

DOI: 10.19666/j.rlfed.202402027

水电机组振动评价和测点布置现行标准 对比分析

李志华¹, 李明², 王远洪², 王猛³, 郭金忠²,
刘殿程², 夏绍云¹, 马优¹, 周科衡²
(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
2.华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650206;
3.郑州航天电子技术有限公司, 河南 郑州 450066)

[摘要] 对比了行业标准和国家标准中关于水电机组振动/摆度的越限评价和测点布置要求, 阐述了工程现场振动/摆度测点的布置等, 发现评价标准、测点布置标准和工程现场之间出现了振动评价边界条件、评价准则、评价工况、测点布置等不一致或不明确的现象。分析发现: 各标准间不统一之处均出现在固定部件的振动评价和测点布置, 对机组轴系径向振动(摆度)的规定相对统一; 各标准中的不一致现象, 不利于标准广谱应用, 且容易产生歧义和分歧; 评价标准和测点标准不一致的现象, 不利于大型或者巨型机组现场全面振动评价; 所有标准中评价准则中缺少振幅越限幅度与累计时长权重系数考虑, 不利于水电机组新型角色下振动故障及状态检修开展和数据积累。该结论可为水电机组振动标准编制、安装验收、运行管理和科研试验等从业人员提供帮助和参考。

[关键词] 振动; 摆度; 振动评价; 测点布置; 不统一

[引用本文格式] 李志华, 李明, 王远洪, 等. 水电机组振动评价和测点布置现行标准对比分析[J]. 热力发电, 2024, 53(11): 38-46. LI Zhihua, LI Ming, WANG Yuanhong, et al. Comparative analysis of current standards for vibration evaluation and measuring points layout in hydropower units[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(11): 38-46.

Comparative analysis of current standards for vibration evaluation and measuring points layout in hydropower units

LI Zhihua¹, LI Ming², WANG Yuanhong², WANG Meng³, GUO Jinzhong²,
LIU Diancheng², XIA Shaoyun¹, MA You¹, ZHOU Keheng²
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650206, China;
3. Zhengzhou Aerospace Electronic Technology Co., Ltd., Zhengzhou 450066, China)

Abstract: The requirements of over limit evaluation and measuring points layout of vibration/swing in hydropower units in industry standards and national standards are compared. The layout of vibration/swing measurement points on the project site is also described. It is found that the standards related to evaluation and the ones related to measuring points arrangement are inconsistent or unclear with the engineering site, such as vibration evaluation boundary conditions, evaluation criteria, evaluation working conditions and measuring points arrangement. Analysis shows that all the differences between the standards appear in vibration evaluation and measuring points arrangement for fixed parts, and the provisions on radial vibration (swing) of the unit shafting are relatively unified. Inconsistencies in all standards are not conducive to broad-spectrum application, and are prone to ambiguity and disagreement. The phenomenon that the evaluation standard is inconsistent with the measuring points standard, is not conducive to on-site comprehensive vibration evaluation of large or giant units.

收稿日期: 2024-02-29

第一作者简介: 李志华(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水力发电机组监督、流场分析、故障诊断、调节控制系统性能测试等, lizhihua@tpri.com.cn.

通信作者简介: 李明(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水电机组运维检修及技术管理, 13264810@qq.com.

All the standard evaluation criteria lack the consideration of weight coefficient of amplitude exceeding the limit and cumulative duration, which is not conducive to the development of vibration fault and condition based maintenance, and data accumulation in the new role of hydropower units. The conclusion is expected to provide analytical help and reference for the practitioners of vibration standard compilation, installation and acceptance, operation management and scientific research and test of hydropower units.

Key words: vibration; swing; vibration evaluation; measuring points arrangement; disunity

我国水电资源丰富, 目前为止我国已建成投产的水电机组装机容量超过 3.9 亿 kW, 其中常规电站水电机组装机容量已超过 3.5 亿 kW, 抽水蓄能电站可逆式水电机组装机容量超过 0.4 亿 kW, 水电机组装机总容量和数量均位居世界第一。水电机组参数、形式、结构等均较繁多, 则主流常规水力发电机组按照水轮机和发电机及可调部件名称归纳, 具体见表 1。

表 1 主流水电机组类别
Tab.1 Main categories of hydropower units

名称	类别	容量/MW	转速/ (r·min ⁻¹)	设备型号
发电机	伞式	700.0	150.0	SF700-40/12770
	半伞	125.0	87.5	SF120-32/8360
	悬式	80.0	428.6	SF80-14/5100
水轮机	轴流定桨	12.5	166.7	ZDJP502-LH-333
	轴流转桨	140.0	107.1	ZZD827-LH-740
	贯流定桨	1.0	500.0	GDJ530-WZ-120
	贯流转桨	12.0	115.4	GZ995-WP-430
	混流式	700.0	150.0	HL153-LJ-660
	水斗式			
调节形式	单调	230.0	100.0	HLA1323-LJ-660
	双调	50.0	107.1	ZZ-HL-620
轴线布置	横轴	35.1	93.7	GZ-WP-615
	竖轴	20.5	333.3	HLA153-LJ-180
单机容量 P/MW	1 ≤ P ≤ 1 000	81.6	600.0	HL(C)-LJ-230
转轮直径 D1/mm	1 500 ≤ D1 ≤ 12 000	140.0	107.1	ZZD827-LH-740
定子直径 R/mm	3 000 ≤ R ≤ 20 000	350.0	125.0	SF350-80/18900
机架直径 R/mm	3 000 ≤ R ≤ 22 000	700.0	150.0	SF700-40/12770

