

附件 1:

西安理工大学

博士创新基金项目

申 请 书

项目名称: 高面板堆石坝应力变形机制及
智能预测分析研究

申请者: 卜鹏

导师: 李炎隆

学科名称: 水工结构工程

联系电话: 15353495499

起止时间: 2020.10-2023.06

入学年月: 2019.09

攻读方式: 全日制非定向博士研究生

申请日期: 2020.10

西安理工大学研究生院制
二〇一三年五月

项目名称	高面板堆石坝应力变形机制及智能预测分析研究						
申请项目类别 (在相应类别上画“√”)		<input checked="" type="checkbox"/> 基础研究		<input type="checkbox"/> 应用研究	<input type="checkbox"/> 开发研究		
所属学科		水工结构工程					
起止时间	2020.10-2023.06			申请金额	30000 元		
项目申请人	姓名	卜鹏		性别	男	出生年月	1994.07
	已获学位 及获学位时间		工学硕士 2019.06		专业技术职务		博士生
	入学时间		2019.09		攻读方式		全日制非定向博士研究生
	承担或参加其他科学基金项目及研究情况: 参与国家自然科学基金面上项目“基于人工智能的高面板堆石坝应力变形预测分析研究”(51979224),负责离心模型试验方案的制定及开展。						
项目组主要成员	姓名	性别	年龄	技术职务	主要承担工作任务		本人签字
	李炎隆	男	40	教授	技术指导		李炎隆
	闵恺艺	男	24	硕士生	资料收集		闵恺艺
	殷乔刚	男	24	硕士生	现场试验		殷乔刚

一、立项依据

1、研究项目的国内外概况、科学意义和应用前景：

1. 科学意义

混凝土面板堆石坝具有对地基基础条件适应性强、能就地取材、占用耕地少、节省投资、建设速度快等优点，是最有发展前景的坝型之一。我国西部金沙江、澜沧江、怒江及黄河上游等流域规划的梯级电站中，很多工程选用的是混凝土面板堆石坝，这些坝的高度基本在 200~300m 级，超过世界上已建最高的水布垭面板堆石坝（233m）。这些特高面板堆石坝（300m 级，超过 250m）坝址区地形条件复杂、地震活动频繁且烈度较高，一旦破坏，不仅会造成重大的经济损失，对下游所形成的次生灾害还将造成难以估量的人民生命损失。因此，保证面板堆石坝，尤其是特高面板堆石坝的安全是国家经济和公共安全保障的重大科技需求。

混凝土面板堆石坝是采用上游面混凝土面板作为防渗结构，以堆石体作为主要支撑结构的一种堆石坝。马洪琪院士指出，坝体变形控制是高混凝土面板堆石坝的关键技术问题^[1]。混凝土面板堆石坝防渗体的性态主要取决于堆石体变形，堆石体变形过大可能会造成大坝面板开裂，引起大坝渗漏，严重时将导致大坝溃决。目前，我国面板堆石坝建设正面临向 300m 级高度跨越发展的挑战，其关键问题就是高面板坝的应力变形预测分析与控制。随着坝高的增加和水头的增大，坝体的应力变形以及大坝的运行性态将不可避免地出现一些新特性，已有的设计准则和经验的常规做法无法适应特高面板堆石坝高应力水平、高水头、复杂应力路径的情况，无法满足防渗体适应性与安全性的要求。因此，研究高面板堆石坝在不同工况下的应力变形特性，准确的掌握其应力变形过程，揭示高面板堆石坝的应力变形机制，建立相应的预测模型，可以为高面板堆石坝的建设和运行提供理论基础。

国内外诸多学者围绕面板堆石坝的应力变形问题开展了一系列研究，取得一系列有价值的研究成果。由于面板堆石坝的力学特性是一个复杂的非线性问题，坝体应力变形分布及演化机制复杂，影响因素多，研究成果总体来说还是较少。同时，目前尚无特高面板堆石坝实际工程经验积累，已有的设计准则和工程方法无法用于准确评价特高面板堆石坝的力学特性。因此，研究特高面板堆石坝在施工蓄水过程中的应力变形机制，建立特高面板堆石坝应力变形智能预测系统具有重要科学意义和实际应用价值。

1. 国内外研究现状

面板堆石坝变形控制与安全评价是水工结构工程领域长期以来非常重要的研究课题。国内外学者从本构模型、坝体和防渗体静动力特性、面板开裂控制、坝体和防渗体变形预测等多方面进行了深入的理论分析、室内外试验及数值模拟研究。本项目围绕基于人工智能的高面板堆石坝应力变形预测分析开展研究，主要涉及高面板堆石坝智能预测、混凝土面板堆石坝离心模型试验等研究内容。

