

# 舰艇高温管路热振耦合试验系统研制

周涛<sup>1</sup>, 贾地<sup>1</sup>, 高晟耀<sup>1</sup>, 丁哲宇<sup>2</sup>, 唐宇航<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军 92578 部队, 北京 100161; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350116)

**摘要:** 针对舰艇高温管路系统难以同时进行振动与高温加载的技术难题, 研制了管路高温振动耦合试验系统, 为舰艇高温管路的减振设计提供有效的测试平台; 该系统分为热环境模拟子系统和振动激励子系统; 以石英灯为辐射热源, 设计圆筒形加热器, 采用 ANSYS 对温度场进行瞬态热分析, 通过试验与仿真对比表明热环境模拟子系统具有较优的温度加载特性; 以电磁激励器、功率放大器、数据采集器共同组成振动激励子系统; 在 20 °C、100 °C、200 °C、300 °C、400 °C、500 °C 等温度下对刚性吊架管路与阻尼吊架管路进行热振耦合试验, 结果表明温度对管路的振动特性有显著影响, 且阻尼吊架能有效降低管路的振动水平; 所提出的方法可用于高温管路振动特性试验。

**关键词:** 高温管路; 热振耦合试验; LabVIEW; 热辐射

## Development of Thermal Vibration Coupling Test System for Warship Pipeline

Zhou Tao<sup>1</sup>, Jia Di<sup>1</sup>, Gao Shengyao<sup>1</sup>, Ding Zheyu<sup>2</sup>, Tang Yuhang<sup>1</sup>

(1. No. 92578 Unit of PLA, Beijing 100161, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

**Abstract:** To investigate the vibration reduction of the high-temperature pipeline of marine, a new thermal-vibration joint test system was designed. The joint test system is composed of thermal environment simulation subsystem and vibration excitation subsystem. A series of quartz lamps was arranged in the form of cycle for heating the pipeline evenly. The thermal environment of the pipeline was analyzed by ANSYS. On the other hand, the actual heating test results show the effectiveness of the analysis. The vibration subsystem is composed of magnetic vibration exciter, power amplifier and multi-channel data acquisition system. The thermal-vibration joint tests of rigid pipeline and damping pipeline were carried out at 20 °C, 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C and 500 °C. The results show that the temperature has a significant effect on the vibration characteristics of the pipeline, and the damping can effectively reduce the vibration level of the pipeline. The proposed method can be used to test the vibration characteristics of high temperature pipeline.

**Keywords:** high temperature pipeline; thermal-vibration coupling test; LabVIEW; thermal radiation

## 0 引言

管路系统是舰艇内部传输介质的主要通道, 同时也是振动和噪声的主要传播途径。如何有效控制管路系统振动噪声对提升舰艇声隐身性能有着至关重要的意义。

国内外学者已对管路的减振设计开展了广泛且深入的研究。Fang 和 Lyons<sup>[1]</sup> 在 20 世纪 90 年代发现在充液管路外表面包覆一层阻尼材料可以抑制管路的轴向振动, 能有效降低管路系统的振动噪声辐射。刘帆等<sup>[2]</sup> 以内部设有管路的圆柱壳结构为研究对象, 在管路内、外侧敷设不同厚度的橡胶层, 发现敷设的橡胶层厚度与圆柱壳结构水下减振降噪效果密切相关。尹志勇等<sup>[3]</sup> 在舰船管道外表面不同位置敷设不同面积的粘弹性阻尼, 并在室温下对各种情况下的减振效果进行了评估研究。卜峥嵘等<sup>[4]</sup> 对高温高压蒸汽管道的振动特性进行分析, 给出在保证管系应力合格的前

