

文章编号:1006-1355(2021)01-0229-06

SG与RV减速器综合性能对比分析

赵巧绒¹, 王雪雯^{2,3}, 王鑫^{2,3}, 张宏伟¹

(1. 西京学院 机械工程学院, 西安 710123; 2. 宝鸡文理学院 机械工程学院, 陕西 宝鸡 721016;
3. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 西安 721016)

摘要: RV减速器是工业机器人的核心零部件, 国产减速器在总体性能上有待提高。对一种新型可替代RV减速器的SG减速器开展测试与分析研究, 利用机器人减速器综合测试系统, 测试对比SG减速器与RV减速器在空载升速过程中振动、温度、噪声及传动效率等参数的差异, 分析SG型减速器的优点与不足, 并提出改进方案。研究发现SG减速器在温度、噪声及负载方面更有优势, 但在振动及传动效率方面尚待改进。研究结果可为国内新型SG减速器的设计与优化提供参考。

关键词: 振动与波; RV减速器; SG减速器; 振动特性; 噪声; 传动效率

中图分类号: TH132

文献标志码: A

DOI编码: 10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.042

Comparative Analysis of Comprehensive Performance between SG Reducers and RV Reducers

ZHAO Qiaorong¹, WANG Xuwen^{2,3}, WANG Xin^{2,3}, ZHANG Hongwei¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xijing University, Xi'an 710123, China;
2. School of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences,
Baoji 721016, Shanxi, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components,
Xi'an 721016, China)

Abstract : The RV reducer is the core component of industrial robots. The overall performance of domestic reducers needs to be improved. In this paper, a new SG reducer, which can replace RV reducer, is tested and analyzed. Using the robot reducer comprehensive test system, the differences of parameters, such as vibration, temperature, noise and transmission efficiency, between SG reducer and RV reducer during load-free acceleration are tested and compared. The advantages and disadvantages of the SG reducer are analyzed, and the corresponding improvement scheme is put forward. It is found that the SG reducer has the advantages in the aspects of temperature, noise and loading, but needs to be improved in the aspect of vibration and transmission efficiency. This study provides a reference for the design and optimization of the new SG reducers in China.

Key words : vibration and wave; RV reducer; SG reducer; vibration characteristics; noise; mechanical efficiency

机器人减速器是工业机器人的核心零部件, 占整机成本的30%以上。世界75%的精密减速器市场被日本的Harmonica和Nabtesco所占领, 其中

Nabtesco的RV减速器约占60%的市场份额。我国目前正逐步进入工业机器人产业化发展阶段, 以精密减速器为代表的核心零部件不能自给自足的现状显得尤为突出^[1]。因此分析国产减速器的综合性能参数, 为国产减速器的设计与优化提供参考, 可以加速我国工业机器人的发展。

目前国内外学者针对谐波减速器、摆线针轮传动进行的研究较多, 主要包括齿廓优化^[2]、传动误差^[3-4]、疲劳寿命^[5-6]、性能测试^[7-8]、以及结构优化与分析^[9]等。有关RV减速器的性能研究与试验分析是近几年才发展起来的, 虽然时间较短没有谐波减速器的研究完善, 但也涵盖了齿廓修型^[10-11]、传动误

收稿日期: 2020-02-11

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2019JQ-898); 陕西省教育厅自然科学基金资助项目(19JK0912)

作者简介: 赵巧绒(1983-), 女, 陕西省临潼市人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为机械设计及机械制造。

E-mail: 39288367@qq.com

通信作者: 王鑫, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为非线性振动与故障诊断。

E-mail: 46607190@qq.com

差^[12-13]、疲劳与模态^[14-15]、实验测试^[16-17]等方面。本文研究的另一种工业机器人用减速器来源于陕西省某新兴企业自主研发的SG系列机器人关节减速器。受该企业委托进行其综合性能的全面测试,并与陕西省老牌企业生产的RV减速器进行综合性能对比,为其优化设计提供理论指导。

本文利用机器人综合性能测试系统,分别进行SG减速器与RV减速器的振动、温度、噪声及传动效率的性能测试,对比分析两者的优缺点,为SG系列减速器的设计与优化提供理论指导。

