

摘要：针对特殊应用环境的霍尔电流传感器叠片铁芯磁路结构对传感器基本性能的影响进行分析。通过电磁场的基本理论，应用安培环路定律以及基尔霍夫磁路定律，推导出影响磁路性能的方程。结合 Maxwell 仿真工具，对于现有磁路结构进行仿真分析。提出环路截面不均匀、叠片间隙等影响磁路性能的因素，通过对其进行优化设计，改善各个影响因素。将优化后的磁路应用到传感器样机，使传感器的精度提升至 0.04%，零点性能更加稳定。

关键词：叠片铁芯；磁路优化；Maxwell 仿真；霍尔传感器

中图分类号：TP212.1

文献标识码：A

文章编号：1006-883X(2018)05-0007-06

收稿日期：2018-03-26

霍尔传感器磁路结构仿真分析与优化

朱胜平 徐东海 马华超 任浩 周俊

宁波中车时代传感技术有限公司，浙江宁波 315021

一、引言

随着信息化时代的发展，作为前端信号检测的关键器件——传感器凸显的作用越来越明显。霍尔电流传感器就是其中一种，广泛应用于轨道交通、工业变频、光伏及汽车等行业^[1-2]。

霍尔电流传感器可分为磁路、敏感元件及电路三个部分。此前，对于电路设计、磁路设计以及霍尔敏

感元件的应用多有研究，其中电路设计以及霍尔应用部分研究较为深入，而磁路部分则多以规则等截面磁路为研究对象，通过磁电等效的方式对磁路进行简化计算，对于不均匀截面的磁路结构未能深入计算分析^[3-4]。

本文以一款方形母排穿心孔的闭环霍尔电流传感器磁路结构作为研究对象，分析不均匀磁路结构的磁场分布及影响传感器性能的关键要素，从而进行改善和优化，提升传感器的性能。

二、传感器原理及磁路结构

1、传感器的工作原理

闭环霍尔电流传感器通过副边线圈的电流对原边电流的反馈跟随，在磁路中两者产生的磁场相抵消后使得气隙处的霍尔器件（HALL）始终处于零磁通的状态。

图 1 所示为传感器工作原理图，当原边电流在磁路中产生磁场时，副边线圈会产生对应大小的电流使得磁路中产生相反方向的磁场，并与原边电流产生的磁场相抵消，使气隙处的磁场处于零磁通状态。原、副边线圈匝数已知时，通过副边线圈测量得到的电流大小就可以计算出原边电流大小^[5-6]。

