文章编号：1003-1421(2026)06-0013-12
引用格式：时菁. 铁路基础设施检测监测数据质量评价综述[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：13-24.
SHI Jing. Review on Data Quality Assessment of Railway Infrastructure Inspection and Monitoring[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：13-24.

铁路基础设施检测监测数据质量评价综述

时 菁

(中国铁道科学研究院集团有限公司 基础设施检测研究所，北京 100081)

摘 要：铁路基础设施检测监测数据质量是行车安全与智能运维的关键保障。本研究构建“通用理论-行业借鉴-铁路适配”分析框架，系统梳理数据质量评价的研究进展，从评价视角的多元选取、评价指标的专业化构建、评价方法的智能迭代3个核心维度，阐释从通用框架到铁路专业适配的路径与挑战。研究发现，当前存在理论体系不完善、专业指标缺失、评价方法与业务融合不足等问题。提出应构建多视角融合的系统性评价框架，研发行业特色量化指标、过程指标与效能指标，发展领域知识引导的混合智能评价方法，推动数据质量评价与运维价值提升的深度融合，为构建铁路基础设施检测监测数据质量评价体系提供理论支撑。

关键词：数据质量评价；铁路基础设施；检测监测数据；评价指标；评价方法
中图分类号：U29-39 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250903004

Review on Data Quality Assessment of Railway Infrastructure Inspection and Monitoring

SHI Jing

(Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: The quality of railway infrastructure inspection and monitoring data is a crucial prerequisite for ensuring train operation safety and enabling intelligent operation and maintenance. This study constructed an analytical framework encompassing “general theory, industry reference, and railway adaptation” and systematically reviewed the research progress in data quality assessment. By focusing on three core dimensions, including the diversified selection of assessment perspectives, the professional construction of assessment indicators, and the intelligent iteration of assessment methods, this study elucidated the pathways and challenges involved in adapting generic frameworks to railway-specific scenarios. The results show that current assessment approaches face several challenges, including an incomplete theoretical system, a lack of professional indicators, and insufficient integration between assessment methods and operational practices. Therefore, it is proposed that a systematic, multi-perspective assessment framework be established, industry-specific quantitative, process, and efficiency indicators be developed, and domain knowledge-guided hybrid intelligent assessment methods be promoted to further integrate data quality assessment with improvement in maintenance performance. This study provides theoretical support for establishing a quality assessment system for railway infrastructure inspection

收稿日期：2025-09-03
基金项目：中国铁道科学研究院集团有限公司科研项目(2023YJ019)

and monitoring data.
Keywords: Data Quality Assessment; Railway Infrastructure; Inspection and Monitoring Data; Evaluation Indicator; Assessment Method

0　引言

在数字化与智能化浪潮推动下，数据已成为现代铁路运维管理的核心资产。截至2025年底，全国铁路营业里程达到16.5万km，每天产生的基础设施检测监测数据体量庞大且类型多样，涵盖轨道几何、接触网、通信信号等多专业多源异构数据[1]。目前铁路基础设施检测监测数据在采集、传输、处理和应用过程中面临诸多问题，如数据干扰、数据缺失、里程误差、数据异常等，这些问题已对运维决策产生显著影响。

既有研究针对铁路基础设施检测监测数据开展了大量研究，汪鑫等[2]发现由于GNSS漂移、轮径误差及轮轨滑动，动检车采集的某线路检测数据里程绝对误差最大23.8 m，相对误差最大15.9 m；李再帏等[3]指出动态检测数据普遍存在异常值、低频趋势和里程漂移3类失真；牛道安等[4]提出“干扰修正–波形对齐–数据融合”技术链，现场验证表明未经治理的异常数据会显著放大轨道状态评估误差。铁路基础设施检测监测数据不同质量问题的处理和评价重点各不相同，如数据干扰和异常值需借助滤波与智能识别算法，数据缺失依赖插补技术，里程误差则需进行里程校正，分别对应数据完整性、准确性等评价维度。因此，建立科学、系统、可落地的铁路基础设施检测监测数据质量评价体系已成为铁路运维智能化发展的当务之急。

数据质量评价研究始于20世纪90年代，Wang等[5]提出的全面数据质量管理(Total Data Quality Management，TDQM)理论，首次就数据质量提出了较为完整的知识体系；后续发布的《数据质量 第8部分：信息和数据质量 概念和测量》(ISO 8000–8：2015)[6]、《信息技术数据质量评价指标》(GB/T 36344—2018)[7]等标准，进一步统一了数据质量核心术语并建立了通用评价指标体系，被医疗、金融等行业广泛借鉴。然而，铁路基础设施检测监测数据具有多专业耦合、时空强参考、高安全敏感等特性，通用框架难以解释“里程漂移放大评估误差”“跨专业数据冲突”等特有问题，无法直接迁移使用。现行《高速铁路基础设施运用状态检测管理办法》(交运部令2018年第19号)[8]仅对检测流程作出原则性要求；中国国家铁路集团有限公司工电部发布的《铁路基础设施检测监测数据归集管理办法(暂行)》(工电综技函〔2022〕40号)[9]明确提出对数据完整性、有效性等方面进行质量评价的具体要求。但目前，铁路基础设施检测监测领域尚未形成体系化的数据质量评价规范。

综上所述，研究聚焦铁路基础设施检测监测数据质量评价理论与实践需求，构建“通用理论–行业借鉴–铁路适配”的分析框架。首先通过界定铁路基础设施检测监测数据的质量评价对象并选取适宜的评价视角，明确“评什么”和“为何评”。其次，纵向梳理评价指标从通用维度到专业构建的演进脉络，解决“用什么评”的问题。最后，横向对比评价方法从统计规则到混合智能的技术迭代，并聚焦其在铁路场景下的适配，解答“怎么评”的问题。通过系统梳理从“通用框架”到“铁路场景深度适配”的演进逻辑，为构建铁路基础设施检测监测数据质量评价体系提供清晰、可追溯的理论依据和发展导向。

1　数据质量评价对象的铁路场景界定与评价视角多元选取

1.1　评价对象的演进与扩展

数据质量评价的对象是构建评价体系的逻辑起点，决定了评价的覆盖范围。其演进历程深刻反映了研究视角从内在数据属性走向外在业务价值的转变，评价粒度持续下沉，与行业场景的结合日益紧密。根据文献梳理，其发展可划分为3个阶段，数据质量评价对象的演进历程如表1所示。阶段Ⅰ聚焦于数据库内部静态数据值的质量，奠定了准确性、完整性等核心维度的基础。阶段Ⅱ开始应对半结构化、非结构化数据的挑战，扩展至工作表、文本、图像等多模态数据。阶段Ⅲ则跳出了数据本身的范畴，进一步与特定业务实体和流程融合，在不

