

基于马鞍形磁场的永磁直线电机位置解算方法^{*}

蔡炯炯, 张亚成, 蒋丽君, 王子辉

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 针对直线电机转子位置检测低成本和较高精度的要求, 提出了一种基于马鞍形磁场来获得位置信息的方法及实现过程。分析了永磁体表面的磁场分布特征, 指出了利用马鞍形磁场分布曲线来解算位置信息的优点, 提出了根据马鞍形磁场推算位置信息的算法流程: 先测得错开相位的 2 条马鞍形曲线数据, 划分为 4 个象限后建立数据库; 位置检测时, 运用区间搜索算法寻得实际角度所在区间; 再根据精度要求, 采用合适的插值算法计算得到待解算的角度。仿真结果表明: 基于马鞍形磁场的位置解算, 能较好地得到直线电机转子的位置信息。

关键词: 永磁直线电机; 马鞍形磁场; 线性霍尔传感器; 位置检测

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)09-0046-07

A Method to Calculate the Position of Permanent Magnet Linear Motor Based on Saddle-Shaped Magnetic Field^{*}

CAI Jiongjiong, ZHANG Yacheng, JIANG Lijun, WANG Zihui

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Aiming at the low cost and high precision requirements of permanent magnet linear motor rotor position detection, a method based on saddle-shaped magnetic field and the process to obtain position were presented. The magnetic field distribution characteristics of the permanent magnet surface were analyzed. The advantages of using the saddle-shaped magnetic field distribution curve to obtain the position information were pointed out. The algorithm flow of estimating the position information based on the saddle-shaped magnetic field waveform was proposed. First, two saddle curve data of the staggered phase were measured and the database was divided into four quadrants. Second, in the position detection, the interval search algorithm was used to find the best two sets of magnetic field intervals. Finally, according to the accuracy requirements, the appropriate interpolation algorithm was used to calculate the electrical angle. The simulation results showed that the position calculation based on the saddle-shaped magnetic field could better meet the requirements of linear motor rotor position detection.

Key words: permanent magnet linear motor; saddle-shaped magnetic field; linear Hall sensor; position detection

0 引言

随着精密、先进制造和高要求运动控制技术的发展需求, 直线电机以直接驱动而具有的高精

度、高动态响应能力, 成为研究和应用的热点。位置检测方法是直线电机研究和应用的关键技术之一^[1-5], 直接影响了系统的关键技术指标和成本。目前使用最多的是专用的栅尺和相应的读数

^{*} 基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY17E070002、LQ17E070002); 江苏省博士后资助计划项目(169491)

作者简介: 蔡炯炯(1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电机及其驱动系统。

张亚成(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为位置传感识别技术。

蒋丽君(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为先进电机驱动技术。

头来获得精确位置和速度信号,比如光栅尺^[6-10]、感应同步器^[11-12]、磁栅尺^[13]等。该类检测方法检测范围大、测量精度好、具有很好的动态响应速度,但高性能栅尺和读数头制作、安装复杂,成本较高。也有采用一些特殊方法,比如基于图像的处理方法^[14],也能够提供较为准确的位置和速度数据,但是高精度的工业高速相机价格较为昂贵,安装使用较为复杂。基于无位置传感器算法估算位置的方法^[15-18]成本最低,不过检测精度和适用条件受限较多。

因此,高性价比的通过线性霍尔传感器检测电机自身永磁体的磁场特征实现位置推算的方法,受到研究人员的广泛关注。文献[19]提出一种基于线性霍尔元件的圆筒形永磁直线同步电机位置检测,分析了不同电机结构和不同的位置检测技术,以理想正弦磁场波形解算。文献[20]考虑永磁体外围无法形成线性磁场分布的情况,提出了一种解决非线性测量问题的方案,但该方案易受高次谐波影响。文献[21]针对易受高次谐波干扰的问题,提出了硬件和软件的补偿方法。文献[22]结合电机定子反电动势信号和霍尔传感器信号,通过两者之间的制约关系得到动子的相对位置,提高了霍尔元件的绝对精度。

上述基于正余弦波函数解码的工作对应用线性霍尔解算永磁直线电机转子位置提供了诸多建设性的方法,但是就谐波处理和空间电磁干扰处理等对精度有较大影响的因素方面,仍然留有难点有待进一步研究。

