

分类号: TH117.1

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120157



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 服役工况下 RV 减速器润滑脂流变
特性与工作性能相关性研究

论 文 作 者 周焰生

校 内 导 师 江本赤 副教授、潘家保 教授

校 外 导 师 艾和金 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 机械摩擦与润滑

论文提交日期: 2024 年 04 月 10 日

分类号：TH117.1

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120157

服役工况下 RV 减速器润滑脂流变特性与工作性能相关性
研究

CORRELATION BETWEEN RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND
OPERATIONAL PERFORMANCE OF RV REDUCER GREASE UNDER
SERVICE CONDITIONS

学生姓名： 周焰生

指导教师： 江本赤 副教授、潘家保 教授

校外教师： 艾和金 高级工程师

专业学位类别： 机械

研究方向： 机械 摩擦与润滑

论文答辩日期： 2024 年 5 月 17 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：周煜生

日期：2024年5月31日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：周礼生。

日期：2024年5月31日

指导教师签名：江岸希 潘伟

日期：2024年5月

服役工况下 RV 减速器润滑脂流变特性与工作性能相关性研究

摘 要

润滑脂在工业机器人中扮演着至关重要的角色，直接影响着机器人的运行稳定性、使用寿命、工作效率以及工作环境的舒适性。润滑脂在面对不同工况下所表现的流变特性各不相同，过于复杂的工作环境会限制润滑脂本身能发挥的有效性能。由于工业机器人本身的智能性，RV 减速器作为其核心零部件，减速器往往工作运转时所遇到工况环境很是复杂。然而，润滑脂作为 RV 减速器核心的组成部分，减速器在运转时所遇到的复杂环境对其润滑特性会产生重要影响。同时润滑脂的润滑效果会随着外界环境的变化而变化，故对于减速器来说，不同工况下润滑脂的流变特性对其工作特性的影响也是不同的。

本文以广泛应用的 RV-20E 减速器为研究对象，对其润滑剂的流变学特性开展测试分析和行为预测研究，结合搭建试验台测试不同润滑条件下的 RV 减速器工作特性变化，进而探究润滑剂流变学行为与工作特性之间的相关性。主要内容如下：

（1）本文先是对 RV 减速器常用的 SK-1A 润滑脂进行了流变特性试验。试验使用了德国安东帕公司的旋转流变仪 Physica MCR302，采用平板测试头进行测试，测试模块选用了 PP25-SN26459。实验过程中设置了温度值为-20℃、-10℃、0℃、10℃、20℃、30℃、40℃

进行测试。对 SK-1A 润滑脂在各种温度下所表现的流变特性进行了详细分析。

(2) 引入机器学习模型实现对 SK-1A 润滑脂流变特性的预测, 将 RV 减速器工作范围内的不同温度作为输入, 所用润滑脂剪切速率作为输出, 基于 Elman 神经网络建立回归预测模型, 对 SK-1A 润滑脂热流变性能之间的关系进行预测和表征, 以达到更加贴合 RV 减速器真实的工况环境。对于预测结果, 本文通过与 BP 神经网络与 RBF 神经网络两种预测结果进行对比, 使用 MAE、MSE、MAPE、RMSE、 R^2 等五种指标进行评价, 并进行了交叉验证。相比于实验所需的时间和成本, 本文所使用的预测方法, 展现出低成本、高效率的一面。

(3) 针对 RV 减速器自身的工作条件为要求, 搭建出适宜的 RV 减速器试验台。同时搭配计算机, 用相应的分析软件与试验台相结合, 展开对 RV 减速器工作特性的相关试验。通过试验数据分析出 RV 减速器在 SK-1A 润滑脂、通用锂基润滑脂 (0 号)、通用锂基润滑脂 (GP-A 型号) 三种润滑环境对 RV 减速器工作特性的具体影响。

本文提供了一种预测润滑脂流变特性的新思路, 以及对 RV 减速器在润滑条件下所展现的工作特性进行了详细分析。所取得的研究成果可为润滑脂的制备以及 RV 减速器自身的参数优化提供新思路。

关键词: RV 减速器, 润滑特性, 流变特性, 机器学习, 传动效率

CORRELATION BETWEEN RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS
AND OPERATIONAL PERFORMANCE OF RV REDUCER GREASE
UNDER SERVICE CONDITIONS

ABSTRACT

Grease plays a vital role in industrial robots, directly affecting the stability, service life, efficiency and comfort of the working environment. The rheological properties of grease vary under different working conditions, and overly complex working environments can limit the effective performance of the grease itself. Due to the intelligence of industrial robots, RV gearboxes, as their core components, are often subject to complex working conditions. However, grease as a core component of the RV reducer, reducer in the operation of the complex environment encountered in its lubrication characteristics will have an important impact. At the same time, the lubrication effect of grease will change with the changes in the external environment, so for the reducer, the rheological properties of grease under different working conditions on its operating characteristics of the impact is also different.

This paper takes the widely used RV-20E reducer as the research object, carries out the test analysis and behaviour prediction research on

the rheological characteristics of its lubricant, combines with the construction of the test bench to test the changes in the operating characteristics of the RV reducer under different lubrication conditions, and then explores the correlation between the rheological behaviour of the lubricant and the operating characteristics. The main research contents are as follows:

(1) In this paper, first of all, the SK-1A grease, which is commonly used in RV gearboxes, is tested for its rheological properties, and the test is carried out using the flat test head of a rotational rheometer (Anton Paar Physica MCR302, Germany), and the test module is selected from PP25-SN26459, and the temperature values are set to -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C , and 40°C for testing during the experiment. The temperature values were set to -20°C , -10°C , 0°C , 10°C , 20°C , 30°C , 40°C . The rheological properties of SK-1A grease at various temperatures were analyzed in detail.

(2) A corresponding prediction model was introduced to achieve the prediction of the rheological properties of SK-1A grease. The name is the Elman neural network model. The prediction results of this model are improved based on machine learning. In the model, the input parameters are set to different temperatures in the operating range of the RV gearbox. The output is the shear rate of the grease used in it. The relationship between the thermorheological properties of SK-1A grease is predicted and

characterized. to achieve a better fit for the real working environment of the RV gearbox. For the prediction results, this paper evaluates the results by comparing them with two kinds of prediction results, BP neural network and RBF neural network, using five kinds of metrics, such as Mean Absolute Error, Root Mean Squared Error, Mean Absolute Percentage Error, and R^2 , and cross-validates them. Compared with the time and cost required for experiments, this paper proposes a low-cost and efficient prediction method.

(3) The working conditions of the RV reducer itself are required to build a suitable test bench for the RV reducer. At the same time with the computer, with the corresponding analysis software and the test bench to start the RV reducer working characteristics of the relevant tests. Through the test data to analyze the RV reducer in the SK-1A grease, general lithium grease, and general lithium grease (GP-A type) three lubrication environment on the RV reducer working characteristics of the specific impact.

This paper provides a new way of predicting the rheological properties of grease and a detailed analysis of the operating characteristics of RV gearboxes under lubrication conditions. The results of the research can provide new ideas for the preparation of grease and the optimization of the parameters of the RV gearbox itself.

KEY WORDS: RV gearbox, lubrication characteristics, rheological properties, machine learning, transmission efficiency

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 润滑脂流变特性研究现状.....	2
1.2.2 RV 减速器工作性能研究现状	3
1.2.3 RV 减速器脂润滑研究现状	6
1.3 本文的主要研究内容及章节安排.....	8
1.3.1 研究内容.....	8
1.3.2 章节安排.....	8
第 2 章 RV 减速器润滑下的工作特性分析.....	10
2.1 引言.....	10
2.2 润滑脂对 RV 减速器传动的影响	10
2.2.1 摆线轮传动润滑理论.....	11
2.2.2 直齿行星齿轮传动润滑理论.....	13
2.3 RV 减速器工况参数对脂润滑的影响	13
2.3.1 RV 减速器脂润滑控制方程	13
2.3.2 不同工况参数对 RV 减速器润滑效果的影响	15
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 RV 减速器润滑脂宽温流变特性.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 润滑脂流变特性理论.....	17
3.2.1 流变学基本概念.....	17
3.2.2 流变学测试方法.....	19
3.3 润滑脂宽温域流变测试.....	21
3.3.1 实验材料与方法.....	21
3.3.2 数据收集.....	22
3.4 实验结果与分析.....	23

3.4.1 黏弹性分析.....	23
3.4.2 流变特性分析.....	25
3.4.2 触变性分析.....	26
3.6 本章小结.....	27
第 4 章 RV 减速器润滑脂流变行为预测.....	29
4.1 引言.....	29
4.2 建立 Elman 神经网络预测模型	29
4.2.1 Elman 基本原理	29
4.2.2 模型参数设置.....	30
4.3 流变行为预测模型分析与结果.....	31
4.3.1 数据预处理.....	31
4.3.2 预测模型参数优化.....	32
4.3.3 流变行为预测结果分析.....	33
4.4 预测模型指标评价.....	37
4.4.1 预测性能评估系数.....	37
4.4.2 交叉验证性能评估.....	38
4.4.3 性能验证结果对比分析.....	39
4.5 本章小结.....	41
第 5 章 RV 减速器工作特性试验研究.....	42
5.1 引言.....	42
5.2 试验平台的搭建.....	42
5.3 试验台使用流程及实验方案.....	44
5.3.1 试验实施方法.....	44
5.3.1 试验具体方案.....	44
5.4 RV 减速器振动特性分析	45
5.5 RV 减速器传动效率分析	49
5.6 本章小节.....	54
第 6 章 结论与展望.....	55
6.1 全文工作总结.....	55

6.2 展望与建议.....	56
参 考 文 献.....	58
攻读硕士学位期间学术成果及参研项目.....	65

插图清单

图 1-1 RV 减速器在工业机器人上的应用	1
图 2-1 润滑脂力学的宏观特性	14
图 3-1 MCR 301 旋转流变仪	20
图 3-2 旋转流变仪的使用步骤	20
图 3-3 SK-1A 润滑脂样品	21
图 3-4 MCR302 旋转流变仪及测试模块	22
图 3-5 各温度下 SK-1A 润滑脂应变扫描图	24
图 3-6 SK-1A 润滑脂平台模量随温度的变化规律	24
图 3-7 不同温度下剪切应力随剪切速率的变化规律	25
图 3-8 SK-1A 润滑脂稳态剪切流动曲线	26
图 3-9 不同温度下 SK-1A 润滑脂的触变环面积	27
图 4-1 Elman 神经网络示意图	30
图 4-2 Elman 算法流程图	31
图 4-3 建模过程流程图	33
图 4-4 加速阶段实验与各预测结果对比图	35
图 4-5 减速阶段实验与各预测结果对比图	35
图 4-6 加速阶段预测结果小提琴图对比	36
图 4-7 减速阶段预测结果小提琴图对比	37
图 4-8 交叉验证流程图	39
图 4-9 三种预测的性能指标对比	40
图 5-1 RV 减速器试验台实物图	43
图 5-2 RV 减速器试验台二维示意图	43
图 5-3 RV 减速器工作特性测控系统示意图	43
图 5-4 RV 减速器试验流程图	44
图 5-5 SK-1A 润滑脂 X 方向振动信号	45
图 5-6 SK-1A 润滑脂 Y 方向振动信号	46

图 5-7 SK-1A 润滑脂 Z 方向振动信号	46
图 5-8 通用锂基润滑脂（0 号）X 方向振动信号	47
图 5-9 通用锂基润滑脂（0 号）Y 方向振动信号	47
图 5-10 通用锂基润滑脂（0 号）Z 方向振动信号	47
图 5-11 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）X 方向振动信号	48
图 5-12 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）Y 方向振动信号	48
图 5-13 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）Z 方向振动信号	48
图 5-14 三种润滑脂在不同转速下的传动效率对比	51
图 5-15 三种润滑脂在不同负载下的传动效率对比	52
图 5-16 三种润滑脂在不同转速、负载的传动效率对比	53

表格清单

表 3-1 SK-1A 润滑脂主要成分及参数	21
表 3-2 SK-1A 润滑脂主要实验分布	23
表 4-1 -20℃加速状态下样本的输入值以及三种预测方式结果	34
表 4-2 三种模型精度对比	40
表 5-1 RV 减速器测试参数	45
表 5-2 不同润滑环境下工作运转的时域特征	49

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

目前，中国将通过扩大工业机器人市场，加快实施“机器人换人”计划。并且为了提升产品质量和生产效率，节约成本和降低损耗，早日实现普通制造业向智能制造业转型的目标。智能制造将会成为制造业未来发展的方向和核心内容^[1-3]。近年来，由于机器人产业发展迅速，中国对机器人的需求越发迫切。工业机器人在制造业中的应用越来越广泛。而RV减速器作为机器人关节传动的理想选择之一，其润滑性能直接关系到机器人的稳定性和运动精度^[4, 5]。然而随着工业自动化程度的提高，对高性能、高精度减速器的需求也日益增加，同时RV减速器在需要高精度、高扭矩密度的机械系统中具有独特的优势，主要应用于高精密机械加工、医疗设备制造等领域。尤其在工业机器人方面对其润滑性能有更高的要求^[6]，因此其润滑性能对工业机器运转时的影响成为研究的热点。

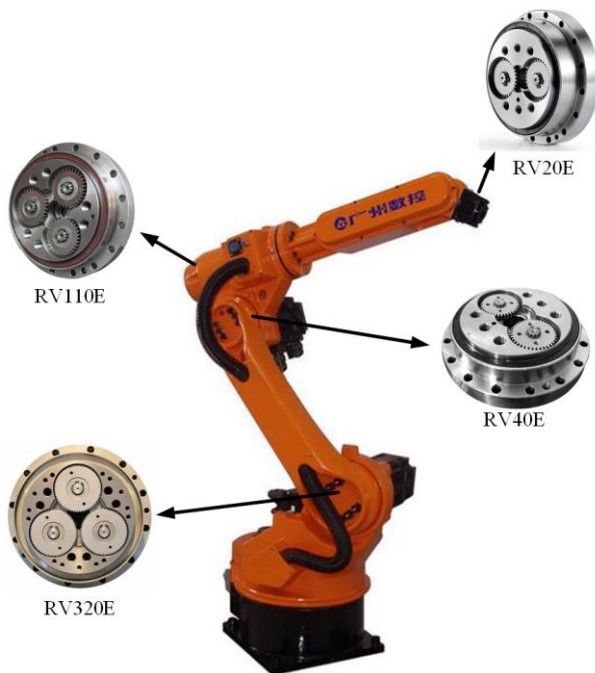


图 1-1 RV 减速器在工业机器人上的应用

润滑脂作为 RV 减速器重要的组成部分，在减速器面对运转中的各种齿轮、轴承和其他运动部件在高速旋转和承受负载时，容易产生摩擦和磨损。润滑脂能够形成一层薄膜覆盖在运动部件表面，从而降低能量损耗和磨损，延长 RV 减速器的使用寿命^[7-9]。同时 RV 减速器在工作时会产生一定的热量，而润滑脂具有良好的热传导性能，能够帮助将热量从摩擦表面传递到外部，促进热量的散发和冷却，防止部件因过热而损坏。另外当减速器在工作环境中会受到潮湿、腐蚀性介质或氧化气体的影响。润滑脂所形成的一层保护膜，能够防止金属表面直接接触到腐蚀性介质或氧化气体，从而起到防腐蚀和防氧化的作用，保护 RV 减速器的表面免受损坏^[11]。在工作时可能会产生一定的噪音，而润滑脂能够在运动部件间起到缓冲和减振作用，降低噪音的产生，提升设备的工作环境量^[12]。润滑脂对于 RV 减速器的运行稳定性、使用寿命和工作效率都具有重要意义。因此，本文在各种工况下研究润滑脂对于 RV 减速器自身工作特性的具体影响，揭露润滑脂流变特性与减速器工作性能的相关性联系。

1.2 国内外研究现状

本课题主要研究 RV 减速器工作性能与润滑脂流变特性，研究内容主要涉及以下三个方面：润滑脂流变特性、RV 减速器工作性能和 RV 减速器润滑。

1.2.1 润滑脂流变特性研究现状

润滑脂的流变特性研究是润滑脂领域的一个重要方面，涉及到润滑脂在不同工况下的流动行为和性能变化。为了定量研究物质自身的流变学行为，许多研究学者提出了能够准确描述物质流变过程的流变模型。在研究塑性流体流动过程中，Bingham 发现材料存在屈服应力，超过屈服应力后，流体的应力和应变关系呈线性变化规律，即 Bingham 模型^[13-15]。研究人员通过广泛的研究发现，Bingham 模型和赫谢尔-巴尔克莱模型的适用范围不仅局限于先驱们所研究的流体，而且适合自然界中众多流体，包括润滑脂。至此，在之后研究润滑脂流变特性变化规律过程中，流变模型对润滑脂流动及润滑过程的准确描述起到了至关重要。

为了更深入的对润滑脂的流变特性进行了解，之后许多研究人员展开了对润滑脂流变特性与其微观形貌的关联性分析研究。Delgado 等^[16]研究了润滑脂制备过程中各阶段的润滑脂流变特性和微观结构的关联性，发现良好的流变特性

对应高度缠结的皂纤维结构。Moreno 等^[17]研究了添加剂二异氰酸酯聚合物(PBTDI)对锂基润滑脂的流变学性能和显微结构的影响。结果显示, PBTDI 的添加会使锂基润滑脂的纤维变粗大。沈铁军^[18]的研究发现, 润滑脂在经历静态热老化后, 其微观形貌结构将会遭到破坏。相应地润滑脂自身结构稳定性变差, 进而在承受剪切情况下, 润滑脂的结构恢复性能明显减弱。许俊等^[19]研究了冰水浴和自然冷却两种制备工艺下的润滑脂皂纤维结构及流变性能, 发现润滑脂的流变性能可很好地反应其胶体及机械性能。毛菁菁等^[20]研究发现, 润滑脂的微观结构与其流变参数相对应, 可以借助流变参数对润滑脂胶体稳定性及破坏程度进行评价。

在对润滑脂的微观结构研究中发现, 皂纤维结构及流变特性不仅会在承受外力作用下发生变化, 而且在温度变化时同样也会发生变化。变化后会展现出明显的热流变特性。姚立丹等^[21-23]的研究发现, 温度是影响润滑脂稳定性的重要因素, 当润滑脂所处的温度高于 130℃时, 润滑脂自身的稳定性会很大幅度的下降。Delgado 等^[24]考察了温度对锂基润滑脂黏性和弹性响应的影响规律, 发现高 110℃时润滑脂的热敏感性增加。Couronne 和 Vergne 研究了^[25]最高使用温度和极限使用温度对锂基脂和聚脲润滑脂热降解后的流变行为和理化性能的影响。结果表明锂基润滑脂在极限温度下使用, 因为热效应在使用过程中出现了降解, 润滑性能受到明显削弱。但是也发现了聚脲脂的性能却因为热效应加强了。沈铁军等^[26, 27]研究了长时间热老化对锂钙基润滑脂微观结构和流变性的影响, 发现在热处理后润滑脂的基础油分子会发生氧化, 从而产生含羰基分子, 从而导致了皂纤维稳定性变差。潘家保等^[28, 29]比较了连续与间断热作用对复合锂基润滑脂流变性能的影响, 发现持续热效应对润滑脂性能的影响较为显著。总之, 润滑脂流变特性的研究是一个不断发展的领域, 涉及多个学科, 包括化学、材料科学和工程。对润滑脂流变特性的深入理解有助于优化润滑脂的使用方案, 提高其性能, 以满足各种工业和机械应用的需求。

1.2.2 RV 减速器工作性能研究现状

RV 减速器作为一种高精度、高效的减速机构, 其效率和能效一直是研究的关键点。研究者关注提高 RV 减速器的传动效率, 降低能量损失, 以满足不同工业应用对节能和高效的需求。目前, 对 RV 减速器工作性能的研究主要集中在摆

线轮方面。李充宁等^[30]分析了摆线针轮的啮合运动关系，并推导出了相对运动速度。何卫等^[31]在考虑摆线轮和曲柄轴受力变形协调条件的基础上，对摆线轮和曲柄轴进行了静力分析。关天民等^[32]提出了一种在组合修形方法条件下对齿面进行受力分析，并通过迭代的方式计算得出了齿面接触压力分布。Gorla 等^[33]对减速器的新型摆线针轮进行了结构特点和运动原理的分析，并提出一种方法，通过滚子行星轮的啮合受力，计算摆线传动的受力分布、功率损耗和理论传动效率。Blagojevic^[34, 35]在探究摆线轮与针齿之间摩擦对接触力分布和传动效率的影响。通过实验和理论分析，发现摆线轮与针齿之间的摩擦会显著影响接触力的分布情况，并对传动效率产生直接影响。同时排除了摆线轮与输出机构、摆线轮与滚动轴承之间的接触摩擦，集中探讨了摆线轮与针齿间摩擦对传动系统性能的影响。结果对于提高摆线轮传动系统的效率和可靠性具有重要的指导意义。韩林山^[36]通过对 RV 减速器的传动灵敏性研究，主要分析摆线轮累积螺距误差、齿槽误差、针齿轮螺距误差对减速器精度的影响程度。结果对于提高 RV 减速器的传动精度以及可靠性具有重要的实际意义

另外由于 RV 减速器通常用于要求低噪音和低振动的应用领域，研究者对其噪音和振动特性进行了深入研究。通过改进设计、材料选择和减振措施，研究如何减少减速器在工作中的噪音和振动水平。张大卫、刘继岩等^[37]基于扭转动力学模型，探究 RV 减速器曲柄轴的齿轮啮合刚度、针齿数和扭转刚度对系统固有频率的影响。发现齿轮啮合刚度、针齿数和扭转刚度是影响系统固有频率的重要因素。Chuan Chen 等^[38]建立 RV 减速器的集总参数模型，研究无陀螺效应和有陀螺效应系统的自由振动特性，发现这两种特性时引起 RV 减速器振动的主要原因。李果等^[39-41]基于振动测试理论，对 RV 减速器进行了时频域分析。通过振动频率来帮助减速器自身故障的识别和诊断。张跃明等^[42]通过加装悬臂负载来模拟工业机器人机械臂的运动，基于 RV 减速器传动系统的特征频率，利用振动检测技术分析了 RV 减速器生产和装配误差的来源。研究结果显示，RV 减速器的特征频率与其生产和装配误差密切相关。Botman^[43]通过分析行星齿轮传动系统的结构特点和工作原理，研究了其振动特性。结果表明，行星齿轮传动在工作过程中会产生特定的振动频率和振幅，这些振动特性受到传动系统参数、工作条件等因素的影响。Parker 等^[44-47]基于前人研究，深入探讨了行星轮

在非均匀分布条件下的固有特性。通过建立数学模型和理论分析，探讨了行星轮在非均匀分布条件下的动力学行为。研究结果显示，在非均匀分布条件下，行星轮的固有特性与传统情况有所不同，显现出了更加复杂的振动模式以及固有的频率响应。

