

交通荷载作用下边坡动力响应数值分析

蔡汉成, 言志信, 王群敏, 梁晓波

(兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:利用岩土数值分析软件FLAC^{2D}6.0对边坡岩土体在不同交通荷载作用下动力响应做了数值分析。结果表明:在交通荷载作用下,岩土体的振动加速度在震源附近最大,沿坡面向上以及向内水平向逐渐减小;离震源越近衰减越快,随着距离增大而逐渐变慢,并且交通荷载越大衰减的幅度越大;路面以上边坡岩土体垂直加速度和水平加速度处于同一量级,垂直加速度大于水平加速度;路面以下加速度比路面以上大一个量级,水平加速度和垂直加速度处于同一量级,并且水平加速度大于垂直加速度。研究结果对于评价交通荷载对边坡岩土体的影响及边坡的加固与治理具有一定的理论意义和工程应用价值。

关键词:交通荷载;边坡;动力响应;振动加速度;数值分析

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)03-0220-06

Numerical Analysis of Slope Dynamic Response under Traffic Loads

CAI Hanch-eng, YAN Zhi-xin, WANG Qun-min, LIANG Xiao-bo

(School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Numerical analysis of the dynamic response for rock-soil mass slope under different traffic loads is made, using numerical analysis of geotechnical software FLAC^{2D}6.0. The result indicates that under traffic loads, the vibration acceleration of rock-soil mass near seismic source is the maximum, up along slope or inner slope in horizontal direction it decreases gradually. Near seismic source, the vibration attenuation is more intense, and it gets more weak as distance increases. The heavier the traffic load is the bigger the attenuating range is. Above the road the vertical acceleration and the horizontal acceleration in slope are in same magnitude, and the vertical one is bigger than the horizontal one. The magnitude below the road is bigger than one above the road, the vertical acceleration and the horizontal acceleration are in same magnitude, and the horizontal one is bigger than the vertical one also. The results have some theoretical significance and project application for evaluating the influence acting of traffic loads on rock-soil mass slope and considering how to reinforce and govern the slope under traffic loads.

Key words: Traffic loads; Slope; Dynamic response; Vibration acceleration; Numerical analysis

0 引言

随着我国国民经济的迅速发展,大量的公路、高速公路、铁路等交通设施投入建设,在山区产生了大量的人工边坡。边坡长期处于交通荷载的振动环境之中,在交通荷载反复作用下必然加剧岩土体强度的弱化,进而产生疲劳破坏^[1]。同时交通荷载长期作用所产生的环境振动的影响也越来越受到人们的

关注。然而,现有的研究成果大多都是交通荷载对路基和周围建筑物影响的研究^[2-7],采用数值方法研究边坡在交通荷载作用下的响应和稳定性分析的文献较为少见。

拟静力法是分析边坡地震稳定性的常规方法,将地震作用简化为水平方向或垂直方向的大小不变的惯性力,作用于拟分析的边坡岩土体。然后根据

极限平衡理论将所有作用于潜在滑动面上的力沿滑动面分解,求出沿滑动面的安全系数。但是拟静力法无法全面考虑边坡岩土体受动荷载作用时不同高度和范围内的动力响应存在变异性和高程及水平放大效应等特征。所以正确认识交通荷载作用下边坡动态加速度响应规律,对于进一步分析和评价岩质边坡的长期稳定性具有重要的理论意义和工程应用价值。

简文斌^[12]研究了边坡对循环荷载的响应,但他只研究了公路路面以上边坡坡面上动力响应,没有研究坡面向内水平方向以及路面下边坡的动力响应。本文在已有相关研究成果的基础上^[8-12],以某公路路堑为例,采用美国 ITASCA 咨询集团开发的二维快速拉格朗日程序 FLAC^{2D} (Fast Lagrangian Analysis of Continua) 6.0 中的动力学模块进行数值计算,研究路堑岩质边坡动力响应的分布规律,为合理评价交通荷载对边坡岩土体的影响,优化公路岩质边坡设计和加固措施,提供理论依据。

1 数值分析模型

边坡岩土体是一种具有非均质、非连续、非线性等复杂特点的地质体,并受特定的地质环境条件、岩性组合、岩体结构类型和工程特征如坡高、坡度、坡型等诸多因素的影响。在数值模拟中如果综合考虑上述各种因素,将使问题变得十分复杂。因此将岩石边坡概化为均质、连续的弹塑性模型。岩体的物理力学参数采用文献^[12]中的参数,如表 1 所示。

