

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.014

## 基于 Rocky/Ansys Workbench 的发射药自动称量包装过程仿真

史慧芳, 郭进勇, 胡翔, 杨治林, 李全俊, 季丹丹

(中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高发射药称量精度和生产效率, 针对 26、16 和 5 mm 3 种不同直径的发射药, 采用三级加料方式结合 Rocky 离散元软件对连续加料称量过程进行动态仿真, 确定称量料斗放料板的工作载荷。基于 Ansys Workbench 有限元软件对称量料斗的受力变形进行仿真分析, 判断是否漏料且获得卸料时间。动态仿真结果表明: 称量装置结构设计满足承载 80 kg 装药量使用要求, 不会发生漏料; 实现了称量过程的可视化, 能较准确地反映实际称量包装工况, 对称量包装过程的精确控制具有指导意义。

**关键词:** 发射药; 定量称量; 应力; 变形; 仿真分析

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Simulation of Propellant Automatic Weighing and Packing Process Based on Rocky/Ansys Workbench

Shi Huifang, Guo Jinyong, Hu Xiang, Yang Zhilin, Li Quanjun, Ji Dandan

*(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of**China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)*

**Abstract:** In order to improve the propellant weighing precision and production efficiency, the continuous weighing processes of 26, 16 and 5 mm diameters propellant were dynamically simulated by 3-stage charging mode and Rocky discrete element software, the work load of the discharge plate of the weighing hopper is determined. Based on the Ansys Workbench finite element software, the stress and deformation of the weighing hopper are simulated to determine whether the material is leaking or not, and the unloading time is obtained. The results of dynamic simulation show that the structure design of weighing device can meet the requirement of loading 80 kg, no material leakage will occur, and the visualization of weighing process can be realized, which can accurately reflect the actual weighing and packing conditions. It is the instructive experience for the accurate control of the weighing and packing process.

**Keywords:** propellant; quantitative weighing; stress; deformation; simulation analysis

### 0 引言

现有工厂多采用人工批次计量与加料的方式, 使用的计量装置与设备自动化水平低, 不能满足计量精度与效率的需求, 导致产品质量一致性和性能下降, 进而影响身管武器的使用寿命和作战指标<sup>[1-3]</sup>; 因此, 迫切需要对发射药制备的安全、精确、自动加料与计量装备进行深入研究, 提升我国发射药生产过程的连续化与自动化水平。

近年来, 研究人员提出了一些新型连续精确加料计量装置<sup>[4-6]</sup>, 岳显等<sup>[7]</sup>针对颗粒状发射药定量称量的自动化需求, 研制了一套自动定量称重系统, 实现了上料、定量称重和装药过程全自动化。汪庆华等<sup>[8]</sup>设计了一种粉料安全、连续加料计量装置, 计量误差可小于 1%。

称量过程中, 物料从进料口落到料斗上产生的

冲击载荷, 难免对部件受力产生影响。数值仿真方法是研究加料过程中颗粒动力学问题的有力手段<sup>[9-12]</sup>。根据相关文献研究<sup>[13-14]</sup>: 贮料卸料流动时的结拱—破拱引发了筒仓卸料时仓壁侧压力不断地上下波动, 拱效应位于卸料口附近。刘克瑾等<sup>[15]</sup>采用离散元数值模拟, 从细观颗粒层次探求卸料时贮料内部土拱效应与宏观仓壁卸料压力增大及产生震荡的本质联系, 表明拱的形成是仓壁压力增大的根本原因。称量完成后的物料放料装箱时, 放料时间的长短会对箱体内部形成的堆积角大小造成影响, 使物料溢出箱体, 影响包装质量。孔淼等<sup>[16]</sup>研究了一种粒状发射药的自动包装控制技术, 实现了粒状发射药的自动称量包装, 提高了包装质量和包装效率。

笔者以发射药自动称量单元为研究对象, 针对

收稿日期: 2021-04-20; 修回日期: 2021-05-26

作者简介: 史慧芳(1984—), 男, 河南人, 高级工程师, 从事高危产品先进制造研究。E-mail: 42132505@qq.com。

称量包装过程中加料精度与效率、放料门强度和形变等问题，利用离散元和有限元结合的方法对自动称量装置进行了仿真模拟分析，获得了控制加料过程中称量精度的方法，得到了装置在现有工艺条件下允许的最小物料粒径，可为发射药自动称量过程工艺参数精确控制、设备结构优化设计提供指导。

