

CRH3G 型高速动车组电气综合柜电缆串扰 问题分析及建议措施

汪星华 郝明远 才 倩

(中车唐山机车车辆有限公司技术研究中心, 063035, 唐山//第一作者, 高级工程师)

摘 要 CRH3G 型高速动车组的车载电气综合柜中安装有电压为 440 V/60 Hz 的动力单元水泵风扇、变压器油泵风扇和牵引通风机的空开,同时也安装了 110 V 直流电压电气设备,且柜内空间有限。为了分析 440 V 的电缆是否会对电气柜内的低压弱电设备造成干扰,建立了空开动作和空开不动作两种情况下 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆的串扰分析仿真模型。仿真结果表明,空开不动作时 440 V 高压输电线路中的信号不会通过线间串扰方式干扰电气柜内的弱电设备,但空开动作时大的瞬态脉冲骚扰信号可能会对 110 V 弱电设备造成干扰。最后基于仿真分析结果,给出了减少线间串扰的电气综合柜布线的建议措施。

关键词 高速铁路; CRH3G 型动车组; 线缆; 串扰; 解决措施

中图分类号 TM246: U226.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.031

Problem Analysis and Suggested Solutions for Cable Crosstalk in Integrated Electrical Cabinet of CRH3G High-speed EMU

WANG Xinghua, HAO Mingyuan, CAI Qian

Abstract Inside the on-board integrated electrical cabinet of CRH3G high-speed EMU installs the ACB (air-circuit breaker) of 440 V/60 Hz power unit hydraulic fan, of transformer oil pump fan and of traction ventilator, as well as 110 V DC voltage electrical equipment. The cabinet space is limited. To analyze whether the 440 V cable will cause interference to low-voltage weak-current equipment inside the cabinet, the analysis simulation model of crosstalk between 440 V AC and 110 V DC cables under conditions of ACB working and not working is established. Simulation results show that the signal in 440 V high voltage electricity transmission cables do not disturb the weak-current equipment in the electrical cabinet through crosstalk interference between cables when ACB is not working. But large transient impulsive disturbance signal may interfere with the 110 V weak-current equipment when ACB is working. Finally, based on the simulation analysis results,

suggested solutions of integrated electrical cabinet wiring for lowering crosstalk between cables are proposed.

Key words high-speed railway; CRH3G EMU; cable; crosstalk; solution

Author's address Technical Research Center, CRRC Tangshan Locomotive & Rolling stock Co., Ltd., 063035, Tangshan, China

在有限的空间中线缆布线对于轨道车辆的电磁兼容性而言是至关重要的。我国的高速动车组布线一般根据 EN 50343—2003《铁路应用 机车车辆布线规则》进行设计。通常情况下,CRH3 型动车组电气柜为 110 V 直流电压线缆空开,但 CRH3G 型高速动车组的车载综合电气柜中装有电压为 440 V/60 Hz 的动力单元水泵风扇、变压器油泵风扇,且牵引通风机空开,此外还布置了 110 V 直流电压空开。虽然通过空开、断路器等开关器件可对电路中的电流进行控制,但当电流超过一定的阈值时,电路中的断路器会自动断开,以避免因通风机温度过高而造成通风机损坏、牵引动力系统故障等问题。随着电流和功率的增大,空开和断路器的接通与断开,以及通风机电控设备、牵引动力设备、变压器及空开等非线性设备的起动均会产生大量的瞬时突变电流,瞬时突变电路进入电路后将形成电磁骚扰,影响低压弱电设备的正常工作。因此,有必要对 CRH3G 动车组的 440 V 电缆是否会与其他电缆之间发生串扰、进而对综合电气柜内的低压弱电电缆造成干扰这一问题进行分析研究。

1 不同电压线缆在综合电气柜内的分布及 所连接设备的电流与功率

1.1 不同电压线缆所连接设备的电流与功率

110 V 直流低压弱电设备主要由 TCU(牵引控制单元)、IGBT(绝缘栅双极型晶体管)脉冲触发控

制信号,其工作电流约为 5 A,预充电阶段的电流约为 7 A(充电时间仅需几秒)。交流 440 V/60 Hz 线缆连接的用电设备有变压器冷却泵和两个动力单元水泵风扇,各设备的电流、功率如表 1 所示。

表 1 交流 440 V/60 Hz 连接设备的电流、功率

Tab.1 Current and power of AC 440 V/60 Hz connected equipment

设备	运行电流/A	起动电流/A	功率/kW
冷却风扇(低速)	2.7	16.5	0.6
冷却风扇(高速)	10.3	70.0	5.1
变压器冷却泵	3.5	17.0	2.5

