

高速列车车端关系综合试验台试验研究

王英波¹, 李明², 丛大成¹, 许宏光¹, 韩俊伟¹

(1. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 150001 哈尔滨; 2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司
高速列车系统集成国家工程实验室, 266111 山东 青岛)

摘要: 为了验证基于 Stewart 并联机器人的车端关系综合试验台能否满足车端关系试验的要求, 进行静态定位精度、最大运动范围、运动学正解、动态跟踪特性和最大输出速度试验. 结果表明, 试验台最大平移运动定位误差 0.1 mm, 最大旋转运动定位误差 0.1°, 远优于车端关系试验实际需求, Stewart 并联机器人运动学正解精确, 可用于系统状态实时监控; 动态跟踪特性中, 最大幅值衰减和相位滞后均发生在 Y 向, 分别为 0.755 dB 和 25.92°, 明显优于幅值衰减 3 dB 和相位滞后小于 90° 的要求; 三向平移运动最大输出速度均能够达到 0.2 m/s 的要求. 表明车端关系综合试验台完全能够满足高速列车车端关系试验的要求, 并且具备进一步提升性能的空间.

关键词: 高速列车; 车端关系试验; Stewart 并联机器人; 运动学正解; 定位精度; 动态跟踪; 试验研究

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0051-04

Experimental study on the comprehensive test bench of high-speed train cabinet-end relationship

WANG Ying-bo¹, LI Ming², CONG Da-cheng¹, XU Hong-guang¹, HAN Jun-wei¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China;

2. National Engineering Laboratory for System Integration of High-speed Train, CSR Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Corporation Limited, 266111 Qingdao, Shandong, China)

Abstract: To verify whether the comprehensive test bench of cabinet-end relationship for high-speed train can meet the demand or not, the positioning precision, maximum motion range, forward kinematics, dynamic tracking performance and maximum output speed tests were carried out. The results indicate that the maximum positioning error of translational motion is 0.1 mm and the maximum positioning error of rotation motion is 0.1°, far superior to the actual demand. The forward kinematics of the Stewart parallel manipulator is precise enough and can be used for monitoring the real-time state of the system. In the dynamic tracking test, the maximum aptitude attenuation and the maximum phase lag occur in the Y direction, 0.755 dB and 25.92°, respectively, significantly better than the amplitude attenuation 3 dB and phase lag 90°. The maximum output speed of three translational motion can meet the 0.2 m/s requirement. The results show that cabinet-end relationship comprehensive test bench can fully meet the demand of the high-speed train cabinet-end relationship test and has space for further improving performance.

Key words: high-speed train; cabinet-end relationship test; Stewart parallel manipulator; forward kinematics; positioning accuracy; dynamic tracking; experimental study

收稿日期: 2011-11-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105094); 机器人技术与系统国家重点实验室资助项目(SKLRS200803B).

作者简介: 王英波(1979—), 男, 博士研究生;
韩俊伟(1964—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王英波, foreverbluesun@foxmail.com.

贯通道是列车车端组件的核心部件, 普通时速列车贯通道采用莲蓬布式结构, 但高速列车贯通道采用的是橡胶结构, 不仅能为旅客通行提供一个安全的通道, 同时也具有隔音降噪等新功能. 目前的用于莲蓬布式贯通道的性能试验设备已经

无法满足现在的试验要求. 相对于串联机器人, 并联机器人具有很多更好的特性, 如高刚度、高推重比、高精度、高速度和加速度, 因此并联机构在很多领域中均有所应用^[1-3]. 并联机器人的第一次应用是由 Gough 设计用来做轮胎测试的并联机构^[4], 其他一些应用包括飞行模拟器, 微动机构, 航天器空间对接仿真器, CNC 机床, 球面射电望远镜、重载设备运动学仿真设备^[5-11]等等.

