

RV 减速器服役工况加速载荷谱编制方法

杨 雨^{1,2} 李晓雷² 陶友瑞^{1,2} 郭祺雨^{1,2} 叶 楠^{1,2*}

1.河北工业大学省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室,天津,300132

2.河北工业大学机械工程学院,天津,300401

摘要:针对工业机器人关节 RV 减速器可靠性分析与寿命预测的需要,提出了一种基于服役工况的 RV 减速器加速载荷谱编制方法。现场采集工业机器人关节的扭矩-时间数据并进行数据预处理,应用马尔可夫链蒙特卡罗法进行时域重构并将工况合成为 RV 减速器典型工况重构载荷历程,采用雨流计数法进行统计计数并进行分布拟合和参数估计,获得载荷均幅值的统计分布规律。将频次外推得到的均幅值二维载荷谱等寿命转化为 8 级一维程序加载谱,并根据 RV 减速器实际使用情景进行加速,编制成为 RV 减速器一维加速程序加载谱,该方法显著缩短了疲劳寿命试验周期。

关键词:工业机器人;RV 减速器;载荷谱;加速寿命试验;疲劳寿命

中图分类号:TH132.46

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Accelerated Load Spectrum Preparation for RV Reducer Service Conditions

YANG Yu^{1,2} LI Xiaolei² TAO Yourui^{1,2} GUO Qiyu^{1,2} YE Nan^{1,2*}

1.State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin, 300132

2.School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, 300401

Abstract: Aiming at the needs of reliability analysis and life prediction of RV reducers for industrial robot joints, a method of compiling accelerated load spectrum for RV reducers was proposed based on service conditions. On-site collection of industrial robot joint torque-time data and data pre-processing, the Markov chain Monte Carlo methods(MCMC) were applied for time-domain reconstruction and service conditions were synthesized as a typical RV reducer reconstruction of the load history. The rainfall counting methods were used for statistical counting, distribution fitting and parameter estimation, to obtain the statistical distribution laws of the mean-amplitude of the load. The mean-amplitude two-dimensional load spectrum obtained by frequency extrapolation were transformed into 8-level one-dimensional program loading spectrum, and accelerated based on the actual applications of RV reducers, which was compiled into a one-dimensional accelerated program loading spectrum of RV reducers, which greatly shortened the fatigue life test cycle.

Key words: industrial robot; RV reducer; load spectra; accelerated life test; fatigue life

0 引言

RV 减速器具有结构紧凑、传动比大、承载能力强、传动平稳、传动效率高等优点,被广泛应用于工业机器人重载关节。RV 减速器的疲劳寿命是评价其可靠性的重要指标之一,国内外学者从寿命模型、测试方法、评价指标、影响因素等方面对 RV 减速器的疲劳寿命进行了大量的研究。张跃明等^[1]基于疲劳强度理论建立了 RV 减速器额定寿命模型,并开展加速寿命试验进行额定寿命预测;周坤等^[2]基于小样本的高应力加速退化试验建立了 RV 减速器退化模型,完成剩余寿命的预测;XU 等^[3]在变载条件下对 RV 减速器展开

了动力学分析,得出高频重载工况对 RV 减速器整机寿命影响较大的结论;HUANG 等^[4]根据多种型号的 RV 减速器曲柄轴承载荷数据,利用乌鸦搜索算法对 RV 减速器内部轴承的疲劳寿命预测方法进行了优化。相较于设计阶段额定工况, RV 减速器在服役过程中受工业机器人急停急起、变速变载、惯性冲击等典型工况影响,载荷状态极为复杂多样,因此 RV 减速器的寿命预测需考虑随机交变载荷对 RV 减速器的影响。一般采用构建 RV 减速器服役工况载荷谱的方法对其服役过程载荷情况进行统计学分析。为有效提高 RV 减速器寿命预测精度并降低疲劳试验成本,引入加速寿命试验的方法,可在更短时间内得到 RV 减速器全寿命周期数据。

在加速载荷谱编制及应用方面,国内外在汽

收稿日期:2024-06-06

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4702100);河北省教育厅科学研究项目(ZD2020180)

车、高速列车、重型机械等领域已经有了大量研究成果,针对工业机器人 RV 减速器的研究则相对匮乏。藤瑞品等^[5]采集汽车试验场载荷谱数据进行外推并分级,计算了不同等级对疲劳损伤的影响;姚凌云等^[6]提出了一种基于 S 变换的双阈值加速载荷谱编辑方法,试验的时间压缩效率明显提高;郑国峰等^[7]应用小波变换对汽车零部件载荷信号进行了压缩,编辑的加速载荷谱与原始载荷谱具有相同的加载效果,并保持相似的失效模式;LU 等^[8-9]结合加速寿命试验(accelerate life test, ALT)方法及有限元分析,对高速列车车体及转向架进行 ALT 测试并推导其疲劳寿命;文献^[10-12]根据实测数据编辑加速寿命载荷谱,并基于等损伤理论编辑疲劳试验程序载荷谱,进行了结构耐久性分析。

