

制动系统管路管夹位置灵敏度分析与优化设计

顾海浩 鄢艳丽 章 义

(中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京)

摘 要 [目的]在轨道车辆制动系统制动管路设计阶段,优化管夹的支撑位置可以使制动管路有效避开车体等激励频率,进而降低管路振动松脱的风险,故需对其优化方案进行研究。[方法]以城市轨道交通车辆某段制动管路为例,创建了车体和制动管路的有限元模型,得到了车体和制动管路的固有频率;基于灵敏度分析方法,以管夹位置为设计变量,获得了对制动管路固有频率影响较大的4个管夹位置参数;同时,以制动管路固有频率远离车体固有频率范围为优化目标,建立优化模型;基于遗传算法对4个管夹位置参数进行优化。[结果及结论]通过优化设计实现了制动管路固有频率的调节;对比不同优化方案的效果发现,优化方案2可以有效使制动管路避开车体固有频率范围,达到了避振效果。

关键词 轨道车辆; 制动管路; 管夹位置; 灵敏度; 遗传算法

中图分类号 U270.35

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.040

Sensitivity Analysis and Optimization Design of Brake System Pipeline Clamp Positions

GU Haihao, YAN Yanli, ZHANG Yi

(CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China)

Abstract [Objective] During the design phase of brake system pipeline for rail vehicles, optimizing the support positions of clamps can effectively avoid the excitation frequency of the vehicle carbody and reduce the risk of pipeline vibration and loosening. Therefore, it is necessary to study optimization solutions for clamp positions. [Method] Taking a segment of the brake system pipeline for urban rail transit vehicles as example, a finite element models of the vehicle carbody and brake system pipeline is created to obtain their natural frequencies. Using sensitivity analysis, with clamp positions as design variables, four clamp position parameters that significantly affect the natural frequencies of the brake system pipeline are identified. Meanwhile, an optimization model is established with the goal of adjusting the natural frequencies of the brake system pipeline away from the natural frequency range of the vehicle body. Genetic algorithm is then applied to optimize the four clamp position parameters. [Result & Conclusion]

Through optimization design, the natural frequencies of the brake system pipeline are adjusted. Comparing the effects of different optimization schemes, it is found that optimization scheme 2 can effectively keep the brake system pipeline away from the natural frequency range of the vehicle carbody, achieving the desired vibration avoidance effect.

Key words rail vehicle; brake system pipeline; clamp position; sensitivity; genetic algorithm

管路系统是轨道车辆空气制动系统动力传输的重要通道,其走向复杂。管夹是管路支撑和固定的重要零件,对提供管路系统刚度、改变管路频率具有重要作用,合理的管夹布置是避免管路振动最有效、最便捷的方法。目前而言,制动管路的管夹布置通常是设计人员经验进行布置,其随意性较大,且缺乏具体的理论指导^[1-4]。而管夹布置的随意性可能会导致管路结构的固有频率与车辆部件的固有频率接近,从而引发共振,导致局部应力较大。因此,研究空气制动系统的管夹布局优化设计具有重要意义。

相关学者在管夹位置优化方面都做了一定程度的研究。文献[5]通过建立管道及其元件的数学模型,利用传递矩阵法得到了频域特征阻抗的变化规律,并采用粒子群优化算法优化了卡箍位置。文献[6]对发动机外部管路上的卡箍进行了灵敏度分析,选取了对管路动态特性影响较大的关键参数,并对关键参数进行了优化,实现了频率调节。文献[7]针对发动机管路布置的随意性,采用有限元法结合离散抽样分析了结构参数对管路系统的基频和随机振动的灵敏度,结果表明卡箍的间距比其他参数影响更明显,最后利用罚函数对卡箍位置进行了优化。

本文利用有限元软件分别对车体和制动管路进行模态分析,借助灵敏度分析方法确定了影响系统动态特性的若干重要的管夹位置参数,以一阶固有频率差值最大化为目标,对管夹位置进行了优

