

doi: 10.7690/bgzdh.2020.11.019

# 发射药螺旋分料装置的设计与实验研究

杜木伟, 陈保林, 漆帮林

(重庆航天机电设计院工艺装备研究所, 重庆 400039)

**摘要:** 为提高发射药的装药质量, 对发射药螺旋分料精密称量技术的分料装置进行研究。介绍螺旋分料装置的机械结构及工作原理, 构建分料过程的力学模型、速度模型及分料量模型, 设计螺旋分料装置的关键参数, 采用松散密度及流动性等物料特性近似的旱菜籽作为替代物料进行实验验证。实验结果表明: 该研究可提升工程问题的设计水平, 为发射药的分料装置设计提供参考。

**关键词:** 发射药; 螺旋分料; 分料量

**中图分类号:** TJ410.5 **文献标志码:** A

## Design and Experimental Study of Gun Powder Spiral Dosing Device

Du Muwei, Chen Baolin, Qi Banglin

*(Technological Assembling Research Institute of Chongqing Aerospace  
Mechanical & Electrical Designing Academy, Chongqing 400039, China)*

**Abstract:** In order to improve the charging quality of gun powder, the spiral dosing device in the precision weighing technology of gun powder was studied. Through introducing the mechanical structure and working principle of the spiral dosing device, the mechanics model, velocity model and dosing quantity model of dosing process were established. Through designing the key parameters of the spiral dosing device, the dry rapeseed with similar material properties such as loose density and fluidity was used as the substitute material for the experiment. The experimental results show that the study can improve the design level of engineering problems and provide reference for the design of the gun powder spiral dosing device.

**Keywords:** gun powder; spiral dosing; dosing quantity

### 0 引言

发射药一般装在发射药包内, 主要用来发射弹丸, 其装药质量直接影响炮弹的发射性能。发射药必须经精确称量后, 才能被装入发射药包<sup>[1]</sup>。随着我国军工自动化程度的不断提高, 以及基于火工品安全操作的要求, 现在的各军工业企业已基本采用螺旋分料精密称量技术来实现对发射药等粒状药剂的自动精确称量。在加药方式上综合考虑精度和速度 2 方面的因素, 先使用较高速度粗加药, 加药量达到设定值后, 再使用低速度精加药, 直至达到要求的称量数值。

螺旋分料精密称量技术主要通过螺旋分料装置+高精度电子天平来实现对发射药的精确分料与称量。高精度称量技术应用已日趋成熟, 笔者主要针对螺旋分料装置展开研究, 建立数学模型来分析螺旋分料过程, 并通过实验来验证数学模型的正确性。

### 1 螺旋分料装置结构

如图 1 所示, 发射药螺旋分料装置包括分料斗、

伺服电机、传动轴、螺杆轴、螺杆、进料斗、出料斗、电子天平, 主要通过伺服电机控制螺杆对发射药进行精准分料。针对不同松散密度及流动性的物料, 可更换相应轴径和节距的螺杆来实现分料。

工作前, 从进料斗将药剂加入分料斗内。工作时, 由伺服电机带动传动轴、螺杆轴及螺杆转动, 整个加料过程是通过 PLC 控制伺服电机的旋转圈数来判断加料量, 通过控制伺服电机的旋转速度来判别加料精度<sup>[2]</sup>。PLC 根据设定参数控制伺服电机先快速旋转进行粗加料, 到达设定值后由程序对称量数据进行对比分析计算, 再控制伺服电机慢速旋转进行精加料, 并在临界点附近采用伺服电机断续旋转的点动模式进行补药, 避免加药过冲, 以保证分料称量过程中反馈称量值的精确性和及时性。

### 2 螺旋分料装置数学模型

#### 2.1 力学模型

发射药螺旋分料装置在分料过程中, 药剂在旋转螺旋的影响下并非单纯沿螺旋轴线做直线运动,

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-07-19

作者简介: 杜木伟(1988—), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 从事弹药装药自动化设备及生产线研究。E-mail: 424442066@163.com。