本文基于现场实测工业机器人关节载荷数据,应用统计学与信号处理方法,分析 RV 减速器真实受载情况,提出了一种工业机器人 RV 减速器加速载荷谱编制方法,为 RV 减速器疲劳分析提供参考。

1 载荷信号获取与预处理

工业机器人在服役过程中,各关节位置、角速度、角加速度时刻发生着变化,加上负载的改变,导致关节所受载荷不断变化。对 RV 减速器真实载荷数据进行统计分析,形成各工况下的典型载荷分布图谱,能够明确 RV 减速器真实受载情况,因此,深入工业机器人用户现场,采集真实载荷数据是编制服役工况载荷谱的前提。

服役工况中工业机器人关节处主要承受径向力、扭矩以及倾覆力矩三种载荷。通常情况下,受自由度限制,位于工业机器人第一、二、三关节处的 RV 减速器所受载荷类型以扭矩为主,因此,本文主要对 RV 减速器输出端的扭矩-时间数据进行采集分析。

工业机器人各关节内部控制及传动部分可简化为“驱动器-电机-减速器-负载”系统,整个机械臂由电机驱动,电机内安装编码器,记录电机轴的运动状态信号,并将信号反馈至驱动器,驱动器通过运动控制单元传递单相电流信号来调节电机转速及扭矩,以适应关节负载的改变,因此,工程上对工业机器人关节载荷进行信号检测时,可以通过采集电机信号进行检测。通过驱动器内部自带的电流传感器采集经平滑处理的单相电流信号,并根据电流大小及相关参数计算出电机扭矩,上传至上位机软件界面,在不考虑电磁扰动的情

况下,电机扭矩即为减速器输入扭矩^[13]。电机电流信号与减速器输出端扭矩换算关系如下:

$$T = kI\eta/i \quad (1)$$

式中: T 为 RV 减速器输出端扭矩; k 为电机扭矩常数; I 为采集到的电机电流; i 为减速器传动比; η 为 RV 减速器输出功率与输入功率之比。

本文选择应用于搬运工况的 CCR006-900 型六轴机器人进行现场载荷数据采集,采样频率为 250Hz,该机器人第一、二、三关节处所用减速器均为 RV40E-81 型减速器。第二关节 RV 减速器的服役位姿与 GB/T 40729—2021《精密齿轮传动装置疲劳寿命试验方法》中规定的卧式疲劳试验台试验位姿一致,因此本文对第二关节的 RV 减速器载荷数据进行采集。工业机器人外观如图 1 所示。



图 1 CCR006-900 型六轴机器人
Fig.1 CCR006-900 6-axis robot

工业机器人 RV 减速器在服役过程中不同作业段特征显著不同,为确保采集信号的真实性、典型性、全面性及有效性,应分别采集不同工况数据样本,典型工况确定原则为:①所选工况应具有代表性,能代表该工种的主要作业工况;②根据所研究型号的作业特点,能反映该机型的特殊性能;③根据对用户使用数据的统计调查,确定典型工况以及使用时间比例。基于上述原则采集获得的部分工业机器人 RV 减速器扭矩-时间数据见图 2。

图 2 中 4 组数据均依据 GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其实验方法》中规定的试验位姿及测试轨迹进行轨迹规划采集。受环境因素、系统误差及人为因素等影响,现场采集的扭矩-时间数据不可避免地存在趋势项、异常峰值点、噪声等失真信号,这些失真信号严重影响载荷数据后续的分析和处理。为了还原 RV 减速器服役工况下载荷变化的真实规律,根据失真信号的特点,采用最小二乘法剔除趋势项,利用小波变换滤除奇异点,并作降噪及滤波处理。以上 4 种工业机器人 RV 减速器载荷数据包含不同工况下多

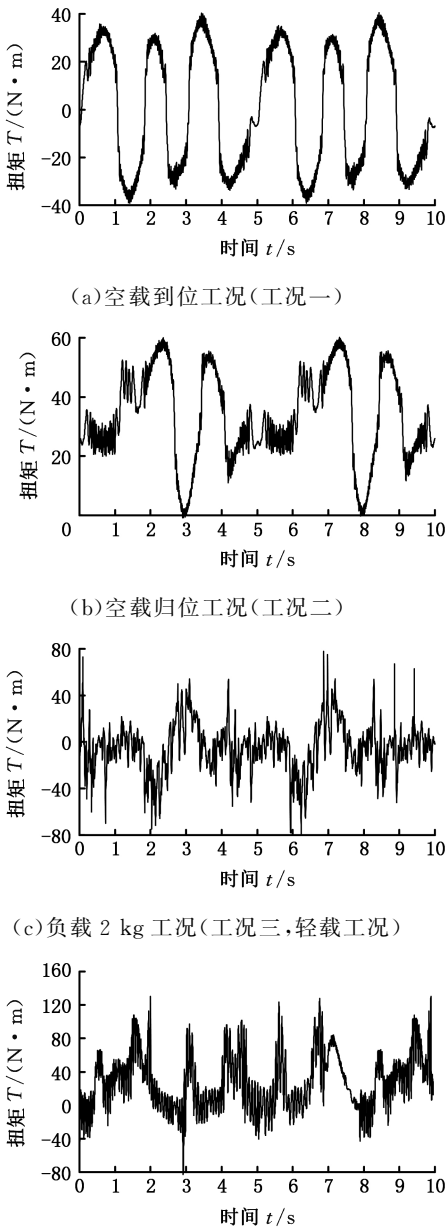


图 2 现场实测 RV 减速器扭矩-时间数据
Fig.2 Torque-time data for RV reducers measured in the field

