

鼓式线控驻车执行器卡滞故障的机械结构诱因及解决路径

苏永胜

上海众持汽车零部件有限公司，上海市，201802；

摘要：鼓式线控驻车执行器：鼓式线控驻车执行器是 EPB 的关键部件，鼓式线控驻车执行器的工作稳定与否直接关系到车辆的行驶安全。针对某车型低温试验中鼓式线控驻车执行器出现的卡滞故障，本文从机械结构角度对故障诱因进行深入分析。通过一系列低温实验，明确了蜗轮蜗杆结构处的水汽凝结成冰晶以及润滑脂低温黏稠度变大是造成故障的主要机械结构相关原因。在此基础上，提出了更换合适的润滑脂，润滑脂用量控制，密封结构优化等解决路径，并对解决路径进行了验证。验证结果说明，所给出的解决路径可以有效解决低温环境下执行器卡滞故障，为鼓式线控驻车执行器的设计和改进提供了参考。

关键词：鼓式线控驻车执行器；卡滞故障；机械结构；低温环境

DOI：10.69979/3060-8767.25.08.074

引言

随着汽车工业的发展，电子驻车系统 EPB 因其操作方便，响应迅速等优势，在现代汽车中得到了广泛应用。鼓式线控驻车执行器作为 EPB 的核心执行部件，是实现车辆驻车制动的核心部件。车辆在使用过程中会面临复杂的环境条件，低温的环境对执行器的工作性能提出了严峻的考验。例如某车型低温试验车在实验舱内出现 EPB 工作失效，电子驻车无法启动的故障，而在常温下恢复正常。这一故障不仅影响了车辆的正常试验进程，也潜在地威胁到车辆在实际低温环境下的行驶安全。因此，

深入探究该鼓式线控驻车执行器卡滞故障的机械结构诱因，并制定有效的解决路径，具有重要的现实意义。

1 故障概况及实验设计

1.1 故障问题说明

A 车型低温试验车在实验舱内进行试验时，EPB 工作失效，电子驻车无法启动，而在常温下该功能恢复正常。实验舱内的温度为 -30°C 。

1.2 实验设计

表 1 故障件更换实验情况

序号	实验条件	故障件：执行器 + 制动器	故障件更换执行器：新执行器 + 制动器	新执行器	分析说明
1	-30°C 保持 4h	×	√	√	模拟整车实验条件，故障复现
2	-30°C 、保持 2h	×	√	√	故障指向执行器、排除制动器
3	-30°C 、保持 3h	×	√	√	-
4	升温至 -20°C 、保持 0.5h	√	√	√	故障和温度有关
5	降温至 -25°C 、保持 0.5h	×	√	√	-
6	-30°C 保持 2h	×	√	√	继续复现验证
7	100°C 烘干 1h 后继续降温至 -30°C 保持 2h	√	√	√	-
8	故障件取出空气中暴	×	√	-	故障件和水汽存在

	露 0.5h, 表面产生冷凝水, 模拟进水处理后放入 -30℃保持 2h				关联
9	此时拆解故障执行器, 内部单独电机 -30℃可正常运行	√	-	-	执行器故障原因排除电机

从表 1 故障件更换实验数据来看, 在不同低温条件下, 故障件(执行器 + 制动器)多次出现启动失败(×), 而新执行器相关组合大多能正常启动(√), 这直接表明故障核心指向执行器, 可排除制动器的影响。温度对故障的影响显著: -30℃环境下(实验 1、2、3、6), 故障件均启动失败; 升温至 -20℃(实验 4), 故障件恢复启动; 降温至 -25℃(实验 5), 故障件再次失效, 说明低温是触发卡滞的关键环境因素。水气关联实验(实验 8)显示, 故障件经冷凝水处理后, 在 -30℃下再次启动失败, 印证水汽参与了故障形成。而 100℃烘干后(实验 7)故障件恢复启动, 进一步佐证水汽是重要诱因。拆解实验(实验 9)中, 单独电机在 -30℃可正常运行, 排除了电机本身的问题, 说明故障源于执行器内部机械传动结构(如蜗轮蜗杆)在低温、水汽共同作用下的异常。故障本质为: 执行器机械结构在 -25℃以下低温环境中, 若存在水汽侵入, 会引发传动阻滞, 导致启动失败; 升温或去除水气后, 阻滞消失, 功能恢复。

