

基于CatBoost的航空齿轮本体温度预测方法与验证研究

贾晨帆 刘怀举* 朱才朝 陈泰民 陈进筱

重庆大学高端装备机传动全国重点实验室, 重庆, 400044

摘要:开展了齿轮胶合承载能力试验,开发无线测试装置以获取齿轮本体温度数据集,并在此基础上提出了基于CatBoost的航空齿轮本体温度预测方法。此外,辨识了润滑油添加剂、热导率、扭矩、表面硬度、表面粗糙度、润滑油密度、润滑油黏度等参数对本体温度的贡献度,提出了考虑材料和油品参数的航空齿轮本体温度预测公式。结果表明,所提的公式对航空齿轮本体温度的预测误差在10%以内,为航空齿轮抗胶合设计提供了新思路。

关键词:航空齿轮;胶合失效;本体温度;数据驱动;预测公式

中图分类号:TH132.41;V233

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An Aviation Gear Bulk Temperature Prediction Method and Verification Research Based on CatBoost

JIA Chenfan LIU Huaiju* ZHU Caichao CHEN Taimin CHEN Jinxiao

State Key Laboratory of Mechanical Transmission for Advanced Equipment, Chongqing University, Chongqing, 400044

Abstract: The present study conducted gear scuffing tests and employed a wireless temperature measuring system to acquire bulk temperature data for aviation gears. Subsequently, a novel methodology, based upon the CatBoost algorithm, was developed with the intention of predicting the bulk temperature of aviation gears. Moreover, the contributions of parameters such as lubricant additives, thermal conductivity, torque, hardness, roughness, lubricant density, and lubricant viscosity to gear bulk temperature were identified. A predictive formula for aviation gear bulk temperature, considering materials and lubricant parameters, was proposed as a solution to the identified issues. Notably, the results demonstrate that the formulated formula achieves a prediction error within 10% for the bulk temperature of aviation gears. And the formula offers a promising method for designing aviation gears against scuffing failures.

Key words: aviation gear; scuffing failure; bulk temperature; data driven; prediction formula

0 引言

齿轮传动作为航空发动机传动系统的关键机械系统,其承载能力和功率密度等直接决定了航空发动机的服役性能^[1-3]。航空发动机面临高温、高速、重载、短暂断油等极端服役工况,要求航空齿轮应具备高可靠、长寿命^[4-6]。然而齿轮啮合过程中由于热-机械的耦合作用,齿面金属发生粘着并不断撕裂,高速重载航空齿轮胶合失效的风险增大,严重限制了航空发动机的高功率密度设计和高可靠服役^[7]。齿轮胶合试验费时、费力,且现有的齿轮胶合设计规范无法适应新材料、新油品、新结构的精益化设计,这对齿轮胶合性能的高效评价提出了严峻挑战。

齿轮表面温度(也称接触温度)一般由两部分组成:一是齿面的实际温度,即本体温度;二是齿轮传动系统中润滑剂的闪点温度,即闪温。一般情况下认为,齿轮接触温度过大会导致胶合失效^[8]。本体温度作为齿轮发生胶合失效的主要诱因之一,受到学者们的关注。LUO等^[9]根据摩擦学、传热学和齿轮啮合理论确定了不同齿面的对流传热系数和摩擦热通量,并建立了齿轮本体温度的有限元预测模型,结果表明,大压力角和齿廓修形能有效降低齿轮本体温度,宽齿顶有利于本体温度的均匀分布。PENG等^[10]建立了单齿段的参数化三维有限元模型,以获得齿轮的稳态温度场,进一步分析了扭矩和速度对齿轮本体温度的影响。CASTRO等^[11]建立了混合油膜润滑模型来评估沿齿轮啮合线的几个点的法向压力和剪切应力,并分析了齿轮胶合过程中划伤的发生,证明

收稿日期:2024-08-20

基金项目:国家自然科学基金(U2141247)

了齿面中出现第一个划伤痕迹的区域的合理性,并为低磨损提供了指标。还有一些齿轮胶合试验研究,通过试验数据对齿轮本体温度进行计算或评估。CHEN 等^[12]开展了喷油润滑下齿轮的胶合承载能力试验,并通过研制的无线测试系统实现了齿轮本体温度的测量。JIANG 等^[13]开展高速齿轮的胶合试验,提出了用于浸油润滑的润滑剂/钢组合的本体温度和临界温度的计算方程,试验结果表明,与基础矿物油相比,合成油的临界温度值显著增大,油类型通过接触表面反应膜的强度和浓度来影响齿轮本体温度。CHEN 等^[14]设计了高速航空齿轮的胶合试验方法,研究了齿形和表面处理对齿轮胶合性能的影响,结果表明,压力角和表面处理对齿轮胶合行为有显著影响。然而胶合试验成本过高,获取胶合温度的效率较低,仅依靠胶合试验难以实现齿轮本体温度的高效预测。

随着人工智能技术的蓬勃发展,运用人工智能技术挖掘材料、油品等关键参数与航空齿轮服役性能之间的关系,为航空齿轮高承载设计提供了新思路^[15-16]。LIU 等^[17]提出了考虑表面完整性和应力状态的齿轮接触疲劳寿命预测模型,可用于小样本状态下齿轮疲劳寿命和 S-N 曲线的预测。ZHANG 等^[18]基于随机森林算法,明确了不同表面完整性参数对齿轮接触疲劳的影响,识别了表面硬度、最大残余应力、表面粗糙度等参数对齿轮接触疲劳极限和寿命的贡献度,拟合了考虑表面完整性参数的齿轮接触疲劳寿命与极限的计算公式,误差也控制在可接受的范围内。LI 等^[19]提出一种基于物理引导 Transformer 的齿轮概率疲劳寿命预测方法,采用多组不同材料、工艺和几何的齿轮弯曲疲劳试验进行验证,发现寿命预测误差均在 2 倍误差带内,与其他传统机器学习模型对比分析结果表明,寿命预测精度能够提高 19.74%~29.44%。然而,相比人工智能在齿轮疲劳方面的大量应用,将其应用到齿轮胶合性能预测方面鲜有报道。

本文针对航空齿轮胶合试验数据缺失、本体温度预测困难的问题,开展了齿轮胶合承载能力试验,采用无线测试装置获取齿轮本体温度数值,构建不同工况下齿轮本体温度数据集,进一步提出基于 CatBoost 的航空齿轮本体温度预测方法,拟合了航空齿轮本体温度的计算公式,旨在为航空齿轮胶合性能高效评估提供新思路。

