结果表明，其长期运营成本低于感应电机，并且对系统容量要求更低。但是，该类电机运用于轨道交通领域时牵引力波动较大，会造成明显的噪声，并且降低电机运行的可靠性，这限制了该类电机在轨道交通领域的应用。

发明内容

针对现有技术上存在的不足，本发明目的在于提供一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统，该牵引系统通过合理设计驱动电机的空间排列方式，可以有效降低列车驱动电机的牵引力输出谐波，在不降低牵引力输出平均值的情况下，达到明显降低牵引力波动的效果，进而减小运行时的噪声，并提高系统的稳定性。

本发明提出的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，包括

车厢 10、轨道 11 和直流供电系统 12；

所述车厢 10 包含车厢主体 100、转向架 101、$i*2^p$ 个永磁磁通切换直线电机的初级 102、以及逆变器与电机控制器 103；

所述轨道 11 包含列车导轨 110 以及永磁磁通切换直线电机的次级 111，所述永磁磁通切换直线电机的次级 111 包含次级齿 1110 与次级轭部 1111。

进一步地，对属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级 102 依次编号，记作电机 M_1 至电机 $M_{i*2}{}^p$，电机 M_a 与电机 M_b 的中心线间距离记为 $\lambda_{(a,b)}$；相邻次级齿 1110 中心线间距离为 τ_s；对任一所述永磁磁通切换直线电机运行时的牵引力进行傅利叶分解，得到各次牵引力的幅值，根据牵引力前 p+q 项谐波的幅值大小，对谐波次数进行排列编号，记作 h_1 至 h_{p+q}；

属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级（102）间距离，满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\lambda_{(x,x+2^p)},\tau_s)=0 & (1) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_k} & (2) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，mod（a,b）表示 a 除以 b 的余数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^p \quad (3)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（1）具有实际意义的 x 时，（1）视为恒成立；当不存在满足（3）的 t、k 数组时，（2）式视为恒成立；

作为一种优选，对同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级 102 移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同电机间的顺序调换，形成新的排列方式；

进一步地，$j*2^q$ 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统；

对子系统依次编号，记作子系统 S_1 至子系统 $S_{j*2}{}^q$，子系统 S_a 与子系统 S_b 的中心线间距离记为 $\Lambda_{(a,b)}$；子系统间的 $\Lambda_{(a,b)}$ 满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\Lambda_{(x,x+2^q)},\tau_s)=0 & (4) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\Lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_{p+k}} & (5) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^q \quad (6)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（4）具有实际意义的 x 时，（4）视为恒成立；当不存在满足（6）的 t、k 数组时，（5）式视为恒成立；

作为一种优选，对不同子系统移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同子系统间的顺序调换，形成新的排列方式；

作为一种优选，根据优先需要消除的谐波次数，对 h_1 至 h_{p+q} 的值进行调整，形成基于新的 h_1 至 h_{p+q} 构成的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统及其构成的牵引系统。

本发明电机主要存在如下优点：

本发明提出的一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统，课题通过合理设计驱动电机的空间排列方式，针对性的消除指定次数的谐波，进而有效降低列车驱动电机的整体牵引力输出谐波，在不降低平均牵引力输出的前提下，达到明显降低牵引力波动的效果，进而减小运行时的噪声，并提高系统的稳定性。

附图说明

下面结合附图和实施例对本发明进一步说明：

图 1 是实施例 1 中一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统的结构示意图；

图 2 是实施例 1 中一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统的轨道正视图；

图 3 是实施例 1 中一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统的驱动电机结构示意图；

图 4 是实施例 1 中一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统的牵引力波形图；

图 5 是实施例 2 中一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统的结构示意图；

其中，10-车厢，11-轨道，12-直流供电系统，100-车厢主体，101-转向架，102-永磁磁通切换直线电机的初级，103-逆变器与电机控制器，110-列车导轨，111-永磁磁通切换直线电机的次级，1110-次级齿，1111-次级轭部。

具体实施方式

本发明提供一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统，为使本发明的目的，技术方案及效果更加清楚，明确，以及参照附图并举实例对本发明进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

