

doi: 10.7690/bgzd.2018.09.015

# 某两自由度弹药传输机械臂拓扑优化设计

李 蓓, 侯保林

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为了对两自由度弹药传输机械臂进行轻量化, 并保证轻量化的机械臂仍能满足动静态性能要求, 采用拓扑优化的方法进行优化设计。在 RecurDyn 中建立弹药传输机械臂的动力学模型, 在 Matlab/Simulink 中建立弹药传输机械臂的联合仿真系统, 采用 PID 方法对弹药传输机械臂进行位置控制, 通过 OptiStruct 软件平台建立其左臂和右臂有限元模型, 采用变密度方法的拓扑优化技术对机械臂的左右两臂进行减重。结果表明: 该设计是合理的, 左右两臂质量比原模型质量降低 36.6%, 优化后的模型满足刚度性能要求。

**关键词:** 机械臂; 联合仿真; PID; 拓扑优化; 变密度法

**中图分类号:** TJ410.2 **文献标志码:** A

## Topology Optimization Design of Certain 2-DOF Ammunition Auto-loading Manipulator

Li Bei, Hou Baolin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to reduce the weight of the 2-DOF ammunition auto-loading manipulator and ensure the lightweight manipulator can still meet the dynamic and static performance requirements, the topology optimization method is adopted. The dynamic model of the ammunition auto-loading manipulator is established in RecurDyn and the coordinated simulation system is established in Matlab/Simulink. The position control of the ammunition auto-loading manipulator is realized by PID method. Use OptiStruct software platform to establish the finite element model of left and right arms. Use varied density topology optimization technology to lose weight of left and right arms. The results show that the design is reasonable, and the weight of the left and right arms is 36.6% lower than that of the original model. The optimization model can satisfy the performance requirements of stiffness.

**Keywords:** manipulator; co-simulation; PID; topology optimization; variable density method

### 0 引言

弹药传输机械臂用于接收弹仓内被推弹器所推送出来的弹丸, 然后将该弹丸传送到输弹线上, 由输弹机输弹入膛后, 弹药传输机械臂再返回到原位, 在火炮的自动装填系统中起到重要作用<sup>[1]</sup>。在满足设计要求和强度的条件下, 对机械臂进行轻量化可以减少能量的消耗, 拓扑优化设计能够提高机械臂的结构性能, 满足结构的轻量化设计要求, 降低研发成本。

笔者以某弹药传输机械臂为研究对象, 建立了机械臂的 RecurDyn 和 Matlab 联合仿真模型, 通过提取弹丸和输弹器的最大加速度作为拓扑优化的受力条件, 在满足刚度要求的情况下, 以减轻其左臂和右臂质量为目标, 运用拓扑优化方法寻求了左右两臂的最佳材料分布, 对机械臂的结构进行了轻量化设计。

### 1 弹药传输机械臂联合仿真

#### 1.1 弹药传输机械臂动力学建模

如图 1 所示, 某弹药传输机械臂的结构包括左右臂、输弹器和弹丸、左臂电机及传动装置、扭转电机及传动装置。左右臂可绕耳轴做定轴转动, 带动输弹器运动到取弹和输弹位置, 围绕左右两臂端部旋转的输弹器可使弹丸和身管轴线平齐, 最后由输弹器将弹丸推送入膛。弹药传输机械臂旋转提升过程中, 其左臂由左臂电机驱动, 通过齿轮传动绕着左耳轴定轴转动; 输弹器由扭转电机驱动通过齿轮传动绕转轴相对左臂做定轴转动; 为平衡输弹器, 避免输弹器以悬臂的方式相对左臂转动, 输弹器通过同一转轴与右臂铰接, 右臂绕右耳轴定轴转动。

