

道路桥梁结构健康监测与质量评估技术研究

管鹏

武汉市汉阳市政建设集团有限公司 湖北武汉 430050

DOI: 10.12238/ems.v7i3.12185

[摘要] 近年来,道路桥梁工程建设范围不断扩大,结构健康问题逐渐受到人们的重视,在健康监测动态数据质量评估期间,探索性数据分析统计图得到广泛应用,在量化结构健康值的情况下,确保桥梁结构性能预测的准确性。对此,本文针对道路桥梁结构健康监测与质量评估技术展开分析,结合工程实例情况,建立桥梁健康监测静、动态数据的质量评估方法,在对比分析不同数据的情况下,帮助人们快速判断数据质量的好坏,进而提高健康监测数据的实际效能。

[关键词] 监测数据;道路桥梁;健康监测;质量评估;EDA统计图

引言:

在传统道路桥梁结构健康监测中,主要是以传感器等技术为主,受多种因素影响,存在设备老化、安装错误等多种问题,严重影响监测信号质量、准确性。为最大程度上还原真实结构响应数据,相关人员可应用近似度量方法,对统计图进行量化分析,实现结构快速质量评估。EDA统计图的应用可采用数据可视化直观分析的方式,精准识别异常数据,保证监测数据质量,便于相关人员分析道路桥梁结构运营状态,保证道路桥梁结构处于正常、健康运行状态。

1 监测数据特点分析

在道路桥梁结构健康监测期间,具体监测数据为时间序列数据流,根据随时间变化激烈程度、采样频率情况,主要分为两种数据类型:一是动态数据;二是静态数据。其中,静态数据主要包含湿度、温度、静位移等数据,一般情况下,主要涉及结构静态信息、环境信息,实际采样频率较低,主要以1Hz以下为标准。与之相比,动态数据采样频率较高,通常可达到1Hz以上,主要包含动挠度、动应变、振动加速度等数据,作为结构动态响应信号,可直观展示结构实际健康状态^[1]。

对于长期监测数据来说,主要包含季节性周期、日周期,具有长期波动的特点。同时,在结构监测、评估期间,受外部环境等因素影响,对于时间间隔较近的数据来说,其不可避免具有一定相关性的特点,与此同时,部分类型相似的数据同样具有相关性,在质量评估期间,相关人员需注重分析数据潜在规律,根据实际需求做出数据的相应选择、取舍,保证结构预测的准确性。另外,对于桥梁动态响应信号而言,例如,动应变、振动加速度等,在对线性平稳性评估期间,可应用随机过程统计特征方法,最大限度上还原真实结构的响应数据,能够增强数据质量评估成效,明确道路桥梁结构状态信息,以便相关人员制定针对性的维护策略。

2 道路桥梁结构健康监测数据质量评估方法

2.1 EDA统计图

在对道路桥梁结构数据质量评估期间,主要目标是对数据价值进行判断,确保其符合后续数据分析要求,从总体上评估数据质量好坏,以便明确结构质量、性能。在道路桥梁结构监测数据质量评估期间,可从数据本身质量等方面入手,本文采用EDA统计图、相似度量等方法,从多维度分析数据价值。结合道路桥梁结构数据类型分析,为实现对静、动态数据的评估,相关人员可计算完整率,采用定量分析方式,在完整率值越大的情况下,代表数据信息具有一定价值,相应的完整性较高,反之则代表数据完整性低^[2]。其中,完整率计算公式为:

$$C_{\text{ration}} = 1 - \frac{N_d}{N}$$

其中, N_d 代表数据总个数(不变化数据), N 代表原始数据集。

在应用EDA统计图过程中,可采用可视化分析方法,结

合动态数据特点,应用箱线图、Q-Q图、直方图等方式,直观呈现数据信息实际价值。其中,直方图的应用可以精准反映样本分布的分散情况。从定量角度分析,通过量化数据的相似性,可直接对数据质量进行评估。与之相比,箱线图则是以箱线为区分,主要用于全局异常点检测工作。在实际应用中,如果数据值落于箱线外部则直接将其视为异常点,实现质量评估目标。EDA统计图的应用主要是从数据本身出发,在实际应用中,其摒弃了传统统计学分析的假设,深入挖掘、描述数据特征,直观展示数据特性,增强数据质量评估的直观性。总的来说,EDA统计图可减少人工观察中的主动性,基于客观事实入手,提高评估效率与准确性。

2.2 相似性度量

在对道路桥梁工程健康监测过程中,需采用相似性度量法,结合Q-Q图、直方图实际应用情况,可使用余弦相似度、KL散度量相似性方式,对数据实际分布程度进行评估,进而达到实际概率密度函数。在此基础上,拟合成正态分布概率密度函数,做好两个函数余弦相似度对比的情况下,明确数据实际情况。

