

喷油润滑内齿圈外圆面红外测温及误差分析*

王琳, 郑志振, 王勇, 陈国定

(西北工业大学机电学院 西安, 710072)

摘要 高速重载人字齿轮箱的摩擦功率损失会转换为温升, 齿面温度测量是评价齿轮箱润滑和冷却设计的重要手段。针对某人字齿轮箱中内齿圈外圆面温度的在线实时准确测量需求, 提出了一种基于红外测温仪的旋转齿轮表面温度测量方法, 并分别设计搭建了相关测试装置。首先, 分析了基于红外测温仪的旋转齿轮表面温度测量误差的影响因素; 其次, 通过试验对待测齿面的发射率进行标定; 最后, 开展了不同转速工况下的喷油润滑齿轮表面温度测量试验, 并分析了吹气压力和吹气温度对红外测温误差的影响。研究表明: 待测齿面喷涂黑色哑光漆后的标定发射率为0.96, 而红外测温光路上的光学镜片会使红外测温值低2°C左右; 带有空气吹扫管的红外测温仪可以在线实时测量旋转内齿圈外圆面的温度, 且红外与热电偶测温值的最大相对误差不超过7%; 选择合适的空气吹扫压力和吹扫温度, 可以进一步减小红外测温误差。

关键词 内齿圈; 红外测温仪; 温度测量; 喷油润滑; 齿面温度

中图分类号 TH132.4

引言

在高速重载齿轮啮合过程中, 由于摩擦引起的功率损失转换成热量而使齿轮轮齿温度上升, 若润滑和冷却设计不当会导致啮合齿面瞬时温度过高, 造成齿轮失效, 因此需要采用喷射润滑油的方式带走齿面间的热量^[1-2]。准确的齿面温度分布是评价喷油润滑设计的关键。很多学者在齿轮热分析和温度分布方面进行了大量研究, 但多数是采用有限元方法进行数值仿真^[3-5], 而有关齿轮齿面温度试验测量方面的研究则较少^[6-12]。因此, 开展齿轮表面温度的试验测量研究非常必要。在实际工况中, 为了避免影响啮合轮齿的齿面接触应力和变形, 不能通过在齿轮表面和侧面加槽、开孔和粘贴的方式布置测温热电偶, 因此需要使用非接触测温技术获得齿轮表面温度, 如面测温式的红外热像仪^[13-15]和点测温式的红外测温仪^[16-18]等技术。

红外热像仪可以测量区域温度分布, 但响应速度的限制使其无法准确测量齿轮高速转动过程中的实时温度^[19]。王裕文等^[20]应用红外热成像技术测量塑料齿轮啮合区温度分布时, 发现运动目标红外热像图会产生变形和信息丢失等现象。陈星^[21]使用红外热像仪研究了发射率、透射率、油膜厚度、观测距

离和观测角度等对喷油润滑条件下齿面测温结果的影响, 但由于红外热像仪帧频较低, 无法准确测量齿轮高速转动时的齿面温度分布, 且无法对红外热像仪测温结果的准确性进行验证。红外测温仪采用点测温方式, 具有响应速度快和灵敏度高优点^[18], 可用于测量高速转动的齿轮表面温度。将红外测温仪用于齿面温度测量时, 其测量结果同样易受多种环境因素的影响, 尤其对于喷油润滑的高速齿轮传动系统, 被测表面发射率、齿轮箱油雾环境及齿轮转速等因素^[22]均会影响红外测温准确性。

笔者以喷油润滑内齿圈外圆面为测量对象, 提出了一种使用红外测温仪进行温度测量的方法, 并对喷油条件下红外测温结果的影响因素进行了测试分析。

1 红外测温仪误差影响因素及分析

1.1 红外测温仪测温误差的影响因素

红外测温仪是靠接收被测表面的辐射能来确定温度的, 其接收的红外辐射能主要源于待测物体、周围环境反射和空气。因此, 红外测温仪的测温值与被测物体表面发射率、被测物体表面温度及环境温度等相关。齿轮箱中喷射的润滑油在齿轮表面形成