1 齿轮胶合试验及本体温度测量

1.1 齿轮胶合试验

为了建立基于数据驱动的航空齿轮本体温度预测模型,需要获得一定的本体温度数据,因此,开展了若干组航空齿轮的胶合试验与温度测试。试验齿轮材料为 12Cr2Ni4A、18Cr2Ni4WA、16Cr3NiWMoVNbE、15Cr14Co12Mo5Ni2W 四种高性能渗碳钢,四种钢材料的力学性能参数见表 1。四种航空钢材有极高的强度、硬度和耐磨性,能满足航空工况要求,是直升机、航空发动机传动系统中的主要材料。

表 1 试验齿轮钢力学性能

Tab.1 Mechanical properties of test gear steel

材料类型	抗拉强度 σ_b /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ_4 /%	断面收缩率 ψ /%
12Cr2Ni4A	1100~1296	≥ 940	≥ 15	≥ 59
18Cr2Ni4WA	≥ 1180	≥ 835	≥ 10	≥ 45
16Cr3NiWMoVNbE	≥ 1400	≥ 1020	≥ 14	≥ 62
15Cr14Co12Mo5Ni2	≥ 1900	≥ 1450	≥ 17	≥ 60

四种钢材料的热物理性能参数见表 2。其中 12Cr2Ni4A、18Cr2Ni4WA、15Cr14Co12Mo5Ni2 相比 18Cr2Ni4WA 材料,热膨胀系数较小,产生的热变形较小。

胶合试验采用标准 FZG 齿轮试验机,图 1 为标准 FZG 齿轮胶合试验机示意图。试验台架主要包括主轴电机、传动单元(试验齿轮箱、伺服齿轮箱)、加载联轴器、控制单元(与试验台操控柜相连)、传感器、支架、连接部件、轴、联轴器等。齿轮

表 2 90 °C 下试验齿轮钢的热物理性能参数

Tab.2 Thermophysical performance parameters of test gear steel at 90 °C

材料类型	12Cr2Ni4A	18Cr2Ni4WA	16Cr3NiWMoVNbE	15Cr14Co12Mo5Ni2
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7700	7910	7850	7980
弹性模量/GPa	206	202	210	211
泊松比	0.30	0.27	0.29	0.31
热膨胀系数/ 10^{-6}K	10.0	12.4	11.5	11.3
热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	25.0	47.0	38.0	16.5
质量热容/($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.460	0.460	0.450	0.453

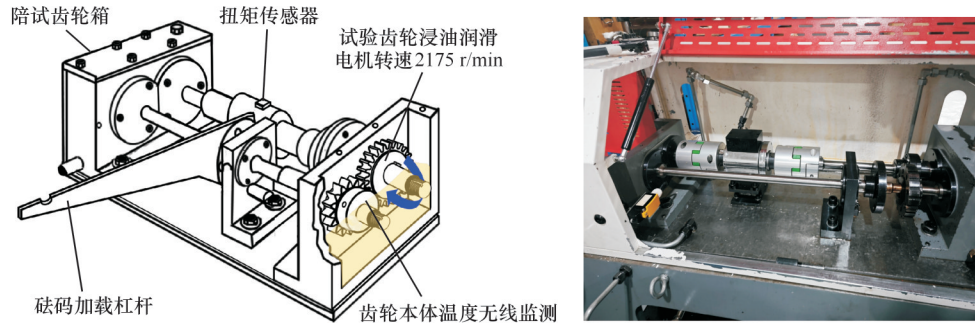


图1 标准FZG齿轮试验机示意图

Fig.1 Schematic diagram of standard FZG gear test rig

试验机的基本参数见表3,其最大加载力矩为1000 N·m,电机最高转速为2910 r/min,扭矩加载精度为±10 N·m,润滑油喷油流量0.1~2.0 L/min,润滑油温20~100 °C,适用模数为2~8 mm、齿宽5~30 mm、中心距为91.5 mm的齿轮胶合承载能力试验。

表3 标准FZG齿轮胶合试验机参数

Tab.3 Parameters of standard FZG gear scuffing test rig

技术参数	数值/范围
电机转速/(r·min ⁻¹)	1455/2910
主动轴扭矩(小齿轮)/(N·m)	0~534.5
中心距/mm	91.5
齿宽/mm	0~30
模数/mm	2~8
润滑油使用温度/°C	50~100
润滑油流量/(L·min ⁻¹)	0.1~2.0

试验齿轮依照国标 GB/T 19936.1—2005《齿轮FZG试验程序第1部分:油品的相对胶合承载能力—FZG试验方法 A/8.3/90》^[20] 和 GB/T 13672—2022《齿轮胶合承载能力试验方法》^[21] 中的FZG A型渐开线圆柱齿轮设计,FZG A型齿的具体参数见表4。可以发现,FZG A齿轮采用正变位传动,中心距为91.5 m,其齿顶具有较大滑动率、易形成胶合的特点。

胶合试验分别采用代号为555、4450、4010、4106的四种典型航空润滑油,来验证润滑油对齿轮本体温度和胶合承载能力的影响。润滑油的参数见表5,其中4106、4010、555为聚酯合成油,适用温度范围为-20~220 °C,4450为聚α烯烃(PAO)合成油,适用温度范围为-40~120 °C;四种润滑油在100 °C时的运动黏度分别为5.22、5.20、3.31、9.55 mm²/s。4450滑油添加了普通极压剂,555滑油添加了极压抗磨剂。

1.2 齿轮本体温度测试

齿轮胶合试验过程中,用无线测试装置对本

表4 FZG-A胶合试验齿轮的几何参数

Tab.4 Geometric parameters of FZG-A scuffing test gear

参数名称		值/表达式
轴中心距 a /mm		91.5
有效齿宽 b /mm		20
工作节圆直径/mm	小轮 d_{w1}	73.2
	大轮 d_{w2}	109.8
顶圆直径/mm	小轮 d_{a1}	88.5
	大轮 d_{a2}	112.3
模数 m		4.5
齿数	小轮 z_1	16
	大轮 z_2	24
变位系数	小轮 x_1	0.8532
	大轮 x_2	-0.5
压力角 α /°		20
啮合角 α_w /°		22.5
节圆线速度 v_w /(m·s ⁻¹)		8.3
齿顶滑动率	小轮 ξ_{E1}	0.86
	大轮 ξ_{A2}	0.34
齿根滑动率	小轮 ξ_{A1}	-0.52
	大轮 ξ_{E2}	-5.96
赫兹接触应力 p_c /MPa		$14.7\sqrt{F_{nt}}$

