

基础研究

基于计算运动学的掩护式液压支架运动特性研究

许永祥^{1,2,3}, 张金虎^{1,2,3}, 佟 友^{1,2}, 张德生^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 2. 天地科技股份有限公司 开设计事业部, 北京 100013;
3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室(煤炭科学研究总院), 北京 100013)

[摘 要] 液压支架是煤矿长壁综采工作面的关键装备, 其结构设计的合理性直接影响着自身的可靠性及对围岩的适应能力, 是实现支架-围岩理想耦合状态的关键。传统的液压支架结构设计主要采用解析法和图解法, 利用结构的几何拓扑关系进行求解, 对于复杂结构求解难度大。采用计算运动学的方法, 利用结构间的约束关系, 通过局部坐标向全局坐标转换建立掩护式液压支架的运动学方程, 调用 Matlab 软件已有的库函数进行非线性方程组的求解, 建模速度快、求解效率高, 该方法可方便地用于支架的支护质量监测、智能控制系统等方面。

[关键词] 液压支架; 计算运动学; 设计; 控制; 监测

[中图分类号] TD355.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2018) 04-0004-04

Study of Shield Hydraulic Support Motion Characteristics Based on Calculation Kinematics

XU Yong-xiang^{1,2,3}, ZHANG Jin-hu^{1,2,3}, TONG You^{1,2}, ZHANG De-sheng^{1,2}

(1. Mining Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Coal Mining & Designing Department, Tiandi Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China;

3. State Key Laboratory of Coal Resource High Effective Mining & Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: Hydraulic support is key equipment for long wall fully mechanized coal mining working face, its reliability and adaptation for surrounding rock were directly influenced by structure design, and is key point for ideal coupling state between support and surrounding rock. Analytical method and graphical method were the main method for traditional hydraulic support design, and solved by geometry topological relation of structure, and it was difficulty for complex structure. And then calculation kinematics was applied, constrained relationship of different structure was also used, and motion formula of shield hydraulic support was built by local coordinate transformation to world coordinate, nonlinear formula groups was solved by invoked library function of software Matlab, built model speed was high and effectively, and the method could be used for support quality monitoring, intelligent control system and so on.

Key words: hydraulic support; calculation kinematics; design; control; monitoring

液压支架是煤矿长壁综采工作面的“钢铁长城”, 是长壁机械化采煤的关键装备, 为采煤工作面各个工序安全高效运行提供作业空间和坚实的安全保障。合理的液压支架设计能使支架与围岩实现理想的耦合关系, 增强支架对围岩的适应性。传统的液压支架结构设计通常采用传统的运动学方法^[1-10], 即解析法和图解法。但其主要依赖于系统的几何拓扑关系, 因而仅适用于含刚体和关节数目较少的系统的研究, 对于复杂系统其所建立的方程较为复杂, 求解不方便。且通常只求解出支架结构间的位置关系, 而未对支架结构运动中的速度和加速度进行求解。本文基于计算运动学, 通过约束方程建立液压支架结构件间的运动学方程, 求解液压

支架在不同工作状态的姿态、位置、速度和加速度关系, 有利于液压支架的结构设计、分析优化、质量监测、智能控制以及与采场围岩的耦合状态等^[11-15]。

1 计算运动学简介

运动学分析的目的在于根据已知的输入运动, 来确定目标的位置、速度和加速度, 求解系统运动关系可以确定系统的状态。完整的机械系统运动学分析包含 3 个阶段: 位置分析, 速度分析和加速度分析。通常来说, 系统坐标的运动学关系是非线性的, 因而求解过程需要使用迭代数值程序(如牛顿-拉普森法)。位移方程的一次、二次微分可得

[收稿日期] 2018-04-23

[DOI] 10.13532/j.cnki.cn11-3677/td.2018.04.002

[基金项目] 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804305); 国家自然科学基金资助项目(51704157); 中国煤炭科工集团科技创新创业资金专项青年项目(2018QN018)

[作者简介] 许永祥(1987-), 男, 河南许昌人, 煤炭科学研究总院在读博士生, 主要从事采矿理论与技术、矿山压力与围岩控制研究。

[引用格式] 许永祥, 张金虎, 佟 友, 等. 基于计算运动学的掩护式液压支架运动特性研究[J]. 煤矿开采, 2018, 23(4): 4-7.

