

基于改进粒子群优化算法的施工期拱坝结构性态反演分析

李占超^{1,2,3}, 侯会静³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;

2. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098 ;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要 : 针对施工期拱坝坝体变形的特点, 建立了施工期拱坝坝体变形特殊安全监控模型, 对坝体变形中的水压分量进行提取。采用改进的粒子群优化算法对拱坝反问题最优控制解模型进行优化计算, 以此完成施工期拱坝结构性态的反演分析。以某拱坝为例, 对该拱坝施工期的结构性态进行反演分析。结果表明, 坝体变形反演的相对误差均在 2% 以内, 由此验证了所提出方法的可行性。

关键词 : 拱坝 ; 坝体变形 ; 反演分析 ; 改进粒子群算法 ; 坝体施工期 ; 大坝安全监控模型

中图分类号 : TU431 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2011)04-0024-05

Inverse analysis of structural behaviors of arch dams during construction period based on improved particle swarm optimization / LI Zhan-chao^{1,2,3}, HOU Hui-jing³ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : For their deformation characteristics, a special safety monitoring model for arch dams during the construction period was established. The hydraulic component of the dam deformation was extracted. The improved particle swarm optimization method was employed to optimize and calculate the optimal control model for inversion problems of arch dams. Accordingly, the inverse analysis of structural behaviors of arch dams during the construction period would be performed. An arch dam was taken as an example to inverse its structural behaviors during the construction period. The results show that the relative errors of the inversed dam deformation are all less than 2%, and the feasibility of the proposed method is validated.

Key words : arch dam ; dam deformation ; inverse analysis ; improved particle swarm optimization ; construction period of dam ; dam safety monitoring model

随着计算机水平的不断提高以及系统论、控制论等传统理论方法及人工智能、仿生理论等新兴理论方法研究的不断深入, 涌现出一大批高效、快捷的优化理论和方法, 使如今对工程结构的安全评价也越来越及时、准确、快捷和高效。目前对大坝安全的评估已不仅仅局限于运行期, 而逐渐向施工期进行延伸和扩展。为了对施工期大坝的安全进行评估, 需要根据施工期大坝效应量的实测数据反演确定其真实的结构性态。

对于施工期拱坝而言, 施工期持续的时间较长, 影响坝体变形、应力及渗流等效应量的因素较多, 影响关系复杂, 其中区别于运行期拱坝结构性态的一个关键因素就是施工期横缝的存在。施工期横缝的

工作性态不仅与大坝本身的体形、材料、荷载有关, 还与封拱和蓄水过程、温度场变化过程有关。在各种荷载作用下, 横缝未灌浆部分可能会张开或发生相对滑移, 横缝已灌浆部分由于抗拉强度较低, 也可能重新张开, 引起坝体内的应力重分布^[1-3]。因此, 对施工期拱坝结构性态的反演不仅包括坝体及坝基的材料参数, 还应该包括该时期拱坝的结构参数, 对这些参数的反演关系到对施工期拱坝工作状态的分析及安全评价。其中, 坝体弹性模量是坝体损伤状况的一个关键指标, 是坝体健康诊断的基础和先决条件^[4-5]。对施工期拱坝横缝进行反演分析, 可以得到灌浆前后横缝的接触性质, 从而对灌浆前横缝开合度是否满足灌浆要求以及横缝灌浆后是否又被拉

基金项目 : 国家自然科学基金(51079046) ; 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金(2009586012, 2010585212) ; 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CX09B_163Z)

作者简介 : 李占超(1985—)男, 河南开封人, 博士研究生, 从事大坝安全监控研究。E-mail: lizhanchao@gmail.com

开及是否需要二次重复灌浆进行判断^[3]。由此可见,进行施工期拱坝的反演分析具有重要意义。

反演问题往往可以转化为求目标函数极值的优化问题,对于基于静力观测位移的参数识别问题,若正演采用有限元法进行计算,则该反问题的最优控制解模型通常为^[6]

$$\begin{cases} \min T(\mathbf{P}) = \sum_{j=1}^h [u_j^* - u_j(\mathbf{P})]^2 \\ \text{s.t. } \mathbf{KU} = \mathbf{F} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{P}$ 为结构参数向量; $T(\mathbf{P})$ 为目标函数或适应度; h 为观测自由度总数; u_j^* 为第 j 个观测自由度上的实测位移; $u_j(\mathbf{P})$ 为第 j 个观测自由度上基于 $\mathbf{P}$ 的计算位移; $\mathbf{K}$ 为与结构参数相关的刚度矩阵; $\mathbf{U}$ 为节点位移列阵; $\mathbf{F}$ 为等效结点荷载列阵。

