

北京地铁八通线司机控制器故障原因分析及对策研究

邬春晖¹ 李 瀚²

(1. 北京市地铁运营有限公司运营二分公司, 100043, 北京; 2. 株洲菱创机电设备有限公司, 412007, 株洲//第一作者, 高级工程师)

摘 要 对北京地铁八通线司机控制器使用过程中警惕开关、牵引制动开关信号异常进行了故障研究。在已有的设计基础上对司机控制器警惕及牵引制动开关的工作工况进行建模仿真分析及对比验证, 得出在其开关控制的继电器线圈侧并联肖特基二极管能有效降低通断时继电器线圈的电压波动, 并缩短继电器的动作时间, 改善警惕及牵引制动开关的工作条件。同时在现有设计上通过增大司机控制器牵引、制动开关信号的过渡角度, 消除开关信号重叠区能有效解决司机控制器牵引制动信号叠加故障。新的设计方案提高了司机控制器警惕及牵引制动开关的工作可靠性, 有效解决了现有设计故障频发的问题, 提高了北京地铁八通线的运行可靠性。

关键词 北京地铁八通线; 司机控制器; 故障原因; 对策

中图分类号 TM571.2; U231

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.06.036

Cause Analysis of Beijing Subway Ba Tong Line Master Controller Failure and Countermeasures

WU Chunhui, LI Han

Abstract The alert switch failure and abnormal traction braking switch signal of the master controller on Beijing Subway Ba Tong Line are studied. Based on the existing design, the working conditions of the master controller alert switch and traction braking switch are modeled, simulated, analyzed and comparatively verified. It is found that a Schottky diode connected in parallel with the relay coil on the switch-controlled side can effectively reduce relay coil voltage fluctuation during switching and shorten relay action time, improving working conditions for alert switch and traction braking switch. Additionally, by increasing the transition angle of the master controller's traction/braking switch signal and eliminating the signal overlapping area, the superposed failure of the master controller traction braking signal can be effectively solved on top of the existing design. The new design scheme improves the working reliability of the master controller alert switch and traction braking switch, effectively solving the problem of frequent

failures in the existing design while elevating the Beijing Subway Ba Tong Line operation reliability.

Key words Beijing Subway Ba Tong Line; master controller; failure cause; countermeasure

First-author's address The Second Operation Branch Affiliated to Beijing Mass Transit Railway Operation Co., Ltd., 100043, Beijing, China

司机控制器作为控制列车牵引、制动的主令设备, 一般通过其上的手柄控制开关实现信号的输出。各信号通过电缆传输给车辆控制网络, 车辆控制网络通过判断比对各信号完成牵引、制动指令的实施。北京地铁八通线列车司机控制器的输出信号分为开关信号与 PWM(脉冲宽度调制)信号, 其警惕及牵引制动开关信号在运营过程中出现信号不稳定的情况, 影响了车辆的正常运营。

1 司机控制器故障介绍

北京地铁八通线列车司机控制器由钥匙开关、换向手柄及牵引/制动手柄构成。其中, 钥匙开关用来激活车辆, 换向手柄用来向车辆网络发出向前或向后的行驶指令, 牵引/制动手柄控制司机控制器提供车辆牵引/制动的开关信号及 PWM 信号。司机控制器牵引/制动手柄上集成警惕握柄, 司机使用司机控制器驾驶车辆时必须一直按压警惕握柄, 当释放警惕握柄超过 6 s, 车辆则开始报警提示并进行制动。

北京地铁八通线在 2019—2021 年运行期间司机控制器共计发生故障 26 项, 其中影响车辆运营的主要为: 警惕开关故障 6 项, 牵引制动叠加 14 项。

1.1 警惕开关故障现象

司机控制器的警惕开关及牵引/制动开关信号通过磁簧管的开/闭实现。其构成如图 1 所示。通过按压磁簧管内部的磁铁靠近磁簧管, 从而使磁簧

管导通,当松开握柄时,握柄在弹簧的作用下远离磁簧管,从而使磁簧管断开。

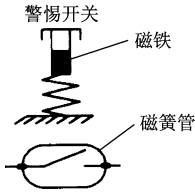


图1 磁簧管构成

Fig.1 Composition of magnetic clarinet

警惕开关使用的磁簧管型号为 MK11-1A66B,其电气参数见表1。

表1 磁簧管电气参数取值

Tab.1 Values of magnetic clarinet electrical parameters

| 参数 | 取值 |
|-----------|-----|
| 额定功率/W | 10 |
| 开关电压最大值/V | 200 |
| 开关电流最大值/A | 0.5 |
| 承载电流最大值/A | 1.0 |

