

地铁列车牵引系统速度传感器故障分析

王延金

江苏新誉阿尔斯通牵引系统有限公司, 江苏 常州 213166

[摘要] 牵引系统速度传感器是地铁列车牵引系统的重要组成部分, 其稳定、可靠的工作对于列车的正常运行至关重要。文中从速度传感器的工作原理级牵引系统对速度传感器信号的检测机制入手, 结合深圳 2&5 号线的速度传感器信号实测情况, 对牵引速度传感器故障进行全面、深入的探讨和分析, 为当前牵引系统速度传感器故障的分析及处理提供相关参考。

[关键词] 地铁; 牵引系统; 牵引控制系统; 速度传感器; MCM

DOI: 10.33142/ucp.v1i5.14442

中图分类号: TH73

文献标识码: A

Fault Analysis of Speed Sensor in Subway Train Traction System

WANG Yanjin

Jiangsu Xinyu Alstom Traction System Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213166, China

Abstract: The speed sensor of the traction system is an important component of the subway train traction system, and its stable and reliable operation is crucial for the normal operation of the train. Starting from the working principle of speed sensors and the detection mechanism of speed sensor signals in traction systems, this article comprehensively and deeply explores and analyzes the faults of traction speed sensors based on the measured speed sensor signals of Shenzhen Line 2&5, providing relevant references for the analysis and handling of current traction system speed sensor faults.

Keywords: subway; traction system; traction control system; speed sensor; MCM

引言

随着我国城市化进程的逐步深入, 地铁逐渐成为城市交通的重要公共交通工具, 其智能化、绿色化、舒适化的显著优势, 其在城市交通中有着不可替代的地位, 其系统的稳定性和安全性也愈发重要。牵引速度传感器是地铁列车的重要组成部分, 其稳定可靠的工作对于列车的正常运行至关重要。列车牵引速度传感器故障, 极端情况可能导致车辆冲击、无牵引力等情况发生, 影响列车运行的安全和稳定。

深圳 2&5 号线增购列车, 自运营以来, 多次报出过牵引速度传感器故障, 为保证车辆的安全运行, 对 SZ2&5 速度传感器信号进行了多次现场测试, 并结合速度传感器原理及列车控制系统 (DCU) 速度传感器处理电路对故障进行分析, 以期找出故障的根本原因, 彻底解决速度传感器故障的问题。

1 列车测速原理解析

1.1 速度传感器速度信号的产生

深圳 2&5 号线增购列车速度传感器是选用的速度传感器类型为宁波时代的双通道霍尔转速传感器, 型号为 TQG19E (1.3m), 被测转动物体为模数等于 2 的导磁性齿轮它由永久磁钢、磁能转换器、放大整形电路、外壳、屏蔽电缆线、电连接器等组成, 输出信号波形为方波, 与交通工具上的测速控制装置配合使用, 如下图 1 为速度传感器安装示意图。

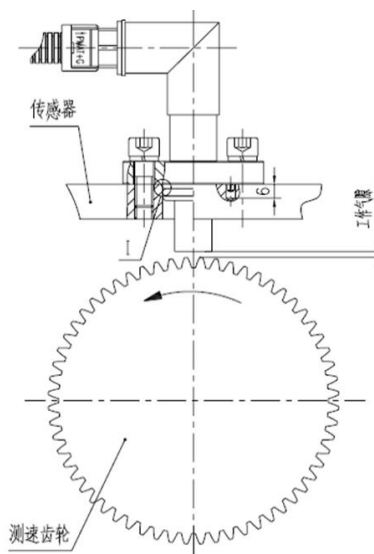


图 1 速度传感器安装示意图

速度传感器可感应导磁上凸起的齿或者是凹下的槽, 当金属齿经过霍尔传感器前端时, 引起磁场变化, 霍尔元件检测到磁场变化, 并转换成 1 个交变电信号, 传感器内置电路对该信号进行放大、整形, 输出良好的矩形脉冲信号^[1]。速度传感器最终输出为相位差为 $90^\circ \pm 30^\circ$ (齿轮转向如图 1 所示, 通道 1 超前通道 2), 占空比为 $50\% \pm 20\%$ 的一对方波信号。速度传感器的对外电气接口及输

