

文章编号:1671-1637(2019)05-0053-11

传感器智能芯片与阵列光纤对接平台运动顺序优化

唐 皓¹, 张籽林^{1,2}, 周笔峰¹, 唐果宁¹

(1. 湖南科技大学 机电工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 隆德大学 工程学院, 斯坎纳 隆德 SE-22100)

摘 要:从运动平台空间运动可能存在的 720 种运动顺序配置入手, 针对智能芯片与阵列光纤对接过程各运动单元产生的几何误差进行敏感性分析, 通过区分和归类各运动单元的敏感误差和不敏感误差, 将运动平台运动顺序配置数减少到 90; 考虑到运动平台各运动单元具有均匀分散、齐整可比特性, 运用正交试验设计方法将敏感误差和不敏感误差确定为 3 个水平, 将 6 个运动单元确定为 6 个影响因素, 建立了对应的正交试验表, 得出了 5 条运动顺序配置的试验路径; 在此基础上, 借助 MATLAB 仿真平台对 5 条运动顺序配置的试验路径进行了仿真试验, 获得了运动平台运动顺序最优配置; 在封装系统多自由度精密运动平台上进行了实测试验, 检验了仿真试验结果。试验结果表明: 传感器智能芯片与阵列光纤对接的运动平台在空间直角坐标系中最优的运动顺序为先沿横轴平动, 再绕横轴转动, 再绕纵轴转动, 最后沿纵轴平动; 该方法可优化光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接的运动平台的空间运动顺序, 还可预测和规划其他多自由度运动平台的配准路径。

关键词:汽车工程; 传感器; 精密运动平台; 运动顺序优化; 正交试验

中图分类号:U463

文献标志码:A

Optimization on motion sequence in alignment platform between sensor intelligent chip and fiber array

TANG Hao¹, ZHANG Zi-lin^{1,2}, ZHOU Bi-feng¹, TANG Guo-ning¹

(1. College of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Faculty of Engineering, Lund University, Lund SE-22100, Scana, Sweden)

Abstract: Starting with the 720 types of possible motion sequence configurations of spatial motion of motion platform, the sensitivity of geometric errors generated by each moving unit during the alignment process between the intelligent chip and fiber array was analyzed. Through distinguishing and classifying the sensitive and insensitive errors of each motion unit, the number of motion sequence configuration was reduced to 90. Considering the characteristics of uniform, decentralized, neat and comparable of each motion unit, the orthogonal test design method was used to determine the sensitive and insensitive errors into 3 levels, and determine the 6 motion units into 6 influencing factors. The corresponding orthogonal test table was established, and 5 test paths of motion sequence configurations were obtained. On this basis, the 5 test paths of motion sequence configurations were simulated through the MATLAB simulation platform, and the optimal motion sequence configuration of motion platform was obtained. The field test was conducted on the multi-degree-of-freedom precision motion platform of packaging system, and the

收稿日期:2019-06-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51705149);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3168)

作者简介:唐 皓(1988-),男,湖南湘潭人,湖南科技大学讲师,工学博士,从事复杂精密运动系统研究。

simulation results were verified. Test result indicates that the optimal motion sequence of motion platform for docking the sensor intelligent chip and fiber array in space rectangular coordinates is moving along the horizontal axis first, then rotating around the horizontal axis, and then rotating around the vertical axis, and finally moving along the vertical axis. This method can not only optimize the spatial motion sequence of motion platform aligned by fiber scanning radar sensor smart chip and array optical fiber, but also can predict and plan the registration paths of other multi-degree-of-freedom motion platforms. 10 tabs, 10 figs, 30 refs.

Key words: automobile engineering; sensor; precise motion platform; motion sequence optimization; orthogonal test

Author resume: TANG Hao(1988-), male, lecturer, PhD, tanghao@hnust.edu.cn.

0 引 言

众所周知,智能汽车的发展离不开传感器技术的进步^[1-3]。随着中国对智能汽车发展战略“三步走”方针的进一步明确,研发具有高性能、全天候、抗干扰以及低成本的高端传感器已刻不容缓。目前,智能汽车传感器的研发主要集中在雷达测距、图像传输以及安全高效等几个方面,其中高端雷达传感器的研发更受人关注,如光纤扫描激光雷达、超声波雷达以及毫米波雷达等。这些高端雷达传感器的最显著特征就是技术高度集成,即将雷达技术、激光技术、光电子技术、芯片技术以及光纤技术高度融合^[4-5]。关于这方面技术的研发,美国、日本等国仍处于领先地位。如美国诺斯洛普格拉曼(Northrop Grumman)公司、日本三菱精密有限公司已有系列产品^[6-7]。中国虽起步较晚,但高端雷达传感器研发已取得显著成效,东南大学对相关智能芯片研发已取得突破,北京行易道毫米波雷达公司与北汽合作研发的低成本 77 GHz 毫米波雷达已试用于无人汽车,并在 2016 年北京国际车展演示区亮相^[2]。纵观智能汽车高端传感器的研发,其难点在于将激光扫描技术、光电子技术以及信息处理技术等深度融合。以光纤扫描激光雷达传感器为例:首先是采用微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)摆镜+光纤扫描,其次是收集相关信息和集成处理,第三是将信息处理芯片与阵列光纤精准封装^[8-10]。工程上多采用六轴精密运动平台来精准对接封装传感器智能芯片与阵列光纤,因此,六轴精密运动平台的各自由度和运动顺序将直接影响高端传感器的质量。

传感器智能芯片与阵列光纤封装系统六轴精密运动平台亦比较复杂,它主要由控制系统、反馈系统和各自由度的运动系统构成^[11]。除了反馈系统采

用激光干涉仪或光功率计进行实际测定外,控制系统主要是精准驱动各自由度的运动。这将不可避免地带来各自由度运动几何误差的产生、积累和传递等问题(本文暂不考虑由温度变化产生的误差)。关于多自由度精密运动平台的精准对接控制问题,国内外许多学者进行了大量研究。Bohez 等针对五轴钻床提出了系统性几何误差参数辨识^[12];Tan 等视五轴机床为非线性系统,运用神经网络算法开展了几何误差建模^[13];Zi 等通过对多自由度并联操作系统进行误差敏感性分析,使被控物件的空间运动轨迹更加精确^[14];栗时平等针对不同的三轴或五轴数控机床进行了误差建模^[15-16];田延岭等针对磨削加工的微定位工作台进行了动力学特性精度补偿分析^[17-18];Tang 等基于误差流理论^[19]提出了一种新的光电子封装多自由度运动系统建模方法,并进行了专题研究^[20-22]。

然而,上述研究更多地集中在多自由度运动平台误差之间的积累、传递和耦合规律的探讨,而对运动平台运动顺序对对准精度的影响却研究较少。事实上,由于运动平台各自由度运动特征的不同,导致误差积累方式、传递过程以及对耦合的影响亦不同,生成的控制系统、反馈系统的复杂程度和制造成本必然存在差异,因此,基于工程方面快速、高效和精准对接的要求,研究多自由度运动平台运动顺序对耦合效率的影响意义重大。鉴于此,本文从运动平台空间运动可能存在的 720 种运动顺序配置入手,通过误差敏感性分析,逐步减少运动平台运动顺序配置数量,并运用正交设计方法进一步减少试验次数;借助 MATLAB 仿真平台进行了仿真试验,并采用实测试验验证了仿真结果,以期获得智能汽车光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接运动平台耦合效率最优的运动顺序。

1 运动平台对接过程

图1为光纤扫描激光雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接运动平台示意,其中:上组件通常用来固紧智能芯片适配器,便于智能芯片与阵列光纤对接;下组件包括运动单元控制,用来安装阵列光纤;封装系统为光功率反馈装置和运动平台机架等。运动平台6个自由度运动单元包括 X 、 Y 、 Z 、 U 、 V 和 W 。