1 测试方案

1.1 测试系统与测试仪器

本文研究的SG减速器来源于陕西省某新兴企业,如图1所示,该款减速机没有走仿制进口的路子,打造出了机器人减速机领域新结构。本文作为标杆的RV减速器为秦川RV-40E减速器,其各项指标均处于国内外同类产品的先进水平。

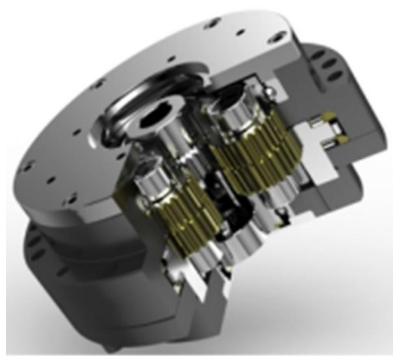


图1 SG减速器

本文所用机器人减速器综合性能测试系统如图2所示。其结构主要由电机、扭矩传感器、联轴器、减速器等部件组成。



图2 机器人减速器综合性能测试系统

1.2 测点布置

测试系统主要是由单向振动加速度传感器、温度传感器、噪声传感器、扭矩传感器及便携式振动信号分析仪组成。在采样频率为2 000 Hz的情况下,利用单向加速度传感器对减速器X、Y、Z三个方向的

振动信号进行采集,测点布置如图3所示。温度传感器在减速器的正下方如图3所示。噪声传感器位于实验台中部,见图2。

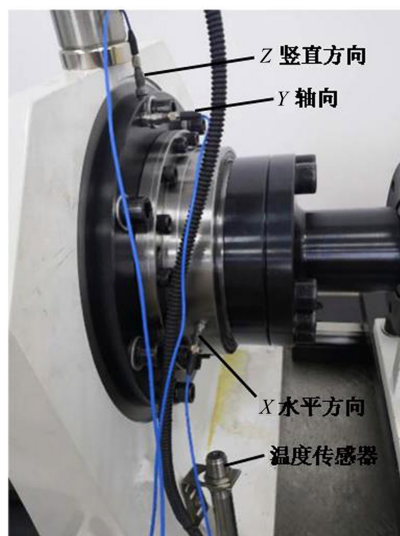


图3 测点布置

2 测试数据与分析

在电机转速为0~3 000 r/min的升速过程中,分别测量两种减速器的各项性能指标。从时域、频域、温度、噪声及传动效率的角度对比两减速器的综合性能。

2.1 时域分析

利用机器人减速器综合测试系统,分别测试两减速器的时域振动信号。由于篇幅原因在此仅列出RV-40E在电机转速为500 r/min、负载50 N,采样频率为2 000 Hz时,X、Y、Z三个方向的振动信号时域图,见图4。

由图4可见,三个方向整体振动均围绕0 m/s²上下波动,漂移较小。相比而言,X(水平)、Z(竖直)方向振动幅值较小,而Y(轴向)振动较大,该特征符合传动系统振动的一般规律。计算整理此时三个方向的振动信号,求解最大值、平均值、标准差等数据,得到RV-40E减速器振动性能指标,见表1。

表1 RV-40E减速器振动性能

方向	平均值/(m·s ⁻²)	最大值/(m·s ⁻²)	标准差/(m·s ⁻²)
X(水平)	-0.050 9	0.293 6	0.039 2
Y(轴向)	-0.119 9	0.764	0.185
Z(竖直)	0.003 5	0.125	0.039 6

由表1中可见,RV-40E减速器X、Y、Z三个方向的振幅平均值分别为-0.059 m/s²、-0.119 9 m/s²、0.003 5 m/s²,整体漂移较小,说明信号的直流分量、外界随机噪声干扰较小。振动信号的最大值为