出信号示意，如下图2所示。

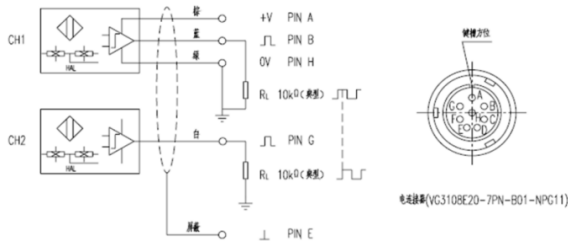


图2 速度传感器对外电气接口及输出信号示意

此速度传感器采集列车的速度信号及方向信号，并通过影响将信号传递给牵引系统。牵引系统根据速度信号，控制列车的牵引与制动^[2]。

1.2 控制系统对速度信号的接收及处理

速度传感器信号通过连接器最终送入到DCU之中，并进行相应滤波和信号转换。通过判定一对脉冲信号的相位超前滞后情况，确认列车当前的运行方向，通过对脉冲频率的处理计算，获得列车的运行速度。DCU内部速度传感器信号的处理电路如下图3。

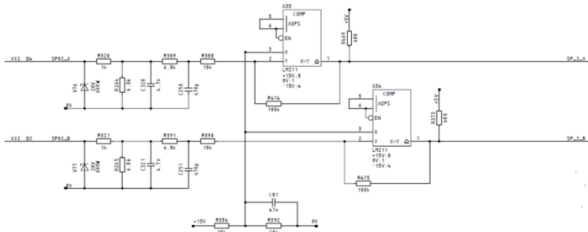


图3 控制系统对速度传感器信号处理电路

根据图3电路，此处理电路将输入的15V电平的速度传感器信号转换成了5V电平信号送给主控芯片，并做了滞回处理^[3]。滞回处理后的信号，虽然会使得信号略有延时，但是会提高信号的抗干扰能力。处理后理论上，当速度传感器信号由低升高至7.075V时，输出变为高电平；当速度传感器信号由高降低至8.0386V时，输出变为低电平。实际使用过程中，由于器件差异，电源供电的差异等可能与理论值存在一定程度的偏差。

DCU主芯片接收到处理过的速度传感器信号后，通过计算接收到的速度信号的频率，可折算出当前的列车速度。而且DCU主芯片会通过速度信号的情况解析出列车轴承转速的变化率等信息，从而判定接收到的速度信号是否正常，并进行判断是否触发保护。

1.3 常见的速度传感器故障原因

在地铁列车中，常见的速度传感器故障原因总结下来，主要可以分为如下几个方面^[4]：

- (1) 速度传感器本身故障；
- (2) 测速齿轮缺陷；
- (3) 插头有问题（插头松动，插针缩针）；
- (4) 控制单元故障；
- (5) 电缆有问题。

2 SZ2&5 报出速度传感器故障的测试

2.1 SZ2&5 速度传感器故障现象描述

根据列车上线运行以来的故障数据信息，深圳2&5增购列车都有出现过速度传感器故障，主要表现为运行过程中闪报速度传感器故障，并未封锁MCM，未影响列车运行。

2.2 SZ2&5 现场速度传感器信号测试

针对速度传感器报故障的列车，使用示波器现场进行跟车对速度传感器信号的测试。测试方案说明如下：

(1) 选择速度传感器故障报出最多最严重的车辆进行测试；

(2) 将测试电缆（三通线）替代原来的速度传感器信号传输线，并将信号线引到车上使用示波器进行测量。测试电缆替换方案示意如下图4，三通电缆替代原269-1和270-1电缆；

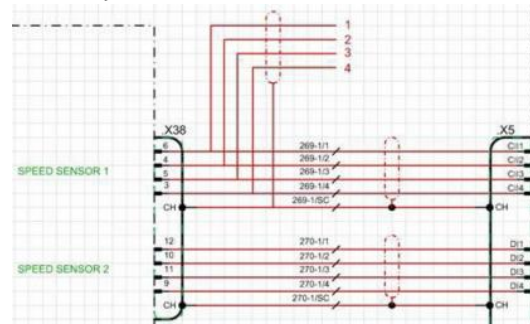


图4 测试电缆布置示意图

(3) 线缆更换完成后，确认车辆网络和信号正常，确认示波器可正常测量到有效的速度传感器信号，示波器采样率设置不低于200k/s；

(4) 列车正线进行测试，示波器测试速度传感器信号的状态；

(5) 测试完成，列车还原，并确认还原后列车正常。

根据上述测试方案，测试出列车运行过程中，速度传感器信号会偶发异常现象，如下图5。

如上图红色标准所示，在列车运行过程中，偶尔会出现速度传感器信号异常，此异常波形可能触发硬件的误判限值，从而导致控制系统闪报速度传感器故障。

2.3 针对拆解下的故障齿轮箱测试速度传感器信号

针对深圳2&5号线的速度传感器故障，现场拆解一台故障齿轮箱用于故障分析判断。为判定速度传感器的故障根源，对于现场拆解下的速传故障齿轮箱进行信号对比测试和拆解分析。速度传感器测试线路布置图如下图6所示。