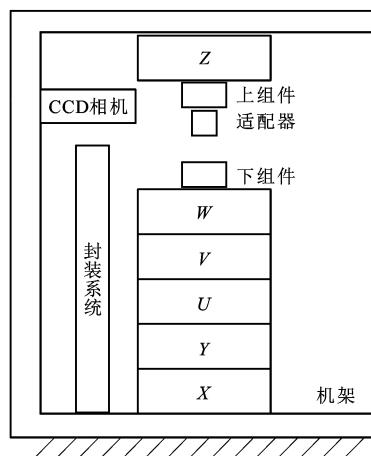


图1 多自由度运动平台的封装系统

Fig. 1 Packaging system of multi-degree-of-freedom motion platform

光纤扫描激光雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接运动平台封装过程主要包括粗对准、精对准和封装3个过程,见图2。粗对准时将上组件a、适配器b贴合并与运动单元 Z 固结,再将下组件c与运动平台固结,移动运动单元 Z 并转动运动单元 U 、 V ,使上组件(含适配器)与下组件贴合;精准时移动运动单元 X 、 Y 并转动运动单元 W ,精确对准上组件与下组件;精对准后第1次封装,形成焊点d,将运动单元 W 旋转 180° 后,进行第2次封装。

2 运动平台运动顺序的正交分析

为实现光纤扫描激光雷达传感器智能芯片与阵列光纤快速、高效对准并封装,首先需分析控制耦合封装系统的运动平台运动单元的运动顺序。由于运动平台存在6个运动单元,不同的运动单元存在不同的几何误差,因此,不同的运动路径配置将形成不同的误差累积及其传递和耦合效果。根据几何误差敏感性分析的初步结果,运动平台误差模型的目标函数随配置路径的变化而变化^[23],因此,不同的配置路径将直接影响运动平台的工作效率和对准质量。图3描述了运动平台各运动单元之间的装配关系,其中:1为 $Oxyz$ 固定直角坐标系;2为沿 x 轴平

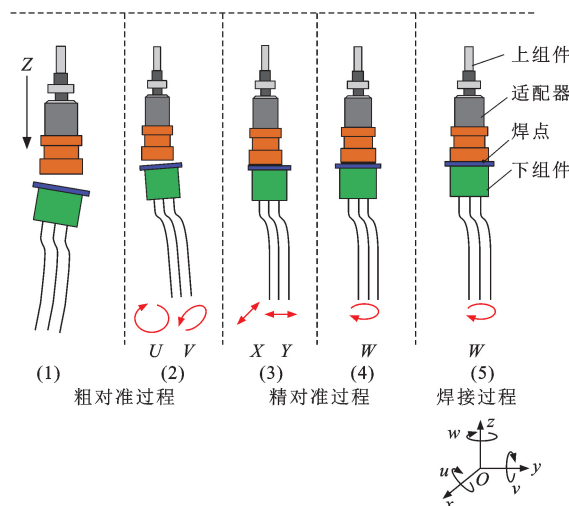


图2 封装系统对准过程和焊接过程

Fig. 2 Alignment procedure and welding process in packaging system

动的运动单元 X ;3沿为 y 轴平动的运动单元 Y ;4为绕 x 轴转动 u 的运动单元 U ;5为绕 y 轴转动 v 的运动单元 V ;6为绕 z 轴转动 w 的运动单元 W ;7为沿 z 轴平动的运动单元 Z 。结合图1、3可知:当机架确定时,平动单元 Z 随之确定。

视6个运动单元相互独立,理论上,各运动单元的排列有720种方式,说明运动平台运动顺序配置存在720种路径。结合运动平台各运动单元的运动特征、所产生的误差耦合效果以及现有的误差敏感性研究成果^[24-25],发现运动单元 X 、 Y 、 U 、 V 对目标函数敏感,而 Z 和 W 对目标函数不敏感,从耦合效率的影响效果出发,将敏感的2个平动单元 X 、 Y 归于一类,影响程度视为相当;将敏感的2个转动单元 U 、 V 归于一类,将不敏感的2个运动单元 Z 、 W 归于一类,影响程度视为相当。简化后,720种运动顺序排列可减少为90种。

实际生产中不可能也没有必要通过90种试验去寻求最佳运动顺序配置,因此,为进一步减少路径配置数量,考虑到运动平台各运动单元具有均匀分散、齐整可比的特性,可借鉴田口玄一的正交试验设计思路^[26],以求在90种路径配置中选择有代表性的运动顺序来进行试验,最终获得运动平台精准对接的最优运动顺序。

本文定义对运动平台误差耦合影响大的运动单元为敏感单元,反之为不敏感单元。将相同特征的运动单元按类型合并、归类,即将平动的敏感单元 X 、 Y 合并,称之为 A 水平;将转动的敏感单元 U 、 V 合并,称之为 B 水平;将不敏感单元 Z 、 W 合并,定义为 C 水平。这样就可以得到正交试验设计的

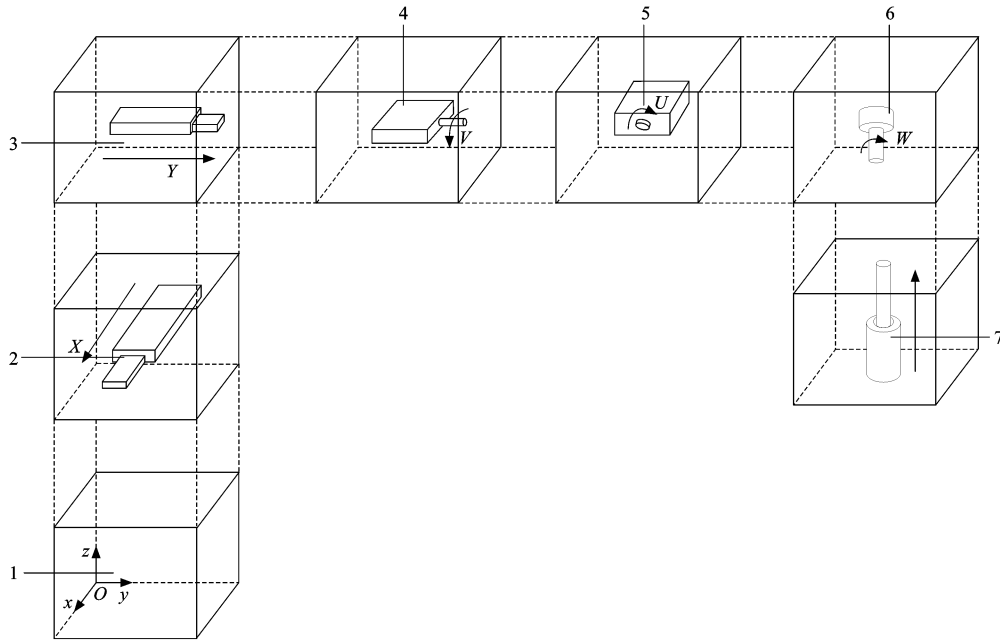


图 3 运动平台的运动单元配置

Fig. 3 Motion units configuration of motion platform

3 个试验水平。至于与正交试验相关的影响因素, 本文的运动平台客观上存在 6 个自由度运动。尽管它们对耦合效率都存在敏感与不敏感问题, 但它们都存在实际的运动, 可将其定义为 6 个影响因素, 即 x 、 y 、 z 、 u 、 v 和 w 运动对应 6 个位置影响因子, 构建出以运动平台对准效率最高, 即光功率损耗最小为目标的运动顺序正交试验表 $L18(3^6)^{[27-28]}$, 见表 1, 其中: 试验次数为 18; 选择水平为 3; 影响因素为 6。

