

农用无人机药箱防晃内腔结构优化设计

李 熙, 张俊雄, 曲 峰, 张文强, 王大帅, 李 伟

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘 要: 针对农用无人机易受药液晃动造成失稳的问题, 分别采用水平阻尼格栅和竖直阻尼格栅对药箱的内腔结构进行优化设计。以激励方向液体重心相对箱体的位移幅值和液体对箱体侧壁的冲击力为评价标准, 采用 Fluent 软件中的流体体积 (volume of fluid, VOF) 多相流及非稳态 k - ϵ 湍流模型对无人机侧向急停激励下, 10%、30%、50%、70%和 90% 的充液率, 格栅布置高度为箱体高度的 30%、50%和 70%, 采用不同槽数的水平和竖直阻尼格栅的防晃效果进行了仿真。仿真结果表明, 2 种阻尼格栅都减小了晃动液体在激励方向的重心变化。在液体对箱体冲击力方面, 当液面高度和布置位置重合时水平阻尼格栅会造成液体对箱体的冲击力分别增加 34.4%、24.5%和 15.1%, 其余位置的水平格栅可以减小液体对箱体的冲击力, 并在槽数为 6 时趋于稳定; 竖直阻尼格栅使 30%、50%和 70%充液率下液体对药箱的冲击力降低了 42.6%、51.1%和 61.7%, 并在格栅槽数为 9 时趋于稳定。据此, 选取在 30%和 70%的药箱高度位置布置 6 槽的水平阻尼格栅以及 9 槽竖直格栅作为最终药箱的内腔结构, 并制作了实物进行台架试验, 试验结果与软件仿真结果相符, 优化改进后的药箱对液体的晃动有较好的抑制作用。

关键词: 无人机; 优化; 设计; 药箱; 计算流体力学; 阻尼格栅; 液体晃动

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.010

中图分类号: S251

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-18-0072-08

李 熙, 张俊雄, 曲 峰, 张文强, 王大帅, 李 伟. 农用无人机药箱防晃内腔结构优化设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 72-79. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.010 http://www.tcsae.org

Li Xi, Zhang Junxiong, Qu Feng, Zhang Wenqiang, Wang Dashuai, Li Wei. Optimal design of anti sway inner cavity structure of agricultural UAV pesticide tank[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(18): 72-79. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.18.010 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着中国农业生产技术的发展, 农用无人机的使用率也逐步提升, 在推广使用过程中, 农用无人机的安全与稳定性不足的问题逐渐凸现^[1], 其中无人机药箱内药液的晃动是导致其稳定性不足的一个重要原因。目前在农用无人机领域, 研究集中在变量施药系统设计^[2-3]、施药后雾滴沉积规律^[4-5]、飞控稳定性^[6-7]及无人机遥感技术^[8-9]等方面, 而农用无人机药箱的防震荡要求才刚刚引起人们的重视, 一些研究者从内部结构上进行了优化设计^[10-12], 但效果不尽如人意。

参考目前在航空航天领域对贮箱内液体晃动的研究, 并将其推广到农用无人机领域可知: 无人机在起停、加速、减速、转向等产生加速度的状态下, 会引起药箱内液体的重心发生变化, 导致无人机系统整体重心发生偏移^[13-15]。同时, 在加速度的作用下, 药箱内液体会对侧壁产生冲击力, 以上 2 个因素直接影响无人机整体安全性与稳定性^[16]。因此, 研制一种能减轻药液振荡的药箱对提升农用无人机的安全与稳定性有重要的意义。

早期对液体晃动的研究方法主要集中在流体理论分析和建立等效力学模型^[17-18]方法上, 随着计算机技术的发展, 逐步出现了试验分析^[19-20]和计算机仿真分析^[21-22]。本文以长方体箱体为研究对象, 研究阻尼结构的布置位置、阻尼结构形状、箱体充液深度对液体晃动的影响, 通过计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 仿真与试验验证相结合的方式, 分析并得出较优的药箱内腔结构。

1 计算方法及模型

1.1 计算方法

液体晃动是指带有自由分界面的液体在有限的空间内发生运动的现象^[23]。本文主要采用基于有限体积法的 CFD 软件 Fluent 进行计算, 最后进行台架试验验证。在 CFD 中整个流域采用统一的 N-S (Navier-Stokes) 方程描述, 在直角坐标系中 N-S 方程表达式为:

$$\rho \frac{dv_x}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho F_x + \mu \Delta v_x \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_y}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho F_y + \mu \Delta v_y \quad (2)$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho F_z + \mu \Delta v_z \quad (3)$$

式中 F_x 、 F_y 、 F_z 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向的受力, N; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; P 为压力, N; μ 为动力黏性系数,

收稿日期: 2017-04-03 修订日期: 2017-07-07

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200700)

作者简介: 李 熙, 男, 河北衡水人, 研究方向为农业智能装备。

Email: caulixi@126.com

※通信作者: 张俊雄, 男, 广东台山人, 副教授, 研究方向为农业机器人。

Email: cau2007@cau.edu.cn

Pa·s; v_x 、 v_y 、 v_z 分别为流体在 x 、 y 、 z 方向的速度, m/s; t 为流体运动时间, s。

采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 方法^[24]对箱内液体的自由表面进行追踪, VOF 法通过研究网格单元中流体和网格体积比函数 $F(x,y,z,t)$ 来确定自由液面, 从而确定流体的变化。若 $F=0$, 则该单元内无指定相流体; 若 $0<F<1$, 则该单元包含自由表面; 若 $F=1$, 则说明该单元全部为指定相流体所占据, 其守恒形式的传输方程表示为