种作业段 RV 减速器受载情况,从一定程度上能够代表 RV 减速器典型工况下载荷变化规律。

2 RV 减速器服役工况载荷谱编制

2.1 多工况合成及载荷统计计数

采集多种工况载荷数据后,应将数据进行多工况合成,以便于后续进行统计学分析及数据处理。受试验条件限制,采集获得每种工况的扭矩-时间数据时长相同,这导致所模拟的工况场景时间比例与服役工况中各场景时间比例不一致。为使载荷谱还原 RV 减速器全寿命周期不同工况实际时间比例,需依据实际使用时间比例进行时域重

构。根据采集用户统计调查,上述 4 种典型工况采集时长比例及实际工况中时长比例如表 1 所示。

表 1 4 种工况采集时长及实际时长比例

Tab.1 Sampling duration and actual duration ratio for four working conditions

工况	采集时长比例	实际时长比例
一	25%	38%
二	25%	36%
三	25%	10%
四	25%	16%

本文选择马尔可夫链蒙特卡罗法 (Markov chain-Monte Carlo, MCMC) 对扭矩-时间数据进行时域重构,此方法是一种广泛应用于随机数据重构的采样方法,从 4 种工况样本中采样任意两个相邻载荷点分别作为极大值和极小值,以合成工况载荷数据作为目标分布函数,进行蒙特卡罗模拟。以表 1 中 4 种工况实际时长比例作为判定值,直至从各工况中进行载荷随机采样的数量达到实际比例,则采样结束,实现时域重构后各工况随机采样数据的时长比例与实际时长比例的统一。基于马尔可夫链蒙特卡罗法的 RV 减速器载荷数据时域重构流程如图 3 所示。

图 3 中,已知极值载荷时域序列 $X_i = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_i\}$,极值载荷的载荷等级为 $\varphi^{(j)} (j = 1, 2, \dots, n)$ 。在 MCMC 模型中, $\pi(\varphi)$ 表示与载荷状态相关的平稳分布,用于描述极值载荷大小 φ_i 处于不同载荷等级 $\varphi^{(j)}$ 的长期概率,载荷状态包括载荷大小和载荷等级信息, φ 表示当前载荷状态, φ' 表示下一载荷状态, $\pi(\varphi)$ 满足:

$$\pi(\varphi) = \int P(\varphi | \varphi') \pi(\varphi') d\varphi' \quad (2)$$

若载荷等级的分布函数 $\sum_{j=1}^n \pi(\varphi^{(j)}) = 1$,即可对载荷序列进行从极大值到极小值的数据采样。以下为采样步骤:设时间为 t 时的载荷大小为 φ_t ,载荷等级为 $\varphi^{(j)}$,载荷状态转移概率为 $z \sim q(\varphi | \varphi')$,其中 $q(\varphi | \varphi')$ 表示提议分布,用于从当前载荷状态 φ 生成候补转移状态 z ,随机数据点 u 满足标准均匀分布,即 $u \sim U(0, 1)$,对 u 进行判定并采样;随后将每个单点极值载荷进行时域扩展, $rand(0, 1)$ 表示在 0 到 1 之间任取一个数;重复上述采样操作,即可得到时域重构后的极值载荷等级 N ,计算得出扩展后的载荷时域序列 X'_i 。

对随机采样的时域重构扭矩数据进行前后叠加可实现多个典型工况载荷数据工况合成,获得的 RV 减速器典型工况重构载荷历程如图 4 所示。为分析 RV 减速器典型工况重构载荷历程统计特性,本文对重构载荷历程及现场采集的扭矩-

