

ICS 27. 140

P 55

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 749—2017

替代 SL 647—2013

水工金属结构振动时效及效果评定

Vibration stress relief and effect valuation for
hydraulic steel structures

2017-06-05 发布

2017-09-05 实施



中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水工金属结构振动时效及效果评定》
等 3 项水利行业标准的公告

2017 年第 22 号

中华人民共和国水利部批准《水工金属结构振动时效及效果评定》(SL 749—2017) 等 3 项为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水工金属结构振动时效及效果评定	SL 749—2017	SL 647—2013	2017. 6. 5	2017. 9. 5
2	水工金属结构声发射检测技术规程	SL 751—2017		2017. 6. 5	2017. 9. 5
3	水闸自控翻板闸门技术规范	SL 753—2017		2017. 6. 5	2017. 9. 5

水利部

2017 年 6 月 5 日

目 次

前言	V
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 振动时效基本技术要求	3
4.1 振前检验与分析	3
4.2 振前准备	3
4.3 试振	3
4.4 主振	3
4.5 辅振	4
5 振动时效装置及振动方式	4
5.1 振动时效装置	4
5.2 振动方式	4
6 振动时效效果评定方法	5
6.1 参数曲线观测法	5
6.2 残余应力检测法	5
7 振动时效效果评定报告	6
7.1 报告内容	6
7.2 报告格式	6
8 量产构件的工艺参数评定	6
8.1 评定目的	6
8.2 评定原则	6
8.3 评定方法	6
8.4 工艺规程	7
附录 A (资料性附录) 振动时效效果评定报告格式	8

前 言

根据水利技术标准制修订计划安排，按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第1部分：标准的结构和编写》的要求，编制本标准。

在编制《水工金属结构振动时效效果评定方法》过程中，整合了 SL 647—2013《水工金属结构振动时效工艺参数选择及技术要求》，并更名为《水工金属结构振动时效及效果评定》。本标准替代 SL 647—2013。

本标准共 8 章和 1 个附录，主要技术内容有：

——振动时效基本技术要求；

——振动时效效果评定方法。

本标准全文推荐。

本标准所替代标准的历次版本为：

—— SL 647—2013

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部综合事业局

本标准解释单位：水利部综合事业局

本标准主编单位：水利部水工金属结构质量检验测试中心

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：袁关堂 胡木生 韩志刚 王志民 李东明 杜伟华 董小涛

本标准审查会议技术负责人：叶文海 董学武

本标准体例格式审查人：徐海峰

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条 2 号；邮政编码：100053；电话：010—63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

水工金属结构振动时效及效果评定

1 范围

本标准规定了水工金属结构振动时效基本技术要求和振动时效效果评定方法。
本标准适用于水工金属结构焊接构件（下称构件）的振动时效处理。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

