文章编号：1674－9057(2012)03－0302－05 doi:10.3969/j.issn.1674－9057.2012.03.002

汽轮发电机组弹簧基础振动设计评判标准讨论

尹学军，王伟强，谷朝红，沙曾炘

（隔而固（青岛）振动控制有限公司，山东 青岛 266108）

摘 要：国际振动测试与评判标准ISO 10816是为回转类动力机器制订的，它同时又可用于动力机器基础，这一点在欧洲得到公认，但是在我国尚未达成共识。本文详细介绍了基础振动与机器振动的有关问题，经过讨论，得出以下结论：ISO 10816.2和我国国家标准GB 50040都经过了大量的工程实践检验，是可靠的，无论采用哪个标准进行汽轮发电机基础动力分析和设计，都能保证机器的安全运行；ISO 10816.2控制物理量采用振动速度，反映了不同频率的振动分量的贡献，不需要针对不同频率进行转换；ISO 10816.2的扰力输入和控制值更加符合当今国内外机械制造水平和平衡等级，与实测的振动也更加吻合；对于汽轮发电机基础，ISO 10816.2比GB 50040略为严格；ISO 10816已转化为国家标准GB/T 6075，适用于回转类动力机器的振动评判；对于国外工程和国内引进机型，ISO 10816.2也适用于汽轮机发电机组基础。建议：加强国家标准GB/T 6075在回转类机器基础设计中的应用，积累经验；条件成熟后，在GB 50040修编之时将ISO 10816.2吸纳到我国的《动力机器基础设计规范》之中。

关键词：动力机器；弹簧基础；设计标准

中图分类号：TU311.3；TU435 **文献标志码**：A

0 引 言

国际振动测试与评判标准ISO 10816[1－2]是为回转类动力机器制定的，它同时又可用于动力机器基础，这一点在欧洲土建工程师中已得到公认，但是在我国尚未达成共识。

岭澳2期核电站1 000 MW机组的基础振动测试后，该用哪个标准评估就曾有过讨论。这台基础在设计时确定的标准是国际标准，因为：（1）弹簧基础是新技术，台板是由隔而固德国公司为主进行设计的，当时中国广东核电集团有限公司有个认识：引进技术用国际标准，要系统引进、不片面地引进国外技术；（2）控制设计的量，国际标准用均方根振动速度，而国家标准用振动线位移，为了避免分歧，就决定依照国际标准。

确定采用国际标准后，业内还有学者指出，没有发现ISO组织或欧洲任何一个国家发布过动力机器基础振动的设计标准。从欧洲公司学习回来的工程设计人员，都主张用ISO 10816为动力机器基础的振动评估标准，但是有人认为没有找到文件依据。

ISO组织或欧洲任何一个国家确实没有给出将ISO 10816作为动力机器基础振动设计标准的文件，但是欧洲各大动力机器设备供货商，如Alstom公司与Siemens公司都给出了文件依据，作为与美国Westinghouse公司同一个技术系统的日本Mitsubishi公司也给出了文件依据。这些专业大公司的技术文件怎样引用标准，给笔者提供了很好的范例。

基础的振动不能大于机器的振动，在欧洲标准中怎么体现？在本文中给予了详细介绍，旨在抛砖引玉。

收稿日期：2012－06－28

作者简介：尹学军（1962—），男，德国工学博士，高级工程师，中国工程建设标准化协会建筑振动专业委员会副秘书长，中国环境保护产业协会噪声与振动控制委员会常务委员，研究方向：隔振减振技术。

引文格式：尹学军，王伟强，谷朝红，等. 汽轮发电机组弹簧基础振动设计评判标准讨论［J］. 桂林理工大学学报，2012，32（3）：302－306.

1　国际大公司汽轮发电机组基础设计的相关规定

根据近几年新建项目，尤其是核电站引进机组的设计文件中对汽轮发电机组基础设计的有关内容，笔者都能够找到这样一条明确的规定：汽轮发电机组基础设计时应保证基础最大均方根振动速度小于 ISO 10816.2 的 A/B 边界规定值。无论是 Alstom 公司、Siemens 公司还是 Mitsubishi 公司，事实上都把动力机器的振动设计标准 ISO 10816 作为了基础的振动控制标准。

