

文章编号:1001-7372(2000)04-0062-04

桥梁活载内力分析可视化研究初步

朱 玉,蔡清香

(交通部第二公路勘察设计研究院,湖北 武汉 430052)

摘要:可视化方法可有效处理数值分析的结果。提出了两种利用可视化方法分析桥梁活载内力的可行方式,完成了其中一种的程序实现,并结合实例介绍了其工程应用。

关键词:桥梁活载内力;可视化;动态规划法;动画

中图分类号:U441.2 **文献标识码:**A

Preliminary research on visualization of bridge inner forces due to Chinese highway live loads

ZHU Yu, CAI Qing-xiang

(The 2nd Highway Survey & Design Institute, Ministry of Communications, Wuhan 430052, China)

Abstract: Visualization method can process numerical analysis efficiently. Two visualization methods for analyzing bridge inner forces due to Chinese highway live load are proposed and one of them is programmed. As an example, the application on Yu-jiang Bridge is presented.

Key words: bridge inner forces due to live loads; visualization; dynamic programming method; animation

大部分的桥梁结构,除了有专门用途(如管道桥、渡槽等)外,主要用来承受汽车、火车等活载,以达到通涉利济的目的。因而,全面把握活载作用下桥梁结构的内力状态是进行合理工程设计的基础。由于活载的作用点是沿桥跨移动变化的,故活载内力的求解过程必定是一个动态的计算过程,对于活载内力计算,过去的研究往往只注重内力最值的获得,而对内力最值取得的过程关注极少。一般仅获得最终结果就可以满足需要,但某些时候还需了解计算的中间结果,例如,为了某种原因,需要小于最大值的某个值。事实上,即使不需要计算的中间结果,了解其求解过程对把握结构的活载内力也是有益的。笔者结合影响线布载的动态规划法和动画制作的基本原理,通过可视化的分析方法,使求解的过程与结果并重,两者得到统一。可视化是指把数字信息转化为图像信息,通过图像浏览数据,对数据的观察更加方便、迅速,易于校核。活载内力分析的可视化可在求解最值的同时,又可以动画的形式展现活载的布

载过程,不但清楚、直观地反映最值获得的可信度,且可随时锁定画面取得中间结果,可把图像信息保存为磁盘文件,用以长久存放,或作为其它文件的原始资料,如填写汇报文件,制作演示图片等,或直接用于结构实验。笔者提出了两种可行的可视化分析方式,并完成其中一种的程序实现,最后给出了在广西郁江大桥(净跨 220 m,中承式钢管混凝土桁架双肋拱桥)静载实验(1999年9月)中的应用,它也是进行本文研究的初衷。

1 影响线计算

结构力学中常用一个指向不变(通常是向下)的单位集中荷载沿结构移动时某一量值(如位移、内力)变化规律的图形称为该量值的影响线,数值计算中常指该图形的散点值。实际上,广义上讲,它是某量值以荷载位置为变量的函数。

$$F = f(x, y, z) \quad (1)$$

如今,有限元法已被公认是求解工程中所遇到

的各种问题的最有效、最通用的方法,事实上,其应用范围还要广些。桥梁结构的影响线一般采用此方法。对有限元数值方法,函数(1)为离散的形式。

$$F_i = f(x_i, y_i, z_i) \quad (2)$$

式中:下标 i 为单位荷载通过的节点号。有研究指出,利用机动法原理可有效地求解结构内力影响面(线),但此方法需改变整个结构体系的自由度(即需解除与内力分量相应的约束)。更精确的影响线计算可采用静力法,它可根据加载的步长逐点求解影响线的值。笔者采用有限元方法并结合功的互等定理(位移互等),先得到节点位移影响线,进而由联系单元内力与节点位移的内力矩阵求得单元内力影响线。采用此方法的优点是可获得位移影响线,因为活载位移(挠度)也是桥梁结构设计的一个重要指标。值得强调指出的是,节点位移是对结构的整体坐标系而言的,而单元内力则相应于单元的局部坐标系。

1.1 节点位移影响线

整体坐标系下某节点 N 第 i 个位移分量的影响线等于沿该分量方向施加一单位节点荷载,在结构各节点沿某指定方向 L 的位移值 $[\delta]_k^i$, L 指活载作用的方向,通常是向下。

