



# 自动化集装箱码头电缆电磁场 对 IGV 磁钉的干扰控制

柴治国, 崔政伟, 谢皓

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 磁钉作为自动化集装箱码头智能导引运输车(IGV)自动行驶的关键元件, 若受到外界磁场干扰, 则会对 IGV 自动行驶造成较大影响。为减少电缆电磁场对磁钉的干扰, 从设计、选材等方面对电磁场产生的机理进行分析, 提出通过优化电缆选型增加电缆屏蔽效果、加大电缆与磁钉的敷设距离减弱磁场干扰、增加电缆顶部接地包封实现电磁屏蔽、利用合理布线技术弱化电缆磁场强度等措施, 有效地控制电缆电磁场对磁钉的干扰, 保证 IGV 自动行驶不受其影响。

**关键词:** 磁钉; 磁场干扰; 合理布线; 接地

中图分类号: U 653. 95; U 656. 1+35

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)10-0199-05

## Interference mitigation of electromagnetic field generated by cables on IGV magnetic nails in automated container terminal

CHAI Zhi-guo, CUI Zheng-wei, XIE Hao

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

**Abstract:** Magnetic nails serve as a key component enabling the autonomous driving of an intelligent guided vehicle(IGV) in automated container terminals and will greatly affect the autonomous driving of the IGV if they are interfered by an external magnetic field. In order to mitigate the interference of the electromagnetic field generated by cables on magnetic nails, this paper analyzes the generating mechanism of the electromagnetic field in terms of design and material selection and proposes measures such as optimizing the cable selection to enhance the cable shielding effect, increasing the laying distance between the cables and magnetic nails to mitigate the interference of the magnetic field, strengthening the grounding and envelope at the top of the cables to achieve the electromagnetic shielding, and employing reasonable cabling technology to weaken the magnetic field strength of the cables. These measures can effectively mitigate the interference of the electromagnetic field generated by the cables on magnetic nails and make the autonomous driving of the IGV not affected.

**Keywords:** magnetic nail; interference of magnetic field; reasonable cabling; grounding

## 1 工程概况

本工程为全自动化集装箱码头, 码头及堆场区水平运输采用智能导引运输车(intelligent guided vehicle, IGV), IGV 无人驾驶磁钉导航方式是通过磁导航传感器检测磁钉的磁信号实现 IGV 的定位<sup>[1]</sup>, 磁钉导航逻辑是将连续感应变成间歇式感应, 磁钉之间处于一种较为精确的定位状态, 依

靠编码器等里程计量传感器计算位置, 依靠陀螺等角度传感器确定方向角, 最后得到 IGV 的位姿信息实现无人驾驶。但磁钉也存在一些缺点, 由于磁信号的稳定性对于实现定位至关重要, 所以在这样的场所中不能有磁场的干扰, 在 IGV 运行的路径上应尽量减少有消磁影响的设备。本工程在设计时, 为防止外部金属对磁钉的干扰, 在磁