GB/T 25713—2010 机械式振动时效装置

SL 499 钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法

SL 547 水工金属结构残余应力测试方法——X射线衍射法

SL 565 水工金属结构残余应力测试方法——磁弹法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

振动时效 vibration stress relief

构件在激振器产生的周期性激振力作用下达到共振状态，消减和均化了构件的残余应力并使构件的后续变形得以减小的过程。

3.2

激振点 excitation point

振动时效时，激振器在构件上的固定位置。

3.3

支撑点 support point

振动时效时，构件的支撑位置。

3.4

拾振点 sensor point

振动时效时，加速度传感器在构件上的测量位置。

3.5

节点 resonance node

构件共振时，振型上振幅为零的点。

注：共振时，构件可能有多个节点。

3.6

节线 resonance nodal line

构件共振时，由节点连成的线。

注：共振时，构件可能有多条节线。

3.7

扫频 frequency scanning

固定偏心矩，将激振器的转速连续均匀地由低调高的过程。

3.8

扫频曲线 frequency scanning curve

激振器转速由低向高均匀升速过程中，构件被检测点的加速度值随激振频率或激振器转速变化的曲线。

注：扫频曲线简记为 $a-n$ 曲线。其中： a 为加速度， m/s^2 ； n 为激振器转速， r/min 。

3.9

主振频率 main resonance frequency

在激振器的激励频率范围内，引起构件振动响应的多阶共振频率中，重点关注区域内振幅大的共振频率。

3.10

辅振频率 additional resonance frequency

除主振频率以外的其他共振频率。

3.11

时效频率 aging frequency

当拟定以某一振型对构件进行振动时效时，在该振型共振频率的亚共振频率区内具体选择的激振频率。

3.12

时效时间 aging time

当激振器的转速稳定在某一定数值开始振动时效后，激振器持续运转的时间。

3.13

时效曲线 aging curve

当激振器的转速稳定在某一定数值开始振动时效后，反映拾振点加速度值随时效时间变化的曲线。

注：时效曲线简记为 $a-t$ 曲线。其中： a 为加速度， m/s^2 ； t 为时效时间， min 。

3.14

等效残余应力 equivalent residual stress

在平面残余应力场中，为方便比较各点残余应力大小或判定某点的屈服状态，把二维残余应力等效而成的一维残余应力。

注：等效残余应力记为 $\bar{\sigma}$ ， $\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1\sigma_1 + \sigma_2\sigma_2 - \sigma_1\sigma_2}$ ，其中： σ_1 为残余应力最大主应力， MPa ； σ_2 为残余应力最小主应力， MPa 。

3.15

平均残余应力 average residual stress

构件某区域按一定原则所选多个测点的等效残余应力之算术平均值。

3.16

残余应力消除率 ratio of stress relief

构件某区域时效后比时效前相同测点的平均残余应力降低之比率。

注：时效后某区域残余应力消除率 = (时效前该区域平均残余应力 - 时效后该区域平均残余应力) / 时效前该区域平均残余应力 $\times 100\%$ 。

3.17

残余应力离散度 discrete degree of residual stress

构件某区域所选测点中最大的等效残余应力与该区域平均残余应力之差。

3.18

残余应力均化率 ratio of stress leveling

构件某区域时效后比时效前相同测点的残余应力离散度降低之比率。

注：时效后某区域的残余应力均化率 = (时效前该区域残余应力离散度 - 时效后该区域残余应力离散度) / 时效前该区域残余应力离散度 × 100%。

4 振动时效基本技术要求

4.1 振前检验与分析

4.1.1 振前应对构件焊缝质量进行检验。构件焊缝不应有超过设计文件和标准规定的夹渣、裂纹、未焊透、未熔合等缺陷。

4.1.2 振前应对构件进行预分析。根据构件的结构形式、尺寸、材质及重量，预判构件的共振频率和振型。对于体积大、结构复杂的构件，宜通过模态分析法找出构件的各个共振频率和振型。根据残余应力、工作应力的分布情况，选择残余应力或工作应力较大区域作为重点关注区域。

4.2 振前准备

4.2.1 支撑点应布置在预判振型的节线上或其附近。支撑点数量宜为 2~4 个，构件的支撑物应具有弹性。支撑形式应以振动阻力小、平稳安全为原则。

4.2.2 激振点应布置在刚性较大且位于预判振型波峰处或其附近。激振器应固定牢固，其旋转轴应平行于重点关注区域。

4.2.3 拾振点应布置在重点关注区域，加速度传感器的测量方向应垂直于重点关注区域。

4.3 试振

4.3.1 偏心矩的调整应从零开始逐级加大，每调整一档均应进行全程扫频并观察扫频曲线，当扫频曲线有明显突变、构件出现共振时，停止调整偏心矩，该偏心矩作为初始偏心矩。

4.3.2 应以初始偏心矩进行全程扫频，并记录该偏心矩下的全程扫频曲线。

4.3.3 根据全程扫频曲线找出全转速范围内的所有共振频率，将激振器转速分别调整到每个共振频率处，观察确认每个共振频率所对应的振型、节线及波峰位置。将重点关注区域内振幅大的共振频率作为主振频率，其余共振频率作为辅振频率。