实验研究是对 RV 减速器工作特性深入了解的关键手段，其包括在实际工作条件下对减速器性能进行测试和评估，通过实验，能够验证先前的模拟和理论研究成果，真实的了解 RV 减速器在实际工作中的表现。Seetharaman 等^[48]在浸没润滑的条件下，对不同参数的圆柱直齿齿轮副进行了功率损耗实验。试验结果表明，润滑油的浸没高度和齿轮转速以及宽度等参数对自旋功率损失的影响较大。Talbot 等^[49]通过试验分析行星轮个数、表面粗糙度和运行温度对行星齿轮箱功率损耗的影响。在实验台架上搭建试验系统，对行星齿轮箱在不同条件下的功率损耗进行了测试。实验结果显示，行星轮个数、表面粗糙度和运行温度对行星齿轮箱功率损耗均有显著影响。Sjberg 等^[50]利用 FZG 齿轮试验台，系统研究了不同温度和磨合载荷对齿轮啮合效率的影响。实验结果显示，高磨合负载和低润滑剂温度测试得到了更高的效率，高载荷也能提高齿轮啮合效率。此外，Fernandes 等^[51, 52]通过改进的四球机和多种润滑剂对轴承的润滑摩擦性能进行了研究。实验结果表明，润滑剂对滚动轴承摩擦力矩具有显著影响。Changenet 等^[53]探究了斜齿轮在不同浸没深度的油浴中产生的搅拌功率损耗，并对几种经验搅拌损耗公式进行了对比分析。通过实验和理论分析，不同浸没深度下斜齿轮的搅拌功率损耗规律。试验发现耗随着浸没深度的增加而减小，但变化趋势并非线性。Kahraman 等^[54]通过试验分析了齿轮负载无关损耗的主要组成部分，并对各部分损耗在设定速度和润滑剂温度范围内对整体损耗的贡献进行了分析。结果显示，各部分损耗在不同速度和润滑剂温度条件下的贡献存在差异，润滑剂温度对润滑剂搅拌损耗的影响较大，而速度对轴承摩擦损失的影响较为显著。陈小安等^[55]研究了轴承摩擦损耗、风阻损耗和电动机电磁损耗之间的关系，并通过试验验证了这种关系。实验发现轴承摩擦损耗、风阻损耗和电动机电磁损耗之间存在一定的相关性，其中轴承摩擦损耗和电动机电磁损耗的关系较为显著。Fernandes 等^[56]使用不同粘度的润滑油，探究润滑环境对轴承摩擦扭矩的影响。通过试验测量不同粘度润滑油在不同工况下的摩擦扭矩，研

究结果表明, 润滑油的粘度对轴承摩擦扭矩有显著影响。较高粘度的润滑油可以减少轴承摩擦扭矩, 提高轴承的工作效率。李雪原等^[57]通过试验研究了传动比、输入转速、液压压力和输入转矩对双圆锥式无级变速器传动效率的影响。结果显示, 传动比、输入转速、液压压力和输入转矩均对传动效率有显著影响, 其中液压压力是影响传动效率的重要因素之一。梁文宏等^[58]通过试验方法对直齿轮进行负载无关功率损耗测定, 并研究了齿轮模数、齿数、转速、浸润深度以及润滑剂性质对损耗的影响。研究结果表明, 在低转速条件下, 齿轮模数、齿数、转速、浸润深度以及润滑剂性质均对直齿轮的负载无关功率损耗有一定影响。关通等^[59]和陈李果等^[60]在有限的参数范围内仅考虑负载和扭矩对 RV 减速器传动效率影响的试验研究。结果显示, 负载和扭矩对 RV 减速器传动效率有显著影响, 为 RV 减速器的设计和优化提供了重要参考。

1.2.3 RV 减速器脂润滑研究现状

润滑剂的性能对 RV 减速器的性能和退化速度有着重要影响。润滑剂的性能直接影响着 RV 减速器的传动精度、传动效率和工作寿命^[61, 62]。同时 RV 减速器内部传动系统润滑属于弹性流体动力润滑问题, 该问题具有重要的研究价值。Cheng 等^[63]考虑温度变量的弹性流体动力润滑分析模型, 将热弹流润滑问题转化为二维数值求解问题。该模型分析摆线轮在运动过程中由于压力和热量的作用而产生的变形和温度变化, 能够更准确地描述摆线轮的工作状态。朱才朝等^[64, 65]利用 Eyring 流体和指数率流体的摆线针轮传动系统的润滑特性, 并对现有的修形技术进行了润滑特性分析评价。通过实验和理论分析, 研究 Eyring 流体和指数率流体在摆线针轮传动系统中的润滑性能, 发现它们能够有效降低摩擦损耗、提高传动效率。Bo 等^[66]通过建立摆线针轮接触混合润滑模型, 研究修形量和接触载荷对其润滑特性的影响。考虑了摆线针轮在接触区域既存在弹性变形又存在润滑剂的情况。实验结果表明, 修形量和接触载荷对摆线针轮的润滑特性有着显著的影响。姜元志等^[67, 68]基于多重网格法分析了啮合相位变化对压力和膜厚的影响, 并进一步分析了波长变化和粗糙峰峰值对膜厚的影响。在波长变化和粗糙峰峰值的影响分析中, 研究发现增大粗糙峰峰值和波长可以提高润滑性能, 增加润滑膜的稳定性和厚度, 从而减少啮合表面的接触和磨损。张振华等^[69]研究 RV 减速器曲柄轴滚子轴承混合润滑模型, 基于混合润滑理论,

考虑了滚子轴承接触表面的真实粗糙度，真实粗糙表面和接触载荷对滚子轴承的性能有着显著影响。具体来说，增大粗糙度会增加摩擦损失，降低轴承的工作效率，而增加接触载荷可以提高轴承的承载能力和稳定性。

在国内，温诗铸等^[70]学者计算了弹流润滑中线接触、点接触、热弹流等问题的完全数值解，在润滑领域研究奠定了基础。随后，众多学者对弹流问题的数值解进行了深入研究。刘晓玲等^[71]学者应用多重网格方法成功求解了有限长滚子线接触热弹流的数值解，拓展了润滑数值计算的领域。这些研究工作在理论和方法上为润滑领域的进一步发展提供了重要参考和借鉴。孙浩洋等^[72]学者利用不等距多重网格法，对该问题进行了分析，以获得更为精确的数值结果。研究表明，这一方法在描述线接触热弹流润滑时具有显著的优势。程军等^[73]研究人员则采用逆解法，对线接触脂润滑进行了数值计算，并着重分析了乏脂对膜厚的影响。突出了脂润滑在线接触中的重要性，并通过数值模拟揭示了不同条件下脂润滑膜厚的变化规律。黄平等^[74]学者则通过求解相应的数学模型，在考虑温度影响的基础上，对线、点接触的非牛顿流体润滑问题展开了研究。深入分析了流变指数对膜厚和压力的影响。邓磊等^[75]在研究中采用了多重网格方法对基于 Ostwald 模型的线接触脂润滑问题进行了数值求解。通过数值模拟，得到了钢球与沟道间润滑剂的压力分布图，并研究了不同工况下脂膜的形成和变化规律。刘明勇等^[76]采用了 Ree-Eyring 流体和 Power-Law 流体对有限长圆柱滚子进行了非牛顿流体的热弹流润滑研究。通过对比不同工况和热效应对流体润滑的影响，深入探讨了流体性质对热弹流润滑行为的影响机制。建立了相应的数学模型。分析了工况和热效应对流体润滑性能的影响。其实际应用还存在一定的局限性。特别是没有从试验角度研究润滑环境对 RV 减速器工作性能的影响，在实际应用中润滑脂的润滑效果会制约着 RV 减速器的正常运转。因此，未来的研究可以结合理论研究和试验研究，全面探究润滑环境对 RV 减速器性能的影响，以进一步提高其可靠性和效率。

本文重点从振动和传动效率两个角度对 RV 减速器工作特性进行评价。通过动力学特性分析，对比不同润滑环境下减速器的振动性能。通过实验和数值模拟，对比了不同润滑环境下减速器的振动情况。在传动效率方面，分析不同润滑环境下减速器的传动效率变化趋势，并探讨润滑环境对减速器性能的影响。

通过对 RV 减速器的振动和传动效率进行综合评价，为提高减速器性能和寿命提供了理论基础。

1.3 本文的主要研究内容及章节安排

1.3.1 研究内容

本文的研究主要围绕 RV 减速器所使用的润滑脂对其自身运转时的工作性能展开分析研究，以及所用润滑脂的流变特性展开详细的分析，最终得出 RV 减速器的工作特性与润滑脂流变特性之间的相互关联性。首先是对 RV 减速器常用的 SK-1A 润滑脂进行流变特性试验，基于润滑脂自身的流变理论对其试验结果进行理论分析，详细分析出该润滑脂在不同温度下所表现的流变特性情况。同时为了探究润滑脂在不同温度工况下会对 RV 减速器自身运转产生怎样的影响，在试验研究的基础上，采用 BP 神经网络联合 Elman 算法的新型预测方法，对 RV 减速器润滑脂流变特性进行流变预测。最后对 RV 减速器进行工作特性的试验研究。通过最真实的实验来研究润滑脂对其工作性能的影响。

1.3.2 章节安排

本文共分为 6 个章节，每章研究内容如下所示：

第 1 章：绪论。简要地介绍了本文的研究背景并引出研究主题。对 RV 减速器现阶段的研究方式方法纯进行了简要的概述，探讨了减速器工作性能研究现状，未来的发展方向。对相关领域的国内外研究进展进行科学梳理，指出当前研究存在的不足。可以进一步完善对 RV 减速器工作特性的研究，提高研究的深度和广度。

第 2 章：RV 减速器润滑下的工作特性。从润滑脂的流变性能出发，探讨其在 RV 减速器运转工况下的实际影响。同时深入分析 RV 减速器润滑下的工作特性，特别关注 RV 减速器在运转工况下可能对润滑脂润滑效果产生的影响。从理论的角度探讨润滑脂在不同工作条件下的表现。通过对 RV 减速器自身工作特性对润滑脂润滑效果产生影响、润滑脂自身流变性能对 RV 加速器在不同工况下的运转影响。

第 3 章：RV 减速器润滑脂宽温域流变特性。研究润滑脂在宽温域范围内的流变指数随温度变化的情况。同时研究润滑脂在不同剪切速率下的流变特性，以全面了解润滑脂在实际工作条件下的性能。

第 4 章：RV 减速器润滑脂流变行为预测。引入相应的预测模型实现对 SK-1A 润滑脂流变特性的预测。对 SK-1A 润滑脂热流变性能之间的关系进行预测和表征，以达到更加贴合 RV 减速器真实的工况环境。

第 5 章：RV 减速器工作特性实验研究。通过实验测量 RV 减速器在不同润滑脂下，研究出润滑脂流变特性对减速器工作特性的影响。试验主要测试了两个方 面，一个通过振动传感器等设备，对 RV 减速器在运行过程中产生的振动进行测量和分析。进而评估润滑脂对其在振动控制方面的性能，满足对工业运转时的应用。另一个是着重测试了在不同润滑脂以及不同工况的交叉影响下，RV 减速器的传动效率变化情况，系统的分析了 RV 减速器工作特性与润滑脂流变性能相关性联系。

第 6 章：根据已有研究成果的总结分析，存在一些明显的不足之处。针对以上不足之处，未来的研究展望，以拓展学术视野并促进学科的发展。

第 2 章 RV 减速器润滑下的工作特性分析

2.1 引言

RV 随着科技的迅速发展，RV 减速器在现代机械系统中扮演着越来越重要的角色，其精密设计和高效性能使其成为各行业中不可或缺的组件。然而，在 RV 减速器长时间、高负荷运转的背景下，润滑问题逐渐突显出其在维持设备长寿命和高效性能方面的至关重要性。特别是，在考虑到润滑脂自身流变性能的角度，必须深入了解 RV 减速器在运转工况下，润滑脂的特性如何影响其整体工作性能。

润滑脂作为 RV 减速器润滑系统的核心组成部分，其流变性能在一定程度上决定了润滑脂在高速、高负荷环境下的表现。流变性能的好坏直接关系到润滑脂在 RV 减速器内的润滑效果，从而影响到设备的摩擦、磨损以及整体运行的稳定性。因此，对于 RV 减速器润滑下的工作特性进行深入研究，特别关注润滑脂自身的流变性能，对于确保 RV 减速器长时间、高效运转至关重要。

在本章的研究中，从润滑脂的流变性能出发，探讨其在 RV 减速器运转工况下的实际影响。同时深入分析 RV 减速器润滑下的工作特性，特别关注 RV 减速器在运转工况下可能对润滑脂润滑效果产生的影响。从理论的角度探讨润滑脂在不同工作条件下的表现。对 RV 减速器自身工作特性对润滑脂润滑效果产生影响、润滑脂自身流变性能对 RV 减速器在不同工况下的运转影响。对后续研究服役工况下 RV 减速器润滑脂流变特性与工作性能的相关性有着重要意义。

2.2 润滑脂对 RV 减速器传动的影响

在 RV 减速器中，润滑脂扮演着关键的角色，其主要功能在于形成润滑膜，以减少摩擦和磨损。润滑膜的厚度对于润滑效果至关重要，其与相对速度、油粘度和负荷之间存在密切关联。在最理想的情况下，润滑脂应形成具有粘性的流体膜，完全隔离摩擦表面，从而有效减少摩擦和磨损。然而，在实际工况中，如果相对速度不足、油粘度不足或负载过大，都会对润滑效果产生不利影响。特别值得注意的是，高温会导致润滑脂的粘度降低，如果未及时更换润滑脂，可能会导致污染和增加磨损，进而影响减速器的正常运行。因此，维持适当的

相对速度、油粘度和负荷条件，以及定期更换润滑脂，对于保障 RV 减速器的正常工作和延长其使用寿命至关重要。这些因素的合理控制和维护措施，不仅可以提高减速器的性能和效率，还可以降低成本，增强系统的可靠性和稳定性。

2.2.1 摆线轮传动润滑理论

润滑质量对 RV 减速器的性能和寿命具有直接影响。良好的润滑环境可以有效地减少减速器在运转时所产生的摩擦、磨损和振动，从而改善装置自身的疲劳寿命和动态特性。在 RV 减速器摆线针轮传动中，润滑问题主要涉及热弹流润滑，脂膜温度的增加会显著降低润滑性能。当 RV 减速器频繁处于缺乏润滑脂的状态时，无法充分覆盖接触表面的入口区域，导致润滑效果不理想。在缺乏润滑脂的情况下润滑膜较薄，又可能导致干摩擦接触，从而会产生极端情况导致润滑失效，加速磨损进程，进而影响传动的准确性和疲劳寿命。因此，维护润滑质量，确保适当的润滑状态对于保障 RV 减速器的正常运行和延长其使用寿命至关重要。在热弹流（Thermoelastic flow）润滑情况下，Reynolds 方程可以进行修正，考虑了温度对润滑膜自身性质的影响。在无量纲形式下，Reynolds 方程可表示为：

$$\frac{d\left(\varepsilon \frac{dp}{dX}\right)}{X} - \frac{d\left(\bar{\rho}^* H\right)}{dX} - \frac{d\left(\bar{\rho} e H\right)}{d\bar{t}} = 0 \quad (2-1)$$

其中：

$$\varepsilon = \left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{\eta}}\right)_e \frac{H^3 p H b^3}{12 \eta_{our} R^2} \quad (2-2)$$

$$\left(\frac{\bar{\rho}}{\bar{\eta}}\right)_e = 12 \left(\frac{\bar{\eta} e \bar{\rho}' e}{\bar{\eta}' e} - \bar{\rho}'' e \right) \quad (2-3)$$

$$\bar{\rho}^* = \frac{2 \left[\bar{\rho}' e \bar{\eta} e (U_b - U_a) + \bar{\rho} e U_a \right]}{U_b + U_a} \quad (2-4)$$

边界条件为：

$$\begin{aligned} P(X_{in}, \bar{t}) &= P(X_{out}, \bar{t}) = 0 \\ P(X, \bar{t}) &\geq 0 (X_{in} < X < X_{out}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

无量纲油膜能量方程为：

$$\begin{aligned}
 P_r R_e^* \left(\bar{\rho} \frac{d\bar{T}}{d\bar{t}} + \bar{\rho} U \frac{d\bar{T}}{dX} - \frac{\bar{q}}{H} \frac{d\bar{T}}{dZ} \right) - \frac{1}{H^2} \frac{d^2 \bar{T}}{dZ^2} \\
 = -EcYt \left(\frac{b}{R} \right)^2 \frac{\bar{T}}{\bar{\rho}} \frac{d\bar{\rho}}{d\bar{T}} \left(U \frac{dP}{dX} + \frac{dP}{d\bar{t}} \right) + EcYt \frac{b}{R} \frac{\bar{\tau}}{H} \frac{dU}{dZ}
 \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中：

$$(2-7)$$

$$\bar{q} = \frac{d}{d\bar{t}} \left(H \int_0^Z \bar{\rho} dZ' \right) + \frac{d}{dX} \left(H \int_0^Z \bar{\rho} U dZ' \right) \quad (2-8)$$

$$(2-9)$$

$$R_e^* = \frac{\rho_o u b}{\eta_o} \left(\frac{b}{R} \right)^2 \quad (2-10)$$

无量纲摩擦损失功率为：

$$P_r(X, \bar{t}) = \int_0^1 \bar{\eta}^* \left(\frac{p_H b}{R \eta_o u} H^2 \left(\frac{Z}{\bar{\eta}^*} - \frac{\bar{\eta} e}{\bar{\eta}' e \bar{\eta}^*} \right) \frac{dP}{dX} + (U_2 - U_1) \frac{\bar{\eta} e}{\bar{\eta}^*} \right)^2 dZ \quad (2-11)$$

$$\frac{d \left(\varepsilon \frac{dP}{dX} \right)}{X} - \frac{d \left(\theta \bar{\rho}^* H \right)}{dX} - \frac{d \left(\theta \bar{\rho} e H \right)}{d\bar{t}} = 0 \quad (2-12)$$

在整个计算区域内，为了更加准确的描述流体流动状态的无量纲参数，需满足补充条件为：

$$P(X) [1.0 - \theta(X)] = 0.0 \quad (2-13)$$

$$\begin{aligned}
 P_r R_e^* \left(\bar{\rho} \frac{d\bar{T}}{d\bar{t}} + \bar{\rho} U \frac{d\bar{T}}{dX} - \frac{\bar{q}}{\theta H} \frac{d\bar{T}}{dZ} \right) - \frac{1}{(\theta H)^2} \frac{d^2 \bar{T}}{dZ^2} \\
 = -\frac{u_r^2}{c T_o} \frac{cb P_H}{u_r k} \left(\frac{b}{R} \right)^2 \frac{\bar{T}}{\bar{\rho}} \frac{d\bar{\rho}}{d\bar{T}} \left(U \frac{dP}{dX} + \frac{dP}{d\bar{t}} \right) + \frac{u_r^2}{c T_o} \frac{cb P_H}{u_r k} \frac{b}{R} \frac{\bar{\tau}}{\theta H} \frac{dU}{dZ}
 \end{aligned} \quad (2-14)$$

其中：

$$\bar{q} = \frac{d}{dX} \left(\theta H \int_0^1 \bar{\rho} U dZ \right) \quad (2-15)$$

修正后无量纲磨损功率为：

$$P_r(X, \bar{t}) = \int_0^1 \bar{\eta}^* \left(\frac{p_H b}{R \eta_o u} (\theta H)^2 \left(\frac{Z}{\bar{\eta}^*} - \frac{\bar{\eta} e}{\bar{\eta}' e \bar{\eta}^*} \right) \frac{dP}{dX} + (U_2 - U_1) \frac{\bar{\eta} e}{\bar{\eta}^*} \right)^2 dZ \quad (2-16)$$

2.2.2 直齿行星齿轮传动润滑理论

渐开线齿轮在运行过程中润滑效果对其性能和使用寿命有着重要影响。对于渐开线齿轮弹流润滑情况，通常使用无量纲 Reynolds 方程进行描述。该方程可以表示为：

$$\frac{d}{dX} \left(\varepsilon \frac{dP}{dX} \right) - \frac{d(\rho H)}{dX} = 0 \quad (2-17)$$

其中：

$$\varepsilon = \frac{\rho H^3 a^2 p_H}{12 \eta \lambda \eta_0 U R^2} \quad (2-18)$$

最小油膜厚度计算公式如下：

$$h_{min} = 1.6 \alpha_0^{0.6} (v_0 u)^{0.7} E_e^{0.03} R_e^{0.03} W^{-0.13} \quad (2-19)$$

上式中， w 代表单位齿宽的齿面啮合力大小， α_0 和 v_0 分别是润滑剂的压力粘度系数和动力粘度， R_e 是等效曲率半径， r 是齿轮啮合面间隙的一半。方程表明了润滑剂中流动时，润滑剂的粘度对齿轮啮合力的大小有着重要影响。

由上述可知：粘度和摩擦系数对减速器性能有着重要影响。较大的粘度可以减小齿轮的振动噪声，并增加油膜厚度，进而减小减速器的振动。然而，较大的摩擦系数可能会导致更大的磨损，但较少的发热，从而减小齿轮的热变形和振动。因此，在不同的润滑环境下测试和分析润滑脂的油膜厚度和摩擦系数对于 RV 减速器的工作稳定性具有重要意义。

2.3 RV 减速器工况参数对脂润滑的影响

2.3.1 RV 减速器脂润滑控制方程

研究润滑脂的流变特性是脂润滑理论的重要任务，需要建立其本构模型以描述其流变行为。由图 2-1 所示，润滑脂的流变特性表现为随着剪应变率的增加，其粘度呈下降趋势。此外，润滑脂的剪应力与剪应变率之间存在非线性关系，当润滑脂受到外部剪切作用时，其内部分子结构发生变化，导致了复杂的流变行为。润滑脂的状态随着外部力的作用而发生变化。当润滑脂受到的剪应力大于其屈服剪应力时，表现为流动状态；反之，表现为固体状态，并且具有一定的弹性变形能力。这种状态的变化是动态的，随着剪切时间的增加，润滑脂的粘度会降低，但在剪切停止后，部分粘度会恢复。此外，润滑脂还具有有一

定的固体性质。当润滑脂受到不同方向的压力时，会拉长入口区的流线，使润滑脂膜变薄。固体性质使润滑脂能够在机械设备中形成有效的润滑膜，减少摩擦和磨损，保护机械部件的正常运行。

