

水工金属结构安全检测与评估方法综述

郑圣义 原玉琴

(水利部水工金属结构安全监测中心 南京 210098)

摘要 简要介绍了水工金属结构安全检测与评估研究的现状,阐述了巡视检查、外观检查、腐蚀检测、材料检测、无损探伤、结构应力与变形检测、振动检测、启闭力检测等项检测的目的和方法,对综合评估法和可靠度分析法两种评估方法进行了评述,并简要介绍了可靠度分析法的应用,提出了目前存在的问题和今后的发展方向。

关键词 水工结构 金属结构 安全检测 安全评估 综述评

水工金属结构安全检测就是采用先进的检测方法和仪器设备对在役水工金属结构进行现场检测,通过检测发现不安全因素,经综合评估,确定结构的安全级别,并提出相应的改造加固措施。

水工金属结构安全检测与评估工作在我国开展的时间不长。80年代后期,河海大学率先开始进行这方面的研究,经过几年的努力,现已成立了专门从事金属结构安全检测的全国性机构,编制了《水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程》,完成了“水电站水工金属结构安全检测措施研究”和“水工金属结构安全检测方法和判别评估标准研究”等多项研究课题,提出了水工金属结构的安全检测内容、检测方法和安全评估方法。研究成果对规范检测行为、确保检测质量、推动水工金属结构安全检测工作的开展具有重要作用。

1 水工金属结构安全检测内容和方法^[1]

水工金属结构安全检测主要包括巡视检查、外观检查、腐蚀检测、材料检测、无损探伤、结构应力与变形检测、振动检测、闸门启闭力检测等项内容。

1.1 巡视检查

巡视检查是对水工金属结构设备所处环境的宏观检查,主要检查与金属结构相关的水工建筑物是否有异常迹象,附属设施是否完善有效。巡视检查是一项经常性的工作,通常由工程管理机构组织进行,安全检测时根据管理单位的记录,抽样检查。

1.2 外观检查

在长期运行过程中,水工金属结构很可能会遭受因自然灾害或其它偶然突发事件而引起的损伤或损坏,留下安全隐患。通过外观检查,可以对金属结构的整体状况有直观的了解,为全面的安全检测打下基础。

外观检查通常使用水准仪、经纬仪、卡尺、卡钳等量测仪器和工具进行。主要检查构件的变形、损伤、零部件的脱落和闸门的支承系统、启闭机的传动系统、润滑系统、行走系统的运行状态等。外观检查前,检测人员应详细了解水工金属结构的维修、养护及运行情况,掌握缺陷的发生时间、原因和过程,以便正确判断缺陷的危害和发展。

1.3 腐蚀检测

运行多年的水工金属结构都存在着不同

第一作者简介:郑圣义,男,硕士,讲师,从事水工金属结构安全检测与评估的研究,曾发表《三家店闸金属结构安全检测与评估》等论文。

程度的腐蚀。金属构件腐蚀后,截面面积减小,截面应力相应提高,从而导致整个结构强度削弱,承载能力下降,直接影响结构的安全运行。通过腐蚀检测,可以确定构件的蚀余厚度和腐蚀速度,为结构应力计算和安全评估提供必要的数据。

腐蚀检测经常采用的方法有直接测量法、橡皮泥法、割取试件法等。实际检测时具体采用哪种方法,要根据现场条件和构件的腐蚀程度来确定。为准确测定构件的腐蚀量,有时需要多种测量方法联合使用。

1.4 材料检测

由于历史的原因,有些工程的水工金属结构没有材料出厂证明书和工程验收等文件,结构材料牌号不清,性能不明。进行材料检测,可以确定结构材料的机械性能和化学成份,鉴别材料牌号。

材料检测有两种方法。若设备允许取样,可按金属材料化学分析和机械性能试验的试件标准取样试验,直接确定材料牌号。但是,在正常服役的设备上取样做机械性能试验往往是不允许的,故此,鉴别材料牌号更多地是采用综合分析的方法。在设备的非受力部位钻取屑样进行化学分析,确定材料的化学成份,同时测定材料硬度,并据此换算出材料抗拉强度的近似值,综合分析两项检测结果,确定材料牌号。

1.5 无损探伤

焊接缺陷会降低焊缝的抗拉强度、延伸率、冲击韧性和疲劳强度。水工金属结构设备在制造安装时对焊缝已进行过较为严格的探伤。但是,经长期运行后,在荷载作用下,焊缝有可能产生新的缺陷,而原先经检查在容许范围内的缺陷亦有可能扩展,影响结构的安全运行。为此,安全检测时应对接结构的主要受力焊缝进行无损探伤,及时发现隐患,确保结构的安全运行。

无损探伤的常用方法有射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤及渗透探伤。每一种探伤方法都有各自的适用范围,对缺陷的检出精

