三峡坝区电力设施及水工建筑物在工程爆破引发振动激励下的动力安全评估

申仲翰　李世海

(中国科学院力学研究所，北京 100080)

摘 要：本文针对三峡坝区之电力设备及坝体、厂房、闸门、基础帷幕灌浆等典型水工建筑物在工程爆破条件下的振动安全问题进行了讨论。重点考虑了爆破振动源与地震振动源在频率范围、持续时间、振源深度、能量大小及频率单一性等方面的不同特征以及二者在上述建筑物上引发的不同响应，参考以往爆破振动中积累的经验及有关安全标准，并结合坝区各类水工建筑物的结构特点。经过分析论证，给出以加速度和质点速度表征的各种振动安全限值，可供爆破设计中参照应用。

关键词：爆破振动，水工建筑，振动卓越频率，振动持续时间

1 前言

利用爆破技术拆除地面上的建筑物是建造工程中常用的方法，如陈旧的房屋、废弃的堤坝都可通过这种方法处理。但是作为爆炸产生的振动会通过地表层而传播到周围处于完好状态的建筑或设备，从某种意义上讲，这种爆破振动的作用相当于人造地震，如处置不当则会造成不必要的破坏和损伤，因此必须在爆破之前对振动的影响给予科学的估计。在此，三峡工程中围堰的爆破拆除工作即为一个典型的实例，为了保证已建好并运行的电力设备及水工建筑物在爆破振动激励下的响应低于设计中所能承受的振动标准，从而维持其正常运转，必须针对爆破所致地面振动及电力设备与建筑结构的动态响应作出合理的评估。本文即是基于这一目的而作的研究工作。

2 评估工作的基本思想

从原则上讲，评估工作可从两个途径进行，第一是直接方式，即通过测量分析确定由爆破振源传至设备所在地面的振动，再根据设备的自身结构及其基础的动力特性求出设备的振动响应，所得振动量与原设计的振动标准比较，看其是否会超出。上述过程是一种通用的评价途径，但是这种方法是不现实的，原因是需要评价的设备及建筑物很多，每件设备或建筑物均有自身的力学特性，各不相同的结构形式和支撑条件以及不同的抗振性能，按照这种方法去评估则需要大量、复杂的测试和计算工作，这些从时间上和技术上都是爆破工程项目和从事此工作的技术人员所难以承受的，是不现实的。在此选择了第二种方法，即与抗震设计相结合的反推方法。

反推方法的思路如下：将爆破振源类比于地震波动，由于建在地震区的电力设施及水工建筑物均是按相应的设防烈度进行设计的，因此在对建筑及设备的动力输入(振动环境)及动力特性作出实际调查了解的前提下，如果由爆破引起相应结构的振动响应低于原设计烈度下的振动响应，则可基本认为，设备和建筑将免于受损。根据这一思路，我们对三峡坝区的爆破工程所涉及的电力设备和水工建筑物振动的安全问题进行了评估。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 评估的主要依据

3.1 地面振动环境的估计

我们所要进行振动评估的设备及建筑物位于三峡坝区。根据国家地震局评定及“七五”科技攻关研究[1]，运用当今这一领域的先进技术和理论，确认三斗坪坝区50年超越概率10%的烈度为6度，因此坝区的基本烈度仍为6度，又因三峡工程的重要性，提高1度按7度设防，相当于取50年超越概率1%作为大坝抗震设防的标准。按照现行的电力设施及水工建筑物抗震设计规范，地面水平方向加速度峰值限定为0.1g(1m/s^2),地面垂直方向加速度峰值为0.065g。显然，在三峡坝区，包括电力设备在内的主要设施和建筑的抗震设计均以这一标准为依据。

3.2 坝区电力设施的规范化设计

坝区电力设施主要包括水轮机组、发电机组、变电站等一系列重要设备。依据电力设施抗震设计规范[2]，单机容量在100MW及以上的水力发电厂的有关电气设施均需按规范设计；而三峡发电机组单机容量在700MW以上，电厂装机总量达18200MW[3]。按照规范，这些设备属于重要电力设施，因此显然其之设计、建造应是严守规范的。