水电机组在新型电力系统结构下, 具有调峰、调频、调相、备用电源等调节作用, 其工作环境较为恶劣、瞬变。因其承担瞬变调峰能力较强, 机组大部分转动部件和部分固定部件均承受水力-机械-电磁耦合作用力, 金属部件瞬变应力释放常伴随着复杂、多变的非线性剧烈振动^[1-6]。因此, 在水电机组生产运行过程中监视其振动摆度的幅值和变化趋势至关重要。机组振动评价和测点设置标准在生产中应用较为广泛。基于旋转机械测点位置及

频谱特性, 利用支持向量回归和变分模态基本原理, 关于机组故障诊断开发及一些振动特性方面的研究^[7-10], 在水电机组振动边界和机组运行性能的评价方面取得了较好的效果。

水电机组无论是新机组投产、修后启动还是稳定运行期间, 需依据技术标准进行振动幅值测量和评价。因其结构尺寸、结构形式、主要参数等较为复杂, 故涉及水电机组振动评价和测点布置的标准也很多, 现行行业标准和国家标准共有 15 本。其中, 行业标准 6 本, 国家标准 9 本, 与国际对标 2 本, 涉及机组测点布置的行业标准/国家标准有 1 本/2 本。具体标准名称、编号等的统计见表 2。

表 2 涉及水电机组振动评价和测点布置的标准
Tab.2 Standards for vibration evaluation and measuring points layout of hydropower units

标准号	标准名称	备注
DL/T 817	立式水轮发电机检修技术规程	发电机-评价
DL/T 827	灯泡贯流式水轮发电机组启动试验规程	机组-评价
NB/T 42052	小水电机组启动试验规程	机组-评价
NB/T 42127	小水电机组验收检验导则	机组-评价
DL/T 507	水轮发电机组启动试验规程	机组-评价
GB/T 15468	水轮机基本技术条件	水轮机-评价
GB/T 8564	水轮发电机组安装技术规范	机组-评价
GB/T 11348.5	旋转机械转轴径向振动的测量和评定第 5 部分: 水力发电厂和泵站机组	机组-评价/ 测点布置
GB/T 21718	小型水轮机基本技术条件	水轮机-评价
GB/T 22581	混流式水泵水轮机基本技术条件	水轮机-评价
GB/T 32584	水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定	机组-评价
GB/T 7894	水轮发电机基本技术条件	发电机-评价
GB/T 28570	水轮发电机组状态在线监测系统技术导则	机组-测点布置
GB/T 17189	水力机械(水轮机、蓄能泵和水泵水轮机)振动和脉动现场测试规程	机组-测点布置
DL/T 556	水轮发电机组振动检测装置设置导则	机组-测点布置

笔者详细研究了现行的 15 本标准, 因水电机组尺寸跨度大, 结构形式、机组类型繁多, 运行参数差异大和标准制定的年代等客观因素, 为了避免不同机型、不同参数、不同容量出现混淆情况, 针对标准适用范围进行了统计, 结果见表 3。比对发现: 存在标准中部件命名不统一, 甚至工程实际中已安装测点, 但是缺少评价标准; 或者测点布置标

准中有要求,但是评价标准中无评价指标等现象。现对国家标准和行业标准中不一致、不完善、数值不统一等问题和矛盾,进行列举和分析。

表3 标准适用范围统计
Tab.3 Statistics of standards application scopes

类型	范围	标准号
功率 P/MW	$0.5 \leq P < 15$	NB/T 42052、NB/T 42127、GB/T 21718
	$P \geq 1$	GB/T 11348.5、GB/T 32584
	$P \geq 5$	DL/T 827
	$P \geq 10$	GB/T 15468
	$P \geq 15$	DL/T 817、GB/T 8564
直径 D/m	$P \geq 25$	DL/T 507、GB/T 7894
	$D \geq 2.5$	DL/T 827
	$D \leq 3.3$	NB/T 42052、NB/T 42127、GB/T 21718
其他	$D \geq 3.3$ 或 $D \geq 1.0$	GB/T 15468、GB/T 8564
	功率和直径未明确规定的	GB/T 22581、GB/T 28570、GB/T 17189、DL/T 556

为了便于分析比对相关差异,将表2和表3中标准分为评价标准和测点布置标准。评价标准包括:DL/T 817、DL/T 827、NB/T 42052、NB/T 42127、DL/T 507、GB/T 15468、GB/T 8564、GB/T 11348.5、GB/T 21718、GB/T 22581、GB/T 32584、GB/T 7894。测点布置标准包括:GB/T 28570、GB/T 17189、DL/T 556。

