

doi: 10.7690/bgzdh.2021.10.014

某雷达多连杆倒伏机构运动学和动力学仿真

杨艳辉, 周进良, 帅晓飞

(零八一电子集团有限公司机电室, 成都 611700)

摘要: 针对某雷达倒伏机构轻量化、小型化、空间受限等问题, 提出双摇杆多连杆倒伏机构解决方案, 采用封闭矢量原理和辅助几何解法进行设计分析, 运用计算机辅助工具 Matlab/Simulink 和 SimMechanics 相结合建立 3 维动态仿真模型, 对机构进行机电一体化的动态仿真和优化设计, 并分别得到原动摇杆转动副、从动摇杆转动副的角度、速度、加速度和驱动力曲线结果。仿真结果表明: 该方法充分展示了连杆倒伏机构的运动和动力特性, 验证了其设计可行性, 为传动结构和控制系统的设计提供了重要依据。

关键词: 双摇杆; 多连杆; 运动学; 动力学; SimMechanics

中图分类号: TJ99 **文献标志码:** A

Kinematics and Dynamics Simulation of Certain Type Radar Multi-linkage Lodging Mechanism

Yang Yanhui, Zhou Jinliang, Shuai Xiaofei

(Mechanical & Electronic Research Studio, No. 081 Electronics Group Co., Ltd., Chengdu 611700, China)

Abstract: Aiming at the problems of light weight, miniaturization, and limited space of certain type radar lodging mechanism, proposes a solution to the dual-rocker multi-linkage lodging mechanism, and this solution adopts closed vector principle and auxiliary geometric solution method for design analysis. Use the computer-aided tools Matlab/Simulink and SimMechanics to establish a 3D dynamic simulation model, carry out the dynamic simulation and optimization design of mechanical and electrical integration of the mechanism, and get the angle, speed, acceleration and driving force curve results of the original rocker revolute pair and the driven rocker revolute pair respectively. The simulation results show that the method fully demonstrates the motion and dynamic characteristics of the linkage lodging mechanism, verifies the feasibility of its design, and provides important basis for the design of the transmission structure and control system.

Keywords: dual rocker; multi-linkage; kinematics; dynamics; SimMechanics

0 引言

对机动式雷达而言, 必须设计天线的升降或者倒伏机构, 以满足雷达机动性和隐蔽性要求。针对传统电动和液压驱动式翻转机构的受力分析、双缸同步和设计方法等方面, 国内外学者都有详细的研究, 但大多数都是基于大型、重型天线, 采用液压缸、电动缸、齿轮、链条、钢丝绳方式^[1-3]。本文中雷达的翻转机构需要轻量化、小型化, 宽度和高度空间极为受限, 传统的电动缸、钢丝绳无法满足宽度要求, 扇形齿轮和 U 型架无法满足运输状态高度的要求。连杆机构可通过改变各杆件的相对长度得到期望的运动规律和运动轨迹, 使用连杆机构设计的翻转机构具有撤收后空间占用小、质量轻的特点, 非常适合本次雷达翻转机构的设计要求。多连杆机构的数学模型复杂, 非线性超越方程不容易求解。传统的静力学分析方法通过分析静态工作点的

受力不能获取连杆机构整个运动过程中的运动特性和动力学特性; 笔者充分考虑雷达倒伏机构的需求, 利用连杆机构的优点, 采用计算机辅助工具完成倒伏机构分析和优化设计^[4], 并通过仿真验证了该机构的可行性, 为传动结构设计选型和伺服控制算法提供了理论支撑。

1 机构原理分析及 SimMechanics 3 维建模

1.1 机构原理分析

该雷达倒伏角度旋转范围为 $0\sim 70^\circ$, 以地平面为参考, 规定俯仰角为雷达天线法线与铅垂线之间的夹角。等效各部分后, 得到连杆机构几何示意图如图 1 所示。图中: 机架 5 为倒伏机构控制箱, 连杆 2 为天线箱体, 1 和 4 为连架杆, 连杆 3 和连架杆 4 之间加入转动副的作用是折叠, 导向杆 6 的作用是防止连杆 3 和连杆 4 在接近直线时发生急回, 而且导向杆的存在, 使该机构的自由度与原件数