钉埋设周边不能有金属<sup>[2]</sup>，堆场面层已考虑在 200 mm 范围内不敷设钢筋，同时磁钉布置在 IGV 行

驶区已尽量避开电缆沟、电缆井等敷设电缆的区域，但局部仍无法避免电缆敷设区域，如图 1 所示。

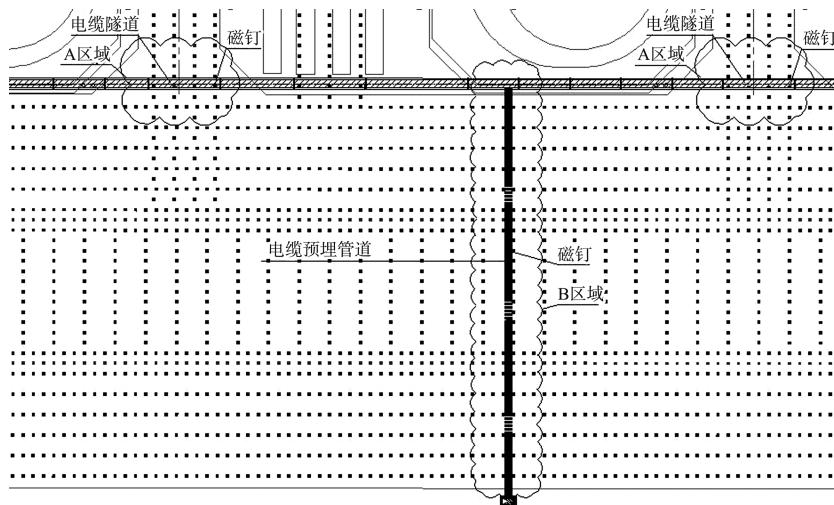


图 1 磁钉及管线分布

由图 1 可知，在 A 区域内磁钉布置在电缆隧道正上方，电缆隧道内敷设有 10 kV 高压电缆、380 V 低压电缆和通信电缆等，此区域对磁钉的干扰较为严重，是磁钉磁场的一个薄弱区；B 区域内磁钉布置在电缆埋管上方，管道内敷设有 10 kV 高压电缆、380 V 低压电缆和通信电缆。本工程高压电缆为码头岸桥、堆场轨道吊供电电缆，码头岸桥、堆场轨道吊为间歇性工作设备，电缆电流变化快且无规律性，形成的电磁场复杂，对磁钉干扰较为严重。针对以上 2 个区域，根据工程经验以及建模仿真分析提出切实有效的措施对载流电缆磁场干扰进行控制。

## 2 原因分析及控制

### 2.1 电缆磁场产生的原因分析

铠装电力电缆的物理结构从内到外分别为铜导体、导体屏蔽层、金属屏蔽层、绝缘屏蔽层、绝缘层、铠装、外护套等<sup>[3]</sup>。电缆或线圈通入交变电流后，因为有了电荷（电荷定向移动形成电流），从而产生交变电场。当线圈中存在交变电流时会产生磁场，同时在空间中变化的磁场又会产生电场，所以电磁场是相辅相成、相互影响的<sup>[4]</sup>。载流电力电缆的电磁场辐射是工程或日常生活中常见的电磁辐射。

载流线圈磁场分布见图 2，根据毕奥-萨伐尔定律，载流回路的任一电流元  $Idl$ ，在空间的任意点  $P$  处所产生的磁感应强度为：

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cdot r_0}{r^2} \quad (1)$$

式中： $r_0$  为指向场点  $P$  的单位矢量； $r$  为  $Idl$  与场点  $P$  之间的距离； $\mu_0$  为真空磁导率；电流元  $Idl$  的方向与电流方向相同。

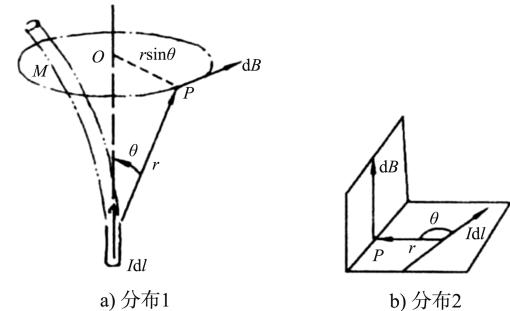


图 2 载流线圈磁场分布

把多条不同的载流电缆或导线所产生的磁场看作是很多电流元产生的磁场叠加，可以得出多条载流电缆产生的磁感应强度：

$$B = \oint dB = \oint \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \cdot r_0}{r^2} \quad (2)$$

### 2.2 抗电磁干扰常用措施

#### 2.2.1 利用屏蔽技术减少电磁干扰

1) 动力电缆采用屏蔽电缆，可以有效抑制

电磁波的辐射; 控制电缆、模拟信号线缆最好使用金属材料屏蔽层的屏蔽电缆或者采用屏蔽类的光缆; 同时在实施过程中屏蔽层均应做可靠接地。

2) 采用屏蔽金属板(网格), 金属板对电磁场传播的影响见图 3。可以看出, 电磁波  $H_o$  由金属板(厚度为  $t$ ) 的左侧向右侧传播, 因空气传播介质与金属板传播介质性质不同, 在电磁波传播至左侧金属板时会反射折回, 未被反射回的电磁波  $H_{mo}$  继续入射至金属板内部, 电磁波  $H_{mo}$  在金属板内部经过介质吸收衰减为  $H_{mt}$ , 同时有部分电磁波  $H_{mr}$  经过金属板右侧壁反射折回, 电磁波  $H_{mt}$  经过金属板右侧壁折射衰减, 穿透金属板最终衰减为  $H_t$ 。