1 标准中振动描述

1.1 振摆定义

机械振动为物体或者物体的一部分在某一中心位置两侧所做的往复运动,谐振是最简单的机械振动。水电机组振动是指顶盖、机架、铁芯和机座或者其中一部分在机组旋转运行时,因自身和水力、电气等原因产生的相对于平衡位置随时间的往复变化,其振动通常采用低频速度传感器进行测量,一般指绝对振动。

水电机组摆度即运动物体做圆周运动时往复摆动的幅度。水电机组摆度分为盘车摆度和运行摆度,本文重点讨论运行摆度。水电机组运行摆度为水电机组转动部分的运动中心和固定部分的几何中心的相对偏差,即转动部分相对几何中心发生量值大小及方向连续不断地交替变化的相对振动^[11],通常采用非接触涡流传感器进行测量,一般指相对振动。

1.2 现场测点

为了实现机组各部位振摆监视和保护,大型或者巨型轴流式机组和混流式机组近年工程现场布置的在线监测和振摆保护测点主要有:机组 X/Y 方

向顶盖水平振动、X/Y 方向顶盖垂直振动、X/Y 方向下机架水平振动、X/Y 方向下机架垂直振动、X/Y 方向上机架水平振动、X/Y 方向上机架垂直振动、X/Y 方向定子铁芯水平振动、X/Y 方向定子铁芯垂直振动、X/Y 方向定子机座水平振动、X/Y 方向定子机座垂直振动、X/Y 方向水导摆度、X/Y 方向下导摆度、X/Y 方向上导摆度等摆振测点。大型或者巨型贯流式机组在线监测和振摆保护测点主要有: +X/-Y/+Z 方向水导轴承径振动、+X/-Y/+Z 方向组合轴承振动、+X/-Y/+Z 方向灯泡头振动、X/Y 方向水导轴承摆度、X/Y 方向组合轴承摆度等测点。大型或者巨型轴流式机组和混流式机组一般设置 6 个摆度测点, 20 个振动测点, 1 个键相测点; 大型或者巨型贯流式机组一般设置 4 个摆度测点, 9 个振动测点, 1 个键相测点。上述测点涉及传感器类型有低频速度传感器和非接触涡流传感器 2 种, 工程应用现场振摆测点与标准均存在一定差异。

1.3 标准中测点描述统计

1.3.1 振动测点描述

分别按照双幅振动、通频及倍频双幅振动和驱动/非驱动端安装位置区分的分类统计 12 本“评价标准”中的测点评价名称及对应标准编号, 结果见表 4—表 6^[12-27]。

表4 双幅振动评价标准统计
Tab.4 Corresponding statistics of standards names and numbers for double-amplitude vibration evaluation

机组类型	振动类型	标准号
发电机	带推力轴承支架的垂直振动	GB/T 8564、DL/T 817、NB/T 42052、NB/T 42127、GB/T 32584、GB/T 7894
	立式机组带导轴承支架的水平振动	
	定子铁芯部位机座水平振动	
	定子铁芯振动(100 Hz 双振幅值)	
水轮机	立式机组顶盖水平振动	GB/T 8564、NB/T 42052、GB/T 15468、GB/T 21718、GB/T 22581、GB/T 32584、GB/T 7894
	顶盖垂直振动	
水轮机 + 发电机	卧式机组各部轴承垂直振动	GB/T 8564、NB/T 42052、NB/T 42127、GB/T 15468、GB/T 21718、GB/T 32584、GB/T 7894
	各部轴承水平振动	
水轮机 + 发电机	贯流式机组推力支架的径向振动	GB/T 8564、DL/T 827、NB/T 42052、GB/T 32584、GB/T 7894
	各导轴承的径向振动	
	灯泡头的径向振动	

表 5 区分通频和倍频双振幅的评价标准统计
Tab.5 Statistics of standards names and numbers for direct frequency and double-frequency double-amplitude vibration evaluation

机组类型	振动类型	标准号
发电机	立式	DL/T 507
	带推力轴承支架的垂直振动 (通频值)	
	带导轴承支架的水平振动 (转频值)	
	定子铁芯部位机座水平振动 (转频值)	
水轮机	立式	DL/T 507
	机座	
	顶盖垂直振动 (通频值)	

表 6 区分电机驱动和非驱动端的评价标准统计
Tab.6 Statistics of standards names and numbers for vibration evaluation in motor driven and non driven ends

机组类型	振动类型	标准号
水轮发电机	立式	GB/T 11348.5
	卧式	
	贯流式	
水轮发电机组摆度	立式	GB/T 32584
	卧式	
	贯流式	
水轮发电机组振动	立式	GB/T 32584
	卧式	
	贯流式	