表1　数据质量评价对象的演进历程

Tab.1　Evolution of data quality assessment objects

演进阶段	核心特征	代表性研究	评价粒度
阶段Ⅰ：库内聚焦	关注数据库内部静态数据值的质量	Wang等[5]；Levitin等[10]；杨青云等[11]	字段、记录(关系型数据库中的具体数值)
阶段Ⅱ：模态扩展	应对半结构化、非结构化数据的挑战	Batini等[12]；陈滢等[13]；高军等[14]	字段、记录、文档(XML、文本报告、图像等)
阶段Ⅲ：行业深化	与特定业务实体和流程深度融合	医疗：Weiskopf等[15]；翟运开等[16] 政务：Zuiderwijk等[17]；郭鑫等[18] 金融：Karkošková[19]；陈伟等[20] 电力：荀挺等[21]	业务实体-质量维度-指标

同行业领域形成了针对核心业务实体的精细化、场景化指标维度。

然而，现有研究多聚焦医疗、政务等业务流程清晰的领域，对于铁路基础设施检测监测涵盖工务、电务、供电多专业且数据间存在强时空耦合与物理关联的复杂场景，尚未建立起跨专业的、统一的本体化评价对象体系。

1.2　评价视角的多元化发展

评价视角决定了评价的出发点和价值导向，回答了“为谁评价、为何评价”的核心问题。随着研究的深入，先后形成了4种主流的评价视角，数据质量评价视角的内涵与比较如表2所示。产品视角将数据视为可衡量的“产品”，奠定了数据质量客观量化的基础。平台视角关注数据归集效率与系统可用性。用户视角将“人”的因素引入评价体系，聚焦用户满意度与需求贴合度。生命周期视角则实现了从静态快照到动态过程评价的飞跃，强调全过程的管控与追溯。

各视角均存在局限：产品视角“见数不见人”；平台视角粒度不足；用户视角主观差异大；生命周期视角虽全面但实施复杂，成本高昂。研究表明，单一视角无法满足铁路复杂场景的需求，需采用多维融合的评价思路。

1.3　铁路基础设施检测监测数据质量评价对象界定与评价视角选取

铁路基础设施检测监测数据涵盖工务、电务、供电三大专业领域，具有多源、异构、强时空关联等复杂特征。工务专业数据主要包括轨道几何、钢轨状态、路基沉降等数据，其特点是空间参考性强、时间序列特征明显；电务专业数据主要包括信号设备状态、通信系统性能等检测监测数据，强调数据的实时性和告警准确性；供电专业数据则以接触网几何参数、绝缘子状态等为主，参数间存在复杂的物理关联性。根据其形态和业务用途，列举3类典型评价对象，铁路基础设施检测监测数据典型评价对象与特征如表3所示。

表2　数据质量评价视角的内涵与比较

Tab.2　Definition and comparison of data quality assessment perspectives

评价视角	核心理念	代表性研究	核心度量属性	铁路基础设施检测监测领域映射
产品视角	数据即产品	Wang[22]；Lee等[23]	准确性、一致性、完整性	关注数据内在属性的精确性，如轨道几何参数的测量精度、传感器采集的完整性、数据文件的格式规范性
平台视角	系统服务	齐艺兰[24]；张静蓓等[25]	可用性、时效性、可访问性	关注数据归集系统的服务效能，如检测数据上传的时效性、存储系统的可访问性、接口服务的稳定性
用户视角	满足用户需求	杨青云等[11]；王今等[26]	满意度、贴合度、价值	关注数据对各类终端用户(如检测工程师、维修决策者)需求的满足程度，如数据的可理解性、对维修工单生成的支撑度
生命周期视角	全过程管控	Levitin等[10]；Chen等[27]；刘心报等[28]	可追溯性、采集合规性、清洗有效性	强调对数据从采集、传输、存储、处理到应用全链条的过程质量管控与追溯，是构建系统性评价框架的基础

表3　铁路基础设施检测监测数据典型评价对象与特征

Tab.3　Typical assessment objects and characteristics of railway infrastructure inspection and monitoring data

类别	数据示例	主要特征	典型质量关注点
几何参数类	轨距、水平、高低、接触网导高	结构化、半结构化、时间序列密集(采样频率高)、空间参考强	里程精度、时空一致性
报告文本类	监测报告、缺陷描述、检修记录	非结构化、专业术语密集	语义准确性、可追溯性
图像视频类	缺陷病害高清图像、检测视频	大容量、像素级细节丰富	清晰度、标注一致性

在评价视角的选择上，需深入分析各通用视角在铁路基础设施检测监测数据评价应用场景下的局限性及研究启示，通用数据质量评价视角在铁路基础设施检测监测数据质量评价中的局限性与研究方向如表4所示。应结合不同评价对象特点，根据业务需求动态适配：对于轨距、接触网导高等几何参数类数据需优先整合产品视角(确保参数测量精度)与生命周期视角(管控采集–传输–处理全流程质量)，其内在数据精度与全过程管理直接影响线路的安全评估；对于缺陷检测报告等报告文本类数据需重点关联用户视角(满足维修工程师对缺陷描述的理解需求)与产品视角(保证语义准确性)，避免因文本歧义导致维修决策偏差；对于缺陷图像、监控视频等图像视频类数据需兼顾平台视角(保障图像存储清晰度)与生命周期视角(追溯图像标注环节质量)。

因此，构建有效的铁路基础设施检测监测数据质量评价体系，应以覆盖全流程的生命周期视角作为基本框架，并针对几何参数、报告文本、图像视频等不同评价对象的具体特征，有机融合产品视角的内在精度要求、平台视角的服务效能以及用户视角的业务价值需求。