本文充分分析了霍尔传感器安装位置距离永磁体表面不同高度时的磁场信号特征,提出了一种利用较低安装高度获得幅值大、抗干扰能力强的马鞍形磁场,以数值方法进行位置解算的方法。

该解算方法分为数据库的建立和实时解算2个部分。实时解算前需提前建立参考点数据库并可在动态修正。为了提高后续计算速度,所得数据根据特征分为4个象限存储,每2个采样点之间角度间距为后续搜索的最小区间。实时解算过程分为象限判断、最小区间搜索和插值解算3个过程。根据2个霍尔传感器所测信号的特征匹配到对应象限,根据本文提出的搜索策略查找到所在的最小区间,之后再采用优选的插值算法解算出角度或者位置值。计算结果表明,该算法可

以有效推算出所求的角度,算法精度与信号采样频率正相关,而采样频率与硬件性能有关,如何优化选择需根据硬件性能和实时性要求进行抉择。

1 位置磁场信号特征分析

1.1 基于线性霍尔传感器的位置磁场检测结构

获取磁场信号特征结构,如图1所示。为某平面型永磁直线电机局部及2个线性霍尔传感器安装位置示意图如图1左上角局部放大图所示。霍尔传感器的底面距离定子永磁体上表面的高度为 H_g 。2个霍尔传感器水平安装位置相差 $1/2$ 极距,A为固定在电机转子上承载霍尔传感器的支架,为非导磁材料。霍尔传感器水平方向上与转子铁心需保持一定距离,以减少铁心引起的磁场畸变^[22]。该方案也同样适用于圆筒形永磁直线电机。

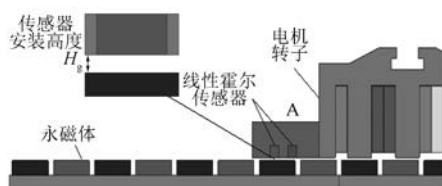


图1 磁场信号特征结构

1.2 磁场信号分布特征

令电枢转子与一体安装的霍尔传感器在一对永磁体磁极范围内运动,测量不同位置时的磁场值。霍尔传感器距离永磁体的高度 H_g 在1~6 mm范围变化时,从其中1个霍尔传感器测得的磁场竖直方向分量值如图2所示。

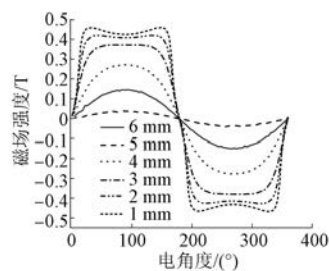


图2 不同位置磁场信号波形

从图2可以看出,当霍尔传感器距离永磁体较近,如 $H_g=1$ mm时,磁场空间波形是中间略低两侧略高的马鞍形; $H_g=3$ mm时,波形逐渐变化为梯形形状; $H_g=5$ mm,则逐渐靠近类正弦波形。

另外,从磁场值来看,随着 H_g 高度的增加,波形的幅值逐步减小,从 $H_g = 1 \text{ mm}$ 时的 0.5 T 减小到 $H_g = 6 \text{ mm}$ 时的约 0.04 T 。进一步对上述磁场波形数据进行傅里叶级数分析,结果如图 3 所示。

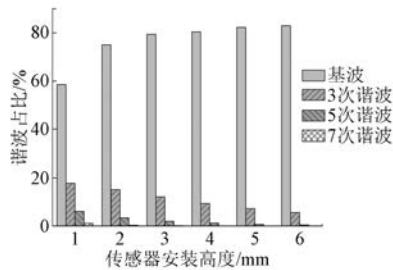


图3 永磁体表面不同高度磁场信号谐波分析

从图 3 可以看出,随着 H_g 逐渐加,基波占比逐渐增加,与图 2 的波形在频率域的规律一致。但是从图 2 可以看到,即使在 $H_g = 6 \text{ mm}$ 的正弦波形中,仍然存在谐波,在位置解算时会引入直接误差。

