

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.004

工程机械车辆发动机冷却系统仿真与优化

张弘强¹, 孙东方¹, 江斌¹, 蒋影¹, 张锐²

(1. 合肥工业大学 汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥安信瑞德精密制造有限公司, 安徽 合肥 230061)

摘要:文章分析工程机械车辆发动机冷却系统基本原理及主要部件性能,采用 AMESim 仿真软件搭建冷却系统的仿真模型,基于风洞实验验证模型的准确性;研究环境温度、水泵传动比以及散热器翅片波距对冷却系统的影响,并探讨冷却系统性能的优化路径。结果表明,环境温度过高会使冷却系统性能显著下降,适当提高水泵传动比和降低散热器翅片波距可以提高冷却系统的冷却性能。该文设计的 2 款散热器通过优化散热器翅片波距提高了冷却系统性能。

关键词:发动机;冷却系统;环境温度;水泵传动比;翅片波距

中图分类号: TB657.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)04-0452-06

Simulation and optimization of engine cooling system for construction machinery vehicle

ZHANG Hongqiang¹, SUN Dongfang¹, JIANG Bin¹, JIANG Ying¹, ZHANG Rui²

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei Anxin Ruide Precision Manufacturing Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: This paper introduces the basic principle of construction machinery vehicle engine cooling system as well as the performance of the main parts, sets up a simulation model for the cooling system using AMESim, and verifies the accuracy of the model by wind tunnel test. The paper analyzes the influence of ambient temperature, pump transmission ratio and radiator fin wave distance on the cooling system to optimize the performance of the cooling system. The study finds that the excessive ambient temperature will make a significant reduction in the performance of the cooling system. The cooling performance of the cooling system can be improved by appropriately increasing the pump transmission ratio and decreasing the fin wave distance of the radiator. Two modified radiators are presented in the paper, and the cooling system performance is improved by optimizing the fin wave distance of the radiators.

Key words: engine; cooling system; ambient temperature; pump transmission ratio; fin wave distance

目前我国叉车行业正处在一个高速发展的时期,叉车的需求量随着物流行业的蓬勃发展不断提高。为了控制污染物排放,减轻空气污染程度,国家对于发动机的排放要求在逐步提高,这也对叉车发动机冷却系统的冷却性能提出了较高要求。发动机是内燃叉车的核心,发动机工作过程

中会产生大量的废热,若热量不能及时散出去,会严重影响发动机工作性能甚至引起故障,而实际情况中,叉车故障很大一部分是由发动机故障引起的。冷却系统的冷却性能对于发动机寿命和整车性能有着极其重要的作用。叉车和普通车辆的区别在于工作环境相对恶劣,而发动机舱结构紧

收稿日期: 2021-07-13; **修回日期:** 2022-05-26

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020M681983); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2021HG TB0093; JZ2020HGQA0211)

作者简介: 张弘强(1995—),男,安徽肥西人,合肥工业大学硕士生;

孙东方(1991—),男,河南周口人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: dfsun@hfut.edu.cn.

凑、空间狭小,这对发动机冷却系统的散热能力有着更高的要求^[1-4]。

文献[5]通过建立简化四缸柴油机冷却水套几何模型,对柴油发动机冷却水套进行流动与传热的数值仿真,分析了发动机水套的传热特性;文献[6]对冷却水泵进行三维流场数值模拟,分析离心泵内的流场分布特性,并对冷却水泵进行了改进与优化;文献[7]通过编制管带式汽车散热器的传热与流动阻力计算程序,分析发现散热带波距是影响散热器性能的主要参数。目前,对发动机冷却系统主要部件做深入研究的较多,而将主要部件改变与冷却系统相联系的研究相对较少。文献[8]通过自主研发的一维模拟仿真软件,模拟了冷却系统空气侧的整体情况,并与 CFD 软件进行耦合,得到较为准确的空气流动分布情况;文献[9]基于四缸汽油机采用 AMESim 软件搭建了发动机冷却系统模型,并通过实验验证了模型的准确性;文献[10]通过建立车辆冷却系统模型,分析了低速高负荷和高速爬升工况条件下冷却系统的水温变化情况。

