

# Optimization Research of the Earthing Design for Metro Vehicle

Zhangqun Li

Shenzhen Research and Design Institute of CARS, Shenzhen Guangdong  
Email: lizhangqun1979@163.com

Received: Feb. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 5<sup>th</sup>, 2018; published: Mar. 12<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper introduces the metro vehicle earthing based on the Shenzhen Metro Line 1, and deeply analyses the reason of train traction motor bearings electrical corrosion in the actual operation; optimization scheme of protective earthing is improved from the earthing point and it's tested.

## Keywords

Metro Vehicle, Earthing, Electrolysis

---

# 地铁车辆接地方案的优化研究

李张群

中国铁道科学研究院深圳研究设计院, 广东 深圳  
Email: lizhangqun1979@163.com

收稿日期: 2018年2月20日; 录用日期: 2018年3月5日; 发布日期: 2018年3月12日

---

## 摘要

文章主要以深圳地铁1号线增购车辆为例, 对地铁车辆接地进行了介绍, 并对列车在实际运行中出现牵引电机轴承发生电蚀的原因进行了深入的分析, 从接地的角度提出了改进保护性接地的优化方案并进行了验证。

## 关键词

地铁车辆, 接地, 电蚀

---

Copyright © 2018 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来随着城轨交通的快速发展, 车辆内部电子设备不断增加, 不仅使地铁车辆内部设备布局十分密集, 也使车内的电磁环境变得复杂, 整列车的电磁兼容问题也成为很重要的问题。为了保证列车人员的人身安全及电气设备的可靠运行, 列车必须要有良好的接地性能。文章就深圳地铁 1 号线增购车辆因逆变器的电磁干扰而造成电机轴承电蚀的问题, 重点对保护接地方案进行探讨。

## 2. 地铁车辆接地系统分类

地铁车辆的接地, 按其功能可分为工作接地和保护接地。其中工作接地又包括回流接地和屏蔽接地[1]。

### 2.1. 工作接地

回流接地即高压电源负端的回流, 通过轴端接地回流装置与轨道相连。高压电源的负端首先通过导线经与车体绝缘的绝缘子相连, 然后通过接地导线与转向架构架相连, 再通过接地导线与轴端接地回流装置相连, 经列车轨道最终回到变电所高压负端, 从而形成高压回路。

屏蔽接地是为了抑制车辆与环境之间的电磁干扰, 车辆的部分电力线缆和信号线缆要采取屏蔽层接地措施。

### 2.2. 保护接地

一般地铁车辆用电设备使用过程中会由于绝缘老化、磨损、浸水、潮湿等原因, 带电导线或部件与机壳之间漏电, 或者由于设备超负荷引起严重发热烧损绝缘造成漏电, 还可能因环境气体污染、灰尘沉积导致漏电或电弧击穿打火, 所以要地铁上用电设备进行护接地。

根据 EN50153 的规定, 车辆内部所有导电的可触及到的车辆零部件, 必须通过保护性接地以较低的电阻连接到车体上。在车体与地面装置的保护性导体之间至少要有两条保护性接地通道, 以确保一条通道发生故障不致造成电击隐患。两条通道都应能目视检查[2]。

## 3. 深 1 车辆接地系统设计

深圳地铁 1 号线增购列车为 4 动 2 托的 6 辆编组, 车体为 A 型铝合金鼓型车体。其中 A 车为拖车, B、C 车为动车。每节 A 车下配置一台辅助逆变器, 每节 B、C 车下各配置一台牵引逆变器。受电弓设置在 B 车车顶, DC1500V 通过受电弓引入, 向牵引逆变器和辅助逆变器供电。半组车的工作接地原理如图 1 所示。

### 3.1. 工作接地

B、C 车牵引逆变器的 DC1500V 回流是通过设置在本车的接地汇流排与轴端接地装置相连, 再最终流回轨道。其中接地汇流排与车体绝缘, 防止工作电流流回车体。另外在动车转向架的每个轴各设置一个轴端接地装置。A 车辅助逆变器的 DC1500V 回流通过设置在 1、4 轴的轴端接地装置直接实现回流。

