

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.04.010

挂弹车举升系统整体研究与运动仿真分析

刘中新¹, 王占富²

(1. 中国空空导弹研究院凯迈测控, 河南 洛阳 471009;

2. 中国空空导弹研究院主机配套部, 河南 洛阳 471009)

摘要: 为了提高挂弹车举升机构的效率和性能, 对其液压系统进行整体研究。首先根据已有模型及 1.5 t 负载, 通过力矩平衡方程, 计算推力。再用 ADAMS 软件仿真计算举升过程推力情况, 将 2 次的结果对比参考, 为举升机构的液压系统设计提供可靠的数据支持。同时, 还对固定举升臂的机架进行了受力分析, 确定了机架和车底盘之间的固紧方式。通过对比 2 次计算的结果可知: 举升臂在负载为 1.5 t 的情况下, 接近最高位置时, 液压缸的推力最大达到 164.1 kN。

关键词: 举升机构; 力矩方程; ADAMS 仿真; 莫尔积分

中图分类号: TJ760.2 **文献标志码:** B

Research of Lifting Mechanism of Hangings Missile Truck System and Dynamic Simulation Analysis

Liu Zhongxin¹, Wang Zhanfu²

(1. CAMA Measurements & Controls, China Airborne Missile Academy, Luoyang, 471009, China;

2. Dept. of Main Machine Assembly, China Airborne Missile Academy, Luoyang, 471009, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency and performance of the lifting mechanism for the hangings missile truck, its hydraulic system had been overall researched. Firstly, according to the existing model and the load of 1.5 t, the thrust was calculated through the torque balance equation. Secondly, the thrust in the lifting process was computed by ADAMS software simulation, and compare the results deriving from two different ways to provide reliable data support for the design of a hydraulic system of the lifting mechanism. Meanwhile, the received force on the rack of the fixed lifting arm was analyzed, and the fastening way between the rack and the chassis was also determined. The comparison of two calculation results indicated that in the case of the lifting arm with the load of 1.5 t, when it was close to the highest position, the thrust of hydraulic cylinder reached the maximum of 164.1 kN.

Key words: lifting mechanism; torque equation; ADAMS simulation; Moore integral

0 引言

挂弹车用于举升挂装导弹, 因其有效作业距离大, 可举升不同重量导弹, 驾驶方便等特点, 受到了市场欢迎。挂弹车的举升机构对其效率和性能有很大的影响。设计举升机构的关键是要确定举升所需要的液压推力。因此, 笔者对可以最大举升 1.5 t 的重物的挂弹车进行设计, 并对固定举升臂的机架进行受力分析, 为举升系统的液压系统的设计提供参考。

1 举升臂简化模型计算实例

1.1 模型简化

已有的举升臂模型如图 1 所示, 首先将其简化为如图 2 所示的简化模型。

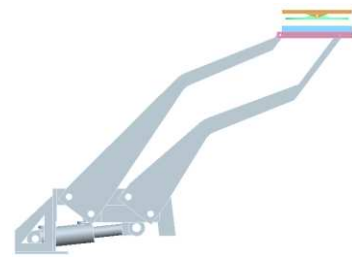


图 1 举升机构模型

液压缸的推力如图 2 中的 F 和 F' , 举升的负载力为 G , 作用点距离 A 点距离为 L_g , a 杆为类似的 T 型杆, 用于连接液压缸和 2 个举升臂, 2 个举升臂可绕固定点旋转, 举升过程中液压缸和水平成 α 角, 举升臂和竖直方向成 θ 角。整个系统共由 4 个杆件和 1 个液压缸组成。在图 2 中标出的各力均为在方程中有体现的、需要的, 并未标出实际存在的