本文采用 AMESim 仿真软件建立工程机械车辆发动机冷却系统仿真模型,分析环境温度以及冷却系统主要部件参数即水泵传动比和散热器翅片波距变化对冷却系统性能的影响,并探讨冷却系统性能的优化路径。

1 冷却系统仿真模型

内燃叉车发动机冷却系统的基本结构如图 1 所示。

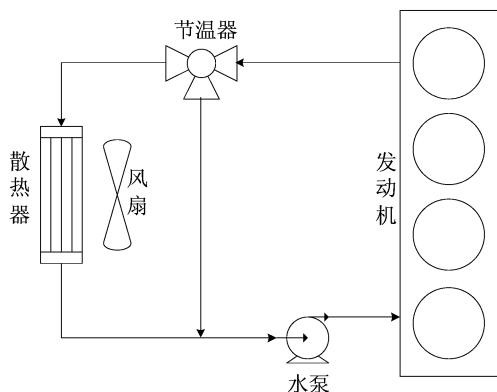


图 1 冷却系统结构示意图

冷却系统主要包括发动机、水泵、节温器、油冷器、散热器和风扇。当发动机处于冷态时,冷却液在冷却水泵的驱动下进入发动机水套,节温器主阀关闭,冷却液通过副阀再流入冷却液泵形成

小循环,从而防止发动机过冷,保证发动机迅速暖起来。当冷却液温度达到节温器的开启温度时,冷却液经节温器主阀流入散热器,空气在风扇的驱动下通过散热器以热对流的形式带走冷却液的热量,冷却液返回冷却水泵形成大循环。

本文基于 AMESim 软件搭建仿真模型,应用冷却系统库、热库、信号控制库、热液压库、热力学库对冷却系统进行一维和三维仿真计算,构建的冷却系统模型与实际冷却系统物理模型保持一致,冷却系统模型如图 2 所示。

系统模型主要包括发动机子模型、节温器子模型、水泵子模型、散热器子模型、油冷器子模型和风扇子模型^[11]。

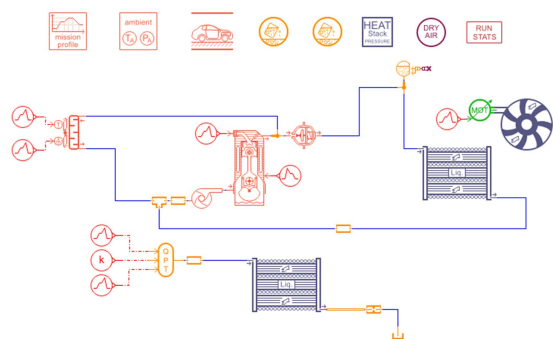


图 2 基于 AMESim 的发动机冷却系统模型

1.1 发动机

发动机燃料燃烧产生的热量主要转化为 3 个部分:① 转化为输出的有用功;② 通过发动机水套被冷却液带走的热量;③ 燃料燃烧后排出气体的热量。发动机子模型选用 CSEN00 元件。

发动机散热量随转速和轴功的变化情况如图 3 所示。

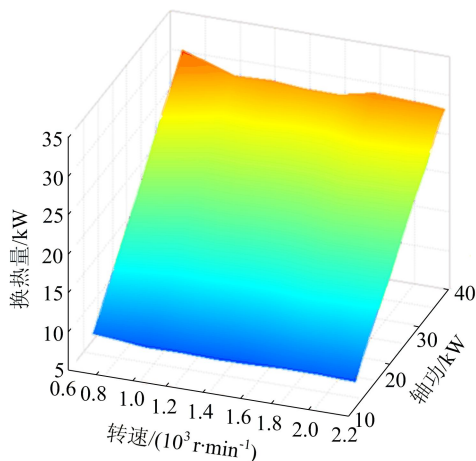


图 3 发动机散热量与转速、轴功的关系

发动机换热量采用经验公式结合燃料特性和发动机参数进行计算:

$$Q_w = \frac{A g_e N_e h_n}{3600} \quad (1)$$

其中: A 为发动机散热量占燃料总热量的百分比; g_e 为发动机燃料消耗率; N_e 为发动机功率; h_n 为燃料低热值。

1.2 散热器

本文研究的内燃叉车散热器为管带式水箱散热器, 结构参数见表 1 所列。其中芯片尺寸单位为 mm。

表 1 散热器主要参数

参数	数值
芯体尺寸	345×520×56
散热带数	36
水管数	37
翅片波距/mm	3.8
翅片波高/mm	8.0

仿真建模时散热器子模型选用气-液热交换器 HEATRAD2001 元件。散热器气-液热交换公式为:

$$Q = AU(T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

其中: Q 为散热器中空气与冷却液在单位时间内的热交换量; A 为散热器内部的热交换面积; U 为对流换热系数; T_{in} 、 T_{out} 为散热器进、出口冷却液的温度。

对流换热系数通过一组试验数据, 采用 AMESim 基于 NTU 的方式计算出导热系数和对流修正系数, 计算公式为:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{1}{a_{out} G_{out}^{b_{out}}} + \frac{1}{a_{in} G_{in}^{b_{in}}}} \quad (3)$$

其中: K 为散热器管道的导热系数; G_{in} 为冷却液质量流量; G_{out} 为空气质量流量; a_{in} 、 b_{in} 为冷却液侧对流修正系数; a_{out} 、 b_{out} 为空气侧对流修正系数。

1.3 节温器

节温器模型选取 CSTH1 元件。蜡式节温器主要作用是通过冷却液温度来调节冷却回路流量的分配, 从而改变冷却系统的散热能力, 保障发动机在合适的温度范围内工作。节温器开启温度范围为 70~74 °C, 节温器中蜡的温度与来流冷却液温度的关系为:

$$\frac{dT_w}{dt} = \frac{hA}{mC_p} (T_c - T_w) \quad (4)$$

其中: T_w 为节温器内蜡的温度; T_c 为冷却液的温度; mC_p 为节温器内蜡的热熔; hA 为节温器蜡与冷却液换热的总热导。

节温器中冷却液流量计算公式为:

$$Q_v = C_q A \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (5)$$

其中: Q_v 为冷却液体积流量; C_q 为流量系数; A 为等效面积; Δp 为节温器进出口压差; ρ 为冷却液密度。

1.4 水泵

水泵模型选取 CSCP100 元件, 4C3-60C31 型离心式水泵扬程 ≥ 10 m, 水泵与曲轴的传动比为 1.23。水泵的主要作用是对冷却液加压, 保障其在冷却系统中循环流动, 使冷却液不断从发动机吸收热量, 再经过散热器带走热量, 从而保证发动机不过热。冷却水泵在 4 000 r/min 转速下的性能曲线如图 4 所示。

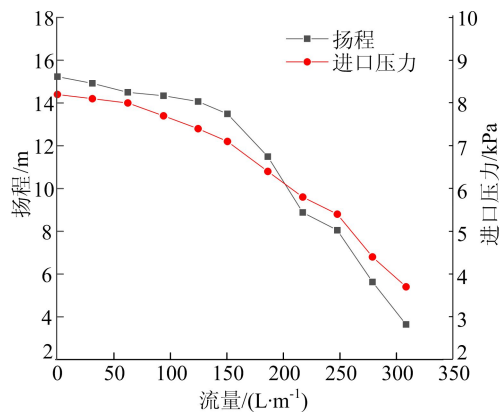


图 4 水泵性能曲线

泵的出口压力计算:

$$p_{out} = p_{in} + \Delta p \quad (6)$$

其中: p_{out} 为水泵进口压力; Δp 为水泵进、出口压差。

泵的转速由发动机转速与传动比计算得到:

$$N_m = N_e \epsilon \quad (7)$$

其中: N_e 为发动机转速; ϵ 为水泵与发动机的传动比。

水泵冷却液出口温度由冷却液进口温度和泵提供的功率确定, 水泵向冷却液提供的功率为:

$$P = \frac{Q\Delta p}{f_e} \quad (8)$$

其中: Q 为冷却液体积流量; f_e 为全局效率, $0 \leq f_e \leq 1$ 。

1.5 风扇

风扇模型选取 HEATFAN001 元件, 为塑料

排风式风扇,冷却风扇与曲轴转速比为 165 : 134,叶片数为 7,外径为 380 mm。根据空气动力学原理,风扇的流量与转速成正比,消耗功率与转速成三次方关系。因此,在满足散热量要求的情况下,从燃油经济性考虑,可以适当增大风扇的直径,降低风扇的转速。