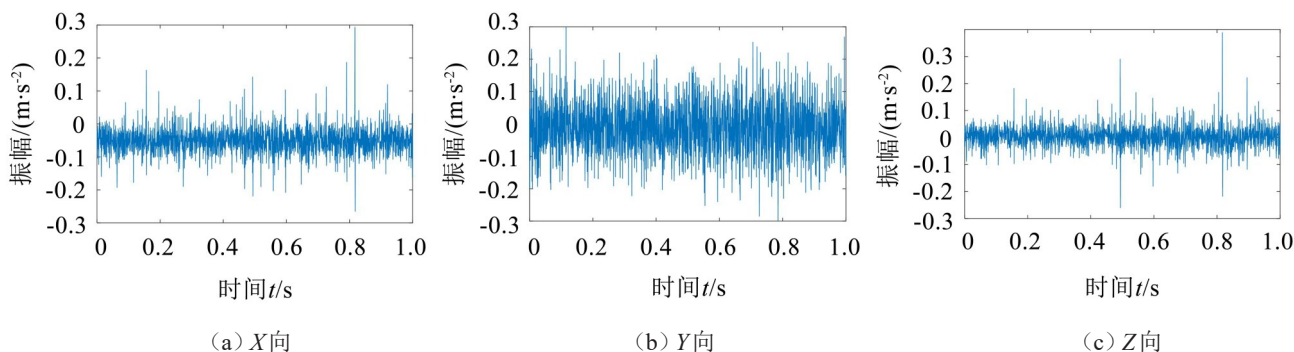


图4 RV-40E减速器时域振动信号

0.764 m/s^2 , 出现在 Y (轴向) 方向。标准差分别为 $0.039 2 \text{ m/s}^2$ 、 0.185 m/s^2 、 $0.039 6 \text{ m/s}^2$, 查得日本帝人公司生产的 RV 减速器在工作情况下振动加速度小于 0.1 m/s^2 , 由此可知 RV-40E 减速器 X 、 Z 向振动信号符合标准, Y 向超差。

测试 SG 减速器同样在电机转速为 500 r/min 、负载 50 N 、采样频率为 $2\,000 \text{ Hz}$ 时, X 、 Y 、 Z 三个方向的振动信号, 求解最大值、平均值、标准差等数据, 得到 SG 减速器振动性能指标, 见表 2。

表2 SG减速器振动性能

方向	平均值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	最大值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
X (水平)	0.258	0.465	0.068 5
Y (轴向)	0.485	0.833	0.158 2
Z (竖直)	0.125	0.258	0.042 6

由表 2 可见, SG 减速器平均值大很多, 在测试中发现其振动信号大多为正, 负值较少, 说明信号漂移较大。振动信号的最大值为 0.833 m/s^2 , 同样出现在 Y (轴向) 方向, 与表 1 相比, 三个方向最大值均高于表 1。标准差方面同样如此, X 、 Z 向高于表 1, 而 Y 向略低于表 1。 X 、 Z 向振动信号符合标准, Y 向超标。由此可知 SG 减速器整体稳定性低于 RV 减速器。

2.2 随转速变化的振动特性

以上研究为固定转速下的振动特性, 当转速升高时, 两种减速器的幅值变化呈非线性增长, 因此有必要考察转速升高过程中各方向振幅的变化。测试采样频率为 $2\,000 \text{ Hz}$ 时, 输出端不加载状态下转速由 0 r/min 升到 $3\,000 \text{ r/min}$ 的过程中, 每个转速下稳定采样 5 s 求得各方向的振动平均值, 绘制两种减速器各向振动对比折线图, 见图 5 至图 6 所示。

由图 5 可见, 随着转速的增大, RV-40E 减速器三个方向振幅都呈上升趋势, 相比较而言, Y 向振幅最大, X 向次之, Z 向增长较为平缓。

由图 6 可见, 随着驱动转速的增大, SG 减速器三个方向的振幅亦呈上升趋势。 Y 向振幅最大, 其最大值为 RV-40E 的 3 倍, X 、 Z 向振幅几乎相等。