KL散度量主要是对两个离散化后的函数进行对比,KL散度取值为正无穷,在实际应用中,相关人员可结合实际情况,取两个函数平均值作为度量指标,以便提高数据监测质效^[3]。

2.3 质量评估

结合道路桥梁结构健康监测相关政策规范分析,相关人员需明确数据质量评估标准,根据实际情况分析,如果数据长时间处于“差”这一等级,则需考量设备问题,着重检查传感器、数据采集方面的问题,保证数据采集的精确性。相关人员需严格落实评估标准,结合实际工程情况,优化数据采集流程。根据实际情况分析,不同类型传感器具有一定差异性,其布置位置、传感器类型、采集频率、数据时长等参数均会影响最终数据采集的一致性,对此,相关人员需以工程情况为核心,合理、科学确定具体阈值,保证数据采集的精确性、科学性。

在道路桥梁工程正常运营过程中,动挠度、动应变、振动加速度等动态响应监测数据应具备一致性的特点,在后续质量评估期间,相关人员可通过已知等级的数据分析道路桥梁工程质量。根据实际需求,应用EDA统计图,精准标定数据质量。在此基础上,选取不同质量等级的数据作为样本,结合本文所采取的方法,对箱线图、Q-Q图、直方图进行量化,以KL散度、余弦相似度为抓手对比分析数据质量情况,实现数据质量自动评估筛选目标。

3 道路桥梁结构工程实例健康监测数据质量评估分析

为进一步验证本文所提方法的可行性,以实际项目工程为例,对道路桥梁结构健康监测数据实施自动化质量评估,以便明确工程结构实际质量水平。

3.1 工程概况

以某道路桥梁工程为例,该桥梁主桥跨径为(40+88+252+88+40)m,在数据采集过程中,工程人员在桥

梁布置四个传感器，分别位于主梁、拉索等位置，在日常监测过程中，平均每天可采集 6×10^7 个数据。该工程为双塔转体钢箱梁半漂浮体系，在监测过程中，主梁、拉索振动传感器采样频率分别为 32Hz、32.5Hz。结合桥梁数据信息分析，相关人员需在做好健康监测工作质量，科学确定评估指标，将其应用于后续自动评估筛选工作中，以便验证本文所提方法的有效性^[4]。

3.2 工程健康监测

在对工程结构健康监测过程中，为实现动态数据采集、分析目标，相关人员需做好数据采集工作，其作为健康监测的基础，对于后续评估具有一定积极意义。在具体实施期间，可布置矢量传感器，使其采集位移、加速度等数据，根据实际需求对其进行预处理，消除内部异常值，保证数据的可靠性。同时，基于 EDA 统计图，绘制直方图、Q-Q 图、箱线图，初步判断数据质量。另外，加强量化分析，明确正常数据占比，精准评估数据质量，提高评估准确性。

3.3 评估指标的确定

在确定评估指标过程中，结合实际情况分析，相关人员首先选取主梁振动数据，以某日 10min 数据段为主，应用本文 EDA 统计图可视化分析方法，对数据信息进行初步质量评估。同时，整合自身专业经验，基于文中方法逐步计算量化指标，例如，Q-Q 图余弦、直方图 KL 散度、箱线图的正常数据占比等情况，明确传感器数据质量。以直方图为例，在质量属于优级的部分，其 KL 散度、余弦值分别为 [0, 0.1]、[0.95, 1]。与之相比，在质量为良级的部分，其 KL 散度、余弦值分别为 [0.10, 0.15]、[0.95, 1]。结合具体数据分析，直方图 KL 散度、直方图余弦正常占比具有一定相似性，可满足一致性要求、标准，便于相关人员区分数据质量，落实数据质量评估工作。

对于箱线图而言，其质量为优级的数据中，正常值占比达到 0.95 以上，而质量为良级的数据中，与绝大部分相比，正常值占比处于 0.95 以下，结合数据情况分析，可精准分析

数据质量，保证质量评估准确率达到实际标准。同时，结合 Q-Q 图余弦值变化情况分析，具体数据一致性较差，无法区分数据质量，对数据质量误判率较高。对此，相关人员需选用直方图余弦值、直方图 KL 散度、箱线图作为数据质量评估指标，根据实际情况，明确数据质量量化标准（如表 1 所示）^[5]。