## 1 自动定量称重单元设备组成

发射药自动定量称重单元设备包括称量斗、称重传感器、防爆工业称重终端、气动式放料门等，其结构如图 1 所示。

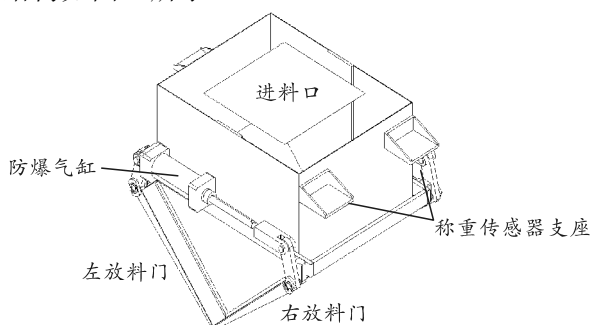


图 1 自动称重设备结构

采取淋浴式加料，发射药从进料口进入称重装置进行称重，进料口尺寸  $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ ；两侧气缸控制放料门闭合，当达到称重设定值后，加料通道关闭，气缸打开放料门完成下料。如图 2 所示，称量斗高  $H=380\text{ mm}$ ，内径  $D=700\text{ mm}$ ，放料门宽度  $W=500\text{ mm}$ ，长度  $L=710\text{ mm}$ ，夹角  $\theta=90^\circ$ 。

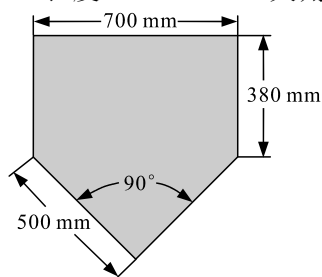


图 2 称量料斗几何尺寸

## 2 加料过程离散元仿真

Rocky 离散元仿真软件能够根据真实物料的形状、尺寸建立颗粒 CAD 模型，准确描述物料的物理性质和力学性能，充分考虑颗粒之间、颗粒与壁面的相互摩擦作用。

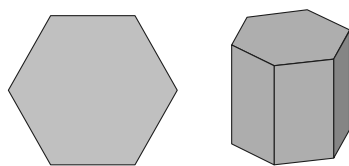


图 3 发射药离散元模型

采用 UG 建立 3 维模型，将模型导入 Rocky 软件中对加料称量过程进行数值模拟。如图 3 所示，发射药物料颗粒采用正六棱柱结构，长径比 1:1，直径大小包括 26、16 和 5 mm 3 种。根据生产效率测算，料斗单次填满时间为 40 s，填充质量为 80 kg。由于定量称重过程是一个动态过程，要准确计量物料的重量使其尽量接近设定的标准值，就需要同时兼顾加料速度与称重传感器稳定性；因此，采取三级加料方式，将加料过程分为粗加料阶段、中加料阶段和精加料阶段。

图 4 给出了三级加料过程的质量变化曲线，各阶段的加料情况如下：

1) 粗加料阶段：加料质量 64 kg，加料速度为 8 kg/s，时间 0~8 s，加药颗粒直径为 26 mm，加料速度较快，需完成 80% 的加料质量。在此阶段短时间内会有大量发射药进入到称重装置中，对结构部件及称重传感器的冲击较大，导致质量结果检查不稳定，检测值误差大；

2) 中加料阶段：加料质量 12 kg，加料速度为 1 kg/s，时间 8~20 s，加药颗粒直径为 16 mm，加料速度较慢，需完成 95% 的加料质量。此阶段加料速度相对于粗加料阶段较慢，在加料的同时减缓了对称重传感器的冲击，使称重传感器的检测值波动减小，防止在继续较快加料的同时出现加药量瞬时超出设定值的情况出现；

3) 精加料阶段：加料质量 4 kg，加料速度为 0.2 kg/s，时间 20~40 s，加药颗粒直径为 5 mm，加料速度缓慢，需完成全部加料质量。此阶段加料量会加至预期值，是保证称量精度的关键，通过低速精加料，确保精度和稳定性；同时进行实时称重传感器监测，达到设定值后立即停止加料。