2　数据质量评价指标的铁路专业化构建

2.1　通用框架的范式演进

数据质量评价指标是质量评价的核心要素，指标体系的演进是一个从概念开创到标准化、多维化的过程。Wang等[5]突破“质量即精度”的传统认知，提出了包含固有质量、可访问性、上下文质量和表达质量4个维度15个指标的评价体系，奠定了多维评价的理论基石。我国国家标准《信息技术数据质量评价指标》(GB/T 36344—2018)[7]在此基础上，构建了涵盖规范性、完整性、一致性、准确性、时效性、可访问性6个一级指标和20个二级指标的层次化框架，为数据质量的量化管理提供了统一、规范的术语和测度方法，成为国内各行业构建数据质量评价体系的重要基准。

准确性、完整性等通用指标在铁路基础设施检测监测领域具有基础适用性，但其定义相对抽象宽泛，难以充分刻画铁路场景下“里程精度”“时空一致性”“多源数据耦合性”等核心质量诉求，直接套用会导致评价结果与业务价值脱节。因此，必须在通用维度的基础上，进行行业化适配并细化指标。

2.2　评价指标的行业化发展

为克服通用框架的局限，各领域纷纷开展数据质量评价指标研究，呈现出维度扩展、粒度细化、价值显化三大趋势，典型行业/领域数据质量评价指标特色对比如表5所示。

（1）维度扩展与特色化。各行业从自身业务痛点出发，提炼出高度场景化的特色指标。如大数据领域关注价值密度[29]、冗余性[44]；政府开放数据强调用户满意度、可重用性[17]与可发现性[18]；金融风控领域则极度重视可审计性、语义规范性[19]；科学数据追求长期保存性、数据影响力等[25]。

（2）层级细化与过程化。评价粒度从对数据本身的静态属性评价，延伸至对数据全生命周期的过程管控。翟运开等[16]构建了数据生命周期视角下的医疗健康大数据质量评价指标体系，在数据采集阶段关注准确性、完整性和及时性，在数据预处理和存储阶段关注规范性、安全性和一致性，在数据分

表4　通用数据质量评价视角在铁路基础设施检测监测数据质量评价中的局限性与研究方向

Tab.4　Limitations and research directions of general data quality assessment perspectives in railway infrastructure inspection and monitoring data quality assessment

评价视角	现有研究的局限性	未来研究的启示与方向
产品视角	停留在对单一数据源(如轨道几何波形数据)的简单统计，如里程准确性、数据缺失率等，缺乏对多源数据间精度耦合关系的评价	需结合铁路基础设施检测监测数据特征，将通用准确性、完整性维度转化为具象可量化的指标，如里程对齐误差、跨专业数据冲突率等
平台视角	主要关注数据汇聚平台的技术实现，缺乏从平台视角建立系统性的服务质量评价指标，如数据入库延迟率、服务调用成功率等	应建立与运维流程相匹配的平台服务等级协议评价体系，确保数据链路畅通，为实时分析与决策提供保障
用户视角	缺乏普适的评价方法，鲜有从用户视角出发的铁路基础设施检测监测数据系统性质量评价研究	可借鉴其他行业的成熟度模型，开展用户调研，构建面向不同专业、不同用户角色的“数据质量–业务效用”模型
生命周期视角	多针对特定环节(如里程校正)的“点状”创新，未能形成覆盖全生命周期的“线状”或“面状”评价体系	最具整合潜力。应以此视角为骨架，融合其他视角的维度，构建贯穿铁路数据全生命周期的动态质量评价与管控框架

表5　典型行业/领域数据质量评价指标特色对比

Tab.5　Comparison of data quality assessment indicator features across typical industries and domains

行业/领域	代表性研究	核心通用指标						特色专业化指标	价值取向与演进
		准确性	完整性	一致性	时效性	可用性	合规性		
大数据	张绍华等[29]；秦之湄等[30]；Cai等[31]；严晗等[32]	√	√	√	√	√	√	价值密度、冗余性、多样性	从体量转向价值度量
政务	Zuiderwijk等[17]；郭鑫等[18]；刘智锋等[33]		√	√	√		√	用户满意度、可重用性、可发现性	侧重公共服务与开放
金融	Karkošková[19]；陈伟等[20]；唐勇等[34]	√	√	√			√	可审计性、语义规范性	强调风险管控与监管
科学实验	张静蓓等[25]；刘琼等[35]	√	√	√		√		长期保存性、数据影响力	关注可信度与学术价值
电力	荀挺等[21]；刘文君等[36]	√	√	√	√			异常率、稳定性	保障电网安全稳定运行
医疗	翟运开等[16]；冯雨萱等[37]	√	√	√	√	√		可追溯性、采集合规性	满足临床科研复用需求
军事	王军玲等[38]	√	√	√	√	√		检查项重要性分级、与实战适配性	服务于指挥决策与任务执行
地理	王帆飞[39]；尹春荣等[40]；薛冰等[41]；诸云强等[42]	√	√	√	√	√		绝对/相对位置精度、拓扑一致性、图形光滑度	支撑GIS分析与共享服务
教育	李璐颖等[43]	√	√	√	√	√	√	业务协同一致性、教学环节完整性、指标口径统一性	支撑高校精细化管理与决策

析与应用阶段则关注互联互通性、可用性和价值性；虞业泺等[45]面向卫星装备试验鉴定场景，将合用性、正确性和有效性等指标，进一步细化为数据更新时效性、数据量适当度、阈值合理性、数据可靠性、逻辑一致性、数据表完整率等指标，形成覆盖试验全过程的链条化指标树，实现了由“事后检验”向“过程实时监控”的转变。

（3）价值显化与效用化。评价目标正从“保证质量”向“度量价值”范式迁移。孙俐丽等[46]在电商数据评价中引入“价值密度”；尤建新等[47]构建了包含“价值密度”的数据资产评价模型；黄倩倩等[48]面向数据流通交易场景，进一步提出“可交易指数”“价值实现率”“市场溢价系数”等指标，将数据质量得分折算为预期交易价格和流通潜能，实现了质量到价格的闭环。

评价指标行业化定制的核心在于实现了从“有什么评什么”到“要什么评什么”的转变。其局限在于这些指标高度依赖特定行业语境，难以直接迁移。然而，各行业通过“通用维度+专业特色”的指标体系构建思路，为铁路专用指标构建提供了参考。

2.3　铁路基础设施检测监测数据质量评价指标的构建维度

铁路基础设施检测监测数据具有多源(工务、电务、供电等)、异构(波形、图像、文本、数值)、强时空耦合的典型特征[4, 49]，其质量评价需进行定制。当前研究整体仍处于起步阶段，缺乏一个贯穿全生命周期、覆盖多专业、融合多视角的统一评价指标体系，未来应围绕以下4个维度系统构建。