表 1 数据质量评估标准

评估标准等级	箱线图	直方图	
	正常数据占比	余弦相似度	KL 散度
优	(0.95, 1.00]	(0.95, 1.00]	[0.00, 0.10)
良	(0.90, 0.95]	(0.90, 0.95]	[0.10, 0.15)
差	≤ 0.90	≤ 0.90	≥ 0.15

在指标计算过程中，不可避免受异常数据的影响，导致指标计算存在误差。对此，可能存在个别指标评定结果不准确的问题，在设定阈值无法精准对应数据实际质量等级的情况，导致最终结果与实际质量不相符，无法精准、高效反映道路桥梁结构质量。

3.4 方法验证与对比

为验证方法有效性，相关人员还可借助峰度、偏度、Shapiro-Wilk 等指标，结合其实际应用特点，将其应用于针对性项目工程中。以 Shapiro-Wilk 为例，在检验过程中，可应用于 $8 \leq n \leq 50$ 等样本容量较小的情况中。反之，如果容量较大，则可根据实际情况，应用偏度、峰度等指标，解决各类检验问题。同时，为实现对数据异常情况的精准监测，可根据实际情况，应用 3σ 准则，以均值为基础，对其加减三倍标准差。在此基础上，将最终数据范围以外的数据点作为异常值。结合上述三种检验方法，将本文所提方法与其进行对比分析，有效验证监测与评估方法的合理性、精确性。

在具体对比过程中，可选取四个传感器所采集的数据，基于数据信息，绘制直方图、Q-Q 图和箱线图，在量化分析的过程中，相关人员可根据数据类型，计算数据偏度、峰度、KL 散度等多种指标，明确应用成效（如表 2 所示）。

表 2 验证数据统计指标计算

传感器类型	评估标准	偏度	KL 散度	峰度	余弦相似度
1	优	-0.17	2.553×10^4	13.795	0.0993
2	良	0.047	0.146	5.902	0.914
3	差	0.043	1.928	2.012	0.581
4	差	-0.013	1.220×10^6	-0.013	0.554

结合表内数据分析，在数据质量持续降低的情况下，余弦相似度值稳定减小，并且直方图 KL 值有所增加，可以相对敏感的感知数据分布差异，实现动态监测数据的精准评估。为分析 3σ 准则与箱线图对比情况，相关人员对每个验证数据集中正常数据占比进行计算，具体情况如表 3 所示。

表 3 验证数据中正常数据占比情况

传感器类型	评估标准	正常数据占比	
		3σ 准则	箱线图
1	优	0.990	0.992
2	良	0.992	0.986
3	差	0.999	0.875
4	差	0.998	0.880

结合表 3 内部数据情况分析，与 3σ 准则相比，箱线图检测结果精确性较高，可将其应用于数据质量辅助判断工作中，降低误判几率，实现桥梁健康监测与质量评估工作的高质量落实。

3.5 方法应用

本文所提方法具有一定有效性，结合案例工程情况分析，相关人员可将余弦相似度、直方图 KL 值作为主要指标，根据实际需求，辅之箱线图，对项目结构质量进行分析。对于评估结果而言，该项目道路桥梁结构中主梁结构振动情况相对较好，而拉索振动数据质量较差。在后续运维期间，相关人员需对传感器故障情况进行检测，并着重检查其附近是否存在

干扰源，在处于正常情况下，则需对结构进行优化，以便其达到性能标准，保证道路桥梁工程可以安全、可靠运行。

结论：

综上所述，结合项目实际情况分析，相关人员应用余弦相似度、KL 散度优势，量化分析 EDA 统计图，以便自动化评估道路桥梁结构数据质量。结合数据信息实际情况，做好异常数据筛选工作，在全面、快速检测数据全局异常点的情况下，降低动态数据误判率。基于量化改进的探索性分析方法能够准确、快速的对桥梁结构进行质量评估，有效地辅助桥梁健康监测系统，充分揭示更多的结构特性，提升监测、评估自动性的同时，保证交通系统稳定、健康运行。

【参考文献】

[1] 李君. 智能传感技术在桥梁结构健康监测中的应用研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (11): 167-169.
[2] 盛伟伟. 物联网 RFID 技术在大跨径桥梁结构健康监测中的应用研究[J]. 铁道建筑技术, 2024, (12): 163-166.
[3] 夏萌. 基于 EasyEnsemble-AlexNet-BMA 的桥梁监测数据异常诊断方法研究[D]. 重庆交通大学, 2024.
[4] 易小伟. 健康监测技术在市政桥梁结构安全评估中的应用研究[J]. 工程建设与设计, 2023, (18): 110-112.
[5] 王军威, 罗春明, 姜涛. 桥梁健康监测技术及结构损伤评估算法[J]. 建筑安全, 2023, 38 (06): 34-37.