相应的速度运动方程和加速度运动方程, 由此可得出一系列的以速度和加速度表示的线性代数方程。

计算运动学基于刚体结构假设, 即: 假设多结构系统由刚体组成, 结构自身变形可以忽略。刚体分析中, 结构中任意两点间的距离保持不变。如果结构仅仅发生小变形且小变形在整体运动过程中可以忽略, 则该结构可以认为是刚体结构。如果研究的内容在于应力或者结构发生大变形且大变形的影响不可忽略, 则刚体假设不再适用, 需采用变形体模型来处理。

计算运动学方法可以用于求解包含刚体和关节数多的系统。该方法建立了坐标间代数运动约束关系方程, 这些约束方程通常为坐标的非线性函数, 可以采用迭代数值计算方法来确定系统中刚体的位置。通过约束方程关于时间的一次和两次微分可以分别获得以速度和加速度表示的线性系统方程。这些线性方程可以直接求解得到坐标的一次和二次时间导数。

2 液压支架运动学方程的建立

计算运动学中, 刚体位移可以通过一个参考点的平移和通过该参考点的旋转组成。可以使用非线性三角函数来确定机构中所有刚体的位置和方向。计算运动学方程由结构间的约束方程组成, 约束方程通常包含: 固定约束、转动关节约束、平动关节约束和驱动约束方程。计算运动学使用局部坐标向全局坐标转换的方法, 摆脱对结构几何拓扑关系的依赖, 将复杂的问题简单化, 便于建立复杂结构关系的数学模型。

无约束刚体的平面运动可以用 3 个独立坐标表示, 2 个坐标定义刚体的平移, 1 个坐标定义刚体的方向。刚体 i 的平动可以用矢量 R^i 来定义, R^i 用来描述刚体上原点相对于全局坐标的位置, 刚体的方向可以用角 θ^i 表示。采用 3 个坐标 $R^i = [R_x^i R_y^i]$ 和 θ^i 可以确定刚体上任一点的位置矢量, 可用式 (1) 表示

$$r_p^i = R^i + A^i \bar{u}_p^i \quad (1)$$

式中, $\bar{u}_p^i$ 为局部坐标系内任意一点的位置矢量, A^i 为以旋转角 θ^i 表示的局部坐标系统向全局坐标系统的变换矩阵, 即

$$A^i = \begin{bmatrix} \cos \theta^i & -\sin \theta^i \\ \sin \theta^i & \cos \theta^i \end{bmatrix} \quad (2)$$

一个包含 n_b 个刚体的多体系统具有 $3 \times n_b$ 个独立广义坐标, 用矢量 q 表示为

$$q = [R_x^1 R_y^1 \theta^1 \cdots R_x^{n_b} R_y^{n_b} \theta^{n_b}]^T, i = 1, 2, \cdots, n_b \quad (3)$$

以掩护式液压支架为例, 底座的坐标可以用 $[R_x^1 R_y^1 \theta^1]$ 来表示, 右上标代表刚体的编号, 这样依次表示出液压支架的结构件, 如图 1 所示。通过结构件的连接关系, 建立约束方程组, 以矩阵的方式表示液压支架计算运动学方程, 见式 (4)。