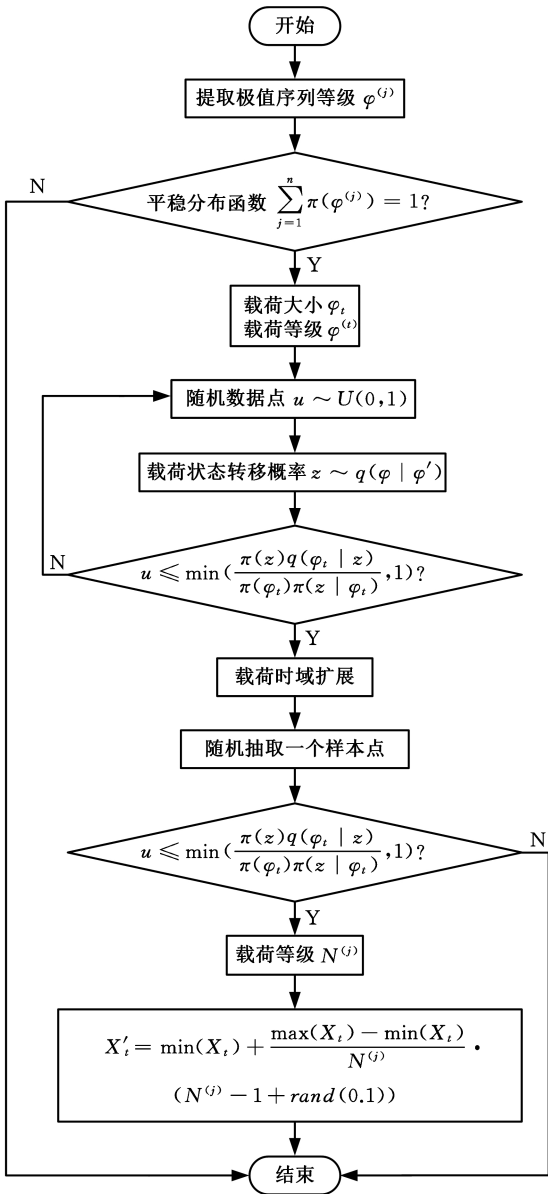


图 3 基于 MCMC 的 RV 减速器典型工况合成流程
Fig.3 Typical working condition synthesis process of RV reducer based on MCMC

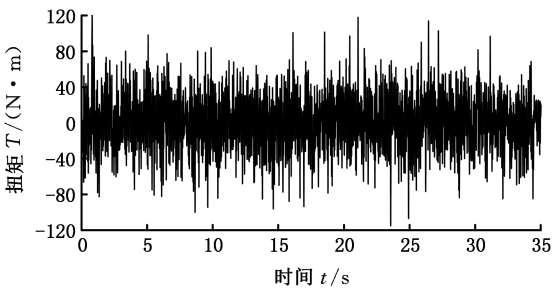
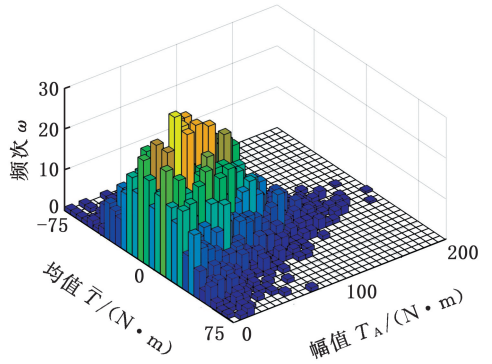


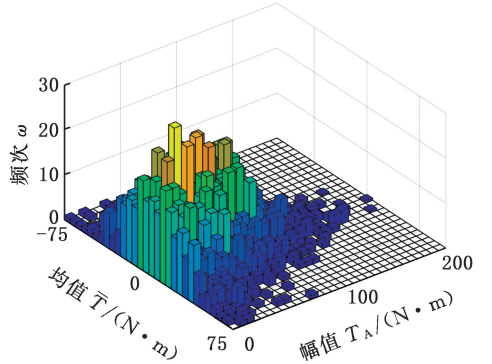
图 4 典型工况重构载荷历程
Fig.4 Typical working condition reconstruction load history

时间数据应用两参数雨流计数法进行统计计数, 雨流计数结果如图 5 所示。

从图 5 中可知,应用 MCMC 方法时域重构的载荷历程雨流计数结果与将 4 种典型工况不进行



(a) 重构载荷历程雨流计数结果



(b) 4 种工况直接合并雨流计数结果

图 5 雨流计数结果

Fig.5 Rainflow count results

重构直接合并的雨流计数结果,均幅值频率及大小基本一致,表明 MCMC 重构方法针对本文采集的工业机器人载荷数据重构效果较为理想,下面对重构载荷历程雨流矩阵进行数据分析。

2.2 载荷分布规律

由文献[14-15]可知,通过雨流计数法得到的均幅值二维变量中,幅值一般服从 Weibull 分布,均值一般服从正态分布。分别对载荷幅值及均值进行分布拟合以及参数估计以验证其分布规律,假设幅值服从三参数 Weibull 分布,其概率分布密度函数为

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x-\epsilon}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x-\epsilon}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (3)$$