提下加装减振装置的治理方案。已有的研究主要集中在常温下管路的减振设计, 对温度因素考虑较少。

在高温管路减振试验方面, 主要技术途径为: 管路内加热和管路外加热<sup>[5]</sup>。肖坤等<sup>[6]</sup> 针对高温管路减振难题提出金属橡胶包覆阻尼结构, 并通过高温蒸汽发生装置产生高温蒸汽对管路进行内加热, 但由于管路表面散热面积较大, 其最高试验温度仅为 100 °C, 无法有效验证其机构在高温下的减振性能。采用石英灯进行辐射加热是一种可适应结构形状的高效加热方式。NASA dryden 研究中心就与美国空军展开合作, 对 YF-12 整机开展了上千摄氏度级别的结构热试验研究, 为了达到目标温度, 试验中总共应用了 15 870 支石英灯<sup>[7]</sup>。彭富豪等<sup>[8]</sup> 设计了用于平板结构的热振耦合试验系统, 并完成板状结构的减振试验。Ding 等<sup>[9]</sup> 针对设备基座的复杂结构研制一套热振联合试验系统, 并完成设备基座的高温振动试验 (300 °C)。卫国等<sup>[5]</sup> 针对

收稿日期: 2020-09-30; 修回日期: 2020-11-16。

作者简介: 周涛 (1987-), 男, 河北唐山人, 硕士, 工程师, 主要从事船舶振动噪声控制方向的研究。

引用格式: 周涛, 贾地, 高晟耀, 等. 舰艇高温管路热振耦合试验系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(5): 136-140.

的管路的高温试验同样设计了平板状石英灯阵加热装置, 无法保证管路的受热均匀性。

虽然现有技术可实现管路的高温振动试验, 但其无法确保结构的受热均匀性, 且高温环境无法准确模拟。本文将针对管路系统的特殊结构形式, 以石英灯为热源、搭建弧形加热工装, 采用 LabVIEW 进行精确温控, 实现管路系统的高温振动耦合试验, 为高温管路的减振设计提供有效的验证途径。

### 1 系统结构及原理

试验系统的整体结构框图如图 1 所示, 主要包括两部分: 热环境模拟试验系统和振动激励试验系统。热环境模拟试验系统精确生成管路振动试验需要的高温环境, 振动激励试验系统模拟管路所受的外部载荷并采集管路的振动响应, 两个系统共同作用从而实现不同温度下管路系统的振动特性试验。

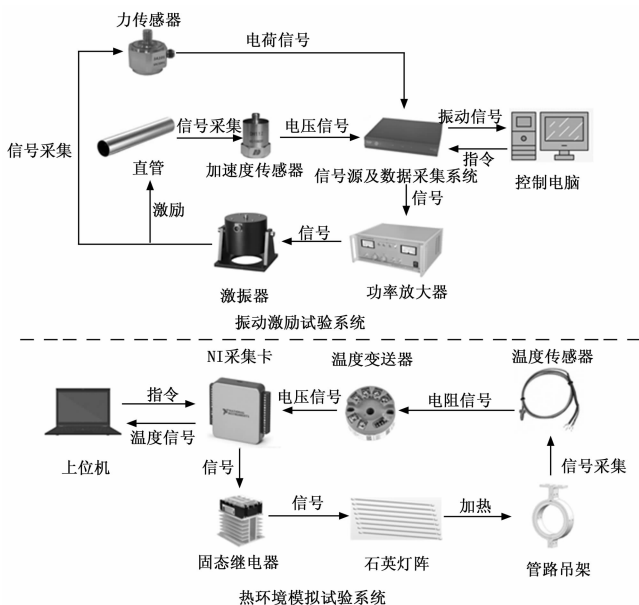


图 1 高温管路热振耦合试验系统结构框图

以高温管路减振吊架为例, 目标管路两端通过管路吊架固定在安装基座上。两个基座再通过 T 型螺栓紧固在两个 T 型槽重载铸铁平台上, 形成固定约束边界条件。在管路中点正下方为一台安装于升降台上的电磁激振器, 电磁激振器可以通过升降台来调节所处高度, 从而改变激振杆与管路之间的预紧力。在管路中点正上方安装一个加速度传感器以测量此处的加速度信号。由于管路系统左右两端呈中心对形式, 考虑试验成本和试验操作简便性, 仅在管路一端吊架处安装石英灯加热器, 以模拟实际振动工况中的高温环境。管路吊架以螺纹连接的方式安装有温度传感器, 其电阻值将随着温度改变而改变, 温度变送器对该信号进行调理并将其转换为电压信号经过放大电路放大后传递给 NI-DAQ 多功能数据采集卡, NI 采集卡将收到的电压信号转换为数字信号传递给上位机, 操作人员可在电

