

隧道检测用并联式车载稳定平台构型综合 与耦合运动分析

罗二娟^{1,2}

(1. 山西省交通新技术发展有限公司, 山西 太原 030006; 2. 山西交通科学研究院集团有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 针对车辆高速行驶时隧道视觉检测系统图像采集质量显著下降的问题, 结合当前公路隧道检测用并联式稳定平台构型综合研究较少、传统并联机构学模型均建立于惯性坐标系的现状, 提出一种基于并联式稳定平台的扰动隔离方案, 以保障图像采集的稳定性和清晰度。首先, 通过现场试验分析了隧道结构参数与车身姿态对视觉系统性能的影响, 据此制定了并联式车载稳定平台构型综合原则, 设计了一种具有两移一转自由度的2SPR/RPS并联机构, 并分析了其耦合运动特征。其次, 基于刚体运动的旋量描述及惯性系与非惯性系间的耦合位姿变换关系, 建立了运动平台在非惯性系下的六维运动描述, 进而推导了并联式车载稳定平台在非惯性系中的运动学模型。最后, 结合已研制的隧道检测系统来确定平台结构与运动参数, 通过数值计算与半实物仿真验证了理论分析的正确性。研究表明: 设计的2SPR/RPS并联机构可有效补偿车辆行驶中的侧移、升降、侧倾等扰动; 提出的非惯性系耦合运动学建模方法为空间复杂多刚体系统运动/动力学问题提供了有效解决路径。但是, 并联机构存在占用空间大、能耗高的固有缺陷, 后续需通过反复优化结构尺寸、优选伺服电动缸等核心元器件, 方可满足工程应用要求。

关键词: 视觉检测; 并联机构; 稳定平台; 构型综合; 运动分析; 非惯性系

中图分类号: TP24; U45 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.01.0012

引用格式: 罗二娟. 隧道检测用并联式车载稳定平台构型综合与耦合运动分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 703-711.

LUO Erjuan. Type synthesis and coupled kinematics analysis of parallel vehicle-based stabilized platform for tunnel detecting[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 703-711.

Type Synthesis and Coupled Kinematics Analysis of Parallel Vehicle-Based Stabilized Platform for Tunnel Detecting

LUO Erjuan^{1,2}

(1. Shanxi Transportation New Technology Development Co., Ltd., Taiyuan 030006, China;

2. Shanxi Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan 030006, China)

Abstract: Aiming at the problem that the image acquisition quality of the tunnel visual inspection system decreases significantly when the vehicle was moving at high speed, and combining with the current situation that the comprehensive research on the type synthesis of parallel stabilized platforms for highway tunnel detection was less and the traditional kinematic models of parallel stabilized platforms were all established in the inertial coordinate system, a disturbance isolation scheme based on the parallel stabilized platform was proposed to ensure the stability and clarity of image acquisition. Firstly, the influence of tunnel

收稿日期: 2025-01-09

作者简介: 罗二娟(1984—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事智慧交通、交通智能装备、并联机器人等方面的研究。E-mail: 329407132@qq.com。

structure parameters and vehicle body posture on the performance of the visual system was analyzed through field tests. Based on this, the comprehensive principles for the configuration of the parallel vehicle-mounted stabilized platform were formulated. A 2SPR/RPS parallel mechanism with 2-DOF transitional and 1-DOF rotational was designed, and its coupled motion characteristics were analyzed. Secondly, based on the spinor description of rigid body motion and the coupled pose transformation relationship between inertial and non-inertial frames, a six-dimension motion description of the motion platform in non-inertial frames was established, and the kinematic model of the parallel vehicle mounted stabilized platform in non-inertial frames was derived. Finally, the platform structure and motion parameters were determined based on the developed tunnel detection system, and the correctness of the theoretical analysis was verified through numerical calculations and semi-physical simulations. The results show that the 2SPR/RPS parallel vehicle-mounted stabilization platform mechanism designed in this paper can effectively compensate for the impact of external disturbances such as lateral shift, lifting, and rolling on the tunnel visual inspection system. The proposed non-inertial frame coupled kinematic modeling method provides an effective solution path for the kinematics problems of complex spatial multi-rigid-body systems. However, parallel mechanisms have disadvantages such as large space occupation and high energy consumption, it is necessary to repeatedly optimize the structural dimensions and select the best servo electric cylinders and other components in order to achieve engineering applications.

Key words: vision detection; parallel mechanism; stabilized platform; type synthesis; kinematics analysis; non-inertial system

0 引言

公路隧道运营过程中会产生裂缝、剥落、渗水等各种病害^[1-2],人工检测方法需要封闭道路,主观程度高、速度慢、精度低。机器视觉检测技术凭借其形象直观、检测速度快以及精度高等显著优势,在工业无损检测领域得以广泛应用^[3-4]。公路隧道断面周长约20 m,而裂缝等病害的几何尺寸较小,一般为0.1~0.8 mm,因此高质量的图像采集是病害特征处理与识别的前提^[5-6]。但是,受驾驶员主观意识、周围车流量、路面颠簸等外部扰动作用,数字相机等车载设备与隧道衬砌之间的位姿会发生变化,特别是不同设计时速的隧道的结构参数差异较大,会严重影响视觉系统的采集效果,导致图像模糊甚至无法成像^[7]。由于隧道智能检测系统中的高精度数字相机景深较小(-200~200 mm),同时行车速度较快(50~80 km/h),只通过实时调整相机参数无法隔离车辆外部扰动对视觉采集设备的影响。因此,为保证良好的图像采集效果,需要在视觉系统与车辆底盘之间增加一套伺服运动补偿机构,以实现数字相机与隧道衬砌表面之间的相对位姿保持不变。

