

水电站水击与调压室涌浪随机分析研究进展

②
7-11

张芹芬 索丽生

(河海大学 南京 210098)

TV139.26

TV135

摘要 综述水电站水击与调压室涌浪随机分析的研究现状、最新进展、需进一步研究的问题与可采用的研究方法。认为水电站水击压力与调压室水位波动过程是以时间为参数的随机过程,对其进行随机分析,对结构可靠度设计尤为重要。目前应对有关影响因素的随机特性进行实地调查与统计分析,并在此基础上建立水击与调压室涌浪随机分析数学模型;针对分项系数极限状态结构设计的要求,采用适宜的随机分析方法(如 Monte Carlo 数值模拟方法)得出水击压力与调压室涌浪极值的概率分布特性,为结构可靠度分析提供荷载概率依据。

关键词 水电站 水击 调压室涌浪 随机分析 综述 水力学

1 研究意义与目的

1.1 水击与调压室涌浪的随机性

水电站负荷大幅度改变时,有压引水系统中出现水击和调压室水位波动。电站负荷改变往往是由于输电线路或母线短路、主变压器或机组事故、主要设备故障、建筑物事故、误操作等造成的事故丢荷;或者是由于同一输出线路上某电站发生事故丢荷而使得处于事故备用状态的水电站突然增荷。这些事故属随机事件,因此水击与调压室涌浪的发生条件具有很大的随机性。

另外,在引水系统布置、结构型式以及机组特性已确定的情况下,影响水击压力、调压室涌浪水位的因素主要有:①水力系统的参数(如摩阻系数、水击波速);②边界条件(如库水位、丢弃负荷的机组台数、导叶关闭时间及关闭规律);③初始条件(如导叶起始开度、事故前开机台数、库水位)等。它们都具有一定的随机性。因此,水击及涌浪水位的波动过程中,任意时刻 $t(t \in T)$ 时的波动幅值都

是随机变量。简言之,水击压力与调压室水位波动过程是以时间为参数的随机过程。

1.2 水击与调压室涌浪随机分析的意义和目的

随着科学技术的发展,工程结构的设计方法,已经从传统的、源于简单经验估算的安全系数法,逐渐上升到科学的、基于精确概率计算为基础的可靠度设计方法。作为传统设计方法向可靠度设计方法的过渡,《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》(报批稿,1992)中规定,水电工程结构设计采用概率极限状态设计原则,以分项系数极限状态设计为实用设计方法。但至今各类水工建筑物的可靠度设计规范尚未出台,主要是由于水工建筑物的作用荷载较为复杂,它们的概率模型尚未明确,这些大大阻碍了可靠度设计方法在水电工程实际中的推广应用。

水击压力和涌浪水位作为压力管道和调压室结构设计的主要荷载之一,其随机特性对结构可靠度设计有着不可忽略的影响。但迄今为止,它们的随机过程概率模型尚未确

第一作者简介:张芹芬,女,硕士,讲师,从事水工水力学研究,曾发表《调压室涌浪分析随机模型》等论文。

定,其标准值仍采用确定性方法计算,即在进行这类非恒定流计算时,仍将各种影响因素及控制变量当作确定量,综合选择最不利条件组合,求出最高(低)水击压力或涌浪水位,作为结构设计的动水荷载。因此在压力管道或调压室结构设计中,即使采用目前推广使用的、较为精确的分项系数极限状态设计方法,因作用荷载的精度不相匹配,设计水准仍没有得到实质性提高。

水击与调压室涌浪随机分析旨在为压力管道、调压室等结构设计提供精确的荷载依据,这对结构可靠度设计而言已迫在眉睫。

1.3 水击与涌浪的随机过程概率模型

建筑结构设计中涉及的荷载,除永久荷载外,一般都是随时间变化的可变荷载,所以采用随机过程概率模型来描述比较切合实际。规范中,将几种常遇荷载统一化为平稳二项随机过程,即它们的样本函数为等时段矩形波函数。对于这种模型,每种荷载必须给出:①荷载一次持续施加于结构上的时段长度 τ ;②每一时段上荷载出现的概率 p ;③在每一时段上,荷载出现时,其幅值的任意时点荷载概率分布 F_T ;④建筑结构的设计基准期 T 。并由此计算出设计基准期内最大荷载这一随机变量的概率分布 F_T ,作为结构极限状态设计的荷载概率依据(参见:中国建筑科学研究院编《建筑结构设计统一标准》(报批稿),1994)。水击压力与调压室涌浪水位,也可近似采用上述随机过程概率模型。图1即为水击压力随机过程模型示意图。