3.3 主要电力设备的分类

在各种电力设施中，由于其结构形式有别，因此动力特性、动力反应也就不同。从结构动力学的角度分析，在电力设备的抗震设计中采用了两种不同的设计方法，亦即动力设计法和静力设计法。

应用动力设计的电气设备属于柔性结构，高细比大，重心高，稳定性差，设备安装方式一般是底部与基础紧固，顶部与电纲柔性联接，呈垂直的悬臂状态。主要设备为高压电器和电瓷产品，如各种断路器，避雷器、隔离开关、棒型绝缘子等。它们的自振频率多在1.5~5Hz，临界阻尼比在5%以下，其频率与地震波频率有交叉；于是当设备及其体系的自振频率接近地震波的频率时将会发生耦合振动，其动力放大程度可达地面最大加速度的数倍量级。基于这种情况，偏于柔性的电力设备的设计是从动力放大的角度严格进行的，所采取的措施包括增加动强度和加置阻尼器等，以保持良好的抗震性能。

另外一类电气设备属刚性结构，形式多为箱型，重心低，稳定性好。主要类型包括电力变压器、电抗器、调相机、电动机、空压机以及开关柜、控制保护屏、通信设备、蓄电池等。这些设备的本体结构刚性好，自振频率高，一般在10~25Hz，临界阻尼在5%以下，与地震发生耦合的概率较小，地震反应也小，尚无因地震而招致本体直接损坏之实例。由于这类设备的安装方式多为以滚轮放在轨道上或浮放于基础或平台，因此所造成之损坏多为长时间持续振动造成的大位移或倾倒，设计中采用静力设计法；但变压器、抗振器的出线套管的自振频率偏低，可能处于地震所造成的地面振动频率范围内，因此在设计中需采用动力设计方法。

3.4 振动环境下电力设施的动力放大

按规范进行的电气设备的动力设计中考虑两种放大因素，一是在前节所提到的设备结构本身的放大作用，二是支撑电力设备的结构物的放大作用，如基础支架和楼板等。一般支架

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的放大作用与其自身组成为单柱式和多柱式有关。规范中表明，设备支架的动力放大系数一般取1.2。二、三层建筑物之动力放大系数在2以上。例如，变压器和高压电抗器基础及本体的联合结构之放大系数为2.0。

3.5 三峡大坝抗震设计依据的烈度

根据水工建筑物抗震设计规范1.0.6.条中的规定[5]，工程抗震设防类别为甲类的水工建筑物可根据其遭受强震影响的危害性，在基本烈度基础上提高1度作为设计烈度。鉴于三峡坝区为6度地震区，三峡大坝为甲类水工建筑物，它是按7度设防进行设计的。

4 爆破振动作用力与地震作用力的比较

从振动对设备或建筑物作用力的角度分析，无论是地震源或是爆破振动源所产生的地面振动的速度都是对地面结构物的一种激励，它们都将在结构上造成一定的动态响应，这是两者的共同之点。但是通过具体分析可知，在振动的要素方面有别，如频率、幅值、动持时(振动持续时间)等。特别是地面反应谱不同，或者说造成地面振动的卓越频率(即主峰能频率)不同，从而使相同的振动量级的地震源和爆破源所造成的地面结构物的振动损伤不同，这是本节要阐述的重要问题。

4.1 三峡坝区电力设备的抗震设计

三峡坝区建立了大型水力发电站，按电力设施抗震设计规范，坝区所属电力设施为重要电力设施，它们均是按7度烈度或更为严格的要求进行设计和建造的，以适应振动安全的需要。

4.2 坝区电力设备对爆破振动的响应估计

如前所述，三峡坝区电力设备的设计可有效地预防地震带来的振动损伤。但是面对爆破产生的振动又将如何呢？对此需作具体分析。所考虑的关键因素是振动的频率、幅值和动持时特性。大量的爆破测量工作表明，爆破引发地面振动的频率约为20~80Hz，因此对于电力设备中自振频率为5Hz 以下的柔性结构所引起的动态响应比相应量级的地震所引发的响应要弱得多，因此不容易产生振动损伤，这一道理可通过单自由度体系的振动分析作出说明。