目前,应用较为成熟的载体式稳定平台多为二、三轴串联转台,主要用于姿态稳定,不能隔离载体

移动扰动,这也限制了其在隧道智能检测系统中作用的发挥^[8]。并联机构易于实现空间多轴联动补偿^[9],具有多自由度输出、移动空间大等优点,是研制面向隧道视觉检测车载稳定平台的理想机构学模型。目前,并联式稳定平台多以Stewart并联机构为主,占用空间大、能耗高、造价高^[10],无法应用于隧道检测系统中。

另外,现有的并联机器人机构学模型均是在地面等惯性系中建立的,而并联式车载稳定平台是一个处于非惯性系环境中的复杂多刚体系统。研究刚体在非惯性系中的动力学问题时,需导出刚体在惯性系与非惯性系中的运动映射关系,然后引入惯性力,进而建立动力学模型^[11]。传统的刚体动力学分析方法主要有以牛顿-欧拉方程为代表的矢量力学法和拉格朗日为代表的分析力学法^[12],用于分析多刚体系统动力学问题时十分复杂与困难。Aspragathos等^[13]研究发现,随着机器人自由度数量的增加,应用旋量法和李代数法解决多刚体动力学问题时更高效。近年来,以李群李代数为基础的旋量理论在并联机构等多刚体系统分析中得到了广泛的应用。Martínez等^[14]和Rico等^[15]分别研究了旋量描述的加速度和加加速度的合成变换,并表示该方法的加速度具有坐标不变性,因此,可以方便地分析空间多刚体系统在非惯性系中的运动动力学问题。

本文面向隧道检测工程应用需求,在分析外部扰动对视觉系统影响的基础上,提出一种具有两移一转的三自由度并联机构,推导了运动平台在非惯性系中的耦合运动变换,提出了一种建立非惯性系并联机构输入-输出映射的方法,在此基础上通过数值计算和半实物仿真来验证分析方法的正确性。

1 外部扰动对视觉系统的影响

外部扰动会导致视觉系统相对隧道的位姿发生改变,进而影响图像质量,主要扰动来自以下三个方面:

- 1) 隧道结构:《公路隧道设计规范》指出^[16],隧道断面尺寸主要由净高、起拱半径和车道宽度构成,所述参数与路面设计时速有关,因此视觉系统处在不同设计时速的隧道采集图像时,数码相机工作距离、视场完全不同;
- 2) 车辆行驶轨迹:为了不影响道路通行,隧道智能检测系统行驶速度为50~80 km/h,车辆在高速行驶过程中不可避免地会偏离路面中心线,进而引起视觉设备相对隧道位姿发生改变;
- 3) 路面颠簸:与道路路面相比,隧道内路面为水泥刚性结构,水泥在硬化过程中会收缩变形,同时施工过程中需切割成相对独立的板块结构,该结构在温度和载荷作用下局部变形较大,会造成平整度损失,因此车辆在隧道内高速行驶时颠簸较为严重。

1.1 隧道结构对视觉系统的影响

为了表述方便,建立如图1所示的隧道简图,隧道高度为 H ,起拱线高度为 h ,隧道拱半径为 R 。以两车道为例,车道总宽度为 w ,车道与隧道壁的距离均为 $l(r)$ 。

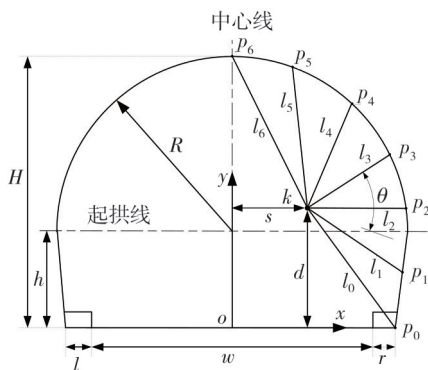


图1 隧道断面轮廓

Fig. 1 The cross-section outline of road tunnel

在车道中心线处建立坐标系 $\{o\}$, x 轴沿隧道侧壁, y 轴向上。为保证各组相机视野 $l_i = |p_i - k|$ 范围一致,将半幅隧道均分为6份,令 $p_i (i = 0, 1, \dots, 6)$ 为半幅隧道面上的分割点, $k = [s \ d]^T$ 为多组相机视轴相交点, $l_i (i = 0, 1, \dots, 6)$ 为各相机的视野边界线。在变量 s, d 取值范围内,关于多相机安装中心的优化条件是 $\sigma(l_i)$ 最小,其中 $\sigma(l_i)$ 为相机工作距离 l_i 的均方差,由此可确定不同隧道结构参数条件下多相机安装中心的最优值。

在此基础上,为了保证图像采集质量,各组相机的视野范围应保持一致,由此可计算多组相机的姿态调整量,即安装平台与 $\{o\}$ 系 x 轴的夹角为

$$\theta = \arccos \left(\frac{I \cdot (k - p_3)}{|k - p_3|} \right), \tag{1}$$

式中: $I = [1 \ 0]$ 。

根据《公路隧道设计规范》,高速公路及一级公路的设计速度分别为60, 80, 100和120 km/h等4种,不同设计速度下隧道结构参数各不相同,计算相应的多相机安装中心参数及安装平台姿态调整量,结果如表1所示。由表1可以得出不同设计速度下各参数的变化范围,其中, T_x 为0~0.3 m, T_y 为0~1.1 m, R_z 为0~10°,这里, T_x, T_y 分别为安装平台沿 x 轴、 y 轴的位移量, R_z 为安装平台绕 z 轴的转动量。

表1 不同隧道工况下相机的安装及姿态优化参数
Tab. 1 The install and pose optimal parameters of multi-camera in different tunnel

设计速度/(km·h ⁻¹)	计算结果(T_x, T_y, R_z)
60	(1.7 m, 2.4 m, 25.1°)
80	(1.9 m, 2.8 m, 28.7°)
100	(1.9 m, 3.0 m, 32.9°)
120	(2.0 m, 3.5 m, 35.0°)