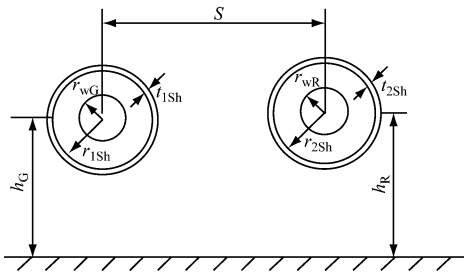
1.2 综合电气柜内不同电压线缆的布置情况

440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆在综合电气柜外两线并行走线的长度为 1 500 mm,在综合电气柜内两线紧贴综合电气柜后面板布线,其平行走线长度为 1 640 mm。440 V 交流电缆所连接的空开安装在综合电气柜右侧壁上的屏蔽箱内,该屏蔽箱长、宽、高的尺寸分别为 518 mm、317 mm、80 mm。

2 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆的参数计算

2.1 线缆分布参数计算

在电路原理图中传输线仅仅是一对理想的连接导线,但在实际使用中传输线具有电阻、电容、电感,如图 1 所示,本文对 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆间传输线模型进行分析。



注: r_{wG} ——440 V 缆线的半径; r_{wR} ——110 V 缆线的半径;
 S ——两根缆线间的距离; h_G ——440 V 缆线距离地面的高度; h_R ——110 V 缆线距离地面的高度; r_{1Sh} ——440 V 缆线屏蔽层的半径; r_{2Sh} ——110 V 缆线屏蔽层的半径;
 t_{1Sh} ——440 V 缆线屏蔽层的厚度; t_{2Sh} ——110 V 缆线屏蔽层的厚度。

图 1 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆间切面示意图

Fig.1 Section diagram of 440 V AC cable and 110 V DC cable

2.1.1 分布电感计算

440 V 缆线的分布电感可由地面上单根导线的分布电感求得:

$$l_{GG} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_G}{r_{wG}}\right) \tag{1}$$

式中:

l_{GG} ——440 V 电缆单位长度的自电感;

μ_0 ——真空磁导率。

110 V 缆线单位长度的分布电感 l_{RR} 为:

$$l_{RR} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h_R}{r_{wR}}\right) \tag{2}$$

440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆之间单位长度的互电感 l_{GR} 为:

$$l_{GR} = \frac{\mu_0}{4\pi} \ln\left(1 + 4 \frac{h_G h_R}{S^2}\right) \tag{3}$$

2.1.2 分布电容计算

110 V 直流电缆屏蔽层与其芯线间电容 C_{R2S} 为:

$$C_{R2S} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(r_{2Sh}/r_{wR})} \tag{4}$$

式中:

ϵ_0 ——真空电容率;

ϵ_r ——线芯电容率。

440 V 电缆屏蔽层与其芯线间电容 C_{G1S} 为:

$$C_{G1S} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln(r_{1Sh}/r_{wG})} \tag{5}$$

2.2 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆终端负载计算

已知 440 V 交流电缆所连接的负载中,最大功率为 8 000 W,最小功率为 2 000 W。根据公式 $P = U^2/R$ (P 为功率, U 为电压, R 为电阻),可计算出其负载阻抗的最大值为 96.8 Ω ,最小值为 24.2 Ω 。当阻抗最小时,线路中的电流最大。

取 110 V 直流电缆两端所连设备的阻抗为匹配阻抗 50 Ω 。因为 110 V 直流电缆控制的空开的额定电流为 2 A,所以若 110 V 直流电缆上存在的干扰信号电流大于 1 A,则空开的控制电路将受到干扰,此时控制电路会因接收到非正常信号而动作。

3 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆间串扰分析

3.1 电气柜外并行线缆串扰分析

在 CST CABLE STUDIO(线缆仿真工作室)软件中建立 440 V/60 Hz 和 110 V 线缆模型,分空开没有动作、空开动作两种情况,对两线间的串扰进行分析。

3.1.1 空开没有动作

空开没有动作情况下所建立的电路模型如图 2

所示。设两线间距为 5 mm,在综合电气柜外两线平行走线距离为 1.5 m。其中:X440_P_1 和 X440_P_2 分别为 440 V 交流电缆的输入端和输出端,在输入端加 440 V、60 Hz 的交流激励源;X110_P_1 和 X110_P_2 分别为 110 V 直流电缆的输入端和输出端,在输入端不加任何激励。记录 110 V 电缆输入端因线间串扰所引起的端口电压和电流。