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial(wF)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中 u 为 x 方向速度, m/s; v 为 y 方向速度, m/s; w 为 z 方向速度, m/s。

1.2 计算模型

药箱外壳简化为长方体壳体模型, 尺寸: $L=260$ mm, $B=132$ mm, $H=242$ mm, $\delta=2$ mm, 其中 L , B , H , δ 分别为药箱的长、宽、高以及壁厚。药箱的内腔布设水平阻尼格栅和竖直阻尼格栅。为探究它们各自对药箱防振荡效果的影响, 将水平阻尼格栅和竖直阻尼格栅分开研究。通过 Gambit 软件对箱体内流场进行网格划分并添加边界条件, 利用 Fluent 软件中的 VOF 多相流模型 (介质分别为水和空气), 对晃动过程中的自由液面进行追踪, 计算模型选择非稳态, k -epsilon 湍流模型, 编写并设置用户定义函数 (user defined function, UDF) 提取液体的重心位置, 利用 Fluent 后处理模块求解液体对箱体侧壁的冲击力。在计算中箱体壁设置为无滑移壁面边界条件, 不考虑液体的传热问题。

2 空箱体液体晃动仿真模拟

无人机的侧向加速度会增大无人机的侧向力, 导致无人机失衡。为研究无人机作业过程中换行时侧向冲击力对无人机稳定性的影响, 仿真采用了无人机侧向瞬时制动的极限飞行工况。即在初始时刻无人机处于侧向速度为 0 的状态, 在 $0\sim 0.55$ s 侧向以 2 m/s^2 的加速度做匀加速直线运动, 在 $0.55\sim 1.10$ s 做匀速直线运动, 在 1.10 s 时刻, 无人机采用紧急制动, 速度瞬时减为 0。激励曲线如图 1 所示。

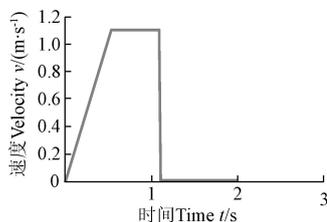


图 1 空箱体液体晃动外界激励仿真曲线

Fig.1 External excitation simulation curve of liquid sloshing in empty tank

对空箱体分别在 10%、30%、50%、70%和 90% 5 种充液率条件下, 利用 Fluent 的 UDF 功能施加如图 1 所示外界激励进行仿真计算, 共计算 5 s 时间。以充液率为 30% 的情况为例, 箱体内气液两相分布, 激励方向 (x 方向)

和垂直于激励方向 (y 方向) 速度分布图如图 2 所示。

图 2a、2b 均在图 2c 的 xoy 平面内测量, 其中图 2a 为箱内液体速度沿激励方向 (x 方向) 分别在左右两侧壁 ($AA'D'D$ 面和 $BB'C'C$ 面) 出现极值时的分布图。图 2b 则是在沿垂直于激励方向 (y 方向) 出现速度极值时的分布图。由图 2 可见, 液体沿激励方向 (x 方向) 的速度最大值出现在箱体的中间区域, 而在垂直激励方向 (y 方向) 速度最大值出现在靠近箱体的左右侧壁区域。这一结论不仅适用于 30% 充液率, 对于其余充液率也适用。

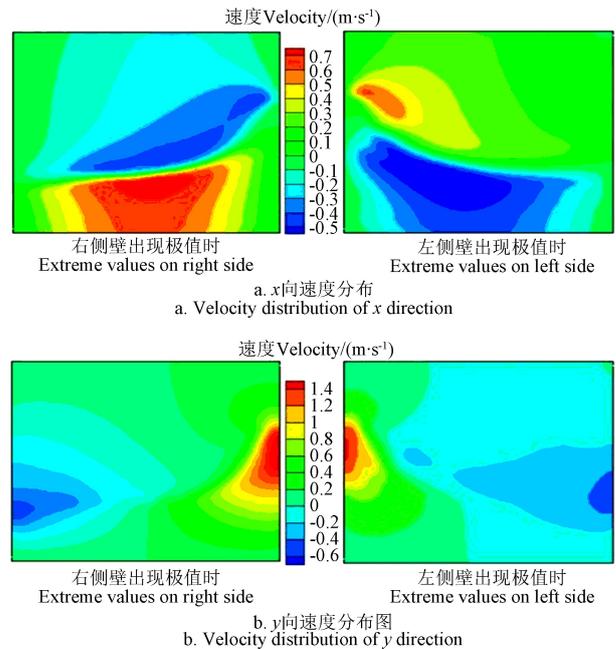


图 2 充液率为 30% 时箱体内速度分布图

Fig.2 Velocity distribution with 30% filling rate

3 阻尼结构设计及仿真

将装有液体的箱体视为充液系统, 将外界激励施加到充液系统时, 充液系统内液体产生晃动, 液体具备了能量, 该能量包含动能以及势能^[25-26]。在液体的晃动过程中, 动能与势能不断转化, 因而会对箱体侧壁产生冲击载荷。同时, 不断晃动的液体重心会产生剧烈变化, 进而影响整个充液系统的动力学特性。所以, 抑制液体晃动的根本问题是如何有效地降低晃动液体的能量, 进而降低液体的重心变化及液体对箱体的冲击载荷^[27]。

