

尿素 N908J 隔膜泵流量波动故障浅析

周乐海 胡关华 陈平

云南水富云天化有限公司装备运维中心, 中国·云南 水富 657800

摘要: 公司 80 万吨尿素装置尿素双氧水泵在工业系统中至关重要, 总之, 尿素双氧水泵通过输送双氧水、形成保护膜, 防止设备腐蚀, 保障系统稳定运行, 延长设备使用寿命。N908J 隔膜泵有较高的计量精度, 而如何调整该泵使其达到满意的计量精度一直是检修以及工艺操作中的难题。本文通过一定的理论分析, 结合该泵调整中的实际情况及检修经验, 提出了抑制脉动, 减小流量波动, 提高计量精度的方法及途径。

关键词: 隔膜泵; 流量波动; 调整

A Brief Analysis of Urea N908J Diaphragm Pump Flow Fluctuation Faults

Zhou Lehai, Hu Guanhua, Chen Ping

Yunnan Shuifu Yuntianhua Co., Ltd. Equipment Operation and Maintenance Center, China Yunnan Shuifu 657800

Abstract: The urea-hydrogen peroxide pump of the company's 800,000-ton urea plant plays a crucial role in the industrial system. In short, the urea-hydrogen peroxide pump delivers hydrogen peroxide to form a protective film, preventing equipment corrosion, ensuring stable system operation, and extending equipment service life. The N908J diaphragm pump has high metering accuracy, but how to adjust this pump to achieve satisfactory metering precision has always been a challenge in maintenance and process operation. This paper provides theoretical analysis, combined with the actual conditions of pump adjustment and maintenance experience, proposing methods and approaches to suppress pulsation, reduce flow fluctuation, and improve metering accuracy.

Keywords: Diaphragm pump; Flow fluctuation; Adjustment

1 现状和存在的问题

在本研究中, 针对公司 80 万吨尿素装置所配备的双氧水 N908J 计量泵, 该泵由大连里瓦泵业有限公司生产, 为四联隔膜计量泵。其主要功能是将双氧水输送到高压系统, 并确保双氧水在系统各部分的均匀稳定分布。双氧水在进入系统后, 会在设备表面形成一层薄而致密的氧化膜, 该膜能够有效隔离设备与外界的腐蚀性物质, 从而降低设备的腐蚀风险。鉴于此, 对计量泵的计量精度和流量稳定性提出了较高要求。然而, 由于隔膜泵固有的流量脉动特性, 流量波动在运行过程中难以完全避免。流量波动的存在会降低瞬时计量精度, 进而影响聚合反应的稳定性。因此, 抑制流量脉动、减小流量波动以及提高瞬时计量精度对于确保装置系统设备的稳定和高效运行具有至关重要的意义。在实际操作过程中, N908J 计量泵的流量波动问题导致系统波动的情况屡见不鲜。本研究旨在分析造成流量波动的原因, 并探索相应的解决策略, 以期降低流量波动, 提升计量精度^[1]。

2 流量波动成因探究

在不考虑进、排液阀的泄漏、液体的可压缩性以及受压部件的形变等因素的情况下, 单泵头隔膜计量泵的理论排量仅与柱塞直径和行程长度有关, 且在行程固定时, 理论上排量应为一恒定值。然而, 在实际操作过程中, N908J 型计量泵频繁出现流量波动现象, 主要由于进、出口管道内残存气体、安全阀底部 O 型环的损坏以及运动部件的磨损, 导致计量精度下降。本研究将对上述波动成因进行深入分析。

2.1 流量波动特性分析

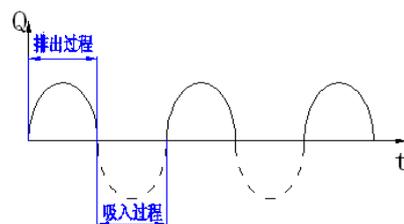


图1流量特性曲线

根据制造商提供的技术资料，N908J 型单泵头的出口流量随时间变化的函数关系可近似为正弦函数，其流量特性曲线呈现正弦波形特征（如图 1 所示）。

该单泵头的流量是时间的周期函数。为了便于分析，结合该泵的特性，可以构建如下的函数关系式： $Q = Q_0 \sin(\omega t + \varphi)$ 。观察图 1，可以发现单一泵头的流量存在波动，无法满足聚合反应过程中对瞬时计量精度的需求。因此，N908J 采用四个泵头共同由一台电机驱动的配置，各泵头的齿轮箱通过齿式联轴器连接。这种联接 - 驱动方式有利于抑制流量脉动，通过精确设定各泵头的相位角，可以抵消泵的流量脉动特性所引起的流量波动，从而实现满足工艺要求的瞬时计量精度。