化,为制动管路的避振设计提供了参考。

1 车体和制动管路的有限元建模及模态分析

1.1 车体的有限元建模及模态分析

以某城市地铁车辆 Tc(带司机室的拖车)车车体为例,该车体主要由底架、侧墙、端墙、车顶和司机室组成。在 Nastran 软件进行有限元分析时,其整车的车体结构主要以壳单元的形式进行模拟;对车体底架相关的电气线槽、空气管路以及客室内装采用均布质量的形式施加在相应部位上;其他较大的设备包括空调、车下吊挂设备、座椅、车窗等设备以集中质量的形式施加在其重心上,通过 REB3 单元连接在受力点处。在有限元计算模型中,角焊和对接焊以焊缝处节点重合的形式进行模拟,搭接焊和塞焊以搭接壳单元进行模拟。根据上述简化原则,建立整车的有限元模型,如图 1 所示。

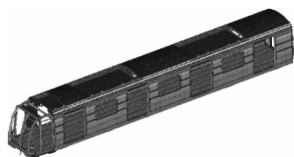


图 1 车体有限元模型

Fig. 1 Carbody finite element model

根据车体设计要求,选择车体铝结构和 AW0(空载)2 种模态分析工况,对约束状态下的车体进行模态分析,其主要计算结果见表 1,对应振型见图 2—图 7。

表 1 模态振型分析结果

Tab. 1 Mode analysis results

振型	铝结构状态/Hz	AW0 状态/Hz
一阶菱形振型	11.8	7.2
一阶垂弯振型	17.2	8.9
一阶扭转振型	18.4	11.1



图 2 一阶菱形振型(车体铝结构)

Fig. 2 First order rhombus mode (carbody aluminum structure)



图 3 一阶垂弯振型(车体铝结构)

Fig. 3 First order sag mode (aluminum structure)



图 4 一阶扭弯振型(车体铝结构)

Fig. 4 First order bending mode (aluminum structure)



图 5 一阶菱形振型(AW0)

Fig. 5 First order rhombus mode (AW0)



图 6 一阶垂弯振型(AW0)

Fig. 6 First order sag mode (AW0)

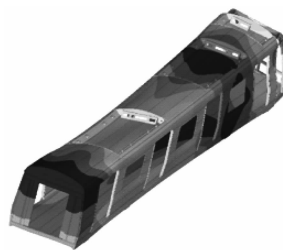


图 7 一阶扭弯振型(AW0)

Fig. 7 First order bending mode (AW0)

由图 2—图 7 可知:通过仿真分析可以得出车体在铝结构和 AW0 工况下的自振频率范围大约在 7~20 Hz 之间。因此,为了避免与车体发生共振问题,制动管路的频率需避开此区间。

1.2 制动管路的有限元建模及模态分析

以空气制动系统某段管路为例,制动管路采用直径为 22 mm,内径为 19 mm 的无缝不锈钢管,制动管路通过管夹进行固定。制动管路三维模型如图 8 所示。



图8 制动管路三维模型

Fig. 8 3D model of brake system pipeline

在建立制动管路有限元模型时,管路和管夹采用三维实体单元对其进行网格划分;将管夹简化为单自由度的弹簧阻尼单元,在管夹上弹簧阻尼单元的另一端施加全位移约束,建立有限元模型如图9所示。



图9 制动管路有限元模型

Fig. 9 Finite element model of brake system pipeline

对制动管路进行模态分析,仿真分析得到的结果如表2所示。图10为管路一、二、三和四阶主要模态振型。

表2 固有频率的模态分析结果

Tab. 2 Modal analysis results of natural frequency

阶数	固有频率/Hz
一阶	17.3
二阶	52.4
三阶	150.5
四阶	220.3

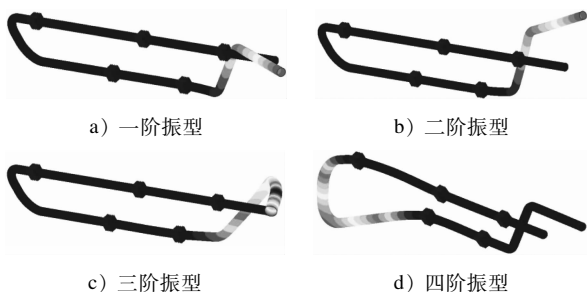


图10 制动管路各阶主要模态振型

Fig. 10 Main modes of each order for the brake system pipeline

由表2仿真计算结果可以看出,制动管路的一阶频率在车体激振频率范围内,存在共振风险,需要对管夹位置进行优化。

2 管夹位置的参数化与灵敏度分析

2.1 管夹位置的参数化建模

灵敏度分析方法研究的是各参数变化对系统某种特性的影响。以本文制动管路为例,选取管夹的安装位置作为参考变量,可以随时更改管夹的安装位置;通过仿真计算评估不同的管夹布局对制动管路系统固有频率的影响,从而对管夹的安装布置提供技术指导。

