

电子油门踏板的磁场仿真和实验研究

徐源, 郭斌, 袁月峰

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310038)

摘要: 对于汽车电子油门踏板利用可编程霍尔传感器将踏板的位置变化转换为线性模拟电压输出, 具有产品一致性好、寿命长等优点正越来越获得广泛应用; 针对踏板磁钢片位置布局不良容易导致的传感器校准异常和输出非线性等问题, 进行了踏板旋转件永磁磁路分析, 并用 ANSYS 软件进行了磁场有限元建模仿真, 分析了踏板旋转角度和传感器位置安装之间的影响因素, 并在电子油门性能检测平台上进行了实验验证; 实验结果表明, 双路输出式电子油门踏板的输出线性度达到 1.45%, 同步度指标为 0.12%, 符合产品技术标准。

关键词: 电子油门踏板; 磁场; 仿真; 霍尔传感器

Magnetic Field Simulation and Experimental Research of the Electronic Accelerator Pedal

Xu Yuan, Guo Bin, Yuan Yuefeng

(China Jiliang University, College of Metrology & Measurement Engineering, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The used of the programmable sensor about automotive electronic accelerator pedal, changing the position of the pedal which is converted to linear analog voltage output, having the advantages of good product consistency and long life span, is more and more widely used. The wrong position of pedal's magnets position is easy to cause the abnormal sensor calibration and the output signal's nonlinear problem, analyzing the pedal rotating permanent of magnet magnetic. And magnetic field finite element analysis was carried out by using ANSYS software modeling and simulation, analyzing the influencing factors between the pedal rotation angle and position sensor installed, which is verified in the electronic accelerator pedal's testing system. The experimental results show that the dual type electronic accelerator pedal's output linearity is 1.45%, synchronous index is 0.12%, which is conformed to the product technical standard.

Keywords: electronic accelerator pedal; magnetic field; simulation; Hall sensor

0 引言

电子油门踏板分为接触式和非接触式, 接触式电子油门踏板存在易磨损和寿命短的缺点而逐渐被淘汰, 现在普遍采用基于霍尔原理的非接触式电子油门踏板。Micronas 公司生产的霍尔芯片不仅能实现在线校准的功能, 还具有一致性好、寿命长、精度高等优点, 得到了广泛的使用^[1]。

在对霍尔式双路电子油门踏板的校准和性能检测中发现, 电子油门踏板会出现校准异常或校准后出现输出信号非线性的问题。为了进一步分析其原因, 对电子油门踏板的工作原理深入的研究。

在研究中发现, 电子油门踏板工作方式是, 踏板臂带动永磁体围绕传感器做旋转运动, 使得传感器的磁感应强度随着踏板臂的旋转角度的大小而改变, 最后霍尔芯片利用霍尔效应输出与其受到的磁感应强度成正比的电压信号^[2]。因此, 对霍尔式电子油门踏板工作原理的研究重点在于传感器受到的磁感应强度与永磁体旋转角度之间的转换关系。

目前, 对于霍尔传感器工作的磁场研究普遍采用经验公式和实验的方式, 这种方法使得其研究更繁琐, 得到的精度会比较低。对于不同尺寸和性质的磁铁, 求出其解析式会更加困

难。ANSYS 是基于数值计算的一种大型通用有限元软件, 可以方便地对磁铁进行建模和分析, 并可以形象地画出磁力线分布以及磁场强度的云图, 较为准确地给出各点数值^[3-5]。本文是基于 ANSYS 软件建立永磁体模型, 用来模拟霍尔传感器的工作环境, 通过在静态的磁场中采样霍尔传感器的不同旋转位置的磁感应强度, 将动态的磁场分析转换为静态的磁场分析。最后使用 WT10A 数字特斯拉计和电子油门踏板性能测试台来验证仿真分析的正确性。

1 电子油门踏板的工作原理

电子油门踏板安装霍尔芯片的个数可分为双路式和单路式, 与单路式相比, 双路式油门踏板的传感器采用冗余设计思想, 其设计原理是采用两个相同传感器以对称互补的方式安装在电子油门踏板中, 能有效提高产品的可靠性。