根据电力设备的自振主频率，将电力设备的动力特性简化为下图所示的单自由度弹簧—质量—阻尼系统。

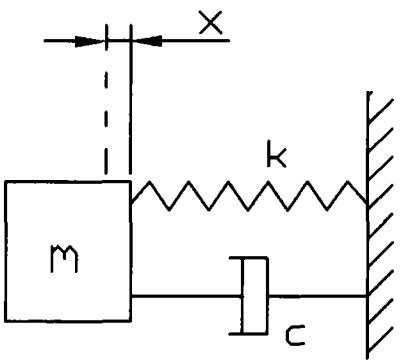

图1 电力设备的简化单自由度模型

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

振动系统的强迫振动微分方程为

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_0\sin\omega t$$

这里 $F_0=ma$，a 为地面振动加速度幅值，ω 为地面振动的角频率，这里取振动的卓越频率，于是在地面振动的激励下，质量为 m 的设备位移响应为

$$x=\frac{F_0}{k}R_d\sin(\omega t+Q) \tag{1}$$

$$R_d=\frac{1}{\sqrt{(1-\omega^2/\omega_n^2)^2+(2\xi\omega/\omega_n)^2}} \tag{2}$$

$$Q=\arctan\left(\frac{2\xi\omega/\omega_n}{1-\omega^2/\omega_n^2}\right) \tag{3}$$

上式中 ω_n 为结构自振圆频率，$\omega_n=2\pi f_n$，ξ 为结构之阻尼比，Q为相位差。对于地面振动加速度幅值不变的情况下，同一设备的激励力 F_0 不变，刚度 k 不变，于是我们所关心的最大振幅的变化只反应在 R_d 中。以公式(1)，(2)为基础，还可以导出设备m的加速度响应为

$$\ddot{x}=-\frac{F_0}{k}R_a\sin(\omega t+Q) \tag{4}$$

$$R_a=\frac{\omega^2}{\omega_n^2}R_d \tag{5}$$

下面以 R_d 和 R_a 为参数进行讨论。首先以具有柔性结构特点的FA2-252断路器为例[4]，其自振频率为 $f_n=3.5\text{Hz}$，折合圆频率 $\omega_n=2\pi f_n=22$，临界阻尼比 $\xi=3.6\%=0.036$。当以卓越频率为5Hz的地震波激励时，以近似正弦波估算，由公式(2)得出 R_d 之值为R_{d1}=0.965，同样如以卓越频率为20Hz的爆破振动波激励时则有R_{d2}=0.0316,于是R_{d1}/R_{d2}=30.5。这就表明，由爆破引起的振动位移响应仅为地震响应的三十分之一。在同等条件下计算加速度响应，则可给出R_{a1}/R_{a2}=1.9即爆破振动的加速度响应约为地震响应的二分之一。

再以具有刚性结构特点的BSJL—560/6型电力变压器为例[4]，其自然频率为 f_n=15.5Hz，临界阻尼 $\xi=2.77\%$。接着用前述断路器中相同的激励条件进行分析，即分别以卓越频率为5Hz的地震波和卓越频率为20Hz的爆破振动波进行激励，且激励幅值相同，所得R_d之值如下：对应地震波激励之R_{d1}=1.116，对应爆破波激励之R_{d2}=0.624。于是R_{d1}/R_{d2}=1.8，表明爆破波引起电力变压器响应约为地震激励响应的二分之一。但在与此相同的条件下所得出的R_{a1}/R_{a2}却是$0.112\approx1/9$。这表明由爆破振动激励得出的电力变压器的加速度响应大于地震引发的响应，前者约为后者的9倍。

综合上述分析可知，对于确定的电力设备，当爆破激励强度等于相应的地震激励强度时，由爆破所造成柔性电力设备的振动响应会小于地震所致之响应；对刚性电力设备则不尽如此，可能会由于频率的配置不同而有完全相反的结果。