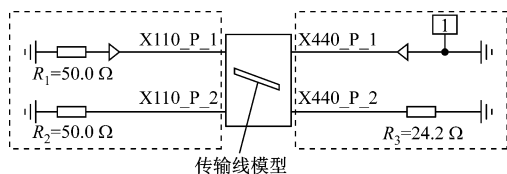


图2 综合电气柜外部空开没有动作下 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆两线间的串扰分析电路模型

Fig.2 Analysis model of crosstalk between 440 V AC cable and 110 V DC cable under condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

由上文可知,当 440 V 交流电缆连接最大功率(8 000 kW)负载时,经计算其负载阻抗为 24.2 Ω,线路中的电流最大。本文将此工况定义为最大功率负载,此时 110 V 电缆输入端的串扰电流波形如图 3 所示。由图 3 可知,110 V 直流电缆上串扰电流的最大值约为 20 μA,远小于 1 A。所以,当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时,在空开不动作的情况下,440 V 交流电缆不会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

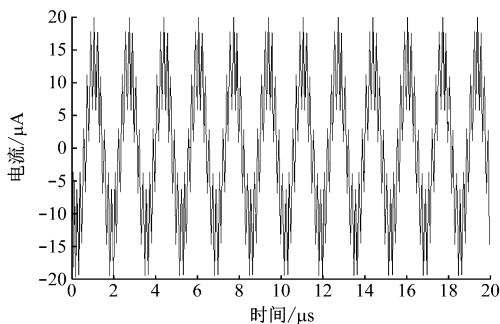


图3 综合电气柜外部空开没有动作下 440 V 交流电缆上承载最大功率负载时 110 V 直流电缆上的串扰电流波形

Fig.3 Crosstalk current waveform on 110 V DC cable when 440 V AC cable bearing maximum power load under the condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

当 440 V 交流电缆连接最小功率(2 000 kW)负载时,其负载阻抗为 96.8 Ω,线路中的电流最小。

将此工况定义为最小功率负载,则此时 110 V 电缆输入端的串扰电流波形如图 4 所示。由图 4 可知,串扰电流的最大值为 20 μA 左右,远小于 1 A。所以,当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时,在空开不动作的情况下,440 V 交流电缆不会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

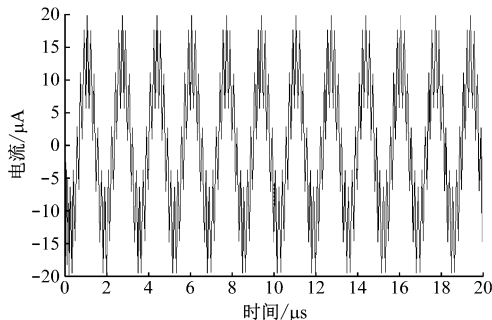


图4 综合电气柜外部空开没有动作下 440 V 交流电缆上承载最小功率负载时 110 V 直流电缆上的串扰电流波形

Fig.4 Crosstalk current waveform on 110 V DC cable when 440 V AC cable bearing minimum power load under the condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

3.1.2 空开动作时

若 440 V 交流电缆控制的空开有瞬态干扰时,则线间串扰的仿真模型如图 5 所示。设两线间距为 5 mm,在综合电气柜外两线平行走线距离为 1.5 m。其中,X440_P_1 与 X440_P_2 为 440 V 交流电缆空开处的输入端和输出端;X110_P_1 和 X110_P_2 为 110 V 直流电缆的输入端和输出端。

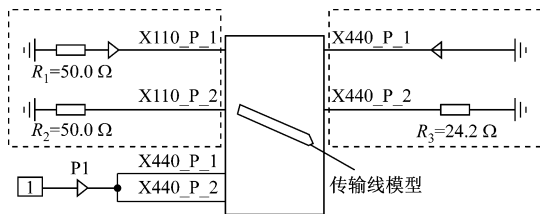


图5 综合电气柜外部空开动作下 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆两线间的串扰分析电路模型

Fig.5 Analysis model of crosstalk between 440 V AC cable and 110 V DC cable under the condition of ACB working and outside integrated electrical cabinet

440 V 交流电缆空开动作时产生的瞬态干扰可用快速瞬变脉冲群信号来模拟。参照 GB/T 17626.4—2006《电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验》,车载设备控制端口对电

快速瞬变脉冲群的抗扰度应达到 1 kV, 脉冲重复频率为 5 kHz。因此, 在 X440_P_1 与 X440_P_2 间加入快速脉冲群, 在 440 V 交流输入端记录该快速脉冲群的电压和电流; 在 110 V 直流电缆的输入端 X110_P_1 处不加任何激励, 记录 110 V 电缆输入端因线间串扰所引起的端口电压和电流。

