

基于振动理论的水工结构无损检测技术研究综述

王山山, 任青文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 无损检测技术是检测水工结构隐患及损伤的方法之一。鉴于水工结构的特点和复杂性, 重点介绍了基于振动理论的适用于水工结构现场无损检测的振动法。根据振动法利用系统模态参数的变化和结构的振动响应而对水工结构进行无损检测这一基本原理, 综述了国内外基于振动理论的水工结构无损检测技术的研究现状。结果表明, 目前对于大型复杂水工结构无损检测的研究大多是针对不同的问题而采取的具体方法。在现场检测时, 保证检测结果正确的首要条件是合理有效的激励。对于结构损伤或破损检测, 扩阶和缩聚都十分重要。最后指出, 为提高振动法的实用性及精度, 必须找出损伤结构动力特性的变化规律, 重视和发展隐患及损伤的早期探测技术和信息处理技术, 以及基于神经网络和模糊数学的无损检测技术, 为处理病险水利水电设施提供科学依据。

关键词 振动理论; 水工结构; 无损检测; 振动法; 模态参数

中图分类号 :TV698.15 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2004)05-0550-07

水工结构作为水利水电工程的重要组成部分, 为国民经济和社会发展做出了重大贡献。但是由于地质条件复杂, 勘测和设计不周, 施工缺陷及管理维护不善, 以及长期使用后老化等原因, 不少水工结构存在各种病害与隐患。我国已建成水库 8.7 万座, 堤防 26 万 km, 海塘 7900 km, 全国装机容量已达 7395 万 kW。在这些水利水电设施中病害数量非常巨大, 如大部分堤防存在不同程度的隐患, 病险水库在大中型水库中约占 20%, 在小型水库中约占 40%^[1, 2]。这些结构中存在的病害和隐患, 可能导致结构失稳或强度破坏, 严重影响工程的正常运行和效益的发挥。为此, 必须寻找有效的检测手段, 以快速、准确地发现水工结构中存在的隐患及病害, 有效预报其安全状况, 对其运行的可靠性进行评估, 为水工结构的安全评价提供可靠的方法, 并为处理病险工程提供科学依据。

现有的水工结构隐患及病害(损伤)检测方法主要有人工探视法、破损法及无损检测法。人工探视既费力又难以发现隐患, 破损法如钻探等, 既具有局部性又具有破坏性, 而鉴于水工结构的重要性和特殊性, 对其进行检测时往往要求不破坏结构, 因此破损法很难用于水工结构正常运营时期或汛期的隐患和险情探测。可见这两种检测方法都不能满足快捷、精细、准确和无损伤等诸项要求。而无损检测方法具有速度快及不破坏结构等特点, 特别是现代水工结构正向大型化、复杂化的方向发展, 虽然在其建造过程中会埋设各类传感器用于原型观测, 当传感器正常工作时, 所采集的信息能够真实反映结构的工作状态, 然而由于传感器布置和使用寿命的限制, 在隐患、病害部位可能没有安装传感器或传感器失效, 或局部隐患病害尚未引起监测系统的反应等, 从而使原位观测的信息不够完整, 这时就有必要使用无损检测方法对其进行隐患和病害的检测。

目前, 材料的无损检测技术已经比较成熟, 检测方法有射线法、超声波法、磁粉法、渗透法、涡流法等^[3]。但结构无损检测技术的研究成果大多局限在实验室环境下小尺度结构的层面上, 对于真实结构的隐患和损伤问题尚难应用^[4]。特别是由于水工结构工程的复杂性和特殊性, 现有的无损检测方法无法全面、准确地检测其隐患及损伤。

目前用于水工结构的无损检测方法有振动法、传导类电法(如常规电法、高密度电法等)、波动法(如反射波法、折射波法、瑞利波法、瞬变电磁法、地质雷达法等)及示踪法等, 每一种方法各有其适用范围及优缺点, 其中基于振动理论的振动法特别适用于水工结构的现场无损检测。因为水工结构在运行过程中都会受到动

载的作用,动载直接影响水工结构的工作性能、精度、效率、寿命、安全性和可靠性,并对环境产生干扰和危害。结构的破坏大多是在动载的长期作用下发生的,这些动载可以作为振动法检测的激振源,并且检测的过程不影响结构的正常使用。