注: F_{nt} 为法向载荷级,单位为N。

表5 不同润滑油参数

Tab.5 Parameters of different lubricants

牌号	555	4450	4010	4106
40 °C运动黏度/(mm ² ·s ⁻²)	26.50	61.00	13.34	25.79
100 °C运动黏度/(mm ² ·s ⁻²)	5.20	9.55	3.31	5.22
合成基油	聚酯合成油	聚α烯烃合成油	聚酯合成油	聚酯合成油
适用温度/°C	-20~220	-40~120	-20~220	-20~220
添加剂	极压抗磨剂、抗氧化剂、抗泡剂	极压剂、抗氧化剂、减摩剂	抗氧、抗腐蚀、抗磨损	抗氧、抗腐蚀、抗磨损

体温度进行测量。图2为所开发的齿轮无线测试系统的原理图。测试系统由传感器、PCB板、壳

体和基于Labview编写的测试软件组成。测试外壳安装并保护PCB板和供电电池,以防止油液干扰。传感器采用PT100温度传感器测量轮齿端面的温度信号,其测试原理是通过PT100温度传感器来感知外界温度的变化,温度的变化导致传感器的电阻发生变化,进而产生电阻信号,传入电阻信号后电桥转换电路能够获得电压模拟信号,电压模拟信号经AD模数转换器转换为数字信号,单片机读取到数字信号后产生数字量电桥分压值,经过转换再次获得热敏电阻阻值,通过PT100温度和电阻之间的对应关系即可获得测试温度值。最后温度通过串口输出至WiFi,并传输

到PC端进行显示。温度和阻值之间在一定范围内线性度较高,但在温度较高的范围内则不呈现线性关系,因此,需要采用分段函数^[22]来表示温度和阻值之间的关系以减小误差,分段函数的表达式为

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= 2.4R_{Pt} - 99.88 & -60\text{ }^\circ\text{C} \leq T_1 \leq -30\text{ }^\circ\text{C} \\ T_2 &= 2.6R_{Pt} - 99.15 & -30\text{ }^\circ\text{C} \leq T_2 \leq 20\text{ }^\circ\text{C} \\ T_3 &= 3.4R_{Pt} - 115.68 & 20\text{ }^\circ\text{C} \leq T_3 \leq 60\text{ }^\circ\text{C} \\ T_4 &= 4.1R_{Pt} - 112.83 & 60\text{ }^\circ\text{C} \leq T_4 \leq 100\text{ }^\circ\text{C} \\ T_5 &= 4.9R_{Pt} - 139.09 & 100\text{ }^\circ\text{C} \leq T_5 \leq 140\text{ }^\circ\text{C} \\ T_6 &= 4.5R_{Pt} - 150.27 & 140\text{ }^\circ\text{C} \leq T_6 \leq 200\text{ }^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $T_1 \sim T_6$ 分别为6个温度范围内计算本体温度值, $^\circ\text{C}$; R_{Pt} 为热敏电阻在某温度下的电阻值, Ω 。

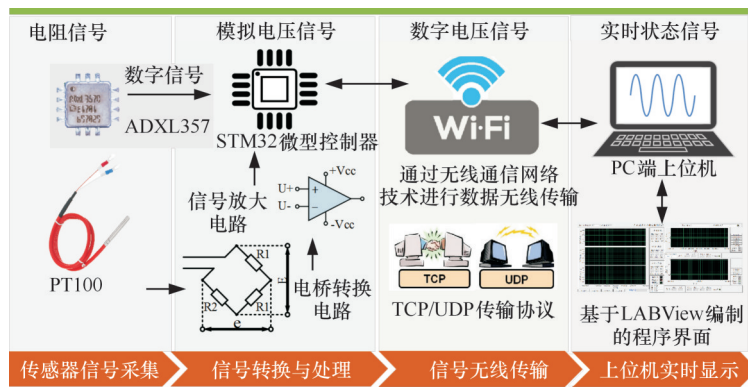


图2 温度无线测试系统原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of a wireless temperature measuring system

图3所示为试验过程中齿轮本体温度测试流程,获取了试验中齿轮本体温度变化情况。当发生胶合失效时,齿轮表面温度产生突增,通过信号

监测实现了齿轮胶合非拆箱判定。此时,在无线测温装置的PC端会获取试验过程中本体温度的变化曲线,从而获取齿轮胶合失效时的本体温度值。

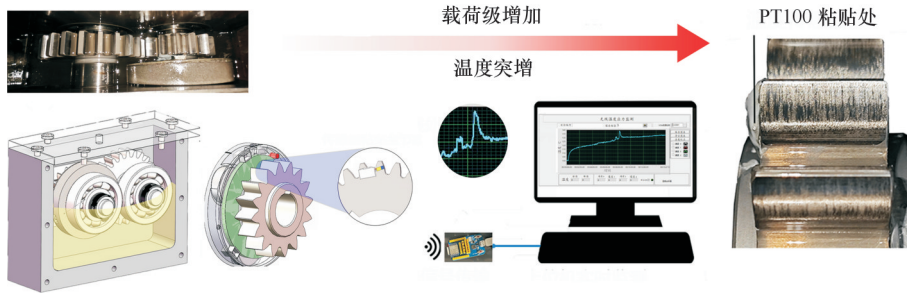


图3 齿轮本体温度测试示意图

Fig.3 Schematic diagram of gear bulk temperature test

基于上述试验条件及温度测试装置,在试验小齿轮转速为2175 r/min,油温为90 $^\circ\text{C}$,材料分别为12Cr2Ni4A、18Cr2Ni4WA、16Cr3NiWMoVNbE、15Cr14Co12Mo5Ni2W,油品分别为555、4450、4010、4106的工况下开展了70组齿轮胶合试验,并统计各工况下的齿轮本体温度。材料属性参数考虑了表面硬度、热膨胀系数、热导率,润滑油参数则考虑了黏度、密度及添加剂,其中,润滑油添加剂按照含有的添加剂类型对各种润滑剂设置数值,根据其自身添加剂种类,含有抗磨剂