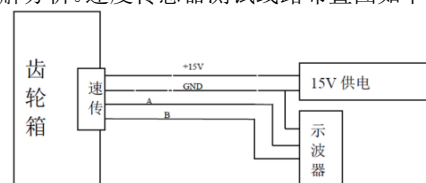


图6 故障齿轮箱速度传感器信号测试布置图

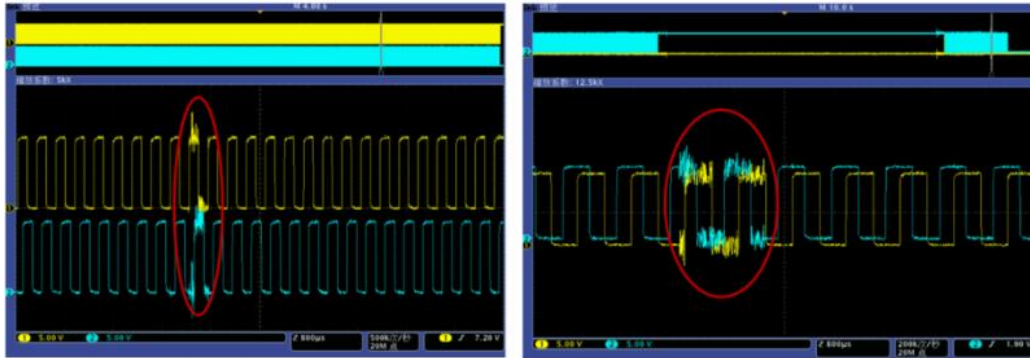


图5 现场测试速度传感器信号波形

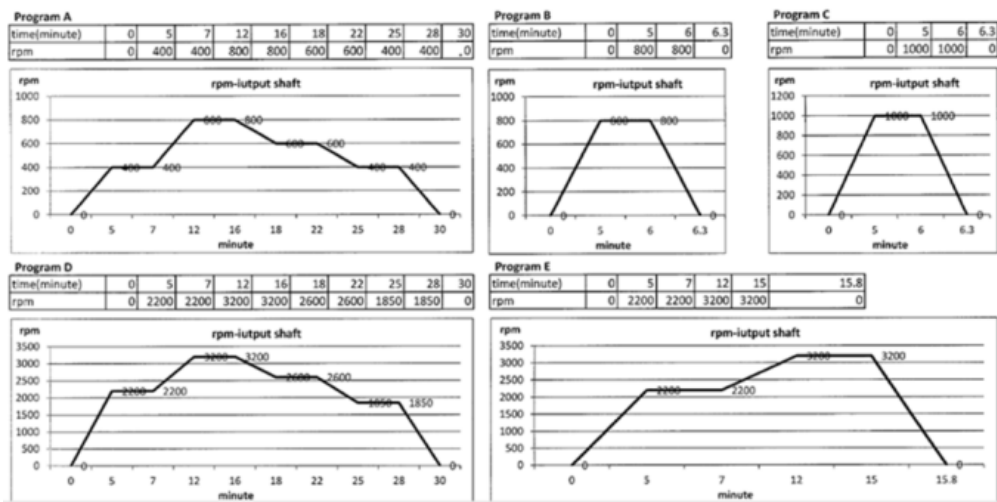


图7 齿轮箱速度传感器对比测试方案对应跑和曲线

根据实际情况，制定的测试方案如下表1所示。

表1 故障齿轮箱速度传感器对比测试方案

试验序号	齿轮箱	试验内容	程序代号
1	故障齿轮箱	带轮饼低速完整程序	A
2		带轮饼输入轴最高速 800rpm 惰性（电机断电）	B
3		带轮饼输入轴最高速 1000rpm 惰性（电机断电）	C
4		不带轮饼低速完整程序	D
5		不带轮饼输入轴最高速 3200rpm 惰性（电机断电）	E
6	全新齿轮箱	带轮饼低速完整程序	A
7		带轮饼输入轴最高速 800rpm 惰性（电机断电）	B
8		带轮饼输入轴最高速 1000rpm 惰性（电机断电）	C
9		不带轮饼低速完整程序	D
10		不带轮饼输入轴最高速 3200rpm 惰性（电机断电）	E