事实上,以图1所示的简支梁为例,要计算节点1第 i 个位移分量的影响线,先在图1(a)的节点3施加一单位节点力 P_{3j} ,其在节点1产生沿 i 方向的位移分量为 δ_{1i} ,然后在图1(b)的点1沿 δ_{1i} 方向施加一单位节点力 P_{1i} ,其在节点3产生沿 j 方向的位移分量为 δ_{3j} ,据功的互等定理,有

$$\delta_{1i} P_{1i} = \delta_{3j} P_{3j}$$

$$\text{又} \quad P_{1i} = P_{3j} = 1$$

$$\text{则} \quad \delta_{1i} = \delta_{3j} \quad (3)$$

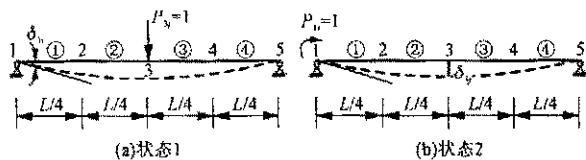


图1 简支梁节点位移影响线

即在节点3沿 δ_{3j} 方向作用一单位节点力 P_{3j} ,节点1处产生的位移分量 δ_{1i} 等于在节点1处沿 i 方向作用一单位节点力 P_{1i} ,节点3处位移分量 δ_{3j} 的值。实际上,若设简支梁的刚度 EI 沿跨长不变,因 $P_{3j}=P_{1i}=1$,则由材料力学知: $\delta_{3j}=\delta_{1i}=L^2/16EI$ 。

注意到节点3的位置是任意选定的,故式(3)适用于结构的所有节点。分别对其余各节点1、2、4、5用此定理一次,可得到 δ_{1j} 、 δ_{2j} 、 δ_{3j} 、 δ_{4j} 、 δ_{5j} 组成的位移

序列 $[\delta_{ij}]$, $k=1, \dots, 5$ 。即为节点1第 i 个位移分量 δ_{1i} 的位移影响线在5个离散点处的值。

1.2 单元内力影响线

有限元法中,每个单元的内力是在局部坐标系下给出的,可由单元刚度与局部坐标系下的节点位移的乘积得到,即

$$[F_e^*] = [K_e^*][\delta_e^*] \quad (4)$$

式中: $[F_e^*]$ 为局部坐标系下 e 号单元的内力矩阵; $[K_e^*]$ 为局部坐标系下 e 号单元的刚度矩阵; $[\delta_e^*]$ 为局部坐标系下 e 号单元各节点的位移矩阵。

由于节点位移是在整体坐标系下给出的,故局部坐标系下的节点位移需由坐标变换得到。

$$[\delta_e^*] = [R][\delta_s^*] \quad (5)$$

式中: $[R]$ 为坐标变换矩阵; $[\delta_s^*]$ 为整体坐标系下 e 号单元各节点位移矩阵。

故局部坐标系下 e 号单元的内力为

$$[F_e^*] = [K_e^*][R][\delta_s^*] \quad (6)$$

把前面求得的节点位移影响线代入上式,可得到单元的内力影响线。

2 最值求解的动态规划法

动态规划法是一种最优化方法,它可有效解决多阶段决策问题,运用动态规划的基本原理对影响线布载可快速求得活载内力的最值(有的文献称为极值),并可获得取得最值时活载的载位。它提供了活载内力分析可视化的基础。

根据中国《公路桥涵设计规范》的规定,行驶在桥梁上的活载可归纳为受到以下三个条件的约束:
①总体约束。它限定了活载最多可以同时出现在桥梁上出现的车辆数 N 。如一系列汽车车队中,重车只能出现一辆;挂车在桥梁全长也只能用一辆布载验算($N=1$)。
②车距约束。它限定了活载之间必须满足的最小轮距 B (顺桥向)及 H (横桥向)。如一系列汽车车队中,两辆主车的后轮沿顺桥向的中心距不小于15m($B=15$ m),而沿横桥向两辆车的轮中心距不小于1.3m($H=1.3$ m)。
③活载自约束。即活载自身各个车轮之间的轮距 D_i (顺桥向)、 L (横桥向)及轴重 P_i (履带车为均布荷载)的限定。考虑活载的约束状况并结合动态规划的基本原理,可把影响线布载求最值问题分为以下三个阶段完成。

阶段1:形成主车内力函数。它包含主车前进行驶的内力函数 $P_{AHD}(x)$ 和主车倒退行驶的内力函数 $P_{BAK}(x)$ 。 $P_{AHD}(x)$ 、 $P_{BAK}(x)$ 分别为全部由主车组成满足约束条件的车队前行时的单调不减函数与后退