4450、极压剂555与无添加的4010、4106,四种润滑油添加剂参数分别设置为0.5、1.0、0.0、0.0。航空齿轮本体温度数据集的部分信息见表6,将总体70组本体温度测试数据随机分成两个数据集,其中62组数据作为模型训练的数据集,另外8组数据作为后续验证集。

2 基于CatBoost的齿轮本体温度预测模型

航空齿轮本体温度过高是发生胶合失效的关

表6 航空齿轮的本体温度测试数据

Tab.6 Bulk temperature test data of aviation gears

粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	表面硬度 HV/MPa	扭矩/(N·m)	90 °C油黏度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$)	90 °C油密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	润滑剂添加剂参数	热膨胀系数/K	热导率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	最大本体温度/°C
0.68	645	3.3	10.09	895	0.5	1.00	25.0	95.5
0.68	645	13.7	10.09	895	0.5	1.00	25.0	99.5
0.68	645	35.3	10.09	895	0.5	1.00	25.0	101.5
0.68	645	60.8	10.09	895	0.5	1.00	25.0	105.5
0.68	645	94.1	10.09	895	0.5	1.00	25.0	108.0
0.68	645	135.5	10.09	895	0.5	1.00	25.0	112.5
.....								
0.50	738	183.4	6.35	946	0.0	1.15	38.0	134.0
0.42	678	183.4	10.09	895	0.5	1.24	47.0	124.5
0.42	678	239.3	10.09	895	0.5	1.24	47.0	136.0
0.42	678	302.0	10.09	895	0.5	1.24	47.0	141.0
0.46	820	35.3	3.91	910	0.0	1.13	16.5	102.0
0.46	820	94.1	3.91	910	0.0	1.13	16.5	108.0
0.46	820	302	3.914	910	0.0	1.13	16.5	148.0

键因素之一。尝试采用数据驱动的方法探究不同材料、油品参数与齿轮本体温度之间的关系。齿轮本体温度预测的技术路线如图4所示。首先开展航空齿轮胶合试验,并采用无线测试装置测量试验过程中的齿轮本体温度,以获取足量的齿轮本体温度数据集;然后基于皮尔逊相关系数分析

方法分析不同材料、油品参数之间的相关性并筛选出合适的输入参数;同时采用CatBoost算法对筛选出的输入参数进行贡献度分析,明确各输入参数对齿轮本体温度的贡献度;最后在处理后的本体温度数据基础上,基于CatBoost算法建立航空齿轮本体温度预测模型,并验证该模型的准确性。

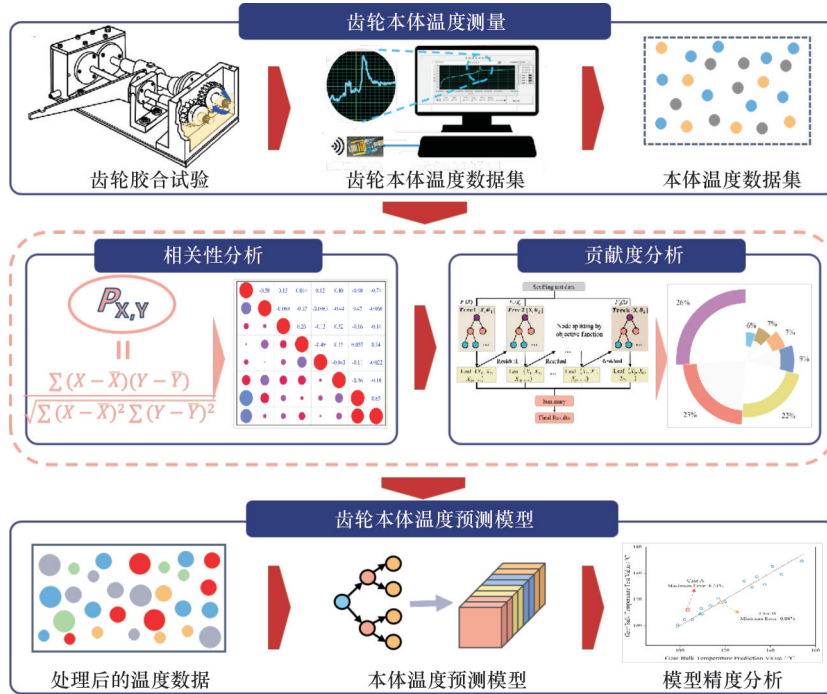


图4 齿轮本体温度预测技术路线图

Fig.4 Gear bulk temperature prediction technology route

2.1 齿轮本体温度影响因素

影响齿轮本体温度的参数众多,不同参数之间存在相互作用,所以建立齿轮本体温度预测模型前要对输入参数之间的多重共线性进行消除。本文采用皮尔逊相关系数分析方法对影响齿轮本

体温度的参数进行相关性分析^[23]。相关性系数 $\rho_{X,Y}$ 的计算公式为

$$\rho_{X,Y} = \frac{\sum(X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X - \bar{X})^2 \sum(Y - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中： $\rho_{X,Y}$ 为相关系数； $X、Y$ 为相关性分析的两个变量； $\bar{X}、\bar{Y}$ 为 $X、Y$ 的平均值。

根据试验条件,选取表面粗糙度、表面硬度、扭矩、90 °C 润滑油黏度、90 °C 润滑油密度、润滑油添加剂、材料热膨胀系数、材料热导率等参数作为输入参数,初始油温多为 90 °C,以该条件下的黏度与密度作为输入,选择 90 °C 的参数能够排除初始条件对本体温度的影响。对上述试验中的 62 组数据进行相关性分析。图 5 为输入参数之间的相关系数热力图,其中,热膨胀系数分别与表面粗糙度、热导率的相关性系数均超过 0.8,因此,需要将相关性过大的参数进行剔除。由于热膨胀系数和热导率都是和材料耐热属性相关的参数,对本体温度的影响具备一致性,故剔除热膨胀系数而保留热导率。从分析结果来看,表面粗糙度、表面硬度等 7 个参数之间不存在强相关性,最终选择表面粗糙度、表面硬度、扭矩、90 °C 润滑油黏度、90 °C 润滑油密度、润滑油添加剂、热导率作为输入参数,进行齿轮本体温度预测模型的训练以及后续的公式推导。