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-22

作者简介: 杨艳辉(1981—), 男, 山东人, 博士, 工程师, 从事无线电通信、电视、应用电子技术、智慧教育等研究。

E-mail: 13708181901@163.com。

量相等，保证机构运动的唯一性。本次原动安装在连架杆 4 与倒伏机构控制箱连接位置，位置传感器因为空间受限，安装在连架杆 1 与倒伏机构控制箱连接位置。

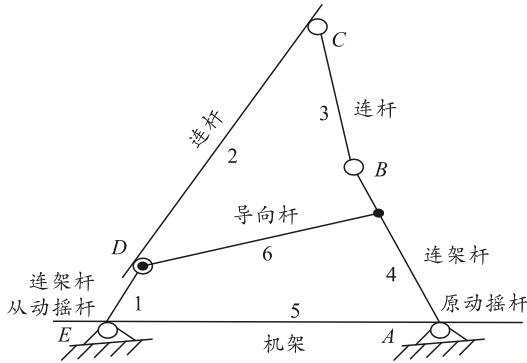


图 1 多连杆倒伏机构几何

该多连杆机构活动构件数量 n 为 5，运动低副数量 p_l 为 7，运动高副数量 p_h 为 0。平面机构自由度计算公式：

$$F=3n-(2p_l+p_h) \quad (1)$$

由上式可知，该多连杆倒伏机构的自由度为 1。该机构的自由度数量与原动件数量相等，即在原动件角位移规律已知的情况下，其他构件的运动便可完全确定，符合机构运动原理。

在此基础上对倒伏机构进行行军状态(0°)和工作状态(70°)的几何角度位置分析。假设连架杆 1、

$$l_3\omega_3^2 e^{i\theta_3} + l_4\omega_4^2 e^{i\theta_4} + l_3\alpha_3 e^{i\theta_3} + l_4\alpha_4 e^{i\theta_4} = l_1\omega_1^2 e^{i\theta_1} + l_2\omega_2^2 e^{i\theta_2} + l_1\alpha_1 e^{i\theta_1} + l_2\alpha_2 e^{i\theta_2} \quad (6)$$

式中： α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 的角加速度。

在 Solidworks 中完成结构设计，得到如下已知

连杆 2、连杆 3、连杆架 4 长度分别记为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 ，机架连接 A 和 E 的运动副的距离为 l_5 ， l_5 与水平平面的夹角记为 σ 。以 A 点为坐标原点，由封闭图形 $ABCDE$ 可写出机构各杆矢量所构成的封闭矢量方程^[5]：

$$\vec{l}_3 + \vec{l}_4 = \vec{l}_5 + \vec{l}_1 + \vec{l}_2 \quad (2)$$

式(2)的复数形式为：

$$l_3 e^{i\theta_3} + l_4 e^{i\theta_4} = l_5 e^{i\sigma} + l_1 e^{i\theta_1} + l_2 e^{i\theta_2} \quad (3)$$

将式(3)实部和虚部分离，得：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & \cos \theta_3 \\ \sin \theta_4 & \sin \theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_4 \\ l_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \sigma & \cos \theta_1 & \cos \theta_2 \\ \sin \sigma & \sin \theta_1 & \sin \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_5 \\ l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中： θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 分别为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 与水平面之间的夹角； x_c 和 y_c 为 C 点的坐标。方程(4)是关于三角函数的超越方程，可使用牛顿-辛普森迭代法求解^[6]。

将式(3)两边对时间求一次导数，得到速度关系：

$$l_3\omega_3 e^{i\theta_3} + l_4\omega_4 e^{i\theta_4} = l_1\omega_1 e^{i\theta_1} + l_2\omega_2 e^{i\theta_2} \quad (5)$$

式中： ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 为 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 矢量的角速度。

再将式(5)两边对时间求一次导数，即可得到加速度关系：

参数： $l_1=100$ mm， $l_2=240.4$ mm， $l_3=154$ mm， $l_4=211.34$ mm， $l_5=225.887$ mm， $\sigma=174.92^\circ$ 。工作状态和行军状态如图 2 所示。

