

刘鹏. 基于混合编程的桥梁振动有限元系统开发与应用[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(9): 165-169. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240926

基于混合编程的桥梁振动有限元系统开发与应用

刘鹏

(湖南高速铁路职业技术学院 铁道工程学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 工程上广泛应用的变截面连续梁桥在移动车辆作用下的振动方程为变系数偏微分方程, 无法得到解析解, 数值方法中的有限元法成为一种行之有效的求解方法。有限元计算程序常用 Fortran 语言编制, 在界面设计、图像处理等方面较弱, 本文基于混合编程技术, 利用 Visual Basic 语言设计开发了一套桥梁振动有限元计算程序系统, 系统直接调用 Fortran 语言程序的可执行文件进行数值计算。工程实例应用表明该系统具有较好人机交互功能, 操作简单方便, 提高了工作效率, 实现了数值计算的可视化。

关键词: 混合编程; 桥梁振动; 有限元; 可执行文件; 可视化

中图分类号: TP311 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2024)09-0165-05

Development and application of finite element system for bridge vibration based on mixed programming

LIU Peng

(College of Railway Engineering, Hunan Technical College of Railway High-speed, Hengyang 421002, Hunan, China)

Abstract: The vibration equation of variable cross-section continuous beam bridges widely used in engineering under the action of moving vehicles is a variable coefficient partial differential equation, which cannot obtain analytical solutions. The finite element method in numerical methods has become an effective solution method. Finite element calculation programs are commonly written in Fortran language, which is weak in interface design, image processing, and other aspects. Based on mixed programming technology, this paper designs and develops a bridge vibration finite element calculation program system using Visual Basic language. The system directly calls the executable file of Fortran language program for numerical calculation. The application of engineering examples shows that the system has good human-computer interaction functions, simple and convenient operation, improved work efficiency, and achieved visualization of numerical calculations.

Key words: mixed programming; bridge vibration; finite element; executable file; visualization

0 引言

车辆通过桥梁时会对桥梁产生冲击作用引发振动, 而桥梁的振动反过来又会影响车辆振动, 这种相互作用和影响就是车桥耦合振动问题^[1-3]。当前, 中国正在建设交通强国, 交通密度和车辆荷载日益增大, 而移动车辆的动荷载是桥梁产生损伤的主要因素之一。因此, 新建或既有桥梁均需要进行动力分析, 以对其进行结构优化设计和安全评估^[4-5]。

关于车桥耦合振动问题, 国内外学者已进行了

大量的理论和试验研究, 刘焕举^[6]计算了多刹车工况下的桥梁动力响应; 周勇军^[7]梳理了国内外关于桥梁冲击系数的研究进展, 并探讨其不足和发展趋势; 张骞^[8]对不同车型以不同速度通过沪通长江大桥的安全性和舒适性进行研究分析。传统的理论方法通常需对车桥模型进行简化, 通过推导动力学公式得到解析解, 是一种近似的定性分析, 不能真实反映复杂结构的桥梁振动特性。试验方法受外界干扰因素影响大, 且测试费用高, 虽能真实反映实际车桥耦合振动关系, 但获得的是多种因素综合作用的车桥耦合振动, 较难形成一致性规律^[9-10]。选择一款针对性强、应用性广的桥梁结构分析软件, 采用数

基金项目: 湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(23B0951)。

作者简介: 刘鹏(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 车桥耦合振动计算机数值仿真。Email: pliu85@126.com

