

文章编号: 2095-4980(2023)01-0077-05

接触网断线落在碳纤维车体的过电压仿真分析

徐 跃¹, 冯玉明¹, 白 刚², 王富强², 郭文卿²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 中国电子科技集团公司 第三十三研究所, 山西 太原 030032)

摘 要: 电气化铁路运行环境的复杂性使接触网存在断线的可能, 断开的接触网导线落在动车表面容易形成车体过电压。为了评估碳纤维动车车体由于导电性劣于传统铝合金车体而引起的过电压危害, 基于某公司设计的半碳纤维半铝合金司机室车体结构, 建立了动车组浪涌过电压电路模型。通过仿真求解接触网断线落在动车司机室车顶时司机室不同位置浪涌过电压的传输特性, 得到车体过电压最大幅值 26 kV, 在 60 μ s 内快速衰减, 对车载电子设备造成安全隐患, 并提出将车载设备的接地线缆直接连接在车厢的接地碳刷附近, 为司机室车体的过电压防护设计提供理论依据。

关键词: 接触网断线; 高速动车组; 过电压

中图分类号: TN919.72

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020540

Simulation analysis of over-voltage of broken contact line falling on CFRP body of driver's cab

XU Yue¹, FENG Yuming¹, BAI Gang², WANG Fuqiang², GUO Wenqing²

(1. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China;

2. The 33rd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan Shanxi 030032, China)

Abstract: Complexity of the railway operation environment makes it possible to break the contact line, and the broken contact wire falling on the surface of the motor train unit will lead to the overvoltage of the cab body. In order to evaluate the over-voltage damage of Carbon Fiber Reinforced Polymer/Plastic (CFRP) cab body due to its poorer conductivity than that of traditional aluminum alloy cab body, the circuit model of CFRP train body is established based on the semi-CFRP semi-aluminum alloy structure design. The transmission characteristics of surge overvoltage in different positions of the cab body are solved by simulation. The maximum voltage reaches 26 kV, and attenuates rapidly in 60 μ s, which is a potential safety hazard for on-board equipment. It is proposed that the grounding wires of on-board equipment should be connected directly near the grounding brush of cab body, which provides a theoretical basis for the design of overvoltage protection of CFRP cab body.

Keywords: broken contact line; high-speed train; overvoltage

继不锈钢和铝合金材料之后, 新型碳纤维复合材料由于具备高强度、低膨胀系数、热容量小、比重小等特性^[1-2], 已成为高速列车车体减重设计时的重要备选材料。以动车组司机室铝合金车体改进设计为例, 设计了半碳纤维半铝合金车体模型。即司机室车体引入碳纤维复合材料, 司机室所在车辆剩余部分仍为铝合金材料。碳纤维复合材料由于组成方式、成型工艺等客观因素的影响, 其阻抗特性、车体参数与传统金属车体存在差异, 过电压在碳纤维车体上的传播和衰减特性会发生变化, 为增强碳纤维车身导电性, 在复合材料表面引入铜网, 增强导电性的同时, 能起到电磁屏蔽的作用。

动车组列车在高速运行的过程中, 接触网承受着巨大的拉力和摩擦力, 弓网离线产生的弓网电弧以及电流的热效应, 再加上风雨和大气环境的腐蚀, 接触网导线长期磨损, 机械强度下降到一定程度时, 会发生断线^[3-5]。接触网断线后接地, 使牵引变电所相应供电臂触发保护动作, 断路器跳闸, 供电系统中断, 铁路行中

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-12

基金项目: 山西省国际科技合作基金资助项目(201803D421001)

断,对铁路工务、电务、通信等设备造成不同程度的损害和影响。接触网断线后未接地,牵引变电所保护不发生动作,断路器未跳闸,接触网还在供电,导线悬于铁路线路上方,动车组经过时搭接到车顶导致高压短路,在车体表面形成过电压,会对车载设备的安全性造成潜在隐患。

