

优化 GM(1,1) 模型在桥梁静载试验中应用

梁德襄

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要: 设计一种适用于桥梁静载试验中极不完备数据条件下的优化 GM(1,1) 模型。使用 3 个前置神经网络模块替换传统模型中的微分拟合过程, 利用神经网络的回归能力对其进行优化, 使用 1 个后置神经网络模块结合 1 个数据解模糊模块替换传统模型的数据还原过程, 其他数据处理方式沿用传统模型的数据处理方式。经过仿真计算, 发现不同桥梁设计规模下, 优化模型的标准差显著低于传统模型, 证实优化模型具有较显著的算力提升。

关键词: 桥梁设计; 静载试验; GM(1,1) 模型; 神经网络; 模型优化

中图分类号: U446

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)05-0202-04

0 引言

一阶灰度微分模型(Grey Model, GM(1,1)), 应用模式为: 对某一数据序列用累加的方式生成一组趋势明显的新数据序列, 按照新的数据序列的增长趋势建立模型进行预测, 然后再用累减的方法进行逆向计算, 恢复原始数据序列, 进而得到预测结果^[1]。其核心应用场景是在最小原始数据集的基础上, 利用完备因子条件下的不完备数据进行曲线估计, 提升曲线估计精度^[2]。

桥梁静载试验是保障桥梁安全性和可靠性的重要试验。其技术实现路径主要分为两种, 一是在有限元分析系统中构建桥梁模型, 对其进行仿真环境下的静载模拟; 二是构建小比例实体模型, 通过挂载静载荷载的方式对其进行破坏性试验, 从而获得相关数据^[3]。前者能得到更大的数据量, 但其存在因子不完备, 后者的数据量较小, 但其可以考察更接近实际情况的数据^[4]。所以, 当前相关桥梁设计规程文件要求, 桥梁静载试验必须经过后者实体模型的试验过程^[5,6]。

该研究对 GM(1,1) 模型进行优化, 设计一种可以深度挖掘实体模型静载试验数据的数据处理方法, 提升实体桥梁静载试验数据的工程价值^[7]。

1 桥梁静载试验设计

1.1 试验平台的搭建

采用 1:20、1:30、1:50 等比例尺构建桥梁箱

梁的缩微模型, 在实验室中构建基于桥梁中部受压挠度变化和破坏性变化的试验场景, 测量压力千斤顶的压力和桥梁在不同压力状态下的挠度变化, 形成试验数据。该试验系统包括一个框架型承力支架、一个做功千斤顶、一对简支梁底座, 以及相关的压力计、挠度计测量装置, 如图 1 所示。

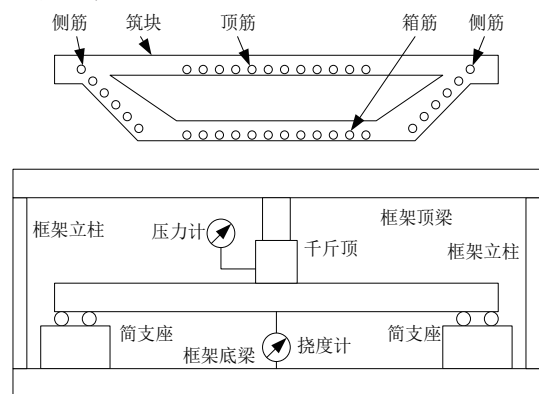


图1 桥梁静载试验平台示意图

在图1中, 箱型梁的截面结构, 包括混凝土筑块、钢筋网等, 均应按照等比例关系进行缩微处理。此时, 可以根据对混凝土筑块结构和钢筋结构的应力表现实际测量结果, 推测其因为体积和截面缩小带来的变化量传导关系。而为了使试验结果数据可以满足 GM(1,1) 模型的原始数据要求, 满足对 1:1 桥梁静压荷载的应力表达值的估计结果, 采用多种比例尺进行试验, 进而对桥梁实际静压能力进行测算。其所谓结构模型构建模式, 如表1所列。

在表1中, 设计桥宽 5 m 跨度 40 m 的箱型桥梁缩微模型, 其在桥长、桥宽、箱顶、箱底、侧壁等结构的缩微处理中, 可以基本保证等比例缩微处理的原

收稿日期: 2021-12-29

作者简介: 梁德襄(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 桥梁设计。

表 1 模型尺寸设计参数表

模型参数	原始设计	1 : 20	1 : 30	1 : 50
桥长(跨度) /m	40	2.000	1.333	0.800
桥宽 /m	5	0.250	0.167	0.100
箱顶厚 /mm	240	12.0	8.0	4.8
箱底厚 /mm	180	9.0	6.0	3.6
主梁钢筋直径 /mm	18	1.2	1.2	1.2
绑扎钢丝直径 /mm	3	0.5	0.5	0.5