2　基础振动与机器振动的有关问题

2.1　转子动平衡标准与扰力计算

扰力是由于机器转子残余不平衡量在作回转运动时产生的离心力引起的，因此扰力的取值要与机器转子的加工精度联系起来。

大型汽轮发电机组转子一般有 4 ~ 6 个轴段，根据 ISO 1940/1[3] 标准要求，每个轴段转子的动平衡等级必须保证 G2.5，即不平衡量的偏心距 e 与角速度 ω 乘积 $e\omega = 2.5$ mm/s。当多个轴段连接时，动平衡等级可能保证不了 G2.5，所以德国基础设计标准 DIN 4024[4-5] 要求，转子动平衡等级降 1 级取值计算扰力，即取 $e\omega = 6.3$ mm/s。如果取 G2.5 级计算扰力，等于扰力取小了，对于同一振动控制值，等于放宽了台板的振动，不能保证机器的振动满足要求，因此制造厂家会反对。

基础设计应保证基础的振动小于机器的振动。岭澳 2 期 1 000 MW 核电半速机组的扰力是按 G6.3 级计算的。基础振动测试数据表明，由实测振动反算的扰力，只有计算扰力的 1/5（无法在扰力作用点测振，实际测振点在台板边缘各个轴承两侧相应的沉降观测点旁边，因台板边缘存在摇摆振动，故振动值大于扰力作用点的值），虽然这只是个例，但可以表明加大 2.5 倍用 G6.3 级计算扰力进行基础振动的动力分析，比用 G2.5 级计算扰力与实际振动更加吻合，为保证基础振动小于机器振动提供了保证。

由实测振动反算的扰力只有计算扰力的 1/5 也说明，由转子回转运动时产生的离心力，经轴承油膜至轴承体、轴承体至轴承座、再由轴承座至基础扰力作用点的总传递系数小于 1。这是对机器设计的要求，否则机器质量可能出了问题。根据机械动力工程师的经验，机器底法兰的振动一般比中法兰的振动小，如果情况相反，则机器可能有问题。

过去，基础设计者还有一个手段降低基础的振动，即加大基础质量对机器质量的比值（简称质量比），具体的措施是加厚并加宽台板的尺寸，容量 300 MW 以下机组的质量比可以达到 2.0 以上，但是随着机组容量的加大，机器质量成倍增长，机器尺寸却变化不大，基础尺寸随着机器尺寸布置，变化也不大，导致 1 000 MW 以上容量的核电半速机组的质量比降低到 1.0，甚至 1.0 以下。于是要求对基础进行精心设计，扰力按 G6.3 计算。

2.2　用 ISO 10816.2[2] 作为汽轮发电机基础振动评估标准的质量评估

由于 ISO 10816.2 是机器振动的评估标准，基础振动应该比机器振动小，将基础振动与机器振动用同一个标准评估，是否降低了基础振动的评估质量？是降低评估质量，还是提高评估质量，可以通过数字比较说明。

2.2.1　全速机组　国家标准 GB 50040[6]（简称《动规》）是国内普遍认可的标准。以全速机组为例，GB 50040、ISO 10816.2 以及 VDI 2056[7]（德国老标准，德国土建工程师常喜欢用此标准）3 个标准扰力、阻尼比与振动控制值的对比见表 1。

表 1　全速机组 GB 50040、ISO 10816.2 与 VDI 2056 3 个标准的扰力、阻尼比与振动控制值对比

Table 1　Comparison of exciting force, damping ratio and vibration criteria for foundation of the full speed turbo generator unit among codes GB 50040, ISO 10816.2 and VDI 2056

标准	扰力/N（或 kN）	阻尼比	振动控制值（换算到振动位移）/μm
GB 50040	$0.2W$	0.062 5	20
ISO 10816.2	$0.2W$[8]	~0.03	17.1(3.8 mm/s)
VDI 2056	$0.2W$[8]	~0.03	12.5(2.8 mm/s)

注：W 为机器转子重量。

可以看出，3 个标准的扰力完全相等，但是 GB 50040 的阻尼比比 ISO 10816.2 与 VDI 2056 取值大 1 倍多，而 GB 50040 的振动控制值却是 ISO 10816.2 和 VDI 2056 的 1.17 倍和 1.6 倍。所以对汽轮发电机台板振动的控制，ISO 10816.2 比 GB 50040 要求略为严格，VDI 2056 比 ISO 10816.2 更

加严格。如果将振动控制标准从 GB 50040 转到 ISO 10816.2,不是降低要求，而是要求更严格。另外由于 ISO 10816.2 采用振动速度为控制值，还可以避免测振时将不同振动频率振动幅值简单叠加而引起的误解，可以避免片面引进国外技术。