收稿日期: 2024-06-29

值仿真分析方法求解桥梁振动问题对于车桥耦合理论在桥梁工程中的应用和推广具有重要意义^[11-13]。

目前广泛应用的大型有限元结构分析软件主要有 ANSYS、MSC - NASTRAN、DYTRAN、ABAQUS、MIDAS 等^[14]。中国一些研究机构也自行研发了一些桥梁动力计算专用软件,如中南大学的 G-SAP、西南交通大学的 BDAP 以及北京交通大学的 DRVB,这些软件也都能较好的实现对车桥耦合振动问题进行数值仿真分析,在科学研究和工程应用上发挥了巨大的作用,也取得了大量的研究成果。肖国良^[15]运用 ANSYS 软件对蔚汾河铁路桥梁的主桥进行车桥耦合动力分析,通过对车辆安全性、平稳性和桥梁动力性能等指标进行分析,验证其满足规范要求;苗新强^[16]设计了一种结构动力数值仿真两级并行计算系统,该系统能缩减求解问题规模和提高通信效率,大幅度减少了界面方程求解时间和系统求解总时间;刘宏宇^[17]基于 DLL(Dynamic Link Library)和 COM 组件技术,实现了 C#语言与 IDL(Interactive Data Language)的混合编程,对浑善达克沙地沙漠化问题设计了监测系统,系统具有遥感数据处理、沙漠化分类及统计等功能;曹博文^[18]利用 Visual Basic(以下简称 VB)对转炉新 OG 系统中除尘设备的关键参数进行可视化;宋云连^[19]结合 MATLAB 的 CUI 功能,开发出一款面向对象的通用计算程序软件,实现对重力式挡土墙可靠度计算和敏感性分析。

综上所述,采用通用软件或自编专用软件,在各个研究领域中开发与应用,实现了所需的系统功能,并取得了一定的研究成果。本文在此基础上,把 Fortran 语言强大计算功能和 VB 语言良好界面设计功能两者结合起来,基于混合编程技术开发了桥梁振动有限元计算程序系统,并应用于某一座三跨连续梁桥,分析计算在车辆通过时桥梁的振动情况。

1 桥梁振动

1.1 梁桥弯曲振动微分方程

非均匀欧拉-伯努利梁模型如图 1 所示,沿梁长度 x 方向变化的抗弯刚度为 $EI(x)$,梁的线质量为 $m(x)$,假设不考虑梁的横向剪切变形和阻尼作用,在 xy 对称面内,有一竖直向下的动荷载 $p(x,t)$,梁将产生自静平衡位置计起的动挠度 $y(x,t)$,以竖直向下为正。

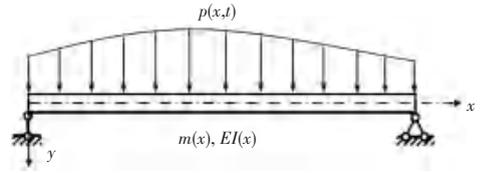


图 1 欧拉-伯努利梁模型

Fig. 1 Euler-bernoulli beam model

选取梁上距左端距离 x 处的任意微段 dx 为隔离体,根据达朗贝尔原理,可以得到仅考虑弯曲情况该变截面梁的振动偏微分方程:

$$m(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} EI(x) \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = p(x,t) \quad (1)$$

1.2 有限元法数值求解

变截面梁桥的振动方程为变系数偏微分方程,无法通过 Duhamel 积分得到解析解。本文采用数值方法中的有限元法对梁桥体系进行离散,得到系统振动的矩阵方程,然后在时域内逐步积分求解,数值模拟了在移动荷载作用下梁桥的动力响应。

采用有限元法时,梁桥的弯曲振动方程写成矩阵形式:

$$M\ddot{y}(t) + Ky(t) = F(t) \quad (2)$$

其中, M 为质量矩阵, K 为刚度矩阵,其与桥梁的材料种类和截面几何特性有关; $F(t)$ 为施加荷载列向量; $y(t)$ 和 $\ddot{y}(t)$ 分别为方程要求解的位移和加速度。

通过 VB 编制的系统前端处理界面输入与该矩阵方程有关的桥梁材料、截面和施加荷载等已知参数,建立桥梁振动分析模型;其次,运用 Fortran 语言编制有限元计算程序,在时域内采用 Newmark - β 法对矩阵方程进行逐步数值积分计算^[20];最后,求解出来的位移、加速度等可以通过系统的后端处理功能进行展示。

2 系统设计与开发

2.1 总体设计

桥梁振动有限元计算程序系统架构分为 3 层,即模块层、中间层和数据层。模块层包括前端处理模块、计算模块和后端处理模块;中间层接收用户的指令,通过调用数据层的基础数据分析处理并进行反馈;数据层是桥梁振动有限元计算程序系统的数据支持基础,能够接收中间层的请求并返回数据结果,系统的总体设计如图 2 所示。