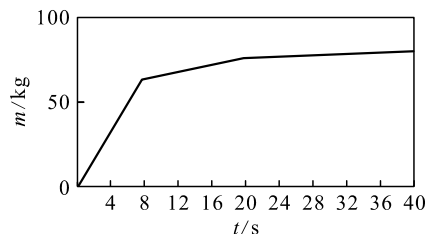


图 4 三级加料过程质量-时间变化曲线

三级加料后料斗内发射药的颗粒分布如图 5 所示。整个料斗在加满 80 kg 发射药药粒后，加料空间仍有较大富余，完全能够满足当前药量的称量。料斗内粒径为 26 mm 的药粒占据了大部分空间，主要位于料斗下方，粒径为 16 和 5 mm 的药粒占据的空间较小，位于料斗上方，通过观察发现，部分 5 mm

药粒嵌入在 26 和 16 mm 物料中间，填充了物料颗粒间的空隙，从而增加了物料的堆积密度；实际生产中在加料的同时，料斗通过振动装置发生不断的振动，药粒的分散性会更加均匀，整体物料占据的体积相对更小。

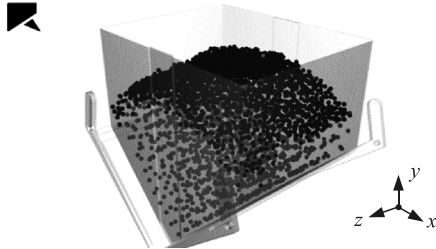


图 5 发射药填充分布

加料过程中，随着药粒的不断加入，放料门受到物料的作用力不断增加。图 6 给出了左右放料门在物料填充过程中重力方向的受力情况。左右放料门的受力情况基本相同，加料开始后 0.3 s 放料门受力从 0 变为 -1.65 N，可推断出物料滞空时间为 0.3 s；随后放料门受到力载荷成线性的快速增长，8 s 内从 0 增加到 320 N 左右，单位时间内重力方向的力载荷增加量约为 40 N/s，为主要的受力来源。中加料阶段 2 条曲线出现小部分分离。这是由于放料门发生微小形变以及物料分布有差别，导致物料在称量斗中重力方向的力分量发生变化，左右两侧出现受力分布不均匀；精加料阶段物料颗粒直径小，加入量少，放料门的受力变化趋势缓慢增加，放料门在重力方向上的受力在 40.1 s 时达到稳定，这是由于加料结束时下料距离减小，造成滞空时间缩短。实际加入物料质量为 80.08 kg，与设定值误差为 0.1%。加料结束后左侧放料门的最终受力为 -387 N，右侧为 -388.5 N，将此时刻的受力载荷导出，作为下一步强度分析的边界条件。

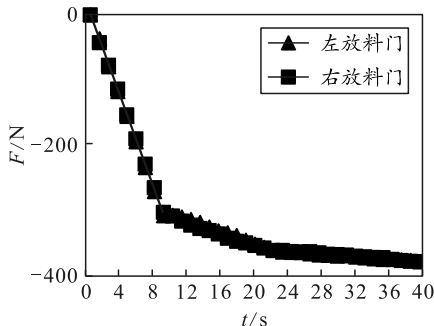


图 6 放料门重力方向力-时间变化曲线

### 3 称量料斗有限元分析

使用 Q235 钢作为主体材料。为提高网格质量，将不影响结构应力的倒角和孔隙删除。采用四面体

网格，网格尺寸控制为 10 mm，总计 334 367 个单元，692 394 个节点。称量设备有限元模型结构如图 7 所示。称量料斗顶部安装称重传感器，支座处施加固定约束，将离散元仿真过程得到的物料填满时受力情况施加在放料门左右挡板上，分析放料门的强度及刚度。