1 基本原理

基于振动理论的水工结构无损检测方法,就是通过某种激励,使水工结构产生一定的振动响应,继而通过测振仪器直接量测出激励力与系统振动的响应特性,如位移、速度、加速度等函数的时间历程,然后通过数字信号分析得到系统的模态参数,再根据水工结构模态参数的变化判断有无隐患和损伤。即由于水工结构中特定部分的质量和刚度损失而引起的模态参数变化,都将在模态测量中有所反映。当系统的模态测量值与未存在隐患的系统模态值之间出现了差异时,就表示出现了损伤或破损,进而可以确定损伤的位置及程度。另一方面,在相同激励条件下,有无损伤的同一结构的振动响应也是不同的,因此具体检测可从以下几个方面进行。(a)将被测结构的实测值与完好结构的模态参数和物理参数的理论解或设计值进行比较,判断被测结构是否有损伤以及其位置和大小。(b)根据被测结构与完好的相同结构模态参数和物理参数实测值的比较来判断。(c)根据被测结构健康阶段与目前状态的模态参数和物理参数实测值的比较来判断。(d)根据激励和响应的关系以及其他综合分析方法来判断。

2 研究现状

用振动法进行结构的无损检测可追溯到 19 世纪后期^[5],但因其涉及结构的动力特性、先进的测试技术和数据处理技术,所以振动法真正应用于工程实际中,还是在现代电子计算机和快速傅立叶变换出现之后。因为振动法是利用损伤发生前后结构动力特性的变化来检测损伤的存在、位置和程度,所以精确、有效地确定结构的动力特性就成为研究的主要方面。Douglas 等^[6]对一个 5 跨、122 m 长的桥梁进行了动力特性测试,并以此为基础对整个系统的识别进行了研究。Harry 等^[7]给出了悬索桥的固有频率及其相应振型变化与桥梁本身结构变化之间的关系。Masafumi 等^[8]对一有损伤的混凝土桥进行了现场实测研究,采用脉动的方法分别对铅直和水平方向的振动进行了测试,得到了桥梁结构有损伤时的动力特性,并与数值模拟结果进行了对比。Avinash 等^[9]研究了刚架结构的模态识别问题。Chin 等^[10]在时间域对结构参数识别进行了系统的研究。Salane 等^[11]以桥梁为例研究了结构的模态识别。George 等^[12]对结构损伤及破损检测的模态分析进行了较系统的研究。Hong 等^[13]在频率域对结构的参数识别进行了进一步的研究。Juan 等^[14]研究了直接应用动力特性测试数据进行结构损伤和破损识别。Wong 等^[15]研究了结构中柔性结合部的参数和系统识别问题。从 20 世纪 90 年代中期开始,一些研究者具体深入研究了不同类型的结构的动力特性。Tan 等^[16]应用线性模型,对有限个自由度结构的动力特性进行了识别研究。Sashi 等^[17]研究了特殊混凝土结构的参数识别。Yam 等^[18]应用脉动的方法来确定高耸结构的动力特性。Chati 等^[19]以悬臂梁为例,进行了具有裂纹梁的模态分析。Ching 等^[20,21]利用一种新的模拟算法对线性结构的参数识别进行了研究,并进一步应用脉动方法进行结构的参数识别。Martin 等^[22]研究了海洋平台的非线性动力特性。Zhao Jun 等^[23]研究了在结构损伤或破损检测中各振动参数的灵敏度。Yan^[24]等研究了采用实验模态分析的方法确定三维振型的方法。Zhang 等^[25]研究了具有多处裂纹梁固有频率的计算方法。Gregory 等^[26]研究了通过强迫振动响应计算确定结构频率及振型的方法。

以上为采用振动法进行结构的无损检测时确定结构动力特性的方法,具有普遍适用性。但在具体结构损伤无损检测时,大多都是根据具体问题,由具体的模态参数来推断结构的完整性,其中应用最多的是结构的频率^[27,28]。因为结构在发生损伤时,一般情况下可认为结构的刚度降低,而质量不发生变化。另一方面,在实际结构中,可以方便、快速、经济地测到频率且与测试的位置无关,其测量误差较振型和阻尼的测量误差小,基于结构的固有频率可敏感地表征结构的整体性。所以在结构损伤检测的早期,一般使用频率作为损伤判据。从频率的变化可直接确定结构是否存在损伤以及损伤的大小。结构发生损伤后任意二阶频率改变量之比仅是损伤位置的函数,与损伤的程度和大小无关,据此可检测结构损伤的位置。但仅靠频率的测试还不足以对损伤探测提供足够的信息,如不同形式的结构损伤或破损可能产生相似的频率变化特征。在对称结构中,两个对称位置上结构损伤或破损将产生同一频率的变化。对于结构的轻微刚度损伤,根据频率的变化确定结构损伤的位置,需要先假定一组与实际情况相应的损伤情况,而结构的损伤各种各样,这在实际应用中非常困难。

