doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.03.026

粤港澳大湾区轨道交通 AFC 票务清分互联互通研究

李　吴[1]，梁强升[2]
（1. 佛山市轨道交通发展有限公司，广东佛山 528000；2. 广州地铁集团有限公司，广州 510330）

摘　要：随着国内城市群轨道交通互联互通发展进入关键期，跨区域、多制式、多运营主体背景下的轨道交通 AFC 票务清分互联互通问题得到广泛关注。分析研究粤港澳大湾区轨道交通线网运营现状、建设规划和轨道交通互联互通优先发展战略要求，探讨湾区轨道交通互联互通给 AFC 票务清分管理带来的问题和面临的挑战。综合分析对比城市群轨道交通 AFC 票务清分互联互通模式，在借鉴广佛城市轨道交通 AFC 票务清分互联互通部分成功经验的基础上，总结湾区轨道交通 AFC 票务清分互联互通最优实现模式和轨道交通湾区清分中心建设定位，提出湾区轨道交通 AFC 票务互联互通、一票通达管理思路和实现步骤，并指出湾区多网融合 AFC 票务清分互联互通下一步的技术实现方向。

关键词：粤港澳大湾区；轨道交通；互联互通；一票通达；AFC 票务清分
中图分类号：U231.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2023)03-0168-06

Interconnection of AFC Fare Clearing System of Urban Rail Transit in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

LI Wu[1], LIANG Qiangsheng[2]
(1. Foshan Metro Co., Ltd., Foshan, Guangdong 528000;
2. Guangzhou Metro Group Corporation, Guangzhou 510330)

Abstract: To address the critical issue of rail transit Automatic Fare Collection (AFC) fare-clearing systems and interconnections in the context of cross-regional, multistandard, and multioperating entities, as the development of rail transit interconnections in domestic urban agglomerations has entered a crucial phase, this paper presents an analysis and study of the current situation of rail transit network operation, construction planning, and priority development strategic requirements of rail transit interconnection in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. It also examines the problems and challenges that the interconnection of rail transit in the Bay Area poses to the AFC fare clearing system management. Based on a comprehensive analysis and comparison of the AFC fare-clearing interconnection modes of urban agglomerations and the successful experience of the Guangfo urban rail transit AFC fare-clearing system interconnection, the paper summarizes the optimal realization mode of the AFC fare-clearing system interconnection of rail transit in the Bay Area. With the positioning of the rail transit Bay Area clearing and sorting center, the paper presents the bay area rail transit AFC fare-clearing system interconnection, one-ticket access management solution ideas, and implementation steps, indicating the next technological realization direction of the Bay Area multi-network integration AFC fare-clearing interconnection.

Keywords: Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; rail transit; interconnection; one-ticket access; AFC fare-clearing system

---

收稿日期：2022-04-27　　修回日期：2022-05-25
第一作者：李吴，男，硕士，工程师，专业方向为城市轨道交通售检票票务清分，18225081196@163.com
引用格式：李吴，梁强升．粤港澳大湾区轨道交通 AFC 票务清分互联互通研究[J]．都市快轨交通，2023，36(3)：168–173.
LI Wu, LIANG Qiangsheng. Interconnection of AFC fare clearing system of urban rail transit in Guangdong–Hong Kong–Macao greater bay area[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 168–173.

当前，京津冀、长三角、珠三角、长江中游、成渝城市群轨道交通互联互通发展进入关键期。轨道交通作为串联城市群的大动脉，其票务清分管理一体化已成为城市群发展优先战略要求。各城市群均已开始票务清分互联互通的探索，并取得一些成果[1-3]。例如，各城市群通过乘车码互联，实现了乘客用一个 App 就能在城市群中乘车。然而，在无障碍、跨区域、跨制式背景下实现一票通达，需探索如何解决精确计算票价、客流及收益精准清分、城市群业务互通设备改造等一系列问题。本文专题研究湾区轨道交通票务清分互联互通存在的问题，并提出解决思路。