表 1 运动路径配置的正交试验

Tab. 1 Orthogonal test for motion paths configuration

| 因素 | 位置 1 | 位置 2 | 位置 3 |
|------|------|------|------|
| 1 水平 | B | B | B |
| 2 水平 | A | A | A |
| 3 水平 | C | C | C |
| 因子 | 位置 4 | 位置 5 | 位置 6 |
| 1 水平 | B | B | B |
| 2 水平 | A | A | A |
| 3 水平 | C | C | C |

正交计算时, 因采用的是骏河公司 Suruga Seiki ES6201 运动平台, 其 48 项几何误差试验初始赋值可依据安装准则得出, 见表 2^[29], 其中: $u_{R,x}$ 、 $u_{R,y}$ 、 $u_{R,z}$ 、 $u_{R,v}$ 、 $u_{R,w}$ 分别为运动单元 U 在 x 、 y 、 z 、 v 、 w 方向上转动的轴向误差; $v_{R,x}$ 、 $v_{R,y}$ 、 $v_{R,z}$ 、 $v_{R,u}$ 、 $v_{R,w}$ 分别为运动单元 V 在 x 、 y 、 z 、 u 、 w 方向上转动的半径误差; $w_{R,x}$ 、 $w_{R,y}$ 、 $w_{R,z}$ 、 $w_{R,u}$ 、 $w_{R,v}$ 分别为运动单元 W 在

表 2 A、B 和 C 水平下参数初始赋值

Tab. 2 Initial values of parameters under levels A, B and C

| 误差名称 | 误差表达式 | 初始赋值 |
|----------------------|---|------|
| 轴向误差/ μm | $u_{R,x}$ 、 $u_{R,y}$ 、 $u_{R,z}$ 、 $u_{R,v}$ 、 $u_{R,w}$ | 0.1 |
| 半径误差/ μm | $v_{R,x}$ 、 $v_{R,y}$ 、 $v_{R,z}$ 、 $v_{R,u}$ 、 $v_{R,w}$ | 0.1 |
| 倾斜误差/ μm | $w_{R,x}$ 、 $w_{R,y}$ 、 $w_{R,z}$ 、 $w_{R,u}$ 、 $w_{R,v}$ | 0.1 |
| 装配误差/ μm | $\alpha_{a,x}$ 、 $\alpha_{a,u}$ 、 $\alpha_{a,yv}$ 、 $\alpha_{a,zw}$ 、 $\beta_{a,y}$ 、 $\beta_{a,v}$ 、 $\beta_{a,xu}$ 、 $\beta_{a,zw}$ 、 $\gamma_{a,z}$ 、 $\gamma_{a,w}$ 、 $\gamma_{a,xu}$ 、 $\gamma_{a,yv}$ | 0.5 |
| 直线度误差/ μm | $x_{T,y}$ 、 $x_{T,z}$ 、 $x_{T,u}$ 、 $x_{T,v}$ 、 $x_{T,w}$ 、 $y_{T,x}$ 、 $y_{T,z}$ 、 $y_{T,u}$ 、 $y_{T,v}$ 、 $y_{T,w}$ 、 $z_{T,x}$ 、 $z_{T,y}$ 、 $z_{T,u}$ 、 $z_{T,v}$ 、 $z_{T,w}$ | 1.0 |
| 定位误差/ μm | $x_{T,x}$ 、 $y_{T,y}$ 、 $z_{T,z}$ | 2.0 |
| 角度误差/ μm | $u_{T,u}$ 、 $v_{T,v}$ 、 $w_{T,w}$ | 3.0 |

x 、 y 、 z 、 u 、 v 方向上转动的倾斜误差; $\alpha_{a,x}$ 、 $\alpha_{a,u}$ 分别为运动单元 X 、 U 在 x 方向上平动的装配误差; $\alpha_{a,yv}$ 、 $\alpha_{a,zw}$ 分别为运动单元 V 、 W 绕 y 、 z 转动在 x 方向上的装配误差; $\beta_{a,y}$ 、 $\beta_{a,v}$ 分别为运动单元 Y 、 V 在 y 方向上平动的装配误差; $\beta_{a,xu}$ 、 $\beta_{a,zw}$ 分别为运动单元 U 、 W 绕 x 、 z 转动在 y 方向上的装配误差; $\gamma_{a,z}$ 、 $\gamma_{a,w}$ 分别为运动单元 W 、 Z 在 z 方向上平动的装配误差; $\gamma_{a,xu}$ 、 $\gamma_{a,yv}$ 分别为运动单元 U 、 V 绕 x 、 y 转动在 z 方向上的装配误差; $x_{T,y}$ 、 $x_{T,z}$ 、 $x_{T,u}$ 、 $x_{T,v}$ 、 $x_{T,w}$ 分别为运动单元 X 在 y 、 z 、 u 、 v 、 w 方向上的直线度误差; $y_{T,x}$ 、 $y_{T,z}$ 、 $y_{T,u}$ 、 $y_{T,v}$ 、 $y_{T,w}$ 为运动单元 Y 在 x 、 z 、 u 、 v 、 w 方向上的直线度误差; $z_{T,x}$ 、 $z_{T,y}$ 、 $z_{T,u}$ 、 $z_{T,v}$ 、 $z_{T,w}$ 分别为运动单元 Z 在 x 、 y 、 u 、 v 、 w 方向上的直线度误

差; $x_{T,x}$ 、 $y_{T,y}$ 、 $z_{T,z}$ 分别为运动单元 X 、 Y 、 Z 平动的定位误差; $u_{R,u}$ 、 $v_{R,v}$ 、 $w_{R,w}$ 分别为运动单元 U 、 V 、 W 转动的角度误差。对应的正交试验计算结果见表 3。

表 3 正交试验计算结果

Tab. 3 Calculation results of orthogonal test

| 试验 序列 | 正交试验序列号 | | | | | | 结果 |
|----------|---------|---|---|---|---|---|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 1 | B | B | B | B | B | B | 0 |
| 2 | B | A | A | A | A | A | 0 |
| 3 | B | C | C | C | C | C | 0 |
| 4 | A | B | B | A | A | C | 0 |
| 5 | A | A | A | C | C | B | 0 |
| 6 | A | C | C | B | B | A | 1 |
| 7 | C | B | A | B | C | A | 1 |
| 8 | C | A | C | A | B | C | 0 |
| 9 | C | C | B | C | A | B | 0 |
| 10 | B | B | C | C | A | A | 1 |
| 11 | B | A | B | B | A | A | 0 |
| 12 | B | C | A | A | B | B | 0 |
| 13 | A | B | A | C | B | C | 1 |
| 14 | A | A | C | B | A | B | 0 |
| 15 | A | C | B | A | C | A | 0 |
| 16 | C | B | C | A | C | B | 0 |
| 17 | C | A | B | C | B | A | 1 |
| 18 | C | C | A | B | A | C | 0 |

从表 1、3 可以看出:借鉴正交分析来指导试验可大大减少运动平台运动顺序配置数量,因为具有正交意义的试验序列只有 18 次,这进一步减少了试验数量;由于受影响因子的影响,正交试验计算结果存在较大差异,第 1 次试验序列的水平排列为 B、B、B、B、B、B,第 5 次试验序列的水平排列为 A、A、A、C、C、B,结果都为 0,说明水平虽然正交,但结果无效,且与现实不符,可以忽略;当 3 个水平 A、B、C 同时 2 次出现在某一行试验序列时结果才为 1,试验才有意义。根据以上判断,表 3 中 5 个试验序列第 6、7、10、13 和 17 的结果均为 1,应受到关注,而其他试验序列结果均为 0,可以忽略。至此,运动平台运动顺序配置试验次数由 18 减少到 5。具体的试验序列为:第 6 次 A、C、C、B、B、A 水平排列,第 7 次 C、B、A、B、C、A 水平排列,第 10 次 B、B、C、C、A、A 水平排列,第 13 次 A、B、A、C、B、C 水平排列,第 17 次 C、A、B、C、B、A 水平排列。将试验水平还原为运动单元,即将水平 A、B、C 分别还原为 X 和 Y 、 U 和 V 、 Z 和 W ,可得到运动平台的 5 条运

