

工业机器人减速器磨损可靠性寿命预测

张 振

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘 要】：减速器属于工业机器人关节传动系统的关键部件，它所发生的磨损退化会对机器人作业的精确度，运行的稳定性以及使用寿命产生影响。为了准确预测减速器的服役状态，提高机器人设备的运维可靠性，本文根据磨损机理和可靠性理论，分析工业机器人减速器主要的磨损形式及影响因素，利用 Archard 磨损模型建立适合变工况的磨损寿命预测模型，用实际工况试验数据对模型进行验证，总结出磨损防控和寿命延长的优化策略。从试验结果可以看出，本预测模型可以很好地反映减速器磨损退化的规律，预测误差控制在合理的范围内，可以为工业机器人减速器的状态检修、寿命评价以及设备运维体系的改进提供技术支持。

【关键词】：工业机器人；减速器；磨损机理；可靠性；寿命预测

DOI:10.12417/3041-0630.26.11.001

1 引言

工业机器人被普遍应用到智能制造、机械加工、物流搬运等各个领域当中。目前大多数企业对于机器人减速器的运维都是采取定期检修、到期更换的被动方式，缺少准确的寿命预判依据，造成过度维护或者维护滞后的情况。本文以机械磨损动力学和可靠性工程理论为基础，对减速器磨损退化的规律进行研究，建立高精度寿命预测模型，用工程实例来验证模型的实用性，为实现减速器视情维护、提高设备运行可靠性提供理论和实践支持。

2 工业机器人减速器磨损机理及主要形式

2.1 主流减速器类型及服役特性

工业机器人常用的减速器有 RV 减速器和谐波减速器两种，RV 减速器由于具有高承载、高精度、高刚性等特点，被广泛应用于重载、高精度作业的机器人关节上，是工业场景中磨损故障高发的核心部件。减速器内部构件的接触摩擦、循环载荷冲击是造成减速器磨损的主要原因，长期使用中磨损呈逐渐退化的趋势，故障发展具有持续性、不可逆的特点，对整个机器人的作业稳定性有较大影响。

2.2 主要的磨损形式

一是磨粒磨损。设备运行时，润滑油里混有金属碎屑、粉尘杂质，硬质颗粒在齿轮啮合、轴承滚动时把表层材料剥落、划伤，是减速器最常见的一种磨损方式，长时间积累会使传动间隙增大。二是粘着磨损。高速重载工作条件下，构件接触表面局部温度急剧上升，表层金属产生粘连撕裂，齿面、轴承滚道出现材料迁移和损伤，多在高频启停作业工况下发生。第三种是疲劳磨损。构件长期受交变载荷作用，表面产生微观疲劳裂纹，裂纹不断扩展导致材料剥落，出现点蚀、剥落损伤，传动精度下降。四、腐蚀磨损。润滑脂老化变质、环境湿度超标

时，构件表面发生氧化腐蚀，腐蚀层在摩擦作用下脱落，加快构件失效。

3 磨损寿命预测模型的建立

3.1 基础磨损理论

根据经典的 Archard 磨损理论，结合机器人减速器变工况磨损的特点来建立适应工程应用的磨损可靠性寿命预测模型。Archard 基础磨损公式表明，构件磨损量和接触载荷、摩擦距离成正比，和材料硬度成反比，可以准确反映稳态工况下磨损规律，给模型搭建提供主要的理论依据。

3.2 变工况模型的优化

对工业机器人变载荷、变转速、频繁启停的复杂工况，采用工况修正系数、润滑修正系数，对基础模型加以改进，消除稳态模型的计算误差。优化后的磨损量计算模型考虑了载荷波动、转速变化、润滑状态等因素对磨损量的影响，可以实时拟合出不同的工况下磨损增量。根据疲劳累积损伤理论，把减速器磨损退化程度同可靠度联系起来，用传动误差、振动幅值来表示性能退化程度，确定减速器失效阈值，得到剩余寿命计算公式，从而对磨损可靠性以及剩余寿命进行定量预测。

3.3 模型参数标定

模型参数用试验标定来确定，磨损系数、材料修正系数用构件磨损试验得到，工况修正系数根据现场作业载荷谱、转速谱统计计算，润滑修正系数结合润滑脂老化周期、污染程度标定，多维度精确校准参数，保证模型符合实际工程工况，提高预测准确性。

