

一种基于点距判断的永磁电机位置解算方法*

蔡炯炯¹, 蒋丽君¹, 倪凯华², 王子辉¹, 张亚成¹

(1. 浙江科技学院 自动化与电气工程学院, 浙江 杭州 310012;

2. 墨尔本大学 工程系, 澳大利亚 维多利亚州 墨尔本 3000)

摘要: 基于马鞍形磁场波形特征解算直线电机位置的方法可为高性价比位置解算提供一种新的选择, 其包含离线建数据库和实时解算 2 部分, 实时解算中又以区间匹配为关键。分析了双马鞍形磁场值之间的关系点阵图, 提出了在实时解算中利用点距来匹配、确认算法插值区间的算法思路, 针对特殊点提出采用点距和变化趋势结合的方法确认插值区间。此外, 还研究了数据波动和数据库信息总量对解算方法的影响。与对照样本对比, 结果表明使用点距的解算方法物理意义明确, 计算精度可以通过数据采集高度参数、数据库数据总量来调整优化, 具有较好的研究价值和应用前景。

关键词: 永磁电机; 霍尔传感器; 位置检测; 马鞍形磁场

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0034-06

doi: 10.12177/emca.2020.134

A Method of Permanent Magnet Motor Position Calculation Based on Point Distance Judgment*

CAI Jiongiong¹, JIANG Lijun¹, NI Kaihua², WANG Zihui¹, ZHANG Yacheng¹

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

2. Melbourne School of Engineering, The University of Melbourne, Melbourne, Victoria 3000, Australia)

Abstract: The method based on saddle-shaped magnetic field waveform to calculate the position of linear motor can provide a new choice for cost-effective position calculation. It includes two parts: offline database establishment and real-time calculation. In real-time calculation, interval matching is the key. The relationship between the double-saddle magnetic field values is analyzed, and the real-time algorithm of matching and determining interpolation interval by point distance is put forward, in which the interpolation interval is determined by combining point distance and change trend of special points. In addition, the influence of data fluctuation and the total amount of database information on the calculation is also studied. Compared with the results of the samples, the calculation method using point distance has clear physical meaning, and the calculation accuracy can be regulated and optimized through adjusting the height parameters of data collection and the total amount of database data, so it has a good research value and application prospect.

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

收稿日期: 2020-07-22; 收到修改稿日期: 2020-08-26

* 基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY17E070002、LQ17E070002、LY21E070002)

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。

0 引言

直驱式永磁直线电机以体积小、效率高、结构简单等优点得到了广泛应用^[1-3]。精确获取电机转子位置信息是实现永磁直线电机高效高精度控制的关键因素之一。

基于线性霍尔传感器的检测方法,因具有较高的性价比,得到诸多关注和研究。该方法大多是通过解算正弦磁场波形^[4-5]获得转子位置信息。为了获得较好的正弦性,需将传感器安装在较高位置,不仅有效信号幅值非常弱小,且容易引入各种干扰信号,使有效信号易受高次谐波的干扰^[6]。尽管可以通过软、硬件补偿的方法尽量消除高次谐波带来的影响^[7-8],但是在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,改进过程中仍然留有难点。

利用将霍尔传感器安装在较低高度时获取幅值较大的马鞍形磁场的波形特征,以数值方法解算来获取电子转子位置信息的方法具有抗干扰能力强、解算精度高的潜在优点^[6]。

本文在依据马鞍形磁场解算电机转子位置信息的基础上,进一步分析了马鞍形磁场数据特征,提出了利用点距来判断寻找归属区间的方法。针对每个象限中局部出现的2个点距离相同的情况,提出了利用数据变化趋势来区分的方法。此外,本文还研究了影响算法的相关因素,研究了使用目标区间中间值插值的方法降低误差;分析了传感器安装高度对马鞍形算法的精度影响;分析了数据库总量对计算精度的影响等。从解算的角度与对照样本对比的结果来看,利用马鞍形波形特征解算直线电机转子时,使用点距的解算方法物理意义明确,计算精度可以通过传感器安装高度参数、数据库数据总量来调整优化,所提方法具有较好的研究价值和应用前景。