1 粤港澳大湾区轨道交通概况

1.1 轨道交通建设运营及规划情况

2021 年底，湾区主要城市地铁运营里程超 1 300 km。其中，广州地铁运营线路 16 条，里程近 600 km，在建线路 11 条；深圳地铁运营线路 12 条，里程超 400 km，在建线路 12 条；佛山地铁运营线路 3 条，里程 69 km，在建线路 2 条；东莞地铁运营线路 1 条，里程 37.8 km，在建线路 3 条；香港地铁运营线路 10 条，里程 264 km。大湾区城际铁路与都市圈市域(郊)铁路、城市轨道交通在广深珠枢纽场站换乘衔接[4]，目前湾区城际铁路运营线路 7 条、超 500 km，在建线路 5 条。按国家发展改革委《关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划》的最新批复，近期到 2025 年，大湾区铁路网络运营及在建里程达到 4 700 km，全面覆盖大湾区的中心城市、节点城市和广州、深圳等重点都市圈；远期到 2035 年，大湾区铁路网络运营及在建里程达到 5 700 km，覆盖 100%县级以上城市，湾区轨道交通具备支撑建设国际一流粤港澳大湾区的基础。

随着湾区城际铁路逐渐建成通车，城际铁路与中心节点城市的轨道交通线网交织并串联成网，城市交通边界进一步模糊，逐渐形成一个无障碍通行的湾区轨道交通圈，形成融合互通、一票通达的格局。

1.2 轨道交通互联互通优先战略要求

轨道交通作为城际、城市内的重要支撑，其互联互通、公交化运营可促进各城市间快速通达，缩短时空距离。因此，粤港澳大湾区的融合发展，轨道交通互联互通是一个必备要件。2019 年，中共中央、国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》[5]，提出“构筑大湾区快速交通网络”“加快城际铁路建设，有序规划珠三角主要城市的城市轨道交通项目”总体要求；2020 年 7 月 30 日，《粤港澳大湾区(城际)铁路建设规划》[4]获国家发展改革委批复，提出打造“轨道上的大湾区”。通过城市群间轨道交通互联互通的“一张网和一票通”，实现“一串城”，从而促进湾区生产要素、生活要素、环境要素的快速自由流动，最终实现湾区由交通一体化向产业一体化、生活一体化转变，实现大湾区真正的融合发展[6]。

2 票务清分互联互通面临的问题

相比广佛的互联互通，湾区的互联互通需要协调的环境和主体更多。多网融合、一票通达，面临技术标准和计价计费规则不统一、事权关系复杂、未建立统一的协调管理机构等更复杂的问题。

第一，模式上。广佛互联互通部分成功经验可推广至湾区，如明确两市互联互通政策指引和顶层设计思路，为一票通达工作奠定坚实基础；但推广至湾区还存在诸多问题：如广佛未建立城际清分中心而是两两对接，是否适合湾区；湾区各地市开通运营地铁已形成稳定的票价政策、优惠方案等，若强制统一，技术经济和社会适应性如何；数据共享，广佛两两交互共享数据尚可，若推广至湾区，将形成复杂的网状结构，是否符合系统架构设计原理和运营稳定发展的初衷；诸多的跨城规则，两两之间协商能解决，但推广至湾区是否能持续可行。

第二，管理上。湾区各市轨道交通网络化进程不一样，运营主体不一致。欲实现一票通达，首先需从顶层设计上解决管理壁垒上存在的问题。是否建设湾区清分中心主体，如何能让票务管理优势互补，形成有效资源；如何推进互联互通票务清分、乘客服务，必须做好政策协同、规则建立、财务清算、信息共享、技术准入等工作，这些是亟待解决的问题。

第三，技术上。湾区轨道交通既有单一票制，也有阶梯票制，且阶梯票价存在多种制式：既有公交化运营，也有非公交化运营；既有国铁、地方铁路、城轨，又有地铁。如何在跨区域、跨制式错综复杂的背景下，建立适时且行之有效的规则制度和方案，实现多网融合、一票通达的目标，同时确保各方权益，提供稳定、安全、高效、便捷的乘客服务，是工作推进的重点及难点。

当前，大湾区轨道交通一体化发展已然迈入“机遇与挑战并存”的历史机遇期，“多网融合，一票通行，票务清分一体化” 建设也进入关键期。如果能在管理

体制、技术等方面突破创新，提出合适的解决方案，打造便利性、先进性、可操作性的大湾区互联互通智能生态圈，则大湾区轨道交通一体化将成为世界级交通强国战略的典范。

3 票务清分互联互通实现思路

调研国内城市轨道交通 AFC 票务清分互联互通情况，如表 1 所示。北京建设轨道交通指挥中心，实现同区域、不同制式、多个运营主体情况下票务清分互联互通；上海、深圳通过两地地铁清分中心升级，实现同区域、不同制式、多个运营主体票务清分互联互通；杭绍、广佛通过两两对接，实现了两地票务清分互联互通；长三角通过链式结构，解决了跨区域、两个或以上运营主体票务清分互联互通。