表 1 边坡岩土体参数

密度 ρ /[$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	粘聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
2 200	2 000	0.32	100	35

1.1 数值模型

动力分析过程一般分为两个步骤:一定地质条件下的静力平衡计算与施加动力荷载后的动力反应分析。在第一步中确定模型范围、初始条件、材料类型、本构模型以及模型的填筑、开挖、衬砌等,也就是静力作用下的平衡计算;第二步是在第一步计算的基础上施加动荷载,考虑动力加载和动力边界、力学阻尼和地震波在介质中的传播。

某盘山公路边坡坡高 48 m,坡角 45°,建立的数值模型如图 1。为了保证波在模型中正确传播,划分网格最大尺寸为 2 m。模型采用平面应变假设与摩尔-库仑强度准则。公路向上坡面设置 6 个监测点,沿高程每 4 m 一个(A1 - A6);公路坡面向下

6 个监测点,沿高程每 4 m 一个(B1 - B6);坡面向内水平方向设 10 个监测点,每 4 m 一个(C1 - C10)。

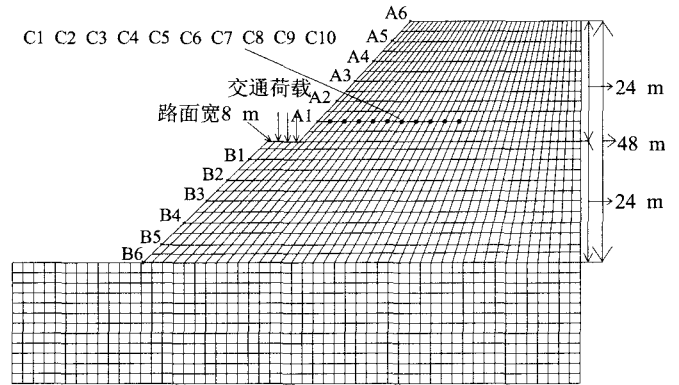


图 1 边坡计算模型及监测点示意图

Fig. 1 The slope model for numerical simulation and distribution of monitoring points.

1.2 交通动荷载和边界条件

汽车同公路的相互作用是一个复杂的过程。汽车行驶时速度范围大,轮胎阻尼随机性强,路面不平整情况等因素都对汽车荷载及冲击力有影响,荷载大小,空间分布均具有随机性,准确确定动力荷载的量值非常繁琐和困难^[13]。樊秀峰^[8]和叶四桥^[13]、蒯行成^[14]的研究结果见图 2。从图中可以看到汽车作用在路面的动荷载反力类似于正弦波形式,所以用在模型中输入的动力荷载用正弦波的形式表达为

$$F = \hat{F} \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

由于公路汽车荷载是一种随机荷载,它随车重量和速度的变化而变化,所以取在 40 ~ 90 kN 之间变化。

边坡模型的边界条件设定如下:公路和坡顶为自由表面;左侧和右侧边界施加水平方向的位移约束,同时施加粘滞边界条件;模型底部设置水平和垂直方向位移约束,施加粘滞边界条件。

2 数值计算结果分析

2.1 向上坡面

图 3 是公路向上坡面各监测点(A1 - A6)在不同交通荷载作用下最大加速度与高程的关系图,可看到最大水平和垂直加速度都随高程的增大而逐渐减小。离公路越近(高程越低),荷载强度越大,衰减也快;随着高程的增大衰减也越来越慢。计算结果与文献^[8]实测值所反映的规律一致。在相同交通振动荷载作用下,相同高程测点的垂直加速度和