时的单调不减函数。形成这两个函数后,可得到沿桥跨方向任一点处主车车队可能产生的结构最大内力,它是计算活载结构最大内力可视化处理必需的中间数据。主车车队从节点1(图2)前进内力函数 $P_{AHD}(x)$ 可由下式得到

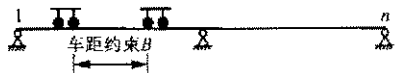


图2 车队示意

$$P_{AHD}(x) = \begin{cases} Z(x) = g(x) + P_{AHD}(x-B) & Z(x) > P_{AHD}(x-1) \\ Z(x) & Z(x) \leq P_{AHD}(x-1) \\ P_{AHD}(x-1) & \end{cases} \quad (7)$$

式中: B 为主车的车距约束; $g(x)$ 为一辆主车在 x 点处引起的桥梁内力。同理从影响线的右端节点 n 主车车队后退可得到后退内力函数 $P_{BAK}(x)$ 。

阶段2:形成重车内力函数。在一列车队中重车只有一辆,故它在结构中产生的内力可由重车的轴重与相应影响线量值的乘积直接得到。其在桥面 x 点处的内力函数记为 $P_{MAI}(x)$ 。

阶段3:结构内力最值计算。设汽车车队行驶到桥面 x 点处引起桥梁结构的可能最大内力为 $F_{TOL}(x)$,则

$$F_{TOL}(x) = P_{MAI}(x) + P_{AHD}(x - B_1) + P_{BAK}(x + B_2) \quad (8)$$

式中: B_2 、 B_1 分别为重车与其前、后主车的车距约束。故一列车队活载引起的桥梁结构最大内力为

$$F_{\max}(x) = \max\{F_{TOL}(x)\} \quad (9)$$

而与桥面任一点 x 处引起的桥梁结构可能最大内力相应的活载相对排列位置可由以下方法确定。

①重车位置。由式(9)可知,点 x 处即为车队中的重车。②主车位置。由式(9)可知,满足重车与主车车距约束 B_1 、 B_2 处为其前、后第一辆主车的可能位置。若在此两点(即 $x - B_1$ 和 $x + B_2$ 点)分别为 $P_{AHD}(x)$ 、 $P_{BAK}(x)$ 的函数值变化点,则此两点即为重车前、后第一辆主车的位置。依此方法继续向重车前、后寻找满足主车与主车车距约束的 $P_{AHD}(x)$ 、 $P_{BAK}(x)$ 函数值变化点,则可依次确定所有主车的位置。

3 桥梁活载内力分析可视化方法

影响线布载的动态规划法以最优的加载次序取得了活载可能引起的桥梁结构最大内力,用可视化的手段把动态规划法的布载以动画的形式展示在屏幕上,可生动、直观地展现活载沿桥跨移动时结构的

内力变化情况,辅之以影响线背景,时时显示车队中每辆车在桥跨上的位置,也便于对计算结果的校核。同时提供随时可选取关心区域的图像信息存贮为磁盘文件和写入内存的功能,则可直接为其它文档提供图像资料,如填写汇报材料等,减少后续的数据整理工作。动画可较好地模拟物体的移动,它通过连续播放一系列相差不大的静止画面使物体“运动”。动的效果来自于医学上对人眼视觉暂留现象的发现:即若以不小于24帧/s的速度连续播放一系列相差不大的静止画面,由于视觉暂留人眼看到的就是连续运动的物体而无间断感,如电影的播放速度24帧/s,电视的播放速度25帧/s。动画制作中最基本的“画一擦一画”法即源自这一原理。即它首先画出画面的背景和前景,接着用背景擦去前景,利用视觉暂留,在人眼还未觉察到前一幅画面消失前,迅速在新的位置重画前景,如此反复,人眼就看到了前景的“运动”。笔者结合影响线布载的动态规划法和动画制作的“画一擦一画”方法,提出了两种桥梁活载内力分析可视化的可行方式:①实时方式;②重演方式。下面分别介绍其基本原理。

3.1 实时方式

实时方式是指把程序计算的数据结果立即转换为图像信息显示在屏幕上,即随时完成数据图像化。它的最大特点是可基本同步显示程序计算的结果,数据计算与图像显示同时开始和终止,便于对程序运行的监控。由于此方式计算与显示的同步性,可视化显示的动画效果对微机计算的速度要求较高,若处理的数据较多,则明显限制显示的速度,若达不到24帧/s的显速,就会影响到动画的效果。另外,显示的图像稍纵即逝,若想再次获得中间结果,必须同时启动加载计算,造成机时浪费。但由于它计算与显示的同步性便于对程序运行的监控,现实中也时有应用,因而这里也给出实时方式的程序流程图(图3)。

