

矿用救援机器人悬架平衡机构建模与仿真

刘建

(中国矿业大学机电工程学院,江苏徐州211116)

摘要:为了提高矿用救援机器人的平顺性和越野性,将被动适应式空间平衡连杆机构与履带行驶机构相结合,根据对角线对称布置和中心线对称布置两种空间平衡连杆机构,分别设计了矿用救援机器人悬架。基于笛卡尔坐标系建立了两种悬架多刚体模型,计算其自由度为2,表明两种悬架均具有差动性能;通过几何方法推导出对角线对称的悬架具有线性均化作用。在 Recurdyn 多体系统仿真环境下进行运动学仿真,并使用蒙特卡洛法进行试验,对试验结果进行线性回归分析,结果表明:所设计的两种矿用救援机器人悬架均具有差动性能;与中心线对称的空间平衡连杆机构悬架相比,对角线对称的空间平衡连杆机构悬架还具有线性均化能力,因此,采用对角线对称的空间平衡连杆机构悬架。所设计悬架的零部件布置于防爆机箱外部,不必考虑悬架与防爆机箱的密封,简化了结构设计,满足矿用救援机器人运动功能的需求。

关键词:矿用救援机器人;空间平衡连杆机构;差动机构;蒙特卡洛方法;运动学分析

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2014)04-0081-07

Coal Mine Rescue Robot Suspension Mechanism Modeling and Simulation Experiment

Liu Jian

(School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: To improve the stability and cross-country ability of coal mine rescue robot, two types of coal mine rescue robot suspensions were designed based on two types of spatial balance linkage mechanism (SBLM). Each design combined SBLM with tracks but differentiated in that one design used diagonal symmetry mode and the other used center line symmetry mode. The multi-rigid body models of two types of SBLM were established and degree of freedom was 2 by calculation in Descartes coordinate system, indicating the differential motion performance of the mechanisms. The linear equalization function of diagonal symmetry mechanism was deduced in light of geometric derivation. Kinematics simulation was implemented using Recurdyn and simulating experiment using Monte Carlo method was conducted. In light of one-dimensional linear regression, the differential motion performance of the two types of SBLM and the linear equalization function of the diagonal symmetry mechanism were verified. The final results prove the suspension with the diagonal symmetry mechanism is suitable for coal mine rescue robot.

Key words: coal mine rescue robot; spatial balance linkage mechanism; differential motion; Monte Carlo method; kinematics simulation

矿用救援机器人的主要任务是对发生灾害后的矿井进行环境探测,为救援人员提供井下环境信息及现场场景信息,为制定可行、安全、周密的救援方案提供科学依据^[1]。煤矿井下空间狭小、地形复杂、环境恶劣,尤其是灾害发生后,井下的道路变得更加崎岖复杂,因此矿用救援机器人必须具有适应复杂地形和高越野性能移动系统。移动系统包括行走机构、平衡机构和驱动单元。其中,平衡机构的主要作用是调整重力在行

收稿日期:2014-02-14

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2012AA041504)

作者简介:刘建(1982—),男,山东寿光人,博士研究生,主要从事矿用救援机器人方面的研究。

E-mail: superlj168@126.com

走机构上的分布,使行走机构受力均衡,提高车体的平顺性和越野性,同时对车体两侧行走机构的扰动输入进行均化,减小车体的起伏,保证车体内电子设备的正常工作。

由于防爆和防水性能的要求,矿用救援机器人对密封的要求很高。因此,隔爆机箱的结构越简单,设计的孔洞越少,密封设计就越简单,可靠性也越高。

根据机器人能否检测地形变化,平衡机构分为主动适应式、被动式适应式和混合适应式。主动适应式平衡机构是在其悬架或轮子上安装传感器和执行器以保证稳定的接地压力,其地面适应性强,但结构与控制复杂^[2]。被动适应式平衡机构在悬架或轮子上没有安装传感器,只是被动地适应地面变化,减小车身的摆动,该类机构运动平滑性较好、控制简单,但不具有主动适应性^[3]。混合适应式平衡机构是将主动和被动平衡机构有机结合,既有传感器和执行器以保证较稳定的接地压力,又有相应的被动适应机构,该机构环境适应性很强,但结构与控制相对复杂^[4-5]。在实际使用中,被动式平衡机构由于运动平滑,控制简单被广泛使用,因此矿用救援机器人系统中也使用被动适应式平衡机构。

