

# (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  
2021 年 6 月 3 日 (03.06.2021)



(10) 国际公布号  
**WO 2021/103246 A1**

(51) 国际专利分类号:  
*H02K 41/02* (2006.01) *H02K 15/00* (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2019/128490

(22) 国际申请日: 2019 年 12 月 26 日 (26.12.2019)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:  
201911174572.0 2019 年 11 月 26 日 (26.11.2019) CN

(71) 申请人: 江苏大学 (JIANGSU UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(72) 发明人: 赵文祥 (ZHAO, Wenxiang); 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。  
朱旭辉 (ZHU, Xuhui); 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。  
吉敬华 (JI,

Jinghua); 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。  
徐亮 (XU, Liang); 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。  
赵美玲 (ZHAO, Meiling); 中国江苏省镇江学府路 301 号, Jiangsu 212013 (CN)。

(74) 代理人: 北京德崇智捷知识产权代理有限公司 (JW IP LAW FIRM); 中国北京市朝阳区酒仙桥路 14 号 A5 楼 7 层 701, Beijing 100015 (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, 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,

(54) **Title:** PRIMARY PERMANENT MAGNET BILATERAL LINEAR MAGNETIC FIELD MODULATION ELECTRIC MOTOR AND LOW MAGNETIC RESISTANCE DESIGN METHOD THEREFOR

(54) 发明名称: 一种初级永磁双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法

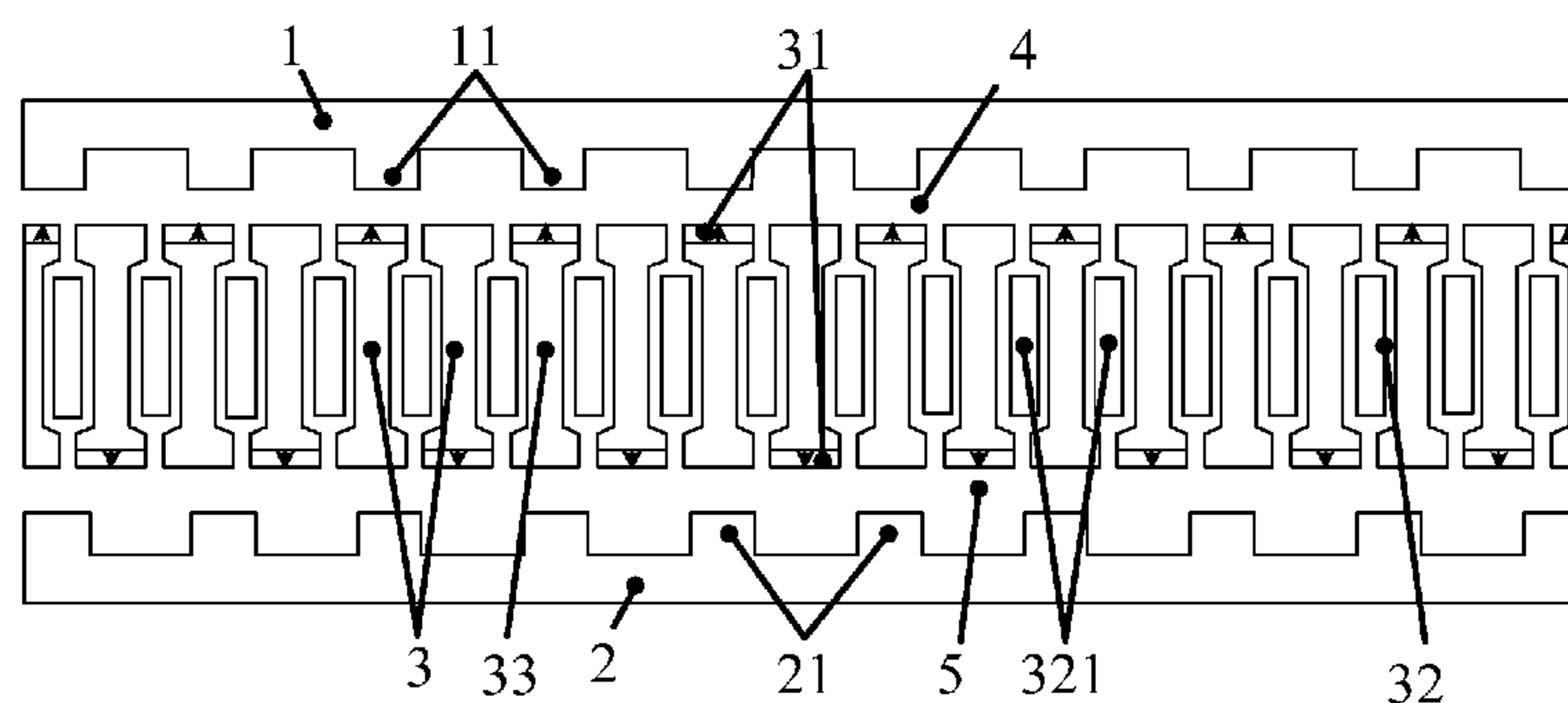


图 1

(57) **Abstract:** Disclosed are a primary permanent magnet bilateral linear magnetic field modulation electric motor and a low magnetic resistance design method therefor. The electric motor structurally comprises two secondary stages (1, 2) which are only composed of salient pole teeth (11, 21), and a primary stage (3) provided with permanent magnets (31) and armature windings (321), wherein the upper and lower secondary stage salient pole teeth (11, 21) are oppositely arranged, and the salient pole teeth (11, 21) play the role of modulating a magnetic field; the surface-mounted permanent magnets (31) with the same excitation direction are distributed at intervals on the tooth crest of a unilateral armature of the primary stage (3), and at the same time, the permanent magnets (31) on two sides of the primary stage (3) are distributed in a staggered manner; a primary iron core uses a modular design; each primary module is only composed of long-strip-shaped armature teeth (33); a semi-closed armature groove or a closed groove is formed between every two adjacent modules; and the armature windings (321) are arranged in the grooves. The electric motor processing difficulty can be effectively reduced; and at the same time, due to the arrangement design of the permanent magnets (31) and the secondary modulation teeth, the magnetic flux path can be effectively simplified, the magnetic resistance on the magnetic flux path is reduced, the magnetic field amplitude of the electric motor is increased, the torque performance is improved, and the application prospects are wide.

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))。

(57) 摘要：一种初级永磁双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法，电机结构包括两个仅由凸极齿（11,21）组成的次级（1,2）以及一个排布着永磁体（31）及电枢绕组（321）的初级（3），上下两个次级凸极齿（11,21）正对排布，凸极齿（11,21）起到调制磁场的效果，初级（3）单边电枢齿顶间隔排布励磁方向相同的表贴式永磁体（31），同时初级（3）两边永磁体（31）错位分布，初级铁心采用模块化设计，每个初级模块仅由长条形电枢齿（33）组成，邻近两个模块之间形成半闭口电枢槽或闭口槽，槽内排布电枢绕组（321），能有效降低电机加工难度，同时永磁体（31）、次级调制齿的排布设计能有效简化磁通路径，降低磁通路径上的磁阻，提高电机磁场幅值，提升转矩性能，具有较大的应用前景。

## 一种初级永磁双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法

### 技术领域

本发明涉及电工、电机设计及控制和长行程电动领域，特别是涉及到一种低成本高性能初级永磁型双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法，适用于轨道交通和物流运输等直线运动场合。

### 背景技术

直线电机由于结构简单，可作为长行程直线应用领域的直驱电机，其巨大的应用价值越来越受到大家的关注。现有的长行程直线应用领域较多采用异步电动机或者感应电动机，这类电机的特点是结构简单，加工制造方便且成本低，但缺点是效率及推力密度都较低，前者需要额外配置的电流变换器增加成本，后者浪费能源。相比于异步（感应）直线电机，永磁直线电机直驱具有结构简单、传动效率高、定位精度高、响应速度快等优势。对于传统永磁型直线电机，其长次级部分需要铺设大量永磁体或者电枢绕组，很显然，对于长行程领域，运用传统永磁直线电机极大的提升电机成本。而初级永磁型直线电机由于永磁体和绕组都在初级部分，很好的解决了长行程应用领域高成本这一问题。但是由于其永磁体与电枢绕组没有相对移动，因此电机基波并不能被利用，造成初级永磁直线电机推力密度较低，磁场调制的引入能有效提高初级永磁直线电机推力密度，为初级永磁直线电机在长行程领域中的应用提供了重要参考。

中国发明专利 201820249878.2 公开了一种齿槽型双边初级永磁体同步直线电机，该结构将永磁体与绕组都置于初级部分，永磁体嵌于初级铁心内，可以认为是两个磁通切换直线电机结合形成的电机结构，电枢绕组不经过永磁体且端部很短，有利于电机功率密度的提高，但是该电机本质属于磁通切换电机，也是利用调制后的磁场谐波工作，但是由于磁通切换电机结构的调制放大效果不明显，因此其存在推力密度不高的问题；并且永磁体贯穿整个电枢齿，用量较大，利用率不高，电机制造成本较大。

中国发明专利 201910352149.9 公开了一种模块化初级永磁式双边开关磁阻电机，该结构将永磁体置于电枢槽的上下槽口，同一个槽的 2 个槽口采用励磁方向相反的 2 块永磁体，同边槽开口内的永磁体呈间隔排布，虽然相较于一般磁阻直线电机，该专利提出的电机结构能有效提升电机推力密度，但由于永磁磁场及电枢磁场只能通过相邻的两个电枢齿形成回路，且回路同时穿过同一个槽内的 2 块永磁体，使得该电机并不能满足性能放大的效果，其最佳性能也只能是  $1+1=2$ 。

中国发明专利 201410259315.8 公开了一种双边初级永磁游标直线电机，该结构在每

个初级齿顶部都表贴有多对永磁体，有效磁通在两个次级之间形成串联回路，同时利用磁场调制原理，可以使得直线电机产生较大的推力密度。但是由于磁通回路会经过初级双边的永磁体，因此该电机结构不能形成  $1+1>2$  的性能放大效果，同时由于永磁体极对数较多，造成电机漏磁较大，电机功率因数偏低，另外永磁体用量较大，永磁体利用率偏低，造价较高。