则。但受制于模型制作材料的限制,其钢筋网的缩微处理过程无法实现等比例缩微处理,只能采用直径 1.2 mm 的钢丝取代 1 : 1 状态下直径 18 mm 的螺纹钢钢材。如前文分析,该数据算法设计中使用的 GM(1,1)模型可以在因子完备而数据不完备条件下完成高精度曲线估计。考虑到混凝土本身的骨料、辅料粒径不能实现等比例缩微,该处理方式在 GM(1,1)模型的算力支持下,仍可基本保障数据的有效性,且没有违反相关桥梁静载试验规程文件的规定^[8]。

1.2 试验数据的采集

该试验系统采集的数据,包括不同比例尺条件下的多次测量数据。如果每个比例尺采集 n 次试验数据,每次试验均设定为从 0 压力至破坏性压力值之间的离散测量点数据,其数据构成如图 2 所示。

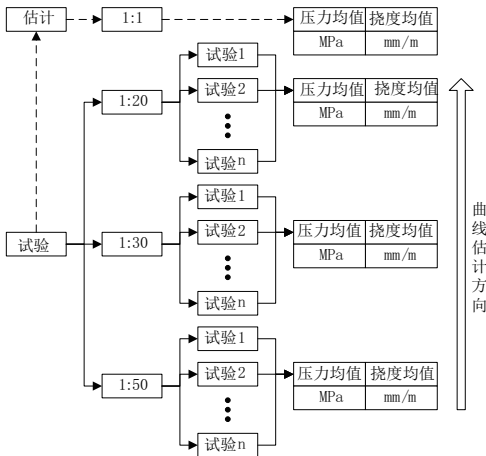


图 2 试验数据采集整理模式示意图

在图 2 中,针对三种比例的缩微模型进行的 n 次试验中,进行一次均值计算,其中测定试验结果的压力值为在实验中控制在一定误差范围内的目标值,即使用安装在液压系统上的压力计,可以实现控制其实际偏差率小于 1%。所以,其压力均值变化幅度较小,一般模式下使用设计压力取代其压力均值。而挠度均值方面则需要使用算数平均法进行均值计算,即其实际压力均值计算过程如公式(1):

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i \in n} D_i(P_i, S_i) \tag{1}$$

式中: D_i 为第 i 次试验中测得的指定压力 P_i 和指定比例尺 S_i 的结果;将其累加后除以数据总量,即试验次数 n ,可得其算数平均值。

因为该试验中仅测试 1 : 20、1 : 30、1 : 50 三种缩微比例尺,所以实际使用 GM(1,1)模型进行验算时,输入数据为 3 对,输出数据为 1 对,存在显著的完备因子和不完备数据特性,且该数据不完备性已经超出了常规曲线估值中 10% 的数据估计量限制,所以需要引入基于深度迭代回归的神经网络算法对其算法进行加强。

2 基于GM(1,1)模型的神经网络设计

受制于试验环境和试验成本,实际工程应用中很难实现 1 : 1 的桥梁静载荷现场试验,也很难实现更多比例尺条件下的桥梁静载荷试验。而且,根据更少的不同比例尺试验数据进行曲线估计,得到 1 : 1 桥梁的静载荷试验估计结果,是当前算法计算中的重点^[9-10]。

传统的 GM(1,1)模型,首先要对被分析序列进行逐层累加,得到新序列,并对其基于一阶微分方程进行处理后,获得曲线估计方程,利用差值法还原原始序列,再从方程式上截取估计数据。如前文所述,在该项试验中,输入数据序列仅 3 对原始数据值,如果采用传统的 GM(1,1)模型进行分析,很难满足该不完备数据条件下的数据分析,所以需要引入进一步加强不完备数据分析能力的神经网络算法,与 GM(1,1)模型算法相结合,实现对数据的深度挖掘。

其 GM(1,1)累加序列的构建模式,如公式(2):

$$\begin{aligned} GM(1) &= D(1 : 50) \\ GM(2) &= D(1 : 50) + D(1 : 30) \\ GM(3) &= D(1 : 50) + D(1 : 30) + D(1 : 20) \end{aligned} \tag{2}$$