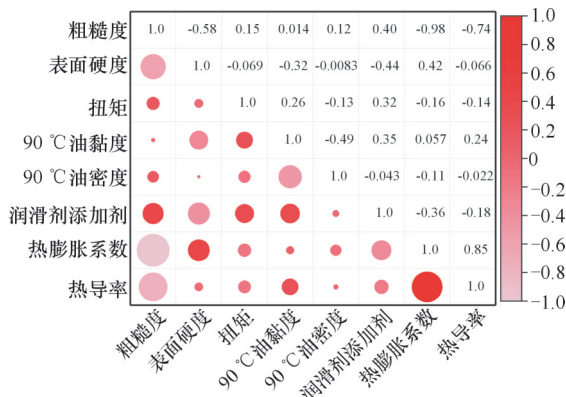


图 5 影响齿轮本体温度的参数相关性分析

Fig.5 Correlation analysis of parameters affecting gear bulk temperature

CatBoost 是一种基于梯度提升算法的机器学习模型,能够通过特征重要性来评估每个特征对模型预测的贡献程度。上述相关性分析确定的 7 个参数对齿轮本体温度预测的重要度各不相同,采用 CatBoost 算法辨识各个参数对于齿轮本体温度的贡献度^[24-25]。贡献度 $VIM(X_i)$ 计算公式为

$$VIM(X_i) = \frac{1}{N_T} \sum_{k=1}^n T_k(X_i) \quad (3)$$

式中： $VIM(X_i)$ 为各输入特征参数的贡献度； n 为模型中特征 X_i 出现的树的总数量； $T_k(X_i)$ 为第 k 棵树中特征 X_i 在分裂过程中出现的次数； N_T 为特征 X_i 出现的树的分裂总次数。

上述 CatBoost 算法能够有效地将输入参数

与齿轮本体温度的影响相关联。以 7 个参数作为输入特征参数,相应的本体温度作为输出参数,将试验获得的 62 组数据代入 CatBoost 算法中进行贡献度分析。根据上述试验结果,得到了表面硬度等 7 个参数对齿轮本体温度的影响权重,如图 6 所示。由图 6 可知,润滑油添加剂、热导率、扭矩、表面硬度、粗糙度、润滑油密度、润滑油黏度的贡献度分别为 26%、23%、22%、9%、7%、7%、6%。润滑油添加剂对齿轮本体温度的影响较大主要是因为润滑油中的极压添加剂和抗磨剂的作用,使得齿轮表面形成保护层,有效地降低了产热;热导率影响较大的原因则是由于较高热导率的齿轮,其齿面传热速度较快,进而使得齿轮本体温度涨幅较大。

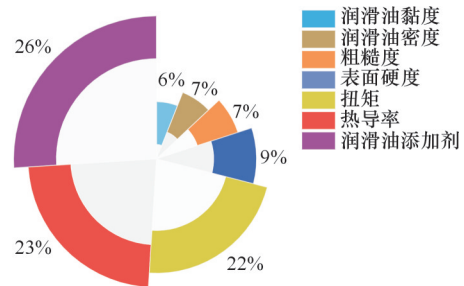


图 6 不同参数对齿轮本体温度的贡献度分析

Fig.6 Contribution of different parameters to gear bulk temperature

2.2 齿轮本体温度预测模型

齿轮本体温度影响参数具备类别型特征,而 CatBoost 是一种以对称决策树 (oblivious trees) 为基学习器实现的参数较少、支持类别型变量和高准确性的 GBDT 框架,能够高效合理地处理类别型特征。此外,CatBoost 还解决了梯度偏差和预测偏移的问题,可以减少模型过拟合的发生,具备优异的泛化能力以及预测准确性,因此,仍基于前文 CatBoost 算法开发齿轮本体温度预测模型^[26-27]。图 7 所示为 CatBoost 预测算法原理框架,将初始数据代入 oblivious trees 进行第一轮学习并形成弱学习器预测结果,第一轮的学习结果会更新样本的权重并形成 Weighted Data,进而得到第二轮的弱学习器预测结果,预测模型在建立时设置迭代次数为 k ,即会生成 k 棵对称决策树,每一棵树即一个弱学习器,除了初始弱学习器外,其他弱学习器会通过上一轮的学习结果不断更新样本权重形成 Weighted Data,这种方式会逐步降低噪声点带来的偏差,从而提高每个学习器的预测精度,当所有弱学习器训练完成后,将预测值加权得到最终的预测结果。CatBoost 的目标函数 \hat{y}

的计算公式为

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^k T(X, \theta_i) \quad (4)$$

式中： \hat{y} 为预测值； $T(X, \theta_i)$ 为决策树； k 为树的数量。

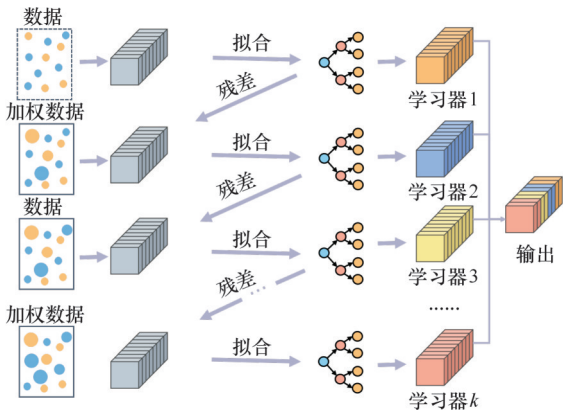


图7 基于 CatBoost 的齿轮本体温度的预测模型

Fig.7 Gear bulk temperature prediction model based on CatBoost

本文模型中树的总数设置为50,即进行了50次迭代。通过对所有树形成的弱学习器的回归值进行加权,得到最终齿轮本体温度预测值。选取决定系数 R^2 对拟合的模型预测效果进行评价, R^2 的大小决定了曲线和数据点相关的密切程度^[28],其计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{(\sum(y - \hat{y})^2)/n}{(\sum(y - \bar{y})^2)/n} \quad (5)$$

式中： y 为齿轮本体温度的测量值； \hat{y} 为所提公式的计算值； \bar{y} 为样本齿轮本体温度的测量值均值； n 为齿轮本体温度的数据量； y_i, \hat{y}_i 分别为样本 i 的本体温度的测试值和预测值； n 为样本数； R^2 越接近1,模型的预测性能越好。

