

宁波溪口抽水蓄能电站 1 号机组盘车工艺综述

张思远, 张咏

浙江江能建设有限公司, 浙江 杭州 310000

摘 要 : 在水电站机组的检修作业里, 机组盘车是一道有着严苛工艺要求的关键工序。机组盘车, 也就是机组轴线的调整, 其质量状况对机组运行的稳定性以及使用寿命起着决定性作用。特别是对于具备正反两个旋转方向的抽水蓄能机组而言, 盘车的重要性更是不言而喻。本文着重对宁波溪口抽水蓄能电站 1 号机组的盘车工艺展开阐述, 期望能为相似机组的盘车工作提供一定的参考借鉴。

关 键 词 : 抽水蓄能电站; 盘车; 工艺

Summary of Turning Process for Unit 1 of Ningbo Xikou Pumped Storage Power Station

Zhang Siyuan, Zhang Yong

Zhejiang Jiangneng Construction Co., Ltd. Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : In the maintenance of hydropower station units, turning is a critical process with strict technological requirements. Unit turning, or the adjustment of the unit axis, plays a decisive role in the stability and service life of the unit. Especially for pumped storage units with forward and reverse rotation directions, the importance of turning is even more evident. This article focuses on the turning process of Unit 1 of Ningbo Xikou Pumped Storage Power Station, hoping to provide a reference for similar unit turning work.

Keywords : pumped storage power station; turning; process

一、概述

宁波溪口抽水蓄能电站采用半地下竖井式厂房, 该电站配备两台立轴可逆混流式水泵水轮机—发电电动机组, 单机容量为 40MW, 总装机容量达 80MW, 额定转速维持在 600r/min。机组轴线上分别设有上导、下导、水导这三部分轴承, 上导轴承分为 8 块导轴承及 8 块推力轴承, 推力轴承中心带有高压油孔, 以便机组开停机时高压顶起, 减小摩擦力, 下导分为 4 块导轴承, 水导为可拆解桶式免刮巴氏合金瓦。推力轴承与上导采用一个油槽, 机组在推力头及镜板安装到位后进行发电机单独盘车, 转子与中间轴承、水导轴承连轴后进行整体盘车^[1]。

二、盘车(轴线找正)目的

盘车是指采用人力、机械或电气的方式使机组轴系缓慢旋转, 测量轴系各特征部位的摆度以求得轴系空间位置状态的作业。

机组轴线是由机组转轴各段几何中心线连接而成, 同时还涉及该线与镜板工作面、法兰结合面所形成的空间角度关系。机组的转动部分由多段连接组成, 在每一个连接部位, 都存在着不垂直和不同心的情况, 进而导致轴线成为一条较为复杂的折线。机组轴线是用盘车的方式并通过测量机组各个位置的摆度值确定的。

当机组运行时, 若轴线存在曲折情况, 会导致各部件出现偏摆现象。由于机组轴线不垂直, 在运行过程中, 推力轴承会承受

周期性的不均匀负载。此外, 摆度过大对水导轴承及其密封也会产生显著影响, 进而使机组处于不稳定状态。因此, 应尽可能让轴线接近理想中心位置, 同时将机组轴线调整至与镜板工作面相互垂直的状态^[2]。

在测量位置, 摆度值 δ 指的是几何中心与旋转中心之间的差值。而摆度是由于转动部分的几何中心与旋转中心不重合造成的。我们进行盘车操作, 目的在于尽可能让转动部分的几何中心与旋转中心达到重合状态, 降低摆度数值, 提升安装品质, 确保机组能够稳定运行。其作用主要体现在以下三个方面:

- (1) 检查镜板的磨擦面相对于轴线的垂直度以及镜板水平度;
- (2) 检查机组轴线折弯情况及方向;
- (3) 确定机组旋转中心线, 依据旋转中心线与轴线的实际空间位置关系, 调整各导轴承间隙, 保证各导轴承和旋转中心线同心^[3]。

三、盘车方案

(一) 盘车前准备工作

(1) 机组在推力头及镜板安装完成, 确定卡环锁定到位, 检查空气间隙, 四周均匀, 转子上无异物, 与固定件无触碰点, 进行发电机单独盘车, 转子与中间轴承、水导轴承连轴后进行整体盘车;