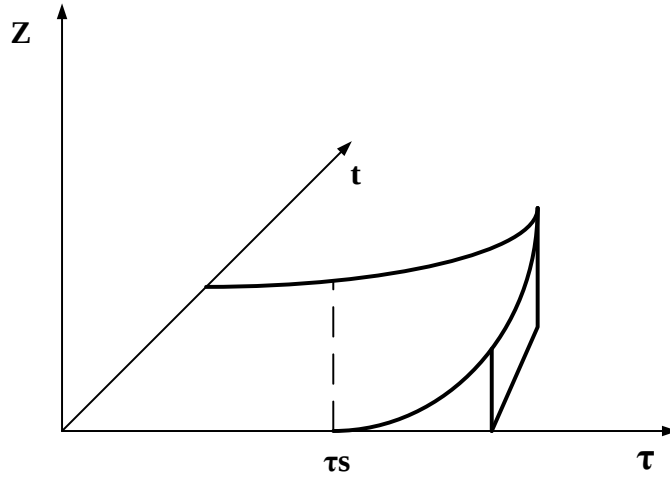


图 2-1 润滑脂力学的宏观特性

实际工程中，为了更准确地描述其在润滑系统中的行为，常常使用本构方程来描述其流变性质。润滑脂的流变行为受到多种因素的影响，包括温度、剪切速率、压力等，因此需要一个能够综合考虑这些因素的模型。润滑脂的本构方程通常包括两部分：弹性部分和粘性部分。弹性部分描述了润滑脂在受到应力时的回弹性质，而粘性部分描述了润滑脂在受到剪切力时的变形性质。常见的本构方程包括卡尔文-弗伦奇模型（Kelvin-Voigt model）、卡西蒂粘弹性本构方程（Casson rheological model）二种：

卡尔文-弗伦奇模型是一种描述线性粘弹性材料行为的经典模型，也称为弹簧-阻尼器模型。它由弹簧和阻尼器两部分组成，用来描述物质在受力时的应变和应力关系。该模型假设了材料既有弹性又有粘性，弹簧代表了材料的弹性部分，阻尼器代表了材料的粘性部分。弹簧的弹性系数为 k ，阻尼器的阻尼系数为 η ，物体的受力作用下，模型描述了物体的位移 x 随时间 t 的变化关系：

$$F(t) = kx(t) + \eta \frac{dx(t)}{dt} \quad (2-20)$$

其中： $F(t)$ 为外力， $x(t)$ 为位移函数。

根据该模型，物体的位移随时间的变化可表示为：

$$x(t) = x_0 e^{\frac{-kt}{\eta}} + \frac{F_0}{k} \left(1 - e^{\frac{-kt}{\eta}} \right) \quad (2-21)$$

其中： x_0 为初始位移， F_0 为初始外力。

该模型说明了在施加外力后，物体会先发生瞬时变形，然后逐渐趋于稳定位置。模型的参数 k 和 η 分别描述了材料的弹性和粘性特性，可以通过实验测量获得。

卡西蒂粘弹性本构方程是描述流体非牛顿性质的模型之一，特别适用于描述具有较大粒径或高浓度颗粒的流体，如润滑脂等。卡西蒂模型将流体的应力-应变关系描述为一个非线性的方程，其数学表达式如下：

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}^{\frac{1}{n}} \quad (2-22)$$

其中： τ 为剪切应力， τ_0 为初始应力， μ 为卡西蒂粘度参数， $\dot{\gamma}$ 为剪应变率， n 为卡西蒂指数，通常取值在 0.5 到 1 之间。

2.3.2 不同工况参数对 RV 减速器润滑效果的影响

通过上述对润滑脂控制方程的了解。对 RV 减速器在运转中脂润滑效果产生显著影响的工况参数主要包括：流变指数和卷吸速度以及工作载荷。

(1) 流变指数是用来直接反映润滑脂的流变特性和润滑能力。指数越高，润滑脂在使用时越容易产生润滑膜，增加自身的润滑效果。尤其是在高载荷和高速度下，润滑脂通过形成润滑膜的方式，可以有效减小金属表面之间的直接接触，从而降低摩擦和磨损，提高机械系统的工作效率和寿命。因此，较高的流变指数可能导致黏度对剪切速率更为敏感，可能影响黏滞耗散的能力。良好的润滑剂应当在高剪切速率下保持较低的黏滞耗散。

(2) 卷吸速度影响会润滑膜的形成，较高的卷吸速度有助于将润滑脂有效地输送到接触区域，并形成一個稳定的润滑膜。对于 RV 减速器零件表面之间的直接接触、减小摩擦和磨损非常关键。高卷吸速度可能导致润滑脂在接触区域形成更薄的润滑膜，因为润滑剂在极短的时间内被卷入接触区域。可能对黏滞耗散和摩擦性能产生影响。一些高黏度的润滑脂可能需要相对较低的卷吸速度，以确保在接触区域形成足够的润滑膜。适当的卷吸速度有助于提供足够的润滑，并减小摩擦，从而降低磨损。然而，过高或过低的卷吸速度都可能影响

润滑效果，导致摩擦增大、磨损加剧，从而影响 RV 减速器工作的耐久性。

(3) 工作载荷的增加会导致更高的接触压力，会直接影响液膜的厚度。较大的载荷可能需要更厚的液膜来分散和承受载荷，从而维持润滑效果。较高的工作载荷通常会导致润滑膜的形成。在 RV 减速器润滑过程中，脂润滑被挤压到接触区域，形成一个润滑膜，减小齿轮表面的直接接触。较大的工作载荷可能导致润滑膜更显著地形成，从而降低摩擦和磨损，同时摩擦和黏滞耗散会增加，可能导致温度的升高。

2.4 本章小结

针对减速器在摆线轮润滑传动理论的基础上修正了 Reynolds 方程，推导出修正后的无量纲磨损功率。研究指出，润滑脂的油膜厚度对减速器的磨损、发热和振动性能有着重要影响，进而影响了减速器的使用寿命。在正常运转时，使用粘度较高的润滑脂可以增加油膜厚度，减小振动，提高减速器的工作稳定性。此外，润滑脂的缓冲减振效果也使得在其润滑环境下减速器的工作更加平稳，为减速器的正常运行提供了保障。研究结果对于减速器的设计和使用有着一定的指导意义。

为了研究 RV 减速器润滑脂流变性能与其工作特性相关性的联系。本文给出了 RV 减速器脂润滑控制方程，通过润滑理论方程为基础，根据 RV 减速器自身工况条件，分析出对工况参数对润滑效果影响显著的三种因素。依据理论方程解释出这些参数对 RV 减速器工作时润滑效果的一些影响。

第 3 章 RV 减速器润滑脂宽温流变特性

3.1 引言

RV 减速器的主要特点包括工作平稳、噪音低、寿命长、传动效率高等，因此受到了广泛关注和应用。其稳定性和寿命关键地依赖于润滑系统的性能，而润滑脂作为润滑系统的重要组成部分，其宽温流变特性成为保障 RV 减速器在多样化工作环境中可靠运行的重要因素。

润滑脂的宽温流变特性指的是在广泛的温度范围内，润滑脂仍能保持适当的黏度和流动性。由于 RV 减速器常常面临从低温到高温的温度变化，因此润滑脂的宽温流变特性对于确保在不同工作条件下维持适当的润滑膜至关重要。本研究通过深入分析 RV 减速器润滑脂的宽温流变特性，以揭示其在多样化工作环境中的实际应用价值。在探讨 RV 减速器润滑脂的宽温流变特性时，通过深入研究润滑脂在低温、高温和温度变化过程中的流变行为。可以更好地理解其在不同温度下的黏度、剪切稀释率以及流动极限等关键特性。

3.2 润滑脂流变特性理论

3.2.1 流变学基本概念

(1) 剪切应力

剪切应力（Shear Stress）是指液体或固体在受到剪切力作用时对形变的一种响应。剪切应力通常用符号 τ （tau）表示。在润滑脂或其他液体中，当施加剪切力时，润滑脂内部的分子或颗粒受到力的作用，发生相对于初始位置的平行位移。同时相对位移会导致内部的应力，即剪切应力。剪切应力计算公式为：

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (3-1)$$

其中： τ 是剪切应力， F 是施加的剪切力， A 是受力的截面积。

剪切应力的单位通常是帕斯卡（Pa）或牛顿 /米²（N/m²）。在润滑脂中，剪切应力的产生是由于分子间的相互作用和流动行为。当施加剪切力时，润滑脂内部的分子开始发生滑动，导致剪切应力的产生。流变性质是润滑脂适用于润滑的关键之一，润滑脂的流动性使其能够在机械部件之间形成均匀的润滑膜，

防止金属表面直接接触和磨损。并在高压下保持稳定，有效减少机械部件的磨损，以确保其正常运行并延长使用寿命。

剪切应力是流变学中的基本概念，描述了流体或固体在受到切变力作用时的应力情况。通过剪切应力和剪切速率的关系，了解物质的流变行为，包括其黏度的变化和非牛顿性质。在流变学中，剪切应力通常用来表示单位面积上的切变力，而剪切速率则表示单位时间内的变形速率。物质的黏度可以通过剪切应力和剪切速率的比值来定义，即黏度等于剪切应力除以剪切速率。非牛顿性质指的是物质在剪切应力作用下其黏度随剪切速率或剪切应力而变化的特性，与牛顿流体不同，牛顿流体的黏度是恒定的。因此，剪切应力和剪切速率是研究物质流变行为的重要参数。

（2）剪切速率

剪切速率（Shear Rate）是指在液体或固体中，在单位时间内相对于相邻层的运动速度梯度。在流体力学和流变学中，剪切速率用来描述流体或固体在受到剪切力作用时的变形程度。剪切速率通常用希腊字母 γ （gamma）表示。

剪切速率的计算公式为：

$$\gamma = \frac{\Delta v}{\Delta Y} \quad (3-2)$$

其中： γ 是剪切速率， Δv 是相邻层之间的速度差， ΔY 是相邻层之间的距离。

剪切速率的单位通常是每秒（ s^{-1} ）。

在润滑脂或其他液体中，当施加剪切力时，相邻的分子层之间发生相对滑动，而剪切速率就是描述相对滑动速度的参数。剪切速率越高，润滑脂内部的分子相对运动越快，润滑脂呈现出不同的流变行为。

具体来说：当剪切速率较低时，润滑脂可能呈现出较高的黏度，即呈现出粘稠的状态，当润滑脂处于粘稠状态时会在低速运动中形成持久的润滑膜。当剪切速率较高时，润滑脂可能会发生剪稀（shear-thinning）现象，即黏度下降，有利于在高速运动中减小润滑阻力。了解剪切速率与润滑脂的流变特性之间的关系对于优化润滑脂的选择和应用具有重要意义。流变学研究中通常通过在不同剪切速率下测量润滑脂的黏度来获取流变特性的信息，从而更好地理解其在不同工况下的性能。

(3) 粘度

黏度（Viscosity）是描述流体抵抗变形的物理属性，即液体或气体对剪切力的反应程度。它是衡量流体内部粘滞阻力的量度，表示了流体的黏稠程度。黏度可以通过流体力学的牛顿定律来理解，即剪切应力与剪切速率之比。牛顿定律表明，流体内部的应力正比于它的速率梯度，而黏度则是该比例的比例常数。换句话说，牛顿定律可以描述黏度的基本行为，即在单位面积上施加的剪切应力与流体单位厚度内的速率梯度成正比。公式如下：

$$\tau = \eta \cdot \gamma \quad (3-3)$$

其中： τ 是剪切应力， η 是黏度， γ 是剪切速率。

牛顿定律适用于黏度保持不变的牛顿流体，即黏度独立于剪切速率。同时，无论应变速率如何变化，牛顿流体的黏度始终保持不变。然而，对于非牛顿流体（如润滑脂），黏度可能是剪切速率的函数，性质称为非牛顿性。其中非牛顿流体的黏度可能随剪切速率的增加而增加（剪切稠化）或减少（剪切稀释），取决于物质的特性和结构。在润滑脂中，黏度的重要性体现在以下几个方面：

润滑效果：黏度影响润滑脂在机械设备中形成的润滑膜的均匀性和持久性。适当的黏度可确保在设备运行期间提供有效的润滑。

摩擦阻力：黏度直接影响摩擦阻力，过高或过低的黏度都可能导致不良的摩擦效果，影响设备的性能和寿命。

温度敏感性：黏度通常随温度的变化而变化。理解黏度与温度之间的关系对于在不同工作温度下选择合适的润滑脂至关重要。

润滑脂的黏度可以通过实验测量得到，通常使用旋转黏度计等工具。黏度的理论研究和实验测试对于设计和选择适用于不同工况的润滑脂具有重要意义。

3.2.2 流变学测试方法

流变学是研究物质在外部应力作用下的流动和变形行为的学科。流变学测试方法用于测量物质在不同应力或应变条件下的流变性质。其中，旋转黏度法是一种常用的测试方法，通过旋转式黏度计在不同剪切速率下测量物质的黏度。可以通过实验了解物质的流变特性，包括其黏度随剪切速率变化的情况。通过流变学测试，可以评估物质的流变行为，为工程和科学领域提供重要的参考数

据。使用旋转流变仪（Parallel-Plate Rheometer）研究高黏度液体、半固体以及软物质的流变行为，实物图如 3-1 所示。



图 3-1 MCR 301 旋转流变仪

旋转流变仪由两个平行的圆盘组成，一个是旋转平板，另一个是固定平板。如图 3-2 所示可知：准备测试样品并将被测物质被置于这两个平板之间，同时在正式测试之前对所测样品进行间距调整，还可以根据自身的实验需求对样品进行预热或者降温。之后再正式测试，在测试中可以通过旋转平板，施加剪切力于被测物质，测量物质在剪切力下的变形。等不同手段该百年测试所需的不同条件。最终通过数据分析将应力与应变或剪切应变之间的关系绘制成图表，得到流变曲线。

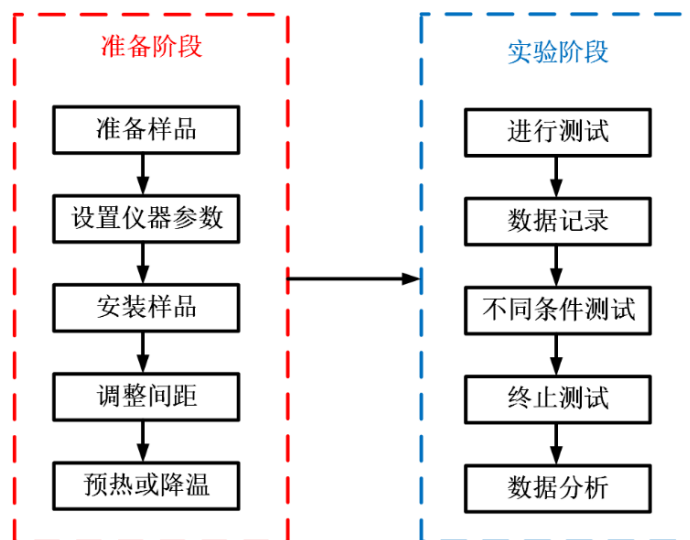


图 3-2 旋转流变仪的使用步骤

3.3 润滑脂宽温域流变测试

由上文分析可知，润滑脂的流变特性主要测试的目标是润滑脂本身的剪切应力、剪切速率以及粘度三个部分。并且随着不同的使用工况与温度变化，对自身的流变特性产生极大的该变。同时可根据旋转流变仪进行测量。再依据润滑脂流变的理论基础进行数据的分析。

3.3.1 实验材料与方法

本研究中使用的润滑脂是 NLGI 3 的 SK-1A 润滑脂，是一种专用于工业机器人的润滑脂。表 3-1 显示了润滑脂的主要成分和相关技术参数。相关技术参数。稠度参数对润滑脂的性能至关重要 稠度参数对润滑脂的性能至关重要。测量润滑脂稠度的主要测试方法是锥入度试验，其公式为 $ASTMD217^{[77]}$ 。稠度水平除以锥入度深度。渗透深度的单位渗透深度的单位是 0.1 毫米，NLGI 3 的工作渗透深度在 220-250 毫米范围内，范围为 220-250。

表 3-1 SK-1A 润滑脂主要成分及参数

稠化剂种类	基础油	粘度($\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	滴点 / $^{\circ}\text{C}$	稠度等级	工作锥入度 (0.1 mm)
铝基润滑脂	合成的	423	123	3	235



图 3-3 SK-1A 润滑脂样品

流变特性测试中，采用安东帕 Physica MCR302 旋转流变仪（德国）和平板测试头进行实验。测试模块选用 PP25-SN26459，平板间隙设置为 1mm。在实验过程中，设置不同的温度值，分别为-20 $^{\circ}\text{C}$ 、-10 $^{\circ}\text{C}$ 、0 $^{\circ}\text{C}$ 、10 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ 、30 $^{\circ}\text{C}$ 和 40 $^{\circ}\text{C}$ ，以对润滑脂在不同温度条件下的流变特性进行测试。通过实验分析润滑脂在不同温度下的流变行为，同时为各种工况下的应用提供参考数据。

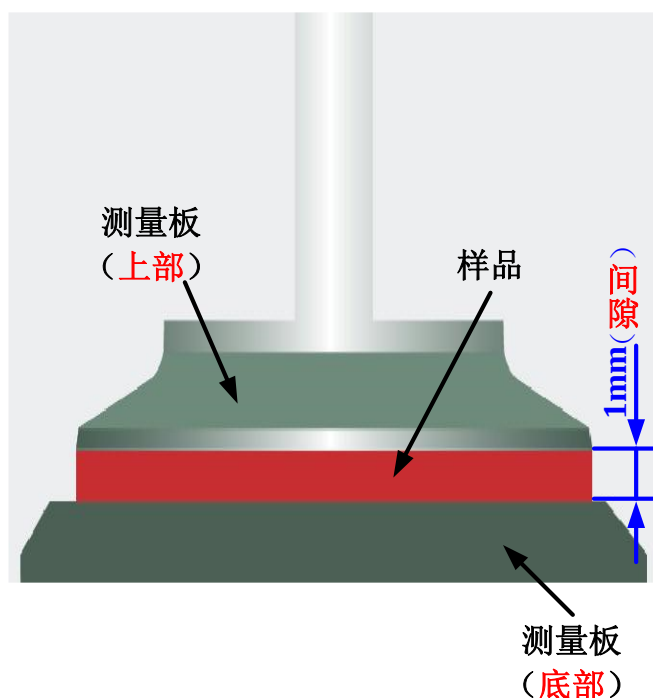


图 3-4 MCR302 旋转流变仪及测试模块

黏弹特性测试：采用旋转流变仪振荡剪切模式下的控制应变实验。振荡频率：1Hz，扫描应变范围： $0.01\text{s}^{-1}\sim 100\text{s}^{-1}$ ，测试储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随扫描频率的变化规律，并推算润滑脂的平台模量。

流动特性测试：采用旋转流变仪连续剪切模式下的控制剪切速率实验。剪切速率范围： $0.01\text{s}^{-1}\sim 100\text{s}^{-1}$ ，测试剪切应力随剪切速率的变化规律。

触变性测试：采用旋转流变仪分段连续剪切模式的控制剪切速率实验。剪切速率分 3 段，分别为 $0.01\text{s}^{-1}\sim 100\text{s}^{-1}$ 、 100s^{-1} 、 $100\text{s}^{-1}\sim 0.01\text{s}^{-1}$ 。测试黏度随剪切速率的变化规律，分析各复合锂基润滑脂样品的触变环面积变化情况。

3.3.2 数据收集

如表 3-2 所示，实验设置了四个阶段。第一阶段（预剪切）：频率为 0.01rad/s ，取点 5 个、第二阶段（加速剪切）：频率为 $0.01\sim 100\text{rad/s}$ ，对数坐标每个数量级取点 10 个，合计 40 个、第三阶段（恒定剪切）：频率为 1Hz，取点 10 个、第四阶段（减速剪切）：频率为 1Hz，对数坐标每个数量级取点 10 个，合计 40 个。其中考虑到实验仪器本身的适应性，为了使实验数据更加准确，本文将预剪切和恒定剪切阶段的实验数据去除，主要保留加速剪切和减速剪切阶段的实验数据。在对实验数据进行分析的同时，将所测数据通过不同温度条

件进行分组。研究的输入变量包括时间、温度和剪切速率，输出变量是剪切应力。再利用预测模型来预测在不同剪切速率下 SK-1A 润滑脂的剪切应力变化规律，以深入研究其流变特性。

表 3-2 SK-1A 润滑脂主要实验分布

	预剪切 (0.01s ⁻¹)		加速剪切(0.01s ⁻¹ ~100s ⁻¹)		恒定剪切 (100s ⁻¹)		减速剪切(100s ⁻¹ ~0.01s ⁻¹)	
	频率	取点数量	频率	取点数量	频率	取点数量	频率	取点数量
稳定模式 (-20℃~40℃)	0.01rad/s	5	0.01~100 rad/s	40	1Hz	5	1Hz	40
震荡模式 (-20℃~40℃)	0.01rad/s	5	0.01~100 rad/s	40	1Hz	5	1Hz	40

3.4 实验结果与分析

3.4.1 黏弹性分析

黏弹性是润滑脂的重要指标，对于提高 RV 减速器的平稳性和工作效率至关重要。黏弹性能够减少运转时对零件的震动，从而保护机械部件，延长其使用寿命。图 3-5 给出了 SK-1A 润滑脂的储能模量和损耗模量曲线反映了其由粘性向弹性转变的难易程度。同时可以看出 SK-1A 润滑脂的储能模量始终高于损耗模量，表明其在此区间内的粘弹性变化非常稳定。并且在线性黏弹性区域内， G' （储能模量）和 G'' （损耗模量）保持稳定，说明润滑脂具有高的皂纤维缠结程度和较高的剪切应力。进而这些特性使得 SK-1A 润滑脂在各种工况下都能保持稳定的润滑性能，从而提高了机械设备的可靠性和使用寿命。结合作者的前期研究^[78]，SK-1A 润滑脂的缠结程度可以通过平台模量描述（ G_N^O ）。平台模量是指在在一定的频率范围内，储能模量和损耗模量之间的平衡值。如公式 3-4 所示：通过频率扫描实验数据外推法，可以直接获取平台模量。

$$G_N^O = [G']_{\tan \delta \rightarrow \min imum} \quad (3-4)$$

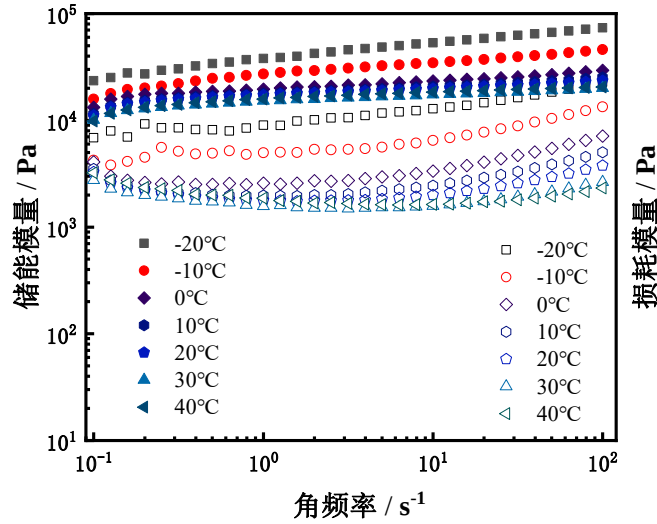


图 3-5 各温度下 SK-1A 润滑脂应变扫描图

图 3-6(a)给出了直观的平台模量计算方法，结合式 (3-4) 即可计算出任何频率下润滑脂所对应的平台模量，通过计算得出了图 3-6(b)。图 3-6 (b)给出了 SK-1A 润滑脂平台模量随温度着的变化规律。由图中的规律可以看出，随着温度的升高，所对应的平台模量处于持续下降状态。特别要指出的是，由-20°C至 0°C之间，平台模量的下降幅度较大，这表明在该区间的温度变化下，SK-1A 润滑脂的皂纤维结构发生明显变化，粘弹性能大大下降，对于润滑脂自身流动有益。同时，随着温度的进一步升高，平台模量的下降趋势逐渐平缓，表明了 0°C到 40°C之间，润滑脂皂纤维结构处于稳定状态，流动性良好。在此工况下，使用 SK-1A 润滑脂有利于 RV 减速器的有效运转。