2.2.2 半速机组 对半速机组，GB 50040、ISO 10816.2 以及 VDI 2056 这 3 个标准扰力、阻尼比与振动控制值的对比见表 2。

表 2 半速机组 GB 50040、ISO 10816.2 与 VDI 2056 3 个标准的扰力、阻尼比与振动控制值对比

Table 2 Comparison of exciting force, damping ratio and vibration criteria for foundation of the half speed turbo generator unit among codes GB 50040, ISO 10816.2 and VDI 2056

标准	扰力/N (或 kN)	阻尼比	振动控制值 (换算到振动位移)/μm
GB 50040	0.16W	0.062 5	40
ISO 10816.2	0.1W[8]	~0.03	25(2.8 mm/s)
VDI 2056	0.1W[8]	~0.03	25(2.8 mm/s)

注：W 为机器转子重量。

可以看出，GB 50040 的扰力是 ISO 10816.2 与 VDI 2056 的 1.6 倍，但 GB 50040 的振动控制值也是 ISO 10816.2 与 VDI 2056 的 1.6 倍，两者的控制效果理论上是等同的，但是 GB 50040 的阻尼比比 ISO 10816.2 与 VDI 2056 大 1 倍多，得出的振动输出会略小，因此标准 ISO 10816.2 与标准 VDI 2056 比标准 GB 50040 略为严格。

虽然有上述区别，国际标准 ISO 10816.2 和我国国家标准 GB 50040 都是经过了大量的工程实践检验的，是可靠的[9-10]。只要领会了每个标准的核心内涵，无论采用哪个标准进行汽轮发电机基础动力分析和设计，都能保证机组的安全运行。

二者区别主要在于：(1) 控制物理量分别采用振动速度和振动位移，尽管二者是可以相对转换的，但国际标准不需要对不同频率的振动分量贡献进行转换，应用更加方便；(2) GB 50040 采用的是“大输入、大输出、大控制值”的思路，而国际标准 ISO 10816.2“小输入、小输出、小控制值”的原则，更加符合当今国内外机械制造水平和平衡等级，与实测的振动水平也更加吻合。

从 20 世纪 70—90 年代，新技术如转子数控加工、高速动平衡、叶片由手工抛光磨削到模锻再由数控加工中心精加工制成，转子加工精度有了极大的提高，用 0.16W 计算扰力，相当于转子动平衡等级为 G10 级，计算扰力远远高于实际扰力，与我国目前加工制造水平已不相适应。

2.3 均方根振动速度与振动位移问题

汽轮发电机振动控制标准有两套体系：一套是轴振，另一套是壳体振动。国际标准相应于轴振的标准是 ISO 7919 系列，相应于壳体振动的标准是 ISO 10816 系列。轴振与壳体振动对相同的制造质量与安装质量的机器可能有一定的数值对应，但没有换算关系。

机器轴振只能用振动位移测量，但是机器壳体振动可以用振动位移，也可以用振动速度测量。基础振动对应于机器的壳体振动，振动评价采用振动速度与振动位移哪个更加合适？笔者认为用振动速度评估合理。原因如下：

(1) 弹簧基础存在低频振动，管道随机振动是低频振动，是激发台板发生低频振动的一个主要原因。过去，固定基础的振动测量，过滤掉 10 Hz 以下的低频振动，矛盾不显现；但是弹簧基础用下限频率为 0.1 Hz 的速度探头测量时，测量到大量的低频振动。这些低频振动在振动位移的频域曲线中峰值很大，但是在振动速度的频域曲线中峰值很小，可以忽略。例如 2×350 MW 鸭河口机组，某单位用速度探头硬件积分直接读得叠加不同频率的振动位移为 17 μm，大于 A/B 区域界限值 12.5 μm，结论是振动品质在 B 区域，而不是在 A 区域[11]。中国计量科学研究院力学处振动室进行复测，由于测量的低频范围更低，也是用速度探头硬件积分直接读得叠加不同频率的振动位移为 51 μm，但速度探头直接读得的测点中最大的均方根振动速度为 1.84 mm/s，远小于 A/B 区域边界值 2.8 mm/s，结论是振动品质在 A 区域[12]。