* 国家自然科学基金资助项目(51975475, 52375265); 直升机传动技术重点实验室基金资助项目(HTL-O-22G03)

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-11-10

油膜,油膜会反射和吸收红外辐射;齿轮箱内也会因喷油溅射与齿轮甩射形成大量油滴和油雾。齿轮表面形成的油膜、红外测温光路中弥漫的油雾及溅射的油液均会影响红外测温仪接收到的红外辐射强度,从而影响测温结果。因此,需要在红外测温仪前端的光路设计上添加空气吹扫管^[23],以清除红外测温仪测量光路上的油液、油雾及灰尘等介质的干扰,减小红外测温仪测量误差。

图1为红外测温仪连接吹扫管对齿轮表面进行测温的原理图。红外测温探头置于密闭试验腔体内,探头前端安装有空气吹扫管,空气吹扫管末端侧面通入高压高温气体,将测量光路上的油滴、油雾吹走。为了避免高压气体、油雾和油滴等影响红外测温仪镜头,在空气吹扫管前方安装了高透光的石英玻璃镜片。

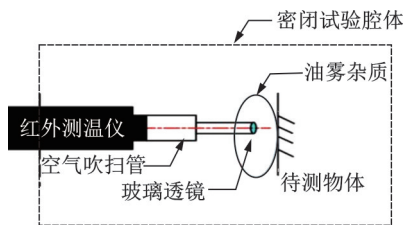


图1 测温原理图

Fig.1 Schematic diagram of temperature measuring

测量角度是指红外光路与待测物体表面法线之间的夹角;测量距离是指前端镜头与待测表面之间的距离。本研究所选用的三铯红外测温仪的有效测量距离为170~300 mm,有效测量角度为 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。测温试验结果表明,在有效测量距离内,当红外测温仪的测量角度小于等于 45° 时,测量位置和测量角度对测温结果的影响可以忽略。因此,当红外测温仪在有效测量距离和测温角度内使用时,影响测温误差的主要因素为红外测温仪设定的待测齿面发射率、空气吹扫管的镜片、吹扫气体的压力和温度等。

1.2 待测齿面发射率标定

物体的发射率是指该物体在指定温度时辐射量与同温度黑体辐射量的比值。发射率越高,其辐射能力越强,发射率一般不超过1。在红外测温仪中准确设置待测面的发射率,可以有效降低发射率引起的红外测温误差。本研究标定待测表面发射率的基本过程如下:使用热电偶与红外测温仪同步采集同一测点处的温度,定义热电偶测温值为真实温度,对比热电偶与红外测温值,通过调整红外测温仪内部设定发射率大小,使红外测温值变化到与热电偶

测温值一致,此时的发射率即为待测表面的真实值。

待测表面发射率标定试验装置如图2所示,笔者使用恒温油浴锅作为恒温加热设备。在圆环金属罐体内壁面和底面上喷涂与试验内齿圈外圆面一致的黑色哑光漆制成简易黑体装置,并固定在恒温油浴锅内。红外测温仪前端空气吹扫管深入罐体内以遮挡外部光线影响,红外光线从空气吹扫管中部穿过,测量罐体底部温度。罐体底部粘接有接触式热电偶,将适量润滑油加入恒温油浴锅中,使润滑油高度超过热电偶测温探头,并将其测温结果作为黑体装置底部温度真实值。圆环金属罐体与待测齿轮材料相同,因此标定的发射率可视为喷涂黑色哑光漆的待测内齿圈外圆面发射率。

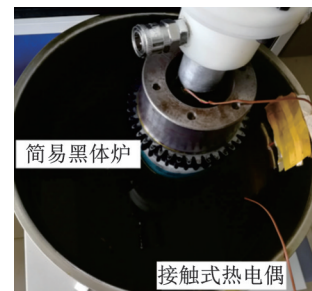


图2 待测表面发射率标定试验装置

Fig.2 The calibration test device for surface emissivity

依次调整恒温油浴锅的温度为70,80,90,100,110,120和130 $^{\circ}\text{C}$,对比每一温度下红外测温与热电偶测温值,并通过调整红外测温仪发射率使二者一致,然后记下此时红外测温仪的发射率 ϵ 。待测齿面发射率的标定结果如表1所示,其中: T_k 为热电偶温度; T_h 为红外温度; $\Delta T = T_k - T_h$ 。可以看出,待测齿面发射率随温度升高而保持不变,试验标定的发射率均为0.96。

