

机器人步行腿机构的动力分析

李栋成 杨昂岳

(精密机械与仪器系)

摘要 本文根据力的叠加原理,采用拆杆拆副法,对一平面闭式多杆步行腿机构进行了较为全面的动力分析,得出一个运动循环内原动曲柄的输入力矩及各运动副处的约束反力线图,为该机构的驱动、控制及进一步的改型设计提供了必不可少的计算依据。线图分析表明:该机构节省能量,力学性能较好,有良好的应用前景。

关键词 机器人,机构,动力分析,步行腿,闭式多杆机构,动态静力分析

分类号 TH112,TP24

机器人可望用于战场环境,实现一定的战术目的和意图。文献[1]介绍了一种可用作机器人步行腿的平面闭式多杆机构,它由两套八杆机构组成,其中原动曲柄的相位相差 180° ,用同一台电机驱动,如图1所示。文献[2]对该机构进行了运动仿真,得出了机构本体的绝对运动轨迹。本文旨在文献[1][2]的基础上,对该机构作一次较为全面的动力分析,期为今后的控制、驱动及进一步的改型设计提供必要的计算依据。

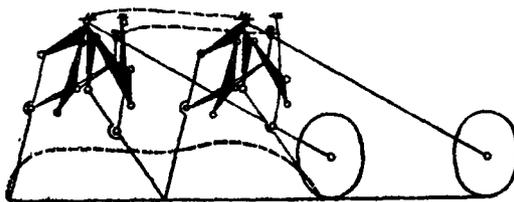


图 1

1 机构的静定性及惯性参数的确定

如图1所示,步行腿机构的前部是两个对称的八杆机构,后部是两个用以保持平衡的轮子,机构总的活动构件数 $N=15$,运动副数 $P_1=20$ 。由文献[2]可知,两条腿没有同时着地的时间段,因此机构与地面的接触点数为3。由于每个运动副及接触点处都有两个未知的约束反力,且原动曲柄的输入力矩未知,因此机构全部待求的未知数 $C=2 \times (20 + 3) + 1 = 47$ 。而在15个活动构件中,除机架能提供5个平衡方程外,其余每个构件只能提供3个平衡方程,因此机构所有独立的平衡方程数 $F=3 \times 14 + 5 = 47$, $F=C$,因而满足静定条件。

需要指出的是:考虑到地面足够粗糙,可以假定轮子与地面的摩擦为纯滚动摩擦。这样还可以得到一独立的平衡方程——虚功方程。48个方程求解47个未知数,它们彼此

国家自然科学基金资助项目

1989年12月22日收稿

必须相容，这样其中一个就可以用来检验前面的计算结果是否正确。

为了进行机构的动态静力分析，首先必须确定各构件的惯性力及惯性力矩。文献[2]采用拆杆拆副法作了相对于机架的速度、加速度分析，要确定绝对（相对于地面）速度、加速度，还必须进行机架的牵连运动分析。这样问题比较复杂。既然文献[2]已经给出了机构的绝对运动轨迹，因此我们就可以采用差分法直接求出各构件在任一时刻的绝对速度和加速度来，进而也就确定了机构各构件的惯性力及惯性力矩。图2a, b分别为机架及杆2（腿）质心的速度、加速度线图。