模态振型的测试较频率测试困难,测试的精度也较低,但振型中包含着更多的损伤信息,并且可以直接反映损伤的位置,所以采用结构损伤前后振型的变化来检测结构的损伤得到了广泛的应用^[29~31]。如果结构出现损伤,则损伤处的刚度会降低,而曲率会增大,结构振型曲率随着结构曲率的增大而增大,因此可以根据振型曲率的变化确定结构损伤的位置。因为振型曲率的变化对局部损伤表现敏感,依此作为损伤定位的判据,比使用位移模态对结构损伤的定位更准确^[32,33]。但该方法需要非常临近的测点,以利用中心差分法求取曲率模态,这就要求有足够多的测点,或者要求精度非常高的插值扩阶模态,否则将增大曲率模态振型的误差。

通过传递函数的变化也可对结构的损伤进行无损检测^[34,35]。该方法所需测试的传感器比常规测试要少得多,适合于结构在线的无损检测,并且在一些具体测试时可不测试结构的振型,测试较为简单,但传感器的安装位置对测试精度有较大的影响。

在应用能量法进行结构损伤检测时,由于表达能量所用的参数不同,有许多不同的方法,其中引用最多的是模态应变能法^[36,37]。该方法即使使用有噪声影响的不完整测试数据时,仍能得到较好的损伤诊断结果,并且方法简便,便于实际应用。不足之处是对复杂结构的应用较为困难。

除上述的一些方法外,还可利用刚度^[38,39]和柔度^[40,41]的方法对结构进行无损检测。为提高检测精度和可靠性,有时还会将各种方法联合使用^[42]。

除了以上一些基本的检测方法,一些研究者还提出了一些可以提高检测精度的方法。如利用结构的动力响应来对结构的损伤进行评估^[43]、利用残余力法^[44]、概率及统计法^[45]、模态范数法^[46]进行检测,采用最佳可能模态矢量^[47]来研究结构损伤或对破损进行检测等。

在使用有限元模型作为判定结构损伤或破损的依据时,还需进行模态的扩阶和缩聚。对于结构损伤或破损检测,扩阶和缩聚都是十分重要的,它们的精度直接关系到结构损伤或破损检测的成败^[48]。因为若要将有限元分析模型的计算结果与试验结果进行比较,则试验测点应与分析模型的自由度一一对应,而现场测试时往往不可能使试验测点与分析模型的自由度一一对应,故由有限元模型求得特征向量不能直接与试验测得的特征向量相比较。解决这一问题有两种方法,第一种方法为模态扩充,即用有限元模型的质量矩阵和刚度阵将每个实测模态的较少的实测点的值扩充到较多的有限元的自由度。但这种方法的缺点是有限元模型中的任何误差将引入扩充后的模态中,并影响参数识别的结果。第二种方法为模态缩聚,即用变换的方法将有限元的质量阵和刚度阵缩聚到试验的自由度数。缩聚后得到的质量阵和刚度阵可以直接和试验测得的振型相比较。这种方法的优点为:在处理过程中,试验和分析是分开进行的,这就可以消除分析结果对试验结果的影响;可以根据传感器的位置分布对那些重要的自由度进行动力识别;由于试验测点比分析模型的自由度要少得多,可以大规模地减少计算量。目前,虽然扩阶和缩聚可以解决现场测试的一些实际问题,但还没有一个公认的、用于工程实际的成熟方法。

在现场无损检测时,由于受到环境条件的影响、所使用仪器设备的限制等,测试得到的信号往往是带有噪声和不完整的,这为在线结构的损伤检测带来困难,使检测的精度明显降低。针对这些问题,不少研究者研究出各种应用不全面且带有噪声的模态测试数据进行结构损伤检测的方法^[49~51],提高了结构现场无损检测的精度。

