

# 地铁弓网燃弧特征光谱原位测试及研究



孟海凤<sup>1</sup>, 王萌<sup>1</sup>, 戴源廷<sup>2</sup>, 张俊超<sup>1</sup>, 魏志恒<sup>2</sup>, 熊利民<sup>1\*</sup>

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029

2. 中国铁道科学研究院集团有限公司, 北京 100081

**【摘要】** 为更好地满足我国地铁轨道交通弓网系统动态及性能检测核心项目——弓网燃弧标准检测需求, 提高检测的准确有效性, 建立了基于光纤光谱仪的弓网燃弧光谱原位测试系统, 用于实时测量地铁运行中瞬时不定期发生的弓网燃弧特征光谱。介绍了地铁弓网燃弧光谱原位测试系统的设计及其实验室波长准确性定标, 并在此基础上开展了地铁运行现场实时试验。以北京地铁某路线的原位实时测试数据为例, 结合列车运行监测参数, 提取并分析其弓网燃弧特征光谱。数据结果表明, 我国地铁弓网燃弧特征光谱区别于自然太阳光和普通照明光源的显著特征光谱在 220~225 nm, 峰值波长在 224.6 nm。研究结果对于解决目前国际国内标准与学术文章在光谱特征波长方面的分歧提供了实测数据依据, 对我国地铁弓网燃弧监测系统的选型和研制以及标定, 均具有重要指导意义。

**【关键词】** 计量学; 弓网燃弧; 特征光谱; 原位测试; 紫外; 峰值波长

**【中图分类号】** TB96

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2096-9015(2023)09-0056-05

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2023.0228

**【引用本文】** 孟海凤, 王萌, 戴源廷, 等. 地铁弓网燃弧特征光谱原位测试及研究 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(9): 56-60, 48.

## In-Situ Spectral Measurement and Study of Pantograph-Catenary Arcing in Subway Systems

MENG Haifeng<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, DAI Yuanting<sup>2</sup>, ZHANG Junchao<sup>1</sup>, WEI Zhiheng<sup>2</sup>, XIONG Limin<sup>1</sup>

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China

Corresponding author: XIONG Limin, Email: [xlmin@nim.ac.cn](mailto:xlmin@nim.ac.cn)

**【Abstract】** To enhance the dynamic and performance testing of subway pantograph-catenary systems, particularly in the standard measurement of arcing, a fiber optic spectrometer-based in-situ spectral testing system has been developed. This system is designed for real-time measurement of the characteristic spectra of spontaneous and intermittent arcing in subway operations. This paper presents the design and laboratory wavelength calibration of the subway pantograph-catenary arcing spectral in-situ testing system. Subsequently, real-time experiments were conducted at subway operation sites. By using in-situ measurement data from a specific Beijing subway line and integrating train operation monitoring parameters, the characteristic spectra of pantograph-catenary arcing were extracted and analyzed. The results indicate distinct spectral features of subway arcing, differing from natural sunlight and ordinary lighting, in the range of 220–225 nm with a peak wavelength at 224.6 nm. These findings provide empirical data to address discrepancies in spectral characteristic wavelengths between international and national standards and academic papers, offering significant guidance for the selection, development, and calibration of China's subway pantograph-catenary arcing monitoring systems.

**【Key words】** metrology, pantograph-catenary arcing, characteristic spectra, in-situ measurement, ultraviolet, peak wavelength

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-11-09

基金项目: 中国计量科学研究院基本科研业务费所自主项目 (AKYZZ2217); 北京市自然科学基金项目 (L211001)。

作者简介: 孟海凤(1983-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 光探测和光伏计量, 邮箱: [menghf@nim.ac.cn](mailto:menghf@nim.ac.cn); 通讯作者: 熊利民(1972-), 中国计量科学研究院研究员, 研究方向: 光探测和光伏计量, 邮箱: [xlmin@nim.ac.cn](mailto:xlmin@nim.ac.cn)。