表1 待测齿面发射率的标定结果

Tab.1 The calibration results of the emissivity of the tooth surface

ϵ	$T_k/^{\circ}\text{C}$	$T_h/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T/^{\circ}\text{C}$
0.96	70.4	70.4	0
0.96	79.3	79.2	0.1
0.96	91.8	91.5	0.3
0.96	98.3	98.9	-0.6
0.96	112.6	112.4	0.2
0.96	121.8	122.2	-0.2
0.96	130.2	130.1	0.1

1.3 光学镜片对红外测温误差的影响分析

为了分析吹扫管的光学镜片对红外测温误差的

影响,建立了如图3所示的试验装置。红外测温仪安装在距离待测表面280 mm的位置,测温仪镜头测量角度和测量距离均在有效范围内。试验装置中的恒温油浴锅不锈钢壁面导热性好,能够将内部油液温度快速传至外壁表面。在锅的内壁面上布置热电偶温度传感器,并使用红外测温仪对相同液位处(从锅沿朝下100 mm)的外壁面温度进行同步测量,相同液位下的锅内油温与外壁面温度可视为一致。试验时光学镜片固定在离测温表面20 mm的位置,并使红外光线穿过光学镜片。每次试验用时均较短,可以忽略室内温度的变化及外界光线对红外发射率的影响。

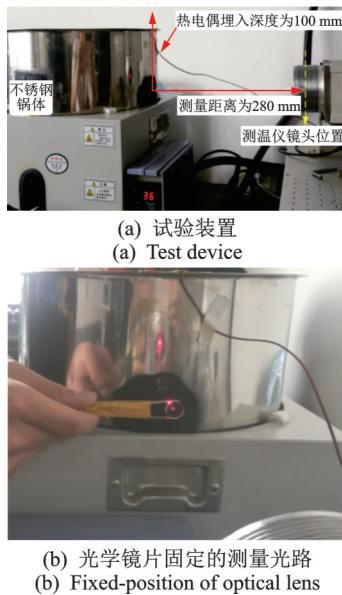


图3 光学镜片对红外测温误差影响的试验装置

Fig.3 The test device for the influence of optical lens on infrared temperature measurement error

分别设置80,90,100,110和120℃等5个温度,有无光学镜片的测温结果如表2所示。可以看出:无光学镜片时,两者之间的测温误差值很小;当红外光路上存在光学镜片时,热电偶与红外测温值之间的误差有所增加,但误差值稳定在2℃左右。

表2 有无光学镜片的测温结果

Tab.2 The temperature measurement result with or without optical lens °C

光学镜片	测试项目	试验温度				
		80	90	100	110	120
无	T_k	79.6	89.5	99.5	109.3	119.3
	T_h	79.8	89.5	99.6	109.3	119.3
	ΔT	-0.2	0.0	-0.1	0	0
有	T_k	80.5	90.0	99.7	109.9	120.1
	T_h	78.7	88.6	97.8	108.1	117.8
	ΔT	1.8	1.4	1.9	1.8	2.3

2 喷油润滑内齿圈外圆表面红外温度测量试验及影响因素

2.1 喷油润滑内齿圈外圆面温度的红外测量试验

试验待测对象为行星人字齿轮箱中的内齿圈,由于内齿圈尺寸较大,难以在真实齿轮箱上进行测温试验,因此笔者设计了喷油润滑内齿圈表面温度红外测量试验装置,如图4所示。润滑油喷管通过磁性表座安装在保温壳体内部的试验平台上,并可进行喷射方向和角度的调整。润滑油经过喷管喷射到内齿圈外圆面上,通过溅射和甩射形成模拟齿轮工作时的油滴和油雾环境。