而是沿螺旋轴做空间复合运动。螺杆为等螺距等直径的单头螺旋，螺旋面升角为  $\alpha$ 。将此螺旋面展开用一条斜直线来表示，取距离螺旋轴线  $r$  处的药剂颗粒  $M$  作为研究对象，对其进行受力分析，受力图如图 2<sup>[3]</sup>所示。

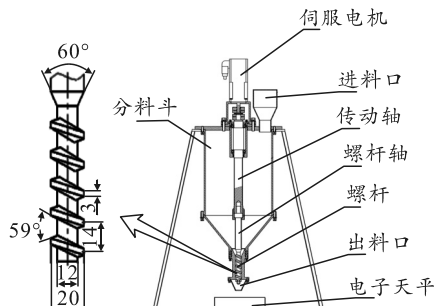


图 1 螺旋分料装置结构

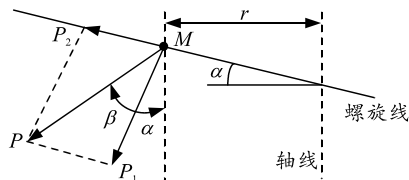


图 2 颗粒受力分析

假设螺旋面作用在药剂颗粒  $M$  上的力为  $P$ ，由于颗粒与螺旋面存在摩擦， $P$  力的方向与螺旋面的法线方向偏离了  $\beta$  角。将  $P$  力分解为法向分力  $P_1$  和径向分力  $P_2$ 。药剂颗粒  $M$  在  $P$  力的作用下，在螺旋斜面上做沿螺旋面轴向移动和沿螺旋面轴线径向旋转的复合运动，取轴向速度为  $v_1$ ，圆周速度为  $v_2$ ，合成速度为  $v$ 。速度分析如图 3 所示。

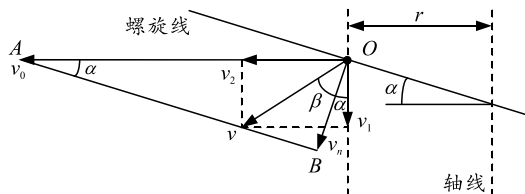


图 3 颗粒速度分析

## 2.2 速度模型

假设伺服电机的转速为  $n$ ，角速度为  $\omega$ ，螺杆的角速度也为  $\omega$ ，距离螺旋轴线半径  $r$  处的  $O$  点药剂颗粒  $M$  的运动速度可由图 3 所示的速度三角形求出。 $O$  点的线速度  $v_0$  就是药剂颗粒  $M$  受旋转螺旋影响的牵连运动的速度，用  $OA$  表示，方向沿  $O$  点回转的切线方向；药剂颗粒  $M$  相对于螺旋面的相对滑动速度用  $AB$  表示，方向平行于  $O$  点的螺旋线；药剂颗粒  $M$  的绝对运动速度  $v_n$  沿螺旋面上  $O$  点的法线方向，用  $OB$  表示。对合成速度  $v$  进行分解，可得到药剂颗粒  $M$  自  $O$  点移动的轴向速度  $v_1$  和圆周

速度  $v_2$ ，其中， $v_1$  是螺旋面上药剂颗粒的轴向移动速度， $v_2$  则是螺旋面对药剂颗粒移动的阻滞和干扰。对图 3 进行分析，可得到药剂颗粒  $M$  轴向移动的速度表达式为：

$$v_1 = v \cos(\alpha + \beta),$$

由于

$$v = v_n / \cos \beta, \quad v_n = v_0 \sin \alpha,$$

所以

$$v_1 = v_0 (\sin \alpha / \cos \beta) \cos(\alpha + \beta). \quad (1)$$

由于

$$\tan \alpha = t / 2\pi r, \quad \sin \alpha = (t / 2\pi r) / \sqrt{1 + (t / 2\pi r)^2},$$

$$\cos \alpha = 1 / \sqrt{1 + (t / 2\pi r)^2}, \quad v_0 = \omega r = (2\pi n / 60) r.$$

将上述各式代入式(1)，可得到：

$$v_1 = (2\pi n / 60) (t / 2\pi r \tan \alpha) (\sin \alpha / \cos \beta) \cos(\alpha + \beta).$$

