

# 基于骚扰磁场的应答器抗干扰研究与应用

王劲鹏 于萌 成威

北京市地铁运营有限公司通信信号分公司 北京 100082

**摘要：**随着在城市轨道交通信号领域迅速发展，对复杂电磁环境下信号传输的可靠性提出了更为严峻的考验，本文针对列车运行控制信号系统（简称ATC）中的核心部件-列车车载应答器系统（以下简称BTM）的电磁干扰，深入研究在不同的供电模式和负载条件下BTM设备电缆差模电磁骚扰、靠近BTM天线的列车回流地线的共模骚扰及骚扰电流，寻求骚扰磁场有效的抗干扰抑制方法，有效解决了BTM受扰问题并进行了应用，为轨道交通BTM的深度研究提供了借鉴。

**关键词：**列车运行控制信号系统；骚扰磁场；应答器

## 引言

近年来，我国城市轨道交通迅速发展，越来越多的通信设备以及日益复杂的电磁环境对列车车辆系统中信号传输的可靠性提出了更为严峻的考验。列车车载应答器系统（以下简称BTM）是列车运行控制信号系统（简称ATC）中不可或缺的核心部件之一，它负责为列车信号系统提供所需的线路和位置信息。车载应答器受到电磁干扰后，将会直接影响行车效率和旅客乘车体验。

### 1 国内外技术发展现状与趋势

BTM干扰问题是影响列车运行的普遍故障之一，干扰分析和干扰抑制措施成为国内外学者研究的对象。地铁运营公司及设备厂商开展过不同角度、不同程度的研究，并取得一定效果。研究方向有：BTM设备带内干扰的成因、

BTM干扰带内干扰的测量、带内干扰抑制的方法等等。

从实际效果来看，有如下的解决措施：BTM天线位置加装金属屏蔽板，对干扰信号进行衰减；在干扰源易引入的位置加装磁环，抑制干扰信号强度等。此类措施从一定程度降低了BTM发生干扰的概率，需进一步从干扰源发生和抑制层面进行系统研究，并制定综合治理方案<sup>[1]</sup>。

### 2 研究目的

列车在运行过程中电磁环境复杂，BTM天线安装在车底外部，容易受到外部电磁噪声的骚扰。寻求有效的干扰抑制方法是保障，列车信号传输可靠性的关键技术问题之一，研究和解决此类故障，可有效减少售后维护成本，提高运营效率和口碑，保障市民的出行安全。

车载BTM主机和天线如图所示：

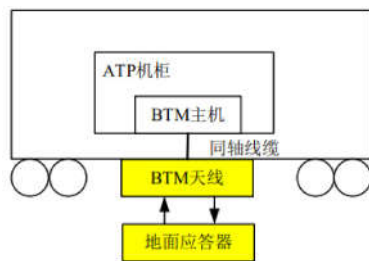


图1 车载BTM主机设备



图2 车载BTM天线



图3 BTM的电缆车上端口差模骚扰测试现场布置图  
(车厢ATP机柜处)

本文通过对列车车载信号设备与车辆设备之间干扰场景进行测试，深入研究车辆设备与车载信号设备间存在的干扰源及传播途径，确定骚扰磁场的成因，通过优化车辆系统电磁环境、提高信号车载系统设备抗干扰等方面研究车载应答器（BTM）干扰故障的整治方法，制定优化方案，进而降低BTM收到外部干扰导致列车降级的故障，保障城市轨道交通线路的运营安全。同时，为城市轨道交通领域列控系统的BTM干扰问题的解决提供思路和处理方法。

### 3 基于骚扰磁场的 BTM 电磁干扰

在实际运用中，BTM 天线电缆常与其他设备电缆共用车底的走线槽，这也导致了BTM 车底电磁环境较为复杂，尤其在列车动态运行状态下，各类设备全部上电，其电缆之间会有不同频率的信号互相影响。列车上各种设备的工作频率虽然不相同，但其产生的干扰信号往往有谐波分量，不能保证所有谐波的频率都不会与 BTM 设备的工作频段重合。

为了对 BTM 车底干扰信号进行采集现场对车内电磁环境进行进行电磁环境测试。在不同的供电模式和负载条件下，测量BTM设备电缆差模电磁骚扰、靠近BTM天线的列车回流地线的共模骚扰及骚扰电流。