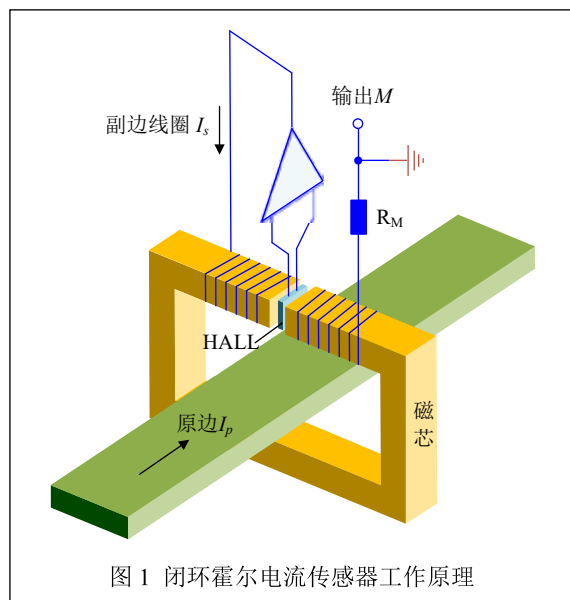


图 1 闭环霍尔电流传感器工作原理

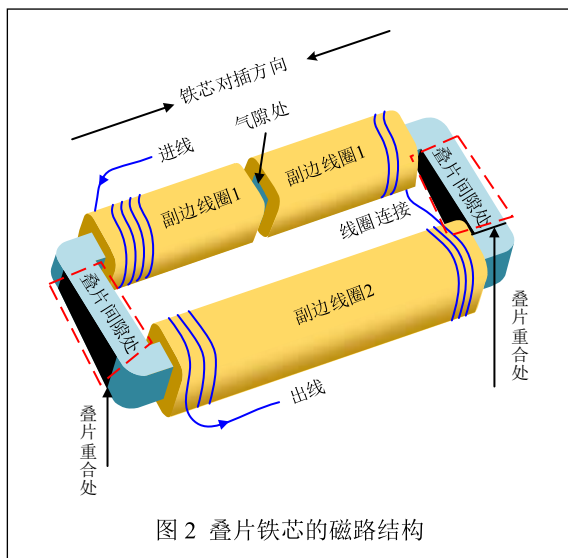


图2 叠片铁芯的磁路结构

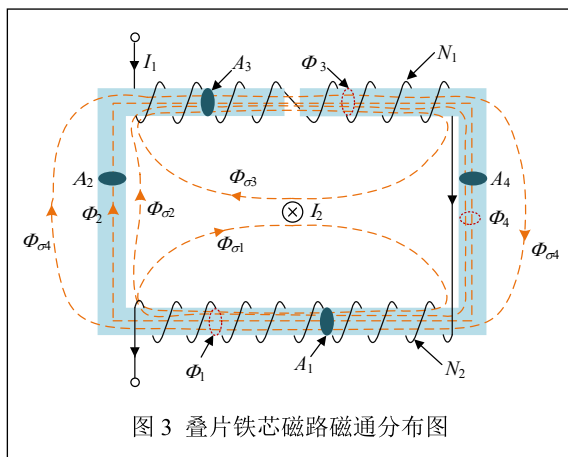


图3 叠片铁芯磁路磁通分布图

2、叠片铁芯的磁路结构

传感器的现场应用环境是复杂多样的，包括安装接口以及原边电流的载体铜母排尺寸形状也各不相同。扁平状铜母排是现场应用中较为常见的一种，故而传感器的母排穿心孔设计成扁平状截面。同时为了遵循传感器小体积设计原则，整个磁路设计成扁平矩形结构，从而减小传感器整体的体积。

由于矩形磁路的线圈整体绕制较为复杂，故而采用分体式线圈磁路结构。即先绕制平直线圈，再将叠片铁芯进行对插后组装成磁路结构。图2所示为传感器叠片铁芯磁路结构示意图。单片的C型铁芯分别从两侧依次对插到副边线圈1和副边线圈2中形成传感器的磁路。副边线圈1中间为气隙处，气隙两侧为不

重叠铁芯，副边线圈两侧为叠片铁芯交叉重叠处，磁路另外两边的铁芯因一侧为单组另一侧为两组交叉而形成叠片间隙。

三、磁路分析计算

1、叠片铁芯的磁场计算

若电路中的两点间存在电位差，则这两点间可能产生电流。同样，在磁路中两点间存在磁位差，则这两点间可能产生磁通。可利用类似于电路的电位分析法对磁路进行分析，从而了解漏磁的分布^[7]。

如图3所示为叠片铁芯磁路中的磁通分布示意图。

由于副边线圈集中绕制在磁路的上下两边，线圈产生的磁通被磁芯短路，磁势落在周围空气，漏磁主要集中在两端，分别是线圈两端之间的漏磁 $\Phi_{\sigma1}$ 、 $\Phi_{\sigma3}$ 以及两线圈之间的漏磁 $\Phi_{\sigma2}$ 等。同时，因磁路左右两侧的叠片铁芯之间存在着间隙，故而也会产生漏磁 $\Phi_{\sigma4}$ 。铁芯的截面分别是 A_1 、 A_2 、 A_3 以及 A_4 ，铁芯内部经过的磁通分别是 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 。副边线圈电流大小为 I_1 ，上边线圈匝数为 N_1 ，下边线圈匝数为 N_2 ，原边电流大小为 I_2 。

根据磁路的基尔霍夫定律，磁路中的任意节点的磁通之和等于零，有：

$$\sum \Phi = 0 \quad (1)$$

于是有：

$$\begin{cases} \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_{\sigma1} - \Phi_{\sigma2} - \Phi_{\sigma4} = 0 \\ \Phi_2 + \Phi_{\sigma2} + \Phi_{\sigma3} + \Phi_{\sigma4} - \Phi_3 = 0 \\ \Phi_3 - \Phi_4 - \Phi_{\sigma3} - \Phi_{\sigma4} = 0 \\ \Phi_4 + \Phi_{\sigma1} + \Phi_{\sigma4} - \Phi_1 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据安培环路定律，在电流产生的磁场中，磁场强度 H 沿着任意封闭的曲线进行积分所得到的值等于此封闭的曲线中包围的所有电流之和，即：

$$\oint H dl = \sum I \quad (3)$$

于是有：

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 (l_1 - g) + H_4 l_2 + H_0 g = N_1 I_1 + N_2 I_1 - I_2 \quad (4)$$