1 马鞍形磁场获取及特征分析

1.1 数据获取仿真模型

以平面型永磁直线电机为例,获取磁场数据的线性霍尔传感器安装结构如图1所示。将2个线性霍尔传感器以相差1/2极距的方式安装在支架上,且使传感器与转子铁心保持一定距离,以减少铁心引起的磁场畸变^[22]。定义霍尔传感器的

安装高度,即传感器底面与定子永磁体上表面之间的距离为 H_g 。

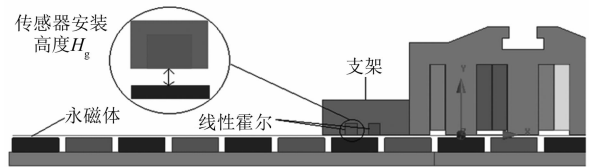


图1 磁场检测设备结构图

1.2 磁场特征分析

图2为2个错位安装的霍尔传感器检测到的 $H_g = 1 \text{ mm}$ 处的磁场竖直方向的分量。其中, f_1 、 f_2 分别是1、2号霍尔传感器检测到的磁场数据。磁场波形中间平缓、两端略高,具有马鞍形的特征。

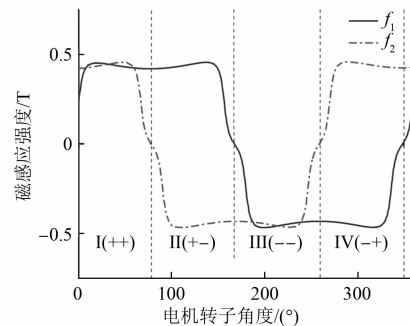


图2 错相位双马鞍形磁场空间分布曲线

图3为 $H_g = 1 \text{ mm}$ 时获取的双马鞍形波形数据关系点阵立体图。平面是2个霍尔传感器检测到的磁感应强度数据 f_1 与 f_2 构成的点阵图。

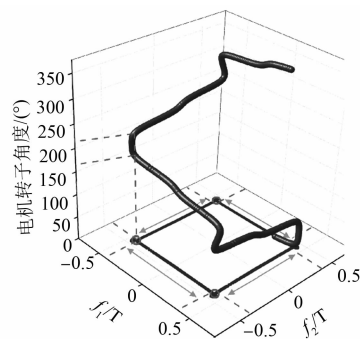


图3 双马鞍形波形数据关系点阵立体图

一般情况下,在电机转子的运动过程中,附近的磁感应强度应满足图3所示轨迹,因此检测到的待解算磁场数据也会存在于此轨迹上,理论上可以通过读取曲线上的磁场数据,输出对应的电机转子位置信息。但曲线上的数据点是无穷的,

仅依靠读取曲线上的磁场数据输出对应的电机转子位置信息是不可取的。

因此,提出了利用插值算法解算磁场数据对应的电机转子位置。插值的前提是找到曲线上与待解算磁场数据最接近的磁场数据,这可以利用两点之间的距离最小两点最接近实现,即点距判断,这一方法物理意义明确,且简单易实现,可以准确地判断与待解算磁场数据最接近的磁场数据,在此基础上解算的电机转子位置也具有准确性。

但在交点处(平面图中深色圆圈部分),存在同一个 $[f_1, f_2]$ 数据对,对应2个不同位置信息的可能。这时仅依靠点距判断的方法来解算电机转子位置是不准确的,需要采取其他辅助方法。本文提出了利用磁场数据变化率来辅助判断当前磁场信号对应的实际转子角度。

2 基于点距判断匹配归属区间的位置解算方法

基于点距判断解算马鞍形磁场来获取电机转子位置信息的方法包含离线数据库构建和在线实时角度解算,在线解算的关键部分在于特殊磁场数据的处理和点距判断。

大部分的磁场数据可唯一确定对应的电机转子位置信息,但也存在一对磁场数据对应两组位置信息的情况,需要对这类特殊的磁场数据预先出处理,利用磁场数据变化率判断对应较小还是较大位置。