统计 3 本“测点标准”中对振摆测点布置的描述,见表 7、表 8^[24-26],其中表 8 比较了 GB/T 28570 和 DL/T 556 关于测点布置的要求,二者在不同容量发电机关于测点布置个数有所增减。

表 7 测点标准对测点的描述
Tab.7 Descriptions of measuring points in “measuring points standard”

机组类型	测点类型	标准号
水轮发电机组	立式	GB/T 17189
	混流或可逆混流	
	机座	
	上机架、下机架、顶盖水平振动测点	
	上机架、下机架、顶盖垂直振动测点	
	定子机座水平测点	
	定子机座垂直测点	
	立式轴流	
	机座	
	灯泡贯流式	
水轮发电机组	立式	DL/T 556
	冲击式	
	机座	
	组合轴承、水导轴承径向水平和轴向水平	
	组合轴承、水导轴承径向垂直	
	灯泡头径向水平和垂直测点	
	转轮室径向水平和垂直测点	
	上机架、下机架水平振动测点	
	上机架、下机架垂直振动测点	
	水导轴承座水平振动测点	

表 8 标准 DL/T 556 与 GB/T 28570 的测点位置比较
Tab.8 Comparison of measuring points positions between DL/T 556 and GB/T 28570

机组类型	功率 P/MW	振动类型
立式混流或可逆混流机组	25 < P	DL/T 556 较 GB/T 28570 缺少定子铁芯水平振动和定子铁芯垂直振动
	P ≤ 100	
灯泡贯流式机组	P ≤ 25	DL/T 556 较 GB/T 28570 增加定子铁芯水平振动和定子铁芯垂直振动
		DL/T 556 较 GB/T 28570 增加定子铁芯水平振动和定子铁芯垂直振动
卧式机组		DL/T 556 较 GB/T 28570 增加组合轴承、水导轴承径向水平和轴向水平,组合轴承、水导轴承径向垂直,定子铁芯水平、垂直振动

1.3.2 标准中摆度测点描述

GB32584、GB/T 11348.52 标准采用概率统计的方法,将机组相对摆度运行的限制划分为 A、B、C 3 区进行评价,并将主轴摆度描述为径向振动或者轴振,其余评价标准均采用机组摆度的叫法,评价准则均采用不大于导瓦双面(总)间隙的 70%或 75%的评价边界。摆度标准的评价较为统一,仅越限数值不同。

2 振动评价不统一

根据表 4—表 8 内容并结合工程现场设置的测点,发现 15 本关于水电机组振动测点布置和评价准则有 4 种不统一之处可归纳为如下。

2.1 振动评价边界条件不统一

2.1.1 频谱边界

振动特征描述。通频幅值为某点随平衡位置往复变化所有频段的叠加幅值。倍频幅值为某点随平衡位置往复变化 N 倍转频/工频叠加幅值,通频和倍频均按照频谱倍数进行的定义。双幅振动为某点随平衡位置往复变化时在 1 个周期或多个周期内的最大波峰-波谷幅值。

水电机组任何一个部位的振动均可分解为通频双幅振动值、转频双幅振动值、通频单幅振动值、转频单幅振动、极频双幅振动值等特征量进行分析和评价,因测点位置不同监视部件振动特征亦不同。“评价标准”中关于双幅振动、通频振动、转频振动、极频振动的分类见表 9。由表 9 可以看出,“评价标准”中大部分明确了双振幅值,但也存在未明确采用通频还是转频的情况,其中 DL/T 827 对振幅和频谱均未明确。虽然在工程现场应用中通常采用通频双幅和转频双幅进行振动量级的评价,但鉴于

标准的权威性,为了使机组振动评价更科学合理,验收评价、性能评价及振动区评价结果无争议,“评价标准”应明确测点位置幅值边界和频谱类型。

表 9 评价标准的频谱振动分类
Tab.9 Classification of spectrum vibration in “evaluation criteria”

序号	内容	标准号	备注
1	明确双振幅值但未明确频谱范围	DL/T 817、NB/T 42052、NB/T 42127、GB/T 15468、GB/T 8564、GB/T 11348.5、GB/T 21718、GB/T 22581、GBT 7894	双幅振动
2	未明确双幅/频谱范围	DL/T827	
3	明确通频/转频和双振幅值	DL/T 507	双振幅值+通频/转频
4	明确通频/转频和双振幅值	GB/T32584	明确 0.25~3.00 倍 转频范围

根据振动频谱分析傅里叶变换至频谱计算基本公式可知,电磁原因振动幅值采用通频容易被弱化失真,水力原因振动幅值采用通频容易被放大失真,机械因素振动幅值因悬臂结构和分块结构采用通频失真的原因各不相同。因此,不同频谱振动幅值计算和实测值差异较大,甚至影响评价结论,某厂振动幅值统计见表 10,可见不同频谱结果差异较大。

表 10 不同频谱类型幅值偏差统计
Tab.10 Statistics of amplitude deviations of different spectrum types

