

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.03.007

一种用于动车车轮缺陷自动检测的超声波探头机构

马 龙, 邓嘉鸣

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:针对目前动车车轮缺陷所采用的传统超声波检测技术普遍存在检测盲区以及自动检测接触面耦合效果不佳等问题,提出了一种全新的并联被动式自耦合多晶片探头机构,不仅能有效消除检测盲区,而且能保证自动检测时超声波探头与动车车轮检测面的实时良好耦合;根据实际检测时的探头的工作情况设计了探头机构的基本结构,并利用基于方位特征集的拓扑结构理论求解了机构的自由度;分析了该机构用作自动检测时的运动学性能,并据此利用相关软件对机构参数进行数值模拟,得到了机构用作自动检测时的工作空间,为全面实施动车车轮缺陷的自动超声波检测奠定了理论基础。

关键词:动车车轮;自动检测;自耦合探头机构;工作空间

中图分类号:O 621.3

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)03-0062-09

A Parallel Self Coupling Ultrasonic Probe Mechanism for Automatic Detection of Wheel Defect of Trains

MA Long, DENG Jiaming

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Aiming at the defects such as blind detection and poor coupling effect of automatic detection of contact surface existing in the traditional ultrasonic detection technology used for detecting the defects of CRH wheel, a new parallel passive self coupling multi wafer probe mechanism is proposed, which can not only effectively eliminate the blind detection zone, but also ensure a good real-time coupling between ultrasonic probe and the wheel surface. A basic structure of the probe mechanism is introduced in this paper, and the degree of freedom of the mechanism is solved by using the topological structure theory based on the orientation feature set. An analysis is made on the mechanism for the automatic detection of the kinematic performance, and by using relevant software, the mechanism parameters are simulated, and the working space of the mechanism is obtained, which lays a theoretical foundation for the full implementation of the automatic ultrasonic detection of the train wheel defects.

收稿日期:2017-11-15。

作者简介:马龙(1991—),男,江苏淮安人,硕士生。通讯联系人:邓嘉鸣(1963—),E-mail:czdydj@126.com

引用本文:马龙,邓嘉鸣.一种用于动车车轮缺陷自动检测的超声波探头机构[J].常州大学学报(自然科学版),2018,30(3):62-70.

Key words: train wheel; automatic detection; autocoupling probe mechanism; working space

近年来,作为最重要的运输方式和工具之一的铁路及其运载车辆,得到了飞速发展。但同时也提出了一个非常严峻的课题,即如何高效地保障运行列车特别是高速动车组或高铁的行车安全,为此世界各国铁路部门都提出了自己的列车安全保障体系,我国铁路部门针对列车的安全运行也专门制定了一系列的检测和维护标准及方法。作为列车走行部重要部件的轮对(车轴与两个车轮的组合体),其制造质量及运行完好性将直接关系到列车的运动学、动力学性能,以及行车的安全性^[1]。为此,相关部门要求对轮对严格实施按既定标准的缺陷检测,以确保轮对不带超限缺陷运行。目前动车车轮的自动化探伤已经成为各国铁路部门的研究范畴,但保证探头与踏面接触良好的问题却没能很好的解决。

1 机构的提出及工作原理

1.1 问题的提出

由于在役动车车轮目前所采用的传统缺陷检测方法中存在的问题,提出了一种新型的超声波探头机构,以解决传统方法存在检测盲区和检测接触面耦合效果不佳等问题。动车车轮作为动车轮对的重要组成部分,在役使用后,车轮踏面(一般用作超声波检测接触面,可有效检测车轮轮辋部位的缺陷)将存在不同程度的磨损,使踏面形状发生畸变,当采用超声波自动检测时,传统的超声波探头由于不具备位姿自调节功能而往往无法与踏面形成真正的耦合,也就无法完成对动车车轮的自动检测。

1.2 机构结构及工作原理

针对在役动车车轮缺陷自动检测中存在的问题,结合车轮超声波检测的具体工艺,提出了一种全新的并联被动式自耦合超声波探头机构,由于该机构具有弹性多支链并联结构,使探头整体具有自适应微调功能,因而能很好地保证自动检测时超声波探头与动车车轮检测面的实时良好耦合,具体结构如图1所示。