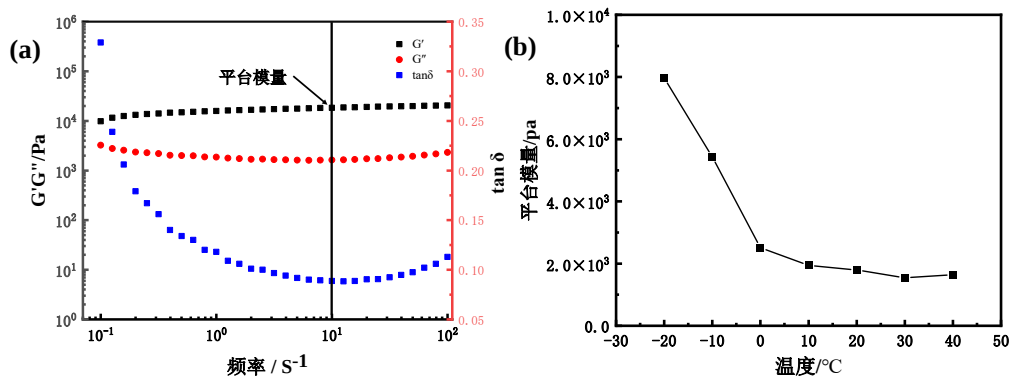


图 3-6 SK-1A 润滑脂平台模量随温度的变化规律

(a) 平台模量推算方法 (b) 平台模量随温度变化规律

3.4.2 流变特性分析

由于 RV 减速器在工作时所需要的转速较高，对其润滑脂在高速下的流变性能有着较高的要求。在图 3-7 发现，在不同温度下，SK-1A 润滑脂的剪切应力随着剪切速率的增加而增加，呈现出了线性趋势。进一步的，对于每个温度曲线上升的趋势均有所差异。特别要指出，在 -20°C 和 0°C 之间曲线上升幅度明显，意味着 SK-1A 润滑脂在此过程中的流动阻力明显增大，并且通过对比可以发现，三个温度之间的趋势差异较大。这表明在 -20°C 至 0°C 过程中 SK-1A 润滑脂由剪切应力表现出的黏弹性变化显著且与上述粘弹性分析图 3-6(b) 中的结果表现相对应。流动特性是指润滑脂在流动时，剪切应力随剪切速率变化的重要特征，反映了润滑脂在不同剪切速率下的流变行为。通过分析流变曲线，可以反映出润滑脂在流动过程中的变形和流动特性，为润滑脂的选择和应用提供重要参考。对于 RV 减速器等设备，润滑脂在流动中的特性直接影响其润滑效果和性能维持。在运转过程中，润滑脂中皂纤维的剪切破坏与恢复情况对其性能维持至关重要。为此，本章进一步对 SK-1A 润滑脂触变特性进行分析，以探究其在剪切条件下的结构恢复情况。

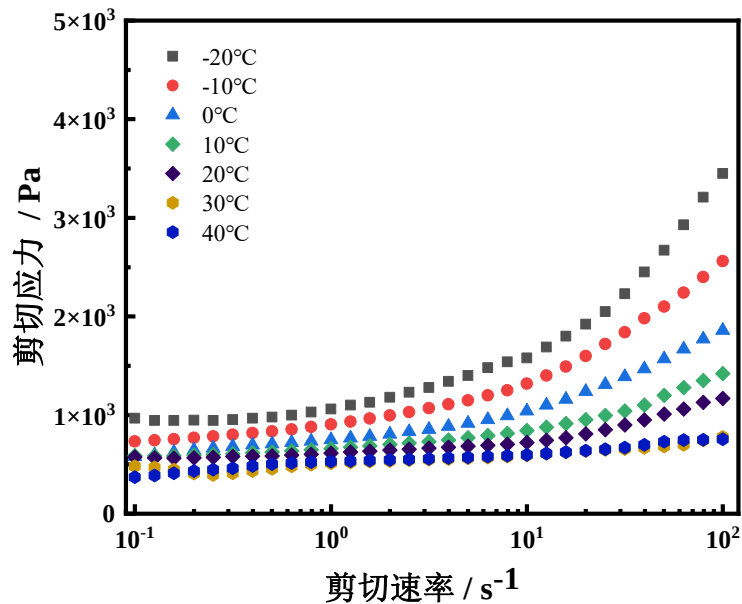


图 3-7 不同温度下剪切应力随剪切速率的变化规律

3.4.2 触变性分析

润滑脂的触变性能是指在受到外部剪切力作用下逐渐破坏，又能逐渐恢复的性质。触变性能良好的润滑脂在各种环境下具有更强的恢复性能和抗剪切能力。在RV减速器的工作过程中，润滑脂需要承受各个方向的复杂力和压力，影响其润滑性能。良好的触变性能可以保证润滑脂在受到外部剪切力破坏后能够迅速恢复其原有的润滑性能，触变性的研究有助于了解润滑脂在实际工况中的变形和恢复特性。如图3-8所示。润滑脂的流变行为可分为不同阶段，并在一定条件下形成触变环。在第一阶段，随着剪切速率增加，润滑脂的黏度逐渐下降，表现出高剪切速率下的剪切稀化特性。恒定剪切速率下，黏度仍持续下降，可能是由于润滑脂内部分子结构持续变化。第二阶段，随着剪切速率降低，黏度逐渐恢复，可能是由于分子重新排列和结构重建。在触变环形成过程中，黏度下降和恢复阶段的曲线不相交，形成闭合环状结构。触变环的存在反映了润滑脂在受到外部剪切力作用下的特殊流变行为。触变环的面积大小可评估润滑脂在剪切力作用下结构破坏后的恢复性能。触变环的研究有助于深入理解润滑脂的流变行为，反映了润滑脂在不同剪切条件下的变形和恢复行为。

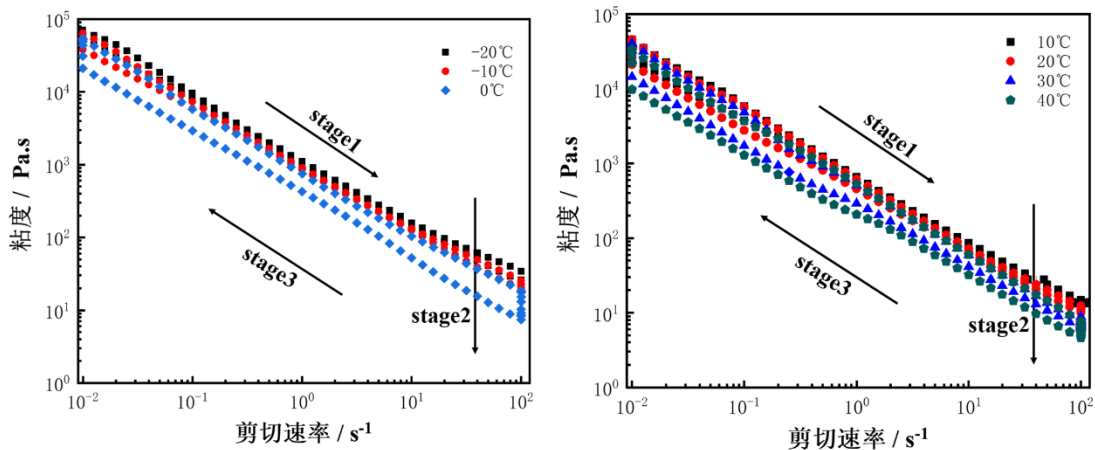


图 3-8 SK-1A 润滑脂稳态剪切流动曲线

从图 3-9 中可以看出，利用 Origin 计算出了 SK-1A 润滑脂样品在(-20°C~40°C)工况下处理前后的触变环面积.在不同温度条件下，SK-1A 润滑脂的触变性环面积是不同的。在比较-20°C与-10°C的触变环面积，发现随着温度升高但二者的面积基本一致。表明在低温条件下对 SK-1A 润滑脂结构的恢复是有益的。在 0°C时，润滑脂表现出的触变环面积最大，这表明在第三阶段恢复过程中，其粘度远低于-10°C和 10°C所表现出的粘度。随着温度升高，润滑脂在热

效应下的触变环面积变化规律不同。实验结果显示，在 20℃和 30℃时，润滑脂的触变环面积相近。在此温度范围内，温度对润滑脂结构的恢复性能影响较小。然而，当温度升至 40℃时，触变环面积显著增加，表明较高的温度可能会对润滑脂的结构破坏和恢复过程产生显著影响。这种影响可能与润滑脂分子结构的热响应性有关，在高温下，分子结构更容易受到热力学影响而发生变化，导致润滑脂的流变特性发生明显变化。表明在 40℃下对润滑脂恢复性能有较强的削弱作用。结果表明，随着温度升高，SK-1A 润滑脂的结构稳定性遭到破坏，自身恢复性能逐渐变差。

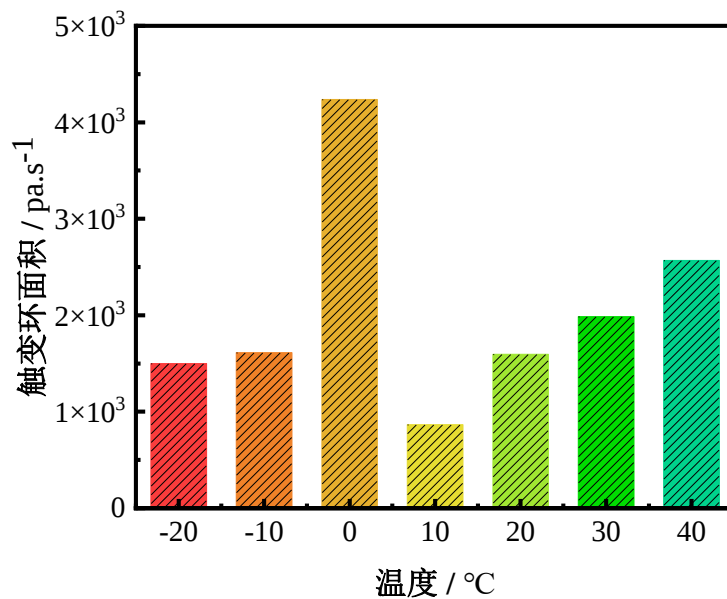


图 3-9 不同温度下 SK-1A 润滑脂的触变环面积

3.6 本章小结

润滑脂在 RV 减速器的正常运转中起到了不可忽视的作用，针对润滑脂在 RV 减速器多变的工况下，润滑剂的性能变化直接影响其可靠运转。因此研究润滑脂的流变特性成为研究 RV 减速器工作性能的重点。本文通过对 RV 减速器在 -20℃~40℃工况下使用 SK-1A 润滑脂所表现的黏弹特性、流动特性、触变性进行了实验测试，着重分析了这些特性对 RV 减速器在该工况下所产生的相关影响。具体结论如下：

(1) 在 SK-1A 润滑脂中，随着温度的变化，整体在线性黏弹性区域内 G' 和 G'' 保持稳定。通过分析图形曲线发现，在 -20℃和 0℃时，润滑脂表现出明显的粘弹性变化。为了更详细地了解缠绕结构的变化，进一步计算了 SK-1A 润滑

脂的平台模量。根据计算结果绘制的图形显示，在-20℃和 0℃时，润滑脂的粘弹性发生显著变化，而在 0℃到 40℃之间逐渐趋于稳定。

（2）在不同测试温度下，润滑脂的剪切应力随剪切速率的升高而增加，呈现整体线性趋势。这表明润滑脂具有较高的剪切应力，但在不同温度下的曲线上升趋势存在差异，尤其在-20℃和 0℃之间表现出显著的增大，表明在这一温度范围内，润滑脂的流动阻力显著上升。验证了润滑脂在高速运转中的黏弹性特性受到温度的显著影响。

（3）通过触变性分析，在-20℃和 0℃中 SK-1A 润滑脂皂纤维结果发生显著变化，尤其是在 0℃中所表现的触变环面积最大，表明了 0℃工况下对 SK-1A 润滑脂的流动性能和触变性能变化影响最大。而对于 10℃到 40℃之间，润滑脂的流动性能和触变性能表现稳定。

第 4 章 RV 减速器润滑脂流变行为预测

4.1 引言

RV 减速器在工业和机械应用中扮演着关键角色，其性能直接受润滑脂的质量和特性影响。润滑脂的流变行为对 RV 减速器的润滑性能和寿命具有重要影响。探讨 RV 减速器润滑脂的流变行为预测，通过建立预测模型，深入分析润滑脂在不同条件下的流变特性，为优化 RV 减速器的润滑方案提供理论支持。通过研究润滑脂的流变行为预测，可以为 RV 减速器的设计和维护提供重要的参考依据，提高其性能和可靠性。了解和预测润滑脂的流变行为，确保在不同工况下的有效润滑和提高设备寿命具有重要意义。对润滑脂在不同温度、剪切速率和压力下的流变特性进行系统分析，为润滑脂的工程应用提供更为可靠的性能预测和优化设计方法。

4.2 建立 Elman 神经网络预测模型

4.2.1 Elman 基本原理

Elman 神经网络是一种递归型神经网络，通常由四层组成：输入层、隐含层、承接层和输出层。相比于传统的 BP 神经网络架构，Elman 神经网络增加了一个承接层，也称为上下文层。隐含层的输出通过承接层的储存，记忆前一时刻的输出并反馈至输入^[79,80]。优化后的结构会使 Elman 神经网络具有对历史数据的记忆功能，能够适应时变的输入。与前馈型神经网络相比，Elman 神经网络具有更强的计算能力和稳定性。其具体表达式如下所示：

$$\begin{cases} r(k) = f(W_2 u(k-1) + W_1 r_c(k) + b_1) \\ r_c(k) = r(k-1) \\ p(k) = g(W_3 r(k) + b_2) \end{cases} \quad (4-1)$$

如上式所述， $u(k-1)$ 是神经网络的输入向量、 $r(k)$ 是隐含层向量、 $r_c(k)$ 是输出向量和承接层的向量， $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别是隐含层和输出层的传递函数； b_1 和 b_2 分别是隐含层和输出层对应的阈值。

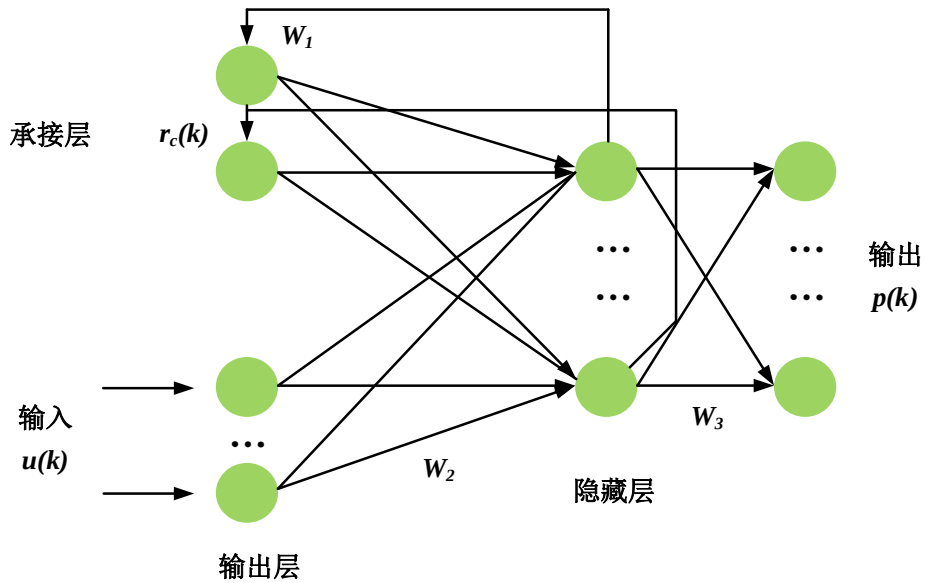


图 4-1 Elman 神经网络示意图^[81]

4.2.2 模型参数设置

为了探究温度、剪切速率、时间、与润滑脂剪切应力和粘度的影响及其对应关系。基于 Elman 神经网络建立了一个预测模型，其输入为温度、剪切速率和时间，输出为剪切应力。实验数据集被随机分成了训练集和测试集，其中训练集占比 70%，测试集占比 30%，用于建立神经网络回归预测模型。对选取的数据样本进行训练确定采用经验公式为：

$$\text{hiddennum} = \sqrt{m+n} + a \quad (4-2)$$

根据公式 4-2， m 为输入层节点个数 3，即代表 3 个输入变量；输出层节点个数 n 为 1，即代表 1 个输出变量。隐藏层节点数一般取 1 到 10 之间的整数，首先尝试取 $a=10$ 进行训练，最终确定最佳的隐藏层节点数为 12。基于 Elman 神经网络测试过程的流程图如图 4-2 所示。具体过程如下：

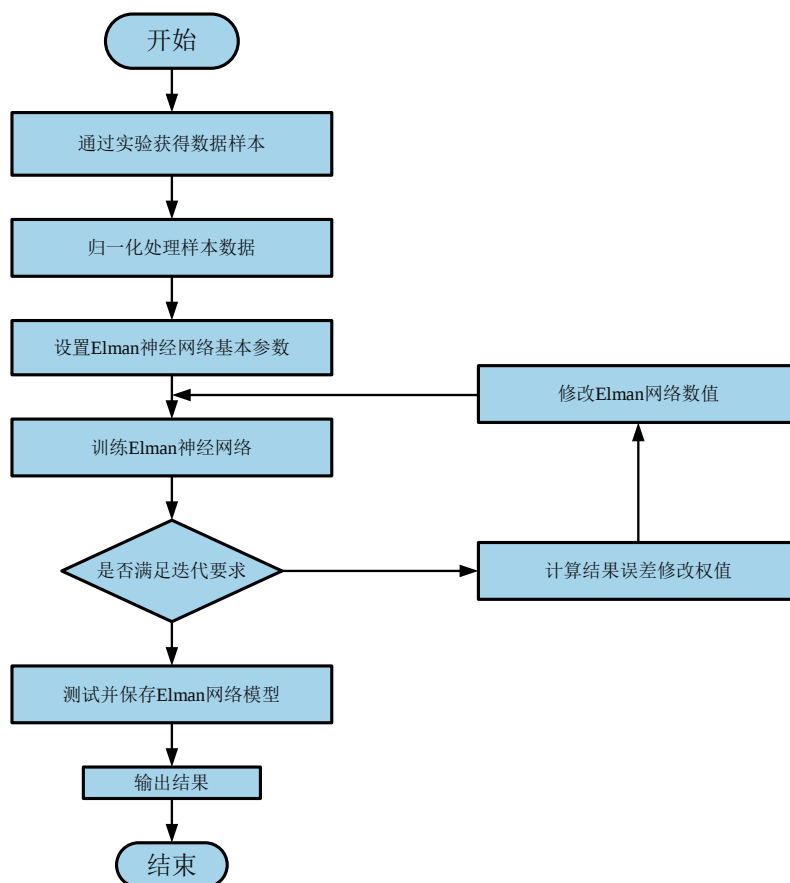


图 4-2 Elman 算法流程图

4.3 流变行为预测模型分析与结果

4.3.1 数据预处理

历史数据通常是机器学习模型的主要输入，但可能存在诸如数据波动大和异常点出现等缺陷。直接使用原始数据进行训练可能导致模型花费更多时间学习异常值，同时也可能使结果不准确。因此，通常需要进行数据预处理，以减少异常值对模型训练的影响，提高训练效果。因此，数据预处理是进行机器学习模型训练前的重要步骤。

(1) 数据平滑处理

数据平滑处理是一种常用的数据预处理技术，其目的在于减少数据中的噪音、波动或不规则变动，从而使数据更加平滑。在数据处理中，连续采样数据通常被视为固定长度为 N 的数列，其中 N 通常取奇数。常用的平滑技术如移动平均需要一个奇数长度的窗口来计算平均值，当给定的 N 为偶数时，可以选择最接近的最小奇数作为 N 的值。加入新的数值时会移除上一组数值中的第一个

数据，并将新数据放入数列末尾。同时，将其他数据向前移动一个位置。可以保持数列的固定长度，并在加入新数据时保持数据平滑处理的效果。通过这种方式，可以使得平滑后的数据更加稳定和连续，有助于后续的数据分析和模型训练。同时对新的数列进行运算，以得到平滑后的运算结果。具体公式如下：

$$x_i = \frac{x\left[i + \left(-\frac{N-1}{2}\right)\right]}{N} + \frac{x\left[i + \left(-\frac{N-3}{2}\right)\right]}{N} + \dots + \frac{x\left[i + \left(-\frac{N-1-2i}{2}\right)\right]}{N} \quad (4-3)$$

其中： x_i 表示平滑后结果， X 表示原数据。

(2) 数据归一化

数据归一化处理目的是将数据缩放或转换到一个统一的尺度，以消除不同特征之间的量纲差异。在神经网络等深度学习模型中，数据归一化可以加速收敛，提高训练效果，避免某些特征对模型的影响过大。数据归一化通常包括两个主要的方法：最小、最大归一化和标准化。

归一化是通过线性变换将数据缩放到指定的范围，通常是[0, 1]。公式如下：

$$x'_i = \frac{x_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4-4)$$

其中： x'_i 为原始数据， $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 分别表示数据的最小值与最大值。

标准化是通过将数据转换为均值为0、标准差为1的分布，从而使数据更符合正态分布。其公式如下：

$$X_{\text{standardized}} = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (4-5)$$