度也不一样,在实际检测时,应根据各种检测目的,有针对性地选择最合适的探伤方法。有时,为提高缺陷的检出精度甚至需要多种探伤方法并用。

一般而言,对结构主要受力焊缝(一、二类焊缝),若经外观检查怀疑其有裂纹时,可采用渗透探伤或磁粉探伤方法进行表面或近表面裂纹检查。对内部缺陷,通常进行射线探伤或超声波探伤。探伤比例:一类焊缝应高于二类焊缝,超声波探伤应高于射线探伤。探伤时,对危害性极大的焊缝裂纹应予以特别的关注。一旦发现裂纹,应根据具体情况在裂纹的延伸方向增加探伤长度,直至焊缝全长。同时,分析裂纹的产生原因并判断其发展趋势。

1.6 结构应力与变形检测

水工金属结构经长期运行后,受结构变形、损伤、腐蚀等多种因素影响,其强度和刚度与设计状态相比必有下降。这就需要对接结构的实际承载能力与抵抗变形的能力进行测定,为结构的安全评估和加固改造设计提供科学的依据。

结构应力检测通常采用电测法,通过粘贴在构件上的应变片将力学量转化成电阻量,并经专门仪器获取应变读数;从而确定结构应力的分布及危险截面的部位。为使检测结果准确反映结构在设计状态下的受力状况,检测工况应尽可能接近设计工况。否则,应设法分级加载进行多级检测,再利用回归分析方法,建立荷载与应力的关系式,据此推算设计状态下的结构应力。

结构变形检测主要检测闸门主梁跨中挠度、支臂的压弯变形及侧向位移和门机等启闭设备的主梁跨中挠度、上拱和门柱的压弯变形及侧向位移等。

1.7 振动检测

振动是水工金属结构特别是闸门较普遍存在的问题,引起闸门振动的原因复杂,影响因素很多。闸门的自振特性是影响闸门振动的重要因素,当外界的激励频率与闸门的自

振频率接近或一致时,就会发生共振,影响闸门的安全运行。同时,闸门在运行过程中产生振动与其所处的工作状态有着密切的关系。同一扇闸门在不同的开度下运行,由于水力条件的不同,闸门的振动状况亦会存在差异。

进行闸门现场振动检测是研究闸门振动问题的重要手段。通过现场检测,可以了解闸门的自振频率,得到闸门开度与振动量的关系,结合其振动的频谱特征,可以分析找出振动区域和振因,从而采取有效措施,消除或减轻振动,确保闸门的安全运行。

振动检测主要采用随机振动信号采集和分析处理系统进行。通过布置在闸门门叶上的加速度计获得振动信号,经电荷放大器适调放大后,通过 A/D 转换进入计算机随机振动信号采集和分析处理系统进行记录和处理,最后得到闸门的振动加速度值及其振动特征。

1.8 启闭力检测

闸门运行多年后,由于支承装置和止水装置的变形、损坏等原因,启闭闸门时的摩阻力变大,闸门的启闭力将会增加,从而引发启闭机的超载,造成启闭机失事。通过实测启闭力,经反演计算求出设计水位及校核水位下的启闭力,并与启闭机的额定启闭力相比较,可得到启闭闸门的安全系数。

闸门启闭力检测主要采用动态测试系统进行。实际检测时,检测工况应尽可能接近设计工况。若无法做到,则应根据实测结果反演计算闸门的摩擦系数,最终获得设计水位下闸门的启闭力。

2 水工金属结构安全评估方法

通过安全检测,可以及时发现水工金属结构存在的安全隐患,对结构的运行性态有较为清楚的了解。但是被检结构是否安全、还可以正常运行多少年等问题都有待于根据检测结果采用适当的评估方法予以评估。

2.1 综合评估法

通过对水工金属结构失事原因的剖析可

知,枢纽布置问题、设计问题、制造安装问题、运行管理问题是影响水工金属结构安全的主要因素。综合评估法以这些主要因素为主框架,以结构的安全性为评估总目标,构造一个较为全面的评估体系,并根据评估体系,列出评估矩阵,计算安全系数,从而实现对水工金属结构的安全评估。

为使综合评估法具有较强的可操作性且评估结果合理,构造评估体系时,应将影响水工金属结构安全运行的各主要因素分解成诸多子项,并根据各子项对安全运行的影响程度确定其权系数。

综合评估法内容全面,直观易行。但子项目权系数和评估指标的确定带有较多的经验成份,缺乏足够的理论依据,因此综合评估法是一种半经验半理论的评估方法。

2.2 可靠度分析法^[2]