2.1 大坝智能预测系统研究

随着科学技术的进步，近年来我国的水利事业不断获得突破，整体向着高坝、大坝的趋势迈进，相应的对于满足高坝、大坝变形特性的运行分析预测模型的研究也成为了众多学者研究的热门课题。传统的分析预测模型主要为统计模型，以回归分析为基础，后又不断地引入主成分分析、逐步回归分析、领回归分析^[2]、最小二乘回归分析法、偏最小二乘回归分析法^[3]等方法。上世纪五十年代意大利的 Faneli 和葡萄牙的 Roeha 首次将统计回归方法应用于定量分析大坝的变形观测数据；七十年代，Faneli 又提出了大坝变形的确定性模型及混合模型，将理论计算数据和实际观测数据结合起来形成预测模型^[4]；周干武^[5]等通过构建了基于物联网技术的土石坝安全监测自动化系统。

随着计算机技术的发展，随之产生了一些不同于传统分析的新理论、新方法，例如：灰色理论、时间序列法、神经网络、模糊数学、支持向量机、相关向量机等都对在原来的基础上对大坝的运行状况有了更进一步的描述。徐波^[6]、崔伟杰^[7]等用灰色系统对大坝的因变量与自变量之间的关联程度做了量化分析，从而研究它们之间的相关程度；吴中如^[8, 9]等推导了坝体顶部时效位移的表达式，提出了裂合开度模型建立分析方法、坝顶位移时间序列分析法、连拱坝位移分析法，同时期还提出用组合流变模型研究时间效应，建立了渗流测压力的确定性模型；He^[10]等分析了群体的模糊数据，最终建立了大坝安全评价的模糊信息分析法；Karimi^[11]等利用人工神经网络模型识别混凝土重力坝，并结合混合有限元-边界元（FE-BE）分析来预测混凝土重力坝动态特性。张帆^[12]等建立了人工神经网络大坝监测预报模型，并比较了神经网络模型与统计模型之间的差异；闫滨^[13]等建立了径向基函数 BP 模型，提高了模型的收敛速度及预测的准确性；Zhou^[14]等将小波动量神经网络应用大坝变形上，提高了鲁棒性和收敛性；Wang^[15]等利用支持向量机进行大坝变形监测数据的建模和预报。

目前，由于工程规模的不断扩大、坝高不断加高，基于传统统计学的方法和机器学习的方法的局限性越来越突出，如：传统的回归模型在处理非线性的问题上无法得到有效的结果；大坝的变形时间序列数据过于分散或波动较大时，时间序列法的预测精度就很难保证；神经网络方法在处理非线性数据时具有一定的优势，能够无线的逼近非线性映射映，但是，神经网络方法极其容易陷入局部极小、网络结构难以确定等缺点，且在训练模型时容易导致过度拟合的现象；支持向量机在神经网络的基础上克服了极小值的问题，但在模型计算速度及鲁棒性上仍存在一定的问题^[16]。故现阶段的大坝变形预测分析模型主要研究方向为多种模型的嵌合，从而达到更加精准的预测效果。李端有^[17]等通过改进遗传算法和 BP 神经网络相结合，通过对神经网络初始阈值深度寻优，从而避免陷入局部最小进而对大坝变形进行预测；曹恩华^[18]等将经验模态解法^[19]与相关向量机理论结合，使得非线性、非平稳的原始时间序列数据得到更有效的利用。

支持向量机（Support Vector Machine, SVM）被认为是现阶段对小样本的分类、回归等问题的最佳理论^[20-22]，该方法采用基于统计学的小样本学习方法^[23, 24]，采用结构风险

