第36卷第6期 河北科技大学学报 Vol. 36, No. 6
2015年12月 Journal of Hebei University of Science and Technology Dec. 2015

文章编号:1008-1542(2015)06-0625-08 doi:10.7535/hbkd.2015yx06012

双臂钻车钻臂与巷道的碰撞检测方法研究

张付祥,史文军

(河北科技大学机械工程学院,河北石家庄 050018)

摘 要:为实现CMJ2-27改进型钻车钻孔的自动化,针对在工作过程中钻臂与巷道之间的碰撞情况,对钻车进行运动学分析,利用D-H参数法导出各坐标系之间的坐标变换矩阵,进而导出各关节和末端的坐标,给出了钻臂与巷道之间碰撞检测的方法,并利用该检测方法对某矿用88孔钻孔方案进行了理论计算和运动仿真试验研究。结果表明,该方法可行,程序简单,执行效率高。

关键词:采矿机械;双臂钻车;运动学分析;巷道;钻臂;碰撞检测

中图分类号:TD421 **文献标志码**:A

Study on the collision detection method between the 2-arm drill rig arms and the roadway

ZHANG Fuxiang, SHI Wenjun

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to achieve the automation drilling of the improved CMJ2-27 drill, kinematic analysis of the drill rig is conducted aiming the collision between the arms and the roadway during the operation process. By suing the Denavit-Hartenberg (D-H) method, the transformation matrix of coordinate system is obtained, then the coordinates of each joint and the ends are derived. The collision detection approach between the arm and the roadway is given. Theoretical calculation and the motion simulation experiment are conducted by using the detection method for a 88-hole drilling program for a mine. The research results show that the method is feasible and has the characteristics of simple procedures and high efficiency.

Keywords: mining machinery; 2-arm drill rig; kinematics analysis; roadway; drill arm; collision detection

目前,随着钻车的市场需求越来越大,各种各样的钻车层出不穷。研究多臂钻车的自动化作业,有效解决存在于钻孔作业过程中的技术问题,是面向中国矿业发展的一个十分紧迫的任务[1]。多臂钻车工作时,由于各钻臂均处在动态的、不确定的非结构性环境中,因此碰撞现象经常发生,所以实现多臂钻车自动作业的前提便是如何判断和避免钻车钻臂的碰撞[2-3]。文献[4]提出一种基于遗传算法的检测障碍物及避障路径规划算法,且通过仿真验证了该算法的有效性与可行性。文献[5]分别对机械臂的安装过程和工作过程的碰撞检测给出了理论分析,并给出了相应的流程图,保证了机械臂的安装和工作的零事故。本文针对石家庄煤矿机械有限责任公司CMJ2-27改进型钻车的结构特点进行运动学分析[6],推导出了各坐标系之间的坐标变换

收稿日期:2015-08-27;修回日期:2015-09-21;责任编辑:冯 民
基金项目:河北省科技攻关计划项目(14211902D);河北省研究生创新资助项目
作者简介:张付祥(1973—),男,河北青县人,副教授,主要从事机电控制与机器人方面的研究。
E-mail:zhangfx@hebust.edu.cn.

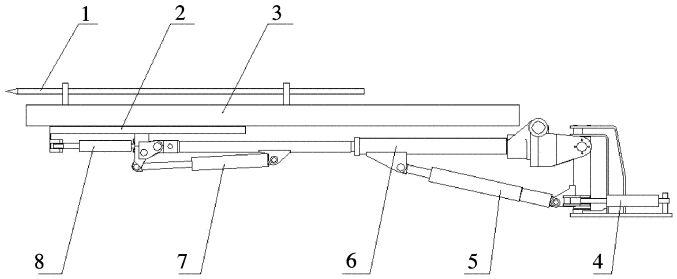
张付祥,史文军.双臂钻车钻臂与巷道的碰撞检测方法研究[J].河北科技大学学报,2015,36(6):625-632.
ZHANG Fuxiang, SHI Wenjun. Study on the collision detection method between the 2-arm drill rig arms and the roadway[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(6): 625-632.