综上所述，现阶段的初级永磁直线电机推力密度与永磁体用量总体呈现正相关性，为进一步降低电机制造成本，需进一步研究如何有效提升电机永磁体利用率。另外，初级永磁电机基波为非工作波，其基于磁场调制原理运行，因此为显著提升初级永磁直线电机推力密度，需要设计较大的调制比（永磁体极对数与绕组极对数之比），这使得电机绕组极对数较小，这意味着有效磁场谐波需要形成较长的磁通路径，导致磁路磁阻增大，磁密幅值降低，这些问题的存在大大限制了其在长行程领域的应用推广。因此如何实现永磁体利用率最大化设计和初级永磁型电机的低磁阻设计的研究已经迫在眉睫。

## 发明内容

本发明根据现有技术的不足与缺陷，提出了一种适用于长行程领域的低磁阻初级永磁双边直线电机结构，该结构能有效简化电机有效磁路，降低磁通路径磁阻，达到提升磁密幅值的效果，有助于提高电机磁场调制效率、提升电机推力性能、降低电机成本等。单边单极性，双边极性相反的永磁体排布设计，在减少一半永磁体用量的同时，使得双边结构在磁场上形成互补，提升电机反电势的幅值的同时，降低了反电势波形的畸变率。永磁体排布设计与次级凸极齿的正对设计使得磁路在上下次级之间形成有效回路，磁场在初级铁心上只是简单地从一个电枢齿穿入穿出，并不与邻近电枢齿形成磁路耦合，因此，次级不需要轭部铁心提供磁路，能有效降低本发明电机的重量，同时为电枢绕组提供更大的槽空间，在相同电负荷情况下降低电机铜耗，提高电机效率。另外，每个次级电枢齿只有一边贴有一块永磁体，并且邻近齿上对应位置没有永磁体，能显著降低电机极间漏磁，提高电机功率因数。

为解决上述的问题，本发明的设计方案如下：

一种初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：该电机包括上次级（1），初级（3）和下次级（2），上次级（1）与初级（3）之间用上层气隙（4）隔开，下次级（2）和初级（3）之间用下层气隙（5）隔开；

所述上次级（1）上均匀分布上次级凸极齿（11），下次级（2）均匀分布下次级凸极齿（21），上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）正对分布。初级（3）为模块化设

计，每个初级模块仅有模块化电枢齿（33）构成，每个模块化电枢齿（33）采用上下不对称设计，初级（3）的模块化电枢齿（33）之间形成初级电枢槽（32），初级电枢槽（32）内排布初级电枢绕组（321）。其中初级（3）存在两种结构设计方案，方案一：永磁体（31）表贴于模块化电枢齿（33）的齿顶，此时模块化电枢齿（33）设计成一边极靴厚，另一边极靴薄的结构，厚的一边直接与气隙相邻，薄的一边表贴永磁体（31），永磁体（31）的厚度为两边极靴厚度的差值。方案二：永磁体（31）放置在初级电枢槽（32）的槽口位置，此时模块化电枢齿（33）的两边均为一半极靴厚，一半极靴薄，且两边极靴薄厚的位置左右相反，相邻的模块化电枢齿（33）相邻边极靴厚度相同，永磁体（31）横跨初级电枢齿（321）贴于厚度较薄的极靴表面，永磁体（31）上表面与厚极靴表面齐平。以上两种方案的永磁体（31）励磁方向均与运动方向垂直，同边的永磁体（31）励磁方向相同，非同边的永磁体（31）励磁方向相反，初级（3）相邻的模块化电枢齿（33）铁心采用颠倒排布设计，因此，同边的永磁体（31）呈间隔排布、非同边的永磁体（31）呈现错位排布。

进一步，上次级（1）与初级（3）之间的气隙（4）和下次级（2）与初级（3）之间的气隙（5）为均匀分布且厚度相等。

进一步，上次级凸极齿（11）在上次级（1）上均匀分布，下次级凸极齿（21）在下次级（2）上也均匀分布，上次级凸极齿（11）与下次级凸极齿（21）个数相等，且截面形状均为长方形或等腰梯形。

进一步，初级（3）的永磁体（31）采用钕铁硼或铁氧体等永磁体材料，上次级（1）、下次级（2）及初级（3）的模块化电枢齿（33）均由高导磁率的硅钢片材料叠压而成。

进一步，初级（3）的初级电枢绕组（321）极对数  $P_w$ ，永磁体（31）极对数  $P_{pm}$ ，上次级凸极齿（11）或下次级凸极齿（21）的个数  $n_s$  满足以下关系式： $n_s = P_w + P_{pm}$ 。

进一步，初级（3）模块化电枢齿（33）铁心通过外部机械部件固定，保证在空间上均匀分布。初级（3）的初级电枢绕组（321）采用分布式绕组，为单层或双层绕制。

进一步，初级（3）的初级电枢槽（32）为半闭口槽或闭口槽形式。

进一步，初级（3）的模块化电枢齿（33）在空间上呈现中心对称结构。

进一步，一种初级永磁双边直线磁场调制电机低磁阻设计方法，其特征在于，包括如下设计步骤：

步骤一：将两个单边结构的初级永磁直线电机的初级背靠背相连，通过同一轭部铁心构成一个整体，每个初级（3）的齿顶部都表贴有永磁体（31）。

步骤二：为保证电机正常运行，需要对永磁体（31）励磁进行设置。本发明的初级（3）单边相邻永磁体（31）励磁方向相反，对应齿上的永磁体（31）励磁方向相同。

步骤三：为使得磁力线在上次级（1）和下次级（2）之间形成有效串联，达到简化磁路和降低磁阻的目的，上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）正对排布，磁力线不经过初级轭部形成回路，因此，去除次级轭部铁心，初级（3）形成模块化电枢齿（33）结构。

步骤四：将初级（3）两边永磁体（31）间隔去除，单边保留同向励磁永磁体（31），同时使初级（3）两边的永磁体（31）励磁方向相反。

步骤五：将去除的永磁体（31）部分用铁心材料替代，并与模块化电枢齿（33）形成整体结构。

步骤六：根据永磁体（31）极对数和上次级凸极齿（11）或者下次级凸极齿（21）数，分析上层气隙（4）和下层气隙（5）的磁场谐波情况，并在初级电枢槽（32）内排布适当极对数的初级电枢绕组（321）。

进一步，需要对永磁体（31）厚度、初级电枢槽（32）开口宽度、模块化电枢齿（33）厚度及上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）的宽度进行优化，使其电磁性能最大化。

本发明具备如下有益效果：

1）运用磁场调制原理，通过次级调磁齿引起的磁导变化产生低速有效磁场，能有效提升电机推力密度；初级的永磁体为间隔分布，且单边永磁体励磁方向相同，在保证电机性能的前提下，能有效减少永磁体用量，降低电机制造成本；初级永磁体错位分布及次级铁心正对分布设计，使得单边未贴永磁体的电枢齿为另一边的永磁磁场提供有效磁路，降低磁通路径磁阻，提高电机磁密幅值，提升电机性能；

2）双边永磁体励磁方向相反，每个有效磁回路只经过一块永磁体，而一边永磁体能为另一边提供有效磁场，使得电机实现  $1+1>2$  的性能放大效果；双边结构及永磁体错位设计使得电机两边的定位力相互抵消，降低电机推力脉动，提高电机输出平滑性；

3）初级采用无轭结构，能显著降低电机重量，同时为电机提供更大的槽空间，提高电机空间利用率。在相同槽满率及电负荷的情况下，能有效降低电机铜耗，提高电机效率；初级采用模块化设计，每个模块仅由简单的电枢齿构成，有效降低了电机加工难度，降低制造成本。

4）永磁体之间相隔距离较大，降低永磁体极间漏磁，提高电机功率因数。

## 附图说明

图 1 为本发明结构示意图；

图 2 为初级模块化电枢齿放大图；

图 3 为次级结构参数示意图；

图 4 为单边及双边初级永磁磁场调制直线电机磁场分布图；(a) 为单边磁场分布图；  
(b) 为双边磁场分布图；

图 5 为本发明磁场分布图；

图 6 为本发明实施电枢槽口排布永磁体的电机模型；

图 7 为本发明与现有电机结构磁密分布曲线对比图；

图 8 为本发明与现有结构磁密谐波对比图；

图 9 是本发明与现有结构电机反电势对比图；

图 10 是本发明与现有结构电机定位力对比图；

图 11 是本发明与现有结构推力波形对比图；

图中：上次级 1，下次级 2，初级 3，上次级凸极齿 11，下次级凸极齿 21，永磁体 31，初级电枢槽 32，初级电枢绕组 321，模块化电枢齿 33，上层气隙 4，下层气隙 5。

## 具体实施方式

下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述。

在本发明的描述中，需要理解的是，术语“上”、“下”、“上层”、“下层”、“上边”、“下边”、“左”、“右”等指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系，仅是为了便于描述本发明和简化描述，而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作，因此不能理解为对本发明的限制。

### 实施例1

参照图 1，本发明公开的一种初级永磁双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法，其电机结构包括上次级（1），初级（3）和下次级（2），上次级（1）与初级（3）之间用上层气隙（4）隔开，下次级（2）和初级（3）之间用下层气隙（5）隔开；

所述上次级（1）上均匀分布上次级凸极齿（11），下次级（2）均匀分布下次级凸极齿（21），上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）正对分布。初级（3）为模块化设

计，每个初级模块仅有模块化电枢齿（33）构成，每个模块化电枢齿（33）采用上下不对称设计，初级（3）的模块化电枢齿（33）之间形成初级电枢槽（32），初级电枢槽（32）内排布初级电枢绕组（321）。永磁体（31）表贴于模块化电枢齿（33）的齿顶，此时模块化电枢齿（33）设计成一边极靴厚，另一边极靴薄的结构，厚的一边直接与气隙相邻，薄的一边表贴永磁体（31），永磁体（31）的厚度为两边极靴厚度的差值。永磁体（31）励磁方向均与运动方向垂直，同边的永磁体（31）励磁方向相同，非同边的永磁体（31）励磁方向相反，初级（3）相邻的模块化电枢齿（33）铁心采用颠倒排布设计，因此，同边的永磁体（31）呈间隔排布、非同边的永磁体（31）呈现错位排布。初级永磁双边直线磁场调制电机低磁阻设计方法，包括如下设计步骤：

