

降低链传动噪声的方法研究

郎 剑, 吴 俊, 程华俊

(杭州自强链传动有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘 要 链传动的应用场景越来越多, 其噪声问题也备受业内关注。链传动噪声的根因较多, 只有深入探究才能找到具有针对性的降噪方法。为此, 本研究设计了一种链传动噪声评估方案, 并依据方案的评估结果, 将链传动噪声归因为结构原因、材料原因和外源原因。针对上述归因, 可在实践中通过调整链传动机构、改变链传动材料和强化链传动管理等几个方面着手改进, 实现链传动噪声的降低, 消弭因链传动噪声而导致的不良结局。

关键词 链传动; 噪声; 降噪

中图分类号: TH13

文献标识码: A

文章编号: 2097-3365(2024)01-0109-03

链传动在输送系统、农业应用和汽车部件等许多机械系统中, 发挥着至关重要的作用, 具有减少机械系统摩擦和磨损的积极意义。通常, 链传动是由多个链节组成, 链节由链销和链套组成, 链销和链套通过内、外齿圈的啮合连接, 其中充满润滑油。这种情况下, 一旦链销、链套、内齿圈和外齿圈之间任意一点脱离, 或者由于其他因素的干扰或障碍, 例如, 润滑不良等, 均会导致振动并产生噪声。不仅影响链传动的使用体验, 而且长此以往, 也会对链传动的生命周期造成不良影响, 缩短链传动的使用寿命。鉴于此, 有必要对链传动的噪声来源进行探析, 并采取针对性的降噪方法。

1 链传动噪声评估

1.1 链传动噪声评估方案

降低链传动噪声的第一步是对噪声进行评估以识别噪声来源。在实际中, 由于很难将链传动系统封闭起来, 所以部分封闭技术噪声控制技术很难实现。因此, 麦克风阵列技术、全息技术、束形成技术和逆频率响应函数技术, 是目前链传动噪声评估方式的主要选择, 但这些方法普遍成本较高或技术难度较大, 在实践应用中有所限制。为了克服现有噪声识别方法的局限性, 本文提出一种链传动噪声评估方案, 即从系统发出的整体声音的时域信号中提取单独激发源的时域信号。该方案利用各种系统元件冲击下的辐射声音, 用于确定它们对整体系统噪声的影响。这种链传动噪声评估的方案, 主要由以下步骤组成: 首先, 使用噪声传感器近乎实时地收集链传动噪声数据; 其次, 根据胡政^[1]等人提出的方法和结果, 来校准整个模拟过程; 再次, 使用噪声发射和传播模型来估计链传动模拟中产生的噪声; 最后, 对估计的链传动动态噪声水平进行后处理,

以进行可视化和噪声暴露指标的评估。上述步骤中产生的链传动噪声水平, 可以可视化为以每个接收器点为中心的彩色圆圈, 或者可视化为插值的连续栅格。这种可视化的主要目的是更好地展示结果, 尤其能够得出详细的、相关的噪声暴露指标, 用于后续分析和缓解策略。除了可视化动画之外, 链传动噪声评估方案的模拟输出结果, 还可以生成替代表示, 例如直方图, 以更好地理解链传动噪声水平的分布和相关的根因。

本次研究中, 对链传动噪声的准确的模拟输出, 是通过模拟和校准之间的迭代反馈循环的优化方法来实现的。其中, 模拟阶段主要依赖于链传动运动矩阵形式的高级数据。在此阶段, 通过运用 AVLEXCITE TD 动力学仿真工具进行仿真。在 AVLEXCITE TD 中, 根据链传动噪声的有限元模型, 据预定义的运动学模型模拟链传动的运动, 并通过迭代过程直到仿真输出满足收敛要求。校准阶段是在迭代过程中生成并维护最佳数据的数据库, 然后执行多个模拟运行, 最终选择与现场测量相比差异最小的。此阶段获得的模拟输出如果未经校准, 可能会与实际存在较大偏差。因此, 过程的关键部分是将模拟输出调整为观察到的参数, 即链传动噪声的有界变量非负最小二乘最小化。^[2] 这样在进行模拟时, AVLEXCITE TD 的模拟输出, 会在相应的时间间隔内, 重新生成链路上的测量结果, 以确保模拟结果的准确。在此过程中, 为了更好地评估链传动噪声, 需要根据现实中的链传动动力学, 构建链传动噪声的有限元模型, 并以此模型进行模拟、评估和分析。

