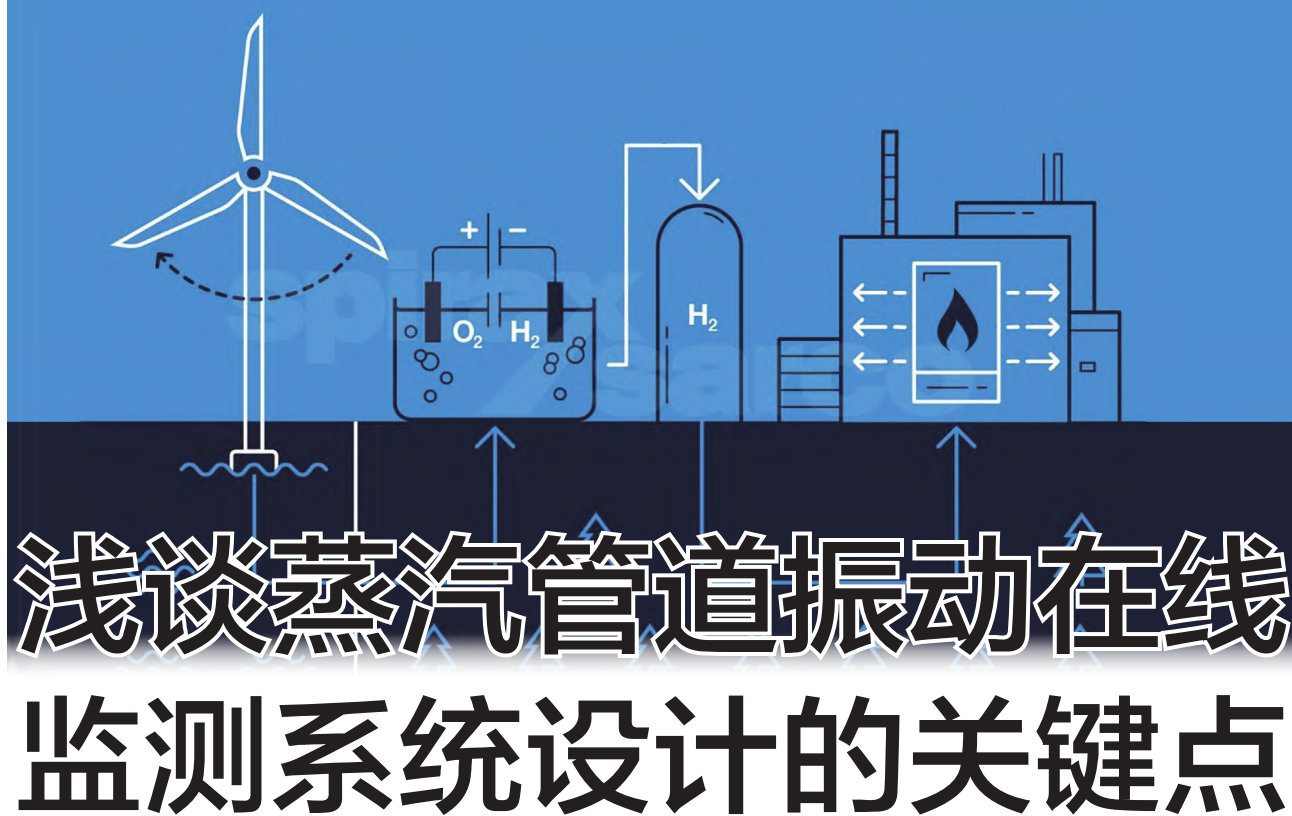




管道振动系统在设计时需要注意的关键点及应对措施——在设计蒸汽管道的时候，为了避免振动产生疲劳损坏并消除水锤，设计蒸汽管道振动监测系统并解决其关键问题。

文 / 杜云川

蒸汽管道的振动一直是业内关注的焦点，振动会产生疲劳损坏，并导致爆管等灾难性事故。据估计美国每年因蒸汽管道振动造成的损失超过 100 亿美元，而我国每年类似事故也层出不穷，造成巨大的人员财产损失。

目前管道振动的识别主要依靠人工巡检，依赖技术人员的技术，缺乏有效性和及时性。而在线的监测系统比较缺乏，这与智慧化、数字化的发展要求不符合，因此寻找一种在线监测系统的解决方案迫在眉睫。