不同频率振动的能量是不一样的，对机器的危害程度也是不一样的。最好的实例是舰船机器，波浪激发的振动位移不是以 μm 计，而是以 mm 或 cm、甚至 m (10^6 μm) 计，这样大的振动位移没有把机器振坏。对机器影响大的是振动加速度，如果振动加速度大于 1.0 g (g 为重力加速度)，则机器将被抛离基础。设想振动频率为 0.01 Hz，如果均方根振动速度为 2.8 mm/s，则相应的位移应为：$A = 225 \times 2.8/0.01 = 63\ 000$ μm；相应的加速度为 $a = 1.414 \times 2.8 \times 2 \times 3.141\ 6 \times 0.01 = 0.249$

$mm/s^2 = 0.000\ 025\ g \ll 1.0\ g$。可见，以 μm 计的振动位移很大，但以重力加速度计的振动加速度却极小（注：ISO 标准总论中注明对极低频振动，因性质没有探讨清楚，振动位移、振动速度与振动加速度是否与常见振动频率一样地进行换算，还有待研究，这里只是作简单讨论，不作定量研究）。

（2）动平衡品质用的是振动烈度，单位（量纲）与振动位移不同，而与振动速度相同。两个几何相似的转子，由相同的材料制成，转子表面以相同的线速度运行，在轴承单位承压相同的条件下，推导相同动平衡品质的条件是不平衡量偏心距 e 与角速度 ω 乘积 $e\omega$ 相等。

两个转子的几何比例为 c，在下面的方程中，下标1表示转子1，下标2表示转子2，s 表示轴承面积

$$\frac{F_1}{s_1} = \frac{m_1 e_1 \omega_1^2}{s_1} = \frac{F_2}{s_2} = \frac{m_2 e_2 \omega_2^2}{s_2},$$

由线速度相等条件，$r_1\omega_1 = r_2\omega_2$，得

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{r_2}{r_1} = c;$$

又由 $\frac{s_2}{s_1} = c^2$ 与 $\frac{m_2}{m_1} = c^3$，得

$$\frac{m_2 e_2 \omega_2^2}{s_2} = \frac{c^3 m_1 e_2 \frac{\omega_1}{c}\omega_2}{c^2 s_1} = \frac{m_1 e_1 \omega_1 \omega_1}{s_1},$$

$e_1\omega_1 = e_2\omega_2$。

德国工程师首先推导出了这个公式，他们认为衡量振动的品质，振动速度更合适，所以在1964年最早提出了振动评估标准 VDI 2056[7]。

2.4　在额定转速（工作频率）附近的振动控制值

比较了额定转速下的振动控制值，还要比较额定转速附近频率范围内的振动控制值，ISO 10816.2 的控制频率范围为 ±10%，控制值是均方根振动速度不超过 C/D 区域边界值，在此频率范围外的最大值是：半速机组为 8.5 mm/s，全速机组为 11.8 mm/s。GB 50040 的控制频率范围为 ±25%，在此频率范围外的最大值是额定转速下控制值的 1.5 倍。

笔者认为应该区分长期几十年稳定运行与短时间运行的控制要求。需要严格限制的是长期稳定运行的控制值，短时间运行的控制要求应该放宽。外高桥 2 期柔性立柱横向振动，在启动停机过程中达到 250 μm 的数值，远超过 GB 50040 标准的控制值 30 μm，至今也正常运行。

德国标准 DIN 4024 规定，在启动或停机过程中其他转速范围内，如果在额定转速 ±10% 范围内没有出现基础的固有频率，有限元动力分析就可以不必进行，这是从实践中得出的结论。

2.5　ISO 10816 是一套完整的标准体系

标准 ISO 10816 是一套完整的标准体系，涵盖汽轮发电机、汽动与电动给水泵、汽轮压缩机、燃气轮机、水轮机等回转类动力机器，本文只讨论了汽轮发电机的情况。汽动与电动给水泵的标准也需要与时俱进，包括扰力必须与机器转子动平衡等级联系起来，才能赋予扰力物理意义。基础振动控制值也必须与转子动平衡等级联系起来，才有合理的解释。

国际标准 ISO 10816 已经在郑州机械研究院等单位的主持下转化为国家标准 GB/T 6075。

3　结论与建议

由以上讨论，可以得出以下结论：

（1）国际标准 ISO 10816.2 和我国国家标准 GB 50040 都是经过了大量的工程实践检验的，是可靠的。只要领会了每个标准的核心内涵，无论采用哪个标准进行汽轮发电机基础动力分析和设计，都能保证机器的安全运行。