对于霍尔式双路电子油门踏板, 其磁场结构是踏板臂和霍尔传感器的重要连接枢纽, 它可以使踏板臂的旋转角度巧妙地转化为霍尔传感器的磁感应强度的变化量。其磁场单元主要由两块永磁体和屏蔽环构成, 永磁体能提供均匀的磁场环境, 屏蔽环使得外界磁场的磁感应强度绝大部分从外壳壁通过, 从而达到屏蔽的作用^[6]。

电子油门踏板的工作原理在于, 永磁体在踏板臂的带动下围绕传感器旋转, 作用于霍尔传感器的磁场分量随旋转的角度而改变, 传感器利用霍尔效应将受到的磁感应强度转化为电压信号输出, 最终将其传递给发动机控制器。发动机控制器根据电压信号大小, 计算出驾驶员对发动机的功率需求并将其转化为所需要的发动机扭矩^[7]。

对于霍尔式电子油门踏板的输出电压值是靠传感器敏感区域磁感应强度的大小体现的, 在相同的磁场下, 受到的 N 极

收稿日期:2016-06-27; 修回日期:2016-07-18。

基金项目:浙江省公益性技术应用研究计划(2015C31081)。

作者简介:徐源(1990-),男,重庆开县人,硕士研究生,主要从事汽车零部件检测,测试计量技术等方向的研究。

郭斌(1977-),男,山东日照人,副教授,主要从事汽车电子技术、自动化检测装置、精密检测技术等方向的研究。

磁感应强度越大, 则电压的输出值也越大, 反之受到 S 极磁感应强度越大, 则输出电压越小。所以在电子油门踏板的设计中, 磁感应强度随旋转角度的变化量线性度越高, 则电子油门踏板的线性度越好。

该磁场单元的两片方形永磁铁是采用枢轴对称的方式固定在屏蔽环内, 永磁铁的磁场方向一致, 传感器则是引脚朝外, 安装在两片磁铁之间。在工程应用中, 由于霍尔传感器模块面积太大, 不便做旋转运动, 采用磁场单元围绕传感器旋转的方式工作。运动是相对的, 为了便于分析, 假定永磁铁的位置固定, 让传感器绕着枢轴在磁场单元中旋转, 如图 1 所示。

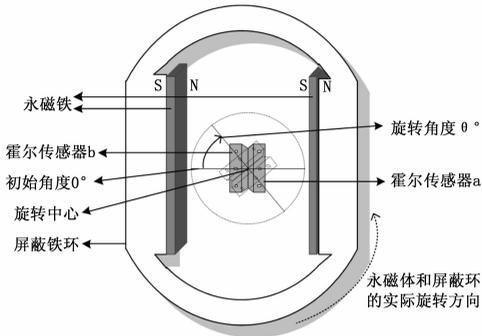


图 1 霍尔传感器与均匀磁场的相对旋转

由于霍尔传感器的敏感区域的移动轨迹与磁场的磁力线垂直, 因此可以通过二维磁场来仿真霍尔传感器所受磁场的影响。

为了验证仿真结果的正确性, 除了要采用 WT10A 数字特斯拉计对传感器实际受到的磁感应强度检定以外, 还需要评定传感器输出信号的同步度和线性度等指标。同步度来表示电子油门踏板的两路传感器输出信号的相关性, 其计算公式为:

$$T = \max \left\{ \frac{PPS1(\theta) \times \alpha - PPS2(\theta)}{V_{dd1}} \right\} \times 100\% \quad (1)$$

式中: T 为同步度; α 为同步系数, 取 0.5; $PPS1(\theta)$ 为传感器 a 在旋转角度为 θ 的实测电压值, V ; $PPS2(\theta)$ 为传感器 b 在旋转角度为 θ 的实测电压值, V ; V_{dd1} 为霍尔传感器 a 的供电电压, V ; V_{dd2} 为霍尔传感器 b 的供电电压, V 。同步度可反映出两个霍尔芯片的安装位置是否对称, 同步度越小说明电子油门踏板的生产工艺越高。传感器输出信号的线性度为:

$$L = \max \left\{ \left| \frac{PPS_i(\theta) - PPS_i(\theta_0)}{V_{ddi}} \times 100\% \right| \right\} (i = 1, 2) \quad (2)$$

