

扬修高转速电动执行器蜗轮蜗杆自锁失效分析与建议

赵欣欣 黄文远 雷震威
中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：某核电站3RRI021VN电动执行器调试再鉴定中出现阀门关到位后力矩无法保持、力矩开关反复复位导致电动执行器抖动的异常现象，该电厂已发生多起同型号扬修2HA3022型80r/min电动装置力矩复位故障。本文从蜗轮蜗杆自锁原理出发，通过导程角与当量摩擦角的理论计算，结合长期运行后的磨损机理分析，揭示自锁失效的根本原因：齿面磨损导致当量摩擦角减小至小于导程角时自锁条件被破坏。80r/min已接近蜗轮蜗杆自锁的转速极限，自锁冗余不足，长期运行后易出现自锁失效。据此提出材质改良、定期更换及低转速替代等改进建议，为高转速电动执行器可靠性提升提供参考。

关键词：电动执行器；蜗轮蜗杆；自锁失效；导程角；当量摩擦角

引言：电动执行器是核电站阀门控制系统的关键驱动设备，其可靠性直接影响核岛及常规岛各系统的安全运行。扬修2HA3022型电动执行器在核电站应用广泛，承担多工况下阀门的启闭控制。本文从蜗轮蜗杆自锁原理入手，通过理论计算与磨损机理分析，探究自锁失效的根本原因，并提出针对性改进建议，为同类设备故障排查与可靠性提升提供参考。

1 设备信息与故障现象

1.1 设备基本参数

故障设备为某核电站3RRI021VN电动执行器，其关键参数如表1所示。

表1 故障电动执行器铭牌参数

功能位置	3RRI021VN
型号	K3-2HA3022
额定功率/电流	1.5KW/6.1A
输出转速	80r/min
额定力矩	250Nm
关阀方式	力矩关

该型号为核级扬修2HA3022型电动装置，输出转速80r/min为该系列产品的最高转速等级，在核电站各系统中承担阀门驱动任务。

1.2 故障现象描述

在执行机构调试再鉴定过程中，阀门关闭到位后出现典型故障现象：电动执行器关力矩无法保持，力矩开关反复复位。具体表现为：阀门在关闭过程中，到达关阀位置时力矩开关无法一次性切断电气回路，出现反复复位现象，导致上游主回路接触器多次吸合释放，电动执行器抖动多次后才能最终关闭阀门^[1]。

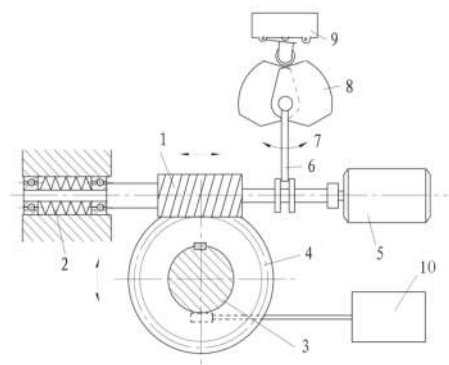
1.3 故障统计与规律性

经统计，该电厂已发生多起核级扬修2HA3022型80r/min电动装置力矩复位问题，故障呈现明显的规律性。查阅维护记录，同型号设备在不同功能位置均出现过类似故障。值得注意的是，大修年检调试期间此类故障较为集中，提示频繁操作可能加速了相关部件的性能退化。

2 蜗轮蜗杆自锁原理与运动分析

2.1 电动执行器传动结构

扬修2HA3022型电动执行器为蜗轮蜗杆传动式结构，在电动操作过程中，其动力传递路径为：电动机输出动力，通过蜗杆传至蜗轮，最终传递至输出主轴，由主轴驱动阀门实现开启与关闭（见图1）。该型电动执行器未设置专设自锁离合器机构，自锁功能完全依靠蜗轮蜗杆副自身的自锁特性实现。



1-蜗杆 2-碟簧组件 3-输出轴 4-蜗轮 5-电机 6-曲拐 7-转矩控制机构
8-凸轮 9-转矩开关 10-行程控制机构

图1 电动执行机构转矩控制原理

该型号电动执行器的输出转速为80rpm，是该电站扬修电动执行器的最高转速等级，蜗轮蜗杆具有减速和自锁两个功能。阀门的关阀方式为力矩关，即阀门到达全关位置时依靠力矩开关动作切断电源，因此力矩开关的