待测内齿圈试验件固定在齿轮支撑托盘上,与驱动主轴连接,驱动主轴通过联轴器与驱动电机相连,在内齿圈内表面上固定了一个环形加热器以对齿轮试验件加热。受限于内齿圈结构,在实际试验时齿轮表面温度的待测点设定在内齿圈的外圆面上。使用红外测温仪和热电偶对内齿圈外圆面上的同一点进行测温,红外测温装置的前端连接了空气吹扫管,用于吹除测量光路和外圆面待测点上的油雾、油滴和油膜等。

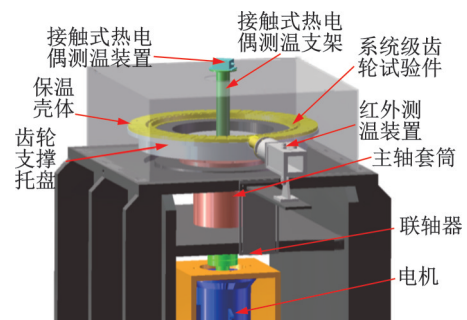


图4 喷油润滑内齿圈表面温度红外测量试验装置

Fig.4 Infrared measurement and test device for surface temperature of oil-injected lubricated inner gear ring

图5为固定在内齿圈试验件上的加热与测温装置。热电偶的一端与图中的白色无线信号发射器相连,另一端焊接到内齿圈外圆面上的待测点,同时使用黑色哑光漆将待测点喷黑用于红外测温。试验过程中环形加热器、热电偶及其无线信号发射器均随内齿圈转动。

根据电机的功率及变频器的性能参数,依次调整齿轮转速为11,19.8,28.6和37.4 m/s,待齿轮运转稳定后在每一转速下进行10 min的温度测量和数据采集。

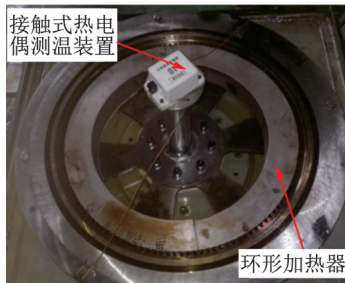


图5 固定在内齿圈试验件上的加热与测温装置

Fig.5 Heating and temperature measuring device fixed on test piece of ring gear

采用等温度间隔数据提取方式提取 90~105℃ 温度区间内 16 个数据样本点进行分析,不同转速下 16 个热电偶采样温度点 2 种测温方式的测温结果如图 6~9 所示。在试验初始阶段,热电偶测温值都低于红外测温值,待测表面温度随着时间的增加而降低,热电偶测温值开始高于红外测温值,并逐渐达到稳定。这是因为喷射到齿面的润滑油虽然对热电偶和红外都有降温作用,但喷油后待测点表面覆盖有油膜,降低了吹风降温的效果,使得红外测温降温变慢;达到稳定状态后,红外和热电偶之间的温差不再变化;红外和热电偶之间的温差稳定时,高速下的温差要小于低速时的温差。此外,内齿圈转速较高时,

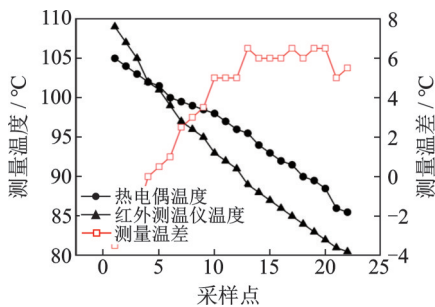


图6 11 m/s 转速下 2 种测温方式的测温结果

Fig.6 Temperature measurement results of two temperature measurement methods at 11 m/s speed