本文介绍了车端关系试验的内容和车端关系综合试验台的设计指标要求, 提出一种基于 Stewart 并联机器人的车端关系综合试验台设计方案, 该试验台是南车集团“高速列车系统集成国家工程实验室(National Engineering Laboratory for System Integration of High-speed Train, NELSIHT)”建设项目之一, 是国内第一部高速列车车端关系综合试验台, 其核心部件是一部液压驱动的 Stewart 并联机器人. 将 Stewart 并联机器人应用于高速列车列车领域尚属首次. 进行了 Stewart 并联机器人

的运动学正解分析, 并对试验台的静态定位精度、最大运动范围、运动学正解验证、动态跟踪和最大输出速度等指标进行了测试.

1 问题描述

车端关系试验是指安装在车体端部的部件在列车运行过程中, 列车各车体间相对运动和通过曲线时各部件发生相对移动和转动, 通过测量部件的位移和力的变化, 测量出车端的刚度及阻尼等参数, 为列车动力学分析提供准确的数据. 车端关系试验包括: 干涉验证试验(模拟列车通过直线、曲线及 S 曲线时的运行状态, 检验安装在车端各部件的相互干涉关系); 功能性试验(车钩模拟连挂试验、转动试验; 贯通道模拟摆动试验); 研究性试验(车端部件的刚度和阻尼试验; 车端部件的动态刚度和动态阻尼试验; 车端部件的疲劳试验). 根据高速列车实际运行情况以及车端部件试验的性质, NELSIHT 对车端关系综合试验台提出如表 1 所示的性能指标要求.

表 1 车端关系综合试验台性能指标要求

参数	伸缩运动 - X 向/mm	横移运动 - Y 向/mm	浮沉运动 - Z 向/mm	侧滚运动 - 绕 X 向/(°)	点头运动 - 绕 Y 向/(°)	摇头运动 - 绕 Z 向/(°)	运动速度 - 仅限 于单向运动/ (m · s ⁻¹)	运动 频率/Hz
参数值	±150	±300	±60	±8	±6	±20	0.2	≤2

2 试验系统与方案

2.1 试验系统

根据车端试验的性质和试验系统指标要求, 提出基于 Stewart 并联机器人的车端关系综合试验台设计方案, 系统结构如图 1 所示. 车端关系综合试验台由前反力基础、Stewart 并联机器人(六自由度运动模拟器)、六维力/力矩传感器(或过渡件)、车端部件(图中为贯通道)、模拟车厢端和后反力基础等组成. 其中 Stewart 并联机器人是该试验台的核心部件, 提供六自由度的运动模拟环境. 贯通道右侧与模拟车厢端相连, 试验过程中保持静止状态, Stewart 并联机器人动平台与贯通道左侧固连, 试验过程中两者保持同步运动, 从而在贯通道左右两侧形成两节车厢端部的相对运动.

试验台采用模块化柔性设计, 通过调整车端不同部件的组合或单个部件, 可以满足地铁车辆、动车组、铁路客车车辆车端上的所有部件的试验需求. Stewart 并联机器人的结构由 5 个参数确定: 作动器初始长度 l_0 、上较短边距 d_a 、下较短边距 d_b 、上铰分布圆半径 R_a 和下铰分布圆半径 R_b , 如图 2 所示. Stewart 并联机器人的几何参数如表 2 所示.

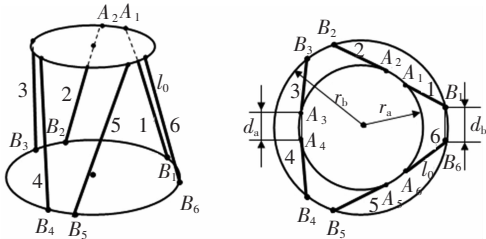


图 2 Stewart 并联机器人结构示意图

表 2 Stewart 并联机器人几何参数

参数	l_0	d_a	d_b	R_a	R_b
参数值	1.46	0.2	0.3	0.8	1.1

六路伺服作动器选用 HAENCHEN 公司 S002350 系列低摩擦单出杆非对称液压缸, 缸杆直径 45 cm, 缸筒直径 63 cm, 行程 469 cm, 由 MOOG 公司 R16KX1MONSX2 高频响电液伺服阀控制. 液压系统工作压力 21 MPa.