可以把优化方法应用于反演问题(式(1))当中,现阶段应用于反演分析的主要方法有神经网络法、共轭梯度法、置信区间法、单纯形法、遗传算法、微分进化准则、粒子群、蚁群以及一些智能方法和传统的确定性搜索方法所组成的混合方法等。然而由于影响因素多、影响关系复杂,导致施工期拱坝结构性态反演分析往往具有高纬度、多极值、高度非线性以及具有噪声等特点^[7]。而粒子群优化算法在处理极值优化问题时简单、易实现、计算速度快,对目标函数的数学形式没有要求,不需要目标函数的梯度等信息,特别适合于非线性、多极值优化问题。但是该算法后期的收敛速度非常缓慢,并且容易早熟。因此,为了提高基本粒子群算法的搜索速度及全局搜索能力,分别与非线性单纯形法和禁忌搜索方法进行混合,形成改进粒子群算法。笔者针对施工期坝体变形的特点,建立了施工期坝体变形的特殊安全监控模型,对坝体变形中的水压分量进行分离,以此来完成对施工期拱坝结构性态的反演分析。

1 施工期拱坝结构性态反演方法

1.1 施工期拱坝坝体变形安全监控模型

施工期混凝土拱坝坝体变形的主要影响因素有上游水位、温度、时效、坝体浇筑高度、封拱灌浆高度等。除了水位之外,受环境温度和混凝土水化热联合影响的坝体混凝土温度对坝体变形也有较大的影响。此外,施工期拱坝由于坝体混凝土和基岩材料的徐变、塑性变形以及基岩地质构造的压缩变形等因素的影响,使坝体产生较为急剧的时效变形。施工期坝体浇筑高度的变化对坝体变形的影响较为复杂,坝体随着浇筑高度的增加,在浇筑高度较低时由于坝体倒悬结构的影响,坝体向上游变形,当浇筑高度较高时坝体向下游变形。坝体封拱灌浆高度对坝

体变形的影响主要体现在对坝体结构性态的影响。坝体结构随着封拱灌浆的进行,水平向的拱效应逐渐增强,而垂直向的梁效应逐渐减弱。因此,施工期大坝变形安全监控模型可以表示为

$$\delta = \delta_H + \delta_{H_b} + \delta_{H_c} + \delta_T + \delta_\theta \quad (2)$$

式中: δ_H 、 δ_{H_b} 、 δ_{H_c} 、 δ_T 、 δ_θ 分别为施工期混凝土拱坝坝体变形的水压分量、未封拱的坝体浇筑高度分量、封拱高度分量、温度分量以及时效分量。 δ_H 、 δ_T 和 δ_θ 可以按照运行期拱坝变形的表达形式进行选取^[8]。

为了分析未封拱的坝体浇筑高度及封拱高度对坝体变形的影响关系,采用敏感性分析结合有限元的方法对其关系进行分析,最后以多项式对该关系进行拟合。最终得到施工期坝体变形的特殊安全监控模型为

$$\begin{aligned} \delta = & \delta_H + \delta_{H_b} + \delta_{H_c} + \delta_T + \delta_\theta = \\ & a_0 + \sum_{i=1}^4 a_{1i} H^i + \sum_{i=1}^2 a_{2i} H_b^i + \sum_{i=1}^2 a_{3i} H_c^i + \\ & \sum_{i=1}^2 \left(b_{1i} \sin \frac{2\pi i t}{365} + b_{2i} \cos \frac{2\pi i t}{365} \right) + \\ & c_1 \theta + c_2 \ln \theta \end{aligned} \quad (3)$$