车辆上的 AC380V 系统和 110 V 系统的回流则是最终流回蓄电池充电机的负极和蓄电池的负极。负极接地只是起到了电位参考的作用。

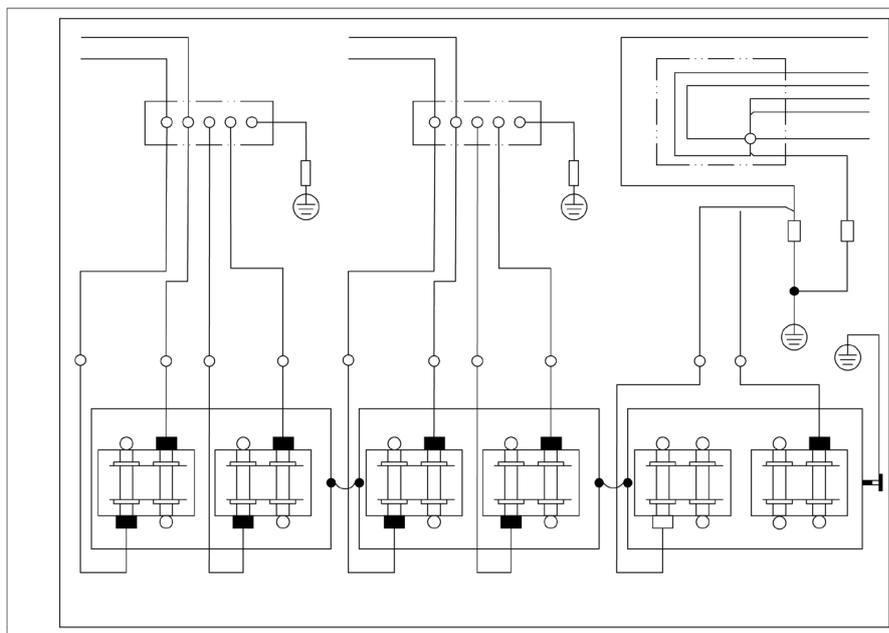


Figure 1. Work grounding schematic diagram  
图 1. 工作接地原理图

### 3.2. 保护接地

保护接地时，以车体作为接地的零电位等势体，为车上的电气设备提供零电位。

#### 1) 各部件的等电位连接

车体金属部件间、所有金属箱体和车体间、车体间、车体和转向架间、转向架和牵引电机间均需要进行保护接地。车辆保护接地分为客室设备保护接地、底架设备保护接地、车顶设备保护接地三部分。

客室设备接地主要是电子设备接地，主要包括 PIS 系统、电气柜、侧顶板、线槽等。由于客室内主要是电子设备，其黄绿地线根据设备布置而定，所以车内电子设备可利用周围的 C 型槽接地。客室内的 1500 V 的钢管、电气柜的接地可利用小的车体接地块接地节省空间，对应在车体上焊接 25 mm 高的车体接地块。客室内的侧顶板、线槽等也是利用周围的 C 形槽接地。

底架接地主要是高压电气设备接地，如：高压箱、牵引逆变器、辅助逆变器、低压箱、蓄电池、制动电阻等通过低阻抗的接地连接与车体相连。每个箱体至少通过一根 70 mm 的软铜绞线与车底焊接的接地块相连。车底线槽则通过 16 mm 的软铜绞线与 C 型槽接地。

车顶保护接地设备主要有：空调机组、受电弓管道、避雷器等，用拉铆接地塞钉与车体相连。每个设备至少通过一根 70 mm 的软铜绞线与车体相连。

而车体本身通过两根接地电缆相互连接，这也确保了所有可触碰得到的电气传导部件都基本处于零电位，从而确保工作人员的安全。

#### 2) 保护性接地点的设置

每辆车均设置一个保护性接地点，每辆车车体均通过一个 30 mΩ 的保护性接地电阻与接地汇流排相连，B、C 车上通过两个转向架的 4 个轴端接地装置实现保护接地的回流。A 车通过 1、4 轴的接地回流装置实现保护接地的回流。