点距判断物理意义明显,可以简单、准确地确认与待解算磁场数据最接近的磁场数据,从而找到待解算数据的匹配区间,最终确认算法的插值区间,计算电机转子位置。

2.1 基于数据特征的离线数据库构建

离线数据库构建:对电机进行有限元仿真计算得到马鞍形“磁场信号组—转子电角度”初始数据库 $S_i[f_{1i}, f_{2i}, \theta_i]$ 。其中, f_{1i}, f_{2i}, θ_i 分别为1、2号传感器获得的第*i*个采样点处磁感应强度值及对应的电机转子角度位置。初始数据库 S_i 曲线的如图2所示。

象限划分:将初始数据库里的磁场数据 $[f_{1i}, f_{2i}]$,按照数值符号划分为4个象限,得到归类整理后的数据库。为了便于说明及后续数据的处

理,2个霍尔传感器组以 90° 电角度相位差安装。图2中, f_{1i} 上测得磁感应强度值为正, f_{2i} 上测得的磁感应强度值为正时为第I象限(++); f_{1i} 为正, f_{2i} 为负时为第II象限(+−);2个磁感应强度数值均为负时为第III象限(−−); f_{1i} 为负, f_{2i} 为正时为第IV象限(−+)

2.2 在线实时角度解算

2.2.1 象限判断

由于数据库包含的磁场数据较多,直接在整个数据库中检索与当前磁场信号 $[f_{1t}, f_{2t}]$ 最匹配的目标磁场信号 $[f_{1i}, f_{2i}]$ ($t \in i$),花费时间过多,影响算法效率。通过象限判断,只需要在某个象限内检索与当前磁场数据最匹配的目标磁场数据,可以降低算法的复杂度和提高位置检测的速率。

当前磁场信号所属象限判断的依据即是数据库象限划分的依据。在传感器检测到一组磁场数据后,根据数据的数值符号,判断当前磁场数据所属象限。

2.2.2 基于点距判断的归属区间匹配

(1) 特殊数据实际位置判断。在第1.2节马鞍形磁场特征分析部分,提到点阵图中的交叠部分,同一组磁场数据,对应2个位置信息(一大一小)。以第II象限为例分析,其局部放大图如图4所示。可以发现, $f_{1A} = f_{1B}, f_{2A} = f_{2B}$,却对应着2个角度 θ_A 和 θ_B 。

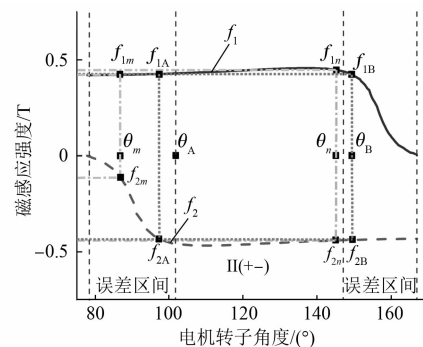


图4 数据库第II象限局部放大图

因此,仅利用2个磁场值以坐标方式来解算角度,无法区分这2个可能的电角度,需要其他辅助方法来进行识别。实际上,为了避免在重叠点附近的邻域也会受到这种类似的影响,需要一进入重叠点附近某个区域范围就采用辅助方法协同识别。

图4中,在左半区域,首先判断当前磁场信号 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 是否进入误差区间,当 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 进入误差区间时,取该象限内一点 $[f_{1m}, f_{2m}]$ ($[f_{1m}, f_{2m}]$ 在 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 前,即按照电机运动方向,先测得 $[f_{1m}, f_{2m}]$),计算 $d_1 = f_{1l} - f_{1m}$ 、 $d_2 = f_{2l} - f_{2m}$,根据电机运动方向和磁场变化趋势可见,若 $d_1 > 0$ 、 $d_2 < 0$,说明当前磁场信号 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 应对应较小位置 θ_m ;在右半区域, $d_1 = f_{1l} - f_{1n}$ 、 $d_2 = f_{2l} - f_{2n}$,若 $d_1 < 0$ 、 $d_2 > 0$,说明当前磁场信号 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 应对应较大位置 θ_n 。其他情况如表1所示。