（1）基础通用维度：从分散应用走向标准化基准。当前铁路基础设施检测监测领域的研究对准确性、完整性、一致性等通用指标的应用呈“碎片化”。例如，在完整性方面关注字段缺失率[4]，在准确性方面探讨轨距误差[50]。然而，这些研究多基于特定算法或模型需求，采用自定义的统计口径、计算方法和阈值(如对数据缺失率的定义或轨距误差容忍度不尽相同)，导致评价结果难以跨项目比较，无法形成行业共识。建议超越针对单一数据源或算法的零散评价，构建铁路基础设施检测监测领域的通用维度标准化体系，明确各通用指标在铁路语境下的精确定义，建立统一的、可复现的测量方法与典型阈值范围，为全行业的数据质量对标、管理与提升提供统一的“标尺”。

（2）铁路特性维度：从单专业走向跨专业耦合。现有研究高度集中于轨道几何数据(如里程校正、小波去噪[4])，对电务通信信号、供电接触网数据等研究较为匮乏，缺乏刻画多专业数据间时空一致性与耦合性的指标，难以反映铁路基础设施作为有机整体的运行状态。因此，未来的研究方向应双

向拓展：一方面将工务领域相对成熟的里程精度、波形有效性等指标深化并横向迁移至电务、供电专业；另一方面研发如“跨专业数据冲突率”“多源数据时空对齐误差”等耦合性指标，以支撑基于多源数据融合的综合性状态评估与决策。

（3）全生命周期维度：从技术环节走向全过程管控。现有研究多将数据清洗[50-51]、传输等视为孤立的技术环节，其质量评价停留在方法有效性层面，尚未将数据从采集、传输、存储到处理的应用全过程纳入系统化的质量评价范畴。未来的研究应借鉴其他行业经验[11, 28-29]，构建覆盖“采集-传输-存储-处理”全生命周期的流程质量指标。如定义并量化“数据传输丢包率”“存储数据可用性”“处理任务成功率”等指标，实现对数据全生命周期关键过程质量的监控与评价，变被动“事后检验”为主动“过程管控”。

（4）价值效能维度：从数据质量度量走向运维价值闭环。牛道安等[4]研究旨在通过大数据分析支撑“资产运维决策”，王保国等[52]在构建高铁综合维修体系时提出“维修记录闭环管理”，均隐含了对价值效能的追求，但目前未能建立数据质量与最终业务价值(如运维效率提升、安全风险降低、决策准确性改善)之间的量化关联。未来研究应突破“就质量论质量”的局限，让数据质量评价驱动运维决策优化。可借鉴数据交易[48]等领域思路，探索构建与铁路运维场景紧密相关的价值指标，例如“数据支撑维修决策准确率”“基于高质量数据的预警有效率”等，形成数据质量到业务价值的有效传导，彰显高质量数据的基础性作用。

3　数据质量评价方法的铁路场景化适配

3.1　数据质量评价方法演进

数据处理技术的发展驱动数据质量评价方法不断演进，先后经历了统计描述、专家系统、机器学习与混合智能4个阶段，其核心特点、典型方法与适用场景各异，数据质量评价方法演进对比如表6所示。

统计描述源于对数据库内数据缺陷的初步度量，开创了数据质量量化评价的先河，核心思想是通过简单的统计量对数据质量的单一维度进行量化评价，但此阶段的质量评价是“事后”评价，难以揭示数据缺陷的内在关联。

随着大型信息系统的普及，基于预定义规则进行质量校验成为核心需求。此阶段以专家系统为代表，通过将领域知识(如行业标准、业务规则)形式化为可计算的规则库，实现了质量评价的自动化和常态化，但其高度依赖预设的专家知识，难以发现规则库未覆盖的、复杂的异常模式，灵活性不足。

大数据时代使得高维、异构数据中的复杂质量问题凸显，基于模式识别的机器学习方法成为研究热点，其核心优势在于能够从数据本身自动学习正常模式，从而识别未知异常。此阶段实现了从“规则驱动”到“数据驱动”的范式转变，在异常检测、关联性分析等方面表现出强大能力。但其多为“黑箱”模型，结果可解释性差，且严重依赖训练数据质量。

为弥补单一方法的局限性，当前研究前沿强调混合智能模型，即融合多种方法优势于一体的综合评价方法，通过协同互补，实现了在大规模复杂数据环境下，兼顾评价效率、结果可靠性和模型可解释性的目标，代表了未来的发展方向。

3.2　铁路基础设施检测监测数据质量评价方法的场景化适配与融合

铁路基础设施检测监测数据质量评价并非“通用方法的简单迁移”，而是以场景为锚点、以业务

表 6　数据质量评价方法演进对比

Tab.6　Comparison of evolution of data quality assessment methods

演进阶段	代表方法与文献	核心特点	适用场景
统计描述	基本统计量分析(如完整性、准确性计算)[12]	简单直观、可解释性强，通过量化缺陷评估质量	小样本、静态数据
专家系统	SQL查询法；数据清洗[53]；规则引擎[54-56]	与数据结构和业务规则紧密耦合，自动化、效率高、依赖预设规则	结构化数据、常规检查
机器学习	孤立森林算法[36]；数据挖掘反向度量[57-58]；模式识别[59]	智能检测、高维自适应、黑箱模型	高维数据、未知异常检测
混合智能	Bootstrap+规则[60-61]；AHP-灰色[62]；范数灰关联分析[63]；综合评分[64-65]	多元融合、兼顾效率与解释性	大规模复杂数据系统

闭环为目标的系统工程，需适配多源异构数据的融合分析、支撑运维决策的场景化适配、满足全生命周期的动态质量管控，核心在于对通用方法的专业化适配与融合应用。

（1）基础统计方法需与专业算法结合。如许贵阳等[50]在处理轨道几何波形数据时，基于绝对平均值的单一异常值剔除方法和基于移动窗技术的成片异常值剔除方法，这些方法是统计思想在铁路场景的典型深化。异常值识别逻辑可表述为

$$y(i)=\begin{cases}1 & x(i)\text{为异常数据时}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