收稿日期: 2018-06-15; 修回日期: 2018-07-21

作者简介: 李 蓓(1993—), 女, 安徽人, 硕士, 从事机械结构设计及优化研究。

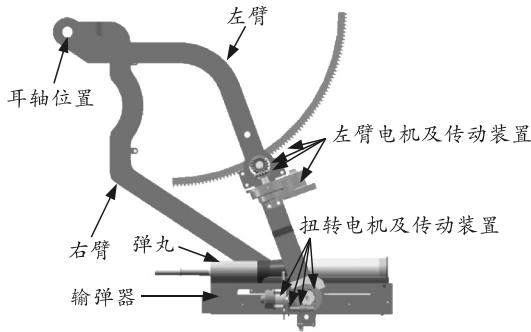


图 1 弹药传输机械臂 3 维模型

笔者在 RecurDyn 中建立机械臂的动力学模型，拓扑关系如图 2 所示。

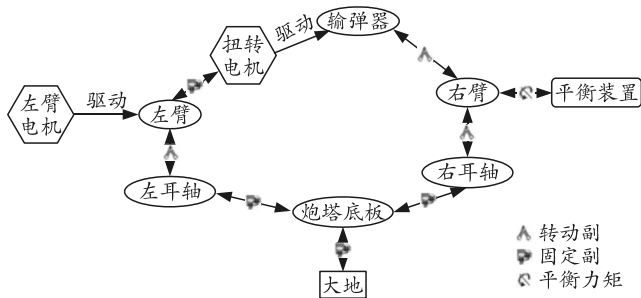


图 2 动力学模型拓扑框图

### 1.2 联合仿真

弹药传输机械臂是一个复杂的机械系统，而其运动位置跟踪又需要复杂的控制系统作为支撑。RecurDyn 虽然功能强大，但要做到对复杂机械系统进行准确控制，RecurDyn 自身很难完成。笔者采用 RecurDyn 与 Matlab 联合仿真技术，对弹药传输机械臂进行位置控制，得到与实际较为符合的受力特性<sup>[2]</sup>。对于弹药传输机械臂运动的控制，输入应为力矩，分别以两电机的驱动力矩作为输入状态变量，机械臂绕耳轴转动的角度和输弹器转动的角度为输出变量。

为了对运动轨迹进行精确控制，笔者采用 PID 位置控制系统，其比例环节可以加快系统的响应速度，积分环节可以消除系统的稳态误差，微分环节可以增大系统的阻尼，抑制系统超调<sup>[3]</sup>。建立闭环系统后的控制模型如图 3 所示。控制系统中 RecurDyn client block 1 为机械臂机械系统模型。其中左臂电机控制 PID 参数设置为 1 000, 100, 80；输弹器扭转电机控制 PID 参数设置为 200, 10, 10。