其中， H_1 、 H_2 、 H_3 、 H_4 分别为磁链上磁通 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 、 Φ_4 对应的磁场强度；

H_0 —气隙处磁场强度；

l_1 、 l_2 —矩形磁路的长、宽尺寸；

g —气隙大小。

根据磁通和磁场强度之间的关系，有：

$$\begin{cases} H_1 = \frac{\Phi_1}{\mu_r A_1} \\ H_2 = \frac{\Phi_2}{\mu_r A_2} \\ H_3 = \frac{\Phi_3}{\mu_r A_3} \\ H_4 = \frac{\Phi_4}{\mu_r A_4} \\ H_0 = \frac{\Phi_3}{\mu_0 A_3} \end{cases} \quad (5)$$

其中， μ_r —磁芯中的磁导率；

μ_0 —气隙处的磁导率。

联立(2)、(4)、(5)可得气隙处的磁感应强度为：

$$B = \frac{\Phi_3}{A_3} = \frac{a\mu_0\Phi_\sigma}{b\mu_0 + c\mu_r} \quad (6)$$

其中， a —常系数；

b 、 c —和磁路截面面积相关的系数；

Φ_σ —等效漏磁通。

由式(6)可见，传感器磁路气隙中的磁感应强度与磁路叠片间隙引起的漏磁、磁路各个磁链的截面积有关，下面结合 Maxwell 仿真软件针对磁路进行仿真分析。

2、叠片铁芯的磁场仿真

Ansoft Maxwell 是在低频电磁场领域中著名的有限元软件之一，广泛应用在各个工程电磁领域^[8]。结合 Maxwell 仿真软件，对现有模型进行仿真分析，模型创建后如图 4 所示。

铜母排上施加原边电流激励，大小从 0A 到 1000A，以 100A 线性递增。线圈 1 和线圈 2 上施加副边电流激励，原副边之间的安匝比相等，对于磁场中产生的磁感应强度方向相反，对模型进行静电磁场求解，得到如图 5 的磁场磁感应强度分布图。

图 5 中所示为原边电流 1000A 时磁路中的磁感应强度分布图，由图中可以看出，气隙处的磁感应强度较小。而从理论上来说，当气隙的磁感应强度为零时，副边线圈电流才能精确地反应原边电流的大小，故而

需考察气隙处的磁感应强度。取气隙中间点作为研究对象，提取仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可知，气隙处的磁感应强度随着电流的增大而增加。可见，叠片对插磁路中由于漏磁、截面积不均匀等因素的影响，造成当原副边安匝比相等，产生磁通方向相反时，气隙中还能产生磁感应强度，不能满足零磁通的要求，从而影响产品的测量精度等基本性能。