矩阵以及各关节坐标和末端坐标，给出了钻臂与巷道之间的碰撞检测方法。

1 钻臂结构及参数

CMJ2-27改进型钻车钻臂结构简图如图1所示，通过对CMJ2-27改进型钻车结构以及工作特点进行分析可知，钻臂本质上是一种关节式工业机器人，手部位姿为6个自由度[7]，所以应用机器人碰撞干涉检测的方法对钻车钻臂的碰撞干涉检测方法进行研究。

根据钻车钻臂的机械结构建立钻车双臂运动学坐标系和用户坐标系[8]，如图2所示。



1—钻杆；2—滑架；3—推进器；4—大臂摆动油缸；
5—升降油缸；6—钻臂；7—俯仰油缸；8—摆角油缸。

图1 双臂掘进钻车钻臂结构

Fig. 1 Arm structure of the drill rig

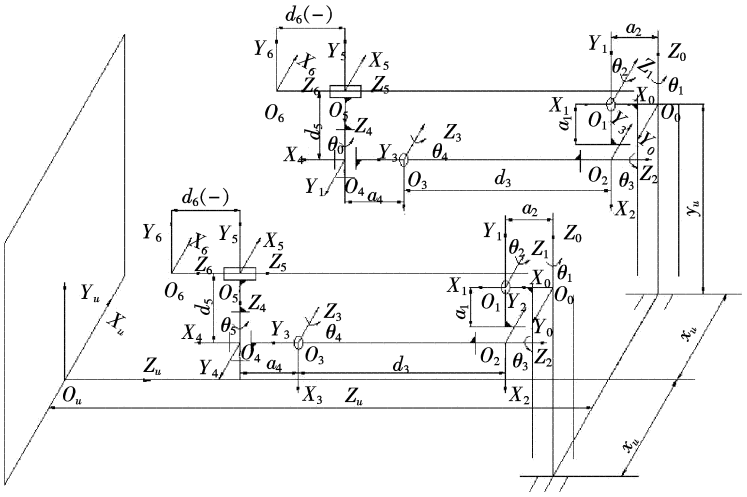


图2 双臂掘进钻车运动学坐标系

Fig. 2 Kinematic coordinates of the drill rig

钻车为双臂操作，且2个机械臂结构基本一致，2个钻臂D-H参数中的常量部分参数完全一致。根据建立的坐标系确定钻车的D-H参数[9]如表1所示。

表1 钻车双臂的D-H参数

Tab. 1 D-H parameters of the arms of the drill rig

连杆	θ_i/(°)	d_i/mm	a_i/mm	α_i/(°)
1	θ_1	0	0	90
2	θ_2	0	0	90
3	θ_3	−3 553	0	−90
4	θ_4	0	130	−90
5	θ_5	479.5	0	90
6	0	−3 060～−1 260	0	0

2 钻臂关节坐标的求取

钻臂与巷道的碰撞，与钻臂各关节坐标有密切关系。利用图2的运动学坐标系以及D-H参数法推导出坐标变换矩阵，进而导出每个连杆两端的关节中心点坐标[10]。

设定用户坐标系原点为(0,0,0)，则基坐标系原点为 $O_0=(x_0,y_0,z_0)=(x_u,y_u,z_u)$。

第1个坐标系原点为

$$O_1=(x_1,y_1,z_1)=(x_u,y_u,z_u)。$$

第2个关节坐标为

$$O_2=(x_2,y_2,z_2)=(x_u,y_u,z_u)。$$

第 3 个关节坐标为

$$O_3=(x_3,y_3,z_3)=\begin{bmatrix}x_u-d_3s_1s_2\\ y_u-c_2d_3\\ z_u-c_1s_2d_3\end{bmatrix}。$$

第 4 个关节坐标为

$$O_4=(x_4,y_4,z_4)=\begin{bmatrix}x_u+a_4c_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)-d_3s_1s_2+a_4s_1s_2s_4\\ y_u-c_2d_3+a_4c_2s_4+a_4c_3c_4s_2\\ z_u-a_4c_4(s_1s_3+c_2c_3c_1)-d_3c_1s_2+a_4c_1s_2s_4\end{bmatrix}。$$

第 5 个关节坐标为

$$O_5=(x_5,y_5,z_5),$$

其中：

$x_5=x_u-d_5(s_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)-c_4s_1s_2)+a_4c_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)-d_3s_1s_2+a_4s_1s_2s_4$，

$y_5=y_u-c_2d_3+d_5(c_2c_4-c_3s_2s_4)+a_4c_2s_4+a_4c_3c_4s_2$，

$z_5=z_u+d_5(s_4(s_1s_3+c_2c_3c_1)+c_4c_1s_2)-a_4c_4(s_1s_3+c_2c_3c_1)-d_3c_1s_2+a_4c_1s_2s_4$。