空开动作时产生的 1 kV 模拟脉冲群信号如图 6 所示。对其中的 1 个脉冲信号进行放大, 其结果如图 7 所示。

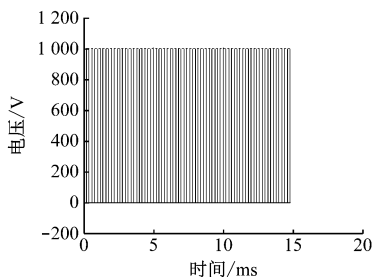


图 6 综合电气柜外部空开动作时产生的 1 kV 模拟脉冲群信号

Fig. 6 1 kV analog pulse group signal that appeared during ACB working outside the integrated electrical cabinet

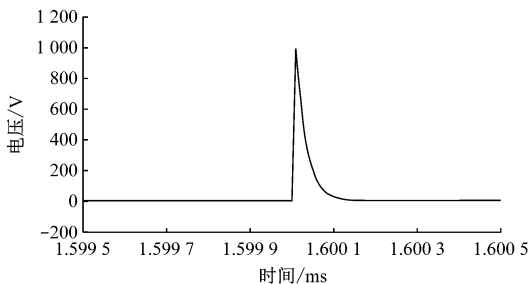


图 7 单个脉冲波形

Fig. 7 Single pulse waveform

当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时, 在 440 V 电缆输入端加上 1 kV 的快速脉冲群信号, 分析 110 V 电缆输入端得到因串扰引起的电流波形。

当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时, 在 440 V 电缆输入端加上 1 kV 的快速脉冲群信号, 分析 110 V 电缆输入端得到由串扰引起的电流波形。

经分析, 空开动作下 440 V 交流电缆上分别承载最大功率、最小功率负载, 在 110 V 电缆上出现的串扰电流的最大值均为 4 A 左右, 均大于 1 A。所以, 当空开动作时, 440 V 交流电缆可能会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

3.2 综合电气柜内部线缆串扰分析

与电气柜外线缆分析类同, 综合电气柜内部线

缆串扰分析也分为空开没有动作、空开动作两种情况。

3.2.1 空开没有动作

440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆在综合电气柜内部有 1 640 mm 的并行走线, 且两线间隔很小 (5 mm), 440 V 交流电缆和 110 V 直流电缆均为 1.5 mm^2 的细线。空开没有动作情况下建立的串扰分析电路模型如图 8 所示。其中: X440_P_1 为 440 V 交流电缆的输入端; X440_P_2 为 440 V 交流电缆的输出端; X110_P_1 为 110 V 直流电缆的输入端; X110_P_2 为直流电缆的输出端。在 X440_P_1 端加上 60 Hz、440 V 的交流激励源, 记录此处的电压和电流。在 110 V 直流电缆的输入端 X110_P_1 处不加任何激励, 记录此处因线间串扰所引起的端口电压和电流。

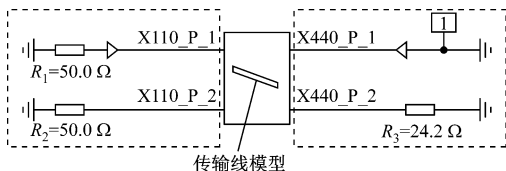


图 8 综合电气柜内部空开没有动作下 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆两线间的串扰分析电路模型

Fig. 8 Analysis model of crosstalk between 440 V AC cable and 110 V DC cable under the condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

当空开没有动作时, 当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时, 在 440 V 交流电缆的输入端加上 440 V、60 Hz 的交流激励源, 在 110 V 直流电缆的输入端不加任何激励, 110 V 电缆的输入端得到因串扰引起的电流波形如图 9 所示。由图 9 可知, 此

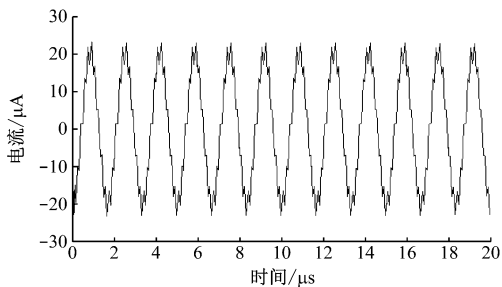


图 9 综合电气柜内部空开没有动作下 440 V 交流电缆上承载最大功率负载时 110 V 直流电缆上的串扰电流波形

Fig. 9 Crosstalk current waveform on 110 V DC cable when 440 V AC cable bearing maximum power load under the condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

时串扰电流的最大值约为 30 μA , 远小于 1 A。所以, 当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时, 在空开不动作的情况下, 440 V 交流电缆不会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时, 110 V 电缆输入端得到由串扰引起的电流波形如图 10 所示。由图 10 可见, 此时串扰电流的最大值约为 15 μA , 远小于 1 A。所以, 当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时, 在空开不动作的情况下, 440 V 交流电缆不会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

