

Stewart 并联机构运动 Jacobian 矩阵表达形式的多样性

尤晶晶¹,叶鹏达²,徐帅¹,王澍声¹,黄宁宁¹,李成刚³

(1. 南京林业大学 机械电子工程学院,江苏 南京 210037; 2. 常州大学 机械与轨道交通学院,江苏 常州 213164;
3. 南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:现有文献中 Jacobian 矩阵存在多种表达形式,不利于指标值的统一评估和对比。为此,通过剖析 Stewart 并联机构运动 Jacobian 矩阵的机理,找到引起上述现象的根本原因,用欧拉角及其导数描述动平台的转动速度并运用位置方程求导法推导出第 1 类形式的 Jacobian 矩阵;用角速度矢量描述动平台的转动速度,并运用环路方程法推导出第 2 类形式的 Jacobian 矩阵;将动平台上与静坐标系原点重合的点选为线速度基点,并运用环路方程法推导出第 3 类形式的 Jacobian 矩阵。运用角速度加法公式和线速度基点法,构建不同形式 Jacobian 矩阵之间的映射;运用矩阵理论推导各 Jacobian 矩阵行列式之间的关联。通过数值算例验证上述结论的正确性,并绘制机构的奇异曲面。所得结论为并联机构的型综合、型优化提供了理论指导。

关键词:并联机构;Jacobian 矩阵;位置方程;环路方程;欧拉角;奇异

中图分类号:TH122 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)06-0085-04

Diversity of Expression Forms of Jacobian Matrix of Stewart Parallel Mechanisms

YOU Jingjing¹, YE Pengda², XU Shuai¹, WANG Shusheng¹, HUANG Ningning¹, LI Chenggang³

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2. School of Mechanical Engineering and Rail Transit, Changzhou University, Changzhou 213164, China;
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Since various expression forms of Jacobian matrix in existing literatures are not conducive to the unified evaluation and comparison of index values, the Jacobian matrix mechanism of Stewart parallel mechanisms is analyzed to identify the basic reasons. The Euler angles and their derivatives are adopted to describe the rotational velocity of the moving platform, and the first-type Jacobian matrix is derived based on the position equation derivation method. The angular velocity vector is applied to describe the rotational velocity of the moving platform, and the second-type Jacobian matrix is derived by the loop equation method. The point located on the moving platform coinciding with the origin of the fixed coordinate system is selected as the base point of the linear velocity, and the third-type Jacobian matrix is derived by the loop equation method. Base on the angular velocity addition formula and the linear velocity base point method, different Jacobian matrices mapping are constructed, and their relationships are deduced with the matrix determinant theory. The correctness of mapping matrices is verified by a numerical example, and the singular surfaces of a Stewart parallel mechanism are drawn. The conclusions provide theoretical guidance for the type synthesis and type optimization of parallel mechanisms.

Keywords: parallel mechanism; Jacobian matrix; position equation; loop equation; Euler angle; singularity

0 引言

与串联机构相比,并联机构具有更紧凑的结构、更高的刚度、更快的响应、更小的累积误差等优势^[1],在多维传感器^[2-3]等领域应用前景广阔。在所有的 6 自由度并联机构中,目前应用最广的是 Stewart 并联机构^[4-5]。它主要由 1 个动平台、1 个静平台以及连接 2 个平台的 6 条 SPS(S 为球面副,P 为移动副)支链构成。研究发现,Stewart 并联机构的很多性能指标,如奇异性、灵活性、各向同性、刚度、可操作度等,都与机构的 Jacobian 矩阵有关^[6]。Jacobian 矩阵包括运动 Jacobian 矩阵和力 Jacobian 矩阵,它们之间满足对偶性的关系。因此,推导并分析

Stewart 并联机构的运动 Jacobian 矩阵有着重要的理论意义和实际价值。

从检索到的文献资料来看,并联机构运动 Jacobian 矩阵的表达形式五花八门^[6-11],且各形式在机构学上的解释以及它们之间的数学关联尚不明确。这影响了机构性能的机理分析和机构拓扑的优化。为解决上述问题,本文从动平台速度的物理定义和数学表达出发,挖掘了 Stewart 并联机构运动 Jacobian 矩阵的内涵,推导并梳理了 3 类 Jacobian 矩阵的解析表达式,继而剖析了不同形式 Jacobian 矩阵之间以及它们行列式之间的映射关系。最后,通过数值算例验证了本文结果的正确性,并基于推导