式中：$x(i)$为原始轨道几何检测数据序列中的第i个采样值；$y(i)$为对应的异常值标记，取值1表示异常，取值0表示正常。

（2）专家系统方法的行业化重构。将行业标准、规程和技术条件转化为可计算的业务规则库，是实现自动化评价的关键。依据《铁路基础设施检测监测数据归集管理办法(暂行)》(工电综技函〔2022〕40号)[9]等管理规范，设定数据归集时效性、数据文件名和类型规范性等专业规则开展校验。还可构建如“曲线超高地段，水平值须与超高值匹配”的关联规则，基于业务逻辑发现矛盾数据。

(3)机器学习方法的场景化应用，引入领域知识进行引导。采用李再帏等[3]的异常值诊断方法，由专家标注部分“波形异常”样本，训练分类模型对轨道不平顺原始采样值进行智能判别，大幅提升异常识别的准确率，为数据质量准确性和有效性评价提供支撑。利用Guo等[51]在接触网几何参数上训练的异常检测模型，适配迁移至不同线路或设备的数据，解决标注样本稀缺问题。

（4）混合智能方法的协同探索。借鉴荀挺等[21]在电网领域的实践，构建“规则过滤+模型识别+专家复核”的分层评价体系。第一层用规则引擎进行快速过滤显性缺陷(如完整性、阈值检查)；第二层对通过第一层的数据调用机器学习模型识别潜在异常；第三层对模型识别出的疑难案例，推送至专家终端进行最终裁决，并将结果反馈至模型，形成优化闭环。这种协同模式既能保证效率，又能确保评价结果的可靠性，是解决铁路基础设施大规模检测监测数据质量评价的理想路径。

4　结论与展望

4.1　结论

本研究采用框架型综述范式，聚焦铁路基础设施检测监测领域数据质量评价的理论空白与实践需求，在系统梳理通用数据质量理论、典型行业实践及铁路相关研究文献的基础上，围绕评价对象的铁路场景界定与视角选取、评价指标的铁路专业化构建、评价方法的铁路场景化适配三大核心内容，明确了从通用理论到行业借鉴，再到铁路适配的核心逻辑与路径，主要结论如下。

（1）评价对象与视角需实现铁路场景的深度融合。借鉴生命周期视角的全流程管控逻辑和产品视角的客观量化思路，结合铁路基础设施检测监测数据多源异构、强时空耦合、多专业交叉特性，构建以生命周期视角为主线，融合产品视角的数据内在精度、平台视角的系统服务效能与用户视角的业务价值需求的多维协同框架，为铁路基础设施检测监测数据质量评价明确核心范围与逻辑起点。

（2）评价指标需完成从通用维度向铁路专业化指标的拓展。借鉴各行业指标“维度扩展、粒度细化、价值显化”的演进规律，铁路基础设施检测监测数据特有质量评价指标应围绕基础通用、铁路特性、处理流程和价值效能4个维度系统构建，通过补充特有的量化指标、流程管控指标与价值关联指标，实现从数据质量评价到业务价值的闭环反馈，提升评价与铁路基础设施检测监测场景的贴合度。

（3）评价方法应走向混合智能与场景化融合适配。借鉴混合智能方法的协同优势，结合铁路基础设施检测监测数据特征，对通用方法进行专业化改造与场景适配，通过基础统计与专业算法结合、行业规则与专家系统重构、领域知识与机器学习融合，构建多层智能评价体系，以兼顾评价效率、准确性及可解释性，适配铁路基础设施检测监测数据的质量评价需求。

4.2　当前研究的不足

尽管国内外在数据质量评价方面已有较多积累，铁路领域的研究仍处于初步阶段，核心短板集

中在数据质量评价的系统性与适配性不足。

（1）缺乏系统性的、能够指导铁路基础设施检测监测数据质量评价实践的理论框架。现有研究多为针对特定数据类型或环节的零散探索，未能整合多专业、全生命周期和多维视角，导致评价实践“碎片化”，难以支撑铁路智能化运维的整体需求。

（2）适用于铁路基础设施检测监测数据的专业化评价指标建设滞后。目前仍以直接套用通用指标为主，缺乏铁路基础设施检测监测数据专业特色量化指标，数据处理流程指标和价值效能指标，导致评价结果无法有效指导数据质量优化与业务价值提升。

（3）数据质量评价方法与铁路基础设施检测监测业务场景融合不足。尽管已有统计分析等方法初步应用，但机器学习及混合智能方法的适配性研究仍较薄弱，领域知识嵌入不够，未能实现“数据–知识–决策”的闭环优化，难以满足铁路智能运维的精准评价需求。

4.3　展望

未来应跳出通用框架的局限，系统构建铁路基础设施检测监测数据专用质量评价体系，重点从以下方面开展深入研究。

（1）构建多视角融合的生命周期评价框架。明确铁路基础设施检测监测数据质量的核心内涵与评价路径，建立覆盖“采集–传输–存储–治理–应用”全流程、融合多专业视角的理论与操作框架，为实现系统化的数据质量评价提供基础支撑。

（2）研发深度场景化与价值化的评价指标。结合工务、电务、供电等专业运维场景，提炼并量化一批专业特色评价指标，如“检测频次覆盖率”“数据归集时效性”“维修响应效率”等，并逐步建立与安全效益、运维成本关联的价值效能指标，形成精准反映铁路基础设施检测监测数据质量的标尺，让数据质量评价直接服务于铁路运维决策优化。

（3）发展领域知识引导的混合智能评价方法。借鉴其他行业方法适配经验，推动行业规则、物理模型、专家经验与机器学习的深度融合，研发可解释、强适应、高精度的智能评价方法，实现通用混合智能方法在铁路场景的有效适配。探索如基于GNN的多源关联异常检测、跨线路迁移学习等技术，构建“实时–周期–专家”三级协同的评价流水线，提升铁路基础设施检测监测数据质量评价的自动化与智能化水平。

（4）推动评价理论成果向标准与系统转化。加强与企业、标准制修订单位的合作，将研究形成的评价框架、指标体系与方法模型，转化为铁路基础设施检测监测数据质量评价指南或规范，并进行验证与推广，通过数据质量评价推动铁路基础设施检测监测数据资产价值释放，为铁路运维效率提升与智能化转型提供坚实支撑。

铁路基础设施检测监测数据质量评价是一项跨数据科学、铁路工程与运维管理的综合性课题。唯有构建一套科学系统、铁路专用的评价体系，才能充分释放铁路基础设施检测监测数据价值，为提升铁路安全水平、运维效率，推进铁路运维智能化转型提供坚实支撑。

参考文献：

[1] 姚　莉，陶　凯，张文轩，等. 基于5G技术的铁路基础设施动态检测数据实时汇聚方案研究[J]. 铁路计算机应用，2022，31(4)：1–6.
YAO Li，TAO Kai，ZHANG Wenxuan，et al. Real Time Aggregation Scheme of Railway Infrastructure Dynamic Detection Data Based on 5G Technology[J]. Railway Computer Application，2022，31(4)：1–6.