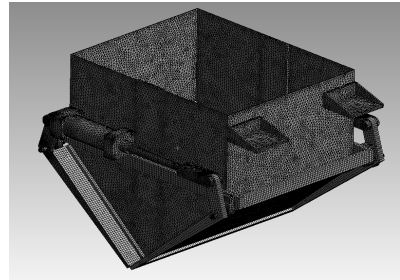
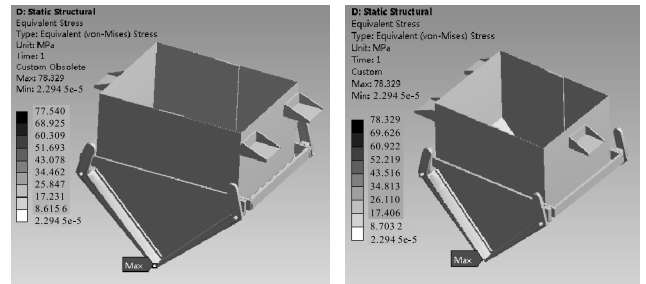


图 7 有限元模型

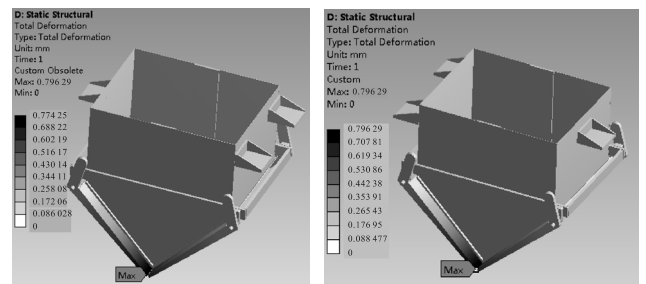
称量料斗的受力情况如图 8 所示。图 8(a)中，左侧放料门最大应力值为 77.5 MPa，位于底部靠边缘位置；图 8(b)中右侧放料门最大应力值为 78.3 MPa，也出现在底部边缘处。两者的最大应力结果远小于 Q235 钢材料的屈服强度，称量料斗满足强度要求。



(a) 左侧放料门应力 (b) 右侧放料门应力

图 8 称量料斗应力

称量料斗的变形云图如图 9 所示。图 9(a)中，左侧放料门最大变形位于底部靠边缘位置，最大位移值为 0.77 mm；图 9(b)中，整个料斗最大变形发生在右侧放料门下端边缘处，最大位移值约为 0.8 mm，材料在弹性变形范围内，称重料斗满足刚度要求。



(a) 左侧放料门变形 (b) 右侧放料门变形

图 9 称量料斗变形

为进一步评估称量料斗装填的发射药是否发生漏料,图 10 给出了左、右两侧放料门下端整个边缘的变形曲线以及 2 条变形曲线的叠加值。左侧放料门位移沿边缘从 0.8 mm 缓慢降低到 0.52 mm,右侧放料门相应位置位移沿边缘从 0.48 mm 缓慢上升到 0.77 mm,2 个放料门叠加曲线显示下料的最大缝隙位于放料门下端中心处,最大值为 1.4 mm。表明该装备在 80 kg 装药量下的最小允许粒径为 1.4 mm。模拟物料的最小边界尺寸为 5 mm,大于左右放料门间的最大缝隙值,因此不会出现漏料情况。

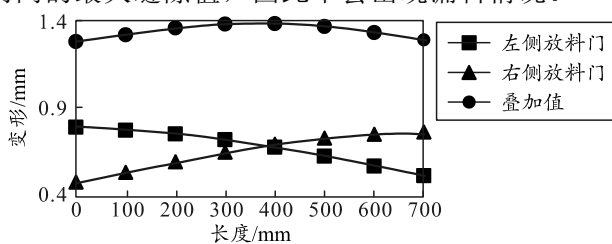


图 10 放料门底边变形曲线

#### 4 卸料过程仿真

设置放料门从加料开始后 40.5 s 开始放料,左右 2 个放料门分别以  $10(^{\circ})/s$  的转速打开。图 11 显示了放料过程中 4 个关键时刻各物料粒子的下料速度分布图。 $t=40.5$  s 时开始放料,各粒子速度几乎为 0,物料整体处于静止状态。 $t=41.5$  s 时,上部分粒子仍处于静止状态,出口处的粒子下料速度加快,最大达到 1.12 m/s。当  $t=42.5$  s 时,物料下料速度达到最大 2.47 m/s。