被动适应式平衡机构主要有齿轮系式、绳索式和空间连杆式。齿轮系式差动机构由于采用行星轮系,质量较大,且放置于车体内部,占用车体内部一定空间,影响内部有效载荷的布置;由于机构有穿过车体的动轴,使车体密封设计难度加大;传动中易发生由于齿轮受力不均而产生的卡死现象。绳索式差动机构采用弹性绳索作为传动部件,往复运动时易产生较大变形,影响工作性能。空间连杆式差动机构可实现对输入的线性均化输出,可以布置在车体外侧,不占用车体内部的空间,便于车内有效载荷的布置;机构没有穿过车体的部件,所以车体密封设计简便,不需要考虑动密封。

目前,空间连杆式平衡机构有对角线对称布置和中心线对称布置两种。陶建国等^[6]设计的月球车连杆式差动平衡机构,采用对角线对称布置空间连杆式平衡机构,并通过杆件间的几何关系证明该机构具有线性差动性能,但杆件运动需要较大的空间;魏毅龙等^[7]设计的移动机器人 6 轮导杆联动式悬架采用中心线对称布置空间连杆式平衡机构,但没有对该机构进行运动分析。这两种形式的空间连杆平衡机构都是应用在轮式机器人上,而矿用救援机器人使用的是附着力更好,接地比压更小的履带行驶机构,并且,尚未发现文献对两种空间连杆式平衡机构的性能进行对比分析。

本研究将被动适应式空间平衡连杆机构与履带行驶机构相结合,设计了一种新型的履带式矿用救援机器人悬架。根据对角线对称布置和中心线对称布置两种空间平衡连杆机构,分别设计了矿用救援机器人悬架。基于笛卡尔坐标系建立了两种悬架平衡机构的差动运动模型,并针对对角线对称布置和中心线对称布置两种空间平衡连杆机构,分别设计了矿用救援机器人悬架平衡机构。在 Recurdyn 多体系统仿真环境下分别定义两种悬架的多刚体模型,通过运动学仿真研究两种悬架的差动性能。为了研究两种悬架的线性均化性能,进行基于蒙特卡洛方法的仿真试验,并通过分析两种矿用救援机器人悬架平衡机构的运动性能,选取悬架设计方案。

1 矿用救援机器人悬架及其多刚体动力学模型

履带行走机构具有支撑面积大、越野性能好、可实现原地转向、牵引附着性能好、自复位及越障能力良好等优点,因此成为移动机器人主要采用的行驶机构。被动适应式平衡机构原理是将两侧悬架的摆角输入均化为隔爆机箱的俯仰角输出,从而减小地形频繁变化对隔爆机箱姿态的扰动,并协调移动系统悬架与履带的运动和受力,将两者的优越性结合起来,可以增强机器人的移动性能。空间连杆平衡机构可以布置在隔爆机箱外侧,不占用机箱内部的空间,便于机箱内部有效载荷的布置,又因为机构没有穿过机箱的部件,所以简化了密封设计。

目前,空间连杆平衡机构有对角线对称和中心线对称两种空间平衡连杆机构,如图 1 所示。两种机构均由机架 B_1 ,右摆臂 B_2 ,右连杆 B_3 ,平衡杆 B_4 ,左连杆 B_5 ,左摆臂 B_6 六个杆件组成。右摆臂 B_2 通过旋转铰与机架 B_1 连接;右连杆 B_3 一端与右摆臂 B_2 通过球铰连接,另一端通过球铰与平衡杆 B_4 连接;左摆臂 B_6 通过旋转铰与机架 B_1 连接;左连杆 B_5 一端与右摆臂 B_2 通过球铰连接,另一端通过球铰与平衡杆 B_4 连接;平衡杆 B_4 通过旋转铰与机架 B_1 连接。左右摆臂相对地面的俯仰角通过平衡杆传递到机架,从而使机架相

