

汽车涂装摆杆链磨损分析及预测性维护

戈北京, 李翔, 戈云飞, 齐江飞, 许健

(中国汽车工业工程有限公司, 天津 300380)

摘要: 通过数学建模、推导链长偏差与摆杆倾斜角度的解析关系以及几何作图和现场试验, 确认导致摆杆接车失败的首要原因是左右链条从出口到入口的长度偏差, 此偏差导致摆杆底部支撑杆在接车位偏斜。偏斜量超过撬体支撑碗宽度一半时, 承载杆将不能插入撬体支撑碗内导致上件失败。提出了快速调整链长偏差、避免接车故障的多种技术措施及对链条磨损进行预测性维护的技术方案: 通过传感器监测配重箱高度差和左右链条在出口和入口的同步性、推算链条长度偏差和阈值比较。

关键词: 摆杆链; 磨损; 伸长; 倾斜; 预测性维护

中图分类号: TQ639 文献标志码: B 文章编号: 1007-9548(2024)12-0044-04

Wear Analysis and Predictive Maintenance of Pendulum Chain in Automobile Painting Plant

GE Bei-jing, LI Xiang, GE Yun-fei, QI Jiang-fei, XU Jian

(Automotive Engineering Corporation, Tianjin 300380, China)

Abstract: Through mathematical modeling and deducing the analytical relationship between the chain length deviation and the tilt angle of the pendulum during operation, as well as geometric drawing and field test, it is confirmed that the main reason leading to the failure of picking up a car is the length deviation of the left and right chain from the exit to the entrance, which leads to the deflection of the support rods at the bottom of the pendulum at loading position. When the deviation exceeds half of the width of the skid carrying bowl, the bearing rod will not be inserted into the bowls, resulting in failure of a car picking-up. A variety of technical measures to quickly adjust the chain length deviation, avoid the loading failure and the technical scheme for predictive maintenance of chain wear are put forward: sensors are used to monitor the height difference of the weight boxes and the synchronization of the left and right chain at the exit and entrance, the chain length deviation is calculated and compared with the threshold value in real time.

Key words: pendulum chain; wear; elongation; tilt; predictive maintenance

0 引言

自2007年中汽工程为某汽车公司设计建成第一条国产涂装摆杆输送线以来, 摆杆输送线在国内汽车厂获得广泛应用。据不完全统计, 摆杆输送线的年产能接近1600万辆汽车, 因此深入研究摆杆输送机的运

行机理、总结应用经验和故障排除方案, 对于保证众多汽车厂的正常生产意义重大。

1 牵引链磨损的不利影响

在输送机运行初期两条牵引链可保持很好的同步性。U形摆杆悬垂运行时, 其侧边始终与地面保持垂直、底边保持水平。在空载返回运行时, 底部的滚轮处于导向轨的中间。在运行磨损后两条牵引链长度出现偏差, 摆杆姿态发生变化, 侧边不再垂直、底部滚轮也不再居中, 并由此导致各种问题。例如: 空载摆杆在出口下降时刮蹭配重箱, 摆杆在返回导向轨(水平)上及

收稿日期: 2024-02-26

作者简介: 戈北京(1963—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要从事汽车涂装输送技术开发及应用工作。E-mail: geibeijing@126.com。

入口导向轨(垂直)上偏斜,在接车位承载杆不能顺利插入橇体支撑碗内,导致上件失败。

2 牵引链长度偏差与摆杆姿态的关系

U形摆杆两端吊挂在两条牵引链上,其中一端与牵引链固定连接,但是可以少许偏转;另一端与牵引链浮动连接,不但能少许偏转还可横向移动。以下分别讨论固定端和浮动端牵引链磨损伸长情况下摆杆的姿态变化及与接车故障的关系。

2.1 摆杆浮动端滞后运行

当浮动端牵引链因磨损伸长时,摆杆浮动端将滞后于固定端。图1为摆杆以水平姿态水平运行(空载返回时)或者以悬垂姿态垂直运行示意,其中AY和BY是两条牵引链中心线,点A和B是摆杆和链条的连接点,A点固定,B点浮动。B点在牵引链上的悬挂点相对于A点滞后距离为 δ ,摆杆在运行平面内绕A点旋转的倾斜角为 θ ,则 $\tan\theta=\delta/m$ 。