在实际工程中, 在箱体内部添加阻尼结构可改变充液系统内晃动液体的边界条件, 从而改变液体的晃动频率和晃动阻尼等动力学参数。它主要从边界层能量耗散、流体

内部能量耗散和绕流能量耗散这3个方面影响充液系统^[28]。

由于水的黏性系数量级为 10^{-6} ,根据3种不同能量耗散的计算公式可知,绕流阻力产生的能量耗散远高于流体内部能量耗散和边界层阻尼造成的能量耗散,因而在设计阻尼结构时只需要考虑绕流阻尼^[29-30]。其中,由绕流阻力造成的能量耗散 D_d 可以表示为

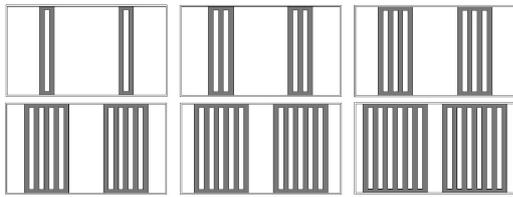
$$D_d = \rho_f \int_{s_z} C_d |\nabla \phi|^3 ds \quad (5)$$

式中 C_d 为阻力系数; s_z 为阻尼结构边界; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; $\nabla \phi$ 为液体相对障碍物速度的梯度; s 为障碍物在相对速度垂直方向的投影面积, m^2 。

由式(5)可知,阻尼结构附近液体的速度越高,则绕流阻尼耗散的能量越高。所以,阻尼结构应布置于液体速度较高的位置。由空箱体内液体晃动仿真结果可知,液体速度较高的位置出现在箱体中部和箱体左右侧壁附近,下面围绕这一结论设计水平和垂直阻尼格栅结构。

3.1 水平阻尼格栅优化

水平阻尼格栅的厚度为5 mm,长度与箱体内腔宽度相等(128 mm),槽宽为8 mm,槽间距为16 mm。将2块水平格栅对称布置在箱体内,中心距为128 mm。格栅的槽数在箱体长度方向从1开始,每次增加1,直到格栅的边缘趋近于箱体的左侧壁或右侧壁,格栅布置的俯视图(槽数从1~6)如图3所示。



注:阴影部分为格栅,下同。将2块水平格栅对称布置在箱体内,单个水平格栅中依次开1到6个槽。

Note: Shadow areas are grilles, the same as below. Two horizontal grilles are arranged in the tank symmetrically with 1-6 slots.

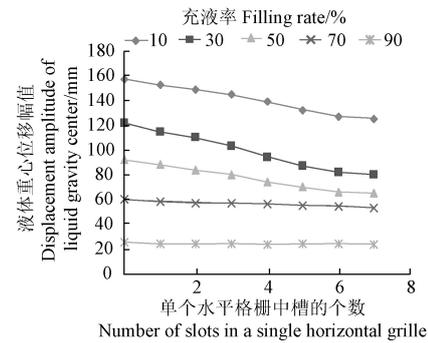
图3 水平格栅布置示意图(俯视图)

Fig.3 Layout of horizontal grilles (Top view)

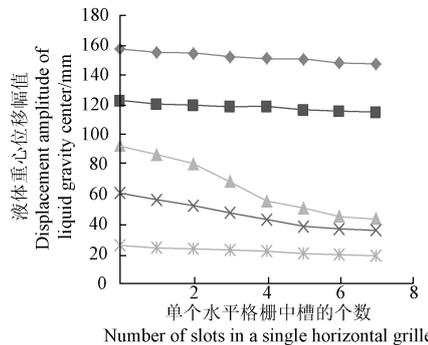
在Fluent中编写和设置求解液体重心位置的UDF,对晃动过程中液体的重心位置进行提取,计算液体重心在激励方向(x 方向)相对箱体的最大位移。如图4所示为水平格栅布置于箱体高度(y 方向)的30%、50%和70%位置时的重心位移幅值。

由图4可知,以从下向上不断充液的角度,随着充液率的不断增加,液体的重心位移幅值不断减小。从布置位置上来看,在水平格栅布置于箱体高度50%位置时,随着格栅槽数的增加,10%和30%充液率条件下的格栅防晃效果不明显,激励方向液体重心位移幅值仅比空箱体条件降低了6.3%和6.5%;同样在水平格栅布置于箱体高度70%位置时,随着水平格栅槽数增加,10%和30%充液率条件下的激励方向液体的重心位移幅值仅比空箱体降低了3.2%和7.3%。这是因为在低充液率条件下,自由液面距离水平格栅的位置较远,自由液面需要经历较长时间的运动才能撞击到格栅。液体在向上运动的过程中,由于重力作用速度会变小,即使撞击到格栅,其速度变

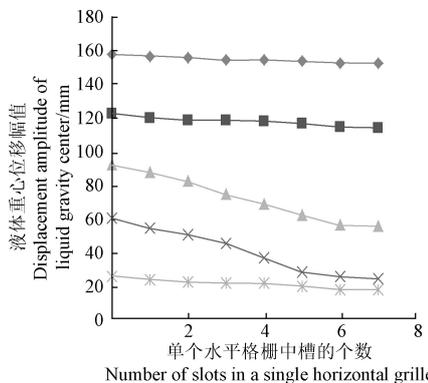
化量也会较小。同时,液体的运动趋势是沿着激励方向运动,所以,向上方运动的液体也会较少,格栅与液体的接触面积较小。



a. 水平格栅布置于箱体高度30%位置
a. Horizontal grilles set on 30% height of tank



b. 水平格栅布置于箱体高度50%位置
b. Horizontal grilles set on 50% height of tank



c. 水平格栅布置于箱体高度70%位置
c. Horizontal grilles set on 70% height of tank

注:水平格栅中槽数为0代表空箱体,下同。

Note: Grill with 0 slot represents empty tank, the same as below.