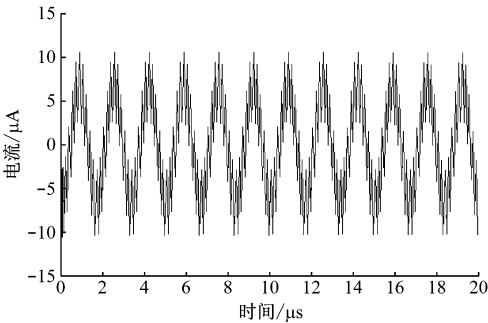


图 10 综合电气柜内部空开没有动作下 440 V 交流电缆上承载最小功率负载时 110 V 直流电缆上的串扰电流波形

Fig. 10 Crosstalk current waveform on 110 V DC cable when 440 V AC cable bearing minimum power load under the condition of ACB not working and outside integrated electrical cabinet

3.2.2 空开动作时

若 440 V 交流电缆控制的空开有瞬态干扰时, 则线间串扰的仿真模型如图 11 所示。其中: X440_P_1 表示 440 V 交流电缆控制的空开瞬态操作点。记录 110 V 直流电缆的输入端由串扰引起的端口电压及电流。空开动作时产生瞬态干扰依然采用 1 kV 的电快速瞬变脉冲群信号来模拟。

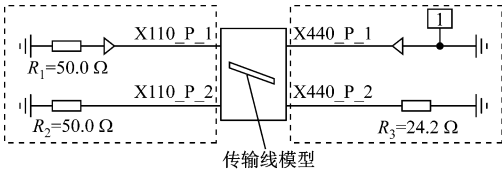


图 11 综合电气柜内部空开动作下 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆两线间串扰分析电路模型

Fig. 11 Analysis model of crosstalk between 440 V AC cable and 110 V DC cable under the condition of ACB working and outside integrated electrical cabinet

当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时, 在

440 V 交流电缆输入端加上 1 kV、间隔为 5 kHz 的快速脉冲群信号, 分析 110 V 电缆的输入端得到因串扰引起的电流波形可知, 串扰电流的最大值为 1.8 A 左右, 大于 1.0 A。所以, 当 440 V 交流电缆连接最大功率负载时, 在空开动作的情况下, 440 V 交流电缆可能会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时, 在 440 V 交流电缆输入端加上电快速瞬变脉冲群信号为 1 kV、间隔为 5 kHz 的快速脉冲群信号, 分析 110 V 电缆输入端得到由串扰引起的电流波形可知, 此时串扰电流的最大值为 1.8 A 左右, 大于 1.0 A。所以, 当 440 V 交流电缆连接最小功率负载时, 在空开动作的情况下, 440 V 交流电缆可能会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。

3.3 线缆间串扰问题的解决方案

由上文可知, 当 440 V 交流电缆中传输 60 Hz 交流信号时, 110 V 直流电缆上的串扰电流很小, 不会对 110 V 直流电缆供电的设备造成干扰。但是, 当 440 V 交流电缆中出现瞬态脉冲信号时, 110 V 直流电缆上的串扰电流很大, 可能会造成 110 V 直流电缆供电的设备误动作。针对这一问题, 可使用以下两种方式解决。

3.3.1 分线槽布线

对综合电气柜外的 1.5 m 并行走线而言, 根据线缆分类原则, 将 440 V 交流电缆及 110 V 直流电缆分置于车底不同的线槽中。综合电气柜内部的布线也可采取加槽处理, 在机柜后面板内部新增 1 个宽度、高度、长度分别为 40 mm、40 mm、1 640 mm 的线槽, 使其紧靠后面板布置, 并距离右侧壁 50 mm。以 440 V 交流电缆的承载最大功率负载为例, 在综合电气柜外部和内部均进行加槽处理后, 分析 110 V 直流电缆上的串扰电流可知, 分线槽布线后 110 V 直流电缆上串扰电流的最大值减小到 0.25 A, 小于 1.00 A, 可保证由 110 V 直流电缆供电的设备不受 440 V 电缆瞬态脉冲信号的干扰。

3.3.2 加大两线间的距离

线间串扰问题均可通过增加两线间的距离来予以减弱。将并行布线的 440 V 交流电缆与 110 V 直流电缆的间距增加至 10 mm, 再次分析 110 V 直流电缆上的串扰电流可知, 当两线间的距离增加至 10 mm 时, 综合电气柜内部 110 V 直流电缆上的串

(下转第 155 页)