可靠度分析法是将可靠度理论引入水工金属结构的安全评估中,将影响结构安全的诸多因素如构件抗力、作用荷载、腐蚀量等均作为随机变量,利用概率论的方法对结构进行综合分析。可靠度分析法的主要步骤如下所述。

a. 确定随机变量,收集结构随机变量的检测或试验资料,用概率统计方法进行统计分析,求出有关统计量及分布规律。与结构有关的随机变量很多,但大致可分为三类,即外来作用(荷载等)、材料性质和结构的几何尺寸。

b. 用力学方法计算结构的荷载效应,如结构的内力、应力、位移、变形等,通过试验获得结构的抗力,如屈服极限、强度极限、容许变形和位移等,从而建立结构的破坏标准。由破坏标准即可建立结构可靠度计算的极限状态方程。对于结构体系,由于极限状态较为复杂,需要用结构力学中的平衡法或虚功原理建立极限状态方程。

c. 根据结构随机变量的统计结果以及破坏标准,利用可靠度方法算出结构的失效概率和可靠指标,结合现行规范,对结构的安全状态作出评估。

d. 确定影响结构使用寿命的主要变量, 结合现行规范规定的目标可靠指标, 进行结构使用寿命预测。

可靠度分析法具有较强的理论性, 评估结论经检验具有较高的可信度。以下为一个可靠度分析法应用实例^[3]。

某工程溢流闸门为平面钢闸门。根据闸门的实际工作状况和相关的统计资料, 经分析比较, 选取下列变量为基本随机变量: 闸门的作用水头 H ; 滑块的摩擦系数 f ; 构件腐蚀量 Δt ; 构件材料的屈服强度 R 。对于其它变量, 如浪压力、风压力、止水的摩擦系数等, 因缺乏统计资料, 且影响较小, 当作常量处理或忽略不计。各基本随机变量均服从正态分布。

将钢闸门作为平面体系进行结构计算, 并且假定当结构构件某个截面弯矩达到其塑性抗力矩时, 即认为该截面失效。按照可靠度理论寻找主要失效模式的思路, 参照《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74-95), 确定平面钢闸门的主要失效模式为主梁失效、边梁失效和面板失效。

主梁受均布荷载作用, 存在弯曲破坏和剪切破坏两种可能的失效模式; 边梁受水平荷载和竖向荷载共同作用, 存在弯曲破坏和拉伸破坏两种可能的失效模式, 而面板的破坏与否取决于面板区格支承边中点的折算应力。据此, 可建立主梁、边梁、面板在各种失效模式下的极限状态方程。

根据极限状态方程, 可计算出主梁、边梁、面板的失效概率分别为 1.1×10^{-3} , 2.9×10^{-13} , 4.0×10^{-7} 。由于主梁的失效概率远远大于边梁和面板的失效概率, 因此, 主梁的失效概率即可作为整个闸门的失效概率, 其值 $P = 1.1 \times 10^{-3}$, 相应的可靠指标 $\beta = 3.27$ 。

目标可靠指标是规范规定的结构应达到的可靠指标, 临界可靠指标是保证结构安全运行所需要的最小可靠指标。由工程的重要程度, 确定闸门的目标可靠指标 $\beta_T = 3.7$, 临界可靠指标 $\beta_L = 2.7$ 。根据不同使用年限闸门可靠指标 β 的计算结果, 可以得出如下结

论: ① 闸门初始可靠指标 $\beta_{初} = 3.6$, 略小于目标可靠指标; ② 闸门运行 25 年后, 其可靠指标 β 已从 3.6 下降为 3.27; ③ 闸门继续运行 15 年后, $\beta = 2.71$, 接近临界可靠指标 β_L , 闸门应重新进行安全检测和评估。

3 结 语

a. 水工金属结构安全检测与评估工作在我国还处于起步阶段, 现有的检测和评估方法尚不完善, 还有一些问题仍未解决, 有待于进一步研究。

b. 随着时间的推移, 达到折旧年限需要检测的水工金属结构越来越多, 检测工作量越来越大; 同时, 金属结构类型各异, 不同类型的金属结构对检测方法的要求不一样。这些都对检测方法和检测技术提出了更高的要求。因此, 应积极创新, 研究更好的检测方法和检测技术, 进一步提高检测质量和检测速度, 确保检测成果的科学性。

c. 加强水工金属结构安全评估理论的研究, 完善现有的评估方法, 从而建立一套科学合理、切实可靠的安全评估方法体系。

参考文献

- 1 张秀玲等. 水工钢闸门和启闭机安全检测技术规程(SL101-94). 北京: 中国水利水电出版社, 1995
- 2 吴世伟. 结构可靠度分析. 北京: 人民交通出版社, 1990
- 3 郑圣义. 水电站平面钢闸门可靠性评估: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1995

(收稿日期: 1996-11-25 编辑: 熊水斌)

· 简 讯 ·

新西兰电力公司拟将其国家最大的水电站提高出力——增修一条长 10 km, 直径 10 m 的尾水隧洞, 与第一条已建的隧洞成 45 度角, 然后在相距 70 m 处两条隧洞平行。这座水电站位于蒂阿瑙南部的马纳普里, 增修的第二条尾水隧洞工程将耗资 1.36 亿美元, 工期 4 年。完工后峰荷发电量可望从 58.5 万 kW 增至 76 万 kW, 每年可增加约 6.4 亿 kW·h 电力。

(熊莉芸供稿)