

煤矿井下绞车变频调速系统辐射电磁骚扰测试研究

陈 辉¹, 田子建², 陆 奎¹

(1. 安徽理工大学 计算机科学与工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 中国矿业大学(北京) 机电与信息工程学院, 北京 100083)

摘 要:针对煤矿井下绞车变频调速系统辐射电磁骚扰问题, 分析了变频调速系统的电磁兼容辐射发射限值以及井下测试环境和测试方法, 并对井下绞车变频调速系统的电磁辐射进行了现场测试。测试结果表明: 绞车变频调速设备辐射电场主要集中在 200 MHz 以内, 尤其在 20 MHz 以内最为显著, 辐射磁场主要集中在 2 MHz 以内, 且低频段噪声突起分布尤为明显; 在距离变频调速设备 1 m 处测量的辐射电场场强最大值达到 122.97 dB μ V/m; 绞车电动机的辐射电场频谱达到 1 GHz, 辐射磁场主要集中在 150 kHz 以内, 但总体辐射强度较低, 在距离绞车电动机 1 m 远处测得的最大电场场强不超过 80 dB μ V/m。因此, 绞车变频调速系统的电磁辐射骚扰较为严重, 对井下辐射电磁环境影响较大, 会对井下监测、监控设备以及控制系统造成干扰, 需要采取一定的电磁辐射干扰抑制和屏蔽措施, 尤其是在变频调速设备附近。

关键词:绞车电动机; 变频调速系统; 辐射电磁骚扰; 电磁辐射环境

中图分类号:TD65 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2018)02-0232-05

Test study on radiation electromagnetic disturbance of frequency conversion speed control system applied to winch in underground coal mine

CHEN Hui¹, TIAN Zijian², LU Kui¹

(1. School of Computer Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. School of Electromechanical and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: According to the radiation electromagnetic disturbance problems from the frequency conversion speed control and driving system of the winch in the underground coal mine, the paper analyzed the electromagnetic compatible radiation transmit limit of the frequency conversion speed control system as well as the underground mine test environment and test method. A site test was conducted on the electromagnetic radiation of the frequency conversion speed control system applied to the winch in the underground mine. The test results showed that the radiation electric field of the winch frequency conversion speed control system would be concentrated within 200 MHz, especially would be most obvious within 20 MHz, the radiation magnetic field would be concentrated within 2 MHz and the protuberance distribution of the low frequency sectional noise would be obvious. At a place with a distance of 1 m to the frequency conversion speed control equipment, the max value of the field strength in the measured radiation magnetic field was reached at 122.97 dB μ V/m. The frequency spectrum of the radiation electric field in the winch electric motor was reached at 1 GHz, the radiation magnetic field was mainly concentrated within 50 kHz, but the total radiation strength was low and at a place with a distance of 1 m to the winch motor, the filed strength of the measured max electric filed would not be over 80 dB μ V/m. Therefore, electromagnetic radiation disturbance of the winch frequency conversion speed control system was quite serious, would have a high influence to the radiation electromagnetic environment in the underground mine and would have disturbances to the monitoring and control equipment as well as the control system in the underground mine. The certain electromagnetic radiation disturbance restrain and shielding measures should be needed and conducted especially the place near the frequency conversion speed control equipment.

Key words: winch motor; frequency conversion speed control system; radiation electromagnetic disturbance; electromagnetic radiation environment

收稿日期:2017-10-11; **责任编辑:**赵 瑞 **DOI:**10.13199/j.cnki.cst.2018.02.034

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1608085ME122); 安徽省高校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2012A077)

作者简介:陈 辉(1973—), 男, 安徽庐江人, 副教授, 博士。E-mail: 1115858010@qq.com

引用格式:陈 辉, 田子建, 陆 奎. 煤矿井下绞车变频调速系统辐射电磁骚扰测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 232-236.

CHEN Hui, TIAN Zijian, LU Kui. Test study on radiation electromagnetic disturbance of frequency conversion speed control system applied to winch in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(2): 232-236.