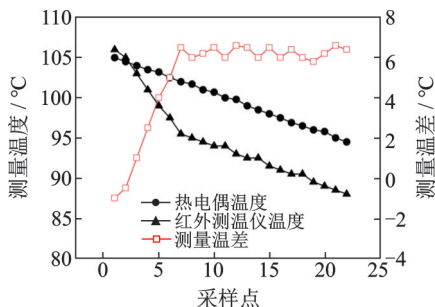


图7 19.8 m/s 转速下 2 种测温方式的测温结果

Fig.7 Temperature measurement results of two temperature measurement methods at 19.8 m/s speed

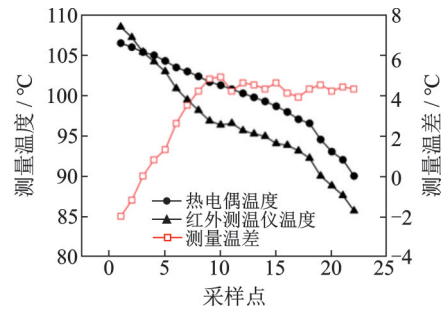


图8 28.6 m/s 转速下 2 种测温方式的测温结果

Fig.8 Temperature measurement results of two temperature measurement methods at 28.6 m/s speed

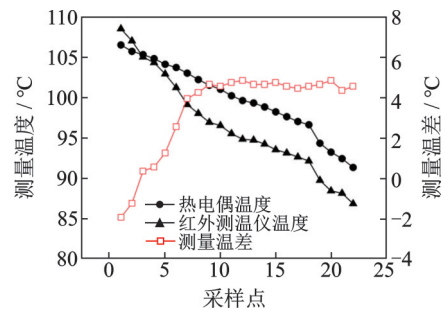


图9 37.4 m/s 转速下 2 种测温方式的测温结果

Fig.9 Temperature measurement results of two temperature measurement methods at 37.4 m/s speed

高速旋转气流可以抑制喷油和吹风对待测表面红外测温误差的影响。可以看出,2 种方法的测温差值较为稳定,红外测试仪可以有效地在线实时测量旋转表面的温度,红外测温值与热电偶测温值的最大相对误差不超过 7% (约为 6℃ 左右)。

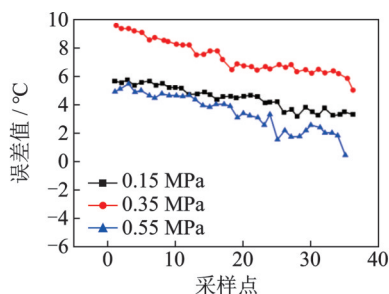
2.2 吹气压力和吹气温度对旋转齿面红外测温误差的影响分析

为了研究吹气压力和吹气温度对红外测温精度的耦合影响,结合实际齿轮箱样机试验中的内齿圈齿面温度测量试验参数,将齿轮转速固定为 19.8 m/s,在不同吹气压力和吹气温度时开展 9 种不同工况下的内齿圈测温试验,吹气压力分别调整为 0.15, 0.35 和 0.55 MPa,吹气温度分别调整为 22, 70 和 110℃。

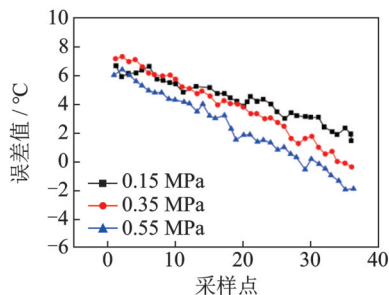
不同吹气温度和吹气压力下的红外和热电偶测温误差对比分析如图 10 所示,由图可知:初始时刻内齿圈外圆面温度为 110℃ 左右,热电偶测温值均高于红外测温值;随着样本点的增加,两者之间的差值逐渐减小。吹气压力为 0.15 MPa 时,吹扫空气的温度对测温误差的影响较小,3 种吹气温度的测温误差比较接近,且均从 6℃ 左右开始降低,110℃ 时温差降低最快;吹扫气体为 110℃ 时,吹气温度高于待测表面温度,这对待测表面有加热作用,且吹扫空