4.3.4 根据主振频率所对应的振型，把支撑点调整到该振型节线上，并宜靠近不同振型的节线交点；把激振点调整到刚性较大且位于该振型振幅较大处；把拾振点调整到重点关注区域振幅最大处。

4.3.5 再次进行初始偏心矩下的全程扫频，并记录全程扫频曲线。

4.3.6 对于体积大、刚度大、结构复杂的构件宜通过支撑点、激振点及拾振点的位置调整进行多次试振，以获取较多的振型。

4.4 主振

4.4.1 根据全程扫频曲线，将主振频率左右相邻两波谷所对应的转速，作为主振频率下的局部扫频范围。

4.4.2 调大偏心矩进行加载，加载的原则是：振动时效装置不过载且构件被关注部位产生的最大等效动应力介于该部位构件材质屈服强度的 1/5~2/5。

4.4.3 偏心矩调大后，在已设置的转速范围内对构件进行振前局部扫频，并记录当前偏心矩下的振前局部扫频曲线。

4.4.4 根据振前局部扫频曲线，在主振频率的亚共振频率区内，选择最大加速度值的 1/3~2/3 所对应的频率作为时效频率对构件进行振动时效，并记录该时效频率下的时效曲线。

4.4.5 确定单次时效时间：当时效曲线 ($a-t$ 曲线) 变平后激振器继续运转 3min 即可结束时效。单次时效时间宜为 5~8min。

4.4.6 单次时效结束后，保持偏心矩不变，在当前扫频范围内对构件进行振后局部扫频并记录扫频

曲线。

4.4.7 对于高强钢构件（如高强钢管），主振频率下宜进行 2~3 次时效处理。每次时效处理均应小幅度加载且满足 4.4.2 所述原则，并记录时效曲线及时效前后的局部扫频曲线。

4.5 辅振

4.5.1 试振后若全程扫频曲线中有不止一个共振频率，应进行辅振频率下的时效处理。

4.5.2 若全程扫频曲线中有不止一个辅振频率时，应优先选择能使重点关注区域获得较大振幅的辅振频率进行时效处理。

4.5.3 根据全程扫频曲线，将辅振频率左右相邻两波谷所对应的转速，作为辅振频率下的局部扫频范围。应按 4.4.2 所述原则调节偏心矩，进行振前局部扫频，并记录扫频曲线。

4.5.4 在辅振频率的亚共振频率区内，选择最大加速度值的 $1/3 \sim 2/3$ 所对应的频率作为时效频率对构件进行振动时效。

4.5.5 实时观察时效曲线，待时效曲线（ $a-t$ 曲线）变平并持续 3min 后，结束该次振动时效，并记录时效曲线及振后局部扫频曲线。

4.5.6 依据时效要求及已进行的时效情况确定是否调大偏心矩进行下一次时效处理。

4.5.7 该激振点经过多次主振、辅振时效处理后，将偏心矩调回到初始偏心矩，进行振后全程扫频，记录初始偏心矩下的振后全程扫频曲线，并与初始偏心矩下的振前全程扫频曲线进行对比分析，定性判断该激振点的振动时效效果。