在水工结构方面,对其动力特性没有系统的研究,用无损技术对水工结构损伤的检测研究也不多。Jimmy等^[52]用一个与实际结构1:24的双曲拱坝模型研究了拱坝的动力特性。Mau^[53]通过振动测试数据研究了拱坝的系统识别问题。Mostafiz等^[54]研究了闸门的动力特性。Darbre等^[55]采用脉动的方法对瑞士250 m高的Mauvoisin拱坝进行了现场测试,得到了拱坝实际的固有频率,并通过测试给出了拱坝固有频率随库水变化的规律。Proulx等^[56]用现场测试的方法系统地研究了180 m高Emosson拱坝在不同库水位的动力特性。

从以上研究的情况可知:

a. 用振动法进行结构损伤或破损的检测,在航空航天结构、机械工程结构、离岸工程(海洋工程)结构、桥梁结构方面应用较多,研究文献和成果也很多,而在水工结构方面的应用比较少。

b. 振动法利用系统动态特性参数和结构的振动响应来检测结构的质量。在具体的结构无损检测中,由于受到测试条件和环境的影响和限制,往往不能对结构的动力特性参数进行全面的测试,而是测试一些关键的参数,如结构的频率和振型等,即测试单个参数或几个参数的变化来判断结构有无损伤,这样的判断是不全面、不准确的。另一方面,现有文献所提供的实例大多是在自由度较少的结构上进行的,自由度越多,检测

就越困难.总之,用振动法对水工结构进行无损检测基本的研究思想一致,但目前的研究大多是针对不同的问题而采取的具体方法,没有一个统一的方法.

c. 在现场检测时,合理有效的激励是保证检测结果正确的首要条件.如将激励力置于振动系统的某阶振型节线上,则该阶振型不可能被激发.同样,如将激励力置于系统的某些特定位置上,则可能激发某些特定的振型.对于激励问题,虽然一些学者对激励的敏感性进行了研究^[57],但在进行水工结构无损检测时,仍需根据水工结构的具体情况,按照参数识别的模式要求,并考虑损伤或破损检测时模式的变化进行激励布置.与外部激励的布置相类似,在设计现场测试时,传感器的布置对于参数识别和损伤检测具有特别重要的意义^[58].因为在实验室进行模型试验时,可以迅速而方便地更换损坏的传感器和重新布置传感器的位置,而在现场检测时更换和重新布置传感器就非常费时费力.这就要求在水工结构现场检测时,为了解决由于传感器不正常以及位置不当引起的数据不足的问题,在系统中布置多余的传感器.

d. 对于结构损伤或破损检测,扩阶和缩聚都是十分重要的,它们的精度直接关系到结构损伤或破损检测的成败.对此仍需从理论上做进一步的研究.

e. 振动法用于结构整体损伤或破损的检测易于实现且有较高的精度,但对于结构的初试损伤或破损、轻微损伤或破损以及局部损伤或破损的检测就很困难.这时就需采用一些新的方法或结合波动法进行检测.

f. 检测噪声、模型误差、环境条件的不确定性、数据的不完整、识别方法的不完善等使得基于结构响应的损伤检测在具体的应用上还存在不少问题.为了有效地进行结构损伤或破损的检测,有必要深入了解损伤或破损对结构动力特性的影响,动力特性对支撑条件的敏感性,环境因素及测试仪器对现场检测的影响等.

3 发展趋势及需要进一步研究的问题

由于水工结构损伤的复杂性和各种环境因素的影响,使得振动法在水工结构质量检测的实际应用还存在许多困难.为提高其实用性及精度,检测技术在如下几个方面得到了重视和发展.

a. 研究损伤对结构动力特性的影响,找出损伤结构动力特性的变化规律,如局部损伤对全局动力特性的影响,动力特性对支撑条件的敏感性以及环境因素对测量的影响,环境的随机影响及测试仪器的影响.

b. 用振动法检测水工结构的质量是一个典型的振动反问题.一般来说,振动的正问题具有唯一解,而反问题往往有多组解,这样就给确定结构动力特性的参数带来困难.在此可以通过加强现场测试的方法来解决.现场测试可以避免因建立模型而简化实际结构带来的误差.

c. 隐患及损伤信息处理技术.隐患及损伤信息处理技术包括隐患和损伤信号检测及分析处理两部分.在信号的处理分析方面,快速傅氏变换为核心的经典信号处理分析方法发挥了巨大的作用.近年来,利用小波变换的刻画信号局部特征的优越性,检测正常信号中夹带的瞬态反常现象并展示其成分的应用也越来越多.