(2) 上导、推力轴承回装结束转动重量转已换到推力轴

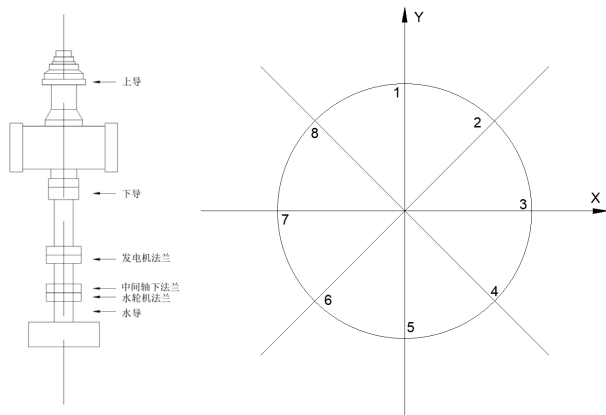
承上；

（3）推力轴承油槽内的油满足高压减载油泵启动的需要；

（4）高压油泵操作机构动作灵活；

（5）为有效避免转子在旋转过程中出现水平方向的位移，我们采用推力轴承处的导轴瓦进行限位，上导瓦盘车间隙 $\leq 0.02\text{mm}$ ；

（6）在机组轴线方向上设有6个监测断面：依照国标要求设上导轴颈、下导轴颈、水导轴颈3个监测断面，并增加发电机法兰、中间轴下法兰、水轮机轴法兰3个监测断面用于校检数据，将检测断面在对称方向上分成8等份，用于测量记录摆度值；（见图1、图2）



> 图1机组轴线6个监测断面示意 > 图2监测断面对称方向八等分示意

（7）盘车前检查水轮机迷宫环间隙、发动机空气间隙、制动环与制动闸板的间隙满足要求；

（8）盘车百分表安装时，要在上导轴颈、下导轴颈、发电机法兰、水轮机法兰、水导轴颈处的 X、Y 方向各装一块，互为校检，表针对零；（应当注意，此处设置 X、Y 两个方向的百分表目的是互为校检，理论上数据应当是一致的，根据百分表读数分别作出的净摆度坐标曲线形式应当一致^[4]。）

（9）机组整体盘车时检查主轴密封及检修密封已拆除。

（二）盘车操作

根据本机组的结构特点，采用人工方法盘车：

（1）把1号盘车点对准 + Y 方向百分表指针，3号盘车点对准 + X 表指针；

（2）分别做好各起始点相应记录；

（3）在机组启动环节，开启高压油顶起装置，高压油在推力瓦和镜板之间形成具有一定厚度和承载能力的油膜，该油膜能够有效隔开推力瓦和镜板，避免两者直接接触，且在转子旋转期间一直保持；

（4）在转子上方，通过人工扶着上机架，以上机架为支撑，推动盘车工具使转子沿顺时针方向转动，Y 轴百分表指针与盘车2号点重合，此时 X 轴线百分表与4号盘车点重合，停止减载泵，解除外力，统一记录上导、下导、发电机法兰、水轮机法兰、水导轴承处百分表的读数；

（5）按上述方法依次完成各盘车点的测量；

（6）盘车结束后检查百分表的读数回零情况；

（7）确认盘车数据，可进行第二次盘车核对数据；

（8）上述工作结束后，再次启动高压减载泵，推动盘车工具使转子沿顺时针方向转动，随后停止施加外力，转子在惯性作用下平稳旋转一圈，在此过程中连续记录各盘车点通过百分表时的百分表读数，此盘车记录将对前两次盘车记录进行校核；

（9）计算出主轴倾斜值，对比盘车标准分析轴线情况，做出正弦曲线分析主轴摆度规律性；

（10）盘车轴线超差处理方法参考机组制造厂家提供的有关图纸、检修 / 维护使用手册等技术文件有关规定、参考安装时轴线调整方法。

（三）盘车标准

根据 GB/T8564-2023《水轮发电机组安装技术规范》10.5.7 检查调整机组轴线应当小于表1中规定的允许值。

本机组额定转速为600r/min，根据 GB/T8564-2023《水轮发电机组安装技术规范》发电机轴上、下导轴承处，轴颈相对摆度需严格控制在小于0.02mm/m，水轮机轴导轴承处轴颈相对摆度同样执行小于 0.02mm/m 的标准，绝对摆度的数值被限定在0.20mm 以内，则数据合格。