表1 特殊数据实际位置判断依据

象限	d_1	d_2	位置信息
I	> 0	> 0	小
	< 0	< 0	大
II	> 0	< 0	小
	< 0	> 0	大
III	< 0	< 0	小
	> 0	> 0	大
IV	< 0	> 0	小
	> 0	< 0	大

(2) 直接判断。对一般磁场数据,在确定当前磁场数据所属象限后,需在该象限的数据库中查找并确定待解算磁场数据对应的目标磁场和算法插值的目标区间,目标磁场是该象限内与当前磁场数据最接近的一组数据,目标区间为目标磁场及其相邻2组磁场共同构成的插值区间。

检索目标磁场的方法点距判断,是利用最小二乘法计算当前磁场信号 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与数据库里的磁场信号 $[f_{1i}, f_{2i}]$ 之间的距离。使待测磁场信号遍历数据库里所有的磁场信号,计算之间的距离,其中最小距离对应的磁场信号组,就是目标磁场信号。点距判断方法能够精准判断与当前磁场信号最接近的磁场信号,且简单易实现。

点距判断过程:经过第2.2.1节象限判断,假设待检测磁场数据 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 落在第I象限,设 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与目标磁场之间的距离 $d=0$ 。

首先,计算 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与数据库里的磁场信号 $[f_{11}, f_{21}]$ 之间的距离,记为 d_1 ;

其次,计算 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{12}, f_{22}]$ 之间的距离,记为 d_2 ;若 $d_2 < d_1$,则说明 $[f_{12}, f_{22}]$ 是比 $[f_{11}, f_{21}]$ 更接近 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 的磁场数据,那么 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与目标磁场

之间的距离 $d=d_2$;

接着,计算 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{13}, f_{23}]$ 之间的距离,记为 d_3 ,若 $d_3 < d_2$,则说明 $[f_{13}, f_{23}]$ 是比 $[f_{12}, f_{22}]$ 更接近 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 的磁场数据,那么 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与目标磁场之间的距离 $d=d_3$;

……

依次遍历第I象限中,所有的 $[f_{1j}, f_{2j}]$ ($j=0, 1, \dots, m$),直到比较出最小 d 对应的 $[f_{1l}, f_{2l}]$,这组数据就是与 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 最接近的目标磁场。

区间匹配:确定好目标磁场 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 后,与算法匹配的插值区间由目标磁场及目标磁场前后的磁场数据构成,包括 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{1l-1}, f_{2l-1}]$ 或 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{1l+1}, f_{2l+1}]$ 。确认插值区间的标准为 $(d_i + d_{i-1})$ 与 $(d_i + d_{i+1})$ 的大小。

区间确认:区间确认示意图如图5所示。若 $(d_i + d_{i-1}) < (d_i + d_{i+1})$,则说明 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 处于 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{1l-1}, f_{2l-1}]$ 之间,算法的插值区间边界为 $[f_{1l}, f_{2l}]$ 与 $[f_{1l-1}, f_{2l-1}]$ (如图5中虚线所示区域), f_1 曲线上的数据对应的插值区间为 $[f_{1l-1}, f_{1l}]$, f_2 曲线上的数据对应的插值区间为 $[f_{2l-1}, f_{2l}]$;同理得 $(d_i + d_{i-1}) > (d_i + d_{i+1})$ 情况下,算法插值区间为 $[f_{1l}, f_{1l+1}]$ 与 $[f_{2l}, f_{2l+1}]$ 。

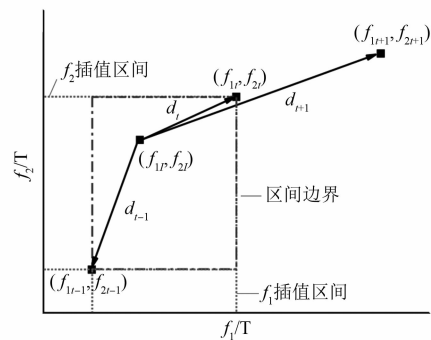


图5 区间确认示意图

上述点距判断和区间匹配、确认方法,对落在其他象限的待检测数据也同样适用。

2.2.3 区间内位置解算

(1) 直接插值解算。由图4数据库局部放大图可见,马鞍形磁场波形变化平缓,因此可以考虑简单的线性插值模型。

根据 N 次插值多项式,结合测得的磁感应强度数据和电机转子位置解算要求,按照上文的算法流程确定目标区间后,可以通过 f_1 和 f_2 中任意一条曲线的数据进行插值。采用 f_2 上的磁场数