机组工况		测点名称	转频 双幅/ μm	通频 双幅/ μm	极频 双幅/ μm
额定转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	额定 功率/%				
125	95	铁芯水平 1	6.0	44.9	1.7
		铁芯水平 2	6.5	41.4	2.5
150	101	定子机座水平	40.4	161.0	6.2
		上机架垂直	2.6	15.4	
	空载	顶盖垂直振动	8.0	45.0	

2.1.2 评价数值

1) 振动数值在“评价标准”中,对相同转速区间振动越限值规定不统一。如文献[18]对转速在 100 r/min 以内的机组定子机座中双幅振动值较文献[23]及其他“评价标准”大 10 μm ;文献[18]中采用转频双幅振动值进行评价,而文献[23]未明确转频还是通频,标准之间存在不一致的地方。又如:关于机组转速在 375 $\leq n < 750$ r/min 内立式水轮机顶盖的水平振动值和垂直振动值,文献[16]和文献[23]较其他“评价标准”评价边界值分别大 10 μm 和 20 μm 。

2) 摆度数值“评价标准”中对机组摆度值规定有 2 种要求:摆度限值 I 为主轴摆度(振动)双幅值不超过轴承总(双边)间隙的 70%或符合机组合同规定;摆度限值 II 为主轴摆度(振动)双幅值不超过轴承总(双边)间隙的 75%。统计结果见表 11。

表 11 评价标准的摆度限制值统计
Tab.11 Statistics of swing limit values

序号	限制名称	标准号	备注
1	不超过轴瓦双边间隙 0.70 倍	DL/T 827、DL/T 507、GB/T 32584、GB/T 15468、GB/T 8564	越限超标
2	不超过轴瓦双边间隙 0.75 倍	DL/T 817、NB/T 42052、GB/T 22581、GB/T 7894	越限超标
3	未明确运行摆度限制	NB/T 42127	仅盘车摆度,未涉及稳定摆度
4	明确摆度限制值	GB/T 11348.5	超标有缓冲区

2.1.3 转速区间

转速是水电机组核心参数之一,其大小与振动幅值关系较为密切,因此在振动评价和故障分析中转速也是关键标示参数之一。以 100 r/min 和 250 r/min 转速的机组为例,总结“评价标准”对转速的划分主要有 2 种:转速区间描述 I 为 100 $\text{r}/\text{min} \leq n < 250$ r/min ;转速区间描述 II 为大于 100~250 r/min ,统计结果见表 12。

表 12 评价标准的转速区间表述统计
Tab.12 Statistics of speed range expressions

转速区间/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	标准号
100 $\leq n < 250$	DL/T 817、DL/T 827、NB/T 42127、GB/T 8564、GB/T 21718、GB/T 7894、GB/T 15468
>100~250	NB/T 42052、DL/T 507、GB/T 11348.5、GB/T 22581、GB/T 32584

机组转速区间为大于 100~250 r/min 时,按照数学意义区间定义可理解为:1、[250, $+\infty$) 区间内的数据;2、(100, 250] 区间内的数据;3、(100,250) 区间内的数据;4、[100, 250) 区间内的数据。结合标准转速划分,则上述转速区间用 100 $\text{r}/\text{min} \leq n < 250$ r/min 的表述方法更为规范和准确。

2.2 测点名称不统一

2.2.1 测点描述

在“评价标准”中,有些标准采用了发电机驱动端、非驱动端和水导轴承描述机组不同部位,该描述方式与工程现场常用及文献[27]机电设备名称

不一致。虽然该标准中对上述部位名称进行了图示解释,与工程现场和水电机组振动特征监测还有差距。如文献[22]水导轴承的振动测点,从标准示意图中并不能分辨出是顶盖振动还是水导油盆处测点。虽然部分小机组和贯流式机组因顶盖尺寸较小,现场将水导振动测点布置于水导油盆盖板上,但大中型和巨型机组顶盖振动测点均布置于顶盖上,且“测点标准”中明确要求应为顶盖振动而非油盆盖板上的振动,这在机组现场振动评价中容易产生偏差或歧义。故根据水电机组特点可将文献[22]标准中的发电机驱动端理解为其他标准中的下导或组合轴承或下机架处,发电机非驱动端理解为其他标准中的上导或者滑环端或上机架处。标准应根据不同部位不同振动量产生的破坏特征规范测点描述,以免产生歧义。

2.2.2 测点布置

由表 7 可见,“测点标准”中规定立式水电机组应设置定子机座垂直振动测点、定子铁芯水平/垂直振动测点,“评价标准”中无垂直振动的评价边界和指标,且大型或者巨型机组均布置了该测点。“测点标准”规定贯流式机组应布置组合轴承、水导轴承轴向水平测点,“评价标准”无水导轴承轴向测点的振动评价边界和数据,且大型或者巨型贯流机组均布置了该测点。“测点标准”规定卧式机组各轴承均需安装垂直振动测点和水平振动测点,但部分“评价标准”中只有水平振动评价边界和数据,未规定垂直振动评价边界和数据,详见表 4—表 6。“测点标准”和“评价标准”之间未完全统一。