动顺序配置试验方案,即运动平台 6 个运动单元组合的运动顺序试验方案为: X - W - Z - U - V - Y 、 W - V - X - U - Z - Y 、 U - V - Z - W - Y - X 、 Y - U - X - W - V - Z 和 Z - Y - V - W - U - X 。

为达到试验目标,使运动平台效益最高,光功率损耗最小,仍需要思考几何误差的敏感性影响。根据第 2 节中的阐述,运动单元 X 、 Y 、 U 和 V 产生的几何误差对运动平台耦合影响很大,而运动单元 Z 和 W 产生的几何误差对运动平台耦合影响较小。若将敏感影响因素保留,忽略不敏感影响因素,可得到 4 个敏感影响因素: x 、 y 、 u 和 v 。此外,结合运动平台存在的 6 个自由度,可得到 24 种涉及影响运动平台效率的运动顺序配置影响因素排列: x - y - u - v 、 y - x - u - v 、 y - u - x - v 、 y - u - v - x 、 x - u - y - v 、 x - u - v - y 、 y - v - x - u 、 y - v - u - x 、 x - y - v - u 、 x - v - u - y 、 x - v - y - u 、 u - x - y - v 、 u - x - v - y 、 v - x - y - u 、 v - x - u - y 、 u - y - x - v 、 u - y - v - x 、 v - y - x - u 、 v - y - u - x 、 u - v - x - y 、 u - v - y - x 、 v - u - x - y 、 v - u - y - x 、 y - x - v - u 。

3 运动顺序仿真及配准精度分析

确定了 5 次试验和 24 种影响运动平台运动路径配置的因素后,可以进行仿真计算。通常情况下,运动平台的误差模型可表达为^[30]

$$E_i = P \prod_{j=0}^n M_{j,j+1}^c M_{j,j+1}^m \quad (1)$$

$$E_a = P \prod_{j=0}^n M_{j,j+1}^c E_{j,j+1}^s M_{j,j+1}^m E_{j,j+1}^k \quad (2)$$

$$E = E_a - E_i \quad (3)$$

式中: E_i 为理想条件下从单元体 $0 \sim n$ 的齐次变换矩阵; P 为起始位姿; $M_{j,j+1}^c$ 为坐标系 j 与相邻坐标系 $j+1$ 的坐标系补偿矩阵; $M_{j,j+1}^m$ 为坐标系 j 与相邻坐标系 $j+1$ 的运动量矩阵; E_a 为实际条件下从单元体 $0 \sim n$ 的齐次变换矩阵; $E_{j,j+1}^s$ 为坐标系 j 与相邻坐标系 $j+1$ 的装配误差矩阵; $E_{j,j+1}^k$ 为坐标系 j 与相邻坐标系 $j+1$ 的运动误差矩阵; E 为运动平台的误差模型矩阵。

式(1)、(2)分别为理想位姿矩阵与实际位姿矩阵。将式(2)与式(1)相减,可得式(3),即运动平台的误差模型。依据 MATLAB 仿真平台,采用齐次变换矩阵(Homogeneous Transformation Matrix, HTM)算法以及激光二极管单模光纤对准光功率损耗的计算方法,考虑到影响运动平台对准效率的 24 种因素,通过式(3),依照正交分析获得的 5 条运动顺序配置方案,分别进行了 5 次计算机仿真试验,其对应的仿真试验结果见图 4~8,可知:在不同的运动顺序下,