收稿日期: 2011-10-25; 修回日期: 2011-12-01

作者简介: 刘中新(1983—), 男, 黑龙江人, 硕士, 工程师, 从事机械电子工程研究。

全部力。

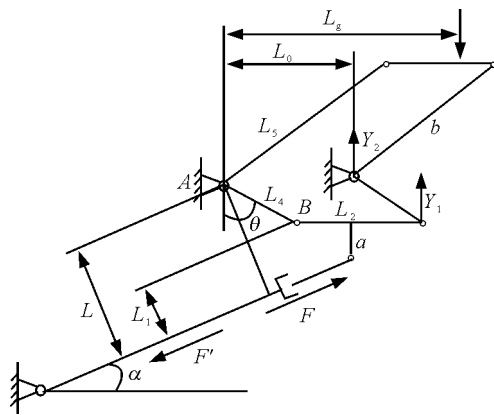


图 2 举升臂简化模型

1.2 力矩平衡计算^[1]

以图 2 的简化模型，列力矩平衡方程，设初始条件 $G=15\ 000\ \text{N}$ 。如图 3，以杆 a 为研究对象，以 B 点为中心，列力矩平衡方程：

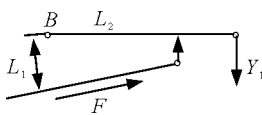


图 3 B 点力矩图

$$F \times L_1 - Y_1 \times L_2 = 0 \quad (1)$$

如图 4，以杆 b 研究对象，列 Y 向力平衡方程：

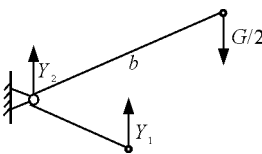


图 4 b 杆研究分析

$$Y_2 + Y_1 - \frac{G}{2} = 0 \quad (2)$$

如图 5，以整体为研究对象，以 A 点为中心，列力矩平衡方程：

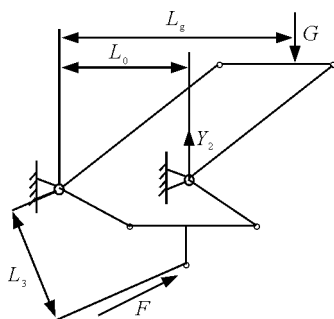


图 5 A 点力矩图

$$-G \times L_g + Y_2 \times L_0 + F \times L_3 = 0 \quad (3)$$

根据式 (1)~式 (3) 得：

$$F = \frac{L_5 \times \cos(\theta - 15)}{[L_4 \times \cos(\theta - \alpha)]} \times G \quad (4)$$

经计算在最高位置是 $\theta=58^\circ, \alpha=7.3^\circ, F=165\ 254\ \text{N}$, $G=15\ 000\ \text{N}$ 。说明此种举升机构形式，可以最大举升力为负载的 11 倍。从公式上可以看出，决定 F 大小的关键因素是： $L_5=2\ 000$, $L_4=200$ ，所以推力 F 和负载 G 就是接近 10 倍的关系。通过以上公式可以求得，液压缸推力和各铰支点的受力情况如表 1 所示。

表 1 举升过程力分析

角度/(°)	液压缸推力/kN	远缸铰支点/kN	近缸铰支点/kN
60	164.1	$X=33.9$	$X=129.1$
		$Y=-43.28$	$Y=39.17$
45	158.9	$X=62.85$	$X=95.65$
		$Y=-36$	$Y=39.92$
15	143.2	$X=82.6$	$X=60.58$
		$Y=-24$	$Y=38.64$
5	137.0	$X=84.9$	$X=52.15$
		$Y=-22.62$	$Y=37.47$

从表 1 可以看出，随着举升角度的增加，液压缸的推力也在增加，远缸铰支点的 X 向力逐渐减小，Y 向力逐渐增大，近缸铰支点的 X 向力逐渐增大，Y 向力逐渐减小。

2 举升臂 ADAMS 仿真

2.1 ADAMS 仿真^[2-3]

在 ADAMS 中建立一个和图 2 同样的物理模型，初始条件给活塞一个 12 mm/s 的速度，给整体一个负载 1.5 t，初始角度 $\theta=0^\circ, \alpha=0^\circ$ ，各杆重量均设为 70 kg。仿真按 20 s 时间计算，仿真结果如图 6、7。