在四泵头联接的情况下，如何确定耦合相位角？假设四个泵头的设定流量保持恒定，即四个泵头的柱塞行程相同。那么，总流量应为四个泵头瞬时流量的叠加，可以建立如下数学模型：

$$Q_{\text{总}} = Q_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + Q_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2) + Q_3 \sin(\omega_3 t + \varphi_3) \quad (1)$$

$Q_{\text{总}}$ 其中，——表示四个泵头叠加时总的瞬时流量；

Q_1, Q_2, Q_3 、——表示一、二、三、四泵头在相同柱塞行程下的瞬时流量；

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 、——表示一、二、三、四泵头的角速度，与电机转速相关；

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 、——表示一、二、三、四泵头的初相位。

通过分析方程式（1），可以得出结论：为了使四个泵头联动时的瞬时总流量保持恒定，根据微积分中导数的基本原理， $Q_{\text{总}}$ 应使得为常数，即 $Q'_{\text{总}} = 0$ 。在相同的柱塞行程下（不考虑进、出口阀泄漏，液体压缩性以及各泵运动部件的不均衡磨损导致的流量变化）， Q_1, Q_2, Q_3 应为常数。在相同的电机转速下， $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ，也应为常数。综合上述条件对 $Q_{\text{总}}$ 求导数：

$$Q'_{\text{总}} = Q_1 \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + Q_2 \omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + Q_3 \omega_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3) \quad (2)$$

$Q'_{\text{总}}$ 由于， $Q_1, Q_2, Q_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为常数，（2）式可简化为：

$$0 = \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \omega_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3)$$

$$= \omega_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2) + \omega_3 \cos(\omega_3 t + \varphi_3)$$

当 $t = 0$ 时，上式可简化为：

$$0 = \omega_1 \cos \varphi_1 + \omega_2 \cos \varphi_2 + \omega_3 \cos \varphi_3 \quad (3)$$

上述（3）式包含四个未知数，采用插值迭代法求解一个周期内的唯一解为： $\varphi_1 = 0, \varphi_2 = \pi, \varphi_3 = \pi$ ，即在一个周期内，当且仅当四个泵头的相位差为 90° 时，理论瞬时流

量为恒定值。如图 2 所示。

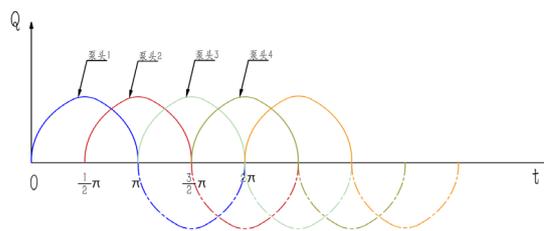


图2 四泵头相位差 90° 时的流量耦合曲线

通过上述数学模型的理论分析可知，由于泵的结构特点，单泵头的流量不可避免地出现波动，表现为脉动状态。在采用四泵头联动时，必须确保四个泵头的相位差为 90° ，以消除流量脉动，保证计量精度。然而，在检修过程中，由于联接时四个泵头的相位差无法得到保证，可能会降低计量精度，甚至导致“波峰”与“波峰”叠加，产生更大的流量脉动幅度^[2]。

2.2 传动与调节机构间隙过大或磨损导致的流量波动问题

尿素 N908J 计量泵的传动与调节机构均采用了创新的 N 型曲轴式调节机构。该泵的调节机构设计为 N 型曲轴与偏心轮的精密配合。通过旋转调节手轮，N 型曲轴发生位移，进而改变偏心距和柱塞的行程长度。在实际的维修过程中，我们发现该机构部件的磨损速率较高，并且在运行过程中不易察觉。

关于传动与调节机构间隙过大或磨损导致流量波动的机理分析。在四泵头联动系统中，任意一个泵头的 N 形轴、联接销、滑块等部件出现磨损（如图 3 所示），将不可避免地导致各运动部件间配合间隙的增加，进而引起柱塞行程的不稳定波动。 Q_1, Q_2, Q_3 这种波动将直接影响四泵头流量叠加后的总流量稳定性。