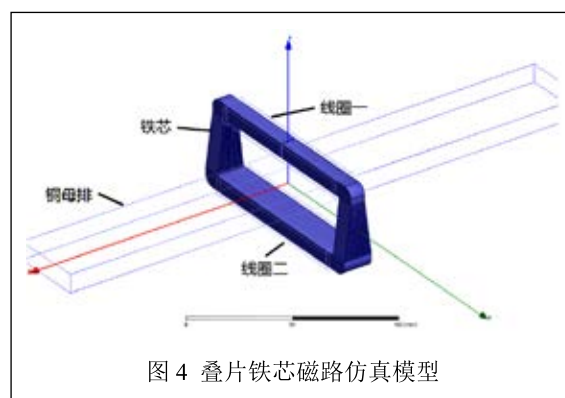


图 4 叠片铁芯磁路仿真模型

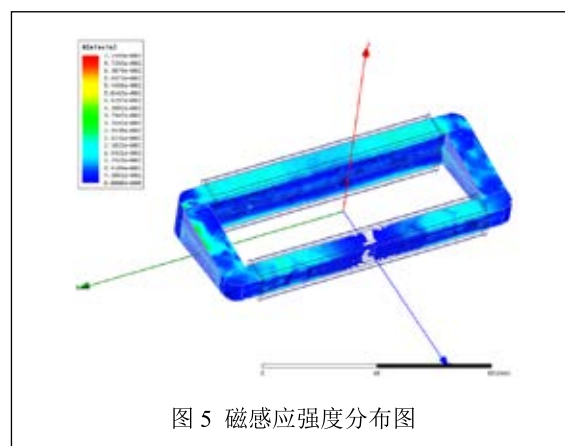


图 5 磁感应强度分布图

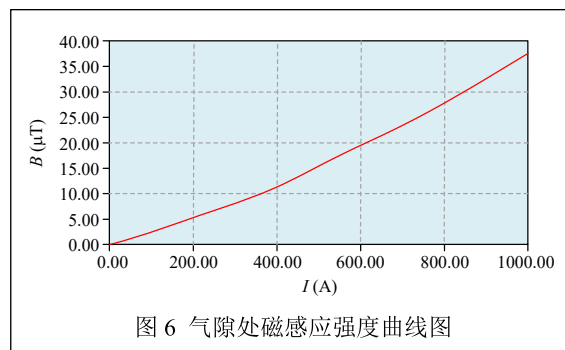
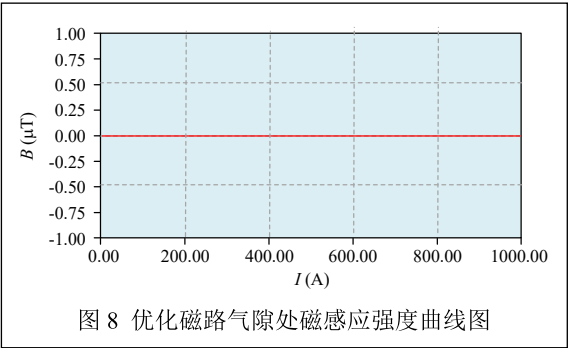
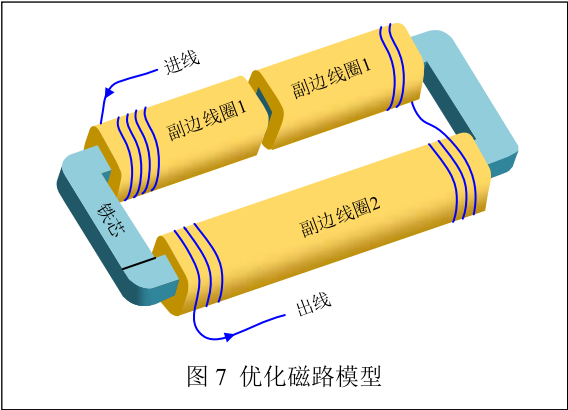


图 6 气隙处磁感应强度曲线图



3、磁路模型优化

由上述分析可知，影响磁路的主要因素有磁路的铁芯叠片气隙大小、磁路的横截面积是否均匀等。基于此考虑，结合现有的生产制造能力，对原有的磁路结构进行优化设计，减小叠片间的气隙影响，同时使得环路上的截面积均匀。

图 7 所示为优化后的磁路模型图。由于原先的 C 型铁芯对插后所产生的中间叠片间隙以及截面积不均匀，故而为使铁芯能够紧密贴合，采取 L 型和 C 型铁芯进行对插的结构方案，层间交叉叠片，从而使得整体铁芯磁路平整，层间紧密贴合，避免产生叠片间隙，同时也使得优化后的磁路各个截面积均匀分布。

采用 Maxwell 对优化后的磁路模型进行仿真分析，施加的原副边电流激励和原仿真模型的激励相同。取气隙处相同点作为研究对象，提取仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出，气隙处的磁感应强度基本稳定在零附近，说明通过磁路的结构优化设计，来

改善原先磁路结构存在的不足之处，利于产品性能的提升。

四、传感器样机验证

为了验证优化后的磁路对产品性能的提升，分别对传感器样机以及安装优化结构磁路后的传感器样机进行测试，收集数据分析基本误差、线性度等基本性能，从而判断磁路结构优化的实际状态。

- 样机的基本参数：
- 额定测量电流：1000A；
- 测量范围：0A~±2000A；
- 额定测量输出：200mA；
- 精度：<±0.5%；
- 线性度误差：<0.1%。