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405237);国家留学基金资助项目(201908320035)

第一作者简介:尤晶晶(1985—),男,江苏南通人,副教授,硕士生导师,研究方向为并联机器人和六维加速度传感器等,yepengda@126.com。

出的运动 Jacobian 矩阵绘制了 Stewart 并联机构的位置奇异曲面和姿态奇异曲面。

1 转动速度采用不同的表达方式

Stewart 并联机构的机构简图如图 1 所示。

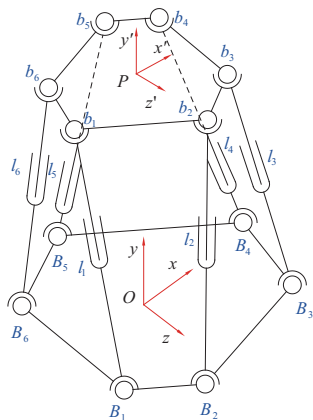


图 1 Stewart 并联机构的机构简图

分别在静平台和动平台上固连笛卡儿坐标系 $O-xyz$ 和 $P-x'y'z'$ 。初始状态下,两坐标系的 3 个坐标轴分别平行。动平台的自由度为 6,包括 3 维平动和 3 维转动。其中,3 维转动的速度可以用欧拉角及其导数来描述,也可以用角速度矢量来描述。

1.1 欧拉角方式

1) 基于欧拉角的旋转矩阵

首先, $P-x'y'z'$ 绕 z' 轴转动进动角 Ψ (逆时针方向为正),得到第 1 次转动之后的坐标系 $P-x''y''z''$ 。两坐标系之间的旋转矩阵为

$$R_1^0 = \begin{bmatrix} c\Psi & -s\Psi & 0 \\ s\Psi & c\Psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1a)$$

式中: R_i^j 表示第 i 次转动之后的坐标系相对于第 j 次转动之后坐标系的旋转矩阵; c 和 s 分别代表余弦、正弦函数。

接着, $P-x''y''z''$ 绕 x'' 轴转动章动角 θ ,得到第 2 次转动之后的坐标系 $P-x'''y'''z'''$ 。它与第 1 次转动之后坐标系之间的旋转矩阵为

$$R_2^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta \\ 0 & s\theta & c\theta \end{bmatrix} \quad (1b)$$

最后, $P-x'''y'''z'''$ 绕 z''' 轴转动自转角 φ ,得到第 3 次转动之后的坐标系 $P-x''''y''''z''''$ 。它与第 2 次转动之后坐标系之间的旋转矩阵为

$$R_3^2 = \begin{bmatrix} c\varphi & -s\varphi & 0 \\ s\varphi & c\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1c)$$

执行关于 3 个绕体轴的子旋转矩阵式(1a)、式(1b)、式(1c)的右乘运算,得到合成的旋转矩阵:

$$R_3^0 = R_1^0 R_2^1 R_3^2 = \begin{bmatrix} c\Psi c\varphi - s\Psi c\theta s\varphi & -c\Psi s\varphi - s\Psi c\theta c\varphi & s\Psi s\theta \\ s\Psi c\varphi + c\Psi c\theta s\varphi & -s\Psi s\varphi + c\Psi c\theta c\varphi & -c\Psi s\theta \\ s\theta s\varphi & s\theta c\varphi & c\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

值得一提的是, R_3^0 也可以用来表示运动之后的动坐标系相对于静坐标系 $O-xyz$ 的旋转矩阵。

2) Jacobian 矩阵的推导

Stewart 并联机构的几何约束方程^[12]为

$$l_i^2 = f_i, i=1 \sim 6 \quad (3)$$

式中: l_i 表示第 i 条支链的长度; $f_i = OP^T OP - 2(B_i^{[O]})^T OP - 2(B_i^{[O]})^T b_i^* + 2OP^T b_i^* + [(B_i^{[O]})^T B_i^{[O]} + (b_i^{[P]})^T b_i^{[P]}]$; $b_i^* = R_3^0 b_i^{[P]}$ 。其中 OP 表示连接两坐标系原点形成的矢量,其 3 个分量分别记作 x, y 和 z ; $B_i^{[O]}, b_i^{[P]}$ 分别表示 B_i, b_i 点在静坐标系和动坐标系中的坐标;上标 T 表示矩阵的转置。