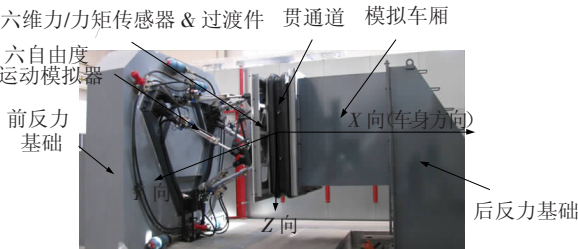


图 1 车端关系综合试验台

2.2 试验方案

根据试验台性能要求中对运动范围的要求, 首先进行静态定位精度和最大运动范围测试, 实际平移/旋转输出采用 NELSHT 指定的经纬仪和倾角传感器测量, 并将运动学正解输出值与实际输出值进行对比, 以确定运动学正解值的正确性; 采用 2 Hz 正弦信号进行动态跟踪性能测试, 确定各自由度运动频率 2 Hz 时, 是否满足幅值衰减 < 3 dB 和相位滞后 < 90° 的要求; 对 X、Y 和 Z 向进行最大速度测试, 位移输入为正弦信号, 幅值 0.082 m, 频率 0.4 Hz, 即 $0.082 * \sin(2 * \pi * 0.4 * t)$, 对应的最大输出速度为 0.2 m/s.

3 基于运动学正解的位姿测量方案

就目前国内外三维惯导装置的精度来看, 姿态角的测量精度一般能高于 0.01°, 但位置测量精度一般只有 20 mm 左右, 精度太低, 不能满足要求. 车端关系综合试验台采用基于 Stewart 并联机器人运动学正解的位姿测量方案.

Stewart 并联机器人运动学正解就是在给定液压缸位移的情况下, 求解动平台的位姿, 因为动平台与贯通道固连, 即是得到贯通道的位姿. 在实时应用中, 通常采用数值方法进行并联机器人的正解运算. 在车端关系综合试验中, 运动学正解采用 Newton-Raphson 迭代算法, 该算法的迭代序列可表示为

$$\boldsymbol{q}_{j+1} = \boldsymbol{q}_j + \boldsymbol{J}_{l_q}^{-1}(\boldsymbol{l}_m - \boldsymbol{l}_j).$$

(1)

式中: j 为迭代次数, $j \geq 1$; $\boldsymbol{l}_m$ 为缸长测量值; $\boldsymbol{J}_{l_q}^{-1}$ 为并联机器人雅克比矩阵的逆矩阵.

该正解算法利用了并联机器人的雅克比矩阵, 当该雅克比矩阵满足莱布尼兹条件时, 该算法能够收敛到局部最优解, 如果初值选择合适, 该算法能够快速收敛到实际位姿值. 而 Newton-Raphson 迭代算法具有对初值的设置不敏感的特点, 并且平均运算时间可达到 0.008 ms, 最长运行时间也可以达到 0.103 ms^[12], 通常控制系统的采样时间为 1 ~ 2 ms, 完全能够满足实时运算的要求.

4 试验结果与讨论

4.1 定位精度及最大运动范围测试

平动方向实验数据精确到 0.1 mm, 转动方向实验数据精确到 0.1°, 试验结果如表 3 所示, 其中, X、Y、Z 代表伸缩、横移、浮沉运动, RX、RY、RZ 代表侧滚、点头、摇头运动, “In” 代表输入值, “O₁” 代表测量值, “O₂” 代表运动学正解值.

对比实测值和输入值可以看出, 最大线运动误差是 0.1 mm, 最大旋转运动误差 < 0.1°. 实际上, 线运动误差 < 2 mm, 并且转动误差 < 1.0° 时, 即可满足车端关系试验的要求, 可见系统的静态定位精度远高于使用要求, 这也为试验台功能的进一步开发预留了很大的空间. 同时, 从表 3 中还可以看到, 在平动 0.1 mm 和转动 0.1° 精度范围内, 采用 Stewart 并联机器人运动学正解得到的位姿输出与输入值没有偏差, 相对于测量得到的实际值来说, 其误差非常小, 所以正解值是可信的, 可以用于监控系统实时运动状态, 这也验证了运动学正解分析的正确性.