其对应的齿轮箱跑和曲线如下图7。

根据对比测试的实际情况，在故障齿轮箱上，所有程序在运行时，均会出现传感器信号异常的现象测试波形如下图8所示，全新齿轮箱上测试则无此异常现象，由此可见，故障齿轮箱应确实存在异常。



图8 故障齿轮箱上测试速度传感器异常波形

为进一步确认故障位置，将两个故障齿轮箱中的速度传感器进行对调，重复上述跑合试验，故障未转移，由此可排除速度传感器为导致信号波形异常根本原因的

可能性。

对故障返回的齿轮箱，进行拆解分析，其中确实发现有齿轮破损的情况，图片如下图 9：



图 9 齿轮箱拆解检查齿轮破损图片

对故障齿轮箱破损齿轮进行更换后，重新进行上述跑合测试，速度传感器信号正常，未再出现异常波形。由此判定齿轮箱内部齿轮损坏是闪报速度传感器故障的根本原因。

3 速度传感器故障及风险分析评估

3.1 速度传感器故障原因分析

针对速度传感器故障，通过测试可见在列车运行过程中，速度传感器信号确实会偶尔出现异常干扰的情况，而且根据现场的情况，结合速度传感器信号硬件信号处理逻辑和软件处理，并非每次测得波形异常时都会报出故障，大部分的异常都已经被 DCU 的软件和硬件滤掉。

根据控制系统速度传感器软件逻辑及故障逻辑分析：送入到 DCU 的速度传感器信号经 FPGA 处理后，送入 DSP。DSP 每 1ms 读取来着 FPGA 的速度传感器信号沿，并根据接收到的信号脉冲数量来计算当前的速度及与上一时刻的速度增量，当检测到转速突变大于 12rad/ms 或者检测到连续两次计算出的加速度大于 6.28rad/ms 时，会认为速度传感器失效，并报出故障信息。

结合测试情况，当出现干扰信号时，若信号干扰脉冲过大，即低电平理论上超过 7.075V，高电平理论上超过 8.0386V 时，干扰信号就会产生出异常的脉冲信号，并送入到 FPGA，FPGA 自身软件虽也设置了平均滤波来滤除高频干扰，但是对于已经处理成脉冲的信号由于频率并不是非常高，滤波效果不明显，导致可能会出现误报保护的情况出现。

导致出现此干扰的原因，从多次测试的情况并结合其他项目的情况来看，振动、EMC 干扰以及齿轮箱异常单独或叠加作用都有可能造成此干扰的出现并进而报出速度传感器故障。而针对此次故障经排查后确认为齿轮箱破损导致。

3.2 速度传感器故障风险评估及处理建议

列车上当前速度传感器配置为：1 个 MCM 采集 2 个转向架上的 4 对速度传感器通道信号。列车运行时，只要有 1 对速度传感器信号的 A&B 通道正常时，就不会封锁 MCM，即只有 4 对速度传感器信号同为故障信号时，才会进行封锁 MCM。因此按照此逻辑，速度传感器故障导致 MCM 封锁条件较为严苛，且做了 4 组冗余处理，单通道的速度传感器故障对 MCM 的工作影响不大。

根据测试的情况及其他项目的经验，建议对出现的频繁报故障的齿轮箱进行齿轮检查和必要时进行更换；软件根据实际情况也可降低触发速度传感器故障的灵敏度；若有必要，也可针对故障进行进一步的振动测试、干扰测试、信号质量测试并进行相应分析。

4 结语

针对深圳 2&5 速度传感器故障，通过原理分析、对比测试及拆解测试等一系列工作后，确认本项目速度传感器故障原因为齿轮箱损坏。速度传感器信号的正常检测关乎列车运行的稳定与安全，本文针对深圳 2&5 号线的速度传感器故障的分析希望能为其他类似故障提供一定参考。

[参考文献]

- [1] 邱新锋, 张颖. 北京地铁 14 号线速度传感器故障探究 [J]. 现代城市轨道交通, 2017, 12(11): 4-5.
- [2] 刘刚. 广州地铁 5 号线直线电机列车牵引速度传感器故障分析与研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013, 16(8): 3-4.
- [3] 康华光. 电子技术基础: 模拟部分 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [4] 马燕, 全瑞琴, 刘洋. 地铁车辆速度传感器通道故障分析及处理 [J]. 内燃机与配件, 2020, 11(10): 11-13.
- [5] 童敏明, 唐守峰, 董海波. 传感器原理与检测技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

作者简介：王延金（1987.12—），毕业院校：西南大学，所学专业：自动化（控制方向），当前就职单位：江苏新誉阿尔斯通牵引系统有限公司，职务：硬件研发工程师，职称级别：电子中级工程师。