

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.019

岭澳核电站半速汽轮发电机基础结构型式分析

钱萍, 尹春明

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 汽轮机是核电主厂房中最重要的电气设备之一, 其运行的稳定性直接影响到整个发电系统的稳定。不同国家的规范对汽轮发电机基础的设计提出了不同的技术措施, 这些技术措施均从降低基础的振动线位移或振动速度着手。正确的基础选型, 能够以较小的经济投入达到较优的振动控制目的。对比分析了欧、美基础设计理念的差异, 对弹簧隔振基础的隔振性能进行了详细的论述, 指出了弹簧隔振基础能够更好地适用于欧洲汽轮机核电机组, 使得机组具有隔振、抗震、不均匀沉降可调等诸多优点, 能够确保国内首台百万级半速汽轮发电核电机组的安全运行。

关键词: 核电站; 半速汽轮发电机; 弹簧隔振基础

中图分类号: TM311

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0102-05

Analysis of Foundation Type for Half Speed Turbine Generator of LNPS

QIAN Ping, YIN Chunming

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: Turbine Generator is one of the most important electrical equipment of the main nuclear power plant, the stability of its operation directly affect the stability of the entire power system. Codes in different countries proposed different technical measures on the turbine generator foundation design, these measures have started from lower base line vibration displacement or vibration velocity. Selection of the proper foundation, smaller economies can achieve in vibration control. This paper analyzes the differences between Europe and America of its design concept, the isolation performance of the spring vibration-isolated foundation are discussed in detail, its show that the spring vibration-isolated foundation can be more suitable for the European nuclear power plant steam turbines. The high quality of spring vibration-isolated foundation in low frequency, aseismicity and adjustability is great to assure the safe operation of China first Nuclear 1 000 MW Class Half Speed Turbine Generator.

Key words: nuclear power station; half speed turbine generator; spring vibration-isolated foundation

2005 年初岭澳核电站二期工程的 TG 包定标, 采用 ALSTOM 的 Arabelle 1000 机型。国内首台单机容量百万千瓦半速汽轮发电机落户广东大亚湾畔。汽轮发电机基础(后简称“汽机基础”)是核电常规岛的核心部分, 基础自主化设计是核电自主化设计的标志性项目之一。

经过国内外调研, 并与中广核工程公司分析讨论, 确定岭澳二期半速汽机基础采用弹簧隔振的弹性基础方案。本文对岭澳二期半速汽机基础选型予以分析论述。

1 国内外设计标准比较

1.1 基础振动的评估标准

我国电力行业, 传统是以“线位移”作为振动的判据^[1-4], 国际上主要以“均方根振动速度”作为判据^[5-8]。在德国, 汽机基础振动的评估标准如表 1。

表 1 标准 ISO10816—2 给出的汽轮发电机组轴承座均方根振动速度的判据^[6]

Table 1 Recommended Values for Bearing Housing/Pedestal Vibration for Steam Turbines and Generators at the Zone Boundaries

区域边界	半速机组 1 500 或 1 800 r/min	全速机组 3 000 或 3 600 r/min
A/B	2.8	3.8
B/C	5.3	7.5
C/D	8.5	11.8

收稿日期: 2014-12-01

作者简介: 钱萍(1970), 女, 湖北黄梅人, 高级工程师, 学士, 主要从事电站土建结构设计的工作(e-mail) qianping@gedi.com.cn。

表中A、B、C、D区域分别对应于新机器,可长期使用的机器,可短期使用、需要检修的机器,不可使用的机器。

德国直接用机器的振动评估标准作为评估基础振动的标准。因此,汽机基础的振动,也以“均方根振动速度”作为判据,也分含义相同的A、B、C、D四个区域。

1.2 抗力标准

德国土建专家在设计汽机基础时,认为汽轮发电机组作用于基础的抗力是与汽轮发电机组转子的动平衡等级挂钩的。具体的标准是:ISO 1940 / 1^[7]。汽轮发电机转子的平衡等级在这个标准中给定为G2.5级。G2.5表示机器额定角速度 ω 与转子不平衡量的偏心距 e 的乘积, $e\omega = 2.5 \text{ mm/s}$ 。这个不平衡量在额定转速下旋转时产生的离心力 F 为:

$$F = m \cdot e \cdot \omega^2 = m(e \cdot \omega)\omega = m \cdot 2.5 \cdot \omega \quad (1)$$

离心力通过轴承中的油膜、轴承体、轴承座的转递到基础上,即为抗力。

我国的GB 50040—96^[3]规范第5.2.2条规定了竖向与横向抗力的取值:全速机为 $0.20 Wg_i$,半速机为 $0.16 Wg_i$,其中 Wg_i 为作用在基础第 i 点的机器转子重量。