从动持性的特征分析，一般工程中由爆破所引发的地面振动，其持续时间只是几百毫秒至2秒的量级；而地震引发振动的持续时间则为几秒到几十秒。这样对于按地震动持性所设计的电力设备遭受到爆破振动激励时，即使振动响应强度相同，则由于动持时间相对较短，则其造成的振动损害也将比地震所致损害大大降低。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4.3 水轮机组的振动估算

根据爆破试验的总结，在三峡坝区，如将工程爆破所致地面振动的频率定为f=30Hz，波动传播速度为$\upsilon \approx 3000$ m/s。以λ表示波长，则由速度=波长×频率的公式可求出λ=100m。又由爆破引起电力设备所在地的振动加速度不大于0.05g的约定，并将爆破振动之卓越频率近似做正弦振动处理。则由加速度幅值A与位移幅值S之间的频率关系$A=\omega^2 S(\omega=2\pi f)$可近似导出双振幅位移为0.03mm，它分布于100m波长的范围之中。

又由三峡水轮机组的振动资料表明，按设计要求，在水轮机组稳定运行的范围内，水轮机组顶盖上的垂直振动和径向振动的双振幅不大于0.1mm和0.14mm，其他运动工况下分别不大于0.12mm和0.16mm。又在各种运动工况下，水轮机导轴承处测量的水轮机轴相对摆度(双副值)应不大于0.05mm/m(以推力轴承镜板处为准)，水轮机导轴承处测量的水轮机轴相对摆幅(双副值)不应大于0.35mm。

综上所述可见，爆破所引起的地面振动将远低于水轮机组所允许的振动标准。

5 爆破振动对水工建筑物的影响

根据水工建筑物抗震设计规范[5],该类建筑物主要包括大坝、水闸、溢洪道、进水塔、水电站、厂房及地下结构等。三峡坝区的水工建筑物还增加了船闸和升船机结构。为了分析工程爆破对水工建筑物的影响，在资料分析的基础上[1,2,6]，针对三峡坝区水工建筑物的动力特性进行了研究总结，并对具有特殊性质的基础帷幕灌浆结构进行了振动分析。

5.1 基础帷幕灌浆的振动分析

在大坝建造中，坝底与基岩之间会有少量空隙，为了提高强度，保证安全，在施工中通过高压方法将水泥浆压入间隙而进行填充，这就形成了基础帷幕灌浆结构。对于这种结构在爆破引发振动的激励下会发生断开和损坏，为此可作下述分析：

灌浆结构的强度分析

大坝高175m，大坝密度为2.7×10^3kg/m^3，因此在坝底灌浆结构上形成之压应力(或压强)为$P_1=G\cdot H$，这里G为坝体材料比重，H为坝高，计算P_1=4.725MPa；又由爆破在灌浆结构上形成之波动应力(或压强)为$P_2=\rho c v$，这里ρ为灌浆结构密度=2.7×10^3kg/m^3，C为波速=3000m/s，υ为质点振动速度=0.02m/s，于是有P_2=0.162MPa，P_1/P_2=29，即P_1远远大于P_2，所以爆破形成的波动应力不会使灌浆结构损坏。

再者灌浆结构与基岩粘结面的抗剪强度可由文献[1]近似给出f=1.3MPa，爆破振动在粘接面形成之剪力可由$\tau=M\cdot A$近似给出，这里M为大坝质量，A为爆破引发的坝底基岩之加速度，A=0.05g。于是有τ=0.236MPa，由f/τ=5.5，说明爆破振动不可能将粘接面剪开，而且即使当A=0.2g时，仍有$f>\tau$,不会形成裂缝。因此是安全的。

