

水电站圆筒式机墩垂直振幅复核计算分析

罗乾坤 邓瞻

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 四川成都 610072

【摘要】机墩是立式水轮发电机的重要支承结构，根据规范要求，大型水电站机墩均需进行垂直振幅的复核算，本文以西南某大型水电站为例，对其圆筒式机墩结构采用规范推荐的方法进行垂直振幅的复核计算，计算结果表明在正常运行工况下，机墩竖向动荷载的频率分别按转频和水力冲击频率计算时，机墩的垂直振幅分别为0.117mm和0.001mm，均未超过0.15mm，满足规范要求。

【关键词】机墩；垂直振幅；正常运行；转频；水力冲击频率

0 前言

机墩是立式水轮发电机的支承结构，其底部固结在水轮机层大体积混凝土或蜗壳层顶板上，上部与风罩或发电机层楼板连接。上部荷载通过机墩传到基础上。机墩受到各种静荷载和动荷载的作用，振动问题较为突出，剧烈和异常的振动直接威胁到水电站厂房的安全，《水电站厂房设计规范》(NB 35011-2016)对圆筒式机墩强迫振动的最大振幅做了如下规定：竖向振幅在标准组合时不大于0.15mm；水平横向与扭转振幅之和在标准组合时不大于0.20mm。

本文以某大型水电站为例，采用规范推荐的结构力学方法对其圆筒式机墩的垂直振幅进行复核计算。

1、基本假定

(1) 将机墩圆筒本身的重量，用一个作用于筒顶的集中质量(相当质量，机墩混凝土的全部质量的0.35倍)来代替，使在此集中质量作用下的单自由度体系的振动频率与原来多自由度体系的最小频率接近。其中第一(最小)频率是实际工程中需要的频率；

(2) 机墩的振动作为单自由度体系振动计算，在计算动力系数和自振频率中，假定无阻尼作用；

(3) 机墩的振动为在弹性范围内的微幅振动，力与变位之间服从胡克定律；

(4) 结构振动时的弹性曲线与在静质量荷载作用下的弹性曲线形式相似，从而可用“动静法”进行动力计算。

2、机墩垂直振幅复核计算

按照《水电站厂房设计规范》(NB 35011-2016)附录D的方法对机墩在机组正常运行时动荷载作用下的垂直振幅进行复核计算。

2.1 机墩强迫振动频率

(1) 机组转动部分偏心引起的振动频率 n_1 (r/min)

计算公式： $n_1 = n$

式中， n —发电机的正常转速，r/min；

因此，机组正常运行时的振动频率为 $n_1=125$ r/min

(2) 水力冲击引起的振动频率 n_2 (r/min)

计算公式为： $n_2 = \frac{nx_1x_2}{a}$

式中：

x_1, x_2 —分别为导叶叶片数(24)和转轮叶片数(15)；

a — x_1 与 x_2 的最大公约数。

$n_2 = \frac{nx_1x_2}{a} = \frac{125 \times 24 \times 15}{3} = 15000$ r/min

2.2 机墩垂直自振频率

计算机墩的自振频率和振幅时选取了对应蜗壳进口断面进行计算。

垂直自振频率 n_{01} 可按下式计算：

$$n_{01} = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{G_1 \delta_1}} = \frac{30}{\sqrt{G_1 \delta_1}}$$

$$G_1 = \sum P_i + P_0 + P_a$$

式中： G_1 —作用在机墩上的全部垂直荷载，kN；

$\sum P_i$ —机组垂直荷载(不计动力系数)，kN；

P_0 —机墩自重，kN；

P_a —蜗壳顶板重，kN；

δ_1 —单位垂直力作用下的结构垂直变位(包括机墩压缩变位

和蜗壳顶板垂直变位)，m/kN。

计算时，沿机墩中心弧线取单宽(1m)进行计算，重力加速度

$g=9.81\text{m/s}^2$ 。

对于本水电站厂房机墩：

(1) $\sum P_i$ 的计算：

$$P \text{ 机组} = (438 \times 14 + 2175 \times 12) / (2 \times 6.8 \times 3.14) = 754.4 \text{ kN/m}$$

风罩自重：

$$P_{\text{风}} = 3.14 \times (19.6^2 - 18.0^2) / 4 \times 6.8 \times 25 / (2 \times 6.8 \times 3.14) = 188.0 \text{ kN/m}$$

计算发电层楼板和母线层楼板传递到机墩顶部的竖向荷载时，忽略了楼板上的活荷载，各层楼板传递到机墩顶部的竖向荷载取各层楼板自重的1/2。

发电机楼板传来的竖向荷载：

$$P_{\text{发}} = 286.25 \times 25 / (2 \times 6.8 \times 3.14) / 2 = 83.7 \text{ kN/m}$$

母线层楼板传来的竖向荷载：

$$P_{\text{母}} = 249.84 \times 25 / (2 \times 6.8 \times 3.14) / 2 = 73.1 \text{ kN/m}$$