对于地面发生俯仰。对角线对称的空间连杆平衡机构的左右摆臂与平衡杆的连接以平衡杆为对角线,相对于平衡杆与隔爆机箱的旋转铰中心对称布置;中心线对称的空间连杆平衡机构的左右摆臂与平衡杆的连接相对于隔爆机箱的垂直中心线对称布置。

将右摆臂 B_2 与机器人的右履带架连接,左摆臂 B_0 与机器人的左履带架连接,形成空间连杆平衡机构的履带机器人底盘。根据两种空间连杆平衡机构设计的底盘,均由隔爆机箱 1,右履带架 2,右连杆 3,平衡杆 4,左连杆 5,左履带架 6 六个杆件组成。左、右履带架与隔爆机箱通过旋转铰链接,履带架与连杆通过球铰链接,连杆与平衡杆通过球铰链接,平衡杆与隔爆机箱通过旋转铰链接。图 2(a)所示机器人是采用对角线对称布置空间连杆式平衡机构,图 2(b)所示的机器人采用中心线对称布置空间连杆式平衡机构。

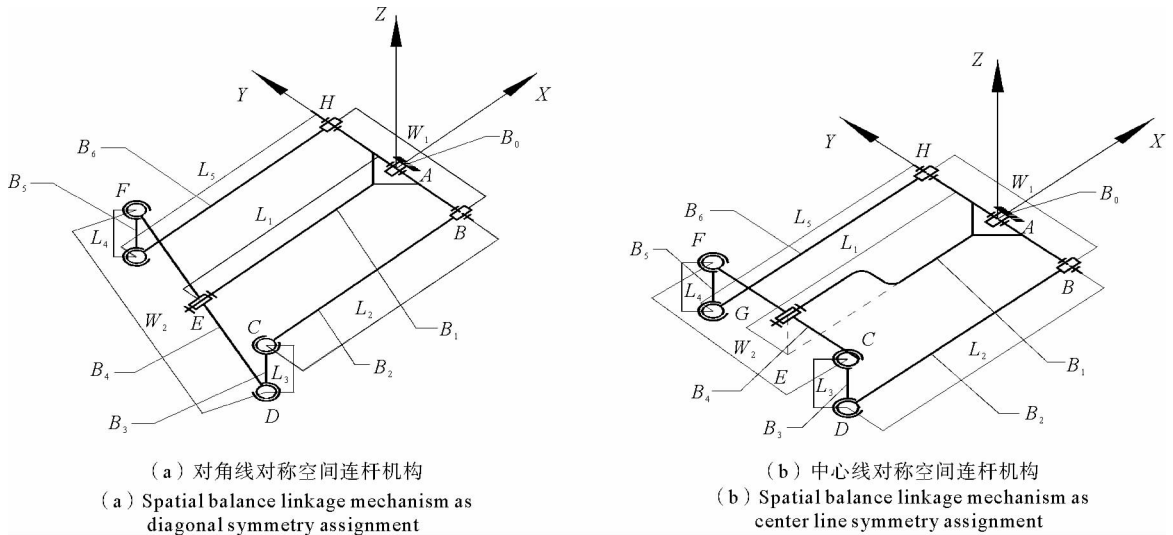


图 1 空间连杆机构简图

Fig. 1 Schematic diagram of spatial balance linkage mechanism

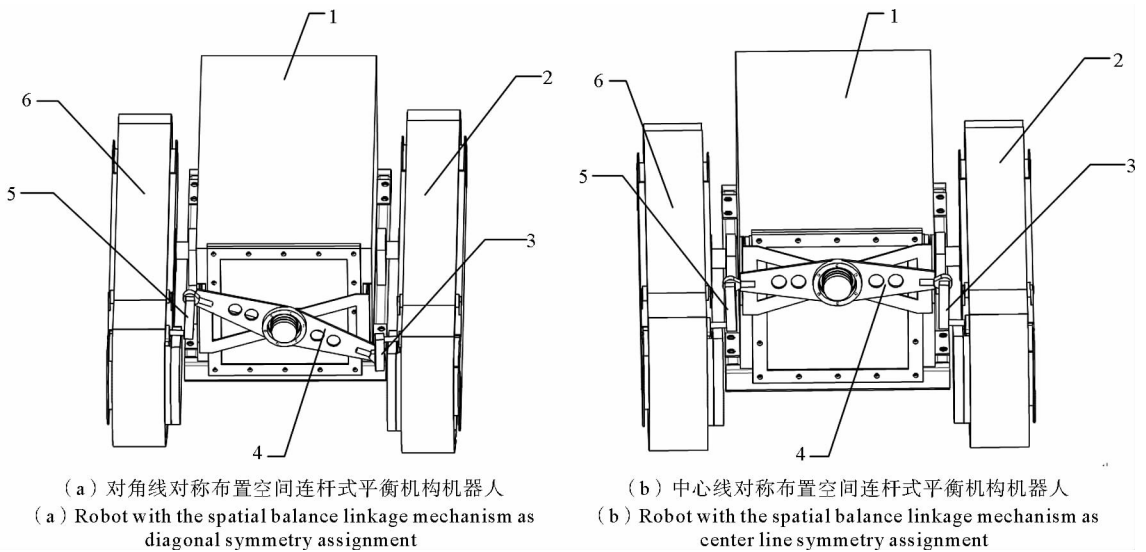


图 2 两种空间连杆机构的履带式矿用机器人

Fig. 2 Two types of robot with the spatial balance linkage mechanism

为分析机器人悬架的运动,建立基于笛卡尔坐标系的空间连杆平衡机构多刚体模型,并对机构的自由度进行分析,定义一个六刚体模型与悬架的六个杆件对应;定义地面 B_0 为公共基,并在隔爆机箱与地面之间

定义一个虚拟旋转铰。多刚体模型中的铰定义如表 1 所示。