脑上经 LabVIEW 程序处理后给予 NI 采集卡相关指令, NI 采集卡通过控制固态继电器的通断电状态来调节石英灯加热器的通电状态, 从而实现管路的加热与保温工作。

### 2 热环境模拟试验系统

高温环境生成与控制主要由自制的石英灯加热系统来实现, 如图 2 所示, 该加热系统由 12 根长 600 mm, 管径 15 mm 的石英灯作为辐射热源, 每根石英灯额定功率为 1 500 W, 以并联方式安装在石英灯固定板上。石英灯固定板的材质为可以承受 1 300 °C 高温的 310S 不锈钢。为降低石英灯加热系统对周边环境的加热导致人员健康损伤和设备损害, 同时更好地利用石英灯热源对工装进行加热, 对石英灯固定板的表面进行抛光处理, 以利于反射石英灯光线。另一个方面, 在石英灯固定板和金属隔热板中间填充一层硅酸铝隔热层, 以起到更好的保温隔热作用。石英灯加热器通过加热器支架安装在底部铸铁平台上, 保持石英灯与管路的相对位置。

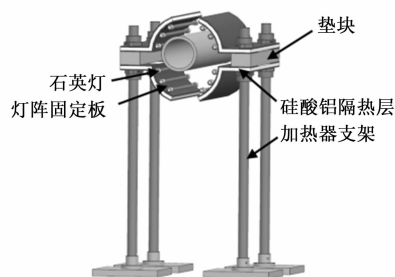


图 2 石英灯加热器

所用石英灯的灯丝为碳纤维单螺旋结构, 其由碳纤维发热体绕制而成, 具体结构如图 3 所示。

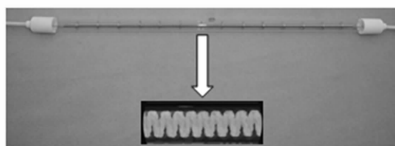


图 3 石英加热管

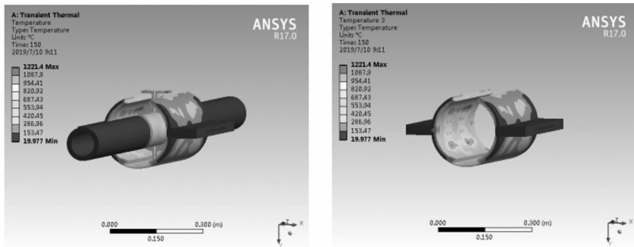
根据实际参数, 利用有限元方法 (ANSYS, Transient Thermal) 对加热装置进行瞬态热分析, 确保管路能可靠地加热到目标温度, 并进行有效的结构参数调整, 使管路能充分被加热, 减少电能损耗。采用文献 [9] 和 [10] 提出的石英灯加热模型, 可将 12 根石英灯管简化为等体积的圆柱体, 其体积热流为 21 220.66 kW/m<sup>2</sup>。石英灯加热系统中所用的材料主要包括 310S 不锈钢, 石英, 304 不锈钢, 硅酸铝纤维, 它们的热物理性如表 1 所示。另外石英和不锈钢的发射率分别为 0.9 和 0.8, 其余材料吸收率均设为 0.8。

为了模拟周围空气与各部件自然对流, 给模型各部件表面施加对流换热系数, 其中不锈钢隔热板外侧及管路表面对流换热系数设为 15 W/(m<sup>2</sup>·K), 石英灯阵固定板内侧和吊架表面对流换热系数均设为 8 W/(m<sup>2</sup>·K)。