其中： X 是原始数据， μ 是数据集的均值， σ 是数据集的标准差。

4.3.2 预测模型参数优化

本文选用 Elman 神经网络作为润滑脂流变行为预测模型的研究对象，用来探讨机器学习算法在流变学领域的应用。此外，还引入了 BP 神经网络和 RBF 神经网络作为对比参照模型，以便更全面地评估 Elman 神经网络在润滑脂流变行为预测中的性能优劣。BP 神经网络作为一种常用的前向反馈神经网络，在一定程度上能够对非线性问题进行较好的拟合，而 RBF 神经网络则以其在局部逼近能力方面的优势而闻名。通过比较三种神经网络模型的预测效果，将有助于更好地理解不同神经网络模型在流变行为预测中的适用性和局限性，为润滑脂

流变行为预测提供参考依据。建模过程流程图如图 4-3 所示。通过温度、时间和剪切速率作为输入特征，并逐步的对剪切应力作为单一输出特征对预测模型训练。建立的模型将剪切应力作为单一预测结果。通过所预测的结果来分析 SK-1A 润滑脂在经过不同温度以及不同剪切强度下的性能。同时将不同模型的预测结果进行验证和对比，观察其与真实的实验值的误差，判断出三种神经网络的流变预测模的可行性。

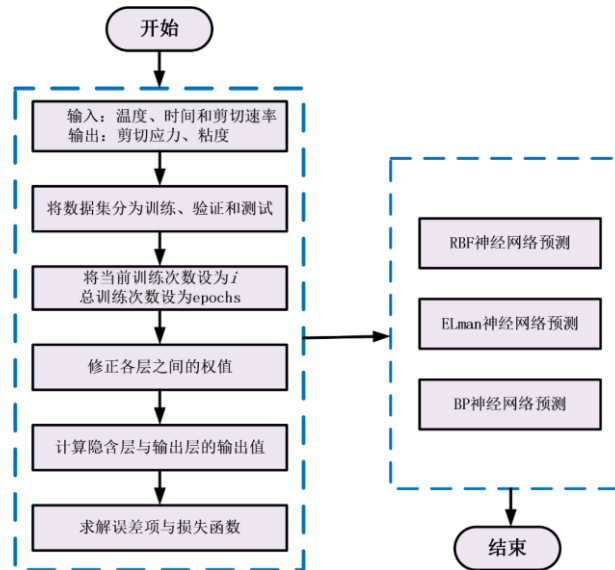


图 4-3 建模过程流程图

4.3.3 流变行为预测结果分析

本文共将样本总数为 560 个数据进行训练和预测。其中训练集占比 70%，测试集占比 30%。并对每种工况条件进行预测。每种温度各取样本数 80，其中加速和减速阶段各占 40。最后确定输入变量为温度、剪切速率以及时间，输出结果为剪切应力。为了更直观的展现预测的输入和输出，因此选取一部分预测结果进行展示。表 4-1 即为 -20℃加速状态下样本的输入值以及三种预测方式结果，可以更直观的看出预测的输入和输出。同时为了验证模型的准确性，需要选取相同的数据，将 Elman 模型的预测结果与 BP 神经网络模型以及 RBF 神经网络模型的结果进行对比。由图 4-4 以及图 4-5 所示，给出了加速与减速阶段各个温度的预测结果，并于其他两种预测结果进行了直观对比。Elman 模型的预测结果与实验数值最接近，与 BP 神经网络模型和 RBF 神经网络模型相比，其预测精度有所提高。对于润滑脂流变行为预测有重要意义。

表 4-1 -20℃加速状态下样本的输入值以及三种预测方式结果

序号	输入变量				输出		
	温度 (°C)	时间 (s)	剪切速率 /s ⁻¹	剪切应力/Pa (实验值)	(Elman)	(RBF)	(BP)
1	-20	6	0.01	706	589.69184	452.16304	370.69064
2	-20	12	0.0126	750	589.34006	443.24006	356.69006
3	-20	18	0.0158	826	590.10300	429.19820	333.87780
4	-20	24	0.02	899	593.77283	418.64763	314.90303
5	-20	30	6.31	1480	1213.98707	925.68307	754.89107
6	-20	130	0.0251	922	602.26477	422.65917	316.26037
7	-20	214	0.0316	928	617.02326	436.24886	329.15766
8	-20	285	0.0398	920	638.12558	458.90958	352.74158
9	-20	345	0.0501	928	665.29424	484.51984	377.42864
10	-20	395	0.0631	938	695.98224	513.25984	405.01464
11	-20	437	0.0794	935	728.14008	546.00208	438.10308
12	-20	472	0.1	967	760.47442	572.10282	460.51102
13	-20	502	0.126	945	790.65718	606.57118	497.51818
14	-20	527	0.158	944	818.93993	635.04873	526.11113
15	-20	548	0.2	949	842.14063	657.27543	547.76083
16	-20	566	0.251	945	863.90367	679.81767	570.76467
17	-20	581	0.316	953	884.11234	698.46794	588.49174
18	-20	594	0.398	969	900.51993	711.75873	599.93613
19	-20	604	0.501	980	915.49788	724.59388	611.50188
20	-20	613	0.631	1000	931.47941	736.67941	621.27941
21	-20	621	0.794	1030	946.58164	745.93764	627.07564
22	-20	627	1	1060	961.31909	754.83109	632.50709
23	-20	632	1.26	1100	976.24708	761.96708	635.02708
24	-20	637	1.58	1130	995.80887	775.68487	645.28287
25	-20	641	2	1180	1017.61773	787.75373	651.58173
26	-20	644	2.51	1230	1041.34978	801.74578	659.80378
27	-20	646	3.16	1280	1071.23247	821.88847	674.17647
28	-20	649	3.98	1340	1110.67092	849.63892	695.00292
29	-20	651	5.01	1400	1155.35161	882.63161	721.07161
30	-20	652	7.94	1540	1286.96673	986.97473	809.25873
31	-20	653	10	1580	1377.99627	1070.21227	887.88027
32	-20	655	12.6	1690	1488.69921	1159.48721	964.46121
33	-20	655	15.8	1800	1620.52462	1269.88462	1062.16462
34	-20	656	20	1920	1783.46439	1409.44839	1187.88039
35	-20	657	25.1	2050	1960.31560	1560.9756	1324.4056
36	-20	658	31.6	2230	2151.98275	1717.57875	1460.23675
37	-20	658	39.8	2450	2346.71756	1869.45756	1586.72756
38	-20	658	50.1	2670	2542.20846	2022.09246	1713.97446
39	-20	660	63.1	2930	2765.20925	2194.44525	1856.32325
40	-20	663	79.5	3210	2956.35362	2331.04562	1960.61162

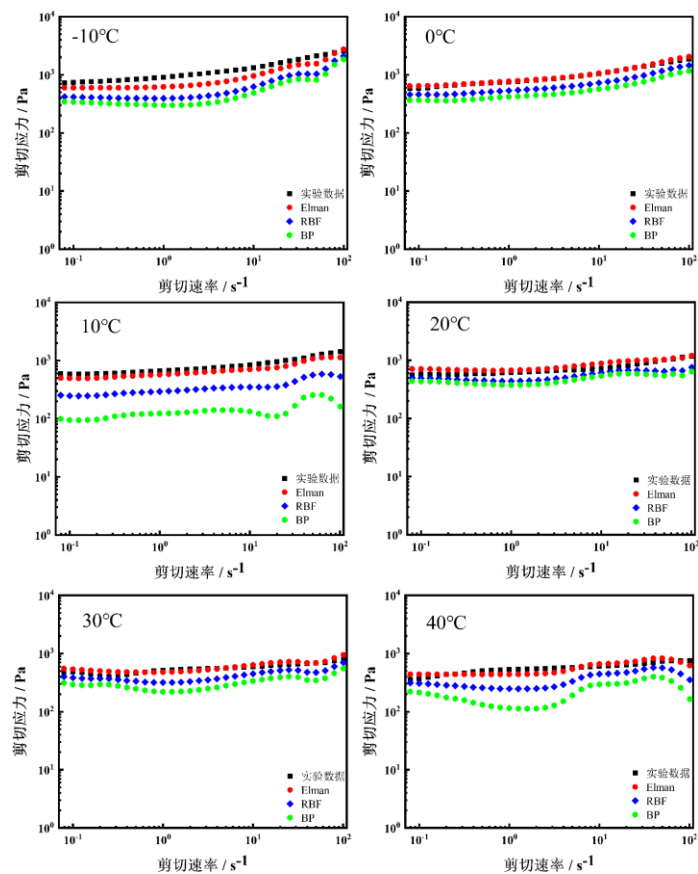


图 4-4 加速阶段实验与各预测结果对比图

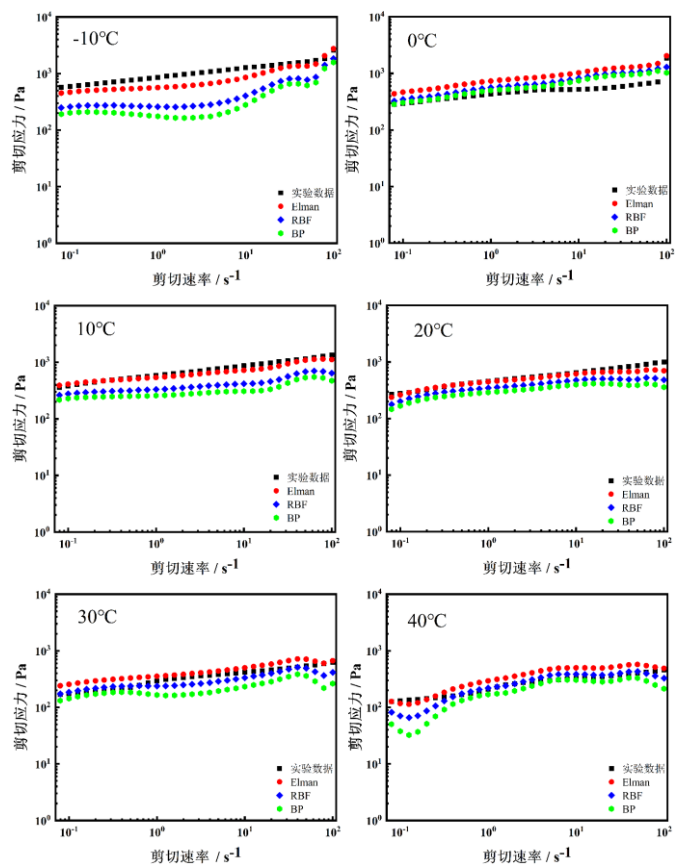


图 4-5 减速阶段实验与各预测结果对比图

为了更直观地展示三种模型的预测结果对比，本文采用小提琴图进行图像化呈现。具体而言，在图 4-6 和 4-7 中，分别呈现了 -10°C 到 30°C 范围内加速和减速阶段的预测结果对比。每个温度点下，都有三个小提琴图进行对比，通过图形之间的相互比对，可以观察到预测数据在图形中的分布特征。根据小提琴图的独特特点研究预测数据的分布情况。通过与实验数据的对比，可以明显看出，Elman 模型展现出了更高的预测精度。这表明 Elman 模型在对温度范围内的加速和减速阶段进行预测时，呈现出更为准确的结果。

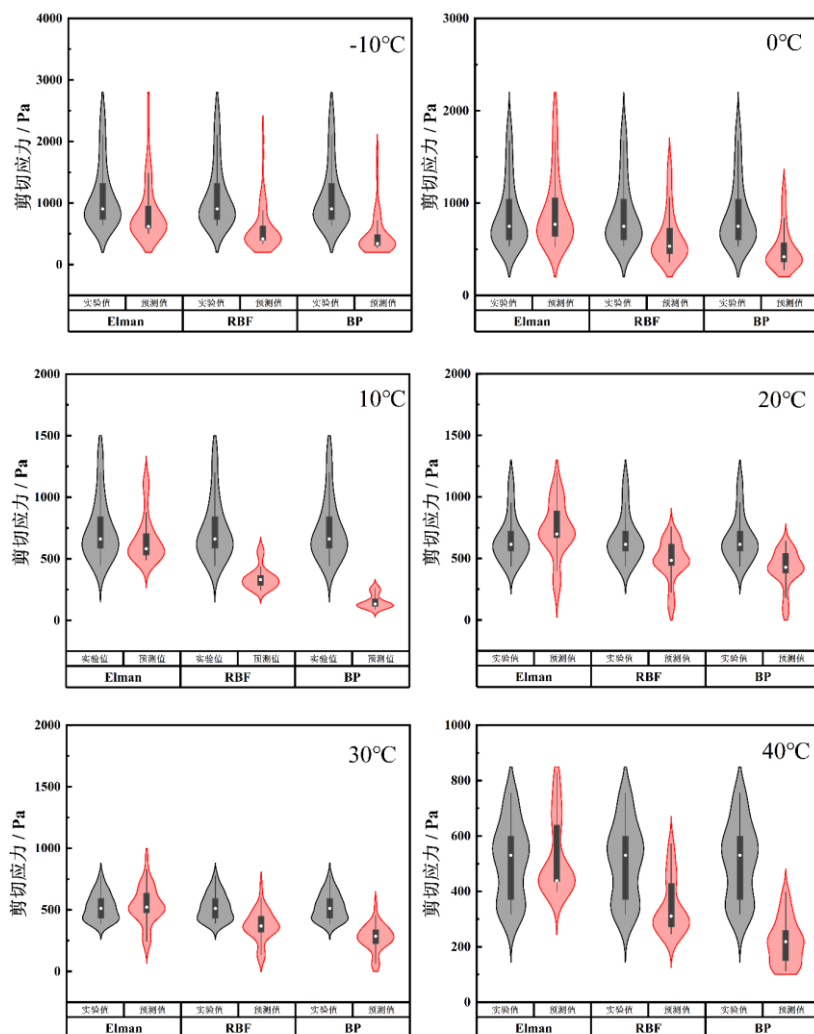


图 4-6 加速阶段预测结果小提琴图对比

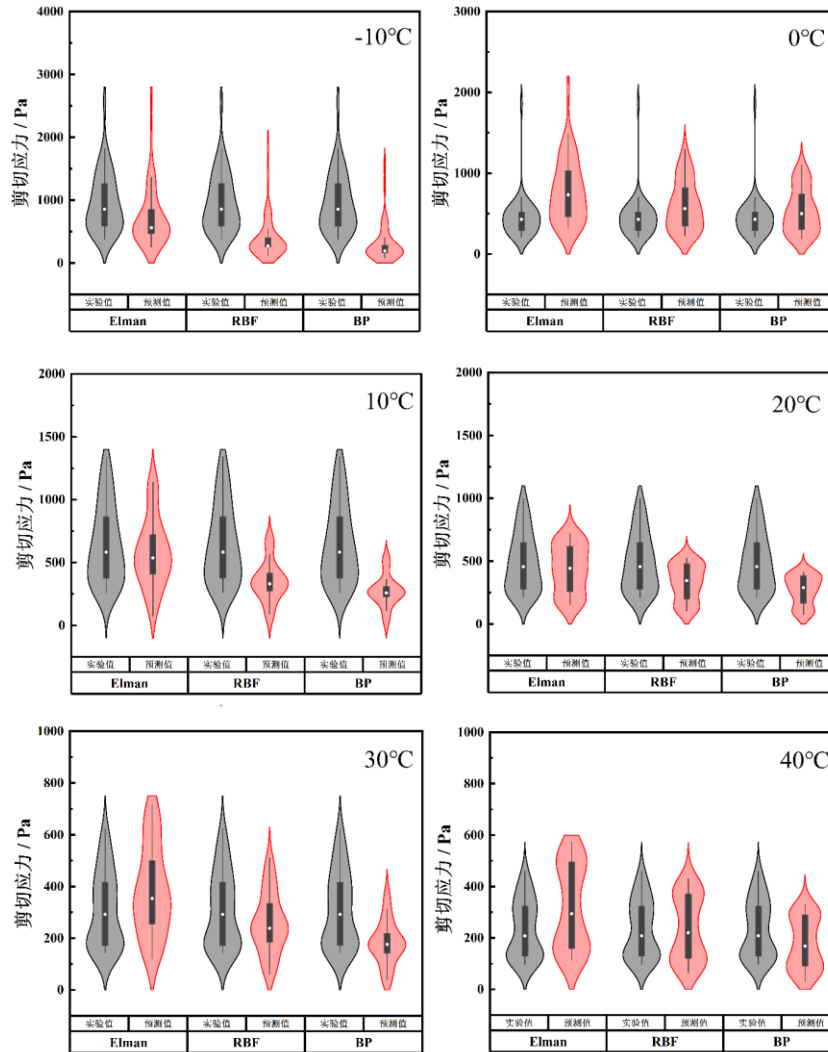


图 4-7 减速阶段预测结果小提琴图对比

4.4 预测模型指标评价

预测模型指标评价是用于评估机器学习或统计模型在预测任务中表现的一组指标。常用的指标包括均方误差（Mean Squared Error, MSE）、平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）、均方根误差（Root Mean Squared Error, RMSE）和平均绝对百分比误差（Mean Absolute Percentage Error, MAPE）等。通过这些指标可以了解模型的预测能力和准确性，从而选择最合适的模型或优化现有模型。

4.4.1 预测性能评估系数

为了验证 Elman 神经网络的流变预测模型的可靠性，在使用该预测模型的同时建立 BP 神经网络模型、RBF 神经网络模型两种不同的预测模型。采用 MAE、MSE 以及 MAPE 作为评价指标来比较不同预测模型的性能是一种常见的

做法^[82,83]。在研究润滑脂流变行为预测中，会利用以上指标帮助确定 Elman 神经网络的有效性和可靠性。MAE 衡量了预测值与实际值之间的平均绝对差异，其数值越小表示模型的预测越准确。MSE 则是预测值与实际值之间平方差的平均值，通过平方处理可以更加突出大误差的影响，但也可能导致对异常值敏感。而 MAPE 则是将预测误差转化为百分比，可以更好地反映预测误差的相对大小，但对于实际值为零或接近零的情况需要特别注意，因为可能导致 MAPE 无法计算或产生无限大的值。综合考虑这些指标，可以更全面地评估 Elman 神经网络在润滑脂流变行为预测中的表现。同时考虑到仅凭上述三个指标对预测模型进行评价是不够的，为了更加准确表达预测结果的准确性，本文还引入均方根误差（RMSE）以及决定系数 R^2 。具体计算公式如下：

$$S_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4-5)$$

$$S_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4-6)$$

$$S_{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \times 100\% \quad (4-7)$$

$$S_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4-8)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (4-9)$$

其中： y_i 、 $\hat{y}_i$ 分别表示 i 第个数据的实际值及预测值， n 为样本数量。

4.4.2 交叉验证性能评估

为了进一步证实 Elman 神经网络的流变预测模型的可靠性，本文又提出 K 倍交叉验证对模型进行测试和评价。K 倍交叉验证是一种常用的评估机器学习模型性能和泛化能力的方法。在 K-fold 交叉验证中，原始数据集被划分为 K 个相同大小的子集，其中 K-1 个子集被用作训练集，剩余的一个子集被用作验证集。重复过程为 K 次，每次使用不同的验证集。最终，模型性能的评估结果是 K 次验证结果的平均值，这样可以减少模型性能评估的随机性，提高评估结果的可靠性。K 倍交叉验证能够更全面地评估模型的泛化能力，因为每个样本都

有机会被验证，并且每个样本都会被用于训练和验证。每次选择不同的验证子集，导致 K 个独立的模型性能评估^[84-86]。本研究选择了 6 倍交叉验证。交叉验证流程图如图 4-8 所示：

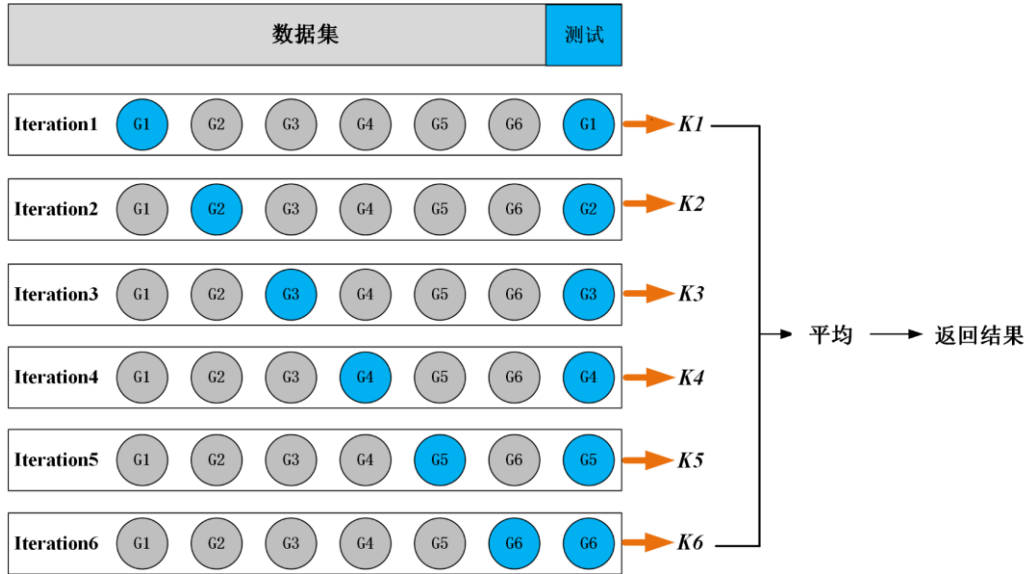


图 4-8 交叉验证流程图

4.4.3 性能验证结果对比分析

通过三种模型的 6 倍交叉验证。如表 4-2 所示，BP 模型的平均误差如下：MAE 为 4.368，MSE 为 7.522，MAPE 为 18.5%。RBF 模型的平均误差如下：MAE 为 3.476，MSE 为 5.693，MAPE 为 12.3%。另一方面，Elman 模型每倍折叠的平均误差为：MAE 为 1.221，MSE 为 1.206，MAPE 为 8.4%。另外相比于 RMSE 和 R^2 ，较 BP 神经网络来说，Elman 模型在 RMSE 方面减少了 8.359，在 R^2 方面增加了 0.34。较 RBF 神经网络来说，Elman 模型在 RMSE 方面减少了 5.529，在 R^2 方面增加了 0.23。进一步的说明 Elman 模型效果明显，提高了模型精度，证实了 Elman 预测模型的有效性。并且由图 4-9 可得，根据三种模型分别进行的每次交叉的数据结果做出了更加直观的柱状图。图 a 图 b 分别是 Elman 模型与 BP 和 RBF 模型的 MAE 结果对比。图 c 图 d 分别是 Elman 模型与 BP 和 RBF 模型的 MSE 结果对比。图 e 图 f 分别是 Elman 模型与 BP 和 RBF 模型的 MAPE 结果对比结果表明，该数据驱动模型在预测润滑脂流变性能方面具有良好的预测性能，证明了该模型的可行性。

表 4-2 三种模型精度对比

模型训练时间/s	MAE	MSE	MAP (%)	RMSE	R ²
BP	4.368	7.522	18.5%	15.752	0.61
RBF	3.476	5.693	12.3%	12.886	0.72
Elman	1.221	1.206	8.4%	7.357	0.95