其中 $i=1$ 表示选择传感器 a, $i=2$ 表示选择传感器 b; $PPS_i(\theta)$ 为传感器输出信号设计值, V ; $PPS_i(\theta)$ 为传感器输出信号实测值, V ; V_{ddi} 为传感器的供电电压, V 。

电子油门踏板理想的输出电压曲线与旋转角度成正比, 因此其输出信号的线性度数值越低, 则电子油门踏板的线性度越好, 传感器在磁场中的工作方式的可靠性越好。

2 有限元建模

利用有限元分析软件, 对于传感器的工作环境进行了模拟, 并对牌号为 REF_e165/170 永磁体进行建模, 并采用 PLANE53 (四边形 4 节点) 的磁单元和 PLANE53 (4 节点, 6 节点) 的铁环单元对磁场空间划分。

根据实物, 设置永磁铁和屏蔽环的仿真参数。永磁铁的牌号为 REF_e240/110, 其相对磁导率 $\mu_r = B_r / \mu_0 H_c$, 其中 B_r 为磁铁的剩磁 ($B_r = 1.14 \text{ T}$), μ_0 为真空磁导率 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$), H_c 为矫顽力 ($H_c = 850 \text{ kA/m}$), 求得永磁铁的相对磁导率为 $\mu_r = 1.06 \text{ T} \cdot \text{m/A}$ 。屏蔽环选用的是牌号为 DT3 的软

磁, 其磁导率为 $7.5 \text{ mT} \cdot \text{m/A}$, 其矫顽力为 10 A/m 。

最后对给定磁性参数和大小的磁系单元划分网格, 如图 2 所示。

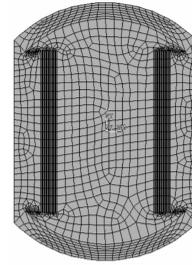


图 2 磁系单元所在空间的网格划分

在永磁场中, 由于其泊松方程和静电场的泊松方程完全相同, 则可以按照静电场中的泊松方程来进行解答^[8], 其求解方程如下:

$$\nabla \times \bar{v} \nabla A = -J_z + jkeA \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \times \frac{\partial(rA)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{z} \times \frac{\partial(rA)}{\partial z} \right) = -J_z + jkeA \quad (4)$$

在此仿真分析中, 要精确得到磁场位置的解析解, 就必须从给定的边界条件和初始条件求其数值解。

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_r + f(\Gamma) \phi \Big|_r = h(\Gamma) \quad (5)$$

式中, Γ 为诺依曼边界; n 为边界的外法线矢量; $f(\Gamma)$ 和 $h(\Gamma)$ 为一般函数^[9]。

3 仿真的结果及讨论

采用 INFIN9 单元来划分边界, 分别对 PLANE53 的磁单元和屏蔽铁圈单元划分区域并施加荷载, 利用磁矢量位法求解,

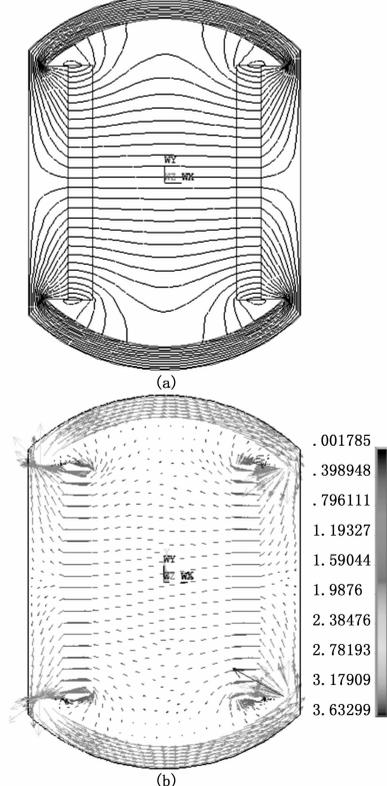


图 3 永磁体的仿真结果

得到电子油门踏板磁场的磁力线和磁感应强度，如图 4 所示。

假定永磁铁和屏蔽环的位置固定，磁感应强度 N 极为正，S 极为负，两个传感器绕着磁场轴心顺时针旋转。由图 4 看出，传感器所在位置的磁感应强度的最大变化范围 0.428 mT，其影响几乎忽略不计，可以将其看作均匀磁场。