## 0 引言

电气化轨道交通牵引供电系统中, 列车的受流质量和安全运行与弓网之间的接触状态密切相关。弓网系统动态及受流性能评价检测的核心内容包括: 弓网接触压力、硬点(振动加速度)、燃弧(火花)和接触线动态高度等参数<sup>[1-4]</sup>, 而燃弧率是检验电气化轨道交通受流系统运行可靠性和运行质量的关键指标。列车在运行过程中因各种因素导致弓网接触状态变差产生间隙, 弓网间电压击穿空气而产生离线电弧<sup>[5-6]</sup>。弓网燃弧会导致弓网电气磨损和沿线通讯干扰, 影响列车整体供电的安全, 严重时甚至会中断机车的供电<sup>[7]</sup>。

弓网燃弧包含特定波长的弧光, 并与电网接触线和受电弓材料及供电电压有关<sup>[8-9]</sup>。国内外研发了多种弓网燃弧检测设备, 安装于机车车顶以监测列车运行时产生的燃弧和火花<sup>[1, 10-18]</sup>。主流弓网燃弧检测产品的原理是利用特定紫外波段响应的光探测器, 采集弓网燃弧区别于日光光谱波段的信号。譬如, 通过火花探测器或紫外相机进行测试, 记录燃弧的次数和单次燃弧的持续时间, 进而统计限定时间或限定距离的离线次数、一次离线的时限及离线率<sup>[11]</sup>。

对于轨道交通弓网燃弧的检测, 国际上普遍参照采用的标准是欧标 BS EN 50317: 2012《轨道交通——受流系统——弓网动态相互作用测量的要求与确认》(*Railway applications -- Current collection systems -- Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line*)。根据欧洲轨道交通实际情况, 此标准定义燃弧光谱的特征波长为 220 ~ 225 nm 和 323 ~ 329 nm<sup>[20]</sup>。国内标准 GB/T 32592-2016《轨道交通 受流系统 受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证》中对燃弧特征参数的相关规定是直接参照欧标<sup>[18]</sup>。然而诸多文献报道, 我国高铁电网电压与欧洲不一样, 电网接触线和受电弓材料也与欧洲不完全一致, 并通过模拟法得出的我国高铁/地铁的弓网燃弧在 400 nm 以下主要分布在 393 ~ 398 nm、310 ~ 330 nm 以及 244 ~ 269 nm 等<sup>[11-19]</sup>。相应的, 国内有诸多弓网燃弧检测装置的研发和定标集中在 (250±10) nm 的紫外探测。国内外标准与研究论文报道之间的分歧, 导致国内实际应用于弓网燃弧检测的设备特征响应波长也不一致, 多年来

经由中国计量科学研院校准测量的弓网燃弧监测用探测器, 其光谱响应度波段范围各异, 峰值响应波长也各有不同, 如 220 nm、250 nm 或 260 nm 不等。然而, 受限于运行中列车车顶原位光谱测试的复杂性等因素, 我国弓网燃弧的实测光谱数据却尚未见有文献报道。随着我国轨道交通向着更快速更智能的方向发展, 其对燃弧检测系统的要求也逐步提高<sup>[22-23]</sup>, 急需对我国轨道交通的燃弧光谱进行原位实测试验研究, 得到其真正的特征波长, 从而为燃弧探测器的选型、研制及标定提供理论和实验依据。

## 1 弓网燃弧光谱原位测试系统

### 1.1 系统设计

本文中, 地铁弓网燃弧光谱原位测试系统的核心是经标定的光纤光谱仪及其控制计算机。将经标定的光纤光谱仪的探头对准弓和网的接触区域, 固定安装在地铁列车车顶, 再通过光纤和数据线连接到车厢内的光谱仪主体及控制计算机。列车运行过程中, 利用光谱采集软件实时抓取瞬时发生的燃弧信号并进行光谱数据分析。安装于列车顶部的弓网燃弧光谱原位测试系统示意图见图 1。受限于列车车顶条件, 无法给光谱仪安装角度跟踪配套设施, 为了提高对弓网燃弧的抓取机率, 实验中在车顶不同位置和角度安装了两套光纤光谱仪(1#和 2#)的探头, 以便在列车运行时同时采集燃弧信号。