d. 隐患及损伤的早期探测.早期损伤对系统模式参数的变化影响不大,加之结构复杂、测量误差、材料性能等因素的影响,使这一新的损伤探测技术仍未取得突破性进展.在这方面,需要研究新的检测方法及频率、振型、阻尼等综合信息,来推断隐患及损伤.

e. 基于神经网络和模糊数学的无损检测技术^[59-60].传统的检测方法在很大程度上取决于所建的数学模型,对于系统建模的复杂情况或系统为高度非线性的复杂关系的情况,用传统的检测方法非常困难.人工神经网络不依赖于模型,只需通过对实际输入和输出数据的学习,就可以将其映射关系以权值的方式编码储存下来,实际上是一种模式分类和识别的过程.在以往的研究中,由于检测数据中可能存在大量的噪声,且结构所处环境外在因素的多样性以及结构物理特性与结构响应之间的复杂性,会造成被检测元素的不确定性,这就使传统的检测方法在实际应用中暴露出它的局限性.在无损检测中引入模糊数学的方法,选用适当的隶属函数,用相应的隶属度来描述结构响应存在的倾向性,为人们判断及控制结构的损伤提供依据.

f. 基于时变结构和智能结构的无损检测技术^[61].将检测技术与结构的时变性和智能性结合起来的智能检测方法.

4 结 语

基于振动理论的结构无损检测技术在航空航天结构、机械工程结构、离岸工程(海洋工程)结构、桥梁结构方面应用较多,对水工结构^[62]也是行之有效的.目前对于大型复杂水工结构的无损检测的研究大多是针

对不同的问题而采取的具体方法.为提高基于振动理论的水工结构无损检测技术的实用性和精度,对检测技术的理论方法、检测仪器设备之间的匹配性、数据采集与处理方法仍需进一步地研究.

参考文献:

- [1] 吴中如.中国大坝的安全和管理[J].中国工程科学,2000,2(6):36—39.
- [2] 潘家铮.中国水利建设的成就、问题和展望[J].中国工程科学,2002,4(2):42—51.
- [3] 冉启芳.无损检测方法的分类及其特征简介[J].无损检测,1999,21(2):75—80.
- [4] 刘箴,唐岱新.建筑结构损伤诊断方法研究[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(1):37—40.
- [5] SALAWU O S, WILLIAMS C. Review of full-scale dynamic testing of bridge structures[J]. Engineering Structures, 1995, 17(2):113—121.
- [6] DOUGLAS B M, WAYNE H R. Dynamic tests and system identification of bridges[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1982, 108(ST10):2295—2312.
- [7] HARRY H W, JOSEPH E S, LOUIS F G. Natural frequencies and modes of suspension bridges[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1984, 110(10):2471—2486.
- [8] MASAFUMI K, SHIZUE S. Vibration of PC bridge during failure process[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1986, 112(7):1692—1703.
- [9] AVINASH M N, ROSS B C, JARED L C. Failure mode identification for structure frames[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7):1415—1432.
- [10] CHIN H L, TSAUR Y H. Time domain estimation of structural parameters[J]. Engineering Structures, 1988, 10(4):95—105.
- [11] SALANE H J, BALDWIN J. Identification of modal properties of bridges[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1990, 116(7):2008—2021.
- [12] GEORGE H, RENE B T. Modal analysis for damage detection in structures[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1991, 117(10):3042—3063.
- [13] HONG K S, CHUNG B Y. Improved method for frequency domain identifications of structures[J]. Engineering Structures, 1993, 15(3):179—188.
- [14] JUAN R C, ANGEL C A. Structural damage identification from dynamic test data[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1994, 119(8):2437—2450.
- [15] WONG C W, MAK W H, KO J M. System and parametric identification of flexible connections in steel framed structures[J]. Engineering Structures, 1995, 17(8):581—595.
- [16] TAN R Y, WENG I W. Identification of dynamic properties of isolated structures[J]. Engineering Structures, 1996, 18(3):240—246.
- [17] SASHI K K, JOHN B M, LEE F. Parameter identification for degrading and pinched hysteretic structural concrete system[J]. Engineering Structures, 1996, 18(4):224—231.
- [18] YAM L H, LEUNG T P, LI D B, et al. Use of ambient response measurements to determine dynamic characteristics of slender structures[J]. Engineering Structures, 1996, 18(3):145—150.
- [19] CHATI M, RAND R, MUKHERJEE M. Modal analysis of a cracked beam[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 207(2):249—270.
- [20] CHING D Y, HUANG S T. Modal parameter identification using simulated evolution[J]. AIAA Journal, 1997, 35(7):1204—1208.
- [21] CHING D Y, CHENG M C. Modal parameter identification from ambient response[J]. AIAA Journal, 1999, 37(4):513—520.
- [22] MATIN S W, RICHARD S G. A parametric study of the non-linear dynamic behaviour of an offshore jack-up unit[J]. Engineering Structures, 1999, 21:383—394.
- [23] ZHAO Jun, JOHN T D. Sensitivity study for vibrational parameters used in damage detection[J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1999, 125(4):410—415.
- [24] YAM L H, GUAN D H. Three-dimensional modal shapes of a tire using experimental modal analysis[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(4):369—375.
- [25] ZHANG D Y, FAN S C. Natural frequencies of a non-uniform beam with multiple cracks via modified fourier series[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 243(4):701—717.
- [26] GREGORY M, FERRY W, PAUL B. Estimating natural frequencies and mode shapes from forced response calculations[J]. AIAA Journal, 2002, 40(2):758—764.
- [27] SALAWU O S. Detection of structural damage through changes in frequency: a review[J]. Engineering Structures, 1997, 19(9):718—