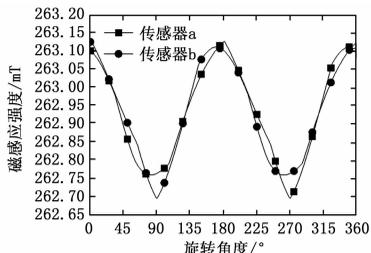


图 4 旋转角度与磁感应强度的关系

实际作用在传感器上的磁感应强度是传感器所在位置磁感应强度的分量，传感器 a 和传感器 b 平面的磁感应强度分量分别为 $B_1 = B\cos\theta$ 和 $B_2 = -B\cos\theta$ ($0^\circ \leq \theta < 360^\circ$)，其中 B 为传感器所在位置的磁感应强度，该分量与旋转角度的变化关系如图 5 所示。

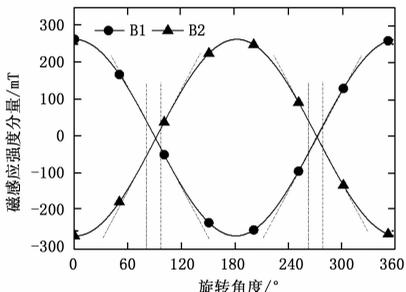


图 5 旋转角度与磁感应强度分量的关系

由上图中曲线可以看出，随着旋转角度的增大，两个传感器的变化趋势相反，传感器 a 的磁感应强度先增大后减小，传感器 b 的磁感应强度先减小后增大。为了满足传感器旋转角度与输出信号的线性关系，则两个传感器的线性区域必须在 $75 \sim 105^\circ$ 和 $255 \sim 285^\circ$ 范围内，此时两个传感器的初始安装角度分别为 75° 和 255° 。

4 实验验证

采用 WT10A 数字特斯拉计来测量传感器所在位置的磁感应强度，该仪器采用的是霍尔响应原理工作的，其分辨力为 0.1 mT，适用于静态磁场的磁感应强度检测。其对于传感器位置测量得到的磁感应强度为 45.1 mT，仿真磁感应为强度 45.18 mT，仿真误差为 0.08 mT，小于特斯拉计的分辨率。在仪表的测量精度范围内，磁场的仿真结果与测量结果基本一致。

在安装好带有传感器的电路板和磁铁后，需要对传感器校准。由图 4 的曲线看出，传感器的磁感应强度程周期变化，取传感器的相对旋转角度为 180° 、 220° 、 260° 的踏板进行校准。通过霍尔编程器校准软件，写入电子油门踏板的两个传感器的电压变化参数 0.55~2.1 V 和 1.1~4.2 V，读取其初始 AD 值和最大角度的 AD 值，将计算得到的原点值和灵敏度写入传感器。

霍尔传感器工作的磁感应强度有 4 种，分别是一 30~30 mT、-60~60 mT、-90~90 mT 和 -150~150 mT (设磁感应强度 N 极为正，S 极为负)，传感器实际受到的磁感应强度在传感器规定的 -60~60 mT 的变化范围内。根据测量的磁感应强度大小，写入工作参数为 ± 60 mT 的磁场变化范围，以满

足传感器实际工作的磁场变化范围。校准时发现在 180° 的位置处，传感器的原点值和灵敏度均超出范围。经过测量发现，在此处位置传感器受到的磁感应强度超过 200 mT，超出了传感器的工作范围。

然后再分别对校准过的、位置为 220° 和 260° 的电子油门踏板进行性能测试，本文采用电子油门踏板的旋转角度为 $0^\circ \sim 18^\circ$ ，在忽略摩擦力、传感器误差和磁场误差的情况下，经过校准后踏板的电压-角度曲线如图 6 所示，电子油门踏下的角度是通过双路霍尔传感器的输出电压体现的，理论上该输出电压应该和旋转角度成线性关系^[10]。

