

文章编号: 2095-4980(2016)04-0591-05

## 低频高性能屏蔽装置的设计

李巧燕<sup>1</sup>, 王保国<sup>1</sup>, 马通边<sup>1</sup>, 宫 剑<sup>1</sup>, 赵亚丽<sup>1,2</sup>

(1.中国电子科技集团公司 第 33 研究所 电磁防护材料及技术山西省重点实验室, 山西 太原 030006;  
2.山西大学 化学化工学院, 山西 太原 030006)

**摘 要:** 为了合理评估磁屏蔽体对低频磁场的屏蔽效果, 设计了一种磁屏蔽体并提出一种屏蔽方案, 计算静磁场与交变磁场共同影响下, 其屏蔽装置对其屏蔽性能的影响, 并通过实验来论证该屏蔽体和设计方案在实践中的应用可行性。实验结果表明, 设计的电磁屏蔽室, 室内静磁场  $B \leq 200$  nT, 50 Hz 交流磁场干扰  $< 0.10$   $\mu$ T; 大于 100 kHz 交流磁场屏蔽系数  $S \geq 1\ 000$ ; 满足磁传感器系统等相关仪器的实用要求, 为实践屏蔽室屏蔽验收提供理论依据。

**关键词:** 磁屏蔽; 屏蔽效能; 多层屏蔽

中图分类号: TNO11

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201604.0591

## Design of shielding device with low-frequency and high-performance

LI Qiaoyan<sup>1</sup>, WANG Baoguo<sup>1</sup>, MA Tongbian<sup>1</sup>, GONG Jian<sup>1</sup>, ZHAO Yali<sup>1,2</sup>

(1.Electromagnetic Protection Materials and Technology Key Laboratory of Shanxi Province, No.33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi 030006, China; 2.Department of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi University, Taiyuan Shanxi 030006, China)

**Abstract:** A magnetic shielding room is designed in order to evaluate the magnetic shielding effect on low-frequency magnetic fields. A kind of shielding scheme is proposed, in which the shielding effect is studied under the joint influence of static magnetic field and alternating magnetic field. The experimental results show that for the proposed electromagnetic shielding room, indoor static magnetic field  $B \leq 200$  nT, 50 Hz AC magnetic interference  $< 0.10$   $\mu$ T, greater than 100 kHz AC magnetic shielding factor  $S \geq 1\ 000$ , which meets the practical requirements of the magnetic sensor system. This work can provide a necessary theoretical basis for the shielding effect evaluation of shielding room.

**Key words:** magnetic shielding; shielding effect; multi-layer shielding

随着科研创新与高科技实验的广泛开展, 低频设备在通信、电子、电力工业等方面应用越来越广泛。电磁屏蔽作为减少辐射干扰的有效措施越来越重要。通常的电磁屏蔽设计考虑的频率范围在 10 kHz 以上频段, 但是在磁传感器系统、透射电镜、光学陀螺等特殊要求下, 要求频率下限为 50 Hz, 有时甚至为 0.01 Hz 极低频。低频磁场干扰是一种很难屏蔽的干扰<sup>[1-4]</sup>。目前, 国内外对低频磁场屏蔽理论及屏蔽材料的研究已有较多成果, 但对屏蔽计算相对比较繁琐, 且对静磁场屏蔽系数的设计研究还很少报道。为了合理评估屏蔽体对低频磁场的屏蔽效果, 为低频磁屏蔽结构设计提供合理的理论依据, 本文主要设计一套磁屏蔽体并研究了对静磁与交变磁场的理论屏蔽设计问题, 分别讨论了不同磁场干扰的屏蔽效能, 并与理论计算值进行了对比, 同时通过对关键技术控制实现了较好的低频磁场屏蔽效能。

### 1 磁屏蔽理论设计

#### 1.1 磁屏蔽原理

铁磁性屏蔽体对静磁场的屏蔽是利用铁磁性屏蔽壳体本身的磁阻小而对磁路进行分流来实现的。静磁屏蔽效果度量主要通过屏蔽效能或屏蔽系数来反映。

收稿日期: 2015-05-07; 修回日期: 2015-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(面上项目, 重点项目, 重大项目)