为了对管夹位置进行优化,首先需要将管夹位置参数化,如图11所示。对于P1上的管夹L1—L3,设P1左端约束处为参考原点,管夹 L_i 到P1参考原点的距离为 s_i ($i=1,2,3$);对于P2上的管夹L4—L6,设P2的左端约束处为参考原点,管夹 L_i 到P2参考原点的距离为 s_i ($i=4,5,6$),若参数全部确定时,制动管路上有唯一的管夹布置与之对应。

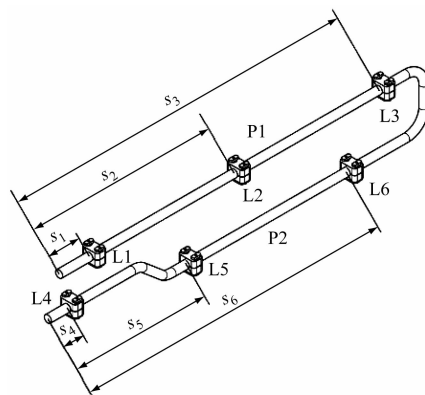


图11 管夹位置的参数化

Fig. 11 Parameterization of clamp position

2.2 管夹位置参数灵敏度分析

假设函数 $y=f(x)$, x 为自变量,当 $x=x_0$ 时增加 Δx ,设计响应变化为 Δy ,用 $\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x}$ 来表述在 x_0 附近 x 对 y 的敏感程度,因设计响应通常与多个设计参数有关,常用响应对该参数的偏导数来表述设计参数对设计响应的敏感程度^[6]。

以本文设计管路为例,当设计变量较多时,并不是每个变量都对系统动力学提出产生显著影响,需要筛选出对优化目标影响较大的变量并对这些变量进行优化设计,故在设计优化前需要进行灵敏度分析,对灵敏度影响较大的参数进行优化,文献[7]对灵敏度求解问题有详细描述。