图3 磨损的 N 形轴、联接销

图 3 展示了磨损的 N 形轴、联接销等部件对流量波动的影响。在磨损程度较轻的情况下，通过微调柱塞行程可以部分补偿磨损带来的流量波动。然而，当磨损程度较为严重时，通过调节行程来补偿的效果则不尽如人意。

2.3 单向阀故障导致的流量波动问题

N908 进出口单向阀采用球形阀设计。从理论上讲，

球形阀在运行过程中, 阀球持续旋转, 因此, 输送介质中夹杂的污垢、杂质或结晶体不易沉积于阀球与阀座的接触面, 从而确保了阀球与阀座之间的可靠密封。然而, 在实际应用中, 由于尿液易于结晶形成尿素板块, 一旦介质中出现结晶体或尿液, 将导致阀垫被抬起, 进而引起阀球与阀座之间的密封不严, 严重影响流量的稳定性。在检修过程中, 发现阀座内存在结晶体或污垢的情况并不罕见[3]。

2.4 管道内部气体影响流量波动问题

管道内部气体积聚是导致隔膜式计量泵流量波动的关键诱因之一, 其作用机制可从流体传输特性、泵腔工作状态及系统压力平衡三个层面展开分析:

2.4.1 气体对吸液过程的干扰

隔膜泵依赖隔膜往复运动形成负压实现吸液, 若吸入管路内存在气体(如管道未充分排净的空气、液体中析出的溶解气或系统泄漏混入的气体), 气体将与液体混合形成气液两相流。此时, 泵腔在吸入冲程中无法被液体完全填充, 实际有效吸液量因气体占据空间而减少; 同时, 气体在泵腔内的压缩与膨胀特性与液体显著不同, 可能导致隔膜运动时受力不均, 进一步降低吸液的稳定性。

2.4.2 气阻效应阻碍液体传输

管道内气体易在局部高点或流速突变区域(如弯头、阀门节流处)聚集, 形成气团或气袋。此类气阻会增大液体流动的沿程阻力, 甚至阻断液流通道, 导致泵出口端压力波动。当泵需克服气阻做功时, 其排出流量会因能量损耗而骤降; 待气团移动或消散后, 流量又可能因阻力减小而短暂回升, 形成周期性或非周期性的流量震荡。

2.4.3 气体对泵腔压力的扰动

隔膜泵的排出过程依赖隔膜挤压泵腔推动液体, 若排出管路内存在气体, 气体被压缩后会产生反向压力, 抵消部分隔膜推力。这种压力波动会直接影响泵腔的有效排液量, 尤其在高频往复运动中, 气体压缩-膨胀的滞后性会导致隔膜动作与流量输出不同步, 加剧流量的瞬时偏差。

因此, 管道内气体的存在通过干扰吸液效率、引发气阻阻力及扰动泵腔压力平衡等多重路径, 最终导致隔膜计量泵流量出现波动。

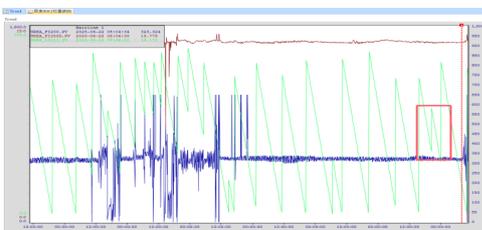
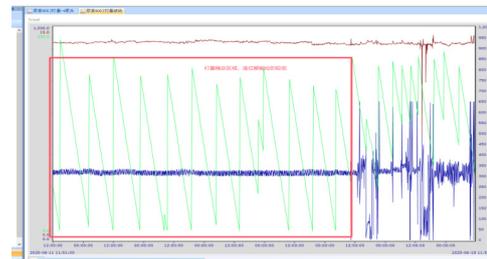