表 1 国内区域轨道交通 AFC 票务清分互联互通情况

Table 1 Interconnection of AFC fare clearing system for rail transit in domestic metropolitan areas

区域	特征	清分模式	数据共享	车票	模式
北京	区域内同制式多主体	统一清分	北京轨指统一	统一	新建中心
上海	区域内同制式多主体	统一清分	上海地铁统一	统一	核心城市升级
深圳	区域内同制式多主体	统一清分	深圳地铁统一	统一	
广佛	跨区域不同制式双主体	互相清分	跨城数据共享	统一	去中心，星形结构
杭绍	跨区域同制式多主体	互相清分	跨城数据共享	不统一	
长三角	跨区域多制式多主体	互相清分	跨城数据共享	不统一	去中心，链式结构

由表 1 可知，在区域不大的情况下，核心城市升级成为周边地区的中心也起到类似效果；在区域范围大、各主体平权的情况下，如互通的主体仅为两个，则广佛及杭绍这种对等结构模式也值得借鉴；在大区域多主体时，如无统一政策指引，长三角各城市互联的去中心化区块链模式是一种可行的模式。总体效果上看，新建中心具有最强的统筹协调能力，能较好推进不同运营主体各异的票务业务。

3.1 票务清分互联互通模式

3.1.1 互联互通模式类型

湾区票务互联互通管理可借鉴国内已成功应用的模式，主要有以下 4 种(见表 2)。

模式 1：新建湾区清分中心由政府或湾区内各城市轨道运输企业共同出资新建大湾区清分中心，各市清分中心接入大湾区清分中心。

表 2 AFC 票务清分互联互通模式

Table 2 Analysis of the interconnection mode of AFC fare clearing system

性能	新建湾区中心	核心城市清分中心升级	去中心	
			星形结构	链式结构
政策驱动性	高	低	低	低
管理适应性	高	低	低	低
技术适应性	适中	适中	低	低
执行力量	强	弱	弱	弱
经济实用性	较高	适中	低	低
可行性	推荐	不推荐	不推荐	不推荐

模式 2：核心城市的清分中心升级，在保留各地清分的基础上，对核心城市清分中心扩容升级。

模式 3：星形结构去中心化，通过两两对接，实现城市间互通，互相清算。

模式 4：链式结构去中心化，建立湾区票务清分互联互通联盟，成立湾区轨道交通联盟，共同协商跨区规则，约定互联互通各事项。

3.1.2 互联互通模式分析

从政策驱动、管理适应性、技术适应性、执行力量和经济实用性 5 个方面，对互联互通模式进行研究分析。

1) 政策驱动。2020 年 7 月，国家发展改革委批复了《粤港澳大湾区城际铁路建设规划》，并在实施建议中提出票务统一思路；2021 年 1 月，广佛两市政府联合发布《广佛两市城市轨道交通互联互通行动细则》[7]，明确广佛票务清分互联互通相关原则；2021 年 7 月，城市轨道交通协会发布《粤港澳大湾区市域铁路发展思考》[8]，提出构建大湾区客票清分中心，负责大湾区各城市、各运营主体之间的票务清分和票务服务管理工作；2021 年 6 月，广东省地方发布的《粤港澳大湾区城际铁路设计标准(试行)》中明确提出，在保留既有各城市清分中心的基础上，筹建大湾区清分中心。因此，在政策上新建湾区中心是共同趋向。

2) 管理适应性。新建大湾区清分中心，能以统一的规则、标准协调票务政策，使湾区中心独立于各地方主体，可最大程度保持公平及公信，各方相对容易接受，各项票务政策及规则较为容易协调推进；核心城市升级，其规则制定易受本地规则影响，在推行至湾区各地时易受到质疑；对等结构则需各地间两两协商制定，工作量巨大且容易造成前后矛盾；去中心化区块链模式过于松散，如无一个各方认同的机构去协