式中: H 为上游水深; H_b 为未封拱的坝体浇筑高度; H_c 为坝体封拱高度。

利用实测资料对施工期拱坝坝体变形的特殊安全监控模型(式(3))进行拟合,得到各项回归系数,从而可以得到坝体变形中的水压分量。

1.2 改进的粒子群优化算法

粒子群优化算法^[9]简单、易实现、计算速度快,对目标函数的数学形式没有要求,不需要目标函数的梯度等信息,适合于非线性、多极值优化问题。此外其具有较好的可移植性和鲁棒性,可以并行计算,但是后期的收敛速度非常缓慢。缓慢的主要原因在于这时大部分粒子已经聚集在粒子最优点的附近,并且几乎停止了运动,但极值的大致区域已被很好地定位,这给非线性单纯形搜索方法的应用提供了良好的初始点位置。非线性单纯形搜索方法^[10]直接根据函数值完成优化过程,不需要目标函数的导数信息,是一种广泛用于非线性无约束优化问题的直接局部搜索技术。其优点是不用求目标函数的一次导数及Hessian矩阵,不用进行复杂的矩阵运算,因此特别适应于信息不完全的复杂函数。但是该方法对初始点的选择非常敏感,且不能保证得到全局最优解。因此,在PSO搜索后期应用NSM,既加强了粒子群的局部搜索能力,又能避免NSM易受初始值的影响而陷入局部极值的不足。这种混合方法对

于具有较少局部极值的函数效果较好,而对具有众多局部极值和全局极值的多峰函数,即使在低维的简单情况下其计算复杂度也相当高,是典型的 NP-hard 问题,优化效果提高有限。Parsopoulos 等^[11]使用“函数拉伸”技术使算法跳出局部最优,但是对目标函数进行的变换可能会引入假的局部最优点和误导的梯度信息,虽然粒子群算法不直接使用梯度信息,它却被确信以某种间接方式使用^[12]。禁忌搜索^[13]是人工智能的一种体现,是局部搜索的一种扩展。禁忌搜索最重要的思想是标识已经搜索到的局部最优解的一些对象,并在进一步的迭代搜索中尽量避开这些对象,从而保证不同的有效搜索途径的探索。禁忌搜索具有较强的“爬山”能力,使其在搜索过程中能够跳出局部最优解,进而转向其他区域进行搜索,从而获得更好的解或全局最优解的概率也大幅度增加。因此,采用 TS 算法可以使粒子群跳出局部极值区。即当粒子群陷入局部最优时,对该局部极值区域进行禁忌处理,赋予一定的禁忌任期,从而使粒子群远离局部极值区域实现全局搜索。根据以上提出的改进粒子群优化算法的基本思想,该算法的基本流程见图 1。

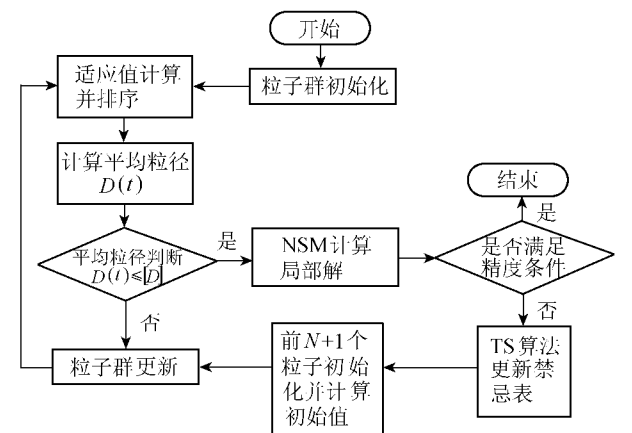


图 1 改进粒子群算法基本流程

在工程应用中最好是将优化搜索限制在有物理意义的区域。经验表明微粒最大速度和惯性权重并不能总是将粒子限制在可行解范围内。故应该对粒子群算法进行边界处理^[14-15],现有的处理方法分别为吸引边界、反射边界、阻尼边界、无形边界、无形/反射边界、无形/阻尼边界等。不同的边界条件对算法的性能有一定程度的影响,而无形边界条件在多数情况下表现得比其他非限制边界性能更好^[16]。