1.2 车身位姿对视觉系统的影响

在激光三维扫描仪中心处建立坐标系 $o'-x'y'z'$,其中, o' 为三维激光扫描仪中心点, x' 轴垂直于隧道衬砌表面, y' 轴垂直向上, z' 轴沿行车方向。令 $p'_i (i = 1, 2, \dots, 1080)$ 为隧道表面各点, θ_i 为点 p'_i 对应激光束与 x' 的夹角, d'_i 为点 p'_i 到 $\{o'\}$ 系原点的距离,如图2所示。在 t 时刻,关于车辆行驶轨迹偏移量 ξ^t 的表达式为

$$\xi^t = \frac{\sum_{i=1}^n d'_i \cos \theta_i}{n}. \tag{2}$$

为获取现场数据,分别在山西平榆高速公路紫金山隧道(全长4 511 m)、山西长平高速公路虹梯关

隧道(全长13 098 m)、重庆包茂高速公路贺家堡隧道(全长2 004 m)和重庆奉巫高速公路骡坪隧道(全长4 596 m)开展现场试验。驾驶员以正常车速和驾驶习惯开车,根据三维扫描仪数据及式(2)绘制车辆行驶轨迹曲线,由此可获得偏移范围 T_x 为 $-0.6\sim 0.6$ m,图3为车辆在紫金山隧道内的行驶轨迹。

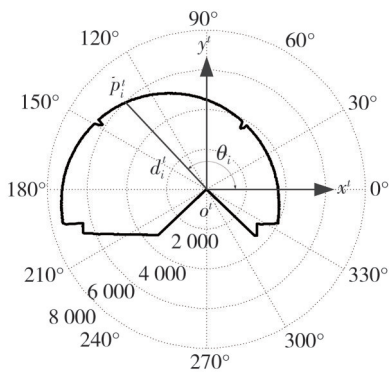


图2 t 时刻车辆的行驶轨迹

Fig. 2 The track of vehicle at time t

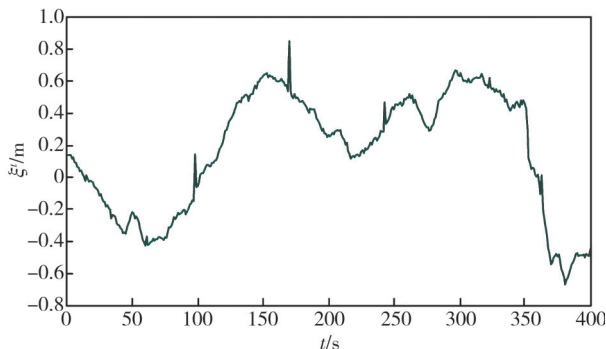


图3 车辆行驶轨迹

Fig. 3 The track of vehicle

车辆在上述隧道内行驶过程时,安装于视觉系统处的加速度计和陀螺仪实时采集车辆多维振动信号,其特点为幅值小、频率高,三轴移动振动量分别为 ± 0.5 , ± 10 和 ± 15 mm,三轴转动振动量分别为 $\pm 0.6^\circ$, $\pm 0.5^\circ$ 和 $\pm 0.2^\circ$ 。本文研究的稳定平台用于隔离车辆的低频高幅扰动,因此暂不考虑车辆高频振动对系统的影响。

2 并联式车载稳定平台构型综合

2.1 构型综合原则

通过第1节分析可知,并联式车载稳定平台需具备沿 y 和 z 轴移动的能力以保证隧道衬砌处于数码相机和激光光源的工作范围内。当视觉设备与隧道衬砌距离发生改变时,数码相机和激光光源的工作视场发生改变,并联式车载稳定平台还需具备绕 x 轴

转动的能力。因此,需要综合一类 $1R^x2T^{yz}$ 三自由度并联机构以补偿侧移、升降和侧倾等外部扰动对视觉系统的影响。根据并联机器人相关理论,本文涉及的并联机构分支约束螺旋系分为三种情况^[17]。机构具有连续转动轴线的必要条件是约束螺旋系尽量少,因此,综合含有一个约束力且分支自由度为5的并联机构构型,并由刚体连续转动转轴存在的数学判据^[18]可知,机构所有约束力线矢需满足空间互相平行且不共面的几何条件。

2.2 $1R^x2T^{yz}$ 并联机构综合

隧道检测车空间及承载力有限,分支运动副数量不宜太多,采用伺服电动缸作为分支驱动输入具有承载力大、动态响应速度快、惯量小等优点,因此五自由度运动分支结构的形式有RPS和SPR两种。对于RPS运动分支,分支约束力线矢在 $\{o\}$ 中的数学表达式为

$$\mathcal{S}^r = (1 \ 0 \ 0; 0 \ -z \ y)。 \quad (3)$$

其中, $(0 \ y \ z)^T$ 为球铰中心点在 $\{o\}$ 系中的坐标。

式(3)描述的RPS型运动分支约束力线矢通过S副中心且与R副轴线平行。同理,对于SPR运动分支,分支约束力线矢在 $\{o\}$ 中的数学表达式为

$$\mathcal{S}^r = (l \ m \ n; 0 \ 0 \ 0), \quad (4)$$

式中: $(l \ m \ n)^T$ 为转动副R的方向矢量,若转动副中心在 $\{o\}$ 系中的坐标为 $(x \ y \ z)^T$,则上述各物理量满足关系式 $lx + my + nz = 0$ 恒成立。