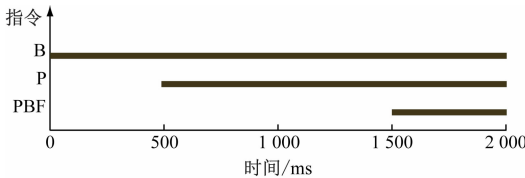
警惕开关故障情况如下:①警惕握柄松开后,其信号不断开;②警惕开关信号时有时无。

1.2 牵引制动叠加的故障现象

北京地铁八通线列车司机控制器牵引/制动手柄分为牵引(P1—P4)、惰行(N)及制动(B1—B7、FB),共13个级位。牵引制动叠加故障属于指令异常(牵引指令与制动指令的重复),均发生在ATO(列车自动运行)工况。发生故障的具体情况如下:

- 1) 停靠车站,将司机控制器手柄置于B1级位;
- 2) 驶离车站,将司机控制器手柄置于N级位;
- 3) 列车开启ATO模式;
- 4) 列车开始运行后,将司机控制器首次置于B1级位。

图2为牵引制动叠加时的数据记录。



注: B 为制动指令; P 为牵引指令; PBF 为牵引/制动指令异常。

图2 牵引制动叠加时的数据记录

Fig.2 Data record of traction braking superposition

2 司机控制器故障原因分析及对策

2.1 警惕开关故障原因分析

经调查司机控制器警惕开关与车辆端的继电

器线圈相连,通过警惕开关的开闭来控制继电器的动作。继电器的线圈为电磁阀结构,当警惕开关给电磁阀通电时,电能转化为磁能驱动继电器动作;当警惕开关断开时,流过线圈的电流迅速下降,电磁阀的磁场也逐渐下降,当磁场降到一定值时,继电器的主回路断开。由于继电器线圈磁场的变化,线圈中会产生感应电动势,其方向与施加在电磁阀两端的电压相反^[1]。该反电动势的表达式如下:

$$V = -L \cdot \text{d}I/\text{d}t \quad (1)$$

式中:

V ——继电器线圈产生的反向电压;

L ——线圈电感;

I ——电流;

t ——时间。

从式(1)可以看出:在警惕开关断开瞬间,将在警惕开关触点两端形成很高的反向电压,由于此时开关触点接触面积减小,接触电阻增大,在电压与电流的作用下,触点接触处熔化形成金属熔池,容易造成触点熔接或电接触面损坏,从而使警惕开关不断开或接触不良。

在继电器中,由于磁路系统的非线性以及吸合、释放过程中气隙的变化,故继电器的电感为变量^[2]。式(1)的计算十分繁杂,厂家一般亦无线圈电感数据,故在研究实际问题时,有效的解决办法是通过实际测量及仿真进行判断。

通过使用示波器对磁簧管两端电压进行监测,记录警惕开关断开瞬间的电压,如图3所示。

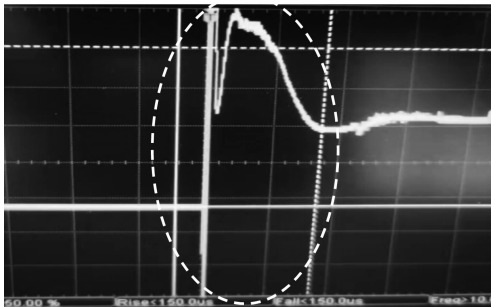


图3 警惕开关断开瞬间的电压波形截图

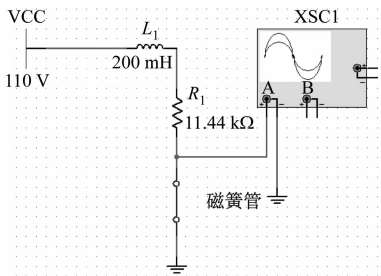
Fig.3 Screenshot of voltage waveform at the moment of alert switch disconnection