4.5.8 对于体积大、刚度大、结构复杂的构件，宜进行多点激振处理。

4.5.9 采用多次、多阶、多点时效处理的构件，累计时效时间宜为 30~60min。

5 振动时效装置及振动方式

5.1 振动时效装置

5.1.1 振动时效装置应具备自动记录扫频曲线及时效曲线、指示振动加速度值和电机电流值的功能，稳速精度应达到 $\pm 1r/min$ 。

5.1.2 振动时效装置应符合 GB/T 25713—2010 的要求。

5.1.3 振动时效装置适用的最大重量应大于构件重量。

5.1.4 振动时效装置的最大激振频率应大于构件的最低共振频率，否则应对构件采取降频措施。

5.2 振动方式

5.2.1 直接振动

5.2.1.1 在振动时效装置的激振频率变化范围内能激起共振响应的构件，可直接置于弹性支撑上进行振动时效。

5.2.1.2 按 4.2 布置支撑点、激振点及拾振点。

5.2.1.3 按 4.3~4.5 进行试振、主振及辅振。

5.2.2 悬臂振动

5.2.2.1 若构件的最低共振频率接近甚至高出振动时效装置的最高激振频率，无法采用弹性支撑方式直接振动时，可选择悬臂方式降频。

5.2.2.2 将构件需要重点时效的一端固定在高刚性、大质量的物体边缘，激振器、加速度传感器固定在另一端。

5.2.2.3 按 4.3~4.5 进行试振、主振及辅振。

5.2.3 串联振动

5.2.3.1 若构件的最低共振频率接近甚至高出振动时效装置的最高激振频率，无法采用弹性支撑方式直接振动时，可选择多件串联方式降频。

5.2.3.2 将两个或多个构件沿长度方向刚性连接，使其串联成一个新的振动系统。

5.2.3.3 按 4.1 对新系统重新进行振前分析。

5.2.3.4 按 4.2 布置支撑点、激振点及拾振点。

5.2.3.5 按 4.3~4.5 进行试振、主振及辅振。

5.2.4 振动台振动

5.2.4.1 对于有特殊要求的构件，应选择振动台振动。

5.2.4.2 将构件与振动台装卡成一个整体，形成新的振动系统。构件可分别单独装卡，也可多个构件以串联或并联方式连接后装卡。装卡位置可在振动台之上，也可悬挂于振动台之侧，但均应使构件避开节线。装卡应方便、快速、牢固。

5.2.4.3 按 4.1 对新系统重新进行振前分析。

5.2.4.4 按 4.2 布置支撑点、激振点及拾振点。

5.2.4.5 按 4.3~4.5 进行试振、主振及辅振。

6 振动时效效果评定方法

6.1 参数曲线观测法

6.1.1 根据时效曲线 ($a-t$ 曲线) 的变化或振后扫频曲线 ($a-n$ 曲线) 相对振前的变化来定性判断振动时效的实际效果。

6.1.2 出现下列情况之一时，即可判定当前时效频率下的该次振动时效有效：

- a) $a-t$ 曲线上升后变平。
- b) $a-t$ 曲线上升后下降然后变平。
- c) 振后 $a-n$ 曲线加速度峰值比振前升高。
- d) 振后 $a-n$ 曲线的共振频率比振前降低。
- e) 振后 $a-n$ 曲线的带宽比振前变窄。
- f) 振后 $a-n$ 曲线的共振峰有裂变现象发生。

6.1.3 不符合 6.1.2 时，应调整振动时效工艺参数重新进行时效处理，并按 6.1.2 条重新评定。

6.2 残余应力检测法

6.2.1 应在振动时效前及振动时效后对构件进行残余应力测试，宜使用 X 射线衍射法，也可使用钻孔应变法或磁弹法等方法。残余应力测试应符合 SL 547、SL 499 和 SL 565 等标准的有关规定。

6.2.2 用钻孔应变法测试时，时效前后测点间距应为盲孔直径的 5~10 倍。钻孔应变法不适用于高强度钢。

6.2.3 应力检测区（下称测区）应布置在残余应力或工作应力较大区域，每个构件的测区数应不少于 3 个，每个测区的检测点数应不少于 5 个，测点应布置在焊缝中心、熔合线和热影响区附近。

6.2.4 时效前，若某测点的等效残余应力小于其屈服强度的 1/5 时，则应直接剔除；时效后，若某测点未处于已实施的时效频率对应的波峰处附近，也应剔除。所有被剔除的测点均不再进行振后残余应力测试，也不参与其所在测区平均残余应力、应力消除率、离散度、均化率的计算。测点剔除后，测区内参与计算的测点数应不少于 3 个。