在图 6 中，输出特性曲线中 A1 和 A2 是 260° 安装位置的传感器输出曲线，输出特性曲线中 B1 和 B2 是 220° 安装位置的传感器输出曲线。两种位置的电子油门踏板经过性能测量，其部分测试数据如表 1 所示。对于前者，其线性度和同步度数值超标，不满足要求。而对于后者的测试曲线，各项指标符合《汽车电子油门踏板总成技术条件》的技术指标。

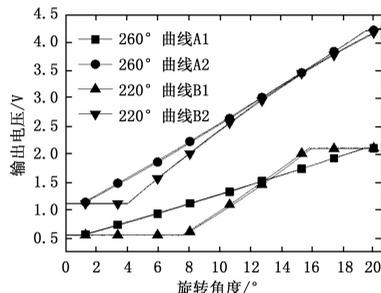


图 6 霍尔传感器实验输出曲线的对比图

表 1 电压-角度输出特性部分测试数据

旋转角度	曲线	传感器 a	传感器 b	传感器 a	传感器 b
		正成/(%)	正成/(%)	回成/(%)	回成/(%)
260°	线性度	1.45	1.15	0.81	0.71
	同步度	0.1		0.12	
220°	线性度	6.44	6.6	6.32	6.82
	同步度	8.15		8.32	

5 结论

在特斯拉计测量的测量误差范围内，其测量磁感应强度的变化范围与传感器的仿真结果一致。并对不同磁钢位置的电子油门踏板进行校准和检测，通过对比发现，只有在线性角度区间内，其校准不会出现异常状态，电子油门踏板检测的结果亦符合相关标准。由于传感器输出的电信号正比于其磁感应强度，所以传感器在工作时受到的磁感应强度与旋转角度是线性的关系。通过上述实验的分析得到，电子油门踏板传感器受到的磁感应强度的变化和仿真的数据基本一致，仿真模型基本正确，传感器在磁场中的工作方式满足其输出电压和旋转角度的线性关系。

参考文献:

[1] 叶飞, 马明星. 基于 HALL 元件的电子油门踏板电路的设计开发 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22 (11): 4-7.
 [2] 钱高法. 电子油门踏板总成: CN, CN 202208251 U [P]. 2012.
 [3] Li X, Xia L, Chen W, et al. Finite element analysis of gradient z-coil induced eddy currents in a permanent MRI magnet [J]. Journal of Magnetic Resonance, 2011, 208 (1): 148-155.

表 6 GPS 电文时效性评估算例

星号	开始时间	结束时间	理论电文个数	电文识别个数	电文识别率	电文校验个数	电文有效率	星历接收个数	星历超时个数	历书接收个数	历书超时个数
17	4323.9496	24627.9466	3385	3384	100	3384	100	677	0	253	15
23	-284.0344	10113.9256	1734	1725	99.5	1725	100	344	0	261	14
6	5781.9586	24627.9156	3142	2987	95.1	2987	100	569	0	257	15
15	20127.9716	24627.9326	751	662	88.1	662	100	127	0	261	16
19	-140.0414	9933.9616	1680	1476	87.9	1476	100	283	0	257	17
7	-284.0494	21045.9646	3556	3100	87.2	3100	100	582	0	261	16
9	1287.9676	19209.9776	2988	2597	86.9	2597	100	504	0	262	16
28	-284.0494	24627.9626	4153	3575	86.1	3575	100	671	0	259	14
5	10047.9836	24627.9466	2431	1863	76.6	1863	100	325	0	265	15
3	-284.0654	10359.9406	1775	1350	76.1	1350	100	254	0	261	14
30	-284.0494	24627.9326	4153	3155	76	3155	100	596	0	263	12
13	13965.9766	24627.9326	1778	1293	72.7	1293	100	250	0	264	13
27	-284.0344	4551.9506	807	561	69.5	561	100	89	0	256	13
2	12435.9726	24627.9156	2033	1336	65.7	1336	100	243	0	258	12
11	-284.0494	16521.9556	2802	1367	48.8	1367	100	248	0	257	15
1	-284.0494	17289.9746	2930	1396	47.6	1396	100	250	0	260	14
4	-284.0344	10527.9506	1803	740	41	740	100	121	0	265	14
16	-284.0184	1215.9786	251	74	29.5	74	100	6	0	261	17
32	-272.0654	2985.9456	544	154	28.3	154	100	28	0	258	16