5.2 三峡坝区水工建筑结构的特点

(1) 自振频率低：三峡坝区各类水工建筑物的主频率均在5Hz以下。

(2) 安全裕度高，各类建筑物的动强度安全系数在3.9以上，远大于规范要求的标准值2.5。

(3) 动力放大情况明确

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

三峡三斗坪河谷岸坡放大作用不明显，约为0.9~1.2倍，大坝本体动力反应明显，在0.1g加速度作用下，坝顶动力放大系数接近5，坝体振型参与系数最大可达2.26。

5.3 爆破振动下坝区水工建筑物的响应

根据上面概括的三峡坝区水工建筑物的动力特性，结合地震波与工程爆破波在几种振动要素方面的差异可得出如下分析结果：

坝区现有各种水工建筑物的自振主频率均低于5Hz左右的地震波卓越频率，不会产生共振，但由于结构自振主频率与地震波卓越频率相差不大，有的仅差1~2Hz，因而可产生一定的动力放大。显然，这一因素在水工建筑设计中已作了足够的考虑，并计及了可长达几十秒的地震作用持续时间，为防止地震所致建筑结构损伤而给出高的安全裕度。而当这类建筑受到爆破波激励时，由于爆破波卓越频率为20~30Hz，与水工建筑物主频相去甚远，难于产生动力放大，其在建筑物上引发的动态响应将远远小于地震波所致响应，况且爆破波的作用时间尚不足2秒。所以对于造成地面振动加速度峰值为0.1g的爆破振动而言，建筑结构响应值与可能造成结构损伤的振动阈值相比会有相当大的差距。

6 爆破振动对坝区各类设施之振动允许量值的估计

6.1 电力设备

如前所述，在电力设备中分为柔性和刚性两种结构，它们对爆破振动的响应不同，需要分别加以分析。

(1) 柔性电力设备

对于设备中之柔性结构，在等同激励强度下，爆破所致响应小于地震所造成的响应，特别是反映在位移方面；另外，从实际爆破之持续时间与设计中所考虑的地震持续时间相比，一般前者仅为后者的十分之一量级。所以爆破所集聚的破坏能量在很大程度上小于地震破坏能量。换句话说，在抗震设计中，已考虑了比爆破要求大得多的安全裕度。鉴于上述论断，在爆破拆除工程中可考虑在地震设防指标的基础上适当提高振动的限定指标，例如将6级烈度下的0.05g提到0.06g。

(2) 刚性电力设备

对于设备中之刚性结构，例如变压器等，由于其本体之自振频率与爆破运动之卓越频率相近，有形成耦合共振之可能，因此对振动允许量的估计需要具体分析。其中的关键因素在于支撑条件，其可能有三：一为固定式支撑，即刚性设备与地基牢牢地固接在一起，在如此情况下设备主体结构与爆破振动发生耦合的可能性很大，是非常不利的；当然以这仲支撑方式安装刚性电气设备，一般是不符合设计惯例的。二是弹性支撑，支撑基础结构的刚度在很大程度上小于设备主体之刚度，于是主体与基础的复合体将具有柔性结构的特点，大大降低了与爆破振动发生耦合的条件，因此可考虑适度提高振动的限定指标。三是滑动接触支撑，其符合常规设计的惯例，由于重心低、摩擦力小，大大削弱了由爆破振动引起的倾复力矩，设备不易倾倒。又由爆破所致地基振动频率较高(20Hz以上)的条件，设备在基础上的滑动位移要比地震造成的滑动位移小得多；另外作用时间也短的多，一般约为1s，因此不会产生大的位移，可避免将连接电路拉断的事故发生，因而是安全的，可承受略高于设计规范中的6级烈度地震下所设定的振动指标。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过上述分析可知，估计刚性电力设备在爆破条件下地基振动的允许值，必须以支撑条件为分析、设定的前提，一般在滑动支撑和弹性支撑条件下，0.06g以内的振动将是允许的。

6.2 水工建筑物

对于各种水工建筑物，由于它们的自振主频率均在5Hz以下，远离20~80Hz的爆破地面振动频率范围，因此爆破所致水工建筑的动态响应会比同量级的地震响应小得多，换句话说，根据两者所得响应等同的原则，爆破振动加速度强度可作一定幅度的提高。即将0.1g提高2~3倍，成为0.2~0.3g。其具体加速度值可依照不同类型的水工建筑物而分别进行调整。