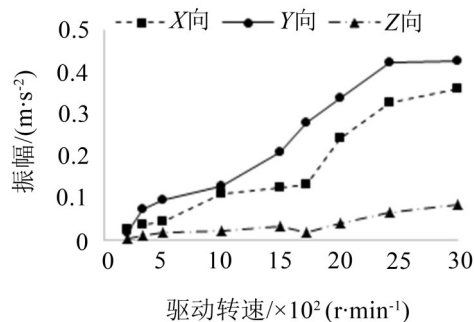


图5 RV-40E各向振动对比图

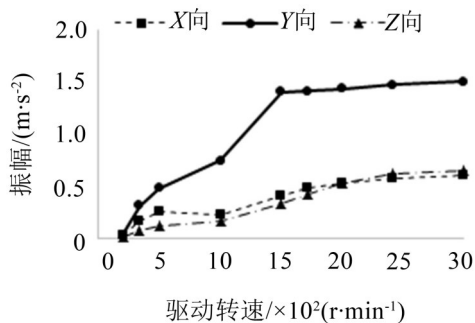


图6 SG减速器各向振动对比图

两种减速器随转速变化的振幅趋势相同, 振幅增长是阶段性变化的, $0 \sim 500 \text{ r/min}$ 区间段转速增长剧烈, 而 $500 \text{ r/min} \sim 1\,000 \text{ r/min}$ 区间段幅值保持平稳, $1\,000 \text{ r/min} \sim 2\,500 \text{ r/min}$ 区间段振幅继续增加, 但增长越来越缓慢, 直至停止增长。

2.3 温度变化对比分析

利用机器人减速器综合测试系统中的温度传感器进行温度测试, 分别测试两种减速器空载状态下连续运行过程中随转速升高的温度变化, 见图 7 所示。

由图 7 可知, 两种减速器温度增长趋势大致相同, 在 $0 \sim 1\,700 \text{ r/min}$ 转速区间温度变化不大, 减速器空载、低速下运行, 即处于低功率状态, 温度不会造成任何影响。在 $1\,700 \text{ r/min} \sim 2\,000 \text{ r/min}$ 区间段温度升高, 并在随后的 $2\,000 \text{ r/min} \sim 3\,000 \text{ r/min}$ 区间段保持稳定, 此时减速器处于正常运行状态, 温度略

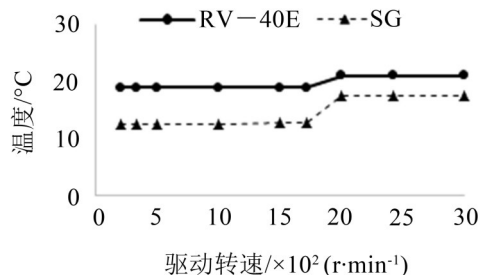


图7 温度对比图

有升高,但对设备性能及润滑油等都不会造成影响。相比较而言,RV-40E的温度偏高,在最开始温度比SG减速器高出7℃,在转速增加后,SG升温幅度更大,此时RV-40E比SG高出4℃。两种减速器均为新机,除去新机器处于磨合阶段造成温度升高等客观原因,SG的冷却系统、设备的通风散热等优于RV-40E。

2.4 噪声变化对比分析

噪声是判断减速器运行状态是否良好的诊断方法之一,分别测试两种减速器空载状态下连续运行过程中随转速升高的噪声变化,见图8所示。

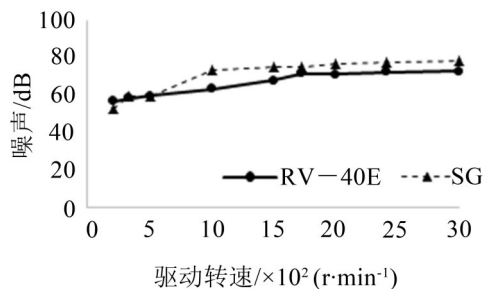


图8 噪声对比图

由图8可见,随着驱动转速的不断增大,RV-40E与SG减速器的噪声在不断增大,两者在转速0~1500 r/min的升速过程中噪声均呈上升趋势,在1500 r/min以后逐渐趋于平稳。启动阶段SG噪声较低,但随转速不断增大的过程中,SG噪声超过了RV-40E。SG减速器传动噪声过大的原因可能是内部齿轮精度等级略低。秦川机床厂作为高精度机床供应商,其齿轮的加工精度更高,高精度齿轮比低精度齿轮传动噪声小的多。同时减速器内部的齿轮误差、装配时的同心度,安装过程中机身与基础支撑以及连接件之间的共振,都可能产生噪声。总之,SG减速器在噪声方面与RV-40E相比有些许不足,可以参考以上几个方面,从齿轮精度、箱体、连接件、轴承等设计、安装、维护方面进行优化。

