

文章编号:1005-0523(2018)03-0119-08

基于分区模型的高铁接触网电场对人体影响数值计算与分析

孙惠娟¹, 贺 璨^{1,2}, 刘 兵¹, 刘 君¹

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国铁建电气化局第五工程有限公司, 四川 成都 610073)

摘要:为探究高铁站台上人体所受电场辐射大小以确保乘客的安全,运用有限元法对高速铁路接触网在站台引起的电场空间分布进行仿真计算,并建立人体部位属性仿真模型,采用分区模型的方法对人体周围电场进行快速准确的仿真计算,以克服常规网格细分法固有的计算速度与精度矛盾;分析了高铁站台上人体感应电流和接触电流,结合国家标准限值对人体周围电场环境的安全性进行了综合评价。研究表明:①分区模型法具有精度高且省时的优势;②接触网电场引起的感应电流及接触电流对于黄线外候车的乘客是安全的。

关键词:有限元;高速铁路接触网;分区模型法;工频电磁场

中图分类号:TM744

文献标志码:A

随着环境问题的日益严峻,交通运输等行业专家认为,从单位运量的能源消耗、环境的占用、环境质量的保护、自然环境的适应及运营安全等方面综合考虑,铁路拥有的优势最为明显,所以在重新调整运输策略时,规划和发展高速铁路势在必行^[1-3]。高速铁路的发展备受世界各国的关注和重视,因此,研究高速铁路站台周围的工频电磁场分布规律,并对人体所受电磁辐射的大小进行准确计算显得尤为重要。

近年来许多学者通过解析法和现场测量等方式探究了高速铁路接触网周围的工频电磁场分布情况。文献[4]实测了车体内部的电磁变化情况,但由于受到测量仪器本身的影响,在准确度上存在疑问;文献[5]探究了接触网4种不良供电状态对列车组供电安全影响,但是并没有探究不同状态下接触网引起的电磁场变化;文献[6]通过简化车体模型的方法进行计算,探究了车体材质与车内的低频磁场及分布情况的关系,但没有考虑周围环境带来的影响;文献[7]通过镜像法研究不同供电方式下接触网的电场强度,并以此来判定是否对长期暴露工作在接触网电磁场环境中的周围生态和工作人员产生伤害;文献[8]使用等效激励探究了高压输电线路下人体所受电场的生物效应,但是对等效电压的解析法计算存在难以普及的问题,文中使用软件直接导出分区模型边界上的电位值,快速且准确。

鉴于此,为了研究接触网引起的电场是否会对乘客的健康产生影响,文中建立了精细的人体模型,使用ANSOFT软件进行模型仿真,运用网格细分法和分区模型法进行求解,对人体所受电场辐射大小进行更准确地计算,通过结果对比,发现使用分区模型法在准确和省时方面更具有优势。同时,结合数值模拟结果对高速铁路站台电场环境的安全性进行了综合评价,为线路设计和环境影响的评价提供依据。

收稿日期:2018-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51567007);江西省自然科学基金项目(2015ACB20017,20171BAB206042);江西省教育厅科技项目(GJJ160525,GJJ160526);江西省“百人远航工程”(2017080)

作者简介:孙惠娟(1982—),女,副教授,硕士,研究方向为电磁场数值分析。

1 高铁站台及人体模型建立

我国高速铁路站台多采用侧式站台,使用AT供电方式,参考高铁接触网设计,对站台模型参数设计如表1所示。其站台简化图如图1所示。

表1 线索参数
Tab.1 Clue parameters

名称	型号	半径/mm	电压/kV	电流/A
接触网	TCG-120	6.2	27.5	100
承力索	TCJ-110	5.9	27.5	100
正馈线	LJ-185	7.7	-27.5	-192
保护线	LJ-70	4.7	250	-0.972