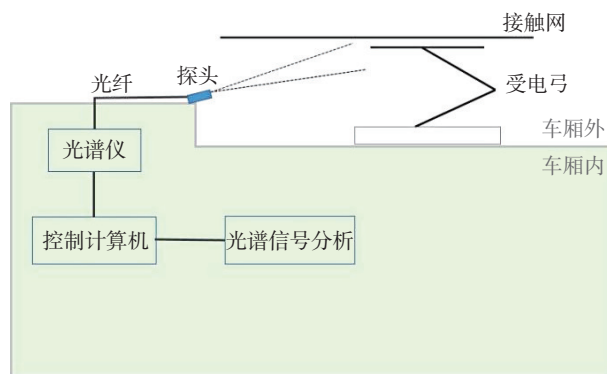


图 1 地铁弓网燃弧光谱原位测试系统示意图  
Fig.1 Schematic diagram of the in-situ spectral testing system for subway pantograph-catenary arcing

### 1.2 光谱仪的选择和标定

首先, 本文现场实验的主要目的是原位获得我国典型地铁轨道交通的弓网燃弧区别于自然太阳光和普通照明光源光谱的紫外特征波段光谱, 故需选择测量波段覆盖 200 ~ 1100 nm 的光谱仪。其次,

考虑到弓网燃弧瞬时发生的不可预测性、列车车顶安装条件,以及列车运行中光谱实时测量控制和分析等因素。本文最终选择荷兰 Avantes 公司 AvaSpec-ULS2048XL-EVO-Dual 型号的光纤光谱仪。

为了确保试验获得高准确度的燃弧特征光谱曲线,研究过程中采用标准谱线灯汞灯对所用光纤光谱仪进行预先标定<sup>[24-25]</sup>。结合实测波段范围,选取了标准谱线灯的 6 个特征波长点以验证光谱仪波长测量准确性。光谱仪测量值与标准谱线标准值之间的对比和偏差如表 1,由此可见所用 1#和 2#两套光纤光谱仪均具有较好的波长准确度,可以满足本文试验测试的要求。

表 1 现场实验用光谱仪测量值与标准谱线标准值之间的对比

Tab.1 Comparison between on-site spectrometer measurements and standard spectral line values

标准值/nm	1#光谱仪 测量值/nm	2#光谱仪 测量值/nm	1#光谱仪 偏差/nm	2#光谱仪 偏差/nm
253.6	253.4	253.4	-0.2	-0.2
312.6	313.2	313.2	0.6	0.6
404.6	404.6	404.6	0.0	0.0
435.8	435.9	435.9	0.1	0.1
546.1	546.0	546.0	-0.1	-0.1
579.1	578.0	578.0	-1.1	-1.1

## 2 实验数据采集

现场测试的北京地铁某路线采用我国主流刚性接触网供电方式,供电电压为 1500 V,试验过程中列车运行速度最高约为 100 km/h。弓网系统的弓碳滑板的主要材料组成为碳和铜,接触网的主要材料组成为铜和银。

列车运行过程中,车顶配备的可见光和红外相机拍摄的弓网燃弧照片如图 2 所示,左图为可见光照片,右图为红外相机拍摄的照片,均可看到明显的燃弧发生。

与此同时,将事先校准的基于紫外探测器的燃弧检测系统安装在车顶,实验中可全程广角监测燃弧信号。此紫外探测器事先经中国计量科学研究院光学所的光谱响应度标准测量装置<sup>[26]</sup>进行校准,所得数据曲线如图 3 所示。可知实验所用燃弧检测系统的特征响应波长范围约为 200 ~ 240nm,峰值响应波长点约为 225 nm。