表 1 机组轴线各部允许盘车摆度值（双振幅）

轴名	测量部位	摆度类别	机组转速 n r/min				
			n < 150	150 ≤ n < 300	300 ≤ n < 500	500 ≤ n < 750	n ≥ 750
发电 机轴	上、 下导 轴承 处轴 颈	相对 摆度 mm/ m	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
水轮 机轴	导轴 承处 轴颈	相对 摆度 mm/ m	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02
		绝对 摆度 mm	0.30		0.20		0.15
发电 机轴	集电 环	绝对 摆度 mm	0.30	0.20	0.15	0.12	0.10
轴流 式机 组受 油器	操作 油管	绝对 摆度 mm	0.20				
注1：绝对摆度，在测量部位测出的实测盘车摆度值。							
注2：相对摆度，绝对摆度（mm）与测量部位至镜板距离（m）之比值。							
注3：本处绝对摆度和相对摆度均指机组盘车摆度，并非运行摆度。							

（四）注意事项

（1）在转动转子的操作过程中，必须确保推力瓦与导轴瓦的润滑效果良好，避免盘车时损坏轴瓦或镜板，可用制动器顶起转子，先在油槽内注入少量的汽轮机油^[6]。

（2）在盘车过程中，要使转子实现转动，需在其切线方向施加作用力。然而，在实际操作中，让施加于转子两侧的力达到绝对相等是几乎难以做到的。当两边的力不平衡时，就会产生一个偏向一侧的合力，这一合力会对转子产生拉动作用，致使转子偏离原本理想的转动轴线，盘车时，应当在减载泵停止，外力完

全解除后读数^[6]。

四、第一次盘车记录

(一) 各部位测量数据 (见表2)

表2 盘车数据 (单位: 0.01mm)

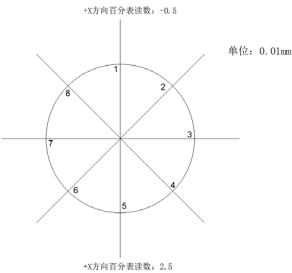
位置		1	2	3	4	5	6	7	8
上导	+X	0	0	0	0	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0	0	0	0	0
下导	+X	-0.5	-1.0	0	+1.0	+2.5	+2.0	+1.5	+0.5
	+Y	0	0	+0.5	+1.5	+2.0	+2.5	+1.5	+0.5
水导	+X	+9.0	+2.0	0	+5.0	+13.0	+19.0	+20.0	+15.0
	+Y	0	-5.0	-5.0	+1.0	+8.0	+14.0	+13.0	+7.0

(二) 各部位摆度计算

全摆渡: 同一测量部位对称两点的测量数值之差。

如图3中下导处X方向百分表在1号测点百分表读数为-0.5, 5号测点百分表读数为2.5, 则在1-5轴线上, 全摆渡为-3。(单位0.01mm)

净摆渡: 净摆渡是指同一测点上下两部位全摆渡数值之差。



>图3

表3 全摆渡计算表 (单位: 0.01mm)

全摆渡		1-5	2-6	3-7	4-8
上导	+X	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0
下导	+X	-3.0	-3.0	-1.5	+0.5
	+Y	-2.0	-2.5	-1.0	+1.0
水导	+X	-4.0	-17.0	-20.0	-10.0
	+Y	-8.0	-19.0	-18.0	-6.0

表4 净摆渡计算表 (单位: 0.01mm)

净摆渡		1-5	2-6	3-7	4-8
下导	+X	-3.0	-3.0	-1.5	+0.5
	+Y	-2.0	-2.5	-1.0	+1.0
水导	+X	-4.0	-17.0	-20.0	-10.0
	+Y	-8.0	-19.0	-18.0	-6.0

下导净摆渡 = 下导全摆 - 上导全摆
水导净摆渡 = 水导全摆 - 上导全摆

表5 最大相对摆渡计算表

	绝对摆度最大值 (mm)	相对镜板距离 (m)	最大相对摆度 (mm/m)
下导	0.03	3.10	0.010
水导	0.20	8.00	0.025
最大相对摆渡: 净摆渡最大值与测量部位至镜板距离之比值			