6.2.5 时效前,若某测区的残余应力离散度小于屈服强度的 1/5 时,则不计算该测区的残余应力均化率。

6.2.6 时效后,至少应有一个测区的残余应力消除率大于 30%或残余应力均化率大于 20%。

7 振动时效效果评定报告

7.1 报告内容

振动时效效果评定报告应包括下列内容:

- a) 构件基本情况:工程名称,使用单位,制造单位,委托单位,构件名称、图号、编号、尺寸规格、材质、重量。
- b) 检测地点、检测日期。
- c) 时效装置型号。
- d) 执行标准。
- e) 支撑点、激振点、拾振点位置布置图及相应编号。
- f) 试振扫频及响应情况:激振点编号、拾振点编号、出现共振时的偏心矩、试振时设定的最高转速、各个共振频率及振幅。
- g) 时效工艺参数及相关曲线:时效时的偏心矩、时效时设定的最高转速、主振频率、辅振频率、时效频率、时效时间、时效前峰、时效后峰、扫频曲线、时效曲线。
- h) 时效效果的定性分析评定。
- i) 残余应力测试区域及测点布置图。
- j) 残余应力测试方法、仪器及测试依据。
- k) 残余应力测试结果:振前残余应力、振后残余应力、等效残余应力。
- l) 残余应力测试结果数据分析:残余应力的平均值、最大值、最小值、离散度、消除率、均化率。
- m) 时效效果的定量分析评定。
- n) 检测结论。
- o) 检测人员,报告编制、审核及批准人员签字。

7.2 报告格式

振动时效效果评定报告格式参见附录 A。

8 量产构件的工艺参数评定

8.1 评定目的

对于批量生产构件,为提高生产效率,保证时效效果,宜进行振动时效工艺参数评定。通过评定,为优化工艺参数,制定量产构件振动时效工艺规程提供技术依据。

8.2 评定原则

5 件以上的批量生产构件宜进行振动时效工艺参数评定,评定时按 4.1~4.5 选择工艺参数对被试构件进行振动时效试验,至少试验 3 件。应评定的工艺参数包括:支撑点、激振点、拾振点、主振频率、主振时的时效频率、主振时的局部扫频范围、主振时的偏心矩、主振时的时效时间、辅振频率、辅振时的时效频率、辅振时的局部扫频范围、辅振时的偏心矩、辅振时的时效时间。

8.3 评定方法

通过选用不同的工艺参数对被试构件进行振动时效试验后,用参数曲线观测法对每个被试构件的

时效效果进行定性评定，用残余应力测试法对每个被试构件的时效效果进行定量评定，并编写振动时效效果评定报告。

8.4 工艺规程

根据被试构件的振动时效效果评定报告，对比分析不同工艺参数及相应效果，优选工艺参数，编制振动时效工艺规程。按照该工艺规程对其余相同构件进行振动时效处理后，可不再进行时效效果评定。

<https://www.slzjxx.com>
水利造价信息网

附录 A

(资料性附录)

振动时效效果评定报告格式

表 A.1 振动时效效果评定报告格式

工程名称				构件名称							
使用单位				构件图号							
制造单位				构件编号							
委托单位				尺寸规格							
检测地点				构件材质							
检测日期				构件重量							
时效装置型号				执行标准							
支撑点、激振点、拾振点位置布置图及相应编号:											
试振扫描及响应情况											
激振点 编号	拾振点 编号	偏心距	最高转速 /(r/min)	响 应 情 况							
				阶次	一阶	二阶	三阶				
				共振频率 /(r/min)							
				振幅							
时效工艺参数及相关曲线											
主振	激振点 编号	拾振点 编号	偏心距	最高转速 /(r/min)	主振频率 /(r/min)	时效频率 /(r/min)	时效时间 /min	时效前峰		时效后峰	
								转速 /(r/min)	振幅	转速 /(r/min)	振幅
扫频曲线及时效曲线:											
前振	激振点 编号	拾振点 编号	偏心距	最高转速 /(r/min)	轴振频率 /(r/min)	时效频率 /(r/min)	时效时间 /min	时效前峰		时效后峰	
								转速 /(r/min)	振幅	转速 /(r/min)	振幅
扫频曲线及时效曲线:											
时效效果的定性分析评定:											
残余应力测试区域及测点布置图:											
测试方法				测试仪器				测试依据			