为了评估接触网断线落在碳纤维司机室车顶时车体过电压对车载设备的安全性,本文以某公司提出的半碳纤维半铝合金司机室车体为参考,测量并推导出碳纤维车体的阻抗参数,建立了司机室车体过电压电路模型,通过仿真分析了接触网断线落在碳纤维司机室车顶时车体过电压的传输特性,为司机室车体的过电压防护设计提供了理论依据。

1 动车组车体阻抗特性

该型动车 2~7 号车体为传统铝合金材料,司机室(1 和 8 号)车体为半碳纤维半铝合金材料。车体承载结构由底架、侧墙、车顶、端墙组成为一个整体,这里将每节车厢等效为 4 个面,每面等效为一个电阻和电感串联,如图 1 所示。司机室车体分为碳纤维和铝合金两部分,其中 R_{cfp} 和 L_{cfp} 对应碳纤维部分的横向参数, R'_{cfp} 和 L'_{cfp} 对应碳纤维部分的纵向参数, R_{Al} 和 L_{Al} 表示铝合金部分的横向参数, R'_{Al} 和 L'_{Al} 表示铝合金部分的纵向参数。2~7 号车厢为全车铝合金材料, R_{hori} 和 L_{hori} 对应横向参数, R_{vert} 和 L_{vert} 对应纵向参数。整车车底全部为铝合金材料, R_{joint} 表示车间连接器。

对于 2~7 车的铝合金车体,查阅文献[6-7]可知车体横向电阻为 12.8 mΩ,电感为 5.78 μH,纵向电阻为 2.8 mΩ,电感为 0.61 μH。对于 1 和 8 车的司机室车体,铝合金和碳纤维材料各占一半。根据导体电阻计算公式 $R=\rho l/S$,其中 R 为电阻, ρ 、 l 、 S 分别对应材料的电阻率、长度和横截面积,司机室车体铝合金部分横向长度变为原来的一半,其他参数不变,则可认为横向电阻变为原来的一半,即 6.4 mΩ;参考平直导线电感计算公式:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{r} - 0.75 \right) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; l 和 r 为材料的长度和截面半径,当导线长度远大于截面半径时,长度 l 缩短为原来的一半,对数项变化很小,可近似认为电感量变为原来的一半,据此推断司机室铝合金车体部分横向电感约为原来的一半,即 2.89 μH。纵向参数不发生变化。

碳纤维应用材料主要包括由单向编织布合成的铺层方式分别为 [0]10、[0/90/0/90/0]s、[0/90/45/-45/0]s 的 3 种层合板和由交叉编织布直接合成的层合板。其中, [0]10 为单一铺层角度的单向铺层层合板, [0/90/0/90/0]s 为含 2 种角度的正交铺层层合板, [0/90/45/-45/0]s 为包括 4 种角度的 $\pi/4$ 铺层层合板,而交叉编织层合板由交叉编织布直接合成,不存在铺层角度和铺层顺序的问题^[1-2]。车体碳纤维材料多采用由斜纹编织布直接合成的碳纤维层合板,取尺寸为 50 mm×50 mm×2 mm 的样件,沿正交方向进行阻抗测试,得到斜纹编织的碳纤维层合板沿正交方向的阻抗分布比较均匀,电阻率大约为 450 Ω·mm²/m,电感约为 0.18 μH。而紫铜的电阻率为 0.018 Ω·mm²/m,铜网复合在碳纤维材料的表面,可视为并联,由于铜的导电性远强于碳纤维材料,所以复合材料的阻抗参数可用铜网的阻抗参数替代。铜网规格为 200 目(每平方英寸筛网上的孔眼数目为 200),厚度为 0.1 mm,车体铝合金材料为型腔结构,蒙皮厚度约为 6 mm(上下 2 层各 3 mm)。选择厚度分别为 0.2 mm 和 6 mm、其他尺寸相同的铜网样件和铝合金样件进行阻抗测试,得到铜网电阻约为铝合金的 300 倍,电感约为铝合金板的 1.2 倍。据此可估算碳纤维(铜网)车体的电阻约为铝合金车体的 20 倍,电感为铝合金车体的 1/4。由此可得到司机室车体铝合金部分横向电阻约为 6.4 mΩ,电感约为 2.89 μH,纵向电阻约为 2.8 mΩ,电感约为 0.61 μH;碳纤维部分横向电阻约为 1.92 Ω,电感约为 3.47 μH,纵向电阻约为 840 mΩ,电感约为 0.73 μH。