式中:GM(1 : n)的 n 值为 50、30、20 等试验数据,其结果值为该试验条件下特定压力条件下的挠度均值,即前文公式(1)的输出结果;经过累加后的 GM(i)的 i 值取值为 1、2、3,分别为三个模型实测结果的依次累加结果。

对该序列进行基于传统 GM(1,1)模型的微分处理,不应使用传统的一阶微分法,而应该对其进行神经网络处理计算,如图 3 所示。

在图 3 中,该神经网络利用前文公式(2)的累加过程获得 GM(1)、GM(2)、GM(3)等三个灰色累加变量,构成神经网络的第 4、5、6 个输入变量,同时利用 3 个原始数据形成三个原始数据输入值,构成神经网络

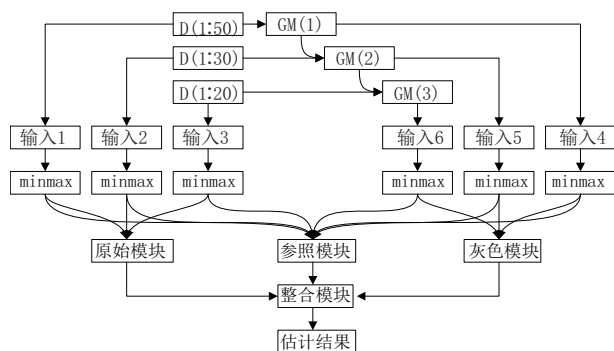


图3 优化GM(1,1)模型神经网络示意图

络的第1、2、3个输入变量,将上述1~6变量形成参照变量,与原始数据变量、灰色变量一起,形成该神经网络的输入系统。因为各变量的值域范围不同,为减少不同值域对神经网络的影响,需要对所有6个数据分别进行min max线性重投影计算。其计算方式为当前输入值减去最小值的差值与最大值最小值的差值的比值,受篇幅限制,该处不展开其计算公式。

以下分析4个神经网络模块的设计参数,具体参数如表2所列。

表2 神经网络模块设计参数表

模块名称	输入层节点	输出层节点	隐藏层结构	节点函数
原始模块	3	1	7、19、5	多项式
参照模块	6	1	11、23、13、(25)	对数
灰色模块	3	1	7、19、5	多项式
整合模块	3	1	7、19、5	多项式

表2中,神经网络的数据分析目的不同,但其中3个内部架构相同,包括原始模块、灰色模块、整合模块,均采用了3个节点的输入层、1个节点的输出层、3层隐藏层分别为7节点、19节点、5节点,所有输入层、输出层、隐藏层节点均采用了多项式节点函数进行节点设计,其函数见公式(3):

$$Y = \sum_i \sum_{j=0}^5 A_j X_i \quad (3)$$

式中: X_i 为上层数据架构中的第*i*个输入值; Y 为该节点的输出值; A_j 为第*j*阶多项式的待回归系数。

参照模块与上述3个模块的架构有所不同,因为其输入层节点较该3个模块更多,节点数为6个,输出层节点为1个,隐藏层架构设计为4层,分别为11节点、23节点、13节点、5节点,其节点函数按照对数函数进行节点设计,其基函数如公式(4):

$$Y = \sum (A \cdot \log_e X_i + B) \quad (4)$$

式中: X_i 为上层数据架构中的第*i*个输入值; Y 为该节点的输出值; e 为自然常数; A 、 B 为待回归系数。

因为输入侧的6个数据均经过了min max线性重投影处理,即对数据实现了初步模糊化,且在数据处理过程中采用的多项式函数、对数函数等节点结构,也较难实现将输出数据进行量纲重填处理,所以其输出数据也控制在与经过min max处理的数据集合相同的[0,1]区间上,在整合模块输出1个最终判断结果后,应在估计结果模块中对该数据进行量纲重填过程,即使神经网络输出的值重新投影到目标值域空间内。该过程等同于传统GM(1,1)模型中在数据累加、一阶求导等过程后的数据还原过程。该模块的实际计算方式,为前文min max计算过程的反算过程,即将输入值与输入最小值相乘,得到其乘积结果,受制于篇幅限制,该计算公式不再展开。

3 优化GM(1,1)模型算法效能验证

传统GM(1,1)模型中,验证计算效果采用了标差法进行验证,标差法为数据发生值与均值的差值平方求取算数平均数后进行开方处理,如公式(5)所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i \in N} (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中: x_i 为数据序列的第*i*个值; $\bar{x}$ 为数据序列的算数平均数,参照前文公式(1)的计算方式; N 为数据序列的最大下标。