1.3 基础设计、静力与动力分析计算的标准

在德国,对汽机基础进行设计、进行静力与动力分析计算的标准是:DIN 4024 Part 1^[8]。我国电力行业《火力发电厂土建结构设计技术规定》^[4]也有相应的规定。

1.4 基础设计、静力与动力分析程序

汽机基础的设计,一定要进行静力与动力分析。欧洲常用STARDYNE程序包进行汽机基础的动静力分析^[9-12],国内常用SAP2000软件。

2 汽轮发电机组弹性基础的产生与应用

2.1 汽轮发电机组弹性基础的产生

汽机基础的结构选型一直是人们十分关注的课题,德国以大量的试验为基础,首先进行了“低频基础”的应用,汽机基础的频率低于机器的工作频率,降低了传递力,具有更加优越的动力性能。

随着核电站的建设,给核电汽机基础提出了新的课题^[13-17]。核电机组使用饱和蒸汽,蒸汽温度和压力较低,做功能力较小,叶片高度较大,受制

于材料强度,要求如此大的叶片采用较低的转速,故一般采用半速机组。针对这种机组,重量很大,工作转速又低(1 500或1 800 r/min),要想设计成低频基础,就产生了极大的困难,这就促使人们寻找别的路径。1967年,欧洲一台容量为600 MW的半速核电机组,机器的工作转速接近基础的固有频率,促使工程师选择使用弹簧隔振基础,以避免共振^[2]。

欧洲和美国采用不同的设计理念进行动力基础的设计。在美国,通过增加基础的质量来抑制振动,若机器与基础的总重远大于机器转子的重量(大于100倍),一般不考虑共振的问题。美国通过增加立柱的尺寸,如3~4 m的立柱来增加基础的尺寸。

在欧洲通过柔性支撑体系,柔性支撑的固有频率可减小到3.0~3.5 Hz^[2],远远避开了机器的转动频率,以此来隔离机器的振动。柔性支撑体系主要依靠弹簧隔振器来实现。如图1所示,将常规固定基础的刚性连接替换成弹簧隔振器,从而改变了体系的固有频率。

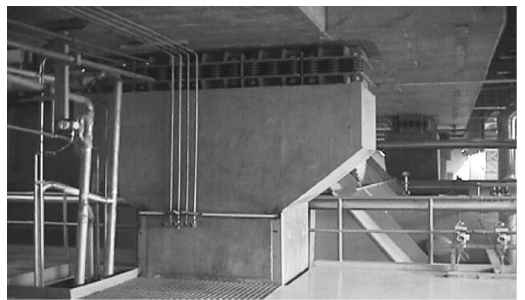


图1 弹性基础结构示意图

Fig. 1 Sketches of Spring Vibration-Isolated Foundation

我们可以用单自由度的振动公式来计算振动的大小,弹性基础的系统竖向固有频率约为3.1 Hz,对半速汽轮机来说,调谐比为:

$$\eta = \frac{f_{exc}}{f_v} = \frac{25}{3.1} = 8.06 \quad (2)$$

式中: η ——调谐比, f_{exc} ——机器工作转动频率, f_v ——基础的固有频率。

当抗力频率大于20 Hz,远大于体系频率时,体系的反应由质量控制,与阻尼基本无关,可取:

$$D = 0$$

因而基础的动力放大系数为:

$$V = \frac{1}{\sqrt{(1 - \eta^2)^2 + 4 \cdot D^2 \cdot \eta^2}} = 0.016 \quad (3)$$

式中： V ——动力放大系数； η ——调谐比； D ——阻尼比。

上面的计算表明，使用弹性基础以后，调谐比为 8.06，基础的动力放大系数为 0.016，系数小于 1 表明基础能减振，动力放大系数越小，基础的振幅则越小，减振效果越好。

2.2 弹性基础有快速对中与调平功能，而且可以补偿不均匀沉降

当不均匀沉降影响机组的正常工作时，对于常规刚接式基础，调平对中耗费时间长，需要将固定地脚螺栓的二次灌浆敲掉，调整机器轴承下面的垫片。而对于弹簧隔振基础，仅仅需要用千斤顶将台板顶起，在柱顶填进相应于沉降量的垫片即可，耗时短且不需停机。与常规的固定基础相比，弹簧隔振基础的“可调性”具有无可比拟的优点。