对上文提到的6个变量进行一阶频率的灵敏度分析,如图12所示。由图12可以看出,管夹位置

L1、L3、L4 和 L6 对制动管路固有频率影响较大,因此选取这 4 个位置进行位置优化。

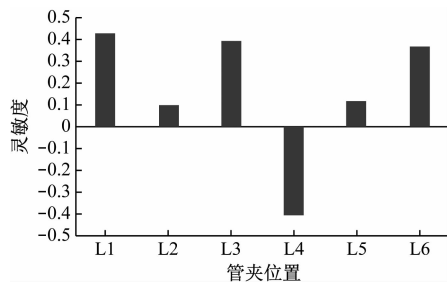


图 12 灵敏度分析结果

Fig. 12 Sensitivity analysis result

3 管夹位置优化设计

对制动管路管夹位置进行优化,首先需要制定合理的优化目标,同时要选择合适的算法对模型进行求解。

根据灵敏度计算结果,选出 4 个管夹位置参数进行优化,同时选取管夹的上、下极限位置,其取值范围见表 3。

表 3 管夹位置参数取值范围

Tab. 3 Parameter value range of clamp position

项目	L1 值/mm	L3 值/mm	L4 值/mm	L6 值/mm
下限	94	820	50	870
上限	544	980	96	995

3.1 制动管路避振优化模型

管路的避振优化一般以改善频率特性、抑制振动幅值为主。本文以通过频率调节,使制动管路的固有频率远离车体外部激励为目标对制动管路管夹位置进行优化。

根据振动设计要求,引入频率比 $\lambda = \omega/\omega_n$, ω 为车体工作频率, ω_n 为管路的第 n 阶固有频率。在工程中,通常取 $0.75 < \lambda < 1.25$ 的区间为共振区,由此可推导出,当结构的第 n 阶固有频率满足 $0.8\omega < \omega_n < 1.3\omega$ 时,结构有发生共振的风险。为了使第 n 阶固有频率离开共振区,该阶固有频率 P_n 需要满足 $P_n = (\omega_n - 0.8\omega)(\omega_n - 1.3\omega) > 0$ 。为了比较不同的管夹布局下第 n 阶固有频率远离共振区的程度,令 $Q_n = |\omega_n - 1.05\omega|$, Q_n 即为第 n 阶固有频率相对于共振区中心的偏离程度。优化的过程是在满足式 P_n 的同时尽可能使 Q_n 最大化。

以一阶固有频率为例,建立优化数学模型的目标函数如下:

$$\begin{cases} (\omega - 7)(\omega - 20) > 0 \\ \max Q_1 \end{cases} \quad (1)$$

3.2 基于遗传算法的管夹布局优化流程

遗传算法是目前工程领域常用的一种优化算法,它的产生受自然界生物进化过程的启发而来。基于生物进化原则,根据每代种群个体对环境的适应程度来对个体进行筛选,适应度高的个体将被保留,适应度低的个体将被舍弃,之后被保留的个体再经历交叉、变异 2 个步骤的处理,将其遗传信息传递给下一代。在逐代的遗传过程中,个体对环境的适应程度越来越高,越来越逼近最优解。

下面为优化流程:

步骤 1 根据灵敏度计算结果,选择出需要进行优化的 4 个管夹位置参数;

步骤 2 4 个管夹进行编码实现参数化;

步骤 3 通过实验设计方法设置样本数量进行数据抽样,调用仿真软件求解器得到所有被抽样的管夹布局所对应的结构固有频率;

步骤 4 通过数据拟合,得出表征管夹位置参数与结构固有频率间函数关系的近似数模;

步骤 5 步骤 4 中求解的数模是否满足误差要求,若满足要求则继续下一步优化计算,若不满足则回到步骤 2 中,增大样本量再重新计算;

步骤 6 以拟合得到的近似数模为基础,调用数值优化模块内置的 NSGA-II 算法进行优化计算,经过多代的交叉、变异操作后,找出出远离共振区的管夹位置解。具体的优化流程如图 13 所示。

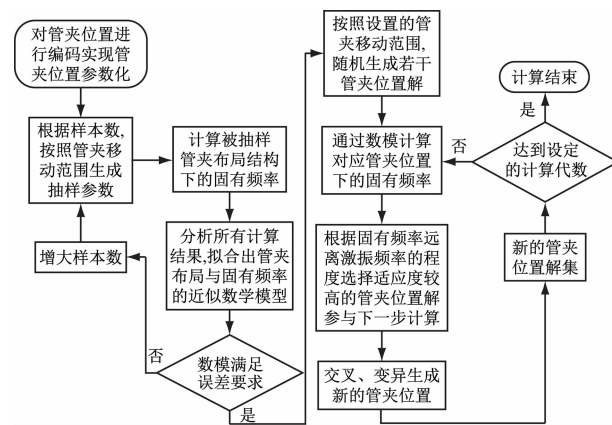


图 13 优化计算主要流程

Fig. 13 Optimization of calculation main process flow

3.3 数模误差分析

本文采用 ISIGHT 平台试验设计方法,该方法是根据实验设计原则而发展出的具体技术。通过

系统和有效的抽样方法来分析设计空间,评估设计变量实验设计所产生的数据,可以用于构造近似模型,已进行基于近似方法的优化设计。试验设计方法选择 Latin Hypercube (超拉丁立方),抽样数为 200,即选取 200 组不同的管夹位置参数进行计算;对抽样的 200 组管夹位置参数进行固有频率求解后,对数据进行拟合得到管夹位置参数与固有频率关系的近似数模;对数模误差进行分析,各阶固有频率的平均误差、最大误差、误差分布均方根与拟合度均满足要求,确认该数模可以用于之后的优化分析。数模误差分析结果如表 4 所示。