由于连杆两端都是球铰,在实际运动中,连杆会产生绕自身轴线的转动,而该转动对空间连杆平衡机构的运动没有任何影响。为了运动学分析求解的唯一性,将其中的一个球铰用万向节代替。铰 3 和铰 4 用万向节铰代替球铰,其约束数量为 4。空间连杆平衡机构的自由度为:

$$F = 6 \times 6 - (5 + 5 + 3 + 3 + 4 + 4 + 5 + 5) = 2。$$

空间连杆平衡机构是 2 自由度机构,因此,可以构建成差动机构,其输入为左、右履带架相对于地面的俯仰角,输出为隔爆机箱相对于地面的俯仰角。

此外,机构 1 可以通过各构件间的几何关系证明其具有线性均化作用。如图 1(a)所示,在机架中心处定义地面惯性坐标系, X 轴指向前方, Y 轴与旋转轴重合, Z 轴垂直向上。设 α_1 和 α_2 为右摆臂和左摆臂相对于地面惯性坐标系旋转的角度, α_3 为机架相对于地面惯性坐标系旋转的角度, α_4 为平衡杆相对于机架旋转的角度。定义 α 为右摆臂相对于机架的摆角, $\alpha = \alpha_1 - \alpha_3$; 定义 β 为左摆臂相对于机架的摆角, $\beta = \alpha_2 - \alpha_3$ 。定义各连接点坐标为:

$$A(0, 0, 0), B(0, -\frac{W_1}{2}, 0), C(-L_2 \cos \alpha, -\frac{W_1}{2}, -L_2 \sin \alpha), D(-L_1, -\frac{W_2}{2} \cos \alpha_4, \frac{W_2}{2} \sin \alpha_4),$$

$$E(-L_1, 0, 0), G(-L_2 \cos \beta, \frac{W_1}{2}, -L_2 \sin \beta), F(-L_1, \frac{W_2}{2} \cos \alpha_4, -\frac{W_2}{2} \sin \alpha_4), H(0, \frac{W_1}{2}, 0)。$$