该并联自耦合探头机构主要包括安装板、并

联弹簧、连接架、探头壳、S副、耦合弹簧、多焦距探头;安装板与探伤主机连接;并联弹簧和S副置于安装板和连接架之间;连接架与探头壳用螺钉连接,与安装板用S副连接,并配有一组并联弹簧;方截面的多焦距探头镶装在方形探头壳内,二者为滑动配合,探头尾部装有耦合弹簧。探伤时,探头与车轮踏面接触受压,在并联弹簧、S副和耦合弹簧的共同作用下可作移动和摆动,则当车轮踏面形状变化时,探头位姿能随之实时被动调节,以最大限度保证耦合良好。此外在探头内部设置了两组不同角度晶片,能同时实施车轮踏面近表面和更深区域的探伤,从而有效地消除了传统超声波检测技术中存在的检测盲区。

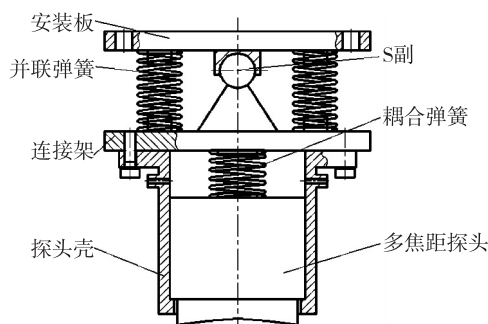


图1 并联被动式微调结构的自耦合探头结构示意图

2 机构的拓扑结构分析

2.1 机构拓扑结构模型的建立

由于该探头用于在役动车车轮的自动探伤,以动车车轮踏面为检测面时,须按车轮的检修规程确定探头位姿微调的范围,同时自动检测时车轮处于运动状态,即超声波探头也处于被动的动态,如何保证

探头与车轮踏面的实时耦合,机构本身的运动学性能及其工作空间就成为了关键为此须对所提出的机构进行位姿及工作空间分析。

按图 1 所示机构得出机构的模型(机构简图)如图 2 所示。从图 2 可以看出,在组合式并联弹簧所组成的多支链机构的末端为超声波探头,并通过中心球铰 5 及耦合弹簧 7 使探头成为浮动式结构,在检测过程中能按照踏面的情况进行实时位姿微调,从而确保接触面的良好耦合,最大程度地保证了检测的准确性和可靠性。

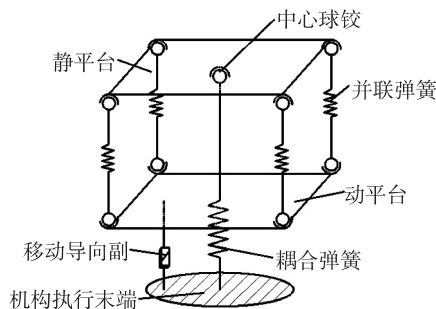


图 2 并联自耦合探头机构简图

2.2 机构自由度分析

根据机构自耦合的运动特点和结构特征,采用等效的伪刚体模型分析机构的基本运动特征,则图 2 中的并联弹簧即可等效为伪刚体^[2]。其伪刚体模型的尺度约束类型可描述成刚性机构: 1 — {—S—} ⊕ 4 — SOC{—S—P—S—} 机构(SOC 表示单开链式串联机构)。该机构有相互平行的

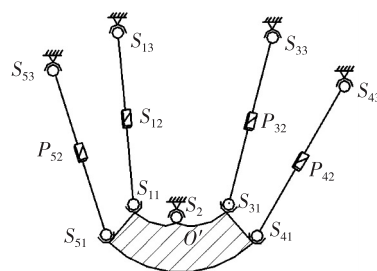


图 3 等价机构图

静平台和动平台组成,四条均布支链 $S_{11}-P_{12}-S_{13}$, $S_{31}-P_{32}-S_{33}$, $S_{41}-P_{42}-S_{43}$, $S_{51}-P_{52}-S_{53}$ 的两端分别与动、静平台通过 S 副铰接,支链 S_2 一端与动平台中心 O' 固定连接,一根刚性杆连接支链 S_2 ,另一端和定平台中心连接。进一步简化,可得到如图 3 所示的,与图 2 等效的刚性并联机构简图。

根据机构方位特征理论^[3],本机构的自由度计算主要步骤如下:

1) 分析机构的拓扑结构可以得出:

支路拓扑结构:一条支路 $\text{SOC}\{-S_2-\}$ 和三条相同结构支路 $\text{SOC}\{-RRR-\}$ ($i=1345$) 并联构成。

两平台拓扑结构:

定平台:球副 $S_{11}, S_{31}, S_{41}, S_{51}$ 均位于同一平台,且方向一致。

动平台:球副 $S_{13}, S_{33}, S_{43}, S_{53}$ 均位于同一平台,且方向一致。

2) 选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线端点。

3) 确定支路末端构件的方位特征(POC (position orientation characteristic))集。

支链 1:由于已选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线上, S_{13} 可以等价为 $\text{SOC}\{-RRR-\}$,支链 1 末端构件的方位特征集

$$M_{b_1} = \bigcup_{j=1}^3 M_{1_j} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

基于方位特征集的算法中, M 表示末端构件的方位特征集, t (translation) 表示平移自由度; r (revolution) 表示旋转自由度。因此,支链 1 末端可实现三平移三转动 6 个自由度。

支链 2:由于该支链仅由 1 个球铰 S_2 构成,同时已选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线上,支链 2 末端构件的方位特征集

$$M_{s_2} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,支链2末端可实现三转动3个自由度。

支链3:由于已选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线上, S_{33} 可以等价于 $\text{SOC}\{-RRR-\}$, 末端构件的方位特征集

$$M_{b_3} = \bigcup_{j=1}^3 M_{3_j} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,支链3末端可实现三平移三转动6个自由度。

支链4:由于已选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线上, S_{43} 可以等价于 $\text{SOC}\{-RRR-\}$, 末端构件的方位特征集

$$M_{b_4} = \bigcup_{j=1}^3 M_{4_j} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,支链4末端可实现三平移三转动6个自由度。

支链5:由于已选定基点 O' 位于 S_2 末端轴线上, S_{53} 可以等价于 $\text{SOC}\{-RRR-\}$, 末端构件的方位特征集

$$M_{b_5} = \bigcup_{j=1}^3 M_{5_j} = \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^1 \\ r^0 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^2 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,支链5末端可实现三平移三转动6个自由度。

4) 确定机构的独立回路数

$$v = m - n + 1 = 13 - 9 + 1 = 4$$

式中: v 为运动动链的独立回路数; m 为运动副数; n 为构件数。

基于方位特征集的拓扑结构设计理论,可得该机构包含4个独立回路。

5) 确定独立回路的独立位移方程数 ξ_{L_k} , 其中 $k = (1, 2, 3, 4)$ 。

①取第一个独立回路 $\text{SOC}_1\{-S_{11}-P_{12}-S_{13}-S_2-\}$, 其独立位移方程数 ξ_{L_1} 为

$$\xi_{L_1} = \dim.\{M_{b_1} \cup M_{s_2}\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = 6$$

可得,第1、第2支路组成的子并联机构的自由度为

$$F_{(1-2)} = \sum_{j=1}^m f_j - \sum_{k=1}^1 \xi_{L_k} = 3 + 1 + 3 - 1 + 3 - 6 = 3$$

式中: F 为机构的活动度; f_j 为第 j 个运动副的自由度(不含局部自由度); m 为运动副数。

由第1、第2支路组成的子并联机构动平台的DOF集为

$$M_{pa(1-2)} = M_{b_1} \cap M_{s_2} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,第1、第2支路组成的子并联机构动平台可实现三转动三个自由度。

②取第二个独立回路为 $\text{SOC}_2\{-R(O_{13}-O_2)-S_{33}-P_{32}-S_{31}-\}$, 其独立位移方程数 ξ_{L_2} 为

$$\xi_{L_2} = \dim.\{M_{pa(1-2)} \cup M_{b_3}\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = 6$$

可得,第1、第2、第3支路组成的子并联机构的自由度为

$$F_{(1-3)} = \sum_{j=1}^m f_j - \sum_{k=1}^2 \xi_{L_k} = 3$$

式中: F 为机构的活动度; f_j 为第 j 个运动副的自由度(不含局部自由度); m 为运动副数。

由第1~第3支路组成的子并联机构动平台的POC集为

$$M_{pa(1-3)} = M_{pa(1-2)} \cap M_{b_3} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,第 1~第 3 支路组成的子并联机构动平台可实现三转动 3 个自由度。