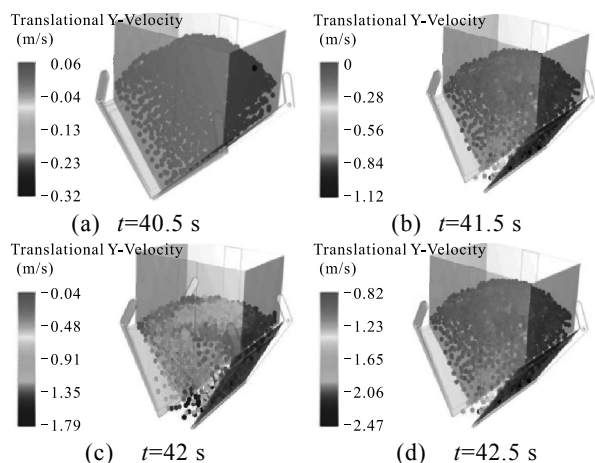


图 11 不同时刻落料速度

从下料曲线(图 12)可以看出:整个下料过程从 40.5 s 开始,主要下料过程集中在 41.5 s~42.5 s,42.7 s 时料斗内质量为 0,表明下料总时间为 2.2 s,左右放料门均旋转  $22^{\circ}$ ,此时两放料门之间的夹角  $\theta=90^{\circ}-2\times 22^{\circ}=46^{\circ}$ ,整个下料过程的平均下料质量

速度为 36.4 kg/s。

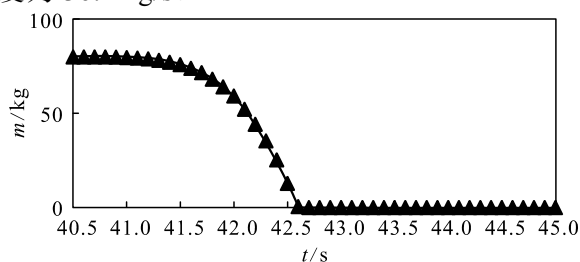
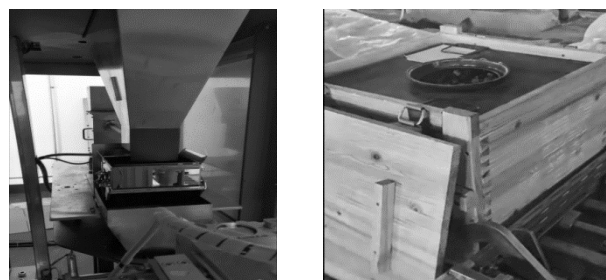


图 12 卸料过程质量-时间变化曲线

为进一步验证仿真结果的有效性和准确性,根据仿真设计的三级加料过程和卸料过程,采用替代料完成了发射药的自动称量包装生产试验,现场试验结果如图 13 所示,试验结果与仿真结果表现出较好的一致性。试验结果表明:当前结构下的料斗完全满足 80 kg 装药量的强度和刚度要求,加料时现场未发生漏料现象,加料时间与卸料时间与仿真结果相同,装箱后的产品质量一致性高,完全满足包装生产效率的要求。



(a) 称量过程

(b) 装箱后

图 13 现场称量试验结果

#### 5 结论

根据不同直径的发射药,采用三级加料方式,对发射药称量包装过程进行仿真分析,可得出以下结论:

1) 在自动称量包装过程中物料运动情况较为复杂,动态仿真实现了称量过程的可视化,得到了加料各阶段的质量与时间的变化曲线以及物料滞空时间,为加料质量的精确控制提供了理论指导。

2) 该装备在 80 kg 装药量下不会发生漏料,物料最小允许粒径为 1.4 mm,卸料过程总时间为 2.2 s,卸料完成时两放料门之间的夹角为  $\theta=46^{\circ}$ ,平均下料质量速度为 36.4 kg/s,保证了物料的包装生产效率。

3) 实际加入物料质量与设定值误差为 0.1%,发射药称量包装过程模拟结果和试验具有较好的一致性,在称量过程中可以更加准确模拟结构的受力情况。仿真结果表明:称量料斗的强度、刚度均满

足使用要求, 且有较大的设计余量, 可对结构进一步优化以提高经济性。

参考文献:

[1] 徐达, 韩保红, 程兆刚, 等. 小口径火炮发射药自动定量技术研究现状和发展趋势[C]//第 16 届北方七省市力学学会学术会议论文集. 河南: 第 16 届北方七省市力学学会, 2016: 373-375.