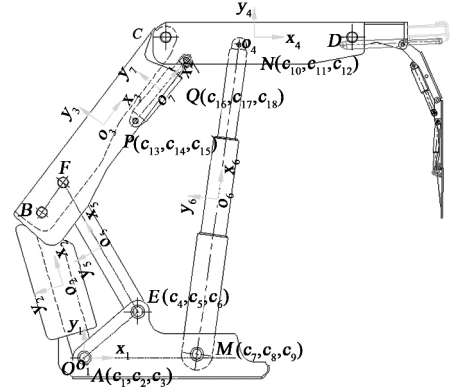


图 1 液压支架模型

$$C(q, t) = \begin{bmatrix} C_1(q, t) \\ \vdots \\ C_i(q, t) \end{bmatrix} = 0, i = 1, 2, \cdots, 23 \quad (4)$$

$$C_1(q, t) = R_x^1 - c_1 \quad (5)$$

$$C_2(q, t) = R_y^1 - c_2 \quad (6)$$

$$C_3(q, t) = \theta^1 - c_3 \quad (7)$$

$$C_4(q, t) = R_x^1 - R_x^2 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta^2 \quad (8)$$

$$C_5(q, t) = R_y^1 - R_y^2 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta^2 \quad (9)$$

$$C_6(q, t) = R_x^2 + \frac{1}{2} l_2 \cos \theta^2 - R_x^3 + \frac{1}{2} l_3 \cos \theta^3 \quad (10)$$

$$C_7(q, t) = R_y^2 + \frac{1}{2} l_2 \sin \theta^2 - R_y^3 + \frac{1}{2} l_3 \sin \theta^3 \quad (11)$$

$$C_8(q, t) = R_x^3 + \frac{1}{2} l_3 \cos \theta^3 - R_x^4 + \frac{1}{2} l_4 \cos \theta^4 \quad (12)$$

$$C_9(q, t) = R_y^3 + \frac{1}{2} l_3 \sin \theta^3 - R_y^4 + \frac{1}{2} l_4 \sin \theta^4 \quad (13)$$

$$C_{10}(q, t) = R_x^4 - \frac{1}{2} l_5 \cos \theta^5 - c_4 \quad (14)$$

$$C_{11}(q, t) = R_y^4 - \frac{1}{2} l_5 \sin \theta^5 - c_5 \quad (15)$$

$$C_{12}(q, t) = R_x^3 + (l_9 - \frac{1}{2} l_3) \cos \theta^3 - R_x^5 - \frac{1}{2} l_5 \cos \theta^5 \quad (16)$$

$$C_{13}(q, t) = R_y^3 + (l_9 - \frac{1}{2} l_3) \sin \theta^3 - R_y^5 - \frac{1}{2} l_5 \sin \theta^5 \quad (17)$$

$$C_{14}(q, t) = R_x^6 - \frac{1}{2} l_6 \cos \theta^6 - c_7 \quad (18)$$

$$C_{15}(q, t) = R_y^6 - \frac{1}{2} l_6 \sin \theta^6 - c_8 \quad (19)$$

$$C_{16}(q, t) = R_x^4 + c_{10} \cos \theta^4 - c_{11} \sin \theta^4 - R_x^6 - \frac{1}{2} l_6 \cos \theta^6 \quad (20)$$

$$C_{17}(q, t) = R_y^4 + c_{10} \sin \theta^4 + c_{11} \cos \theta^4 - R_y^6 - \frac{1}{2} l_6 \sin \theta^6 \quad (21)$$

$$C_{18}(q, t) = R_x^3 + c_{13}\cos\theta^3 - c_{14}\sin\theta^3 - R_x^7 + \frac{1}{2}l_7\cos\theta^7 \quad (22)$$

$$C_{19}(q, t) = R_y^3 + c_{13}\sin\theta^3 + c_{14}\cos\theta^3 - R_y^7 + \frac{1}{2}l_7\sin\theta^7 \quad (23)$$

$$C_{20}(q, t) = R_x^4 + c_{16}\cos\theta^4 - c_{17}\sin\theta^4 - R_x^7 - \frac{1}{2}l_7\cos\theta^7 \quad (24)$$

$$C_{21}(q, t) = R_y^4 + c_{16}\sin\theta^4 + c_{17}\cos\theta^4 - R_y^7 - \frac{1}{2}l_7\sin\theta^7 \quad (25)$$