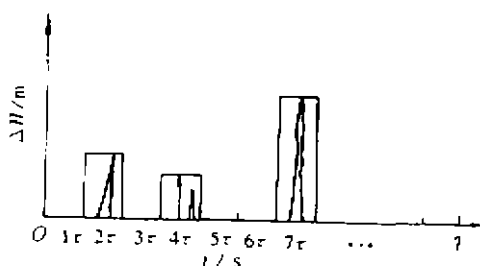


图1 水击压力随机过程模型示意

设计基准期 T ,一般可根据建筑物等级查阅有关规范确定。考虑到影响水击压力、

调压室涌浪大小的主要因素之一库水位的变化周期(受水文周期影响)为年,故将设计基准期 T 以年为时段长度,用 τ 来进行划分,并认为不同时段上的水击压力、调压室涌浪最大幅值是相互独立的,且与各时段上荷载是否出现无关,即与 p 无关。从而确定甩负荷事故在一年内的发生概率 p ,以及一年内甩负荷事故所产生的最大(小)的水击压力或最高(低)涌浪水位的概率分布。最后可确定设计基准期 T 内最大荷载的概率分布 F_T 。

2 研究现状与进展

2.1 水击与调压室涌浪确定性分析

自本世纪初儒可夫斯基、阿列维等学者为水击理论奠基以来,有压非恒定流研究(含水击与调压室涌浪)经历了解析法、图解法、电算法等阶段,已经发展成为流体工程中一个成熟的学科分支^[1]。文献[2,3]论述了有压非恒定流方面的理论基础和工程经验,文献[4]对各种复杂水力系统,提出了水击与调压室涌浪的联合分析数值模型,这对设有调压室的长有压引水系统,当调压室水位升降迅速而水击衰减缓慢,或调压室反射水击不充分、水击“穿越”调压室而进入隧洞等情形有实用意义。

水击与调压室涌浪的确定性分析成果为随机分析打下了必要的基础。

2.2 随机水力学

随机水力学是近年来水力学的新发展,它是在经典水力学的基础上进一步考虑水流现象的随机性,应用随机理论来研究水流运动规律及其应用的学科分支。

现代量测技术的快速发展提供了获取随机现象感性认识及深化理性认识的可能,概率统计、随机过程、随机微分方程等理论在相邻学科应用所取得的成就,为应用随机方法研究水流现象提供了数学基础,而计算机及各种随机数据处理专用机的发展和普及使得一些复杂的随机演算得以实现。由国际水力研究协会组织的随机水力学国际研讨会,每

四年一届,至今已举办了七届,2000年将在中国北京召开第八届会议。

目前国内外随机水力学的研究主要在风险和可靠度分析、汇流水力学及随机水文学、明渠与河流水力学、地下水力学、泥沙输送、波浪及海岸问题等方面。例如:文献[5~9]利用信息熵理论在明渠水流流速、泥沙、糙率、水面曲线以及脉动水压力的谱分析等方面作了较深入研究;文献[10~13]在水力风险可靠度分析方面也取得了一定成果。对管道水流的随机分析研究,主要在管网系统风险分析、恒定流断面流速分布及糙率等方面^[14~16]。

随机水力学的研究正处于蓬勃发展时期。随机分析方法在这些课题中取得的成就,为水击与调压室涌浪随机分析提供了可借鉴的经验。

2.3 水击与调压室涌浪随机分析

目前,国内外有关水击与调压室涌浪随机分析研究刚刚起步,有关的研究成果甚少。

文献[17]对我国几百座大中型电站年最高库水位进行了统计分析,指出它服从正态或对数正态分布规律,并给出了它的统计特征值。这对水击、调压室涌浪水位的随机分析,提供了一项重要的随机变量的统计资料。

文献[18]对压力钢管的主要荷载之一——水击压力进行了分析。收集、统计了三座水电站供电系统事故,认为事故概率可近似作为水击发生概率,得出水电站年水击发生率服从泊松分布的结论,提出用一年内出现水击的概率与年最大可能水击相乘,从而近似地得到最大水击压力的分布。在求年最大水击压力时采用了如下计算方法:

$$H_{\text{年}} = \xi h_m \quad (1)$$

式中 h_m 为年最大水头,并通过样本分析认为 h_m 服从极值 I 型分布; ξ 为水击系数,取确定量,因此年最大水击压力与年最大水头为同分布的随机变量。

文献[19]对由水库、管道及阀门组成的简单管,在分析影响水击的主要随机变量及

其统计特性的基础上,从水击极值近似解析式出发,推导了简单管的水击最大升压解析概率分布,随后引入了随机数值模拟方法。并通过算例表明数值模拟法与解析法结果吻合很好,而水击随机分析与传统的定量计算方法存在相当大的差距。文中还讨论了简单管水击概率分布规律。