为抵消静磁场而使一个区域得以屏蔽,可用高磁导率的材料包围该区域, 该材料形成一个低磁阻的通路使磁场优先通过, 磁屏蔽原理如图 1 所示。

根据磁路定理, 可以把高导磁材料制成的腔体壁与其所包围的空气看成是并联磁路或磁旁路, 如图 2 所示。

由图 2 可知, 屏蔽区某点在不加屏蔽时的磁场强度为  $H_0$ , 加上屏蔽后的磁场强度为  $H_1$ , 则有: 屏蔽系数  $S = \frac{H_0}{H_1}$ ,

屏蔽效能  $SE = 20 \log \frac{H_0}{H_1}$ 。由于屏蔽效能与磁源的性质, 屏蔽体

的材料、形状、尺寸以及屏蔽壳体是否封闭等因素密切相关, 一般情况下, 只能得到屏蔽效能的量级。本文建立了不同磁源下磁屏蔽体的静磁屏蔽效能计算模型, 以此实现对一般情况的估计, 指导工程实践。

1.2 低频磁屏蔽系数的计算分析

1.2.1 对于静磁场的屏蔽

对于磁屏蔽层的屏蔽系数, 以单层球形结构为例, 单层球壳屏蔽计算如式(1)所示, 磁屏蔽系数  $S$  与材料的磁导率  $\mu$ 、材料的厚度  $t$  成正比, 与屏蔽腔体内体积成反比。

$$S = \frac{2\mu t}{V} + 1 \tag{1}$$

式中:  $S$  为磁屏蔽室的屏蔽系数;  $\mu$  为磁屏蔽材料的磁导率;  $t$  为磁屏蔽材料的厚度;  $V$  为磁屏蔽室的体积。

当屏蔽球体的体积与材料确定后, 材料厚度  $t$  越大, 磁屏蔽系数越高。当屏蔽系数要求较高时, 有效的方法是采取多层屏蔽结构。对于一个半径为  $r$ , 壁厚为  $t$ , 相对磁导率为  $\mu_r$  的球形壳, 如果  $t > 3r/2\mu$ , 最好采用多层的同心层, 其间以空气或其他低磁导率材料相隔。

单层屏蔽效果如式(1)所示, 对于多层屏蔽, 理论上的屏蔽效果见式(2):

$$S_m = S_1 \times S_2 \left[ 1 - \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^3 \right] \times S_3 \left[ 1 - \left( \frac{r_2}{r_3} \right)^3 \right] \times \dots \times S_n \left[ 1 - \left( \frac{r_{n-1}}{r_n} \right)^3 \right] \tag{2}$$

式中:  $S_m$  为多层屏蔽系数;  $S_n$  为第  $n$  层的屏蔽系数;  $r_n$  为第  $n$  屏蔽层的半径。

以上理论计算适用于球形磁屏蔽系统, 而在实际建造中大都采用立方型屏蔽室。立方型结构的屏蔽室便于制造, 实用性强。将立方型结构等效为球形结构, 则设  $2L$  是立方体的边长,  $L$  可以代替球形屏蔽半径  $r$ , 更好的是, 替代某个  $r$  值使得这一立方体和球体具有相同的体积, 即  $8L^3 = 4\pi r^3 / 3$  或  $r = 1.24L$ 。一个边长为  $2L$  的单层立方型屏蔽室, 如果  $\mu_r \gg 1$  时, 其屏蔽系数可概略地表达为:

$$S \approx \frac{2}{3} \times \frac{\mu_r t}{1.24L} \tag{3}$$

式中:  $\mu_r$  为材料的相对磁导率;  $L$  为磁屏蔽室的半长, 即体对角线的一半, 单位为 m;  $t$  为屏蔽材料层厚度。由于式中含有相除的项, 球形屏蔽的多层表达式对立方体屏蔽适用。

$$S_m = S_1 \times S_2 \left[ 1 - \left( \frac{L_1}{L_2} \right)^3 \right] \times S_3 \left[ 1 - \left( \frac{L_2}{L_3} \right)^3 \right] \times \dots \times S_n \left[ 1 - \left( \frac{L_{n-1}}{L_n} \right)^3 \right] \tag{4}$$