1.2 链传动噪声评估结果

在链传动噪声评估的过程中, 要将链传动看成是

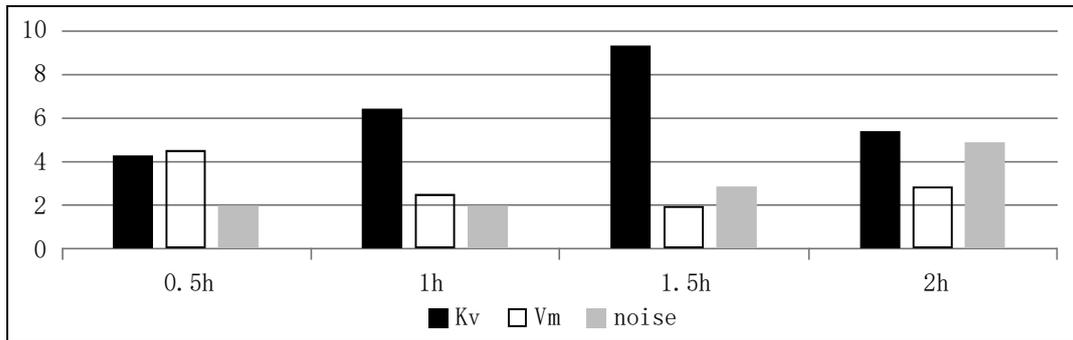


图1 链传动噪声评估结果

链条与一正多边形链轮组成的一种多边形传动。其中，正多边形的边长等于链条的节距，边数等于链轮的齿数。^[3]假设链条紧边一直处于水平位置，当主动链轮以等角速度转动时，则链条沿水平方向的速度变化程度 V_m ，可表示为：

$$V_m = K_v \cdot (VC - VS) \quad (1)$$

式(1)中， V_C ——啮合前速度。

V_S ——啮合后速度。

R ——圆周半径。

ϕ ——啮入过程中，链节铰链中心在主动链轮上的相位角。

n ——回转速度。

其中， VC 与 VS 大小一致，方向相反。 K_v 为速度不均匀系数，由公式(2)表示：

$$K_v = \frac{R_1 \phi_1 \left[1 - \cos \frac{180^\circ}{z_1} \right]}{\frac{z_1}{\pi} R_1 \phi_1 \sin \frac{180^\circ}{z_1}} = \frac{\pi}{z_1} \tan \frac{90^\circ}{z_1} \quad (2)$$

式(2)中， z_1 为链轮齿数。将式(2)带入式(1)中，就能够构建起本次研究所需的链传动噪声的有限元模型。在模拟软件中导入链传动系统的基本参数和有限元模型，结合提取单独激发源的时域信号，利用拉格朗日系统的平稳统计，作为相关方程的稳态解，就能实现对链传动系统噪声的模拟，进而对链传动系统噪声进行评估。

通过模拟可以看到，在链传动系统中， K_v 随着 V_m 减少而变大，而链传动的噪声也随之加剧。由此可见， K_v 是影响链传动噪声的关键因素之一。具体的模拟结果如图1所示。

通过对图1结果的进一步分析，可以发现之所以导致这种结果，与链传动的固有结构有关。在链传动中，链条的水平方向上的速度是一个循环往复的过程，从小到大，再从大到小，一个循环结束后开始下一个循环，

由此实现链传动，即所谓的“多边形效应”。^[4]通过公式和计算机模拟能够发现，在多边形效应的影响下，随着链节之间距离的减小，它们的不稳定性会增加。当链节靠得更远时，即链轮齿数更少时，链节间的主相互作用项更强，则链条的多边形会更加不稳定。这也是导致链传动噪声的关键因素之一。

通过对单个循环内的链传动过程进行噪声搜集和模拟分析，发现除了因多边形效应导致的噪声之外，材料也是导致链传动噪声产生的关键因素之一。在模拟分析中，链条与链条导轨的撞击也能产生噪声。推测是由于同种材质在链传动过程中的相互碰撞，会导致松边垂度不合适、链条或链轮磨损等问题，进而引发链传动噪声。模拟评估结果显示，在全钢链条、半钢半橡胶链条和全橡胶链条中，噪声最小的是全橡胶链条，耐久最好的是半钢半橡胶链条，动力最强的是全钢链条，成本最高的是全钢链条。综合来看，半钢半橡胶链条的噪声、耐久、动力和成本的性价比最高。

通过对单个循环内同一材质的链传动的工作管理进行模拟，发现模拟结果再现了链传动系统中典型的多因素不稳定，即不完善的管理，例如，松边垂度不合适、润滑不良、链罩或支承松动等问题，也会导致链传动噪声的产生。推测是由于不完善的管理会导致链传动外源因素的产生，进而影响到链传动整体的啮合，导致振动或者噪声。

2 链传动降噪方法

如上所述，链传动噪声是归因包括结构原因、材料原因和外源原因。因此，在降低链传动噪声的过程中，要针对上述归因，分别采取针对性的方法，实现链传动降噪的有的放矢。具体来说，可在实践中采取以下方法：