将上式化简后为：

$$v_1 = (nt / 60) ((1 - \tan \beta (t / 2\pi r)) / (1 + (t / 2\pi r)^2))$$

令  $\mu = \tan \beta$ ，再代入上式，可得轴向速度：

$$v_1 = (nt / 60) ((1 - \mu (t / 2\pi r)) / (1 + (t / 2\pi r)^2)). \quad (2)$$

式中： $t$  为螺杆螺距，mm； $n$  为螺杆转速，r/min； $\mu$  为颗粒与螺旋面的摩擦系数。

从式(2)可以看出：在转速一定的情况下，选择合适的螺距，药剂颗粒可以得到较好的轴向移动速度，螺距过大或者过小，都会影响颗粒的轴向移动速度。

根据图 3 的分析，药剂颗粒  $M$  的圆周速度表达式为：

$$v_2 = v \sin(\alpha + \beta).$$

代入前述的各表达式并化简，可得圆周速度为：

$$v_2 = (nt / 60) ((\mu + t / 2\pi r) / (1 + (t / 2\pi r)^2)). \quad (3)$$

将式(3)对  $r$  求 1 阶导数，并令其值  $dv_2/dr = 0$ ，可得对应于  $v_{2max}$  的半径为

$$r_{max} = \left[ (\mu + \sqrt{1 + \mu^2}) / 2\pi \right] t.$$

从上式可以看出：当摩擦系数一定时，螺杆外径与螺杆螺距存在一定的线性关系，只有合理匹配螺杆螺距和螺杆外径的值，才能使药剂颗粒获得最佳的轴向速度和圆周速度。

## 2.3 分料量模型

上述分析的力学模型和速度模型是根据药剂颗粒的下料特征，通过计算推导出的单个颗粒运动的数学表达式，可以知道螺旋分料过程中药剂颗粒的运动情况与螺杆参数及外部条件之间的逻辑关系，但并没有建立一个可以描述整个颗粒群的运动模

型, 还需进一步分析, 找到可以反映整个分料过程颗粒运动关系的数学表达式。

分料量是表现螺旋分料过程所有药剂颗粒运行情况的参数, 同时也是衡量发射药螺旋分料装置工作过程的重要指标, 其值与螺旋分料装置的分料速度和分料精度密切相关。可以通过建立分料量的数学模型, 来反映整个药剂颗粒群的运动情况。发射药螺旋分料装置的单位时间分料量可按下式计算<sup>[4-5]</sup>:

$$Q' = \varphi S \rho v_1 / 1000 \quad (4)$$

式中:  $Q'$  为单位时间螺旋分料量, g/s;  $S$  为螺旋槽内药剂层横截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\rho$  为发射药剂密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\varphi$  为螺杆螺旋槽填充系数。

药剂层横截面积的表达式为:

$$S = \pi(D^2 - d^2) / 4$$

式中:  $D$  为螺杆外径, mm;  $d$  为螺杆轴径, mm。

在实际的发射药螺旋分料过程中, 通常不考虑轴向阻滞对分料过程的影响; 因此, 药剂颗粒在螺旋面上的轴向移动速度  $v_1 \approx nt/60$ 。

将上述各式代入式(4)可知:

$$Q' = [\pi(D^2 - d^2) / 240000] \varphi \rho n t \quad (5)$$

由上式可以看出, 单位时间分料量  $Q'$  与螺杆外径  $D$ 、螺杆轴径  $d$ 、螺杆螺距  $t$ 、螺杆转速  $n$ 、填充系数  $\varphi$ 、发射药剂密度  $\rho$  有关。当发射药剂及螺旋分料装置的结构确定后, 即发射药剂密度  $\rho$ 、螺杆外径  $D$ 、螺杆轴径  $d$ 、螺杆螺距  $t$ 、填充系数  $\varphi$  为已知, 则发射药的单位时间分料量只能通过调整螺杆转速  $n$  来控制。