步骤一：将两个单边结构的初级永磁直线电机的初级背靠背相连，通过同一轭部铁心构成一个整体，每个初级（3）的齿顶部都表贴有永磁体（31）。

步骤二：为保证电机正常运行，需要对永磁体（31）励磁进行设置。本发明的初级（3）单边相邻永磁体（31）励磁方向相反，对应齿上的永磁体（31）励磁方向相同。

步骤三：为使得磁力线在上次级（1）和下次级（2）之间形成有效串联，达到简化磁路和降低磁阻的目的，上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）正对排布，磁力线不经过初级轭部形成回路，因此，去除次级轭部铁心，初级（3）形成模块化电枢齿（33）结构。

步骤四：将初级（3）两边永磁体（31）间隔去除，单边保留同向励磁永磁体（31），同时使初级（3）两边的永磁体（31）励磁方向相反。

步骤五：将去除的永磁体（31）部分用铁心材料替代，并与模块化电枢齿（33）形成整体结构。

步骤六：根据永磁体（31）极对数和上次级凸极齿（11）或者下次级凸极齿（21）数，分析上层气隙（4）和下层气隙（5）的磁场谐波情况，并在初级电枢槽（32）内排布适当极对数的初级电枢绕组（321）。

为了清楚阐述本发明的具体实施方式，下面将结合附图中的三相电机对本发明加以说明，图 1 为本发明电机的半模型，可以看到，永磁体（31）间隔排布在初级模块化电枢齿（33）顶部，初级（3）上下两边永磁体（31）错位排布，且励磁方向相反，初级（3）模块化电枢齿（34）有 18 个，永磁体（31）为 9 对极分布。上次级（1）和下次级（2）为简单的凸极结构，凸极齿数为 10，初级电枢绕组（321）绕制在初级（3）初级电枢槽（32）内，采用分布绕组形式，绕组为 1 对极分布。本发明所设计电机初级（3）、次级

(1) 和 (2) 中需要优化的一些较为重要的参数如图 2 和图 3 所示。

图 4 给出了现有电机的磁力线分布图。对于图 4 (a)，可以看出现有电机在次级边的磁场呈现 1 对极分布，但在初级边有效磁力线需要经过多个次级永磁体，从气隙内反复穿入穿出，形成闭合回路。这使得电机磁路较为复杂，磁路磁导增加，引起电机有效磁密的降低，电机性能下降。对于图 4 (b) 的双边结构，其本质是两个相同的初级永磁单边直线电机组合而成，两个电机公用一个初级轭部，电机磁场相互独立。另外，由于次级齿错开半个极距，使得该双边结构电机定位力相抵，同时反电势互补，从而该电机相比单边结构反电势更加正弦，推力更加平稳。但是，与图 4 (a) 电机相似，其磁力线也需要反复穿入穿出气隙形成有效回路，其磁路磁阻较大，导致电机磁密降低，性能有所损失；另外，初级每个齿都表贴上永磁体，使得永磁体用量较大，电机成本较高。

图 5 为本发明公开的一种初级永磁双边直线磁场调制电机磁场分布图，可以看出该结构磁场相互串联，初级 (3) 上边永磁体 (31) 产生的磁力线通过初级电枢齿与下次级相互作用，因此该结构能实现磁场增强的效果；同时，以上边永磁体 (31) 为例，其磁力线从永磁体上产生，依次经过初级 (3)、下层气隙 (5)、下次级 (2)、下层气隙 (5)、初级 (3)，上层气隙 (4)、上次级 (1)、上层气隙 (4) 回到上边永磁体 (31)，其磁路更加简单，磁路磁导更小。另外，该结构较图 4 (b) 所示的结构永磁体用量减少了一半，永磁体利用率得到了显著提升。

图 7 为本发明与两种现有结构电机的气隙磁密分布对比图，从波形上可以看出本发明的磁密是与模型 a 相近，但比模型 b 低。图 8 为图 7 波形的傅里叶分解图，可以看出，本发明能调制出最高的 2 对极磁场，模型 b 有最高的 18 对极磁场。与本发明和模型 b 相比，模型 a 的磁场没有任何优势。另外，由于绕组为 2 对极分相，因此其 2 对极对电机性能影响最大，而初级永磁结构使得基波 (18 对极磁场) 与绕组不能产生作用，即 18 对极磁场是无效磁场。综上，本发明在工作波的调制上具有明显优势，能减少永磁体用量的同时提升电机性能。

图 9 为本发明的反电势与现有电机反电势的对比图，可以看出，本发明在反电势上具有很大优势，说明该结构在转矩输出能力上要强于现有模型 a 和模型 b。同时，本发明与其单边结构电机 (模型 a)，在反电势上得到了显著提升，实现  $1+1>2$  的磁场增强效果。图 10 为电机定位力的比较，可以看出双边结构定位力更小，主要是由于双边定位力相互抵消，降低了初级定位力幅值，这也有有效的降低了电机推力脉动，提高电机性能。图 11 为相同电负荷情况下电机推力对比图，可以看出本发明电机具有最高的推力平均值，其

推力输出能力要大于 2 倍的模型 a 推力输出能力。

## 实施例2

本发明公开的一种初级永磁双边直线磁场调制电机的另一种变结构电机，如图 6 所示，其永磁体（31）放置在初级槽口，此时模块化电枢齿（33）的两边均为一半极靴厚，一半极靴薄，且两边极靴薄厚的位置左右相反，相邻模块化电枢齿（33）的相邻一侧极靴厚度相同，永磁体（31）横跨初级电枢齿（321）贴于厚度较薄的极靴表面，永磁体（31）上表面与厚极靴表面齐平。永磁体同样呈现间隔分布，上下两边的永磁体（31）错位且励磁方向相反。

与实施例 1 相比，电机磁场也会呈串联分布，但该实施例在电机不饱和的情况下，能有效降低电枢磁路磁阻，提升电枢磁场幅值，从而提高电机性能。但也会大幅提高电机损耗，降低电机效率。同时该结构永磁体（31）直接与模块化电枢齿（33）铁心相接触，导致电机漏磁较实施例 1 大，功率因数会有所降低。

综上，本发明公开了一种初级永磁双边直线磁场调制电机及其低磁阻设计方法，电机结构包括两个仅由凸极齿组成的次级以及一个排布着永磁体及电枢绕组的初级，上下两个次级凸极齿正对排布，凸极齿起到调制磁场的效果，初级单边电枢齿顶间隔排布励磁方向相同的表贴式永磁体，同时初级两边永磁体错位分布，且励磁方向相反，永磁体排布设置能使得电机一边不仅能利用其边永磁体，也能利用对边永磁体产生的有效磁场，提高永磁体利用率，达到 $1+1>2$ 的性能放大效果。初级铁心采用模块化设计，每个初级模块仅由长条形电枢齿组成，邻近两个模块之间形成半闭口电枢槽或闭口槽，槽内排布电枢绕组，能有效降低电机加工难度，同时永磁体、次级调制齿的排布设计能有效简化磁通路径，降低磁通路径上的磁阻，提高电机磁场幅值，提升转矩性能，具有较大的应用前景。

尽管已经示出和描述了本发明的实施例，本领域的普通技术人员可以理解：在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型，本发明的范围由权利要求及其等同物限定。

## 权利要求书

1、一种初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：该电机包括上次级（1），初级（3）和下次级（2），上次级（1）与初级（3）之间用上层气隙（4）隔开，下次级（2）和初级（3）之间用下层气隙（5）隔开；

所述上次级（1）上均匀分布上次级凸极齿（11），下次级（2）均匀分布下次级凸极齿（21），上次级凸极齿（11）和下次级凸极齿（21）正对分布；初级（3）为模块化设计，每个初级模块仅有模块化电枢齿（33）构成，每个模块化电枢齿（33）采用上下不对称设计，模块化电枢齿（33）之间形成初级电枢槽（32），初级电枢槽（32）内排布初级电枢绕组（321）；其中初级（3）存在以下结构：

结构一：永磁体（31）表贴于模块化电枢齿（33）的齿顶，此时模块化电枢齿（33）设计成一边极靴厚，另一边极靴薄的结构，厚的一边直接与气隙相邻，薄的一边表贴永磁体（31），永磁体（31）的厚度为两边极靴厚度的差值；

或者结构二：永磁体（31）放置在初级电枢槽（32）的槽口位置，此时模块化电枢齿（33）的两边均为一半极靴厚，一半极靴薄，且两边极靴薄厚的位置左右相反，相邻的模块化电枢齿（33）相邻边极靴厚度相同，永磁体（31）横跨初级电枢齿（321）贴于厚度较薄的极靴表面，永磁体（31）上表面与厚极靴表面齐平；

永磁体（31）励磁方向均与运动方向垂直，同边的永磁体（31）励磁方向相同，非同边的永磁体（31）励磁方向相反，初级（3）相邻的模块化电枢齿（33）铁心采用颠倒排布设计，因此，同边的永磁体（31）呈间隔排布、非同边的永磁体（31）呈现错位排布。

2、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：上次级（1）与初级（3）之间的气隙（4）、下次级（2）与初级（3）之间的气隙（5）为均匀分布且厚度相等。

3、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：上次级凸极齿（11）在上次级（1）上均匀分布，下次级凸极齿（21）在下次级（2）上也均匀分布，上次级凸极齿（11）与下次级凸极齿（21）个数相等，且截面形状均为长方形或等腰梯形。

4、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：初级（3）的永磁体（31）采用钕铁硼或铁氧体等永磁体材料，上次级（1）、下次级（2）及初级（3）的模块化电枢齿（33）均由高导磁率的硅钢片材料叠压而成。