图4 展示了908J打量波动示意图



2.5 安全阀、补油阀、排气阀及隔膜安装质量分析

2.5.1 安全阀校调不良导致的流量波动问题

在隔膜泵运行过程中, 若液动室内油量补给过多, 柱塞尚未达到规定的排除行程终点, 隔膜已触及前限制板, 柱塞继续向前运动, 液动室内压力急剧上升。为限制这种异常压力, 防止隔膜等部件损坏, 设计了安全阀。当压力超过规定允许值时, 安全阀迅速打开, 排出液动室内多余的液压油。同时, 若排出管路发生堵塞, 排出压力异常升高, 安全阀也能起到保护整个系统的作用。安全阀动作时, 液动时油压突变, 必然导致流量波动。在校调安全阀时, 除了按照说明书的校调压力整定安全阀外, 还应检查安全阀的密封效果。

2.5.2 补油阀引起的波动分析

补油阀本质上是一个倒置的单向阀, 其工作原理是通过吸入压力、弹簧力以及阀体自重三者之间的平衡来实现。在液动室内油量减少的情况下, 会形成瞬时真空, 从而破坏原有的平衡状态, 导致阀球开启。此时, 贮液箱内的油迅速被吸入, 以补偿因泄漏而减少的油量, 确保液动室内油量的稳定。对于要求高精度计量的泵而言, 液动室内油量的稳定性显得尤为重要, 而这一稳定性主要依赖于补油阀的性能。因此, 补油阀必须具备高灵敏度和良好的可靠性, 以便在液动室内油量稍有下降时即刻作出反应, 迅速补充油量。为了达到这一要求, N908 型阀球采用了高精度球体制造技术, 以替代反应迟缓的锥形阀。同时, 弹簧的刚度选择也至关重要。尽管弹簧的刚度可以通过调节来适应, 但若发生断裂或因异物堵塞导致刚度变化, 将无法满足泵的高精度要求。若弹簧刚度过大, 则无法实现补油目的; 若刚度过小, 则容易导致补油过量, 使得安全阀频繁动作。这些因素是导致流量不稳定和精度下降的主要原因。

2.5.3 排气阀引起的波动分析

在柱塞密封部位, 即便采用最佳的密封结构, 也难以完全避免柱塞将气体带入液动室。随着泵的吸入和排出动作, 带入的空气会经历膨胀和压缩的过程, 从而干扰泵的

正常工作，降低流量并影响计量精度。特别是在四泵头耦合的计量泵中，这种影响尤为显著。因此，排气阀的可靠设定对于保证泵的性能至关重要。

2.5.4 隔膜安装质量的影响分析

N908 型泵采用双隔膜结构，正常工作状态下，两隔膜之间的气室应为真空状态，无气体存在。在更换隔膜时，若两隔膜未能精确定位，可能会导致隔膜间气体流动堵塞，无法有效抽出隔膜间的气体。在这种情况下，气室内的气体随着泵的吸入和排出动作发生膨胀和压缩变化，这也是导致流量不稳定和精度下降的主要原因之一。

3 检测以及调整

3.1 流量脉动特性对流量波动的抑制效应

在实际应用中，该泵在解体大修后常常表现出显著的流量波动现象，通过调节行程耦合流量无法获得理想的效果。此时，可以明确判断问题源于四泵头耦合相位差未能精确达到 90° 。为解决此问题，需调整齿轮箱处联轴器间的相对位置，以实现精确耦合。行程耦合的详细情况如图 4 所示。

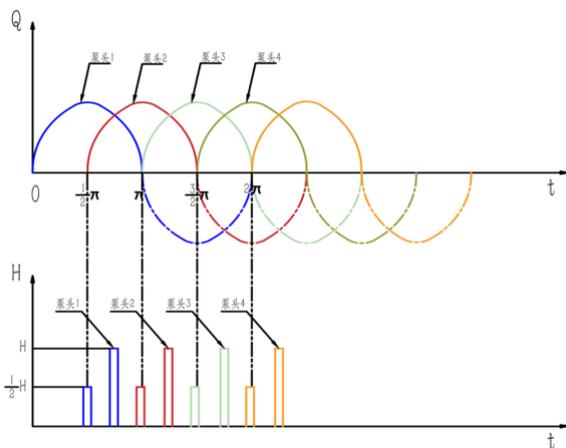


图5展示了四泵头相位差为 90° 时的行程耦合示意图

从图中可以观察到，相位与柱塞行程之间的调整关系如下：当泵头 1 的行程从零开始向正方向移动至 $1/2H$ 时，泵头 2 恰好从零开始向正方向移动，此时应将泵头 1 与泵头 2 之间的联轴器连接。当泵头 2 的行程达到 $1/2H$ 时，泵头 3 也恰好从零开始向正方向移动，此时应将泵头 2 与泵头 3 之间的联轴器连接。当泵头 3 的行程达到 $1/2H$ 时，泵头 4 也恰好从零开始向正方向移动，此时应将泵头 3 与泵头 4 之间的联轴器连接。根据实际调整经验，采用上述方法将四个泵头分别进行耦合，能够有效抑制泵体的流量脉动，进而提升其计量精度。耦合的准确性直接关系到泵的计量精度，因此在检修过程中应予以高度重视。