为了得到齿轮本体温度的预测模型,首先确定模型的输入输出,该模型的输入为前文中相关性分析后确定的7个参数,输出则为齿轮本体温度。将62组齿轮本体温度数据按照7:3的比例进行划分,其中7份数据为训练集,3份数据为测试集。设置完数据集比例后,选取 CatBoost-Regressor 回归模型对数据集进行训练,其中,回归模型的学习率设置为0.06,树的最大深度设置为4,能够防止模型的过拟合,损失函数则选择均方根误差进行训练。设置完数据集比例后,将训练集的齿轮本体温度数据代入第1棵树进行拟合,获得齿轮本体温度第一个预测结果 Predictor 1,并将第1棵树获得的 Weighted Data 代入第2棵树,以此类推,直到最后一棵树训练完毕,得到最终的预测结果 Predictor k ,获得初始齿轮本体温度预测模型。此时,模型的预测精度无法满足实际过程的应用,决定系数 R^2 为0.85,考虑到模型

可能由于树的最大深度设置偏大而发生了过拟合,将模型中树的最大深度调整为3,并将学习率设置为0.05,使得模型具备更好的泛化能力,优化后的模型决定系数 R^2 达0.91。在实际过程中,由于训练集和测试集在确定比例以后,选取具有一定的随机性,故需要对数据集进行交叉验证,交叉验证后获得性能优异的齿轮本体温度预测模型。

图8所示为齿轮本体温度模型的预测值和试验测试值的结果对比,可以发现,案例A下齿轮本体温度预测值为112.00℃,测试值为103.50℃,此时差异最大,达8.21%。案例B下齿轮本体温度的预测值为117.90℃,测试值为118.00℃,此时误差最小,仅0.08%。上述案例数据的齿轮本体预测值和测试值之间的 R^2 为0.91,且预测误差能够控制在10%以内,总体差异较小,说明该模型能够有效地实现航空齿轮在不同粗糙度、表面硬度等参数下的本体温度预测。

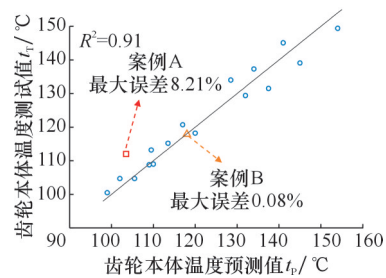


图8 齿轮本体温度预测模型的结果

Fig.8 Results of gear bulk temperature prediction model

为了评估所提方法的优劣,对比分析了 CatBoost、XGBoost 及随机森林算法三种预测方法的准确性,图9所示为三种预测方法的预测误差对比,CatBoost、XGBoost 以及随机森林算法构建的预测模型的决定系数 R^2 分别为0.91、0.76、0.65。其中,随机森林算法的预测与试验结果对比,最大误差为15.67%,最小误差为0.13%；XGBoost 算法的预测与试验结果对比,最大误差为10.67%,最小误差为0.15%；CatBoost 算法的预测与试验结果对比,最大误差仅为8.21%,最小误差为0.08%；由此可以判定,采用 CatBoost 算法训练出来的本体温度预测方法相比其他机器学习算法更具优势。

3 齿轮本体温度计算公式

前文获得了不同材料、油品参数和各扭矩下的齿轮本体温度。结果表明,表面硬度、扭矩、润滑油黏度、润滑油密度、润滑油添加剂、热导率等

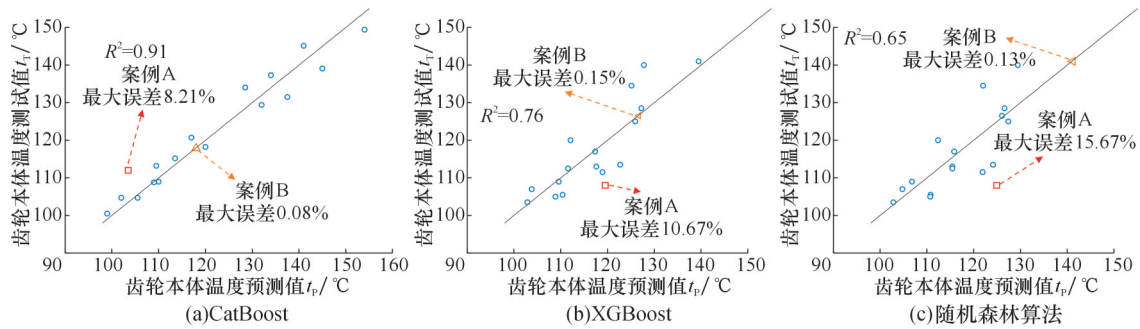


图9 不同机器学习算法的预测误差对比

Fig.9 A comparative analysis of prediction errors across various machine learning algorithms

参数是影响齿轮本体温度的主要参数。为了明确上述参数与齿轮本体温度之间的定量关系,基于OLS线性回归方法,提出了考虑材料、油品参数的齿轮本体温度计算公式,以实现齿轮本体温度的定量计算。该回归方法也适用于齿轮寿命和极限的拟合^[29]。

3.1 齿轮本体温度公式拟合

基于表面硬度等参数与齿轮本体温度试验结果,采用公式拟合的方法获得表面硬度等参数与齿轮本体温度之间的关系。选取62组试验数据利用Python中的statsmodels库中的OLS线性回归方法进行公式拟合。考虑材料和油品参数后,齿轮本体温度 θ_M 的计算公式为

$$\theta_M = 54.31Ra + 0.08HV + 0.12T - 0.89\eta_{oil} - 0.0038\rho_{oil} - 10.93L_A + 0.95e_M \quad (6)$$

式中: θ_M 为齿轮的本体温度,℃; HV 为齿轮的表面硬度,MPa; T 为扭矩,N·m; η_{oil} 为90℃下润滑油动力黏度,mm²/s; ρ_{oil} 为90℃下润滑油密度,kg/m³; L_A 为润滑油添加剂参数; e_M 为齿轮材料的热导率,W/(m·K)。

同时选取决定系数 R^2 对拟合的公式精度进行评价, R^2 的大小决定了曲线和数据点相关的密切程度。该公式的决定系数 R^2 为0.975,表明该公式能够用于齿轮本体温度的预测。