风扇性能曲线如图 5 所示。

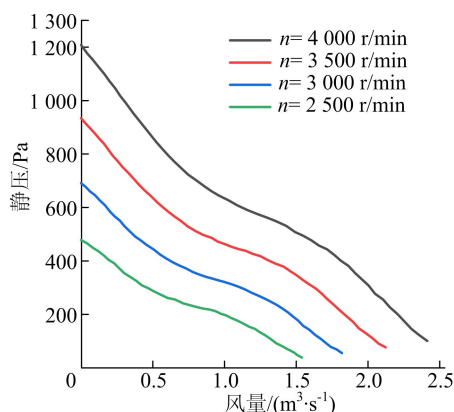


图 5 风扇性能曲线图

风扇输出压力计算公式为:

$$p_{out} = p_{in} + \Delta p \quad (9)$$

风扇压力增加量是体积流量与风机转速的函数,流量系数和压力系数计算公式为:

$$C_f = \frac{Q}{(nD)D^2} \quad (10)$$

$$C_p = \frac{dP}{\rho(nD)^2} \quad (11)$$

其中:Q 为体积流量;n 为转速;D 为叶轮直径; ρ 为流体密度; Δp 为压力增量。

1.6 模型验证

为了验证模型的准确性,选取冷却系统一维仿真散热器的出水温度、出风温度、风量以及换热量与实验数据进行对比。

搭建风洞实验台,对发动机冷却系统散热器的实际性能进行测试,主要实验装置有离心风机、水泵、水加热器、喷嘴、流量调节阀、水箱、采样器等,其中通过水加热器模拟发动机发热量,通过温度、压力、流量传感器记录实测数据。风洞实验台如图 6 所示。

在水散热器进口冷却液温度为 88.6 °C、水量为 1.62 kg/s,空气侧进风温度为 29.0 °C、风速为 8.01 m/s 的工况下进行仿真运行,得到水散热器的出水温度、出风温度、风量以及换热量的数值,并与实验数据对比,结果见表 2 所列。

从表 2 可以看出,仿真结果与实验值之间的

误差在 10% 以内,从而验证了本文仿真模型的准确性。



图 6 风洞实验台

表 2 实验值与仿真值的对比

指标	出水温度/ °C	出风温度/ °C	风量/ (kg · s ⁻¹)	换热量/ kW
实验值	83.20	51.80	1.64	36.94
仿真值	83.66	49.73	1.61	33.57

2 冷却系统影响因素分析

2.1 环境温度对冷却系统的影响

环境温度是一个不稳定的外界因素,对冷却系统的运行状态有着重要影响。工程机械车辆通常在环境相对恶劣的场所进行作业,而叉车一般在港口码头、机场车站以及仓库工厂等场所进行装卸、搬运作业,这些地方受阳光直接照射或相对封闭,导致区域温度较高,对叉车发动机冷却系统性能有着较高的要求。

本文分析了叉车发动机冷却系统性能随室外环境温度变化的情况,如图 7 所示。

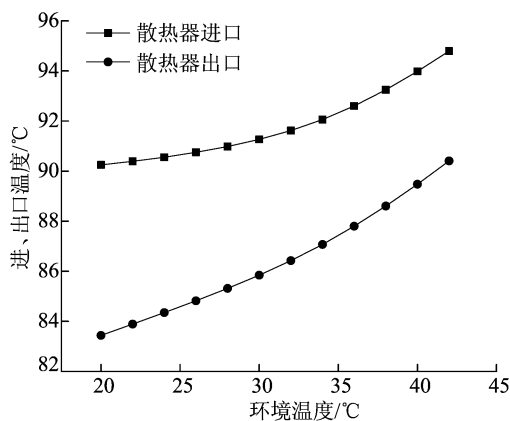


图 7 散热器进、出口温度随环境温度的变化

从图 7 可以看出:随着环境温度不断升高,水箱散热器进、出口冷却液温度持续上升;随着环境温度升高,散热器进出口温差在显著减小。这表明散热器的换热能力在降低,冷却系统冷却性能显著下降。