式(3)的等号两边同时对时间求一阶导数,整理后可得线性方程组

$$J_l \dot{l} = J_x \dot{X}_1 \quad (4)$$

式中: $\dot{l} = (\dot{l}_1, \dot{l}_2, \dot{l}_3, \dot{l}_4, \dot{l}_5, \dot{l}_6)^T$; $\dot{X}_1 = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\Psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi})^T$;

$$J_l = 2 \begin{bmatrix} l_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & l_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & l_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_6 \end{bmatrix};$$

$$J_x = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} & \frac{\partial f_1}{\partial z} & \frac{\partial f_1}{\partial \Psi} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} & \frac{\partial f_2}{\partial z} & \frac{\partial f_2}{\partial \Psi} & \frac{\partial f_2}{\partial \theta} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_6}{\partial x} & \frac{\partial f_6}{\partial y} & \frac{\partial f_6}{\partial z} & \frac{\partial f_6}{\partial \Psi} & \frac{\partial f_6}{\partial \theta} & \frac{\partial f_6}{\partial \varphi} \end{bmatrix}。$$

当 $l_i \neq 0, (i=1 \sim 6)$ 时,矩阵 J_l 是可逆的。此时,式(4)可改写为

$$\dot{l} = J_1 \dot{X}_1 \quad (5)$$

式中 $J_1 = J_l^{-1} J_x$ 称为第 1 类形式的 Jacobian 矩阵。

1.2 角速度矢量方式

运用环路方程法^[4],列出支链速率的解析式:

$$\dot{l}_i = s_i^T \left(\frac{d}{dt} OP + \omega \times b_i^* \right) = s_i^T \frac{d}{dt} OP + [b_i^* \times s_i]^T \omega \quad (6)$$

式中: s_i 表示第 i 条支链的方向矢量^[4]; ω 表示动平台的角速度矢量。

将式(6)整理成矩阵形式:

$$\dot{l} = J_2 \dot{X}_2 \quad (7)$$

式中: $\dot{X}_2 = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \omega^T)^T$;

$J_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \cdots & s_6 \\ b_1^* \times s_1 & b_2^* \times s_2 & \cdots & b_6^* \times s_6 \end{bmatrix}^T$ 称为第 2 类形式的 Jacobian 矩阵。

1.3 第 1、2 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射

根据角速度加法公式,可得坐标系 $P-x''''y''''z''''$ 相对于

P - $x'y'z'$ 的转动速度:

$$\begin{aligned} \omega &= \dot{\Psi}k_0 + \dot{\theta}i_1 + \dot{\varphi}k_2 = \dot{\Psi} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \dot{\theta}R_1^0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\varphi}R_1^0 R_2^1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ & \begin{bmatrix} \dot{\theta}c\Psi + \dot{\varphi}s\Psi s\theta \\ \dot{\theta}s\Psi - \dot{\varphi}c\Psi s\theta \\ \dot{\Psi} + \dot{\varphi}c\theta \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \dot{\Psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} 0 & c\Psi & s\Psi s\theta \\ 0 & s\Psi & -c\Psi s\theta \\ 1 & 0 & c\theta \end{bmatrix}$ 。

通过式(8)建立 $\dot{X}_1$ 和 $\dot{X}_2$ 之间的传递关系:

$$\dot{X}_2 = T_{1,2} \dot{X}_1 \quad (9)$$

式中 $T_{1,2} = \begin{bmatrix} E_3 & O_3 \\ O_3 & A \end{bmatrix}$, E_3 和 O_3 分别为三阶单位矩阵和三阶零矩阵。