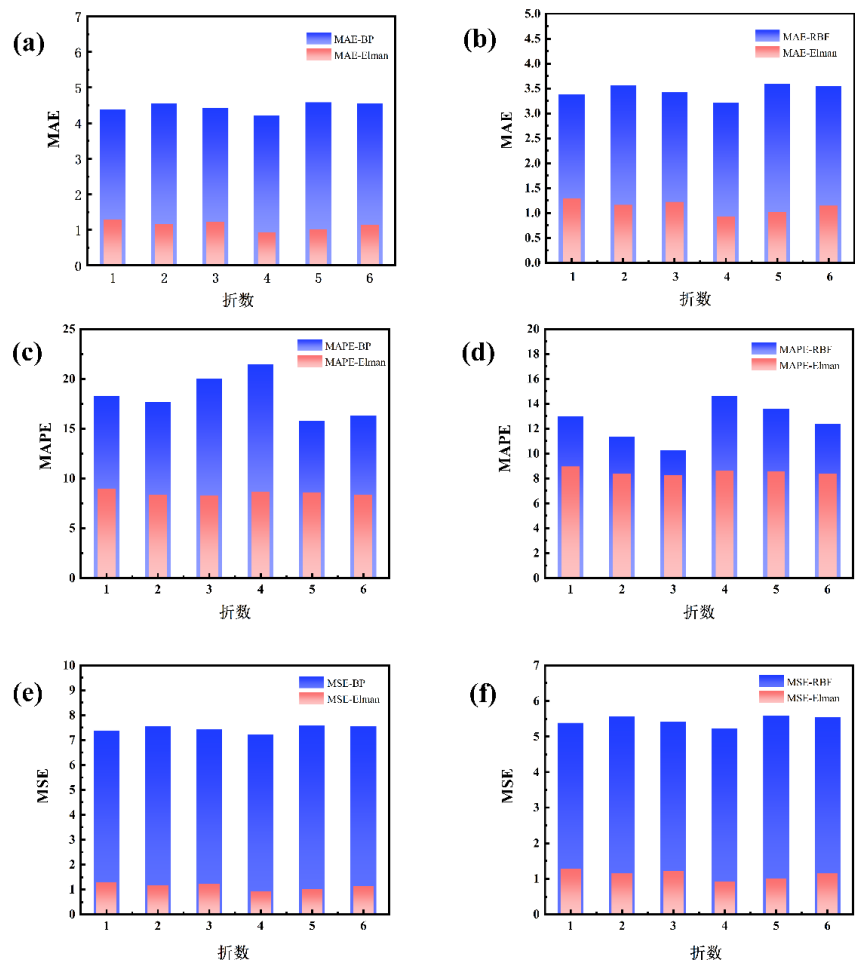


图 4-9 三种预测的性能指标对比

根据表 4-2 和图 4-9 的结果可以看出，Elman 神经网络模型与其他模型相比有相当高的预测精度。可以很好的运用于不同工况下润滑脂流变特性的预测与分析。此外通过准确的预测 SK-1A 润滑脂进行-20℃~40℃工况下的润滑脂的流变特性。对 RV 减速器在该工况下受到的润滑效果的影响有着更加清晰的认识。也对日后研究更加复杂工况下 RV 减速器的工作特性有着很好的借鉴作用。

4.5 本章小结

基于本文的流变学实验，研究发现 Elman 预测模型在预测润滑脂的流变性能中有着很好的发挥作用。故引入 Elman 预测模型实现了 SK-1A 润滑脂工作过程中剪切应力的预测。将温度、时间、剪切速率作为输入特征完成模型训练任务，分别对各种温度在不同速率下的预测结果与实验数据的比对，在预测同一组的实验数据下与 BP 神经网络模型、RBF 神经网络模型进行了结果对比。具体结论如下：

（1）通过将 Elman、BP 以及 RBF 三种预测模型在机器学习的基础上进行优化，在同一条件下对相同的数据进行预测。同时将得出的预测数据与实验数据进行比对，发现 BP 和 RB 模型 Elman 神经网络展现出了较高的预测水平。

（2）本章在采用 MAE、MSE 以及 MAPE 等三种指标来评价预测优劣。同时又运用 K 倍交叉法进行交叉验证。结果相较于 BP 神经网络，Elman 模型在 RMSE 方面减小了 8.359，而在 R^2 方面增加了 0.34。与 RBF 神经网络相比，Elman 模型在 RMSE 方面减小了 5.529，同时在 R^2 方面增加了 0.23。进一步证明了 Elman 模型的显著效果，其在提高模型精度方面表现出色。结果强调了 Elman 预测模型的有效性。

第 5 章 RV 减速器工作特性试验研究

5.1 引言

RV 减速器作为一种关键的旋转传动装置，其稳定性和性能在很大程度上取决于润滑系统的质量。振动是机械系统中常见的运行问题之一，而润滑脂作为润滑系统的核心组成部分，RV 减速器振动工况的影响成为备受关注的研究方向。

本章通过实验研究 RV 减速器在不同润滑脂条件下的工作特性，深入探讨不同润滑脂对其各种工况的可能影响。润滑脂的选择和性能直接关系到摩擦、磨损以及机械系统的整体运行稳定性。通过实验性研究，将对比不同润滑脂在 RV 减速器振动工况下的表现，探讨其对振动频谱和振动幅值的影响。有利于深入了解润滑脂在减速器工作中的实际效果，为优化润滑系统的设计和性能提供有益的指导。特别是，在振动对设备寿命和运行可靠性产生严重影响的背景下，本研究的结果将为 RV 减速器的实际应用提供实用性的参考，为工程师和设计者提供更可靠的技术支持。

5.2 试验平台的搭建

在本章实验中，采用开放式机械系统，同时也可以简化结构平台，并提高测试结果的准确性。开放式机械系统相对于封闭式机械系统，具备较高的性能稳定性，可以进一步确保试验结果的可靠性和一致性。其次，开放式系统的控制精度较高，能够更精准地模拟各种工况下的实际运行情况，并且能够在长时间试验中保持稳定的性能表现。

由图 5-1 和 5-2 可看出为确保安全，测试台面上的高速旋转部位装配了安全防护罩，包括驱动电机、加载电机、被测减速机和联轴器。试验台装置紧凑，可以有效提高试验台的安全性和实用性，为 RV 减速器的性能测试提供了可靠保障。机械系统是试验平台的核心，具有高传动精度和紧凑结构。高传动精度确保试验数据准确，紧凑结构有利于减小试验平台体积，提高灵活性和适用性。通过测控系统，实现对传动效率的实时监测和控制，提高试验效率和准确性。同时通过软件系统，设定试验参数、采集和分析数据，为试验结果的获取和分析提供支持。

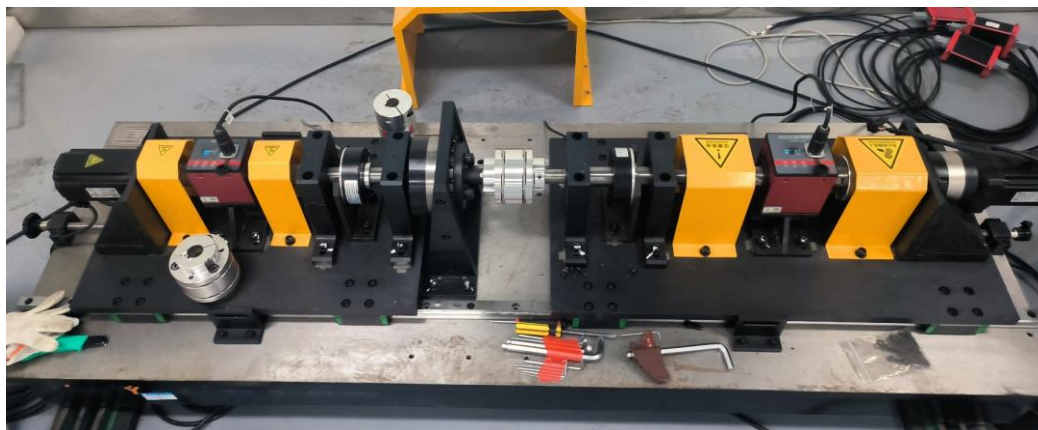


图 5-1 RV 减速器试验台实物图

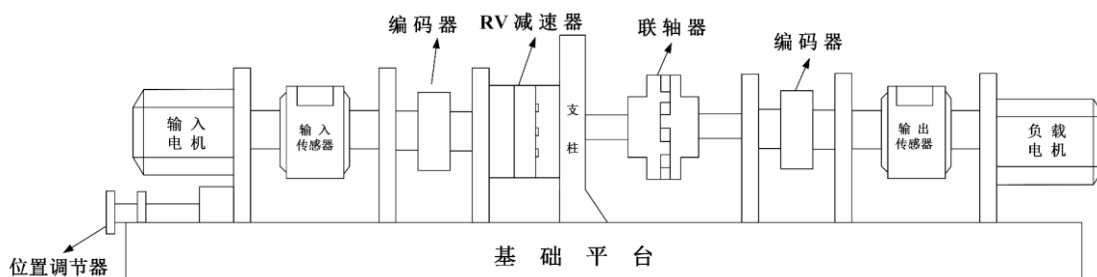


图 5-2 RV 减速器试验台二维示意图

如图 5-3 使用 LY-CS02 实验台控制系统，可有效将交流电转换为直流电，并精确控制驱动电机和加载电机的输入电流和频率。配备计算机系统，LY-CS02 可完成机器人减速器测试中的加载、控制和数据处理，包括数据采集、处理、显示和输出，以及数据的存储、回放和显示输出。此外，LY-CS02 还具有实时曲线显示和输出功能，可直观展示数据变化趋势。控制面板设有多个控制按钮，可方便实现模式选择、工况设定和紧急情况处理。

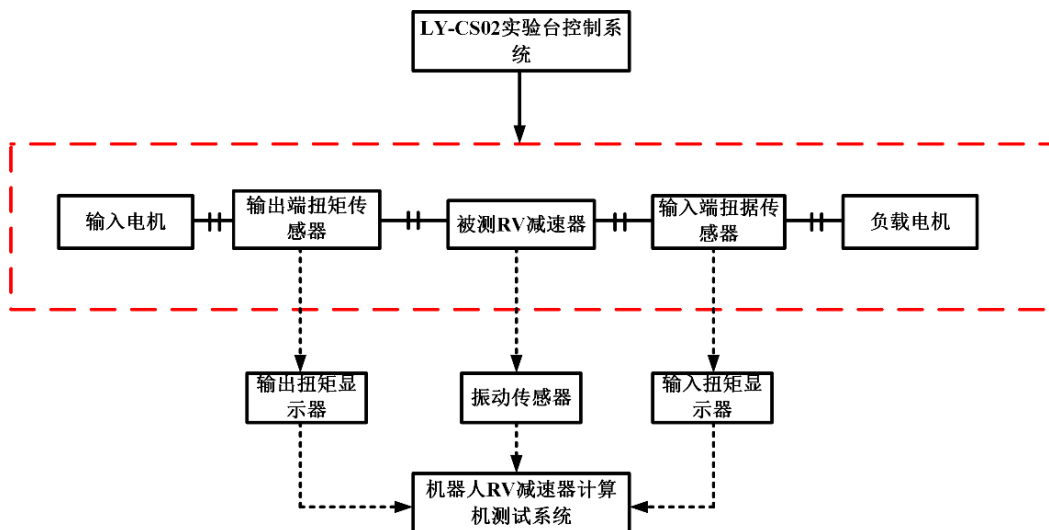


图 5-3 RV 减速器工作特性测控系统示意图

5.3 试验台使用流程及实验方案

5.3.1 试验实施方法

利用搭建的 RV 减速器试验台，精确控制各工况下的参数。通过试验探究在不同润滑脂下，改变输入转速、负载扭矩等对 RV 减速器工作特性的影响。试验流程如图 5-4 所示：

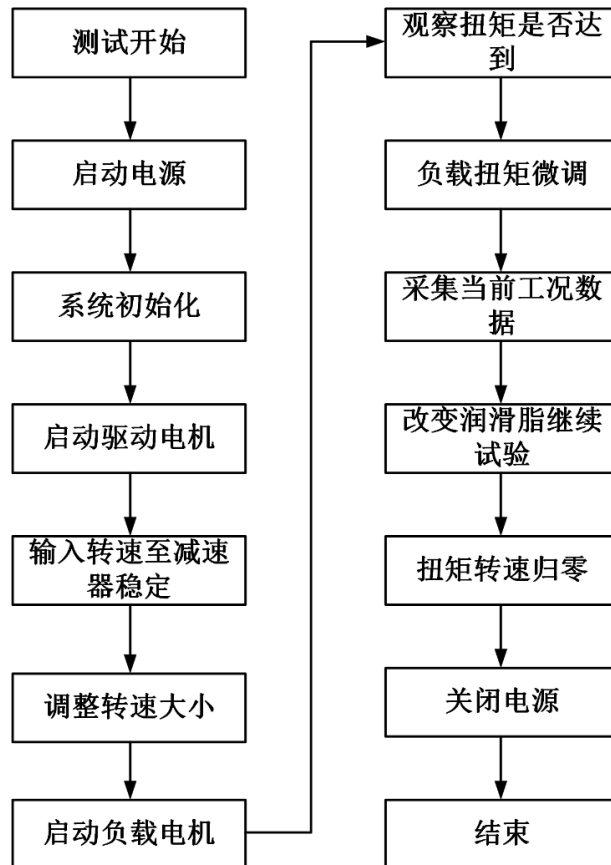


图 5-4 RV 减速器试验流程图

5.3.1 试验具体方案

为了更详尽的测试 RV 减速器整体工作特性的影响，如表 5-1 所示试验通过添加不同润滑脂来测试 RV 减速器整体工作特性的影响。试验分别采集了在三组不同润滑环境下的试验数据，包括输入转速、输出扭矩和工作温度等参数。试验设定了三种转速和三种负载条件，其中转速设定为 800 r/min、1000 r/min、1200 r/min，负载比例范围设定为空载、30%、50%。为保持试验环境的一致性，工作温度维持在正常外界温度。数据采集频率为 5Hz，时长为 40 秒。通过试验数据，可以更深入地了解不同润滑脂对 RV 减速器性能的影响。因实际测试过程中温度变化伴随有压力变化，属于多因素耦合影响，难以单纯表征温度引

起本质上的流变学行为变化。为体现流变行为的差异，开展简化与等效，前述内容中用的 SK-1A 润滑脂的稠度等级 NLGI3，另选通用锂基润滑脂（0 号）、通用锂基润滑脂（GP-A 型号）作为对照组，稠度等级分别为：NLGI 0、NLGI 00，测试期间保持实验室温度均为 20℃。

表 5-1 RV 减速器测试参数

RV 减 速 器 编 号	润滑脂种类	负载范围	转速范围（r/min）
1	SK-1A 润滑脂	0%、30%、50%	800（r/min）、1000（r/min）、1200（r/min）
2	通用锂基润滑脂（0 号）	0%、30%、50%	800（r/min）、1000（r/min）、1200（r/min）
3	通用锂基润滑脂（GP-A 型号）	0%、30%、50%	800（r/min）、1000（r/min）、1200（r/min）

5.4 RV 减速器振动特性分析

为了研究不同润滑脂对 RV 减速器在运转时振动的影响，进行了振动测试。为了使试验更加可靠，在实验过程中确保在工况想的运转条件下记录三组不同润滑环境下的振动数据。RV 减速器均在空载状态，转速都为 800 r/min 的环境下进行，使用了三种不同的润滑剂进行了实验，润滑脂分别为：SK-1A 润滑脂、通用锂基润滑脂（0 号）以及通用锂基润滑脂（GP-A 型号）。通过采集的振动数据，分别做出图 5-5 至 5-13 进行振动信号分析，得到了振动幅值的比较结果，用 X、Y、Z 代表竖直、水平、轴向等三个方向上的振动信号。分析结果显示，RV 减速器在每种润滑环境下竖直方向所产生的振动幅度会比水平方向以及轴向的振动幅度大，且水平方向的振动幅值大于轴向。

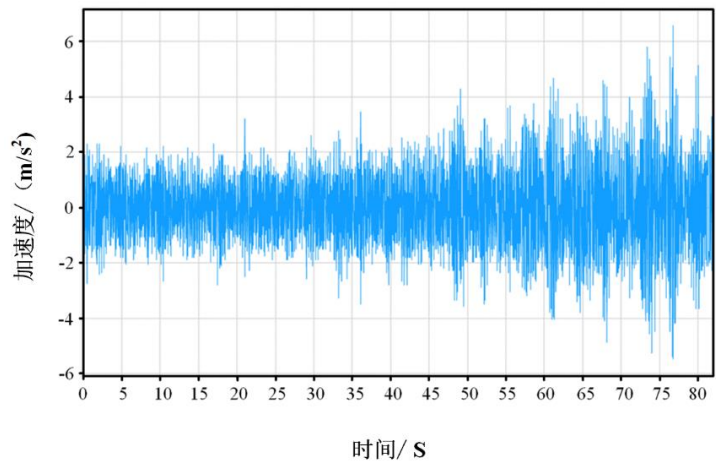


图 5-5 SK-1A 润滑脂 X 方向振动信号

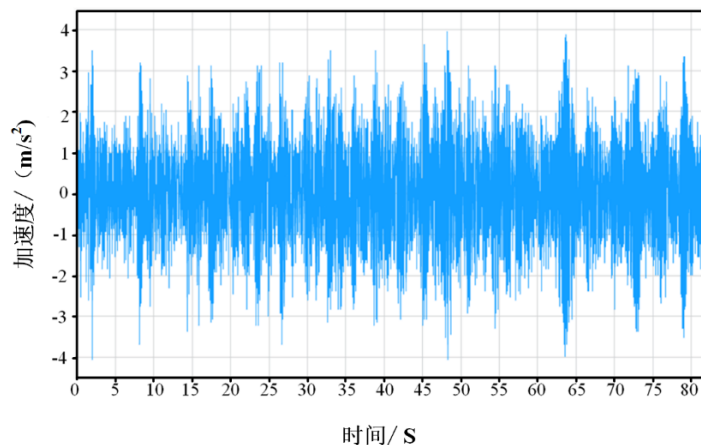


图 5-6 SK-1A 润滑脂 Y 方向振动信号

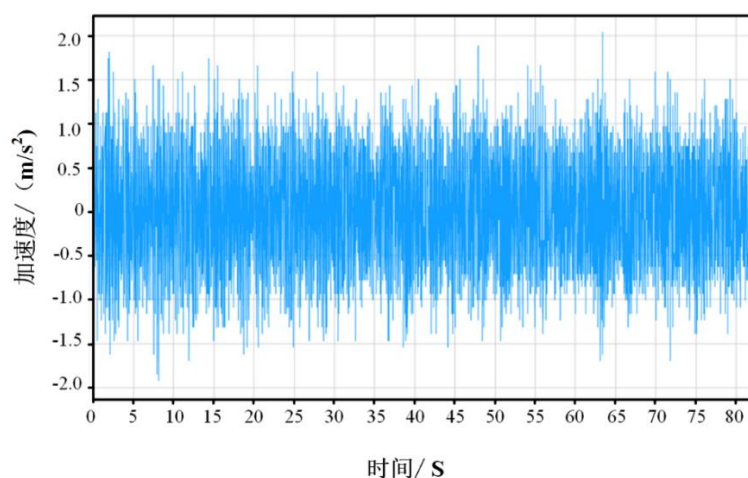


图 5-7 SK-1A 润滑脂 Z 方向振动信号

由上述结果，可以在三种润滑环境下，分别对比出 RV 减速器在运转时所产生的振动幅度大小，分别对比图 5-5 至 5-13 在 X、Y、Z 三种振动信号以及减速器所处的润滑环境可得出：通过比较 SK-1A 润滑脂和通用锂基润滑脂（GP-A 型号）对 RV 减速器性能的影响。在 SK-1A 润滑脂润滑环境下，观察到 RV 减速器的振动幅度为 3 左右，表明其运行状态相对平稳。此外，在 SK-1A 润滑脂润滑环境下，振动信号幅值基本为正态分布，并且减速器的实际运转中没有振动冲击现象的发生，进一步印证了其稳定性。相比之下，在两种通用锂基润滑脂的润滑环境下，RV 减速器的表现出现了明显的不同。其峭度在三个方向上普遍大于 4，甚至超过了 15，表明了在此润滑环境下减速器运行的不稳定性。同时，振动信号幅值已经偏离了正态分布，并且在平稳运行期间存在明显的冲击现象，可能对减速器的寿命和性能产生负面影响。表明滚动轴承的运行状态不正常，表面传动系统的润滑状态也不理想，与 SK-1A 润滑脂润滑环境下的良好表