4 实例验证及结果分析

4.1 试验方案的设计

本次试验所选的工业机器人常用 RV 减速器为 BX-40E 型，

该设备用于汽车零部件焊接生产线，日常作业工况为频繁启停、小幅度载荷变化。利用减速器性能试验台对运行转速、承载载荷、振动信号、传动误差等进行实时采集，连续观测 5000 小时，观察各个服役时间点的磨损退化情况，检验预测模型是否准确。试验工况参数如表 1 所示。

表 1 试验工况参数

参数类型	参数数值
额定载荷	400N·m
额定转速	1500r/min
工作温度	25-45℃
启停频次	8-12 次/min
润滑介质	专用精密润滑脂

按照每 500 小时一个检测周期，统计各个周期减速器的实际磨损量和传动误差，并用建立起来的预测模型来计算理论磨损量和剩余寿命，然后进行模型预测精度的对比分析，核心试验数据和预测结果见表 2。

表 2 核心试验数据和预测结果

服役时长/h	实际磨损量/ μm	预测磨损量/ μm	相对误差/%	设备可靠度/%
1000	3.21	3.15	1.87	98.62
2000	6.58	6.42	2.43	95.37
3000	10.24	9.98	2.54	90.15
4000	14.86	14.43	2.89	83.42
5000	20.12	19.57	2.73	74.68

4.2 试验数据的统计分析

从试验数据可以看出，随着服役时间的延长，减速器的磨损量越来越大，设备的可靠性逐渐下降，磨损退化速度先慢后快，符合精密机械构件磨损的一般规律。本次模型预测结果与实际检测数据最大相对误差为 2.89%，总体误差控制在 3%之内，预测精度较高，可以满足工程应用要求。当服役时间达到 5000 小时的时候，设备的可靠度就下降到 75%以下，这时就要进行检修和保养工作。

参考文献：

[1] 孟震英.工业机器人精密减速器润滑油性能评价[J].石油商技,2025,43(2):34-40.
[2] 赵恒,刘志博,赵转哲,等.工业机器人用谐波减速器机电耦合建模及仿真方法[J].安徽科技学院学报,2025,39(2):96-103.
[3] 邢琳,蔺道深.SCARA 用小型谐波齿轮减速器齿轮磨损故障预测的研究[J].机器人技术与应用,2024,(3):34-40.

4.3 误差的原因分析

试验结果表明，载荷波动、润滑脂老化是造成预测偏差的两个主要原因，高频启停工况下冲击载荷会使瞬时磨损加重，润滑脂长时间使用后粘度变低、杂质增多，会降低润滑防护效果，之后可以采用动态修正工况系数的方法来提高模型精度。

5 磨损防控及寿命改善策略

5.1 运行工况的优化

改善设备运行状况，削减磨损诱因。合理安排机器人作业路线，防止长期超负荷、超转速运行，削减频繁急停急转的操作方式，减小交变冲击载荷给减速器造成的磨损伤害。根据重载作业场景合理分配关节的载荷，防止某一个关节的减速器长时间工作造成过载，从而达到均衡磨损的目的。

5.2 润滑体系完善

健全润滑维护体系，加强磨损防护。根据作业工况准确选择润滑介质，严格按照周期进行润滑脂更换和加注，防止油脂老化、缺少、污染等问题。创建润滑状况定时检查体系，马上清除润滑油路上的杂质，从根基上削减磨粒磨损、粘着磨损的产生。

5.3 准确的运维管理管控

实行视情精准运维，即取消原来的定期检修。根据本文建立的寿命预测模型，利用设备运行数据的实时监测，准确地预测出减速器的磨损状况和剩余寿命，有针对性地进行检修、保养、更换工作，既不会造成不必要的过度维护而造成资源浪费，也不会因为维护不到位而产生设备故障。

6 结论

本文通过对工业机器人减速器磨损机理及可靠性影响因素的分析，利用经典的磨损理论建立改进的磨损寿命预测模型，并通过工程试验对模型进行验证，得到如下结论。一是工业机器人减速器磨损主要为磨粒磨损、疲劳磨损，多种磨损形式相互作用导致设备性能下降，工况变化、润滑失效、装配偏差是造成磨损的主要原因。二是建立的变工况磨损寿命预测模型符合实际作业场景，预测误差小于 3%，可以准确表征减速器磨损退化规律和可靠度变化趋势，满足工程寿命评价的需求。三是采用工况优化、润滑控制、精确维护等方式可以减缓减速器的磨损速度，提高设备的可靠性，延长设备的服役寿命。