本发明提出的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，包括车厢 10、轨道 11 和直流供电系统 12；

所述车厢 10 包含车厢主体 100、转向架 101、$i*2^p$ 个永磁磁通切换直线电机的初级 102、以及逆变器与电机控制器 103；

所述轨道 11 包含列车导轨 110 以及永磁磁通切换直线电机的次级 111，所述永磁磁通切换直线电机的次级 111 包含次级齿 1110 与次级轭部 1111。

进一步地，对属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级 102 依次编号，记作电机 M_1 至电机 M_{i*2^p}，电机 M_a 与电机 M_b 的中心线间距离记为 $\lambda_{(a,b)}$；相邻次级齿 1110 中心线间距离为 τ_s；对任一所述永磁磁通切换直线电机运行时的牵引力进行傅利叶分解，得到各次牵引力的幅值，根据牵引力前 p+q 项谐波的幅值大小，对谐波次数进行排列编号，记作 h_1 至 h_{p+q}；

属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级（102）间距离，满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\lambda_{(x,x+2^p)},\tau_s)=0 & (1) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_k} & (2) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，mod（a,b）表示 a 除以 b 的余数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^p \quad (3)$$

其中，t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（1）具有实际意义的 x 时，（1）视为恒成立；当不存在满足（3）的 t、k 数组时，（2）式视为恒成立；

作为一种优选，对同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级 102 移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同电机间的顺序调换，形成新的排列方式；

进一步地，$j*2^q$ 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统；

对子系统依次编号，记作子系统 S_1 至子系统 S_{j*2^q}，子系统 S_a 与子系统 S_b 的中心线间距离记为 $\Lambda_{(a,b)}$；子系统间的 $\Lambda_{(a,b)}$ 满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\Lambda_{(x,x+2^q)},\tau_s)=0 & (4) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\Lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_{p+k}} & (5) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^q \quad (6)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（4）具有实际意义的 x 时，（4）视为恒成立；当不存在满足（6）的 t、k 数组时，（5）式视为恒成立；

作为一种优选，对不同子系统移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同子系统间的顺序调换，

形成新的排列方式；

作为一种优选，根据优先需要消除的谐波次数，对 h_1 至 h_{p+q} 的值进行调整，形成基于新的 h_1 至 h_{p+q} 构成的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统及其构成的牵引系统。

实施例 1

参见图 1，图 1 为本发明的一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统，本实施例中共 4 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，由于各子系统中电机空间分布方式相同，且列车各子系统在空间中等距分布，故图 1 中仅展示了其中前两个。为了更清晰的展示本实施例中各部分，图 1 放大了车厢 10 增加了轨道 11 之间的距离，实际情况中，两者通过轮轨紧密接触，如图 2 所示。

本实施例中，i=1，p=1，j=4，q=0。本实施例中，基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，包括车厢 10、轨道 11 和直流供电系统 12；车厢 10 包含车厢主体 100、转向架 101、$i*2^p=2$ 个永磁磁通切换直线电机的初级 102、以及逆变器与电机控制器 103。轨道 11 包含列车导轨 110 以及永磁磁通切换直线电机的次级 111，所述永磁磁通切换直线电机的次级 111 包含次级齿 1110 与次级轭部 1111。$j*2^q=4$ 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统。为子系统编号，自左向右分别记作 S1,S2,S3,S4；为 S1 中的电机编号，自左向右分别记作 M1,M2。

对于同一子系统内的永磁磁通切换直线电机初级，中心线距离满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\lambda_{(x,x+2^p)},\tau_s)=0 & (1) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_k} & (2) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，mod（a,b）表示 a 除以 b 的余数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^p \quad (3)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（1）具有实际意义的 x 时，（1）视为恒成立；当不存在满足（3）的 t、k 数组时，（2）式视为恒成立；