末端坐标为

$$O_6=(x_6,y_6,z_6),$$

其中：

$x_6=x_u-d_5(s_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)-c_4s_1s_2)+d_6(s_5(c_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)+s_1s_2s_4)+c_5(c_1c_3+c_2s_1s_3))+a_4c_4(c_1s_3-c_2c_3s_1)-d_3s_1s_2+a_4s_1s_2s_4$，

$y_6=y_u-c_2d_3+d_6(s_5(c_4c_3s_2+c_2s_4)-c_5s_2s_3)+d_5(c_2c_4-c_3s_2s_4)+a_4c_2s_4+a_4c_3c_4s_2$，

$z_6=z_u+d_5(s_4(s_1s_3+c_2c_3c_1)+c_4c_1s_2)-d_6(s_5(c_4(s_1s_3-c_2c_3c_1)+c_1s_2s_4)+c_5(s_1c_3-c_2c_1s_3))-a_4c_4(s_1s_3+c_2c_3c_1)-d_3c_1s_2+a_4c_1s_2s_4$。

3　钻臂与巷道的碰撞检测原理

3.1　碰撞检测算法描述

碰撞干涉检测问题是确定不同的物体在空间是否占有相同区域的问题[11-12]。其目的是要求避免物体间的碰撞[13-15]。在钻车实际工作中，钻臂与巷道很有可能发生碰撞干涉，若钻臂与巷道发生碰撞会加快钻臂的磨损，危害很大，所以要尽量避免。

为便于对钻臂与巷道的碰撞检测进行分析，本文将钻臂结构描述进行简化，首先将连杆用两端具有半径为 r（连杆上的点到连杆轴线的最大距离）的半球的圆柱体包络起来[16]。当钻车钻臂在巷道工作时，只有保证圆柱两端球心位置（即连杆关节中心点坐标）不与巷道碰撞，则整个圆柱体便不会与巷道发生碰撞，即钻臂连杆不与之碰撞。因此只要检测关节点坐标是否与巷道发生碰撞即可。

通过分析，关节点坐标是否与巷道发生碰撞的问题可以转化为求关节坐标到巷道的最小距离[17]，只要保证关节坐标到巷道的最小距离大于包络连杆的半球的半径，则钻臂与巷道不发生碰撞，否则碰撞发生。

在钻车实际工作中，还要考虑实时碰撞检测，则需给出一个限制范围 δ，钻臂实际工作时不能运动到 δ。本文所用巷道是煤矿作业时最为常用的拱形巷道（巷道作业面的结构如图 3 所示），钻孔规划碰撞检测 $\delta=0$ 时，实时碰撞检测 $\delta\neq0$。首先建立巷道各面的方程表达式。

观察巷道形状以及其在坐标系的位置可知，顶面是一个准线在 xoy 面上，母线平行于 z 轴的柱面，其曲面方程为 $x^2+(y-b)^2=R^2$。其中：

$b=H-2\delta-(W-2\delta)/2$，$R=(W-2\delta)/2$。

底面是一个平行 xoz 面且过原点的平面，其平面方程

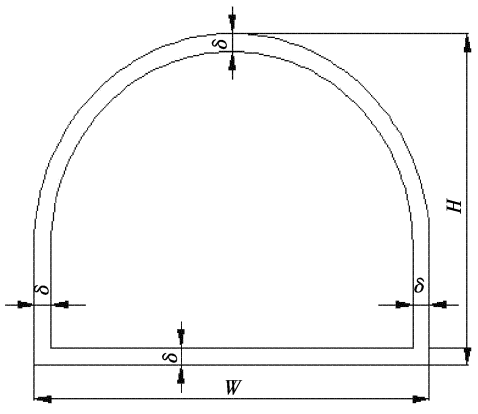


图 3　巷道作业面结构图

Fig. 3　Chart of the roadway work surface

为 $y=0$,平面法向量 $\boldsymbol{n}=(0,1,0)$。

两侧面是平行于 yoz 面的平面,左右两侧面平面方程分别为 $x=a$,$x=-a(a=(W-2\delta)/2)$,平面法向量 $\boldsymbol{n}=(1,0,0)$。

钻车正前面断面所在位置是一个平行于 xoy 面且过原点的平面,其平面方程为 $z=0$,平面法向量 $\boldsymbol{n}=(0,0,1)$。

由此,求解关节坐标到巷道的距离转化为求解点到平面的距离以及点到曲面的距离。

1)点到平面的距离

点到平面的距离公式[18]:空间上任意一点(x_0,y_0,z_0)到一平面的距离为 $d=\dfrac{|Ax_0+By_0+Cz_0+D|}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}$,其中$(A,B,C)$是该平面的法向量 $\boldsymbol{n}$。