7 结论

在作结论之前，首先提出以下三点说明：

(1) 三峡坝区地震基本烈度为6度，地震卓越频率为5Hz以下，在30~50km范围内的振动总持续时间为8~20s[1]。

(2) 三峡坝区所有电力设备及水工建筑物均按地震烈度为7度设防进行设计安装。

(3) 依电力设施抗震设计规范GB50260-96中1.0.3条之规定[2]，凡按此规范设计的电力设施中的电气设备，当遭受到相当于设防烈度以下的地震影响时则设备不会损坏，仍可继续使用。

根据爆破振动所具有的频率高、持续时间短、衰减快、能量小、振源浅及频率较单一的性质，参考国内外类似工程爆破振动的安全标准和工程爆破振动中所积累的经验[6],例如借鉴葛洲坝大江围堰混凝土防渗墙爆破拆除工作的资料，并结合三峡坝区各类水工建筑物的结构特点，经过分析、研究，我们针对坝区电力设备及水工建筑物提出下述爆破振动安全限值。

(1) 运行中的电力设备

根据规范，这类设备对振动效应的要求最为严格，它不仅要考虑结构因爆破振动所引起的损伤，而且要保证设备的正常运行。对于设备中的柔性结构，可以0.06g作为爆破振动下地基振动的限值；如以质点振动速度为标准则限定为0.5cm/s。至于电力设备中之刚性结构，如电力变压器，则需按不同的支撑条件分别论证。例如对于滑动接触支撑和弹性支撑设备，可考虑取为与柔性结构情况下等同的振动限值；而对固定支撑情况则需依据复合系统(由设备本体与支撑结构连接组成)的自振频率范围而确定振动的限值。

与运行中的电力设备相比较，对于各种水工建筑的动力响应而言，加速度响应比起速度或位移响应更为重要；又如前节所述，它们的自振主频率均在5Hz以下，在爆破振动激励下，承受振动的能力比电力设备更强。

(2) 基础帷幕灌浆

这类结构是水工建筑中相对薄弱的部分，抗拒振动的能力虽优于电力设备，但与其他水工建筑相比，由于存在不同介质的结合，因而又显不足。在爆破拆除过程中，其所能承受的加速度限值定为0.15g，按质点振动速度要求，取限值为2cm/s。

(3) 电厂、溢流坝闸门

由于电厂、溢流坝闸门结构承受振动的能力比基础帷幕灌浆结构好，为了保证在爆破振动激励下的安全，限定基础的振动加速度为0.2g,其质点振动速度限定为2.5cm/s。

(4) 电厂、溢流坝迎水面坡脚

由于这部分建筑地处河谷，动力放大作用不明显，尤其是在频率较高的爆破振动激励下

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

则基本无放大，而且振动持续时间短、能量小，因此可承受较强的振动。按加速度振动设定，其限值可定为0.35g。按照质点速度设定，其限值为5cm/s。

(5) 电站厂房

针对厂房设定的加速度限值为0.15g,其质点振动速度限值为2cm/s。

参考文献

1. 三峡工程科学试验和研究. 长江水利委员会编. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.10 (长江三峡工程技术丛书)
2. 电力设备抗震设计规范 GB50260-96
3. 三峡工程机电研究. 长江水利委员会编. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.10 (长江三峡工程技术丛书)
4. 设备抗震鉴定与加固. 韩精忠编著, 长春出版社出版, 1989, 12
5. 水工建筑物抗震设计规范 DL5073-1997
6. 三峡工程施工研究. 长江水利委员会编. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.10 (长江三峡工程技术丛书)

Abstract: This paper discusses the issues of blasting vibrant security on electrical facility, dam, workshop, gate of lock, underground concrete grouting wall and so on in the area of Three Gorges Dam. Based on the standard of security, referring to engineering experience on blasting vibration and considering the special characteristics of hydraulic structure, the difference characteristics which include between blasting source and earthquake is studied. The main aspect to be dealt with includes the range of frequency, durational time of vibration, depth of vibrate sources, magnitude of energy and singleness of frequency. By the analysis, the vibrant limited values of different construction safety are given in acceleration and velocity and the results can be used referentially.

Key words: blasting vibration, hydraulic structure, predominant frequency of vibration, durational time of vibration

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net