2 谐波及干扰信号对正余弦解析法的影响

目前研究和应用的利用线性霍尔传感器来检测位置的方案均将传感器安装在较高的位置,将获得的数据用正余弦函数求得正切值来解算位置值^[22]。由于图 3 中高次谐波的存在,若用理想正余弦波位置解算角度会引入额外误差,影响位置检测的精度,为后续的信号处理带来困难。此外,为了得到较为正弦的波形,需将传感器安装在相对加高的位置,容易引入工作环境中的各种干扰信号,而由于较高安装时测得的有效信号值较弱,干扰信号与较弱的有效磁场信号混合,对后续信号的处理和精度的控制带来了另一个挑战。

2.1 理想三角函数曲线推算的角度值

目前,用霍尔信号来解算直线电机位置检测的方法,是将测得的数据通过正余弦电压信号作反正切运算来解算得到电角度^[21]。理想两路霍尔元件输出可表示为

$$\begin{cases} U_a = M \sin \tau \\ U_b = M \cos \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_a 、 U_b ——两组霍尔传感器的输出电压;

τ ——直线电机动子的电角度;

M ——比例系数。

因此,电角度可表示为

$$\phi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{U_a}{U_b}\right), & U_a \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{U_a}{U_b}\right) + \pi, & U_b \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

2.2 带有谐波和干扰信号时推算的值

实际测量时有多种干扰因素,主要为图 3 所示的谐波。图 2 中 $H_g = 5 \text{ mm}$ 、 $H_g = 6 \text{ mm}$ 对应曲线的变化是由于传感器安装较高且测得磁场信号较弱,导致混入了各类空间电磁干扰信号^[21]。这些因素可以理解为直流分量和高次谐波的混合。

若在测得的系统信号中混入直流分量,则反正切公式变为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{M \sin \tau + \Delta}{M \cos \tau + \Delta}\right) \quad (3)$$

式中: φ ——有直流干扰时解算所得的转子位置;

Δ ——直流分量。

令 $\Delta = \gamma M$, γ 为直流分量占比系数,则该干扰引起的位置误差可表示为

$$e = \phi - \varphi \approx \tan e \approx -\sqrt{2} \gamma \sin\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \quad (4)$$

若考虑谐波对霍尔传感器输出的影响,则反正切公式为

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sum_1^{\infty} K_n \sin n\tau}{\sum_1^{\infty} K_n \cos n\tau}\right) \quad (5)$$

式中: K_n ——各次谐波分量的幅值。

令 $K_1 = \xi_1 M$, $K_2 = \xi_2 M$, 其中 ξ_n 表示对应的比例系数,则谐波引起的解码误差可表示为

$$e = \phi - \varphi \approx \tan e \approx \xi_1 \sin \tau + \xi_2 \sin 2\tau + \dots \quad (6)$$

由式(4)、式(6)可见,直流分量及高次谐波引起的测量误差与干扰信号的占比直接相关。从图 2、图 3 也可知,由于实际测量中所得磁场波形中的谐波成分,以及安装高度较高导致的有效信号较弱,混入的干扰信号影响较大,增加了对后续信号处理的要求和挑战。

3 基于马鞍形信号曲线的位置解算方法

由于上述的磁场波形特征和结构特征,利用

正弦波通过反正切函数解码存在一定的局限性和困难。针对这种情况,本文根据磁场波形特征,提出了一种将传感器安装在较低位置,较少引入空间干扰信号,有效信号值较大,基于马鞍形磁场波形特征的信号检测的数值解算方法。该方法的流程图框架如图4所示。

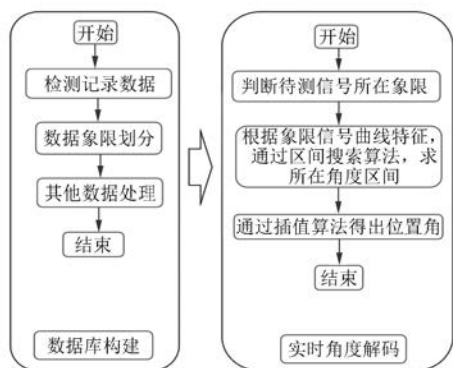


图4 基于马鞍形磁场波形数值解算流程图

从图4可以看出,位置检测算法分为两部分:数据库构建和实时角度解码。数据库构建时,首先霍尔传感器检测到两组具有一定相位差的磁场信号;根据两组磁场信号的数值符号,分成4个象限。实时角度解码时,传感器检测到一组待测信号,根据数值符号,判断所在的象限;根据区间搜索算法,找到所在的最小区域;在最小区域内,应用优选的插值算法解算出位置角度。