0 引 言

随着煤矿井下生产和运输环节自动化程度的不断提高,各种机电设备大量运用到煤矿井下生产现场,大幅提高了煤矿的生产效率。由于变频调速设备在速度调节、电动机软启动以及节能等方面特有的优势,传统定速传动系统正逐渐被变频调速系统所取代。井下采煤机、矿井提升机、运输绞车、井下通风机、带式输送机等电动机的调速越来越多地采用变频调速。变频调速系统在带来优越的调速性能和实现电动机软启动等优点的同时,其产生的电磁干扰问题也尤为突出。一方面,变频设备的非线性电源变换产生的谐波电磁干扰沿着电缆进行传输,对共用电源的其他设备造成干扰;另一方面,变频设备逆变环节的功率开关管高速通断导致电压脉冲化,引起高次谐波和电磁辐射干扰。其中变频设备引起的谐波干扰一直是众多学者研究的重要方面,相应的成果也较为丰富^[1-4],但变频调速系统引起的电磁辐射干扰研究相对较少,尤其是在具有爆炸性气体的狭窄巷道空间变频调速系统的电磁辐射研究更为缺乏。因此井下监测、监控等电子产品的电磁兼容性设计缺乏必要的依据,进而导致监测监控和控制系统出现误报或漏报和误动或拒动等异常现象,对井下生产安全构成威胁。

近些年井下电磁辐射干扰的研究逐渐受到众多学者的重视,文献[5-6]对煤矿井下变电所典型设备的电磁辐射进行了测量,并指出了影响电磁环境的主要因素;文献[7]分析了煤矿井下电快速瞬变脉冲群辐射骚扰,并实际测试了磁力启动器开启和闭合电动机的瞬态辐射;文献[8]理论研究了矿井浪涌脉冲的电磁辐射模型,并进行了仿真试验;文献[9-10]分别对煤矿井下输送带电动机启动和制动过程产生的电磁骚扰,以及井下水泵电动机在瞬态和稳态运行阶段产生的电磁辐射骚扰进行了研究,并分析了电磁辐射对巷道电磁环境的影响;文献[11]对井下架线电动机车引起的电磁辐射进行了理论分析,实际测试了电动机车在不同速度下的电磁辐射场强;文献[12]对井下馈电开关闭合和断开以及正常运行时产生的电磁辐射进行了测试,并指出不同情况下电磁辐射大小;文献[13]研究了变频调速系统中三相感应电动机在 1~50 MHz 范围内的远场辐射模型。虽然在电磁辐射骚扰方面研究已经取得了一些有价值的成果,但还远不能满足井下电

磁兼容性设计的要求。笔者针对煤矿井下绞车变频调速系统的辐射电磁骚扰进行现场测试,分析其对井下电磁环境的影响,为进一步研究井下变频设备的电磁辐射干扰以及电子产品的电磁兼容性设计提供参考和依据。

1 井下变频调速系统电磁辐射及发射限值

井下的电磁辐射发射来源较为复杂,既有功能性设备的电磁辐射如通信系统的电磁波信号,也有来自非功能性设备如机电设备的电磁噪声信号。通信设备发射的信号频率通常是固定的,较易识别和区分。机电设备的电磁辐射信号一般为宽频带信号,需要通过覆盖较大频率范围的测量设备进行测量。煤矿井下产生电磁干扰的非功能性设备主要包括供电设备和用电设备,用电设备以电动机传动系统为主。井下电动机传动系统包括工频电源驱动和变频电源驱动 2 种,在工频电源驱动情况下,电动机传动系统的电磁辐射对井下的电磁环境影响较小,主要是设备启停阶段的电磁辐射干扰较大,而变频电源驱动的传动系统引起的辐射电磁骚扰是井下研究的重点。

目前,变频调速传动系统电磁兼容性测试的主要依据是国家标准 GB 12668.3—2003《调速电气传动系统 第 3 部分:产品的电磁兼容性标准及其特定的试验方法》。标准中规定了供电电压为交流 1 000 V 以下的电气传动系统的电磁兼容性要求,并给出了一类环境下不受限销售和受限销售的电气传动系统的电场辐射发射限值,其中不受限销售的电气传动系统辐射发射限值见表 1^[14]。而受限销售的电气传动系统辐射发射限值更为严格,辐射限值不变,但测量距离均为 30 m。