图3虚线圈内显示警惕开关磁簧管两端电压在断开瞬间有较大的波动。电压峰值达到400V,该电压值已经远超出表1中磁簧管的最大开关电压(200V),该电压的冲击印证了上述线圈电感对警

惕开关触点的影响判断。

调查磁簧管的工作条件如下:①工作电压——DC 110 V(工作电压波动范围为 77 ~ 132 V);②负载——继电器线圈(电阻为 11.44 kΩ)。

对警惕开关磁簧管受电压冲击进行进一步分析,可将警惕开关磁簧管采用简单的合闸开关替代,继电器线圈采用 200 mH 的电感及与其电阻值一致的 11.44 kΩ 电阻替代。使用 Multisim 软件建立图 4 所示的仿真模型并进行仿真。该仿真模型为理想模型,故其中电感 L_1 需设置一定的漏电才能模拟出与实际工况较为接近的曲线。A 通道电压波形仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见,当控制开关闭合时,电压波形基本正常,但当开关断开瞬间,电感将产生很高的电压波动,与实际测量波形基本一致。



注:VCC 为电源电压; L_1 为继电器线圈电感; R_1 为继电器线圈电阻;XSC1 为示波器。

图 4 警惕开关放电电路仿真模型

Fig. 4 Simulation model of alert switch discharge circuit

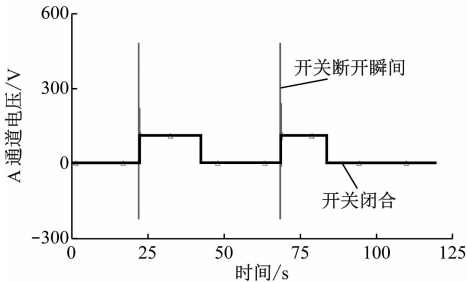


图 5 A 通道电压波形仿真结果

Fig. 5 Simulation results of A passage voltage waveform

2.2 牵引与制动叠加原因分析

司机控制器牵引/制动手柄的级位由其下方的棘轮给出,棘轮的结构如图 6 所示。转动手柄时,棘轮推动滚轮进入凹槽来固定手柄并提供级位感。经测量,当司机控制器的手柄从 N 级位向制动 B1 级位或 P1 级位切换时,其开关过渡区闭合信号存在偶尔重叠的情况^[3]。当出现牵引及制动的开关信号重叠时,车辆网络就会显示牵引与制动叠加故

障信号。

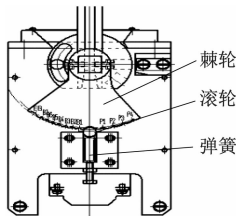


图 6 司机控制器牵引/制动手柄棘轮结构

Fig. 6 Master controller traction/braking handle ratchet structure

司机控制器牵引/制动开关信号也是通过磁簧管控制后端继电器的开闭给车辆提供牵引/制动指令。磁簧管型号为 PPUU-G10,其最大开关电压为 250 V,最大开关电流为 3 A。实际测量的磁簧管断开瞬间继电器辅助线圈的波峰电压为 203.5 V,在承受范围之内,如图 7 所示。

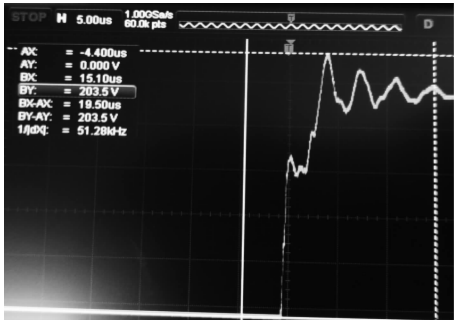


图 7 牵引/制动开关断开瞬间电压波形截图

Fig. 7 Screenshot of voltage waveform at the moment of traction/braking switch disconnection

故牵引/制动开关信号叠加的原因只可能是继电器断开时间过慢,或 N 级位向 B1 级位、P1 级位的过渡角度太小导致信号切换时一个开关还未断开而另一个开关就已接通。

2.3 司机控制器故障对策研究

2.3.1 警惕开关整改

结合上述原因分析,为防止继电器线圈电感的影响,需在继电器线圈两端并联放电电路,通过该放电回路将电能转化为热能释放。因此,可在继电器线圈上并联放电二极管来形成电流回路,以消除磁簧管断开瞬间继电器线圈电流不能突变产生的反电动势^[4-5]。