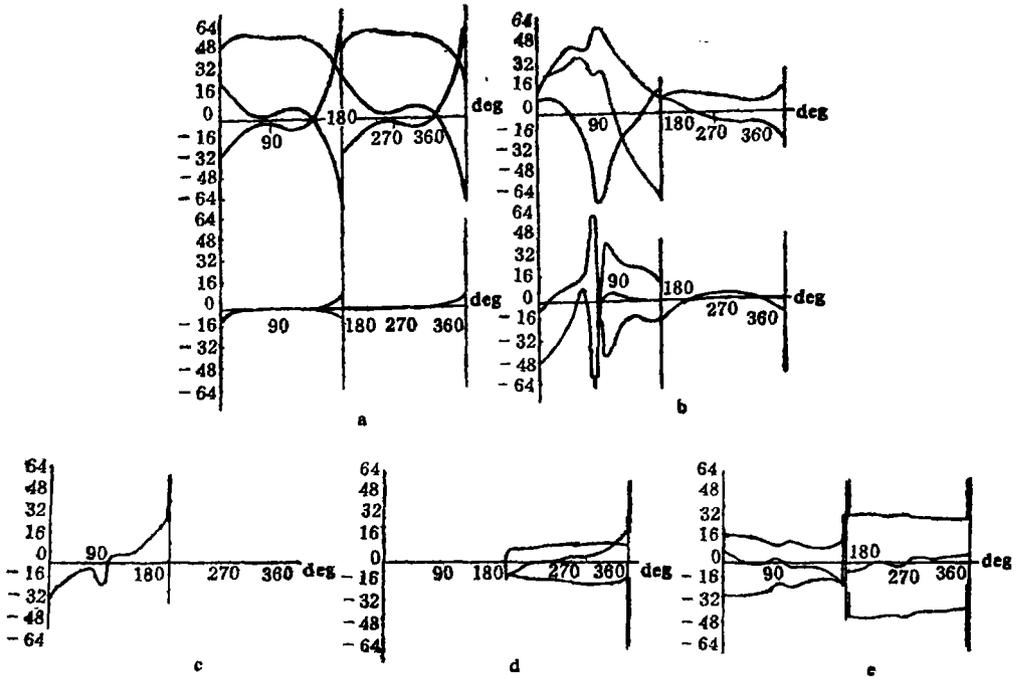


图 2

2 机构的动态静力分析

由文献[2]可知，该机构为一准Ⅱ级机构，不能直接分离出静定的Ⅱ级杆组。故本文通过拆杆拆副、采用分步法来进行分析。

如图3，假想将D处的回转副拆除，原步行腿机构就变成三个Ⅱ级杆组和一个原动曲柄。这三个Ⅱ级杆组分别是：3-6(F-N-M)，4-5(B-E-G)，1-2(A-C-K)。注意K实际上是杆2（腿）与地面的接触点，由于其受力与运动副类似，故可

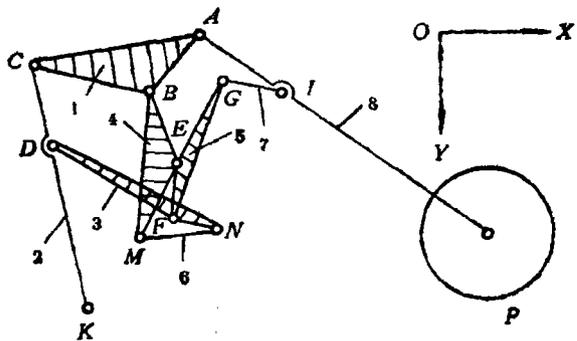


图 3

广义地认作一外接运动副。

在被拆运动副 D 处, 存在有未知的约束反力 R_{4x} 、 R_{4y} 。根据力的叠加原理, 其它运动副处的约束反力应为 R_{4x} 、 R_{4y} 的线性函数, 即

$$\begin{cases} R_{ix} = A_{ix} \times R_{4x} + B_{ix} \times R_{4y} + C_{ix} \\ R_{iy} = A_{iy} \times R_{4x} + B_{iy} \times R_{4y} + C_{iy} \end{cases} \quad (1)$$

其中: A_{ix} 、 A_{iy} 系指由单位 R_{4x} ($R_{4x}=1$) 作用, 在第 i 个运动副处产生的 X 、 Y 方向的约束反力; B_{ix} 、 B_{iy} 系指由单位 R_{4y} ($R_{4y}=1$) 作用, 在第 i 个运动副处产生的 X 、 Y 方向的约束反力; C_{ix} 、 C_{iy} 系指当 $R_{4x}=R_{4y}=0$ 时, 其它外力 (包括惯性力、惯性力矩, 下同) 作用, 在第 i 个运动副处产生的 X 、 Y 方向的约束反力。

- I: 令 $R_{4x}=1$, $R_{4y}=0$, 所有构件的外力置零。对 I 级组 3-6, 求出三个运动副 F 、 M 、 N 处的约束反力 A_{6x} , A_{6y} , A_{9x} , A_{9y} , A_{9x} , A_{9y} 。对 II 级组 4-5, 只在 F 、 M 处作用有约束反力 A_{6x} , A_{6y} , A_{8x} , A_{8y} , 求出三个运动副 B 、 E 、 G 处的约束反力 A_{2x} , A_{2y} , A_{5x} , A_{5y} , A_{7x} , A_{7y} 。对 III 级组 1-2, 只在 B 、 D 处作用有约束反力 A_{2x} , A_{2y} , $R_{4x}=1$, $R_{4y}=0$ 。求出三个运动副 A 、 C 、 K 处的约束反力 A_{1x} , A_{1y} , A_{3x} , A_{3y} , A_{11x} , A_{11y} 。
- II: 令 $R_{4x}=0$, $R_{4y}=1$, 所有构件的外力置零。对 I 级组 3-6, 求出三个运动副 F 、 M 、 N 处的约束反力 B_{6x} , B_{6y} , B_{8x} , B_{8y} , B_{9x} , B_{9y} 。对 II 级组 4-5, 只在 F 、 M 处作用有约束反力 B_{6x} , B_{6y} , B_{8x} , B_{8y} , 求出三个运动副 B 、 E 、 G 处的约束反力 B_{2x} , B_{2y} , B_{5x} , B_{5y} , B_{7x} , B_{7y} 。对 III 级组 1-2, 只在 B 、 D 处作用有约束反力 B_{2x} , B_{2y} , $R_{4x}=0$, $R_{4y}=1$, 求出三个运动副 A 、 C 、 K 处的约束反力 B_{1x} , B_{1y} , B_{3x} , B_{3y} , B_{11x} , B_{11y} 。
- III: 令 $R_{4x}=0$, $R_{4y}=0$, 所有构件的外力作用。对 I 级组 3-6, 求出三个运动副 F 、 M 、 N 处的约束反力 C_{6x} , C_{6y} , C_{8x} , C_{8y} , C_{9x} , C_{9y} 。对 II 级组 4-5, 在 F 、 M 处还作用有约束反力 C_{6x} , C_{6y} , C_{8x} , C_{8y} , 求出三个运动副 B 、 E 、 G 处的约束反力 C_{2x} , C_{2y} , C_{5x} , C_{5y} , C_{7x} , C_{7y} 。对 III 级组 1-2, 在 B 、 D 处还作用有约束反力 C_{2x} , C_{2y} , $R_{4x}=0$, $R_{4y}=0$, 求出三个运动副 A 、 C 、 K 处的约束反力 C_{1x} , C_{1y} , C_{3x} , C_{3y} , C_{11x} , C_{11y} 。