1.3 反演问题的适定性证明

反问题一般不是物理可实现的,它的解一般是不稳定的。而解的存在性与唯一性本质上涉及已知信息量是否足够的问题,信息欠定则解不唯一,信息超定则解不存在,因此反问题一般都是非适定的。

解决反问题的不适定性主要有 2 种途径:一种是通过对方程中的已知部分加强条件,使按经典解的定义进行求解具有适定性;另一种是适当修改解的定义,使反问题求解具有适定性。对于工程应用,通常采用后一种方法。通过修改解的定义,可以获得在不同意义下逼近真实解的近似解,如最优控制解、最小偏差解、选择解等^[17]。基本的拱坝反问题最优控制解模型为式(1),为了消除坝体变形基准点选取等所带来的不利影响,通常采用拱坝反问题最优控制解模型的增量形式:

$$\begin{cases} \min \pi(\mathbf{P}) = \sum_{j=1}^h \omega_j [\Delta u_j^* - \Delta u_j(\mathbf{P})]^2 \\ \text{s. t. } \mathbf{K} \Delta \mathbf{U} = \Delta \mathbf{F} \end{cases} \quad (4)$$

该反演模型使描述拱坝物理规律的微分方程得到满足,只是计算信息在观测点上近似逼近观测信息,当观测信息超定时能平差滤噪,当观测信息欠定时能吸纳其他有用信息(如专家经验等)。显然,该反演模型的求解结果受到以下因素影响:模型物理参量中未知量的数目、观测点集合的大小、观测点的相互位置关系,并且隐含了用局部接近程度来近似代替整体接近程度的假定。因此,在根据实测资料对工程进行反演分析之前,应对相应的反问题进行适定性检验,判断是否可以根据现有的观测点集合和观测点位置正确地得到未知的物理参量。

2 工程实例分析

2.1 工程概况及有限元模型

某大坝为混凝土双曲拱坝,坝高 292 m,坝体共布置有 42 条横缝,坝踵处还布置有缝深 9 m 的结构诱导缝。该坝的混凝土浇筑采用不设纵缝的通仓浇筑方式,根据不同部位的浇筑施工要求,每个浇筑块的层厚为 1.5 m 或 3.0 m。工程于 1999 年 9 月开始筹建,2002 年 1 月 20 日正式开工,预计于 2012 年底竣工。为监测坝体位移状况,大坝主体、岸坡及坝基共布置了 9 条正垂线和 9 条倒垂线监测系统。拱坝的有限元模型及坝体横缝的布置位置如图 2 和图 3 所示。

坝体中的横缝采用接触单元模拟,即缝两侧坝体单元表面的一侧定义为接触面单元,另一侧定义为目标面单元,组成接触单元对。诱导缝采用三维定向 Gap 单元进行模拟,Gap 单元作为一个四节点单元存在。拱坝施工过程的模拟通常是采用激活和杀死单元的方法来动态地实现结构变化。激活单元是指结构在现有的受力状态下,将结构某个部位的单元激活,参加结构的受力和变形,杀死单元是指结构在某一状态下,某些结构构件被撤除,而被撤除构

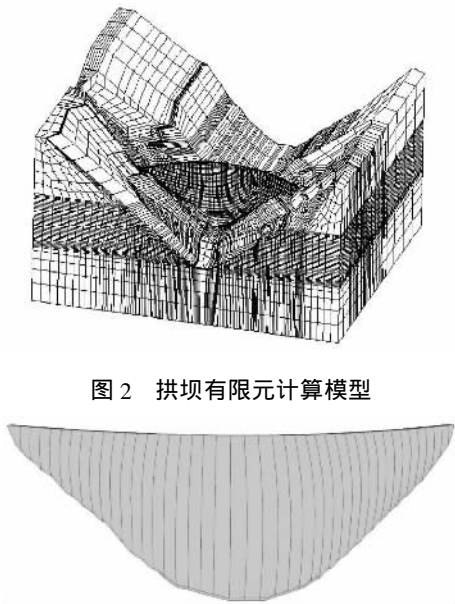


图2 拱坝有限元计算模型



图3 拱坝坝体横缝布置示意图

件的内力以反力作用于结构上,使结构发生进一步的内力和变形。横缝单元在灌浆前后的力学性能是不同的。横缝灌浆前,抗拉强度和凝聚力均为零,横缝只能承受压力和不超过摩擦力的剪力。灌浆后,缝面视为无间隙,缝面可承受不超过灌浆材料抗拉强度的拉应力。为了与未封拱时模拟横缝的接触单元相衔接,采用等效方式对横缝的封拱灌浆进行模拟,在 MSC.Marc 中采用子程序 SEPSTR 及 UFRIC 对灌浆以后的横缝所具有的抗拉强度及拉开后的摩擦系数进行设定。