3.1 数据库构建

(1) 在霍尔传感器组接收到数据后,嵌入式软件系统采集得到马鞍形“磁场信号组-电角度”初始数据库 $S_i[f_{1i}, f_{2i}, \theta_i]$ 。其中: $i = 1, 2, \dots, n$ 表示采样点的编号,也是数据库内数据组的编号; f_{1i}, f_{2i}, θ_i 分别为1号传感器获得的第 i 个采样点处磁场值、2号传感器获得的第 i 个采样点处磁场值、第 i 个采样点对应的角度。

(2) 根据 f_{1i}, f_{2i} 数值符号的不同,将初始数据库的数据按照4个象限归类得到整理后的数据库。以2个霍尔传感器组安装成 90° 相位差为例(不是必须 90° 相位差时,根据对应的界限区分,也可以得到对应的4个象限,但是计算相对会较为复杂),分别为 I(-+) 象限,第 II(--) 象限,第 III(+ -) 象限,第 IV(++) 象限,如图5所示。图5中, K 为最高点。

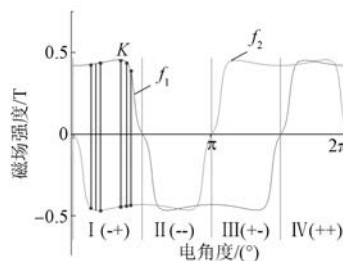


图5 数据库象限划分示意图

3.2 实时角度解码

3.2.1 象限判断

象限判断对于整个算法的高效实现具有重要意义。因数据库元素较多,若直接在整个数据库中检索,花费时间较多,影响算法的实时性。通过象限匹配,只需要在某个象限内检索即可,可以极大地减少算法的复杂度和提高位置检测的实时性。

传感器检测到两组磁场信号后,根据连续信号的数值符号,判断当前数据组所归属的象限。按照 90° 相位差的安装结构,如图5所示。 f_1 上测得值为正 f_2 上测得的值为负时为第 I 象限;2个数值均为负时为第 II 象限; f_1 上测得为负 f_2 上为正时为第 III 象限;2个数值均为正时为第 IV 象限。

3.2.2 区间搜索算法

在确定象限之后,需要在某象限的数据库中查找并确定目标角度所在的磁场和角度区间,区间为相邻2个数据库采样点及对应的角度范围。以第 I 象限为例,区间搜索流程如图6所示。

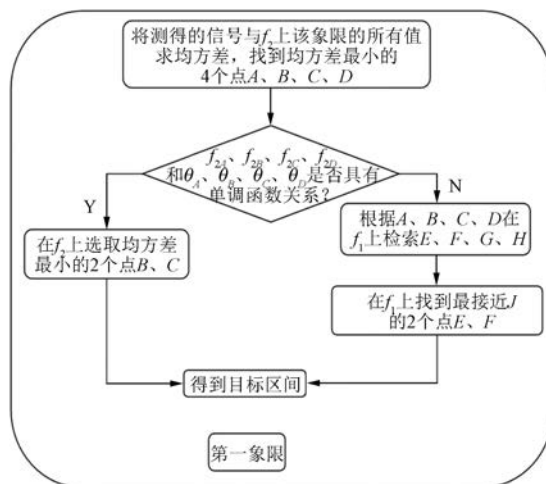


图6 第一象限区间搜索算法流程图

由于每次检测的数据具有细微差异性,并不存在绝对的数值相等,难以从数据库中寻找相等数值磁场信号。故本文提出一种搜索算法:位置检测开始时,检测到一组磁场信号(f_{1I}, f_{2I}),先根据 2 个数值符号判断所在象限,并在该象限内找到两组相邻的磁场信号,构成目标区间。区间匹配的判断标准为:目标区间端点数值与待测磁场数值的均方差之和等于象限内任意两点数值与待测信号均方差之和的最小值。