气的压力对测温误差的影响更大。因此,吹气压力为0.15 MPa、吹气温度为110 °C时,最有利于降低相对误差。

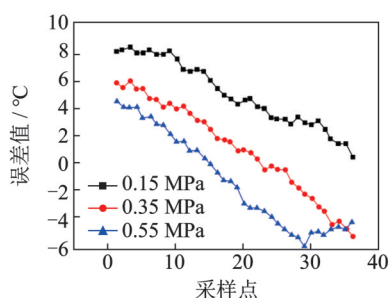
在0.55 MPa工况下,吹气对待测表面的对流换热能力有较大影响,且随着待测表面温度的降低,对流换热系数的影响对待测表面的影响比例逐渐增大。由图10(c)可以看出,0.55 MPa曲线的末端误差值趋于稳定,这是由于110 °C的吹气温度高于待测表面温度,对待测表面有加热作用,吹气压力较高时这种作用更明显。



(a) Comparison of room temperature under different blowing pressure



(b) Comparison of 70 °C blowing temperature under different blowing pressure



(c) Comparison of 110 °C blowing temperature under different blowing pressure

图10 不同吹气温度和吹气压力下的红外和热电偶测温误差对比分析

Fig.10 Comparative analysis of infrared and thermocouple temperature measurement errors under different blowing temperatures and blowing pressures

3 结论

1) 使用红外测温仪时,需先对待测表面发射率

进行标定,条件允许的情况下,可对待测表面喷涂发射率较为稳定的黑色漆。

2) 在需要安装光学镜片阻挡油雾的场合,试验时应先对光学镜片的影响进行标定。本研究中光学镜片使红外测温值比热电偶测温值约低2 °C。

3) 使用吹扫管并通入适当压力和温度的气体,可以降低油雾导致的红外测温误差。试验时应对吹扫空气压力和温度对测温结果的影响进行标定,吹扫空气压力不宜太高,吹扫温度最好与待测表面温度相近。

4) 随着齿轮转速的增高,齿轮旋转造成的气流可以降低红外测温的误差,吹扫气体引起的测温误差随之减小并趋于稳定。

参 考 文 献

- [1] 林腾蛟,黄河,彭建涛,等.混合润滑条件下的星形人字齿轮系统温度场[J].航空动力学报,2020,35(5):1066-1080.
LIN Tengjiao, HUANG He, PENG Jiantao, et al. Temperature field of double helical star gear transmission system in mixed lubrication condition [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35 (5) : 1066-1080. (in Chinese)
- [2] 鲍和云,王春雷,陆风霞,等.基于CFD的风扇驱动齿轮箱流场和温度场特性分析[J].航空动力学报,2020,35(11):2316-2325.
BAO Heyun, WANG Chunlei, LU Fengxia, et al. Flow and temperature fields analysis of fan drive gearbox based on CFD [J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(11): 2316-2325.(in Chinese)
- [3] 李寅平,陈国定.大功率人字齿轮齿间载荷分配与发热量计算[J].机械制造,2012,50(12):11-13.
LI Yinping, CHEN Guoding. Load distribution and heat generation calculation of high-power herringbone gear [J]. Machinery, 2012, 50(12): 11-13.(in Chinese)
- [4] 吉如恍.人字齿轮喷油润滑温度场仿真分析研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [5] 钱雪凌.弧齿锥齿轮传动系统流场与温度场仿真分析[D].重庆:重庆大学,2018.
- [6] CHANG J H, LIU S J, HU X Z. A temperature measurement method for testing lubrication system or revealing scuffing failure mechanism of spur gear [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019, 233(6): 831-840.
- [7] 曾馨雨,陈伟.齿面接触闪温测量系统的设计[J].厦门大学学报(自然科学版),2020,59(1):116-122.