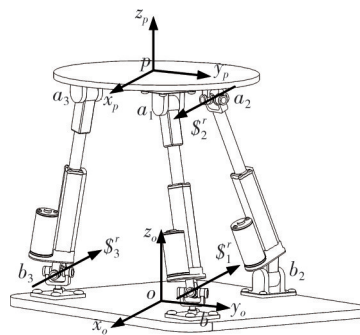


图4 新型2SPR/RPS并联机构

Fig. 4 The 2SPR/RPS parallel mechanism

式(4)描述的SPR型运动分支约束力线矢通过S副中心且与R副平行。结合式(3)、式(4)及并联式车载稳定平台构型综合原则, $1R^x2T^{yz}$ 并联机器人构型为2SPR/RPS(如图4所示),第1和第3运动分支为SPR,第2运动分支为PRS。上述三组运动分支均匀布置于运动平台和固定平台之

间,所有运动分支中转动副轴线平行于 x 轴,移动副由伺服电动缸实现。

2.3 机构运动特征

结合 2.2 节分析,建立并联机构约束螺旋系在 $\{o\}$ 中的描述为

$$\begin{cases} \mathcal{S}_1^r = (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ m), \\ \mathcal{S}_2^r = (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ 0 \ -m), \\ \mathcal{S}_3^r = (1 \ 0 \ 0 \ ; \ 0 \ -n \ 0), \end{cases} \quad (5)$$

式中: $m = |ob_1| = |ob_3|$; $n = |ob_2|$ 。

式(5)表明:各约束螺旋系线性无关,因此 2SPR/RPS 并联机构的自由度为 3。由刚体连续转轴判据^[13]可知,在单个力线矢约束条件下,与约束力线矢平行或相交于约束点的空间直线可取为刚体绕其作连续转动的轴线,且刚体的移动路径为垂直于所有约束力线矢的方向。由于约束力线矢 \mathcal{S}_1^r 、 \mathcal{S}_2^r 、 \mathcal{S}_3^r 均平行于 x_o 轴,且所述三个力线矢不共面,同时 y_o 轴、 z_o 轴均垂直于所述约束力线矢,因此,运动平台不仅可实现绕 x_o 轴的连续转动,而且可实现沿 y_o 、 z_o 轴的移动。

由上述分析可知,基于 2SPR/RPS 并联机构设计的车载稳定平台机构应用于隧道智能检测系统时,可隔离侧移、升降和侧倾等外部扰动,保证视觉设备相对惯性系的稳定。

3 车载稳定平台在非惯性系中的耦合运动学分析

本文所述的并联机构是一个处于非惯性系中的多刚体系统,因此,本节基于刚体运动的旋量表示来研究并联式车载稳定平台在非惯性系中的耦合运动变换及输入-输出映射关系。

3.1 坐标系

为了研究方便,建立如图 5 所示的坐标系:在车辆重心处建立惯性坐标系 $\{e\}$, x_e 轴沿车辆运动方向, z_e 轴向上;在车辆运动中心建立车辆坐标系

$$\begin{cases} V_{op}^e = V_{ep}^e - V_{ev}^e - V_{vo}^e, \\ \hat{A}_{op}^e = \hat{A}_{ep}^e - \{ \hat{A}_{ev}^e + \hat{A}_{vo}^e + [\hat{V}_{ev}^e, \hat{V}_{vo}^e] + [\hat{V}_{ev}^e, \hat{V}_{op}^e] + [\hat{V}_{vo}^e, \hat{V}_{op}^e] \}. \end{cases} \quad (8)$$

由于非惯性系 $\{o\}$ 相对于惯性系 $\{e\}$ 的位姿变换矩阵为 $g_{eo} = g_{ev}g_{vo}$,因此式(7)所述的运动旋量在 $\{o\}$ 系中的数学表达式为

$\{v\}$,当车辆静止时, $\{v\}$ 系与 $\{e\}$ 系各坐标轴重合;在并联机构基础平台中心处建立固定平台坐标系 $\{o\}$, x_o 轴沿车辆行驶方向, y_o 轴垂直于隧道表面, z_o 轴向上;在并联机构运动平台中心处建立坐标系 $\{p\}$,其初始坐标轴与 $\{o\}$ 系对应轴平行。车辆行驶过程中受外部扰动产生多自由度摇摆运动,因此上述坐标系中的 $\{v\}$ 系和 $\{o\}$ 系均为非惯性系。

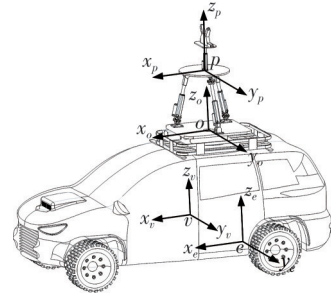


图 5 车载稳定平台坐标系

Fig. 5 The coordinate system of the vehicle-based stabilized platform

3.2 非惯性系耦合运动变换

令 $g_{ep} = \begin{bmatrix} R_{ep} & p_{ep}^e \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示运动平台在惯性系 $\{e\}$

中的位姿变换矩阵(R_{ep} 、 p_{ep}^e 分别为 $\{p\}$ 系相对于 $\{e\}$ 系的姿态矩阵和位置矢量), g_{ev} 、 g_{vo} 分别为运动平台、固定平台相对于 $\{e\}$ 系、 $\{v\}$ 系的位姿变换矩阵,由此建立非惯性系下运动平台的耦合位姿变换为

$$g_{op} = \begin{bmatrix} R_{op} & p_{op}^o \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = g_{vo}^{-1} g_{ev}^{-1} g_{ep} \quad (6)$$

令运动平台相对于惯性系 $\{e\}$ 的传统速度、加速度分别为 $(\omega_{ep}^e, \dot{p}_{ep}^e)$ 、 $(\epsilon_{ep}^e, \ddot{p}_{ep}^e)$,由李群李代数基本原理^[19]可知,运动平台的刚体速度、加速度旋量为

$$\begin{cases} V_{ep}^e = (\omega_{ep}^e, \dot{p}_{ep}^e - \hat{\omega}_{ep}^e p_{ep}^e), \\ A_{ep}^e = (\epsilon_{ep}^e, \ddot{p}_{ep}^e - \hat{\omega}_{ep}^e \dot{p}_{ep}^e - \hat{\epsilon}_{ep}^e p_{ep}^e). \end{cases} \quad (7)$$