$$C_{22}(q, t) = f(t) \quad (26)$$

$$C_{23}(q, t) = g(t) \quad (27)$$

式中, $\mathbf{R}^i = [R_x^i R_y^i]$ 和 θ^i 为图 1 所示第 i 个刚体结构件上原点相对于全局坐标的位置和方向; c_1, c_2, c_3 为底座上 A 点相对于底座局部坐标 $o_1 - x_1, y_1$ 的坐标值; c_4, c_5, c_6 为底座上 E 点相对于底座局部坐标 $o_1 - x_1, y_1$ 的坐标值; c_7, c_8, c_9 为底座上 M 点相对于底座局部坐标 $o_1 - x_1, y_1$ 的坐标值; c_{10}, c_{11}, c_{12} 为顶梁上 N 点相对于顶梁局部坐标 $o_4 - x_4, y_4$ 的坐标值; c_{13}, c_{14}, c_{15} 为掩护梁上 P 点相对于掩护梁局部坐标 $o_3 - x_3, y_3$ 的坐标值; c_{16}, c_{17}, c_{18} 为顶梁上 Q 点相对于顶梁局部坐标 $o_4 - x_4, y_4$ 的坐标值; l_1 为底座 A 点到 M 点的距离; l_2 为后连杆 A 点到 B 点的距离; l_3 为掩护梁 B 点到 C 点的距离; l_4 为顶梁 C 点到 D 点的距离; l_5 为前连杆 E 点到 F 点的距离; l_6 为立柱 M 点到 N 点的距离; l_7 为平衡千斤顶 P 点到 Q 点的距离; $f(t)$ 为立柱长度函数; $g(t)$ 为平衡千斤顶长度函数。

3 液压支架约束矩阵求解

系统坐标的运动学约束方程关系是非线性的, 因而需要使用迭代数值法求解 (如牛顿-拉普森法)。Matlab 软件在非线性矩阵方程组求解方面有着成熟的求解程序, 可直接调用已有库函数进行求解, 十分方便。通过调节支架立柱和平衡千斤顶的长度, 可以显示出支架不同的工作姿态。图 2 (a) 为支架顶梁“抬头”、“低头”姿态, 图 2 (b) 为顶梁保持水平状态不同支护高度时支架的工作姿态。

3.1 顶梁前端运动轨迹、支架立柱和平衡千斤顶的伸缩量的关系

液压支架顶梁前端的运动轨迹是液压支架设计时需要考虑的重点, 对于液压支架自身和工作面顶板与煤壁的稳定性都有影响。由于四连杆机构的约束, 支架顶梁保持水平状态下, 支架顶梁前端的运动轨迹为 S 型双纽线 (图 3), 合理的四连杆参数可使顶梁在液压支架工作高度段 (4000 ~ 5500 mm) 内顶梁摆动较小, 且在液压支架降架过程中

顶梁向煤壁侧运动, 使得液压支架在顶板来压时保持自身稳定, 同时施加给顶板和煤壁以指向煤壁的水平作用力, 可防止工作面顶板端面冒顶和煤壁片帮, 提高液压支架抗水平载荷能力^[19-10]。