2.3 振动评价准则不统一

“评价标准”的评价准则概括以下 3 种:

1) 准则 I 利用振幅进行评价,采用 A、B、C 3 个区进行振动和摆度评价,其中 A 区为可接受区域,B 区为采取进一步措施减低振动或者观察区域,C 区为需立即停机查明原因区域。3 个区域的划分是通过采集不同机组的振动数据,利用概率统计并符合 Burr 分布规律,按照 50% 置信概率得到的边界线值。3 个区域的划分具有很强的工程应用背景。

2) 准则 II 变化幅值评价准则,即根据机组振动变化趋势,振动幅值随着时间显著变化,变化量超过基准值的 25%,表示可能事故已经发生或者即将发生,应立即停机检查原因。

3) 准则 III 机组某部位在评价工况下通频或转

频双幅振动幅值超过边界限制值,即为超标或者禁止运行情况。

“评价标准”中的评价准则统计分类见表 13。

表 13 评价标准的评价准则分类
Tab.13 Classification of evaluation criteria

序号	评价准则	标准号
1	评价准则 I	GB/T 11348.5 GB/T 32584
2	评价准则 II	GB/T 11348.5 GB/T 32584
3	评价准则 III	DL/T 817、NB/T 42052、NB/T 42127、DL/T 507、GB/T 15468、GB/T 8564、GB/T 21718、GB/T 22581、GBT 7894

评价准则 I 和评价准则 III 均设置了振动幅值越限边界,但准则 I 根据工程应用实践结果设置了 1 个缓冲区即 B-C 区间,有较强的工程应用背景,更贴近工程实际。评价准则 III 系多数标准中采用的评价准则,与评价准则 I 和 II 有区别,因其定义简单、容易执行,在水电机组振动评价中受到广泛采用。

众所周知,机组部件破坏的特征值变化是一个渐变过程,或在某个工况和转速下才出现的渐变过程,且振动幅值变大小均为异常情况,并非越限才产生破坏。准则 II 充分考虑了机组振动幅值的变化趋势、变化速率、变化数量级、变化外部因素等得出了评价准则,采用该准则评价机组振动破坏征兆更贴近实际。准则 II 基准值获取受工况相同、运行参数相同、外部环境因素相同等诸多边界限制,准确获得基准数据较为困难。

根据工程实践情况,采用幅值越限即超标评价机组振摆与工程实际存在偏差,因此,在机组振动评价中应充分考虑到评价准则的不一致性和应用性。特别是在设计制造阶段、投产验证阶段和生产管理阶段应明确评价准则,在生产过程中应严密监视各部位的振摆变化幅值,根据变化幅值进行决策。

2.4 评价工况不统一

“评价标准”中的评价工况可以概括为以下 3 种: 1) 评价工况 I, 机组在除过速运行以外的各种运行工况; 2) 评价工况 II, 机组在除过速运行以外的各种稳定运行工况; 3) 评价工况 III, 带负荷工况即立式混流式机组 70%~100% 额定功率和立式水斗式机组 25%~100% 额定功率、其余机型均 35%~100% 额定功率运行; 4) 评价工况 IV, 未明确工况。根据“评价标准”中的评价工况分别进行统计,结果见表 14。

表 14 评价标准的评价工况分类
Tab.14 Classification of evaluation conditions

序号	评价工况分类	标准号
1	评价工况I	GB/T 11348.5、GB/T 15468
2	评价工况II	GB/T 11348.5、GB/T32584、DL/T 817、GB/T 7894、GB/T 8564、GB/T 21718、GB/T 7894、NB/T 42127
3	评价工况III	GB/T32584、GB/T 22581
4	评价工况IV	DL/T 827、DL/T507、NB/T 42052

水电机组自静止至满负荷运行大致可分为空转工况、空载工况、小负荷工况、稳定负荷工况、穿越振动区工况和过渡过程工况。其中，过渡过程工况包括停机惰走工况、开机工况、超速工况和事故停机工况。空转工况主要考察机组转动部分质量平衡情况、轴系轨迹、瓦温瓦隙等制造、安装质量。空载工况主要考验发电机经历无励磁、气隙磁通线性、气隙磁通膝点、气隙磁通非线性近饱和等几种磁场变化后，发电机振动特征的表现形式的工况。空载工况下每个阶段因谐波励磁磁场强度不同，会出现不同的磁拉力、机架或基座的振动频率和振动幅值。小负荷、稳定负荷、穿越振动区工况因导叶开度不同，机组流量、水流冲角不同，以及固定导叶与活动导叶叶道间的流速不同，水流速度水头不同，对固定高强度部件冲击形成的弹性振动特征不同，局部压力下负压面积和间隙射流流速不同，而造成振动特征不同。水电机组在不同的阶段和不同工况其振动特征或振动因变量均不一致，且幅值各有差异，因此在振动评价中应明确评价工况。