由于铝合金车体的电阻小于钢轨的电阻，在车体与汇流排之间增加一个 30 mΩ 接地电阻，防止工作回流流经车体而引起车体之间的环流，从而避免车体之间的环流造成车体、构架和轴承的电蚀[4]。同时

每个车体通过一个 30 mΩ 的电阻与接地汇流排相连, 使每辆车与轮轨之间保持等电位。

所有的 DC110V 负极在 TC 车底架蓄电池箱内与绝缘汇流排相连, 绝缘汇流排再通过一个 30 mΩ 的电阻与车体相连。这样 DC110V 负极相对车体呈高阻态, 防止车体回流造成 DC 110V 电压的波动。

保护接地基本上满足标准 EN50153 的要求。

## 4. 电机轴承电蚀故障的原因分析

用户现场发现牵引电机在低速转动时, 存在批量异响问题。经车辆厂售后现场进行轴承检测排查发现, 存在异响电机的轴承有明显的损伤。故障的共同点是轴承的外圈滚道均出现了明显电蚀的周期性条纹状痕迹。牵引电机轴承拆解后损伤部位如图 2 和图 3 所示。

经分析, 当电流通过轴承时, 会在轴承的滚道产生金属的熔融和细小的熔融泡, 这些表明缺陷的形成能够加速轴承的磨损, 并且也会在熔融位置产生烧伤组织。

### 4.1. 轴承电流的产生原因

当电机由电压型变频器供电运行时, 会存在一个特定的轴承电流源, 即在电动机转轴上感应出高的轴电压[3]。当轴电压形成导电回路后将产生轴承电流, 轴承中有电流存在是轴承发生电腐蚀的必要条件。牵引电机轴承感应电压的主要来源是 PWM 变频器产生的高频共模电压和 PWM 变频器输出电压的  $dv/dt$ 。共模电压会在电动机转轴上感应出高的轴电压并形成轴电流, 同时高频的  $dv/dt$  作用在电机内部的寄生电容上时, 不仅会产生充放电电流, 而且还会由于电容的累积作用使得转子轴电压升高, 当转子轴电压升高到一定程度后将产生轴承电流。

### 4.2. 轴承电流的危害

轴承电流一部分通过车体、接地电阻和轴端接地装置回流到钢轨, 另一部分通过逆变器的 EMI 电容流回到逆变器的负极。

当轴电压略大于轴承润滑剂绝缘电压阈值时, 感应出较小的轴承电流, 使润滑剂发生化学变化, 最终由于轴承座圈受到化学侵蚀而降低寿命。当轴电压远大于轴承润滑剂绝缘阈值时, 将产生电容放电性电流即轴承电流, 且放电电流的重复频率随轴电压数值和脉冲频率的增加而增加。在套圈和滚珠接触时, 这个电流会击穿油膜产生较高的放电电流, 使套圈局部温度迅速升高, 导致轴承座圈上产生熔化性凹点, 最终产生凹槽, 增大了轴承的机械磨损, 降低了机械寿命。

## 5. 抑制轴承电腐蚀的措施

根据轴电流产生的原因及电流路径, 抑制轴承电腐蚀采取优化措施主要是从两个方面考虑: 一是消除轴电压的产生来源为出发点, 如果没有轴电压, 也就不可能会有轴承电流的存在, 就可以从根本上消除轴承电流带来的损伤。二是从增加轴承电流其它泄放回路的角度来保护轴承。因此可以采取以下两种方法来抑制轴承电腐蚀。