文献[20]把丢荷前、后水电站带荷程度系数 m_0, m_1 (定义为水电站所带负荷与满负荷出力之比) 作为随机变量,在收集并统计分析 m_0, m_1 以及其它影响调压室涌浪大小的随机变量概率统计特性的基础上,选择典型调压室水力系统,从调压室水流基本方程出发,建立了涌浪分析的随机数学模型。并采用广泛适用的数值模拟方法(Monte Carlo 法),计算分析了最高涌浪水位的统计特征与概率分布。

水击与调压室涌浪随机分析的研究成果尚不能满足结构可靠度设计的要求,因此还须进一步深入研究。

3 需进一步研究的问题

根据压力管道和调压室分项系数极限状态结构设计要求,对可变荷载水击和调压室涌浪水位的随机分析,应逐步完成下面三部分工作。

第一,广泛收集水电站多年运行期间的事故资料(记录),并从中分析出每年水击事故发生概率 p 以及一年内最严重的丢荷程度的统计特征和概率分布;分析各影响因素的主次,进一步收集其它主要影响因素的统计资料,并采用数理统计方法分析它们的统计特征与概率分布;对工程实际中难以获得统计资料的随机变量,可从物理意义出发加以分析或采用最大熵原理等理论方法分析推导其概率分布规律。

第二,建立分析时段 τ 内水击极值、涌浪水位极值的随机数学模型,并选择合适的求解方法,从而获得一旦发生水击或调压室涌浪波动时,其样本函数极值的统计特征及

概率分布,作为任意时点荷载的概率分布 F_T 。从而进一步分析计算设计基准期 T 内最大荷载的概率分布 F_T 。

第三,采用极限状态可靠度设计方法时,除了应根据设计基准期最大荷载概率分布来确定荷载作用标准值(一般,不利时取0.95的高分位值,有利时取0.05的低分位值)外,还应确定各荷载的分项系数及荷载组合系数,才能给出极限状态设计表达式。这部分工作应在各种荷载及各种抗力参数随机特性分析成果都较为成熟的基础上,参考已有建筑结构及其它可靠度设计规范,综合分析,优选确定。

4 水击与调压室涌浪随机分析方法

4.1 原型观测

选择管路布置、结构型式较为典型的水电站,预埋量测设备,直接量测并记录历次发生负荷变化时,调压室最高(低)涌浪及压力管道中的最大正负水击压力,取得足够的系列样本资料后,进行数理统计和概率分析,找出其概率分布形式及参数,再应用于其它工程的结构可靠度设计计算。

六七十年代,广东流溪河、长湖,广西澄碧河,云南绿水河、龙源,福建安砂等水电站,曾进行过水击与调压室涌浪、尾水系统反水击的原型观测,取得一些可贵的实际资料^[2]。对这些资料需进一步收集、整理、研究。但由于当时原型观测的目的不是为了随机分析,因此样本数量不足,难以得出概率分布。

原型观测工作的最大困难在于对于某一水电站,要想获取足够的样本资料,需长期投入人力物力,而且起控制作用的电站事故所引起的水击、涌浪却往往由于不能预测、没有准备而无法记录。

4.2 模型试验

许多高校和科研机构都进行过水电站引水系统有压非恒定流的模型试验,也取得了相应的宝贵资料,这类非恒定流模型试验具有以下特点^[21]:①由于所研究的水力要素都是随时间而变化的函数,相应的量测设备必

须能同步记录各水力要素的波形图;②由于流量变幅大(可从很大变到零),包括粘滞力在内的阻力相似实际上是不可能的;③由于水击波速与固体边壁的弹性变形有关,模型选材和制作多了一个考虑因素。

这些特点决定了进行这类模型试验研究困难较大,难以取得精确数据资料。而且模型试验无法模拟实际电站运行过程中可能出现的各种甩负荷事故。

4.3 理论解法

在描述水击的偏微分方程组及描述调压室涌浪的常微分方程组中,考虑初始条件、基本参量的随机特性,即构成了研究水击和涌浪随机过程的随机微分方程组。对这类非线性的复杂随机微分方程,数学上至今还没有理论解析方法可用^[22]。

若在某些特殊情形下经适当简化,可得出该确定性方程组的理论解析解,即随机微分方程组的均方解析解。再利用随机向量的密度变换公式,由基本变量的概率分布,推导出控制变量(水击压力或涌浪水位)的概率密度函数。文献[19]即为一例。

对于仅具有随机初始条件的拟确定的随机微分方程,可首先求出其确定解,即均方解,若解的反函数也存在解析形式,则可从初始条件的统计性质确定解的统计特性。

但纯理论方法在水击与调压室涌浪随机分析研究中难以适用,因为调压室水位波动的常微分方程组及管道水击的偏微分方程组,都难以得出理论解析解。只有在某些特殊简化情形下,该方法才可作为其它分析方法的验证对照。