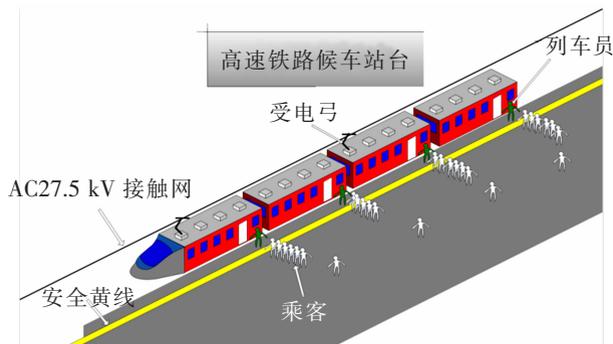


图1 高速铁路站台结构简化剖面图
Fig.1 Simplified section of high-speed railway platform

为探究人体所受到的电场影响,将人体模型分成几个部分,即头部、躯干、腿臂部、手足部,用具有不同电磁参数的单元来模拟,相关参数如表2所示,建立如图2所示的人体模型。

根据人体各部位的组成结构,确定各部位相应的介电常数、电导率和磁导率如表3所示^[9]。

表2 人体模型参数
Tab.2 Human body model parameters

人体部位	参数值/m	人体部位	参数值/m
整体高	1.75	整体宽	0.5
头部正方形边长	0.16	头扇形高	0.06
身体长	0.63	身体宽	0.4
臂长	0.63	臂宽	0.05
手长	0.10	手宽	0.05
腿长	0.85	腿宽	0.1
脚高	0.05	脚长	0.15

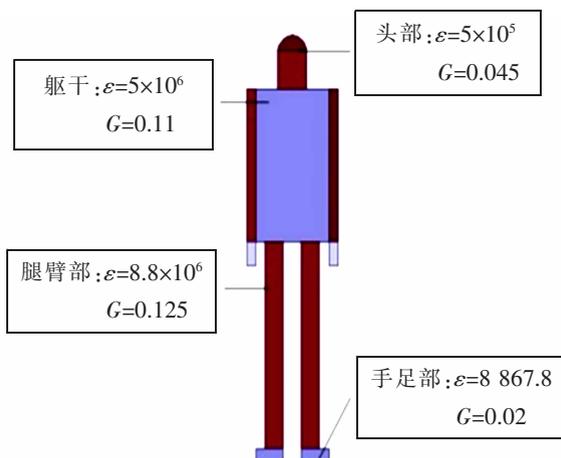


图2 人体模型
Fig.2 Human body model

2 电磁场有限元分析

2.1 有限元分析方法

有限元法是将连续的求解域离散为一组单元的组合体,用每一个单元的近似函数来替代整个组合体的函数,建立求解场函数的方程组^[10]。在仿真计算中使用到的高速铁路接触网工频电磁场的数学方程为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： \vec{E} 和 \vec{H} 分别为接触网引起的电场和磁场的强度； \vec{B} 为磁感应强度； \vec{J} 为接触网电流的密度； ρ 为电荷体的密度； \vec{D} 为电场的位移。场量与介质关系特性的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} \vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： ϵ 是介电常数； μ 是磁导率； σ 是电导率。由于高铁站台电磁场变化缓慢可视为静态场，则方程可简化为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \vec{H} &= \vec{J} \\ \nabla \times \vec{E} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2.2 网格细分法

网格细分法是基于有限元分析软件中求解区域所剖分的网格边长越小计算结果越精确的设定，在不改动基础模型、不限定网格数量的前提下减小网格边长，以减小单元运算面积，获得更精确解的方法。从文献[10]可知，车体对电场有明显的屏蔽效应，为了使仿真结果更明显，减少外在因素的影响，选用无车有人的情况进行仿真计算。

将求解区域离散化成如图 3 所示的三角形单元，通过剖分插值计算子空间(每个三角形单元)电场，用各个子空间电场计算结果逼近整个空间的电场，由于这是基于有限元法的网格剖分，在同一求解域中随着网格边长的减小，网格数量的增多，每个子空间的面积会减小，计算数量会增多，在最终联立的方程组的计算结果会更准确。由于人体离激励较远，网格剖分的结果在人体处网格密度远小于激励处，当网格边长为 5 m 时，高铁站台区域与人体周围网格剖分情况如图 3 所示，当网格边长为 0.1 m 时网格剖分情况如图 4 所示。