由于左摆臂与右摆臂长度相等,左连杆与右连杆长度相同,即 $L_2 = L_5, L_3 = L_4$, 可得方程式:

$$(-L_2 \cos \alpha + L_1)^2 + (-\frac{W_1}{2} + \frac{W_2}{2} \cos \alpha_3)^2 + (-L_2 \sin \alpha - \frac{W_2}{2} \sin \alpha_3)^2 = L_3^2; \quad (1)$$

$$(-L_2 \cos \beta + L_1)^2 + (\frac{W_1}{2} - \frac{W_2}{2} \cos \alpha_3)^2 + (-L_2 \sin \beta + \frac{W_2}{2} \sin \alpha_3)^2 = L_3^2。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)经过化简并通过三角函数转换可得:

$$\cos(\theta + \alpha) = \frac{W}{L_2 \sqrt{4L_1^2 + W_2^2 \sin^2 \alpha_4}}; \quad (3)$$

$$\cos(\theta - \beta) = \frac{W}{L_2 \sqrt{4L_1^2 + W_2^2 \sin^2 \alpha_4}}。 \quad (4)$$

其中: $W = L_1^2 + L_2^2 + \frac{W_2^2}{4} \sin^2 \alpha_4 + (\frac{W_1}{2} - \frac{W_2}{2} \cos \alpha_4)^2 - L_3^2$; $\cos \theta = \frac{2L_1}{\sqrt{4L_1^2 + W_2^2 \sin^2 \alpha_4}}$ 。

从式(3)和式(4)可得: $\alpha = -\beta$ 。即: $\alpha_1 - \alpha_3 = \alpha_3 - \alpha_2$ 。所以,

$$\alpha_3 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}。 \quad (5)$$

式(5)表明隔爆机箱相对于地面惯性坐标系的俯仰角 α_3 等于右摆臂和左摆臂相对于地面惯性坐标系旋转的角度之和 $\alpha_1 + \alpha_2$ 的 1/2, 即该机构具有线性均化功能。

为进一步研究两种机构的运动特性,通过多刚体动力学的方法对两种机构进行运动学分析。根据表 1 建立的多刚体模型,建立基于四元数的笛卡尔坐标系的动力学方程,则方程数量为 $7 \times 6 - 2 = 40$, 并且是非线性方程组,因此只能通过数值方法求解。Recurdyn 是以多体系统动力学理论为基础,采用相对坐标系运动方程理论和完全递归算法的新一代多体系统动力学仿真软件,并已在工程领域得到广泛应用。因此,使用 Recurdyn 作为计算仿真平台。在 Recurdyn 上定义刚体之间的相应约束(表 1), 为方便计算,将图 2 的机器人模型简化为图 3。

表 1 模型中的铰

Tab. 1 Joints of the model

铰号	约 束	约束数量
1	左履带架与隔爆机箱存在旋转铰	5
2	右履带架与隔爆机箱存在旋转铰	5
3	左连杆与左履带架存在球铰	3
4	右连杆与右履带架存在球铰	3
5	平衡杆与左连杆存在球铰	3
6	平衡杆与右连杆存在球铰	3
7	平衡杆与隔爆机箱存在旋转铰	5
8	隔爆机箱与公共基存在旋转铰	5

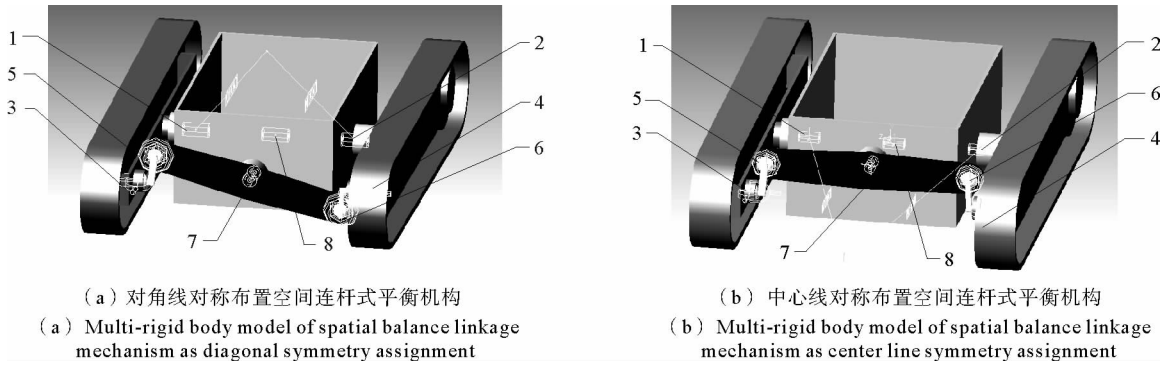


图3 两种形式悬架的履带式矿用机器人多刚体模型图

Fig. 3 Multi-rigid body models of two types of robot suspension

2 运动仿真试验

2.1 运动仿真

为左、右履带设置转动值:左履带从 -10° 转到 10° ,右履带从 5° 转到 -5° 。所获得两个机构的左、右履带相对地面的俯仰角和隔爆机箱相对于地面的俯仰角如图4所示。