最小化原则代替原来的经验风险最小化原则，相比与神经网络具有更加坚实的理论基础，优越的学习能力，良好的推广泛化能力。然而，训练速度慢、难以解决大规模运算问题制约着其推广发展与应用，而最小二乘支持向量机^[25]（Least Squares Support Vector Machine, LSSVM）的提出，将传统的 SVM 方法求解凸二次规划问题转化为求解一组线性方程问题，采用等式约束代替了不等式约束^[26]，从而大大提高了机器学习的训练速度。在 SVM 模型中，选择合适的核函数是决定模型预测准确性与精度的关键。众多方法提出用于确定支持向量机参数，比如网格搜索法、贝叶斯方法、混沌优化方法、粒子群算法、遗传算法等。Lee^[27]等和 Lin^[28]等提出使用粒子群算法对 SVM 进行模型参数优化和特征选择；Chen^[29]和 Zheng^[30]基于遗传算法，提出了两种基于遗传算法的 SVM 模型参数优化方法。对比粒子群算法与遗传算法，发现对于有多个局部极值点的函数，粒子群算法易陷入局部极值点中，且不能严格证明其在全局最优点上的收敛性，而遗传算法具有鲁棒性强，便于并行处理，对函数要求不高，不容易陷入局部最优的特点^[4]。其中遗传算法、利用生物遗传学的观点，结合了适者生存和随机信息交换的思想，通过自然选择、交换、变异等作用机制，实现种群的进化。在寻优过程中，遗传算法在解空间随机产生多个起始点并同时开始搜索，由适应度函数来指导搜索方向，是一种能够在复杂搜索空间快速寻求全局优化解的搜索技术，是目前当前广泛采用的一种参数优化方法。遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是由美国 Michigan 大学 J. Holland 教授于 1975 年提出来的一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法，借用了生物遗传学的观点，通过自然选择、遗传、变异等作用机制，实现各个个体的适应性的提高^[31, 32]，通过 GA 算法的快速全局优化能力，极大程度上简化了核函数的选择过程，在提高 SVM 模型预测精度的基础上，避免了繁琐的试算过程，加快了模型的训练进程，增强了模型的鲁棒性^[33, 34]。在高面板堆石坝不断发展的趋势中，应力变形数据的非线性、离散性等特点将更加突出，结合遗传算法与最小二乘支持向量机算法的预测模型将具有更加快速、准确的分析预测能力，对于特高面板堆石坝的应力变形过程有更加精确的描述，并对其未来的发展变化趋势能做出精确的判断，基于遗传算法和最小二乘支持向量机算法揭示特高面板堆石坝应力变形机制，预测应力变形特性具有重要的科学意义与良好的发展前景。

2.2 高面板堆石坝及特高面板堆石坝离心模型试验研究

目前，在特高面板堆石坝力学特性的研究中，由于岩土材料工程特性和结构形式的复杂性，再加之数值分析方法本身所固有的某些缺陷（例如：材料本构模型与实际的差异、计算条件的简化等），单纯依靠数值分析方法尚不足以对工程设计方案进行充分的论证，因此需要采用模型试验的方法（即物理模型的方法）对结构的应力、变形特征进行深入的研究。在水利工程中，坝工结构物原型的尺寸巨大，试验中只能采取利用小比尺的模型去分析、揭示原型的物理现象^[35]。由于岩土工程中土体的重力是影响其性状的最重要因素，常规的小比尺物理模型不能真实地再现原型的物理特性^[36]。解决这一问题的途径是增加模型的重力，使模型与原型达到一种相似的等效，从而在试验室内再现原型的

应力、变形特征^[37]。而离心模型试验正是实现这一目的最为有效的方法^[38]。与常规的结构模型试验不同，土工离心模型试验的一个重要特点是可以采用原型材料进行试验，无需使用替代材料，因此，它能够较为真实地反映土石材料的应力变形特性。

离心模型试验在心墙堆石坝的研究中已经得到广泛运用。经过多年的发展，离心模型试验逐步运用在面板堆石坝应力变形特性上。如果试验条件控制合理准确，离心模型试验可以模拟获得较为真实的结果，模拟不同条件下面板堆石坝的力学特性，为揭示大坝特性提供重要参考。国内外许多专家和学者在面板堆石坝的离心模型试验方面开展了大量研究，取得了丰硕的成果。徐泽平^[39]等采用离心模型试验手段，对深厚覆盖层上面板堆石坝进行了试验研究，并将离心模型试验的结果与数值计算结果进行比较，两种方法互为验证。Seo^[40]等基于离心模型试验技术，系统研究了面板刚度和垫层刚度对面板应力的影响。同时，将试验结果与数值计算结果及面板堆石坝一般统计结果进行了比较，表明离心模型试验可以获得合理的坝顶沉降值，但是显然高估了面板挠度。易进栋^[41]等就复杂地形条件下面板坝离心模型试验作了研究，研究在施工期、蓄水期和水位骤降期三维挡墙的墙背土压力分布、挡墙位移和倾斜及其稳定性，为复杂地形条件下的面板坝设计提供了依据，并经受了多年安全运行的考验。李从安^[42]等采用离心模型试验技术对面板堆石坝进行研究，对比有限元分析结果，得出试验结果符合面板堆石坝的一般性规律，为面板堆石坝新型结构的理论研究提供设计依据。可见，由离心模型试验来探究面板坝应力、位移工作状态已经发展为当今趋势，但上述试验研究也存在局限性，比如，难以对实验模型进行综合碾压、面板下部约束无法合理施加、面板与垫层之间的接触效应无法合理模拟以及堆石颗粒的缩尺效应^[43]。目前离心模型试验多用于某些特殊条件下面板堆石坝应力变形的研究，比如深覆盖层上的大坝、镶嵌坝、复杂地形条件大坝，少有学者采用离心模型试验对高面板堆石坝特别是特高面板堆石坝的应力变形机制开展试验。