同理,可获得车辆相对于惯性系 $\{e\}$ 、固定平台相对于车辆坐标系 $\{v\}$ 的运动旋量分别为 V_{ev}^e 、 A_{ev}^e 、 V_{vo}^e 、 A_{vo}^e 。依据多刚体加速度伴随变换公式^[20],运动平台相对于非惯性系 $\{o\}$ 的刚体速度、加速度旋量在 $\{e\}$ 中的描述为

$$\hat{V}_{op}^o = g_{eo}^{-1} \hat{V}_{op}^e g_{eo}, \quad \hat{A}_{op}^o = g_{eo}^{-1} \hat{A}_{op}^e g_{eo} \quad (9)$$

由于车载稳定平台的基础平台与车辆固连,因此 $V_{vo}^e = A_{vo}^e = 0$ 。将式(8)代入式(9),建立非

惯性系下运动平台的耦合速度变换为

$$V_{op}^o = Ad_{g_{op}}^v V_{ep}^e + Ad_{g_{ov}}^v V_{ev}^e, \quad (10)$$

式中: $Ad_{g_{op}}^v = \begin{bmatrix} R_{eo}^{-1} & 0 \\ -R_{eo}^{-1} \hat{p}_{eo}^e & R_{eo}^{-1} \end{bmatrix}$ 为运动平台惯性系速度到其非惯性系速度的伴随变换矩阵; $Ad_{g_{ov}}^v = -\begin{bmatrix} R_{eo}^{-1} & 0 \\ -R_{eo}^{-1} \hat{p}_{eo}^e & R_{eo}^{-1} \end{bmatrix}$ 为车辆惯性系速度到运动平台非惯性系速度的伴随变换矩阵。

同理, 建立非惯性系下运动平台的耦合加速度变换为

$$A_{op}^o = Ad_{g_{op}}^v A_{ep}^e + Ad_{g_{ov}}^v A_{ev}^e + (V_{ev}^e)^T Ad_{g_{op}}^a V_{ep}^e, \quad (11)$$

式中: $Ad_{g_{op}}^a$ 为车辆、运动平台在惯性系中的速度到运动平台在非惯性系中六维加速度的伴随变换矩阵。

$$Ad_{g_{op}}^a = \begin{bmatrix} [-R_{eo} * \Theta & 0]^T & 0 \\ [((\hat{p}_{eo}^e)^{-1} R_{eo}) * \Theta - R_{eo} * \Theta]^T [-R_{eo} * \Theta & 0]^T \end{bmatrix}_{6 \times 6 \times 6}, \quad (12)$$

式中: $\Theta = \begin{bmatrix} 0 & -k & j \\ k & 0 & -i \\ -j & i & 0 \end{bmatrix}$, 各元素值分别为列矢量 $i = [1 \ 0 \ 0]^T$, $j = [0 \ 1 \ 0]^T$, $k = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。

3.3 非惯性系输入-输出映射

令运动平台、固定平台处铰链点在各自坐标系中的位置矢量分别为 m_i^p 、 n_i^o , 结合式(6)建立非惯性系下并联式车载稳定平台的位姿输入-输出映射为

$$\bar{q} = g_{vo}^{-1} g_{ev}^{-1} g_{ep} m_i^p - n_i^o. \quad (13)$$

根据螺旋理论法^[12], 运动分支各运动副螺旋在 $\{o\}$ 系中分别描述为 $\mathcal{S}_j^i (i=1, \dots, 3, j=1, \dots, 5)$, 其中, i 为分支序号, j 为运动副序号, 运动平台刚体速度、加速度与分支运动副速度 $\dot{\varphi}^i$ 、加速度 $\ddot{\varphi}^i$ 的关系为

$$\begin{cases} V_{op}^o = \dot{\varphi}_1^i \mathcal{S}_1^i + \dots + \dot{\varphi}_5^i \mathcal{S}_5^i = G_{\varphi}^i \dot{\varphi}^i, \\ A_{op}^o = G_{\varphi}^i \ddot{\varphi}^i + (\dot{\varphi}^i)^T H_{\varphi}^i \dot{\varphi}^i, \end{cases} \quad (14)$$

式中: G_{φ}^i 为分支 i 的雅可比矩阵; $[H_{\varphi}^i]_{m,n}$ 为分支 i 的李括弧雅可比矩阵。

$$[H_{\varphi}^i]_{m,n}^{(i)} = \begin{cases} [\mathcal{S}_m^{(i)}, \mathcal{S}_n^{(i)}] & m < n, \\ 0 & m \geq n. \end{cases} \quad (15)$$

提取式(14)对应部分, 整理为运动平台刚体速度、加速度对分支输入速度、加速度的映射为

$$V_{op}^o = G\dot{q}, A_{op}^o = G\ddot{q} + \dot{q}^T H\dot{q}, \quad (16)$$

式中: G 、 H 分别为运动平台在非惯性系中的六维速度、加速度对运动分支输入的雅可比矩阵和李括弧雅可比矩阵。

结合式(10)和式(16), 若 G 不奇异时, 并联式车载稳定平台在非惯性系中的速度输入-输出映射为

$$\dot{q} = J_p V_{ep}^e + J_v V_{ev}^e, \quad (17)$$

式中: $J_p = G^{-1} Ad_{g_{op}}^v$ 、 $J_v = G^{-1} Ad_{g_{ov}}^v$ 分别为运动平台、车辆在惯性系中的速度对分支输入速度的雅可比矩阵。