从运动分析可以看出,对角线对称布置和中心线对称布置的空间连杆机构都具有差动的性能,隔爆机箱的俯仰角约等于左、右履带俯仰角的一半,但是,其线性均值的性能还没有区分出来。线性均值对移动系统比较重要,它可以保证隔爆机箱俯仰角与左右履带俯仰角的输入保持一定比例,有利于机器人姿态的控制。对角线对称的悬架运动仿真如图5所示。

2.2 基于蒙特卡洛方法的试验

为分析两种机构的线性均化性能,采用蒙特卡洛方法进行试验。首先,按照均匀分布随机产生20组 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 的左右履带的俯仰角;然后,将每对左右履带的俯仰角分别输入到两种机构的多刚体模型中,通过Recurdyn平台计算出隔爆机箱的俯仰角。试验结果如表2所示。

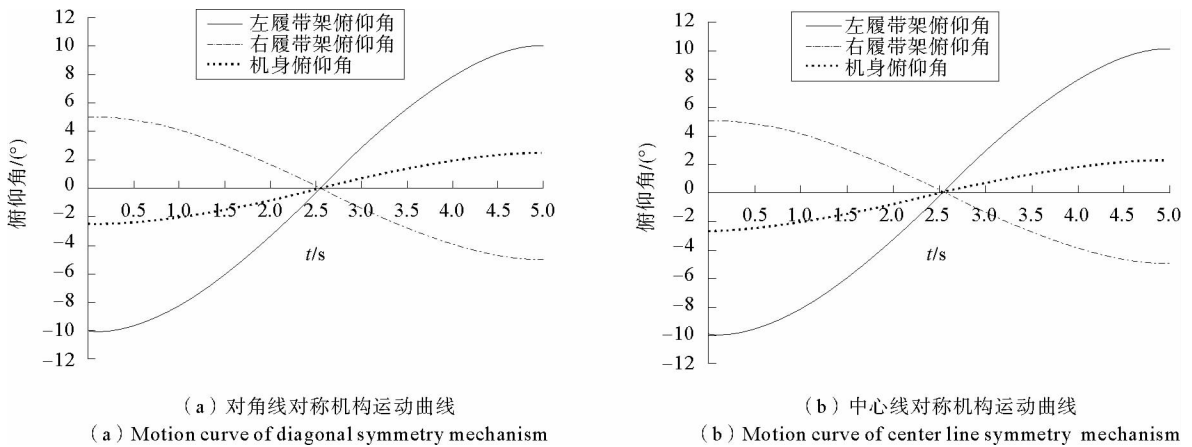


图4 两种形式空间连杆机构的运动曲线

Fig. 4 Motion curves of two types of robot suspension

3 试验结果分析

从两种悬架的运动仿真结果可以看出,两种悬架都具有差动性能。如果空间连杆平衡机构对左右履带俯仰角的输入具有线性均化作用,那么隔爆机箱的俯仰角应该在任何时刻都等于左右履带俯仰角输入和的一半。通过对蒙特卡洛试验结果进行线性回归分析,判断哪种空间连杆机构具有线性均化作用。