（2）国际标准 ISO 10816.2 控制物理量采用振动速度，反映了不同频率的振动分量的贡献，不需要针对不同频率进行转换，应用更加方便。

（3）国际标准 ISO 10816.2 的扰力输入和控制值更加符合当今国内外机械制造水平和平衡等级，与实测的振动也更加吻合。

（4）对于汽轮发电机基础，国际标准 ISO 10816.2 比 GB 50040 相对而言略为严格。

（5）国际标准 ISO 10816.2 已转化为国家标准 GB/T 6075，适用于回转类动力机器的振动评判。

（6）对于国外工程和国内引进机型，国际标准 ISO 10816.2 也适用于汽轮机发电机组基础。

在此基础上，笔者提出如下建议：

1）应加强国家标准 GB/T 6075（ISO 10816.2 转化而来）在回转类机器基础设计中的应用，积累经验；

2）条件成熟后，在 GB 50040 修编之时将 ISO 10816.2 吸纳到我国《动规》之中。

参考文献:

[1] DIN ISO 10816 - 1: 1995, Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 1: General guidelines [S].

[2] ISO 10816 - 2: 1996, Mechanical vibration—Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts—Part 2: Large land-based steam turbine generator sets in excess of 50 MW [S].

[3] ISO 1940/1, Mechanical vibration—Balance quality requirements of rigid rotors—Part 1: Determination of permissible residual unbalance [S].

[4] DIN 4024 Part 1: 1988, Machine foundations—Flexible structures that support machines with rotating elements [S].

[5] DIN 4024 Part 2: 1991, Machine foundations—Rigid foundations for machinery subject to periodic vibration [S].

[6] GB 50040—1996, 动力机器基础设计规范 [S].

[7] VDI 2056: 1964, Beurteilungsmassstaebe fuer mechanische Schwingungen von Maschinen [S].

[8] 尹学军,王伟强,沙曾炘. 旋转机械转子平衡品质等级、扰力与基础台板振动评定的标准[C]//马绅. 大型汽轮发电机基础设计研究与实践,北京:中国电力出版社,2012:44 - 49.

[9] 罗国澍, 翟荣民, 邵晓岩. 汽轮发电机基础动力分析方法与标准综述 [C] //马绅. 大型汽轮发电机基础设计研究与实践, 北京: 中国电力出版社, 2012: 25 - 32.

[10] 翟荣民,罗国澍,周建军,等. 大型汽轮发电机基础设计研究的发展与思考[C]//马绅. 大型汽轮发电机基础设计研究与实践,北京:中国电力出版社,2012:3 - 9.

[11] 河南省电力勘测设计院, 国家电力公司电力建设研究所. 鸭河口电厂 (2 ×350 MW) 汽轮发电机弹簧基础测试报告 [R]. 郑州: 河南省电力勘测设计院, 2000.

[12] 李京胜, 林建, 徐殷. 中国计量科学研究院: 测量证书 LXvs2003 - 1000 [R]. 青岛: 隔而固 (青岛) 振动控制有限公司, 2003 - 07 - 22.

Vibration Criteria for Dynamic Machine Foundation

YIN Xue-jun, WANG Wei-qiang, GU Chao-hong, SHA Zeng-xin

(*Gerb* (*Qingdao*) *Vibration Control Co.*, *Ltd.*, *Qingdao* 266108, *China*)

Abstract: The Criteria ISO 10816 is prepared for the rotating type dynamic machine and confirmed for the civil engineers in Europe, available for the dynamic machine foundation, but not a consensus among domestic engineers. Discussion about the vibration of both the foundation and the dynamic machine is introduced. Our conclusion is that both the international code ISO 10816.2 and the national code GB 50040 are reliable, affer numerous engineering practice. Safety operation can be guaranteed no matter whatever code is used. Vibration velocity is used as the controlled unit for ISO 10816.2, for the contribution of different frequency components. Frequency transferring among components is not needed. The exciting force and the vibration criteria for ISO 10816.2 is available for foreign and domestic current machinery manufacturing level and the balancing grade, and matching with the measurements. International code ISO 10816 has been transferred into national code GB/T 6075, available as the vibration criteria for rotating dynamic machine. ISO 10816.2 is also available for TG foundation for those export projects and imported domestic applications. Application is suggested for national codes GB/T 6075 for the foundation of the rotation machines to accumulate the experience. International code ISO 10816.2 is suggested for the national code GB 50040 when Code GB 50040 is in editing and revision.

Key words: dynamic machine; spring supported foundation; design criteria