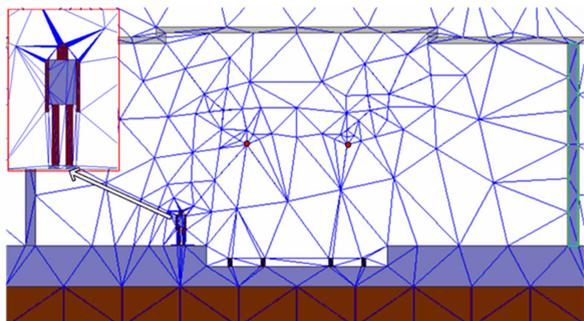


图 3 5 m 边长网格剖分情况
Fig.3 Mesh subdivision by 5 m

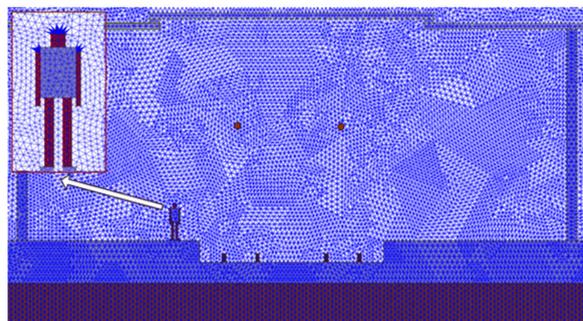


图 4 0.1 m 边长网格剖分情况
Fig.4 Mesh subdivision by 0.1 m

表 3 人体电磁参数
Tab.3 Human electromagnetic parameters

人体部位	介电常数	电导率/(S/m)	磁导率
头部	5×10 ⁵	0.045	1
躯干	9.57×10 ⁶	0.11	1
手足部	8 867.8	0.02	1
腿臂部	8.8×10 ⁵	0.123	1

从图3可知,当网格边长为5 m时可以看到由于网格边长过大,虽然就整个求解域而言网格剖分比较均匀,但在人体处剖分结果比较粗糙,计算精度较小;从图4可知当网格边长为0.1 m时,虽然人体周围网格数量较为均匀,人体网格划分也比较细致,但是对整个求解域而言,网格数量过多,增加了计算复杂度和计算时长。为解决上述矛盾,采用电场分区模型法。

2.3 电场分区模型法

为了克服常规网格细分法的不足,文中以人体为中心将人体及其周边小区域从整个求解区域中划分出来,并构建分区模型(如图5所示)。在区域边界上均匀选取部分节点,在没有人体因素的影响下,计算出分区模型边界各节点电位;然后在分区模型中加入人体模型,在边界各节点上添加等效激励并对模型进行单独的电场计算与分析。分区模型法在求边界电位时之所以要去除人体,是因为人体介电常数很大,相当于一个大的导体,会在身体周围集聚电荷,由于区域边界离人体较近,若是没有去除人体的影响,得到的等效激励会偏大。若采用解析法求分区模型边界上的电位,计算量会很大^[11-12],本文利用ANSOFT软件直接导出分区模型边界上的电位。

建立分区模型的具体步骤如下:

第一步,将接触网下的空气分为两个部分,人体周围空间部分为区域一,此外的整个空气部分为为区域二,人体本身为区域三。依据人体大致尺寸及其附近区域比例,本文设定区域一(近人体区域)的高为2 m、宽为1.3 m,区域三(人体)位于区域一的居中位置(如图5所示)。

第二步,将整个区域二作为求解对象,导出区域一和区域二边界上的电位。

第三步,对分区模型的各区域进行网格剖分,在分区模型边界上赋上步骤二导出的电位值。

第四步,将区域一和区域三作为求解区域,进行模拟仿真。

分区模型的选择区域不应过小,否则会使得激励过近,激励间相互影响,影响计算结果的准确性。由于分区模型法的本质是将等效激励靠近人体,可使得网格在迭代时自动划分得更为细致,因此求解结果将更准确合理。采用分区模型法得到的高铁站台区域与人体周围网格剖分情况如图6所示。