根据水电机组的运行特点，评价工况I应包括空转工况、空载工况、小负荷工况、稳定负荷工况、穿越振动区工况和部分过渡过程工况；评价工况II应包括空转工况、空载工况、小负荷工况和稳定负荷工况；评价工况III仅包括带负荷工况，对机组带负荷情况亦进行了具体规定，不包括空转、空载、小负荷、穿越振动区和过渡过程等工况；评价工况IV可理解为空转工况、升速开机和降速停机等过渡过程或稳定运行工况等。因此，评价工况I、评价工况II、评价工况III、评价工况IV在水电机组振动评价中的适用范围不同，在使用中应加以区分，避免在工程应用中出现歧义或偏差。

3 结 语

因水电机组受尺寸跨度大，结构形式、机型、运行参数繁多等客观因素的影响，相同机型和参数不同标准中确实存在振动评价边界不统一、测点名

称不统一、振动评价准则不统一和振动评价工况不统一的现象，对标准广谱应用和现场振动评价不利，易产生分歧。按照“测点标准”的相关要求，“评价标准”缺少相应测点评价边界数据，不利于大型或者巨型机组现场振动评价，容易产生争议。因涉及振动的标准较多且有诸多不统一，因此部分工程现场未按照“测点标准”布置相关测点，不利于机组振动监测和评价。在此呼吁在标准制定时，应对测点布置位置、转速区间描述等做到准确、规范和统一，避免歧义，提高标准的约束性和广谱性；在标准应用时，根据机组特点规避部分标准的不足。

评价准则I、评价准则II和评价准则III均未涉及越限振幅下运行时间影响系数和振幅越限程度影响系数之间的关系，即振动越限较小时长周期累计运行时间对机组造成的损伤程度，与振动越限较大时短时间运行对机组造成的损伤程度的比较和关联。振动水平较低越限长时间运行时加权系数在机组振动中如何分级，如何设置较为合理，同样振动越限较大短时间运行情况的加权系数如何设置。实现机组状态检修和智慧电厂须面临相同的问题。因此，呼吁标准制定单位、工程应用单位和生产管理单位应补充研究和完善标准中系数和数据。

随着大量光伏和风电等清洁能源接入电网，水电机组在电网中参与调峰调频的任务越来越重要。水电机组从带基负荷发电的角色逐渐向调峰调频的角色转变，评价工况II和评价工况III亦不能很好的适应在未来能源结构背景下对水电机组振动评价的需求，因此在标准修编和应用时应明确评价工况。

在应用评价准则评价机组摆度值越限或超标时，均采用0.70/0.75静态双边间隙进行摆度越限评价，未考虑动态间隙偏差对机组摆度测量的影响，因此建议在摆度评价时应参考分块瓦瓦温偏差对摆度间接反映，以客观评价机组摆度水平。

[参 考 文 献]

- [1] 张金剑, 张雷克, 吴嵌嵌, 等. 动静偏心电磁激励下水电机组碰摩转子-轴承系统弯扭耦合振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2021, 40(12): 236-245.
ZHANG Jinjian, ZHANG Leike, WU Qianqian, et al. Coupled bending-torsional vibration characteristics analysis for a rotor-bearing system with rub-impact of hydraulic generating set under both dynamic and static eccentric electromagnetic excitation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(12): 236-245.
- [2] 张雷克, 原倩, 王雪妮, 等. 基于HB-AFT方法的水电机组转子-轴承系统振动特性研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(16): 26-32.
ZHANG Leike, YUAN Qian, WANG Xueni, et al. A