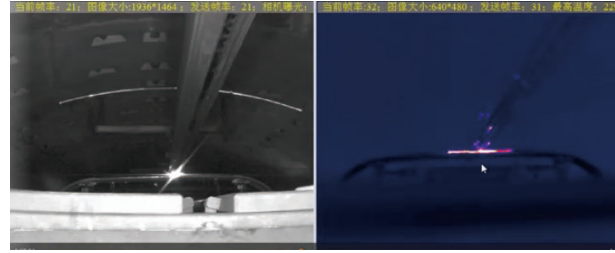


图 2 列车运行过程中燃弧的可见(左)和红外(右)照片

Fig.2 Visible (left) and infrared (right) images of arcing during train operation

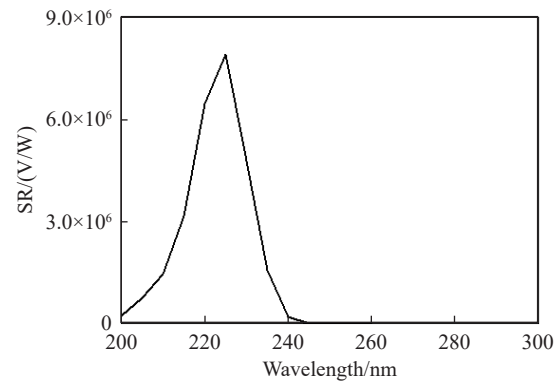


图 3 试验过程中所用燃弧探测器的光谱响应度曲线  
Fig.3 Spectral response curve of the arcing detector used in the experiment

光谱原位实时测试过程覆盖列车上行和下行整个过程,期间非燃弧相关的照明光源等环境光谱曲线也会被采集到,如图 4 所示,为实时采集到的各种代表性光谱曲线。其中红色曲线为地铁线路照明光源的光谱,蓝色曲线可以看出采集到较弱的燃弧光谱,但光谱耦合在其中的照明光源占比较大。绿色曲线为采集到的典型弓网燃弧光谱,其信号较强,照明光源光谱对其几乎无影响。也正因如此,为避免引起误报误判,弓网燃弧检测系统应只对紫外波段内燃弧特征波段有响应,对自然太阳光或普通照明光源无响应。

## 3 试验数据分析

在地铁弓网燃弧光谱原位实时测量过程中,同步监测燃弧检测系统所测得的列车上、下行弓网燃弧时间如图 5 和图 6 所示。图中,红色线条为列车运行速度,蓝色点对应为期间监测到的燃弧发生时间。分析实际测试原始数据可得,列车上行正线弓网燃弧次数平均为 0.96 次/160 m,根据标准 GB/T 32592-2016 的规定,计算燃弧率为 0.14%,单次最大



