基于数字孪生的博物馆智能运行中心构建探析*

Study on the Construction of Museum Intelligent Operation Center Based on Digital Twin

马玉静
Ma Yujing
（中国国家博物馆，北京，100006）
（National Museum of China, Beijing, 100006）

内容提要：随着智慧博物馆建设的推进，通过数据采集、分析、理解、判断，从而形成决策的智能运行模式成为博物馆发展趋势。数字孪生技术作为推动智慧博物馆建设的创新模式和转型路径，亦是必然选择。本文介绍了博物馆藏品、展览、观众、场馆等主要实体数字孪生模型的构建，阐述了以透彻感知、泛在互联、智慧融合为特征的博物馆物理空间、信息空间同生共存、虚实融合的智能运行中心体系架构，深入剖析了其在综合运营态势、藏品全景感知、观展情景研判、观众服务分析、安防设备监测主题业务场景中发挥的数据分析、辅助决策、协同联动作用，并对当前存在问题进行了总结和思考。

关键词：数字孪生　智能　体系架构　业务场景

Abstract: With the advancement of smart museum construction, it has become the development trend of the museum to form an intelligent operation mode of decision-making through data collection, analysis, understanding and judgment. As an innovative mode and transformation path to promote the construction of smart museum, digital twin technology is also an inevitable choice. This paper introduces the construction of digital twin models of main entities such as museum collections, exhibitions, audiences and buildings. Then, it expounds the intelligent operation center system architecture of museum physical space, information space coexistence and virtual real integration, which is characterized by thorough perception, ubiquitous interconnection and intelligent integration. In addition, it deeply analyzes its comprehensive operation situation, collection panoramic perception, exhibition analysis and judgment, audience service analysis, security equipment monitoring, which developing data analysis, auxiliary decision-making and collaborative linkage in the theme business scenario, then thinking and summarizing the current problems.

Key Words: Digital twin; intelligence; architecture; business scenario

* 本文系国家重点研发计划“智慧博物馆关键技术研发和示范”项目（项目批准号：2019YFC152110）、“古文字与中华文明传承发展工程”规划项目（项目批准号：G1811）阶段性成果。

数字孪生通过对物理世界的人、事、物等所有要素数字化，在网络空间再造一个与之对应的“虚拟世界”，形成物理维度上的实体世界和信息维度上的数字世界同生共存、虚实交融的格局[1]。数字孪生作为一种创新模式和转型路径，是博物馆发展的必然选择。物质实体终究是要消亡的，而数字孪生体在信息空间却可以长久保存，且可以在时间和空间上无限延展。数字孪生技术进一步促进实体物理空间、人类社会空间、信息网络空间交汇融合，推动“透彻感知、泛在互联、智慧融合”的智慧博物馆建设发展[2]。通过摄像头、扫描仪、传感器等源源不断产生数据，建立起藏品、展览、空间、设备、观众等各主体在信息空间的数据模型映射；借助物联网、Wi-Fi、5G等泛在互联网络，基于分布式计算的云平台，实现数据模型在信息空间的高效传输与存储；搭建博物馆智能运行中心，运用大数据、人工智能、机器学习等新一代信息技术手段，实现数据采集融合、治理管控、挖掘分析等，使数据在信息空间大规模、高精度地仿真推演计算成为可能，从而在信息空间构建一个与实体博物馆数字孪生的平行博物馆[3]，实现相关事件的模拟推演和未来趋势预测，指导实体博物馆的科学、有效、可持续运行，最终实现智慧博物馆自主学习和迭代提升。