表 A.1 振动时效效果评定报告格式 (续)

残余应力测试结果 (以钻孔应变释放法为例)										
测区编号	测点编号	振前残余应力				振后残余应力				备注
		σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	θ /(°)	$\bar{\sigma}$ /MPa	σ_1 /MPa	σ_2 /MPa	θ /(°)	$\bar{\sigma}$ /MPa	
测区 1	1-1									
	1-2									
	1-3									
	⋮									
	1-n									
残余应力测试结果 (以 X 射线衍射法为例)										
测区编号	测点编号	振前残余应力/MPa				振后残余应力/MPa				备注
		σ_x	σ_y	σ_{45}	$\bar{\sigma}$	σ_x	σ_y	σ_{45}	$\bar{\sigma}$	
测区 2	2-1									
	2-2									
	2-3									
	⋮									
	2-n									
测区 m	m-1									
	m-2									
	m-3									
	⋮									
	m-n									
残余应力测试结果数据分析										
测区编号	测试状态	残余应力 平均值	残余应力 最大值	残余应力 最小值	残余应力 离散度	残余应力 消除率	残余应力 均化率	备注		
测区 1	振前									
	振后									
测区 2	振前									
	振后									
⋮	振前									
	振后									
测区 m	振前									
	振后									
时效效果的定量分析评定:										
检测结论:										
备注										
检测人员										
编写人:		审核人:			批准人:					
日期:		日期:			日期:					

水利水电技术标准咨询服务中心 简介

中国水利水电出版社标准化出版分社

中国水利水电出版社，一个创新、进取、严谨、团结的文化团队，一家把握时代脉搏、紧跟科技步伐、关注社会热点、不断满足读者需求的出版机构。作为水利部直属的中央部委专业科技出版社，成立于1956年，1993年荣膺首批“全国优秀出版社”的光荣称号。经过多年努力，现已发展成为一家以水利电力专业为基础，兼顾其他学科和门类，以纸质书刊为主、兼顾电子音像和网络出版的综合性出版单位，迄今已经出版近四万种、数亿余册（套、盘）各类出版物。

水利水电技术标准咨询服务中心（中国水利水电出版社标准化出版分社）是水利部指定的行业标准出版、发行单位，主要负责水利水电技术标准及相关出版物的出版、宣贯、推广工作，同时还负责水利水电类科技专著、工具书、文集及相关职业培训教材编辑出版工作。

感谢读者多年来对水利水电技术标准咨询服务中心的关注和垂爱，中心全体人员真诚欢迎广大水利水电科技工作者对标准、水利水电图书出版及推广工作多提意见和建议，我们将秉承“服务水电，传播科技，弘扬文化”的宗旨，为您提供全方位的图书出版咨询服务，进一步做好标准和水利水电图书出版、发行及推广工作。

主任：王德鸿 010-68545951 电子邮件：wdh@waterpub.com.cn

副主任：陈昊 010-68545981 电子邮件：hero@waterpub.com.cn

主任助理：王启 010-68545982 电子邮件：wqi@waterpub.com.cn

责任编辑：王丹阳 010-68545974 电子邮件：wdy@waterpub.com.cn

章思洁 010-68545995 电子邮件：zsj@waterpub.com.cn

覃薇 010-68545889 电子邮件：qwei@waterpub.com.cn

刘媛媛 010-68545948 电子邮件：lyuan@waterpub.com.cn

赵智 010-68545622 电子邮件：zz@waterpub.com.cn

传 真：010-68317913