[2] 王亚微. 高能低敏感发射药安定性与安全性研究[D]. 太原: 中北大学, 2018: 1-8.

[3] 汪庆华. 火药中固体组分的连续加料与计量技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 2-4.

[4] 谢强, 张振中, 张路遥, 等. 乌洛托品连续精密加料的双重计量方法[J]. 高校化学工程学报, 2019, 33(5): 1079-1085.

[5] 鲁磊明, 邓国栋, 汪庆华, 等. 超细含能固体粉料流动性测试及加料仓设计[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(6): 26-31.

[6] 邓国栋, 刘宏英, 郭效德, 等. 黑索今粉料连续计量加料技术研究[J]. 爆破器材, 2012, 41(6): 23-26.

[7] 岳显, 孔森. 粒状发射药自动定量称重系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(10): 83-85.

[8] 汪庆华, 邓国栋, 李大勇. 黑索今粉体安全、连续加料

\*\*\*\*\*

(上接第 46 页)

4 结束语

该投放控制系统以工控机和计数器板卡为控制时序核心, 通过配套相应的投放、助推、高速摄影以及瞬时力测量装置, 实现了多达 4 路投放的任意组合方式的自动精确时序控制、投放轨迹可视化判读分析, 同时验证了助推方式的可靠性, 可以满足低速风洞飞机外挂物投放试验需求。

目前, 该系统已成功运用于某型号多达 4 路外挂物投放风洞试验中, 得到了多种投放方式的试验数据, 系统可行性得到充分检验。

\*\*\*\*\*

(上接第 51 页)

[9] KELLENBRINK C, HELBER S. Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure[J]. European Journal of Operational Research, 2015, 246(2): 379-391.

[10] 陆志强, 杨超. 基于项目网络拆分决策的多项目协同调度问题建模[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(2): 193-201.

[11] 李向. 遗传算法及在计划评审技术(PERT)中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2008.

与计量装置[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 95-98.

[9] KOBYLKA R, MOLEND A. DEM simulations of loads on obstruction attached to the wall of a model grain silo and of flow disturbance around the obstruction[J]. Powder Technology, 2014, 256: 210-216.

[10] 赵伟. 粉体料仓下料过程的实验与数值模拟研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015: 3-18.

[11] 俞良群, 邢纪波. 筒仓装卸料时力场及流场的离散单元法模拟[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 15-18.

[12] 肖昭然, 王军, 何迎春. 筒仓侧压力的离散元数值模拟[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2006, 27(2): 10-12, 16.

[13] 张昭, 刘克瑾, 肖昭然, 等. 筒仓仓壁摩擦对仓壁侧压力影响的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 88-92.

[14] OLDAL I, KEPPLER I, CSIZMADIA B, et al. Outflow properties of silos: The effect of arching[J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(3): 290-297.

[15] 刘克瑾, 肖昭然, 王世豪. 基于离散元模拟筒仓贮料卸料成拱过程及筒仓壁压力分布[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 277-285.

[16] 孔森, 彭旭, 岳显. 一种粒状发射药的自动包装控制技术[J]. 兵工自动化, 2016, 35(2): 86-89.

参考文献:

[1] 薛飞, 金鑫, 王誉超, 等. 内埋武器高速投放风洞试验技术[J]. 航空学报, 2017, 38(1): 64-70.

[2] 宋笛. 飞行器内置气动式投放装置及实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013: 3-14.

[3] 王勳年, 孙正荣, 刘伯均. 低速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 281-290.

[4] 张召明. 飞机外挂物投放低速风洞试验技术研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2003, 35(3): 318-321.

[5] 李周复. 风洞特种试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010: 109-111.

[6] 周霭如, 林伟健. C++程序设计基础[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[12] GONCHAROV E N, LEONO V V. Genetic algorithm for the resource-constrained project scheduling problem[J]. Automation and Remote Control, 2017, 78(6), 1101-1114.

[13] 谭伟. 基于遗传算法的多项目网络计划优化研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.

[14] 王杰, 杨坤, 郭永青, 等. 基于网络计划技术的道路施工组织优化[J]. 交通科技与经济, 2019, 21(6): 37-41.

[15] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 200-205.