土工离心模拟技术是将原型缩小 N 倍，将缩尺后的物理模型置于离心机中，通过离心机加速运转给模型施加一个离心力，由于离心力与重力等效，模型在 N 倍重力加速度下所承受的应力场与原型应力场相等，从而模拟原型的应力应变^[44]。在采用离心模型试验研究面板堆石坝的应力变形时，监测传感器的布置尤为关键^[45]。布里渊光时域反射计（Brillouin OpticalTime-Domain Reflectometer，简称 BOTDR）的测量技术是国际上近年来才研发出来的一项用于光通讯和各类构筑物应变监测的尖端技术。试验过程中通过模型内部预埋标记点、粘贴应变片以及在坝顶架设激光，构建基于 BOTDR 分布式光纤监测系统，分布式监测大坝施工过程内部和面板变形过程^[46]。应用 BOTDR 分析仪，不断增加加入射光的频率，就能获得光纤最大的布里渊光强度值，通过对光纤在发生应变前后处的布里渊散射光最大强度值所对应的频率漂移量，就能换算出光纤的应变值。与传统的监测技术相比，该技术具有分布式、长距离、耐腐蚀、抗干扰等诸多优点，因此一些发达国家如日本、加拿大等都在竞相开展这一技术的理论和应用研究^[47-49]，目前国外已有成

功的应用实例，但国内将 BOTDR 技术用于土木工程、水利工程以及一些大型的基础设施的变形监测和健康诊断方面的研究才刚刚起步^[50-52]。

参考文献

- [1] Ma H Q, Chi F D. Technical Progress on Researches for the Safety of High Concrete-Faced Rockfill Dams[J]. Engineering, 2016, 2(3): 332-339.
- [2] 李广春, 戴吾蛟, 杨国祥, 等. 时空自回归模型在大坝变形分析中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 877-893.
- [3] Hu W L, Deng N W, Liu Q S. Optimization study of stepwise regression and partial leastsquares regression models for dam security monitoring[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, (7): 578-579.
- [4] 何宁, 王国利, 何斌, 等. 高面板堆石坝内部水平位移新型监测技术研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(z2): 24-29.
- [5] 周干武, 郎能惠, 何宁. 基于物联网技术的土石坝安全监测自动化系统研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2330-2334.
- [6] 徐波, 包腾飞. 大坝安全监控中定性指标的定量综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 59-63.
- [7] 崔伟杰, 包腾飞, 张学峰, 等. 改进的灰色线性回归组合模型在大坝变形监测中的应用[J]. 水电能源科学, 2013(6): 103-105.
- [8] 吴中如, 徐波, 顾冲时, 等. 大坝服役状态的综合评判方法[J]. 中国科学:技术科学, 2012, 42(11): 1243-1254.
- [9] 吴中如, 顾冲时, 苏怀智, 等. 水工结构工程分析计算方法回眸与发展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2015, 43(5): 395-405.
- [10] He J P, Shi Y Q. Dam safety fusion evaluation based on fuzzy pattern recognition[C]. International Conference on Computer Science and Service System, 2011: 1177-1180.
- [11] Karimi I, Khaji N, Ahmadi M T. System identification of concrete gravity dams using artificial neural networks based on a hybrid finite element-boundary element approach[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3583-3591.
- [12] 张帆, 胡伍生. 神经网络融合模型在大坝变形分析中的应用[J]. 东南大学学报(英文版), 2013, 29(4): 441-444.
- [13] 闫滨, 高真伟, 李东艳. RBF 神经网络在大坝安全综合评价中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(S2): 3991-3991.
- [14] Zhou C, Tang S, Tang C. Based on the wavelet neural network analysis and forecast of deformation monitoring data[C]. International Conference on Intelligent Earth Observing and Applications 2015.
- [15] Wang Z G, Gao Y Y, Hu G Q. Application of BFGS-BP in tunnel deformation monitoring

data processing[J]. Dam Observation and Geotechnical Tests, 2005, 37(3): 900-903.