式中: x 为载荷幅值; α 为形状参数; β 为尺度参数; ϵ 为位置参数,一般取 0。

载荷幅值-频次二维直方图见图 6,其参数估计值 $\alpha = 1.4591, \beta = 48.2391, \epsilon = 0$ 。

假设均值服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$,其概率分布密度函数为

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

式中: y 为载荷均值; μ, σ 分别为正态分布的均值和标准差。

载荷均值-频次二维直方图见图 7,其参数估计值 $\mu = -0.1351, \sigma = 21.6796$ 。

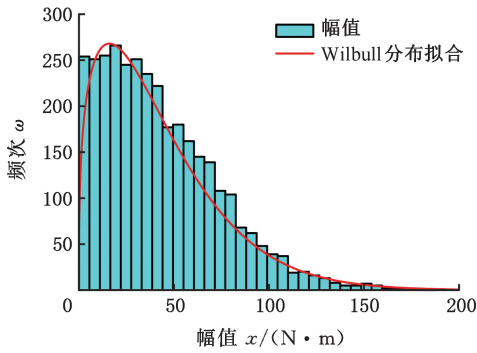


图 6 载荷幅值-频次二维直方图

Fig.6 Amplitude-frequency two-dimensional histogram

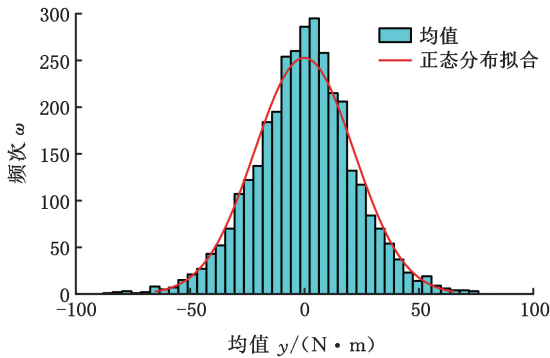


图 7 载荷均值-频次二维直方图

Fig.7 Mean-frequency two-dimensional histogram

为进行载荷频次外推,需得到均幅值二维变量的联合概率密度函数,有必要对均值和幅值两个随机变量的独立性进行检验,本文利用 χ^2 检验的方法对幅值和均值的独立性进行检验。

假设 x 和 y 相互独立,构建统计量:将 x 分为 u 级, y 分为 v 级, n_i ($i=1,2,\dots,u$)为幅值在第 i 级的频次, n_j ($j=1,2,\dots,v$)为均值在第 j 级的频次, n_{ij} 为第 i 级幅值且第 j 级均值的频次, n 为样本容量,则根据 Fisher 定理可得

$$\chi^2 = n \sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^v \frac{(n_{ij} - n_i n_j / n)^2}{n_i n_j} \quad (5)$$

式(5)所示的样本统计量近似服从自由度为 $(u-1)(v-1)$ 的 χ^2 分布。根据 Pearson 定理,若假设成立,则当 $n \rightarrow \infty$, χ^2 分布收敛到 $\chi^2[(u-1)(v-1)]$,给定检验水平为 0.05,则检验拒绝域为 $\{\chi^2 > \chi_{0.05}^2[(u-1)(v-1)]\}$,求得观测值 $\chi^2 = 53.458$,查表得 $\chi_{0.05}^2 = 67.505$ 。由于 $\chi^2 < \chi_{0.05}^2$,因此在检验水平为 0.05 时,随机变量 x 和 y 相互独立。得出均幅值二维变量的联合概率密度函数为

$$f(x, y) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

2.3 二维载荷谱编制

长期载荷谱需基于全寿命载荷数据编制,因

测试周期过长等限制,难以直接获取 RV 减速器全寿命周期载荷数据,原始数据量不足。本文运用基于联合分布的参数雨流外推法对载荷进行频次外推,将短期载荷谱外推为长期载荷谱,得到 RV 减速器全寿命周期载荷大小与频次的对应关系。

获得 RV 减速器典型工况原始载荷谱后,为使载荷谱能更真实地反映 RV 减速器服役工况载荷特征,运用统计学方法求取 RV 减速器服役工况中极少出现但对疲劳损伤贡献最大的最大冲击载荷,并根据联合概率密度函数进行频次外推。取出现概率 $P = 10^{-6}$ 的载荷作为极值载荷,并取 $N = 10^6$ 次载荷循环代表零件的疲劳寿命^[16]。由于载荷均值和幅值相互独立,因此载荷数据的总体极值可以转化为两变量各自的极值,表达如下:

$$\left. \begin{aligned} x_{\max} &= \beta \sqrt[\alpha]{-\ln P} \\ y_{\max} &= U_P \sigma + \mu \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: U_P 由 $P = 10^{-6}$ 时查标准正态分布表得到。

8 级载荷谱作为典型的程序加载谱,可以精确地反映服役工况中 RV 减速器零件的真实疲劳情况。依据极值进行载荷分级时,当不同等级的载荷幅值间隔过大时会对零件的使用精度产生较大误差,显著缩短零件的使用寿命,因此,依据 Conover 提出的理论,将载荷均值等间隔分为 8 级,将载荷幅值按 Conover 比例系数 1.000、0.950、0.850、0.725、0.575、0.425、0.275、0.125 分为 8 级,并由下式得到相应均幅值对应的各级循环频次:

$$n_{ij} = n \int_{S_{ai}}^{S_{bi}} \int_{S_{aj}}^{S_{bj}} f(x, y) dy dx \quad (8)$$