假设继电器线圈通电稳定时,其线圈电流为 I_0 ,线圈电阻为 R_0 ,二极管电阻为 R_1 。在 $t = 0$ 时断开警惕开关磁簧管,此时通过式(1)可推算出电流为:

$$I = \frac{V}{R_0 + R_1} = \frac{-L}{R_0 + R_1} \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

由式(2)变换可得:

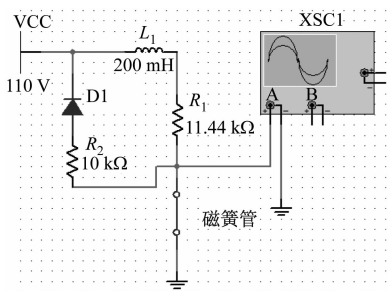
$$I = I_0 e^{\frac{R_0 + R_1}{L} t} \quad (3)$$

从式(3)可以看出:当断开警惕开关磁簧管时,线圈电流是按指数衰减的。令 $I/I_0 = 1/2$, 即使得电流衰减到原来的 $1/2$, 可得:

$$t = \ln 2 \frac{L}{R_0 + R_1} = 0.7 \frac{L}{R_0 + R_1} \quad (4)$$

从式(4)可以看出, $R_0 + R_1$ 越大, t 越小。二极管的正向电阻很小, 而继电器线圈的电阻值已达到 $11.44 \text{ k}\Omega$ 。根据式(4), 如果使用二极管加电阻的方式并入继电器线圈后似乎电感能量消除越快。

采用放电二极管与电阻后, 警惕开关放电电路仿真模型如图8所示。A通道电压波形仿真结果如图9所示。由图9可知, 随着 R_2 的增大, 反电动势的幅值也会增大。



注: R_2 为继电器线圈电阻; D1 为二极管。

图8 采用二极管与电阻后警惕开关放电电路仿真模型

Fig. 8 Simulation model of alert switch discharge circuit after adopting diode and resistance

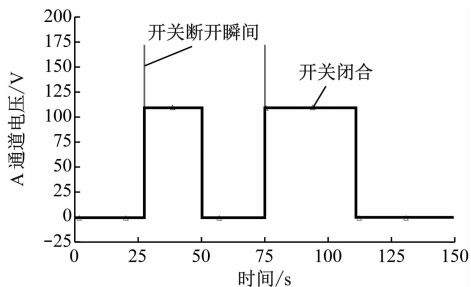


图9 采用二极管与电阻后A通道电压波形仿真结果

Fig. 9 Simulation results of A channel voltage waveform after adopting diode and resistance

因此, 感性负载放电电路中是否引入 R_2 需兼顾放电时间和降低反向电动势幅值两个因素。去除图8仿真模型中的电阻 R_2 , 仿真结果见图10。

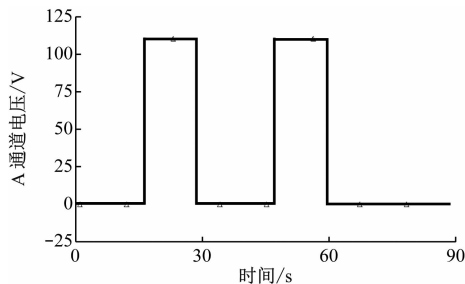


图10 去除 R_2 后A通道电压波形仿真结果

Fig. 10 Simulation results of A channel voltage waveform after removing R_2

从图10可以看出, 去除 R_2 后, 开关断开瞬间的电压幅值得到了较大改善。因此, 放电时间过长电流消散慢容易使警惕开关触点过热, 也会延长继电器开关的动作时间, 而反向电动势过高则容易形成拉弧放电^[5]。通常情况下, 所选电阻 R_2 不大于线圈电阻。而二极管的选择需保证其正向最大电流 I_{\max} 大于继电器线圈正常工作电流 I_0 , 反向击穿电压 V_{rwm} 大于继电器线圈上的电源电压 E 。通常选择如下: $I_{\max} \geq 1.5 I_0$, $V_{\text{rwm}} \geq 1.5 E$ 。