2.5 传动效率变化对比分析

传动效率是判断减速器性能好坏的重要指标,Nabtesco出产的RV减速器其传动效率可以达到

85%~95%,国内主流厂商的出厂指标大约在60%~90%。分别测试两种减速器不加载状态下连续运行过程中随转速升高的传动效率变化,如图9所示。

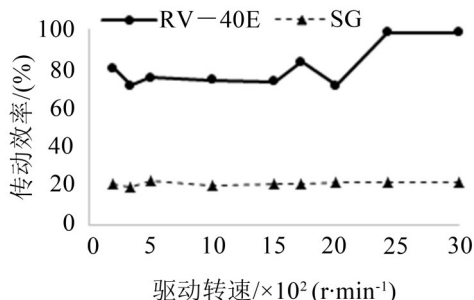


图9 传动效率对比图

由图9可见,随着驱动转速的增大,SG减速器传动效率平稳,并没有出现比较剧烈的波动,传动效率稳定在20%到22%之间。RV-40E上下轻微波动,基本稳定在80%左右,转速在2500 r/min~3000 r/min时,其传动效率达到最大值98%,此时性能已超过Nabtesco出产的RV减速器,说明国产减速器在部分指标上已达到国际先进水平。总体来看,SG减速器在传动效率上表现欠佳,与RV-40E传动效率相差4倍,没有达到国内厂商的最低标准。

3 传动效率差异分析及优化

3.1 传动效率计算

在上文分析中,虽然在振动、温度、噪声方面SG都存在差异,但在传动效率上的差距最为明显,其他参数性能也可能受到传动效率的影响而表现欠佳。因此有必要定量分析两者在传动效率上产生差异的原因。

对于RV减速器的传动效率,国内专家学者已经进行了大量研究,普遍认为RV减速器传动效率一般可达到85%~92%^[18-19]。部分学者采用仿真及实验测试,得到RV-40E最高效率为73.23%^[20]。参考Nabtesco公司的精密控制用高刚性减速机RV SERIES技术资料集,RV-40E减速器效率曲线见图10所示。

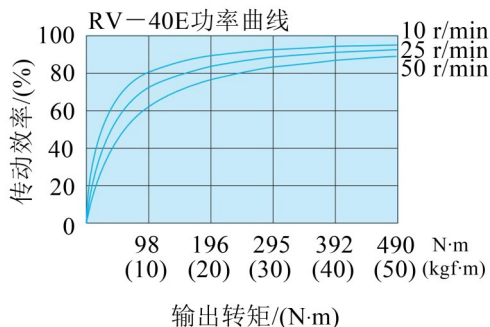


图10 RV-40E减速器效率曲线图

SG 减速器为双联行星结构(NGWN 型),计算时可等效为一级 NGW 行星齿轮和一级正号机构 NN 串联^[21],如图 11 所示。因此,NGWN 行星齿轮的传动比为一级 NGW 行星齿轮的传动比和一级正号机构 NN 传动比的乘积,NGWN 行星齿轮的效率为一级 NGW 行星齿轮的效率和一级正号机构 NN 效率的乘积。其中 $i_{12} = -7$, $i_{1'2'} = 1.043$,单对齿轮啮合效率为 95.06 %。

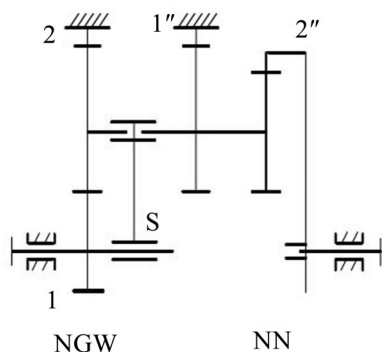


图 11 SG 等效机构

其传动比和传动效率为

$$i = i_{1s} \cdot i_{s2'} = (1 - i_{12}) \cdot \frac{i_{1'2'}}{i_{1'2'} - 1} = 194 \quad (1)$$

$$\eta = \eta_{1s} \cdot \eta_{s2'} = \frac{i_{12}\eta_{12} - 1}{i_{12} - 1} \cdot \frac{i_{1'2'} - 1}{i_{1'2'} - \eta_{1'2'}} = 44.53 \% \quad (2)$$