### 5.1. 优化逆变器负极 EMI 电容选型

结合车辆的结构及接线原理, 对车辆轴电流电路进行简化, 如图 4 所示, 选择合理的变流器 EMI 电容可以为轴电流提供良好的通路, 从而使轴电压减小。

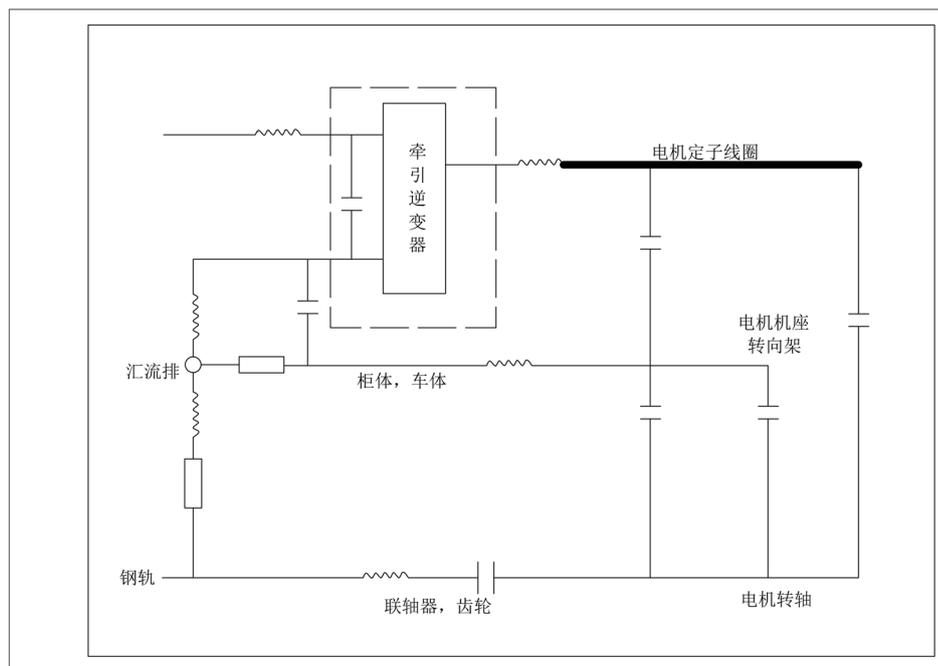
在负极和逆变器之间选择合适参数的 EMI 电容, 该电容必须是无感电容。电容的具体安装位置应尽可能接近逆变器的负极, 接线尽可能短, 采用软铜绞线, 尽量降低电路的电感值。目的是为轴电流提供良好的通路, 从而使轴电压减小。



**Figure 2.** Dark wavy grooves in the bearing area of the outer ring raceway  
**图 2.** 外圈滚道承载区发暗的波纹状凹槽



**Figure 3.** Ring-shaped pits after enlargement of the bearing area of the outer ring raceway  
**图 3.** 外圈滚道承载区放大后呈现的环形坑



**Figure 4.** Simplified circuit of vehicle axle current  
**图 4.** 车辆轴电流简化电路

## 5.2. 调整接地方案

为了增加轴承电流的其它泄放回路，可以通过改进现有的接地方案实现。通过调整接地电阻的接入位置及数量，将接地电阻电气位置改为安装在转向架构架与轴端接地装置之间，降低线路的感抗值，为轴承电流提供低抗支路，从而使轴承电流减小。优化后的牵引电机接地如图 5 所示。

## 6. 车辆保护接地的改进方案

A 车的保护接地方案不变，B、C 车各增加一个保护性接地点和一个  $30\text{ m}\Omega$  的保护接地电阻，同时将既有接地电阻和新增接地电阻的电气位置从车体与轴端接地装置之间，改为安装在转向架构架与轴端接地装置之间。

以 B 车为例，将原有的车体保护接地电阻 11R202 与车体接地汇流排的 99-XT276 接点连接取消，改为一端与一位端转向架构架直接相连，另一端通过接地汇流排 99-XT278.1 接点与轴端接地装置连接。新增的车体保护接地电阻 11R201 一端直接与二位端转向架构架相连，另一端通过汇流排 99-XT272.2 接点与轴端接地装置相连。改进后的 B 车接地原理如图 6 所示。