- study on vibration characteristic of a rotor-bearing system for hydraulic generating set based on the HB-AFT method[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(16): 26-32.
- [3] 张雷克, 范宇宏, 张金剑, 等. 水轮发电机组横/轴有限元振动分析[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(14): 64-69. ZHANG Leike, FAN Yuhong, ZHANG Jinjian, et al. Finite element analysis on the transversal / axial vibration of a hydraulic generating set[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(14): 64-69.
- [4] 周济宸, 牛翔宇, 林贵海, 等. 一种水力机械压力脉动的分频模态提取方法及应用[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(8): 89-97. ZHOU Jichen, NIU Xiangyu, LIN Guihai, et al. Method for extracting frequency-domain modal parameters of pressure pulsations in hydraulic machines and its application[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(8): 89-97.
- [5] 韩文福, 倪晋兵, 桂中华, 等. 模型水轮机初生空化的特征谱提取识别方法[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(8): 69-79. HAN Wenfu, NI Jinbing, GUI Zhonghua, et al. Extraction and recognition method of characteristic spectra for incipient cavitation of model turbines[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(8): 69-79.
- [6] 李志华, 汪安海, 徐楠楠, 等. 水电机组振动评价和测点布置现行标准的对比分析[J]. *大电机技术*, 2024(1): 65-70. LI Zhihua, WANG Anhai, XU Nannan, et al. Analysis and research on the cyclical fluctuation of swing in hydro-generator set[J]. *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2024(1): 65-70.
- [7] 兰家法, 周玉辉, 高泽良, 等. 基于机器学习的水电机组劣化趋势预测模型[J]. *水力发电学报*, 2022, 41(12): 135-143. LAN Jiafa, ZHOU Yuhui, GAO Zeliang, et al. Model for predicting deterioration trends of hydropower units based on machine learning[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2022, 41(12): 135-143.
- [8] 刘旻, 邹小林. 基于 VMD 与包络谱分析的水力机械振动故障特性研究[J]. *中国农村水利水电*, 2023(12): 280-287. LIU Min, ZOU Xiaolin. Study on vibration fault characteristics of hydraulic machinery based on VMD and envelope spectrum analysis[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(12): 280-287.
- [9] 王淑青, 柯洋洋, 胡文庆, 等. 基于参数自适应 SVR 和 VMD-TCN 的水电机组劣化趋势预测[J]. *中国农村水利水电*, 2024(4): 193-198. WANG Shuqing, KE Yangyang, HU Wenqing, et al. Prediction of deterioration trend of hydropower units based on parameter adaptive SVR and VMD-TCN[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(4): 193-198.
- [10] 何葵东, 王卫玉, 金艳, 等. 基于 CNN-SVM 的水电机组智能故障诊断方法研究[J]. *水能源科学*, 2023, 41(4): 207-215. HE Kuidong, WANG Weiyu, JIN Yan, et al. Research on intelligent fault diagnosis method of hydroelectric generating unit based on CNN-SVM[J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(4): 207-215.
- [11] 黄景湖. 准确把握水电机组“摆度”的涵义[J]. *水电站机电技术*, 2004, 27(1): 4-5. HUANG Jinghu. Accurately grasp the meaning of “swing” of hydropower units[J]. *Electromechanical Technology of Hydropower Station*, 2004, 27(1): 4-5.
- [12] 立式水轮发电机检修技术规程: DL/T 817—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 8. Technical code for maintenance of vertical hydro-generators: DL/T 817—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 8.
- [13] 灯泡贯流式水轮发电机组启动试验规程: DL/T 827—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 8. Start-up test code for bulb Hydro-generating units: DL/T 827—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 8.
- [14] 小水电机组启动试验规程: NB/T 42052—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 9. Specification for small hydropower unit starting test: NB/T 42052—2015[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 9.
- [15] 小水电机组验收检验导则: NB/T 42127—2017[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 3. Guide for testing and acceptance of small hydropower units: NB/T 42127—2017[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 3.
- [16] 水轮发电机组启动试验规程: DL/T 507—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 8. Start-up test for hydro-generating units: DL/T 507—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2014: 8.
- [17] 水轮机基本技术条件: GB/T 15486—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020: 12. Fundamental technical requirements for hydraulic turbines: GB/T 15486—2020[S]. Beijing: China Standards Press, 2020: 12.
- [18] 水轮发电机组安装技术规范: GB/T 8564—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 11. Specification installation of hydraulic turbine generator units: GB/T 8564—2023[S]. Beijing: China Standards Press, 2023: 11.
- [19] 旋转机械转轴径向振动的测量和评定 第5部分: 水力发电厂和泵站机组: GB/T 11348.5—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 5. Mechanical vibration: Evaluation of machine vibration by measurements on rotating shafts: Part 5: machine sets in hydraulic power generating and pumping plants: GB/T 11348.5—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2009: 5.
- [20] 小型水轮机基本技术条件: GB/T 21718—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 11. Fundamental technical requirements for small hydraulic turbines: GB/T 21718—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021: 11.
- [21] 混流式水泵水轮机基本技术条件: GB/T 22581—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 10. Fundamental technical requirements for francis pump-turbine: GB/T 22581—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2009: 10.
- [22] 水力发电厂和蓄能泵站机组机械振动的评定: GB/T 32584—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 11. Evaluation of mechanical vibration for machine sets in hydraulic power plants and pump-storage plants: GB/T 32584—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 11.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 水轮发电机基本技术条件: GB/T 7894—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 4.

- Fundamental technical specifications for hydro generators: GB/T 7894 — 2009[S]. Beijing: China Standards Press, 2010: 4.
- [24] 水轮发电机组状态在线监测系统技术导则: GB/T 28570—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 11.
Technical guide of on-line condition monitoring system for hydraulic turbine and generator units: GB/T 28570—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2012: 11.
- [25] 水力机械(水轮机、蓄能泵和水泵水轮机)振动和脉动现场测试规程: GB/T 17189—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 7.
Code test field measurement of vibrations and pulsation in hydraulic machines(turbines, storage pumps and pump-turbines): GB/T 17189—2012[S]. Beijing: China Standards Press, 2018: 7.
- [26] 水轮发电机组振动检测装置设置导则: DL/T 556—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 6.
Guide for vibration monitoring device configuration of hydraulic turbine generator units: DL/T 556—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016: 6.
- [27] 水电站基本术语: GB/T 40582—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 10.
Basic terminology of hydropower station GB/T 40582—2021[S]. Beijing: China Standards Press, 2021: 10.

(责任编辑 杨嘉蕾)