2 仿真模型构建

基于动车组主电路结构,结合实际车体材料类型、供电线路阻抗、车内设备型号等,对动车组结构进行电路参数等效。动车组过电压模型由供电系统和动车组两部分组成。供电系统由牵引变电所、馈线、接触网、钢轨、回流线组成。牵引变电所供电电压 U_s 为 27.5 kV。考虑简单链型悬挂直接供电方式的单线电气化铁路牵引

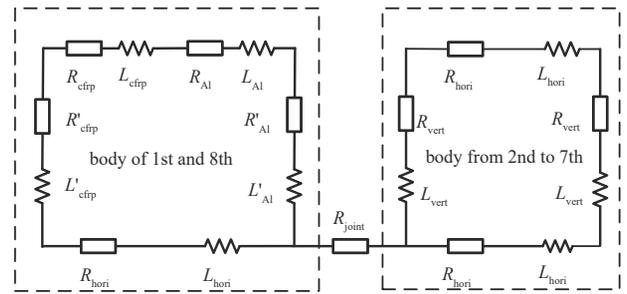


Fig.1 Circuit model of Electric Multiple Units(EMU) body

图 1 车体电路模型

网，基于 Carson 理论^[6-7]，等效电阻 R_s 、电感 L_s 、对地电容 C_s 分别为 3.4Ω 、 0.034 mH 和 $0.283 \mu\text{F}$ 。动车组模型包括高压电缆、车载动力系统、车厢和接地系统。高压电缆型号为 TENAX-Train-Plux，受电弓到主断路器之间高压电缆长度约为 2 m ，高压电缆铺设在 3 到 6 车，其中 3 车和 6 车的高压电缆长 20 m ，4 车和 5 车的高压电缆长 26 m 。单位长度电缆的电阻、电感、电容分别为 $0.2 \text{ m}\Omega/\text{m}$ 、 $0.17 \mu\text{H}/\text{m}$ 和 $0.32 \mu\text{F}/\text{m}$ 。牵引主变压器采用 XFRM-Linear 线性变压器，变压器二次侧电感为 0.34 H ，一次侧电感为 62.09 H ，不考虑高低压侧绕组电阻。变流器主要包括整流模块和逆变模块，由绝缘栅双极型晶体管芯片 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 和二极管组合而成，对于车体过电压产生无明显影响，因此对该部分忽略不计。查阅文献^[6-7]可知，单个负载电动机额定功率为 600 kW ，每台主变压器为 8 个负载电机提供电能，总功率为 4 800 kW ，经计算可得，变压器负载等效电阻 R_m 为 0.71Ω 。该型动车采用串联电阻器的接地方式，接地电阻安装在车厢的正下方，电阻值为 $50 \text{ m}\Omega$ ，然后由接地电缆分别连接在车底前后的 2 个转向架轴端，等效电阻和电感分别为 $2.4 \text{ m}\Omega$ 和 $2.04 \mu\text{H}$ 。此外，接地碳刷处的电阻约为 $5.03 \text{ m}\Omega$ 。据此得到动车组过电压仿真模型如图 2 所示。