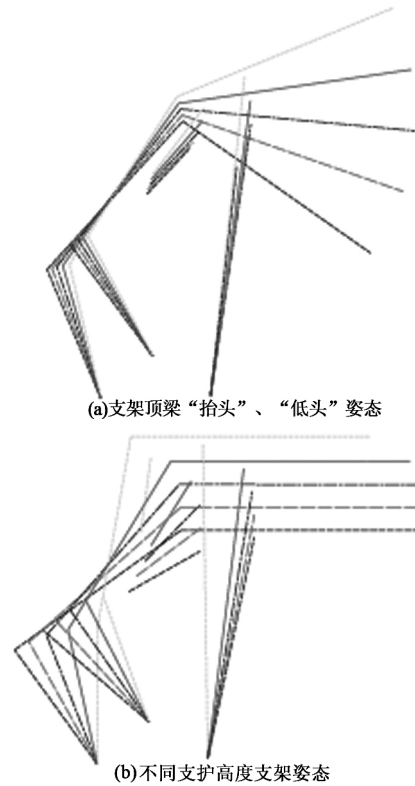


图 2 支架姿态求解简图

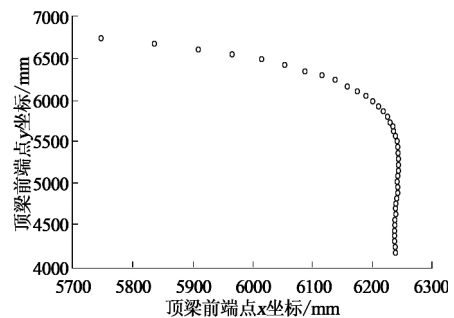


图 3 液压支架顶梁前端点运动轨迹线

3.2 液压支架立柱和平衡千斤顶的伸缩量的关系

掩护式液压支架的立柱是主要的支撑体和承载体, 控制着液压支架的高度, 承载着上覆岩层的压力。掩护式液压支架的平衡千斤顶铰接于支架顶梁和掩护梁之间, 可以调节顶梁的倾角、合力及合力作用点位置, 对液压支架姿态调节和稳定性控制有着至关重要的作用^[16]。对于掩护式液压支架的控制主要是通过立柱和平衡千斤顶的伸缩量来实现, 掌握它们的伸缩量与支架整体姿态和受力特征是实

现液压支架自动化、智能化的基础。图 4 所示为支架顶梁保持水平情况下, 立柱长度和平衡千斤顶长度关系。

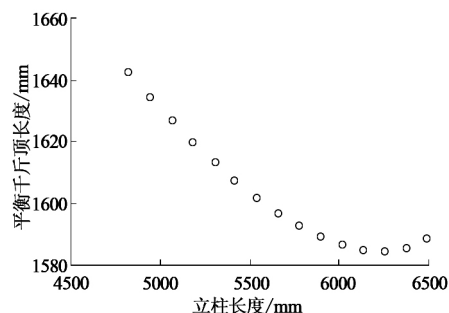


图 4 立柱长度和平衡千斤顶长度关系

4 结束语

采用计算运动学方法建立液压支架运动学约束方程不必考虑复杂结构的几何拓扑关系, 采用 Matlab 已有的库函数进行非线性方程组求解, 降低计算难度, 与传统支架设计中采用解析法和画图法相比, 效率大大提高。同时, 建立的运动约束方程用别的计算机语言编写也较为容易, 可用于液压支架质量监测、智能控制等方面。

[参考文献]

[1] 王建国. 基于 MATLAB 的液压支架四连杆机构优化设计 [J]. 煤矿开采, 2010, 15 (2): 70-72.