将式(5)与GB/Z 6413.1—2003《圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮 胶合承载能力计算方法 第1部分:闪温法》^[30]的计算结果进行对比。采用均方根误差 E_{RMS} 来评价公式的计算精度, E_{RMS} 能够衡量一组数据中预测值和真实值之间的平均偏差程度,其计算公式^[31]为

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (7)$$

式中: y_i 、 \hat{y}_i 分别为样本 i 的本体温度的测试值和预测值,℃; n 为样本数; E_{RMS} 越小,表明测试值和预测值之间的差异越小,模型性能越好。

齿轮本体温度计算结果对比如图10所示。其中,GB/Z 6413.1—2003标准的计算结果的均

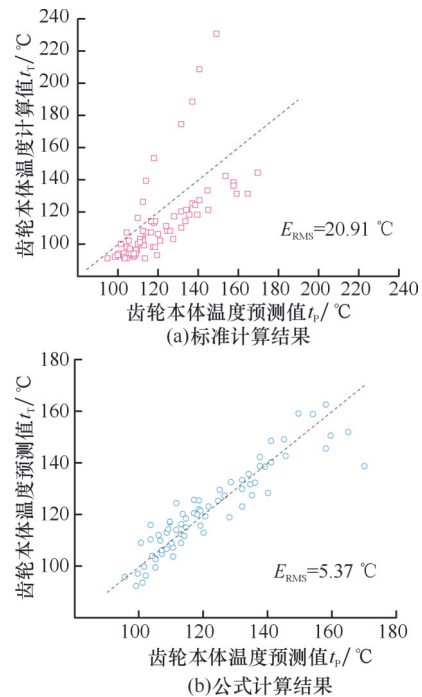


图10 齿轮本体温度公式与GB/Z 6413.1-2003标准计算结果对比

Fig.10 Comparison between the calculation results of the gear bulk temperature formula and the GB/Z 6413.1-2003 standard

方根误差 E_{RMS} 为20.91℃,而本文所提出的计算公式的均方根误差仅5.37℃,表明所提齿轮本体温度的计算公式结果更为准确。

3.2 公式计算精度验证

为了进一步验证齿轮本体温度计算的准确性,将上述验证集代入公式进行计算。从表3中选取了8组12Cr2Ni4A、16Cr3NiWMOVNbE、15Cr14Co12Mo5Ni材料齿轮在4106、4010、555三种润滑油下的齿轮本体温度数据作为验证集。图11所示为8组工况下本体温度公式计算结果与实际测量结果的误差。可以发现,案例I(材料为12Cr2Ni4A,油品4450,扭矩2175 r/min)中齿轮本体温度的预测值为106.60℃,测试值为99.00℃,两者相差7.70%,是8组工况中误差最

大的一组;案例Ⅱ(材料 12Cr2Ni4A, 油品 4010, 扭矩 2175 r/min)中齿轮本体温度的预测值为 115.60 °C, 测试值为 116.00 °C, 两者相差仅 0.38%。8组工况下齿轮本体温度的预测误差均在 8.00% 以内, 能够满足工程实际需求。

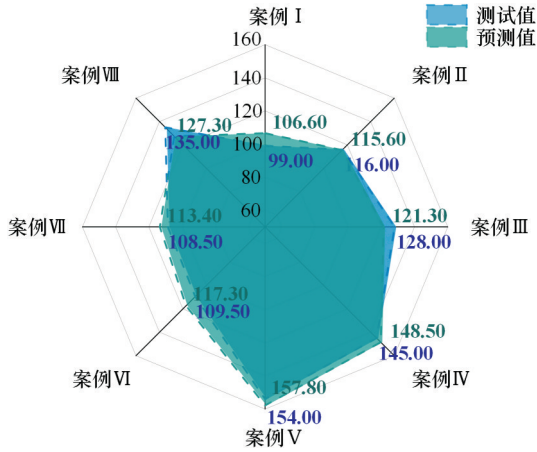


图 11 齿轮本体温度计算值与测试值的对比

Fig.11 Comparison of calculated and tested values of gear bulk temperature

4 结论

1)开展了不同材料、油品和扭矩的航空齿轮胶合承载能力试验,测量了62组不同材料、油品、扭矩下的齿轮本体温度,其范围为92.00~166.90 °C。在此基础上提出了一种基于CatBoost的航空齿轮本体温度预测方法,齿轮本体温度预测误差控制在8%以内。

2)润滑油添加剂、热导率、扭矩、表面硬度、表面粗糙度、润滑油密度、润滑油黏度是影响齿轮本体温度的主要参数,其贡献度分别为26%、23%、22%、9%、7%、7%、6%。可通过加入润滑油添加剂和提升材料热导率等措施,实现齿轮本体温度的降低和胶合的控制。

3)提出了考虑材料、油品、扭矩参数的齿轮本体温度计算公式,经过验证,所提公式的平均计算误差仅为5.37 °C,而GB/Z 6413.1—2003标准的计算误差为20.91 °C。研究结果为齿轮抗胶合设计提供了理论支撑。

参考文献:

[1] LU Zehua, CHEN Yiming, LIU Huaiju, et al. A High-power-density Design Method for Polymer Gear Systems via an Adaptive Non-dominated Sorting Genetic Algorithm III and Surrogate Sub-models [J]. Materials & Design, 2024, 240: 112875.
[2] 吴吉展, 魏沛堂, 刘怀举, 等. 航空齿轮钢表面完

整性与滚动接触疲劳性能关联规律研究[J]. 机械工程学报, 2024, 60(4): 284-295.

WU Jizhan, WEI Peitang, LIU Huaiju, et al. Study on the Correlation between Surface Integrity and Rolling Contact Fatigue Performance of Aviation Gear Steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(4): 284-295.

[3] WU Jizhan, WEI Peitang, ZHU Caichao, et al. Development and Application of High Strength Gears [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2024, 132(7): 3123-3148.

[4] WU Jizhan, WEI Peitang, LIU Guoqiang, et al. A Comprehensive Evaluation of DLC Coating on Gear Bending Fatigue, Contact Fatigue, and Scuffing Performance [J]. Wear, 2024, 536/537: 205177.

[5] LU Zehua, LIU Chang, LIAO Changjun, et al. Conceptual Design and Optimization of Polymer Gear System for Low-thrust Turbofan Aeroengine Accessory Transmission [J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 11(1): 212-229.