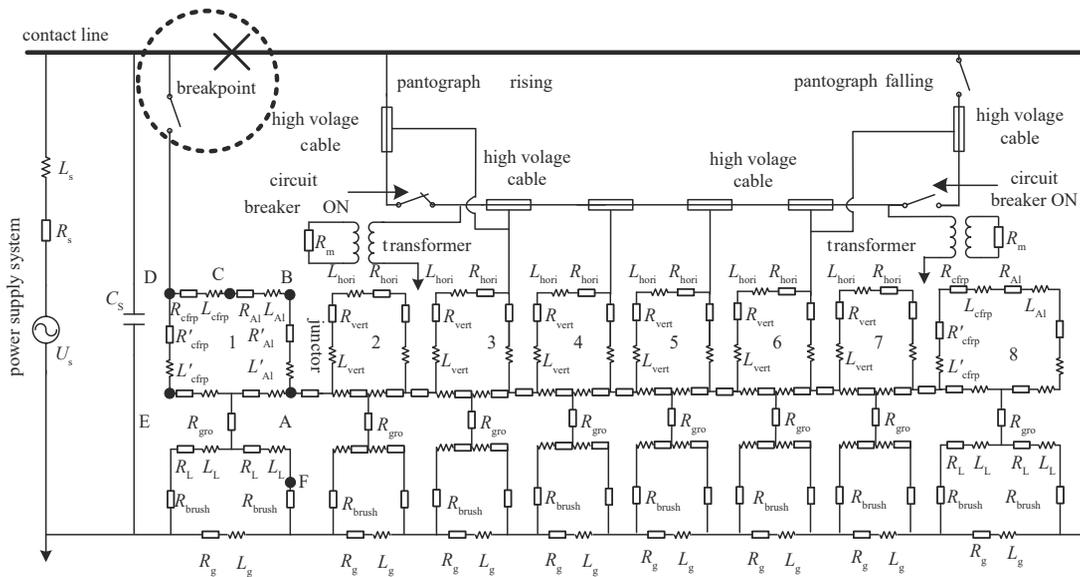


Fig.2 Surge overvoltage circuit model of EMU body

图2 动车组过电压仿真模型

虚线圆圈部分表示接触网在断点处断开，然后落在司机室(1号车)车顶碳纤维一侧(D点)。模型中的 A、B、C、D、E 点为电压探针的位置，分别表示车底铝合金一侧、车顶铝合金一侧、铝合金—碳纤维界面、车顶碳纤维一侧、车底碳纤维一侧和后轮接地碳刷。

3 仿真结果分析

本文采用 OrCAD/PSPice 仿真软件进行过电压仿真分析，如图 3 所示。该软件专门用于电子电路仿真设计分析，界面交互性好，结果准确，具有较高的参考价值。在软件中建立动车组浪涌过电压模型，设置供电电源为 27.5 kV 的工频正弦波，接触网落在司机室车顶瞬间网压相位角为 90° ，车体不同位置浪涌过电压仿真结果如下。

接触网导线搭接到碳纤维车体以后，车顶碳纤维一侧电位瞬间升高，最高电位达到了 26 kV 。不同位置的浪涌过电压变化趋势基本一致，在 $60 \mu\text{s}$ 内快速衰减，之后在小范围内波动。车底铝合金一侧过电压幅值为 6 kV ；车底碳纤维一侧过电压幅值为 23 kV ；铝合金—碳纤维界面处，过电压最大幅值达到了 20 kV 。接地碳刷处过电压幅值比较小，为 34 V 。

过电压在横向传播过程中，从车顶碳纤维一侧到铝合金碳纤维界面，最大幅值下降了 6 kV ，从铝合金碳纤维界面到车顶铝合金一侧，最大幅值下降了 8 kV ，司机室车体全长 26 m ，铝合金部分和碳纤维部分都是 13 m ，因此过电压在碳纤维车体表面横向传输过程中，电压下降幅度为 $461.5 \text{ V}/\text{m}$ ，过电压在铝合金车体表面横向传输过程中，电压下降幅度为 $615.4 \text{ V}/\text{m}$ 。过电压在纵向传播过程中，从碳纤维一侧的车顶到车底，最大幅值下降了 3 kV ，从铝合金一侧的车顶到车底，最大幅值下降了 6 kV 。动车车厢高度约为 4 m ，因此过电压在碳纤维一侧纵向传播，最大电压下降幅度为 $750 \text{ V}/\text{m}$ ，在铝合金一侧纵向传播，最大电压下降幅度为 $1.5 \text{ kV}/\text{m}$ 。过电压沿