下导最大相对摆渡为 0.010mm/m < 0.02mm/m, 符合标准;

水导最大相对摆渡为 0.025mm/m > 0.02mm/m, 超出国家标准, 进行轴线处理后继续盘车。

五、轴线处理的方法

常规发电机组盘车不符合要求时, 可选择的轴线处理方法:

1. 对发电机轴线的处理, 磨削推力头卡环。
2. 对整机轴线的处理, 磨削推力头卡环。
3. 当水轮机轴线与发电机轴线弯折情况未达合格标准时, 磨削水轮机的上法兰面是一种可行的校正手段^[7]。(部分机组上法兰为摩擦面, 不可采用此方式)

(一) 轴线处理时磨削的最大方位确定

轴线处理时磨削的最大方位可由计算出的净摆度确定。

1. 当计算出的净摆度中, 只有一个的绝对值最大, 其它各值与它比较, 相差大于 0.03mm 以上。轴线的倾斜方位就是该净摆度对应的倾斜点, 磨削时 just 按该点进行, 并分区按比例磨削^[8]。

2. 当计算出的净摆度中, 有一个的绝对值最大, 但另有一个净摆度与之相差小于 0.02mm。则轴线的倾斜方位应介于该两个倾斜点之间, 则其实际最大净摆度按下述方法计算:

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sqrt{2}T_2}{T_1} - 1\right)$$

$$T = \frac{T_1}{\cos \beta}$$

β ——实际最大倾斜方向与计算中的最大倾方向的夹角

T_1 ——计算出的最大净摆度

T_2 ——计算出的次最大净摆度

T ——实际最大净摆度

注意:

(1) 该公式是按照“两表八点法”盘车推导出来的, 如果采用其他方法, 则公式中的系数将发生变化。

(2) 在计算卡环磨削量时, 通常以水导处的摆度作为关键依据。卡环最大磨削量的方位应与水导最大摆度点的方位相同。

本机组此次盘车计算出水导净摆度中, 绝对值最大为 0.2mm, 绝对值次最大值为 0.19mm, 差值小于 0.02mm, 根据公式计算:

$$\beta = \arctan\left(\frac{\sqrt{2}T_2}{T_1} - 1\right) = \arctan \frac{19\sqrt{2}}{20} - 1 \approx 0.33 \approx 18.9^\circ$$

$$T = \frac{T_1}{\cos \beta} = \frac{20}{\cos 18.9^\circ} \approx 0.2114mm$$

卡环最大磨削方位见下图:

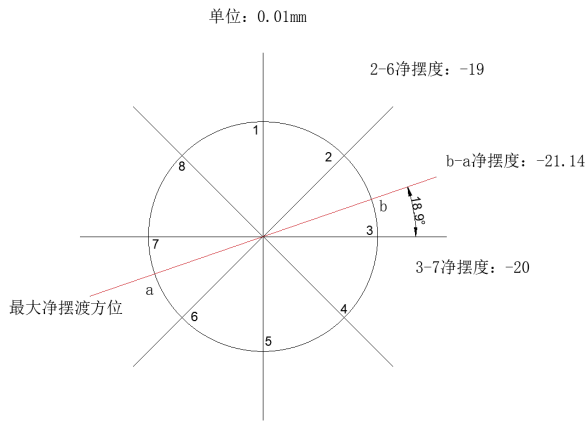
(二) 轴线处理时的最大磨削量的计算

(1) 发电机轴线纠正时, 卡环的最大磨削量计算:

$$\delta = \frac{D\phi_{ba}}{2L_1}$$

δ ——卡环上的轴线倾斜方向上的最大磨削量

D ——推力头的直径
 ϕ_{ba} ——轴线倾斜方向上的最大净摆度
 L_1 ——上导处百分表与法兰处百分表的轴长
(2) 整机轴线的处理, 卡环最大磨削量计算:



>图 4 卡环最大磨削方位示意图

$$\delta=\frac{D\phi_{ba}}{2(L_1+L_2)}$$

δ ——卡环上的轴线倾斜方向上的最大磨削量
 D ——推力头的直径
 ϕ_{ba} ——轴线倾斜方向上的最大净摆度
 L_1 ——上导处百分表与法兰处百分表的轴长
 L_2 ——法兰处和水导处百分表之间的轴长