调，规则制定和新业务的推行很难形成一致意见，效率较为低下。因此，从管理适应性分析，新建湾区清分中心能更好地推进和协调湾区各主体接入。

3) 技术适应性。新建湾区中心，仅统一湾区中心与各区域清分中心接口，实现车票和密钥的互通，完成跨区域票价计算和收益清分；核心城市升级须协调各城市，按照核心城市接口进行改造；去中心化结构技术接口统一难度最大。因此，从技术适应性分析，新建大湾区清分中心较为合适。

4) 执行力量。核心城市升级可能需特事特办，任何一个区域的接入均需重复协商对接，协调成本大；而对等模式则需两两协商，重复成本更多；区块链模式需要考虑链本身的维护问题，需要引入各方信任的机构。因此，在推动湾区互联互通执行力上，结合已落地的案例，新建大湾区清分中心执行力量最强，核心城市升级次之，对等及区块链模式最弱。

5) 经济适用性。从投入成本看，新建中心投入较大；核心城市升级次之；城市两两对接与对接的城市数量相关；区块链模式除了链本身建设维护成本外，在没有新业务的情况下，接入成本相对较低。

综合上述分析，建议新建湾区清分中心。

3.2 票务清分互联互通业务管理模式

3.2.1 大湾区轨道交通清分中心定位

广州、深圳、佛山、东莞、香港等城市地铁已独立成网，票务清分系统运营区域管理。各运营管理机构有独立完善的清分对账机制，且具备相关车票经营、票价、清分规则等事权。要实现互联互通，要完成 4 个目标：第一，完成互联互通 AFC 技术协同、AFC 设备准入，奠定技术最小改造基础，研究解决如何在最小改造情况下实现各地车票互联互通；第二，完成票价、票务规则管理，协调各方明确跨区出行票价政策及计算规则，完成一票畅行的票价计算；第三，完成轨道交通跨区跨制式出行的精准清分；第四，实现乘客数据共享，实现实时出行信息、票价、车站信息等必要的乘客数据收集与共享，为大湾区提供更为优质的乘客服务，推动湾区出行大融合。基于 4 个目标，建议大湾区轨道交通清分中心定位如下：

1) 大湾区一级清分中心。在大湾区互联互通的管理上采用分级管理，大湾区清分中心为湾区一级清分中心，湾区各城市地铁和城际清分中心为二级清分中心。

2) 清算、数据共享中心。它是大湾区统一的票务数据清算中心、数据共享中心，统一事权、统一对账，收集湾区各城市最完整的客流、交易数据，支撑实现湾区轨道交通票务服务中心的功能。

3) 研发、检测中心。制定统一的技术标准，评估新技术的可行性，并具备自主研发能力，可自行改造系统终端、后台等软件。同时，建立统一准入湾区清分中心的机制，在检测中心通过检测后才准予接入或升级。

4) 协调仲裁中心。定位大湾区为各个城市线网级清分系统，担任各市数据仲裁的裁判员角色，协调湾区内各城市主体及与第三方城市通卡的相关业务运作。

3.2.2 互联互通业务管理思路与原则

大湾区多网融合、一票通达，关键是要解决密钥分发管理、车票互通、票价计算、票务收益精准清分、数据共享 5 个要素[9]。为最大程度吸引各个城市的加入，具体业务管理思路：一是求同存异，共建、共享、共治；二是合理规划经营分配规则，经营权益分配是未来各地互联互通的主要障碍；三是用技术标准化奠定最小改造基础，研究如何在最小改造的情况下支持各地的车票；四是实现多网融合，通过新技术使用，实现精准清分。基于以上思路，建议核心要素管理原则如下：

1) 票务政策及票价计算管理原则。一是统一制定原则，跨区域票价由湾区中心协调各地统一制定，建议优惠为实际路径下优惠之和。二是差异化计算原则，票务政策以遵守当地票价政策为前提，保留地方票价制定主权，城市内票价由各方自己计算。

2) 车票互通管理原则。一是最小化改造原则，全国一卡通及岭南通在湾区各市均已支持，互通改造量小，应保留；各地城市已使用当地乘车码的，采用线上入口统一方式实现最小化改造，易于推广，应推荐使用。二是优化票卡种类原则，湾区轨道互通后，车票发行时优先考虑湾区内的通用，为降低业务复杂性，建议各地以发展电子车票为主。

3) 密钥分发管理原则。一是分级管理原则，大湾区清分中心作为湾区车票密钥顶层管理机构，具有权威性和公正性，负责各地公钥签发和管理数字证书，各地作为二层级清分中心，到湾区清分中心上传及下载密钥；二是支持地方发行原则，密钥认证是车票发行的根本，密钥发行后，私钥由各地自行保留用于发行车票，而公钥则由湾区清分中心的密钥认证系统进