图2 利用弹性基础进行机组的对中与调平

Fig. 2 Leveling and Centralizing Using Spring Vibration-Isolated Foundation

2.3 弹性基础有抗地震的功能

弹簧的抗侧刚度较低，通过与阻尼器的联合工作，可以有效降低台板的地震响应，同时耗散地震能量，避免基础的破坏，在机器启动期间，阻尼也能起到限制荷载传递的作用。核电安全社会影响巨大，常规运行、恐怖袭击、地震等等，都要按百年大计来考虑。弹性基础可以减小了机器受地震等外来袭击引起的振动，对电厂是有百利而无一害。

3 几个技术问题的讨论

3.1 欧洲机组的一个特殊问题

一项新技术的采用，其优点往往不是一下子就被人们认识清楚的，而是在实践中不断地被人们所发现。欧洲机组出现了一个特殊的问题。

欧洲机组与美国机组的一个重要的区别是，欧洲机组，以德国 Siemens 与 Alstom Mannheim(以前

的 ABB Mannheim) 为代表，系单轴承结构；而美国机组，以美国 GE 与 Westinghouse 为代表，系双轴承结构。单轴承结构的优点是：

1) 轴系可以连接成一条光滑的绳索曲线，振动性能好。

2) 机器非常紧凑，轴系中每根轴段都缩短了一米多、低压轴段甚至缩短了 2 m 多长。单机容量为 600 MW 的美国机型与欧洲机型的基础比较，美国机型基础顶台板的长度约为 50 m，而欧洲机型基础顶台板的长度只有 43 m，即机组轴系长度缩短了 7 m 左右。

3) 轴承比压大大提高，减小了汽轮机内部通流部分产生气流激振的可能性。

这些优点显示了欧洲工程师们不断进取的精神，但是也给凝汽器的布置出了一道难题。轴段缩短以后，基础台板上汽轮机低压缸排汽口通往凝汽器进口的轴向开口尺寸，欧洲 Alstom Mannheim 机型相对于美国 Westinghouse 机型缩短了 30% 以上；横向开口尺寸，欧洲机型相对于美国机型缩短了 9.5% 以上；两个低压缸排汽口之间的横梁尺寸，欧洲机型相对于美国机型缩短了 21% 以上。

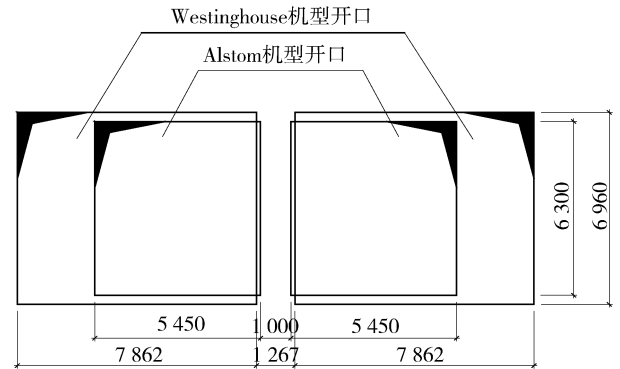


图3 台板上阿尔斯通机型与西屋机型排汽缸开口尺寸的比较(600 MW 机组)

Fig. 3 Comparison of the Openings Size of Alstom Models and Westinghouse Models (600 MW)

对美国 Westinghouse 机型，台板下有足够的余地可以布置 3 m、甚至 4 m 大尺寸的立柱，但对 Alstom Mannheim 机型就不行了。通过台板上的开孔，Alstom Mannheim 的凝汽器除了向机组横向伸张以外，在机组轴向也要伸张，因此大尺寸立柱不能用了，必须用小尺寸立柱。在欧洲，小尺寸立柱是配合弹性基础设计的，因为弹簧隔振器隔离了机器的动载荷，立柱只受静载荷，尺寸便可大大减

小。

3.2 弹性基础的寿命

隔振公司对弹簧作了疲劳试验, 由疲劳试验得到的许用载荷的 0.8 倍值作为额定载荷, 设计上再取工作载荷为额定载荷的 0.8 倍值。另外弹簧是经过喷丸除锈后进行喷塑保护处理的, 在电厂汽机岛厂房内, 弹簧隔振器不受腐蚀性介质的直接侵蚀, 又并不浸泡在水中, 因此不会变质。机组运行时, 弹簧的振幅在 $12\ \mu\text{m}$ 以内, 一般小于 $4\sim 5\ \mu\text{m}$ 。振幅如此小, 对弹簧隔振器 50 年的寿命是没有影响的, 就如同汽轮机危急遮断器中的弹簧一样, 可与机器共同工作 40 年。