[6] 吴吉展, 魏沛堂, 吴少杰, 等. 航空齿轮钢滚动接触疲劳性能预测与表面完整性优化 [J]. 机械工程学报, 2024, 60(8): 81-93.

WU Jizhan, WEI Peitang, WU Shaojie, et al. Rolling Contact Fatigue Performance Prediction and Surface Integrity Optimization of Aviation Gear Steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(8): 81-93.

[7] RIGGS M R, MURTHY N K, BERKEBILE S P. Scuffing Resistance and Starved Lubrication Behavior in Helicopter Gear Contacts: Dependence on Material, Surface Finish, and Novel Lubricants [J]. Tribology Transactions, 2017, 60(5): 932-941.

[8] 李纪强, 朱博强, 刘忠明, 等. 齿轮传动微点蚀与热胶合竞争性失效机制研究 [J]. 摩擦学学报, 2021, 41(5): 636-646.

LI Jiqiang, ZHU Boqiang, LIU Zhongming, et al. Competitive Failure Mechanism of Micro-Pitting and Thermal-scuffing in Gear Transmission [J]. Tribology, 2021, 41(5): 636-646.

[9] LUO Biao, LI Wei. Influence Factors on Bulk Temperature Field of Gear [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(8): 953-964.

[10] PENG Jie, LIU Shaojun, HU Xiaozhou. The Bulk Temperature Analysis of the Involute Spur Gear Based on Parameterized Modeling of APDL [C] // Proceedings of the 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. ACM, 2013: 1146-1149.

- [11] CASTRO J, SEABRA J. Global and Local Analysis of Gear Scuffing Tests Using a Mixed Film Lubrication Model[J]. Tribology International, 2008, 41(4): 244-255.
- [12] CHEN Taimin, ZHU Caichao, LIU Huaiju, et al. Simulation and Experiment of Carburized Gear Scuffing under Oil Jet Lubrication[J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 139: 106406.
- [13] JIANG Q Y, BARBER G C. Experimental Determination of Bulk Temperature and Critical Temperature in Scuffing Resistance Evaluation of Gears[J]. Tribology Transactions, 2000, 43(1): 21-26.
- [14] CHEN Jinxiao, ZHU Caichao, WEI Peitang, et al. Experimental Study on High-speed Aviation Gear Scuffing Based on Tooth Profile and Surface Treatment Improvements [J]. Tribology Transactions, 2024, 67(2): 280-293.
- [15] LI Yang, WEI Peitang, ZHAO Xinhao, et al. A Novel Approach of Shot Peening Process Parameters Prediction with Missing Surface Integrity Data Based on Imputation Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 127(1): 81-92.
- [16] LI Yang, WEI Peitang, XIANG Ge, et al. Gear Contact Fatigue Life Prediction Based on Transfer Learning [J]. International Journal of Fatigue, 2023, 173: 107686.
- [17] LIU Huaiju, LI Yang, LU Zehua, et al. A Unified Estimation Method for Gear Fatigue P-S-N Curves and Fatigue Limits Based on Ensemble Learning and Data Augmentation [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 298: 109941.
- [18] ZHANG Xiuhua, WEI Peitang, PARKER R G, et al. Study on the Relation between Surface Integrity and Contact Fatigue of Carburized Gears[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 165: 107203.
- [19] LI Yang, LIU Huaiju, CHEN Yiming, et al. Probabilistic Gear Fatigue Life Prediction Based on Physics-informed Transformer[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 249: 123882.
- [20] GB/T 19936.1—2005. 齿轮 FZG 试验程序第 1 部分: 油品的相对胶合承载能力—FZG 试验方法 A/8.3/90[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- GB/T 19936.1—2005. Gear-FZG Test Procedures- Part 1: FZG Test Method A/8.3/90 for Relative Scuffing Load-Carrying of Oils [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [21] GB/Z 13672—2022. 齿轮胶合承载能力试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- GB/Z 13672—2022. Test Method for Scuffing Load Capacity of Gears [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [22] 罗维平, 周博, 陈军, 等. 基于 Pt100 的低温真空冷冻干燥机温度测量系统[J]. 现代电子技术, 2021, 44(18): 27-32.
- LUO Weiping, ZHOU Bo, CHEN Jun, et al. Pt100-based Temperature Measurement System for Low Temperature Vacuum Freeze Dryer[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(18): 27-32.
- [23] COHEN I, HUANG Yiteng, CHEN Jingdong, et al. Noise Reduction in Speech Processing [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009
- [24] SAMMIL S, SRIDHARAN M. Employing Ensemble Machine Learning Techniques for Predicting the Thermohydraulic Performance of Double Pipe Heat Exchanger with and without Turbulators [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 47: 102337.
- [25] LI Shaojie, LIU Chun, ZHAO Jing, et al. Multi-scale Deep Features and Empirical Features Fusion-based Gearbox Fault Diagnosis [C]//2022 China Automation Congress (CAC). Xiamen, 2022: 54-59.
- [26] NAJM S M, TRZEPIECIŃSKI T, KOWALIK M. Modelling and Parameter Identification of Coefficient of Friction for Deep-drawing Quality Steel Sheets Using the CatBoost Machine Learning Algorithm and Neural Networks [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 124(7): 2229-2259.
- [27] CHENG Ganlin, XIANG Chong, GUO Fei, et al. Prediction of the Tribological Properties of a Polymer Surface in a Wide Temperature Range Using Machine Learning Algorithm Based on Friction Noise [J]. Tribology International, 2023, 180: 108213.
- [28] IBRAHEM AHMED OSMAN A, NAJAH AHMED A, CHOW M F, et al. Extreme Gradient Boosting (XGBoost) Model to Predict the Groundwater Levels in Selangor Malaysia [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1545-1556.
- [29] JIA Chenfan, WEI Peitang, LU Zehua, et al. A Novel Prediction Approach of Polymer Gear Contact Fatigue Based on a WGAN-XGBoost Model [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2023, 46(6): 2272-2283.
- [30] GB/Z 6413.1—2003. 圆柱齿轮、锥齿轮和准双曲面齿轮 胶合承载能力计算方法 第 1 部分: 闪温法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- GB/Z 6413.1—2003. Calculation of Scuffing Load Capacity of Cylindrical, Bevel and Hypoid Gears-