代入 i=1，p=1，j=4，q=0。（1）式表明 $\lambda_{(x,x+2)}$ 为 τ_s 的整倍数，由于每节车厢仅有 2 台电机，因此（1）式视为恒成立；满足（3）式的 k、t 有：k=1，t=0；因此（2）式表明 M1 与 M2 的中心线距离 $\lambda_{(1,2)}$ 为 τ_s 的整数加 $1/2h_1$ 倍。

本实施例选取的永磁磁通切换直线电机参见图 3，其永磁体充磁方向如图中箭头方向所示。有限元仿真表明，该电机额定情况下，牵引力含有大量二次谐波，因此选取 $h_1=2$；结合

（2）式结论，即 M1 与 M2 与次级齿的相对位置错开 1/4 个齿距。

子系统的 $\Lambda_{(a,b)}$满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\Lambda_{(x,x+2^q)},\tau_s)=0 & (4) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\Lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_{p+k}} & (5) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^q \quad (6)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（4）具有实际意义的 x 时，（4）视为恒成立；当不存在满足（6）的 t、k 数组时，（5）式视为恒成立；

代入 i=1，p=1，j=4，q=0。（4）式表明 $\Lambda_{(x,x+1)}$为 τ_s 的整倍数，即 S1、S2、S3 与 S4 四个子系统的中心线距离均为 τ_s 的整倍数；满足（6）式的 k、t 不同时存在，因此（5）式不具有实际意义，视为恒成立，不进一步限制子系统在空间的分布。

参见图 4，经过有限元仿真后，将本实施例中的每台电机单独运行的牵引力波形，以及采用本实施例中牵引系统输出牵引力除以 16（平均至每台电机）后波形进行对比。由图可知，每台电机单独运行时的牵引力波动为 1.27kN，采用本实施例中牵引系统结构之后，平均到每台电机的牵引力波动仅为 0.29kN，明显小于前者，因此达到了削减谐波，改善牵引力波动，减小噪声，提高系统稳定性的作用。

值得注意的是，本发明提出的利用空间排布以抵消直线电机牵引力谐波的方法不仅仅适用于永磁磁通切换直线电机，该方法同样适用于其他类型的直线电机。对于某一给定的直线牵引电机，只需求得该电机的推力波动谐波分布情况，即可通过本发明提出的方法减小其推力波动，此时 τ_s 为该电机定子或次级的一个基本结构周期长度。

实施例 2

参见图 5，图 5 为本发明的一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统。本实施例与实施例 1 的区别在于，本实施例增加了电机数量，以达到削减更多次数牵引力谐波的目的。由于各子系统中电机空间分布方式相同，且各子系统在空间中等距分布，故图 5 中仅展示了其中前两个子系统。

本实施例中，i=1，p=2，j=2，q=1。即每个车厢 10 包含车厢主体 100、转向架 101、$i*2^p=4$ 个永磁磁通切换直线电机的初级 102。$j*2^q=4$ 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统。为子系统编号，自左向右分别记作 S1,S2,S3,S4；为 S1 中的电机编号，自左向右分别记作 M1,M2,M3,M4。

对于同一子系统内的永磁磁通切换直线电机初级，中心线距离满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\lambda_{(x,x+2^p)},\tau_s)=0 & (1) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_k} & (2) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，mod（a,b）表示 a 除以 b 的余数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^p \quad (3)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（1）具有实际意义的 x 时，（1）视为恒成立；当不存在满足（3）的 t、k 数组时，（2）式视为恒成立；

代入 i=1，p=2，j=2，q=1。（1）式表明 $\lambda_{(x,x+2)}$为 τ_s 的整倍数，即 M1 与 M3，M2 与 M4 的中心线距离为 τ_s 的整倍数；满足（3）式的 k、t 组合有：（k=1，t=0）、（k=1，t=1）以及（k=2，t=0）；（2）式表明 $\lambda_{(1,2)}$与 $\lambda_{(3,4)}$为 τ_s 的整数加 $1/2h_1$ 倍，$\lambda_{(1,3)}$为 τ_s 的整数加 $1/2h_2$ 倍。其中，h_1 与 h_2 为根据实际需要，决定消除的牵引力谐波次数。即 M1 与 M2 和次级齿的相对位置错开 $1/2h_1$ 个齿距，M3 与 M4 和次级齿的相对位置错开 $1/2h_1$ 个齿距，即 M1 与 M3 和次级齿的相对位置错开 $1/2h_2$ 个齿距。