利用点到平面的距离公式有:

关节坐标点(x_0,y_0,z_0)到巷道底面之间的距离为 $d_s=|y_0|$。

关节坐标点(x_0,y_0,z_0)到巷道左侧面之间的距离为 $d_l=|x_0+a|=|x_0+(W-2\delta)/2|$。

关节坐标点(x_0,y_0,z_0)到巷道右侧面之间的距离为 $d_r=|x_0-a|=|x_0-(W-2\delta)/2|$。

2)点到曲面的距离

由于巷道曲面是一个准线在 xoy 面上,母线平行于 z 轴的柱面,因此求点到该曲面的距离可以将空间点投影到 xoy 面,进而将点到曲面的距离转化为求点到曲线的距离。

首先推导点到曲线的距离公式,点到曲线的距离为点到曲线上的点的最小距离,假设已知点 $o(x_0,y_0)$ 到曲线 $x^2+(y-b)^2=R^2$ 上点 $p(x_p,y_p)$距离最小,则点 p 所在曲线上的法向量与点 o 和点 p 所在直线的方向向量平行,那么点 o 到曲线的距离问题即转化为求点 p 的问题。

利用点 p 所在曲线上的法向量与点 o 和点 p 所在直线的方向向量平行以及点 p 在曲线上联立方程组有:

$$\begin{cases}\dfrac{2x_p}{x_p-x_o}=\dfrac{2y_p-2b}{y_p-y_o},\\ x_p^2+(y_p-b)^2=R^2。\end{cases}$$

解方程组得:

$$\begin{cases}x_p=\pm\sqrt{\dfrac{R^2}{1+(y_0-b)^2}}=\mathrm{sgn}(x_0)\sqrt{\dfrac{((W-2\delta)/2)^2}{1+(y_0-(H-2\delta-(W-2\delta)/2))^2}},\\ y_p=b+\sqrt{R^2-\dfrac{R^2}{1+(y_0-b)^2}}=H-2\delta-(W-2\delta)/2+\sqrt{((W-2\delta)/2)^2-\dfrac{((W-2\delta)/2)^2}{1+(y_0-(H-2\delta-(W-2\delta)/2))^2}}。\end{cases}$$

求得点 p,则点 o 与点 p 之间的距离为

$$d_t=|op|=\sqrt{(x_p-x_o)^2+(y_p-y_o)^2}。$$

3.2 钻孔规划碰撞以及实时碰撞检测算法

利用上述理论,建立起钻孔规划的坐标点到巷道的约束方程如下:

$$\begin{cases}|y_0|-r>0,\\ \left|x_0+\dfrac{W-2\delta}{2}\right|-r>0,\\ \left|x_0-\dfrac{W-2\delta}{2}\right|-r>0,\\ \sqrt{(x_p-x_o)^2+(y_p-y_o)^2}-r>0。\end{cases}$$

其中:

$$\begin{cases}x_p=\mathrm{sgn}(x_0)\sqrt{\dfrac{((W-2\delta)/2)^2}{1+(y_0-(H-2\delta-(W-2\delta)/2))^2}},\\ y_p=H-2\delta-(W-2\delta)/2+\sqrt{((W-2\delta)/2)^2-\dfrac{((W-2\delta)/2)^2}{1+(y_0-(H-2\delta-(W-2\delta)/2))^2}}。\end{cases}$$

求解出关节坐标(x_0,y_0,z_0),将其代入约束方程,即可判断钻臂与巷道是否发生碰撞,若同时满足约束条件,则钻臂与巷道之间不发生碰撞干涉,若其中有一个条件不满足则巷道与钻臂之间发生碰撞干涉。

4　仿真试验研究

4.1　钻孔规划的碰撞检测

利用 Matlab 工具，通过某矿用 88 孔钻孔方案，对钻车钻臂与巷道之间的碰撞干涉进行检查，验证该算法的可行性。

经多次运动仿真，结果表明钻臂与巷道之间的碰撞干涉最有可能发生在钻杆及推进器部位与巷道之间，即连杆 O_5O_6，因此只要求出点 O_5 和点 O_6 之间的坐标，代入约束方程判断即可。

下面任取其中一孔试验研究，作业面上的目标孔位为(−2 350，100)，巷道的参数为 $W=4\ 700$，$H=3\ 700$，$\delta=0$；钻臂的杆件参数为 $d_3=-3\ 553$，$d_5=479.5$，$r=50$，$a=130$。做钻孔规划时设定末端位姿参数为