据进行两点插值解算,则有:

$$\theta_{f_i} = \frac{f_{2i} - f_{2i+1}}{f_{2i} - f_{2i+1}}\theta_i + \frac{f_{2i} - f_{2i}}{f_{2i+1} - f_{2i}}\theta_{i+1} \quad (1)$$

式中: f_{2i} 为待测磁场信号; f_{2i}, f_{2i+1} 为已定位的目标区间端点上 f_2 磁场值; θ_i, θ_{i+1} 为已定位的目标区间端点对应的电角度。

(2) 改进的插值解算。在应用插值算法解算电机转子角度时,存在个别数据解算误差较大。这是由于空间干扰等因素,导致检测到的磁场信号并不完全光滑,部分数据存在波动,影响插值效果。

分析误差较大的数据组,待解算的磁场信号 f_{2i} 与数据库中相匹配的目标磁场信号 f_{2i} 之间的关系如图 6 所示。从图 6 可以观察到,第 4 个数据点 f_{2i} 明显偏离目标磁场信号 f_{2i} 与 f_{2i-1} 构成的目标区间 $[f_{2i-1}, f_{2i}]$,落入了 f_{2i} 与 f_{2i+1} 构成的目标区间 $[f_{2i}, f_{2i+1}]$,从而使应属于 $[\theta_{i-1}, \theta_i]$ 这一区间的待解算电机转子角度 θ_i ,落入了 $[\theta_i, \theta_{i+1}]$ 之间,导致最终解算的电机转子角度偏离了实际角度,使算法解算的结果存在较大误差。

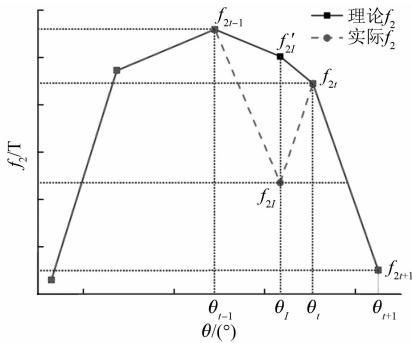


图 6 数据波动对算法的影响

造成待解算磁场信号落入错误区间的原因是,在寻找最匹配的目标区间时,依据待解算磁场数据 $[f_{1i}, f_{2i}]$ 与目标磁场数据 $[f_{1i}, f_{2i}]$ 之间的距离,采用的是 f_1 和 f_2 2 条磁场曲线计算的;在转子位置解算部分,采用 f_2 与 θ (或 f_1 与 θ) 2 组数据。由于空间干扰的存在, f_2 (或 f_1) 上的数据存在图 6 所示的波动,使其偏离目标区间,造成了找对了最近的目标磁场但插值角度存在误差。

总之,因为点距判断部分和位置解算部分,采用了不同的数据维度,造成了部分磁场数据 $[f_{1i}, f_{2i}]$ 落入了错误的插值区间,影响了算法解算的效果。尽管已经通过取 f_{1i} 和 f_{2i} 两者解算结果的均值作为算法的最终解算效果,仍然存在部分解算

误差较大的点。

针对上述现象,对于解算出现较大误差的 $[f_{1i}, f_{2i}]$,算法采取如下方法减小误差:令待解算的 f_{2i} 等于目标区间端点的均值,即 $f'_{2i} = (f_{2i} + f_{2i-1})/2$ [或 $f'_{2i} = (f_{2i} + f_{2i+1})/2$],利用 f'_{2i} 进行插值解算。