表 3 定位精度及最大运动范围测试

X/mm			Y/mm			Z/mm			RX/(°)			RY/(°)			RZ/(°)		
In	O ₁	O ₂	In	O ₁	O ₂	In	O ₁	O ₂	In	O ₁	O ₂	In	O ₁	O ₂	In	O ₁	O ₂
-60	-60.0	-60.0	-300	-300.0	-300.0	-150	-150.0	-60.0	-20	-20.013	-20.00	-6	-6.026	-6.00	-8	-8.015	-8.00
-30	-30.0	-30.0	-150	-150.0	-150.0	-80	-80.0	-30.0	-10	-10.018	-10.00	-3	-3.033	-3.00	-4	-4.037	-4.00
30	30.0	30.0	150	150.0	150.0	80	80.0	-30.0	10	10.009	10.00	3	3.007	3.00	4	4.006	4.00
60	60.0	60.0	300	300.0	300.0	150	149.9	-30.0	20	20.005	20.00	6	5.995	6.00	8	8.005	8.00

4.2 动态跟踪特性试验

2 Hz 动态跟踪特性测试结果如图 3 和表 4 所示. 其余方向的测试结果曲线与 X 向的测试结果曲线相似, 见表 4. 其中, 幅值衰减 = $20 \lg(\text{实测幅值}/\text{给定幅值})$, 相位滞后 = $2 * \pi * [(\text{给定曲线过零点时间} - \text{实测曲线过零点时间})/\text{曲线周期}]$.

可以看出, 直线运动的最大幅值衰减为 0.755 5 dB, 最大相位滞后 25.92°, 发生在 Y 向运动; 旋转运动的最大幅值衰减 0.364 8 dB, 最大相位滞后 24.48°, 发生在 RY 方向上. 从数据可知,

各向幅值衰减均满足 < 3 dB, 各向相位滞后 < 90°, 试验台能够满足 2 Hz 以内的车端部件动态试验要求, 并且还有进一步提升的空间.

表 4 2 Hz 动态跟踪能力测试

方向	幅值衰减/dB	相位滞后/(°)
X	0.458 0	23.76
Y	0.755 5	25.92
Z	0.664 0	25.20
RX	0.291 5	23.76
RY	0.364 8	24.48
RZ	0.254 4	23.40

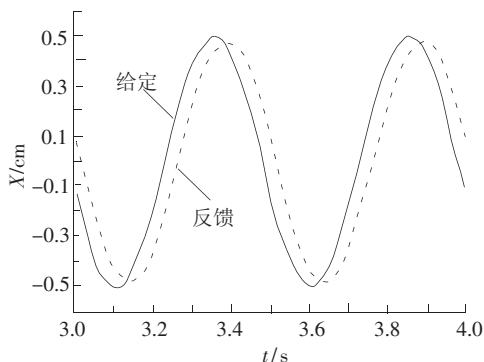


图3 X向2 Hz动态跟踪能力测试

4.3 最大输出速度试验

位移输入为正弦信号, 输入位移 $= A \sin(2 \pi f t)$, 对应的输出速度 $= 2 \pi A f$. 为了满足输出速度 0.2 m/s 的要求, 输入幅值 A 和输入频率 f 必须满足 $0.2 = 2 \pi A f$. 这里, 选择输入幅值为 0.082 m, 输入频率为 0.4 Hz, 对应的最大输出速度为 0.2 m/s. 试验结果如 4 所示.