(2) P_0 的计算：

$$P_0 = 996.825 \times 25 / (2 \times 6.8 \times 3.14) = 583.3 \text{ kN/m}$$

(3) P_a 的计算：

蜗壳顶板厚度取该断面的平均厚度2.3m。

$$P_a = 8.68 \times 2.3 \times 25 = 499.1 \text{ kN/m}$$

(4) G_1 的计算：

$$G_1 = 754.4 + 188.0 + 83.7 + 73.1 + 583.3 + 499.1 = 2181.6 \text{ kN/m}$$

(5) 机墩压缩变形 δ_1' 的计算：

$$\delta_1' = \frac{PH}{EF} = \frac{1000 \times 4.7}{2.8 \times 10^{10} \times 4 \times 1.0} = 0.42 \times 10^{-7} \text{ m/kN}$$

(6) 蜗壳顶板垂直变形 δ_1'' 的计算：

$$\delta_1'' = \frac{x^2}{6EI} (3M_A + R_A x)$$

$$M_A = \frac{Pab}{2l} \left(1 + \frac{b}{l}\right) = \frac{1 \times 6.68 \times 2}{2 \times 8.68} \left(1 + \frac{2}{8.68}\right) = 0.947 \text{ kN-m}$$

$$R_A = \frac{-Pb}{2l} \left(3 - \frac{b^2}{l^2}\right) = \frac{-1 \times 2}{2 \times 8.68} \left(3 - \frac{2^2}{8.68^2}\right) = -0.340 \text{ kN}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{1 \times 2.3^3}{12} = 1.014$$

m⁴，混凝土的弹模 $E=28\text{GPa}$ 。

当 $x=6.68\text{m}$ 时，

$$\delta_1'' = \frac{x^2}{6EI} (3M_A + R_A x)$$

$$= \frac{6.68^2}{6 \times 2.8 \times 10^{10} \times 1.014} (3 \times 0.947 \times 1000 - 0.340 \times 1000 \times 6.68) = 1.49 \times 10^{-7} \text{ m/kN}$$

(7) δ_1 的计算：

$$\delta_1 = \delta_1' + \delta_1'' = (0.42 + 1.49) \times 10^{-7} = 1.91 \times 10^{-7} \text{ m/kN}$$

(8) 垂直自振频率 n_{01} 的计算:

$$n_{01} = \frac{30}{\sqrt{G_1 \delta_1}} = \frac{30}{\sqrt{2181.6 \times 1.91 \times 10^{-7}}} = 1470 \text{ r/min}$$

2.3 机墩垂直振幅 A1 验算
垂直振幅 A1 可按下式计算:

$$A_1 = \frac{P_1}{G_1 \sqrt{(\lambda_1^2 - \omega_1^2)^2 + 0.2 \lambda_1^2 \omega_1^2}}$$

式中, P_1 ——作用在机墩上的动荷载, kN;

λ_1 ——机墩垂直自振圆频率, $\lambda_1 = 0.1047 n_{01}$;

ω_1 ——机墩垂直振动的强迫振动圆频率, $\omega_1 = 0.1047 n_1$ (或 n_2);

对于本水电站厂房机墩:

$$P_1 = (2175 \times 12) / (2 \times 6.8 \times 3.14) = 610.87 \text{ kN/m}$$

3、结论

选取了对应蜗壳进口断面作为典型断面对机墩的垂直振幅时进行复核。计算结果表明:在正常运行工况下,机墩竖向动荷载的频率分别按转频和水力冲击频率计算时,机墩的垂直振幅均未超过 0.15mm,满足规范规定的控制标准。

参考文献:

[1] 罗宏图,孙艳玲,曲红.关于水电站机墩结构静力计算 [J].

当动荷载的频率为转频 n_1 时:

$$\omega_1 = 0.1047 \times 125 = 13.09 \text{ s}^{-1}$$

当动荷载的频率为水力冲击频率 n_2 时:

$$\omega_1 = 0.1047 \times 15000 = 1570.5 \text{ s}^{-1}$$

$$\lambda_1 = 0.1047 n_{01} = 0.1047 \times 1470 = 153.91 \text{ s}^{-1}$$

当动荷载的频率为转频 n_1 时,机墩的垂直振幅为:

$$A_1 = \frac{610.87}{9.81 \sqrt{(153.91^2 - 13.09^2)^2 + 0.2 \times 153.91^2 \times 13.09^2}} = 0.117 \text{ mm}$$

当动荷载的频率为水力冲击频率 n_2 时,机墩的垂直振幅为:

$$A_1 = \frac{610.87}{9.81 \sqrt{(153.91^2 - 1570.5^2)^2 + 0.2 \times 153.91^2 \times 1570.5^2}} = 1.11 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

黑龙江水利科技, 2003, 3(13): 6-8.

[2] 陈鹏,伍鹤皋,袁文娜.地下厂房机墩振幅计算的数值模型取值范围 [J].水利水电科技进展, 2014, 34(4): 16-19.

[3] 国家能源局.水电站厂房设计规范 (NB/T 35011-2016) [S].北京:中国电力出版社, 2017.