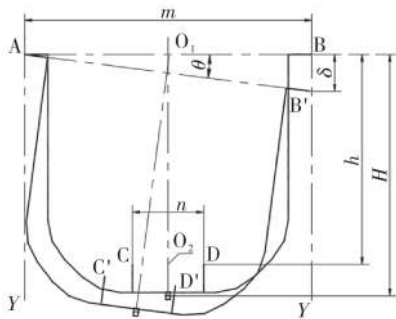


图1 右侧(浮动端)链条变长摆杆姿态

2.1.1 底部承载杆偏移

摆杆底部有2个橇体承载杆,其头部为点C和点D。摆杆转动 θ 角后,C和D偏离原位到达C'和D',且高度均降低。其横向、纵向偏移量分别记作 δ_{Ch1} 、 δ_{Dh1} 、 δ_{Cv1} 、 δ_{Dv1} ,可得: $\delta_{Ch1}=(m-n)(1-\cos\theta)/2+h\sin\theta$, $\delta_{Dh1}=(m+n)(1-\cos\theta)/2+h\sin\theta$, $\delta_{Cv1}=(m-n)\sin\theta/2-h(1-\cos\theta)$, $\delta_{Dv1}=(m+n)\sin\theta/2-h(1-\cos\theta)$ 。

2.1.2 导向轮横向偏移

根据图1,当空载摆杆水平返回且浮动端滞后距离为 δ ,摆杆底部滚轮中点偏离原始位置的横向距离为 $\delta_{Rh1}=(m(1-\cos\theta))/2+h\sin\theta$ 。

2.1.3 摆杆以悬垂姿态水平运行时底部支点偏移

当浮动端B滞后A点的距离为 δ 、摆杆平面绕A点转动 γ 角时,C'和D'偏离原始位置的横向距离很小可忽略。

2.2 摆杆固定端滞后运行

图2表示固定端链条磨损变长情况下摆杆以水平姿态水平运行或者以悬垂姿态垂直运行。固定端A点

相对于B点在牵引链上的原始点滞后距离为 δ ,在运行平面内绕A点旋转的倾斜角为 θ ,显然 $\tan\theta=\delta/m$ 依然成立。

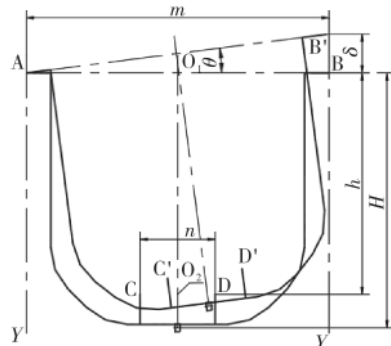


图2 左侧(固定端)链条变长,A点滞后运行

经推导计算,底部承载杆和导向轮偏移量均略小于2.1节的结果,对于设计和调试意义不大,本文不再详述。

2.3 摆杆在垂直转弯段接车时两端高差变化

在输送机入口处,摆杆垂直向上运行。在链条没有磨损的情况下,当摆杆顶端的A、B点同时到达两条垂直转弯轨的某点时,底部承载杆的头部C和D开始插入橇体支撑碗内。该点到轨道最高点的距离为 a_1 ,等于橇体上支撑碗的深度(见图3)。当摆杆发生倾斜时,承载杆头部C和D位置降低,摆杆开始接车的位置会向上移动到F点(见图4)。

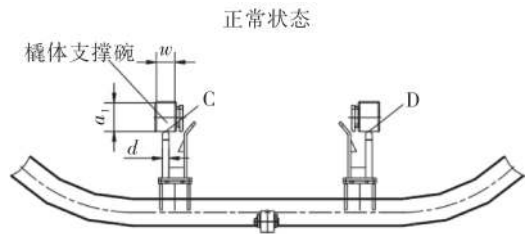


图3 承载杆开始插入支撑碗内

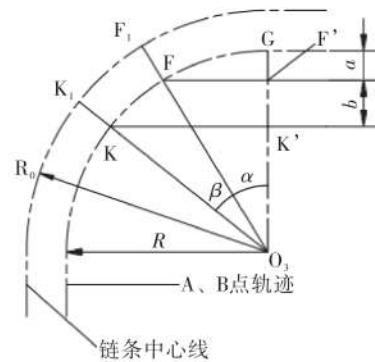


图4 倾斜的摆杆到达垂直转弯轨

如图 1 所示,由于浮动端 B 滞后,摆杆在垂直面内倾斜角 θ_1 ,C 和 D 点分别转动到 C' 和 D',C' 高于 D',因此 C' 先于 D' 插入支撑碗内,但 C' 低于其正常位置 C,高差为 $\delta_{C'1}$,则 $\delta_{C'1} = ((m-n)\sin\theta)/2 - h(1-\cos\theta)$ 。