水平加速度处于同一量级,并且垂直加速度大于水平加速度。

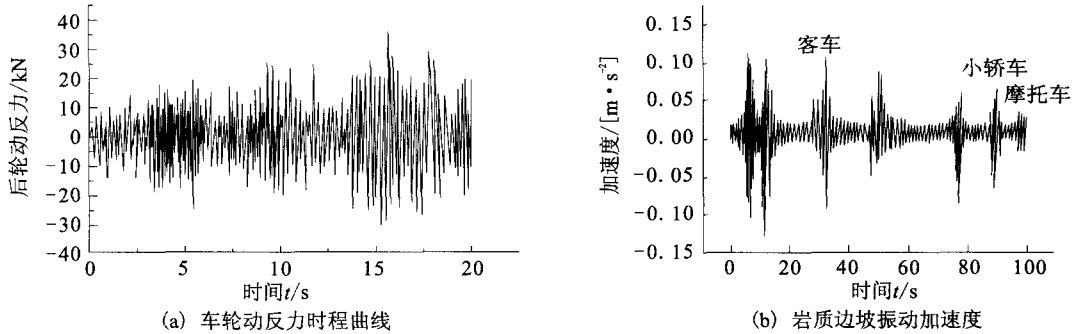


图2 车辆后轮动反力和交通荷载作用下岩质边坡振动加速度

Fig. 2 Time-history curve of at dynamic reaction vehicle rear wheel and vibration acceleration of slope under traffic load.

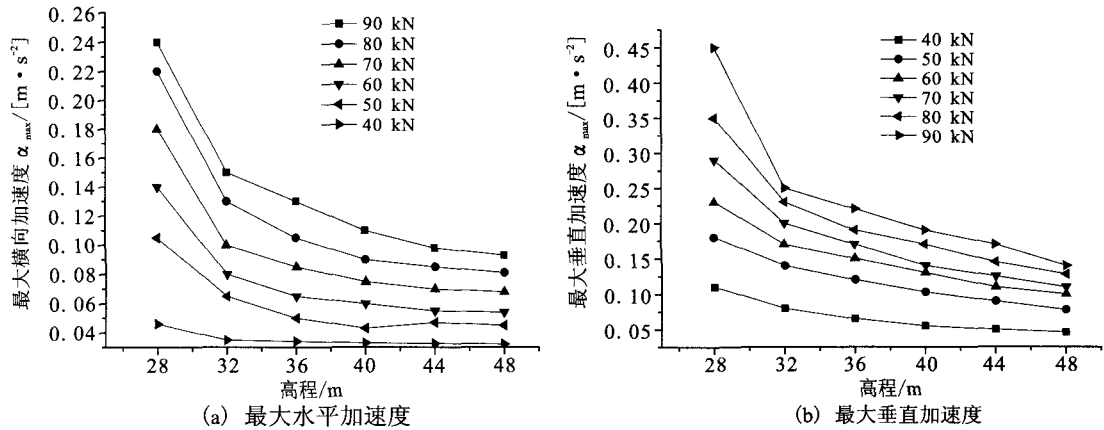


图3 向上坡面不同荷载下最大加速度与测点高程关系

Fig. 3 Relationship between the maximum accelerations and the elevations of monitoring points on the slope above the road under different loads.

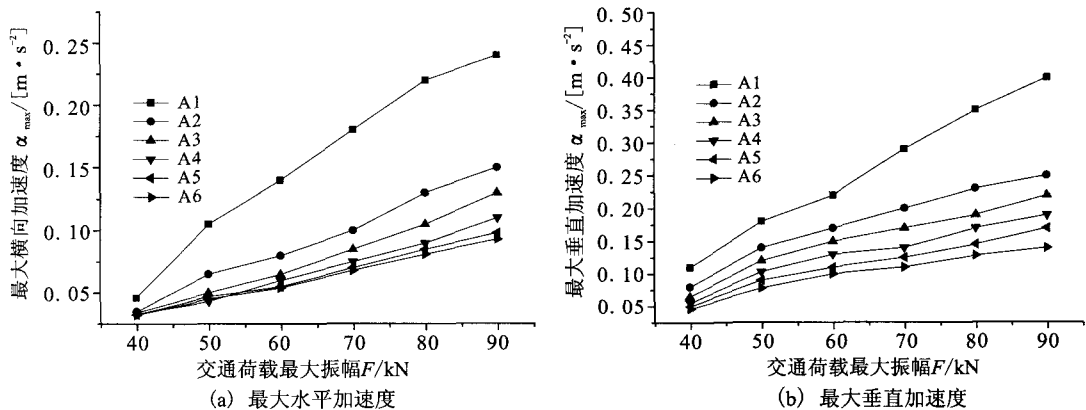


图4 向上坡面各监测点最大加速度与交通荷载最大振幅关系

Fig. 4 Relationships between the maximum acceleration of monitoring points on the slope above the road and the maximum amplitudes of traffic loads.