2 机械结构诱因分析

2.1 故障指向判断

从上述实验结果来看, 在不同的低温实验条件下, 新执行器多数情况下能正常启动, 而包含故障执行器的组合多次出现不能启动的情况, 且通过实验排除了制动器和电机的问题, 故障指向执行器本身。同时, 实验结果表明故障和温度有直接关系, 当温度升高到一定程度时, 执行器可以恢复正常启动; 而且故障与水汽有关, 进一步说明执行器的故障是与机械结构在特定环境下的状态变化有关。

2.2 具体机械结构诱因

1. 蜗轮蜗杆结构低温阻滞力大

从对故障执行器的分析可知, 执行器低温失效主要是因为蜗轮蜗杆结构低温阻滞力大所致。蜗轮蜗杆结构执行器的关键机械结构是实现动力传递和运动转换的, 蜗轮蜗杆结构的正常运转, 对执行器的工作起着非常重要

的作用。在低温环境下, 该结构阻滞力增大, 执行器不能正常启动。

2. 水汽凝成冰晶

故障件在空气中暴露产生冷凝水后, 放入低温环境中再次出现无法启动的情况, 这表明水汽是故障发生的一个重要因素。在低温环境下, 执行器内部的水汽形成冰晶。这些冰晶还会附着在蜗轮蜗杆的齿面及啮合部位, 使蜗轮蜗杆间的摩擦阻力激增。另外, 冰晶的存在还可能堵塞蜗轮蜗杆的啮合间隙, 影响两者之间的正常传动, 从而增大了结构的阻滞力, 导致执行器卡滞故障。

3. 润滑脂低温黏稠度变大

在蜗轮蜗杆结构中润滑脂具有润滑及减少摩擦的作用。但是在低温下, 润滑脂的物理性质有所变化, 黏稠度大为增加。黏稠度越大的润滑脂在蜗轮蜗杆啮合运动时流动性越差, 不能及时在啮合表面形成良好的润滑膜, 造成蜗轮蜗杆之间的摩擦阻力增加。同时, 黏稠润滑脂还会给蜗轮蜗杆的运动带来更多的阻力, 进一步扩大了结构的低温阻滞力, 使得执行器难以正常启动。此外, 量产件小批量摸底测试也从侧面印证了上述诱因。部分样件在-40℃的测试条件下运行电流较大, 拆开后发现齿轮齿隙间有冰晶, 油脂量很大。这表明低温时油脂量过多会加剧黏稠度变大的不利影响, 而冰晶的存在又直接影响了齿轮的正常运转, 从而进一步说明了水汽凝成冰晶及润滑脂低温性能变化对机械结构正常运转的不利影响。

3 解决路径

3.1 优化润滑脂

1. 更换适配润滑脂

润滑脂的性能对蜗轮蜗杆结构的运转有着重要的影响。目前采用的润滑脂在低温下的黏稠度变化较大, 不能满足执行器在低温环境下的工作需求。因此, 需寻源对标更换润滑脂。通过对不同润滑脂低温性能的测试, 选择低温下黏稠度变化较小的润滑脂。

2. 控制润滑脂用量

由前文实验及测试可见，润滑脂用量过大也会对执行器运行有不利影响。过量的润滑脂在低温下更易聚集，增加摩擦阻力。因此，润滑脂涂量要根据执行器的实际结构和工作需要，准确控制，在润滑要求的前提下，避免过量带来的问题。