### 3 螺旋分料装置分料试验

基于发射药分料与称量过程的操作安全性要求, 笔者拟采用松散密度及流动性等物料特性与发射药近似的旱菜籽作为替代物料, 对螺旋分料装置进行试验研究, 便于后续开展对所建立数学模型正确性的验证, 并据此判断螺旋分料装置的分料速度与分料精度是否满足要求。

螺旋分料装置在进行分料试验时, 分料总时间设为 19 s, 粗加料时间 10 s, 精加料时间 9 s, 重复进行 20 次试验。试验步骤如下:

1) 通过分料斗向进料斗加入旱菜籽, 启动控制系统;

2) 伺服电机按设定程序以较高转速 60 r/min 驱动螺杆旋转进行粗加料 10 s;

3) 设定时间到达后控制程序转换为精加料;

4) 伺服电机按控制程序以较低转速 3 r/min 驱动螺杆旋转进行精加料 9 s;

5) 设定时间到达后螺杆停止旋转, 分料过程结束, 对收集的旱菜籽进行称量并记录, 试验数据如表 1 所示;

6) 启动控制系统, 进行下一次粗、精加料操作。

表 1 试验数据记录 g

序号	分料量 $Q$	序号	分料量 $Q$
1	20.006	11	19.989
2	20.026	12	20.028
3	20.002	13	19.983
4	19.987	14	20.037
5	19.998	15	20.005
6	20.010	16	19.997
7	19.995	17	20.001
8	20.032	18	19.980
9	20.016	19	20.017
10	19.994	20	20.009

从表中可知: 螺旋分料装置在进行实际替代物料试验时, 分料量的最大值  $Q_{\max} = 20.037$  g, 最小值  $Q_{\min} = 19.980$  g。

### 4 模型正确性验证

笔者采用的替代物料旱菜籽的密度为 680  $\text{kg}/\text{m}^3$ <sup>[6]</sup>, 螺旋分料装置螺杆的设计参数如表 2 所示。由于本套螺旋分料装置是垂直向下输送, 可以认为旱菜籽完全充满整个螺杆的螺旋槽, 则取填充系数  $\varphi = 1$ 。

表 2 螺杆参数 mm

参数名称	螺杆外径 $D$	螺杆轴径 $d$	螺杆轴距 $t$
数值	20	12	14

将螺杆各参数的值代入式(5), 分别得到单位时间内旱菜籽粗加料和精加料的分料量。

粗加料:

$$Q'_c = \frac{3.14 \times (20^2 - 12^2)}{240000} \times 1 \times 0.68 \times 60 \times 14 = 1.913 \text{ g/s}$$

精加料:

$$Q'_j = \frac{3.14 \times (20^2 - 12^2)}{240000} \times 1 \times 0.68 \times 3 \times 14 = 0.0956 \text{ g/s}$$

在分料总时间内, 本套螺旋分料装置分料量的计算值为:

$$Q_0 = Q'_c \times 10 + Q'_j \times 9 = 1.913 \times 10 + 0.0956 \times 9 = 19.99 \text{ g}$$

通过上述计算, 得到螺旋分料装置的分料量计算值为 19.99 g。将计算数据与实际试验数据进行对比分析可知, 分料量的试验值与计算值差值的最大值为:

$$\Delta Q_{\max} = Q_{\max} - Q_0 = 20.037 - 19.99 = 0.047 \text{ g.}$$

试验值与计算值差值的平均值为：

$$\Delta Q_{\text{ave}} = \sum |Q_i - Q_0| / 20 = 0.0177 \text{ g.}$$

最大偏差为：

$$\delta_{\max} = \Delta Q_{\max} / Q_0 = 0.047 / 19.99 = 2.35\%。$$

平均偏差为：

$$\delta_{\text{ave}} = \Delta Q_{\text{ave}} / Q_0 = 0.0177 / 19.99 = 0.88\%。$$

由上可知：发射药螺旋分料装置分料量的计算值与试验值之间的误差均在允许范围内；因此，认为笔者建立的分料量数学模型正确，可以为发射药螺旋分料装置的分料过程研究提供参考<sup>[7]</sup>。