图4 水平格栅布置于不同位置时液体重心位移幅值变化(激励方向)

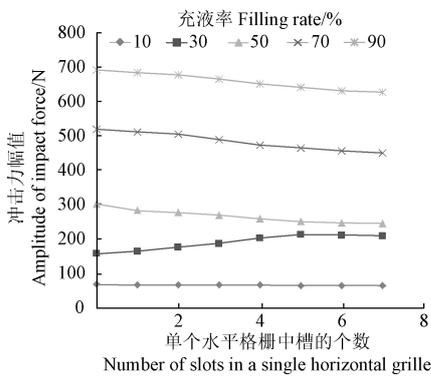
Fig.4 Displacement amplitude of liquid gravity center in tank with different position of horizontal grilles (Excitation direction)

随着充液率的增加,布置于箱体高度50%和70%位置的水平格栅防晃效果明显变好。随着格栅槽数的增加,50%充液率条件下布置于箱体高度50%处的水平格栅使激励方向(x 方向)液体的重心位移幅值降低了53.2%;70%充液率条件下,激励方向液体的重心位移幅值则降低了41.3%。而水平格栅布置于箱体高度70%位置时,在50%和70%充液率条件下,激励方向液体的重心位移幅值分别降低了40%和60%。对于90%充液率的情况,此时液体距离箱体上表面很近,液体本身晃动效果不明显,

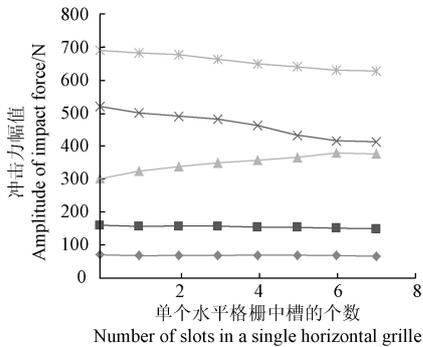
水平格栅虽能降低液体重心变化但效果并不明显。

布置于箱体 30%高度位置的水平格栅对降低低充液率条件液体的晃动效果较好。与空箱体相比，随着格栅槽数的增加，10%充液率下激励方向(x方向)液体重心位移的幅值下降了 20.3%，30%充液率下激励方向液体重心位移的幅值下降了 34.4%。3 种布置位置的水平格栅均在格栅槽数为 6 时对液体的重心抑制效果达到稳定。从节省工艺成本的角度出发，水平格栅槽数为 6 时防晃效果最优。

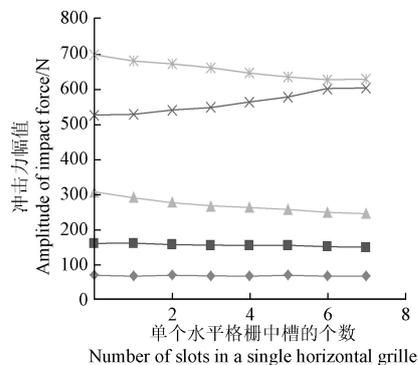
利用 Fluent 的后处理功能求解液体对箱体侧壁的冲击压力。图 5 给出了水平格栅不同布置位置，不同充液率条件下在激励方向(x方向)箱体侧壁受到的冲击压力随格栅槽数的变化。由图 5 可知，在增加格栅槽数后，多数情况下箱体侧壁在激励方向上受到的冲击力幅值逐渐减小，并趋近稳定。



a. 水平格栅布置于箱体高度 30%位置
a. Horizontal grilles set on 30% height of tank



b. 水平格栅布置于箱体高度 50%位置
b. Horizontal grilles set on 50% height of tank



c. 水平格栅布置于箱体高度 70%位置
c. Horizontal grilles set on 70% height of tank

图 5 水平格栅布置于不同位置时冲击力幅值变化(激励方向)
Fig.5 Amplitude of impact force in tank with different position of horizontal grilles(Excitation direction)

但布置位置为箱体高度的 30%位置的水平格栅使 30%充液率下箱体侧壁受到的激励方向(x方向)冲击力幅值增加了 34.4%;布置位置为箱体高度 50%位置的水平格栅使 50%充液率下激励方向箱体侧壁受到的冲击力幅值增加了 24.5%;布置位置为箱体高度 70%的水平格栅使 70%充液率下激励方向箱体侧壁受到的冲击力幅值增加了 15.1%。这是因为在这 3 种情况下，初始时刻静止液面与水平格栅的下表面平齐，在箱体受到外界激励时，液体的自由液面会迅速撞击到水平格栅，在垂直激励的方向(y方向)格栅会抑制液体沿垂直激励方向的运动，此时在激励方向上液体的运动速度会增加。所以撞击到箱体侧壁的液体速度会增加，因而与空箱体相比，箱体侧壁在激励方向受到的冲击力会增加。

在所有工况中，当充液率为 10%时，因为在空箱体条件下，液体本身对箱体侧壁的激励方向冲击力较低，是否增加水平格栅对冲击力影响不大。在激励方向液体对箱体侧壁冲击力降低的工况中，在格栅槽数为 6 时达到稳定。所以，从降低液体对箱体激励方向冲击力方面考虑，格栅槽数为 6 时防晃效果最优。