3 数据处理及算法效果

3.1 数据处理

根据算法流程,解算电机转子一个运动周期内的位置,并对解算的结果进行验证。

待解算的磁场数据取自 $H_g = 1 \text{ mm}$ 时,电机转子运动一个周期内按平均间隔记录的 180 组磁感应强度数据,解算用的数据库里包含 360 组磁感应强度及其对应转子位置信息。这 360 组磁场数据对应的转子位置信息,包含一个周期,并且这 360 组磁场数据不包含待解算的 180 组磁场数据。算法验证分别采用 f_1, f_2 2 条马鞍形磁场上的数据进行,最后取 2 组计算结果的均值。

3.2 算法效果

按照第 3.1 节阐述的数据处理方法,算法最终的解算效果如图 7 所示。在一个周期范围内,应用两点线性插值解算电机转子的位置信息存在一定的偏差,两点线性插值解算结果的平均误差约在 0.032%,而在该误差精度下,提出的算法可适应大多数低成本电机位置解算应用场合的要求,具有一定的应用价值。

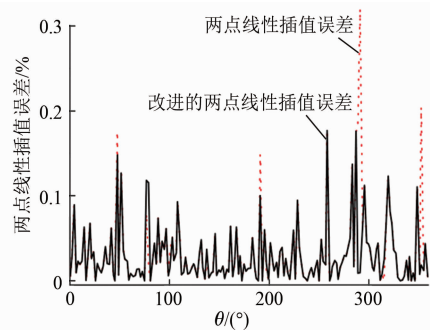


图 7 两点及改进的两点线性插值解算误差

4 影响位置解算精度其他因素

4.1 获取马鞍形磁场的传感器高度的影响

分别解算 $H_g = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 \text{ mm}$ 时测得的马鞍形磁场数据,磁场波形如图 8 所示。算

法解算结果如图 9 所示。可以看出,不同高度获取的马鞍形磁场,最终的解算电机转子位置效果也不一样。原因是 H_g 的减小,使得马鞍形磁场的波峰处包含更多的电机转子位置信息,从而提升了算法解算电机转子位置的精度。尽管降低 H_g 的高度可以有效提升算法解算电机转子位置的精度,但在实际生产中,需要考虑低 H_g 带来的生产工艺难题。并且如何量化 H_g 与算法精度之间的联系也有待进一步的研究。

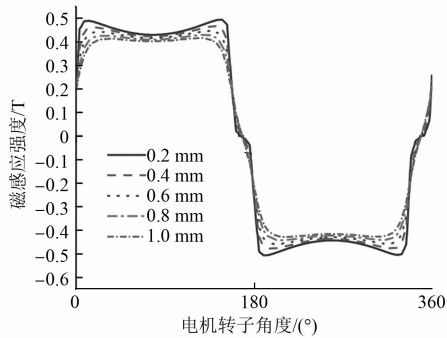


图 8 不同高度获取的马鞍形磁场

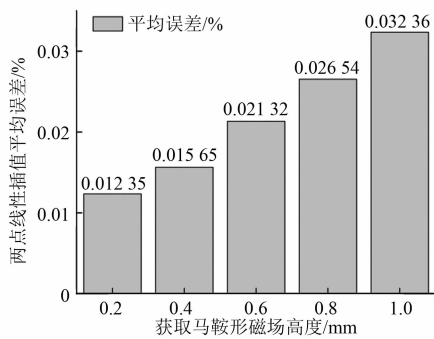


图 9 不同高度获取的马鞍形磁场对解算电机转子位置精度的影响

4.2 数据库信号总量的影响

除了不同高度获取的马鞍形磁场数据对解算电机转子位置精度有影响外,数据库里包含的磁感应强度及其对应转子位置信息的数量对解算电机转子位置精度也具有较大影响。

选取 $H_g = 1$ mm 时 5 组不同的数据库,其信息总量分别为 180、360、540、720、900 (即数据库里分别包含 180、360、540、720、900 组磁感应强度及其对应转子位置信息,这些数据都包含一个周期),解算分析同样的包含一个周期的 85 组磁场信息。结果如图 10 所示。