[16]李波, 顾冲时, 李智录, 等. 基于偏最小二乘回归和最小二乘支持向量机的大坝渗流监控模型[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1390-1394.

[17]李端有, 甘孝清, 周武. 基于均匀设计及遗传神经网络的大坝力学参数反分析方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 125-130.

[18]曹恩华, 包腾飞, 刘永涛. 基于 EMD-RVM-Arima 的大坝变形预测模型及其应用[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 59-64.

[19]Huang N E, Shen Z, Long S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1998, 454(1971): 903-995.

[20]Su H Z, Li X, Yang B B. Wavelet support vector machine-based prediction model of dam deformation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 110(5): 412-427.

[21]Vapnik V N, Golowich S, Smola A. Support Vector Method for function approximation, regression estimation and signal processing[J]. Cambridge, MA, MIT Press. 1997: 281-287.

[22]钱秋培, 崔伟杰, 包腾飞. 基于 SVM 的混凝土坝变形监控模型预测能力实例分析[J]. 长江科学院学报, 2018, 35(8): 46-50.

[23]Vapnik V. The nature of statistical learning theory[M]. New York:Springer, 1995.

[24]Steve R G. Support vector machines for classification and regression[R]. England: Southampton University, 1998.

[25]Suykens JAK, Vandewalle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers[J]. Neural Processing Letter, 1999, 9(3): 293-300.

[26]任超, 梁月吉, 庞光峰, 等. 基于灰色最小二乘支持向量机的大坝变形预测[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(4): 608-612.

[27]Lee T F, Cho M Y, Shieh C S. Particle swarm optimization based SVM application: power transformers incipient fault syndrome diagnosis[C]. International Conference on Hybrid Information Technology, 2006: 468-472.

[28]Lin S W, Ying K C, Chen S C. Particle swarm optimization for parameter determination and feature selection of support vector machines[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 35: 1817-1824.

[29]Yan X F, Chen D Z, Hu S X. Chaos-genetic algorithms for optimizing the operating conditions based on RBF-PLS model[J]. Computers and Chemical Engineering, 2003, 27(12): 1393-1404.

[30]Zheng C, Jiao L. Automatic parameters selection for SVM based on GA [C]. Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE Press, 2004: 1869-1872.

[31]Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems[M]. MIT Press, 1992.

[32]Chou J H. Genetic algorithm in structural damage detection[J]. Computers and structures, 2001,

79(14): 353-353.

- [33] Xing Z, Shuqi M A, Qiang X U. A WD-GA-LSSVM model for rainfall-triggered landslide displacement prediction[J]. Journal of Mountain Science, 2018, 15(1): 156-166.
- [34] Wen T, Tang H, Wang Y. Landslide displacement prediction using the GA-LSSVM model and time series analysis: a case study of Three Gorges Reservoir, China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2017, 17(12): 1-20.
- [35] Sherard J L, Cooke J B. Concrete-face rockfill dam: I. assessment [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(10): 1096-1112.
- [36] Cooke J B, Sherard J L. Concrete-face rockfill dam: II. design [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 113(10): 1113-1132.
- [37] Guo X , Baroth J , Dias D. An analytical model for the monitoring of pore water pressure inside embankment dams[J]. Engineering Structures, 2018, 160: 356-365.
- [38] Kobayashi M, Miura K, Konami T. Centrifugal model loading tests on reinforced soil retaining wall with groundwater permeation[M]. Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, 2017.
- [39] 徐泽平, 侯瑜京, 梁建辉. 深覆盖层上混凝土面板堆石坝的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1323-1328.
- [40] Seo M W, Ha I S, Kim Y S, et al. Behavior of concrete-faced rockfill dams during initial impoundment[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(8): 1070-1081.
- [41] 易进栋, 徐光明, 孙振远. 复杂地形条件下面板坝离心模型试验研究[J]. 水利学报, 2014(s2): 180-185.
- [42] 李从安, 文松霖, 李波, 等. 面板堆石坝新型结构离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(S1): 214-218.
- [43] Lee C W, Kim Y S, Yoon Y S. Stability study of a tide embankment subjected to sea level variations using centrifugal model tests[J]. Marine Georesources and Geotechnology, 2015, 33(5): 376-390
- [44] Tang Y Q, Ren X, Chen B. Study on land subsidence under different plot ratios through centrifuge model test in soft-soil territory[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 66(7): 1809-1816.
- [45] Elgamal A, Yang Z H, Lai T. Dynamic response of saturated dense sand in laminated centrifuge container[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2005, 131(5): 598-609.
- [46] Li Q, Gan J, Wu Y. High spatial resolution BOTDR based on differential Brillouin spectrum Ttechnique[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(14): 1493-1496.