算法流程具体描述如下。

(1) 第 I 象限:根据测量得到待解算角度对应的磁场信号值 $[f_{1I}, f_{2I}]$ 的数值符号,判断所在象限,假设待测信号位于第 I 象限。

逐个选取数据库目标象限里的所有 f_{2i} ,与 f_{2I} 求均方差,找到均方差最小的 4 个点 A、B、C、D,对应的电角度为 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 。①若 $f_{2A}, f_{2B}, f_{2C}, f_{2D}$ 和 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 具有单调函数关系,即 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 增大, $f_{2A}, f_{2B}, f_{2C}, f_{2D}$ 也不断增大,如图 7 所示。在曲线 f_2 上选取均方差最小的 2 个值 B、C,然后在数据库中根据 B、C 可以在曲线 f_1 上检索到 F、G,可推出目标区间为 $[f_{2B}, f_{1F}, f_{2C}, f_{1G}]$ 。②若 $f_{2A}, f_{2B}, f_{2C}, f_{2D}$ 和 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 不具有单调函数关系,即 $\theta_A, \theta_B, \theta_C, \theta_D$ 增大, $f_{2A}, f_{2B}, f_{2C}, f_{2D}$ 先增大然后减小,如图 8 所示。根据 A、B、C、D 在曲线 f_1 上检索到 E、F、G、H,则 $[E, F]$ 和 $[G, H]$ 为 f_1, f_2 上的两组区间,若 f_{1E}, f_{1F} 与 f_{1I} 均方差之和小于 f_{1G}, f_{1H} 与 f_{1I} 均方差之和,即 E、F 点更接近待测点 J,则可推出所求的最小区间为 $[f_{1A}, f_{1E}, f_{2B}, f_{1F}]$ 。③根据选定的插值算法推算待测磁场信号 $[f_{2I}, f_{1I}]$ 对应的电角度 θ_{II} 。

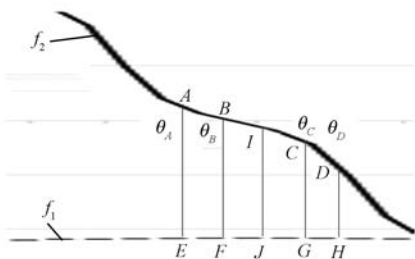


图 7 目标区间搜索算法第 I 象限单值部分示意图

(2) 第 II 象限:在第 II 象限内,如图 9 所示,分为单值部分 MN 和多值部分 MO,在第 I 象限内的单值部分算法同样适用于第 II 象限;多值部分

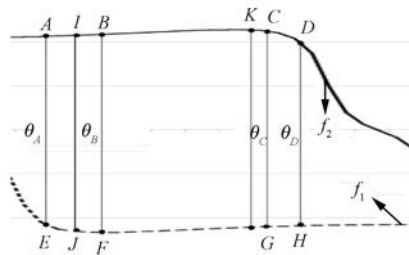


图 8 目标区间搜索算法第 I 象限多值部分示意图



图 9 数据库目标区间搜索算法第 II 象限示意图

MO,第 I 象限内的多值部分算法同样也适用于第 II 象限。

(3) 第 III、IV 象限:由数据库分布情况可以知道,第 III、IV 象限和第 I、II 象限总体分布具有一定对称性,目标区间搜索算法对 III、IV 象限具有通用性。

3.2.3 插值算法对精度的影响

马鞍形磁场的波形起伏变化并不是非常剧烈的。当数据库内采样存储的数据量较多时,局部看,整体线性程度已经相对较好。因计算实时性的需求,优先考虑最简单的插值模型即线性插值或者三点抛物插值。通过 2 条曲线的数据点,按照上文的流程确定最小区间后,可以通过 f_1 和 f_2 中任意一条曲线的数据进行插值。若采用 f_2 上的数据则有:

$$\theta_{FI} = \frac{f_{2I} - f_{2B}}{f_{2A} - f_{2B}} \theta_A + \frac{f_{2I} - f_{2A}}{f_{2B} - f_{2A}} \theta_B \quad (7)$$

式中: f_{2I} ——待测磁场信号;

f_{2A}, f_{2B} ——已定位的目标区间端点上 f_2 磁场值;