## 7. 改进方案验证

为了验证逆变器 EMI 选型和接地电路调整对降低轴承电压的效果，车辆在试验过程中以全牵引全常制动、 $40\text{ Km/h}$  的条件下运行，对轴电压进行了测量。测试结果汇总如表 1 所示。

根据试验测试结果可以看出，在保持原有接地方式和 EMI 电容值的情况下，电机轴承电压最高达到  $126\text{--}142\text{V}$ ，电机轴承存在电蚀的风险。

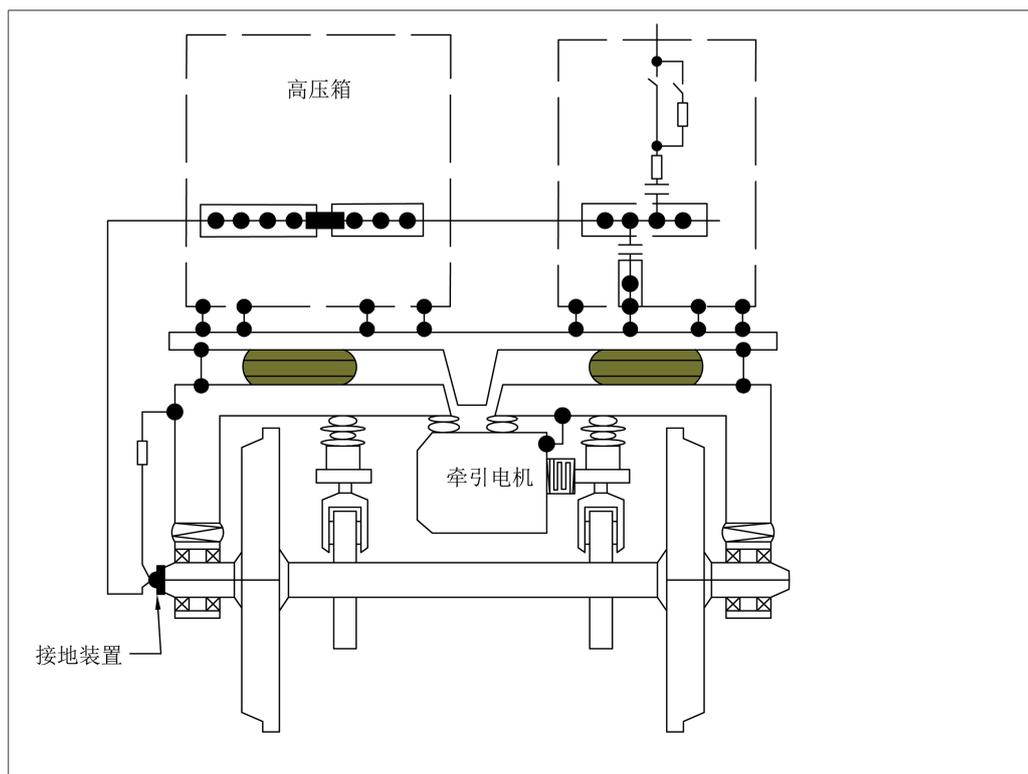
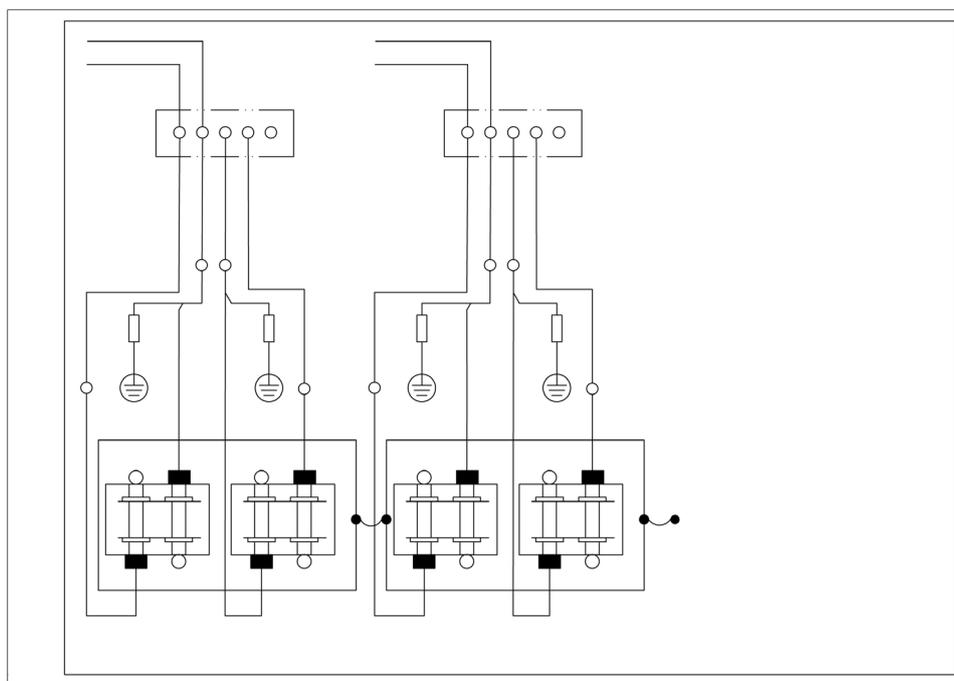