- [47] Wang F, Zhan W, Zhang X. Improvement of spatial resolution for BOTDR by Iterative subdivision method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3663-3667.
- [48] Lollino P, Cotecchia F, Zdravkovic L. Numerical analysis and monitoring of Pappadai dam[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, 42(6): 1631-1943.
- [49] Farahani M A, Castillo-Guerra E, Colpitts B G. Accurate estimation of Brillouin frequency shift in Brillouin optical time domain analysis sensors using cross correlation[J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4275-4277.
- [50] 冯振, 殷跃平. 我国土工离心模型试验技术发展综述[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 323-331.
- [51] Ng C W W, Li X S, Laak P A V. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquakes[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(4): 305-318.
- [52] 崔何亮, 张丹, 施斌. 布里渊分布式传感的空间分辨率及标定方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(7): 1232-1237.

2、主要研究内容：

- (1) 基于图像识别技术的高面板堆石坝监测数据粗差点识别方法研究。
- (2) 基于最小二乘支持向量机算法的高面板堆石坝应力变形预测模型研究。
- (3) 基于 BOTDR 分布式光纤监测系统的高面板堆石坝离心模型试验研究。
- (4) 构建特高面板堆石坝应力变形特性人工智能预测系统。

3、研究特色和创新点：

研究特色

收集已建高面板堆石坝施工期及运行期的监测数据，基于遗传算法和最小二乘支持向量机算法挖掘大坝应力变形与其关键影响因素之间的非线性关系，建立高面板堆石坝应力变形预测的最小二乘支持向量机模型；开展高面板堆石坝离心模型试验，揭示高面板堆石坝应力分布及演化规律；构建特高面板堆石坝应力变形预测系统，为特高面板堆石坝的建设提供理论依据和技术支撑。

创新点：

- (1) 创建基于图像识别技术的大坝监测数据粗差点识别方法。
- (2) 建立高面板堆石坝应力变形最小二乘支持向量机预测模型。
- (3) 研发适用于面板堆石坝离心模型试验的 BOTDR 分布式光纤监测系统。
- (4) 揭示特高面板堆石坝的应力变形分布演化机制。

二、研究方法和技术路线

1、拟采取的研究方法和技术路线：

(1) 基于图像识别技术的高面板堆石坝监测数据粗差点识别方法研究

通过实地调研，资料查询等手段，收集已建高面板堆石坝施工期及运行期的监测数据，建立高面板坝工程监测数据库。模拟人工识别粗差点的过程，创建一种基于高斯模糊和图像二值化处理技术的自动化粗差点识别方法，从而提高对监测数据粗差点的识别的精度，并实现对监测数据粗差点的自动化智能识别。初步分析高混凝土面板堆石坝的应力变形过程分布规律，掌握影响高面板堆石坝应力变形的关键因素。

(2) 基于最小二乘支持向量机算法的高面板堆石坝应力变形预测模型研究

基于预处理的监测数据序列，采用最小二乘回归法，分离获得高面板堆石坝应力变形数据系列的关键影响因子和结果变量因子。采用最小二乘支持向量机算法构建各应力变形分量与对应影响因素之间复杂的非线性关系，并基于遗传算法，确定最小二乘支持向量机算法正则化参数和核函数参数，进而构建基于遗传算法和最小二乘支持向量机算法的高面板堆石坝应力变形预测模型。

(3) 基于 BOTDR 分布式光纤监测系统的高面板堆石坝离心模型试验研究

基于等量替代法和弯曲相似原则建立高面板堆石坝离心试验模型，通过设定不同离心加速度以模拟不同坝高的试验模型。并通过引入布里渊光时域反射计(Birllouin Optic Time-Domain Reflectometer, BOTDR)分布式光纤监测技术，研发一套适用于面板堆石坝离心模型试验坝内应力变形监测的监测系统，进而监测高面板堆石坝坝体内部和表面应力变形特性，揭示高面板堆石坝应力变形机制，并探究不同坝高面板堆石坝应力变形发展规律，进而为特高面板堆石坝应力变形预测模型的构建提供理论基础。