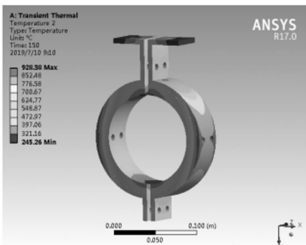
表 1 石英灯加热系统各材料的热物理性

材料	密度 Kg/m <sup>3</sup>	比热容 J/(kg·K)	热导率 W/(m·K)
304	7930	500	16.3
310S	8030	502	13.8
石英	2200	857	2.24
硅酸铝纤维	100	900	0.035

由瞬态热分析得到加热器模型温度分布及吊架温度分布如图 4 所示。由图 4 可知，石英灯固定板内侧表面出现最高温度，其值为 1 221.4 ℃，低于 310S 不锈钢材料的熔点温度（1 300 ℃）。吊架最高温度出现在外环上，其值为 928.38 ℃，低于 304 不锈钢材料的熔点温度（1 398 ℃）。由于吊架内环处要安装金属橡胶，此区域要作为重要考察对象，而此处大部分区域的温度都保持在 500 ℃左右，且温度分布较为均匀，满足试验要求。



(a) 石英灯加热器整体模型温度分布 (b) 加热器模型温度分布



(c) 吊架温度分布

图 4 瞬态热分析温度分布

在上位机利用 LabVIEW 进行温度控制程序的编制与调试，温度控制程序流程图如图 5 所示。温度控制原理为：采集目标区域的温度并判断实际温度与目标温度的偏离程度，若实际温度未达到目标温度值的下限则控制石英灯阵进行最大功率辐射加热；若实际温度已超过目标温度值的上限则停止石英灯阵的加热控制；若实际温度介于目标温度的上下限之间则控制石英灯阵处于半功率（半负荷）辐射加热。

为了验证瞬态热分析的正确性，控制石英灯加热器将吊架直接加热到 500 ℃，测温点选取在吊架下方两螺栓中间处，将实际温升曲线与有限元仿真温升曲线进行对比，结果如图 6 所示。由图 6 可知，在吊架开始升温时，由于灯管通电时间较短，热源自身存在升温的过程，这使得吊架实际温度比仿真温度低 2~3 ℃。在 40~65 ℃温度范围内，实际温升曲线与仿真温升曲线重合程度较高。当温度高于

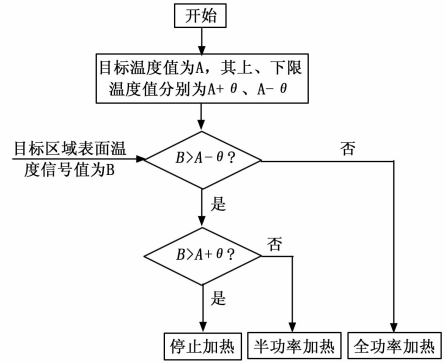


图 5 LabVIEW 温度控制流程图

70 ℃时，由于实际试验中热流损耗大于仿真中的理想情况（即对流系数不变），使得实际温度总是比仿真温度低 5~7 ℃。当温度达到 500 ℃时，上位机开始控制灯管通断电，使实际温度保持在 500 ℃左右，而仿真温度由于热源恒定，温度还会再上升一点。

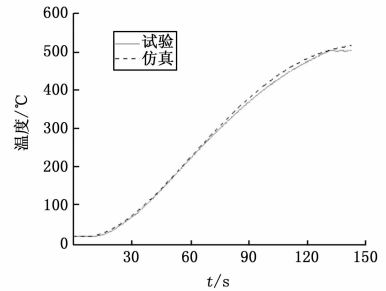


图 6 实际与仿真温升对比曲线

### 3 振动激励试验系统

如图 1 上侧所示，振动激励试验系统所用设备包括：数据采集器，电磁激振器，功率放大器，压电式动态力传感器，IEPE 加速度传感器，具体参数如表 2 所示。

表 2 振动激励试验系统主要设备

名称	型号	厂商	主要参数
数据采集器	VT-9002	杭州亿恒	2 个电荷输入通道；2 个电压输入通道；1 个输出通道电磁
激振器	E-JZK-50	杭州亿恒	激振力范围 0~500 N
功率放大器	E5878	杭州亿恒	最大输出功率
压电式动态力传感器	YD-303	杭州亿恒	测力范围±2 kN；灵敏度 3.00 pC/N；工作温度-40~150 ℃
IEPE 加速度传感器	1A102E	东华测试	灵敏度 10.47 mV/g；量程±500 g