综合式(5)、式(7)和式(9),整理可得第 1、2 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射关系:

$$J_1 = J_2 T_{1,2} \quad (10)$$

也就是说,通过映射矩阵 $T_{1,2}$ 可以将第 1、2 类形式的 Jacobian 矩阵关联起来。

2 平动速度选取不同的基点

理论上,动平台三维平动的速度基点可以任意选择。常用的基点主要有 2 个:1)动平台的质心(一般也是动坐标系的原点)^[4];2)动平台上与静坐标系原点重合的点^[13]。第 1 节在建立平动速度时就是选取的前者,故本节仅讨论后者的情况。

2.1 Jacobian 矩阵的推导

将动平台上与静坐标系原点重合的点标记为点 O' 。同样,运用环路方程法,列出支链速率的解析表达式:

$$\dot{l}_i = s_i^T [v_{O'} + \omega \times (OP + b_i^*)] = s_i^T v_{O'} + [(OP + b_i^*) \times s_i]^T \omega \quad (11)$$

式中 $v_{O'}$ 表示 O' 点的线速度矢量。

将式(11)整理成矩阵形式:

$$\dot{l} = J_3 \dot{X}_3 \quad (12)$$

式中: $\dot{X}_3 = (v_{O'}^T, \omega^T)^T$;

$J_3 = \begin{bmatrix} s_1 & \cdots & s_6 \\ (OP + b_1^*) \times s_1 & \cdots & (OP + b_6^*) \times s_6 \end{bmatrix}^T$ 称为第 3 类形式的 Jacobian 矩阵。

2.2 第 2、3 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射

根据速度基点法,可建立 O' 和 P 两点速度之间的关系式:

$$(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})^T = v_{O'} + \omega \times OP \quad (13)$$

通过式(13)建立 $\dot{X}_2$ 和 $\dot{X}_3$ 之间的传递关系:

$$\dot{X}_2 = T_{3,2} \dot{X}_3 \quad (14)$$

式中: $T_{3,2} = \begin{bmatrix} E_3 & -\hat{OP} \\ O_3 & E_3 \end{bmatrix}$; 上标 $\wedge$ 表示与矢量对应的反对称矩阵。

综合式(7)、式(12)和式(14),整理可得第 2、3 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射关系:

$$J_3 = J_2 T_{3,2} \quad (15)$$

可见,通过映射矩阵 $T_{3,2}$ 可以将第 2、3 类形式的 Jacobian 矩阵关联起来。

2.3 第 1、3 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射

综合式(10)、式(15),整理可得第 1、3 类形式 Jacobian 矩阵之间的映射关系:

$$J_3 = J_1 T_{3,1} \quad (16)$$

式中 $T_{3,1} = T_{1,2}^{-1} T_{3,2}$ 将第 1、3 类形式的 Jacobian 矩阵关联起来。注意:本文不考虑欧拉角奇异点的情况,即默认矩阵 $T_{1,2}$ 是可逆的。

3 映射矩阵的算例验证

本节对 Stewart 并联机构在一般位姿下 3 类形式的运动 Jacobian 矩阵及其映射矩阵进行算例验证。并联机构尺寸参数的选取如表 1 所示。

表 1 Stewart 并联机构的尺寸参数 单位:mm

$b_1^{(P)}$	$b_2^{(P)}$	$b_3^{(P)}$
$(-100, 0, 100)^T$	$(120, 0, 70)^T$	$(130, 0, 0)^T$
$b_4^{(P)}$	$b_5^{(P)}$	$b_6^{(P)}$
$(80, 0, -90)^T$	$(0, 0, -95)^T$	$(-75, 0, -50)^T$
$B_1^{(O)}$	$B_2^{(O)}$	$B_3^{(O)}$
$(-100, 0, 100)^T$	$(100, 0, 100)^T$	$(200, 0, 0)^T$
$B_4^{(O)}$	$B_5^{(O)}$	$B_6^{(O)}$
$(100, 0, -100)^T$	$(0, 0, -200)^T$	$(-100, 0, -100)^T$