(4) 构建特高面板堆石坝应力变形特性人工智能预测系统

基于高面板堆石坝离心模型试验研究成果，进一步改进高面板堆石坝应力变形预测最小二乘支持向量机模型，构建特高面板堆石坝应力变形特性人工智能预测系统，预测分析特高面板堆石坝的应力变形特性，揭示特高面板堆石坝的应力变形分布演化机制，并结合数值仿真计算验证预测系统的精度。

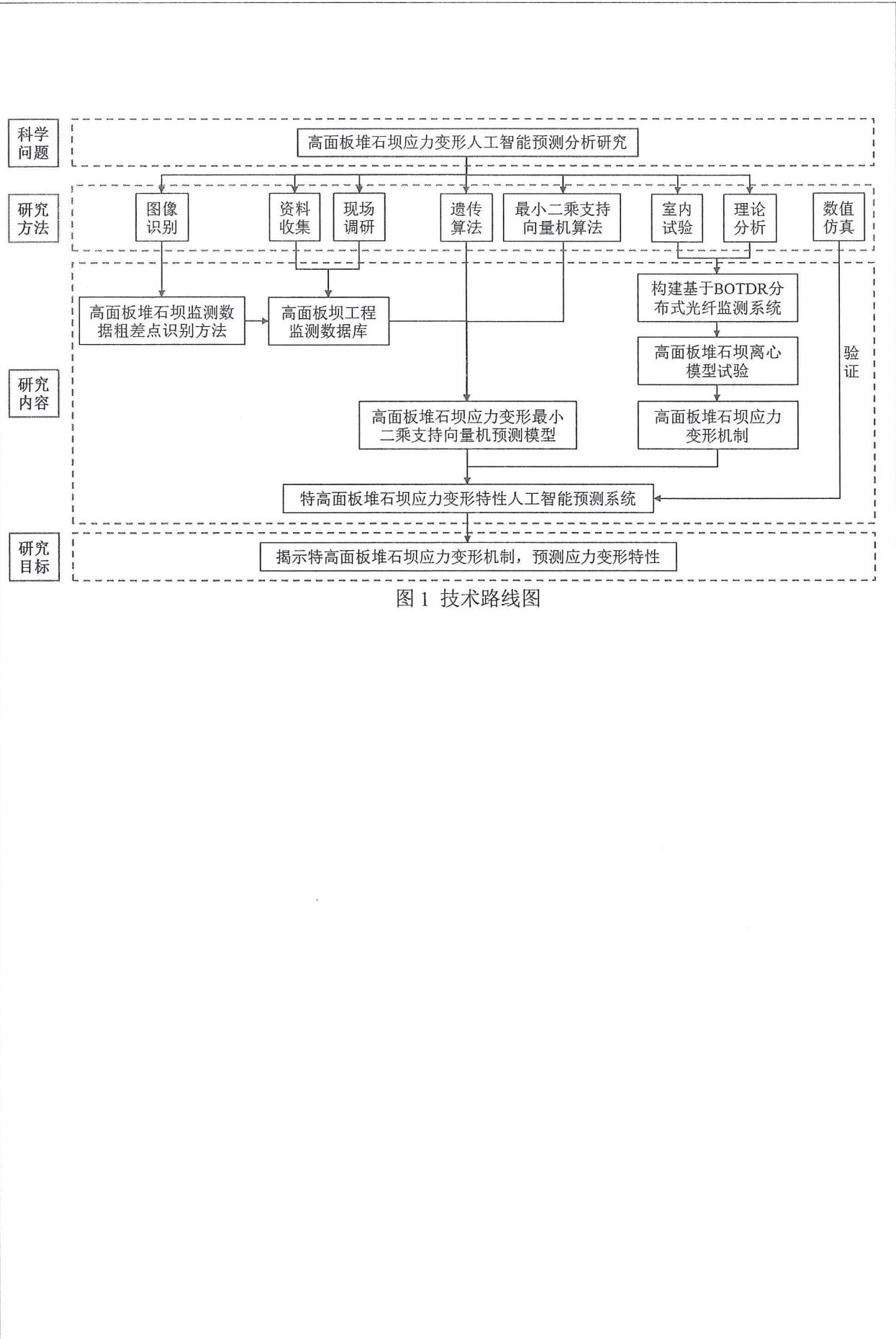


图 1 技术路线图

2、研究工作进度安排：

2019.09-2020.09（已完成）

收集和整理资料；完善与细化研究方案。

2020.10-2020.12

基于高斯模糊和图像二值化处理技术创建一种自动化粗差点识别方法，实现对监测数据粗差点的自动化智能识别，建立高面板堆石坝监测数据库。

2021.01-2021.06

建立基于 BOTDR 分布式光纤监测系统。开展高面板堆石坝离心模型试验研究，揭示高面板堆石坝应力变形分布演化机制。

2021.07-2021.10

基于监测数据序列，采用最小二乘支持向量机算法深入挖掘大坝应力变形与其关键影响因素之间的非线性关系。

2021.11-2022.01

基于遗传算法，确定最小二乘支持向量机算法正则化参数和核函数参数，进而建立高面板堆石坝应力变形预测的最小二乘支持向量机模型。

2022.02-2022.08

改进高面板堆石坝应力变形预测最小二乘支持向量机模型，构建特高面板堆石坝应力变形特性人工智能预测系统，预测分析特高面板堆石坝的应力变形特性。

2022.09-2023.06

整理数据，发表相关研究成果，完成课题总结与归档工作，完成博士毕业论文。

三、预期成果及应用前景

1、预期成果形式与数量：

- (1) 在国内外重要学术刊物或国际会议上发表学术论文 3-4 篇，其中 SCI 检索论文不少于 2 篇。
- (2) 授权发明专利 1 项
- (3) 撰写博士学位论文 1 篇

2、应用前景