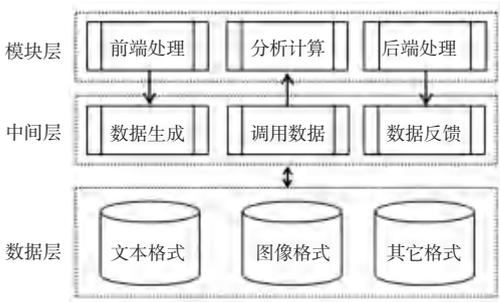


图 2 系统的总体设计图

Fig. 2 Overall design of the system

2.2 功能模块设计

桥梁振动有限元计算程序系统结构功能如图 3 所示,主要功能包括前端处理、分析计算、后端处理及附属功能 4 个大类,设计了截图几何特性、单元信息、边界条件、施加荷载信息等 13 个功能模块。系统功能设计满足任意截面尺寸、材料、跨径的梁桥在不同荷载作用下的静力和动力计算。

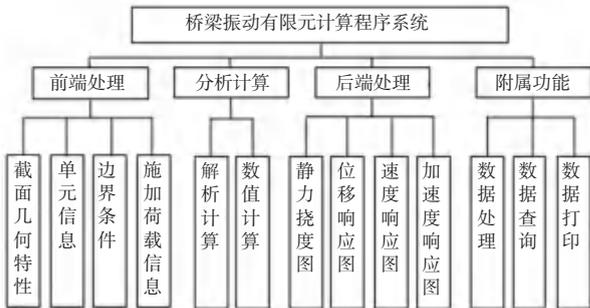


图 3 系统结构功能模块图

Fig. 3 System structure function module diagram

2.3 编程语言及开发环境

本系统的主界面、前后端处理及附属功能等采用面向对象、具有较好人机交互功能的 VB 语言编制。系统操作方便简单,数值仿真结果以字符和动画形式在主界面上展现,实现了桥梁振动数值计算的可视化。有限元计算程序采用 Fortran 语言编制,能对不同工况作用下任意跨径和各种截面梁桥的振动情况进行数值分析计算。系统开发使用的操作系统为 Windows 10 家庭版,基于微软 .Net3.5 开发环境,处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ, CPU 的主频为 2.53 GHz,硬盘为 500 GB。

2.4 混合编程技术

Fortran 和 VB 混合编程在 VB 主程序系统调用 *.dll 动态链接库或者 *.exe 可执行文件,实现数值计算。动态链接库能充分利用现有大量的动态链

接库资源,开发出的系统便于维护和升级;而可执行文件能让程序运行流程简单,在 VB 主程序的后台运行 Fortran 计算程序,数据以文件的形式进行交换,在处理大量数据方面具有经济、效率高等优点。本文开发的系统由于数值计算的数据庞大,且后处理需要处理大量数据,因此采用了直接调用 *.exe 可执行文件的方法。

本系统运行的具体流程如图 4 所示,即先在 VB 语言编制的主程序前端处理界面上建立要分析的桥梁模型,施加车辆荷载等其它信息,系统自动生成 Fortran 计算程序所需格式的原始数据文件,然后在主界面调用 *.exe 可执行文件,启动 Fortran 有限元程序进行计算,输出结果文件,最后在后端处理界面上读取该文件,将结果以动画和字符的形式展现出来。

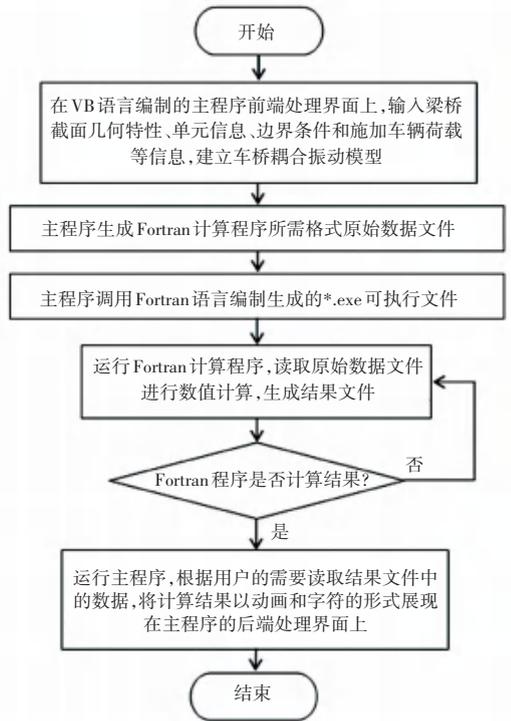


图 4 系统运行流程图

Fig. 4 System operation flow chart

3 工程应用案例

3.1 工程案例概况

某一座三跨(36 m+48 m+36 m)变截面连续箱梁桥,两辆汽车通过桥梁引起桥梁振动。在本系统前处理模块中输入该桥梁的几何特性,如图 5 所示;根据图 6 的操作提示,输入移动车辆荷载信息;在系统的前端处理界面上建立了车桥振动模型如图 7 所示,运用本系统计算该桥梁的动力响应。