结合式(11)和式(16), 若 G 不奇异时, 分支输入加速度的表达式为

$$\ddot{q} = J_p A_{ep}^e + J_v A_{ev}^e + (V_{ev}^e)^T h_{vp} V_{ep}^e - \dot{q}^T h_q \dot{q}, \quad (18)$$

式中: $h_{sp} = G^{-1} * Ad_{g_{sp}}^a$; $h_q = G^{-1} * H$ 。

将式(18)进一步整理并化简, 建立非惯性系下并联式车载稳定平台的加速度输入-输出映射为

$$\ddot{q} = J_p A_{ep}^e + J_v A_{ev}^e + (V_{ev}^e)^T H_{pp} V_{ep}^e + (V_{ev}^e)^T H_{vv} V_{ev}^e + (V_{ev}^e)^T H_{vp} V_{ep}^e, \quad (19)$$

式中: $H_{pp} = -J_p^T h_q J_p$ 为运动平台在惯性系中的速度对运动分支输入加速度的李括弧雅可比矩阵; $H_{vv} = -J_v^T h_q J_v$ 为车辆在惯性系中的速度对运动分支输入加速度的李括弧雅可比矩阵; $H_{vp} = h_{vp} - J_v^T h_q J_p - (J_p^T h_q J_v)^T$ 为稳定平台系统惯性系速度对分支输入加速度的李括弧雅可比矩阵。

4 仿真分析

4.1 系统参数

根据隧道检测车内部空间确定 2SPR/RPS 并联机构的结构参数如下: 运动平台直径 $d_1 = 1\ 600$ mm, 固定平台直径 $d_2 = 1\ 800$ mm, 当机构处于初始位姿时, 运动平台与基础平台之间的距离 $h = 1\ 200$ mm。

由第2节现场试验分析可知, 外界扰动产生的侧倾、侧移和升降对视觉系统的影响较为严重, 采用正弦波叠加技术模拟车辆惯性系运动, 令侧倾、侧移、升降的运动规律为

$$\begin{cases} \theta_x(t) = A_{R_x}^v \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{R_x}^v}\right), \\ P_y(t) = A_{S_y}^z \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{S_y}^v}\right), \\ P_z(t) = A_{S_z}^z \sin\left(\frac{2\pi t}{T_{S_z}^v}\right), \end{cases} \quad (20)$$

式中： $A_{R_x}^v=5^\circ$ ， $A_{S_x}^v=500\text{ mm}$ ， $A_{S_z}^v=500\text{ mm}$ 分别为侧倾、侧移、升降的幅值； $T_{R_x}^v=3.1\text{ s}$ ， $T_{S_x}^v=4.9\text{ s}$ ， $T_{S_z}^v=7.9\text{ s}$ 分别为侧倾、侧移、升降的周期。

车载稳定平台的主要作用是隔离车辆扰动，保证视觉设备相对惯性空间稳定。但是，在实际应用中，运动平台无法保证绝对稳定，只要保证视觉设备在其工作范围内即可。为了研究并联式车载稳定平台在非惯性系中的耦合运动学分析方法，设运动平台的惯性系运动也呈正弦规律，结合数字相机、激光光源对基准稳定性性能的要求，制定运动平台相对于惯性系的运动参数，分别为幅值 $A_{R_x}^l=1^\circ$ ， $A_{S_x}^l=10\text{ mm}$ ， $A_{S_z}^l=10\text{ mm}$ ，周期 $T_{R_x}^l=5.9\text{ s}$ ， $T_{S_x}^l=3.14\text{ s}$ ， $T_{S_z}^l=4.2\text{ s}$ 。

4.2 数值分析

利用刚体的旋量表示描述车辆及运动平台相对于惯性系的各运动量，通过提出的非惯性系耦合运动变换方法，获得运动平台相对于非惯性系 $\{o\}$ 的位姿、刚体速度及加速度，根据非惯性系输入-输出映射关系式，计算并联机构各分支驱动量曲线，如图 6 所示。车辆惯性系运动是稳定平台系统的主要输入，因此各分支运动曲线基本一致，各电机转角、转速或力矩将在相同时刻达到峰值，这为电气控制系统的选型设计提供了基础。由各分支运动曲线可知，拟选取的伺服电动缸最大位移、速度、加速度分别为 0.85 m ， 0.95 m/s ， 1.5 m/s^2 。

为了验证本文理论分析的正确性，以及后续进行结构优化和控制算法搭建，建立关于车载稳定平台的半实物仿真模型，如图 7 所示，其主要包括仿真程序、TRIO 控制器、电动缸、伺服电机及驱动器等部分。将车辆及运动平台相对于惯性

系的运动规律作为主动输入，根据提出的非惯性系运动变换及输入-输出映射关系在仿真程序中建立控制模型，并将生成的分支驱动量传输到 TRIO 控制器中，进而控制各电动缸动作。