2.2 反问题适定性证明

为了对本文所建立的反问题的适定性进行验证,在假定的坝体弹性模量、横缝的摩擦系数、封拱后的横缝抗拉强度下,利用已建立的有限元模型对坝体位移场进行计算,并把计算出的位移监测点的位移值当成是实测位移,对坝体结构性态进行反演分析,结果见表1。

表1 待反演参数的理论值及反演值对比分析

对比量	坝体弹性模量 E/GPa	横缝摩擦系数 f	横缝灌浆后抗拉强度 P/MPa
理论值	21.0000	0.7000	1.0000
反演值	21.0318	0.6914	1.0237

从表1可以看出:反演得到的坝体弹性模量和横缝灌浆后抗拉强度比理论值稍大,相对误差分别为0.15%和2.37%,而横缝摩擦系数的反演值比理论值稍小,相对误差为-1.23%。但总体而言,反演结果与理论值较为接近,可见利用监测点的坝体变形可以对施工期坝体结构性态进行反演分析,即利用此局部接近程度可以较好地代替整体接近程度。

2.3 施工期拱坝反演结果分析

利用该拱坝施工期某一时段坝体变形的实测

值,根据施工期拱坝坝体变形特殊安全监控模型,从中提取水压分量,利用改进粒子群算法对施工期坝体结构性态进行反演分析,结果见图4和表2。其中表2为在反演的拱坝结构性态下靠近河床坝段的坝体变形增量实测值与计算值对比。

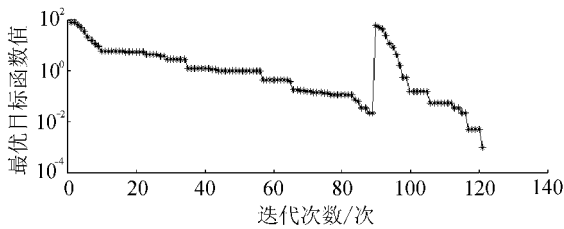


图4 反演函数最优值随迭代次数的变化

表2 拱坝坝体变形反演分析结果

编号	高程/m	实测值/mm	计算值/mm
A22-PL-03	1100	9.843	9.907
A22-PL-04	1065	8.989	9.015
A22-PL-05	1010	5.537	5.479
A22-IP-01	959	1.373	1.348

从图4可以看出,在反演施工期拱坝结构性态时,当迭代次数达到86时平均粒子半径小于所指定的阈值,但是目标函数值并没有达到所要求的精度,即粒子群陷入局部最优解。此时,改进的粒子群算法通过所镶嵌的禁忌算法更新禁忌表使粒子群跳出该局部最优解。可见,利用改进的粒子群算法不但能够增强粒子群后期的搜索能力,而且可以使粒子群跳出局部解,从而可以搜索到精度更好的解。从表2可以看出,实测值与计算值较为接近,只是高高程处反演结果稍大,低高程处反演结果稍小,这也说明反演得到的坝体结构性态仍然是施工期坝体的综合结构性态,反演结果是反映坝体性态的综合参数。

3 结 语

通过对施工期拱坝特点的详细分析,确立了施工期拱坝结构性态反演分析的待反演参数。在反演分析的过程中,为了克服粒子群算法在反演分析中后期收敛速度慢及容易早熟的缺点,通过与非线性单纯形算法和禁忌搜索算法进行镶嵌式混合,形成改进的粒子群算法。该算法不但增强了粒子群后期搜索能力,而且也使其具有跳出局部解进行全局搜索的能力。同时由于采用禁忌算法使粒子群跳出局部解,在一定程度上克服了“函数拉伸”所产生的伪极值问题。以施工期的某拱坝为例,对其施工期的结构性态进行了反演分析,反演结果较为合理可靠。

参考文献:

[1] 韩晓凤. 锦屏高拱坝施工期性态分析及整体安全度研究[D]. 南宁: 广西大学, 2003.