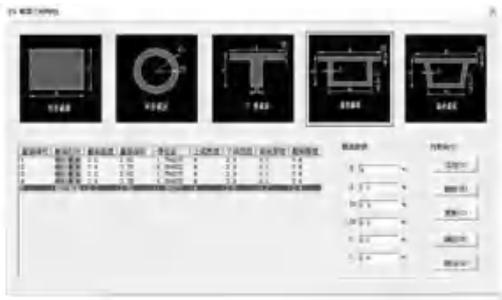


图5 截面几何特性图

Fig. 5 Cross-sectional geometric property diagram



图9 结构计算信息

Fig. 9 Structure calculation for information

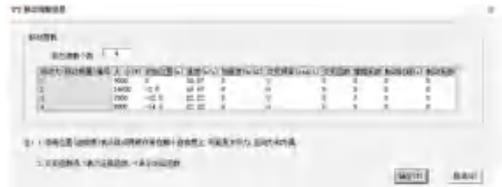


图6 移动车辆荷载信息

Fig. 6 Moving vehicle load information chart

3.3 数值模拟结果输出

通过本系统调用 Fortran 语言编制的有限元计算 .exe 可执行文件进行数值计算,得到计算结果文件。以往通常需要借助 Origin 等软件对计算结果数据进行处理,绘制动力响应图形,数值模拟工作效率低。而本系统的后端处理界面能读取计算结果文件,根据用户的需求将数据以动画和字符的形式展现在后端处理界面上,实现数值模拟的可视化,大大提高了工作效率。选取的任意 $T = 3.563\ 974\ \text{s}$ 时桥梁的动位移响应图如图 10 所示。系统还能将全桥和跨中位置处的最大动位移、速度、加速度值以及出现的时间以字符形式在后端处理界面上展现,直观找出桥梁最大动力响应值和最不利截面,方便工程技术和研究人员对桥梁刚度和安全性能进行验证与评估。

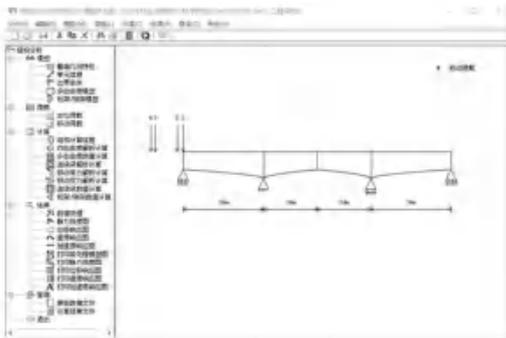


图7 车桥振动前端处理模型图

Fig. 7 Model diagram of vehicle - bridge vibration front - end processing

3.2 数值计算参数

为得到较好的数值计算精度和模拟效果,根据变截面梁的几何尺寸将全桥划分为 60 个截面呈抛物线变化的梁单元,如图 8 所示;根据图 9 所示的操作提示,输入结构计算信息,输入结构动力计算相关信息,时间步长取 $\Delta t = 0.018\ 371\ \text{s}$,不考虑阻尼,选用 3 次曲线的插值函数,采用 Newmark - β 法数值计算该桥梁的动力响应。

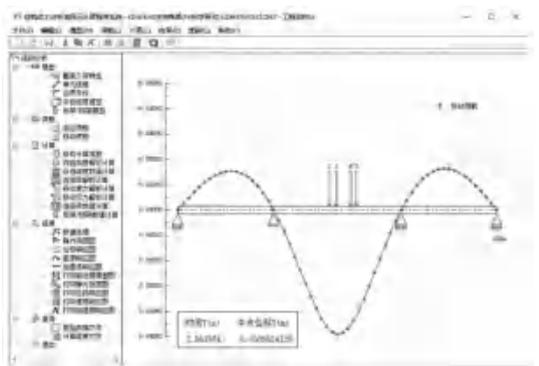


图10 后端处理位移响应图

Fig. 10 Back-end processing displacement response diagram

4 结束语

工程上广泛应用的变截面连续梁桥在移动车辆作用下的振动方程为变系数偏微分方程,无法求得解析解,数值方法中的有限元法成为一种行之有效的求解方法。有限元计算程序常采用 Fortran 语言编制,但在界面设计、图像处理等方面较弱。本文基