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} -0.707\ 1 & -0.706\ 2 & 0.035\ 3 & -2\ 350 \\ 0.707\ 1 & -0.706\ 2 & 0.035\ 3 & 100 \\ 0 & 0.049\ 9 & 0.998\ 8 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

通过运动学反解[19]计算可得各关节坐标为 $\theta_r=(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5,d_6)=(27.899\ 9,-106.099\ 9,132.776\ 8,61.901\ 5,-82.064\ 4,-2\ 386.2)$，通过计算，有 $O_5=(-2\ 265.7,184.2,2\ 383.5)$，$O_6=(-2\ 315.1,135.3,999.2)$。

分别代入约束方程有：

$$\begin{cases} |184.2|-50>0, \\ |-2\ 265.7+2\ 350|-50>0, \\ |-2\ 265.7-2\ 350|-50>0, \\ \sqrt{\left(-\sqrt{\dfrac{2\ 350^2}{1+(1\ 782.9-1\ 350)^2}}+250\right)^2+\left(1\ 350+\sqrt{2\ 350^2-\dfrac{2\ 350^2}{1+(1\ 782.9-1\ 350)^2}}-1\ 782.9\right)^2}-50>0。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} |135.3|-50>0, \\ |-2\ 315.1+2\ 350|-50<0, \\ |-2\ 315.1-2\ 350|-50>0, \\ \sqrt{\left(-\sqrt{\dfrac{2\ 350^2}{1+(1\ 782.9-1\ 350)^2}}+252.2\right)^2+\left(1\ 350+\sqrt{2\ 350^2-\dfrac{2\ 350^2}{1+(1\ 782.9-1\ 350)^2}}-1\ 782.9\right)^2}-50>0。 \end{cases}$$

由计算结果可知，钻臂钻杆及推进器部位到巷道侧面的距离不满足约束条件，因此巷道与钻臂之间会发生碰撞干涉。所以，所给末端姿态参数不合理，需要对其进行调整，调整后末端位姿参数为

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} -0.642\ 8 & -0.764\ 3 & 0.051\ 6 & -2\ 350 \\ 0.766\ 0 & -0.641\ 3 & 0.043\ 3 & 100 \\ 0 & 0.067\ 4 & 0.997\ 7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

采用同样方法计算后的约束方程为

$$\begin{cases} |634.7|-50>0, \\ |-2\ 233.4+2\ 350|-50>0, \\ |-2\ 233.4-2\ 350|-50>0, \\ \sqrt{\left(-\sqrt{\dfrac{2\ 350^2}{1+(634.7-1\ 350)^2}}+2\ 233.4\right)^2+\left(1\ 350+\sqrt{2\ 350^2-\dfrac{2\ 350^2}{1+(634.7-1\ 350)^2}}-2\ 233.4\right)^2}-50>0。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} |580.2|-50>0, \\ |-2\ 298.4+2\ 350|-50>0, \\ |-2\ 298.2-2\ 350|-50>0, \\ \sqrt{\left(-\sqrt{\dfrac{2\ 350^2}{1+(580.2-1\ 350)^2}}+2\ 298.4\right)^2+\left(1\ 350+\sqrt{2\ 350^2-\dfrac{2\ 350^2}{1+(580.2-1\ 350)^2}}-2\ 298.4\right)^2}-50>0。 \end{cases}$$

计算结果满足所有约束方程，因此钻臂与巷道之间不发生干涉。

利用该算法对某矿用 88 孔钻孔方案所有孔的碰撞干涉情况进行检查，进而调整钻车末端姿态参数，并

利用该算法再进行约束判断，保证所有孔均不发生干涉，具体流程如图4所示。

4.2 运动过程中的碰撞检测

利用UG软件进行干涉运动检查对该算法进行仿真研究，将各关节变量输入UG驱动函数，定义巷道为干涉对象1，钻车钻臂为干涉对象2，如若发生干涉则仿真过程高亮显示，干涉信息表显示干涉类型为Hard Interference，若无干涉，则干涉信息表干涉类型为No Interference。

从钻车钻臂的初始位姿（钻车钻臂水平放置，没有任何方向的偏转，各关节坐标为 $\theta_0=(\theta_1,\theta_2,\theta_3,\theta_4,\theta_5,d_6)=(0,-90,0,90,-90,0)$。到给定位置进行运动仿真，解算方案中设定时间为6 s，步数为200步，步进为0.03 s/步。运动仿真时，所有关节同时匀速运动、目标位置同时到达。判断钻臂与巷道是否发生干涉的仿真曲线中设定虚线为零位，实线为巷道与钻车钻臂之间的相对距离。通过观察实线与虚线是否交叉判断有无干涉。若实线与虚线交叉，则表明巷道与钻车钻臂之间发生了碰撞干涉，否则不发生碰撞干涉。