- [2] 刘毅.高拱坝真实工作性态影响因素研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2007.
- [3] 周伟,常晓林,解凌飞,等.模拟高拱坝施工期横缝工作性态的接触-接缝复合单元[J].岩石力学与工程学报,2006,25(22):3809-3815.
- [4] MAIER G,ARDITO R,FEDELE R. Inverse analysis problems in structural engineering of concrete dams[M].Computational Mechanics.Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [5] MAIER G,BOCCIALARELLI M,FEDELE R. Some innovative industrial prospects centered on inverse analyses[C]//MORZ G,STAVOULAKIS G. Parameter Identification of Materials and Structures.Wien:Springer-Verlag,2005:469.
- [6] 田明俊.智能反演算法及其应用研究[D].大连:大连理工大学,2005.
- [7] PELIN GUNDES BAKIR,EDWIN REYNERS,GUIDO DE ROECK. An improved finite element model updating method by the global optimization technique ' Coupled Local Minimizers [J]. Computers and Structures,2008,86:1339-1352.
- [8] 吴中如.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [9] EBERHART R,KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[J]. Engineering and Technology,1995,43:39-43.
- [10] NELDER J A,MEAD R. A simplex method for function minimization[J]. Computer Journal,1965,7:308-313.
- [11] PARSOPoulos K E,VRAHATIS M N. Modification of the particle swarm optimizer for locating all the global minima[C]//KURKOVA V,STEELE N C,NERUDA R,et al. In Proceeding of the International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms. Prague:Czech Republic,2001:324-327.
- [12] 王芳.粒子群算法的研究[D].重庆:西南大学,2006.
- [13] GLOVER F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[J]. Computers and Operations Research,1986,13:533-549.
- [14] XU S H,RAHMAT-SAMII Y. Boundary conditions in particle swarm optimization revisited[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2007,55(3):760-765.
- [15] HUANG T,MOHAN A S. A hybrid boundary condition for robust particle swarm optimization[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2005,4:112-117.
- [16] 康飞.大坝安全监测与损伤识别的新型计算智能方法[D].大连:大连理工大学,2009.
- [17] 黄光远,刘小军.数学物理反问题[M].山东:山东科学技术出版社,1993.

(收稿日期:2011-01-27 编辑:高建群)

· 简讯 ·

第三届全国水工抗震防灾学术交流会将在大连召开

由中国水力发电工程学会抗震防灾专业委员会主办,大连理工大学、河海大学、中国水利水电科学研究院、中国长江三峡集团公司承办的第三届全国水工抗震防灾学术会议将于2011年10月21—23日在大连市召开。本次会议将结合汶川、玉树等地震,就水工建筑物抗震分析理论、水工建筑物抗震设计标准、设计规范修订关键技术、地震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估及修复加固、水工结构现场检测与监测、健康诊断与鉴定、水库引发地震、地震预测和预警、水电工程抗震措施、抗震安全评价体系、水工结构工程振动、爆炸与冲击、水工建筑物现代抗震设计理念、施工水平等关键技术等专题,进行广泛的学术交流。

会议将进行交流 and 研讨的专题如下:①水工(港工)建筑物抗震设计标准;②水工(港工)建筑物抗震分析理论与方法;③水工(港工)建筑物抗震试验研究方法和技术;④水工(港工)建筑物场地地震动输入;⑤水工(港工)建筑物与地基材料动态特性;⑥水工(港工)建筑物现场测试与动力性态检测、健康诊断与鉴定;⑦水工(港工)结构、金属结构振动、爆炸与冲击;⑧水工(港工)结构减震、隔震和控震技术;⑨强震震后水工建筑物震损调查、震害分析、灾害评估以及次生灾害影响;⑩震损水工结构的安全度及修复加固技术;⑪水库地震的预测、监测及其影响研究;⑫水工建筑物地基稳定性及地质灾害防治;⑬水利水电工程安全评价方法、防灾减灾措施及应急预案。

(本刊编辑部供稿)