经计算 SG 的传动比较大,但传动效率极低,理论传动效率仅为 44.53 %。同时,双联行星轮工艺性差,制造、安装复杂,对制造精度要求高,其均载性能对制造误差敏感,因此实际传动效率往往达不到理论计算值。

3.2 传动效率差异分析及改善方案

造成 SG 减速器传动效率未达到理论值的原因主要有以下两点:

(1) SG 啮合齿对数量未达标。在输入转速恒定的情况下,起初齿轮啮合并不完美,所以效率达不到出厂样本效率。随着时间增长啮合齿对数量增多,输出端负载会逐渐升高,进而传动效率升高。在实验过程中 RV-40E 的传动效率即随时间增长而增长,最终达到最高传动效率 98 % 时已运行了 30 分钟。但 SG 减速器未出现随时间增长而增长的现象,因此推断其内部啮合点数量未达到理论值(9 个)。

(2) 齿轮传动的功率损耗较大。传动效率主要来源于齿轮传动的功率损耗、轴承摩擦的功率损耗及润滑油搅动的功率损耗等。其中齿轮传动的功率损耗所占比重大,主要由轮齿间的啮合摩擦引起,受齿面加工精度影响极大。通过拆机观察发现,SG 减速器经过测试后其润滑油由黄色变为黑色,润滑

油中含有大量铁屑,其齿轮加工等级为 9 级,齿面存在划痕。因此 SG 减速器加工精度过低也是造成其传动效率低的重要因素。

大速比行星齿轮效率会随传动比增大而迅速降低,这是由其结构决定的。但相较于理论值,实际测试结果仅占理论值的 50 %,若能在制造及安装工艺方面加以完善可以进一步提高 SG 的传动效率。

4 结 语

本文测试分析了 SG 减速器与 RV-40E 减速器的振动、噪声、温度及效率指标,剖析了 SG 减速器相对于 RV 减速器的优缺点。振动特性方面,两者在轴向振动幅值方面与国外产品相比均超差,水平与垂直方向符合国际标准。SG 减速器整体稳定性低于 RV 减速器,但在温度、噪声方面略有优势,均低于 RV。传动效率方面,SG 减速器表现欠佳,与 RV 传动效率相差 4 倍,没有达到国内厂商的最低标准,一方面由于大速比行星齿轮自身的传动效率理论值偏低,另一方面 SG 减速器的制造及安装工艺均未达标。在后续的优化设计中 SG 可以考虑在齿轮精度、加工误差、整体的安装过程、间隙等方面来减少摩擦,提高传动效率。

参考文献:

- [1] 黄兴,何文杰,符远翔. 工业机器人精密减速器综述[J]. 机床与液压,2015,43(13):1-6.
- [2] 张宁,张英杰,李阳帆. 考虑齿轮形变的谐波减速器齿廓优化方法[J]. 西安交通大学学报,2019,53(12):31-37.
- [3] 陈茜,李俊阳,王家序,等. 制造误差对谐波齿轮应力的影响规律[J]. 浙江大学学报(工学版),2019,53(12):2289-2297.
- [4] 裴欣,张立华,周广武,等. 谐波齿轮传动装置的动态传动误差分析[J]. 工程科学与技术,2019,51(4):163-170.
- [5] 张弦,姜歌东,梅雪松,等. 采用瞬态有限元及加速寿命试验的谐波减速器时变可靠度评估方法[J]. 西安交通大学学报:2020,1(9):1-17.
- [6] 韦乐余. 谐波减速器柔轮疲劳特性分析及啮合刚度研究[D]. 机械科学研究总院,2019.
- [7] 申俊杰. 谐波减速器性能测试方法与装置的研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
- [8] 谭晶,黄炜灵,黄迪山,等. 谐波减速器的扭转刚度试验研究[J]. 计量与测试技术,2019,46(4):3-5.
- [9] 田浩. 新型谐波减速器结构优化与分析[D]. 太原:太原理工大学,2019.
- [10] 安小涛,李天兴,邢春荣,等. RV 减速器摆线轮齿廓的逆向主动修形方法[J]. 机械传动,2019,43(9):81-86+165.
- [11] 缪嘉成,李朝阳,陈兵奎. 结合 Kriging 与改进 NSGA-II 的 RV 减速器优化[J]. 重庆大学学报,2020,1(17):1-13.