[2] 汪　鑫，王　源，王　平，等. 高速铁路动检车检测数据里程误差评估与修正[J]. 铁道标准设计，2018，61(7)：46–51.
WANG Xin，WANG Yuan，WANG Ping，et al. Mileage Error Estimation and Correction of Track Geometry Data from Track Inspection Car on High Speed Railway[J]. Railway Standard Design，2018，61(7)：46–51.

[3] 李再帏，雷晓燕，高　亮. 轨道不平顺检测数据的预处理方法分析[J]. 铁道科学与工程学报，2014，11(3)：43–47.
LI Zaiwei，LEI Xiaoyan，GAO Liang. Analysis of Preprocessing Methods of Track Irregularity Inspection Data[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2014，11(3)：43–47.

[4] 牛道安，刘金朝，杨　飞，等. 高速铁路基础设施检测监测大数据分析技术研究与实践[J]. 中国铁路，2024(2)：

1-11.
NIU Daoan, LIU Jinzhao, YANG Fei, et al. Research and Practice on Big Data Analysis Technology for Inspection and Monitoring of High Speed Railway Infrastructure[J]. China Railway, 2024(2): 1-11.

[5] WANG R Y, STRONG D M. Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers[J]. 1996, 12(4): 5-33.

[6] ISO. ISO 8000-8: 2015 Data Quality—Part 8: Information and Data Quality: Concepts and Measuring[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2015: 1-15.

[7] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 信息技术 数据质量评价指标：GB/T 36344—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018：1-6.

[8] 中华人民共和国交通运输部. 高速铁路基础设施运用状态检测管理办法：交通运输部令2018年第19号[EB/OL]. (2018-09-28)[2025-08-20]. https://xxgk.mot.gov.cn/jigou/fgs/202006/t20200623_3308061.html.

[9] 中国国家铁路集团有限公司工电部. 铁路基础设施检测监测数据归集管理办法（暂行）：工电综技函〔2022〕40号[S]. 北京：中国国家铁路集团有限公司，2022：5.

[10] LEVITIN A V, REDMAN T C. A Model of the Data (Life) Cycles with Application to Quality[J]. Information and Software Technology, 1993, 35(4): 217-223.

[11] 杨青云，赵培英，杨冬青，等. 数据质量评估方法研究[J]. 计算机工程与应用，2004，40(9)：3-4.
YANG Qingyun, ZHAO Peiying, YANG Dongqing, et al. Research on Data Quality Assessment Methodology[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(9): 3-4.

[12] BATINI C, CAPPIELLO C, FRANCALANCI C, et al. Methodologies for Data Quality Assessment and Improvement[J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(3): 1-52.

[13] 陈　滢，王能斌. 半结构化数据查询的处理和优化[J]. 软件学报，1999，10(8)：883-890.
CHEN Ying, WANG Nengbin. Processing and Optimization of Semi-Structured Data Queries[J]. Journal of Software, 1999, 10(8): 883-890.

[14] 高　军，唐世渭，杨冬青，等. 半结构化数据查询重写[J]. 计算机研究与发展，2002，39(2)：165-171.
GAO Jun,, TANG Shiwei, YANG Dongqing, et al. Query Rewriting for Semi-Structured Data[J]. Journal of Computer Research and Development, 2002, 39(2): 165-171.

[15] WEISKOPF N G, WENG C H. Methods and Dimensions of Electronic Health Record Data Quality Assessment: Enabling Reuse for Clinical Research[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2013, 20(1): 144-151.

[16] 翟运开，郭瑞芳，王　宇，等. 数据生命周期视角下的医疗健康大数据质量评价研究[J]. 现代情报，2024，44(1)：116-129.
ZHAI Yunkai, GUO Ruifang, WANG Yu, et al. Research on Quality Evaluation of Medical and Health Big Data from the Perspective of Data Life Cycle[J]. Journal of Modern Information, 2024, 44(1): 116-129.

[17] ZUIDERWIJK A, JANSSEN M. Open Data Policies, Their Implementation and Impact: A Framework for Comparison[J]. Government Information Quarterly, 2014, 31(1): 17-29.

[18] 郭　鑫，聂　磊，王继民，等. 面向数据检索的我国政府开放数据质量评估方法研究[J]. 数据分析与知识发现，2025，9(4)：85-98.
GUO Xin, NIE Lei, WANG Jimin, et al. Research on China's Government Open Data Quality Assessment Methods for Data Retrieval[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2025, 9(4): 85-98.

[19] KARKOŠKOVÁ S. Data Governance Model to Enhance Data Quality in Financial Institutions[J]. Information Systems Management, 2023, 40(1): 90-110.

[20] 陈　伟，刘思峰，Robin Qiu. 审计数据质量评估方法研究[J]. 计算机工程与应用，2008，44(3)：20-23.
CHEN Wei, LIU Sifeng, QIU Robin. Study on Audit Data Quality Assessment Methods[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(3): 20-23.

[21] 荀　挺，王祥浩，胡文斌，等. 电网综合数据质量评价系统及其软件实现[J]. 电测与仪表，2019，56(4)：62-69.
XUN Ting, WANG Xianghao, HU Wenbin, et al. Power Grid Comprehensive Data Quality Evaluation System and Its Software Implementation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(4): 62-69.

[22] WANG R Y. A Product Perspective on Total Data Quality Management[J]. Communications of the ACM, 1998, 41(2): 58-65.

[23] LEE Y W, STRONG D M, KAHN B K, et al. AIMQ: A

Methodology for Information Quality Assessment[J]. Information & Management，2002，40(2)：133-146.

[24] 齐艺兰．ERP系统的数据质量评价研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2014.

[25] 张静蓓，任树怀．国外科研数据知识库数据质量控制研究[J]. 图书馆杂志，2016，35(11)：38-44.
ZHANG Jingbei，REN Shuhuai. Studies on Data Quality Control of Data Repository Abroad[J]. Library Journal，2016，35(11)：38-44.