3.2 竖直阻尼格栅优化

竖直阻尼格栅厚度为 5 mm，长度与箱体内腔宽度相等(128 mm)，槽宽为 8 mm，槽间距为 16 mm。竖直阻尼格栅布置在图 2c 中平行于 yoz 平面的箱体对称面内。格栅上边缘与药箱高度 70%位置处齐平，沿箱体高度方向向下槽数从 1 开始，每次增加 1，直到槽数为 10。在箱体左视图中，槽数为 1~10 的竖直阻尼格栅的布置如图 6 所示。

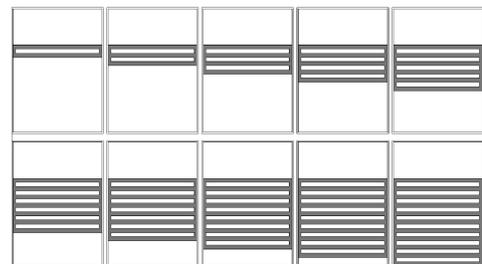
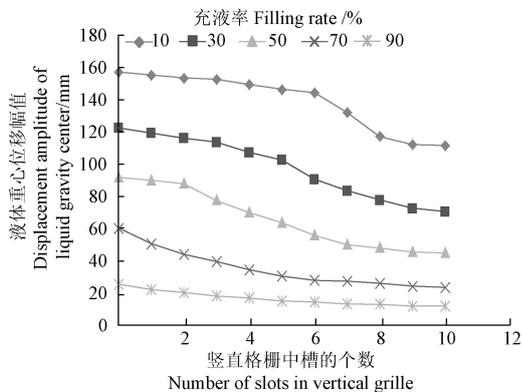


图 6 竖直格栅布置示意图(左视图)
Fig.6 Layout of vertical grilles (Left view)

与水平格栅箱体仿真相同，对竖直格栅箱体利用 Fluent 提取箱体内液体在激励方向的重心位置，求解在激励方向液体重心相对于箱体重心的位移幅值。

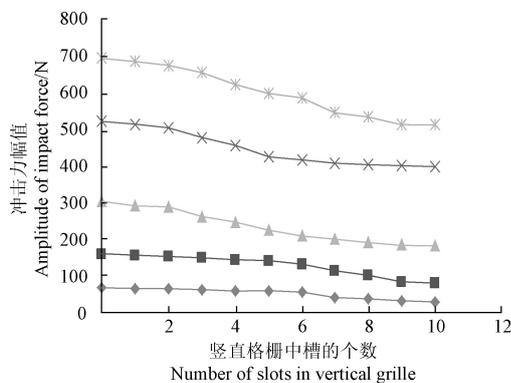
图 7a 表明随着竖直阻尼格栅中槽的个数增加，箱体内液体重心在激励方向的变化幅值逐渐减小，并趋于稳定。对于 10%充液率的工况，在竖直阻尼格栅的槽数较少时，格栅的总面积较小，并未进入自由液面下方，因此曲线的前半段变化较为平缓。但随着阻尼格栅总面积增加，自由液面与格栅的距离减小，竖直格栅对液体的重心抑制效果明显增加，在格栅槽数为 9 时趋于稳定。稳定时相对于空箱体液体激励方向重心位移的幅值减少了 29.3%。对于 90%充液率的工况，由于自由液面与箱体上表面距离较小，因此晃动不明显，增加阻尼格栅

后防晃效果也不明显。对于 30%、50%和 70%充液率的工况,均在竖直格栅开始进入自由液面下方时液体重心位移发生明显的减小,最后在格栅槽数为 9 时趋于稳定,在稳定时相对于空箱体,激励方向液体的重心位移幅值分别减小了 42.6%、51.1%和 61.7%。



a. 液体重心位移幅值

a. Displacement amplitude of liquid gravity center



b. 液体冲击力幅值

b. Amplitude of liquid impact force

图 7 竖直格栅对液体重心位移及冲击力的影响 (激励方向)
Fig.7 Influence of liquid gravity center displacement and impact force with vertical grilles (Excitation direction)

图 7b 为不同竖直格栅槽数,不同充液率条件下激励方向液体对箱体侧壁冲击力的幅值变化。由图 7b 可知,随着竖直格栅的槽数的增加,沿激励方向液体对箱体侧壁的冲击力逐渐减小,并在格栅槽数为 9 时趋于稳定。在 10%、30%、50%、70%和 90%充液率的情况下沿激励方向冲击力幅值分别减小了 37、76、119、122 和 182 N。竖直格栅在降低激励方向液体对箱体侧壁冲击力方面效果较为显著。

根据单独布置水平和竖直格栅的仿真结果可知水平格栅为 6 槽时效果较好,竖直格栅为 9 槽时效果较好。进一步将 2 种格栅组合,水平格栅布置有位于箱体高度 30%、50%和 70% 3 种位置,考虑到兼顾各充液率所以 30%和 70%高度位置的格栅分别对低充液率和高充液率有较好的防晃效果。经仿真计算,在 30%和 70%高度位置布置了格栅基础上,如果继续增加 50%高度位置的水平格栅,在各充液率下的液体重心位移幅值仅下降了 1.7%、3.8%、9.4%、7.8%和 6.5%。同时考虑到箱体整体