3.2 优化密封结构，防止水汽进入

在执行器生产出厂前对其进行全套的气密性检测，保证每个执行器密封性能符合要求，杜绝在生产过程中由于密封不良而造成水汽进入的现象。防尘套和拉索处，是执行器易发生水汽渗漏的薄弱环节。通过防尘套的材料和结构进行改进，增加防尘套的密封性；对拉索与执行器的连接部位进行优化设计，增加密封措施，如使用密封垫圈等，以防水汽进入执行器内部。执行器中的橡胶密封件在低温下会发生收缩等情况，影响密封效果。适当增加橡胶件密封的过盈量，可以在低温下仍然保证良好的密封性能，防止水汽进入。

3.3 整车控制器调整

除了从执行器本身的机械结构及相关部件进行优化外，还可以通过整车控制器提高常态下控制电流值。适当提高控制电流，能够为执行器提供更大的驱动力，以克服低温环境下蜗轮蜗杆结构因冰晶和润滑脂黏稠度变大而产生的较大阻滞力，确保执行器能够正常启动。

4 方案验证分析

4.1 润滑脂用量验证

表 2 不同润滑脂用量测试情况

序号	描述	运行电流 (A)	分析说明
1	无润滑脂	4.41-4.93	-
2-1	少量润滑脂	6.11-6.3	过量润滑脂会导致电机空转运行电流过大
2-2	少量润滑脂	6.11-6.3	-
3-1	过量润滑脂	7.9-8.28	-
3-2	过量润滑脂	7.9-8.28	-

从表 2 不同润滑脂用量测试数据来看，润滑脂用量对执行器运行电流存在显著影响，且直接关联机械传动阻力状态。无润滑脂时（实验 1），运行电流为 4.41~4.93A。这一数据反映出蜗轮蜗杆等传动结构在缺乏润滑的情况下，金属直接接触产生基础摩擦阻力，但未形成额外阻滞——无润滑虽会加剧磨损，却不会因润

滑介质本身引发过大阻力。少量润滑脂条件下（实验 2-1、2-2），运行电流升至 6.11~6.3A。电流升高的原因是润滑脂在传动面形成油膜，虽能减少干摩擦，但低温环境下润滑脂本身的黏稠度会产生一定黏性阻力。不过该电流水平仍处于相对合理区间，未超出执行器正常驱动能力范围。过量润滑脂时（实验 3-1、3-2），运行电流大幅增至 7.9~8.28A。这一现象印证了分析说明中“过量润滑脂会导致电机空转运行电流过大”的结论：多余的润滑脂在低温下会形成“胶结”效应，在蜗轮蜗杆啮合间隙中产生强烈黏性阻滞，迫使电机输出更大功率以克服阻力，最终表现为电流骤升。若该电流超过电机额定驱动能力，便会引发执行器卡滞。润滑脂用量与运行电流呈正相关趋势，且过量润滑脂的负面影响远大于无润滑或少量润滑的情况。这提示在执行器生产中，需严格控制润滑脂用量——既不能完全缺失，也需避免过量，以平衡润滑效果与低温阻力，确保电机驱动电流处于安全阈值内。

4.2 润滑脂种类验证

表 3 不同种类润滑脂验证情况

润滑脂种类	启动电流 (A)	结论
第一种新润滑脂	5.11-6.04	-
第二种新润滑脂	3.06-4.52	第二种润滑脂低温启动电流小于 6A（整车启动电流），平稳运行后空转电流均在 2.5A 左右
第三种新润滑脂	3.4-9.78	-
目前在用的润滑脂	5.28-7.84	-