子系统的 $\Lambda_{(a,b)}$满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\Lambda_{(x,x+2^q)},\tau_s)=0 & (4) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\Lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_{p+k}} & (5) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^q \quad (6)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（4）具有实际意义的 x 时，（4）视为恒成立；当不存在满足（6）的 t、k 数组时，（5）式视为恒成立；

代入 i=1，p=2，j=2，q=1。（1）式表明 $\Lambda_{(x,x+2)}$为 τ_s 的整倍数，即 S1 与 S3，S2 与 S4 的中心线距离均为 τ_s 的整倍数；式的 k、t 组合有：k=1，t=0；（6）式表明 $\Lambda_{(1,2)}$为 τ_s 的整数加 $1/2h_3$ 倍。其中，h_3 为根据实际需要，决定消除的牵引力谐波次数。

本实施例的特点在于，与实施例相比，进一步削减了牵引力谐波，在对驱动电机数量需求更大的轨道交通场合具有良好应用前景。

以上显示和描述了本发明的基本原理和主要特征和本发明的优点。本行业的技术人员应该了解，本发明不受上述实施例的限制，上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原

理，在不脱离本发明精神和范围的前提下，本发明还会有各种变化和改进，这些变化和改进都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

权 利 要 求 书

1、一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，包括车厢（10）、轨道（11）和直流供电系统（12），其特征在于，

所述车厢（10）包含车厢主体（100）、转向架（101）、$i*2^p$ 个永磁磁通切换直线电机的初级（102）、以及逆变器与电机控制器（103）；

所述轨道（11）包含列车导轨（110）以及永磁磁通切换直线电机的次级（111），所述永磁磁通切换直线电机的次级（111）包含次级齿（1110）与次级轭部（1111）。

2、根据权利要求 1 所述的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，其特征在于，

对属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级（102）依次编号，记作电机 M_1 至电机 M_{i*2^p}，电机 M_a 与电机 M_b 的中心线间距离记为 $\lambda_{(a,b)}$；相邻次级齿（1110）中心线间距离为 τ_s；对任一所述永磁磁通切换直线电机运行时的牵引力进行傅利叶分解，得到各次牵引力的幅值，根据牵引力前 p+q 项谐波的幅值大小，对谐波次数进行排列编号，记作 h_1 至 h_{p+q}；

属于同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级（102）间距离，满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\lambda_{(x,x+2^p)},\tau_s)=0 & (1) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_k} & (2) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，mod（a,b）表示 a 除以 b 的余数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^p \quad (3)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（1）具有实际意义的 x 时，（1）视为恒成立；当不存在满足（3）的 t、k 数组时，（2）式视为恒成立。

3、根据权利要求 2 所述的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统，其特征在于，对同一子系统的所述永磁磁通切换直线电机的初级（102）移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同电机间的顺序调换，形成新的排列方式。

4、根据权利要求 1 至 3 任一项所述的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统构成的完整牵引系统，其特征在于，

$j*2^q$ 个基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统组成一个完整的牵引系统；

对子系统依次编号，记作子系统 S_1 至子系统 S_{j*2^q}，子系统 S_a 与子系统 S_b 的中心线间距离记为 $\Lambda_{(a,b)}$；子系统间的 $\Lambda_{(a,b)}$ 满足如下条件：

$$\begin{cases} \mathrm{mod}(\Lambda_{(x,x+2^q)},\tau_s)=0 & (4) \\ \dfrac{\mathrm{mod}(\Lambda_{(t\cdot 2^k+1,t\cdot 2^k+2^{k-1}+1)},\tau_s)}{\tau_s}=\dfrac{1}{2h_{p+k}} & (5) \end{cases}$$