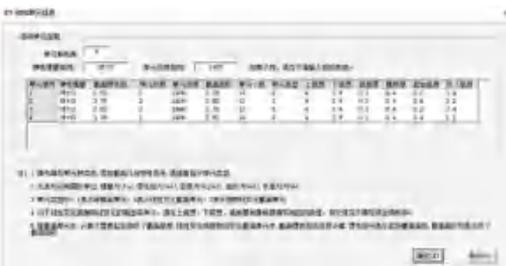


图8 结构单元信息

Fig. 8 System operation flow

于混合编程技术,利用 VB 语言设计开发了一套桥梁振动有限元计算程序系统,直接调用可执行文件进行数值计算。工程实例的应用表明该系统具有较好人机交互功能,操作方便简单,提高了工作效率,实现了桥梁振动数值计算的可视化。

本系统除正常的优化、维护之外,还预留了桁架桥、钢架桥模型端口,方便后续研究移动车辆作用下桁架桥、钢架桥的振动问题。

参考文献

- [1] 刘鹏, 荣华, 蒲军平. 变速多移动质量耦合作用下多跨变截面箱梁桥振动响应分析[J]. 工业建筑, 2016, 46(6): 85-89.
- [2] MA L, WU L, CAI C S, et al. The theoretical impact factor spectrum for highway beam bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(12): 1-17.
- [3] ZHANG L, WANG S, LI B, et al. Dynamic response of a vehicle-bridge expansion joint coupled system [J]. Shock and Vibration, 2022, 2022(1): 1-13.
- [4] 黄辉. 基于车桥耦合振动的既有损伤高速铁路混凝土简支梁桥动力响应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [5] PU Junping, LIU Peng. Numerical calculation of dynamic response for multi-span non-uniform beam subjected to moving mass with friction[J]. Engineering, 2010, 2(5): 367-377.
- [6] 刘焕举, 韩万水, 刘宁, 等. 刹车状况下桥上随机车流动态演化及车-桥耦合振动分析[J]. 中国公路学报, 2020, 33(4): 76-88.
- [7] 周勇军, 薛宇欣, 李冉冉, 等. 桥梁冲击系数理论研究和应用进展[J]. 中国公路学报, 2021, 34(4): 31-50.
- [8] 张骞, 高芒芒, 马莉, 等. 沪通长江大桥引桥车桥耦合振动研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(7): 132-138.
- [9] 陈水生, 张超, 桂水荣. 单箱多室波形钢腹板 PC 组合梁桥动力特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 122-127.
- [10] 陈代海, 李银鑫, 李整, 等. 公路桥梁车桥耦合振动的模型试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(2): 256-262.
- [11] 周爽, 张楠, 夏禾, 等. 高速铁路简支箱梁桥准静态变形对车桥动力响应的研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(5): 209-215.
- [12] 冯冠杰, 陈淮, 王艳, 等. 计算车桥耦合振动路面不平度影响的虚拟梁元法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 59-67.
- [13] 黄永明, 何旭辉, 邹云峰, 等. 基于 ANSYS 和 SIMPACK 联合仿真的大跨钢箱提篮拱桥车-桥耦合振动分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(5): 68-77.
- [14] 蒲军平, 徐玉峰. 基于 SDRA 的移动车辆荷载作用下桥梁动力响应分析[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(1): 81-84.
- [15] 肖国良. 基于 ANSYS 的车桥耦合动力计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [16] 苗新强, 金先龙, 丁峻宏. 结构动力数值仿真两级并行计算系统开发及应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(6): 1126-1133.
- [17] 刘宏宇, 海全胜, 宁小莉. 基于混合编程技术的浑善达克沙地沙漠化遥感监测系统的设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(1): 123-126.
- [18] 曹博文, 钱付平, 张天, 等. 转炉一次除尘新 OG 系统设计软件开发及应用[J]. 计算机辅助工程, 2019, 28(3): 43-48.
- [19] 宋云连, 付宇, 李强. 基于 MATLAB 的重力式挡土墙可靠度计算程序开发及其应用[J]. 计算机应用与软件, 2023, 40(2): 96-101.
- [20] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.