当振动激励系统运行时，上位机通过 VT-9002 的信号输出通道将正弦扫频信号输出至功率放大器进行放大以驱动电磁激振器对管路目标激振部位施加期望的外部激励。安装在激振器与激振杆之间的动态力传感器可实时测量激

振器所输出的动态力信号, 并输入到数据采集器进行激振力的反馈控制。将 IEPE 压电式加速度传感器安装在目标测点可实时测量管路的振动响应, 并由 VT-9002 的输入通道实时采集。

### 4 高温管路热振耦合试验

为验证所设计的管路减振试验系统的可行性, 搭建了高温管路热振耦合试验系统, 如图 7 所示。将一根外径 108 mm, 内径 100 mm 的 304 不锈钢管分别经刚性吊架和阻尼吊架安装在试验系统中。分别对刚性连接管路及阻尼吊架连接管路进行 5~300 Hz 频率范围内的正弦扫频激励试验, 设置试验温度分别为 20 °C、100 °C、200 °C、300 °C、400 °C、500 °C。采集各传感器在不同温度条件下的响应信号, 对比不同温度下阻尼吊架对管路振动响应特性的影响。

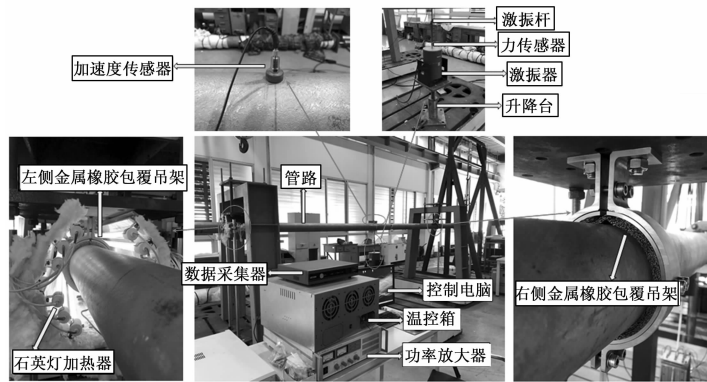


图 7 高温管路热振耦合试验系统

考虑工程实际中低阶固有频率所携带的能量占比较高, 其对管路系统的影响远大于高频共振。为了使高温管路振动试验符合工程实际并缩短试验时间, 下面将重点考察管路系统的一阶模态。利用安装基座上的加速度响应测点采集的振动加速度响应信号和电磁激振器激励管路的激振力可获得管路的振动加速度导纳  $Z$  (振动加速度基准值为  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ )。