一、数字孪生

2003年，美国密歇根大学的格里夫斯（Grieves）教授在产品全生命周期管理课程上，初步提出数字孪生的构想。直到2010年，“数字孪生”一词在美国国家航空和航天局（NASA）的技术报告中被正式提出，并被定义为“集成了多物理量、多尺度、多概率的系统或飞行器仿真过程”[4]。此后，数字孪生技术引起广泛关注。2016年，全球最具权威的IT研究与咨询的高德纳咨询公司将数字孪生列为十大战略科技发展趋势之一。目前，有关数字孪生的定义并未统一，北京航空航天大学陶飞教授认为，数字孪生是以数字化方式创建物理实体的虚拟模型，借助数据模拟物理实体在现实环境中的行为，通过虚实交互反馈、数据融合分析、决策迭代优化等手段，为物理实体增加或扩展新的能力[5]。数字孪生参考模型由三部分构成：物理空间的物理实体、信息空间的虚拟实体、虚实之间的连接数据和信息。其作为一种充分利用模型、数据、网络智能并集成多学科的技术，能精准反映对应实体的全生命周期过程，具有虚实融合、实时呈现、辅助决策等特点，并在智能制造、工程建设和其他学科分析等领域都有较为深入的应用。近年来，随着物联网、大数据、云计算、人工智能等新一代信息技术的发展，数字孪生得到越来越广泛的应用。2020年4月，国家发展和改革委员会、中央网信办印发《关于推进“上云用数赋智”行动　培育新经济发展实施方案》，多次提及数字孪生技术，并鼓励开展数字孪生创新计划。因此，数字孪生作为智慧博物馆建设的创新模式和转型路径成为必然选择。

二、基于数字孪生的实体数据模型构建

物理空间与信息空间的深度融合是智慧博物馆建设的关键，博物馆物理实体在信息空间中的数据模型是指“对应的数字孪生体以及数字化全生命周期的数据管理”[6]，主要指利用扫描仪、传感器、摄像头等感知设备从空间、时间、功能等对物理实体进行采集、监测，使藏品、展览、观众、场馆等各个要素由实体形态向数字形态映射，并以模型、影像、全景等数据形态形成全生命周期的数据管理。

（一）藏品

博物馆文物数字化工作从20世纪80年代启动，经过信息化、数字化、智慧化等发展阶段，已经基本完成文物本体信息、影像信息、管理保护信息等的数据采集著录。博物馆通过高清拍摄、三维扫描等方式，获取藏品微米级的空间几何信息和千万级超高像素的纹理信息，形成真实高度还原的数字孪生体，实现藏品实物形态向数字形态的精准映射；利用有效的信息化管理手段，实现考古报告、藏品档案、研究分析成果等纸质档案电子化，构

建起文物考古、征藏、研究、展陈、教育、传播等多维度、全生命周期的数据管理；利用各类传感器实现藏品空间感知，温湿度、光照、菌落等物理环境变化感知，从而在数字孪生空间与实体物理空间的协同联动实现藏品的预防性保护；利用射频识别（RFID）等物联网技术，在藏品出入库盘点、定位识别查找等核心管理环节，实现科学规范实时动态应用，形成藏品流程可追溯、安全有保障的智慧管理新模式。

（二）展览

展览是博物馆研究成果体现，是教育、传播的载体。新冠肺炎疫情以来，信息空间的虚拟展览得到快速发展。目前展览数据在信息空间的体现有两种方式，一是博物馆线下实体展览的复制。通常利用拍照、测量、三维扫描等数字孪生方式获得数据，利用计算机数字影像技术在虚拟网络空间再现展览，观众可以按照设定好的参观路线图，以交互的方式身临其境在虚拟空间里漫游，观看展品、展板、文字说明等，甚至可以360度旋转观看文物细节。二是博物馆线上策划的展览展示。由于数字资源的可分解、重构，数字空间和时间的无限延伸等特性，可充分利用馆内馆外、国内国外等文物数字资源，在线上虚拟空间完成展览主题策划、数字展品展示、学术内容探讨、观众在线互动等多种功能的展览。线上展览的成功进一步推动线下展览的举办，如浙江省博物馆推出的云展览“丽人行——中国古代女性图像”，在广受好评的同时开始启动线下展览的筹备举办，使信息空间和物理空间以双向交互的方式协同联动，重新构建观众与文物、展览、博物馆观众相互之间的关系。

（三）观众

观众是博物馆教育、传播服务的对象，在信息空间的数据模型体现为个性特征、心理期望、参观喜好等特质，即观众画像，一般通过静态属性数据和动态行为数据，结合定性和定量共同描述。由于观众参观博物馆的分散性、流动性和无组织性，博物馆想要为观众提供精细的个性化服务，就需要进行分众化研究，为个体进行数据模型构建和画像研究。通过注册、预约等采集诸如年龄、性别、教育程度、职业、地区等人口统计学数据；通过Wi-Fi、蓝牙、地磁、惯导等，融合室内定位技术，采集观众在展厅的行为轨迹、留驻时长；通过社交媒体获取观众浏览、点赞、分享、评论、互动等数据，借助多维度数据的采集融合、挖掘分析，可以为观众构建画像[7]，便于博物馆了解观众需求，以个性化的方式为观众提供精准服务，从而形成博物馆与观众理解之间的最佳互动模式。