3.3 凝汽器支承方式、凝汽器与汽轮机连接方式的变化

用弹簧隔振基础替代常规固定基础时, 基础台板与汽轮发电机组底部的连接方式不需要任何改变。美国机型变化的是凝汽器的支承方式, 由固定支承(图 4 中的左图)变化到弹性支承(图 4 中的右图), 汽轮机与凝汽器的连接方式由波纹管(图 4 中的左图)变为刚性焊接(图 4 中的右图)。凝汽器支承方式与连接方式变化的目的, 是为了消除真空吸力。

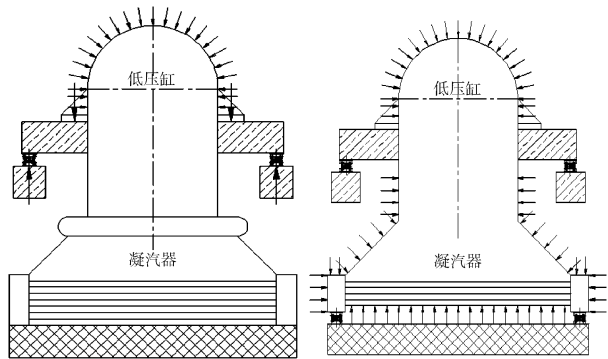


图 4 由常规固定基础变化到弹性基础时, 凝汽器支承方式、及与汽轮机连接方式的变化

Fig. 4 By Conventional Fixed Foundation Changes to the Spring Vibration-Isolated Foundation, the Change of the Supporting Way of the Condenser and the Connection Type of the Steam Turbine

对欧洲机型来说, 凝汽器的支承方式本来就是弹性支承, 凝汽器与汽轮机的连接也本来就是刚性焊接, 因此从型式上看没有任何变化。但是, 对弹性基础来说, 汽轮发电机组的隔振弹簧与凝汽器的支承弹簧之间存在刚度匹配问题。凝汽器支承弹簧的总刚度, 要远小于汽轮发电机组隔振弹簧总刚

度, 以使汽轮发电机组的工作不受凝汽器工作时微小移位的影响。

3.4 弹性基础不会影响机器的安装、对中与调整

1) 无论常规固定基础, 还是弹性基础, 顶台板的尺寸(长度、宽度与厚度)是完全一样的。因此, 常规固定基础时机器与台板是怎么连接的, 弹性基础也这么连接, 一点也没有变化。

2) 在机器安装时, 弹簧处于 1.2 倍工作载荷的预压缩状态, 也即处于刚性支承状态, 台板不会摇摆。在这种刚性支承状态下, 汽轮发电机组进行初步对中与调平, 汽缸扣盖, 地脚螺栓拧紧, 但是不进行二次灌浆。然后进行弹簧的释放, 释放后的精对中与调平, 不牵涉汽缸内部的间隙, 而只对联轴器的对中进行校核与调整。

3) 管道的连接, 台板以内部分与台板以外部分分别进行。在弹簧释放以后处于静平衡状态下, 再进行台板以内部分与台板以外部分管道之间的连接, 因此不会有大的变形。

4) 弹簧隔振器其实是很刚、很硬的。对一台 600 MW 机组来说, 垂直总刚度约为 $2\ 000\ \text{kN/mm}$, 水平总刚度约为 $1\ 200\ \text{kN/mm}$ 。这意味着, 在垂直方向上必须施加 200 t 的力, 或者在水平方向上必须施加 120 t 的力, 才能使台板产生 1mm 的位移。任何一个管道接口的反作用力都达不到这样大的数值。在不平衡力的作用下台座振幅小于 0.01mm, 这样的变形对于管道是察觉不到的。

Alstom Mannheim 公司有一个土建设计准则规定, 凡是在力作用下, 位移小于 0.5mm 的, 都视为固定点。

4 岭澳二期 TG 的特点要求

岭澳二期半速机采用 ALSTOM 的 Arabelle 1000 机型, 机组的外形尺寸比岭澳一期全速机增加较多, 见表 3。

分析表 3 可知, 汽机岛在汽机间内占用的空间更多, 而汽机间的 44 m 跨度没有变化, 汽机平台布置极为紧凑, 低压缸下的两凝汽器连成一体, 凝汽器体型庞大, 其支墩只有一个布置在中间的死点, 不能在两凝汽器间布置墙体结构, 凝汽器间柱宽只能设计为 1 m, 这就是欧洲机型的特点, 给汽机立柱预留的空间很小, 所以采用弹性基础是最好选择。

表3 岭澳一、二期汽轮发电机组比较

Table 3 Comparison of the Phase I and Phase II Large Turbo Generator Unit of Ling Ao