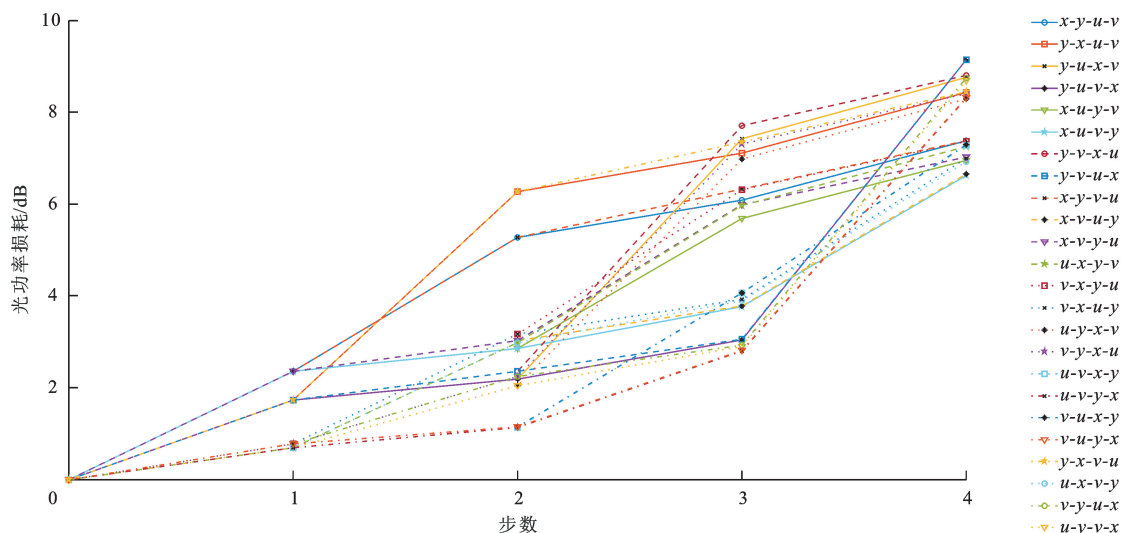


图 4 运动顺序为 X-W-Z-U-V-Y 的仿真结果

Fig. 4 Simulation results when motion sequence is X-W-Z-U-V-Y

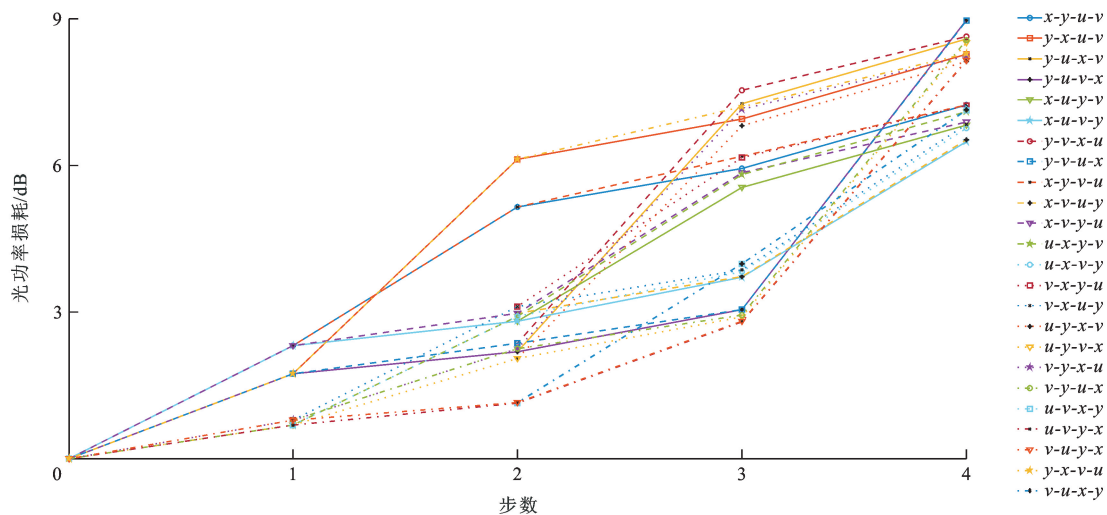


图 5 运动顺序为 W-V-X-U-Z-Y 的仿真结果

Fig. 5 Simulation results when motion sequence is W-V-X-U-Z-Y

随着运动平台运动步数的增加,所有曲线的光功率损耗均有增加,当步数达到 4 时,所有曲线的光功率损耗达到最大,说明无论采用哪一种试验顺序,都可实现运动平台上、下组件的顺利对接;若运动平台运动顺序不同,而影响因素相同,对应的光功率损耗却存在差异;图 4、5 中的运动顺序分别为 X-W-Z-U-V-Y 和 W-V-X-U-Z-Y,影响因素均为 $x-v-u-y$,完成相同的 4 个运动步骤所产生的光功率损耗分别为 2.33、3.00、3.74、6.66 dB 和 2.39、3.12、3.85、6.81 dB,说明在相同的影响因素条件下,运动顺序直接影响运动平台的耦合效率。可见,提高运动平台耦合效率的问题实际上就是运动平台运动顺序优化问题。

运动平台的运动顺序直接受影响因素 x 、 y 、 u 和 v 的影响。因为两者本身存在伴生关系,即随着运

动平台运动的进行,影响因素对运动平台耦合效率的影响也随之产生,因此,优化运动平台的运动顺序必须考虑影响因素,即考察在相同的运动顺序条件下,影响因素对运动平台耦合效率的影响。表 4 为图 4 中 24 种因素影响下运动平台每步产生的光功率损耗,可知:相同的运动顺序和不同的影响因素反映在耦合效率光功率损耗差异较大,影响因素为 $x-u-v-y$ 时,第 4 步对应的光功率损耗为 6.63 dB,影响因素为 $y-v-u-x$ 时,第 4 步对应的光功率损耗为 9.15 dB,说明敏感的 4 个运动单元 X 、 Y 、 U 和 V 对整个运动平台运动误差系统的影响程度存在差异,正是这种影响权重的差异导致了运动平台各运动单元在整个运动系统中所产生的几何误差在积累、传递以及耦合过程中也存在差异。可见,深入讨论这