假设在 C 点开始插入支撑碗时摆杆固定端 A 到达 F,浮动端 B 在另一条轨道的 K 点,则弧长 K_1F_1 等于两条牵引链的长度差 Δ_1 , $\beta = \Delta_1/R_0$,此时 F 点到轨迹最高点距离为 $a = a_1 - \delta_{C'1} = a_1 - ((m-n)\sin\theta_1)/2 + h(1-\cos\theta_1)$ 。

根据图 4 并参考 $\tan\theta = \delta/m$,则 $b = m\tan\theta_1$, $\cos\alpha = 1 - a/R$, $\cos(\alpha + \beta) = 1 - (a+b)/R$ 。

2.4 保证摆杆正常运行、接车时左右链条长度偏差的最大值 Δ_{max}

2.4.1 保证摆杆底部滚轮在导向轨上运行时链条长度最大偏差 Δ_{max2}

如图 5 所示,导向轨宽度 w_1 ,滚轮宽度 w_2 ,点 P 和 T 位于导向轨中心和边缘。滚轮边缘到达导向轨边缘时,摆杆倾斜角 θ_2 达到最大值,此时滚轮中心 O 偏离导向轨中心的距离为 $OP = (w_2\cos\theta_2 + w_1)/2$ 。

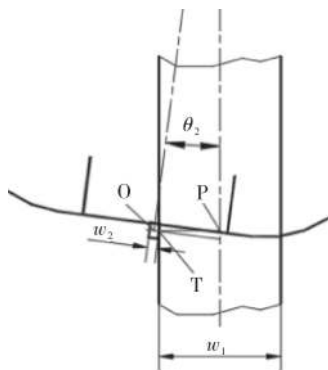


图 5 滚轮在导向轨上偏斜

对于浮动端滞后运行,令 $OP = \delta_{Rh1}$,可得 $2H\sin\theta_2 - (m+w_2)\cos\theta_2 + m - w_1 = 0$, $\sin\theta_2 = (-2H(m-w_1) + (4H^2(m-w_1)^2 + (4H^2 + (m+w_2)^2)(w_1+w_2)(2m-w_1+w_2))^{0.5}) / (4H^2 + (m+w_2)^2)$,求得 $\Delta_{max2} = m\tan\theta_2$ 。

2.4.2 保证摆杆承载杆 C 和 D 顺利插入撬体支撑碗内链条长度偏差最大值 Δ_{max1}

在正常状态下,承载杆和支撑碗的相对关系见图 3,摆杆倾斜时承载杆和支撑碗的相对关系见图 6。撬体支撑碗宽度 w ,承载杆直径 d 。在弯轨处承载杆插入支撑碗时,承载杆的横向偏移量应 $\leq (w-d)/2$ 。

在浮动端滞后运行情况下,应有 $\delta_{Ch1} \leq (w-d)/2$,得 $(m-n)(1-\cos\theta_1) + 2h\sin\theta_1 \leq w-d$,令 $e = m-n$, $f = m-n-w+d$,得 $(4h^2 + e^2)\cos^2\theta_1 - 2ef\cos\theta_1 + f^2 - 4h^2 \leq 0$, $\cos\theta_1 \leq (ef \pm (ef^2 - (4h^2 + e^2)(f^2 - 4h^2))^{0.5}) / (4h^2 + e^2)$ 。可求出最大允许倾斜角 θ_{max} , α , β 和 b ,然后根据 $\beta = \Delta_1/R_0$ 可求出两条牵