将理论验证中用孔调整前后的末端位姿参数解出的关节变量输入UG驱动函数进行干涉检查。

由图5可知，调整前的仿真过程中从第93步到第124步高亮显示，说明巷道与钻臂推进器及钻杆部位发生了干涉。位姿参数调整后干涉检测运动仿真过程中（图6）未检测到干涉。

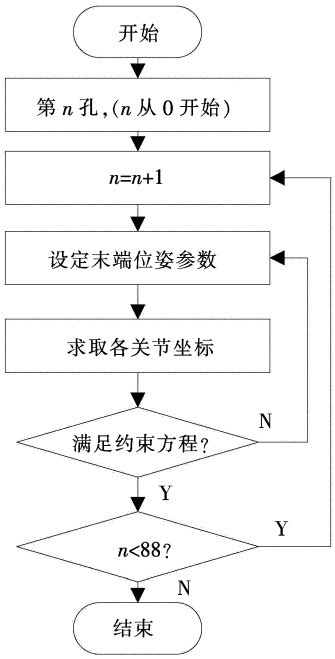
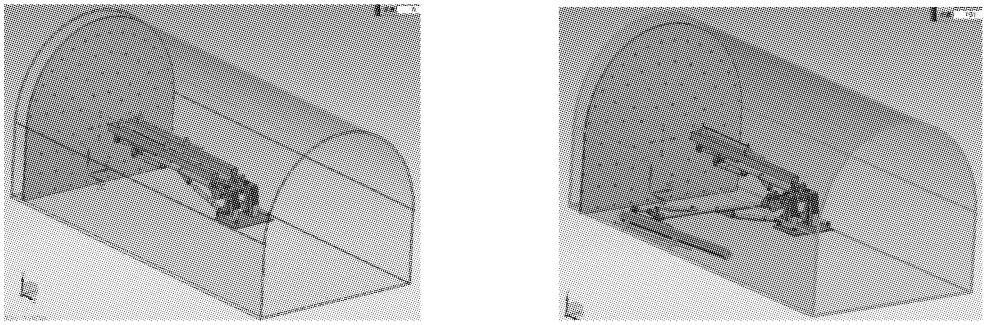


图4 88孔方案碰撞干涉检测程图

Fig. 4 Flowchart of the collision interference detection of the 88-hole drilling program



a) 仿真初始位置　　b) 检测到干涉位置

图5 钻臂与巷道干涉检测运动仿真

Fig. 5 Motion simulation of the interference detection of the drilling arm and the roadway

提取部分干涉信息（图7）显示，调整前从第93步到第124步巷道与钻臂推进器及钻杆部位发生干涉，调整后的干涉信息表显示仿真无干涉。

由钻臂与巷道是否发生干涉的仿真曲线（图8）可知，调整前1.9 s到4.4 s之间虚线与实线交叉，表明钻臂与巷道之间发生了干涉，调整后虚线与实线之间没有交叉，表明未检测到干涉。