不失一般性地,随机选择动平台在其工作空间内的一个位姿: $OP = (82, 158, 68)^T$ mm, $\Psi = 1.2$ rad, $\theta = 2.5$ rad, $\varphi = 1.7$ rad。根据式(3),此时,6 条支链的长度(单位:mm)依次为 298.541、141.327、181.274、322.265、388.781、277.387。对应的 3 类形式的 Jacobian 矩阵以及 3 个映射运算分别如式(17a)一式(17f)所示。结果显示:1)3 个 Jacobian 矩阵的前 3 列元素完全相同;2)3 个 Jacobian 矩阵之间的关联和本文的推导结论完全一致。

$$J_1 = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & -18.85 & -54.60 & 73.88 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & 128.56 & 23.14 & -109.92 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & 44.09 & -109.92 & -65.70 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & 1.87 & -32.52 & -35.97 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & -25.88 & 42.95 & 0.00 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & -72.72 & 52.41 & 63.81 \end{bmatrix} \quad (17a)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & 71.76 & -86.48 & -18.85 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & -2.40 & 25.76 & 128.56 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & -87.14 & -84.06 & 44.09 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & -65.47 & -9.44 & 1.87 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & -16.73 & 52.58 & -25.88 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & 27.64 & 45.48 & -72.72 \end{bmatrix} \quad (17b)$$

$$J_3 = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & -59.33 & -1.03 & -59.33 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & -66.42 & 85.73 & 66.42 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & 0.00 & -160.15 & 115.81 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & 44.96 & -85.30 & 44.96 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & 91.88 & -14.92 & 0.00 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & 71.90 & 22.16 & -71.90 \end{bmatrix} \quad (17c)$$

$$J_2 T_{1,2} = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & -18.85 & -54.60 & 73.88 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & 128.56 & 23.14 & -109.92 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & 44.09 & -109.92 & -65.70 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & 1.87 & -32.52 & -35.97 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & -25.88 & 42.95 & 0.00 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & -72.72 & 52.41 & 63.81 \end{bmatrix} \quad (17d)$$

$$J_2 T_{3,2} = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & -59.33 & -1.03 & -59.33 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & -66.42 & 85.73 & 66.42 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & 0.00 & -160.15 & 115.81 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & 44.96 & -85.30 & 44.96 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & 91.88 & -14.92 & 0.00 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & 71.90 & 22.16 & -71.90 \end{bmatrix} \quad (17e)$$

$$J_1 T_{3,1} = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.59 & -0.57 & -59.33 & -1.03 & -59.33 \\ 0.74 & 0.66 & -0.12 & -66.42 & 85.73 & 66.42 \\ -0.15 & 0.58 & 0.80 & 0.00 & -160.15 & 115.81 \\ -0.04 & 0.45 & 0.89 & 44.96 & -85.30 & 44.96 \\ 0.07 & 0.46 & 0.89 & 91.88 & -14.92 & 0.00 \\ 0.37 & 0.72 & 0.59 & 71.90 & 22.16 & -71.90 \end{bmatrix} \quad (17f)$$

4 奇异位形

当并联机构的 Jacobian 矩阵的行列式等于 0 时,动平台所处的位形称为“奇异位形”^[14]。本节研究 3 类形式 Jacobian 矩阵的行列式之间的关联。

运用矩阵行列式的乘法定理和分块矩阵的行列式性质,分别处理式(10)、式(15),整理可得:

$$|J_1| = |J_2| |T_{1,2}| = |J_2| |A| = -s\theta \times |J_2| \quad (18)$$

$$|J_3| = |J_2| |T_{3,2}| = |J_2| \quad (19)$$

由于本文不考虑欧拉角奇异点的情况,即 $s\theta$ 不等于 0,故由式(18)、式(19)可知:3 类形式 Jacobian 矩阵的行列式等于 0 的情况是完全等效的。因此,可以通过求解任意一类形式的 Jacobian 矩阵行列式来判别并联机构是否处于奇异位形。图 2(a)、图 2(b) 分别为作为算例的 Stewart 并联机构的位置奇异曲面和姿态奇异曲面。在进行机构的轨迹规划时,应避开奇异曲面中的全部坐标点。