燃弧时间为 30.5 ms; 下行正线弓网燃弧次数平均为 0.7 次/160 m, 计算燃弧率为 0.06%, 单次最大燃

弧时间为 27.1 ms。列车运行速度越大, 产生的弓网燃弧次数越多, 相应的燃弧能量也越大。

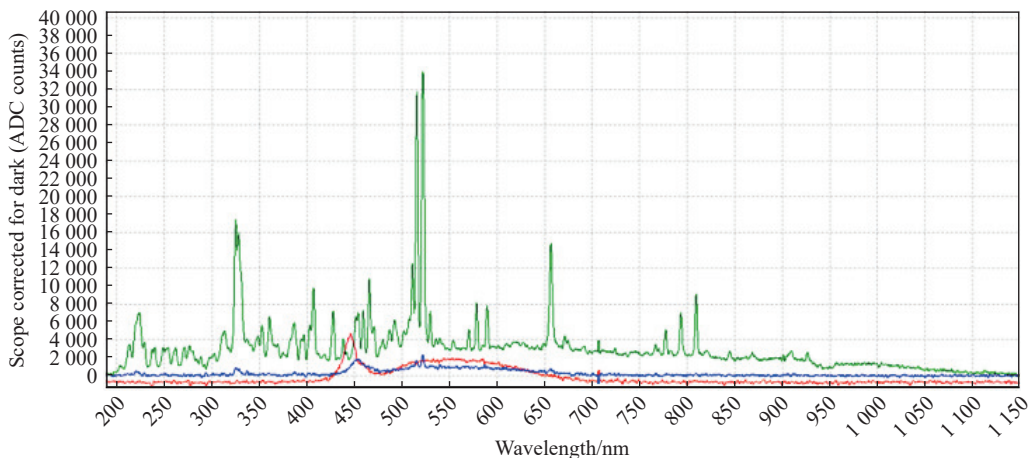


图 4 列车运行过程中实时采集的典型光谱曲线

Fig.4 Typical spectral curves captured in real-time during train operation

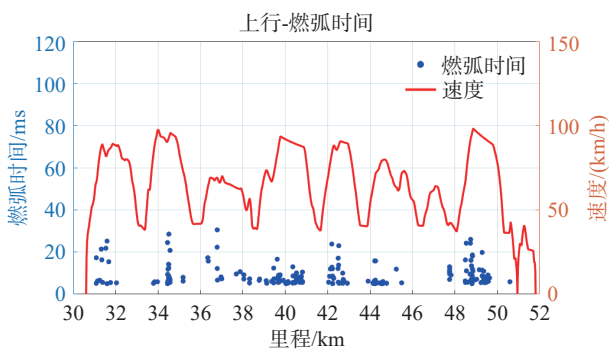


图 5 列车上行弓网燃弧时间监测数据

Fig.5 Monitoring data of upward pantograph network arcing time during train operation

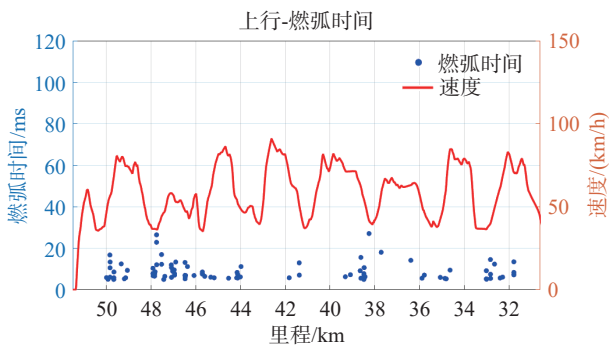


图 6 列车下行弓网燃弧时间监测数据

Fig.6 Monitoring data of downward pantograph network arcing time during train operation

由于安装在车顶的光纤光谱仪探头接收信号角度和受电弓遮挡等因素, 不是所有的燃弧信号均会被抓取到, 这也从另一方面反映了弓网燃弧光谱原位测试的难度。图 7 所示为现场实时测量所得燃弧

光谱数据与标准 AM1.5G 太阳光谱分布对比图, 其中 AM1.5G 标准光谱来源于国际标准 IEC 60904-3 (光伏器件. 第 3 部分: 带参考光谱辐照度数据的地面光伏(PV)太阳能器件的测量原理)<sup>[27]</sup>。和已有文献报道的, 通过模拟方法所得弓网燃弧现象光谱特征波段在 244 ~ 269 nm 和 310 ~ 330 nm 等相比<sup>[11-16]</sup>, 现场原位实时测量得到的地铁弓网燃弧光谱在 400 nm 以下有两个明显的特征峰, 约为 220 ~ 225 nm 和 323 ~ 330 nm。前者差别悬殊, 后者虽与文献报道接近, 但它和自然太阳光无法区分, 不适用于作为地铁燃弧信号的监测依据。