表 1 一类环境下电气传动系统辐射发射限值

Table 1 Radiation emission limits of adjustable speed electrical power drive systems in the first environment			
气传动系统 的容量	频带/MHz	电场强度/ (dBμV·m ⁻¹)	测量 距离/m
小功率传动系统 (I<25 A)	30≤f≤230	30	10
	230≤f≤1 000	37	10
中功率传动系统 (I≥25 A)	30≤f≤230	30	30
	230≤f≤1 000	37	30

注:I为电流;f为频率。

井下变频调速传动系统与地面存在较大的差异,首先是电压等级不同,井下电压等级主要包括 127、380、660、1 140、3 300 和 6 000 V;其次是井下

供电系统采用中性点不直接接地方式,且普遍采用电缆供电;再次是井下空间有限,且具有瓦斯等混合气体的爆炸性环境,对于高功率密度的电源变换设备,必须具有隔爆外壳。因此,标准中给出的辐射发射限值不能直接应用到井下。此外,标准中只给出了30~1 000 MHz的电磁辐射发射限值,对于30 MHz以下和1 GHz以上频率的电磁辐射发射限值没有给出,而且也没有给出磁场强度的辐射发射限值。目前还没有专门针对井下变频调速系统的电磁兼容相关标准,井下变频调速系统的实际电磁辐射情况应该比标准中给出的情况复杂。

2 井下现场测试环境和测试方法

为了研究井下变频调速系统的辐射电磁骚扰,在平煤集团十三矿现场测试了井下绞车变频调速系统的电磁骚扰情况。绞车房环境:纵向长度40 m,横向宽度4.4 m,绞车房高度3.3 m,截面形状为圆弧拱形,如图1所示。绞车变频设备采用交-直-交拓扑结构,绞车控制系统包括输入电抗、整流设备、逆变器和输出电抗。其中输入和输出电抗的型号均为2DKB-400/1140,额定电压1 140 V,额定电流350 A;整流设备的型号为QJR-400/1140,额定电压为1 140 V,额定电流为290 A;逆变器的型号为QJR-400/1140,额定电压为1 140 V,额定电流为500 A。

由于目前还没有专门用于煤矿井下的隔爆型或本质安全型电磁辐射测量设备,所以测试时必须配备瓦检员以便检测现场瓦斯浓度,在瓦斯浓度允许范围内才可以开机测试。考虑到变频调速系统辐射电磁骚扰为宽频带噪声信号,测量仪器采用R&S频谱分析仪FSP7,测量辐射磁场采用R&S HZ-10、

5 Hz~10 MHz 磁场天线;测量辐射电场采用R&S HE300 0.009~20 MHz, HE300 20~200 MHz, HE300 200~500 MHz, HE300 0.5~7.5 GHz 四副天线。井下绞车变频调速传动系统辐射骚扰测量时,应以绞车变频器和绞车电动机为骚扰源中心,结合井下实际空间和设备布局,选择合适的测量点,同时需要考虑磁场和电场天线的高度和方向位置,选取测量最大值作为井下辐射电磁骚扰的测量结果。

3 井下绞车变频调速系统辐射电磁骚扰测量结果与分析

绞车变频传动系统的辐射电磁骚扰较为复杂,实际测量时分别以变频设备、绞车电动机为骚扰源中心进行辐射电磁骚扰的测量。由于绞车房空间限制,以及考虑到变频设备、绞车电动机的位置和高度,测量点分别选择在距离2号变频驱动系统逆变器 and 绞车电动机1 m远,距离绞车房地面高度1 m处进行测量,其中绞车变频器旁的测点如图1所示。变频器处测量的辐射磁场和电场频谱分别如图2和图3所示。其中图2和图3中横坐标均为频率,图2中纵坐标为磁场强度,单位为dBpT,图3中纵坐标为电场强度,单位为dBμV/m。