1.2.2 对于交变磁场屏蔽

对于直流场的磁屏蔽具有的优点是它也可以屏蔽交变磁场。如果存在着交变磁场, 除了静态屏蔽效应外又有一个附加的涡流屏蔽, 屏蔽系数随着磁场频率的增加而升高, 至少在低频范围内是如此。

涡流贡献于屏蔽的相对重要性是由屏蔽材料趋肤深度  $\delta$  及其与壁厚  $t$  的关系来控制的。当  $t < \delta$  时涡流屏蔽很

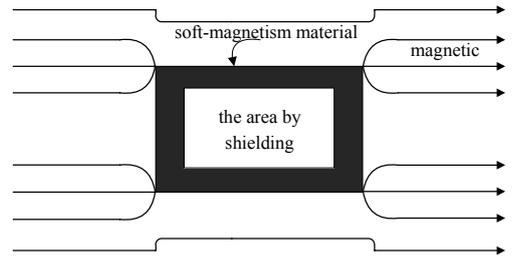


Fig.1 Principle of the magnetic shielding  
图 1 磁屏蔽原理图

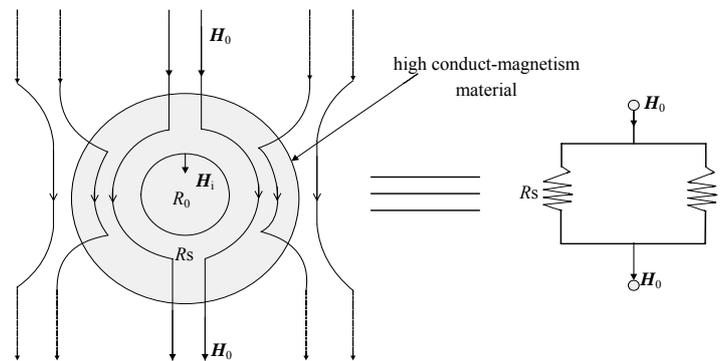


Fig.2 Side way of magnetism  
图 2 磁旁路

弱, 磁屏蔽系数  $S$  趋向于其静态值, 从  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu_r\mu_0}}$  ( $\sigma$  是电导率,  $\omega = 2\pi f$  为干扰的圆频率,  $\mu_r$  为介质的相对磁导率), 可以看出  $\delta$  与  $\sqrt{\sigma\mu_r}$  成反比, 因此磁屏蔽材料的  $\delta$  值比非铁金属要小得多, 这是由于磁屏蔽材料具有高的  $\mu_r$  值而足以补偿其较低的电导率  $\sigma$ 。因此, 对某磁场趋肤深度为  $\delta$  的介质, 厚度为  $t$  的屏蔽层, 其交流屏蔽系数可表示为:

$$S = \exp\left(\frac{t}{\delta}\right) \tag{5}$$

其屏蔽是受磁场变化支配的, 因此  $\mu_r$  取决于屏蔽材料内部的磁场, 所以有效磁导率不是以恒定条件确定<sup>[5-6]</sup>。

### 1.3 屏蔽材料选取设计

为了避免高磁导率的材料饱和, 屏蔽体采用多层结构设计: 即高磁导率和高磁饱和度材料结合使用。外层材料的磁导率相对较低, 对饱和的敏感度低, 选取低碳钢板作为屏蔽材料, 这层屏蔽其目的是减小入射磁场, 使它不至于使内层材料饱和, 内层则可以具有较高的磁导率和电导率, 选取硅钢片作为屏蔽材料。

## 2 磁屏蔽的实际设计与理论计算值比较

### 2.1 磁屏蔽优化设计

在磁屏蔽设计中, 不可避免地存在孔或缝隙, 这是屏蔽设计的难点之一, 合理设计孔、缝隙的大小和位置可以提高磁屏蔽效能<sup>[7]</sup>。为验证所应用的低频磁场理论设计的可行性, 将设计应用到磁传感器、电涡流传感器等<sup>[8]</sup>磁屏蔽设计中, 其中对于磁传感器屏蔽系统的要求包括: 电磁屏蔽室内静磁场:  $B \leq 200 \text{ nT}$ ; 50 Hz 交流磁场干扰  $< 0.10 \mu\text{T}$ ; 大于 100 kHz 交流磁场屏蔽系数  $S \geq 1\ 000$ ; 考虑到其技术要求, 选取低碳钢板与硅钢相结合的屏蔽材料, 其工艺流程如图 3 所示。