因此,冷却系统的设计需要考虑高温工况下散热器的散热性能会降低,应该适当提高极限工况下冷却系统的性能,以保障冷却系统的散热能力仍能满足发动机的散热要求。

2.2 水泵传动比对冷却系统的影响

水泵作为冷却液循环的动力来源,对冷却系统的散热性能有着重要影响。随着水泵传动比的提高,水泵转速不断增大,冷却液循环加快,导致散热器的换热量增大。

散热器冷却液进、出口温度随水泵传动比变化情况如图 8 所示。

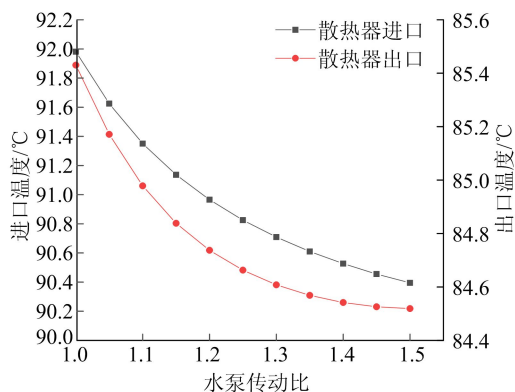


图 8 散热器冷却液进、出口温度随水泵传动比变化

从图 8 可以看出:随着水泵传动比的提高,散热器进、出口冷却液温度逐渐降低,并且降低速率逐渐减缓;同时,随着水泵传动比增加,散热器进出口冷却液温差逐渐减小。

考虑到提高水泵传动比会增加水泵的消耗功率,建议在一定范围内适当提高传动比,改进冷却系统的散热性能。

2.3 散热器翅片波距对冷却系统性能的影响

散热器是发动机冷却系统的重要部件,其结构对发动机冷却系统的散热性能有着重要影响,叉车发动机舱的空间较为紧凑,留给散热器的空间相对有限。因此,在空间尺寸相对固定的情况下,优化散热器结构,提高传热系数,增强冷却系统的散热能力成为关键。

对于管带式散热器,翅片波距是影响散热器性能的主要参数,本文重点探讨散热器翅片波距

对发动机冷却系统性能的影响。

保持管带式水散热器芯体结构尺寸、水管结构不变,翅片结构除波距外其余不变,通过只改变散热器翅片波距来探究其对冷却系统的影响。

本文在原散热器的基础上设计了 2 款散热器,散热器翅片波距依次减小 0.3 mm,见表 3 所列。

表 3 散热器优化参数表

散热器	原散热器	优化散热器 1	优化散热器 2
翅片波距/mm	3.8	3.5	3.2

不同散热器结构下,散热器进、出水冷却液温度变化如图 9 所示。

从图 9 可以看出,随着散热器翅片波距减小,换热有效面积增加,换热量提高,进、出水温差逐渐升高,表明优化后的散热器散热性能提高,对冷却系统有着积极的影响。

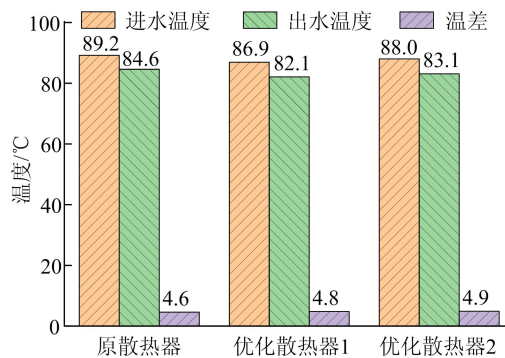


图 9 散热器进、出水冷却液温度变化

3 结 论

本文采用 AMESim 仿真软件建立了叉车发动机冷却系统模型,并基于风洞实验台验证了模型的准确性,分析了环境温度、水泵传动比以及散热器翅片波距对冷却系统性能的影响,研究结论如下:

(1) 发动机冷却系统受环境温度影响较大,随着环境温度的升高,冷却系统的冷却性能会显著降低。因此,冷却系统的设计应该适当提高极限工况下冷却系统的性能以保障高温工况下发动机的散热要求。另外,在高温环境下,应及时查看水温,防止发动机出现“开锅”现象。