质量,所以不布置 50%高度处的水平格栅。

综合仿真结果,选取在 30%和 70%的高度位置布置 2 个 6 槽的水平格栅以及 1 个 9 槽竖直格栅作为最终药箱的内腔结构,其主视图如图 8 所示。

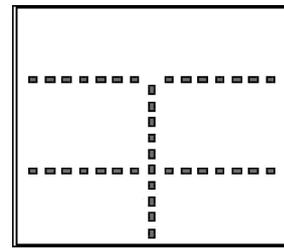


图 8 优化后箱体(主视图)

Fig.8 Optimized tank (Main view)

对优化后的箱体进行仿真,得出各充液率条件下液体在沿激励方向重心变化幅值和液体对箱体侧壁的冲击力,并与空箱体进行对比,结果见表 1。

表 1 药箱优化前后液体重心位移幅值及冲击力幅值对比

Table 1 Comparison of before and after optimized tank

充液率 Liquid filling rate/%	液体重心位移幅值 Displacement amplitude of liquid gravity center/mm		液体冲击力幅值 Amplitude of liquid impact force/N	
	优化后箱体 Optimized tank/mm	空箱体 Empty tank	优化后箱体 Optimized tank/mm	空箱体 Empty tank
10	110	157	30	67
30	68	122	197	157
50	46	92	176	302
70	22	60	565	519
90	16	25	504	692

由表 1 可见,优化后的箱体在 10%、30%、50%、70%和 90%充液率条件下均比空箱体有更好的防晃效果,加入格栅后箱体内液体的重心位移幅值和液体对箱体的冲击力幅值均有了明显较小。对于 30%和 70%充液率,在箱体 30%和 70%高度布置的水平格栅起到了显著的防晃作用,竖直格栅对于各充液率均有较好的防晃效果,优化后的箱体效果较佳。

4 试验对比验证

为了验证仿真分析的真实可靠性,设计了液体晃动试验平台,利用 PhantomV9.1 高速相机(美国 Vision Research 公司,可支持最大分辨率 1 632 像素×1 200 像素下 1 016 fps 帧速的拍摄)采集药箱内液体自由液面变化过程的图像。

试验用箱体为空箱和优化后箱体。2 个箱体均在 10%、30%、50%、70%和 90%充液率下进行试验,试验共进行 10 次。其中试验用导轨长度为 1.2 m,试验用电机为额定电压 220 V 的单相交流电机。

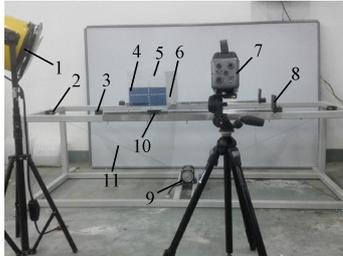
4.1 试验装置及工况

如图 9 所示,交流电机作为动力源,通过钢丝绳及滑轮带动挡板在导轨上运动,其中托板上方安装试验用药箱,下方安装有滑块。整个运动过程为模拟图 1 的激

励先匀加速直线运动，然后匀速直线运动，最后急停。通过调速器调整电机转速，得到与仿真激励相同的运动，进而验证仿真的正确性。

4.2 试验与仿真结果对比

以 30% 充液率为例，试验和仿真效果对比如图 10 所示。图 10 中上层为高速相机以 960 像素×960 像素的分辨率，帧速为 1 000 fps 记录的液体表面图像，下层为对应时刻的仿真结果。



1.光源 2.滑轮 3.导轨 4.水(经染色) 5.药箱 6.托板 7.高速相机
8.挡块 9.交流电机 10.滑块 11.钢丝绳
1.Light source 2.Pulley 3.Rail 4.Water (by staining) 5.Liquid tank 6.Carrier plate 7.High speed camera 8.Block 9.AC motor 10.Slider 11.Wire rope

图 9 液体晃动试验装置

Fig.9 Experimental installation of liquid sloshing

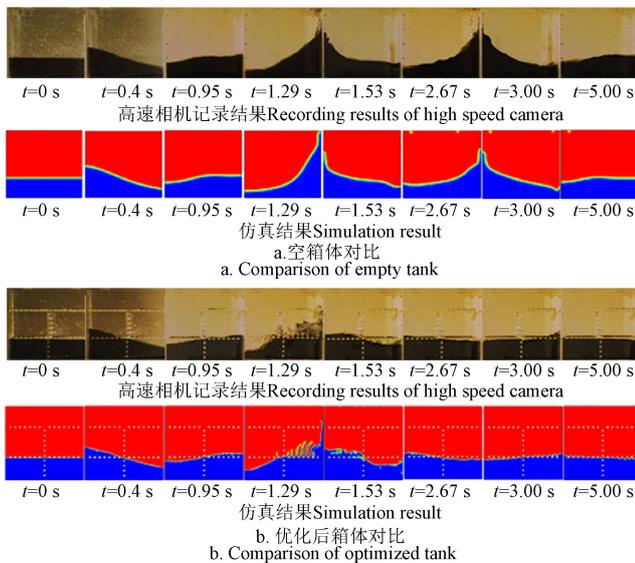


图 10 30% 充液率时试验与仿真对比图

Fig.10 Comparison between experiment and simulation with 30% filling rate

从图 10 中可以看出，仿真计算得到的液体晃动波形和试验中用高速相机记录的液体晃动波形吻合度较好，证明仿真计算真实可靠。同时图中可以看出优化后的药箱可有效抑制液体的重心变化；与空箱体相比，优化后的药箱内液体平复时间在各充液率下大幅减少，能起到较好的液体平复效果。