引链长度允许最大偏差值 Δ_{max1} 。

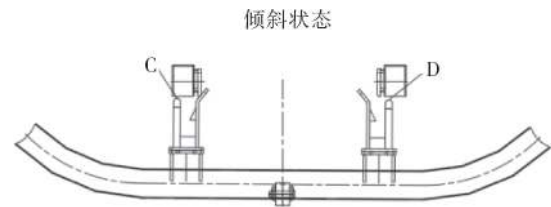


图 6 倾斜摆杆承载杆和支撑碗相对关系

2.5 工程实例

某项目摆杆输送机基本参数: $m=3\ 500\text{ mm}$, $n=969\text{ mm}$, $w=100\text{ mm}$, $d=15\text{ mm}$, $h=3\ 693\text{ mm}$, $a_1=119\text{ mm}$, $R=698\text{ mm}$, $R_0=850\text{ mm}$, $w_1=400\text{ mm}$, $w_2=100\text{ mm}$, $H=4\ 035\text{ mm}$,其理论计算和作图法求解结果见表 1。

表 1 允许的最大倾斜角和链长偏差

变量	计算	作图法
$\theta_{1max}/(^{\circ})$	0.662	0.661
Δ_{max1}/mm	85.13	85.10
$\theta_{2max}/(^{\circ})$	3.599	3.605
Δ_{max2}/mm	220.20	220.15

计算结果讨论:

1)理论计算和作图法所得结果非常接近,误差小于 0.2%,证明理论推导计算正确可靠,可以作为工程设计、安装调试和预测性维护阈值计算的基础数据。

2)为保证摆杆在导向轨上正常运行的链长最大偏差 Δ_{max2} 约为保证摆杆在垂直转弯段顺利接车的链长最大偏差 Δ_{max1} 的 2.6 倍,因此,应以 Δ_{max1} 为基础提出链长偏差要求,设定预测性维护阈值。

3)链长偏差和摆杆倾斜角度正相关,是摆杆刮蹭配重箱和接车失败的主要原因,无论制造或安装均需严格控制偏差值。

3 牵引链磨损原因分析及应对措施

3.1 制造误差

链条的长度误差由内外链板孔中心距、孔直径、销轴直径和套筒直径的精度决定,并且是多个链节误差累积的结果。由于制造误差的缘故,即使新链条也有长度偏差,因此必须对链条的制造精度提出严格要求。轨道及驱动装置的制造和安装误差也会影响两条牵引链在入口的偏差。

3.2 链条的不均匀磨损

1)链条材质、热处理:套筒、销轴材质和热处理的不一致性,将导致链条磨损和伸长的不同。

2)载荷偏差:由摆杆输送的车身和撬体重心的左

右偏斜会导致两条牵引链载荷不同,承载较大的链条必然磨损较快。

3)履带链啮合偏差:两条履带式驱动链和两条牵引链的啮合偏差,将导致承受较大张力的牵引链磨损严重,产生较大伸长量。

4)润滑不良:牵引链因运行环境恶劣、油道易于堵塞导致润滑不良,导致个别或者部分链节因生锈而磨损严重。

3.3 控制、调整链长偏差的技术措施

3.3.1 牵引链和轨道的制造要求

1)链条节距误差 $\leq \pm 0.05$ mm。

2)牵引链左右配对:左右对称的两条链要求选配,以工件节距为选配长度。配对的左右两段长度误差不大于0.5 mm,按误差从小到大在每一段上注明 $A_1, A_2, \dots, B_1, B_2, \dots$ 等标记。牵引链在现场按照标记顺序连接,并且两条链安装后的标记要左右对应。

3)长度偏差:牵引链由履带链驱动,两条牵引链在驱动装置处被两条履带链对齐。摆杆在入口处的倾斜由两条牵引链从履带链到入口处的长度偏差决定。因此,为保证任意一个摆杆在输送机入口都能顺利接车需严格控制此偏差。设链条总长 L_0 ,从履带驱动链到输送机入口的链条长度为 L_1 ,任意长度为 L_i 的两段牵引链长度偏差 $\leq 5\% \Delta_{\max 1}$ 。