[2] 赵彬, 罗欣, 黄显智. 煤矿液压支架四连杆机构的遗传优化设计 [J]. 煤矿机械, 2012, 33 (5): 1-3.
 [3] 王勇. 液压支架四连杆机构受力分析 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1999 (2): 85-87.
 [4] 郑晓雯, 王丹, 王耀辉. 改进的液压支架四连杆机构的优化设计 [J]. 煤矿机械, 2009, 30 (10): 1-3.
 [5] 钟佩思, 朱绍琦, 张冠, 等. 基于 C 语言的液压支架四连杆机构的优化设计 [J]. 煤矿机械, 2014, 35 (3): 1-3.
 [6] 高慧涛, 荆浩然. 基于 Visual Basic 的液压支架四连杆机构的优化设计 [J]. 煤矿机械, 2012, 35 (4): 1-2.
 [7] 李谨, 王斌, 姚新改, 等. 基于 Web 的液压支架四连杆机构优化设计 [J]. 矿山机械, 2014, 42 (2): 9-12.
 [8] 马明国, 赵峰, 吴成峰, 等. 液压支架连杆扭矩基于刚度分配的研究 [J]. 煤矿机械, 2013, 34 (9): 88-89.
 [9] 牛艳奇. 液压支架可视化设计研究 [J]. 煤矿机械, 2015, 36 (6): 15-18.
 [10] 牛艳奇. 液压支架四连杆机构分析及参数化、可视化程序设计 [J]. 煤矿机械, 2010, 33 (8): 37-39.
 [11] 姚贵英, 杜小勇, 李秋生, 等. 二柱掩护式液压支架受力分析及优化 [J]. 煤矿机械, 2013, 34 (1): 100-102.
 [12] 张文迁. 基于遗传算法的液压支架重量和运动优化 [J]. 煤矿机械, 2014, 35 (5): 30-33.
 [13] 卢小菊, 段瑾刚. 液压支架的分析优化 [J]. 机械工程与自动化, 2014 (5): 212-213.
 [14] 李提建, 靳丰田. 支架四连杆机构解析法设计与优化 [J]. 矿山机械, 2015, 43 (11): 25-27.
 [15] 牛艳奇. 液压支架四连杆机构多目标优化 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2015 (5): 628-632.
 [16] 李雪伟. 两柱掩护式液压支架平衡千斤顶的选择原则及计算过程 [J]. 煤矿机械, 2015, 36 (9): .

[责任编辑: 徐亚军]

(上接 19 页)

[2] 汤伏全. 近景摄影测量用于岩移模型的位移观测 [J]. 西安矿业学院学报, 1990, 10 (4): 57-64.
 [3] 何国清, 杨伦, 凌庚娣, 等. 矿山开采沉陷学 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1991.
 [4] 徐良骥, 高永梅, 张玉. 全站仪在相似材料模拟实验中的应用 [J]. 现代情报, 2004 (4): 189-190.
 [5] 杨化超, 邓喀中, 郭广礼. 相似材料模型变形测量中的数字近景摄影测量监测技术 [J]. 煤炭学报, 2006, 31 (3): 292-295.
 [6] Study and application of monitoring plane displacement of a similarity model based on time-series images [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21 (4): 501-505.
 [7] 柴敬, 赵文华, 李毅, 等. 采场上覆岩层沉降变形的光纤检测实验 [J]. 煤炭学报, 2013, 38 (1): 55-60.
 [8] 许家林, 钱鸣高, 高红新. 采动裂隙实验结果的量化方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 1998 (6): 586-589.
 [9] 许家林. 岩层采动裂隙演化规律与应用 [M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
 [10] 张云鹏, 吴侃, 徐亚楠. 相似材料模型破裂边界提取研究

[J]. 煤矿开采, 2012, 17 (6): 10-13.
 [11] 陈朋, 汤玉兵, 孔庆珠, 等. 图像辅助激光点云的相似材料模型破裂边界提取 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2016, 35 (7): 751-754.
 [12] 孙双花. 视觉测量关键技术及在自动检测中的应用 [D]. 天津: 天津大学, 2007.
 [13] 沙爱民, 童峥, 高杰. 基于卷积神经网络的路表病害识别与测量 [J]. 中国公路学报, 2018, 31 (1): 1-10.
 [14] 刘建伟, 梁晋, 梁新合, 等. 大尺寸工业视觉测量系统 [J]. 光学精密工程, 2010, 18 (1): 126-134.
 [15] 童耀刚. 特定建筑物结构的三维测量系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
 [16] Weng J, Cohen P, Herniou M. Calibration of stereo cameras using a non-linear distortion model [A]. Proceeding of IAPR 10th Int Conf on Pattern Recognition [C]. 1990.
 [17] 冯文灏. 近景摄影测量: 物体外形与运动状态的摄影法测定 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
 [18] 陈冉丽, 吴侃. 相似材料模型观测新技术 [J]. 矿山测量, 2011 (6): 84-86, 89.

[责任编辑: 施红霞]