#### 3.1 静态车内BTM系统电缆端口差模骚扰测试：

测试内容包括列车在不同供电模式下，包括蓄电池供电、正常高压供电（仅照明）、正常高压供电（空调冷风或暖风），BTM电缆车下一端连接不同设备（开路、50欧姆负载、环天线、BTM天线），车上另一端连接频谱仪记录不同状态下的骚扰情况，通过对比各个状态和连接不同负载情况下的差模骚扰功率，分析造成BTM故障的原因。测量频段涵盖应答器上行信号的工作频带，为1MHz~6MHz<sup>[2]</sup>。

根据测试数据结果分析，BTM电缆车下一端在开路状态和接50欧姆负载状态骚扰信号的幅度较小，高压供电开空调时骚扰强度较大，最大值集中在5.3MHz附近，最大功率为-40dBm。

BTM电缆一端接BTM天线时，在高压供电开空调状况下的骚扰功率最大，在1.5MHz、2.3MHz和5.3MHz附近存在峰值，从2.5~5.5MHz有较强的骚扰信号，频段内各频点最大值幅度在-30dBm左右。

由于BTM电缆车下一端接BTM车载天线是BTM系统正常工作的情况，以下重点讨论此条件下的测试数据。对每一种工况，都进行了约3分钟的测量，对测量数据进行了统计分析，统计结果详见下表。

表1 BTM电缆车下一端接BTM车载天线时的骚扰功率

频率 (MHz)	骚扰功率 (最大值) dBm	骚扰功率 (20%概率) dBm	骚扰功率 (50%概率) dBm	骚扰功率 (80%概率) dBm
1.5	-25	-30	-32	-39
2.3	-24	-30	-29	-32
3.952	-26	-33	-39	-46
3.952	-25	-33	-40	-45
4.3	-25	-28	-36	-40
4.516	-29	-40	-44	-49
4.516	-30	-40	-48	-53
5.3	-20	-35	-45	-57

从上表中可以看出，所列频率骚扰信号功率较大，对于BTM上行信号频段4.234±0.282所在频段，有80%概率接近或超过了BTM上行FSK信号中3.952和4.516频点的功率，有可能对BTM上行信号造成同频干扰，导致BTM解码失败。

#### 3.2 静态车底靠近BTM天线的回流线共模骚扰测试：

此项测试主要测试车底回流线中的共模骚扰，测试内容包括列车在不同供电模式下，包括蓄电池供电、正常高压供电（仅照明）、正常高压供电（空调冷风或暖风），采用连接频谱仪的电流钳测量列车车底回流线上的共模骚扰。典型试验位置和电流钳的布置如所示。同时采用钳形表的直流挡位测量回流线上的实时电流。



图4 车底回流线电流测试现场布置图

无金属空间最小距离（列车运行方向） $dx \geq 300$ mm
无金属空间最小距离（与轨面平行且垂直铁轨方向） $dy \geq 170$ mm
无金属空间最小距离（天线上表面且垂直于轨面方向，不包括安装架） $dz \geq 50$ mm

图5 BTM天线无金属要求

根据测试结果分析，列车在空调冷风状态时，回流线上的骚扰电流在50到80dBuA之间，在BTM的上行频率4.234MHz处的骚扰电流最大值约为72dBuA。

在不同工况下，采用钳形表测量回流线上的工频（DC）电流，当测量状态为蓄电池供电时，测得电流为1.2A，当测量状态为正常高压供电仅照明时，测得电流值为7.5A，当开启空调时测得电流值为53A。对比骚扰电流和工频电流的关系，可以得出结论：当工频电流越大，骚扰电流越大。

对比回流线骚扰电流的频谱图与车上频谱仪接BTM天线的骚扰信号的频谱图，可以看出，峰值点出现的频率以及频谱图的变化趋势，两者非常相似，由此可以推断，BTM电缆中出现的骚扰信号，其源头来自于回流线上骚扰电流形成的骚扰磁场，该磁场被BTM天线接收后，转化为骚扰电压信号，通过电缆传输到BTM，当骚扰强度超过BTM的敏感门限时，造成BTM解码失败。