2.1 调整链传动结构

由链传动噪声评估结果可知，因链传动结构所导致的多边形效应是造成链传动噪声最主要的因素。因此，在实现链传动噪声的过程中，首先要解决多边形

效应。由于多边形效应的产生主要是由链传动的固有结构所导致,因此,多边形效应只能减小而不能完全消除。通过公式(2)可以发现,通过增加链轮齿数就能够减少链条速度与轮角速度的变化,继而达到链传动的降噪目的。受此启发,在链传动的结构调整中,还可以采取以下方法:首先,为了实现链传动降噪,可以采取保持链传动瞬时传动不变的方法。因为在保持瞬时传动始终为1的前提下,链传动的多边形效应最小,噪声也最小。为此,可以将中心距调整为链节距的整数倍,或者改变主动轮的运动规律,促使链条作匀速运动,进而保证瞬时传动始终为1;其次,为了实现链传动降噪,可以降低链条速度变化的方法。因为改变主动轮的运动规律当链条速度的变化幅度相对较小的情况下,也能保证链传动的多边形效应最小,噪声最小。为此,可以通过附加小节距链传动装置的方法,或者使用小节距多排链方法,实现对链条速度的控制;最后,在链传动中利用变节距链条来减弱多边形效应,采用变节距链条,使链条与链轮轮齿总是在位于相切时进行啮合,则能明显减弱多边形效应。因为当中心距为偶数倍半节距时,输出速度的波动最小,也能保证链传动的多边形效应最小,噪声最小。

2.2 改变链传动材料

由链传动噪声评估结果可知,因链条而导致啮合冲击是导致链传动噪声的另一因素,而这与链传动过程中链条和链轮之间的阻尼相关。材料表征将阻尼定义为存储模量与损耗模量的比率,而材料的损耗因子与应变决定阻尼。因此,在降低链传动噪声时,需要通过增加材料的弯曲刚度来实现链传动降噪效果。这种效果与材料的振动峰值振幅的降低有关。在计算机模拟中,分析了全钢链条、橡胶链条和半钢半橡胶链条之间的噪声、耐久、动力和成本,结果显示,半钢半橡胶链条的综合性最高,因此,建议将链传动中的全钢链条替换为半钢半橡胶链条。围绕这一点,考虑到链传动的应用场景和动力需求,可以采取以下的方法:其一,将链节三段为一组进行分组,其中,中间一段为橡胶制作,两边的两段为全钢制作,即钢-橡胶-钢的结构。这种方法既能够保证链传动的动力机制和传动效果的不变,又能借助中间段的橡胶链节,低效啮合冲击,降低链传动噪声;其二,在链条中使用减振吸振材料,如将内链板、滚子和套筒用橡胶制作,特别是海绵型或极低刚度弹性体,比固体和高刚度橡胶更能表现较高的阻尼行为,进而抵消啮合冲击,实现链传动降噪。

2.3 强化链传动管理

由链传动噪声评估结果可知,不完善的管理会增

加链销和衬套之间的接触区域的摩擦,进而导致链传动噪声。为此,需要强化现有的链传动管理,通过降低链销和衬套之间的接触区域的摩擦,实现链传动的降噪目标。在这方面,为了提高链条传动的摩擦性能,业内探索了多种方法,包括激光表面纹理和冷喷涂技术,以及链销氮化和涂层。^[5]虽然由于低磨损限制,表面纹理化对于链驱动中的链销来说是一种很有前途的方法,但它会抵消表面的结构,因此,还有问题需要解决。相比之下,通过物理气相沉积的氮化物硬质涂层,不仅可提高链销的耐磨性,而且可降低由此产生的噪声。然而,目前的氮化物硬质涂层技术,对链套内表面进行涂层目前还不可行。因此,有专家提出了一种替代方法,即形成转移的摩擦膜。^[6]这一概念基于掺有固体润滑剂的涂层在减少磨损和摩擦方面具有很高的潜力。特别是在链传动的边界润滑或干运行条件下,掺有固体润滑剂的涂层可以在干滑动条件下实现低摩擦系数,因为它与润滑剂的硫基添加剂相互作用,可以分解润滑剂的烃链,以无定形碳形成减少摩擦,实现链传动降噪。

3 结论

本文将导致链传动噪声的原因分为结构原因、运动原因和外源原因。针对不同的噪声来源,本文建议采取针对性的方法。例如,针对结构原因导致的噪声,建议改变链传动的结构和材料;针对运动原因导致的噪声,建议减弱链传动的多边形效应;针对外源原因导致的噪声,建议在链销上使用硬质摩擦活性涂层。所提建议能较好地解决不同原因所导致的链传动噪声,值得相关人员借鉴和参考。

参考文献:

- [1] 胡政,马卫国,曲宝龙,等.连续管注入头链传动啮合及接触分析[J].机械传动,2023,47(04):138-145.
- [2] 王存飞.链轮齿厚对矿用刮板输送机链传动系统的固有频率影响分析[J].机械传动,2022,46(11):115-121.
- [3] 曾庆良,王刚,江宁波.刮板输送机链传动系统动力学分析[J].煤炭科学技术,2017,45(05):34-40.
- [4] 杨仁民,张学昌,韩俊翔,等.链传动多边形效应实时传动数学模型构建与仿真[J].机械科学与技术,2017,36(06):821-826.
- [5] 刘太素,钱林方,陈光宋,等.某输弹机开式链传动建模及动力学特性分析[J].兵工学报,2018,39(11):2109-2117.
- [6] 陶东波,何超,樊新波,等.基于RecurDyn的链传动动态特性模拟研究[J].机械强度,2017,39(04):986-990.