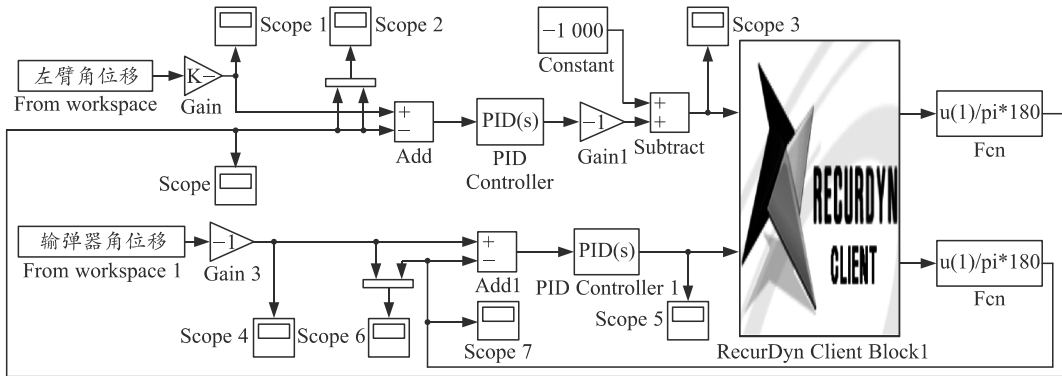


图 3 机械臂联合仿真模型

### 1.3 联合仿真结果

通过联合仿真，得到了目标位置跟踪状况以及受力曲线，如图 4—7 所示。

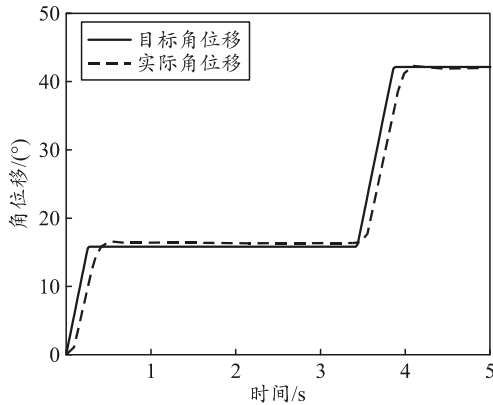


图 4 左臂角位移跟踪曲线

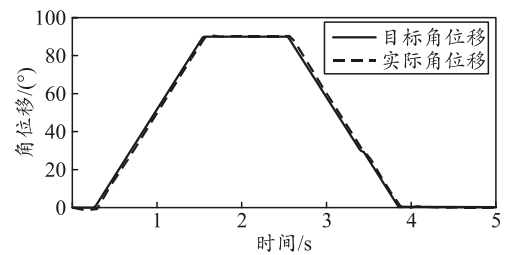


图 5 输弹器角位移跟踪曲线

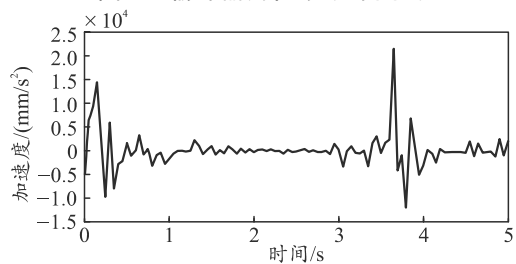


图 6 输弹器和弹丸 X 方向加速度

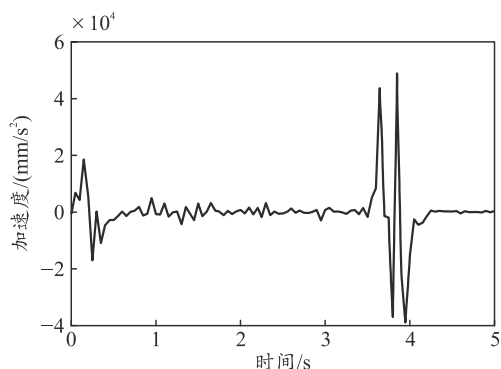


图7 输弹器和弹丸Z方向加速度

从图4和图5可以看出,控制系统可以很好地跟踪上目标轨迹,验证了联合仿真的准确性;因此图6和图7可为接下来机械臂的拓扑优化载荷提取提供依据。

## 2 机械臂拓扑优化

拓扑优化是一种在满足应力、刚度等约束条件下,寻求材料最佳分配的优化方法<sup>[4]</sup>。变密度法是拓扑优化中常用的方法,具有程序实现过程简单、计算效率高等特点,已在许多问题中得到应用,成为拓扑优化领域的主要方法<sup>[5]</sup>。笔者采用Optistruct软件,在弹药传输机械臂满足性能要求的情况下,对其左右两臂进行拓扑优化,以达到最终减重的目的。

### 2.1 拓扑优化设计空间及网格划分

根据设计要求,需要简化及填充左右两臂得到拓扑优化的设计空间,采用壳单元进行网格划分,如图8所示。

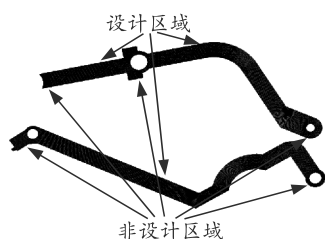


图8 左右两臂的有限元模型

### 2.2 连接单元

完成网格划分后,需要在机械臂和耳轴的连接处、左臂和左臂电机的连接处以及左右臂和输弹器的连接处建立连接关系,用于模型的约束和加载。方法是在有限元模型中引入轴的有限元模型及它们之间的连接关系,这种办法虽然更接近实际情况,但是轴与机械臂之间的接触关系(如间隙、摩擦、过盈量大小等)很难准确模拟。因此笔者采用刚性单元来模拟上述连接关系。该单元被研究者广泛采用,

其优点是前处理工作量相对较小,计算精度较好,对于孔内、柱面加载,接近实际结构的受力特性<sup>[6]</sup>。

### 2.3 载荷分析及边界条件

左右两臂所承受的力为运动过程中输弹器的加速度对其产生的作用力,加速度过大可能造成左右两臂的刚度不足,需要提取联合仿真分析中输弹器和弹丸的最大加速度对左右两臂产生的力,作为极限工况。从图6和图7中得到输弹器和弹丸沿X轴和Z轴的最大加速度分别为21 576、48 598 mm/s<sup>2</sup>。由于主要目的是对左右臂进行减重,在施加载荷的过程中,可以把输弹器和弹丸看成质量点并赋予质量和转动惯量,将输弹器和弹丸加速度加到质量点上。拓扑优化分析是静态分析,因此将加速度转换为力作用在质量点处,在输弹器转轴中心和质量点间建立刚性连接来模拟受力过程。分别约束左右两臂和耳轴的连接中心,以及左臂和左臂电机的连接中心的3个平动自由度和2个转动自由度,保留绕轴线方向的转动自由度,如图9所示。



图9 机械臂载荷及边界条件施加

### 2.4 拓扑优化计算过程及结果

定义左右两臂的设计区域和非设计区域,根据性能要求,约束条件为和输弹器连接中点处的位移不能超过4 mm,优化目标为体积最小化,设计变量为设计空间内每个单元的密度,并添加了最小尺寸约束得到比较均匀的材料分布。

定义优化问题后进行拓扑优化计算,经过52次迭代运算后,目标函数收敛。优化结果如图10所示,为密度阈值等于0.3的等值面图,显示了优化所得结果中伪密度在0.3以上的单元,给出了优化后的材料分布与清晰的结构主传力路径<sup>[7]</sup>。