由此可知, 原位实测我国地铁弓网燃弧光谱区别于自然太阳光和普通照明可见光源的特征波段在 220 ~ 225nm。此实验结果与国际标准 BSEN 50317: 2012 及我国相应的国标 GB/T 32592-2016 所规定的 220 ~ 225nm 一致。对原始数据导出并分析可得在此特征波段内峰值波长约为 224.6 nm。根据原位实时光谱测试数据, 应选择 220 ~ 225nm 特征光谱响应的探测器用于弓网燃弧检测系统, 对其它波段响应的探测器会导致地铁弓网燃弧信号的漏检, 或因自然太阳光/照明光源信号产生误判。原位实测光谱数据对我国地铁弓网燃弧检测装置的标定系统研究也至关重要, 目前已初步开展基于紫外 LED 的标定系统研究<sup>[28-30]</sup>。

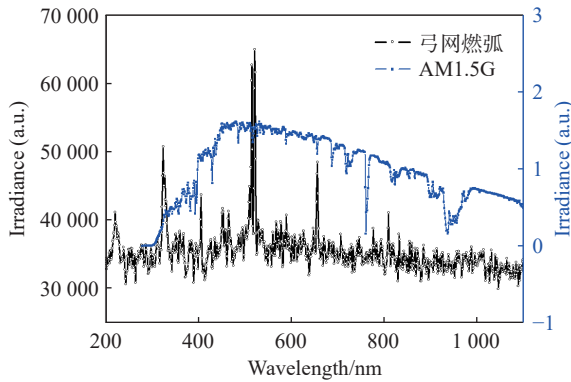


图7 原位实测燃弧光谱与标准 AM1.5G 太阳光谱对比图

Fig.7 Comparison of in-situ measured arcing spectrum with standard AM1.5G solar spectrum

#### 4 结论

随着我国地铁轨道交通的行驶速度提升和运行年限增长,准确有效的弓网燃弧检测对弓网受流质量监测愈发关键。在弓网燃弧监测系统中,其特征响应波段和响应时间是最为关键的参数。为了更准确有效地监测燃弧,对燃弧自身的特征光谱数据

的原位实测至关重要。本文采用经标准谱线灯标定的弓网燃弧光谱原位测试系统,对北京地铁某路线弓网燃弧光谱进行原位实时监测,并分析其特征光谱曲线数据。结果表明,我国典型的地铁轨道交通的弓网燃弧区别于自然太阳光和普通照明光源光谱的特征波段为 220 ~ 225 nm,其峰值波长约为 224.6 nm。本实验研究一方面为弓网燃弧相关国内/外标准和文献报道提供了第三方仲裁实测数据,更重要的是验证了我国地铁轨道交通燃弧弓网燃弧监测需采用仅对 220 ~ 225 nm 波段响应的系统,对地铁弓网燃弧检测系统的选型、研制和标定意义重大。

#### 参考文献

[1] 周宁, 蔚超, 谭梦颖, 等. 弓网系统动态及受流性能测试技术研究及应用 [J]. *铁道学报*, 2020, 42(3): 47-54.  
 [2] 吴燕, 吴俊勇, 郑积浩, 等. 高速受电弓-接触网动态受流性能及双弓距离的研究 [J]. *铁道学报*, 2010, 32(4): 38-43.  
 [3] 王黎, 高晓蓉, 赵全轲, 等. 弓网系统的动态检测及研究 [J]. *铁道学报*, 1999, 21(2): 105-109.  
 [4] 徐旻, 刘文正, 伊金浩, 等. 受电弓离线过程弓网电弧电气特性研究 [J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(2): 147-153.