723.

- [28] CHINCHALKAR S. Determination of crack location in beams using natural frequencies[J]. Journal of Sound and Vibration ,2001 ,247 (3) 417—429.
- [29] LIU P L. Identification and damage detection of trusses using modal data[J]. ASCE ,Journal of Engineering Mechanics ,1995 ,121(4) : 599—608.
- [30] REN W X ,GUIDO D R. Structural damage identification using modal data. 1 :simulation verification[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,2002 ,128(1) 87—95.
- [31] REN W X ,GUIDE D R. Structural damage identification using modal data. 2 :test verification[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,2002 ,128(1) 96—104.
- [32] PANDEY A K ,BISWAS M ,SAMMMAM M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes[J]. Journal of Sound and Vibration ,1991 ,145(2) 321—332.
- [33] ABDEL W. Damage detection in bridges using modal curvatures : application to a real damage scenario[J]. Journal of Sound and Vibration ,1999 ,226(2) 217—235.
- [34] THYAGARJAN S K ,SCHULZ M J. Detecting structural damage using frequency response functions[J]. Journal of Sound and Vibration , 1998 ,210(1) :162—170.
- [35] HWANG A K. Identification techniques of structure connection parameters using frequency response functions[J]. Journal of Sound and Vibration ,1998 ,212(3) 469—479.
- [36] SCOTT W D ,FRANCOIS M H ,LEE D P. Improved damage location accuracy using strain energy-based selection criteria[J]. AIAA Journal ,1997 ,35(4) 693—699.
- [37] SHI Z Y ,LAW S S ,ZHANG L M. Improved damage quantification from modal stain energy change[J]. ASCE ,Journal of Engineering Mechanics ,2002 ,128(5) 521—529.
- [38] TAO L ,JIMIN H. Local structural modification using mass and stiffness changes[J]. Engineering Structures ,1999 ,21 :1028—1037.
- [39] MAECK J ,WAHAB M A. Damage identification in reinforced concrete structures by dynamic stiffness determination[J]. Engineering Structures ,2000 ,21 :1339—1349.
- [40] PANDEY A K ,BISWAS M. Damage detection in structures using changes in flexibility[J]. Journal of Sound and Vibration ,1994 ,169(1) : 3—17.
- [41] PANDEY A K ,BISWAS M. Experimental verification of flexibility difference method for locating damage in structures[J]. Journal of Sound and Vibration ,1995 ,184(2) 311—328.
- [42] NICHCHOLSON D W ,ALNEFAIE K A. Modal moment index for damage detection in beam structures[J]. ACTA Mechanica ,2000 ,144 : 155—167.
- [43] JERRY E S ,JAMES T P Y. Damage assessment using response measurements[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,1987 ,113 (4) :787—801.
- [44] RICLES J M ,KOSMATKA J B. Damage detection in elastic structures using vibratory residual forces and weighted sensitivity[J]. AIAA Journal ,1992 ,30(9) 2310—2315.
- [45] HOON S ,KINCHO H L. Bayesian probabilistic damage detection of a reinforced-concrete bridge column[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics ,2000 ,29 :1131—1152.
- [46] GAWRONSKI W ,SAWICKI J T. Structural damage detection using modal norms[J]. Journal of Sound and Vibration ,2000 ,229(1) : 194—198.
- [47] RICCI S. Best achievable modal eigenvectors in structural damage detection[J]. Experimental Mechanics ,2000 ,40(4) 425—429.
- [48] SHIN Y S ,LEE I. Investigation of equivalent system modeling and dynamic characteristics using reduced models[J]. AIAA Journal ,2000 , 38(1) :102—109.
- [49] LAW S S ,SHI Z Y ,ZHANG L M. Structural damage detection from incomplete and noisy model test data[J]. ASCE ,Journal of Structural Engineering ,1998 ,124(11) :1280—1288.
- [50] JAMES M ,ZIMMERMAN M. Development of a coupled approach for structural damage detection with incomplete measurements[J]. AIAA Journal ,1998 ,36(12) 2209—2217.
- [51] CHA P D ,GU W. Model updating using an incomplete set of experiment modes[J]. Journal of Sound and Vibration ,2000 ,233(4) 587— 600.
- [52] JIMMY P B ,NORMAN C D. Vibration tests and analysis of a modal arch dam[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics , 1975 ,4 :163—177.