③取第 3 个独立回路为 $SOC_3\{-S_{43}-P_{42}-S_{41}-\}$, 其独立位移方程数 ξ_{L_3} 为

$$\xi_{L_3} = \dim.\{M_{pa(1-3)} \cup M_{b_4}\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = 6$$

可得,第 1~第 4 支路组成的子并联机构的自由度为

$$F_{(1-4)} = \sum_{j=1}^m f_j - \sum_{k=1}^3 \xi_{L_k} = 3$$

式中: F 为机构的活动度; f_j 为第 j 个运动副的自由度(不含局部自由度); m 为运动副数。

由第 1~第 4 支路组成的子并联机构动平台的 POC 集为

$$M_{pa(1-4)} = M_{pa(1-3)} \cap M_{b_4} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,第 1~第 4 支路组成的子并联机构动平台可实现三转动 3 个自由度。

④取第 4 个独立回路为 $SOC_4\{-S_{43}-P_{42}-S_{41}-\}$, 其独立位移方程数 ξ_{L_4} 为

$$\xi_{L_4} = \dim.\{M_{pa(1-4)} \cup M_{b_5}\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cup \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = \dim.\left\{\begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix}\right\} = 6$$

可得,第 1~第 5 支路组成的子并联机构的 DOF 为

$$F_{(1-5)} = \sum_{j=1}^m f_j - \sum_{k=1}^4 \xi_{L_k} = 3$$

式中: F 为机构的活动度; f_j 为第 j 个运动副的自由度(不含局部自由度); m 为运动副数。

由第 1~第 5 支路组成的子并联机构动平台的 POC 集为

$$M_{pa(1-5)} = M_{pa(1-4)} \cap M_{b_5} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} t^3 \\ r^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t^0 \\ r^3 \end{bmatrix}$$

因此,第 1~第 5 支路组成的子并联机构动平台可实现三转动 3 个自由度。

综上可得,该并联自耦合探头机构在机构固有属性上所等价的刚性机构模型 $1 - \{-S-\} \oplus 4 - SOC\{-S-P-S-\}$ 具有 3 个自由度,即能够实现空间 3 个方向的转动。

3 机构运动学分析

3.1 机构齐次坐标变换

为了便于对该等价机构运动学方程的求解和分析,如图 4 所示。假定: $S_{11}S_{13}=L_1$, $S_{31}S_{33}=L_3$, $S_{41}S_{43}=L_4$, $S_{51}S_{53}=L_5$ 。 α, β, γ 分别为绕 X, Y, Z 轴转动的旋转角(分别以面对 X, Y, Z 轴正向看逆时针转角为正,与右手螺旋法则一致)。

由前述求得该机构并联部分的伪刚体模型具有 3 个自由度,即能够实现绕 X 轴, Y 轴, Z 轴 3 个方向的转动^[4]。则静坐标系 $O-XYZ$ 与动坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 之间的旋转变换矩阵为 $R_{\alpha\beta\gamma}$, 具体写成

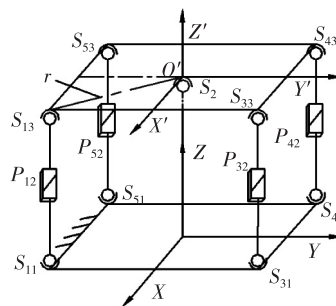


图 4 伪刚体坐标模型

$$\mathbf{R}_{\alpha\beta\gamma} = \mathbf{R}(Z, \gamma) \mathbf{R}(Y, \beta) \mathbf{R}(X, \alpha) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + c\alpha s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: s, c 分别为三角函数 \sin 和 \cos 的简写, \mathbf{R} 为旋转矩阵。

旋转变换矩阵为 $\mathbf{R}_{\alpha\beta\gamma}$ 和平移变换矩阵为 \mathbf{T}_{XYZ} , 得到静坐标系 O - XYZ 与动坐标系 O' - $X'Y'Z'$ 之间的变换矩阵为^[5]

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{R}_{\alpha\beta\gamma} \mathbf{T}_{XYZ} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + c\alpha s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + c\alpha s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