图4是公路向上坡面各监测点最大加速度和交通荷载最大振幅的关系图,可以看到各监测点的垂直和水平加速度曲线都随着交通荷载振幅的增大单调递增,但沿坡面向上各个监测点的加速度曲线的

斜率逐渐减小。即在相同的荷载作用下,距公路越近的点振动响应越敏感,增幅也越大。计算结果与文献[8]实测值所反映的规律一致。文献[12]所得出的边坡岩土体振动加速度随交通荷载的增大呈线

性增大的规律与本本文所得出的非线性规律并不矛盾,这是因为文献[12]中振动加速度是合成加速度,而本文中是将加速度分解为水平和垂直加速度来研究的。

2.2 向下坡面

图5是公路向下坡面各监测点(B1-B6)最大加速度与高程关系图,可以看到各监测点的最大水平和垂直加速度随高程的减小而减小。坡面上测点高程越高(离荷载源越近),荷载强度越大,衰减也越强烈;随着高程的降低,响应逐渐减小,衰减逐渐

变弱。高程8 m以上响应衰减较快,8 m以下则基本保持不变。向下坡面岩土体的水平振动加速度和垂直加速度比向上坡面大一个量级,并且离震源较近的岩土体振动加速度衰减幅度显著大于向上坡面岩土体振动加速度,同时离震源较远的岩土体振动加速度的衰减幅度显著小于向上坡面岩土体振动加速度。相同测点在同一荷载作用下,水平加速度和垂直加速度在同一量级,水平加速度略大于垂直加速度。

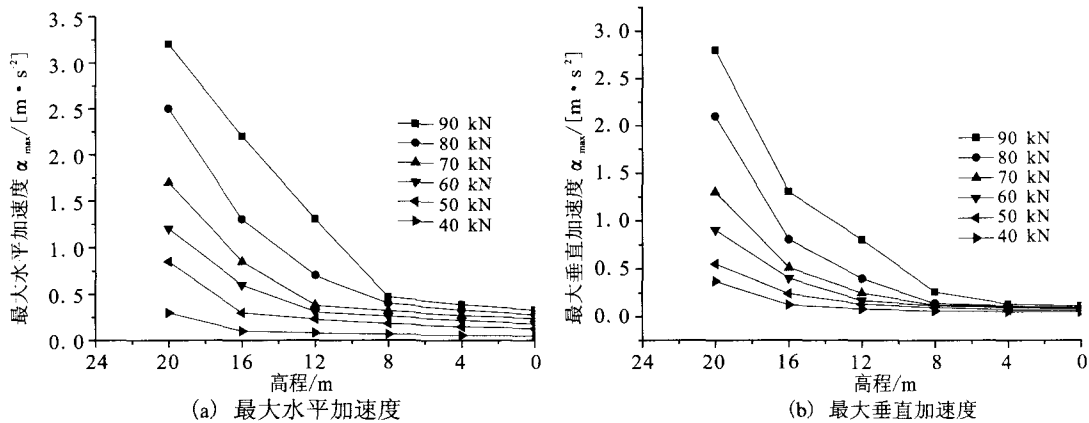


图5 向下坡面不同荷载下最大加速度与测点高程关系

Fig. 5 Relationship between the maximum accelerations and the elevations of monitoring points on the slope below the road under different loads.

图6是公路向下坡面各监测点最大水平加速度和垂直加速度与交通荷载最大振幅的关系图,可以看到边坡监测点的水平和垂直加速度都随交通荷载最大振幅的增大而增大,但不同测点增大的幅度不