对悬空腿, 注意到 K 点的约束反力 $R'_{11x}=0$, $R'_{11y}=0$, 代入式(1), 有

$$\begin{cases} A'_{11x} \times R'_{4x} + B'_{11x} \times R'_{4y} + C'_{11x} = 0 \\ A'_{11y} \times R'_{4x} + B'_{11y} \times R'_{4y} + C'_{11y} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

由此即可求得悬空腿被拆副 D 处的约束反力 R'_{4x} 、 R'_{4y} 。再将 R'_{4x} 、 R'_{4y} 代入(1)式, 便可得悬空腿各运动副的约束反力; 然后由曲柄的平衡条件, 可得 R'_{10x} 、 R'_{10y} 、 M' (M' 为作用于悬空腿部分曲柄的输入力矩)。

假定轮子与地面的摩擦为纯滚动摩擦, 由虚功原理可直接求出电动机作用于曲柄的总输入力矩 M , 则作用于着地腿部分曲柄的输入力矩 $M'' = M - M'$, 对运动副 I 取矩, 可得一关于 R''_{4x} 、 R''_{4y} 的线性方程; 再将着地腿部分机构对轮子与地面的接触点 P 取矩, 又可得一关于 R''_{4x} 、 R''_{4y} 的线性方程。联立上述二方程, 可求得着地腿被拆副 D 处的约束反力 R''_{4x} 、 R''_{4y} ; 同理, 代入(1)式, 可得着地腿部分机构各运动副处的约束反力。

至此, 只剩下轮子与地面接触点处的四个约束反力未知。忽略轮子的质量, 可将轮

子和机架作为一个整体来考虑。前已述及，机架可提供五个平衡方程（机构在垂直于运动平面的方向上不受力），因此，可用一平衡方程来检验前面的计算结果是否正确，其余则用来求轮子与地面接触点处的四个约束反力。

图 2c, d, e 分别为一个运动循环内原动曲柄的输入力矩及 K, P 点的约束反力线图。

3 结论

(1) 从线图 2c 可知，为保证机体匀速运动（前进），电机在一段时间内（约半个循环）需作负功。这说明在这段时间内，机构可以由其自身的重力驱动，从而节省能量。这一现象同模型机构的实际表现一致。

(2) 由速度、加速度线图可知，机构在换腿的瞬间，速度、加速度均有突变。这从机构的绝对运动轨迹线图上也可见出。因此，在这一瞬间，机构存在着柔性冲击。这在某些场合也许有用。但如果地面较硬或机构负载较重，则冲击对机构强度的影响不可忽视，必须对机构进行修改，使之在换腿的瞬间，速度、加速度都尽量平稳。

致 谢

本文的研究，得到了张绪强、曾砥平等同志的帮助，在此表示感谢！

参 考 文 献

- [1] 王瀚. 步行腿机构简介. 自然杂志, 1982, 5(2)
- [2] 曾砥平等. 战地机器人步行腿机构研究. 全国第七届机构学年会, 1990
- [3] 天津大学等六院校合编. 机械原理. 北京: 高等教育出版社, 1986

Dynamic Analysis of Field Robot's Step-legs

Li Dongcheng Yang Angyue

(Department of Precision Machinery and Instrumentation)

Abstract

By dividing some kinematic pair from links, this paper has made a comprehensive dynamic analysis of a planar closed multiple mechanism, which may be used as a field robot's step-leg mechanism, and we have obtained all the input moment of the master crank and the constrained force in every kinematic pair in a period. All of these make it possible to control, drive and modify the robot's step-leg mechanism in future.

Key words robot, mechanism, dynamic analysis, step-leg, closed multiple mechanism, dynamic static analysis