定平台上 S_{i1} (i 表示第 i 条支链, $i=1, 3, 4, 5$) 在静坐标系 O - XYZ 中的齐次坐标分别为:

$$S_{11} = [X_{S_{11}} \quad Y_{S_{11}} \quad Z_{S_{11}} \quad 1]^T = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad -\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (3)$$

$$S_{31} = [X_{S_{31}} \quad Y_{S_{31}} \quad Z_{S_{31}} \quad 1]^T = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad \frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (4)$$

$$S_{41} = [X_{S_{41}} \quad Y_{S_{41}} \quad Z_{S_{41}} \quad 1]^T = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad \frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (5)$$

$$S_{51} = [X_{S_{51}} \quad Y_{S_{51}} \quad Z_{S_{51}} \quad 1]^T = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad -\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (6)$$

动平台上的球副 S_{i3} (i 表示第 i 条支链, $i=1, 2, 3, 4, 5$), 在动坐标系 O' - $X'Y'Z'$ 中的齐次坐标系分别为:

$$S'_{2} = [X'_{S_2} \quad Y'_{S_2} \quad Z'_{S_2} \quad 1]^T = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (7)$$

$$S'_{53} = [X'_{S_{53}} \quad Y'_{S_{53}} \quad Z'_{S_{53}} \quad 1]^T = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad -\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (8)$$

$$S'_{43} = [X'_{S_{43}} \quad Y'_{S_{43}} \quad Z'_{S_{43}} \quad 1]^T = \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad \frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (9)$$

$$S'_{33} = [X'_{S_{33}} \quad Y'_{S_{33}} \quad Z'_{S_{33}} \quad 1]^T = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad \frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (10)$$

$$S'_{13} = [X'_{S_{13}} \quad Y'_{S_{13}} \quad Z'_{S_{13}} \quad 1]^T = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad -\frac{\sqrt{2}}{2}r \quad 0 \quad 1 \right]^T \quad (11)$$

根据空间不共原点的坐标系的变换方法^[6], 可得: 动坐标系 O' - $X'Y'Z'$ 中的点在静坐标系 O - XYZ 中的坐标作如下变换

$$S_{i3} = \boldsymbol{\varphi} \cdot S'_{i3} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + c\alpha s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & -s\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & s\alpha s\beta & c\alpha s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X'_{i3} \\ Y'_{i3} \\ Z'_{i3} \\ 1 \end{bmatrix}$$

则有:

$$S_{13} = \varphi \cdot S'_{13} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -ca s\gamma + sa s\beta s\gamma & ca c\gamma + ca s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & ca c\gamma + sa s\beta s\gamma & -sa c\gamma + sa s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & sa s\beta & ca s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}r \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$S_2 = \varphi \cdot S'_2 = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -ca s\gamma + sa s\beta s\gamma & ca c\gamma + ca s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & ca c\gamma + sa s\beta s\gamma & -sa c\gamma + sa s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & sa s\beta & ca s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$S_{33} = \varphi \cdot S'_{33} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -ca s\gamma + sa s\beta s\gamma & ca c\gamma + ca s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & ca c\gamma + sa s\beta s\gamma & -sa c\gamma + sa s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & sa s\beta & ca s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}r \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$S_{43} = \varphi \cdot S'_{43} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -ca s\gamma + sa s\beta s\gamma & ca c\gamma + ca s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & ca c\gamma + sa s\beta s\gamma & -sa c\gamma + sa s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & sa s\beta & ca s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2}r \\ \frac{\sqrt{2}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$S_{53} = \varphi \cdot S'_{53} = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -ca s\gamma + sa s\beta s\gamma & ca c\gamma + ca s\beta c\gamma & 0 \\ c\beta s\gamma & ca c\gamma + sa s\beta s\gamma & -sa c\gamma + sa s\beta s\gamma & 0 \\ -s\beta & sa s\beta & ca s\beta & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{2}r \\ -\frac{\sqrt{2}}{2}r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