（四）场馆

博物馆场馆是藏品存放、展示，观众参观活动的重要场所，是“人、物、空间”运营场景中管理难度最大的区域。为便于实时掌控博物馆空间运行状态，利用建筑信息模型（BIM）、地理信息系统（GIS）等数字孪生技术，整合场馆内外1∶1数字孪生，从多维多尺度构建与真实场馆精准映射的数字孪生模型，可以在虚拟空间实时监测公共空间利用情况，辅助引导规划空间利用；通过电梯、空调、给排水等设施设备的精细建模，可以在虚拟空间对场馆设备运行情况进行实时监测，一旦出现故障，可及时发出报警信息，自动派单进行维修处理；基于场馆模型，融合高清摄像头、人脸识别等视频数据，可实时监测展厅人流拥挤程度，及时做出人员疏导等安全方案。

除此之外，智慧博物馆建设过程中，孪生数据越来越复杂多样，呈现出规模海量、来源多样、格式繁杂、采集实时等特征。由于分布式计算、大数据挖掘分析等技术的不断发展，基于博物馆私有云平台，针对博物馆藏品、展览、观众等核心业务数据，财务、资产、办公等行政管理数据，楼宇、设备、安防等运维保障数据，进行实体、流程、服务和管理全生命周期的数据管理，如对各类数据资源进行元数据及本体层次标引，基于语义本体提炼各种实体关联，基于实体及其关联图谱搭建数字孪生场景等。通过对各业务环节的数据进行汇聚、治理、管控，深度挖掘分析，以及数字化重构，实现物理空间的无序涌现到虚拟空间的有序收敛。

三、博物馆智能运行中心构建

博物馆是一个以藏品、观众等为核心的关联融合、动态演化的有机生命体，各数据模型并非孤立发挥作用。随着智慧博物馆建设的推进，随时随地获取数据和信息的能力越来越强，通过数据分析、理解、判断而形成决策的智能运行模式成为博物馆新的发展形态。博物馆智能运行中心通过对“人、物、场馆”等全要素数据化，以及数据资源采集、治理和处理分析模式，对即时数据和历史数据间关联关系进行不断的分析研究和深度学习，结合行业体系化、专业化的分析算法模块及辅助数据模型，形成博物馆“智慧大脑”，模拟人类预判博物馆人与人、人与物、物与物之间的实时动态智能化识别、定位、追踪、监控以及观众喜好等综合性问题；通过各种通信手段、视频资源融合、领导驾驶舱大屏显示统一控制，实现对事件的快速研判和会商决策，协同联动指挥，为博物馆全业务智能化、精细化管理提供及时、精准的数据支撑和决策依据，推动博物馆从静态管理体系向动态生态系统转型。

（一）体系架构

博物馆智能运行中心是利用云计算、大数据、物联网、移动互联网、人工智能等技术与业务场景深度融合的神经系统，从端点感知、信息传送、大脑分析决策，再到反馈指令、完成行动，构成一个完整的神经网络来实现闭环管理。因此，体系架构按照“透彻感知、泛在互联、智慧融合”的技术路线，构成“1+1+1+N”的体系架构模式，即