现形成了对比。由结果可知 SK-1A 润滑脂对 RV 减速器的润滑和振动控制具有良好的效果。

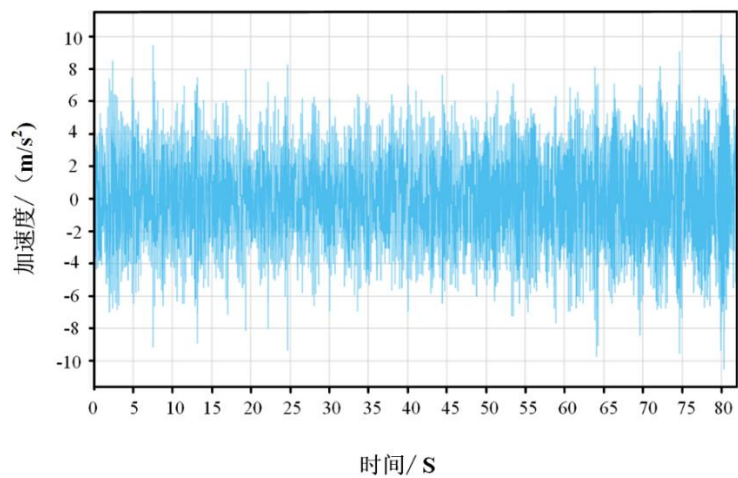


图 5-8 通用锂基润滑脂（0 号）X 方向振动信号

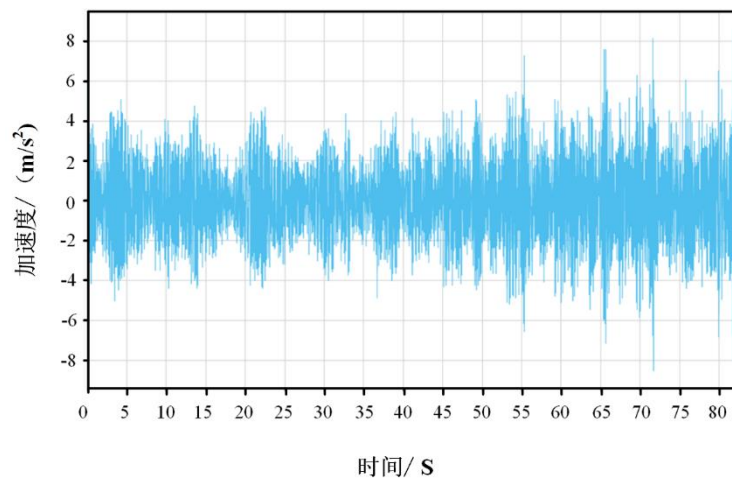


图 5-9 通用锂基润滑脂（0 号）Y 方向振动信号

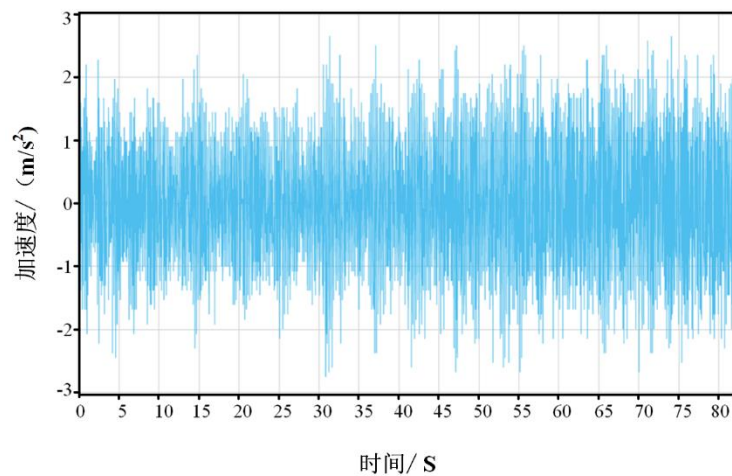


图 5-10 通用锂基润滑脂（0 号）Z 方向振动信号

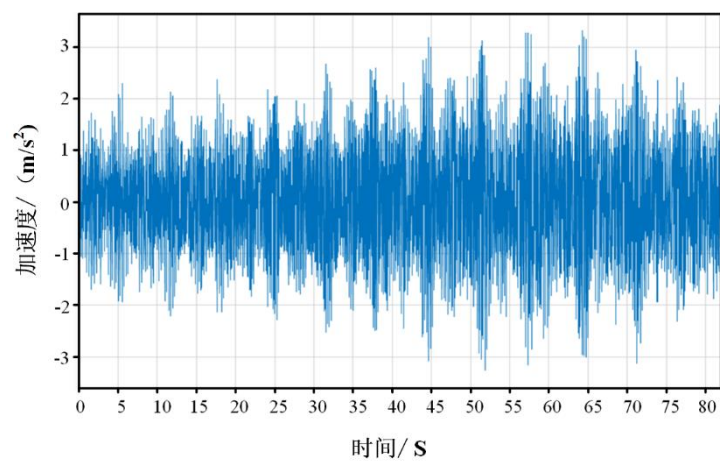


图 5-11 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）X 方向振动信号

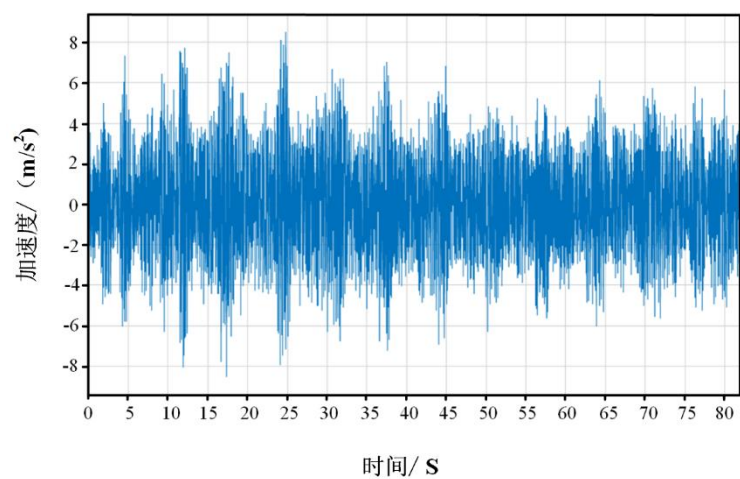


图 5-12 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）Y 方向振动信号

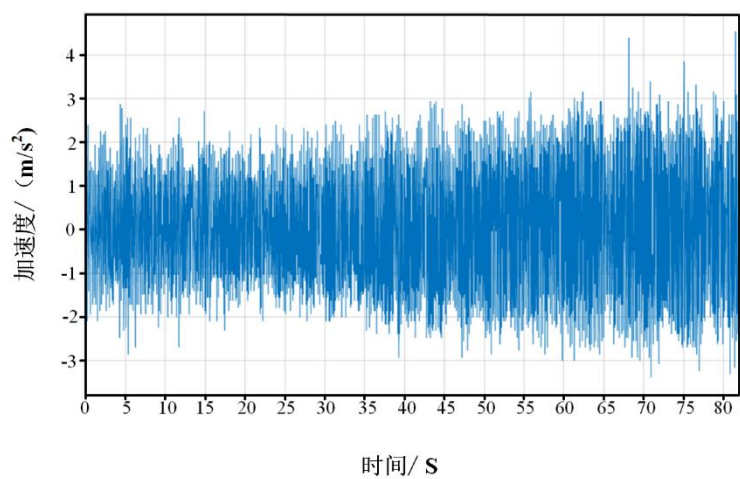


图 5-13 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）Z 方向振动信号

为了进一步探究不同润滑环境对 RV 减速器振动信号特性的影响，风别对比竖直、水平和轴向三个方向上振动信号的均方根最大值。由表 5-2 显示，在三种不同的润滑环境下，RV 减速器的振动信号均方根在最大值时的位置变化顺序是竖直方向大于水平方向大于轴向。表明竖直方向上的振动幅度最大，轴向最小。分析显示，由于竖直方向上的振动信号幅度最大，故从竖直方向进行减振降噪效果最好，对减振降噪的需求也相对更为迫切。又从方差角度对比可知，在 SK-1A 润滑脂润滑环境下，RV 减速器的振动信号表现出最小的方差，展现出的振动现象很平稳并且冲击也不明显。这表明 SK-1A 润滑脂在该润滑环境下能够有效减少 RV 减速器的摩擦和磨损，保持其良好的运行状态。相比之下，在其他两种润滑环境下，RV 减速器的润滑状态较差，振动异常，可能是由于润滑脂性能不佳导致的。因此，在 SK-1A 润滑脂润滑环境下，RV 减速器表现出最佳性能。综上所述，SK-1A 润滑脂对 RV 减速器的影响相对有利，其稳定性和良好的润滑性能为减速器的可靠运行提供了有效保障。

表 5-2 不同润滑环境下工作运转的时域特征

润滑脂	方向	均方根	最大值	峭度	方差
SK-1A 润滑脂	X	0.36	6.64	4.79	0.12
	Y	0.45	3.83	4.26	0.25
	Z	0.32	2.3	3.43	0.09
通用锂基润滑脂（0 号）	X	0.41	10.04	8.56	0.17
	Y	0.38	8.57	6.39	0.41
	Z	0.47	2.76	3.84	0.18
通用锂基润滑脂（GP-A 型号）	X	0.49	15.12	9.74	0.34
	Y	0.53	8.4	7.03	0.53
	Z	0.33	4.64	4.23	0.29

5.5 RV 减速器传动效率分析

为了进一步研究 RV 减速器工作特性与润滑脂流变特性之间的相关性，本文对于三种润滑脂在不同转速下以及三种负载下的传动效率分别进行了分析对比。在对数据进行处理时，将输入扭矩表示为 T_1 ，输出扭矩 T_2 ，则效率计算公式为：

$$\eta = \frac{T_2}{i \cdot T_1} \times 100\% \quad (5-1)$$

当设定输入的转速分别为 800 r/min、1000 r/min、1200 r/min 时，测量 RV 减速器的输入转矩和输出转矩。利用式(5-1)来计算出减速器的传动效率。同时对比在三种润滑脂润滑状态下的传动效率，实验结果如图 5-14 所示。其中分别代表者 800 r/min、1000 r/min、以及 1200 r/min 转速下三种润滑脂润滑状态下传动效率的对比。根据图形可以看出，随着转速的不断增加，传动效率也在逐渐递减，同时随着 RV 减速器的输出扭矩逐渐上升，其传动效率也在不断升高。特别要指出的是：在三种润滑脂的润滑状态下，RV 减速器所表现的传动效率是不一样的。分别对比三种图形可以看出，在 SK-1A 润滑脂的润滑状态下所表现的传动效率最高。在通用锂基润滑脂（GP-A 型号）润滑状态下所表现的传动效率最低。可以得出如下结果：

（1）随着输出转矩增加，传动效率通常会提高。在初始阶段，传动效率增长较快，因为低转矩条件下摩擦和损耗相对较小。然而，当输出转矩达到一定程度如 3 (N·m) 后，传动效率增幅逐渐减小。可能是因为高转矩条件下摩擦和损耗增加，限制了传动效率的提高。

（2）在不同转速下，减速器的最大传动效率分别为 82.7%（800 r/min）、77.2%（1000 r/min）、73.1%（1200 r/min）。这表明在较低的转速下，减速器的传动效率较高，随着转速的增加，传动效率逐渐降低。可能是由于在高转速条件下，减速器的摩擦损耗增加，使得传动效率降低。

（3）对比三种润滑脂润滑状态下的传动效率可以看出，随着工况的不断变化 SK-1A 润滑脂的润滑状态下的传动效率，始终要高于其他两种润滑脂。并且随着输入转速为 800 r/min 时有着最高的传动效率。说明 SK-1A 润滑脂的润滑状态下 RV 减速器的传动效率最高。

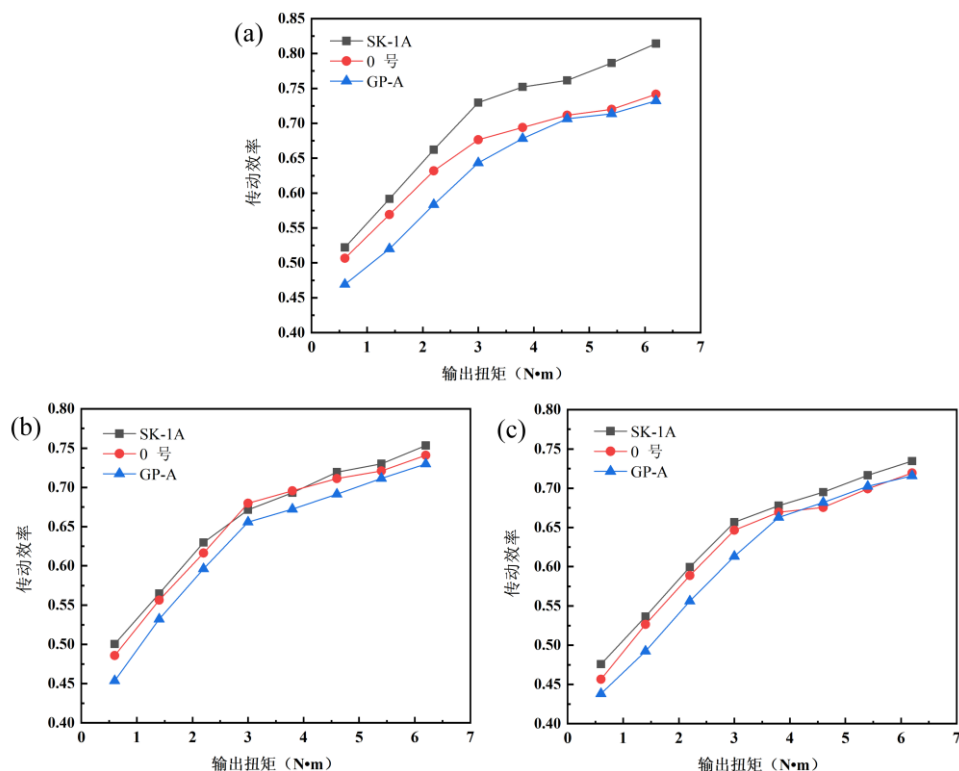


图 5-14 三种润滑脂在不同转速下的传动效率对比

(a) 800 r/min 时三种润滑传动效率对比

(b) 1000 r/min 时三种润滑传动效率对比

(c) 1200 r/min 时三种润滑传动效率对比

当为 RV 减速器样机添加负载时：设定负载分别为空载、负载 30%、负载 50%时，测量 RV 减速器的输入转矩和输出转矩。利用式(5-1)计算减速器的传动效率。同时对比在三种润滑脂润滑状态下的传动效率，实验结果如图 5-15 所示。其中分别代表者空载、负载 30%、负载 50%负载下三种润滑脂润滑状态下传动效率的对比。根据图形可以看出，随着负载的不断增加，传动效率同样也在逐渐递减，同时也因为输出扭矩渐渐增加，其传动效率也在不断升高。结果如下：

(1) 在减速器承受相同负载的情况下，由于在承受相同负载的情况下，输出转矩的增加导致了输入功率的增加，而减速器的输出功率保持不变的情况下，传动效率随之提高。分析结果可得，在一定范围内，减速器在承受相同负载时，通过增加输出转矩可以提高传动效率。

(2) 当减速器所承受的负载不同时，减速器的传动效率随输出转矩的变化趋势相同，表明在不同负载状态下，传动效率随输出转矩增加而减少。在空载状态时，减速器的最大传动效率为 73.4%；在负载 30%状态时，最大传动效率

为 69.9%；在负载 50%时，最大传动效率为 67.2%。结果显示，随着负载增加，减速器的传动效率略微下降，可能是因为在高负载条件下，减速器的摩擦和能量损耗增加，导致传动效率降低。

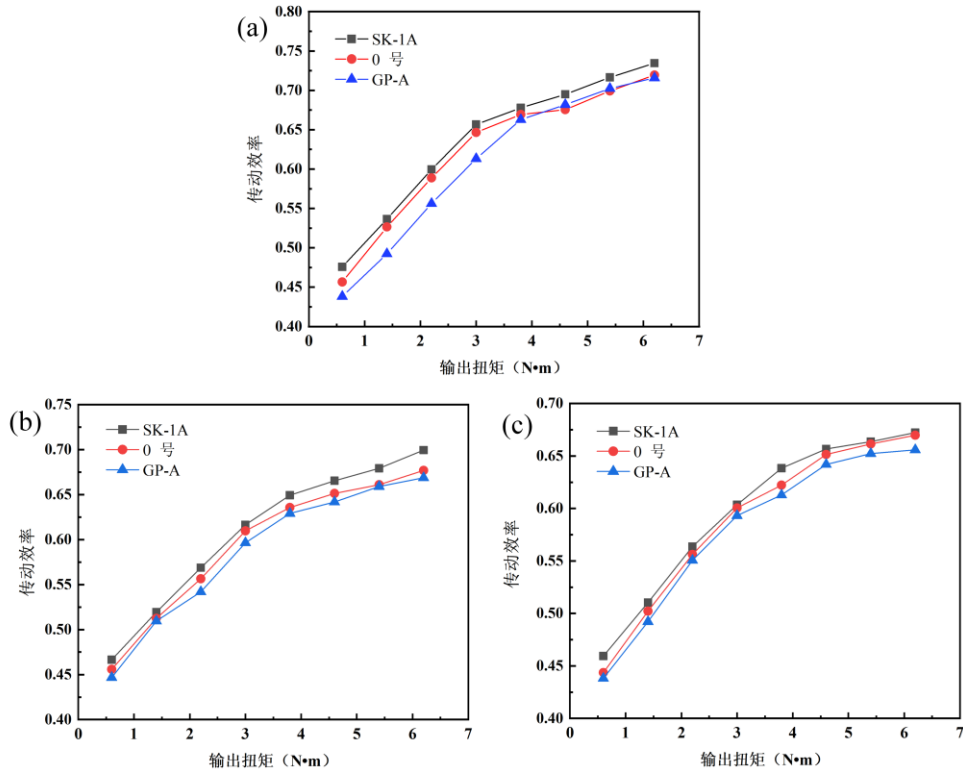


图 5-15 三种润滑脂在不同负载下的传动效率对比

(a) 空载状态下三种润滑传动效率对比

(b) 负载 30%时三种润滑传动效率对比

(c) 负载 50%时三种润滑传动效率对比

为了进一步研究润滑脂与 RV 减速器自身工况对传动效率的影响差异，在对上述结果分析的同时。单独将 RV 减速器在安装和润滑条件相同的条件下，对输入转速分别为 800 r/min、1000 r/min、1200 r/min 时，以及空载、负载 30%、负载 50%三种负载条件下，对进行传动效率结果进行分别比较。同时可以单独的看出在同一种润滑脂润滑条件下，随着转速或者载荷的影响，传动效率的变化情况。测量减速器的输入转矩和输出转矩，利用式(5-1)计算减速器的传动效率。实验结果如图 5-16 所示。其中分别代表者 SK-1A 润滑脂、通用锂基润滑脂（0 号）和通用锂基润滑脂（GP-A 型号）润滑下随着输入转速以及负载条件下变化传动效率的对比。结果表明：

(1) 在同一润滑条件下当输入转速相同时，随着输出转矩的增加，减速器的传动效率随之增加。尽管减速器的传动效率随着输出转矩的增加而呈现相似

的变化趋势，但由于转速的不同，传动效率随着转矩增加的幅度也会有所不同。由图（a）可以明显看出，在输入转速为 800 r/min 的工况下，随着输出转矩的增加，样机的传动效率增加最快。与之相比在输入转速为 1200 r/min 的工况下，随着这转矩的增加样机的传动效率增长相对较慢。

（2）在同一润滑条件下，当添加负载不同时，减速器的传动效率随输出转矩的虽然变化趋势相同，但是在转矩为 3 ($\text{N} \cdot \text{m}$) 之前，三种载荷之间的传动效率极为接近，尤其是图（c'）可以看出，在通用锂基润滑脂（GP-A 型号）润滑条件下，随着输出转矩刚开始增加，三种负载工况下的传动效率之间并无明显变化。之后随着转矩的逐渐增加尤其是输出转矩达到 3 ($\text{N} \cdot \text{m}$) 之后。三种载荷之间的传动效率区别渐渐增大。

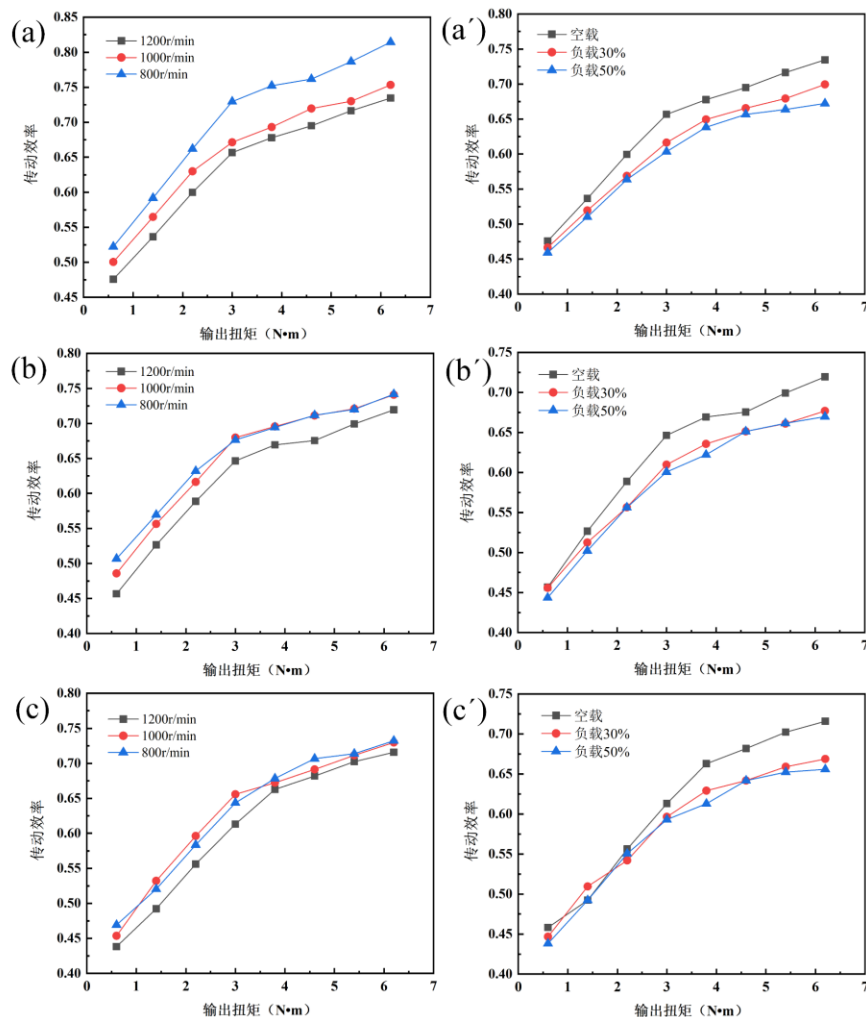


图 5-16 三种润滑脂在不同转速、负载的传动效率对比

(a) (a') SK-1A 润滑脂润滑下不同转速、负载的传动效率对比

(b) (b') 通用锂基润滑脂（0 号）润滑下不同转速、负载的传动效率对比

(c) (c') 通用锂基润滑脂（GP-A 型号）润滑下不同转速、负载的传动效率对比

5.6 本章小节

本章分别完成了 SK-1A 润滑脂、通用锂基润滑脂（0 号）和通用锂基润滑脂（GP-A 型号）三种润滑脂在不同工况下对 RV 减速器工作特性的影响。实验先是研究了三种润滑脂的润滑效果对 RV 减速器振动特性的影响。进一步分析了三种润滑脂在不同工况下对 RV 减速器自身传动效率的影响。结论主要如下：

（1）通过振动数据分析可知，在 SK-1A 润滑脂润滑环境下，RV 减速器的振动信号方差最小，表明其振动平稳，冲击不明显。SK-1A 润滑脂润滑环境下的润滑状态理想、振动正常相一致。相比之下，在通用锂基润滑脂（0 号）和通用锂基润滑脂（GP-A 型号）润滑环境下，RV 减速器的润滑状态不理想，振动出现异常。综合振动分析结果可见，RV 减速器在 SK-1A 润滑脂润滑环境下表现出最佳性能，进一步验证了润滑状态对减速器运行的重要性。

（2）随着转速的不断增加，传动效率也在逐渐递减，同时随着 RV 减速器的输出扭矩逐渐上升，其传动效率也在不断升高。减速器的传动效率随输出扭矩变化，不受输入转速影响。在不同转速下，最大传动效率分别为：800 r/min 时为 82.7%，1000 r/min 时为 77.2%，1200 r/min 时为 73.1%。表明减速器的传动效率随输出扭矩变化，但与输入转速无明显相关性。在不同负载下，减速器的传动效率变化趋势相同。空载状态下，最大传动效率为 73.4%；负载 30% 状态下为 69.9%；负载 50% 状态下为 67.2%。传动效率随负载增加而略微下降，可能是由于高负载条件下的摩擦损耗增加导致的。