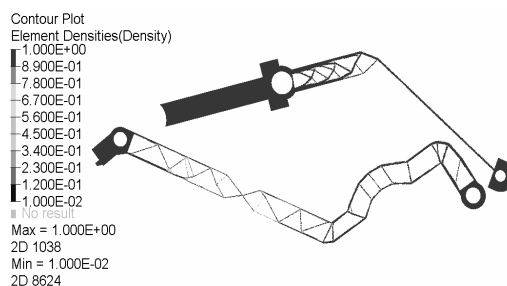


图10 左右两臂拓扑优化结果

### 2.5 模型重建及分析

利用 OptiStruct 的 OSSmooth 工具, 导出拓扑优化后左右两臂的 3 维模型文件, 在 Solidworks 软件中进行左右两臂的几何模型重建, 得到新的 3 维模型, 如图 11<sup>[8]</sup>所示。



图 11 优化后左右两臂 3 维图

为了验证重建模型是否满足设计要求, 需要对新模型进行有限元强度分析<sup>[9-10]</sup>。通过对新模型进行网格划分, 施加和原模型相同的载荷和边界条件提交分析, 得到优化后的应力云图和位移云图, 如图 12、13 所示。



图 12 优化后左右两臂应力云图

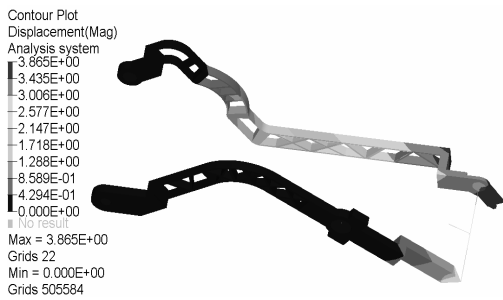


图 13 优化后左右两臂位移云图

从图 12、13 中可看出: 左右两臂的最大应力为 130 MPa, 远小于其许用应力 350 MPa, 左右两臂和输弹器连接中心处的位移最大值为 3.412 mm, 小于

4 mm, 满足设计要求; 新模型质量为 82.4 kg, 原模型质量为 130 kg, 优化后的左右两臂总质量较优化前减少了 36.6%。

### 3 结论

为了对弹药传输机械臂进行减重, 建立了 RecurDyn 和 Matlab 联合仿真模型, 仿真结果显示运动轨迹跟踪情况良好, 从而提取了关键处的受力作为极限工况, 并将此力作为拓扑优化的载荷施加条件, 利用 OptiStruct 在设计区域进行拓扑优化, 对优化后的模型进行重建和强度分析。经过校验, 实现弹药传输机械臂左右两臂总质量减重 36.6%, 其强度及刚度特性亦能得到很好的保障, 证明了该设计的合理性。

### 参考文献:

- [1] 高学星, 苏哲子, 孙华刚, 等. 具有参数不确定性的火炮弹药协调器定位精度优化[J]. 兵工学报, 2014, 35(6): 776-781.
- [2] 佟刚, 张显军, 赵林楠. 基于 RecurDyn 与 Matlab 的油电混合四旋翼飞行器虚拟样机仿真[J]. 航空精密制造技术, 2015, 51(6): 24-27.
- [3] 李海斌, 陈奎生, 罗洁. 机械手夹持机构运动与控制的联合仿真[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(1): 46-49.
- [4] 吴卓, 刘哲. 大型随车起重机吊臂的轻量化研究[J]. 起重运输机械, 2016(6): 72-75.
- [5] 杨嘉伟, 潘玉田, 蒋华剑, 等. 某武装侦察机器人武器站大臂的拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(5): 76-79.
- [6] 时培成, 周永, 高立新. 基于制造工艺约束的悬架控制臂拓扑优化[J]. 机械设计, 2013, 30(10): 39-45.
- [7] 孙全兆, 杨国来, 葛建立. 某火炮上架结构改进设计[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1281-1285.
- [8] 康元春, 李辉, 高赞. 悬架控制臂多目标拓扑优化[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(6): 571-575.
- [9] 范林盛, 刘树华, 曹广群, 等. 多工况下某火炮摇架拓扑优化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 22-24.
- [10] 曲令晋, 李仁. 基于有限元法的电动汽车车身正面碰撞仿真及拓扑优化[J]. 新技术新工艺, 2013(4): 48-51.

\*\*\*\*\*

- [6] 李言俊, 张科, 余瑞星. 系统辨识理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 4-5.
- [7] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述[J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
- [8] 陈贵敏, 贾建援, 韩琪西. 粒子群优化算法的惯性权重递减策略研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 53-56.
- [9] 刘金琨, 沈晓蓉, 赵龙. 系统辨识理论及 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 215-233.
- [10] 高学星. 弹药自动装填子系统动作可靠性与故障诊断[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 59-77.

(上接第 56 页)