$$Z = 20 \lg \left( \frac{a}{F} \right) + 120 \quad (1)$$

式中,  $a$  为安装基座测点布置的加速度响应,  $F$  为激振点输入力。

高温管路热振耦合试验结果如图 8~9 和表 3 所示, 其中刚性吊架管路的四阶模态对应阻尼吊架管路的三阶模态。

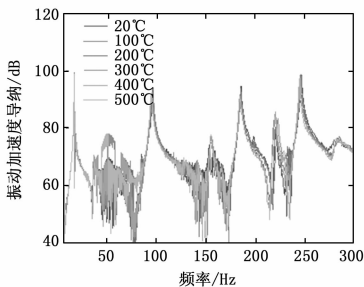


图 8 刚性吊架管路加速度阻抗曲线

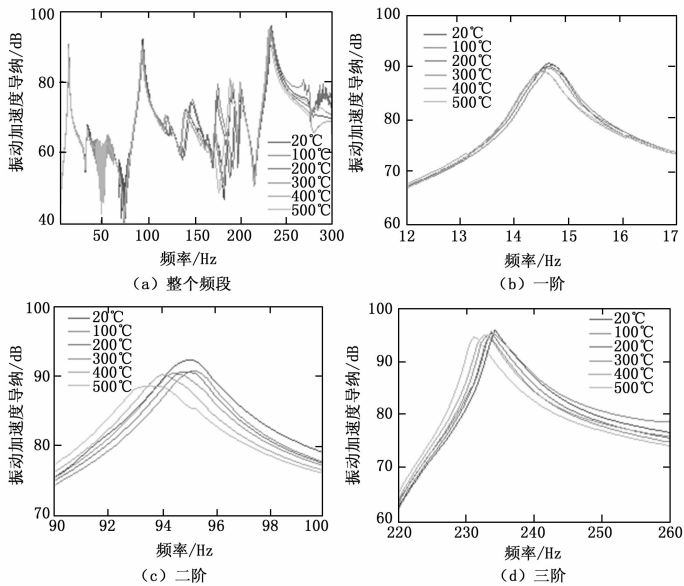


图 9 阻尼吊架管路加速度导纳曲线

由图 8 和图 9 可知, 温度对刚性吊架管路和阻尼吊架管路的振动响应都有一定的影响。温度越高, 管路系统各阶模态的共振频率都随之减小, 且振动加速度导纳整体呈下降趋势。

由表 3 可知, 随着温度升高, 一阶模态处的插入损失逐渐升高, 500 °C 下的插入损失与常温下的插入损失之间的差值为 1.219 94 dB。二阶模态和三阶模态处的插入损失随温度升高其值出现波动, 不再单调递增, 不同温度下的插入损失最大差值分别为 1.318 63 dB 和 0.644 79 dB。

表 3 不同温度条件下各阶模态下的插入损失 (dB)

温度	一阶	二阶	三阶
20 °C	8.537	1.915	2.957
100 °C	8.813	3.234	3.251
200 °C	8.997	3.178	3.107
300 °C	9.261	2.225	3.005
400 °C	9.613	1.95	2.606
500 °C	9.757	2.969	2.784

### 5 结束语

针对船舶高温管路减振试验难题, 以石英灯阵为辐射热源, 设计了高温管路热振耦合试验系统, 对温度场进行瞬态热分析, 同时基于 LabVIEW 开发了石英灯阵温控程序, 通过有限元分析与实际加热测试验证了所研制的温度加载模块能满足不同温度的加热需求, 最后通过刚性吊架高温管路与阻尼吊架高温管路的对比试验表明所研制的试验系统可用于不同温度背景下的管路减振试验验证。

#### 参考文献:

[1] Fang J, Lyons G J. Structural Damping of Tensioned Pies with Reference to Cables [J]. Journal of Sound and Vibration, 1996.

193 (4): 891-907.

[2] 刘帆, 周其斗, 吕晓军. 管路敷设橡胶层对圆柱壳结构振动与声辐射的影响 [J]. 舰船科学技术, 2017 (2): 70-74.

[3] 尹志勇, 吴江海, 孙凌寒. 管路阻尼敷层减振效果评估研究 [J]. 船舶力学, 2018, 22 (8): 127-134.

[4] 卜崢嵘, 程勇明, 安付立, 等. 高温高压蒸汽管道振动分析治理 [J]. 华电技术, 2018, 40 (5): 41-44.

[5] 卫国, 于韶明, 芦田, 等. 管路系统环境试验技术 [J]. 导弹与航天运载技术, 2017 (5): 93-96.

[6] 肖坤, 白鸿柏, 薛新, 等. 高温管路包覆金属橡胶耗能特性及参数识别 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42 (1): 11-17.

[7] Jenkins J M, Quinn R D. Historical perspective of the YF-12A thermal loads and structures program [R]. NASA-1996-104317.

[8] 彭富豪, 吴乙万, 白鸿柏, 等. 板状结构可变边界热振耦合试验系统研制 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 241-245.

[9] Ding Z Y, Bai H B, Wu Y W, et al. Experimental Investigation of Thermal Modal Characteristics for a Ship's Foundation under 300 °C [J]. Shock and Vibration, 2019, 2714930.

[10] 丁哲宇. 高温环境下金属橡胶包覆管路结构动力学特性研究 [D]. 福州: 福州大学, 2020.