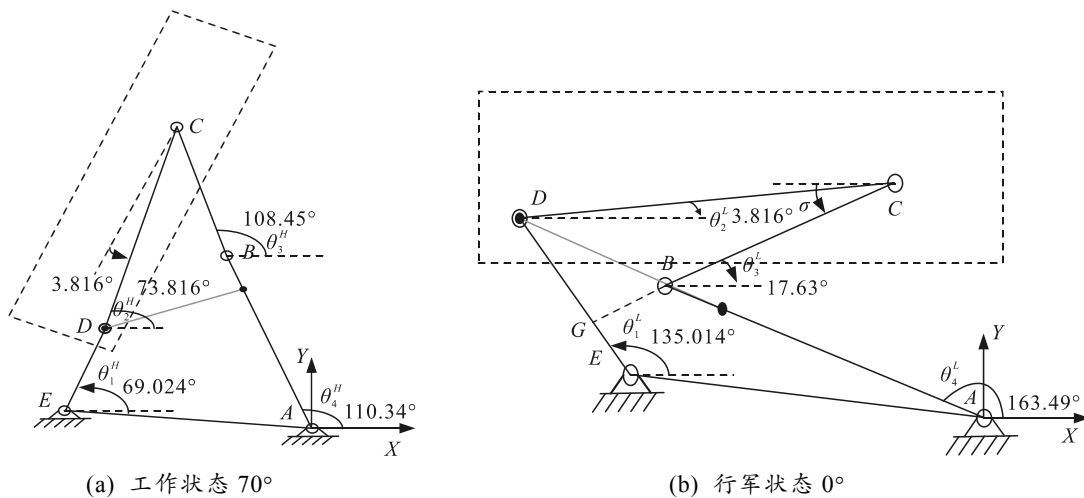


图 2 雷达在工作状态和行军状态的几何

通过测量获得倒伏机构在工作状态和行军状态下各连杆对地平面的角度： $\theta_1^H = 69.024^\circ$ ，

$\theta_2^H = 73.816^\circ$ ， $\theta_3^H = 108.45^\circ$ ， $\theta_4^H = 110.339^\circ$ ， $\theta_1^L = 135.014^\circ$ ， $\theta_2^L = 3.816^\circ$ ， $\theta_3^L = 17.63^\circ$ ，

$$\theta_4^L = 163.492^\circ。$$

综上可得到如下关系式：

$$\Delta\theta_4 = \theta_4^L - \theta_4^H = 163.49^\circ - 110.34^\circ = 53.15^\circ； \quad (7)$$

$$\Delta\theta_1 = \theta_1^L - \theta_1^H = 135.014^\circ - 69.024^\circ = 65.99^\circ。 \quad (8)$$

天线展开的俯仰角度实际为：

$$\beta = a \tan((y_C - y_D)/(x_C - x_D)) - 3.816^\circ。 \quad (9)$$

式中 3.816°为 CD 连线与天线平面的夹角。

天线从 0°到 70°，ED 的角度变化为 65.99°，原动摇杆 AB 运动角度为 53.15°。

1.2 多连杆倒伏机构 SimMechanics 3 维建模

SimMechanics 紧密结合 Matlab/Simulink，可快速建立机电一体化仿真物理模型，并且物理结构建模方式避免了复杂的数学建模和编程，大大提高了运动学和动力学分析仿真的效率和质量^[4]。

按照几何关系和结构尺寸进行部分等效。使用 solid 实体模块来构建原动摇杆、从动摇杆、基座、天线箱体、连架杆、杆件；采用 Rigid Transform 刚体坐标变换模块，实现从一个坐标系到另一个坐标系的变换；采用 Revolute joint 转动副模块，用于连接 2 个刚体，实现 2 个刚体之间的旋转运动，可设

置动力来源和需要测量的物理量^[7]。

按照需求倒伏机构承载不小于 35 kg，仿真时将天线实体质量设置为 40 kg。所有参数设置完毕，运行便可得到 Mechanics explorer 窗口中显示出多连杆倒伏机构的 3 维模型如图 3 所示，左边是工作状态，右边是行军状态。可以看出在行军状态下，使用连杆机构折叠后空间更紧凑。

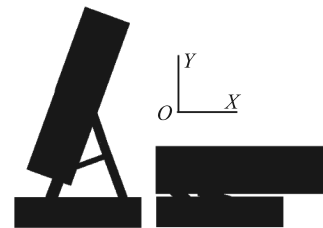


图 3 多连杆倒伏机构 3 维模型

2 Simulink 运动控制建模

2.1 电气动力控制建模

本次控制主要通过分析多连杆倒伏机构旋转副的位置、速度、加速度和力，以及从动摇杆处旋转副的位置、速度，进而验证多连杆机构设计的正确性，以此数据作为电机、减速机选型的依据，并通过数据实现结构优化，其控制模型如图 4 所示。