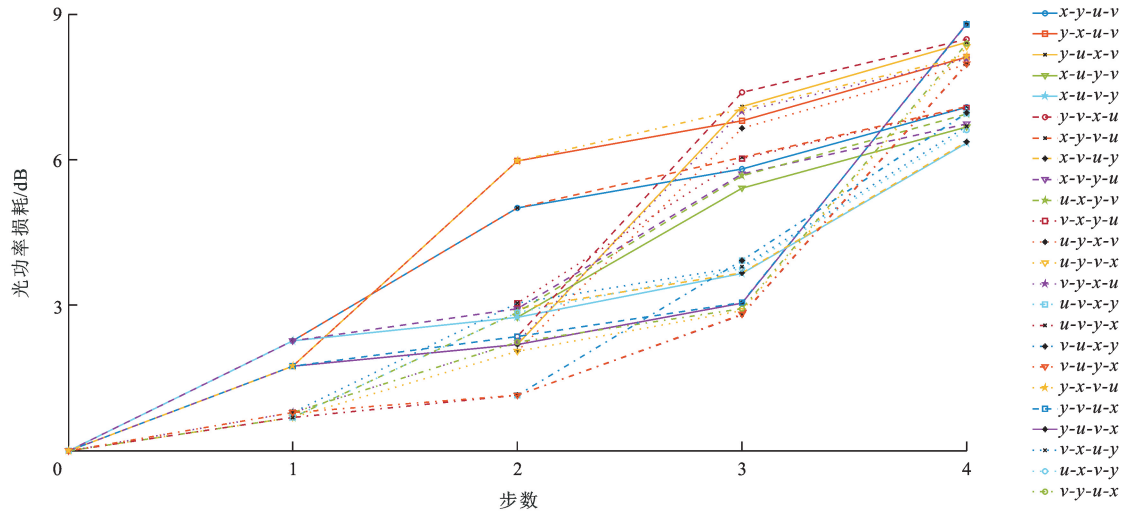


图 6 运动顺序为U-V-Z-W-Y-X 的仿真结果

Fig. 6 Simulation results when motion sequence is U-V-Z-W-Y-X

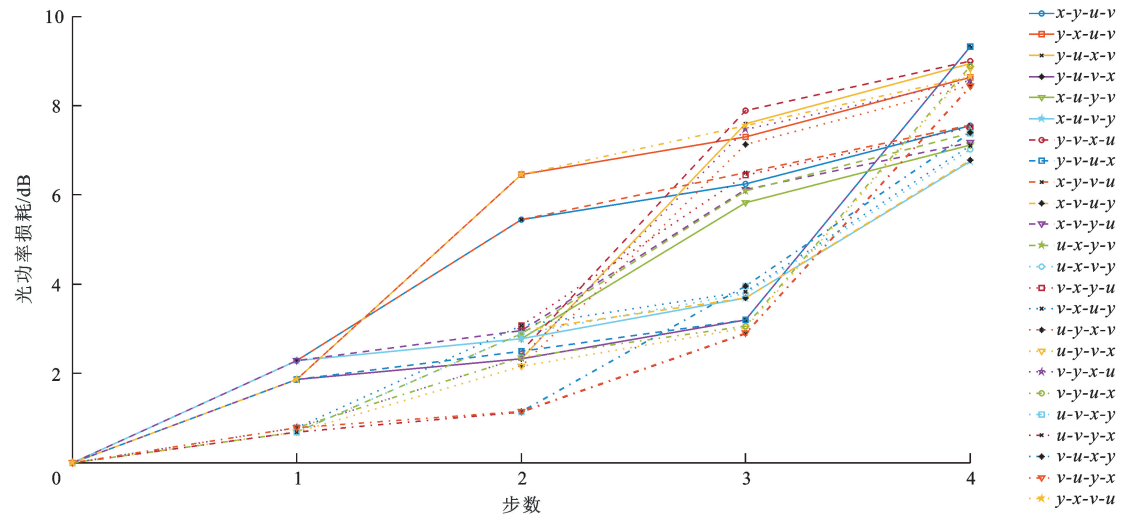


图 7 运动顺序为Y-U-X-W-V-Z 的仿真结果

Fig. 7 Simulation results when motion sequence is Y-U-X-W-V-Z

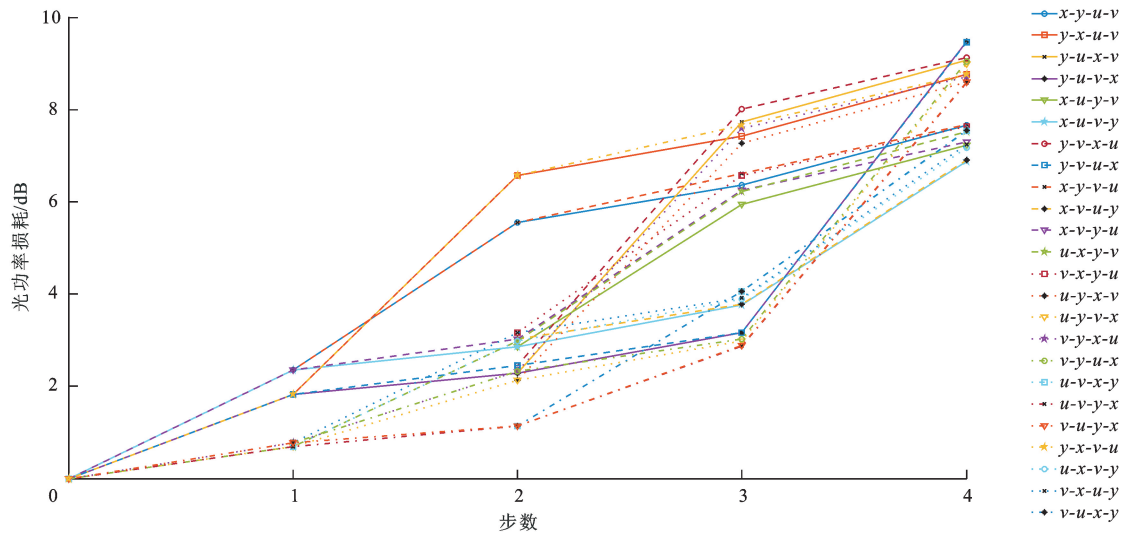


图 8 运动顺序为Z-Y-V-W-U-X 的仿真结果

Fig. 8 Simulation results when motion sequence is Z-Y-V-W-U-X

4 个敏感单元的影响权重对运动平台的运动顺序优化尤为重要。

表 4 运动顺序为 X-W-Z-U-V-Y 时 24 种影响因素每步光功率损耗

| Tab. 4 Optical power losses at every step by 24 influence factors when motion sequence is X-W-Z-U-V-Y dB | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 影响因素 | 第 1 步 | 第 2 步 | 第 3 步 | 第 4 步 |
| $x-y-u-v$ | 2.33 | 5.29 | 6.10 | 7.39 |
| $y-x-u-v$ | 1.76 | 6.28 | 7.12 | 8.45 |
| $y-u-x-v$ | 1.76 | 2.21 | 7.43 | 8.77 |
| $y-u-v-x$ | 1.76 | 2.21 | 3.08 | 9.16 |
| $x-u-y-v$ | 2.33 | 2.83 | 5.69 | 6.97 |
| $x-u-v-y$ | 2.33 | 2.83 | 3.73 | 6.63 |
| $y-v-x-u$ | 1.76 | 2.38 | 7.72 | 8.82 |
| $y-v-u-x$ | 1.76 | 2.38 | 3.08 | 9.15 |
| $x-y-v-u$ | 2.33 | 5.29 | 6.34 | 7.40 |
| $x-v-u-y$ | 2.33 | 3.00 | 3.74 | 6.66 |
| $x-v-y-u$ | 2.33 | 3.00 | 6.00 | 7.04 |
| $u-x-y-v$ | 0.69 | 2.94 | 5.97 | 7.25 |
| $u-x-v-y$ | 0.69 | 2.94 | 3.85 | 6.91 |
| $v-x-y-u$ | 0.78 | 3.13 | 6.31 | 7.37 |
| $v-x-u-y$ | 0.78 | 3.13 | 3.89 | 6.99 |
| $u-y-x-v$ | 0.69 | 2.07 | 6.98 | 8.30 |
| $u-y-v-x$ | 0.69 | 2.07 | 2.92 | 8.69 |
| $v-y-x-u$ | 0.78 | 2.27 | 7.32 | 8.41 |
| $v-y-u-x$ | 0.78 | 2.27 | 2.95 | 8.74 |
| $u-v-x-y$ | 0.69 | 1.13 | 4.02 | 7.27 |
| $u-v-y-x$ | 0.69 | 1.13 | 2.81 | 8.30 |
| $v-u-x-y$ | 0.78 | 1.14 | 4.02 | 7.29 |
| $v-u-y-x$ | 0.78 | 1.14 | 2.83 | 8.31 |
| $y-x-v-u$ | 1.76 | 6.28 | 7.37 | 8.46 |

表 5 为图 4~8 中运动系统对几何误差敏感的 4 个运动单元在仿真试验中每步所产生的平均光功率损耗,可知:4 个敏感单元中,X 在运动平台仿真试验 4 步中所产生的平均光功率损耗都较大,分别为 2.33、3.04、4.38 和 5.78 dB,且随步数的增加而增大;相对于其他 3 个敏感单元,X 每步产生的平均光功率损耗最大,说明在 4 个敏感单元中,X 是最大的影响因子,所占的影响权重最大;当 X 与 Y 相邻时,对应于第 2 步的光功率损耗增长较快,说明在选择运动平台的运动顺序时,敏感单元 X、Y 不宜相邻配置。由此可见,欲有效控制运动平台的系统误差和提高平台运动的耦合效率,运动顺序配置时应将敏感单元 X 放在第 1 位,且运动单元 X 与 Y 不宜相邻配置。

表 5 四个敏感单元每步所产生的平均光功率损耗

| Tab. 5 Average optical power losses at every step generated by four sensitive units dB | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| 敏感单元 | 第 1 步 | 第 2 步 | 第 3 步 | 第 4 步 |
| X | 2.33 | 3.04 | 4.38 | 5.78 |
| Y | 1.76 | 1.94 | 2.57 | 3.08 |
| U | 0.69 | 0.43 | 0.75 | 1.07 |
| V | 0.78 | 0.58 | 0.94 | 1.30 |

依照同样思路,先剔除敏感单元 X(计算时视敏感单元 X 为常数)的影响,再分别讨论单元 Y、U 和 V 对运动平台运动误差系统的影响。表 6 为剔除 X 后,Y、U 和 V 在余下 3 步中产生的平均光功率损耗,可知:运动平台的误差系统中,敏感单元 Y 产生的平均光功率损耗随步数的增加而降低,而敏感单元 U 和 V 的平均光功率损耗随步数的增加而增加;虽然 Y 在运动平台余下的运动步骤中对应的平均光功率损耗远大于 U 和 V,但前者表现出是下降,而后者表现出是增长,说明敏感单元 Y 应放在最后。

表 6 敏感单元 Y、U 和 V 在余下 3 步的平均光功率损耗

| Tab. 6 Average optical power losses for sensitive units Y, U and V on rest three steps dB | | | |
|--|-------|-------|-------|
| 敏感单元 | 第 2 步 | 第 3 步 | 第 4 步 |
| Y | 2.96 | 2.93 | 2.91 |
| U | 0.67 | 0.98 | 1.28 |
| V | 0.49 | 0.77 | 1.05 |

剔除敏感单元 X 和 Y,讨论敏感单元 U 和 V 对运动平台误差系统的影响,计算结果见表 7,可知:剔除敏感单元 X、Y 后,虽然敏感单元 U 和 V 在余下 2 步产生的平均光功率损耗都不大,但前者的增长幅度(0.37)大于后者(0.24);在余下的 2 步中,敏感单元 U 对运动系统误差的影响程度大于敏感单元 V,因此,在运动平台运动顺序配置时,敏感单元 U 应排在敏感单元 V 之前。

表 7 敏感单元 U 和 V 在余下 2 步的平均光功率损耗

| Tab. 7 Average optical power losses for sensitive units U and V on rest two steps dB | | |
|---|-------|-------|
| 敏感单元 | 第 3 步 | 第 4 步 |
| U | 0.49 | 0.86 |
| V | 0.67 | 0.91 |

综上所述,通过仿真计算光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接运动平台的运动顺序,并综合分析 4 个对运动平台系统误差有影响的敏感单元,可得出结论:光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤封装系统运动平台运动误差系统影响程度

排序应为 $X-U-V-Y$, 所对应的运动顺序排序为 $X-U-V-Y$, 此时系统的耦合精度和效率最高。

4 运动顺序优化验证

为考察光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接运动平台运动顺序正交分析结果, 本文进行了相关实测试验。试验装置为 To-Can 型 LD 组件封装系统, 主要组成包括: 显示屏、精密运动平台、组件封装系统和光功率计, 见图 9。