[5] 王英, 刘志刚, 范福强, 等. 弓网电弧模型及其电气特性的研究进展 [J]. *铁道学报*, 2013, 35(8): 35-43.  
 [6] 王万岗, 吴广宁, 高国强, 等. 高速铁路弓网电弧试验系统 [J]. *铁道学报*, 2012, 34(4): 22-27.  
 [7] 李希炜, 朱峰. 武广高速铁路轨旁电磁干扰实测及分析 [J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(9): 121-124.  
 [8] 丁心志, 刘柱揆, 严跃, 等. 电弧光光谱成分特性及其应用分析 [J]. *电气工程学报*, 2015, 10(5): 75-81.  
 [9] 工业和信息化部. 铜及铜合金分析方法 火花放电原子发射光谱法: YS/T 482-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.  
 [10] 吴琛, 伍川辉, 杨恒, 等. 基于 LabVIEW 图像处理的弓网拉弧在线监测研究 [J]. *铁道标准设计*, 2018, 62(9): 145-148.  
 [11] 刘宝轩, 陈唐龙, 于龙, 等. 地铁弓网燃弧能量检测与牵引电流扰动分析 [J]. *铁道学报*, 2015, 37(3): 8-13.  
 [12] 马成. 基于燃弧检测装置的弓网受流质量试验分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
 [13] 卢兵, 于龙, 张冬凯. 弓网燃弧检测装置定标及其最小功率密度测量 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(3): 328-388.  
 [14] 张士奎, 周兴无, 姜保林. 基于紫外脉冲原理的地铁弓网燃弧检测系统研究 [J]. *现代城市轨道交通*, 2013(3): 29-33.  
 [15] 毛玉伟. 基于紫外光信号的弓网电弧强度检测装置的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
 [16] 于晓英, 苏宏升. 基于 PMT 电压一次积分值的城轨弓网电弧检测系统 [J]. *铁道学报*, 2019, 41(9): 41-51.  
 [17] 代富强. 城市轨道交通弓网燃弧检测与分析 [J]. *现代城市轨道交通*, 2014(3): 89-92.  
 [18] 金光. 城市轨道交通弓网燃弧现象分析及试验研究 [J]. *电气化铁道*, 2014(1): 44-47.  
 [19] 王婧, 张文轩, 杨志鹏, 等. 一种弓网燃弧模拟装置及其控制方法: CN202210187862.4[P]. 2023-11-09.  
 [20] EUROPEAN STANDARD. Railway applications -- Current collection systems -- Requirements for and validation of measurements of the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line: BS EN 50317: 2012 [S]. London: BSI Standards Limited, 2012.  
 [21] 国家质量监督检验检疫总局. 轨道交通 受流系统 受电弓与接触网动态相互作用测量的要求和验证: GB/T 32592-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.  
 [22] 雷栋, 张婷婷, 段绪伟, 等. 列车运行速度对弓网电弧电气特性的影响研究 [J]. *铁道学报*, 2019, 41(7): 50-56.  
 [23] 景所立, 魏隆, 陈欢, 等. 低气压环境电气化铁路弓网电弧放电特性研究 [J]. *铁道标准设计*, 2022, 66(6): 138-145.  
 [24] 冯国进, 甘海勇, 赫英威, 等. 一种基于谱线灯组的高精度光谱仪波长标定装置: CN201721657440. X [P]. 2017-12-01.  
 [25] 孙若端, 赫英威, 刘欣萌. 光栅单色仪波长校准装置可计量性设计研究 [J]. *计量科学与技术*, 2023, 67(6): 3-8.