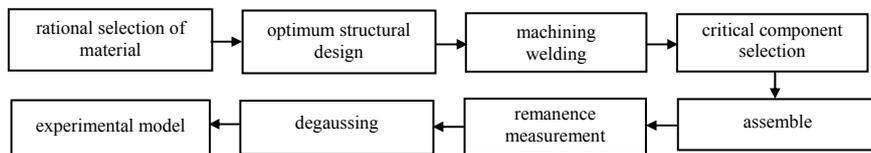


Fig.3 Technological process  
图 3 工艺流程图

电磁屏蔽室主体采用钢架结构, 材料采用 4 mm 钢板、4.5 mm 厚硅钢片 2 层结合建造, 能够隔离外界电磁干扰, 尺寸约 10 m×5 m×2.8 m (长×宽×高)。此设计包括交变磁场的屏蔽与静磁场的屏蔽, 故结构较复杂, 其结构如图 4 所示。

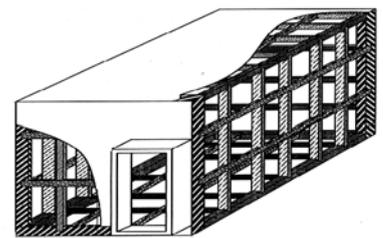


Fig.4 Structure of shielding room  
图 4 电磁屏蔽室结构图

电磁屏蔽室工艺设计要素体现: 延长通道设计与通风窗的设计。考虑到屏蔽室的整体效能是靠屏蔽体开口及接缝处设计的可靠性来保证, 而此屏蔽体最关键的部位就是门洞的设计和处理<sup>[9]</sup>。采用将电磁屏蔽门位置延伸设计, 以取得较好的磁屏蔽; 同时采用本体磁屏蔽材料硅钢打孔蜂窝设计, 降低成本的同时, 达到良好的通风与减少漏磁效果。其示意图如图 5 所示。

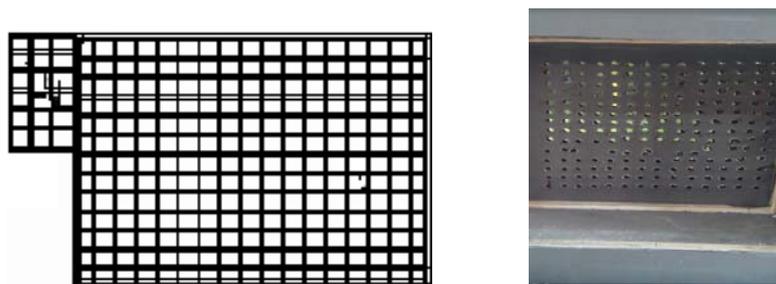


Fig.5 Design of extended passageway and ventilated window  
图 5 延伸通道与通风窗设计图

2.2 屏蔽实测与理论计算值比较

按照国家标准 GB/T 12190-2006《电磁屏蔽室性能的检测方法》<sup>[10]</sup>和企业标准《直流磁屏蔽装置屏蔽性能测试方法》对磁屏蔽室屏蔽效能对空间某点屏蔽前后的磁场进行测量。静磁场空间测试点见图6，剩磁测量值与理论计算值见表1，其曲线分布见图7。

表1 剩磁测量值与理论值  
Table1 Theoretic and testing data

		B/nT		
		A	B	C
1	$B_{exp}$	183.0	166.0	135.0
	$B_{calc}$	175.3	153.7	121.8
2	$B_{exp}$	179.0	137.0	108.0
	$B_{calc}$	170.4	124.8	97.6
3	$B_{exp}$	193.0	130.0	102.0
	$B_{calc}$	189.9	118.5	87.7
4	$B_{exp}$	200.0	155.0	132.0
	$B_{calc}$	189.4	143.7	120.8
5	$B_{exp}$	193.0	159.0	133.0
	$B_{calc}$	187.7	145.8	121.8