其中，x 为正整数，t、k 为满足如下条件的数组：

$$t\cdot 2^k+2^{k-1}+1\le 2^q \quad (6)$$

其中 t 为非负整数，k 为正整数；

当不存在使（4）具有实际意义的 x 时，（4）视为恒成立；当不存在满足（6）的 t、k 数组时，（5）式视为恒成立。

5、根据权利要求 4 所述的一种基于永磁磁通切换直线电机的轨道交通牵引系统，其特征在于，对不同子系统移动 τ_s 的整倍数距离，以实现不同子系统间的顺序调换，形成新的排列方式。

6、根据权利要求 1 至 5 任一项所述的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统及其构成的牵引系统，其特征在于，根据优先需要消除的谐波次数，对 h_1 至 h_{p+q} 的值进行调整，形成基于新的 h_1 至 h_{p+q} 构成的一种基于永磁磁通切换直线电机的城市轨道交通牵引系统的子系统及其构成的牵引系统。

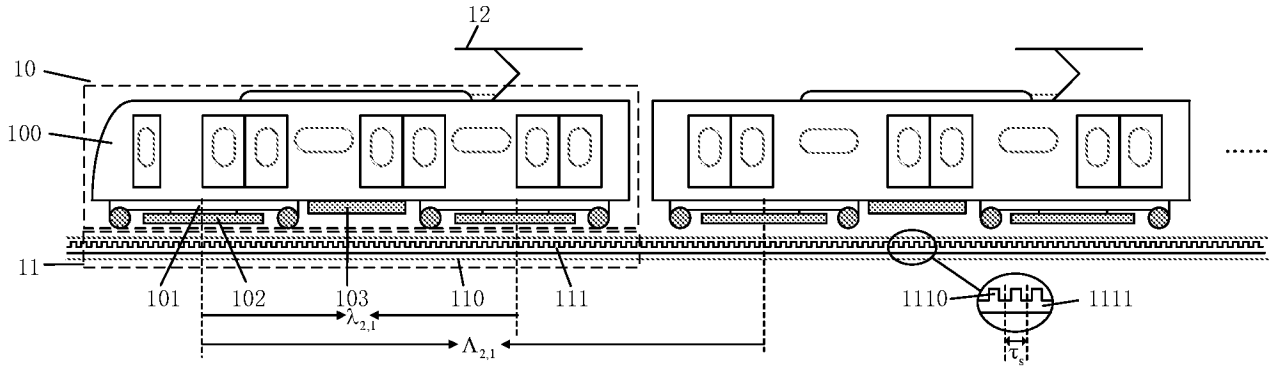
12
10
100
11
101
102
103
110
111
1110
1111
$\lambda_{2,1}$
$\Lambda_{2,1}$
τ_s