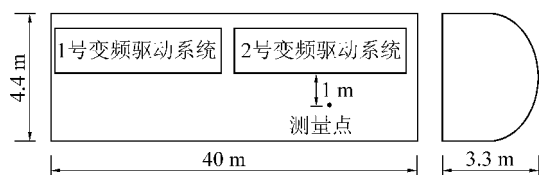


图1 绞车房尺寸及变频器附近测点布置

Fig. 1 Size of winch room and layout of measuring points near converter

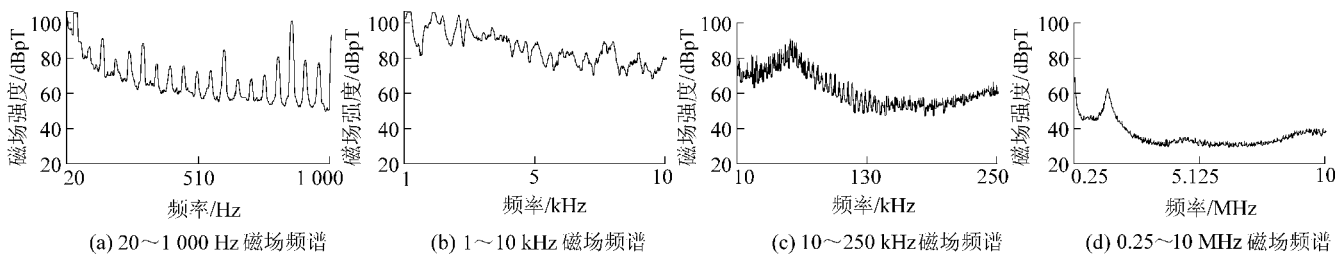


图2 磁场频谱

Fig. 2 Frequency spectrum for magnetic field

从图2和图3可以看出:绞车变频器产生的电磁辐射较为严重,无论是辐射磁场还是电场都有较为明显的噪声突起。其中磁场噪声骚扰频段主要集中在2 MHz以内,2 MHz以上频段磁场骚扰较小,磁

场场强在50 Hz达到最大值114 dBpT。产生大量磁场噪声根本因在于变频器在运行过程中产生大量的谐波和间谐波引起。变频设备辐射电场骚扰频段主要集中在200 MHz以下,尤其在20 MHz以内。在频

段 9~250 kHz 范围内,辐射电场场强达到最大,在频点 95.76 kHz 达到 122.97 dB μ V/m,约为 1.41 V/m;在频段 20~200 MHz 范围内也有一定的电磁辐射,但