表2 实测交流屏蔽系数  
Table2 Shielding effectiveness at actual measurement

100 kHz shielding effectiveness		
location	SE/dB	S
1	-68	2 512
2	-66	1 995
3	-68	2 512
4	-64	1 585
5	-62	1 259
6	-64	1 585
7	-66	1 995

1-5 shielding doors;6,7 waveguide windows

曲线分布图的结果表明，计算结果和实验结果有较好的一致性。虽然硅钢片的磁导率比较大，但因其使用时采用粘贴方式，且实验中屏蔽体为方形，在粘贴时不可避免有很多缝隙存在，实验结果达不到计算结果，因此图中对应的计算结果和实验结果有出入。同时测试值也表明靠近屏蔽室门的位置A区剩磁明显高于B,C两区，可见屏蔽门与延伸通道的优化设计非常关键，同时通过实验也验证了磁屏蔽理论计算的正确性。100 kHz交流磁场屏蔽测试点分布见图8，其实测交流磁场屏蔽系数见表2，其曲线分布见图9。

实验中所选2层厚度相同， $t=4.5\text{ mm}$ ，2层材料相同，均为硅钢片，在低频外磁场条件下，将多点数据进行平均可得： $SE=65.4\text{ dB}$ ；利用上面理论式(5)可得： $SE=68.2\text{ dB} \sim 70.5\text{ dB}$ 。由此验证了公式的正确性。误差的原因一方面在于磁源(不是模型中的均匀源)；另一方面则在于测量过程中的环境磁场的变化。从以上的屏蔽效能计算结果看，采用多层结构的设计，大大提高了屏蔽体对低频磁场的屏蔽效果。同时在磁屏蔽设计中，不可避免地存在孔或缝隙，这是屏蔽设计的难点之一，在此装置中对孔洞进行了合理设计，首先采用磁屏蔽门取代电磁屏蔽门，并在组装完成后采用激光焊接，其次对于开孔位置选取勿切割磁力线，故较大提高了磁屏蔽效能。