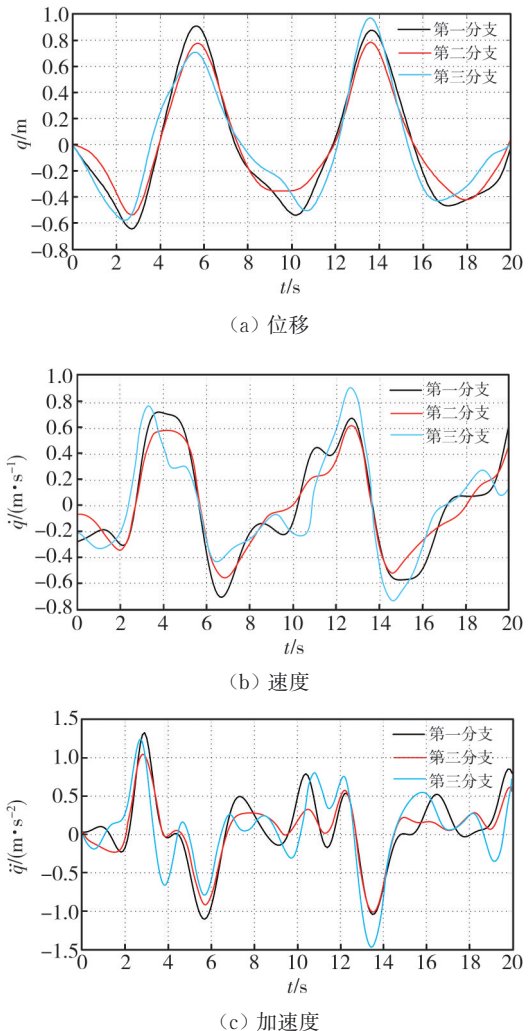


图 6 计算结果
Fig. 6 The calculation results

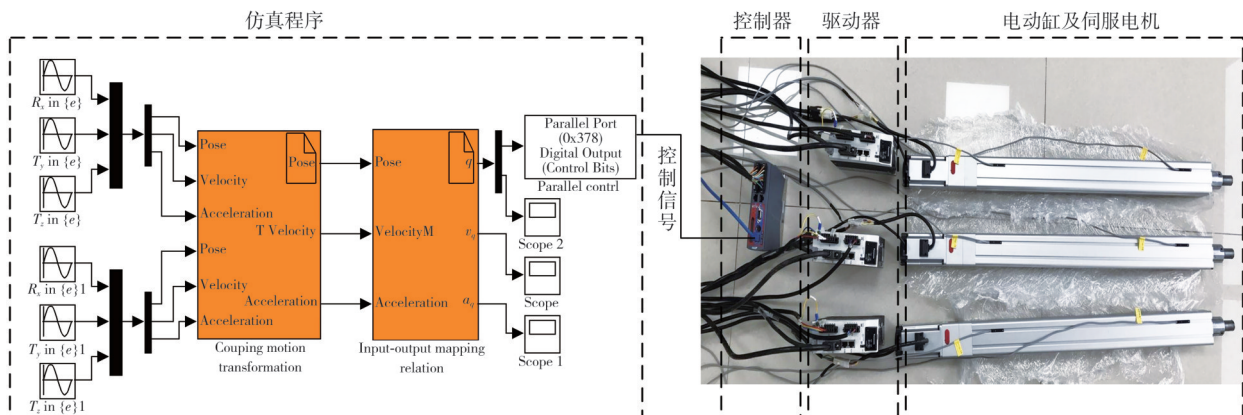
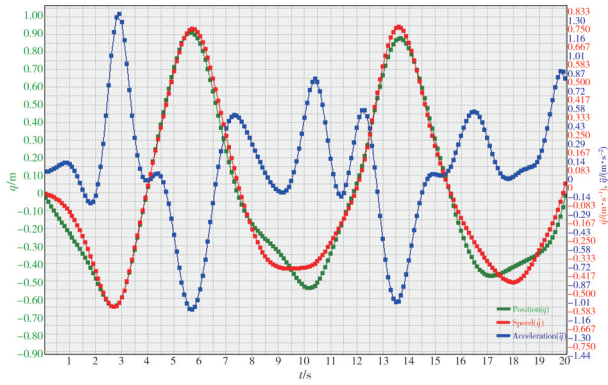
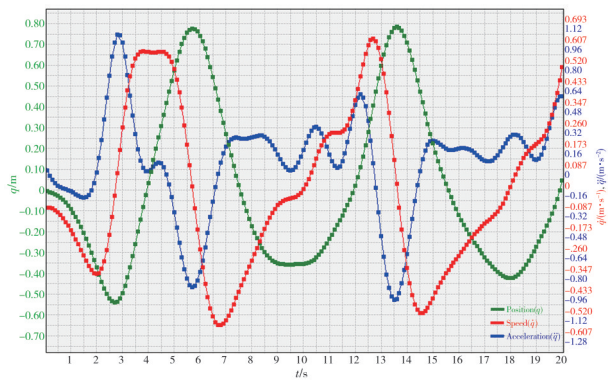


图 7 半实物仿真模型
Fig. 7 A semi-physical simulation model

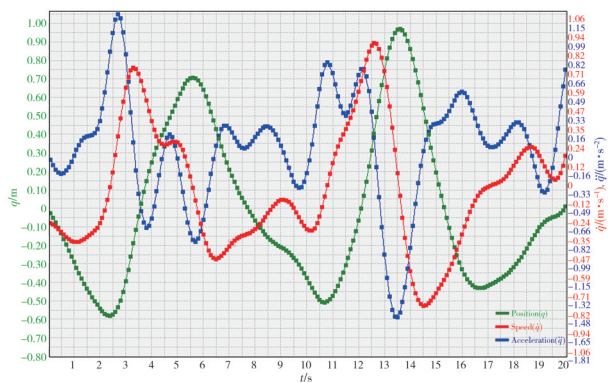
在伺服控制器中读取电动缸各运动量曲线,如图8所示,图中绿色为位移曲线,红色为速度曲线,蓝色为加速度曲线。通过与图6对应曲线对比可以看出,运动位移、速度、加速度曲线都一致,验证了本文分析方法的正确性。



(a) 第一分支



(b) 第二分支



(c) 第三分支

图8 仿真结果

Fig. 8 The simulation results

5 结论

本文基于隧道检测应用需求,开展了车载稳定平台构型综合与耦合运动学分析,得到了如下

结论:

1) 现场试验测试表明:隧道结构、车身姿态等外界扰动产生的侧倾、侧移、升降等对视觉系统影响较为严重。基于并联机器人螺旋理论,设计了2SPR/RPS并联式车载稳定平台机构,可有效补偿侧移、升降和侧倾等外部扰动对视觉系统的影响。