项目	岭澳一期机组	岭澳二期机组
高(中)压缸上半缸重量	50 t	123.9 t
高(中)压转子尺寸、重量	最大直径 1.871 m、长 6.71 m、33 t	最大直径 3.795 m、长 12.79 m、105 t
低压转子尺寸、重量	最大直径 3.58 m、长 7.3 m、58 t	最大直径 5.64 m、长 11.95 m、180.8 t
发电机转子尺寸、重量	直径 1.3 m、长 16 m、100 t	直径约 2 m、长约 15.2 m、233 t
发电机定子重量	170 t	355 t

5 结语

总结上述分析,相对于常规的框架式汽机基础而言,弹簧基础具有如下四个优点:

1)属于柔性支撑体系,频率低达 3~3.5 Hz,具有良好的隔振效果,降低了机组转动对基础的影响。

2)弹簧联合阻尼器使用,具有良好的耗能作用,可以降低地震反应,同时限制机器启动阶段荷载的传递。

3)可以实现基础不均匀沉降的快速对中与调平,施工便捷。

4)有效地隔离动力荷载,减小立柱的尺寸,特别适合欧洲机型的要求。

岭澳二期半速机采用 ALSTOM(Arabelle 1000 机型),对于首次国产化设计的百万千瓦半速汽轮发电机组,采用弹簧隔振的弹性基础,其低频、抗震、可调的优点无疑更确保机组的安全运行。

参考文献:

- [1] 翟荣民, 罗国澍. 对进一步提高大型汽轮发电机基础设计水平的思考[J]. 电力勘测设计, 2005(1): 40-44.
ZHAI Rongmin, LUO Guoshu. Opinions to Further Improve Foundation Design Level for Large Sized Turbo Generators[J]. Electric Power Design, 2005(1): 40-44.
- [2] 尹学军, 王伟强, 沙曾妍. 汽轮发电机组弹簧隔振基础分析[J]. 电力建设, 2003, 24(8): 35-40.
YIN Xuejun, WANG Weiqiang, SHA Zengxin. Analysis on Spring Vibration Isolating Foundation for Turbine-Generator Unit[J]. Electric Power Construction, 2003, 24(8), 35-40.

- [3] GB50040—96, 动力机器基础设计规范[S].
GB50040—96, Code for Design of Dynamic Machine Foundation[S].
- [4] DL 5022—2012, 火力发电厂土建结构设计技术规定[S].
DL 5022—2012, Technical stipulation for the Design of Civil Structure of Fossil Fuel Power Plant[S].
- [5] ISO 2372, Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s Asis for Specifying Evaluation Standards[S].
- [6] ISO 10816—2 Mechanical Vibration-Evaluation of Machine Vibration by Measurements on Non-Rotating Parts-Part2: Large Land-Based Steam Turbine Generator Sets in Excess of 50 MW[S].
- [7] ISO 1940/1, Mechanical vibration—Balance Quality Requirements of rigid rotors—Part1: Determination of Permissible Residual Unbalance[S].
- [8] DIN 4024, part 1 Machine Foundations, Flexible Structure That Support Machines with Rotating Elements[S].
- [9] LIU W, NOVAK M. Dynamic Behavior of Turbine Generator Foundation System[J]. Earthquake Eng. Struc. Dyn., 1995(24): 339-360.
- [10] ANEJA I K, WDIMMICK B. Nuclear Turbine-Generator-foundation Model Tests[J]. J. Eng. Mech. Div., ASCE 103, 1977: 243-255.
- [11] ABOUL-ELLA F. Dynamic Analysis of Turbomachinery Frame Foundation[D]. University of Western Ontario, London, Ontario, 1979.
- [12] TIMOSHENKO S P. Strength of Materials, Part I, Advanced Theory and Problem[M]. D. Van Nostrand Company, Inc., 1957: 378-392.
- [13] MEI Deqing. Research on Vibration Characteristics of A 280 MW Steam Turbine-Generator Foundation by Model Testing[J]. Power Engineering, 2005(5): 158-165.
- [14] YANG Yaofeng. Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Cooling Tower Considered Site Influence[J]. Building Structure, 1997(1): 32-38.
- [15] ZHANG Lei, ZHENG Qizhen. Research on the Model Rotor Test of the Million-kilowatts-class Nuclear Power Turbogenerator[C]. ASCE, 2007(5): 101-112.
- [16] MEI Deqing, HE Wen. Research on Model Test of Frame Foundation Model for Steam Turbine-generator Set[J]. Power Engineering, 2001(6): 156-163.

(责任编辑 林希平)