(3) 当水轮机轴与发电机轴弯折较大时, 水轮机法兰面的最大磨削量, 常用公式为:

$$\delta=\frac{D\phi_{ba}}{2L_2}$$

δ ——卡环上的轴线倾斜方向上的最大磨削量
 D ——推力头的直径
 ϕ_{ba} ——轴线倾斜方向上的最大净摆度
 L_2 ——法兰处和水导处百分表之间的轴长
本机组此次轴线调整的最大磨削量:

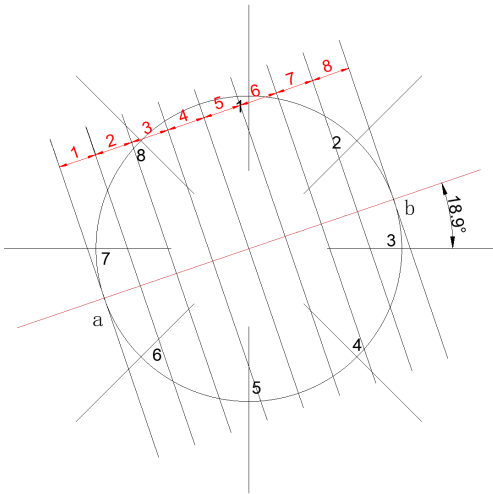
$$\delta=\frac{D\phi_{ba}}{2(L_1+L_2)}=\frac{450\times21.14/100}{2\times8000}\approx0.006mm$$

(三) 调整轴线

轴线调整通过磨削推力头与镜板之间的卡环来进行。盘车后得出正确数据, 确定卡环的应磨削数据及方位。顶起转子, 取出推力头卡环, 按测点方位将卡环8等份, 作出记号, 并记好卡环与推力头的接触面。标记出磨削最大方位并按磨削最大方位直径均分8份, 将卡环分成8个区域, 并注意方位记号^[9]。(见图5)

将卡环放在平台上, 用外包砂皮纸的小方板, 在卡环上磨削。磨削时要注意最大磨削方向, 左右要适当, 用力大小要根据磨削量而定, 磨削面应平整均匀, 按楔形面磨削, 实际磨削按台阶形进行。

例如: 在本机组此次盘车中最大磨削量为0.006mm, 可以将卡环分成8个区, 从0.006mm开始, 逐区减少, 最后一个区不磨削。



>图 5 卡环分区示意图

表6 各分区磨削次数

分区	1区	2区	3区	4区	5区	6区	7区	8区
磨削次数(次)	64	32	16	8	4	2	1	0
采用240沙皮纸进行磨削								

完成磨削作业后, 需严格依照原有的标记, 将卡环精准复位。要特别注意卡环的方位, 确保其安装方向准确无误, 同时卡环的正反面也不能出现差错。安装前, 务必保证卡环、推力头以及镜板之间的接触面干净整洁, 不能有任何杂质残留。接着, 缓慢落下转子, 将所有螺栓均匀紧固, 随后进行盘车操作。在盘车过程中, 需密切监测摆度数值, 持续调整直至摆度达到标准要求为止。

六、第二次盘车记录

各部位测量数据(见表2)

表7 盘车数据(单位0.01mm)

位置		1	2	3	4	5	6	7	8
上导	+X	0	0	0	0	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0	0	0	0	0
下导	+X	+1.0	+1.0	0	-1.0	-2.0	-2.0	-1.5	0
	+Y	0	0	-0.5	-2.0	-3.0	-3.0	-2.0	-1.0
发电机法兰	+X	+1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-6.5	-6.0	+2.5	+4.0
	+Y	-1.0	0	-1.5	-4.0	-7.0	-4.5	+1.0	0
中间轴下法兰	+X	+2.0	+1.0	0	+4.0	+3.0	+4.0	+7.0	+7.0
	+Y	0	0	+2.0	+1.0	+2.0	+5.0	+9.0	+4.0
水轮机法兰	+X	+1.0	-2.0	0	-3.0	-2.0	+3.0	+7.0	+5.0
	+Y	0	-2.5	-1.0	0	-2.0	+2.0	+6.0	+7.0
水导	+X	+8.0	+3.0	0	0	+3.0	+7.0	+9.0	+9.0
	+Y	0	-3.5	-6.0	-5.0	-3.0	+1.0	+3.0	+3.0