表 3 不同种类润滑脂验证数据从表中可以看出，润滑脂的类型对于执行器低温起动性能的影响很大，启动电流的不同直接体现了润滑脂在低温环境下的润滑效果与阻力特性。目前在用的润滑脂启动电流为 5.28~7.84A，这个范围较大。如果处于低温环境中，此润滑脂的黏稠度可能会有较大的增加，蜗轮蜗杆等传动结构的摩擦阻力会增大，电机需要输出较大的功率才能够驱动执行器启动，从而表现出较大的启动电流。如果持续的启动电流处于高位，既增大了能耗，极端时，由于电流过大，可引起执行器的卡滞。第一种新润滑脂启动电流为 5.11~6.04A，总体上与现行润滑脂相比，启动电流

降低,但幅度不大。这说明该润滑脂低温性能较现有润滑脂有一定改善,在一定程度上可降低传动阻力,但未达到最优化,其低温黏稠度的优化可能还有提高的空间。第二种新润滑脂表现最为突出,启动电流仅为3.06~4.52A,且明显低于整车启动电流6A。这种数据说明了该润滑脂在低温环境下具有较好的流动性和润滑性能,可以有效减少蜗轮蜗杆传动时的摩擦阻力。同时,其平稳运行后的空转电流均在2.5A左右,进一步说明该润滑脂在执行器正常运行过程中,能持续保持较低的阻力,不会给电机带来额外的负担,能很好地适应低温环境下执行器的工作需求,是较为理想的选择。第三种新润滑脂启动电流为3.4~9.78A,该数值范围波动较大。这可能是由于该润滑脂的稳定性较差,在低温环境下的性能表现不稳定,有时能提供较好的润滑效果,使启动电流较低;但在某些情况下,其润滑性能会大幅下降,导致启动电流急剧升高。这种不稳定性会给执行器的工作带来较大风险,不利于保证执行器运行的可靠性,因此不适合在该执行器上使用。不同种类润滑脂在低温下的性能差异明显。第二种新润滑脂在启动电流和运行稳定性方面均表现优异,能满足执行器在低温环境下的工作要求;第一种新润滑脂有一定改善但效果有限;第三种新润滑脂稳定性不足;目前在用的润滑脂低温性能欠佳。因此,从提升执行器低温工作稳定性的角度出发,建议优先选用第二种新润滑脂。

4.3 综合验证

在采用了更换第二种新润滑脂、控制润滑脂用量、优化密封结构以及调整整车控制器控制电流等措施后,对改进后的执行器进行了低温实验。在 -30°C 等低

温环境下,执行器能够正常启动,未再出现卡滞故障,表明所提出的解决路径能够有效解决鼓式线控驻车执行器的卡滞故障。

5 结论

本次针对鼓式线控驻车执行器在低温环境下出现的卡滞故障,通过一系列实验明确了故障的机械结构诱因主要是蜗轮蜗杆结构处水汽凝成冰晶和润滑脂低温黏稠度变大导致阻滞力增大。针对这些诱因,提出了更换适配润滑脂、控制润滑脂用量、优化密封结构以及调整整车控制器控制电流等解决路径。通过实验验证,这些解决路径能够有效解决低温环境下执行器的卡滞故障,保证了执行器在低温环境下的正常工作。本次研究不仅解决了特定车型的实际故障问题,也为鼓式线控驻车执行器在低温环境下的设计、生产和改进提供了宝贵的经验和参考,对于提高汽车电子驻车系统的可靠性具有重要意义。

参考文献

- [1] 李春,王尔烈,聂石启,王洪亮,谭福伦,皮大伟.纯电动商用车气压驻车制动线控技术研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(07):309-314.
- [2] 张明.2017款一汽奥迪A4L(B9)新技术剖析(三)[J].汽车维修技师,2016,(12):18-21.
- [3] 黎薇,彭忆强,张津蕾,黎长青.线控驻车制动系统驱动部件的动态模拟[J].机械与电子,2008,(03):26-28.
- [4] 黎薇,彭忆强.线控驻车制动系统辨识方法研究[J].西华大学学报(自然科学版),2008,(01):9-11+22+101.