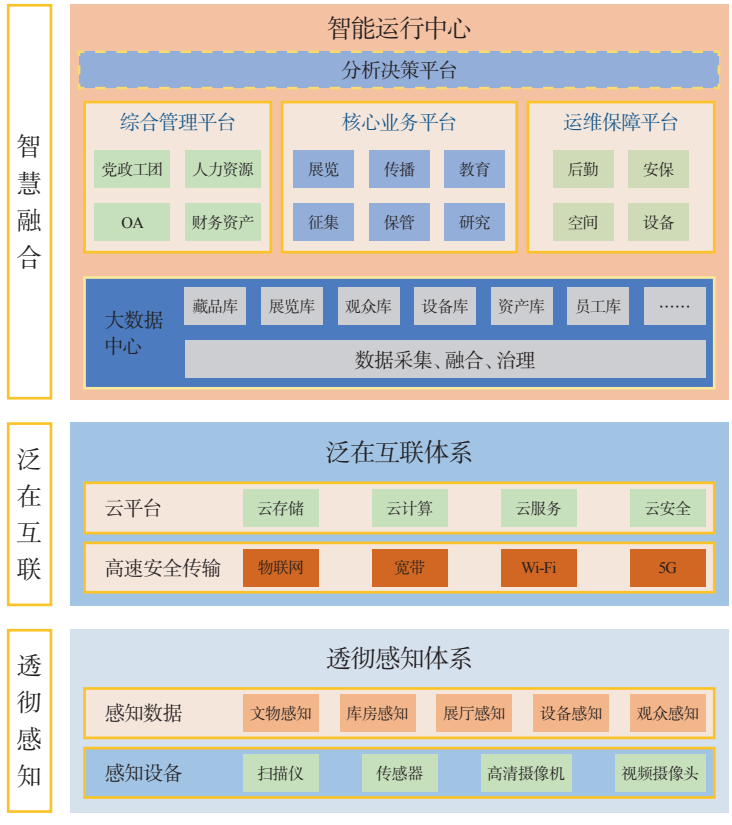


图1 博物馆智能运行中心体系架构

一套全面的透彻感知体系，一体化的云网全联接的泛在互联体系，一个高效的智能运行中心，N项智慧应用场景（图1）。

1. 透彻感知

透彻感知是全面及时获取事物数据和信息的基本条件。利用可以随时随地感知、测量、捕获和传输信息的设备、系统或流程收集各类数据。通过扫描仪、传感器、高清摄像机、视频摄像头等实现对文物、库房、展厅、设备、观众等的全面监测和动态感知，形成跨部门协作、跨系统集成、多端口采集的数据和信息，构建多源汇聚、泛在物联的感知体系，用于支撑数据层面的挖掘分析，构建不同业务的智慧场景。

2. 泛在互联

泛在互联是无时不在、无所不在数据实时通信的重要保障。博物馆搭建物联网、宽带、Wi-Fi、5G等高速泛在、深度覆盖、高效便捷的通信网络，为透彻感知层数据采集汇聚提供支撑；搭建大容量、高带宽、可弹性扩展的博物馆云平台，形成逻辑统一、物理分散的数据中心，为博物馆大数据应用提供安全、优质、高效的存储和计算服务；通过云网融合、安全可控的信息基

础设施，实现人与物、物与物、人与人的全面互联互通，为各孪生数据之间的融合重构搭建一体化的基础底座。

3. 智慧融合

智慧融合是数据挖掘分析，形成决策的实现途径。智能运行中心涵盖大数据中心和分析决策平台。大数据中心围绕数据的“采、存、算、管、用”全链条能力，集数据采集与汇聚、存储与管理、计算与分析、治理与管控、应用与服务为一体，通过建立体系化、标准化的数据采集、存储、交换、应用流程，开展对文物藏品、研究成果、陈列展览、观众服务、馆内空间、设备设施等全要素数据采集工作，使“业务数据化、数据资产化”，构建文物、展览、研究、设备、资产等专题库，形成博物馆数据资产运营管理闭环体系，一方面为综合管理平台、核心业务平台、运维保障平台等业务应用提供全域数据服务，另一方面为运行决策分析提供数据支撑服务。

分析决策平台利用BIM三维建模、全景视频融合、大数据分析、深度学习等信息技术，通过数据可视化形式“一张屏”监管整个博物馆运营状态，实现场馆建筑体、展厅空间、安防保障等综合运营态势分析；藏品征集保管、修复保护、数字资产情况全景呈现；展览排期、观展人数、热门展览、舆情监测等情景分析研判；对预约人数、到馆情况、观众画像等开展观众服务分析；对安防、消防、设备、能源消耗等进行安防设备监测。

（二）业务场景

1. 综合运营态势

综合运营态势是博物馆运行整体感知的数据可视化服务。通过大量数据汇聚、挖掘、分析，利用数据可视化形式展示、统计运营与运维等重要数据，以数据总览和实时监测方式实现“一张图”监管整个博物馆运营状态，实现对资源的即时洞察、对业务的辅助决策、对过程的精细管理（图2）。