各部位摆度计算

表8全摆度计算表（单位0.01mm）					
全摆度		1-5	2-6	3-7	4-8
上导	+X	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0
下导	+X	+3.0	+3.0	+1.5	-1.0
	+Y	+3.0	+3.0	+1.5	-1.0
发电机法兰	+X	+7.5	+5.0	-3.5	-4.5
	+Y	+6.0	+4.5	-2.5	-4.0
中间轴下法兰	+X	-1.0	-3.0	-7.0	-3.0
	+Y	-2.0	-5.0	-7.0	-3.0
水轮机法兰	+X	+3.0	-5.0	-7.0	-8.0
	+Y	+2.0	-4.5	-7.0	-7.0
水导	+X	+5.0	-4.0	-9.0	-9.0
	+Y	+3.0	-4.5	-9.0	-8.0

表9净摆度计算表（单位0.01mm）					
净摆度		1-5	2-6	3-7	4-8
下导	+X	+3.0	+3.0	+1.5	-1.0
	+Y	+3.0	+3.0	+1.5	-1.0
发电机法兰	+X	+7.5	+5.0	-3.5	-4.5
	+Y	+6.0	+4.5	-2.5	-4.0
中间轴下法兰	+X	-1.0	-3.0	-7.0	-3.0

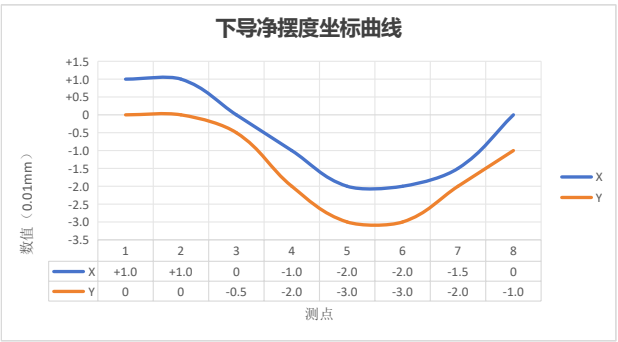
续表：

净摆度		1-5	2-6	3-7	4-8
	+Y	-2.0	-5.0	-7.0	-3.0
水轮机法兰	+X	+3.0	-5.0	-7.0	-8.0
	+Y	+2.0	-4.5	-7.0	-7.0
水导	+X	+5.0	-4.0	-9.0	-9.0
	+Y	+3.0	-4.5	-9.0	-8.0

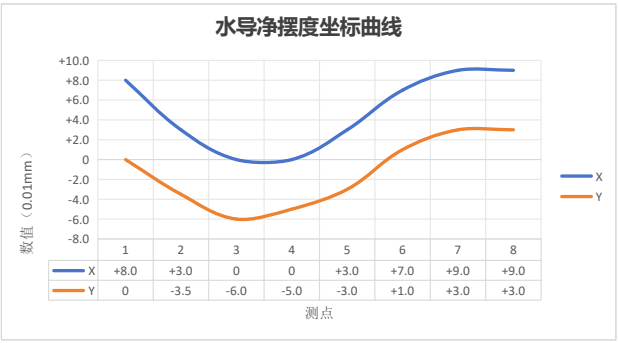
表10最大相对摆度计算表				
		绝对摆度最大值 (mm)	相对镜板距离 (m)	最大相对摆度 (mm/m)
下导		0.03	3.10	0.010
发电机法兰		0.075	4.95	0.015
中间轴下法兰		0.07	7.02	0.010
水轮机法兰		0.08	7.02	0.011
水导		0.09	8.00	0.011

各部位最大相对摆渡均小于0.02mm/m，水导绝对摆度小于0.20mm，符合标准。

基于各测点所获取的净摆度数值，采用平面坐标的方式来呈现，其中横坐标设定为测点位置，纵坐标则对应净摆度值，借此便能绘制出各部位的净摆度坐标曲线。正常状况下，这条曲线应大致呈现为正弦曲线的形态。通过对该曲线的观察与分析，能够直观地确定最大摆度值以及摆度所处的具体位置。然而，一旦坐标曲线并非趋近于正弦曲线，而是呈现出异常的畸形状态，此时就必须深入查找导致这一异常情况的原因，排查无误后重新进行盘车操作，以获取准确可靠的测量数据。