5、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机，其特征在于：初级电枢

绕组 (321) 极对数  $P_w$ , 永磁体 (31) 极对数  $P_{pm}$ , 上次级凸极齿 (11) 或下次级凸极齿 (21) 的个数  $n_s$  满足以下关系式:  $n_s = P_w + P_{pm}$ 。

6、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机, 其特征在于: 初级 (3) 模块化电枢齿 (33) 铁心通过外部机械部件固定, 保证在空间上均匀分布, 初级 (3) 的初级电枢绕组 (321) 采用分布式绕组, 为单层或双层绕制。

7、根据权利要求 1 所述的初级永磁双边直线磁场调制电机, 其特征在于: 初级 (3) 的初级电枢槽 (32) 为半闭口槽或闭口槽形式; 初级 (3) 的模块化电枢齿 (33) 在空间上呈现中心对称结构。

8、一种初级永磁双边直线磁场调制电机低磁阻设计方法, 其特征在于, 包括如下设计步骤:

步骤一: 将两个单边结构的初级永磁直线电机的初级背靠背相连, 通过同一轭部铁心构成一个整体, 每个初级 (3) 的齿顶部都表贴有永磁体 (31);

步骤二: 为保证电机正常运行, 需要对永磁体 (31) 励磁进行设置, 所述初级 (3) 单边相邻永磁体 (31) 励磁方向相反, 对应齿上的永磁体 (31) 励磁方向相同;

步骤三: 为使得磁力线在上次级 (1) 和下次级 (2) 之间形成有效串联, 达到简化磁路和降低磁阻的目的, 上次级凸极齿 (11) 和下次级凸极齿 (21) 正对排布, 磁力线不经过初级轭部形成回路, 因此, 去除次级轭部铁心, 初级 (3) 形成模块化电枢齿 (33) 结构;

步骤四: 将初级 (3) 两边永磁体 (31) 间隔去除, 单边保留同向励磁永磁体 (31), 同时使初级 (3) 两边的永磁体 (31) 励磁方向相反;

步骤五: 将去除的永磁体 (31) 部分用铁心材料替代, 并与模块化电枢齿 (33) 形成整体结构;

步骤六: 根据永磁体 (31) 极对数和上次级凸极齿 (11) 或者下次级凸极齿 (21) 数, 分析上层气隙 (4) 和下层气隙 (5) 的磁场谐波情况, 并在初级电枢槽 (32) 内排布适当极对数的初级电枢绕组 (321)。