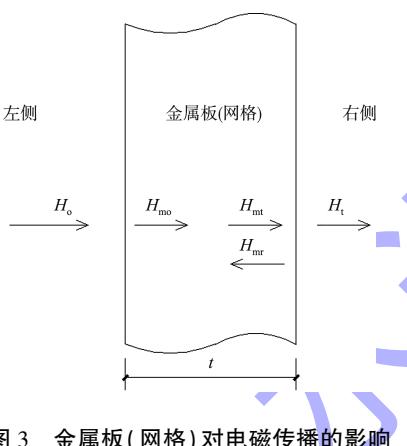


图 3 金属板(网格)对电磁传播的影响

根据金属板的屏蔽工作原理, 可分为表面反射损减  $R$ (dB)、吸收损耗  $A$ (dB)及金属板内部多次反射损耗  $B$ (dB)3 个部分, 即金属板的屏蔽效果  $S$  可表示为:

$$S = A + R + B \quad (3)$$

其中:  $A = 1.31t \sqrt{\mu\sigma f}$  (4)

$$R = 168.2 + 10\lg[\sigma/(\mu)] \quad (5)$$

式中:  $t$  为屏蔽厚度(cm);  $\mu$  为金属材料相对于空气的磁导率;  $f$  为电磁波频率(Hz);  $\sigma$  为金属材料相对于铜的导电率。

根据式(5)可以看出,  $R$  与金属的导电性成正相关函数关系, 与金属的导磁性成负相关函数关系, 与金属板的厚度无关。另外,  $B$ (dB)与  $A$  成正相关函数关系。

## 2.2.2 利用接地技术消除电磁干扰

沿电缆敷设方向设置接地线, 电缆铠装钢丝或钢带做良好接地; 如果电缆线路带有变频设备, 与变频设备相关的线缆、控制设备等, 其接地均应可靠连接且共地。

## 2.2.3 利用布线技术降低电磁干扰

根据式(1), 某点的磁感应强度与载流电流的距离成反比, 故距离载流电缆越远, 磁感应强度越弱。对长距离电缆进行合理布线, 干扰较强的线缆远离被保护设备, 同时控制电缆和电源电缆交叉时应尽可能使它们垂直交叉, 并且加强交叉处的屏蔽层固定设置, 加大控制电缆和电源电缆之间的物理距离。

## 2.2.4 利用滤波技术降低电磁干扰

滤波器主要由电容器、电感等元器件组成, 工作原理为允许固定带宽频率通过, 对其他带宽的频率加以抑制, 进而抑制线路上电磁干扰, 工程上常用的滤波器有低通、高通、带通、带阻等滤波器<sup>[5]</sup>。

## 2.2.5 利用磁环材料抑制干扰

目前工程常用的磁环材料包括镍锌铁氧体或锰锌铁氧体等。镍锌铁氧体可以抑制高频干扰, 锰锌铁氧体可以抑制低频干扰, 在工程中可根据高频或低频信号选择合适的磁环材料。在同一束电缆上同时套上锰锌和镍锌铁氧体, 可以抑制的干扰源频段较宽。

## 3 消除电磁干扰的控制设计

### 3.1 A 区域控制电磁干扰措施

#### 3.1.1 合理布线

电缆隧道内敷设有轨道吊供电高压电缆、照明电缆、维修箱低压电缆等。其中照明及维修箱为常规设备, 电缆为其提供持续稳定电流, 产生的磁场较为稳定。高压电缆为轨道吊供电电缆, 为间歇性工作设备, 电机启动电流大、电流变化快且无规律性, 形成的电磁场复杂, 产生的磁场多变。结合此现象, 并根据距离越远磁场越弱的原则, 电缆隧道内电缆布置原则为: 低压电缆在

最上层、高压电缆在中间层、光缆布置在最下层。

为验证载流电缆布线不同位置产生的磁场情况,采用通用有限元仿真软件 ANSYS 进行磁场模拟,建立电缆隧道内电磁场仿真模型确定 10 kV 电缆磁场强度与距离的关系。在电缆隧道内电磁场仿真研究中,电缆的结构、电缆在电缆隧道的空间位置、供电电压等级和流过电缆的电流大小是非常重要的因素<sup>[6]</sup>。电缆隧道断面如图 4 所示,宽度 1.6 m,深度 1.9 m,隧道盖板厚度 350 mm。电缆隧道内含有 380 kV 电力电缆 16 回,截面积为 960 mm<sup>2</sup>,电流 300 A;含有 10 kV 电力电缆 32 回,截面积为 285 mm<sup>2</sup>,电流 55 A。