使用传统GM(1,1)模型和该研究设计的基于神经网络的优化GM(1,1)模型分别对数据进行处理,比较其处理结果的标差法验证结果,包括前文表1中设计的跨度40 m的箱梁桥梁验算结果,及常规设计中经常使用的30 m箱梁、25 m箱梁、20 m箱梁的验算结果,得到表3所列。

表3 仿真数据的标准差比较表

比较项目	40 m 箱梁	30 m 箱梁	25 m 箱梁	20 m 箱梁
传统 GM(1,1)	0.129	0.107	0.094	0.081
优化 GM(1,1)	0.046	0.039	0.033	0.031
<i>t</i>	1.294	1.980	2.063	2.297
<i>P</i>	0.001	0.001	0.002	0.004

表3中, t 值与*P*值来自对两组比较数据在SPSS数据分析软件中的双变量*t*校验结果。该结果中的Value值作为*t*值,当*t*<10.000时认为两组数据存在统计学差异,且*t*值越小,认为数据差异性越大;该结果中的Log值作为*P*值,当*P*<0.05时认为结果数据处于置信空间内,当*P*<0.01时认为结果数据具有显著的统计学意义,且*P*值越小,认为结果数据的

显著性越强。该数据分析中,优化 GM(1,1)模型相比较传统 GM(1,1)模型,其标准差计算结果显著更低,且随着箱梁规模增大,其优势更为明显。所有结果 $t < 10.000, P < 0.01$,具有显著的统计学意义。

分析该优化结果产生的原因,主要因素为该试验设计中,通过 1:20、1:30、1:50 共三个比例尺模型来估计 1:1 模式下的结果数据,其数据不完备性超出了传统 GM(1,1)模型的计算能力可靠性区间。虽然传统 GM(1,1)模型对该试验结果中的完备因子条件下的不完备数据的曲线估计能力较强,且其分析能力超过大部分基于灰色算法的模型算法效能,但如果依照该研究思路,使用同样具备不完备数据分析能力的神经网络算法对其进行充分加强,可以使其实际算力效能得到更大程度提升。

以往相关研究对传统 GM(1,1)模型的优化过程,包括从一阶微分向高阶微分拓展,或考虑额外数据形成辅助计算序列,该计算过程均会增加系统算力需求,相比较该研究中使用的方法,其增加算力的经济性有限。该算法的实际价值为在桥梁静荷载试验中,可以在更有限测量数据的基础上完成数据分析,得到更高精度的结果。

4 结 论

桥梁静载试验中难以实现 1:1 模型的实际测量试验,且增加缩微比例模型的数量,一方面延长试验时间,另一方面增加试验成本,且没有合理的曲线

估计算法支持的条件下,即便采用更多比例尺的相关试验,也难以实现有效的数据估计。该研究采用 3 个比例尺的实地试验测量结果,每个比例尺下进行多次试验求取平均值以提升试验精度,使用神经网络结合 GM(1,1)的整合优化模型进行数据分析,发现其最终实测结果中的标准差得到有效控制,计算结果显著优于传统 GM(1,1)模型。

参考文献:

[1] 朱海东.检测技术对于公路桥梁的重要性以及具体应用[J].科技与创新,2021(5):174-175.
[2] 易文韬,刘芳平.钢管混凝土拱桥承载力数值模型研究[J].建筑技术开发,2020,47(12):122-124.
[3] 董鹏飞.无损检测技术在桥梁桩基检测中的应用研究[J].四川水泥,2020(3):83.
[4] 张小帅.高速公路桥梁桩基检测中的常见问题与优化措施[J].城市建设理论研究(电子版),2020(1):46.
[5] 钟炜林.大跨径桥梁施工中空气静力的特性研究[J].西部交通科技,2019(9):146-149.
[6] 王彪.论钢筋混凝土斜交桥梁静载和动载试验检测[J].居舍,2019(26):165.
[7] 杨笔将.多种方法检测桥梁桩桩身质量方案[J].城市道桥与防洪,2019(08):166-171+22.
[8] 安爱霞.公路工程中道路桥梁的桩基施工检测技术解析[J].工程技术研究,2019,4(10):82-83.
[9] 熊彩凤,朱林萱,杜承哲,周志军.黄土地区不同成孔方式桥梁灌注桩动静载对比试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(5):183-186.
[10] 赵喜平.桥梁基桩大吨位静载试验问题探讨[J].铁道勘察,2019,45(1):86-89.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com