作者简介:罗乾坤(1984-),男,湖北十堰人,硕士,工程师,主要水电站厂房设计工作

(上接第 27 页)

将 500kV 光换线(电厂唯一的出线)停电并转冷备用,将参与本次黑启动试验范的光照电厂 1 号发变组、500kV 母线、500kV 光换线等高压设备进行隔离,对 10kV 厂用电 I、II 段,400V 自用电 I 段、III 段,10kV 坝区 I 段、400V 坝区 I 段、坝区 III 段进行隔离。断开 10kV I 段与 V 段联络开关 050,人为操作 1 号机组段交流电源全消失,模拟全厂失压的情景。

4.4 柴油发电机带 1 号机组自用电源

开启柴油发电机带 10kV 厂用电 II 段、I 段运行,为 1 号机组提供事故情况下的交流动力电源。

4.5 1 号机组带 500kV 光换线零起升压试验

手动开启 1 号机组到空转,机组运行稳定后切为“自动”运行方式,并将调速器切“远方/自动”。经测试,机组各部位振动、摆度、压力、流量、瓦温正常,机组油压装置油位及油压正常,辅助系统运行正常,顶盖排水正常。

将 1 号发变组带 500kV 光换线零起升压至 15% U_e。经检查运行正常后,依次以 10% I_e 机端电压为步长逐步升压,每步间隔 1 分钟。当升压至 99% U_e 时,500kV 光换线对侧电压最高值 (U_a) 为 549kV,带线路零起升压结束。

由测试结果可知:光照电厂 1 号机组带 500kV 光换线零起升压运行基本正常,与理论计算结果一致:没有发生自励磁。空载光换线电容效应引起末端工频过电压值较小,没有发生过电压,满足试验方案的要求。在整个零起升压试验过程中,励磁系统运行正常,机端电压正常,主变压器运行正常,光换线充电正常,光换线对侧电压正常,各部位电压值稳定。测试结果详见表 3:

4.6 1 号机组带 500kV 光换线充电试验

对 500kV 光换线依次进行 50% U_e、75% U_e、100% U_e 充电试验。1 号机组带 1 号主变零起升压至 50% U_e,500kV 光换线无压,合上 5002 开关对 500kV 光换线充电,测试 1 号机组频率摆动值,记录 #1 机组励磁电流值、励磁电压值,合 5002 开关后 500kV 光换线两侧电

压值。测试完成后,将 #1 机机端电压降至 0kV,断开 500kV 光换线 5002 开关。重复以上步骤,分别进行 75% U_e、100% U_e 充电试验。

由测试结果可知:在整个充电试验过程中,励磁系统运行正常,机端电压正常,主变压器运行正常,光换线充电正常,光换线对侧电压正常,未出现过电压现象。同时检查 1 号机组、1 号主变压器及各辅助系统运行正常,机组油压装置的油温、油位及油压正常,顶盖排水正常。测试结果详见表 4:

5、试验结论

5.1 光照电厂 1 机组的黑启动试验,是依据国家技术规程、《南方区域发电厂辅助服务管理实施细则》及《光照电厂 1 号发电机组黑启动技术协议》的要求进行的。1 号机组在自启动运行、机端建压、带线路零起升压、带线路充电等过程中,能够按照要求变换工况,并在各种孤网条件下稳定运行。光照电厂 1 号机组满足 B 类黑启动方式。

5.2 本次黑启动试验选定的调速器孤网运行参数,能够满足机组黑启动及孤网运行的要求,试验中机组频率的摆动值比较小,满足系统要求。

5.3 光照电厂的 1 号机组黑启动试验给同类型的电厂开展黑启动试验提供参考。

参考文献:

[1] 石良.惠州抽水蓄能电站黑启动电源实施方案研究,《华南理工大学》,2010.

[2] 韦宏华.岩滩水电站黑启动的研究《第十八届电工理论学术年会论文集》,2006.

[3] 《南方区域发电厂辅助服务管理实施细则》

[4] 《光照电厂 1 号发电机组黑启动技术协议》

作者简介:

黄光敏(1986),男,本科,助理工程师,现主要从事水电厂运行维护管理工作。

湛洪江(1971),男,大专,工程师,现主要从事水电厂运行维护管理工作。

(上接第 28 页)

在架设工作中保证线路的质量,提高电力运输效率。

参考文献:

[1] 余永红,许建昆.自动化系统在宝盖 220kV 变电站的应用 [J]. 电力自动化设备, 2001, (12).

[2] 陈玉明.220kV 新塘变电站自动化系统的功能与设计原则 [J].

电力自动化设备, 1999, (5).

[3] 张儒,胡学鹏.变电站综合自动化原理与运行 [M].北京:中国电力出版社, 2008.

[4] 彭伟国.110kV 变电站自动化系统的安全管理研究 [J]. 电力自动化设备, 2003, (5).

[5] 宋东明.110kV 变电站自动化系统的功能与设计原则 [J]. 电力自动化设备, 1998, (5).



知网查重限时 **7折** 最高可优惠 **120元**

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