图8中, 二极管D1可以使用恢复时间更快的肖特基二极管或快恢复二极管。因普通二极管的单向导电特性取决于P型半导体与N型半导体接触形成的PN结, 由于二极管PN结电容的存在, 恢复时间并不太短, 开关断开的瞬间二极管还来不及导通, 也会有较大的电压波动^[6]。而肖特基二极管的单向导电性是由金属与半导体接触形成的, 开关速度快是它的特点。

2.3.2 牵引制动叠加整改

通过式(4)分析, 同样可在牵引/制动继电器端并联肖特基二极管, 以加快继电器线圈中电流的衰减, 缩短继电器动作时间。同时可将棘轮在P1级位、N级位、B1级位之间的切换角度加大(见图11), 使挡位切换时需断开的继电器在需闭合的继电器前完成动作, 消除3个位置互相切换时开关信号的重叠区^[3]。

3 司机控制器整改方案验证

3.1 警惕开关整改验证

结合上述调查分析, 对司机控制器进行如下优化:

1) 取消司机控制器警惕按钮中的磁簧管设计, 采用耐受电压冲击更大的微动开关替代, 如欧姆龙

放大中间挡位的星形轮角度

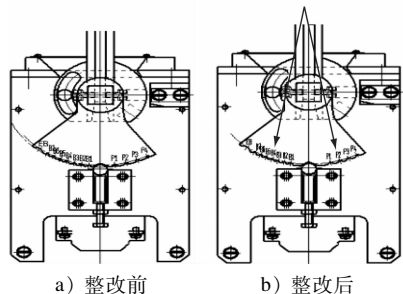


图 11 棘轮过渡区整改前后对比

Fig. 11 Comparison of the ratchet transition zone before and after adaptation

A-20 系列微动开关。

2) 在继电器线圈侧并联 1 个肖特基二极管,如 SR2200。通过测试继电器线圈端电压,其电压波形未再出现较大波动,证明以上整改对策能有效解决现有警惕开关的故障。

3.2 牵引制动信号叠加整改验证

同样,通过在牵引/制动继电器线圈侧并联 1 个肖特基二极管,缩短继电器动作时间,同时加大司机控制器棘轮在 N 级位、B1 级位及 P1 级位的过渡角度,彻底解决手柄在过渡区开关信号重叠。对北京八通线司机控制器进行了为期半年的考核,发现未再出现故障。

4 结语

通过故障调查及一系列改进措施,北京地铁八通线列车目前改进的司机控制器在正线运营中不再出现警惕按钮失效和牵引制动叠加的故障,保障了运营质量。这也说明在对开关器件及继电器选用中,继电器线圈端反向并联二极管能有效降低断开瞬间的感应电动势,降低控制开关的冲击电压,提高控制开关的寿命。同时反向并联二极管给继电器电感线圈提供释放反向电流通路,缩短继电器

的动作时间。对于司机控制器牵引/制动手柄挡位间的过渡间隙需充分考虑控制继电器的动作先后顺序,消除司机控制器手柄挡位间的开关信号的重叠区,能有效避免牵引制动信号重叠故障,提高列车的运行可靠性。

参考文献

- [1] 张松春. 电子控制设备抗干扰技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
ZHANG Songchun. Anti-interference technology and its application in electronic device control[M]. Beijing: China Machine Press, 1995.
- [2] 刘超. 基于有限元法的铁路信号继电器的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
LIU Chao. Research on railway signal relay based on finite element method[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2014.
- [3] 曹斌. 地铁车辆牵引制动指令同时激活故障研究[J]. 轨道交通装备与技术, 2021(3): 42.
CAO Bin. Study on the fault of traction brake command activation of metro vehicles at the same time[J]. Rail Transportation Equipment and Technology, 2021(3): 42.
- [4] 陈一飞. 谈谈无触点开关切断感性负载时的干扰抑制[J]. 电气时代, 1993(6): 3.
CHEN Yifei. Discussion on interference suppression during contactless switch cutting off inductive load[J]. Electric Age, 1993(6): 3.
- [5] 陈君. 直流继电器线圈控制电路对其性能参数的影响[J]. 电器与能效管理技术, 2019(3): 40.
CHEN Jun. Influence of DC relay coil control circuit on its performance parameters[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2019(3): 40.
- [6] 王文学. 信号继电器及检修(中册)[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
WANG Wenxue. Signal relay and maintenance (volume II)[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2000.

(收稿日期: 2021-10-14)

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com