一样。测点离震源距离越小,动力响应越敏感,加速度的增幅也越大;离震源距离较远时加速度随荷载振幅增大的幅度越来越小,到几乎保持不变。

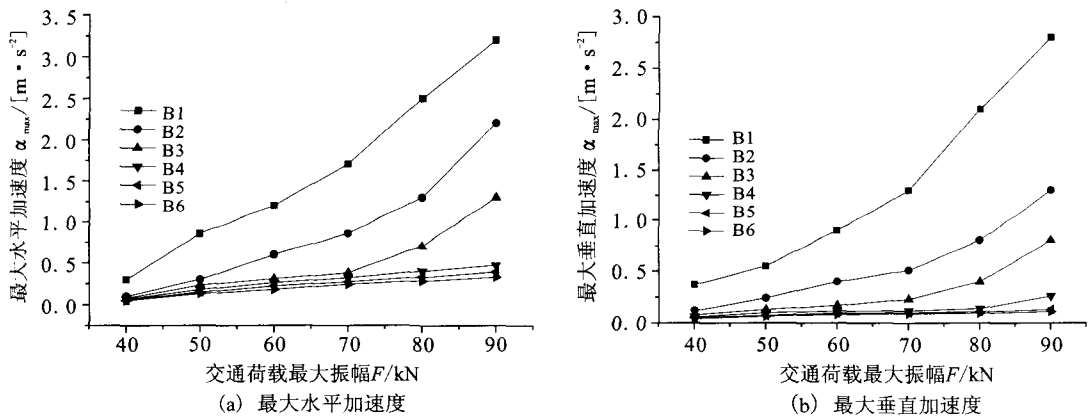


图6 向下坡面各监测点最大加速度与交通荷载最大振幅关系

Fig. 6 Relationships between the maximum acceleration of monitoring points on the slope below the road and the maximum amplitudes of traffic loads.

2.3 坡面向内水平方向

图7是坡面向内水平方向各监测点(C1 - C10)的最大水平加速度和垂直加速度与距坡面水平距离的关系图,可以看到各监测点的最大加速度随着距坡面水平距离的增大呈单调递减的趋势,并且交通荷载越大,曲线的斜率越大,即递减的幅度大。与沿

坡面向上加速度变化规律类似,离震源越近的点衰减越强烈,随着离震源距离的增大,衰减越来越弱。垂直加速度和水平加速度处于同一数量级,垂直加速度大于水平加速度,且对荷载变化的敏感程度低于水平加速度。



图7 坡内不同荷载下最大加速度与测点距坡面距离关系

Fig.7 Relationships between the maximum acceleration and distances from monitoring points inner slope under different loads.

图8是坡面向内各监测点最大水平和垂直加速度与交通荷载最大振幅关系图,可以看到各点的水平和垂直加速度值随着交通荷载的增大逐渐增大。

离震源越近(距坡面水平距离越小)的点,动力响应越敏感,加速度增幅越大,表现为曲线斜率越大。

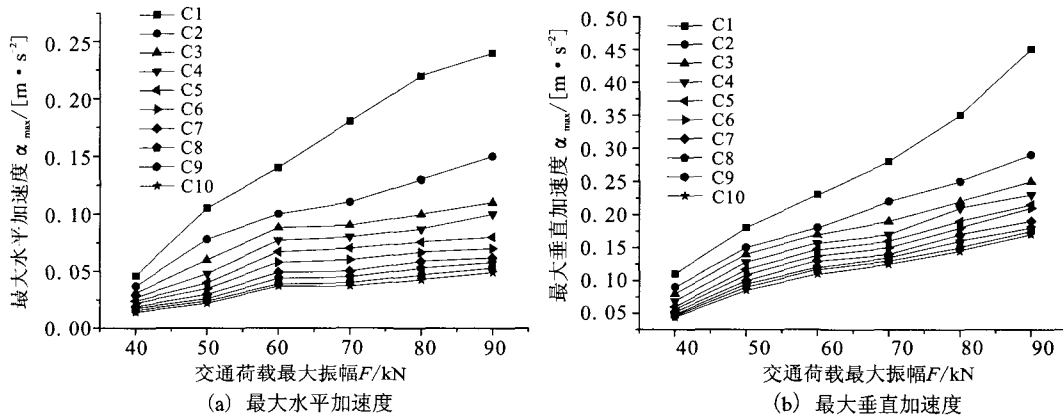


图8 坡内各监测点最大加速度与交通荷载最大振幅关系

Fig.8 Relationships between the maximum acceleration of monitoring points inner slope and the maximum amplitudes of traffic loads.