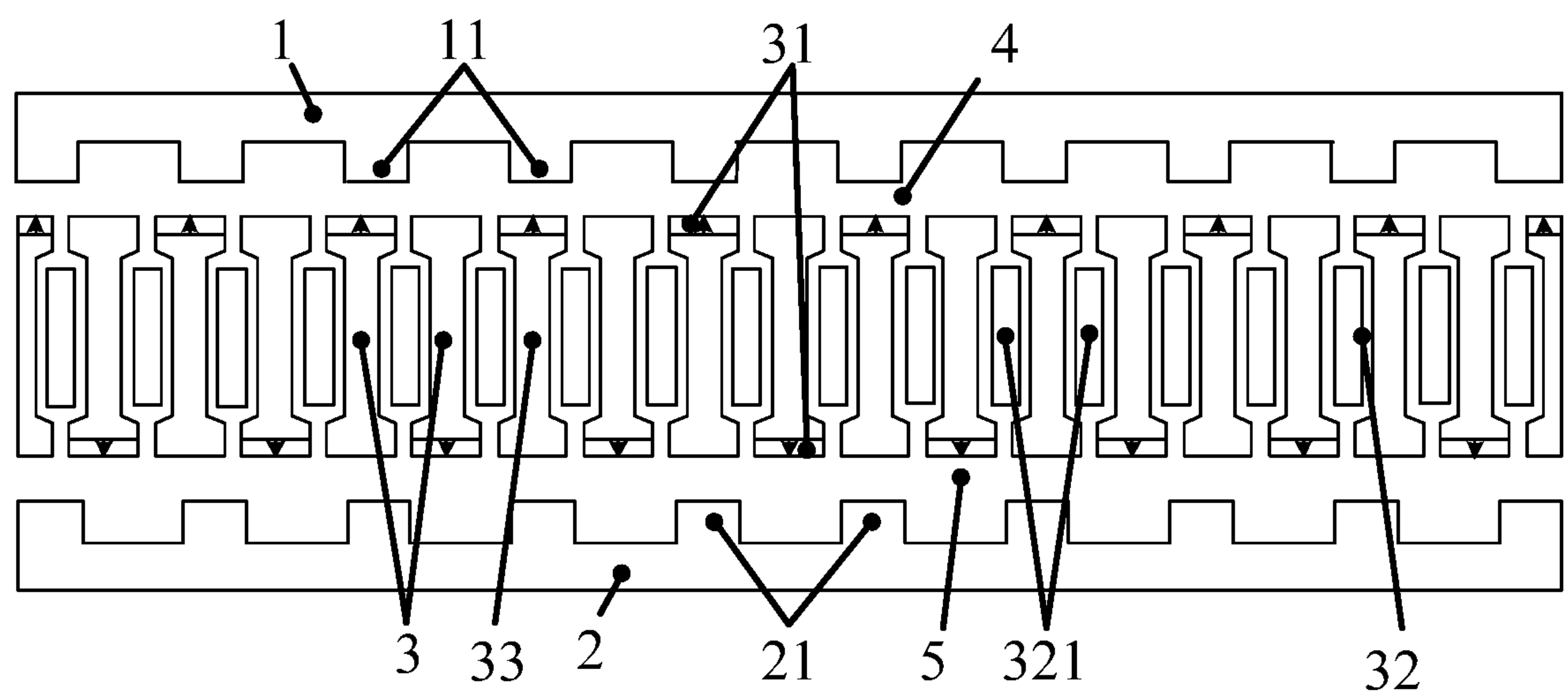


图 1

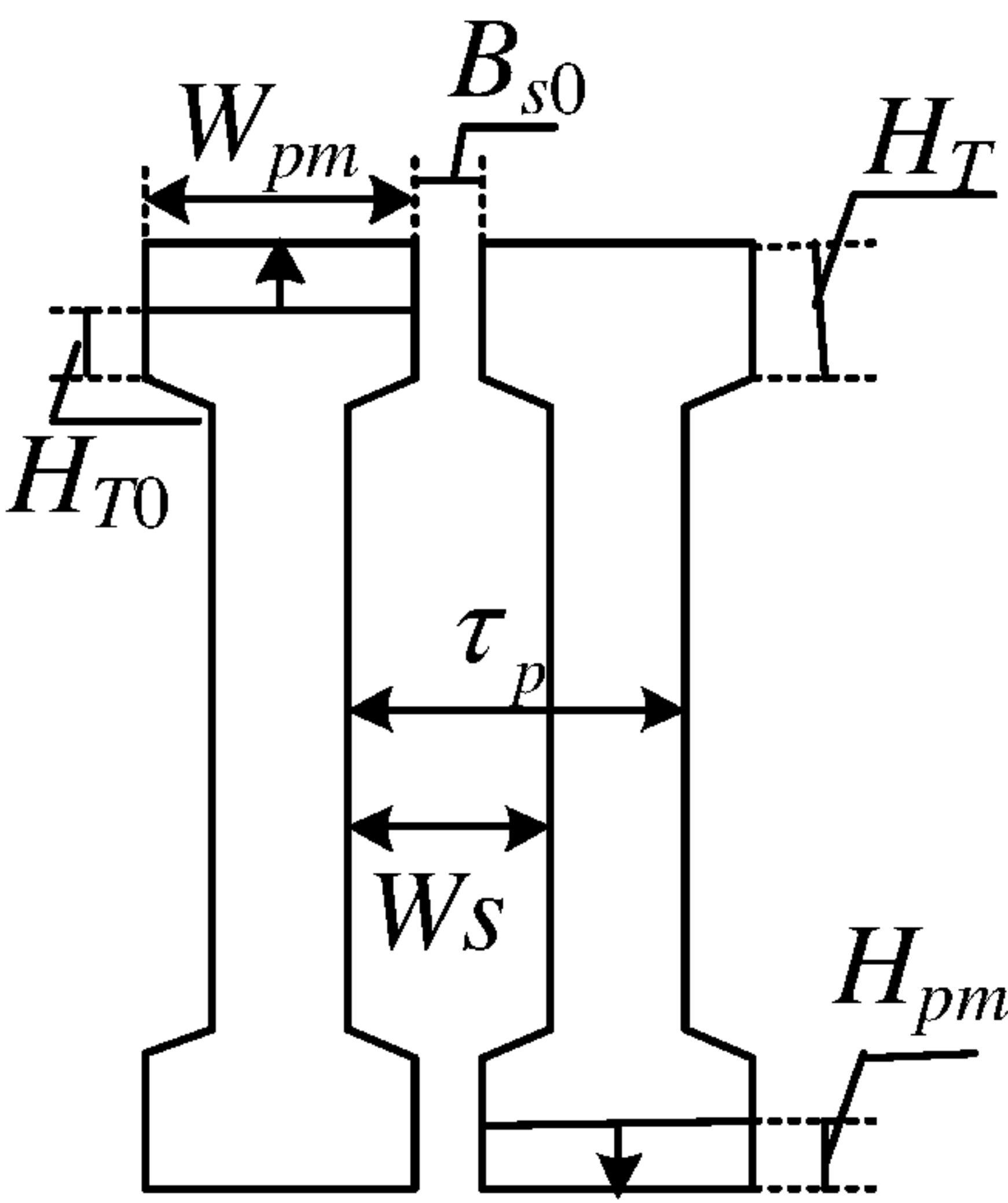


图 2

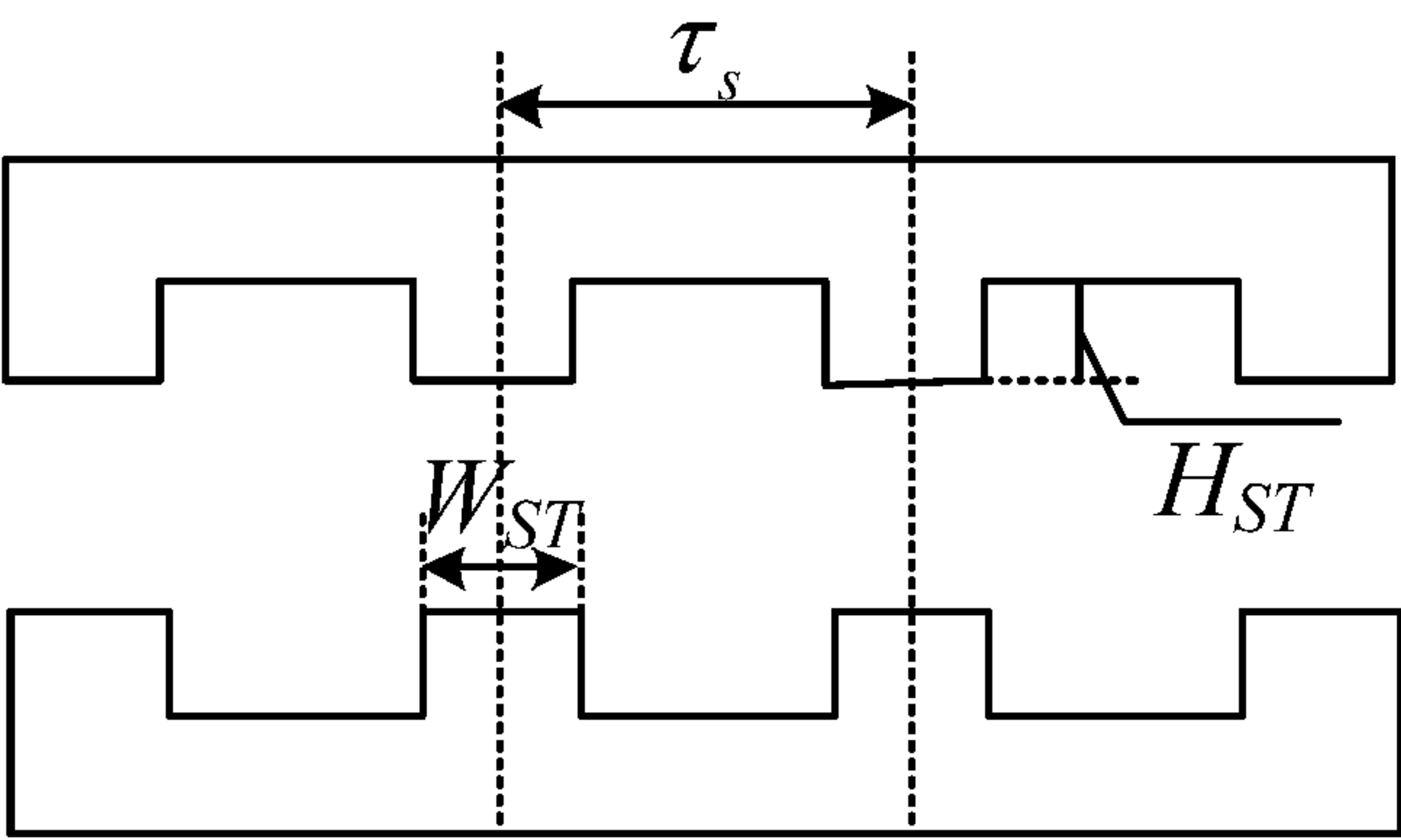