将传感器原边输入电流从 0A 到 1000A，以 200A 为一个测试点记录输出，表 1 为原有传感器经过零点调试之后的数据，表 2 为装配后无需调试直接测试的数据。从表中可以看出，结构优化后的精度 σ 由 0.107% 提升至 0.040% 以上，而零点输出稳定性、线性度等基本性能也均得到提升，同时减少了零点调试的工序。

表 1 原有传感器基本性能测试数据

输出电流（mA）							
样本	行程	原边输入电流（A）					
		0	200	400	600	800	1000
1	上	-0.0468	39.8768	79.8554	119.8203	159.7800	199.7299
	下	-0.0191	39.9336	79.8905	119.8361	159.7895	199.7275
2	上	-0.0827	39.8416	79.8003	119.7506	159.6962	199.6320
	下	-0.0512	39.8820	79.8448	119.7825	159.7162	199.6326
3	上	-0.0719	39.8686	79.8343	119.7981	159.7582	199.6991
	下	-0.0483	39.8989	79.8556	119.8193	159.7791	199.7010
4	上	0.0172	39.9262	79.9170	119.9016	159.8757	199.7852
	下	0.0386	39.9820	79.9516	119.9196	159.8562	199.7923
5	上	-0.0956	39.9528	79.9806	120.0272	160.0492	200.0816
	下	-0.1311	39.9218	79.9466	119.9866	160.0265	200.0817
平均值 $\overline{y_i}$		-0.049	39.908	79.888	119.864	159.833	199.786
理论值 y_i		0.000	40.000	80.000	120.000	160.000	200.000
* 精度 $\sigma_i(\%)$		0.025	0.046	0.056	0.068	0.084	0.107
* 线性度 $\delta_i(\%)$		0.000	0.005	0.001	0.006	0.007	0.000

表2 改造后传感器样机基本性能测试数据

输出电流 (mA)							
样本	行程	原边输入电流 (A)					
		0	200	400	600	800	1000
1	上	0.0491	40.0748	80.0638	120.0501	160.0736	200.0923
	下	0.0632	40.0828	80.0841	120.0747	160.0925	200.0825
2	上	0.0363	40.0540	80.0432	120.0305	160.0648	200.0718
	下	0.0540	40.0741	80.0612	120.0500	160.0615	200.0520
3	上	0.0313	40.0430	80.0348	120.0224	160.0430	200.0415
	下	0.0511	40.0506	80.0519	120.0419	160.0509	200.0603
4	上	0.0773	40.1116	80.1020	120.0906	160.1130	200.1100
	下	0.1400	40.1220	80.1245	120.1026	160.1234	200.1127
5	上	0.0620	40.0708	80.0739	120.0626	160.0737	200.0847
	下	0.0772	40.0821	80.0949	120.0749	160.1030	200.0941
平均值 $\overline{y'_i}$		0.064	40.077	80.073	120.060	160.080	200.080
理论值 y_i		0.000	40.000	80.000	120.000	160.000	200.000
* 精度 $\sigma_i(\%)$		0.032	0.038	0.037	0.030	0.040	0.040
* 线性度 $\delta_i(\%)$		0.000	0.005	0.001	0.007	0.001	0.000

$$\text{* 精度: } \sigma = \max\{\sigma_i\} = \max\left\{\frac{|\overline{y'_i} - y_i|}{Y_{FS}} \times 100\%\right\} \quad (7)$$

其中, $\overline{y'_i}$ —传感器在第 i 个测量点上的实际输出算术平均值;

y_i —传感器在第 i 个测量点上的输出理论值;

Y_{FS} —满量程理论输出值。

$$\text{* 线性度: } \delta_L = \max\{\delta_i\} = \max\left\{\frac{|\overline{y'_i} - y''_i|}{Y_{FS}} \times 100\%\right\} \quad (8)$$

其中, $\overline{y'_i}$ —传感器在第 i 个测量点上的实际输出算术平均值;

y''_i —拟合直线上第 i 个点的值;

Y_{FS} —满量程理论输出值。

拟合直线采用端基法, 其直线方程为:

$$y'' = a + bx \quad (9)$$

式中, b —端基直线斜率, $b = \frac{\overline{y_{\max}} - \overline{y_0}}{x_{\max} - x_0}$;

a —端基直线截距, $a = \overline{y_0} - bx_0$;