式中: S_{ai} 、 S_{bi} 为第 i 组幅值的下限、上限; S_{aj} 、 S_{bj} 为第 j 组均值的下限、上限。

编制的 8×8 二维载荷谱如表 2 所示。

2.4 一维加速程序加载谱编制

根据 GB/T 40729—2021《精密齿轮传动装置疲劳寿命试验方法》,RV 减速器疲劳试验通常采用往复运转型试验台,以一系列一维载荷模拟现场载荷,既考虑了变幅载荷的特点,也更易于通过去掉低幅载荷、强化加载以及增加加载频率等方法进行加速疲劳试验。本文应用变均值法将二维载荷谱转化为一维载荷谱^[17],采用 Goodman 公式将不同均值的各级幅值等寿命转化为均值为 0 的幅值,以便于进行往复运转试验。Goodman 公式为

$$\frac{S_{ci}}{S_{di}} + \frac{S_{wi}}{S_b} = 1 \quad (9)$$

式中: S_{ci} 为二维载荷谱第 i 级幅值; S_{di} 为二维载荷谱第 i 级均值; S_{wi} 为等效后第 i 级幅值; S_b 为 RV 减速器材料扭转极限强度。

表 2 8×8 二维载荷谱

Tab.2 8×8 two-dimensional load spectrum

幅值 / (N·m)	均值 / (N·m)							
	81.95	- 58.54	- 35.13	- 11.72	11.72	35.13	58.54	81.95
36.43	17	9473	49503	235932	386333	74859	12847	24
80.15	2	1934	10203	63849	100888	18375	2574	4
123.87	1	352	1523	9384	16231	1523	375	1
167.59	0	4	64	1283	1827	104	57	0
211.31	0	0	2	86	147	35	1	0
247.74	0	0	0	4	14	2	0	0
276.89	0	0	0	0	3	0	0	0
291.46	0	0	0	0	1	0	0	0

按照潜在损伤一致性原则,根据下式将等效载荷幅值不等间隔分为 8 级:

$$S_j = \beta_j S_{\text{umax}} \quad (10)$$

式中: S_j 为一维载荷谱各级转矩幅值; β_j 为 Conover 比例系数; S_{umax} 为等效转矩最高级幅值。

RV 减速器属于长寿命、高可靠性产品,针对常规的 RV 减速器疲劳寿命试验存在运行周期长、试验成本高的缺陷,引入加速寿命试验的方法,即在不改变产品失效机理的前提下,通过施加高于正常应力水平的方式,在短时间内获取产品全寿命历程数据的方法。本文综合考虑加载方式、应力大小以及加载顺序等因素,编制一维加速程序加载谱。

加速寿命试验的应力加载方式一般分为恒定应力加载、步进(步降)应力加载和序进应力加载方式三种,步进应力加载方式相比其他两种加载方式能够更好地模拟复杂工况下产品的真实受载情况。结合分级载荷谱可以直接进行应力扩大实现加速的目的,本文选择步进应力加载方式进行 RV 减速器服役工况加速载荷谱编制。文献[18]指出,一定范围内,加速试验施加的扭矩越大, RV 减速器失效越快。根据 GB/T 35089—2018《机器人用精密齿轮传动装置试验方法》及 RV 减速器使用要求,工业机器人启动及停止时产生的惯性转矩远超出设计允许的 RV 减速器的额定转矩,在保证 RV 减速器失效机理不发生改变且能正常工作的前提下,其值不允许超过额定转矩的 250%,因此将最高级幅值扩大为 2.5 倍额定转矩,并等比例扩大其余等级。加速后的一维加速程序加载谱如表 3 所示。图 8 为一维标准程序加载谱及一维加速程序加载谱谱图。

为进一步提高试验效率,可删掉微小损伤载荷,通过将设计载荷谱中小于材料疲劳极限 60% 的载荷删除,可在显著缩短试验周期的同时保留损伤比例达到 90%~95%^[19],且压缩前后寿命预测相近。本文将第一级删除,试验时间缩短为原来的 60%。

表 3 一维加速程序加载谱

Tab.3 One-dimensional accelerated program loading spectrum

幅值等级	标准幅值 / (N·m)	强化幅值 / (N·m)	分级频次	累计频次
1	322.11	1029.00	1	1
2	306.00	977.53	6	7
3	273.79	874.63	71	78
4	233.53	746.02	673	751
5	185.21	591.66	5235	5986
6	136.90	437.33	42 408	48 394
7	88.58	282.97	205 526	253 920
8	40.26	128.61	369 313	574 839

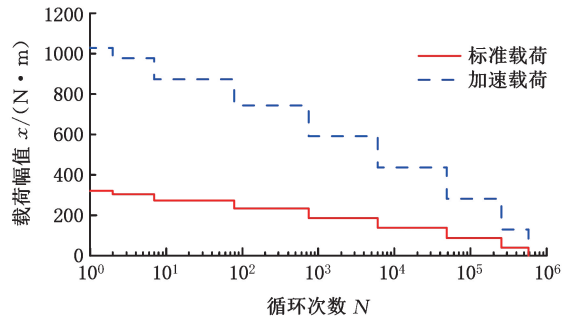


图 8 一维载荷谱图

Fig.8 One-dimensional load spectrogram

服役工况程序加载谱需确保载荷加载顺序与 RV 减速器服役工况载荷加载顺序一致。常规的疲劳试验大多遵循“低—高一低”的载荷加载顺序,无法真实重现 RV 减速器现场受载情况。本文基于上述编制的一维加速程序加载谱,参考 RV 减速器特征作业段循环顺序,提出一种不同作业段按照“空载到位—满载作业—空载归位”的加载顺序;同时考虑 RV 减速器急停急启的典型工况产生的大惯性扭矩,将各作业段内的载荷顺序采用“启动—低—高一低—停止”的顺序进行加载,考虑加载顺序的 RV 减速器一维加速程序加载谱如图 9 所示。