4.4 近似理论解法

如上所述,理论求解非恒定流微分方程组的最大困难在于方程中的非线性项,若对非线性项作适当的近似处理,采用小摄动法、动态局部线性化法,也有望获得控制变量的近似理论解析表达式,再由基本参量的统计特性推求控制变量的统计特性。

4.5 数值模拟法

文献[19]和[20]采用 Monte Carlo 法分别分析了简单管水击极值、调压室最高涌浪水位的概率分布规律。Monte Carlo 法的实质是,首先用数学方法产生 N 个 $(0,1)$ 上均匀分布的伪随机数,并转换为服从各随机变量实际分布的 N 组随机序列,对每一组随机序列,采用数值解法求解确定性方程组,从而得到控制变量随机过程的 N 组样本函数,最后对这 N 组样本函数进行数理统计分析,即可求得控制变量随机过程的各种概率信息。对于 Monte Carlo 法,不管多复杂的非恒定流水力系统,随机数值分析的主攻关键在于各基本随机变量的概率统计信息的获取,以及确定性方程组的数值解法。

5 结 语

水电站水击与调压室涌浪随机分析旨在为调压室、压力管道等水工结构可靠度设计提供荷载概率依据。国内外这方面的研究刚刚起步,需进一步研究的问题较多,当前应针对工程实际中普遍采用的分项系数极限状态设计方法的要求,确定水击和涌浪的随机过程概率模型。从水击和涌浪的基本随机微分方程出发,选择合理的求解方法,给出结构可靠度设计所需的荷载概率依据。随机过程概率模型的确定及随机微分方程的求解,都以各基本随机变量统计资料的获取及分析为基础,因此从运行多年的水电站收集统计甩负荷资料是一项重要工作。

参考文献

- 1 索丽生.国外瞬变流研究进展.河海科技进展,1991,11(2):9~15
- 2 丁浩.水电站有压引水系统非恒定流.北京:水利水电出版社,1984
- 3 Wylie E B, Streeter V L, Suo Lisheng. Fluid transients in system. Engle Wood Cliffs, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1993
- 4 索丽生.水电站水击与调压室涌浪的电算法及其

应用:[硕士学位论文].南京:华东水利学院,1981

- 5 Chiu Chao-Lin. Entropy and probability concepts in hydraulics. HY, ASCE, 1987, 113(5):583~600
- 6 朱党生,张芹芬,王木兰.信息熵理论在水力学中的应用.水利学报,1996(6):33~37
- 7 黄克中,江涛.明渠流污染带的最大熵理论.水利学报,1996(5):61~67
- 8 张芹芬,朱党生,王木兰.最大熵原理在悬沙浓度分布计算中的应用.水道港口(专集一).1994(2):21~25
- 9 黄克中.明渠水力设计的随机方法.武汉水利电力学院学报,1983(2)
- 10 Erich J Plate. Stochastic design in hydraulics: concept for a broader application. In: Proc of the Sixth IAHR Int Sym on Stochastic Hydraulics, Taipei, 1992
- 11 王木兰,郑管平.挑流冲刷风险分析的蒙特卡罗方法.泄水工程与高速水流,1989(2)
- 12 姜树海.可靠性分析方法和面流消能工的优化设计.水利学报,1989(1):9~17
- 13 郭子中,徐祖信,吴建华.消能工的风险及经济分析.水动力学研究与进展,1990,5(2):69~108
- 14 Chiu Chao-Lin, Lin Gwo-Fong, et al. Application of probability and Entropy concepts in pipe-flow study. HY, ASCE, 1993, 119(6):742~756
- 15 Yen B C. Uncertainties on roughness for pipe design. In: Proc of the 2nd IAHR Int Sym on Stochastic Hydraulics, 1976
- 16 Ning Duan, Larry W Mays. Reliability analysis of pumping systems. HY, ASCE, 1990, 116(2):230~247
- 17 吴世伟等.坝上游水位变化规律与统计量.见:结构可靠度与可靠度分析论文集.南京:河海大学出版社,1987.36~42
- 18 张博庭.压力钢管可靠度分析:[硕士学位论文].北京:中国水利科学研究院,1988
- 19 郭文铸,索丽生.简单管水击随机分析.水力发电学报,1996(4):72~81
- 20 张芹芬,索丽生.调压室涌浪分析随机模型.河海大学学报,1997,25(5):41~45
- 21 左东启等.模型试验的理论和方法.北京:水利电力出版社,1983.90~94
- 22 张炳根,赵玉芝.科学与工程中的随机微分方程.北京:海洋出版社,1980

(收稿日期:1997-10-28 编辑:马敏峰)