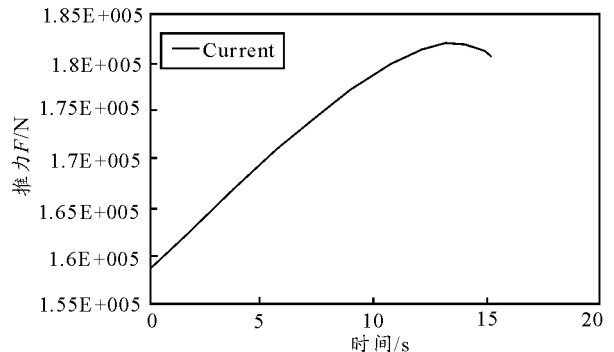


图 6 推力 F 随时间变化的曲线

$t=0\ \text{s}$ 时， $F_{\min}=160\ 000\ \text{N}$ ， $t=14\ \text{s}$ 时， $F_{\max}=182\ 000\ \text{N}$ ，为负载 15 000 N 的 12.2 倍。

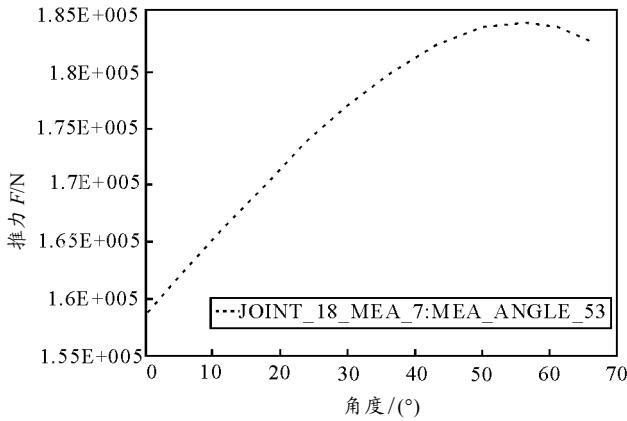


图 7 推力 F 随角度 θ 变化曲线

在临近最高位置时, $\theta=55^\circ$, $F_{\max}=182\ 000\ \text{N}$ 。

2.2 结论分析

由公式:

$$F = \frac{L_5 \times \cos(\theta - 15)}{[L_4 \times \cos(\theta - \alpha)]} \times G \quad (5)$$

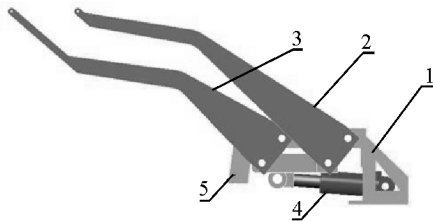
可知推力 F 和大臂长度 L_5 、小臂长度 L_4 、举升臂与竖直方向的夹角 θ 及液压缸和水平方向的夹角 α 有关。通过改变相应的结构进而改变参数, 可以优化设计举升臂。

在现有模型中, 由力矩平衡方程, 计算得液压推力 $F=11G$ 。由 ADAMS 仿真得, 最大推力 $F=12.2G$ 。说明软件 ADAMS 仿真的结果更接近于真实情况, 从而也验证理论计算的正确性。

3 机架受力分析

3.1 机架模型简化

机架和液压缸均安装在车底盘上, 而举升臂安装在车底盘的机架上, 机架要承受举升臂的限位和固定所产生的力^[4], 如图 8 所示。



1: 车底盘部分; 2: 后举升臂; 3: 前举升臂; 4: 液压缸; 5: 机架。

图 8 举升机构整体模型

经计算, 在举升的过程中, 前举升臂对机架的最大水平作用力 $X_1=9 \times 10^4\ \text{N}$, 方向向右, 竖直方向作用力 $Y_1=4.328 \times 10^4\ \text{N}$, 方向向上; 后举升臂对机架的水平作用力 $X_2=1.291 \times 10^5\ \text{N}$, 竖直方向作

用力 $Y_2=3.917 \times 10^4\ \text{N}$, 方向向下。水平力和竖直力的最大值并不是同时出现, 所以需要按水平力和竖直力均出现极值的情况来对机架进行强度和刚度校核。

首先对机架进行受力分析, 机架底端的 2 部分和底盘用螺栓连接, 在其上有两处受到举升臂的力作用, 如图 9 所示, 整个模型是典型的静不定问题, 使用莫尔积分解决, 求出支反力。