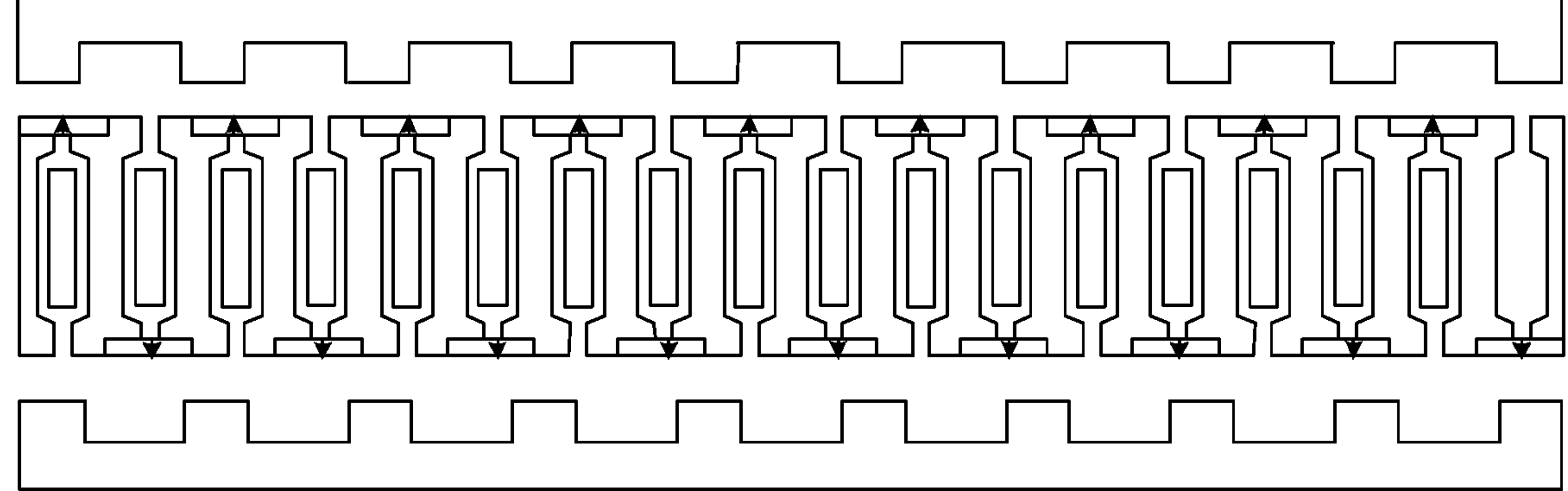
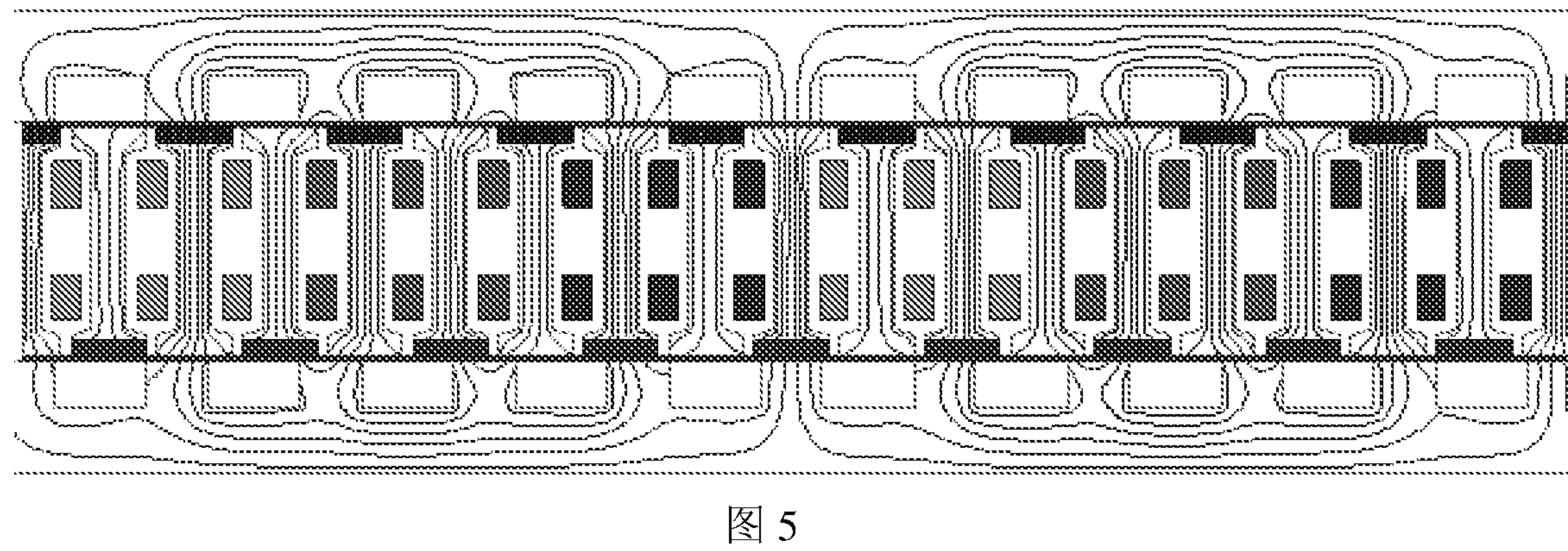
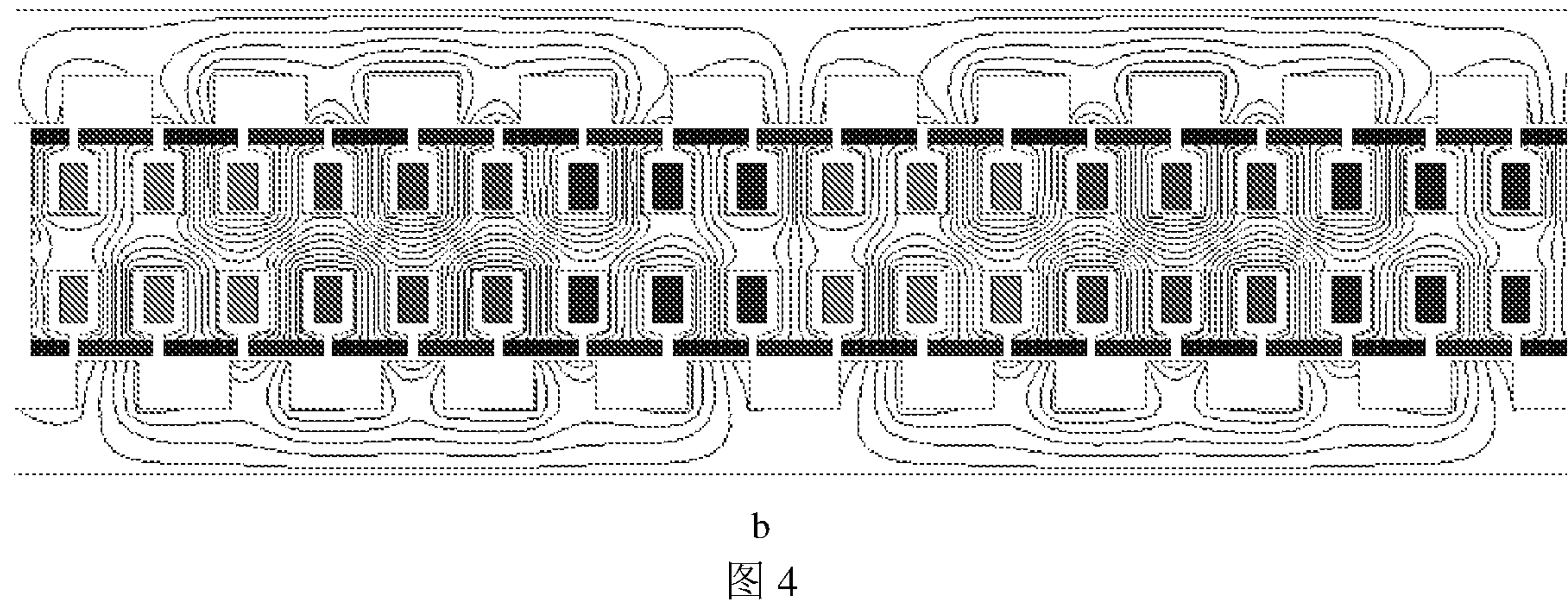
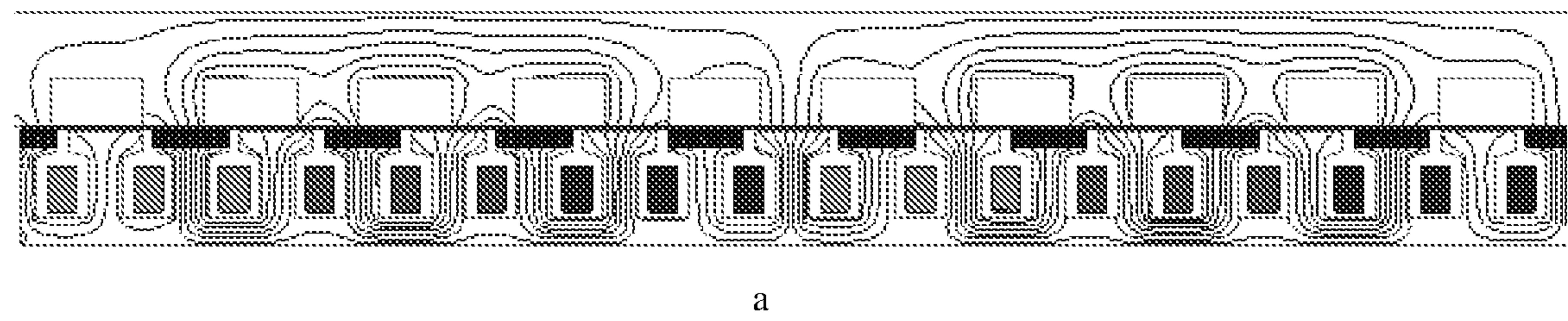