- [53] MAU S T ,WANG S. Arch dam system identification using vibration test data[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics ,1989 , 18 :491—505.
- [54] MOSTAFIZ R C ,ROBERT L H. Dynamic performance evaluation of gate vibration[J]. ASCE Journal of Structural Engineering ,1999 ,125 (4) :445—452.
- [55] DARBRE G R ,DE SMET C A. Natural frequencies measured from ambient vibration response of the arch dam of Mauvoisin[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2000 29 :577—586.
- [56] PROULX J ,PATRICK P ,JULIEN R. An experimental investigation of water level effects on the dynamic behaviour of a large arch dam [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2001 30 :1147—1166.
- [57] 马宏伟 ,扬桂通. 结构损伤探测的基本方法和研究进展[J]. 力学进展 ,1999 ,29(4) :513—527.
- [58] RICHARD G C ,BRAD S L. Sensor placement and structural damage identification from minimal sensor information[J]. AIAA Journal , 1997 ,35(2) :369—374.
- [59] NAKAMURA M ,MASRI S F. Method for non-parametric damage detection through the use of neural networks[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics ,1998 ,27(9) :997—1010.
- [60] 苏娟 ,陆秋海 ,管迪华. 神经网络法在定量损伤识别研究中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版) ,1999 ,39(4) :68—70.
- [61] 李俊宝 ,张景绘 ,任勇生 ,等. 振动工程中智能结构的研究进展[J]. 力学进展 ,1999 ,29(2) :165—177.
- [62] 王山山 ,任青文. 黄河大堤防渗墙质量无损检测方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版) 2004 ,33(4) :405—409.

A review of vibration theory-based nondestructive detection technique for hydraulic structures

WANG Shan-shan , REN Qing-wen

(College of Civil Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract :The nondestructive detection technique is an effective method for detection of hidden troubles in and damages to hydraulic structures. In consideration of the complexity of hydraulic structures , the emphasis was placed on the vibration method suitable for field nondestructive detection of hydraulic structures. Based on the principle that the nondestructive detection with the vibration method was implemented according to the variation of modal parameters of the system and the vibration response of the structures , a summary was made on the current situation of the development of the vibration detection method at home and abroad , and some conclusions were drawn. In most cases , special methods are always taken under different conditions in nondestructive detection of large-scale complex structures ; the reasonable and effective excitation is the most important measures to ensure the correctness of the detected result ; expansion and reduction processes are both important for detection of the structure failures. Finally , it was pointed out that , for improvement of the applicability and precision of the vibration method , it was necessary to find the regularity of dynamic characteristics of failure structures and pay much attention to the development of early detection technique , information processing technique and nondestructive technique based on neural network and fuzzy mathematics , so as to provide a scientific basis for dealing with hydraulic and hydropower facilities in trouble.

Key words :vibration theory ; hydraulic structure ; nondestructive detection ; vibration method ; modal parameter