辐射场强较弱,最大峰值为 32.02 dB μ V/m;在 200 MHz 以上频段,没有明显的电磁噪声突起。

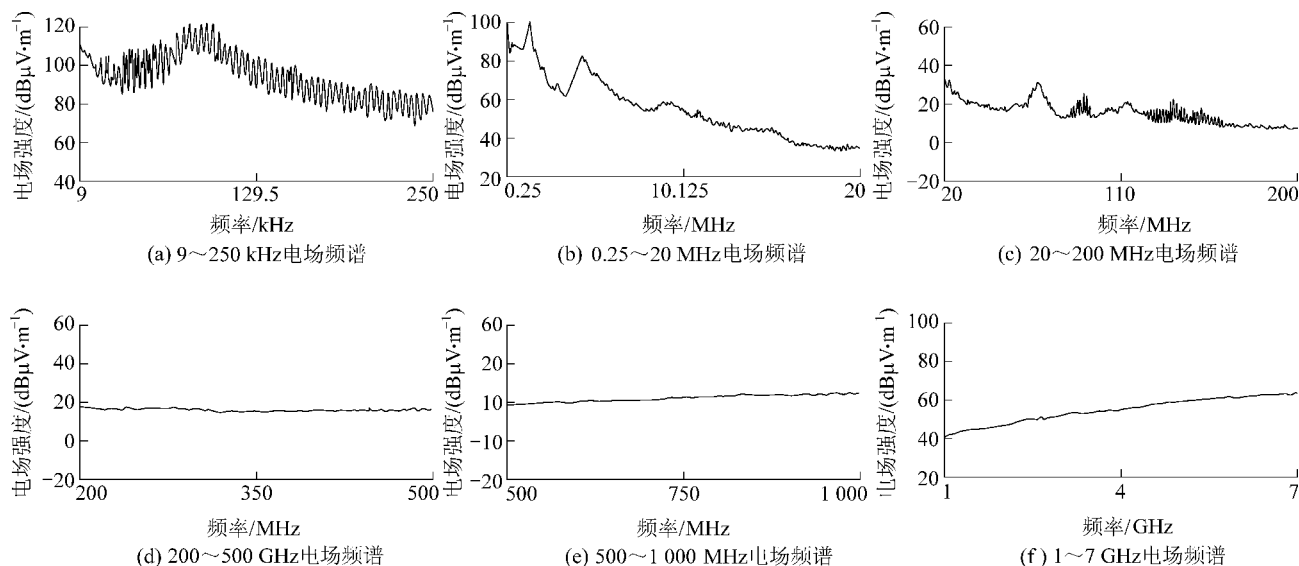


图 3 电场频谱

Fig. 3 Frequency spectrum for electric field

在测量绞车电动机辐射电磁骚扰时,发现在变频电源驱动下电动机的辐射频谱范围达到 1 GHz,尤其是高频辐射明显,但总体辐射强度较低。其中电动机的辐射磁场主要集中在 250 kHz 以内,磁场场强在 50 Hz 达到最大值为 98 dBpT,另外一个噪声峰值在频点 58 kHz 达到约 64 dBpT,其他频点的辐射磁场场强较小。绞车电动机辐射电场在频段 0.009~20 MHz 以内的噪声突起不超过 80 dB μ V/m,在 20 MHz 以上不超过 35 dB μ V/m。很明显,绞车电动机比一般工频电源驱动的电动机电磁辐射复杂^[10],主要原因是输入电源的高频化,导致电磁辐射增强;另一方面由于电抗器的滤波和隔爆外壳的屏蔽作用,使得绞车电动机的电磁辐射远低于变频器的电磁辐射强度。

4 结 论

1) 井下变频调速设备的电磁辐射较强,辐射磁场频谱主要集中在 2 MHz 以内,辐射电场主要集中在 200 MHz 以内。辐射磁场除了工频磁场以外,在其他频率点也存在明显的磁场噪声突起现象;辐射电场在 20 MHz 以内最为显著,200 MHz 以上频段没有明显的电场噪声突起,在频点 95.76 kHz 达到最大值 122.97 dB μ V/m,但在不同电动机和负载下辐射场强大小会不同。

2) 绞车电动机在变频电源驱动下,其电磁辐射明显增强,尤其是高频辐射。辐射电场频谱范围可以达到 1 GHz,但总体辐射强度较低。

3) 绞车系统由于在启停阶段实现了软启动和软停车过程,绞车启动和停车阶段的瞬态电磁辐射骚扰得到大幅降低。

4) 由于变频调速设备逆变环节固有的工作原理,导致产生较为严重的高频电磁辐射,因此井下变频调速设备附近的监测和监控系统需要采取一定的抗电磁辐射干扰的措施。

参考文献 (References):

- [1] 周玉峰,乔 和.煤矿井下软启动器的网侧谐波分析[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2010,29(2):271-273.
ZHOU Yufeng, QIAO He. Analysis on harmonic waves in network side of soft-starter in underground coal mine [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2010, 29(2):271-273.
- [2] 陈 辉,张 帆,李敬兆.MG900/2210-WD 采煤机牵引系统谐波仿真分析[J].煤炭科学技术,2013,41(5):93-96,100.
CHEN Hui, ZHANG Fan, LI Jingzhao. Analysis on harmonic simulation of haulage system for MG900/2210-WD coal shearer [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5):93-96, 100.
- [3] 殷佳琳,张 斌,秦 敏.变频器谐波干扰及其防治措施研究[J].控制工程,2013,20(6):1023-1026.
YIN Jialin, ZHANG Bin, Qin Mi. Research on harmonic