干涉检查结果与理论计算结果一致，表明该方法可行。对于实时运动，碰撞干涉检查方法与上述过程一样，本文不再赘述。

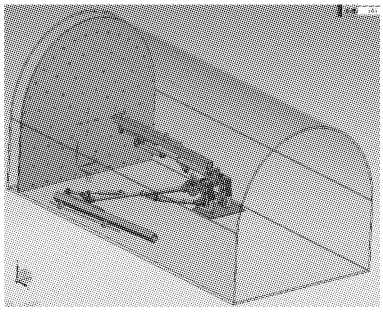
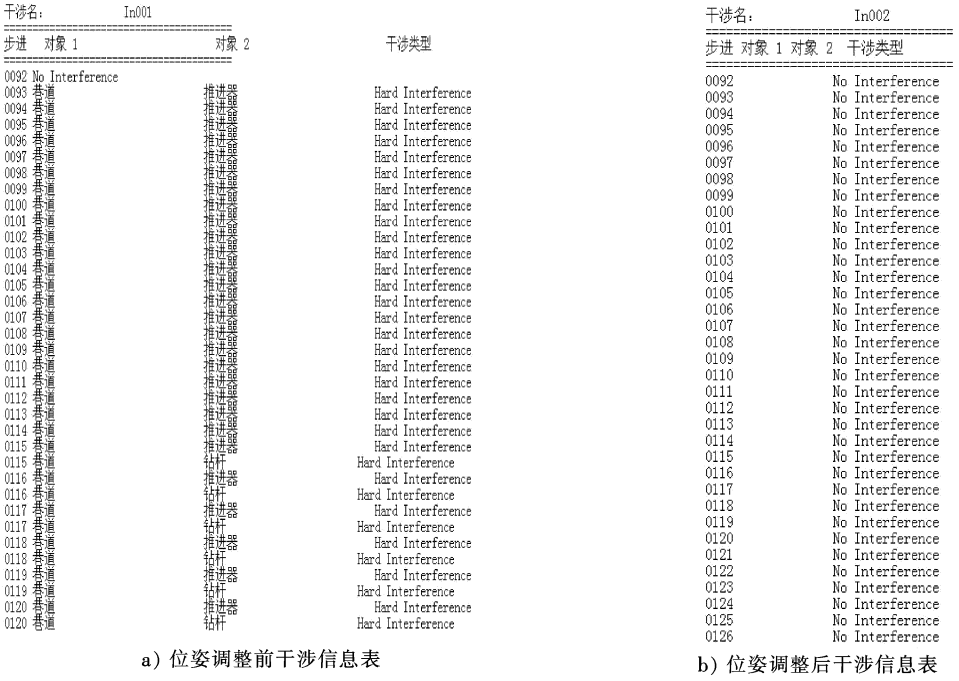


图6 位姿参数调整后干涉检测运动仿真

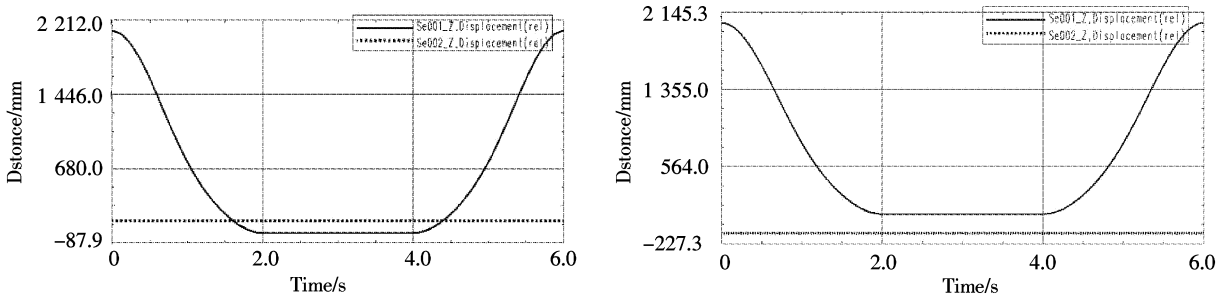
Fig. 6 Motion simulation of the interference detection of the drilling arm after pose adjustment



a) 位姿调整前干涉信息表　　b) 位姿调整后干涉信息表

图 7　钻臂与巷道的干涉检测信息表

Fig. 7　Information table of the interference detection of the drilling arm and the roadway



a) 钻臂与巷道发生干涉的仿真曲线图　　b) 位姿调整后钻臂与巷道无干涉的仿真曲线图

图 8　钻臂与巷道的干涉检测仿真曲线图

Fig. 8　Simulation graph of the interference detection of the drill arm and the roadway

5　结　语

该算法利用钻臂各关节点坐标，通过一些约束条件来判别钻臂与巷道之间的碰撞情况，计算量小，程序简单，便于在矿用钻车 PLC 控制系统实现，能满足一般情况下的实际需要，为后续判断钻孔规划的合理性奠定了理论基础，为实现自动化钻孔奠定了技术基础，为多臂钻车的碰撞检测提供了参考。对该方法进行了理论计算及仿真试验研究，研究结果表明该方法可行。未来还有钻臂的其他碰撞情况需要研究，尤其是钻臂与环境中凹凸物之间的碰撞检测。

参考文献/References：

[1]　蔚艳庆. 电脑凿岩台车快速施工技术研究[D]. 成都：西南交通大学，2007.
WEI Yanqing. Research on the Rapid Construction Techniques of Computer-controlled Drill Jumbo [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[2]　熊永刚，周友行，林峰. 多臂机器人关节间的碰撞检测研究[J]. 机械科技与技术，2004，23(7)：867-869.
XIONG Yonggang, ZHOU Youxing, LIN Feng. An algorithm for collision detection of the joints of a multi-boom robot's [J]. Mechanical Science and Technology, 2004, 23(7): 867-869.