根据 $1 - \{-S-\} \oplus 4 - \text{SOC}\{-S-P-S-\}$ 机构中各根柔性杆的杆长特征,假定各杆长为 $S_{11}S_{13} = L_1, S_{31}S_{33} = L_3, S_{41}S_{43} = L_4, S_{51}S_{53} = L_5$, 基于该等效模型中的集合关系和杆长特征^[7], 则各坐标点需满足以下方程:

$$\begin{cases} (X_{S_{13}} - X_{S_{11}})^2 + (Y_{S_{13}} - Y_{S_{11}})^2 + (Z_{S_{13}} - Z_{S_{11}})^2 = L_1^2 \\ (X_{S_{33}} - X_{S_{31}})^2 + (Y_{S_{33}} - Y_{S_{31}})^2 + (Z_{S_{33}} - Z_{S_{31}})^2 = L_3^2 \\ (X_{S_{43}} - X_{S_{41}})^2 + (Y_{S_{43}} - Y_{S_{41}})^2 + (Z_{S_{43}} - Z_{S_{41}})^2 = L_4^2 \\ (X_{S_{53}} - X_{S_{51}})^2 + (Y_{S_{53}} - Y_{S_{51}})^2 + (Z_{S_{53}} - Z_{S_{51}})^2 = L_5^2 \end{cases} \quad (17)$$

3.2 机构的运动学逆解

机构的逆解是已知机构执行末端的位姿或给定末端的位姿要求,求解计算相应关节的运动变量^[8]。在该并联自耦合机构中,探头能够紧压在踏面上,实现逆向自耦合,实际上就是给定了动车车轮踏面的

位姿,需要分析各柔性杆的长度及角度的变化以及中心球铰的偏转角度,因此机构的运动学逆解是该自耦合机构工作状态分析的关键^[9]。简化到该等价机构中,就是已知动平台姿态角 (α, β, γ) ,求解机构的3根柔性杆长 L_1, L_3, L_4 。

1) 求解 L_1

已知 $S_{11}S_{13} = L_1$, 利用动平台姿态角 (α, β, γ) 的表达式,通过式(3)(12)(17)联立求解得到

$$L_1 = \sqrt{A_1^2 + (B_1 + C_1)^2 + (D_1 - E_1 + d)^2} \quad (18)$$

式中,各个参数的具体表达式为:

$$A_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta c\gamma - \frac{\sqrt{2}}{2}r(-c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma) - \frac{\sqrt{2}}{2}r; B_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta s\gamma; C_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2}r(c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma);$$

$$D_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rs\beta; E_1 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rs\alpha s\beta。$$

2) 求解 L_3

已知 $S_{31}S_{33} = L_3$, 利用动平台姿态角 (α, β, γ) 的表达式,通过式(4)(14)(17)联立求解得到。

$$L_3 = \sqrt{A_3^2 + B_3^2 + (C_3 + d)^2} \quad (19)$$

式中,各个参数的具体表达式为:

$$A_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta c\gamma + \frac{\sqrt{2}}{2}r(-c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta c\gamma); B_3 = \frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta s\gamma + \frac{\sqrt{2}}{2}r(c\beta c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma); C_3 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rc\alpha s\gamma$$

$$+ \frac{\sqrt{2}}{2}rs\alpha s\beta c\gamma。$$

3) 求解 L_4

已知 $S_{41}S_{43} = L_4$, 利用动平台姿态角 (α, β, γ) 的表达式,通过式(5)、式(15)、式(17)联立求解得到

$$L_4 = \sqrt{A_4^2 + (B_4 + C_4)^2 + (D_4 + E_4 + d)^2} \quad (20)$$

式中,各个参数的具体表达式为:

$$A_4 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta c\gamma + \frac{\sqrt{2}}{2}r(-c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta c\gamma); B_4 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta s\gamma; C_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}r(c\alpha c\gamma + s\alpha s\beta s\gamma); D_4 =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2}rs\beta; E_4 = \frac{\sqrt{2}}{2}rs\alpha s\beta。$$

4) 求解 L_5

已知 $S_{51}S_{53} = L_5$, 利用动平台姿态角 (α, β, γ) 的表达式,通过式(6)(16)(17)联立求解得到

$$L_5 = \sqrt{A_5^2 + (B_5 + C_5)^2 + (D_5 - E_5 + d)^2} \quad (21)$$

式中,各个参数的具体表达式为:

$$A_5 = -\frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta c\gamma + \frac{\sqrt{2}}{2}r(c\alpha c\gamma - s\alpha s\beta s\gamma); B_5 = \frac{\sqrt{2}}{2}rc\beta s\gamma; C_5 = \frac{\sqrt{2}}{2}r(c\alpha s\gamma + s\alpha s\beta s\gamma); D_5 = \frac{\sqrt{2}}{2}rs\beta;$$

$$E_5 = \frac{\sqrt{2}}{2}rs\alpha s\beta。$$

3.3 工作空间分析

在役动车车轮踏面存在不同程度的磨损,导致踏面表面形状发生变化,利用并联被动式自耦合探头对动车车轮进行自动探伤检测,为达到最佳的耦合效果,自耦合探头的位姿必须能按照踏面表面的具体形状进行实时微调,并能与踏面所允许的极限形变进行良好耦合,则自耦合探头必须具有足够大的微调