- ZENG Xinyu, CHEN Wei. Design on surface instantaneous contact temperature measurement system for gear tooth [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2020, 59(1): 116-122. (in Chinese)
- [8] 吴双峰, 李锦花, 王旭华, 等. 齿轮动应力及温度测量在机匣故障中的应用[J]. 航空科学技术, 2020, 31(8): 27-35.
- WU Shuangfeng, LI Jinhua, WANG Xuhua, et al. Application of gear dynamic stress and temperature measurement in the failure of accessory gearbox [J]. Aeronautical Science and Technology, 2020, 31(8): 27-35. (in Chinese)
- [9] HOOKE C J, MAO K, WALTON D, et al. Measurement and prediction of the surface temperature in polymer gears and its relationship to gear wear [J]. Journal of Tribology, 1993, 115(1): 119-124.
- [10] 林超, 李润方, 郭晓东, 等. 准双曲面齿轮齿面温度红外热象测试[J]. 机械工艺师, 1996(7): 26-27.
- LIN Chao, LI Runfang, GUO Xiaodong, et al. Infrared thermal image test of tooth surface temperature of hypoid gear [J]. Machinery Manufacturing Engineer, 1996(7): 26-27. (in Chinese)
- [11] MAO K. A new approach for polymer composite gear design [J]. Wear, 2007, 262(3/4): 432-441.
- [12] 陈君, 刘少军, 陈星, 等. 基于红外热像技术的喷油润滑齿轮齿面温度实验研究[J]. 现代制造工程, 2015(5): 115-119.
- CHEN Jun, LIU Shaojun, CHEN Xing, et al. The study on measurement of oil-jet-lubricated gear surface temperature based on infrared thermal imaging [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015(5): 115-119. (in Chinese)
- [13] 李云红. 基于红外热像仪的温度测量技术及其应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [14] 王华伟. 基于红外热成像的温度场测量关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2013.
- [15] 李岩峰, 张志杰, 赵晨阳, 等. 利用红外热像仪进行物体表面波段法向发射率测量[J]. 传感技术学报, 2017, 30(9): 1348-1351.
- LI Yanfeng, ZHANG Zhijie, ZHAO Chenyang, et al. Surface band normal emissivity measurement using infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(9): 1348-1351. (in Chinese)
- [16] 崔雨, 李鸿飞. 红外测温仪的原理与实际应用指南[J]. 自动化与仪器仪表, 2009(6): 103-104, 107.
- CUI Yu, LI Hongfei. The element and using guide of infrared thermometer [J]. Automation and Instrumentation, 2009(6): 103-104, 107. (in Chinese)
- [17] 赵会妮, 李杨, 龚强国, 等. 红外测温仪在航空发动机燃烧室试验中的应用[C]//第六届中国航空学会青年科技论坛论文集. 沈阳: 中国航空学会, 2014: 1048-1050.
- [18] 郑斌. 双色红外测温仪的设计与改进[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [19] LETZELTER E, GUINGAND M, VAUJANY J P D, et al. A new experimental approach for measuring thermal behaviour in the case of nylon 6/6 cylindrical gears [J]. Polymer Testing, 2010, 29(8): 1041-1051.
- [20] 王裕文, 冯昂, 侯年仓, 等. 塑料齿轮啮合区红外热图的研究[J]. 红外技术, 1993, 15(4): 38-41.
- WANG Yuwen, FENG Ang, HOU Niancang, et al. Study on infrared thermography of the meshing zone of plastic gears [J]. Infrared Technology, 1993, 15(4): 38-41. (in Chinese)
- [21] 陈星. 基于红外热像的喷油润滑齿面温度测量技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [22] 廖盼盼, 张佳民. 红外测温精度的影响因素及补偿方法的研究[J]. 红外技术, 2017, 39(2): 173-177.
- LIAO Panpan, ZHANG Jiamin. Research on influence factors for measuring and method of correction in infrared thermometer [J]. Infrared Technology, 2017, 39(2): 173-177. (in Chinese)
- [23] 王琳, 冯金, 刘露露, 等. 一种用于红外测温仪的空气吹扫装置: 中国, CN202010288763.6 [P]. 2020-08-07.



第一作者简介:王琳,男,1987年10月生,副研究员、硕士生导师。主要研究方向为航空发动机机械传动系统的润滑设计与传热分析、齿轮箱和轴承腔的油气两相流动分析测试等。

E-mail: wanglin@nwpu.edu.cn