图 3



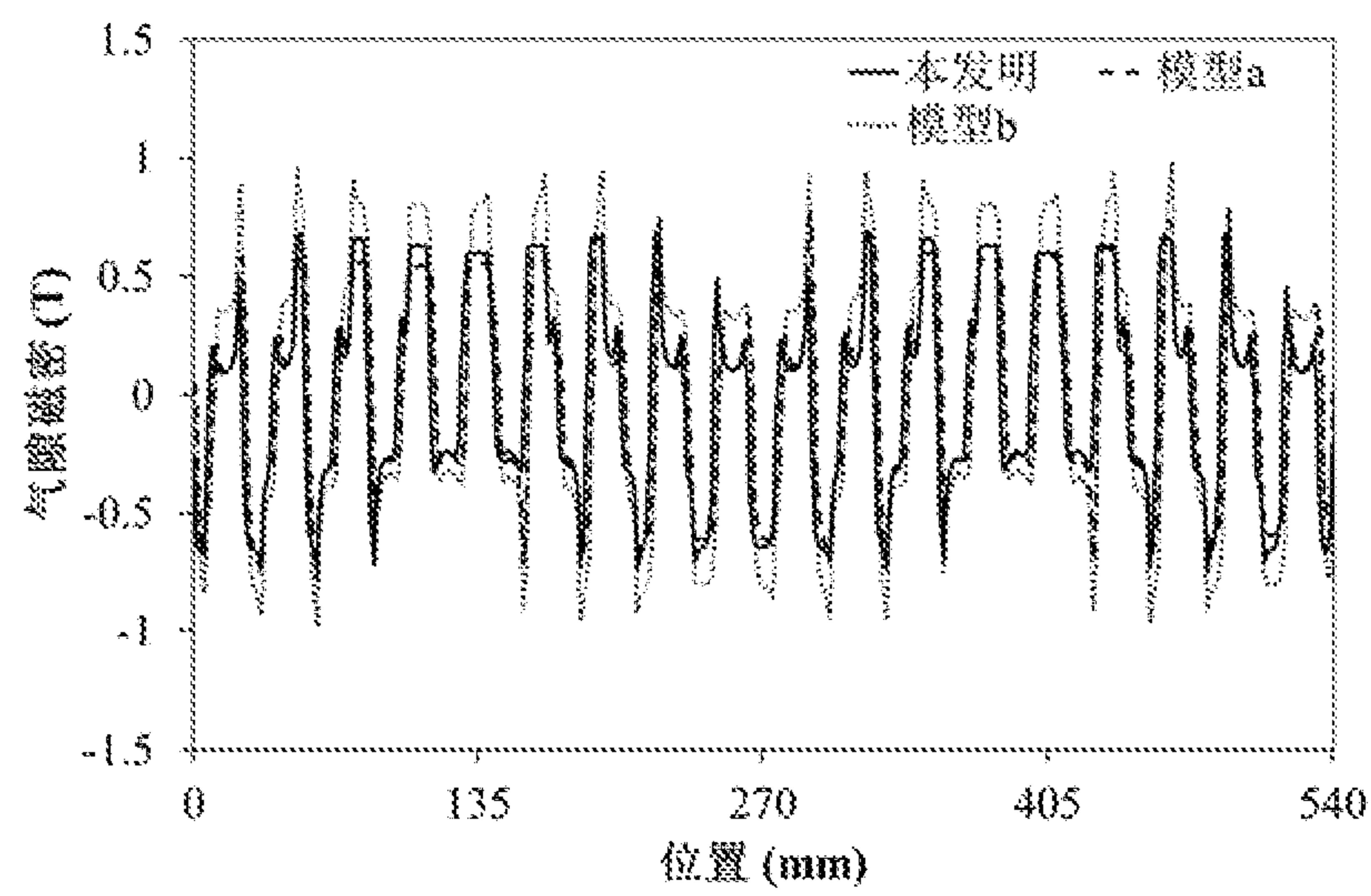


图 7

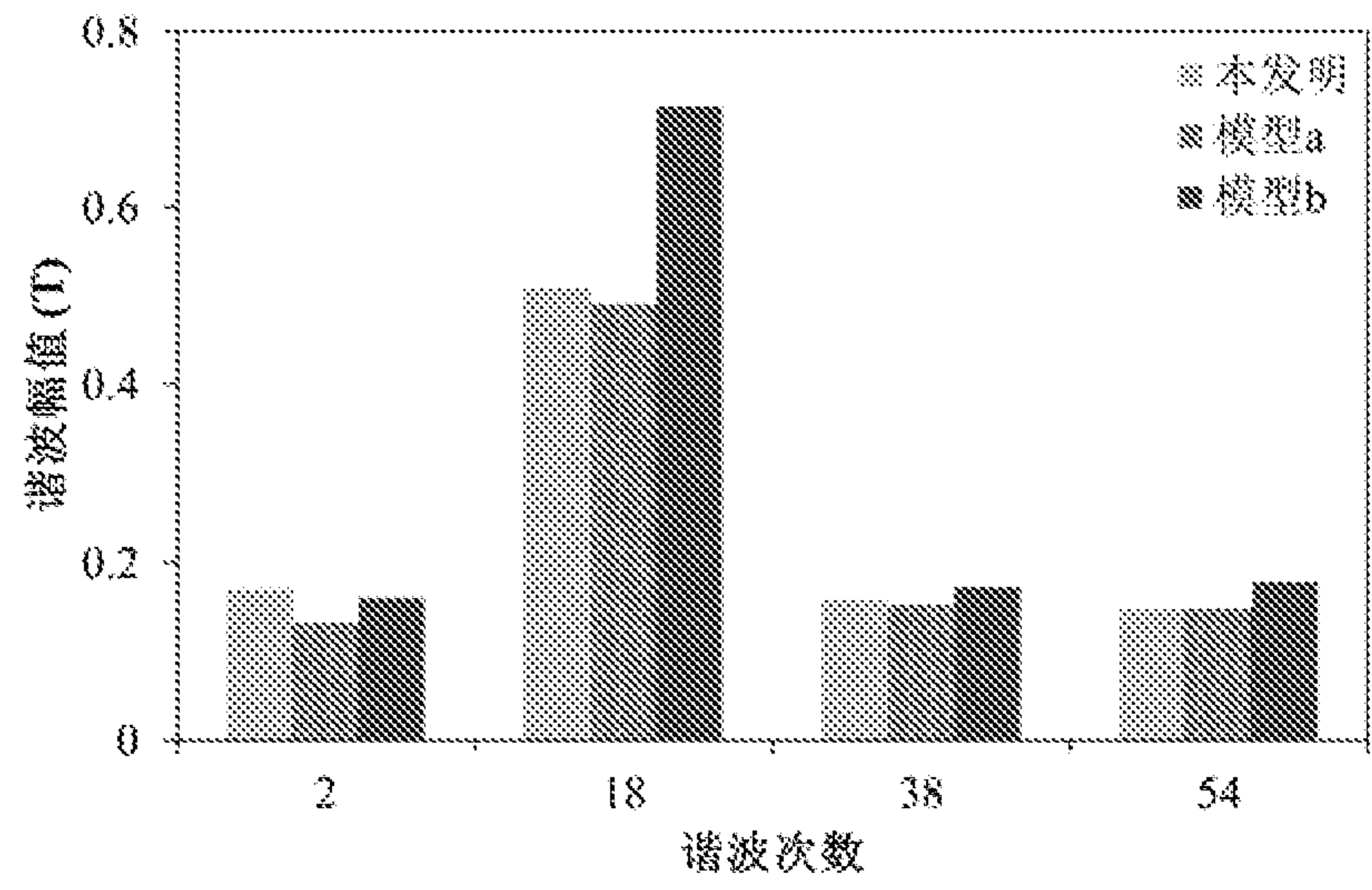


图 8

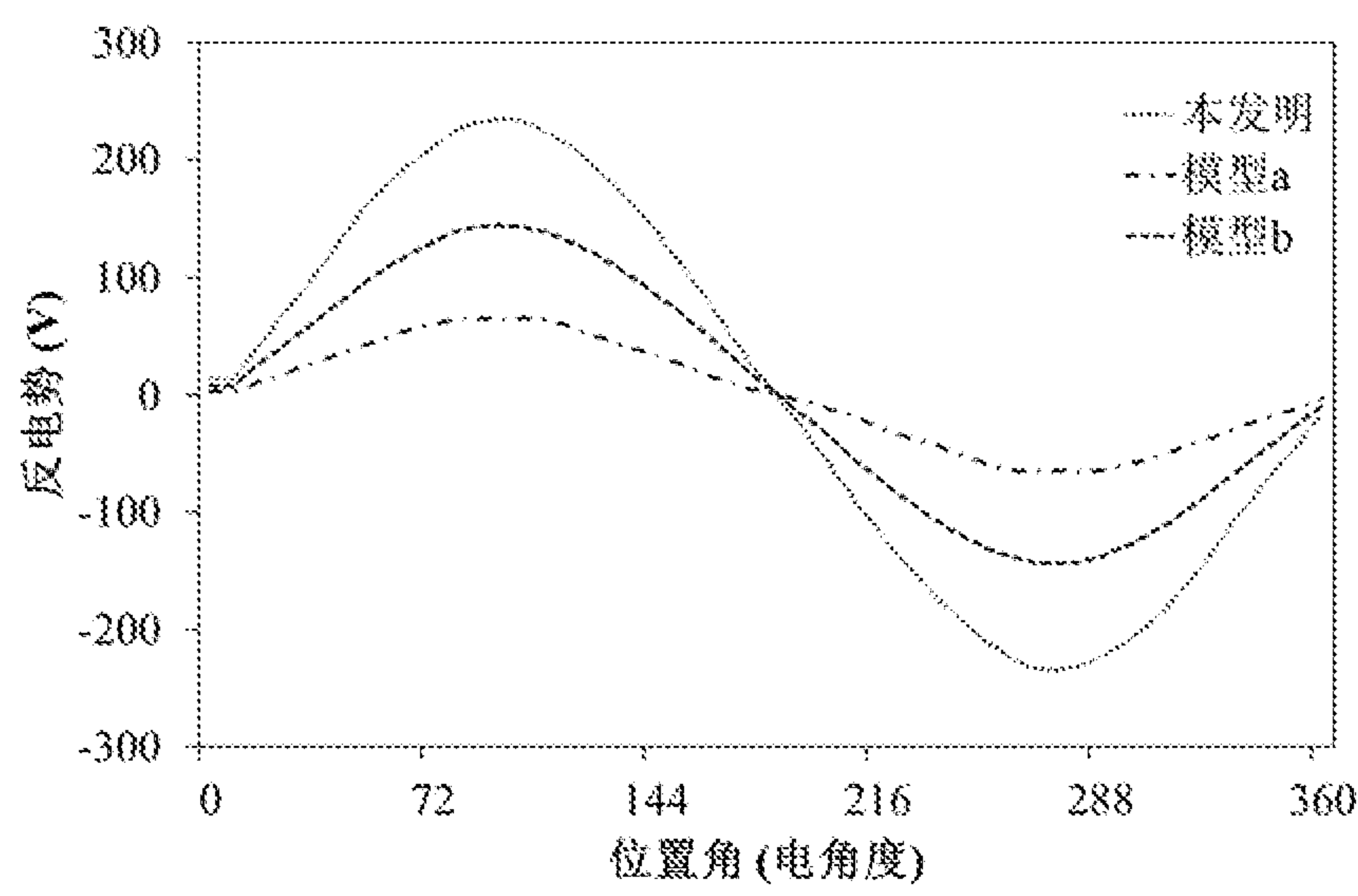


图 9

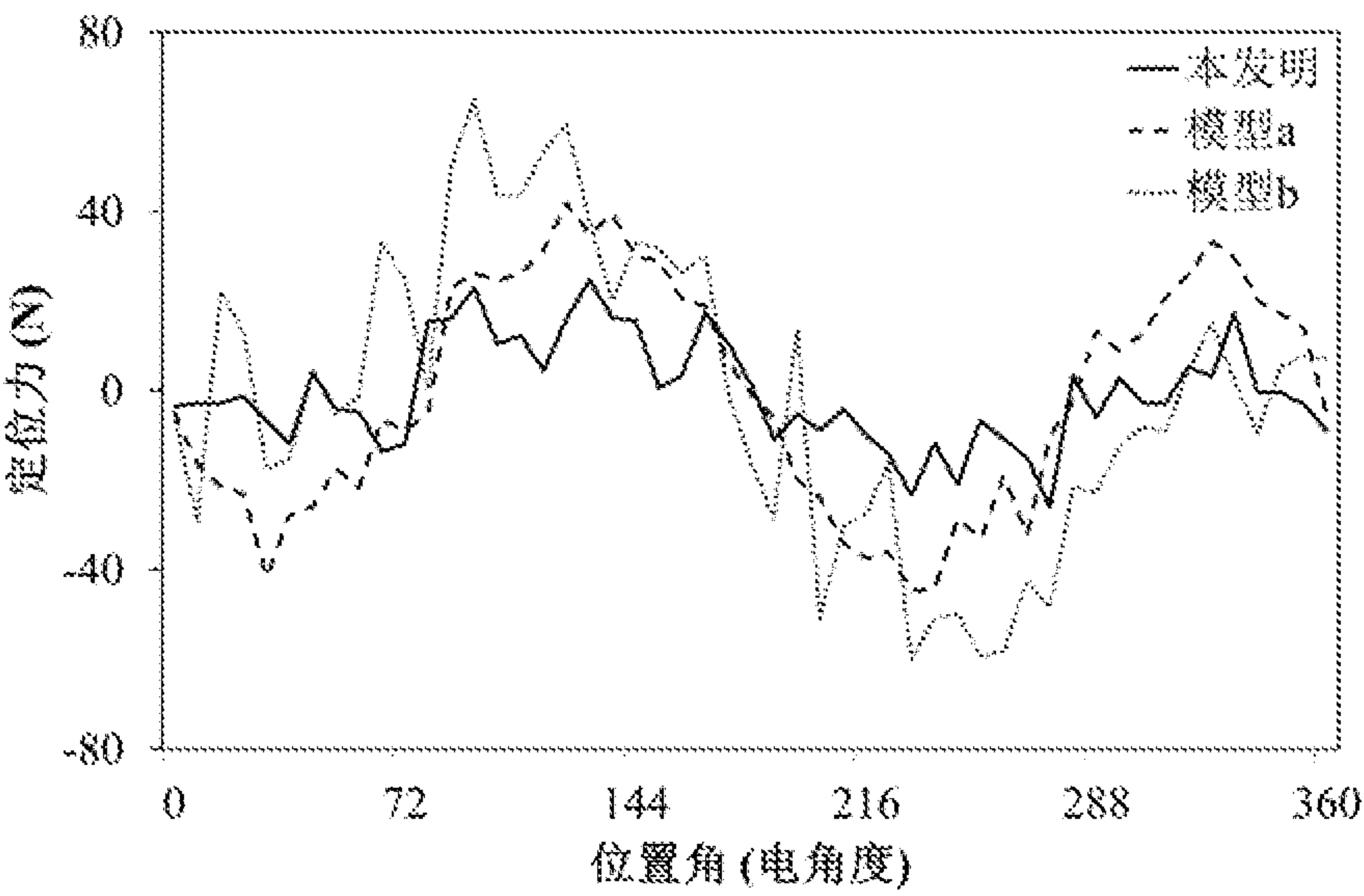


图 10

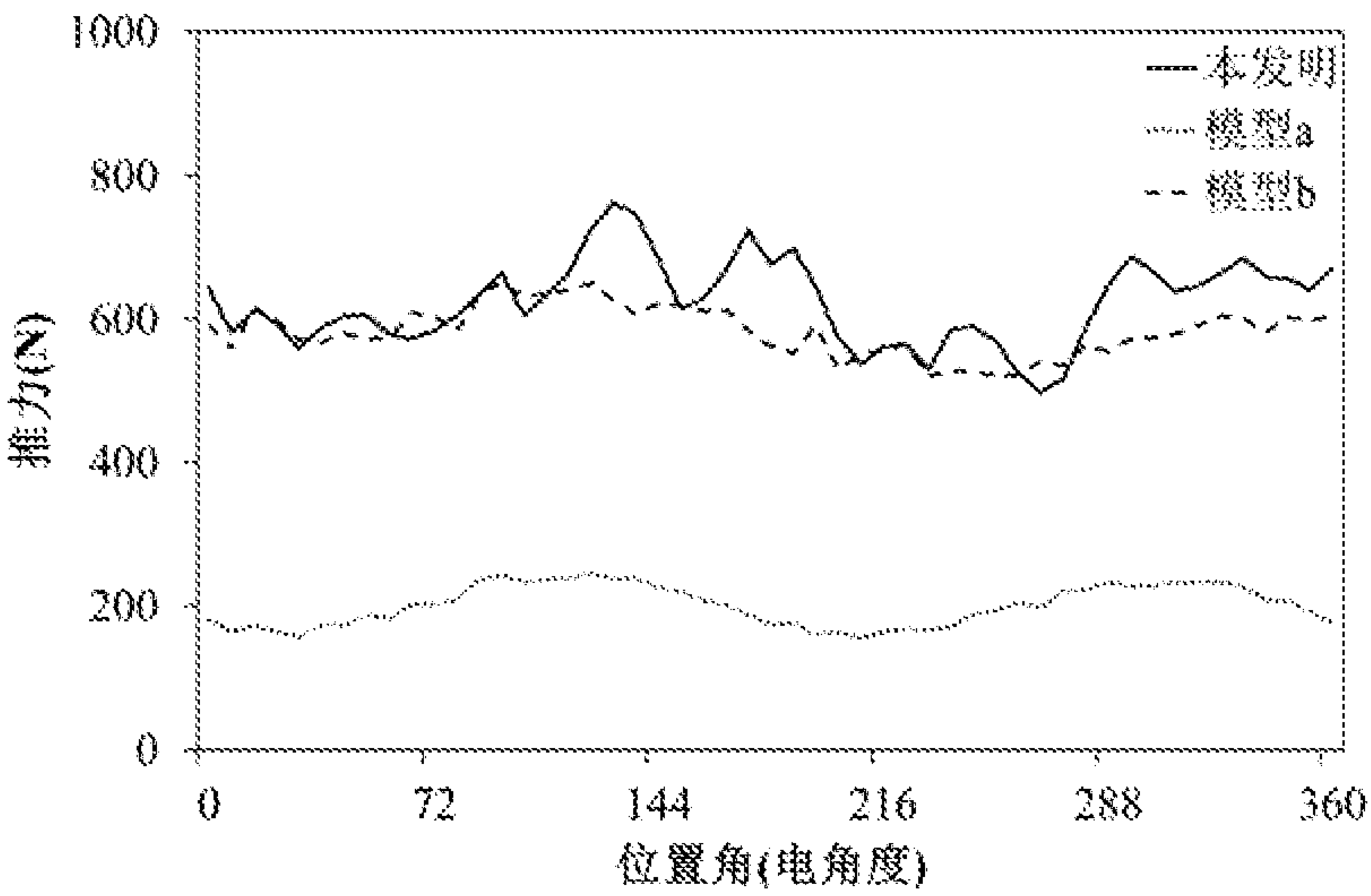


图 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2019/128490

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02K 41/02(2006.01)i; H02K 15/00(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)

H02K

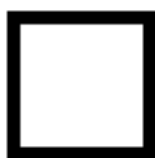
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

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

CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: 线性, 直线, 电机, 马达, 电动机, 双边, 永磁, 磁体, 磁铁, 磁块, 磁钢, 磁性体, 齿, 错位, linear, motor, double, bilateral, magnet, teeth, stag+

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                           | Relevant to claim No. |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | CN 104052238 A (JIANGSU UNIVERSITY) 17 September 2014 (2014-09-17)<br>description, paragraphs [0016]-[0023], and figures 1-2 | 1-8                   |
| A         | CN 109245483 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS)<br>18 January 2019 (2019-01-18)<br>entire document       | 1-8                   |
| A         | CN 109842265 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 04 June 2019 (2019-06-04)<br>entire document                                 | 1-8                   |
| A         | CN 109962598 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS)<br>02 July 2019 (2019-07-02)<br>entire document          | 1-8                   |
| A         | CN 110011513 A (NANJING UNIVERSITY OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS)<br>12 July 2019 (2019-07-12)<br>entire document          | 1-8                   |
| A         | JP 2002112527 A (GENESIS K.K. et al.) 12 April 2002 (2002-04-12)<br>entire document                                          | 1-8                   |
| A         | US 2006076839 A1 (KAWAI, Yoichi) 13 April 2006 (2006-04-13)<br>entire document                                               | 1-8                   |



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

|                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| * Special categories of cited documents:                                                                                                                                | “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                                              |
| “A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance                                                                | “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                                                                     |
| “E” earlier application or patent but published on or after the international filing date                                                                               | “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 |
| “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) | “&” document member of the same patent family                                                                                                                                                                                                    |
| “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                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                  |

Date of the actual completion of the international search

10 July 2020

Date of mailing of the international search report

28 July 2020

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

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT  
Information on patent family members

International application No.  
**PCT/CN2019/128490**

| Patent document<br>cited in search report |            |    | Publication date<br>(day/month/year) | Patent family member(s) |              |    | Publication date<br>(day/month/year) |
|-------------------------------------------|------------|----|--------------------------------------|-------------------------|--------------|----|--------------------------------------|
| CN                                        | 104052238  | A  | 17 September 2014                    | None                    |              |    |                                      |
| CN                                        | 109245483  | A  | 18 January 2019                      | None                    |              |    |                                      |
| CN                                        | 109842265  | A  | 04 June 2019                         | None                    |              |    |                                      |
| CN                                        | 109962598  | A  | 02 July 2019                         | CN                      | 210041616    | U  | 07 February 2020                     |
| CN                                        | 110011513  | A  | 12 July 2019                         | CN                      | 210041615    | U  | 07 February 2020                     |
| JP                                        | 2002112527 | A  | 12 April 2002                        | None                    |              |    |                                      |
| US                                        | 2006076839 | A1 | 13 April 2006                        | JP                      | 4473088      | B2 | 02 June 2010                         |
|                                           |            |    |                                      | DE                      | 102005047819 | A1 | 11 May 2006                          |
|                                           |            |    |                                      | DE                      | 102005047819 | B4 | 14 December 2017                     |