- [12] 卢博文, 宋雪萍, 毕爱宾. RV减速器摆线针轮啮合间隙影响因素的分析[J]. 机械制造, 2019, 57(11): 58-61.
- [13] 朱忠刚, 张靖, 周莉, 等. RV减速器传动误差高精度测试台设计与试验分析[J]. 机械传动, 2019, 43(11): 84-88.
- [14] 崔迪, 张迎辉, 葛宰林, 等. RV减速器有限元动态仿真与接触疲劳强度设计[J]. 机械设计, 2019, 36(9): 50-56.
- [15] 孟聪, 陈川, 杨玉虎. RV减速器模态特性分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(1): 8-13.
- [16] 彭鹏, 柯梁亮, 汪久根. 噪声干扰下的RV减速器故障诊断[J/OL]. 机械工程学报, 2020, 1-7: 01-17.
- [17] 丁超, 秦少军. RV减速器传动效率的测试与研究[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版), 2019, 39(3): 65-68.
- [18] 贡林欢. 工业机器人用RV减速器的样机试制及试验研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2015.
- [19] 李蒙. 中小功率壳固定RV-E型减速器的设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [20] 吕明帅. RV减速器传动特性的仿真与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [21] 梁健斌. 大速比行星齿轮传动关键问题研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.

(上接第223页)

用,从而改变薄板声辐射效率特性。安装动力吸振器,能够使薄板原模态的频率明显降低,对应的声辐射效率明显降低。动力吸振器的耦合作用使得薄板产生新生模态,新生模态的振型在吸振器安装点产生反相位振型特征。而吸振器质量的增加会使得新生模态在低频范围的声辐射效率增加。因此,在利用吸振器抑制低频声辐射时,要严格控制吸振器质量以及合理设置吸振器的频率从而达到理想的降噪效果。

参考文献:

- [1] 张絮涵, 汪光文, 刘毓迪, 等. 宽体客机巡航飞行舱内噪声及声品质现状测试[J]. 科技视界, 2018(14): 10-13.
- [2] 李志辉. 时速250公里动车组车内噪声特性研究及机理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2016: 24-25.
- [3] B R MACE. Periodically stiffened fluid-loaded plates, I: Response to convected harmonic pressure and free wave propagation[J]. Journal of Sound and Vibration, 1980, 73(4): 473-486.
- [4] DENYS J MEAD. Plates with regular stiffening in acoustic media: Vibration and radiation[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1990, 88(1): 391-401.
- [5] 金叶青, 庞福振, 姚熊亮, 等. 基于板梁组合理论的正交加筋板声振特性分析[J]. 振动工程学报, 2012, 25(5): 579-588.
- [6] 闫兆敏, 张东俊, 温激鸿. 基于有限元法的贴敷阻尼薄板声辐射性能研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 195-199.
- [7] CHEN YICHENG, HUANGB SHYHCHIN. An optimal placement of CLD treatment for vibration suppression of plates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(8): 1801-1821.
- [8] 何山. 动力吸振器的设计方法研究及其在汽车减振降噪中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [9] 孙朝晖, 戴扬, 王冲, 等. 飞机壁板附加动力吸振器后的振动与声辐射[J]. 西北工业大学学报, 1993(4): 470-475.
- [10] Y M HUANG, C R FULLER. Vibration and noise control of the fuselage via dynamic absorbers[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1998, 120(2): 496-502.
- [11] DAYOU J. Fixed-points theory for global vibration control using vibration neutralizer[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 292(3-5): 765-776.
- [12] YANG C, LI D, CHENG L. Dynamic vibration absorbers for vibration control within a frequency band[J]. Journal of Sound and Vibration, 2011, 330(8): 1582-1598.
- [13] ZHU X Z, CHEN Z B, JIAO Y H. Optimizations of distributed dynamic vibration absorbers for suppressing vibrations in plates[J]. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 37(4): 1188-1200.
- [14] MAO Q. Control of noise and structural vibration: A MATLAB-based approach[M]. 2013.