2) 提出了运动平台的非惯性系耦合运动变换方法,建立了并联式车载稳定平台在非惯性系中的输入-输出映射关系。研究表明:基于李群李代数的刚体六维旋量描述,可有效分析空间多刚体系统在非惯性系中的耦合运动学问题,建立简洁通用的运动学模型。

3) 运动学模型仿真表明:当并联机构在非惯性系中运行时,各个运动分支的输入情况,并非仅仅取决于机构自身的运动状态以及结构参数,车辆的运动状况以及稳定平台的安装位置同样对其有着重要影响。本文提出的并联式车载稳定平台的设计与分析方法可以作为下一步样机研制和工程应用的基础。

参考文献:

[1] 李少华, 沈翔, 李树忱, 等. 基于多尺度网格的隧道衬砌裂缝目标检测方法[J]. 土木工程学报, 2024, 57(S1): 95-101.
 LI Shaohua, SHEN Xiang, LI Shuchen, et al. Target detection method of tunnel lining cracks based on multi-scale grid[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(S1): 95-101. (in Chinese)
 [2] 李彬, 雷明锋, 李文华. 运营公路隧道病害对衬砌结构安全性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(5): 40-45.
 LI Bin, LEI Mingfeng, LI Wenhua. Safety influence of operating highway tunnel caused by structure disease [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(5): 40-45. (in Chinese)
 [3] 高典, 唐波. 隧道检测车图像检测系统校准方法研究[J]. 计量与测试技术, 2025, 52(5): 62-64.
 GAO Dian, TANG Bo. Research on calibration method of tunnel inspection vehicle image detection system [J]. Metrology & Measurement Technique, 2025, 52(5): 62-64. (in Chinese)
 [4] 刘晓, 贾磊, 段英杰, 等. 一种车载式公路隧道快速检测系统: CN206019637U[P]. 2017-03-15.
 [5] 李耀宇, 王宏民, 张一帆, 等. 基于结构化深度学习的单目图像深度估计[J]. 机器人, 2017, 39(6): 812-819.

- LI Yaoyu, WANG Hongming, ZHANG Yifan, et al. Structured deep learning based depth estimation from a monocular image[J]. *Robot*, 2017, 39(6): 812-819. (in Chinese)
- [6] 方贤勇, 阚未然, 陈尚文, 等. 面向运动过程建模的运动模糊图像摄像机响应函数估计方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(7): 1238-1246. FANG Xianyong, KAN Weiran, CHEN Shangwen, et al. Motion-modeling-oriented camera response function estimation method for motion blurred images[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(7): 1238-1246. (in Chinese)
- [7] 王建强, 王履程. 基于机器视觉的隧道车辆检测系统设计与实现[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015(9): 100-101. WANG Jianqiang, WANG Lücheng. Design and implementation of a tunnel vehicle detection system based on machine vision[J]. *Automation & Instrumentation*, 2015(9): 100-101. (in Chinese)
- [8] LIU X, ZHAO T S, LUO E J, et al. Coupling 3-PSR/PSU 5-axis compensation mechanism for stabilized platform and its analysis[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(7): 1619-1629.
- [9] XU K, DING X L. Gait analysis of a radial symmetrical hexapod robot based on parallel mechanisms[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 27(5): 867-879.
- [10] 王艺, 秦超, 徐振邦. 并联机器人非接触式大量程位姿测量系统[J]. *电子测量技术*, 2025, 48(9): 1-8. WANG Yi, QIN Chao, XU Zhenbang. Non-contact large-stroke position and attitude measurement system for parallel robots[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2025, 48(9): 1-8. (in Chinese)
- [11] 林富生, 黄其柏, 黄新乐, 等. 非惯性系动力学研究综述[J]. *武汉理工大学学报(信息与管理工程版)*, 2007, 29(4): 67-71. LIN Fusheng, HUANG Qibo, HUANG Xinle, et al. A survey of the dynamic investigation in non-inertial systems[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering)*, 2007, 29(4): 67-71. (in Chinese)
- [12] LEE D J. Passive decomposition and control of non-collinear mechanical systems[J]. *IEEE Translation Robotic*, 2012, 26(6): 978-992.
- [13] ASPRAGATHOS N A, DIMITROS J K. A comparative study of three methods for robot kinematics[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 1998, 28(2): 135-145.
- [14] MARTÍNEZ J R, DUFFY J. An application of screw algebra to the acceleration analysis of serial chains[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1996, 31(4): 445-457.
- [15] RICO J M, GALLARDO J, DUFFY J. Screw theory and higher order kinematic analysis of open serial and closed chains[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1999, 34(4): 559-586.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范: JTG D70—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [17] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] 赵铁石, 赵永生, 黄真. 欠秩并联机器人能连续转动转轴存在的物理条件和数学判据[J]. *机器人*, 1999, 21(5): 347-351. ZHAO Tieshi, ZHAO Yongsheng, HUANG Zhen. Physical and mathematical conditions of existence of axes about which platform of deficient-rank parallel robots can rotate continuously[J]. *Robot*, 1999, 21(5): 347-351. (in Chinese)
- [19] 谢兴彪, 张晓旭, 孙秀婷, 等. 6-PSU 并联机器人动力学模型辨识及其驱动力矩估计新方法[J]. *力学学报*, 2025, 57(1): 183-198. XIE Xingbiao, ZHANG Xiaoxu, SUN Xiuting, et al. A new method for dynamic model identification and driving torque estimation for 6-PSU parallel robots[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2025, 57(1): 183-198. (in Chinese)
- [20] 理查德·摩雷, 李泽湘, 夏恩卡·萨思特里. 机器人操作的数学导论[M]. 徐卫良, 钱瑞明, 译. 北京: 机械工业出版社, 1998.