θ_A, θ_B ——已定位的目标区间端点对应的两组电角度。

根据上述算法流程,在一个周期内,对位置解算进行验证,平均间隔,采样 180 个验证点进行了对比分析计算,如图 10 所示。从图 10 可以看出,

通过 2 种插值算法得出的角度,线性度和跟随性较好。

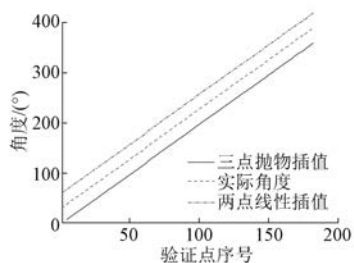


图 10 实际角度与插值后的角度对比

图 11 所示为不同插值误差曲线对比。图 11 中:实线为电机转子的实际位置信息;虚线为霍尔传感器测得磁场信号后,通过象限匹配、区间搜索、插值推算后解码得到的位置信息。由于验证点数过多,图形重合度较高,为了增加对比效果,将两点线性插值、三点抛物插值后的角度相应的增加 30° 和 60° ,以便于在图 10 中观察。

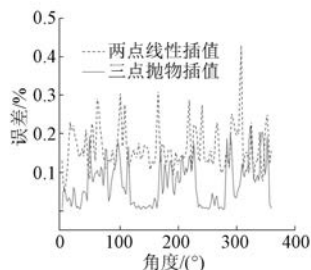


图 11 不同插值误差曲线对比

在一个周期范围内,应用两点线性插值和三点抛物插值时,均存在一定的偏差。图 11 中,在插值阶段采用两点线性插值,平均误差在 0.16% 以内,三点抛物插值计算后的角度,平均误差在 0.07% 以内,因此在某种程度上,采用三点抛物插值算法优于两点线性插值算法。该误差精度可适应大多数低成本应用场合要求。

结合图 11 和马鞍形曲线可以看出,不同的误差分布在马鞍形曲线的不同部分,误差比重是不一样的,后续可以做进一步讨论。综上所述,当采用两点线性插值算法的时候,误差明显过大;当采用三点抛物插值时,可以明显地修正误差。

4 影响位置检测精度的因素分析

除了插值算法选择的影响之外,对本文所提算法影响最大的是数据库的采样点数量。增加数

据采样点数量必然可提高解算出的角度精度,但是对数据存储量和解算复杂度则有负面影响。对此,分析了一对磁极范围内数据库总量对精度的影响。

分别设置 5 组不同分采样频率,生成 5 组数据总量不同的数据库作解算分析,一对磁极范围内对应的数据库总量分别为 50、100、200、400、800。以 5 个数据库各自分别解算相应的位置角度,并取 30 组数据作为验证误差,如图 12 所示,总误差如图 13 所示。

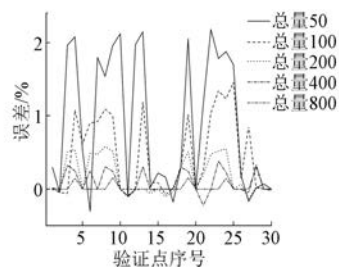


图 12 数据库信号总量对误差的影响曲线 I

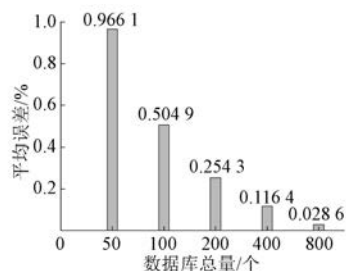


图 13 数据库信号总量对误差的影响 II

当数据库元素总量为 50 时,最后的平均误差约为 1%,随着数据库数据量的不断增加,最后的平均误差不断降低。当数据库的数据总量为 800 时,平均误差已经降低至 0.03%;如果继续改进算法,在变化剧烈的区域适当增加插值点,可以进一步提升数据库与精度的性价比。

5 结 语

(1) 在基于线性霍尔传感器的位置检测中,传感器测得信号往往带有谐波分量。为了获取类正弦波形,传感器装于较高位置导致有效信号较弱,而空间其他干扰难以忽略,影响精度,为信号的处理带来较大挑战。