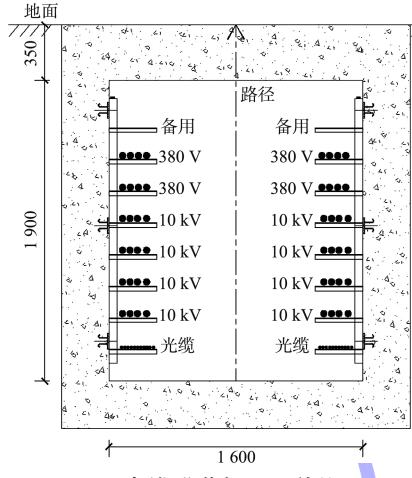


图 4 电缆隧道断面 (单位: mm)

在仿真软件 ANSYS 输入相关参数,如电缆支架所用的 Q235 钢材为磁性材料,相对磁导率取 1 900,电缆隧道为钢筋混凝土结构,钢筋的相对磁导率取 700。通过仿真,得出在隧道底部中心竖直向上至隧道顶部地面的磁场分布曲线如图 5 所示。可以看出,磁场  $B$  呈现出先增大后减小的趋势,磁场最强的位置电缆隧道中间位置,越往顶部磁场强度越小。

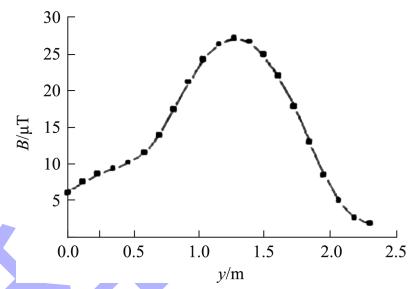


图 5 隧道磁场分布

### 3.1.2 采用屏蔽措施

A 区域电缆隧道为钢筋混凝土结构,内部钢筋形成方形钢筋网格,此钢筋网格可以起到良好的电磁屏蔽效果,不仅可以屏蔽外部信号干扰内部,也可以屏蔽内部信号干扰外部。为形成完全独立的封闭结构,在安装磁钉的 14 m 长电缆隧道做伸缩缝,与通长段电缆沟做隔断,形成独立接地结构,处理措施如图 6 所示。

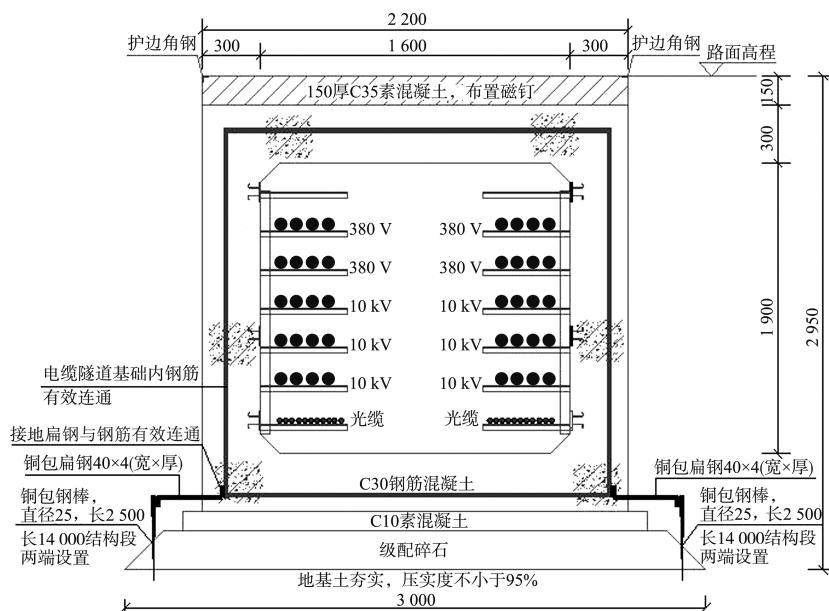


图 6 电缆隧道布置断面 (单位: mm)