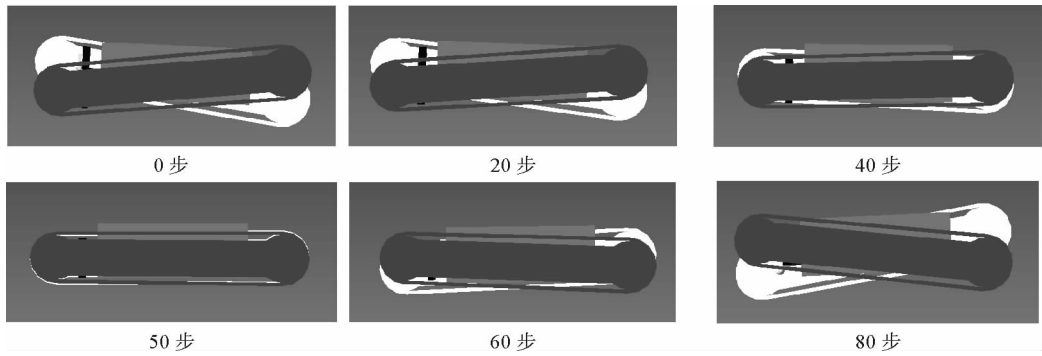


图 5 对角线对称的悬架运动仿真图

Fig. Motion simulation of diagonal symmetry mechanism

表 2 蒙特卡洛试验结果

Tab. 2 Monte Carlo experiments results

数据点	左履带俯仰角/(°)	右履带俯仰角/(°)	两侧履带俯仰角和/(°)	对角线对称形式		中心轴对称形式	
				隔爆机箱俯仰角/(°)	两侧履带俯仰角和与隔爆机箱俯仰角之比	隔爆机箱俯仰角/(°)	两侧履带俯仰角和与隔爆机箱俯仰角之比
1	2.136 9	6.263 3	8.400 2	4.200	2.000	4.214	1.993
2	-0.280 4	-9.802 8	-10.083 2	-5.042	2.000	-4.956	2.035
3	7.826 0	-7.222 2	0.603 8	0.302	1.999	0.559	1.080
4	5.241 9	-5.944 7	-0.702 8	-0.351	2.002	-0.228	3.082
5	-0.870 6	-6.025 6	-6.896 2	-3.448	2.000	-3.425	2.013
6	-9.629 9	2.075 8	-7.554 1	-3.777	2.000	-3.639	2.076
7	6.428 1	-4.556 2	1.871 9	0.936	2.000	1.054	1.776
8	-1.105 9	-6.023 7	-7.129 6	-3.565	2.000	-3.544	2.012
9	2.308 6	-9.694 5	-7.385 9	-3.693	2.000	-3.547	2.082
10	5.838 7	4.935 7	10.774 4	5.387	2.000	5.388	2.000
11	8.436 3	-1.098 1	7.338 2	3.669	2.000	3.755	1.954
12	4.764 1	8.636 3	13.400 4	6.700	2.000	6.713	1.996
13	-6.474 7	-0.680 1	-7.154 8	-3.577	2.000	-3.548	2.017
14	-1.885 9	-1.627 0	-3.512 9	-1.756	2.001	-1.756	2.001
15	8.709 4	6.924 4	15.633 8	7.817	2.000	7.820	1.999
16	8.338 1	0.503 0	8.841 1	4.421	2.000	4.476	1.975
17	-1.794 6	-5.947 1	-7.741 7	-3.871	2.000	-3.856	2.008
18	7.873 0	3.442 7	11.315 7	5.658	2.000	5.674	1.994
19	-8.842 2	6.762 4	-2.079 8	-1.040	2.000	-0.758	2.744
20	-2.942 6	-9.607 2	-12.549 8	-6.275	2.000	-6.236	2.012

分别对两种机构的左右履带俯仰角的输入之和与隔爆机箱的俯仰角进行线性回归。图 6(a)是对角线对称布置机构线性回归结果,回归方程 $y = 0.500 0x + 3.2 \times 10^{-5}$,符合线性均化的要求,因此该机构具有线性均化作用。图 6(b)是中心线对称布置机构运动曲线的线性回归结果,回归方程 $y = 0.497 9x + 0.073 9$,不具有线性均化的功能。并且,从表 2 所示的两种机构左右履带俯仰角之和与隔爆机箱俯仰角比值可以看