[26] 王　今，马海群．政府开放数据质量的用户满意度评价研究[J]. 现代情报，2016，36(9)：4-9.
WANG Jin，MA Haiqun. Evaluation for Customers' Satisfaction about Quality of Government Open Data[J]. Journal of Modern Information，2016，36(9)：4-9.

[27] CHEN H，HAILEY D，WANG N，et al. A Review of Data Quality Assessment Methods for Public Health Information Systems[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2014，11(5)：5170-5207.

[28] 刘心报，胡俊迎，陆少军，等．新一代信息技术环境下的全生命周期质量管理[J]. 管理科学学报，2022，25(7)：2-11.
LIU Xinbao，HU Junying，LU Shaojun，et al. The Entire Life Cycle Quality Management in the New Generation of Information Technology Environment[J]. Journal of Management Sciences in China，2022，25(7)：2-11.

[29] 张绍华，潘　蓉，宗宇伟．大数据治理与服务[M]. 上海：上海科学技术出版社，2016.

[30] 秦之湄，张会平，王　斌，等．智慧治理中的数据质量管理困境及对策研究[J]. 大数据，2024，10(5)：151-167.
QIN Zhimei，ZHANG Huiping，WANG Bin，et al. Research on the Difficulties and Countermeasures of Data Quality Management in Smart Governance[J]. Big Data Research，2024，10(5)：151-167.

[31] CAI L，ZHU Y . The Challenges of Data Quality and Data Quality Assessment in the Big Data Era[J]. Data Science Journal，2015，14(1)：21-33.

[32] 严　晗，朱启贵．大数据下的数据质量评价指标体系研究[J]. 上海管理科学，2024，46(1)：14-18.
YAN Han，ZHU Qigui. Research on Big Data Quality Evaluation Index System[J]. Shanghai Management Science，2024，46(1)：14-18.

[33] 刘智锋，王继民，李　倩．元数据质量评价研究综述[J]. 情报理论与实践，2022，45(7)：42-48.
LIU Zhifeng，WANG Jimin，LI Qian. A Survey of Research on Metadata Quality Evaluation[J]. Information Studies：Theory & Application，2022，45(7)：42-48.

[34] 唐　勇，李东鹏，林娟娟，等．基于效用的数据质量综合评估方法探讨[J]. 财会月刊，2024，45(16)：110-116.
TANG Yong，LI Dongpeng，LIN Juanjuan. Discussion on Comprehensive Utility-Based Data Quality Assessment Method[J]. Finance and Accounting Monthly，2024，45(16)：110-116.

[35] 刘　琼，聂云贝，刘桂锋，等．科学数据质量评价指标体系构建及用户满意度研究[J]. 图书情报导刊，2022，7(12)：31-38.
LIU Qiong，NIE Yunbei，LIU Guifeng. Research on the Construction of Scientific Data Quality Evaluation Index System and User Satisfaction[J]. Journal of Library and Information Science，2022，7(12)：31-38.

[36] 刘文君，贺馨仪，王　彬，等．基于异常检测集成算法的油色谱在线监测数据质量评价体系[J]. 电网与清洁能源，2022，38(8)：16-23.
LIU Wenjun，HE Xinyi，WANG Bin，et al. Online Monitoring Data Quality Evaluation System for Oil Chromatographic Based on Anomaly Detection Integrated Algorithm[J]. Power System and Clean Energy，2022，38(8)：16-23.

[37] 冯雨萱，何恬睿，沈　力，等．医疗大数据质量评价及管理研究综述[J]. 医学信息学杂志，2024，45(8)：1-7.
FENG Yuxuan，HE Tianrui，SHEN Li，et al. A Review of Researches on Quality Evaluation and Management of Medical Big Data[J]. Journal of Medical Informatics，2024，45(8)：1-7.

[38] 王军玲，张红亮，李　华．军事信息系统数据质量评估方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报，2011，6(3)：311-314，319.
WANG Junling，ZHANG Hongliang，LI Hua. Research on Assessment Method of Data Quality in Military Information System[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology，2011，6(3)：311-314，319.

[39] 王帆飞．空间数据库数据质量评测与质量控制体系研究[D]. 成都：四川大学，2005.

[40] 尹春荣，李　媛，曲雪妍，等. 中国地质灾害数据质量评价指标体系构建[J]. 中国地质灾害与防治学报，2021，32(4)：120-125.
YIN Chunrong，LI Yuan，QU Xueyan，et al. Formulation of an Evaluation Index System of Geological Hazard Data Quality in China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control，2021，32(4)：120-125.

[41] 薛　冰，赵冰玉，李京忠. 地理大数据中POI数据质量的评估与提升方法[J]. 地理学报，2023，78(5)：1290-1303.
XUE Bing，ZHAO Bingyu，LI Jingzhong. Evaluation and Enhancement Methods of POI Data Quality in the Context of Geographic Big Data[J]. Acta Geographica Sinica，2023，78(5)：1290-1303.

[42] 诸云强，朱少春，刘海川. 土地利用数据质量检查方法研究与实现[J]. 国土资源科技管理，2008，25(6)：66-71.
ZHU Yunqiang，ZHU Shaochun，LIU Haichuan. Research and Implementation of Land Use Data Quality Checking Methods[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources，2008，25(6)：66-71.

[43] 李璐颖，陈　平，王兴建，等. 业务协同驱动的高校数据质量管理模型及应用[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2023，51(5)：627-633.
LI Luying，CHEN Ping，WANG Xingjian，et al. Universities Data Quality Management Model and Application Based on Business Collaboration Scenarios[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)，2023，51(5)：627-633.

[44] DUMBILL E. Making sense of Big Data[J]. Big Data，2013，1(1)：1-2.

[45] 虞业泺，施敏华，邓洛凤，等. 卫星装备试验鉴定数据质量评价技术及实现[J]. 计算机测量与控制，2021，29(8)：233-237.
YU Yelu，SHI Minhua，DENG Luofeng，et al. Quality Evaluation Technology and Implementation of Satellite Equipment T&E Data[J]. Computer Measurement & Control，2021，29(8)：233-237.

[46] 孙俐丽，袁勤俭. 数据资产管理视域下电子商务数据质量评价指标体系研究[J]. 现代情报，2019，39(11)：90-97.
SUN Lili，YUAN Qinjian. Research on Evaluation Index System of E-Commerce Data Quality from the Perspective of Data Asset Management[J]. Journal of Modern Information，2019，39(11)：90-97.