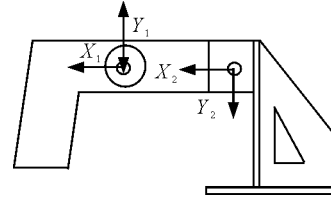


图 9 机架受力示意图

机架和底盘之间用螺栓固紧, 在其上有两处受到力的作用, 相当于如图 10 所示。

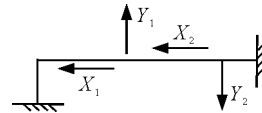


图 10 机架简化模型

3.2 求解支架的支反力^[5-6]

此模型为典型的静不定问题。采用莫尔积分进行求解。将模型的右端固定点解放成自由形式, 同时赋予等效的外力, 如图 11 所示。

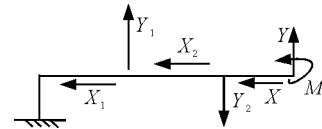


图 11 机架简化等效模型

图 11 中机架上受力:

$$X_1=9 \times 10^4\ \text{N} ; Y_1=4.328 \times 10^4\ \text{N} ; X_2=1.291 \times 10^5\ \text{N} ; Y_2=3.917 \times 10^4\ \text{N} .$$

$$a=0.327\ \text{m} ; b=0.427\ \text{m} ; c=0.116\ \text{m} ; d=0.224\ \text{m} .$$

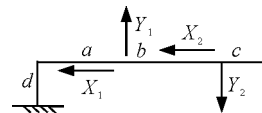


图 12 机架只受外力作用示意图

如图 12 所示, 先求出只在外力作用下产生的弯矩 M , 再分别求出在单位竖直力 Y 、单位水平力 X 、单位力矩 M 作用下, 在机架上产生的弯矩 \overline{M}_1 、 \overline{M}_2 、 \overline{M}_3 , 再根据莫尔积分和弯矩方程, 可以得出如下位移量:

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_1 M_1} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} 0 dx + \frac{1}{EI} \int_0^d x^2 dx = \frac{0.389}{EI}$$

$$\delta_{12} = \delta_{21} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_1 M_2} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} 0 dx + \frac{1}{EI} \int_0^d x(a+b+c) dx = \frac{0.0218}{EI}$$

$$\delta_{22} = \delta_{21} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_2 M_2} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} 0 dx + \frac{1}{EI} \int_0^d x(a+b+c) dx = \frac{0.0218}{EI}$$

$$\delta_{13} = \delta_{31} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_1 M_3} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} x dx + \frac{1}{EI} \int_0^d (a+b+c) dx = \frac{0.573}{EI}$$

$$\delta_{23} = \delta_{32} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_2 M_3} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} x^2 dx = \frac{0.0037}{EI}$$

$$\delta_{33} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_3 M_3} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{a+b+c} x dx + \frac{1}{EI} \int_0^d 1 dx = \frac{1.094}{EI}$$

其中： δ_{11} 为机架上自由端只作用竖直方向单位力

$Y=1$ 时，在竖直方向产生的位移； δ_{12} 为机架上自由端只作用水平方向单位力 $X=1$ 时，在竖直方向产生的位移； δ_{13} 为机架上自由端只作用单位力矩 $M=1$ 时，在竖直方向产生的位移； δ_{21} 为机架上自由端只作用竖直方向单位力 $Y=1$ 时，在水平方向产生的位移； δ_{22} 为机架上自由端只作用水平方向单位力 $X=1$ 时，在水平方向产生的位移； δ_{23} 为机架上自由端只作用单位力矩 $M=1$ 时，在水平方向产生的位移； δ_{31} 为机架上自由端只作用竖直方向单位力 $Y=1$ 时，产生的角位移； δ_{32} 为机架上自由端只作用水平方向单位力 $X=1$ 时，产生的角位移； δ_{33} 为机架上自由端只作用单位力矩 $M=1$ 时，产生的角位移。

$$\Delta_{1p} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_1 M} ds = \frac{1}{EI} \int_0^{b+c} x \cdot [-Y_2 \cdot (x-c)] dx + \frac{1}{EI} \int_{b+c}^{b+c+a} x \cdot [-Y_2 \cdot x + Y_1 \cdot (x-b-c)] dx + \frac{1}{EI} \int_0^d (a+b+c) [Y_1 \cdot a - Y_2 \cdot (a+b) + (X_1 + X_2) \cdot x] dx = -1.238 \times 10^4 \frac{m^4 \cdot kg}{s^2 \cdot EI}$$