## 5 结束语

笔者建立发射药螺旋分料装置的力学、速度及分料量等数学模型，并采用旱菜籽作为替代物料进行试验，验证了所建立的数学模型的正确性。理论研究与试验结果表明：该发射药螺旋分料装置可以

\*\*\*\*\*

(上接第 60 页)

表 6 回归分析模型预测数据

月份	实际消耗量 m/t	预测消耗量 m/t	残差
1	266.181	247.693	18.488
2	197.971	173.715	24.256
3	438.282	421.004	17.278
4	281.661	270.076	11.585
5	415.811	411.269	4.542
6	183.380	182.965	0.415

### 4.2 结果分析

笔者建立的预测模型对部分影响因素的分析相对粗略，同时也忽略了飞机处置特情、飞机退油等情况下消耗的油料。但从图 1 及表 6 可以看出：此模型预测该场站保障飞机的航空油料消耗数据，能够表现出较好的拟合效果和预测效果，用它作系统的油料消耗预测辅助决策模型是相对较好的选择。

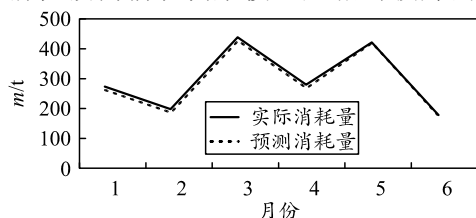


图 1 实际消耗量与预测消耗量折线

## 5 结束语

利用多元线性回归分析模型可以相对准确地预测油料消耗。该模型建立的基础是飞行训练的各类统计数据。这就要求加强与训练、机务、气象等部

用于发射药的分料过程，再辅以高精度的电子天平进行称量，可以提高发射药包的装药质量，从而保证炮弹的发射性能。

## 参考文献：

- [1] 朱珠, 张博, 刘彬. 发射药自动称量技术对比及发展分析[J]. 机械与电子, 2015(4): 75-78.
- [2] 易茂光, 张明明, 冉靖, 等. 弹药熔铸装药水浴处理凝固控制技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 14-18.
- [2] 张东海. 螺旋输送机的优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [3] 向冬枝, 徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术, 2010(1): 29-33.
- [4] 曾鸣, 司秀芬, 韩超, 等. 竖直向下螺旋输送机输送性能的试验研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(1): 60-63.
- [5] 李诗龙. 油菜籽的物理特性浅析[J]. 中国油脂, 2005(2): 17-20.
- [7] 刘钧亮, 刘毅, 王浩, 等. 数码电子雷管自动装配生产线[J]. 兵工自动化, 2019, 38(8): 37-39.

门沟通协调，针对统计数据进行定量分析后进行油料保障方案的制定，实行按计划定量保障来保证合理加油量，不断提高日常训练中航空油料保障的科学性，完成油料保障任务，对场站油库的油料保障工作是一种很好的理论借鉴<sup>[8-9]</sup>。

## 参考文献：

- [1] 贾保华, 但琦, 黄家亮. 油料消耗神经网络组合预测模型[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(4): 62-65.
- [2] 张斐然, 胡扩, 罗俊. 高原地区航空兵作战油料保障对策分析[J]. 训练与科技, 2013, 34(3): 20-22.
- [3] 李京伟. 模拟飞行训练装备维修保障能力建设研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(S1): 113-116.
- [4] 殷武, 黄磊. 军用飞机油料消耗及标准分析[J]. 训练与科技, 2012, 33(2): 1-3.
- [5] 张梁, 崔崇立, 贾徐伟, 等. 基于影响因素主成分分析的航材消耗预测模型[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 50-54.
- [6] 李铁民. 军事定量分析方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 52-55.
- [7] 杨祺煜, 张广楠, 荀焯. 广义回归神经网络在装甲部队油料消耗预测中的应用[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(2): 82-85, 89.
- [8] 王冰, 刘岩, 周庆忠. 军队油料消耗预测策略研究[J]. 中国储运, 2011, 22(3): 111-113.
- [9] 龚杰, 雍歧东, 于力, 等. 基于云模型和层次分析法的油料保障能力评估[J]. 兵工自动化, 2018, 37(2): 66-69.