本文作者供职于斯派莎克中国有限公司。

蒸汽管道振动监测需要解决的关键问题

振动识别与评估的计算模型

流体在管道中输送并高速流动，因此振动是管道中持续存在的现象。从系统启动到正常运行阶段，其表现出的强度差异很大，很难识别并量化出可接受与不可接受的评判标准。对于蒸汽输送来说，由于来源蒸汽品质以及输送过程中散热冷凝产生冷凝水，导致识别和评估计算会更加地复杂和困难。

目前常规的方法是通过人工巡检并测量记录，但是测量数据不足且误差较大，无法反映管道实际振动情况。

振动的安全监测与定位

对于蒸汽管道来说，蒸汽流速快，振动形成的因素复杂多变，尤其是蒸汽带水的两相流使得工况进一步复杂。两相流形成水击所引发的激振力，其频率是不可预测的，激振力的大小在工程上也是很难定量或定性描述的，它与操作工况、传热及传质情况、介质流动状态和管道布置等都有关系。

常规的监测系统主要是基于稳态工况下的压力、流量等数据采集和监测，采集时间间隔长，而工厂蒸汽系统工况多变，强烈振动或者水锤发生的过程一般都在几秒或者几十秒之间，因此导

致常规的监测方法无法取得良好的实用效果。

系统关联因素的识别确认

对于工厂蒸汽系统来说，除了蒸汽管道本身的流动特征之外，引起振动和水锤的因素还有很多，比如跟管道附件相连通的截止阀的开关，减压阀的节流，疏水阀的泄漏，汽水分离器性能的下降以及支路蒸汽设备负荷的变化等。在监测系统设计之前，需要对整个系统有完善的调研，并充分地识别出这些关联因素。

系统解决方案

鉴于以上的问题，并结合当前市场上成熟的传感技术，可以从以下几方面入手，并形成解决方案。

振动测试与评估

将蒸汽管道的振动分为稳态振动和瞬态振动，并设计不同的监测和评估标准。稳态振动是指系统在正常运行过程中，重复发生的持续性时间较长的振动。瞬态振动是短时间内发生的振动，其总的应力循环次数小于 1×10^6 ，通常是由关联系统的工况变化引起的，比如阀门的快速开关及蒸汽负荷的突变等引起的。不同的



图 1 通用型振动传感器

振动类型采用不同的判断标准和监测方法。

对于常规的碳钢蒸汽直管道，可以根据表 1 来确认振动是否可接受，具体判定数值可以参考表 1 所示；瞬态振动评估可以参考表 2 来判断。

传感器的选择和安装

传感器的选择需要满足 2 个功能需求：一是实现日常运行过程中对振动和水锤的定位，二是要对预防性监测或者预警功能的实现提供必要的数据信号。

加速度传感器和振动传感器如图 1 所示，是评估和监测管道振动的必要选择。考虑到蒸汽管道的高温及低频振动特性，推荐使用压电加速传感器。0~300 Hz 的振动频率可以涵盖管道振动的所有振动频率，考虑到监测和定



图 2 噪声传感器

位的准确性，对于蒸汽管道应该选择 0.5~30 Hz，振动位移速度小于 2 540 mm/s，振动位移小于 254 mm。系统需要安装噪声传感器，以捕捉水锤信号，监测范围为 20~130 dB。

加速度和振动传感器需要安装在两类位置：一是阀门或者设备的开关启停对管道有影响的阀门，比如开关阀、疏水阀、减压阀、流量计等等；二是和远离这些管道附件的长距离管道，对于中低压热力管线，按照经验可以 30~50 m 布置一组传感器。噪声传感器如图 2 所示，可安装在需要监测区域的中间位置。

为了实现管道振动或者水锤发生的预警功能，需要对一些基本的表征信号，主要可以考虑以下几个方面。

表 1 稳态振动评估

最大峰值振动速度 $V_{\max}/(\text{mm/s})$	振动评估	处理措施
$V_{\max} \leq 12.4$	优秀	无
$12.4 < V_{\max} \leq V_{\text{allow}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备的敏感性确定是否进行振动治理措施
$V_{\max} > V_{\text{allow}}$	不合格	应进行治理或进行应力强度评估

表 2 瞬态振动评估

最大峰值振动速度 $V_{\max}/(\text{mm/s})$	振动评估	处理措施
$V_{\max} \leq 20$	优秀	无
$20 < V_{\max} \leq V_{\text{allow}}$	合格	应根据疏水管、阀门及相关设备的敏感性确定是否进行振动治理措施
$V_{\max} > V_{\text{allow}}$	不合格	应进行治理或进行应力强度评估