Figure 5. Traction motor grounding principle diagram

图 5. 牵引电机接地原理图



**Figure 6.** Improved work grounding schematic diagram

**图 6.** 改进后的车辆工作接地原理图

**Table 1.** Test results of bearing voltage under different combinations

**表 1.** 不同组合情况下轴承电压测试结果

接地方式	EMI 电容值	电机轴承电压峰值(V)	
原接地方式	54 uF	126	-142
	0.68 uF	117	-115
	0.5 uF	111	-138
	1 uF	121	-111
增加 1 个 30 mΩ 接地电阻并 调整接地线数量和位置后	54 uF	83	-92
	0.68 uF	85	-80
	0.5 uF	85	-101
	1 uF	87	-76

说明：原车 EMI 电容值为 54 uF。

在保持原有接地方式下，选用 EMI 电容调整为 1 uF 后，轴承电压有明显降低，根据试验数据可以看出轴承电压降低了 30 V 左右。说明采用优化逆变器 EMI 电容降低轴承电压的方法是正确的。

在保持原有 EMI 电容值，改进接地方案的情况下，轴承电压也有明显降低，根据试验数据可以看出轴承电压降低了 50 V 左右。说明采用调整接地方案降低轴承电压的方法也是正确的。

在调整逆变器 EMI 电容值同时改进保护接地方案后，牵引电机轴承电压降至 87 V，基本上消除了牵引电机轴承的电蚀隐患。

## 8. 结束语

优良的接地方案是地铁列车安全稳定运行的保障，关系着人身安全和设备的可靠运转。本文主要以

深圳地铁 1 号线车辆接地系统设计为基础, 结合实际运营过程中轴承电蚀的故障问题, 对故障原因和接地系统进行了分析, 并提出了优化的接地系统设计方案。

改进后的保护性接地方式在减小牵引电机轴承电压, 防止牵引电机轴承电蚀方面起到了很好的作用, 对以后新造列车保护性接地设计也起到了很好的提醒和借鉴作用。

## 基金项目

中国铁道科学研究院院基金课题(1551SZ2805)。

## 参考文献

- [1] 唐朝辉, 张丽勇, 查小菲. 地铁车辆接地技术研究[J]. 中国新技术新产品, 2013(2): 16-17.
- [2] EN 50153-2002 铁路应用 - 机车车辆电气隐患防护的规定[S].
- [3] 范彪. 广州地铁二号线 A5 型车牵引电机轴承电蚀问题调查分析及解决措施[J]. 机电工程技术, 2017(2): 134-138.
- [4] 李恩龙, 于青松. 城市轨道交通车辆接地方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012(8): 139-140.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)