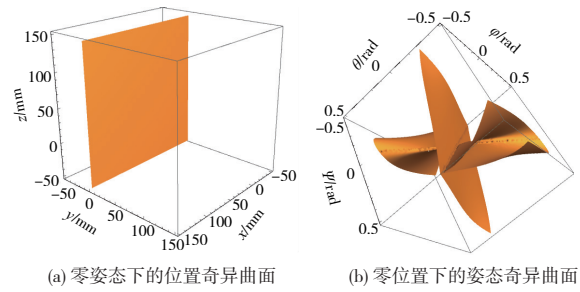


图 2 Stewart 并联机构的奇异曲面

5 结语

1) 用欧拉角及其导数描述动平台的转动速度,并选取动坐标系的原点为平动速度基点,可推导出第 1 类形式的运动 Jacobian 矩阵。

2) 用角速度矢量描述动平台的转动速度,并选取动坐标系的原点为平动速度基点,可推导出第 2 类形式的运动 Jacobian 矩阵。

3) 用角速度矢量描述动平台的转动速度,并选取动平台上与静坐标系原点重合的点为平动速度基点,可推导出第 3 类形式的运动 Jacobian 矩阵。

4) 所推导出的 3 类形式运动 Jacobian 矩阵的前 3 列元素完全相同。

5) 根据角速度加法公式以及线速度基点法,可建立 3 类形式运动 Jacobian 矩阵之间的映射,它们均呈现线性变换的关系。数值算例验证了上述映射矩阵的正确性。

6) 根据矩阵行列式的乘法定理和分块矩阵的运算规则,可推导出 3 类形式 Jacobian 矩阵行列式之间的关系。在不考虑欧拉角奇异点的前提下,它们所对应的机构奇异位形是完全一致的。

7) 上述结论为并联机构的型综合、型优化提供了理论指导。下一步工作是推导 3 类形式 Jacobian 矩阵的特征值、奇异值、条件数之间的关系,以建立并完善 6 自由度并联机构的动力学性能指标。

参考文献:

- [1] 鄢小安,张知行. 基于 LABVIEW 的振动数据采集与分析系统设计[J]. 林业机械与木工设备,2021,49(10):18-24,31.
- [2] 赵延治,赵铁石,温锐,等. 基于结构变形的大型并联六维力传感器精度研究[J]. 机械设计,2007,24(9):22-25.
- [3] YOU J J, WANG L K, XI F F, et al. Decoupling algorithm and maximum operation frequency of a novel parallel type six-axis accelerometer[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(21):12637-12651.
- [4] YOU J J, XI F F, SHEN H P, et al. A novel Stewart-type parallel mechanism with topological reconfiguration: design, kinematics and stiffness evaluation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 162:104329.
- [5] 叶鹏达,尤晶晶,沈惠平,等. 具有解析式正解的 Stewart 衍生型并联机构的位移输入协调关系[J]. 光学精密工程, 2020, 28(1):151-165.

(下转第 122 页)

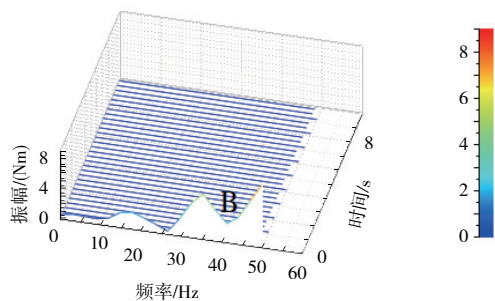


图9 PID 自适应减震系统的频域曲线

通过频域分析发现两种系统在减震开始阶段都出现了较大的振幅。随着时间的推移,一般减震系统逐渐进入稳定工作状态,这时图8中A处的振动虽然减弱,但依然较为明显。而这时,在相同时间与外部振动载荷的作用下,PID 自适应减震系统也进入了稳定工作状态,这时将图9中B处的振动状态与图8中A处相比较,发现振动明显进一步减弱。通过分析证明,PID 自适应控制系统提高了车辆悬架减震系统的减震效果与稳定性。