$\overline{y_{\max}}$ —传感器测量上限实际输出信号的平均值;

$\overline{y_0}$ —被测量为零时传感器的实际输出信号的平均值;

$x_{\max}$, x_0 —传感器测量上限输入值和零输入值。

经过计算, 表1拟合直线方程为 $y'' = -0.049 + 0.199835x$, 表2拟合直线方程为 $y'' = 0.064 + 0.200016x$ 。

五、结论

本文主要通过对现有叠片C型对插铁芯的磁路结构进行理论计算和仿真分析, 提出了现有磁路的不足以及影响产品基本性能的关键因素, 在此条件下进行结构优化, 采用L+C型叠片铁芯, 从而改善磁路, 提升产品基本性能。主要包括如下:

(1) 优化磁路结构, 避免原先磁路中因叠片结构造成的两侧间隙, 使得铁芯层与层之间叠片紧密, 减少磁路中的漏磁通的影响;

(2) 采用L+C型的叠片铁芯结构, 使得铁芯叠片之后的磁路截面积均匀, 同时也减小了整个磁路的体积, 使得产品性能稳定的同时实现小体积;

(3) 通过优化磁路结构, 改善产品的基本性能, 精度从0.107%提升至0.040%以上, 同时使得产品零点稳定, 批量生产一致性好, 缩减了产品调试过程中的大量工时, 利于在产品生产制造的同时降低生产成本, 实现降本增效。

参考文献

- [1] 闫四玉, 张新涛. 光伏逆变器中HALL电流传感器磁场仿真过程研究与应用[J]. 电子元件与应用, 2011, 13(12): 8-10.
- [2] 刘笋, 张军, 徐海宁等. 汽车检测用钳形电流传感器的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2009, (8): 14-16.
- [3] 米哲涛, 曹雷. 霍尔元件在电流传感器中的应用[J]. 机车电传动, 2011, (1): 32-35.

- [4] 李傲梅, 王林森. 零磁通霍尔电流传感器磁路仿真 [J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(10): 1200-1202.
- [5] 郑剑斌. 霍尔传感器磁系统优化设计 [D]. 福州: 福州大学, 2014.
- [6] 王进. 基于双环磁路结构的高精度霍尔电流传感器设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 赵修科. 开关电源中的磁性元件 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2014.
- [8] 赵博, 张洪亮等. Ansoft 12 在工程磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

Simulation Analysis and Optimization of Magnetic Circuit for Hall Sensors

ZHU Sheng-ping, XU Dong-hai, MA Hua-chao, REN Hao, ZHOU Jun

(Ningbo CRRC Times Transducer Technique Co., Ltd., Ningbo 315021, China)

Abstract: The influence of laminated-core magnetic circuit structure of Hall current sensors applied in special environment on their fundamental performance is analyzed in this paper. The equation affecting the performance of magnetic circuits is deduced by applying Ampere circuit law and Kirchhoff magnetic law based on the basic theory of electromagnetic field. The existing magnetic circuit is simulated with Maxwell. The factors affecting the performance of magnetic circuit, such as uneven

cross section of magnetic flux linkage and laminated core gap, are pointed out and optimized so as to improve the performance. The optimized magnetic circuit is applied to the sensor prototypes, and the precision of the sensors is increased to 0.04%, and the zero performance is more stable.

Key words: laminated magnetic core; magnetic circuit optimization; Maxwell simulation; Hall sensor

作者简介

朱胜平: 宁波中车时代传感技术有限公司, 工程硕士, 中级工程师, 主要从事电流电压传感器结构设计研发工作。

通讯地址: 浙江省宁波市江北区振甬路 138 号

邮编: 315000

邮箱: 103597660@qq.com

徐东海: 宁波中车时代传感技术有限公司, 中级工程师, 从事电流电压传感器电路设计研发工作。

马华超: 宁波中车时代传感技术有限公司, 助理工程师, 主要从事电流电压传感器结构设计研发工作。

任浩: 宁波中车时代传感技术有限公司, 中级工程师, 从事电流电压传感器电路设计研发工作。

周俊: 宁波中车时代传感技术有限公司, 中级工程师, 从事电流电压传感器电路设计研发工作。