图 1

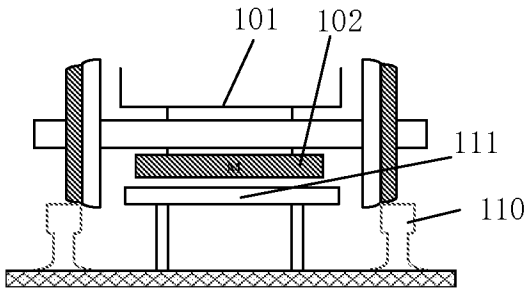
101
102
111
110

图 2

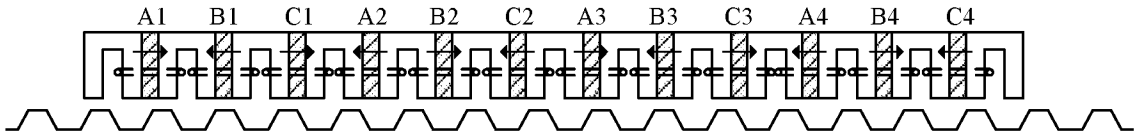
A1
B1
C1
A2
B2
C2
A3
B3
C3
A4
B4
C4

图 3

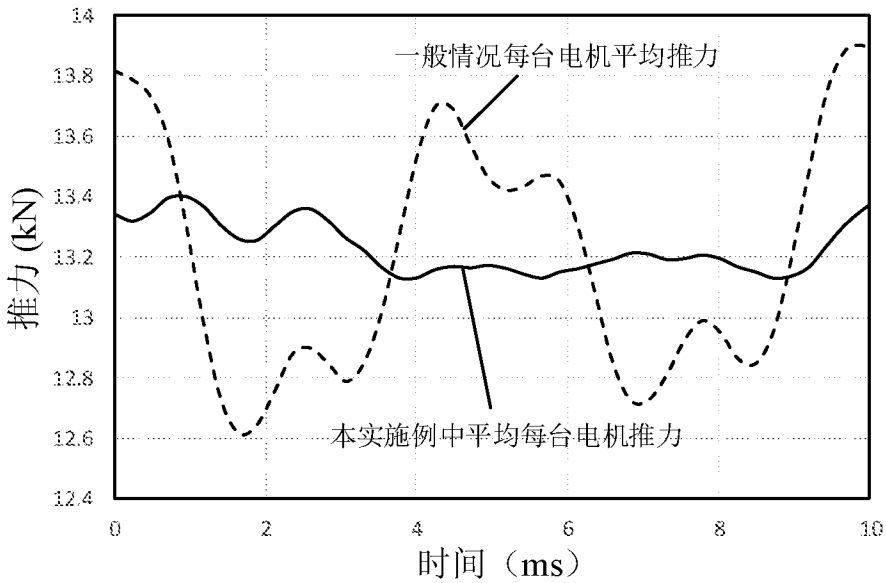
14
13.8
13.6
13.4
13.2
13
12.8
12.6
12.4
推力 (kN)
0
2
4
6
8
10
时间（ms）
一般情况每台电机平均推力
本实施例中平均每台电机推力

图 4

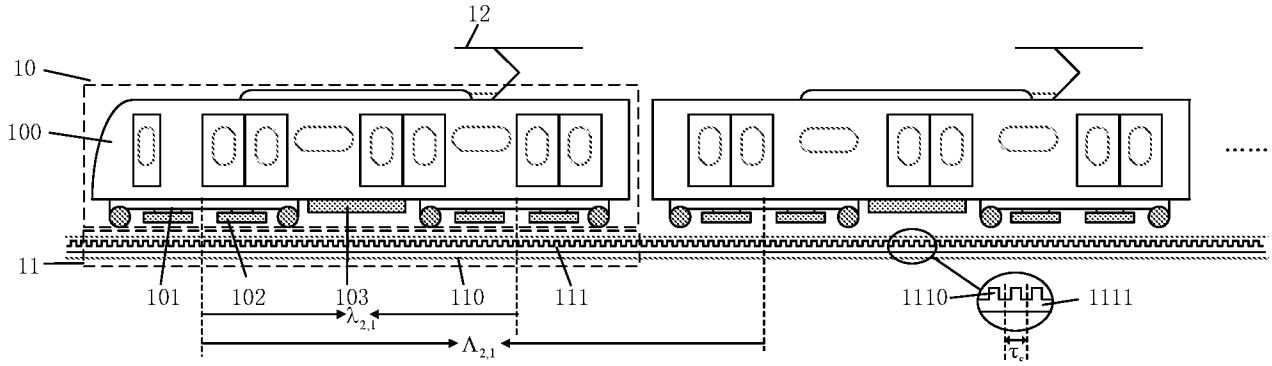
12
10
100
11
101
102
103
110
111
1110
1111
$\lambda_{2,1}$
$\Lambda_{2,1}$
τ_c

图 5

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/092470

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B60L 13/03(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

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, CNKI, CNTXT: 直线, 轨道, 转向架, 永磁, 磁通, 切换, 牵引, 初级, 次级, 电动机, 导轨, 距离, 电机, 磁, 线性; VEN, WOTXT, USTXT, EPTXT: linear, rail, railway, permanet, magnet, change, shift, motor, distance