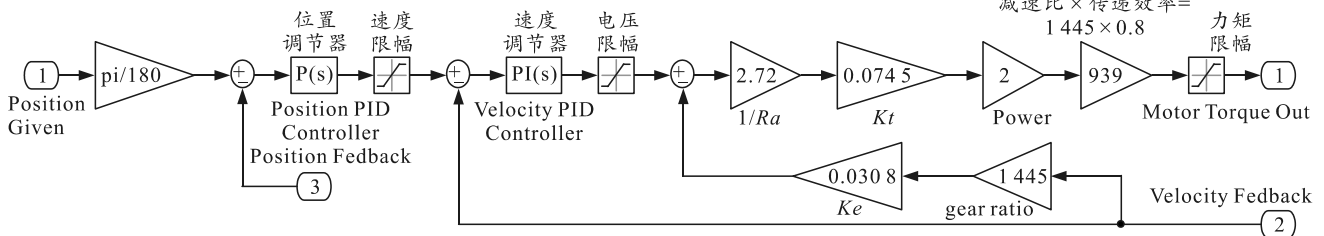


图 4 电气动力控制仿真模型

控制模型中速度环和位置环采用 Matlab/simulink 自带的 PID Controller 模块，通过 PID Tune 可视化界面，在线识别控制回路参数，非常便于在机电一体化仿真中 K_p 、 K_i 和 K_d 的参数调节。

原动摇杆旋转副 L_RevJ1 为模型的控制对象，通过设置该 Revolute Joint 属性，选择 Actuation/Torque 属性为 Provided by Input，在 Sensing 中勾选测量 Position、Velocity、Acceleration 和 Actuator Torque 选项。电气动力控制模型输出 MotorTorqueOut 到 L_RevJ1 的 t 端口，为该旋转副提供驱动力。

2.2 运动规划

根据需求，10 s 内完成展开或倒伏动作，位置曲线可以使用梯形曲线和 S 曲线，按照 8 s 时间完

成仿真设计。0 s 开始撤收，在第 10 s 开始切换指令进行展开。

以下分别为按梯形曲线设计的撤收和展开的位置指令曲线设计：

$$\theta_{s_c}^* = (53.15^\circ/2)(1 + \sin(\text{clk} * \pi/8 - \pi/2))； \quad (10)$$

$$\theta_{s_o}^* = (53.15^\circ/2)(1 + \cos((\text{clk} - 10) * \pi/8))。 \quad (11)$$

以下分别为按 S 曲线设计的撤收和展开的位置指令曲线设计：

$$\theta_{s_c}^* = (53.15^\circ/8)\text{clk}； \quad (12)$$

$$\theta_{s_o}^* = 53.15^\circ(1 - (\text{clk} - 10)/8)。 \quad (13)$$

梯形曲线和 S 曲线通过 Matlab function 模块和 clock 模块组合实现。

2.3 天线角度解算模块

天线角度可通过计算 C 点和 D 点连线与水平方向的夹角得到, 通过式(14)可求得 x_C 和 y_C 的坐标, 通过式(15)求得 x_D 和 y_D 的坐标。

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(110.34^\circ + \Delta\theta_4) & \cos(108.45^\circ + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) \\ \sin(110.34^\circ + \Delta\theta_4) & \sin(108.45^\circ + \Delta\theta_3 + \Delta\theta_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_4 \\ l_3 \end{bmatrix}; \quad (14)$$

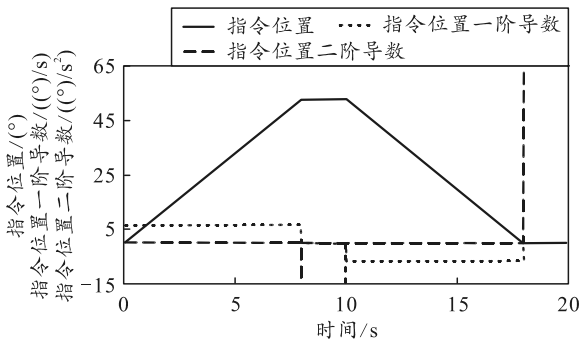
$$\begin{bmatrix} x_D \\ y_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\sigma & \cos(69.24^\circ + \Delta\theta_1) \\ \sin\sigma & \sin(69.24^\circ + \Delta\theta_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_5 \\ l_1 \end{bmatrix}。 \quad (15)$$