3 结论

(1) 交通荷载越大,边坡岩土体的振动加速度越大;交通荷载越小,振动加速度越小。

(2) 振动加速度随着高程的增大(坡面向上)或距坡面水平距离(坡面向内水平方向)增大逐渐减小。离震源越近的点动力响应越敏感,衰减强烈;距离越远衰减幅度逐渐减小;并且交通荷载越大衰

减的幅度越大。

(3) 交通荷载作用下,路面以上水平加速度和垂直加速度处于同一量级,垂直加速度大于水平加速度;路面以下边坡振动加速度比路面以上大一个量级,水平加速度和垂直加速度处于同一量级。

本文仅对竖向振动交通荷载作用下岩质边坡动力响应进行了数值分析,考虑横向交通荷载作用下边坡动力响应问题有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] M Popescu. A suggested method for reporting landslide remedial measure[J]. Bulletin of Engineering Geology and the environment, 2001, 60(1): 58-62.
- [2] 刘飞禹, 蔡袁强, 徐长节. 交通荷载作用下软基加筋道路变形机制研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 129-134.
- [3] 姚海林, 卢正, 罗海宁. 交通荷载作用下 kelvin 地基上不平整路面的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 891-896.
- [4] 章东强, 谢伟平, 于艳丽. 交通荷载引起的环境振动实测与分析[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(9): 57-59.
- [5] 查文华, 洪宝宁. 交通荷载下低路堤路基的动力响应[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(3): 264-268.
- [6] 查文华, 洪宝宁, 徐毅. 交通荷载下低路堤高速公路路面路基振动测试与分析[J]. 公路工程, 2007, 32(4): 113-117.
- [7] 刘奉喜, 刘建坤, 房建宏, 等. 车辆荷载作用下盐路公路振动衰减分析[J]. 公路, 2004, (4): 24-28.
- [8] 樊秀峰, 简文彬. 交通荷载作用下边坡振动特性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(增): 1197-1201.
- [9] 郑黎明. 铁路边坡岩体的振动特性和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(1): 69-78.
- [10] 张友葩, 高永涛, 王杰林. 动荷载下边坡的失稳分析[J]. 北京科技大学学报, 2003, 25(2): 110-116.
- [11] 金亮星, 李建. 高速铁路路堑岩质边坡的动力响应分析[J]. 振动工程学报, 2008, 21(4): 354-358.
- [12] 简文斌, 胡志忠, 樊秀丽, 等. 边坡对循环荷载的响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2562-2567.
- [13] 叶四桥, 唐红梅, 李明. 汽车荷载对滑坡稳定性的影响分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 106-109.
- [14] 蒯行成, 吾朝辉, 李永红. 车辆振动瞬态分析及动荷载[J]. 中南公路工程, 2004, 29(3): 41-44.

(上接 219 页)

[参考文献]

- [1] 敬少群, 吴云, 乔学军, 等. GPS 时间序列及其对昆仑山口西 8.1 级地震的响应[J]. 地震学报, 2005, 27(4): 394-401.
- [2] 顾国华, 张晶. 中国地壳运动观测网络基准站 GPS 观测的时间序列结果[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(2): 61-67.
- [3] 张跃刚, 帅平, 胡新康, 等. 从 GPS 观测看华北地区的形变场演化[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(1): 36-41.
- [4] 江在森, 张希, 崔笃信, 等. 青藏块体东北缘近期水平运动与变形[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 636-644.
- [5] 殷海涛, 李杰, 张玲, 等. 基于 GPS 观测网的山东地区地壳运动特征分析[J]. 西北地震学报, 2008, 30(3): 276-281.
- [6] 杨国华, 江在森, 刘峡, 等. 华北地区水平运动场动态特征及其与昆仑山 8.1 级地震的可能关系[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(1): 6-10.
- [7] 杨国华, 王敏, 韩月萍. 华北中北部地壳运动与张北地震[J]. 中国地震, 2001, 17(3): 301-311.
- [8] 张希, 江在森, 王琪, 等. 青藏块体东北缘弹性块体边界负位错反演与强震地点预测[J]. 地震学报, 2005, 27(6): 620-629.
- [9] 刘峡, 傅容珊, 杨国华, 等. 用 GPS 资料研究华北地区形变场和构造应力场[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(3): 33-38.
- [10] 黄立人, 郭良迁, 马青. 华北 GPS 网复测结果的初步分析[M]. 北京: 地震出版社, 2001, 218-227.
- [11] 杨国华, 王琪, 王敏, 等. 云南地区现今地壳水平运动与变形特征[J]. 大地测量与地壳动力学, 2003, 23(2): 7-14.
- [12] 杨国华, 江在森, 武艳强, 等. 中国大陆整体无净旋转基准及其应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 29(4): 6-10.
- [13] 胡新康, 王倩, 马青, 等. 区域无整体旋转基准的研究与应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 52-60.