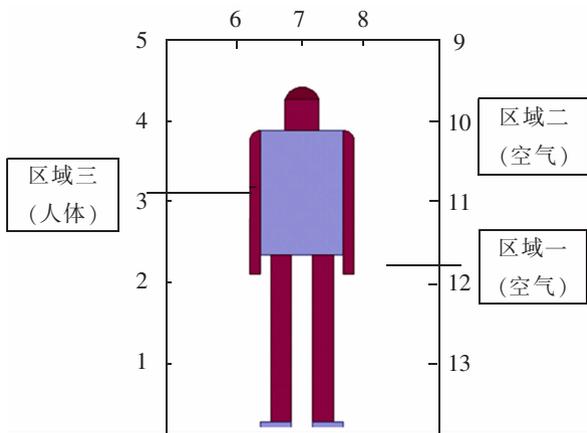


图5 分区模型区域
Fig.5 Areas of subarea model

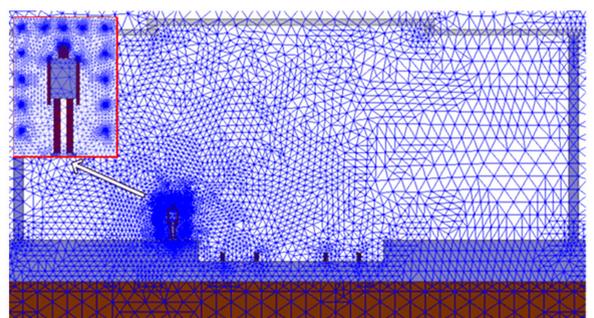


图6 分区模型网格剖分情况
Fig.6 Grid division by subarea model

由图6可知,在分区模型的网格剖分中,网格集中在激励与研究对象即人体周围,且剖分结果均匀适中,可以明显看到网格总量相较于网格边长0.1 m时减小很多,计算量也将显著减小。

3 人体周围电场数值计算与分析

3.1 人体电场环境分析

对如图5人体分区模型,以该区域整个外边界作为一条连续线,将人体左下处作为起点,沿顺时针方向至人体右下处作为终点,根据前述分区模型法步骤二,导出分区模型中区域一与区域二边界上不同位置编号处(如图5)的电位值如表4所示。

表4 分区模型边界上电位值
Tab.4 Subarea model potential on the boundary

位置 编号	1	2	3	4	5	6	7
电压/ kV	0.635	0.833	1.204	1.362	1.500	1.678	1.774
位置 编号	8	9	10	11	12	13	
电压/ kV	2.040	2.262	2.007	1.715	1.400	1.061	

使用网格细分法时,当网格边长为5 m得到的电场仿真模型如图8(a)所示,当网格边长为0.1 m时得到电场仿真模型图如图7(b)所示。

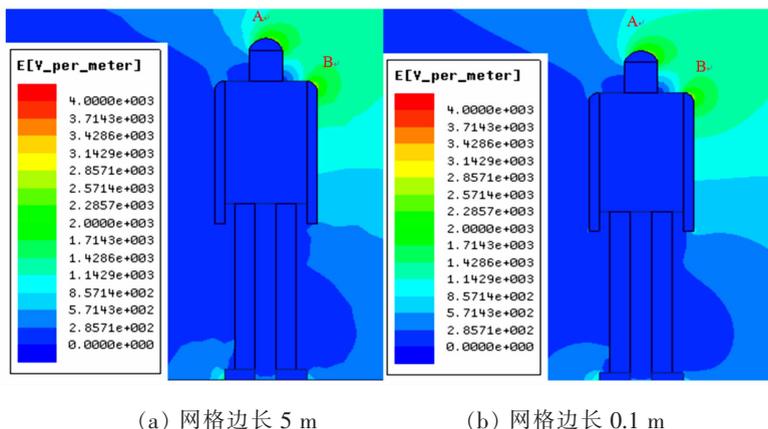


图7 网格细分法人体周围电场强度分布

Fig.7 The distribution of electric field around the human body by mesh subdivision