结合式(9)求得天线的实际俯仰角度, 在 Simulink 中使用运算模块或在 Matlab Function 进行代码设计。

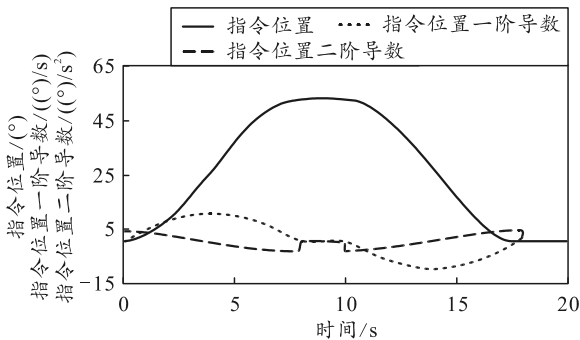
3 运动学和动力学仿真

3.1 运动规划仿真结果

如图 5 所示, 根据 2.2 节运动规划, Simulink 是通过 Matlab Function 编写代码进行仿真。梯形曲线加减速和 S 曲线加减速运动规划的位置、速度和加速度曲线。对比发现: 梯形曲线加减速的速度存在突变, 启动和停止加速度过大, 对传动机构的动力需求比 S 曲线加减速要大得多, 而且容易造成机械冲击。笔者采取 S 曲线加减速实现运动规划。



(a) 梯形曲线



(b) S 曲线

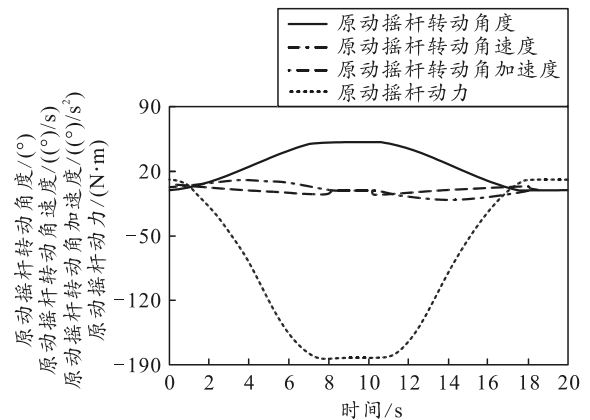
图 5 梯形曲线和 S 曲线仿真结果

3.2 运动学和动力学仿真结果

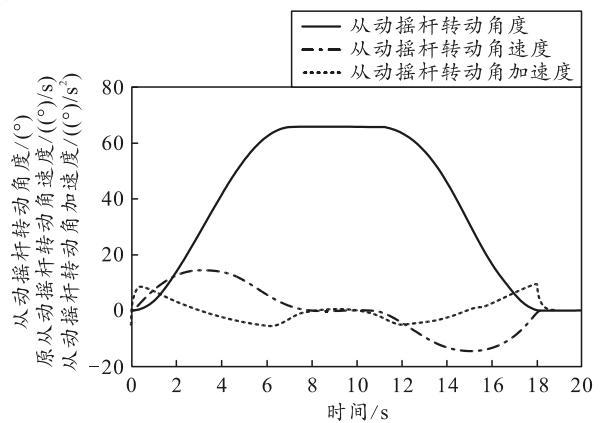
笔者主要分析原动摇杆和从动摇杆的运动学和动力学, 在忽略风速影响的前提下进行仿真, 对原动摇杆最大角速度和最大提供力进行限制, 最大角速度为 25 (°)/s, 最大提供力为 200 N·m。从仿真结果看出图 6(a)为原动摇杆旋转副的角度、速度、加速度和动力曲线, 图 6(b)为从动摇杆旋转副的角度、速度和加速度曲线。观察后可得出以下结论:

- 1) 原动旋转副的位置、速度和加速度响应与运动规划 S 曲线的数据基本吻合;
- 2) 行军状态时力矩最小保持约为 183 N·m;
- 3) 工作状态时力矩最小保持约为 11.2 N·m;
- 4) 从动摇杆的运动特性基本跟随原动摇杆的运动特性;

5) 从动摇杆比原动摇杆提前到达目标位置, 运动和驱动力传递存在非线性。



(a) 原动摇杆旋转副的转动角度、速度、加速度和驱动力



(b) 从动摇杆旋转副的转动角度、速度、加速度

图 6 原动摇杆和从动摇杆旋转副的运动和动力仿真

3.3 天线运动仿真结果

天线的俯仰角可通过求取 C 点和 D 点的连线与水平面的夹角获取。图 7 所示为 C 点(x_C, y_C)和 D 点(x_D, y_D)的运动轨迹。可见运动轨迹平滑。