同理代入可得：

$$\Delta_{2p} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_2 M} ds = -275.16 \frac{m^4 \cdot kg}{s^2 \cdot EI}$$

$$\Delta_{3p} = \frac{1}{EI} \int_s \overline{M_3 M} ds = -1.774 \times 10^4 \frac{m^4 \cdot kg}{s^2 \cdot EI}$$

其中： Δ_{1p} 为机架上只作用外力时，在竖直方向产生的位移； Δ_{2p} 为机架上只作用外力时，在水平方向产生的位移； Δ_{3p} 为机架上只作用外力时，产生的角位移。

应用莫尔定理列变形协调方程式：

$$\begin{pmatrix} \delta_{11} X & \delta_{12} Y & \delta_{13} M \\ \delta_{21} X & \delta_{22} Y & \delta_{23} M \\ \delta_{31} X & \delta_{32} Y & \delta_{33} M \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \Delta_{3p} \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

此方程设计的计算量比较大，必须通过软件来进行计算，先把方程转化为矩阵运算：

$$A = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.389 & 0.0218 & 0.573 \\ 0.0218 & 0.003746 & 0.025 \\ 0.573 & 0.025 & 1.094 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} \Delta_{1p} \\ \Delta_{2p} \\ \Delta_{3p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.238 \times 10^4 \\ -275.16 \\ -1.774 \times 10^4 \end{pmatrix}$$

即 $AX + B = 0$ ； $X = -A^{-1}B$ 。

通过 Mathcad 软件计算矩阵 A 的逆矩阵 A^{-1} ，得：

$$A^{-1} = \begin{pmatrix} 15.38 & -42.18 & -7.09 \\ -42.18 & 430.66 & 12.25 \\ -7.09 & 12.25 & 4.34 \end{pmatrix} X = -A^{-1}B = \begin{pmatrix} 5.3 \times 10^4 \\ -1.864 \times 10^5 \\ -7.286 \times 10^3 \end{pmatrix}$$

由上式可知：机架的右端受力结果：

$$Y = 5.3 \times 10^4 \text{ N}$$

$$X = -1.864 \times 10^5 \text{ N}$$

$$M = -7.286 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}$$

由结果可知，因为机架固定在车底盘上，车底盘给机架的自由端的水平作用力，达到了 180 kN，所以这一段考虑用焊接的方式和底盘连接。另一段受到的水平力 $F=40$ kN，竖直力 $=60$ kN，考虑用螺栓固紧的方式。

4 结论

笔者从举升臂模型入手，分别通过力矩平衡方程和 ADAMS 软件仿真计算出，举升臂在负载为 1.5 t 的情况下，接近最高位置时，液压缸的推力最大达到 164.1 kN，这一数据为液压系统的设计提供了基础依据。通过运用莫尔积分原理进行求解，求出了机架和车底盘之间在负载情况下的支反力，确定了受横向力大的一端采用焊接方式连接，而受力小的一端用螺栓连接。

参考文献：

- [1] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京：高等教育出版社，2009.
- [2] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京：国防工业出版社，2006.
- [3] 郑秋，吴永军. 基于 ADAMS 的某榴弹发射器动力学仿真分析[J]. 兵工自动化，2010，29(7)：28-31.
- [4] 刘巩，罗绪涛，梁晓庚，等. 大离轴发射空空导弹初制导律[J]. 四川兵工学报，2010，31(3)：31.
- [5] 孙训方，方孝淑，关来泰. 材料力学[M]. 北京：高等教育出版社，2009.
- [6] 董增福. 矩阵分析教程[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2005.