纵向传播衰减幅度快于横向传播，在铝合金表面传播的衰减幅度快于碳纤维表面。

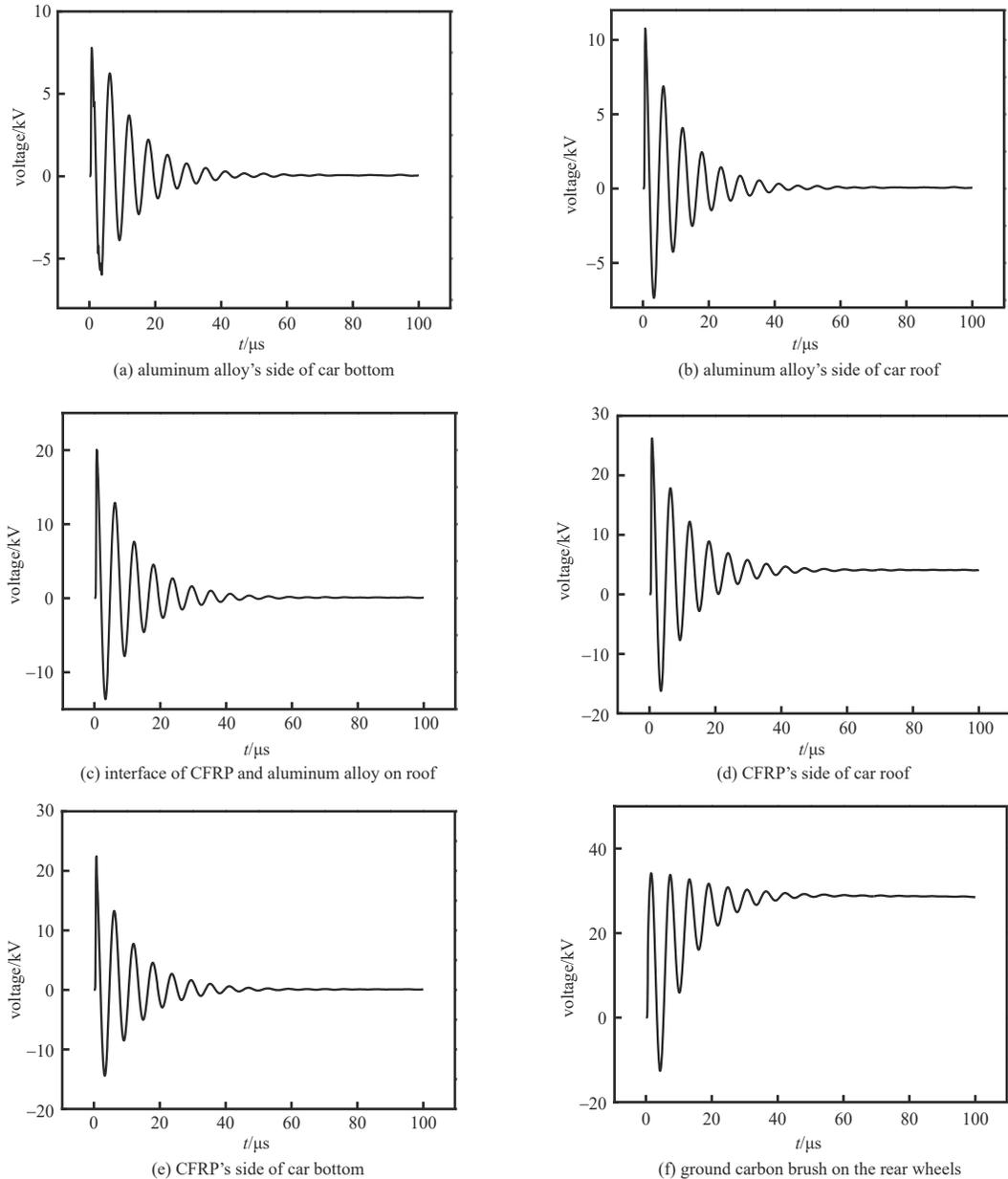


Fig.3 Over-voltage of broken contact line falling on the body of driver's cab

图3 接触网断线落在司机室车体的过电压仿真波形

铁标 TB/T3021-2001 《铁道机车车辆电子装置》中第 12.2.6 条规定^[8]，车载电子设备所能承受的最大浪涌过电压为 2 kV，所以该型动车司机室内电子设备接地点可连接在接地碳刷处。