3.2 传动与调节机构配合精度的检测

在柱塞泵系统中，若配合间隙超出规定范围，可能会引起柱塞行程的不稳定波动。为保证传动系统与调节机构的精确配合，进而实现高精度的计量，必须对 N 型轴、传动销、滑块、偏心轮以及蜗壳 / 蜗轮等关键部件的磨损状况进行细致的检测。特别地，偏心轮作为关键部件，其磨损状况应作为检测的重点。此外，鉴于传动与调节机构中存在较多的摩擦副，必须确保润滑油路的畅通无阻，以保障润滑系统的有效性。

3.3 单向阀故障与进出口管路堵塞问题分析

在维护检修过程中，必须对单向阀的密封性能进行细致检查。建议采用拆卸单向阀后进行灌水静置的检漏方法。同时，对阀球与阀座的接触状况进行评估，以确保单向阀的密封性能稳定可靠。

鉴于尿液具有易结晶特性，为避免介质结晶导致单向阀球阀密封失效及动作失准，必须重视单向阀及其相关管路的保温措施。应采取有效措施，防止因保温措施不当导致尿液结晶现象的发生。

3.4 安全阀、补油阀及排气阀的调整

在对安全阀、补油阀及排气阀进行调整的过程中，补油阀的调整尤为关键。在 N908 的运行实践中，频繁出现因补油阀调整不当导致补油量过多，进而引发安全阀频繁启跳，甚至导致隔膜破裂的状况。因此，补油阀的调整必须遵循图 6 所示的严格程序。图中所示……

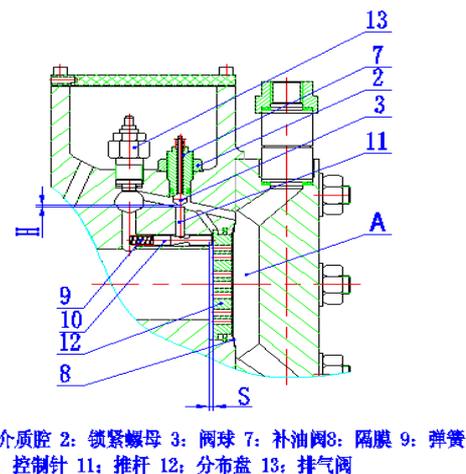


图6展示了补油阀的补油原理

通常情况下，补油阀的“S”值不应超过 2.5mm ，以避免因补油过量导致隔膜破裂的风险。在调整补油阀的过程中，必须谨慎操作补油阀调节螺母，避免过度旋转。建议每次旋转角度控制在 15° 左右。补油阀调节螺母旋转角度“X”与“S”值之间的关系已在表 1 中详细列出。

表1 螺母旋转角度“X”与“S”的关系

X(°)	S (mm)
30° — 50°	0.5
90° — 100°	1.5
150° — 160°	2.5

4 结语

经对 N908 泵的结构特性进行深入分析，并结合实际运行调整经验，成功有效抑制了运行过程中的流量脉动现象。此举显著提升了该泵的计量精确度，并减少了流量波动，为尿素装置系统的稳定运行和优质产出提供了坚实的计量支持。

参考文献：

[1] 往复泵设计编写组. 往复泵设计[M]. 北京：机械工

业出版社，1987.

[2] 凌学勤. 往复泵输送矿浆峰值分散技术研究[J]. 冶金设备, 2003,8:22-25.

[3] 王小磊, 王芳. 进料缓冲器型式与隔膜泵匹配研究[J]. 化工机械, 2025,52(04):654-659+665.DOI:10.20031/j.cnki.0254-6094.202504017.

作者简介：周乐海（1984.5.6），男，汉族，云南昭通、学历 / 职称：大专，高级技师、研究方向：机械故障诊断及处理。