(2) 本文提出了利用将传感器安装于较低位

置,针对较大幅度且为马鞍形磁场波形的特征,应用数据象限划分、区间搜索、数字化插值的解算方法,可以回避类似的问题,获得有效的位置值。

(3) 计算结果的对比表明,插值算法,特别是数据的总量对算法的结算精度影响较大。为了进一步提高该类算法的应用价值,可根据信号变化的剧烈程度,在下降和上升比较剧烈的象限两侧区域,适度增加采样点数量,以提高解算精度-实时性或者解算精度-采样频率的性价比。随着芯片存储量和计算速度的提升,该类算法将具有更高的研究和应用价值。

【参考文献】

- [1] 叶云岳.直线电机在现代机床业中的应用与发展[J].电机技术,2010(3): 1.
- [2] SHIN K, LEE S, CHO H, et al. Analysis on the pitching moment in permanent-magnet linear synchronous motor for linear motion stage system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52 (7): 8104904.
- [3] 黄松柏,胡学芝.永磁直线同步电机定子初始位置检测新方法[J].微电机,2015,48(9): 66.
- [4] 陆华才,徐月同,杨伟民,等.表面式永磁直线同步电机初始位置检测方法[J].浙江大学学报(工学版),2008(5): 835.
- [5] 郭凤仙,宋果,肖智明.直线同步电机初始磁场位置检测方法[J].机械制造,2013,51(7): 40.
- [6] KHIAT A, LAMARQUE F, PRELLE C, et al. Two-dimension fiber optic sensor for high-resolution and long-range linear measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical,2010,158(1): 43.
- [7] 杨秀芳,郭彦珍.交流光栅位置检测系统[J].西安理工大学学报,2001(3): 301.
- [8] 于海玲,费业泰.具有测量误差实时分离与修正功能的光栅动态测长系统[J].计量与测试技术,1999(6): 8.
- [9] 节德刚,刘延杰,孙立宁,等.基于双光栅尺的高速高精度位移测量方法[J].光学精密工程,2007,15(7): 1077.
- [10] 艾武,程立,杜志强,等.基于 DSP 的直线电机位置检测与控制技术[J].机械与电子,2004(2): 29.
- [11] 李海霞,张嵘,韩丰田.感应同步器测角系统误差测试及补偿[J].清华大学学报(自然科学版),2016,56(6): 611.
- [12] 王飞,付晶,韩昌佩.基于 FPGA 的绝对式圆感应同步器测角系统的设计与实现[J].红外,2017,38(8): 31.
- [13] 臧金杰.基于磁栅的高精度位移传感器设计[D].苏州:苏州大学,2017.
- [14] 赵吉文,王荔枝,张梅,等.直线电机定子位置检测的图像亚像素测量算法[J].仪器仪表学报,2013,34(11): 2592.
- [15] CUPERTINO F, GIANGRANDE P, PELLEGRINO G, et al. End effects in linear tubular motors and compensated position sensorless control based on pulsating voltage injection[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(2): 494.
- [16] 孔龙涛,程明,张邦富.基于模型参考自适应系统的模块化磁通切换永磁直线电机无位置传感器控制[J].电工技术学报,2016,31(17): 132.
- [17] MENG G, YU H, HUANG L, et al. A novel position sensorless control of flux-switching permanent magnet linear machine for electromagnetic launch[C]//2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS),2014.
- [18] 王利,卢琴芬,叶云岳.永磁直线同步电机无位置传感器定子位置辨识[J].电机与控制学报,2012,16(6): 7.
- [19] 徐丽莉,叶云岳.基于线性霍尔元件的圆筒型永磁直线同步电机位置检测[J].微电机,2007,40(3): 23.
- [20] 黄明,尚群立,余善恩.线性霍尔传感器在直线位移中的应用[J].自动化仪表,2010,31(3): 66.
- [21] 刘刚,肖烨然,宋欣达.永磁同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿[J].电机与控制学报,2014,18(8): 36.
- [22] 刘晓,叶云岳,郑灼,等.一种低成本的线性霍尔位置检测方法研究[J].浙江大学学报(工学版),2008,42(7): 1204.

收稿日期: 2019-06-06