- interference of frequency converter and restraining measures[J]. Control Engineering of China, 2013, 20(6): 1023-1026.
- [4] 冯新军, 王学锋, 刘井旭, 等. 交流变频系统对安全监控系统的谐波污染及抑制措施[J]. 煤矿安全, 2006, 37(1): 51-52.
FENG Xinjun, WANG Xuefeng, LIU jingxu, *et al.* The harmonic pollution and restrain measures of AC variable frequency system for the safety monitoring system[J]. Safety in Coal Mines, 2006, 37(1): 51-52.
- [5] 孙继平, 任锦彪, 冯德旺, 等. 煤矿井下变电所电气设备电磁辐射特性的测试[J]. 煤炭学报, 2010, 35(5): 861-864.
SUN Jiping, REN Jinbiao, FENG Dewang, *et al.* The measurement on the electromagnetic radiation property of electrical equipment at transformer station in the underground coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 861-864.
- [6] 孙继平, 王福增. 煤矿井下中央变电所内电磁干扰测试及分析[J]. 工矿自动化, 2010(4): 4-6.
SUN Jiping, WANG Fuzeng. Testing and analyzing of EMI in central substation of coal mine underground[J]. Industry and Mine Automation, 2010(4): 4-6.
- [7] 孙继平, 陈辉, 姜焱. 矿井电快速瞬变脉冲辐射特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(6): 628-633.
SUN Jiping, CHEN Hui, JIANG Ye. Radiation characteristics of electrical fast transient burst in coal mines[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(6): 628-633.
- [8] 孙继平, 陈辉, 李琼琼. 矿井浪涌脉冲辐射电磁场研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(11): 1360-1364.
SUN Jiping, CHEN Hui, LI Qiongqiong. Radiated electromagnetic fields of surge current in coal mines[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011, 31(11): 1360-1364.
- [9] 冯德旺, 兰建容. 皮带巷电动机暂态过程对电磁环境的影响[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(11): 1169-1174.
FENG Dewang, LAN Jianrong. Effect of motor transient process on electromagnetic environment in belt conveyor tunnel[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(11): 1169-1174.
- [10] 陈辉, 田子建, 陆奎, 等. 煤矿井下水泵电动机辐射电磁骚扰测试研究[J]. 微波学报, 2016, 32(6): 27-31.
CHEN Hui, TIAN Zijian, LU Kui, *et al.* Radiated electromagnetic disturbance for the water pump motor in underground coal mines[J]. Journal of Microwaves, 2016, 32(6): 27-31.
- [11] PAN Tao, LIANG Hong. Analysis of electromagnetic interference from pantograph arcing with different trolley locomotive speed in coal mine tunnel[C]//International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Guilin, 2008.
- [12] ZHANG Hongwei. Analysis electromagnetic disturbance of feed switch in coal mine tunnels[C]//International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), Changchun, 2013.
- [13] FRANCESCO Della Torre, ADRIANO Paolo Morando. Study on far-field radiation from three-phase induction machines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2009, 51(4): 928-936.
- [14] GB 12668.3—2003, 调速电气传动系统 第3部分: 产品的电磁兼容性标准及其特定的试验方法[S].
- (上接第212页)
- WU Lixin, ZHANG Ruixin, QI Yixin, *et al.* 3D geoscience modeling and virtual mine system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002(1): 28-33.
- [18] 毛善君. “高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1572-1583.
- [19] 孙继平. 煤矿监控新技术与新装备[J]. 工矿自动化, 2015(1): 1-5.
SUN Jiping. New technologies and new equipments of coal mine monitoring[J]. Industry and Mine Automation, 2015(1): 1-5.
- [20] 张辉, 聂百胜, 许滕. 煤矿虚拟现实技术应用与发展[J]. 煤矿安全, 2016, 47(10): 118-121.
ZHANG Hui, NIE Baisheng, XU Teng. Utilization and development of virtual reality in coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(10): 118-121.
- [21] 柳林, 李德仁, 李万武, 等. 从地球空间信息学的角度对智慧地球的若干思考[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2012(10): 1248-1251.
LIU Lin, LI Deren, LI Wanwu, *et al.* Thoughts on smarter planet from the view of geomatics[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012(10): 1248-1251.