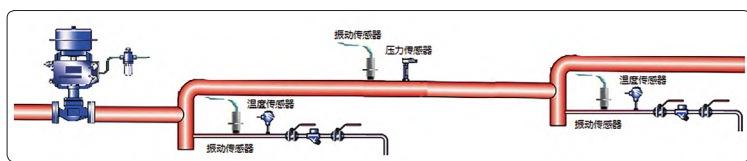


图3 部分传感器布置示意图

1. 蒸汽管道疏水阀堵塞会引起并加剧管道振动, 需要在各个疏水阀前增加温度传感器。

2. 管道压力瞬时的波动是蒸汽管道常见的状态, 增加压力源附近的压力信号。

3. 蒸汽输送管道流动特性, 在壁面安装电导率传感器。

4. 主管和分支管道的阀门开关信号。

5. 蒸汽流量计的蒸汽负荷信号。

6. 管路减压阀和调节阀的运行信号。

7. 安全阀排放信号。

该部分传感器如图3所示, 通常安装在所需要检测设备状态的附近, 具体以能够准备反映阀门或者设备运行状态的位置为核心原则。

监测管理系统搭建

监测系统的搭建除了将传感器系统接入之外, 更加重要的是将系统的信号关联组合, 给出振动和水锤的监控和预警信息, 并促进生产或者操作工艺的优化调整。当所有传感器信号接入之后, 可以通过以下3个步骤进行监测管理系统的搭建:

首先, 对管线系统及上下游工艺设备进行排查。将生产步骤和设备操作步骤制成清单, 每次进行生产操作时, 记录各个设备及整个系统监测参数的变化, 同时人工巡检现场管道系统, 观察振动异常或者水锤发生点的位置和时间。

然后, 进行数据筛选整理。将数据分为两部分, 管道系统正常运行数据及异常数据。通过数据处理, 可以整理出系统正常运行时各个参数的常规指标, 比如振动速度、振动频率等, 并结合相关法规, 给出工厂内的运行管理指标。

最后, 实现预警功能该部分的处理可分两类, 第一类是上面第二步中制定的厂内标准, 一旦逼近或者超过给出报警信号; 第二类是提前预测性, 该部分功能的实现主要从系统运行的异常指标中整理并通过相应的数学计算形成危险等级的评估, 达到不同的阶段在给出预警信号的同时, 给出相应的行动建议。

管道振动水锤的治理措施

1. 常规的管道振动治理可参考以下工作。

1) 找出激振源并降低或者消除激振力。

2) 改变管道系统的约束或者更改管道布局结构, 降低管道振动响应。

3) 优化关联系统尤其是阀门的运行方式以降低管系振动。

4) 对治理后的管道重新做评估和测评。

2. 对于振动明显且有规律的管道可参考以下工作。

1) 观察管道振动形态, 掌握管道主振型。

2) 核对最大振幅、主振动频率、最大振动速度等核心监控参

数, 如有必要进行人工二次校对。

3) 观测同时段以及同时段之前的上下游工艺操作步骤, 并评估系统关联性。

4) 减振方案应综合考虑管道主振型、管道热位移、厂房结构的因素, 同时需要评估对于管道焊接部位的影响。

5) 可能使用的减振措施除了硬件的改善之外, 还包括管道及工艺运行操作习惯。

3. 对于振动形态比较复杂或者振动剧烈的管道, 可参考以下工作。

1) 分析管道振动或者水锤原因, 如果是由于阀门或者设备的运行方式等原因引起的, 应该优先进行改进或者运行优化, 以降低或者避开振动。

2) 掌握管道的主要振动或者水锤类型, 进行振动测试和评估, 必要时进行管道模态计算, 掌握管道振动特征。

3) 减振方案除了综合考虑这些内容之外, 还需要进行管系应力运行的分析, 掌握对现有管道的强度影响程度, 并进行适应性评估。

4) 减振方案实施后应观察记录或者测试减振效果, 并对减振效果进行评估验收。

管道振动的发生是随着压力、温度、流量、设备以及天气等各种因素的影响不断地变化, 企业生产工艺的改变往往也会带来振动水锤的发生, 所以降低管道振动并消除水锤是一项综合性的工作。

本文简述了管道振动系统在设计时需要注意的关键点, 并提出了一些管理和应对措施, 希望能够对企业蒸汽管道系统的运行安全带来帮助。