图 9 所示加载谱中, T1 段模拟工业机器人空载到位工况; T3 段模拟工业机器人空载归位工况; T2 段和 T4 段模拟满载作业工况,其中 T4 段内包含 RV 减速器全寿命周期内可能出现的最大

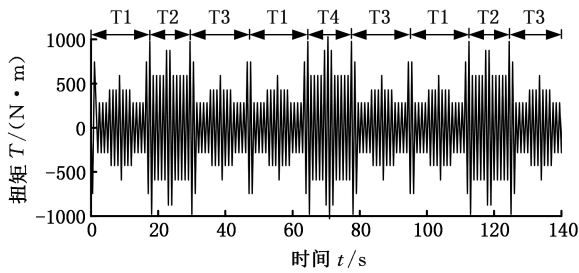


图9 一维加速程序加载谱

Fig.9 One-dimensional accelerated program loading spectrum

冲击载荷。同时每个作业段内,启动及停止的时刻对应大惯性扭矩,其余历程采用“低—高一低”的顺序加载。

3 结论

对现场实测工业机器人关节载荷数据的分析表明,服役工况下工业机器人RV减速器循环载荷在不同作业段特征显著不同,在同一作业段相对平稳,因此对载荷数据采用分作业段处理。将RV减速器原始载荷谱进行统计分析后,发现载荷均值服从正态分布,载荷幅值服从Weibull分布。根据RV减速器实际使用场景,将载荷进行加速,显著缩短了试验时长,并基于“空载到位—满载作业—空载归位”加载顺序编制加速程序加载谱,能够满足基于服役工况的RV减速器疲劳试验加载需求。

本文提出的基于服役工况进行数据采集、参考工作机理进行载荷加速、依据受载情况进行程序加载的RV减速器加速载荷谱编制方法可为RV减速器整机的加速寿命试验提供新方法和新思路。

参考文献:

[1] 张跃明,李亿万,纪姝婷.基于疲劳强度的RV减速器寿命计算与试验方法[J].航空动力学报,2024,39(11):18-27.
ZHANG Yueming, LI Yiwan, JI Shuting. Life Calculation and Test Method of RV Reducer Based on Fatigue Strength[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(11):18-27.

[2] 周坤,叶楠,吴锦辉,等.RV减速器高应力加速退化试验及可靠性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(7):37-44.
ZHOU Kun, YE Nan, WU Jinhui, et al. High Stress Accelerated Degradation Test and Reliability Analysis of RV Reducer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(7):37-44.

[3] XU L X, CHEN B K, LI C Y. Dynamic Modelling

and Contact Analysis of Bearing-cycloid-pinwheel Transmission Mechanisms Used in Joint Rotate Vector Reducers[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 137:432-458.

- [4] HUANG J, LI C, CHEN B. Optimization Design of RV Reducer Crankshaft Bearing[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18):6520.
- [5] 藤瑞品,宋晓琳,刘国云,等.二维随机载荷作用下汽车螺旋弹簧疲劳损伤研究[J].中国机械工程,2019,30(21):2590-2597.
TENG Ruipin, SONG Xiaolin, LIU Guoyun, et al. Research on Fatigue Damage of Automobile Coil Springs under Actions of Two Dimensional Random Loads[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(21):2590-2597.
- [6] 姚凌云,林勇杰,李丽.基于S变换双阈值法的汽车零部件载荷谱加速编辑[J].中国机械工程,2024,35(2):215-220.
YAO Lingyun, LIN Yongjie, LI Li. Accelerated Editing of Load Spectra of Automotive Parts Based on S-transform Dual Threshold Method[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(2):215-220.
- [7] 郑国峰,上官文斌,韩鹏飞,等.基于小波变换的汽车零部件加速耐久性多轴载荷谱编辑方法研究[J].机械工程学报,2018,54(10):156-166.
ZHENG Guofeng, SHANGGUAN Wenbin, HAN Pengfei, et al. Study of Multi-axis Load Spectrum Edition Method Based on the Wavelet Transform to the Accelerated Durability Test of the Vehicle Components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(10):156-166.
- [8] LU Y, ZHENG H, ZENG J, et al. Fatigue Life Reliability Evaluation in a High-speed Train Bogie Frame Using Accelerated Life and Numerical Test [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 188:221-232.
- [9] 卢耀辉,张醒,张舒翔,等.高速列车车体加速寿命试验载荷谱编制及分析[J].机械工程学报,2017,53(24):151-160.
LU Yaohui, ZHANG Xing, ZHANG Shuxiang, et al. Load Spectrum Compilation and Analysis of Acceleration Life Test for High Speed Train Carbody [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24):151-160.
- [10] MOHSENI M, SANTHANAM S, WILLIAMS J, et al. Systematic Fatigue Spectrum Editing by Fast Wavelet Transform and Genetic Algorithm[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2022, 45:69-83.
- [11] ZHANG J, LU J, HAN W, et al. Program Load Spectrum Compilation for Accelerated Life Test of