[47] 尤建新，徐　涛. 基于多准则决策方法的数据资产质量评价模型[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2021，49(4)：585-590.
YOU Jianxin，XU Tao. A Data Asset Quality Evaluation Model Based on A Multi-Criteria Decision-Making Method[J]. Journal of Tongji University (Natural Science)，2021，49(4)：585-590.

[48] 黄倩倩，赵　正，刘钊因，等. 数据流通交易场景下数据质量综合管理体系与技术框架研究[J]. 数据分析与知识发现，2022，6(1)：22-34.
HUANG Qianqian，ZHAO Zheng，LIU Zhaoyin. Comprehensive Management System and Technical Framework of Data Quality in the Data Circulation Transaction Scenario[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery，2022，6(1)：22-34.

[49] 陶　凯，杨　文，杜　中，等. 轨道检测数据集成存储与数据质量评价[J]. 铁道建筑，2019，59(9)：116-120.
TAO Kai，YANG Wen，DU Zhong，et al. Integrated Storage for Track Inspection Data and Data Quality Evaluation[J]. Railway Engineering，2019，59(9)：116-120.

[50] 许贵阳，史天运，刘金朝，等. 高速铁路轨道几何检测数据自动预处理方法研究[J]. 中国铁道科学，2013，34(6)：8-12.
XU Guiyang，SHI Tianyun，LIU Jinzhao，et al. Research on Automatic Preprocessing Methods for Track Geometry Inspection Data of High Speed Railway[J]. China Railway Science，2013，34(6)：8-12.

[51] GUO J F，KE Z T，LIU J Z，et al. Research on Automatic Preprocessing Method of Railway Catenary Geometric Inspection Data[J]. Journal of Physics：Conference Series，2020，1631(1)：012136.

[52] 王保国，张可新，杨　桉，等. 高速铁路基础设施维护管理及综合维修体系研究[J]. 中国铁路，2019(3)：9-15.
WANG Baoguo，ZHANG Kexin，YANG An，et al. HSR Infrastructure Maintenance Management and Comprehensive Maintenance System[J]. Chinese Railways，2019(3)：9-15.

[53] 郭　昊，李海滨，冯　姣，等. 基于大数据处理的船舶数据质量评价方法研究[J]. 计算机仿真，2022，39(2)：298-303.
GUO Hao，LI Haibin，FENG Jiao，et al. Ship AIS Data Quality Evaluation Algorithm Based on Big Data Processing[J].

Computer Simulation，2022，39(2)：298-303.

[54] MA S S，LU C M，LIN X，et al. Evaluating the Metadata Quality of the IPL[J]. Proceedings of the American Society for Information Science and Technology，2009，46(1)：1-17.

[55] 刘　伟. 基于元数据的数据质量控制与评估模型研究[D]. 大庆：东北石油大学，2011.

[56] 宋俊典，刘丰源. 一种支持数据质量评价的方法与应用研究[J]. 计算机应用与软件，2018，35(5)：328-333.
SONG Jundian，LIU Fengyuan. A Method and Application Study of Data Quality Evaluation Supporting[J]. Computer Applications and Software，2018，35(5)：328-333.

[57] FARZI S，DASTJERDI A B. Data Quality Measurement Using Data Mining[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering，2009：115-118.

[58] SRIVASTAVA S. Weka：A Tool for Data Preprocessing，Classification，Ensemble，Clustering and Association Rule Mining[J]. International Journal of Computer Applications，2014，88(10)：26-29.

[59] 时绍壮，黎　明，刘兰军. 基于时间序列搜索的海底电磁采集站数据质量快速预评估方法研究[J]. 仪器仪表学报，2018，39(8)：127-135.
SHI Shaozhuang，LI Ming，LIU Lanjun. Research on Data Pre-Evaluation of Marine Electromagnetic Acquisition Station Based on Time Series Search[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument，2018，39(8)：127-135.

[60] TALEB I，EL KASSABI H T，SERHANI M A，et al. Big data quality：A Quality Dimensions Evaluation[C]//2016 Intl IEEE Conferences on Ubiquitous Intelligence & Computing，Advanced and Trusted Computing，Scalable Computing and Communications，Cloud and Big Data Computing，Internet of People，and Smart World Congress(UIC/ATC/ScalCom/CBDCom/IoP/SmartWorld)，Toulouse，France，July 2016 Proceedings. Piscataway：IEEE Press，2016：759-765.

[61] 丁小欧，李映泽，王　晨，等. 兼顾行列的时序数据质量规则发现[J]. 软件学报，2023，34(3)：1065-1086.
DING Xiaoou，LI Yingze，WANG Chen，et al. Time Series Data Quality Rules Discovery with Both Row and Column Dependencies[J]. Journal of Software，2023，34(3)：1065-1086.

[62] 庄广新，谷远利，马韵楠，等. 基于AHP灰色理论的道路交通流数据质量评价[J]. 山东科学，2017，30(1)：69-75.
ZHUANG Guangxin，GU Yuanli，MA Yunnan，et al. Road Traffic Flow Data Quality Assessment Based on Grey Theory and Analysis Hierarchical Process[J]. Shandong Science，2017，30(1)：69-75.

[63] 刘　娜，陈健军，杨慧杰，等. 基于范数灰关联的情报大数据分析质量评估方法[J]. 中国电子科学研究院学报，2020，15(1)：55-62.
LIU Na，CHEN Jianjun，YANG Huijie，et al. The Assessment Method of Information Big Data Analysis Quality Based on Norm Grey Relational Degree[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology，2020，15(1)：55-62.

[64] 刘承磊，姜晓红，张翰钊，等. 基于模糊综合评价的管道内检测数据质量评估[J]. 油气田地面工程，2023，42(5)：69-77.
LIU Chenglei，JIANG Xiaohong，ZHANG Hanzhao，et al. Pipeline Internal Inspection Data Quality Evaluation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Method[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering，2023，42(5)：69-77.

[65] 雷财林，赵　聪，娄　刃，等. 路侧感知车辆轨迹数据的质量评估方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2024，52(6)：56-72.
LEI Cailin，ZHAO Cong，LOU Ren，et al. Quality Assessment Method of Vehicle Trajectory Data from Roadside Perception[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)，2024，52(6)：56-72.

(责任编辑　金　晶)