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	CN 103227551 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 31 July 2013 (2013-07-31) description, paragraphs 22-30, and figures 1-3	1
A	CN 107856700 A (ZIBO SINOCON MAGNETOELECTRIC TECHNOLOGY CO., LTD. et al.) 30 March 2018 (2018-03-30) entire document	1-6
A	CN 106828183 A (SOUTHWEST JIAOTONG UNIVERSITY) 13 June 2017 (2017-06-13) entire document	1-6
A	CN 103227551 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS) 31 July 2013 (2013-07-31) entire document	1-6
A	US 2002093252 A1 (KOREA ELECTROTECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE) 18 July 2002 (2002-07-18) entire document	1-6
A	EP 2012414 A2 (KOREA ELECTROTECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE) 07 January 2009 (2009-01-07) entire document	1-6

☑ 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	Date of mailing of the international search report
25 September 2019	**22 October 2019**
Name and mailing address of the ISA/CN **China National Intellectual Property Administration** **No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088** **China** Facsimile No. **(86-10)62019451**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/CN2019/092470

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 102594085 A (SOUTHEAST UNIVERSITY) 18 July 2012 (2012-07-18) entire document	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/CN2019/092470

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	103227551	A	31 July 2013	None			
CN	107856700	A	30 March 2018	None			
CN	106828183	A	13 June 2017	CN	207089043	U	13 March 2018
US	2002093252	A1	18 July 2002	KR	20020058182	A	12 July 2002
				US	6580185	B2	17 June 2003
				KR	100392308	B1	23 July 2003
				JP	2002218729	A	02 August 2002
				JP	3672530	B2	20 July 2005
EP	2012414	A2	07 January 2009	EP	2012414	A3	06 April 2016
				US	2009009010	A1	08 January 2009
				US	7928612	B2	19 April 2011
				KR	20090004468	A	12 January 2009
				KR	996135	B1	24 November 2010
CN	102594085	A	18 July 2012	None			

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2019/092470

A. 主题的分类

B60L 13/03(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

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,CNKI,CNTXT:直线，轨道，转向架，永磁，磁通,切换,牵引，初级，次级，电动机，导轨，距离，电机，磁，线性；VEN,WOTXT,USTXT,EPTXT:linear,rail,railway,permanet,magnet,change,shift,motor,distance

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
X	CN 103227551 A (南京航空航天大学) 2013年 7月 31日 (2013-07-31) 说明书第22-30段，附图1-3	1
A	CN 107856700 A (淄博中聚磁电科技有限公司 等) 2018年 3月 30日 (2018-03-30) 全文	1-6
A	CN 106828183 A (西南交通大学) 2017年 6月 13日 (2017-06-13) 全文	1-6
A	CN 103227551 A (南京航空航天大学) 2013年 7月 31日 (2013-07-31) 全文	1-6
A	US 2002093252 A1 (KOREA ELECTROTECH RES INST) 2002年 7月 18日 (2002-07-18) 全文	1-6
A	EP 2012414 A2 (KOREA ELECTROTECH RES INST) 2009年 1月 7日 (2009-01-07) 全文	1-6
A	CN 102594085 A (东南大学) 2012年 7月 18日 (2012-07-18) 全文	1-6

☐ 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	国际检索报告邮寄日期
2019年 9月 25日	2019年 10月 22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

表 PCT/ISA/210 (第2页) (2015年1月)

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2019/092470

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	103227551	A	2013年 7月 31日	无			
CN	107856700	A	2018年 3月 30日	无			
CN	106828183	A	2017年 6月 13日	CN	207089043	U	2018年 3月 13日
US	2002093252	A1	2002年 7月 18日	KR	20020058182	A	2002年 7月 12日
				US	6580185	B2	2003年 6月 17日
				KR	100392308	B1	2003年 7月 23日
				JP	2002218729	A	2002年 8月 2日
				JP	3672530	B2	2005年 7月 20日
EP	2012414	A2	2009年 1月 7日	EP	2012414	A3	2016年 4月 6日
				US	2009009010	A1	2009年 1月 8日
				US	7928612	B2	2011年 4月 19日
				KR	20090004468	A	2009年 1月 12日
				KR	996135	B1	2010年 11月 24日
CN	102594085	A	2012年 7月 18日	无			