行数字签名。这既能确保车票互通，也杜绝了密钥伪造的风险。

4) 收益清分管理原则。一是统一对外原则，对于全国一卡通、岭南通等非轨道交通发行车票，跨区域交易建议由湾区中心统一结算；二是精准清分原则，为实现不同乘车区段的差异化收费、清算，可结合实名制、打标记、生物特征识别、UWB(超宽带通信)等技术，对乘客出行路径进行精准定位，以达到票价精准计算，收益精准清分的目的。

5) 数据共享管理原则。一是不可篡改原则，大湾区数据共享平台采用区块链[10]联盟链模式，湾区清分中心承担其中的主链，二级清分中心作为链上的各个节点，链上的所有交易不可篡改，且能实现用户数据、乘车数据共享，在确保提供优质服务的同时，还能兼顾各个轨道交通运营主体的利益；二是实时共享原则，基于乘客服务需求，对跨城数据实时共享；三是最小共享原则，为节约资源并考虑各轨道交通主体的自身利益，各地在自有区域内部的交易数据可无需共享，只对可能跨城数据进行统一管理，统一跨区域数据的支撑服务。

3.3 票务清分互联互通的实现步骤

实现大湾区票务清分互联互通一票通达，在基于以上管理思路和原则为顶层设计的基础上，考虑技术的成熟和线网联通进度，编制具体方案，分步实施。

1) 第一阶段，综合人脸识别跟踪、无线通信、位置信息分析等多种技术手段，实现无感精准清分，完成广州都市圈统一清分。结合已开通和近期开通线路的情况，筹建湾区清分中心，实现广佛线网与广州都市圈的城际无障碍换乘和不同主体间的精准清分，奠定跨区域、跨制式、跨运营主体广州都市圈一票通达的基础。无感精准清分是能否实现大湾区一票通达的核心关键点，各轨道交通企业应投入重点力量组织新技术研究，并逐步试点应用。

2) 第二阶段，建设湾区清分中心一期，协商制定互联互通及接入清分中心的标准，实现广深都市圈统一清分。可参考东京湾轨道交通建设经验[11]，明确湾区新建城际线路、地铁标准一致的要求，实现互联互通，减少换乘。在技术上，湾区中心要充分预留对等模式、区块链模式等多模式接口支持，无缝打通并使广深都市圈接入湾区清分中心。

3) 第三阶段，实现大湾区统一清分、一票通达。通过探讨共享票务行程数据及车票互认、安检互认等技术及管理思路，在建设湾区中心时预留接口，按实施方案推进湾区清分二期建设，实现与国铁集团、香港和澳门互联互通。

4 结语与展望

笔者论述了粤港澳大湾区互联互通管理定位、思路原则和具体实现的步骤，提出了大湾区城市群多网融合、一票通达可行有效地实现路径和建设管理模式。然而，实现湾区一票通达，许多具体工作须落地执行。

1) 争取政策支持。通过争取省级主管单位的认可，明确湾区清分主体的管理事权和管理机构；争取湾区中心建设与可持续经营资金支持，确保湾区中心的建成和可持续经营；同时，进一步总结国内外同行的经验，顶层奠定湾区票务清分互联互通的大原则。

2) 管理模式探讨先行。建议在省层面明确互联互通大原则的前提下，尽快明确与落实一票通达、精准清分、数据共享等具体工作细项。

3) 技术创新储备。研究出无感且能实现票价精准计算、收益精准清分的方法和系统，是最终实现湾区互联互通的必经之路，需进一步研究可行的技术方案。

4) 编制大湾区清分中心建设技术方案。建设大湾区轨道交通清分中心为城市群首创，应以管理思路为顶层设计，建设大湾区轨道交通清分中心为城市群首创，明确粤港澳大湾区 AFC 票务清分一体化结构的系统架构系列图谱、设备功能系列图谱、业务数据流程系列图谱等。

实现湾区市域城际与各城市地铁 AFC 票务清分互联互通、一票通达，只是打造轨道上大湾区的第一步。后续须持续研究，探索实现与国铁线网的互联互通，建成区域一票通达、与国铁互联互通的轨道交通系统网络。

参考文献

[1] 张森，于敏. 都市圈跨制式轨道交通贯通融合票价体系研究[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 79-84.
ZHANG Sen, YU Min. Fare system under the background of integration of cross-standard rail transit payment areas in metropolitan area[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 79-84.