我国西部金沙江、澜沧江、怒江及黄河上游等流域规划的梯级电站中，很多工程选用的是混凝土面板堆石坝，这些坝的高度基本在 200~300m 级，超过世界上已建最高的水布垭面板堆石坝（233m）。这些特高面板堆石坝（300m 级，超过 250m）坝址区地形条件复杂、地震活动频繁且烈度较高，一旦破坏，不仅会造成重大的经济损失，对下游所形成的次生灾害还将造成难以估量的人民生命损失。因此，保证面板堆石坝，尤其是特高面板堆石坝的安全是国家经济和公共安全保障的重大科技需求。

混凝土面板堆石坝是采用上游面混凝土面板作为防渗结构，以堆石体作为主要支撑结构的一种堆石坝。马洪琪院士指出，坝体变形控制是高混凝土面板堆石坝的关键技术问题。混凝土面板堆石坝防渗体的性态主要取决于堆石体变形，堆石体变形过大可能会造成大坝面板开裂，引起大坝渗漏，严重时将导致大坝溃决。目前，我国面板堆石坝建设正面临向 300m 级高度跨越发展的挑战，其关键问题就是高面板坝的应力变形预测分析与控制。随着坝高的增加和水头的增大，坝体的应力变形以及大坝的运行性态将不可避免地出现一些新特性，已有的设计准则和经验的常规做法无法适应特高面板堆石坝高应力水平、高水头、复杂应力路径的情况，无法满足防渗体适应性与安全性的要求。因此，研究高面板堆石坝在不同工况下的应力变形特性，准确的掌握其应力变形过程，揭示高面板堆石坝的应力变形机制，建立相应的预测模型，并为特高面板堆石坝的建设和运行提供理论基础。

四、经费预算

1、项目经费预算			
序号	支出科目	金额 (元)	预算依据及理由
1	试验材料费	3000	试验材料与耗材
2	样品加工及测试费	7000	测试费
3	差旅费	4000	调研、考察 2000*2 次
4	会议费	4000	国内会议 2 次
5	资料及出版费	3800	文章版面费、资料费
6	专家咨询费	4000	专家讨论会 2000*2 次
7	劳务费	4200	研究生劳务 600*7 个月
合计		30000 元	

五、指导教师意见：
(对项目可行性及拟取得成果提出明确意见)

本次项目研究思路清晰，逻辑清楚，核心模块试验和参数预测模型建立方面均已给出详细的解决方案。总体而言，本项目研究方案合理可行。
本人同意推荐申报优博创新基金。

指导教师签字： 李东隆

2020 年 10 月 9 日

六、同行专家推荐意见:

(另附)

七、学院学位委员会评审意见:

同 意 推 荐

主席签字:



2020年10月13日

八、研究生院意见:

签章:

年 月 日