一方面，依据《国家一级博物馆运行评估指标体系》[8]，从内部管理、服务产出、社会传播等一级指标，藏品管理、科学研究、陈列展览、社会教育、文化传播、观众数量等二级指标，通过各业务系统即时数据和历史数据不间断分析研究和深度学习，从时间、空间、层级结构等多方面进行数据统计分析



图2 综合运营态势

可视化呈现。另一方面，通过BIM建模、视频融合数字孪生技术，将场馆空间、展览分布、文物利用、客流情况、能源消耗、安防管理等系列关键指标项，通过可视化大屏展示系统自动对各业务场景实时可视化呈现，并进行动态调整与资源优化，更好地发挥博物馆规模效应、集聚效应和联动效应，使管理者对博物馆运营管理、综合态势实时掌控，从而辅助决策执行。

2. 藏品全景感知

藏品是博物馆存在的物质基础，博物馆在保管和使用藏品时，应当对藏品数量、藏品类别、馆藏特色、藏品价值和可以发挥的作用等了如指掌[9]。目前，博物馆已基本实现考古发掘、征集保管、修复保护、数字资产等业务的信息化管理，相关数据的统计分析也不是问题。

藏品全景感知通过对业务系统数据采集融合、治理分析，实现藏品考古、征藏、修复、保护、展示等全生命周期的数据管理，结合藏品三维模型数字孪生数据，可以通过数据可视化的方式直观了解业务开展情况，实现对实物藏品和数字资产全面、立体、多维的全方位监管。此外，通过数据挖掘分析可计算出藏品的展出率、藏品类别数目、馆藏缺项等统计分析数据，为业务开展提供大数据支撑；通过对海量文化资源数据进行统筹分析，加强数据的管理与知识挖掘，探寻文化数据内在关联的文化价值，为文化强国建设提供公共文化服务领域的决策支持。

3. 观展情景研判

博物馆展览是根据社会需求和观众特点，利用藏品、信息、视觉形象、空间环境等因素，来表达和传递情感，引发观众对中华优秀传统文化、革命文化和社会主义先进文化的深刻共鸣，引导观众自主践行社会主义核心价值观[10]。因此，对展览的价值评估常常涵盖主题创意、展品选择、空间设计、观展热情等多个方面。

观展情景研判采用场馆BIM模型、展览全景、观众分布热力图等数据融合的方式，实时了解展览排期、展览分布、观展热点等。结合参观人数、舆情监测、热门报道、参观热力图等数据可视化体现热点展览、热门展品等，助力管理者实时掌控馆内展览分布、公共空间利用情况等；通过采集相关网络数据，建立博物馆展览档案，对展览选题、展览评估、社会影响等进行分析，并对此类选题藏品情况进行信息汇总，为办展方向及可行性提供依据，从而制定更高效更合理的策展计划，改善和提高馆内展览运营，实现观展情景研判。

4. 观众服务分析

博物馆是为观众服务的。观众服务涵盖讲解服务、餐饮休息、信息咨询、教育活动等内容。博物馆观众拥有不同趣味、动机、教育程度和文化背景，一方面通过感知终端、视频跟踪识别技术，实时监测观众数量、位置、密度和提供服务情况，形成可视化的人流态势监管，有利于管理者及时了解馆内运营状况，在人流密集情况下及时做出疏导方案。另一方面，采用大数据分析技术，通过预约系统、定位系统、社教活动系统搜集诸如年龄、性别、教育程度、职业、地区等人口统计学数据，通过对观众进行无干扰的行为监测，实时采集观众的行动轨迹、停留区域、停留时间等数据信息，研究分析观众参观前、参观中和参观后的行为信息，构建观众参观行为画像，为博物馆展览、教育、传播等各项工作决策和评估提供参考依据，以个性化服务提升观众参观体验，促使观众服务由粗放式向精准化转型。

5. 安防设备监测

将BIM建筑信息模型、安防视频在展厅重点区域、建筑外围采用全景视频融合的方式，实现馆内各区域内的人、物在静态及动态位置的实时分析；将馆内各类信息资源和基础要素进行可视化展现和监测，在海量数据积累的基础上开展数据分析挖掘，计算各展厅拥挤程度，分析出预警方案及引流方案，提出开放空间使用优化建议，为馆内的安全保障、资源调配提供有力的决策依据。