（3）在同一润滑条件下当输入转速相同时，随着输出扭矩的增加，减速器的传动效率随之增加。虽然减速器的传动效率随输出扭矩的变化趋势相同，但是由于转速的不同，随着扭矩增加，传动效率增加的幅度也不相同。在同一润滑条件下，当添加负载不同时，减速器的传动效率随输出扭矩的虽然变化趋势相同，但是在扭矩为 3（N·m）之前，三种载荷之间的传动效率极为接近，之后随着扭矩的逐渐增加尤其是输出扭矩达到 3（N·m）之后。三种载荷之间的传动效率区别渐渐增大。

第 6 章 结论与展望

6.1 全文工作总结

RV 减速器作为工业机器人的核心部件之一，本研究通过对 RV 减速器润滑脂流变特性与工作性能的关联性进行了深入分析，揭示了润滑脂选择与优化对减速器性能的重要影响。未来的研究可以进一步探索润滑脂配方的优化方向，以提高 RV 减速器的传动效率和使用寿命，为工业生产的稳定运行提供更可靠的技术支持。本文先是对 SK-1A 润滑脂进行流变实验，分析其流变特性。再通过 Elman 神经网络对第三章得出的实验数据进行预测分析。最后通过 RV 减速器工作特性试验，得出振动数据评估 RV 减速器在不同润滑环境下的工作性能。以及详细分析了不同润滑条件下各种工况的传动效率对比。主要内容和结论如下：

(1) 在 SK-1A 润滑脂中，随着温度的变化，整体在线性黏弹性区域内 G' 和 G'' 保持稳定。在 -20°C 和 0°C 时，润滑脂的粘弹性发生显著变化，而在 0°C 到 40°C 之间逐渐趋于稳定。在不同测试温度下，润滑脂的剪切应力随剪切速率的升高而增加，呈现整体线性趋势。表明润滑脂具有较高的剪切应力，但在不同温度下的曲线上升趋势存在差异，尤其在 -20°C 和 0°C 之间表现出显著的增大，表明在这一温度范围内，润滑脂的流动阻力显著上升。验证了润滑脂在高速运转中的黏弹性特性受到温度的显著影响。在 -20°C 和 0°C 中 SK-1A 润滑脂皂纤维结果发生显著变化，尤其是在 0°C 中所表现出触变环面积最大，表明了 0°C 工况下对 SK-1A 润滑脂的流动性能和触变性能变化影响最大。而对于 10°C 到 40°C 之间，润滑脂的流动性能和触变性能表现稳定。

(2) 通过将 Elman、BP 以及 RBF 三种预测模型在机器学习的基础上进行优化，确保在同一条件下对相同的数据进行预测。同时将得出的预测数据与实验数据进行比对，发现 BP 和 RB 模型 Elman 神经网络展现出了较高的预测水平。MAE、MSE 以及 MAPE 来评价三种预测的优劣。同时运用 K 倍交叉法进行交叉验证。结果相较于 BP 神经网络，Elman 模型在 RMSE 方面减小了 8.359，而在 R^2 方面增加了 0.34。与 RBF 神经网络相比，Elman 模型在 RMSE 方面减小

了 5.529, 同时在 R^2 方面增加了 0.23。进一步证明了 Elman 模型的显著效果, 其在提高模型精度方面表现出色。结果强调了 Elman 预测模型的有效性。

(3) 润滑状态对减速器的振动、冲击和寿命等性能指标有显著影响。在 SK-1A 润滑脂润滑环境下, RV 减速器的润滑状态被认为是理想的, 振动处于正常水平; 而在通用锂基润滑脂 (0 号) 和通用锂基润滑脂 (GP-A 型号) 润滑环境下, 润滑状态不佳, 导致减速器振动异常。因此, 润滑状态的选择对减速器性能至关重要。在 SK-1A 润滑脂润滑环境下, RV 减速器表现出最佳性能, 进一步表明了润滑状态对减速器性能的重要性。此外, 传动效率随转速增加逐渐降低。在不同转速下, 减速器的最大传动效率分别为: 800 r/min 时为 82.7%, 1000 r/min 时为 77.2%, 1200 r/min 时为 73.1%。在不同负载下, 减速器的传动效率变化趋势相同, 空载状态下为 73.4%, 负载 30% 状态下为 69.9%, 负载 50% 状态下为 67.2%。在同一润滑条件下当输入转速相同时, 随着输出转矩的增加, 减速器的传动效率随之增加。虽然减速器的传动效率随输出转矩的变化趋势相同, 但是由于转速的不同, 随着转矩增加, 传动效率增加的幅度也不相同。在同一润滑条件下, 当添加负载不同时, 减速器的传动效率随输出转矩的虽然变化趋势相同, 但是在转矩为 3 ($\text{N} \cdot \text{m}$) 之前, 三种载荷之间的传动效率极为接近, 之后随着转矩的逐渐增加尤其是输出转矩达到 3 ($\text{N} \cdot \text{m}$) 之后。三种载荷之间的传动效率区别渐渐增大。

6.2 展望与建议

本文围绕润滑脂流变特性以及 RV 减速器工作特性之间的相互影响进行了深入研究以及相关性分析, 展开了系统的理论和实验研究。先是对所用润滑脂进行流变分析及预测, 接着对 RV 减速器进行试验, 研究在不同润滑脂下, 所展现出的工作特性, 所获得成果对润滑脂的制备以及 RV 减速器的参数优化具有一定的工程价值和理论意义。虽然本文做出了一些研究, 但是存在一些缺点和需要改进的地方, 具体如下:

(1) 并没有深入研究 RV 减速器的结构优化设计, 细微的分析具体部件的润滑情况。

(2) 单凭振动和传动效率分析无法明确确定最佳润滑剂。必须深入探究润滑剂对振动和退化的影响, 以确定最适合的润滑剂配置。未来的研究需要深入

理论分析，以验证润滑剂性能参数对减速器性能的影响。

（3）润滑脂的参数，包括粘度和添加剂，对润滑性能和 RV 减速器的振动与性能具有关键影响。进一步的研究可以通过在单一变量条件下探究不同粘度和添加剂的润滑环境，来了解它们对 RV 减速器振动和性能的影响。计划使用数据评价这些参数对减速器的影响，并进行加速寿命试验。

参考文献

- [1] 何卫东, 单丽君. RV 减速器研究现状与展望[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(05): 13~18.
- [2] 乔雪涛, 张力斌, 闫存富, 等. 我国工业机器人 RV 减速器发展现状分析[J]. 机械强度, 2019, 41(06): 1486-1492.
- [3] 曾昶畅. 工业机器人的技术发展趋势及产业应用现状[J]. 产业与科技论坛, 2016, 15(17): 50-51.
- [4] 王文涛, 杨斌. 浅谈工业机器人用精密减速器[J]. 中国新技术新产品, 2018 (13): 40-41.
- [5] Malhotra S K, Parameswaran M A. Analysis of a cycloid speed reducer[J]. Mechanism and Machine Theory, 1983, 18(6): 491-499.
- [6] MIRKO B, NENAD M, ZORICA D, et al. A New Design of a Two-stage Cycloidal Speed Reducer[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(8): 1-7.
- [7] 孟聪. RV 减速器动力学特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [8] 肖君君. RV 减速器的动态特性理论分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2009.
- [9] 孙永森. RV 减速器动态特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [10] 邵洙浩, 杨大伟, 吴咏锦, 等. 谐波减速器刚轮用材质摩擦磨损性能分析[J]. 金属热处理, 2024, 49(01): 0254-6051.
- [11] 姜元志, 王优强, 卢宪玖. 单粗糙峰对摆线针轮弹流润滑的影响[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 49-52.
- [12] 姜元志, 王优强, 于平. 摆线针轮行星传动瞬态弹流润滑分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(12): 12-15.
- [13] Stefan G.E. Lampaert, Ron A.J. van Ostayen. Lubrication theory for Bingham plastics [J]. Tribology International, 2020: 160160.
- [14] Baikov, V. I. horny, A. D. Withdrawing a Bingham viscoplastic fluid[J]. Journal of Rheology, 2019: 63(6), 927-938.
- [15] Shelukhin, V.V, Neverov, V.V. Thermodynamics of micropolar Bingham fluids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2016: 101016.

-
- [16] Delgado M A, Sánchez M C, Valencia C, et al. Relationship among microstructure, rheology and processing of a lithium lubricating grease[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2005, 83(9): 1085-1092.
 - [17] Moreno G, Valencia C, De Paz M V, et al. Rheology and microstructure of lithium lubricating greases modified with a reactive diisocyanate-terminated polymer: Influence of polymer addition protocol[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2008, 47(4): 528-538.
 - [18] 沈铁军, 胡明华, 刘瑞刚, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂微观结构和流变性的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(6): 581-586.
 - [19] 许俊, 徐楠, 王晓波, 等. 冰水浴和自然冷却条件下锂基润滑脂的流变学性能[J]. 摩擦学学报, 2013, 33(4): 406-412.
 - [20] 毛菁菁, 程型国, 张遂心. 复合锂基润滑脂的流变特性与微观结构的关系研究[J]. 润滑与密封, 2013, 38(12): 79-83.
 - [21] 姚立丹, 杨海宁, 孙洪伟, 等. 锂基润滑脂流变学的特性[J]. 石油学报(石油加工), 2011, 27(S1): 1-5.
 - [22] 姚立丹, 杨海宁, 孙洪伟, 等. 复合锂基润滑脂和脲基润滑脂成脂机理的差异[J]. 石油学报(石油加工), 2010, 26(05): 747-754.
 - [23] 刘显秋, 李茂森, 杨海宁, 等. 一种复合锂基润滑脂的机械性能评价[J]. 石油商技, 2018, 36(03): 40-43.
 - [24] Delgado M A, Valencia C, Sánchez M C, et al. Thermorheological behaviour of a lithium lubricating grease[J]. Tribology Letters, 2006, 23(1): 47-54.
 - [25] Couronne I, Vergne P. Rheological Behavior of Greases: Part II—Effect of Thermal Aging, Correlation with Physico-Chemical Changes[J]. Tribology Transaction, 2000, 43(4): 788-794.
 - [26] 沈铁军, 胡明华, 刘瑞刚, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂微观结构和流变性的影响[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(06): 581-586.
 - [27] 胡明华, 刘艳升, 沈铁军, 等. 静态热老化对锂-钙基润滑脂胶体性能的影响[J]. 润滑与密封, 2008(10): 55-57+60.

-
- [28] 潘家保, 钱明, 周彬, 等. 连续间断热作用对复合锂基润滑脂流变特性的影响[J]. 石油学报 (石油加工), 2018, 34(3): 552-560.
 - [29] 潘家保, 杨广鑫, 褚甜甜, 等. 热老化行为对磁流变脂流变学性能的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2023, 39(01): 174-182.
 - [30] 李充宁, 林世俊. 长幅摆线针齿行星传动的运动分析[J]. 西安矿业学院学报, 1991, 1(4): 77-83.
 - [31] 何卫东, 李力行, 徐永贤, 等. 高精度 RV 传动的受力分析及传动效率[J]. 机械工程学报, 1996, 32(4): 104-110.
 - [32] 关天民, 张东生, 雷蕾. FA 新型摆线针轮行星传动受力分析方法与齿面接触状态有限元分析[J]. 机械设计, 2005, 22(3): 31-34.
 - [33] Gorla C, Davoli P, Rosa F, et al. Theoretical and Experimental Analysis of a Cycloidal Speed Reducer[J]. Journal of Mechanical Design, 2008, 130(11): 1671-1676.
 - [34] Blagojevic M. Kinematic and Dynamic Analysis of Single-stage Cycloid Speed Reducer. Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, 2003, 31(03), 115-127.
 - [35] Blagojevic M, Marjanovi N, Stojanovic B, et al. Influence of Friction on the Force Distribution at Cycloidal Speed Reducer[J]. In: 12th International Conference on Tribology. Kragujevac, Serbia, 2011: 226-229.
 - [36] Han L S. Global Sensitivity Analysis of Transmission Accuracy for RV-type cycloid-Pindrive[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(03): 1225-1231.
 - [37] 张大卫, 王刚, 黄田, 等. RV 减速机动力学建模与结构参数分析[J]. 机械工程学报, 2001(01): 69-74.
 - [38] Chuan Chen, Yuhu Yang, Hassan Haddadpour. Structural Characteristics of Rotate Vector Reducer Free Vibration[J]. shock and vibration 2017: 4214370.
 - [39] 陈李果, 汪久根, 张靖. 基于小波理论的 RV 减速器振动信号分析[J]. 机械传动, 2018, 042(005): 14-17.
 - [40] 陈李果, 汪久根, 张靖. RV 减速器振动测试与信号分析[J]. 机械传动, 2018, 42(03): 80-84.

-
- [41] 陈李果. RV 减速器试验装置研制与测试分析[D]. 浙江大学, 2018.
 - [42] 张跃明, 赵飞, 纪姝婷, 等. RV 减速器振动的在线检测研究[J]. 机械设计与制造, 2019(06): 240-243.
 - [43] BOTMAN M. Epicyclic Gear Vibrations[J]. Journal of Engineering for Industry, 1976, 98(3): 811-815.
 - [44] PARKER R G. A Physical Explanation for the Effectiveness of Planet Phasing to Suppress Planetary Gear Vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 236(4): 561-573.
 - [45] LIN J, PARKER R G. Sensitivity of Planetary Gear natural Frequencies and Vibration Modes to Model Parameters[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(1): 109-128.
 - [46] LIN J, PARKER R G. Analytical Characterization of the Unique Properties of Planetary Gear Free Vibration[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1999, 121(3): 316-321.
 - [47] LIN J, PARKER R G. Structured Vibration Characteristics of Planetary Gears with Unequally Spaced Planets[J]. Journal of sound and vibration, 2000, 233(5): 921-928.
 - [48] Seetharaman S, Kahraman A, Moorhead M D, et al. Oil churning power losses of a gear pair: experiments and model validation[J]. Journal of Tribology, 2009, 131(2): 1-10.
 - [49] Talbot D C, Kahraman A, Singh A. An experimental investigation of the efficiency of planetary gear sets[J]. Journal of Mechanical Design, 2012, 134(2): 1-7.
 - [50] Sjöberg S, Sosa M, Andersson M, et al. Analysis of efficiency of spur ground gears and the influence of running-in[J]. Tribology International, 2016, 93: 172-181.
 - [51] Fernandes C M C G, Martins R C, Seabra J H O, et al. Friction torque of thrust ball bearings lubricated with wind turbine gear oils[J]. Tribology International, 2013, 58(1): 47-54.
 - [52] Fernandes C M C G, Pedro P M, Amaro, et al. Torque loss in cylindrical roller thrust bearings lubricated with wind turbine gear oils at constant temperature[J]. Tribology International, 2013, 67: 72-80.

-
- [53] Changenet C, Leprince G, Ville F, et al. Draft: A note on flow regimes and churning loss modelling[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2011, 133(12): 5159-5171.
 - [54] Kahraman A, Hilty D R, Singh A. An experimental investigation of spin power losses of a planetary gear set[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 86: 48-61.
 - [55] 陈小安, 张朋, 合烨, 等. 高速电主轴功率流模型与热态特性研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(9): 250-254.
 - [56] Fernandes C M C G, Amaro P M P, Martins R C, et al. Torque loss in thrust ball bearings lubricated with wind turbine gear oils at constant temperature[J]. *Tribology International*, 2013, 66: 194-202.
 - [57] 李雪原, 沈楚敬, 苑士华, 等. 双圆锥式无级变速器传动性能的试验研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(2): 116-120.
 - [58] 梁文宏, 刘凯, 崔亚辉. 直齿轮搅油功率损失的实验研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(2): 239-244.
 - [59] 关通, 徐宏海, 谢雄伟, 等. 高精度 RV 减速器传动效率测试与分析[J]. *机械传动*, 2019, 43(5): 106-109.
 - [60] 陈李果, 彭鹏, 汪久根, 等. RV 减速器试验装置研制及测试分析[J]. *机械传动*, 2017, 41(11): 92-96.
 - [61] 孙章栋. 摆线针轮传动弹性流体动力润滑特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
 - [62] 王君, 陈智龙, 程群超, 等. RV 减速器摆线轮齿廓修形润滑性能分析[J]. *机械传动*, 2020, 44(01): 109-116.
 - [63] Cheng H S. A Refined solution to the thermal-elastohydrodynamic lubrication of rolling and sliding cylinders[J]. *ASLE Transactions*, 1965, 8(4): 397-410.
 - [64] 孙章栋, 朱才朝, 刘怀举, 等. 摆线针轮传动线接触弹流润滑分析[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(23): 195-199.
 - [65] 孙章栋, 朱才朝, 刘怀举, 等. 摆线针轮传动接触热弹流润滑特性[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(06): 174-180.
 - [66] Bo W, Jiaxu W, Guangwu Z, et al. Mixed lubrication analysis of modified cycloidal gear used in the RV reducer[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers Part J Journal of Engineering Tribology, 2015, 230(2): 121-134
- [67] 姜元志, 王优强, 卢宪玖. 单粗糙峰对摆线针轮弹流润滑的影响[J]. 机械设计与制造, 2014(12): 49-52.
- [68] 姜元志, 王优强, 于平. 摆线针轮行星传动瞬态弹流润滑分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(12): 12-15.
- [69] Zhen hua Zhang, Jiaxu Wang, Guangwu Zhou, et al. Analysis of mixed lubrication of RV reducer turning arm roller bearing[J]. Industrial Lubrication and Tribology. 2018, 70(1): 161-171.
- [70] 温诗铸, 杨沛然. 弹性流体动力润滑[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [71] 刘晓玲, 杨沛然. 有限长滚子线接触热弹流润滑分析[J]. 摩擦学学报, 2002(04): 295~299.
- [72] 孙浩洋, 杨沛然. 使用不等距多重网格技术求解线接触热弹流润滑问题[J]. 摩擦学学报, 2002(03): 218~221.
- [73] 程军. 线接触润滑脂弹流润滑理论及其数值解[J]. 润滑与密封, 1990(01): 5~11+52.
- [74] 黄平. 弹性流体动压润滑数值计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013. 187~247.
- [75] 邓磊, 于玫, 黎桂华, 等. 脂润滑轮毂轴承弹流润滑数值分析[J]. 润滑与密封, 2009, 34(10): 21~25.
- [76] 刘明勇, 朱才朝, 刘怀举. 有限长线接触非牛顿热弹流润滑分析[J]. 润滑与密封, 2014, 39(02): 48~55.
- [77] Gurt Alan, Khonsari Michael M. Testing Grease Consistency Journal[J] Lubricants, 2021, 9(2): 14
- [78] Ding Lin, Bai Yulong, Liu MD, et al. Predicting short wind speed with a hybrid model based on a piecewise error correction method and elman neural network[J]. Energy, 2022, 244: 122630.
- [79] Li Lechen, MeinrenkenCJ, Modi V, et al. Short-term apartment-level load forecasting using a modified neural network with selected auto-regressive features [J]. Applied Energy, 2021, 287: 116509.

- [80] Hu Guiting, Xu Luping, Zhang Zhengjiang, et al. Correntropy based elman neural network for dynamic data reconciliation with gross errors[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2022, 140: 104568.
- [81] Boualem S, Kraa O, Benmeddour M, et al. Power management strategy based on Elman neural network for grid-connected photovoltaic-wind-battery hybrid system[J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 99: 107823.
- [82] Xu Ma, Xiaofeng Chen, Xiaoyu Zhang. Non-interactive privacy-preserving neural network prediction[J]. Information Sciences, 2019, 481: 507-579
- [83] Minghui Li, Yuejing Yan, Qian Wang, et al. Secure Prediction of Neural Network in the Cloud[J]. IEEE Network, 2021, 35(1): 251-257
- [84] Jieun Park, Dokkyun Yi, Sangmin Ji. Analysis of Recurrent Neural Network and Predictions[J]. Symmetry, 2020, 12(4), 615
- [85] Tzu-Tsung Wong, Po-Yang Yeh. Reliable Accuracy Estimates from k-fold Cross Validation[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 2019, 32:1586-1594
- [86] Tzu-Tsung Wong, Nai-Yu Yang. Dependency Analysis of Accuracy Estimates in k-fold Cross Validation[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering 2017, 29(11): 2417-242

攻读硕士学位期间发表学术论文及参研项目

一、发表学术论文

- [1] Jiang B C, Zhou Y S, Pan J B, et al. Rheological characteristics and behaviour prediction of lubricating grease for RV reducer across a wide temperature range [J]. The Journal of Engineering, 2024(2): 12362.

二、专利

- [1] 江本赤, 周焰生, 卞仕磊等. 双轴头尾式自动焊接变位机及工件焊接方法 [P]. 中国: CN113828992A, 2023-04-14.
- [2] 周焰生, 潘家保, 吴博文等, 一种覆膜砂加工用便于调节的覆膜砂新型冷却床[P]. 中国: CN220497676U, 2024-2-20

致谢

恭承天命，岁月流逝，研习三年，始终不懈，今告毕业。谨以此文，致谢诸位垂教之师，友朋及家人，承蒙厚泽，得以顺遂完成研究生学业，遂以此文记之，以表寸心之敬。

余于求学期间，蒙导师教诲，深感其慈心仁术。导师潘家保教授，不辞辛劳，启迪吾智，悉心指导，使余茅塞顿开，得以进步。若无导师之悉心教导，余岂能有今日之成果？江本赤导师，师恩深重。吾师博学多识，严谨治学，不遗余力，指导吾学术研究，拨疑解惑。其言传身教，足为吾今后治学之楷模，感佩之情，殷殷难尽。谨谢之，以示感激之忱。亦感谢诸位师长，授业解惑，培育吾才，感谢吴波文老师、徐锐老师、闫伟老师、胡焰老师、湫阳成明老师和周彬老师给予的关心、指导和帮助，令余铭记于心。

其次，谢同窗挚友，砥砺共勉。感谢李瑞、李贻良、汤天成、王子辉、许书恒、吴飞翔、王锦、傅学镔、陆金龙、张锦程、王文静和陈晴晴等同学。数年同窗，切磋学术，彼此激励，学业之路，因有诸友而少孤寂，多欢愉。友谊长存，感怀于心。

最后，感谢父母亲人，抚育之恩，关爱之情，始终不离不弃。吾在学途上之艰辛，皆因父母之支持而得以克服。父母之恩，虽山高海深，亦难以为报，唯以努力进取，回报养育之情。特别感谢三联学院辅导员王春妹女士，平日相伴，给予吾鼓励与支持。研学之路，虽有坎坷，但因你之伴，余不觉孤寂，得以勇往直前。

末了，愿将此篇致谢，献于学术殿堂，感念所有帮助吾完成学业之人。此生幸得诸位扶持，余将铭记于心，永不敢忘。愿以此文，表达吾真挚之谢意，愿诸君安康，事业有成，前程似锦

尚德敏学 唯实惟新