表 4 数模误差分析结果

Tab. 4 Numerical error analysis results

项目	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4	许可范围
平均误差	0.012 3	0.032 3	0.031 3	0.053 4	小于 0.3
最大误差	0.065 3	0.056 3	0.067 8	0.134 5	小于 0.3
误差均方根	0.022 3	0.043 1	0.037 8	0.059 8	小于 0.2
拟合度	0.997 0	0.987 0	0.956 0	0.953 0	大于 0.9

3.4 管夹支撑位置优化

在实际工程中,通常选用多目标遗传算法进行优化计算,根据试验设计方法中拟合得到的近似数模,选用多目标遗传算法进行优化计算设置遗传代数为 30 代,每代的种群数量为 18 个。计算结束后,从符合优化目标要求的管夹布局中挑选出适应度

较高的 3 组管夹进行布局,其优化结果见表 5。

表 5 管夹位置与固有频率优化结果

Tab. 5 Optimization results of clamp position and natural frequency

优化方式	管夹位置/mm				固有频率/Hz			
	L1	L3	L4	L6	ω_1	ω_2	ω_3	ω_4
优化前	94.0	994.0	60.0	950.0	17.3	52.4	150.5	220.3
优化 1	105.0	856.0	79.0	940.0	31.5	74.6	170.4	240.4
优化 2	120.0	932.0	65.0	930.0	40.2	80.1	189.2	245.3
优化 3	190.0	920.0	100.0	900.0	38.2	85.7	210.5	253.4

由表 5 的优化结果可以看出:优化后的制动管路一阶固有频率有效避开了共振区 $[7, 20]$ Hz,实现了错频的目标;同时,还有效避免了管路与车体的共振问题。对表 5 中 3 种优化方案进一步分析可以看出:优化 2 使得管路一阶固有频率最大限度地远离车体固有频率。

3.5 结果验证

为了进一步验证数模的准确性,在优化结束后使用有限元软件求解 3 种不同优化方式下结构的前四阶固有频率,并与数模结果进行对比(见表 6)。通过对比发现:仿真数模所求解的固有频率结果,与有限元计算结果误差不超过 1.5%。因此,基于数模的优化结果是可靠的。该数模可以用于替代有限元计算。

表 6 数模优化结果与有限元结果对比

Tab. 6 Comparison of numerical simulation optimization and finite element results

方法	优化 1				优化 2				优化 3			
	ω_1 /Hz	ω_2 /Hz	ω_3 /Hz	ω_4 /Hz	ω_1 /Hz	ω_2 /Hz	ω_3 /Hz	ω_4 /Hz	ω_1 /Hz	ω_2 /Hz	ω_3 /Hz	ω_4 /Hz
数模结果	31.5	74.6	170.4	240.4	40.2	80.1	189.2	245.3	38.2	85.7	210.5	253.4
有限元结果	30.1	76.2	173.3	237.6	41.4	79.2	190.9	249.1	37.3	84.2	208.9	252.1
误差/%	0.04	0.02	0.03	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.02	0.01	0.01

4 结语

本文针对某地铁项目空气制动系统制动管路的管夹位置进行了设计优化,可以得到如下结论:

1) 仿真计算结果表明,制动管路一阶固有频率(17.3 Hz)在车体一阶固有频率范围 $[7, 20]$ Hz 内,存在共振、脱落的风险。

2) 对于多管夹固定的制动管路,可以将管夹位置作为设计变量,通过灵敏度分析,筛选出对优化目标影响较大的管夹。根据灵敏度分析结果,制动

管路管夹 L1、L3、L4 和 L6 对制动管路固有频率影响较大,选取该 4 个管夹位置进行设计优化。

3) 以制动管路固有频率与车体固有频率的差值为目标函数,并根据管夹位置的参考范围,从而建立以避振为目标的数学优化模型。根据优化结果,可以得出优化 2 方案使得管路一阶固有频率为 40.2 Hz,最大限度地远离车体一阶固有频率范围,优化效果显著。

(下转第 203 页)