|                                           |            |    |                                      | US                      | 7154198      | B2 | 26 December 2006                     |
|                                           |            |    |                                      | JP                      | 2006109653   | A  | 20 April 2006                        |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                 |                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 国际检索报告                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                 | 国际申请号<br>PCT/CN2019/128490           |
| A. 主题的分类<br>H02K 41/02 (2006.01) i; H02K 15/00 (2006.01) i<br><br>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<br>检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号)<br>H02K<br><br>包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献<br><br>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))<br>CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC, IEEE: 线性, 直线, 电机, 马达, 电动机, 双边, 永磁, 磁体, 磁铁, 磁块, 磁钢, 磁性体, 齿, 错位, linear, motor, double, bilateral, magnet, teeth, stag+                                                                                                                                                                  |                                                                                 |                                      |
| 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                              |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CN 104052238 A (江苏大学) 2014年 9月 17日 (2014 - 09 - 17)<br>说明书第[0016]-[0023]段, 图1-2 | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CN 109245483 A (南京航空航天大学) 2019年 1月 18日 (2019 - 01 - 18)<br>全文                   | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CN 109842265 A (哈尔滨工业大学) 2019年 6月 4日 (2019 - 06 - 04)<br>全文                     | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CN 109962598 A (南京航空航天大学) 2019年 7月 2日 (2019 - 07 - 02)<br>全文                    | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | CN 110011513 A (南京航空航天大学) 2019年 7月 12日 (2019 - 07 - 12)<br>全文                   | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | JP 2002112527 A (GENESIS K.K. 等) 2002年 4月 12日 (2002 - 04 - 12)<br>全文            | 1-8                                  |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | US 2006076839 A1 (KAWAI, Yoichi) 2006年 4月 13日 (2006 - 04 - 13)<br>全文            | 1-8                                  |
| <div><input type="checkbox"/> 其余文件在C栏的续页中列出。</div> <div><input checked="" type="checkbox"/> 见同族专利附件。</div>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                 |                                      |
| <div><div>* 引用文件的具体类型:<br/>“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件<br/>“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利<br/>“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)<br/>“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件<br/>“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</div><div>“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了解发明之理论或原理的在后文件<br/>“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<br/>“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<br/>“&amp;” 同族专利的文件</div></div> |                                                                                 |                                      |
| 国际检索实际完成的日期<br>2020年 7月 10日                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                 | 国际检索报告邮寄日期<br>2020年 7月 28日           |
| ISA/CN的名称和邮寄地址<br>中国国家知识产权局 (ISA/CN)<br>中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088<br>传真号 (86-10)62019451                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                 | 授权官员<br>魏桂芬<br>电话号码 86-(10)-53961256 |

|                     |            |    |                |                            |              |    |                |
|---------------------|------------|----|----------------|----------------------------|--------------|----|----------------|
| 国际检索报告<br>关于同族专利的信息 |            |    |                | 国际申请号<br>PCT/CN2019/128490 |              |    |                |
| 检索报告引用的专利文件         |            |    | 公布日<br>(年/月/日) | 同族专利                       |              |    | 公布日<br>(年/月/日) |
| CN                  | 104052238  | A  | 2014年 9月 17日   | 无                          |              |    |                |
| CN                  | 109245483  | A  | 2019年 1月 18日   | 无                          |              |    |                |
| CN                  | 109842265  | A  | 2019年 6月 4日    | 无                          |              |    |                |
| CN                  | 109962598  | A  | 2019年 7月 2日    | CN                         | 210041616    | U  | 2020年 2月 7日    |
| CN                  | 110011513  | A  | 2019年 7月 12日   | CN                         | 210041615    | U  | 2020年 2月 7日    |
| JP                  | 2002112527 | A  | 2002年 4月 12日   | 无                          |              |    |                |
| US                  | 2006076839 | A1 | 2006年 4月 13日   | JP                         | 4473088      | B2 | 2010年 6月 2日    |
|                     |            |    |                | DE                         | 102005047819 | A1 | 2006年 5月 11日   |
|                     |            |    |                | DE                         | 102005047819 | B4 | 2017年 12月 14日  |
|                     |            |    |                | US                         | 7154198      | B2 | 2006年 12月 26日  |
|                     |            |    |                | JP                         | 2006109653   | A  | 2006年 4月 20日   |