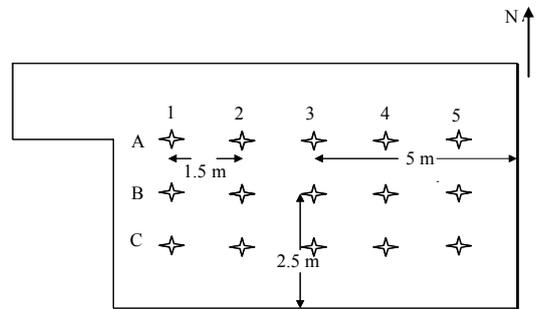


Fig.6 Distribution of experimental units

图6 测试点分布图

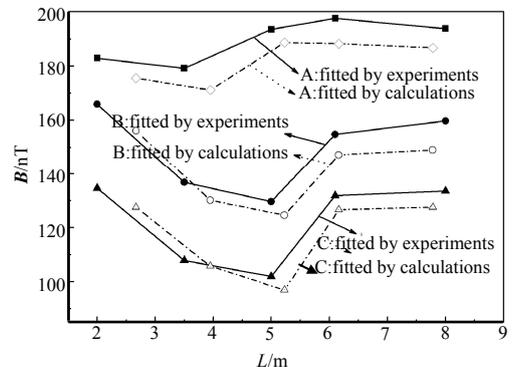


Fig.7 Curves of theoretical and testing

图7 理论与测试曲线图

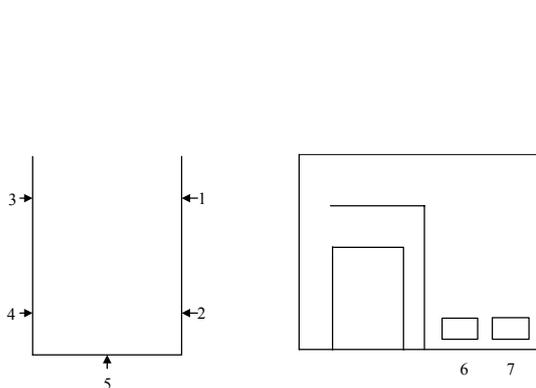


Fig.8 Distribution of experimental units

图8 测试点位置分布图

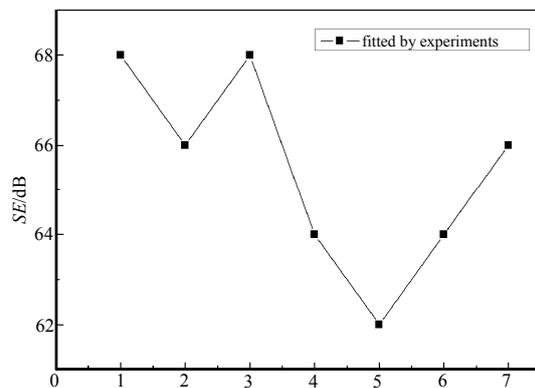


Fig.9 Curve of testing

图9 测试曲线图

### 3 结论

建立了简化优化的计算交变磁场与静磁场方法,针对磁传感器屏蔽室的多层磁屏蔽系统屏蔽进行了研究,并给出试验验证。结果表明,在静磁与交变磁场的理论计算与工程实践方面有很好的 consistency,并对低频磁屏蔽范围内的应用提供了可行的理论依据。

#### 参考文献:

- [1] SCHULZ R B, PLANTZ V C, RUSH D R. Shielding theory and practice[J]. IEEE Trans. on EMC, 1988,30(3):187-201.
- [2] COHEN D, SCHLAPEER U, AHLFORSI S, et al. New six-layer magnetically-shielded room for MEG[C]// Proc of 13th Int Conf on Biomagnetism. Jena, Germany:[s.n.], 2002:919-921.
- [3] CHENGA K B, RAMAKRISHNAB S, LEEC K C. Electromagnetic shielding effectiveness of copper/glass fiber knitted fabric reinforced polypropylene composites[J]. Composites:Part A, 2000,31(10):1039-1045.
- [4] BORK J, HAHLBOHM H D, KLEIN R, et al. The 8-layered magnetically shielded room of the PTB: design and construction[C]// Proc of 12th Int Conf on Biomagnetism. Helsinki, Finland:[s.n.], 2002:970-973.
- [5] 刘昆, 房芳, 陈伟亮, 等. 应用于铯喷泉钟的磁屏蔽系统的设计[J]. 计量学报, 2014,35(3):282-285. (LIU Kun, FANG Fang, CHEN Weiliang, et al. Design of magnetic shield for cesium fountain clock[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014,35(3):282-285.
- [6] Laird Technologies. Shielding-minimizing large aperture effects[J]. Shielding Technology & Shielding Material, 2002(4):38-40.
- [7] 李金涛, 房建成. 高精度光纤 IMU 的磁屏蔽方法及实验研究[J]. 航空学报, 2011,32(11):2106-2116. (LI Jintao, FANG Jiancheng. Magnetic shielding method and experiment study of inertial measurement unit based on high precision fiber-optic gyroscope[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011,32(11):2106-2116.)
- [8] 王毅, 汤紫峰, 曾永菊. 一种屏蔽式电涡流传感器的研制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(2):347-351. (WANG Yi, TANG Zifeng, ZENG Yongju. Design of a shielded eddy current sensor[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(2):347-351.)
- [9] 赵万章, 吴琼, 刘江涛. 屏蔽效能的工程计算[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2005,26(4):335-339. (ZHAO Wanzhang, WU Qiong, LIU Jiangtao. Engineering arithmetic of shielding efficiency[J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition), 2005,26(4):335-339.)
- [10] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12190-2006 电磁屏蔽室屏蔽效能的测试方法[S]. 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 北京: 中国标准出版社, 2006. (Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12190-2006 Method for measuring the shielding effectiveness of electromagnetic shielding enclosures[S]. General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Beijing: Standards Press of China, 2006.)

#### 作者简介:



李巧燕(1979-), 女, 山西省晋中市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护研究与技术. email:cdliqy88@126.com.

王保国(1965-), 男, 山西省晋中市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护研究与技术.

马通边(1971-), 山西省晋中市人, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护研究与技术.

宫剑(1986-), 男, 山西省太原市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电磁防护研究与技术.

赵亚丽(1980-), 女, 山西省临汾市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁防护材料与器件.