5 结 论

1) 长方体空箱内液体在沿激励方向液体速度的峰值出现在箱体的中心区域，在垂直于激励方向速度的峰值出现在箱体近壁区域。

2) 对于水平阻尼格栅，在箱体的 50% 和 70% 高度位置处布置的阻尼格栅对于 10% 和 30% 2 种低充液率条件的激励方向重心变化幅值影响不明显，但对 50%、70% 高充液率下的激励方向液体重心变化幅值有明显抑制作用。在布置位置相同时，随着阻尼格栅槽数的增加，液体的重心变化幅值逐渐下降，在水平格栅槽数为 6 时趋于稳定。与静止时自由液面平齐的水平格栅会增加沿激励方向液体对箱体侧壁的冲击力，其余条件下的水平格栅会减小沿激励方向液体对箱体侧壁的冲击力。

3) 竖直阻尼格栅随着槽数的增加，各充液率下液体沿激励方向重心位移幅值逐渐减小，液体对箱体侧壁的冲击压力逐渐减小，并在槽数为 9 时达到稳定。

4) 选择在 30% 和 70% 的药箱高度位置布置 2 个 6 槽的水平阻尼格栅以及 1 个 9 槽竖直阻尼格栅作为最终药箱的内腔结构并进行台架试验，试验记录的液体晃动波形与仿真结果吻合度较好。

[参 考 文 献]

- [1] 张东彦, 兰玉彬, 陈立平, 等. 中国农业航空施药技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 53—59. Zhang Dongyan, Lan Yubin, Chen Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 53—59. (in Chinese with English abstract)
- [2] 茹煜, 金兰, 贾志成, 等. 无人机静电喷雾系统设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 42—47. Ru Yu, Jin Lan, Jia Zhicheng, et al. Design and experiment on electrostatic spraying system for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 42—47. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王大帅, 张俊雄, 李伟, 等. 植保无人机动态变量施药系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(5): 86—93. Wang Dashuai, Zhang Junxiong, Li Wei, et al. Design and test of dynamic variable spraying system of plant protection UAV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 86—93 (in Chinese with English abstract)
- [4] 王潇楠, 何雄奎, 王昌陵, 等. 油动单旋翼植保无人机雾滴飘移分布特性[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 117—123. Wang Xiaonan, He Xiongkui, Wang Changling, et al. Spraying drift characteristics of fuel powered single-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(1): 117—123. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 无人植保机施药雾滴空间质量平衡测试方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 54—61. Wang Changling, He Xiongkui, Wang Xiaonan, et al. Testing

- method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 54—61. (in Chinese with English abstract)
- [6] Zhang Kun, Zhang Tiemin, Liao Yiyong, et al. Remote control unmanned aerial vehicle test system based on Labview[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(Supp.2): 11—16.
张昆, 张铁民, 廖贻泳, 等. 基于 Labview 的遥控无人机操控测试系统[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 11—16. (in English with Chinese abstract)
- [7] Chen Y, Yu J, Mei Y, et al. Trajectory optimization of multiple quad-rotor UAVs in collaborative assembling task[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(1): 184—201.
- [8] 刘建刚, 赵春江, 杨贵军, 等. 无人机遥感解析田间作物表型信息研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 98—106.
Liu Jianguang, Zhao Chunjiang, Yang Guijun, et al. Review of field-based phenotyping by unmanned aerial vehicle remote sensing platform[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 98—106. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王利民, 刘佳, 杨玲波, 等. 基于无人机影像的农情遥感监测应用[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 136—145.
Wang Limin, Liu Jia, Yang Lingbo, et al. Applications of unmanned aerial vehicle images on agricultural remote sensing monitoring[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 136—145. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何勇, 肖宇钊. 一种减轻药液倾荡的农用植保无人机药箱: CN201520086118.0[P].2015-08-05.
- [11] 陈博. 具有防荡功能的植保无人机药箱: CN201330630812.0[P].2014-06-25.
- [12] 王大伟, 高席丰. 植保无人机药箱建模与姿态控制器设计[J]. 排灌机械工程学报, 2015(11): 1006—1012.
Wang Dawei, Gao Xifeng. Liquid tank modelling and attitude controller design of plant protection UAV[J]. Journal of Drainage and Machinery Engineering, 2015(11): 1006—1012. (in Chinese with English abstract)
- [13] 邓明乐, 岳宝增, 黄华. 液体大幅晃动类等效力学模型研究[J]. 宇航学报, 2016, 37(6): 631—638.
Deng Mingle, Yue Baozeng, Huang Hua, et al. Study on the equivalent mechanical model for large amplitude slosh[J]. Journal of Astronautics, 2016, 37(6): 631—638. (in Chinese with English abstract)
- [14] Yang Y, Jing W, Kang Z, et al. An equivalent mechanical model for Liquid sloshing on spacecraft[J]. Journal of Aeronautics Astronautics & Aviation, 2016, 48(2):75—81.
- [15] Pletcher R H, Chen K H, Kelecyc F J. Numerical and experimental study of three-dimensional liquid sloshing flows[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2015, 8(3): 507—513.
- [16] 尹树悦, 王少飞, 陈超. 无人机安全性指标要求确定方法研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(2):63—67.
Yin Shuyue, Wang Shaofei, Chen Chao. Research on method for determination of UAV safety index requirements[J]. Modern Defence Technology, 2015, 43(2): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [17] Haroun M A, Chen W. Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015, 25(7): 653—669.
- [18] Wei C, Wang L, Shabana A A. A Total lagrangian ANCF liquid sloshing approach for multibody system applications[J]. Journal of Computational & Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 51—54.
- [19] 胡齐, 李永, 姚灿, 等. 大容量推进剂贮箱液体晃动性能试验[J]. 空间控制技术与应用, 2016, 42(3): 44—48.
Hu Qi, Li Yong, Yao Can, et al. Experiment of liquid sloshing performance in bulky propellant tank[J]. Aerospace Control and Application, 2016, 42(3): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [20] Yan G R, Rakheja S, Siddiqui K. Analysis of transient fluid slosh in partly-filled tanks with and without baffles: Part 1 model validation[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2010, 17(3/4): 359—379.
- [21] 唐浩, 徐建, 朱建辉, 等. 导弹油箱燃油晃动仿真分析[J]. 无线互联科技, 2015(3): 76—79.
Tang Hao, Xu Jian, Zhu Jianhui, et al. Study of liquid sloshing in missile fuel tank based on SPH method[J]. Wireless Internet Technology, 2015(3): 76—79. (in Chinese with English abstract)
- [22] Singal V, Bajaj J, Awalgankar N. CFD Analysis of a kerosene fuel tank to reduce liquid sloshing[J]. Procedia Engineering, 2014, 69(1): 1365—1371.
- [23] Hu Q, Li Y, Liu J T, et al. Research on Liquid sloshing performance in vane type tank under microgravity[J]. 2016, 129(1): 12—16.
- [24] 张健, 方杰, 范波芹. VOF 方法理论与应用综述[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 67—70.
Zhang Jian, Fang Jie, Fan Boqin. Advances in research of VOF method[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 67—70. (in Chinese with English abstract)
- [25] Wang W, Peng Y, Zhou Y, et al. Liquid sloshing in partly-filled laterally-excited cylindrical tanks equipped with multi baffles[J]. Applied Ocean Research, 2016, 59: 543—563.
- [26] Wang W, Guo Z, Peng Y, et al. A numerical study of the effects of the T-shaped baffles on liquid sloshing in horizontal elliptical tanks[J]. Ocean Engineering, 2016, 111: 543—568.
- [27] Wang Z, Zou L, Zong Z. Three dimensional sloshing of stratified