[3]　POLJAC B, NEGGERS B, van den BERG A V. Collision judgment of objects approaching the head [J]. Experimental Brain Research,

2006，171 (1)：35-46.

[4] 韩涛，吴怀宇，杜钊君，等. 基于遗传算法的机械臂实时避障路径规划研究[J]. 计算机应用研究，2013，30(5)：1373-1376.
HAN Tao，WU Huaiyu，DU Zhaojun，et al. Research on path planning for manipulator to avoid real-time obstacle based on genetic algorithms[J]. Application Research of Computers，2013，30(5)：1373-1376.

[5] 曾鹏. 六轴机械臂避碰运动学算法研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2007.
ZENG Peng. Research on Collision-avoidance and Kinematic of Six-DOF Manipulator [D]. Harbin：Harbin Engineering University，2007.

[6] 张付祥，孙书鹏. 双臂液压钻车的运动学分析及优化[J]. 机床与液压，2014，42(9)：101-104.
ZHANG Fuxiang，SUN Shupeng. Kinematics analysis and optimization of a two-arm hydraulic drill manipulator[J]. Machine Tool & Hydraulics，2014，42(9)：101-104.

[7] 蔡自兴. 机器人学基础[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
CAI Zixing. Robotics Basic [M]. Beijing：Mechanical Industry Publisher，2009.

[8] 李团结. 机器人技术[M]. 北京：电子工业出版社，2009.
LI Tuanjie. Robotics Technology[M]. Beijing：Electronics Industry Publisher，2009.

[9] 吴振彪，王正家. 工业机器人[M]. 北京：机械工业出版社，2005.
WU Zhenbiao，WANG Zhengjia. Industrial Robot [M]. Beijing：Mechanical Industry Publisher，2005.

[10] 安凯. 空间机械臂运动过程中的碰撞检测方法[J]. 计算机测量与控制，2014，22(11)：3528-3531.
AN Kai. Collision detection methods of a space manipulator in motion [J]. Computer Measurement & Control，2014，22(11)：3528-3531.

[11] 莫蓉，何卫平，杨彭基. 碰撞检测与干涉检测方法研究[J]. 西北工业大学学报，1997,15(3)：45-51.
MO Rong，HE Weiping，YANG Pengji. A survey of collision and interference detection methods [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University，1997，15(3)：45-51.

[12] MAHMOODI M，MASIH K M，MANESH E，et al. Adaptive passivity-based control of a flexible-joint robot manipulator subject to collision[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers，2015，229 (5)：1-11.

[13] 朱齐丹，仲训昱，张智. 基于速度变化空间的移动机器人动态避碰规划[J]. 机器人，2009，31(6)：539-547.
ZHU Qidan，ZHONG Xunyu，ZHANG Zhi. Dynamic collision-avoidance planning of mobile robot based on velocity change space[J]. Robots，2009，31(6)：539-547.

[14] SCHMIDT B，WANG Lihui. Depth camera based collision avoidance via active robot control [J]. Journal of Manufacturing Systems，2014，33(4)：711-718.

[15] WU C J. On the representation and collision detection of robots [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems，1996，16 (2)：151-168.

[16] 陈靖波，赵猛，张珩. 空间机械臂在线实时避障路径规划研究[J]. 控制工程，2007，14(4)：445-447.
CHEN Jingbo，ZHAO Meng，ZHANG Heng. On-line real-time obstacle avoidance path planning of space manipulator [J]. Control Engineering of China，2007，14(4)：445-447.

[17] 熊勇刚，陈科良，周友行，等. 机器人关节间的碰撞检测[J]. 包装工程，2004，25(3)：171-173.
XIONG Yonggang，CHEN Keliang，ZHOU Youxing，et al. Study on collision detection of multi-boom Robot′s joints[J]. Packaging Engineering，2004，25(3)：171-173.

[18] 付小娟. 空间点到平面距离公式的证明探究[J]. 数理化学习，2014(3)：4.
FU Xiaojuan. Proof point to plane distance formula space exploration [J]. Science Learning，2014(3)：4.

[19] 张付祥，史文军. 双臂液压钻车的逆运动学求解[J]. 机械设计与制造，2015(8)：147-149.
ZHANG Fuxiang，SHI Wenjun. Inverse kinematics solver of a 2-arm hydraulic drill carriage [J]. Machinery Design & Manufacture，2015(8)：147-149.