卫星。2 号卫星一直下传 61440s 的历书数据; 5 号卫星数据分两部分, 在 14649.94 s 到 17649.96 s 一直下传 61440 s 的历书数据, 在 18399.96 s 到 24399.95 s 一直下传 147456 s 的数据; 9 号卫星数据从 2649.956 s 到 19149.98 s 一直下传 61440 s 的历书数据, 如表 7 所示。

表 7 17 号卫星过期历书来源

星号	开始时间	结束时间	历书时间(GPS 秒)	数量	过期
2	17649.96	24399.93	61440	10	是
5	14649.94	16149.93	61440	3	否
5	16899.95	17649.96	61440	2	是
5	18399.96	24399.95	147456	9	否
9	2649.956	14649.92	61440	17	否
9	17649.95	19149.98	61440	3	是

4 结束语

本文从导航电文的特性出发, 采用质量树的方法, 从电文完整性、电文一致性、电文正确性以及电文时效性等 4 个方面, 建立了 GPS 电文质量模型, 每个质量特性均建立了专属子特性, 以及量子特性的数据指标; 研制了 GPS 电文质量评估软件, 采用实测数据对模型和软件进行了验证, 结果表明, 该模型能够发现 GPS 电文的异常数据, 如数据不完整、

数据不一致、数据不正确、数据超时等, 其结果可用于改进电文参数解算算法, 提高电文参数解算软件的可靠性。

参考文献:

- [1] Hu J, Rao A S, Zhang L, et al. A GLONASS Navigation Data Verification Algorithm Under High Bit-error Rates [A]. China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015 Proceedings: Volume I [C]. 2015: 553-562.
- [2] 白 锋, 徐卡. GNSS QC 用于 GNSS 数据质量分析的研究 [J]. 测绘通报, 2010, (6): 72-46.
- [3] 余文坤, 戴吾蛟, 杨 哲. 基于 TEQC 的 GNSS 数据质量分析及预处理软件的设计与实现 [J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30 (5): 81-85.
- [4] 刘荟萃, 唐歌实, 崔红正, 等. 多模 GNSS 数据质量检测方法与软件研发 [J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37 (1): 5-8.
- [5] 连 帅, 闫利军, 孙 科. 北斗 2 代卫星导航电文纠错校验设计与仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (10): 2344-2347.
- [6] 李天阳, 侯跃鹏, 汪文琳, 等. 一种通用的数据质量评估控制元数据模型 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (9): 146-150.
- [7] 杨青云, 赵培英, 杨冬青, 等. 数据质量评估方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 9 (4): 3-4.
- [8] 杨艳梅, 王泽根. 空间信息服务质量评价 [J]. 测绘科学, 2011, 36 (4): 139-141.
- [9] 叶 飞, 马明星. 基于 HALL 元件的电子油门踏板电路的设计开发 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22 (11): 4-7.
- [10] 卢东方, 王毓华, 何平波, 等. 基于 ANSYS 的履带式永磁磁选机磁场模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2014 (8): 2188-2194.
- [11] ANSYS 12.0 电磁学有限元分析从入门到精通 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [12] 柴姗姗, 林 敏, 罗 哉, 等. 电子油门踏板综合测试系统的设计 [J]. 汽车技术, 2013 (1): 48-53.

(上接第 280 页)

- [4] Takayama T, Kamitani A, Tanaka A. Numerical simulation of permanent magnet method; Influence of experimental conditions on accuracy of j C-distribution [J]. Physica C: Superconductivity, 2010, 470 (20): 1354-1357.
- [5] Haniotis A, Kladas A. Permanent magnet machine operation with static converter: modeling and experimental verification of space harmonics effects [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003, 106 (1): 286-291.
- [6] liupeieffort. 《实用电路设计》第二版出版 [J]. 高保真音响, 2009