- Parabolic Leaf Spring[J]. International Journal of Automotive Technology, 2019, 20:337-347.
- [12] 梁佳, 宋绪丁, 黄柱安, 等. 装载机驱动桥疲劳试验扭矩加载谱编制方法研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9):1039-1044.
- LIANG Jia, SONG Xuding, HUANG Zhu'an, et al. Study on Compiling Method of Torque Load Spectrum of Fatigue Tests for Loader Driving Axles[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(9):1039-1044.
- [13] OH Y, KIM Y, NA K, et al. A Deep Transferable Motion-adaptive Fault Detection Method for Industrial Robots Using a Residual-convolutional Neural Network [J]. ISA Transactions, 2022, 128:521-534.
- [14] 李晓祥, 王安麟, 付志翼. 面向典型换挡工况重构的参数化试验载荷模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(1):43-49.
- LI Xiaoxiang, WANG Anlin, FU Zhiyi. Parameterized Test Load Model for Typical Shifting Condition Reconstruction[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(1):43-49.
- [15] 韩为铎, 卢剑伟, 龙道江. 变刚度钢板弹簧加速寿命试验程序载荷谱编制[J]. 中国机械工程, 2017, 28(2):144-149.
- HAN Weiyi, LU Jianwei, LONG Daojiang. Test Program Load Spectrum Compilation for Accelerated Life Test of Leaf Springs with Variable Stiffness[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(2):144-149.
- [16] 李俊杰, 任尊松. 基于疲劳极限的高速列车构架载荷扩展方法[J]. 机械工程学报, 2023, 59(18):263-270.
- LI Junjie, REN Zunsong. Load Expansion Method of High-speed Train Frame Based on Fatigue Limit [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(18):263-270.
- [17] 张英爽, 王国强, 王继新, 等. 工程车辆传动系载荷谱编制方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4):179-183.
- ZHANG Yingshuang, WANG Guoqiang, WANG Jixin, et al. Compilation Method of Power Train Load Spectrum of Engineering Vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2011, 27(4):179-183.
- [18] LEE J H, CHO Y H, KIM D S, et al. Lifetime Estimation of Harmonic Reducer for Manufacturing Robot Using Accelerated Life Test[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(6):2879-2887.
- [19] 董国疆, 韩杰, 颜峰, 等. 汽车零部件疲劳分析载荷谱加速编辑法研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(5):543-552.
- DONG Guojiang, HAN Jie, YAN Feng, et al. Research on Load Spectrum Accelerated Editing Method for Fatigue Test of Vehicle Parts[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(5):543-552.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介: 杨 雨, 男, 2000 年生, 硕士研究生。研究方向为 RV 减速器可靠性。E-mail:1346836942@qq.com。叶 楠* (通信作者), 男, 1986 年生, 讲师。研究方向为复杂系统可靠性。E-mail: yenan@hebut.edu.cn.
- 本文引用格式:
杨雨, 李晓雷, 陶友瑞, 等. RV 减速器服役工况加速载荷谱编制方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6):1170-1177.
- YANG Yu, LI Xiaolei, TAO Yourui, et al. Accelerated Load Spectrum Preparation for RV Reducer Service Conditions [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1170-1177.
-
- (上接第 1169 页)
- [20] LAWN B R. A Model for the Wear of Brittle Solids under Fixed Abrasive Conditions[J]. Wear, 1975, 33(2):369-372.
- [21] PAN R, ZHONG B, CHEN D, et al. Modification of Tool Influence Function of Bonnet Polishing Based on Interfacial Friction Coefficient[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 124:43-52.
- [22] CHEN S, CHEUNG C F, ZHANG F, et al. Three-dimensional Modelling and Simulation of Vibration Marks on Surface Generation in Ultra-precision Grinding [J]. Precision Engineering, 2018, 53:221-235.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介: 罗晨阳, 男, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为精密与智能制造技术。E-mail:252653927@qq.com。郭 磊* (通信作者), 男, 1986 年生, 副教授。研究方向为精密与智能制造技术。E-mail:lguo@chd.edu.cn.
- 本文引用格式:
罗晨阳, 郭磊, 曹维清, 等. 固结与游离磨粒协同作用硬脆材料磨抛加工机理[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6):1159-1169.
- LUO Chenyang, GUO Lei, CAO Chuqing, et al. Grinding and Polishing Mechanism of Hard and Brittle Materials under Cooperation of Fixed and Free Abrasive Grains[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1159-1169.