定性。

参考文献

- [1] 李凯, 何广忠, 王春生, 等. 基于机器视觉的激光焊缝余高检测技术[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 127.
LI Kai, HE Guangzhong, WANG Chunsheng, et al. Remaining-height detection technology of laser weld bead based on machine vision[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(2): 127.
- [2] 安博文. 基于结构光的汽车冲压件划痕视觉检测技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
AN Bowen. Research on visual detection technology of automotive stamping parts scratches based on structured light[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [3] SHI H, LAI R, LI G, et al. Visual inspection of surface defects of extreme size based on an advanced FCOS[J]. Applied Artificial Intelligence, 2022, 36(1): 2122222(doi).
- [4] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- [5] 蔡改贫, 陈永康, 周小云, 等. 基于改进蚁群算法的打磨机器人路径规划[J]. 机床与液压, 2022, 50(9): 48.
CAI Gaipin, CHEN Yongkang, ZHOU Xiaoyun, et al. Path planning of polishing robot based on improved ant colony algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2022, 50(9): 48.

- [6] PARTY E, LIN Z W. Dual Kalman filter algorithm based on tandem structure for grinding robot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(12): 220.
- [7] 赵新华, 冯建峰, 刘凉, 等. 同类异构打磨机器人奇异性评价与综合方法研究[J]. 机械设计, 2023, 40(5): 58.
ZHAO Xinhua, FENG Jianfeng, LIU Liang, et al. Singularity evaluation and synthesis of isomeric grinding robot[J]. Journal of Machine Design, 2023, 40(5): 58.
- [8] SHI W, ZHANG J, LI L, et al. Analysis of efficient and fast prediction method for the kinematics solution of the steel bar grinding robot[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1212.
- [9] GE J, DENG Z, LI Z, et al. An efficient system based on model segmentation for weld seam grinding robot[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 121(11): 7627.

· 收稿日期:2023-11-12 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-12 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
· 通信作者:郑立, 助理工程师, zhengss1027@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 198 页)

参考文献

- [1] 徐培原. 基于遗传算法的飞机液压管路卡箍布局优化[D]. 西安: 西北工业大学, 2017.
XU Peiyuan. Optimal design of aircraft hydraulic piping clamp layout based on genetic algorithm[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2017
- [2] 周达达, 陈国金, 龚友平. 基于 iSIGHT 的多学科优化方法研究[J]. 机电工程, 2009, 26(12): 78.
ZHOU Dada, CHEN Guojin, GONG Youping. Research of multi-disciplinary optimization based on iSIGHT[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2009, 26(12): 78.
- [3] 张义民, 吕春梅, 周娜, 等. 动态结构系统可靠性的频率灵敏度分析[J]. 力学学报, 2008, 40(5): 716.
ZHANG Yimin, LYU Chunmei, ZHOU Na, et al. Frequency sensitivity analysis for dynamic structural systems reliability[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008, 40(5): 716.
- [4] 蹇开林, 燕乐纬, 朱学旺. 基于遗传算法的结构支撑位置优化[J]. 应用力学学报, 2007, 24(2): 306.
JIAN Kailin, YAN Lewei, ZHU Xuewang. Optimization for support position based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2007, 24(2): 306.

- [5] 李鑫, 王少萍. 基于卡箍优化布局的飞机液压管路减振分析[J]. 振动与冲击, 2013, 32(1): 14.
LI Xin, WANG Shaoping. Vibration control analysis for hydraulic pipelines in an aircraft based on optimized clamp layout[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(1): 14.
- [6] 徐培原, 刘伟. 发动机外部管路系统的卡箍布局多目标优化[J]. 航空发动机, 2020, 46(6): 46.
XU Peiyuan, LIU Wei. Multi-objective optimization of clamps layout for engine external pipeline system[J]. Aeroengine, 2020, 46(6): 46.
- [7] 刘伟, 曹刚, 翟红波, 等. 发动机管路卡箍位置动力灵敏度分析与优化设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(12): 2756.
LIU Wei, CAO Gang, ZHAI Hongbo, et al. Sensitivity analysis and dynamic optimization design of supports' positions for engine pipelines[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12): 2756.

· 收稿日期:2023-10-25 修回日期:2023-12-19 出版日期:2024-05-10
Received:2023-10-25 Revised:2023-12-19 Published:2024-05-10
· 通信作者:顾海浩, 工程师, guhaihao1213@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license