出,对角线对称布置机构的比值任何时刻都为 2,而中心线对称布置的机构相应比值不确定。

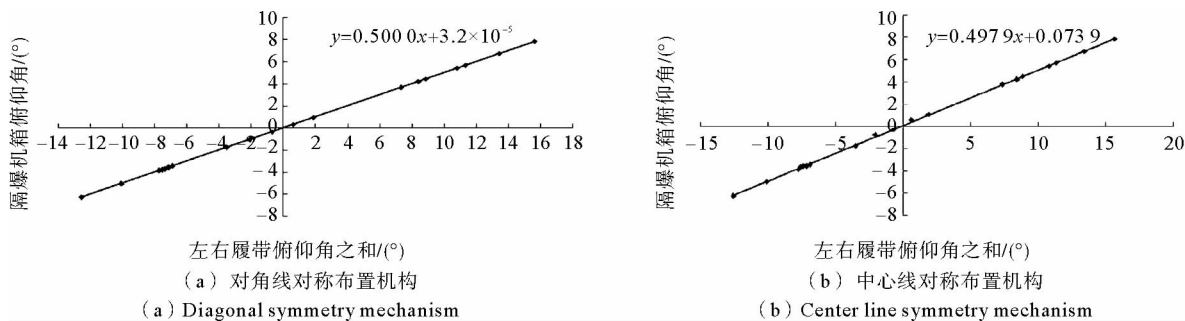


图 6 两种空间连杆机构蒙特卡洛试验线性回归图

Fig. 6 One-dimensional linear regression of two types of robot suspension

4 结束语

将被动适应式空间平衡连杆机构与履带行驶机构相结合,设计了一种新型履带式矿用救援机器人悬架。根据对角线对称布置和中心线对称布置两种空间平衡连杆机构,分别设计了矿用救援机器人悬架。基于笛卡尔坐标建立两种悬架的多刚体模型,两种悬架为 2 自由度机构,均具有差动性能。通过几何方法推导出对角线对称的悬架具有线性均化作用。

为进一步研究两种悬架的性能,在 Recurdyn 多系统仿真环境下建立两种悬架仿真模型,进行运动学仿真,并使用蒙特卡洛方法进行试验,对试验结果进行线性回归分析。结果表明:两种悬架平衡机构均具有差动性能,相比于采用中心对称的空间平衡连杆机构,采用对角线对称的空间平衡连杆机构设计的悬架平衡机构还具有线性均化能力,因此,履带式矿用救援机器人采用对角线对称的空间平衡连杆机构悬架。所设计悬架的零部件布置于隔爆机箱外部,不必考虑悬架与隔爆机箱的密封,简化了结构设计,能够满足矿用救援机器人运动功能的需求。

参考文献:

[1]Murphy R R,Kravitz J,Stover S,et al. Mobile robots in mine rescue and recovery[J]. Robotics & Automation Magazine, 2009,16(2):91-103.

[2]孙鹏,高峰,李雯,等. 深空探测车可变直径车轮牵引通过性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2007,33(12):1404-1407.
Sun Peng,Gao Feng,Li Wen,et al. Analysis of traction traffic ability of diameter-variable wheel for planetary rover[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007,33(12):1404-1407.

[3]李允旺,葛世荣,朱华. 摇杆式移动机器人的齿轮式差动机构研究[J]. 机器人,2009,31(3):235-241.
Li Yunwang,Ge Shirong,Zhu Hua. Gear-type differential mechanisms for rocker-type mobile robots[J]. Robot,2009,31(3): 235-241.

[4]Armour R,Paskins K,Bowyer A,et al. Jumping robots:A biomimetic solution to locomotion across rough terrain[J]. Bioinspiration & Biomimetics,2007,2(3):65-82.

[5]Wettergreen D,Thomas H,Bualat M. Initial results from vision-based control of the Ames Marsokhod rover[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Grenoble, Sep. 7-11,1997:1377-1382.

[6]陶建国,邓宗全,高海波,等. 月球车连杆式差速平衡机构的运动学分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2009,41(9):21-26.
Tao Jianguo,Deng Zongquan,Gao Haibo,et al. Kinematics analysis of differential bar linkage on lunar rover[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2009,41(9):21-26.

[7]魏毅龙,程志红,江海波,等. 移动机器人 6 轮导杆联动式悬架设计及其平稳性分析[J]. 机器人,2013,35(6):665-671.
Wei Yilong,Cheng Zhihong,Jiang Haibo,et al. Design and stability analysis of 6-wheel guide-bar-linkage suspension for mobile robots[J]. Robot,2013,35(6):665-671.