可靠动作与自锁功能保持对阀门可靠关闭至关重要^[2]。

2.2 蜗轮蜗杆自锁的力学条件

蜗轮蜗杆自锁的实现条件是：蜗杆分度圆的导程角 γ 小于当量摩擦角 ρ ，即：

$$\gamma < \rho$$

当该条件满足时，蜗轮无法反向驱动蜗杆，从而实现机械自锁。若导程角大于当量摩擦角，则自锁失效，蜗轮上的载荷将反向驱动蜗杆转动。

2.2.1 导程角 γ 的计算

导程角 γ 的计算公式为： $\tan \gamma = Z_1 \cdot p / C$

式中： Z_1 为蜗杆头数， p 为齿距， C 为蜗杆横切面分度圆周长。

以齿轮模数 m 的概念为基础：分度圆周长 $C = \pi \cdot d$ ，其中 d 为分度圆直径。齿距 $p = \pi \cdot m$ ，其中 m 为齿轮模数。

代入上式可得：

$$\tan \gamma = Z_1 \cdot \pi \cdot m / (\pi \cdot d) = Z_1 \cdot m / d$$

代入数据可知： $\gamma = 4.5^\circ$

经与厂家确认，该型号设备使用的蜗杆导程角为 4.5° ，与理论计算结果一致。

2.2.2 当量摩擦角 ρ 计算过程

经与厂家确认，该型号设备蜗轮蜗杆材质分别为：

蜗杆：40Cr调质

蜗轮：铝青铜

另外，查询摩擦系数表，可知：

钢与铜的动摩擦系数为： $\mu = 0.07 \sim 0.15$ ，取中间值为0.1

当量摩擦角 ρ 的计算公式为：

$$\rho = \arctan(\mu)$$

代入 $\mu = 0.1$ ，可得：

$$\rho = \arctan(0.1) \approx 5.7^\circ$$

结论：蜗轮的齿越竖直（越接近 90° ），导程角 γ 越小，减速作用越明显，自锁效果越好，即主轴输出转速越小，自锁越好；反之，主轴转速越大，自锁效果越差。80r/min已接近蜗轮蜗杆自锁的转速极限，自锁冗余不足是该型号设备的结构性薄弱环节。

2.3 动作过程与自锁失效机理

电动机动力经蜗杆传至蜗轮，再传至输出轴驱动阀门。蜗杆可轴向移动，碟簧预紧力使其处于蜗轮中心位置。当负载超过碟簧预紧力时，蜗杆轴向移动偏离中心，曲拐摆动传递位移至转矩控制机构，超设定转矩时力矩开关动作切断电源，执行器停止运行实现自锁。阀门关闭到位时，蜗杆压缩碟簧，曲拐带动凸轮触发力矩开关切断电源。若机构不自锁，阀杆反向作用力使蜗杆

反向移动，力矩开关无法保持^[3]。力矩抖动源于凸轮复位，关阀长命令下凸轮反复触发形成抖动。扬修电动执行器无专设自锁离合机构，80rpm已达自锁极限，长期运行后蜗轮蜗杆磨损致摩擦系数降低，全关位置易出现自锁失效。

3 自锁失效原因分析

3.1 蜗轮磨损对自锁性能的影响

在设备长期运行过程中，蜗轮蜗杆副不可避免地产生齿面磨损。蜗杆材质为40Cr调质钢，硬度较高；蜗轮材质为铝青铜，相对较软。在长期啮合运动中，蜗轮齿面优先发生磨损，表面粗糙度降低，实际接触面积增大，导致齿面摩擦系数下降。根据当量摩擦角的计算公式 $\rho = \arctan(\mu)$ ，摩擦系数 μ 减小将直接导致当量摩擦角 ρ 减小。当 ρ 值从新品的约 5.7° 下降至低于 4.5° 时，导程角 γ （ 4.5° ）将大于当量摩擦角 ρ ，自锁条件被破坏。此时阀门关闭瞬间，阀杆受到的反向作用力通过主轴传递至蜗轮，由于蜗轮蜗杆副无法自锁，蜗杆在蜗轮齿面的法向分力作用下产生反向轴向位移，曲拐摆回原位，力矩开关复位，电动执行器重新得电，如此反复形成抖动。

表2 自锁失效机理演变过程

阶段	状态	导程角 γ	当量摩擦角 ρ	自锁条件	结果
新品状态	齿面未磨损	4.5°	$\approx 5.7^\circ$	$\gamma < \rho$ 成立	自锁正常
长期运行后	齿面磨损	4.5°	$< 4.5^\circ$	$\gamma < \rho$ 不成立	自锁失效

3.2 设计缺陷与自锁冗余不足

该转速80rpm已是扬修设计的最大转速，没有专设自锁离合器机构，蜗轮蜗杆自锁已达到极限。当关闭瞬间，阀门阀杆的瞬间反向力作用在电动执行器主轴上，当自锁力不足时，容易出现自锁失效。从蜗轮蜗杆传动原理分析，转速越高，为获得较高的传动效率，蜗杆导程角 γ 的设计值越大。导程角 γ 增大直接导致自锁裕度（ $\rho - \gamma$ ）减小。80r/min已接近蜗轮蜗杆自锁的转速极限，在该转速下自锁冗余本已十分有限，加之长期运行磨损后摩擦系数下降，自锁失效的可能性大幅增加。低转速电动执行器由于导程角较小，自锁裕度更大，对磨损的容忍度更高。这解释了为何日常定期试验期间低转速电动执行器未出现类似自锁失效问题。