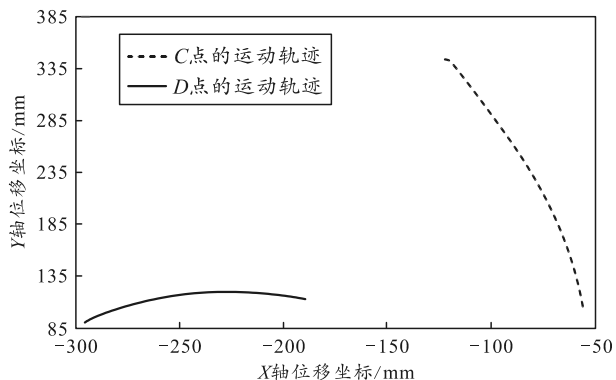


图 7 C 点和 D 点的运动轨迹

通过天线角度解算模块可求得天线的俯仰角 β ，俯仰角度、角速度和角加速度的运动曲线如图 8 所示。可以看出在整个运动范围内，角度、速度和加速度的曲线平滑。

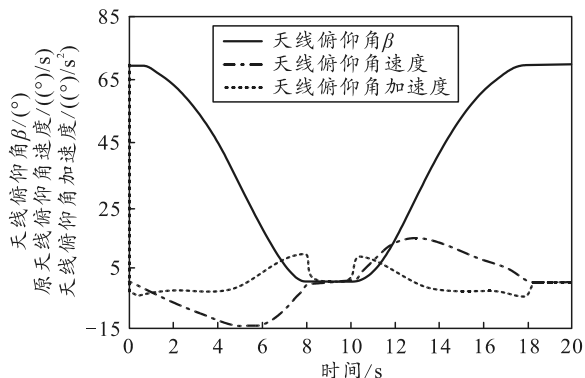


图 8 天线角度、角速度和角加速度曲线

3.4 结论

该双摇杆多连杆倒伏机构在规定时间内能实现雷达天线的平稳展开和撤收，设计目标值和仿真结果的对比如表 1 所示。

表 1 仿真结果对比

项目	设计结果	仿真结果
原动摇杆旋转范围/(°)	53.15	53.15
从动摇杆旋转范围/(°)	65.99	65.99
天线运动范围/(°)	0~70	0~70
最小启动力矩/(N·m)	-	183
工作态最小保持力矩/(N·m)	-	11.2

从上表可见，原动件摇杆、从动件摇杆、天线运动特性与原理分析结果一致。最重要的是提供了较精确的最小启动力矩和保持力矩；同时，可以直观地看到整个运动过程中的速度、加速度和驱动力情况，通过与运动控制一体化仿真，对控制算法进行优化，从而精准实现设计和选型。

4 结束语

笔者通过几何解法进行多连杆倒伏机构的设计分析，对 Solidworks 设计的结构实体进行等效和简化，在 SimMechanics 中完成 3 维建模，将运动控制模型与 3 维模型结合完成机电一体化仿真，得到运动学和动力学仿真结果，验证了设计的可行性，并对设计中的问题给出了相应解决措施。该方法可在硬件搭建前期进行方案验证，便于提前发现问题，并可通过 Mechanics explorer 动态观察，排除机械干涉等问题。该方法对复杂运动系统，诸如机械手臂、仿生机器人、空间运动机构等数学模型复杂的机电一体化设计具有重要意义。

参考文献：

- [1] 文航凌. 某新型天线翻转机构的设计及优化[D]. 成都: 电子科技大学, 2017: 1-3.
- [2] 吴俊全, 王蓉晖, 孙海文. 燃气作动筒驱动弹翼展开实验与仿真[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 60-62.
- [3] 李鑫, 付鑫, 吕怀武. 反导预警体系雷达装备能力提升贡献率评估[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 22-23.
- [4] 孙桓, 陈作模, 葛文杰. 机械原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 123-125.
- [5] 马贵平. 基于 SimMechanics 的混合驱动五连杆机构逆运动学分析[J]. 机械管理开发, 2018, 33(8): 31-32.
- [6] 王锡霖, 严日明, 李举, 等. 基于 MATLAB 的平面五连杆机构的运动学分析[J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 2011, 32(3): 273-277.
- [7] 卜王辉, 陈茂林, 李梦茹. MATLAB 基础与机械工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 184-185.