当数据库信息总量为 180 时,即数据库只包

含 180 组磁感应强度及其对应转子位置信息,算法最后的平均误差达到了 0.07%。随着数据库信息量的不断增加,算法最后的平均误差也不断降低。当数据库的信息总量为 900 时,算法的平均误差已经降低到了 0.009%,在这样的误差下,已经可以满足大部分的工业需求。

同样地,增加数据库的信息数量可提高算法解算电机转子角度的精度,但是一方面会对数据库的信息存储带来挑战,另一方面也对算法解算的速率带来了负面影响。如果继续改进算法,平衡数据库信息总量、算法计算量和算法解算精度之间的关系,可以进一步算法的应用价值。

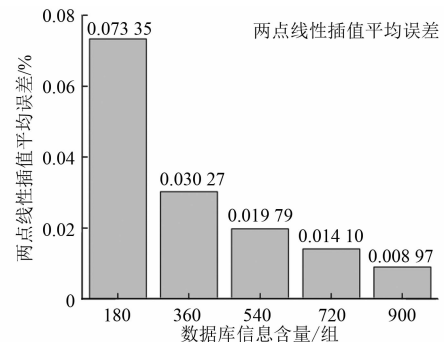


图 10 数据库信息总量对解算电机转子位置精度的影响

5 结 语

最终的解算结果表明,提出的基于马鞍形磁场解算电机转子位置信息的方法是有效的。待检测的磁场数据经过象限判断、点距判断、区间构建等处理,有效提高了电机转子位置解算的速度,并且针对算法本身和数据本身提出的改进方案,有效提升了电机转子位置解算的精度。在算法的误差精度下,可以实现对永磁电机的有效控制。如果进一步平衡算法插值次数、数据库信息总量与算法的速率之间的关系,在实际生产运用中,可以实现更大的价值。

【参考文献】

- [1] GU B, CHOI J, JUNG I. Development and analysis of interturn short fault model of PMSMs with series and parallel winding connections [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29 (4), 2016.

(下转第 46 页)

机的精确参数,因而具有较好的解耦效果。

(2) 传统 ADRC 控制器采用单个 LESO 来观测扰动,在系统扰动突变瞬间,由于扰动估计负担较重,难以准确、快速地观测出全部扰动量,进而影响解耦效果。

(3) 理论分析表明,与传统 ADRC 控制相比,引入 PIO 后的 ADRC 控制器具有更优的扰动跟踪能力,闭环控制系统也具有更强的扰动抑制性能。仿真和试验结果表明,本文提出的控制策略在电流解耦效果上优于传统 ADRC 策略。

【参考文献】

- [1] YEPES A G, VIDAL A, MALVAR J, et al. Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6) : 3041.
- [2] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4) : 920.
- [3] HARNEFORS L, NEE H. Model-based current control of AC machines using the internal model control method [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1) : 133.
- [4] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2) : 121.
- [5] 李春鹏, 贲洪奇, 刘博, 等. 采用扰动观测器的偏差解耦控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22) : 5859.
- [6] DE SORICELLIS M, DA RÙ D, BOLOGNANI S. A robust current control based on proportional-integral observers for permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2) : 1437.
- [7] 杨淑英, 王玉柱, 储昭哈, 等. 基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6) : 1985.
- [8] 董家臣, 高钦和. 永磁直线同步电机电流环新型线性自抗扰控制 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1) : 1.
- [9] WANG G, LIU R, ZHAO N, et al. Enhanced linear ADRC strategy for HF pulse voltage signal injection-based sensorless IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1) : 514.
- [1] JEZERNIK K, KORELIC J, HORVAT R. PMSM sliding mode FPGA-based control for torque ripple reduction [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7) : 3549.
- [2] LIN F, HUNG Y, HWANG J, et al. Fault-tolerant control of a six-phase motor drive system using a Takagi-Sugeno-Kang type fuzzy neural network with asymmetric membership function [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7) : 3557.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 蔡炯炯, 张亚成, 蒋丽君, 等. 基于马鞍形磁场的永磁直线电机位置解算方法 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9) : 46.
- [6] 刘刚, 肖焯然, 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.
- [7] 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.

(上接第 39 页)

扫码关注

《电机与控制应用》

微信公众号