(2) 提高水泵传动比可降低水箱散热器冷却液温度,对冷却系统性能有所提高,且提升趋势逐渐变缓。因此,考虑到水泵消耗功率的增加,应在

一定范围内适当提升传动比,以提高冷却系统散热性能。

(3) 本文通过适当减小散热器翅片波距优化设计了2款散热器,相较于原散热器翅片波距依次减小0.3 mm,结果表明,优化后的散热器进出水温差依次提高0.2、0.3℃。

[参 考 文 献]

- [1] 李进卫. 叉车现代技术的发展趋势[J]. 建筑机械, 2015(6): 22-29, 4.
- [2] 成晓北, 潘立, 鞠洪玲. 现代车用发动机冷却系统研究进展[J]. 车用发动机, 2008(1): 1-7.
- [3] 姚仲鹏, 王新国. 车辆冷却传热[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.
- [4] PANG H H, BRACE C J. Review of engine cooling technologies for modern engines[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2004, 218(11): 1209-1215.
- [5] 崔翰星, 徐向华, 梁新刚, 等. 四缸柴油机冷却水套流动与传热仿真研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(3): 477-479.
- [6] 刘婷婷, 王彤, 杨波, 等. 汽车水泵性能三维数值模拟及结构改进[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(6): 961-963.
- [7] 朱恂, 廖强. 管带式汽车散热器流动阻力与传热性能分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(8): 40-43.
- [8] UHL B, BROTZ F, FAUSER J. Development of engine cooling systems by coupling CFD simulation and heat exchanger analysis programs[J]. Simulation and Modeling, 2001, 22(6): 35-39.
- [9] GU N, NI J M. Simulation of engine cooling system based on AMESim [C]//Proceedings of the 2009 Second International Conference on Information and Computing Science-Volume 04. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2009: 117-120.
- [10] LI X, ZHU L, ZHU Y C, et al. Performance simulation study of vehicle engine cooling system [C]//Proceedings of China SAE Congress 2018: Selected Papers. [S. l.]: SAE, 2020: 1-16.
- [11] 付永领, 齐海涛. LMS Imagine. Lab AMESim 系统建模和仿真实例教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第451页)

值趋于稳定;当选取合适的激光线宽度时,车轮仿真测量结果与单边轮实验测量结果的误差绝对值都小于0.5 mm,满足实际测量需要。

本文提出的基于光刀法列车车轮参数动态测量方法方便了系统的整体设计,对该类研究具有一定的指导意义。

[参 考 文 献]

- [1] XING Z Y, CHEN Y J, WANG X H, et al. Online detection system for wheel-set size of rail vehicle based on 2D laser displacement sensors [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(4): 1695-1702.
- [2] GRAW. Wheel measurement system [EB/OL]. (2018-08-13) [2021-03-10]. <http://www.graw.com/pomiary-kol-taboru/laserowy-system-do-pomiaru-kol-taboru.html>.
- [3] 庄明磊. 基于机器视觉的机车车轮状态在线检测系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [4] 王一波, 柳建. 面向手持光刀法三维测量的点云滤波算法[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 111-114.
- [5] 胡杨, 方素平. 线结构光条纹中心提取方法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 196-200.
- [6] CHENG X Q, CHEN Y G, XING Z Y, et al. A novel online detection system for wheelset size in railway transportation [J]. Journal of Sensors, 2016, 88(5): 1-15.
- [7] GONG Z, SUN J H, ZHANG G J. Dynamic measurement for the diameter of a train wheel based on structured-light vision[J]. Sensors, 2016, 16(4): 564-582.
- [8] GONG Z, SUN J H, ZHANG G J. Dynamic structured-light measurement for wheel diameter based on the cycloid constraint[J]. Applied Optics, 2016, 55(1): 198-207.
- [9] CHEN X, SUN J H, LIU Z, et al. Dynamic tread wear measurement method for train wheels against vibrations [J]. Applied Optics, 2015, 54(17): 5270-5280.
- [10] PAN X, LIU Z, ZHANG G J. Reliable and accurate wheel size measurement under highly reflective conditions [J]. Sensors, 2018, 18(12): 4296-4315.

(责任编辑 胡亚敏)