### 3.2 B 区域控制电磁干扰措施

#### 3.2.1 增大距离

电缆管道内敷设有岸桥供电高压电缆、船舶岸电低压电缆等。其中船舶岸电为常规设备, 供电电流为持续稳定电流, 产生的磁场相对稳定。高压电缆为岸桥供电电缆, 岸桥为间歇性工作设备, 电机启动电流大, 电流变化快且无规律性, 形成的电磁场复杂多变。结合此现状, 本工程设置 B 区域管道布置电缆原则为: 低压电缆在上层、高压电缆在最下层。

另根据仿真的结果及式(1)的结论, 为降低 10 kV 电缆磁场对路面磁钉的影响, 增大 10 kV 电缆管道埋深, 普通埋管深度为 0.7 m, 此处加深埋管至 1.1 m, 如图 7 所示。

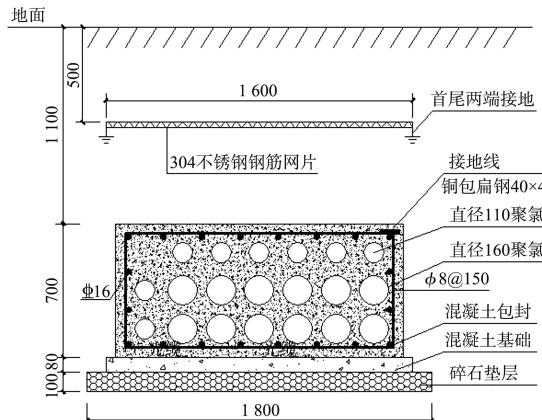


图 7 B 区域埋管接地 (单位: mm)

#### 3.2.2 采用屏蔽措施

普通预埋管采用素混凝土包封, 内无配筋。为形成屏蔽效果, 在混凝土包封中增加配筋, 形成封闭钢筋笼将管道包封, 且两端接地。同时在管道上方增加不锈钢网片, 对下方的电缆形成

覆盖, 并进行接地处理, 如图 7 所示。

## 4 结论

1) 电缆线路布置遵循避免与磁钉长距离平行敷设的原则。

2) 电缆线路与磁钉交叉处, 合理布线, 增大磁钉与电缆线路距离, 弱化磁钉处载流电缆电磁场分布。

3) 上方布置有磁钉的电缆隧道采用独立分缝, 结构钢筋全部贯通并接地, 实现对载流电缆电磁场屏蔽。

4) 上方布置有磁钉的电缆管道, 采用钢筋混凝土包封结构, 结构钢筋全部贯通并接地, 同时管道上方通长布置 304 不锈钢网格, 实现对载流电缆电磁场屏蔽。

## 参考文献:

- [1] 孙鹏飞. 磁钉导航在 AGV 中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2020(4): 194-195, 198.
- [2] 王晓晖, 顾祥奎, 陆敏. 全自动化集装箱码头面层结构设计[J]. 水运工程, 2016(9): 130-133.
- [3] 孙建明, 鲁铁成. 铁路 10 kV 单芯电力电缆对信号电缆的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 93-94.
- [4] 武超. 复杂目标共形网格建模及电磁特性计算[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] 龚文斌. VHF 频段双工器和多工器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [6] 樊京. 6000 V 矿用高压电缆工频电磁辐射有限元分析[J]. 煤炭技术, 2010, 29(6): 42-44.

(本文编辑 王璁)

(上接第 175 页)

- [8] 那振雅, 王晓锋, 赵广军. 预应力混凝土双 T 板端部连接方式综述与发展[J]. 建筑结构, 2020, 50(13): 7-12.
- [9] 王晓锋, 那振雅, 赵广军, 等. 预应力混凝土双 T 板端部钢带及拉筋企口受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(2): 187-197.
- [10] 那振雅, 王晓锋, 赵广军, 等. 预应力双 T 板端部新型钢质企口连接方式设计方法研究 [J]. 结构工程师, 2021, 37(4): 194-202.
- [11] 中国建筑科学研究院, 同济大学. 预应力混凝土双

T 板: 18G432-1[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

- [12] 中国建筑科学研究院. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 2016 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [13] 中国建筑标准设计研究院, 中国昆仑工程公司. 实腹钢梁混凝土柱: 12SG535 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [14] 江苏省建筑设计研究院有限公司. 预应力混凝土双 T 板: 苏 G12—2016[S]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2016.

(本文编辑 王璁)