由图7知:①由于人体的相对介电常数值较大,可看作接地导体,头部与肩膀处距离接触网较近,容易积聚电荷,形成高电场,因此人体周围电场强度主要集中于头部、肩膀处和脚部等突出位置;②受接触网的影响,电荷在人体表面聚集,在网格细分法中,只在靠近激励一侧有电场,由于电荷分正负,在一侧有电荷聚集,在另一侧应该有相反电荷聚集;而在分区模型中,除人体右上方产生的电场外,在人体左下方也有电场存在,所以由仿真云图的对比可知,分区模型法所得到的云图更准确合理。③从云图的细部对比,图7(b)中的电场强度等高线比图7(a)更为细腻平滑,仿真结果更加准确。

导出分区模型法和网格细分法所得的近头顶A处和近右肩B处电场强度数值模拟计算结果以及模型计算时长(计算机参数为:AMDTrinity CPU,A8-4500 M四核,1.9 GHz),如表5所示。

由表5可知,分区模型法的电场强度计算精度和网格边长为0.1 m的网格细分法非常接近,而计算时长

仅为 12 s, 约为同等精度网格细分法的 1/20, 与网格边长为 5 m 的网格细分法的 10 s 非常接近。可见, 在求解域一定时, 采用分区模型法可以用更短的时间得到更高的计算精度。

表 5 不同方法计算结果和计算时长对比
Tab.5 Comparison of different methods

使用方法	A 点 $E/(V/m)$	B 点 $E/(V/m)$	计算时长/s
网格边长 5 m	2 383.966	2 709.729	10
网格边长 0.1 m	2 400.993	2 886.002	216
分区模型法	2 402.286	2 875.963	12

3.2 电场对人体的影响分析

根据人体周围电场环境, 可进一步评估高铁接触网电场辐射对人体的影响。我国的工频电磁场暴露限值如表 6 所示^[13-14]。

表 6 工频电磁场暴露限值
Tab.6 Limits of electromagnetic field exposure

频率/Hz	电场 $E/(kV/m)$	磁场 $B/\mu T$	感应/接触电流/ μA
50	4	100	500

当旅客或工作人员位于高速铁路接触网下方时, 会受到直接或间接的影响。

直接影响: 处于高铁站台上方的身体, 本身介电常数很大, 可看作导体, 会在身体表面产生感应电荷, 而电荷在变化的同时就会在人体内部产生感应电场, 影响人体内部电荷的移动, 从而产生感应电流。人体内感应电流和接触电流的安全限值是 500 μA ^[15], 当超过这个值就会对人体健康造成损害。为了分析电磁环境安全性, 使用国际大电网会议提出的人体内感应电流简化计算公式来计算该模型产生的感应电流。计算公式为

$$I = \pi \omega \varepsilon_0 E (2h_1^2 + h_2^2) \quad (4)$$

式中: ω 是高速铁路电场角频率, rad/s; ε_0 是高速铁路站台周围空气介电常数; h_1 是乘客身体躯干高度, m; h_2 是乘客头部高度, m; E 是高铁站台电场强度, V/m。

人体分区模型高 1.75 m, 头部长 0.22 m, 躯干长 0.63 m, 取极限位置即人体位于黄线处, 对求解域按最小边长为 0.1 m 进行剖分, 得出电场强度最大值为 2 400.993 V/m, 我国接触网供电频率为 50 Hz, 由式(4)求得感应电流为 74.146 μA , 未超过安全限值, 因此高铁站台产生的感应电流对于候车乘客和工作人员是安全的。

间接影响: 处于电场中的乘客或工作人员, 在触碰到良好导体时, 身体内的电荷转移到导体内而产生接触电流。此时接触电流的计算公式为

$$I_c = 9.0 \times 10^{-11} \times h^2 f E \quad (5)$$

式中: h 为人体高度, m; f 为交流电频率, Hz。

由式(5)计算得出接触电流为 33.07 μA , 并未超过人体安全限值 500 μA , 所以当人体在由接触网引起的电场中触碰到良好导体并产生接触电流时, 不会对人体造成伤害。

4 总结

运用有限元法对高速铁路接触网电场环境进行了数值计算和模拟,对人体周围电场强度值做了准确分析对比,结合数值模拟结果对站台电场环境的安全性进行了综合评价,可得到以下结论:

1) 针对高速铁路接触网电场环境进行有限元分析时,采用分区模型法比常规网格细分法更具优势,不仅计算速度快,而且能达到理想的模拟精度,可有效解决常规网格细分法固有的速度和精度的矛盾。

2) 高铁接触网电场引起的感应电流、接触电流远小于人体电流安全限值,对于在黄线外的旅客和工作人员是安全的。

参考文献:

- [1] 唐世政. 依托区域优势和铁路优势加快铁路物流企业发展的实践与思考[J]. 铁道经济研究, 2012(2): 16-18.
- [2] 徐玉屏, 唐青, 付来美, 等. 高速铁路建设对长三角经济区城市化发展的影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(6): 124-132.
- [3] 谭玉顺, 陈森发. 中国铁路运输效率研究——基于网络 DEA-RAM 模型的视角[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(5): 1219-1226.
- [4] 朱峰, 刘光辉, 叶家全, 等. 电气化列车车体内工频磁场环境测试分析与建模[J]. 西南交通大学学报, 2015(3): 400-404.
- [5] 刘志刚, 宋洋, 韩焜, 等. 高速铁路接触网研究进展[J]. 西南交通大学学报, 2016(3): 495-518.
- [6] 陈习权, 韩海林, 孙杰. 轨道交通牵引供电网电磁辐射场强的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2012(29): 7659-7663.
- [7] 李永江. 镜像法计算接触网的电场强度[J]. 科技资讯, 2012(7): 120-121.
- [8] 高阳. 高压输电线路电磁环境分析及人体生物效应研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [9] 王建华, 文武, 阮江军. 特高压交流输电线路工频磁场在人体内的感应电流密度计算分析[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 7-10.
- [10] 孙惠娟, 刘君, 黄兴德, 等. 高速铁路牵引供电网电磁环境数值模拟与分析[J]. 中国电力, 2015(11): 60-66.
- [11] 杜志叶, 干喆渊, 阮江军, 等. 基于 3D 模拟电荷法的变电站工频电场计算[J]. 高电压技术, 2011(10): 2587-2593.
- [12] 刘峻岐, 王小霖, 张弦, 等. 10 kV 配电网感应雷过电压的计算及影响因素分析[J]. 广东电力, 2015(4): 98-105.
- [13] 惠建峰, 关志成, 刘瑛岩. 各国工频电磁场的限值及其确定的依据[J]. 高电压技术, 2006(4): 51-54+64.
- [14] 李妮, 邬雄, 刘兴发, 等. 国际标准工频电磁场公众曝露限值比较及启示[J]. 现代电力, 2013(3): 54-59.
- [15] CHEN X L, BENKLER S, CHAVANNERS N, et al. Simulation of human body exposure in extremely low frequency electromagnetic fields[C]//Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation, April 2010.

Numerical Calculation and Analysis of the Influence of Electric Field on Human Body by High-speed Railway Catenary Based on Subarea Model

Sun Huijuan¹, He Can^{1,2}, Liu Bing¹, Liu Jun¹

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. The Fifth Engineering Company Limited of China Railway Construction Electrification Bureau, Chengdu 610073, China)

Abstract: To investigate the radiation level of the electric field on the high-speed rail platform to ensure the safety of the passengers, the finite element method was used to simulate the spatial distribution of the electric field caused by the high-speed railway catenary, and the simulation model of the body part attribute was established. The subarea model was adopted to realize fast and accurate simulation calculation of electric field around human and overcome the contradiction between the computational speed and accuracy when using conventional mesh subdivision method. The inductive current and contact current of the human body on the high speed railway platform were analyzed, and the safety of the electric field environment around the human body was comprehensively evaluated according to the national standard limit. The research results shows that: ① The subarea model method has the advantages of high accuracy and saving time; ② The passengers of the waiting line outside the yellow line have good adaptability to the induced current and contact current induced by electric field of the catenary.

Key words: finite element; high-speed railway catenary; subarea model; frequency electromagnetic field