- [41] 胡平, 朱梦旭, 丰荣鹏. 食品中甜味剂分类及检测技术研究进展 [J]. 食品安全导刊, 2019(12): 75-76,78.
- [42] 付孟杰. 食品甜味剂分类及其检测技术现状探究 [J]. 现代食品, 2020(8): 59-60.
- [43] Lan Chen, Yuan Zhang, Yu Zhou, *et al.* Sweeteners in food samples: An update on pretreatment and analysis techniques since 2015[J]. *Food Chemistry*, 2023, 408: 135248.
- [44] 武太鹏, 马康. 合成甜味剂检测技术的研究进展 [J]. 化学分析计量, 2017, 26(6): 109-115.
- [45] Idris M, Rao V J, Middha D, *et al.* Determination of sucralose by controlled UV photodegradation followed by UV spectrophotometry[J]. *Journal of Aoac International*, 2013, 96(3): 603-606.
- [46] Khurana H K, Cho I K, Shim J Y, *et al.* Application of multibounce attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy and chemometrics for determination of aspartame in soft drinks[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2008, 56(3): 778-783.
- [47] 齐竹华, 屈锋, 刘克纳, 等. 离子色谱法电化学检测复合甜味剂和饮料中的甜味素 [J]. 环境化学, 1999(4): 380-384.
- [48] Pierini G D, Llamas N E, Fragoso W D, *et al.* Simultaneous determination of acesulfame-K and aspartame using linear sweep voltammetry and multivariate calibration[J]. *Microchemical Journal*, 2013, 106(1): 347-350.
- [49] 刘婷, 吴道澄. 食品中甜味剂的检测方法 [J]. 中国调味品, 2011, 36(3): 1-12,16.
- [50] 俞所银, 聂磊, 闫晴. 离子色谱-脉冲安培法测定糖果中的 D-甘露糖醇 [J]. 包装与食品机械, 2022, 40(3): 39-43,50.
- [51] Gui J Y, Wei S, Zhang C L, *et al.* An innovative approach to sensitive artificial sweeteners analysis by ion chromatography-triple quadrupole mass spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2016, 44(3): 361-366.
- [52] 林榕. 离子色谱同时测定食品中糖醇和糖的方法学研究与应用 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [53] 吕鑫华. 甜菊糖苷类甜味剂的分离纯化与生物转化 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [54] 马康. 建立食品添加剂计量溯源全链条 [J]. 中国计量, 2019 (7): 73-76.
- [55] 吴雪, 薄梦, 孙晓璟, 等. 液相色谱-质谱法检测甲磺酸沙非胺中基因毒性杂质 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(11): 27-30.
- [56] 黄琼华. 山梨糖醇、甘露糖醇、麦芽糖醇和氢化淀粉水解物 [J]. 中国食品添加剂, 1996(4): 37-39.
- [57] 刘菁. 阿斯巴甜分子甜味稳定性研究综述 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(12): 13-16.
- [58] 邓虹. 纽甜的特性及稳定性研究 [J]. 饲料博览, 2016(12): 28-31.
- [59] 郑建仙, 王伟江. 高效甜味剂和甜味抑制剂的现状与发展展望 [J]. 食品与机械, 2006(1): 2-3.
- [60] 罗颖, 吴家宁, 胡嘉诚, 等. 新型功能甜味剂——三叶苷 [J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(5): 227-230.
- [61] 方聪, 刘怡雪, 黎四芳. 新型超高甜度二肽甜味剂爱德万甜的研究进展 [J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(2): 128-136.

本文编辑: 霍炜炜

(上接第 60 页)

- [26] 熊利民, 林延东, 霍超, 等. 200 ~ 400 nm 波段光电探测器光谱响应度测量装置研究 [J]. 计量技术, 2008, 52(2): 13-17.
- [27] INTERNATIONAL STANDARD. Photovoltaic devices – Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data: IEC 60904-2-2015 [S]. Geneva: International Electrotechnical Commission. 2019.
- [28] 赵伟强, 刘慧, 闫劲云, 等. 近紫外 LED 总辐射通量测量比较研究 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(5): 25-28.
- [29] 王彦飞, 代彩红, 许超群, 等. 紫外 LED 计量标准装置的建立 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 74-79.
- [30] 孟海凤, 熊利民, 张俊超, 等. 弓网燃弧检测装置的标定系统: CN 115508762. A [P]. 2022-12-23.

本文编辑: 霍炜炜