3.2 重演方式

重演方式是指把最值的计算过程与计算结果的可视化处理分离开来,先通过计算把最值求解过程的中间信息和结果作为数据文件存贮于外存,求解结束后,在启动可视化处理部分,读取存贮的数据信息,按数据信息重演活载沿影响线布载的过程。由于它独立于内力的计算部分,故重演方式显示速度快,相比之下受内存限制少。它的最大优点是,对于同一计算模型,一次计算可对结果进行反复查看,便于对最终结果的考核和对中间结果的选取。除了同步性外,它具备实时方式的全部功能,因而作者推荐首选

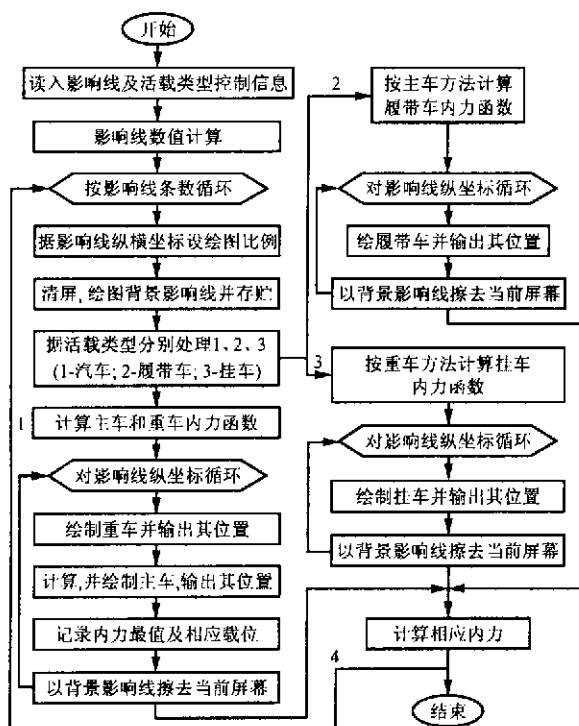


图3 实时方式流程图

重演方式进行可视化处理,影响线加载计算部分的流程图已在实时方式中介绍过,这里仅给出其可视化处理部分(图4)。

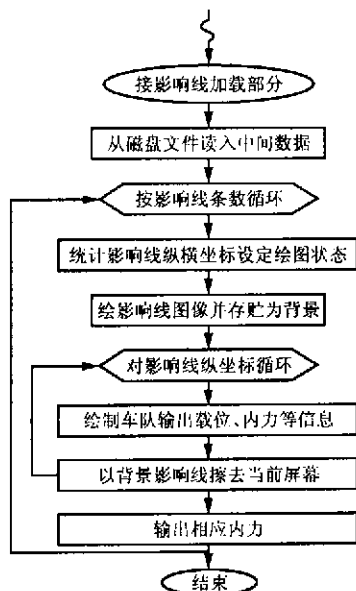


图4 重演方式流程图

据此流程图编制桥梁活载内力分析可视化处理程序QLJZ,源代码均采用FORTRAN-90编写,在586(DELL)微机调试通过。该程序可一次分别处理最大内力及其相应内力、最小内力及其相应内力计6个选项。图5是程序运行时的一个完整的界面图,包括一个标准化窗口、菜单区、绘图区、提示区等。可

由File菜单的Save选项把当前屏幕存贮为位图文件写入外存,也可由Edit菜单中的Copy选项把感兴趣的当前屏幕的指定区域存入内存,直接粘贴于其它文档。

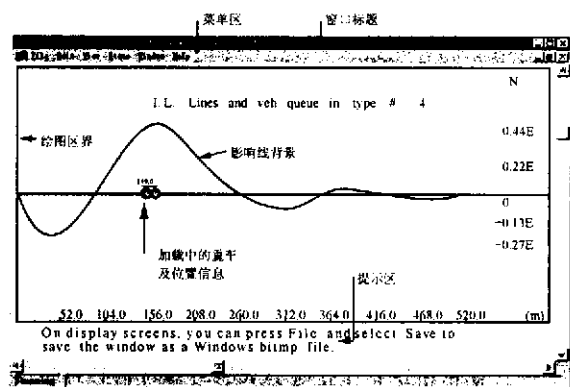


图5 程序运行时一个典型可视化界面(加载中的超-20重车)