[2] 张鹏，王健，陆斌. 都市圈轨道交通 AFC 系统互联互通建设关键问题探讨[J]. 都市快轨交通, 2022, 35(2): 149-154.
ZHANG Peng, WANG Jian, LU Bin. Key problems of interconnectivity building for rail transit AFC systems in

metropolitan areas[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(2): 149-154.

[3] 刘子长. 广州与佛山跨市城市轨道交通的建设与运营模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(1): 11-14.
LIU Zichang. On the construction and operation mode of Guangzhou-Foshan cross-city rail transit[J]. Urban mass transit, 2019, 22(1): 11-14.

[4] 国家发展改革委. 国家发展改革委关于粤港澳大湾区城际铁路建设规划的批复(发改基础〔2020〕1238 号)[EB/OL].(2020-07-30)[2021-08-24] https: //www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202008/t20200804_1235524.html.

[5] 中共中央、国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》[EB/OL]. (2019-02-18)[2021-08-24]. http: //www.mofcom.gov.cn/article/b/g/201904/20190402851396.shtml.

[6] 丁建隆, 蔡昌俊.新时代城市轨道交通创新与发展[M]. 1 版. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019 .

[7] 广州市人民政府, 佛山市人民政府. 广佛两市城市轨道交通互联互通行动细则[R]. 佛山, 2021.

[8] 中国城市轨道交通协会. 粤港澳大湾区市域铁路发展的思考[EB/OL]. (2021-07-15)[2022-01-21]sohu.com/a/477644228_682294.

[9] 张梦笑. 杭州都市区轨道交通互联互通后的清分模式探讨[J]. 企业改革与管理, 2021(24): 53-54.
ZHANG Mengxiao. Discussion on sorting mode after rail transit interconnection in Hangzhou metropolitan area[J]. Enterprise reform and management, 2021(24): 53-54.

[10] 杨保华, 陈昌. 区块链原理、设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
YANG Baohua, CHEN Chang. Principle, design and application of blockchain[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

[11] 蒋中铭. 东京都市圈轨道交通发展历程、特点和经验[J]. 综合运输, 2021, 43(9): 119-125.
JIANG Zhongming. The development process, characteristics and experience for the rail transit in Tokyo metropolitan area[J]. China transportation review, 2021, 43(9): 119-125.

（编辑：王艳菊）

（上接第 159 页）

[8] 段绍辉, 卫春晓, 黄洪, 等. 中低压交流电缆及附件的直流试验研究[J]. 中国电业(技术版), 2014(1): 4-6.
DUAN Shaohui, WEI Chunxiao, HUANG Hong, et al. The experimental study of medium and low voltage AC cable and accessory which used in DC condition[J]. China electric power (technology edition), 2014(1): 4-6.

[9] YU Jingzhe, CHEN Xiangrong, MENG Fanbo, et al. Numerical analysis of thermo-electric field for AC XLPE cables with different service times in DC operation based on conduction current measurement[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2020, 27(3): 900-908.

[10] 陈铮铮, 赵健康, 欧阳本红, 等. 直流与交流交联聚乙烯电缆料绝缘特性的差异及其机理分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2644-2652.
CHEN Zhengzheng, ZHAO Jiankang, OUYANG Benhong, et al. Difference in insulation characteristics and mechanism between AC and DC XLPE cable's material[J]. High voltage engineering, 2014, 40(9): 2644-2652.

[11] 刘贺晨. 高压直流电缆绝缘老化对空间电荷特性的影响及其电树枝特性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
LIU Hechen. Influence of HVDC cable insulation ageing on the space charge distribution characteristics and the study of the DC electrical tree properties[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[12] 秦海鸿, 徐克峰, 王丹, 等. SiC MOSFET 短路特性[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 348-354.
QIN Haihong, XU Kefeng, WANG Dan, et al. SiC mosfet 短路特性[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2018, 50(3): 348-354.

[13] 王占扩. 基于碳化硅器件的 PWM 整流器控制与保护[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
WANG Zhankuo. Control and protection for PWM rectifier based on silicon carbide power device[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.

[14] 中国工程建设标准化协会. 直流照明系统技术规程: T/CECS 705—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

（编辑：王艳菊）