根据测试结果分析，列车在空调冷风状态时，回流线上的骚扰电流在90到110dBuA之间，在BTM的上行频率4.234MHz处的骚扰电流最大约为90dBuA。

采用钳形表测量回流线上的电流，当测量状态为蓄电池供电时，测得电流为1.2A，当测量状态为正常高压供电仅照明时，测得电流值为9A，当开启空调冷风时测得电流值为49.5A，暖风时测得为53.5A。对比骚扰电流和工频电流的关系，可以得出结论：当工频电流越大，骚扰电流越大<sup>[3]</sup>。

对比回流线骚扰电流的频谱图与车上频谱仪接BTM天线的骚扰信号的频谱图，可以看出，峰值点出现的频率以及频谱图的变化趋势，两者非常相似，由此可以推断，BTM电缆中出现的骚扰信号，其源头来自于回流线上骚扰电流形成的骚扰磁场，该磁场被BTM天线接收后，转化为骚扰电压信号，通过电缆传输到BTM，当骚扰强度超过BTM的敏感门限时，造成BTM解码失败。

1) 在BTM天线上部安装屏蔽板，约可降低2DB干扰；

2) 为进一步提高屏蔽效果，研究开发屏蔽罩，在不影响BTM工作的前提下，最大程度屏蔽外部干扰，约可降低8DM，

### 3.3 测试结论：

对比回流线骚扰电流的频谱图与车上频谱仪接BTM天线的骚扰信号的频谱图，可以看出，峰值点出现的频率以及频谱图的变化趋势，两者非常相似，由此可以推断，BTM电缆中出现的骚扰信号，其源头来自于回流线上骚扰电流形成的骚扰磁场，该磁场被BTM天线接收后，转化为骚扰电压信号，通过电缆传输到BTM，当骚扰强度超过BTM的敏感门限时，造成BTM解码失败。

## 4 BTM 抗干扰技术与探索

针对基于骚扰磁场的BTM电磁干扰与空间辐射耦合途径确定不同的优化方案与抑制措施，针对该情况，可以从BTM天线上部安装屏蔽板/屏蔽罩、BTM线缆安装吸收磁环及线缆路径优化、BTM参数优化三方面进行优化。

### 4.1 在BTM天线上部安装屏蔽板/屏蔽罩：

BTM天线作为同频信号的接收单元，通过在BTM天线上部安装屏蔽装置，在一定程度上可以降低影响。为保障BTM天线正常工作，需满足无金属区相关要求。

3) 为进一步提高便利及安全性，降低重量，开发可灵活拆装的屏蔽罩，根据现场测试，约可降低6DB。

### 4.2 BTM线缆安装吸收磁环及线缆路径优化

根据BTM抗干扰理论，在BTM传输线缆上安装吸收磁环，可吸收外部同频信号，并调整车厢信号BTM线缆走线方式，进一步避免传导影响。

### 4.3 BTM参数优化

根据对BTM系统深度分析，滤波功能主要为BTM接收板承担。通过现场测试，确定接收优化参数。调整滤波频带参数、调整FSK信号解析门限、调整对异常信号的识别及处理范围，提高在受扰情况下的解码能力。

### 结束语

本文通过深入开展BTM设备电缆差模电磁骚扰、靠近BTM天线的列车回流地线的共模骚扰及骚扰电流的研究，最终确定了BTM的电磁干扰来自于回流线上骚扰电流形成的骚扰磁场，寻求有效的干扰抑制方法，（1）通过增加BTM天线屏蔽板，既不影响安全运营，也方便后期维护，（2）通过BTM线缆增加吸收磁环，进一步吸收干扰，此部分工作无需拆除线缆，对既有设备无感，（3）通过优化BTM接收板参数结合SIV回流地线屏蔽网，基本解决了BTM受扰的现象，在某地的城市轨道交通线路应用后，满足项目要求，有效提高地铁运营服务水平，增强市民的出行体验，也为车载BTM系统深入研究提供新的思路。

### 参考文献

- [1]李智宇,分相区应答器传输系统电磁干扰分析及防护技术研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022,19(7):1-6
- [2]罗凌峰,曹鹤飞. 中低速磁浮 BTM 设备电磁干扰分析及优化[J]. 铁路通信信号工程技术, 2023,20(7):64-69
- [3]蔡世东,刘佳. 应答器接收模块抗电磁干扰故障诊断与优化[J]. 铁道通信信号, 2024,60(6):45-49