工作空间。

按照在役动车车轮检修规程^[10]对自耦合探头应具有的微调工作空间规定如下:以中心球铰的长度尺寸为标准,选定动平台和定平台的初始位置时相距 20mm(即 $c=20$),根据中心球铰在实际使用中的工作空间为:绕水平 X' 轴 $\pm 15^\circ$;绕水平 Y' 轴 $\pm 15^\circ$;绕 Z' 轴没有约束。

根据初始的数据,采用 Matlab 软件并利用其强大的绘图功能,模拟该探头机构在自动检测过程中在预紧力作用下的极限条件绘制出该机构的得最大工作空间如图 5 所示。从图中可以看出,自耦合探头能随着踏面形状的改变而对自身的位姿作出相应的改变,所形成的可达工作空间能满足在役动车车轮检修规程所要求的车轮踏面变化范围,即能确保检测过程中探头与踏面的耦合良好。

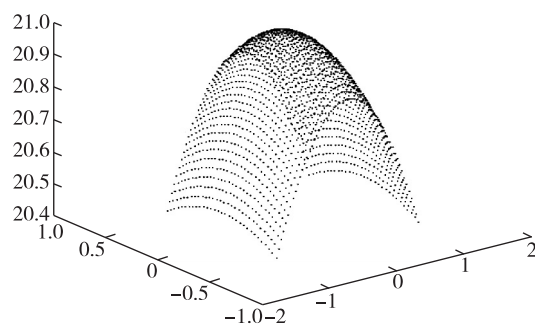


图 5 机构的工作空间

4 结 论

对在役动车车轮缺陷进行自动检测,不仅能提高检测效率,而且能保证检测结果的准确性,但目前所采用的传统自动检测方法普遍存在检测盲区以及检测接触耦合效果不佳等问题。为此,这种全新的并联被动式自耦合多晶片探头机构,能有效消除检测盲区,同时利用基于方位特征集的拓扑结构理论求解了探头机构的自由度,分析了该探头机构用作自动检测时的运动学性能,并据此利用相关软件对机构参数进行数值模拟,得到了探头机构用作自动检测时所需的最大工作空间,能保证超声波探头与在役动车车轮磨损后及时的与检测面的实时良好耦合,从而极大地保证了在役动车车轮缺陷自动检测的质量,以保障行车安全。

参考文献:

- [1]刘希玲,张荣繁,胡宏伟,等.机车车轮超声自动检测系统设计[J].铁道科学与工程学报,2014,12:122-126.
- [2]辛礼兵.基于伪刚体模型的柔性铰链机构自由度分析[J].机械传动,2011,35(8):78-80.
- [3]杨廷力,刘安心,罗玉峰.机器人机构拓扑结构设计[M].北京:科学出版社,2012.
- [4]张铁,谢存禧.机器人学[M].广州:华南理工大学出版社,2001.
- [5]汪源,朱伟,沈惠平.一种柔顺并联自适应机构的工作特性[J].机械设计与研究,2012,9(4):25-29.
- [6]UCHIYAMA M. Closed form force sensing of a 6 six force transducer based on the stewart platform [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2011, 23(2): 83-91.
- [7]杨磊,王南.空间 4SPS-PS 并联机构的刚度及灵巧性分析[J].组合机床与自动化加工技术,2013,11:225.
- [8]KAPPES W, ROCKSTROH B. Type synthesis and forward displacement analysis of parallel manipulator with two equivalent composite universal joints[J]. Journal of Mechanical Engineering Research & Developments, 2014, 37(2): 58-70.
- [9]徐乃昊,刘安心,赵明,等.一种新型 3T1R 并联机器人的拓扑结构设计及运动学分析[J].机械制造与自动化,2016,45(6):169-171,241.
- [10]王华.动车组进口轮对运行情况的调查分析[J].上海铁道科技,2011,3(6):44-50.

(责任编辑:李艳)