4)轨道误差:牵引链轨道制作后左右配对试装,保证分段偏差 ≤ 2 mm。要求每个分段至少包括一个完整的槽内轨道,返回段轨道长度总偏差 ≤ 10 mm。

3.3.2 履带链的安装要求

1)履带链压紧到位,保证圆弧形啮合面与牵引链套筒贴合。

2)尽量减小两个履带链的啮合偏差。

3.3.3 润滑要求

1)采用防水耐酸碱润滑脂,如聚脲基脂、磷酸钙脂及氟素脂。

2)保证牵引链润滑油道通畅、无堵塞。可在自动润滑器上设油压传感器,通过油压高低检测油道是否通畅。

3.3.4 链长偏差调整

当出现明显的摆杆倾斜,可采取以下步骤对链长偏差进行调整。

1)测量左右牵引链相邻摆杆之间的距离,分别记作 $L_{L1}, L_{L2}, \dots; L_{R1}, L_{R2}, \dots$ 。

2)计算长度偏差,依次记为 $\Delta_{d1}=L_{L1}-L_{R1}, \Delta_{d2}=L_{L2}-L_{R2}, \dots$ 。

3)计算从履带驱动链到摆杆输送机入口的链条长度偏差。设摆杆总数为 N_0 ,从履带驱动链到摆杆输送

机入口的摆杆数量 N_1 ,相应的牵引链长度偏差计为 Δn (n 为摆杆编号 $=1, 2, \dots, N_0$)。当 $n < N_1, \Delta n = (\Delta_{d1} + \Delta_{d2} + \dots + \Delta_{dn}) + (\Delta_{d(N_0-N_1+n)} + \Delta_{d(N_0-N_1+n+1)} + \dots + \Delta_{dn0})$,当 $n \geq N_1, \Delta n = \Delta_{d(n-N_1+1)} + \Delta_{d(n-N_1+2)} + \dots + \Delta_{dn}$ 。

4)链长偏差的快速调整和补偿。在运行一段时间后,当某个长度偏差 $\Delta n \geq 80\% \Delta_{\max 1}$ 时,需要对某个或多个 Δ_i 进行调整,使所有 $\Delta n \leq 30\% \Delta_{\max 1}$ 。

3.3.5 减小各段链长偏差 Δ_{di} 的方法

1)销轴磨损的部位在内侧,销轴外侧无磨损,可以将销轴拆下,绕轴线旋转 180° 后重新安装,这样每个链节的长度误差将被减小约一半。

2)将偏差最大的左右两段牵引链对调位置,使其偏差值反向。若原偏差值为 Δ_{di} ,对调后偏差值为 Δ_{di}' ,则 $\Delta_{di}' = -\Delta_{di}, \Delta_n' = \Delta_n - 2\Delta_i$,重复上述牵引链对调,直到 $n \leq 30\% \Delta_{\max 1}$ 。

3)将偏差较大的若干段牵引链的一部分左右对调位置,使对调后每一段的偏差均接近于0,直到 $\Delta_n \leq 30\% \Delta_{\max 1}$ 。

4)在总长偏差较小的情况下,将两条牵引链的各段按照长度偏差重新排序,重新配对,并按 $\Delta_n \leq 30\% \Delta_{\max 1}$ 检验配对效果。

3.3.6 链长偏差调整实例

某公司汽车厂涂装车间电泳线采用某品牌摆杆输送系统,设计产能大于40 JPH。运行若干年后,频繁出现摆杆接车故障。全线40多对摆杆,有近50%不能正常接车,产能下降到不足20 JPH。

1)现场状况:驱动站两条履带链前后错位半个推头;所有摆杆在驱动站呈偏斜状态,A侧滞后、B侧偏前;所有摆杆在出口下降时已开始偏斜,个别摆杆刮蹭配重箱,在返回导向轨上偏斜严重甚至掉落,在入口导向轨(垂直导向轨)上偏斜,不能顺利接车。

2)链长测量:逐对测量相邻摆杆吊挂点的距离,获得每段链条长度。计算各段长度偏差、两条牵引链的总长和总长偏差。测量结果表明:31~39号的摆杆完全不能接车,其对应的室内链条长度累计偏差 Δ_n 约为150 mm,远大于理论计算值 $\Delta_{\max 1}$ (123.53 mm)。

3)现场调整:驱动站A侧履带链驱动链轮空转一个齿,使左右两侧履带链及牵引链在此对齐,保证驱动站处于正常运行状态。共计对调3组偏差较大的链段,链长偏差最大值下降到104 mm。调整后,虽然多数摆杆仍处于偏斜状态,但是所有摆杆均能顺利接车,达到设计产能。

3.4 链条磨损的预测性维护

预测性维护属于事先维护,基于安装在设备上的各种传感器,实时监控设备运行状态,(下转第61页)