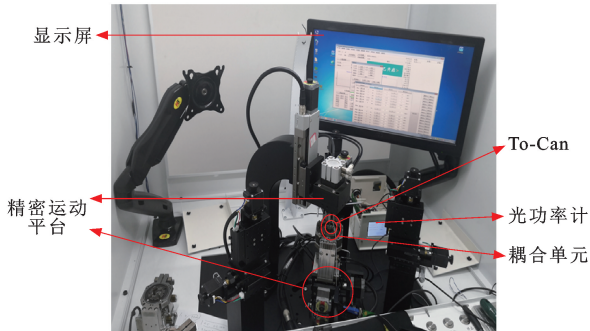


图 9 To-Can 型 LD 组件封装配准过程

Fig. 9 Packaging and aligning processes for LD component of type To-Can

试验过程为模拟传感器的智能芯片与光纤阵列对接; 平动运动步长为 10 mm; 转动运动步长为 0.028° ; 试验目的为考察对几何误差敏感的 4 个运动单元在 24 种运动顺序下的光功率损耗, 通过分析试验结果优化出运动平台运动顺序耦合精度最高的路径。每组试验重复 5 次, 分别记录每个运动单元的初始光功率损耗和划定运动时 4 步产生的光功率损耗, 并取平均值。试验前借助运动平台精配准功能确定某随机位置为初始参考位置, 记录下该位置的光功率损耗, 再次试验时通过平台自动搜索功能与光功率计反馈功能重新回到初始参考位置, 如此反复直到试验完成。全部实测结果见图 10, 试验平台运动每步所产生的平均光功率损耗见表 8, 剔除敏感单元 X 后, 敏感单元 Y 、 U 和 V 在余下 3 步的实测平均光功率损耗见表 9, 可知: 敏感单元 X 在试验平台运动第 1、2 步之间产生的平均光功率损耗 (4.79~7.12 dB) 增长最快且最大, 说明敏感单元 X 对平台运动的误差系统响应最强烈, 其影响程度位置排序应为第 1; 敏感单元 Y 在第 3 步产生的平均光功率损耗的增幅趋缓, 第 4 步却急剧减少, 说明敏感单元 Y 对运动平台误差系统的响应变弱, 所以敏感单元 Y 应放在最后。

表 10 为剔除敏感单元 X 、 Y 后, 敏感单元 U 和 V 在余下 2 步中产生的平均光功率损耗。

表 8 敏感单元 X 、 Y 、 U 和 V 在 4 步运动中产生的平均光功率损耗

Tab. 8 Average optical power losses for sensitive units

X , Y , U and V on four motion steps

dB

| 敏感单元 | 第 1 步 | 第 2 步 | 第 3 步 | 第 4 步 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| X | 4.79 | 7.12 | 9.15 | 5.15 |
| Y | 3.08 | 5.21 | 5.95 | 1.09 |
| U | 0.81 | 2.61 | 6.02 | 1.30 |
| V | 0.65 | 1.89 | 2.51 | 0.06 |

表 9 敏感单元 Y 、 U 和 V 在余下 3 步运动中产生的平均光功率损耗

Tab. 9 Average optical power losses for sensitive units

Y , U and V on rest three steps

dB

| 敏感单元 | 第 2 步 | 第 3 步 | 第 4 步 |
|------|-------|-------|-------|
| Y | 6.05 | 7.92 | 0.20 |
| U | 5.59 | 8.20 | 0.90 |
| V | 1.34 | 1.38 | 0.83 |

表 10 敏感单元 U 和 V 在余下 2 步运动中产生的平均光功率损耗

Tab. 10 Average optical power losses for sensitive units

U and V on rest two steps

dB

| 敏感单元 | 第 3 步 | 第 4 步 |
|------|-------|-------|
| U | 5.11 | 7.95 |
| V | 1.46 | 0.77 |

比较表 10 中剔除单元 X 、 Y 后, U 和 V 对运动平台误差系统的影响, 前者反映出的平均光功率损耗及其增幅明显高于后者, 说明 U 对运动平台系统运动误差的影响大于 V 。由此可确定敏感单元 U 和 V 应分别排在第 2、3 位。

综上所述, 欲获得试验平台最佳的运动顺序, 运动平台运动单元运动顺序配置为 $X-U-V-Y$, 此时的配准精度最高, 该试验结果与仿真计算结果吻合。

5 结 语

(1) 传感器智能芯片与阵列光纤对接平台运动顺序优化, 需区分和分类各运动单元产生的敏感性几何误差。根据误差敏感性分析, 可进一步探讨运动平台几何误差在产生、积累和传递过程中存在权重差异。误差敏感性分析有助于指导运动平台运动的排序。

(2) 由于六自由度运动平台各运动单元具有相对独立的特性, 符合均匀分散、齐整可比的原则, 可运用正交试验分析方法为多自由度运动平台运动顺序优化配置提供支撑。

(3) 根据正交分析及仿真试验结果, 光纤扫描雷达传感器智能芯片与阵列光纤对接封装平台空间运动顺序最优配置为 $X-U-V-Y$ 。该优化结果有助于运动平台高效、快捷地对准智能芯片与阵列光纤, 提

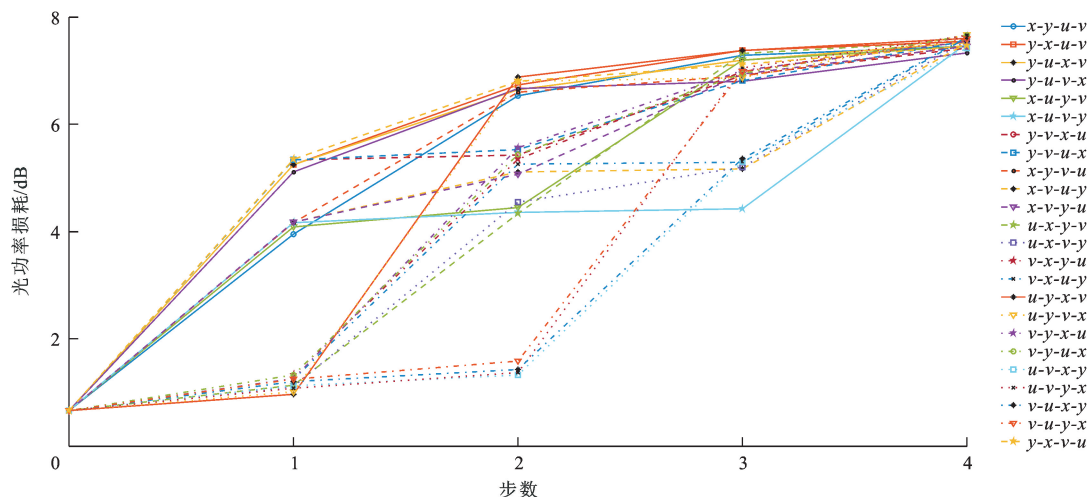


图 10 激光焊接平台试验结果

Fig. 10 Test results of laser welding platform

高了工作效率,降低了生产成本,还可预测和规划其他多自由度运动平台的配准路径。

(4)因温度变化而引起的运动平台误差涉及的原因较为复杂,包括气候变化范围、运动平台材质对温度的敏感程度以及运动平台误差耦合规律等,将在后续研究中展开。

参考文献:

References:

- [1] LI Jing, SONG Ning-fang, YANG Gong-liu, et al. Improving positioning accuracy of vehicular navigation system during GPS outages utilizing ensemble learning algorithm [J]. Information Fusion, 2017, 35: 1-10.
- [2] 王艺辉,刘延飞,赵鹏涛,等.基于九轴姿态传感器的智能汽车平面定位模块设计与实践[J].科技与创新,2018(6):3-6.
WANG Yi-hui, LIU Yan-fei, ZHAO Peng-tao, et al. Design and application of planar positioning module for intelligence vehicle based on 9-axis orientation sensor[J]. Science and Technology Innovation, 2018(6): 3-6. (in Chinese)
- [3] TANG Hao, ZHANG Zi-lin, LI Chang-ping, et al. A geometric error modeling method and trajectory optimization applied in laser welding system[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019, 20: 1423-1433.
- [4] 王金伟,郝欣.基于雷达与光学传感器的协同定轨技术[J].中国电子科学研究院学报,2019,14(3):296-300.
WANG Jin-wei, HAO Xin. Cooperative orbit determination technology based on radar and optical sensor[J]. Journal of CAEIT, 2019, 14(3): 296-300. (in Chinese)
- [5] 唐铂,李振华,王春勇,等.线阵扫描三维成像激光雷达系统[J].激光与红外,2017,47(11):1358-1364.
TANG Bo, LI Zhen-hua, WANG Chun-yong, et al. 3D imaging laser radar based on laser array and APD array[J]. Laser and Infrared, 2017, 47(11): 1358-1364. (in Chinese)
- [6] OMIDI E, KORAYEM A H, KORAYEM M H. Sensitivity analysis of nanoparticles pushing manipulation by AFM in a robust controlled process[J]. Precision Engineering, 2013, 37(3): 658-670.
- [7] 安天益,朱启荣,吴昊.基于光纤光栅传感器的复合材料损伤探测研究[J].实验技术与管理,2019,36(6):72-75.
AN Tian-yi, ZHU Qi-rong, WU Hao. Study on damage detection of composite materials based on optical fiber grating sensor [J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(6): 72-75. (in Chinese)
- [8] 李旭,李保柱.光纤扫描激光雷达技术[J].红外与激光工程,2008,37(5):793-796.
LI Xu, LI Bao-zhu. Fiber scanner radar technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(5): 793-796. (in Chinese)
- [9] SONG J B, CHOI S Y, PARK K. Aiming error analysis of guns ground combat vehicles operating on bumpy roads[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(12): 5145-5150.
- [10] 刘强,毕卫红,付兴虎,等.基于少模光纤长周期光栅叠栅的折射率传感特性[J].光子学报,2018,47(1):0106001-1-7.
LIU Qiang, BI Wei-hong, FU Xing-hu, et al. Refractive index sensing characteristic of superimposed long period gratings on few mode fiber [J]. Acta Photonic Sinica, 2018, 47(1): 0106001-1-7. (in Chinese)
- [11] TANG Hao, LI Chang-ping, ZHANG Zi-lin, et al. A novel geometric error modeling optimization approach based on error sensitivity analysis for multi-axis precise motion platform[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(7): 3435-3444.
- [12] BOHEZ E L J, ARIYAJUNYA B, SINLAPEECHEEWA C, et al. Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines[J]. Computer-Aided Design, 2007, 39: 229-244.

- [13] TAN K K, HUANG S N, LIM S Y, et al. Geometric error modeling and compensation using neural networks[J]. IEEE Transactions on System Man Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 2006, 36(6): 797-809.
- [14] ZI Bin, DING Hua-feng, WU Xia, et al. Error modeling and sensitivity analysis of a hybrid-driven based cable parallel manipulator[J]. Precision Engineering, 2014, 38(1): 197-211.
- [15] 栗时平,李圣怡,王贵林. 基于空间误差模型的加工中心几何误差辨识方法[J]. 机械工程学报, 2002, 38(7): 121-125.
- SU Shi-ping, LI Sheng-yi, WANG Gui-lin. Identification method for errors of machining center based on volumetric error model[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 38(7): 121-125. (in Chinese)
- [16] 杨建国,任永强,朱卫斌,等. 数控机床热误差补偿模型在线修正方法研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 81-84.
- YANG Jian-guo, REN Yong-qiang, ZHU Wei-bin, et al. Research on on-line modeling method of thermal error compensation model for CNC machines[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(3): 81-84. (in Chinese)
- [17] 田延岭,张大卫,陈华伟,等. 基于微定位工作台的精密磨削过程动力学建模与误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2005, 41(4): 168-173.
- TIAN Yan-ling, ZHANG Da-wei, CHEN Hua-wei, et al. Modeling of precision grinding process based on micro-positioning table and error compensation technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 168-173. (in Chinese)
- [18] 王秀山,杨建国,闫嘉钰. 基于多体系统理论的五轴机床综合误差建模技术[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(5): 761-764, 769.
- WANG Xiu-shan, YANG Jian-guo, YAN Jia-yu. Synthesis error modeling of the five-axis machine tools based on multi-body system theory[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(5): 761-764, 769. (in Chinese)
- [19] ZUO Xiao-yan, LI Bei-zhi, YANG Jian-guo. Error sensitivity analysis and precision distribution for multi-operation machining processes based on error propagation model[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2016, 86(1-4): 269-280.
- [20] TANG Hao, DUAN Ji-an, LAN Shu-huai, et al. A new geometric error modeling approach for multi-axis system based on stream of variation theory[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 92: 41-51.
- [21] TANG Hao, DUAN Ji-an, ZHAO Qian-cheng. A systematic approach on analyzing the relationship between straightness and angular errors and guideway surface in precise linear stage[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 120: 12-19.
- [22] 唐 皓,段吉安,郑 煜,等. 平面光波导精密对准平台运动误差的敏感性分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(8): 888-892, 896.
- TANG Hao, DUAN Ji-an, ZHENG Yu, et al. Motion error sensitivity analysis of planar optical waveguide precise aligning stage[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(8): 888-892, 896. (in Chinese)
- [23] WEI Wei-feng, ZHANG Guang-peng. Tool path modeling and error sensitivity analysis of crankshaft pin CNC grinding[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 86: 2485-2502.
- [24] TANG Hao, DUAN Ji-an, LU Sheng-qiang. Stream-of-variation (SOV) theory applied in geometric error modeling for six-axis motion platform[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 120: 1-9.
- [25] TIAN Wen-jie, GAO Wei-guo, ZHANG Da-wei, et al. A general approach for error modeling of machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2014, 79: 17-23.
- [26] 钱小辉,马骁妍,秦中华,等. 基于正交试验的玻璃壳热应力影响因素分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(12): 91-98.
- QIAN Xiao-hui, MA Xiao-yan, QIN Zhong-hua, et al. Analysis of glass shell's thermal stress based on orthogonal experiment[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(12): 91-98. (in Chinese)
- [27] 郭 芳,原 霞,吉梦雯,等. 基于二次回归正交试验的连杆衬套成形质量分析[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(5): 153-157.
- GUO Fang, YUAN Xia, JI Meng-wen, et al. Forming quality analysis of connecting rod bushing based on quadratic regression orthogonal test[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(5): 153-157. (in Chinese)
- [28] 陈达亮,王 东,顾灿松,等. 基于正交试验法的离合器动力学模型优化[J]. 机械工程与自动化, 2018(4): 160-162.
- CHEN Da-liang, WANG Dong, GU Can-song, et al. Clutch dynamic model optimization based on orthogonal experiment method[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2018(4): 160-162. (in Chinese)
- [29] ZHAO Li-ping, CHEN Hong-ren, YAO Yi-yong, et al. A new approach to improving the machining precision based on dynamic sensitivity analysis[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 102: 9-21.
- [30] LIN Y, SHEN Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach[J]. International Journal of Advanced Manufacture Technology, 2003, 21(4): 243-248.