基于能源数据的可视化界面，综合展示水、电、天然气、市政热力等各项能耗情况，结合历史数据进行同比或环比的数据统

计分析，当数据发生异常时，系统自动发出警告并启动场景式的联防联动，帮助管理者全面、清晰、直观地掌握馆内实时运行态势，面对突发事件迅速做出应急决策，增强处置突发事件的能力；基于楼宇电梯、照明、空调等设备的数字孪生模型，可为设备建立全生命周期的数据信息，集合平台监测的设备运行状态、运行参数等大数据信息，建立数据预测模型，提前预警预报有隐患的设备情况，并可以一键派单及时处理。

四、余论

数字孪生是智能时代的遗传基因，可以超越产品生命周期。从历史发展的角度来看，物理实体终究是要消失的，但是它的数字孪生体仍可在数字世界中栩栩如生地存在，甚至可以在数字空间一直流传下去。数字孪生的核心是模型和数据。博物馆以场馆建筑信息模型为基础，通过全面透彻感知体系采集全业务、全要素、全生命周期实时数据和历史数据，基于高效泛在、云网融合的分布式计算、大数据分析等技术将海量数据进行汇集整合，结合专业的模型算法加以多维度可视分析，有效挖掘数据背后的价值，让数据真正可知可感，从而提升决策效率与能力。

智能运行中心的建设，是一个长期的过程。在建设的初级阶段，还存在诸多的问题：一是数据的基础还很薄弱。博物馆全要素数字化工作还有待加强，数据的标准化程度不够，有些数据关键字段为空，导致在数据挖掘分析环节数据的维度不够丰富。二是博物馆安全防范系统目前是独立的局域网，且安全性要求较高，一般不宜对其他系统开放接口，因此需要在安防局域网内进行数据脱敏处理后才可进行数据融合。三是由于当前数字孪生技术中数据融合、技术集成等相关标准仍处于缺位状态。如尚未形成通用性时空数据标准，基于GIS的空间数据尚不能高效解决三维表达和时态变化，BIM空间数据单体性较强，与GIS融合要变化坐标且实时融合较难。四是编码体系较为混乱，业务数据、时空数据与时空编码难以建立关联，多模态数据融合亟需统一标准与认证等。

有鉴于此，在总体设计阶段，既要充分明确建设需求，做好顶层设计，又要有相应的体制机制作为实施保障；在建设实施阶段，既要实现对博物馆物理实体进行数字化建模，采集全生命周期、全业务、全要素的实时数据和历史数据，搭建一套云网融合、安全稳定的基础底座，又要注重应用场景和平台构建；在持续运营阶段，既要统筹数字孪生数据融合、分析、挖掘，实现博物馆运营监管、分析研判等方面的功能和服务，又要关注接口、标准等技术层面的统一性、开放性，在运营中不断发现问题，持续优化迭代式发展。

参考文献

[1] 中国电子技术标准化研究院, 树根互联技术有限公司. 数字孪生应用白皮书: 2020版[R]. 2020.

[2] 王春法. 关于智慧博物馆建设的若干思考[J]. 博物馆管理, 2020(3): 4−15.

[3] 王春法, 王飞跃, 鲁越, 等. 平行博物馆: 新时代博物馆运营的智能管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2021(2): 125−136.

[4] 石婷婷, 徐建华, 张雨浓. 数字孪生技术驱动下的智慧图书馆应用场景与体系架构设计[J]. 情报理论与实践, 2021(3): 149−156.

[5] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018(1): 1−15.

[6] 秦晓珠, 张兴旺. 数字孪生技术在物质文化遗产数字化建设中的应用[J]. 情报资料工作, 2018(2): 103−111.

[7] 马玉静. 博物馆观众画像构建应用与实践探讨: 以中国国家博物馆为例[J]. 博物馆管理, 2021(4): 15−26.

[8] 国家文物局. 国家文物局关于发布《国家一级博物馆运行评估指标体系》的通知: 文物博发[2017]13号[A/OL]. (2017−10−23)[2022−10−20]. http://www.ncha.gov.cn/art/2017/10/23/art_2237_23560.html.

[9] 蒂莫西·阿姆布罗斯, 克里斯平·佩恩. 博物馆基础[M]. 郭卉, 译. 南京: 译林出版社, 2016.

[10] 宋向光. 物与识: 当代中国博物馆理论与实践辨析[M]. 北京: 科学出版社, 2009.