5 结语

本文首先分析了车辆悬架的结构与工作原理,并建立了对应的车辆悬架减震系统的数学模型与仿真实验模型。通过分析与仿真发现传统的控制方式,当外部负载连续无规律变化时,车辆悬架减震系统的响应速度较低,影响了车辆悬架的使用性能和减震效果。其次,针对这一问题,文中以传感器、PID 控制环节为核心设计了一种具有反馈环节的自适应控制系统,通过 PID 反馈环节的控制提高减震系统响应速度,进而达到提高减震效果与稳定性的目的。最后,以 AMESim 为手段搭建了 PID 自适应控制系统

的仿真模型,并进行了仿真实验。通过实验结果的对比分析,表明 PID 控制系统提高减震系统的响应速度,保持了车辆悬架减震系统所需阻尼力,提高了车辆悬架减震系统运行的可靠性,同时增强了设备的适用性。因此本设计具有一定的应用价值。

参考文献:

- [1] 谭鹏宇,唐岚,董明丰. 基于气压减振器的车辆悬架振动研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(23):26-29.
- [2] 黄大山,王炳奇,刘海亮,等. 车辆悬架系统振动控制特性评价方法[J]. 兵器装备工程学报,2021,42(3):114-118.
- [3] 刘洋,刘纪. 长安福特汽车故障维修案例探讨[J]. 产业创新研究,2021(20):130-132.
- [4] 旷庆祥,朱双华. 基于福特车系的汽车故障维修案例分析[J]. 汽车实用技术,2019(17):223-224.
- [5] 李凌翀. 车辆半主动悬架系统结构设计及控制策略研究[D]. 长春:长春工业大学,2020.
- [6] 左瑞. 车辆主动悬架系统控制方案设计[J]. 科技与创新,2022(9):78-80,83.
- [7] 李小伟,高清冉. 基于 MATLAB 的汽车悬架系统参数分析[J]. 济源职业技术学院学报,2022,21(1):47-50.
- [8] 黎秀郁. 基于 MATLAB 的一种全电动注塑机同步带传动的设计方法[J]. 橡塑技术与装备,2022,48(2):66-69.
- [9] 汪志能,刘衡,董楚峰. 多缸驱动液压机主同步纠偏系统的模糊 PID 控制[J]. 锻压技术,2022,47(3):137-141.
- [10] 陈金宝. PID 自整定控制系统设计[J]. 科技风,2022(9):1-3.
- [11] 魏圣坤. 基于 Simulink 和 AMESim 直动溢流阀动态性能比较研究[J]. 机械研究与应用,2022,35(2):6-8,12.
- [12] 佟得吉,梁奎,刘翔. 电站锅炉用先导式安全阀 AMESim 建模及仿真研究[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):132-134,182.

收稿日期:2022-07-15

(上接第 88 页)

- [6] TSAI L W. Robot analysis: the mechanics of serial and parallel manipulators[M]. New York: Wiley, 1999.
- [7] 肖宇光,高峰. 基于多约束条件下的机器人尺寸综合优化[J]. 机械设计,2021,38(4):1-8.
- [8] 尤晶晶,符周舟,吴洪涛,等. 12-6 台体型 Stewart 冗余并联机构正向运动学研究[J]. 农业机械学报,2017,48(12):395-402.
- [9] 叶伟,谢镇涛,李秦川. 一种可用于微创手术的并联机构运动学分析与性能优化[J]. 机械工程学报,2020,56(19):103-112.
- [10] WANG M X, CHEN Q S, LIU H T, et al. Evaluation of the kinematic performance of a 3-RRS parallel mechanism[J]. Robotica, 2021, 39(4): 606-617.

- [11] WANG X, GUO W Z, HAN Y C. A new index of static actuation force sensitivity of mechanisms based on unified forward Jacobian matrix[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2020, 12(6): 061001.
- [12] 仇鑫,尤晶晶,徐帅,等. Stewart 衍生型并联机器人的拓扑构型及结构模型[J]. 机械科学与技术,2021,40(5):678-689.
- [13] YAO J T, ZHANG H Y, ZHU J L, et al. Isotropy analysis of redundant parallel six-axis force sensor[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 91: 135-150.
- [14] 王汝贵,李屹豪,黄慕华,等. 一种新型六自由度可重构并联机构的奇异性分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 306-315.

收稿日期:2022-07-01