>图6下导净摆度坐标曲线



>图7水导净摆度坐标曲线

通过下导、水导净摆度座标曲线，可以看出本次盘车曲线近似正弦曲线，上述摆度符合标准，数据合格。

七、连续盘车

再次启动高压减载泵，推动盘车工具使转子沿顺时针方向转动，随后停止施加外力，转子在惯性作用下平稳旋转一圈，在此过程中连续记录各盘车点通过百分表时的百分表读数，此盘车记录将对前两次盘车记录进行校核。

表 11 连续盘车数据（单位 0.01mm）									
位置		1	2	3	4	5	6	7	8
上导	+X	0	0	0	0	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0	0	0	0	0
下导	+X	-3.5	-3.0	-3.5	-5.0	-6.0	-6.0	-5.0	-4.0
	+Y	+2.0	+2.0	+1.5	0	-1.0	-0.5	-0.5	+1.0
水导	+X	-2.0	-5.0	-7.0	-7.0	-5.0	-1.0	+1.0	+2.0
	+Y	+7.0	+4.0	+1.0	0	+2.0	+6.0	+9.0	+9.0

表12连续盘车全摆度计算表（单位0.01mm）					
全摆度		1-5	2-6	3-7	4-8
上导	+X	0	0	0	0
	+Y	0	0	0	0
下导	+X	2.5	3	1.5	-1
	+Y	3	2.5	2	-1
水导	+X	3	-4	-8	-9
	+Y	5	-2	-8	-9

表 13 连续盘车净摆度计算表（单位 0.01mm）

净摆度		1-5	2-6	3-7	4-8
下导	+X	2.5	3	1.5	-1
	+Y	3	2.5	2	-1
水导	+X	3	-4	-8	-9
	+Y	5	-2	-8	-9

表 14 连续盘车最大相对摆度计算表

	绝对摆度最大值 (mm)	相对镜板距离 (m)	最大相对摆度 (mm/m)
下导	0.03	3.10	0.010
水导	0.09	8.00	0.011

通过连续盘车模拟发电机运行态机组轴线摆度情况，并对之

前的盘车记录进行校核，通过对比数据，连续盘车绝对摆度最大值与相对摆渡最大值与前次盘车数据相吻合，摆度符合标准，数据合格，盘车结束^[10]。

八、结语

经过宁波溪口抽水蓄能电站 1 号机组盘车后数据验证，本盘车方法简便且行之有效，通过对本工程盘车工艺进行研究和总结，积累抽水蓄能机组盘车经验，以期在后续类似的工程项目中提供充分的参考。

参考文献

[1] 尤莉莎, 谷振富, 郑凯, 等. 张河湾抽水蓄能电站机组盘车工艺简介 [J]. 水电站机电技术, 2018, 41(12): 10-11+26. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2018.12.005.

[2] 徐海林. 大型抽水蓄能机组盘车工艺综述 [J]. 水电站机电技术, 2015, 38(02): 31-32+36. DOI: 10.13599/j.cnki.11-5130.2015.02.008.

[3] 徐刚, 刘健. 龙滩 1 号机组盘车数据处理的优化 [J]. 红水河, 2008, (02): 72-74+82.

[4] 于志忠. 大型立式机组轴线最大摆度及方位分析 [J]. 大电机技术, 1998, (06): 16-19.

[5] 吉拥平, 徐晓明, 黄怡. 对盘车数据优化处理方法的研究 [J]. 大电机技术, 1996, (01): 25-29.

[6] 贾德香; 韩净. 我国抽水蓄能电站发展与展望 [J]. 科技资讯, 2012(33).

[7] 刘玉方. 海河流域急需加快抽水蓄能电站的开发 [J]. 海河水利, 1994(02).

[8] 李如芳, 陈崇仁. 抽水蓄能电站综合经济效益分析计算 [J]. 河海大学学报, 1997(05).

[9] 雷显阳; 王樱峻; 孙檀坚; 柏正林. 句容抽水蓄能电站堆石坝岩溶基础处理措施研究 [J]. 人民长江, 2021(S2).

[10] 丁宁; 张杨. 抽水蓄能电站沥青混凝土心墙摊铺试验研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2021(03).