4 结论

通过分析和测试碳纤维材料和铜网的阻抗特性，推导出碳纤维车体的阻抗参数，建立了司机室车体过电压电路模型，通过仿真分析了接触网断线落在碳纤维司机室车顶时车体过电压的传输特性，具体结论如下：

- 1) 碳纤维车体的导电性主要依赖外层的铜网，铜网在增强导电性的同时，也能起到电磁屏蔽的作用。
- 2) 接触网断线落在司机室车体会导致车体电位瞬间升高，最大电压达到了 26 kV，由于接触网对地电容、车体电感和电阻的存在，过电压发生振荡并在 60 μs 内快速衰减。
- 3) 司机室车体过电压沿纵向传播衰减幅度快于横向传播，在铝合金表面传播的衰减幅度快于碳纤维表面。
- 4) 车体过电压大于 2 kV，不满足车载电子设备安全地的接入标准，后轮接地碳刷处过电压最大值只有 34 V，

可作为车载电子设备安全地的连接点。

参考文献：

- [1] 刘东,王钧. 碳纤维导电复合材料的研究与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2001(6):18-20. (LIU Dong,WANG Jun. Research and application of carbon fiber reinforced conductive composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2001(6):18-20.) doi:10.3969/j.issn.1003-0999.2001.06.007.
- [2] 李威,郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011,4(3):201-212. (LI Wei,GUO Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Optics, 2011,4(3):201-212.) doi: 10.3969/j.issn.2095-1531.2011.03.001.
- [3] 孙森. 铁路接触网常见断线事故及预防措施研究[J]. 中国设备工程, 2018(20):30-31. (SUN Miao. Research on common accidents and preventive measures of broken railway contact line[J]. China Plant Engineering, 2018(20):30-31.) doi:CNKI:SUN:SBGL.0.2018-20-020.
- [4] 王攀. 铁路接触网常见断线事故与预防策略探究[J]. 建筑技术开发, 2020,47(3):134-135. (WANG Pan. Research on common accidents and preventive strategy of broken railway contact line[J]. Building Technology Development, 2020,47(3):134-135.) doi:CNKI:SUN:JZKF.0.2020-03-075.
- [5] 苏雪,张小云. 基于无线传感网络的高速铁路监测系统[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):239-242. (SU Xue,ZHANG Xiaoyun. High-speed railway monitoring system based on wireless sensor network[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2): 239-242.) doi:10.11805/TKYDA201902.0239.
- [6] 霍达. 动车组升降弓车体浪涌过电压分布研究[D]. 成都:西南交通大学, 2018. (HUO Da. Study on surge overvoltage distribution of car-body caused by pantograph raising and dropping of EMU[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2018.) doi:CNKI:CDMD:2.1018.709899.
- [7] 陈盼. 高速动车组升降弓暂态过电压形成机理与抑制方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016. (CHEN Pan. Study on the overvoltage mechanism and suppressing method in the process of pantograph raising and lowering of high-speed train[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2016.)
- [8] 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通 机车车辆电子装置:GB/T 25119-2010[S]. 北京:中国标准出版社, 2011. (Standardization Administration of the People's Republic of China. Railway applications-electronic equipments used on rail vehicles:GB/T 25119-2010[S]. Beijing:Standards Press of China, 2011.)

作者简介：

徐 跃(1979-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电气系统集成设计、电磁兼容 .email: xuyue@cqsf.com.

冯玉明(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电磁兼容和非接触供电系统设计.

白 刚(1993-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电路设计、电磁兼容.

王富强(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为复合材料技术、电磁防护技术.

郭文卿(1985-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为系统级电磁兼容与防护.