3.3 其他可能因素的排除

对力矩机构和其他传动机构的检查表明，力矩校验正常，解体检查未发现显著异常，可排除力矩机构故障作为主要原因。因此，自锁失效的核心原因指向蜗轮蜗杆副长期运行后的磨损及高转速条件下自锁冗余不足。

表3 各可能原因综合评估

可能原因	支持理由	反对理由	可能性
蜗轮磨损	蜗杆为钢材质较硬，铜蜗轮相对较软，长期运行后蜗轮齿表面存在磨损，改变了表面摩擦系数	蜗轮蜗杆表面覆盖油脂，通过润滑作用减少磨损	高
设计缺陷，自锁冗余少	80rpm已是扬修设计的最大转速，无专设自锁离合器，蜗轮蜗杆自锁已达到极限	系统上限转速处于设计许可区间，且初期运行时可实现自锁	高
力矩机构故障	力矩机构和其他传动机构存在故障，影响力矩正常保持	力矩校验正常，解体检查未发现异常	低
调试频繁操作	大修年检调试时出现力矩回弹，日常定期试验未出现	新备件调试多次操作未出现回弹	低

4 结论

综上所述，可得出以下结论：第一，自锁条件已被突破。该型号设备（80r/min）蜗杆导程角 $\gamma = 4.5^\circ$ ，新状态下当量摩擦角 $\rho = 5.7^\circ$ ，自锁裕度仅 1.2° ，冗余有限。一旦齿面磨损导致摩擦系数降低，当量摩擦角 ρ 减小至低于导程角 γ 时，自锁条件即被破坏。第二，磨损是自锁失效的直接诱因。设备长期运行后，铝青铜蜗轮齿面优先发生磨损，表面摩擦系数降低，当量摩擦角 ρ 减小至低于导程角 γ （ 4.5° ）时，自锁条件被破坏。此时阀门关闭瞬间阀杆反向力使蜗杆反向移动，力矩开关无法保持，形成反复复位抖动^[4]。第三，高转速是自锁失效的结构性因素。80r/min为该系列最高转速，导程角设计值较大，自锁裕度本已不足，属于结构性设计局限。该转速已是蜗轮蜗杆自锁能力的上限，无额外安全裕度应对磨损退化。第四，频繁操作加速了磨损进程。大修调试期间多次操作加速了齿面磨损，导致自锁失效在大修期间集中显现，而日常低频率操作时磨损速率缓慢，故障未暴露。第五，根本原因为自锁冗余不足叠加长期磨损。在设备投运初期（齿面未磨损）自锁功能尚可维持，长期运行后磨损导致摩擦系数降低，自锁裕度不足以补偿磨损效应，最终出现自锁失效。该问题属设计裕度与长期运行磨损累积效应的叠加结果。

5 建议

厂家已改良蜗轮和蜗杆的材质，提升了制作工艺（参数没有变化），提高了其操作寿命。并且通过试验，可解决现场蜗轮蜗杆磨损后无法自锁的问题。运行

建议：

- （1）对蜗轮蜗杆进行定期更换；
- （2）根据阀门情况，替代为低转速电动头；

结束语

本文针对扬修2HA3022型80r/min电动执行器自锁失效问题，从蜗轮蜗杆自锁原理入手，通过导程角 $\gamma = 4.5^\circ$ 与当量摩擦角 $\rho = 5.7^\circ$ 的理论计算，揭示自锁裕度仅 1.2° 。分析表明，长期运行后蜗轮齿面磨损导致摩擦系数降低，当量摩擦角减小至低于导程角时自锁条件被破坏，高转速设计导致的自锁冗余不足进一步放大了磨损影响。该型号无专设自锁离合器，完全依靠蜗轮蜗杆自锁，在转速接近自锁极限时无额外安全裕度，属结构性设计局限。建议通过蜗杆材质升级为20CrMnTi渗碳、蜗轮更换为锡青铜，结合定期更换及低转速替代方案，系统提升设备可靠性。

参考文献

[1]常森伟,黄美鹏,焦佳欢.核级直流阀门电动执行机构启动电流偏大的分析及处理[J].中国核电,2024,17(5):640-644.

[2]乔磊.基于智能型嵌入式电动执行机构控制器设计[J].电工技术, 2023(2): 107-108,122.

[3]张世炜,许海洋,童少飞.核级电动执行机构防腐研究[J].阀门, 2024(3): 300-304,314.

[4]吴运国,郭庆.用于调节阀的高精度直行程核级电动执行机构[J].机械制造, 2022,60(2):11-13.