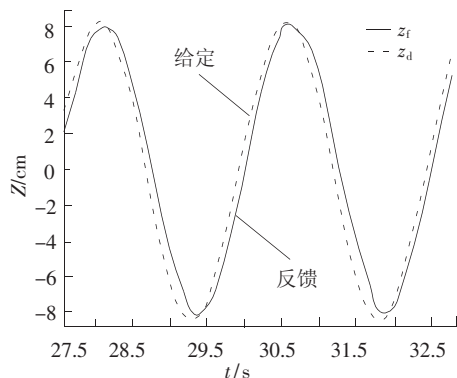


图4 Z向最大输出速度测试

从 Z 向测试曲线可以看出, 系统在 Z 向的最大输出速度满足 0.2 m/s 的要求. X 向和 Y 向的最大输出速度测试结果曲线与 Z 向的测试结果曲线相似, 均满足 0.2 m/s 的要求, 这里不再列出. 在高速列车运行过程中, 两节车厢之间在平移方向的相对运动会发生速度上的“突变”, 比如在换轨时, 两节车厢会发生横移方向的速度“突变”; 而在高速列车运行过程中, 两节车厢之间的旋转幅度和旋转速度是非常小的, 否则对行车安全会造成很大影响, 这需要由列车的转向架系统进行调节, 所以在车端关系综合试验台设计指标中并未提出最大旋转速度要求, 此处不做讨论.

5 结论

1) 车端关系综合试验台最大线运动定位误差是 0.1 mm, 最大旋转运动定位误差 $< 0.1^\circ$, 能够满足车端关系试验的精度要求; 采用 Stewart 并联机器人运动学正解得到的位姿输出在保留精度范围

内与输入没有偏差, 可用于系统状态实时监控.

2) 车端关系综合试验台直线运动的最大幅值衰减为 0.755 5 dB, 最大相位滞后 25.92° ; 旋转运动的最大幅值衰减 0.364 8 dB, 最大相位滞后 24.48° , 各向幅值衰减均满足 < 3 dB, 各向相位滞后 $< 90^\circ$, 试验台能够满足 2 Hz 以内的车端部件动态试验要求, 性能还有进一步提升的空间.

3) 车端关系试验台在 X、Y 和 Z 向平移运动满足输出速度最大 0.2 m/s 的要求, 能够精确模拟两车端之间运动速度“突变”状态.

参考文献:

- [1] GOSSELIN C. Determination of the workspace of 6-DOF parallel manipulators [J]. Journal of Mechanical Design, 1990, 12(3): 331–336.
- [2] HARIB K, SRINIVASAN K. Kinematic and dynamic analysis of Stewart platform-based machine tool structures [J]. Robotica, 2003, 21: 541–554.
- [3] IDER K S, KORKMAZ O. Trajectory tracking control of parallel robots in the presence of joint drive flexibility [J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 319: 77–90.
- [4] STEWART D. A platform with 6 degrees of freedom [J]. Aircraft Engineering, 1966, 38(1): 30–35.
- [5] KOEKEBAKKER S H. Model-based control of a flight simulator motion system [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2001: 12–29.
- [6] PARIKH P J, LAM S S Y. A hybrid strategy to solve the forward kinematics problem in parallel manipulators [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 18–25.
- [7] ZHANG Wanzhou. The manned spacecraft docking mechanism of Soviet [J]. Aerospace China, 1994, 10: 17–20.
- [8] 延皓. 基于液压六自由度平台的空间对接半物理仿真系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 1–20.
- [9] TING Y, CHEN Y S, JAR H C. Modeling and control for a Gough-Stewart platform CNC machine [J]. Journal of Robotic Systems, 2004, 21(11): 609–623.
- [10] YAO Rui. Dimensional optimization design of the four-cable-driven parallel manipulator in FAST [J]. IEEE/ASME Trans Mechatronics, 2010, 15(6): 932–941.
- [11] CUI Guohua, ZHANG Yanwei. Analysis of load capacity on spatial rotation 4-SPS-S parallel manipulator [C]//2010 Second international conference on computer modeling and simulation. Sanya: IEEE Computer Society, 2010: 219–223.
- [12] 何景峰. 液压驱动六自由度并联机器人特性及其控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 30–31.

(编辑 杨波)