(上接第 125 页)

表 1 第 10 秒跟踪误差仿真数据表

线速度 $v/(m/s)$	角速度 $w/(rad/s)$	输入误差 $u1$	输入误差 $u2$	系统误差 $e1$	系统误差 $e2$	系统误差 $e3$
0.24999	0.31250	$-2.48341 \times 10^{-6}$	$-8.16111 \times 10^{-12}$	$-4.69721 \times 10^{-6}$	$-3.37825 \times 10^{-6}$	$1.63234 \times 10^{-11}$

期望的线速度和角速度。对于第 10 秒的系统输入误差, 误差  $u1$  和  $u2$  都能够收敛于零。从表 1 中可以看到, 移动机器人的系统误差  $e1, e2, e3$  都能够收敛于零, 表明了移动机器人的横轴误差、纵轴误差及角速度误差都能够无限趋向于零。根据上述分析, 基于 LOQO 内点法的模型预测控制方法能够精确的完成带速度约束的移动机器人轨迹跟踪任务。

### 4 结束语

为了解决具有速度约束的移动机器人视觉轨迹跟踪问题, 本文提出了一种基于 LOQO 内点法的模型预测控制方法。首先在眼到手框架下建立了移动机器人系统误差模型并给出基于模型预测控制的移动机器人视觉伺服跟踪的代价函数。同时考虑移动机器人速度约束, 采用障碍函数法将不等式约束转化为等式约束, 并引入到代价函数中。进而, 采用 LOQO 内点法对代价函数进行求解, 得到基于视觉的轨迹跟踪控制器。最后, 仿真结果表明, 本文所提出的算法能够很好地完成视觉轨迹跟踪任务。

### 参考文献:

[1] Hajiloo A, Keshmiri M, Wang X, et al. Robust online model predictive control for a constrained image-based visual servoing [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63 (4): 2242-2250.

[2] Dani A P, Gans N, Dixon W E. Position-based visual servo control of leader-follower formation using image-based relative pose and relative velocity estimation [A]. IEEE American Control Conference [C]. 2009, 5271-5276.

[3] Malis E, Chaumett F. 2-1/2 D visual servoing with respect to unknown objects through a new estimation scheme of camera displacement [J]. Computer Vision, 2000, 37 (1): 79-97.

[4] Liu Y H, Wang H, Lam K. Dynamic Visual Servoing of Robots in Uncalibrated Environments [A]. Proceedings of the 2005

IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Barcelona, 2005, 3131-3136.

[5] 康振波. 基于图像的机器人双目视觉伺服系统控制研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.

[6] 杨芳, 王朝立. 不确定非完整移动机器人的轨迹跟踪控制 [J]. 控制工程, 2012, 19 (2): 258-261.

[7] Dixon W E, Dawson D M, Zergeroglu E, et al. Adaptive tracking control of a wheeled mobile robot via an uncalibrated camera system [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics), 2001, 31 (3): 341-352.

[8] Li Z J, Deng J, Lu R, et al. Trajectory-tracking control of mobile robot systems incorporating neural-dynamic optimized model predictive approach [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46 (6): 740-749.

[9] 仇翔, 陈旭, 刘安东, 等. 移动机器人视觉伺服系统上位机软件的设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (4): 106-110.

[10] Gu D, Hu H. Model predictive control for simultaneous robot tracking and regulation [A]. International Conference on Intelligent Mechatronics & Automation [C]. 2004, 212-217.

[11] 席裕庚. 预测控制 (第 2 版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.

[12] Ke F, Li Z J, Yang C. Robust tube-based predictive control for visual servoing of constrained differential-drive mobile robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65 (4): 3437-3446.

[13] 刘安东. 网络化系统的滚动时域控制与估计研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.

[14] Liu A, Yu L. Moving horizon SINR estimation for wireless networked systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Information, 2014, 10 (1): 431-438.

[15] Byrd R H, Hribar M E, Nocedal J. An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming [J]. SIAM Journal on Optimization, 1999, 9 (4): 877-900.