4 应用实例

广西六景郁江大桥是柳州至南宁高速公路宾阳—南宁段上的一座特大桥,全桥长480 m,主桥为净跨220 m的中承式钢管混凝土桁架双肋拱桥,桥宽25.1 m,中承式桥面全长234.6 m。该桥1997年9月正式动工兴建,1999年9月28日竣工通车。它外观轻盈、宏伟,各项综合技术指标居同类型桥梁之首。正式通车前,为保障日后的安全使用,1999年9月12日对该桥进行了静、动载实验(实验详情已超出本文范围,将另文讨论)。郁江大桥静载实验的载位数据全部由本文程序QLJZ提供。下图(图6)是其下弦拱肋跨中截面轴力最大时,该活载内力分析可视化程序提供的活载位置图像信息。

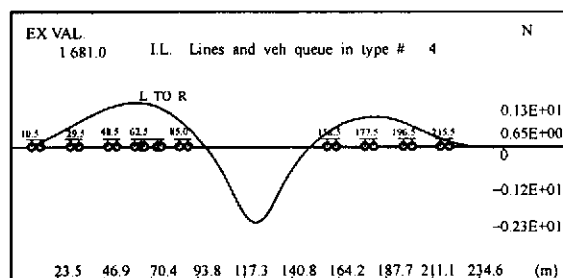


图6 郁江大桥下弦拱肋跨中截面轴力最大时的活载位置

5 结语

笔者对桥梁活载内力分析可视化进行了初步研究,称之为初步,是因为它的应用还局限在影响线(平面)的范畴。但通过它仍可看到其优越性所在:

(下转第82页)

(1)分析过程的可视化使运行在微机内存中的枯燥计算通过显示器以“运动”的图象表达出来,在使用者面前内存中的运行不再是一个彻底的“黑匣子”。对于实时方式,还可较好地监控程序的运行。

(2)分析结果的可视化使得对计算结果的浏览、查看更加直观、方便,结合影响线背景,计算结果的正确与否一目了然,便于校核。

(3)程序运行中,可根据需要随时把屏幕上感性趣的任一区域图像信息存入内存或写入外存以便另有它用,如制作幻灯片、提供实验数据等,减少整理数据结果的工作量。

此方法同样可以用于位移影响线活载计算。此外,它可作为影响面活载内力分析的导引和一个子过程。因为影响面可沿桥宽方向按行车道宽离散为一条条纵向的影响线,对每一条纵向的影响线分别按本文方法布载便可得到桥跨的横向影响线,再用此方法进行一次横向布载,从而完成对整个影响面的布载。

结束之际,指出本程序 QLJZ 的另一应用作为本文的结尾:利用 QLJZ 程序对活载类型超出规定范围只画出背景的功能,可填写数据文件(仅对重演方式)绘制二维函数曲线图。图 7 为该程序绘制的广

深高速公路东莞段某钢管混凝土系杆拱桥,在 EL-Centro 波激励下,拱肋跨中节点(89)顺桥向前 20 s 的位移时程响应曲线。

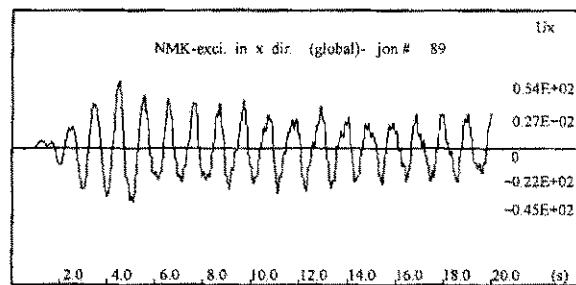


图 7 拱肋跨中节点顺桥向位移时程响应曲线

参考文献:

- [1] 李廉锴. 结构力学[M]. 北京:高等教育出版社,1983.
- [2] 沈为平,等. 内力影响面分析的机动法—理论、算法、程序[M]. 北京:人民交通出版社,1994.
- [3] 石洞,等. 桥梁结构电算[M]. 上海:同济大学出版社,1987.
- [4] 王柏,等. Windows 环境下动画系统开发技术—计算机动画的理论与实践[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.
- [5] 朱玉. 钢管混凝土系杆拱桥地震反应分析[D]. 兰州:兰州铁道学院,1998.