- liquid in a cylindrical tank[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 119: 58–66.
- [28] Sanapala V S, Velusamy K, Patnaik B S V. CFD simulations on the dynamics of liquid sloshing and its control in a storage tank for spent fuel applications[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, 94: 494–509.
- [29] Watanabe T. Numerical simulation of liquid sloshing using arbitrary Lagrangian-Eulerian level set method[J]. *International Journal of Multiphysics*, 2016, 5(4): 339–352.
- [30] Liu H L, Cui D L, Yan S Z. Analysis of liquid sloshing in partially filled tank of spacecraft during maneuver[J]. *Key Engineering Materials*, 2016, 693: 1638–1645.

Optimal design of anti sway inner cavity structure of agricultural UAV pesticide tank

Li Xi, Zhang Junxiong, Qu Feng, Zhang Wenqiang, Wang Dashuai, Li Wei

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at the problem of agricultural UAV (unmanned aerial vehicle) instability caused by the shaking of liquid in the pesticide tank, the tank was optimally designed by arranging horizontal and vertical grille in the empty tank. The grilles were mainly to increase damping, thereby weakening the vibration of the liquid. The horizontal grille contained a number of gaps ranging from 0 to 7, and the vertical grille contained a number of gaps ranging from 0 to 10. The displacement amplitude of the liquid center relative to the tank in the excitation direction and the impact force of liquid on the side walls of the tank were taken as the evaluation conditions. At 0-0.55 s, the acceleration of the uniformly accelerated rectilinear motion was 2 m/s^2 , the speed remained constant at 0.55-1.1 s, and at 1.10 s, the speed was reduced to 0. The simulation condition was to simulate the acceleration and rapid stop of the UAV. The VOF (volume of fluid) model and k-epsilon model in Fluent software were used to simulate the anti sway effect of horizontal and vertical damping grille with 10%, 30%, 50%, 70% and 90% liquid filling rate, 30%, 50%, 70% arranged height and different shapes. The simulation results showed that the peak value of the liquid velocity at the vertical direction in the rectangular empty box appeared in the area near the wall of the box, and the peak value of the liquid velocity in the excitation direction appeared in the central area of the box; and 2 kinds of damping grilles both reduced the variation of the gravity center of the sloshing liquid in the excitation direction. In the case of liquid impact on the tank, the horizontal damping grille would increase the liquid impact on the tank when the depth of liquid filling and the arrangement of horizontal grille overlapped, in other cases, the horizontal grille could reduce the impact force of the liquid to the tank, and the impact force tended to be stable when the slot number was 6. The vertical damping grille could effectively reduce the impact force of the liquid to the tank under every condition of the liquid filling rate, and the impact force would be stable when the number of the grooves was 9. In order to verify the reliability of the simulation analysis, the liquid sloshing test platform was designed. The rail length of the testing platform is 1.2 m, and a three-phase AC (alternating current) motor is used to drive the liquid box. A color high-speed camera with 1 000 fps was used to collect sequential images of the liquid in the box. According to the simulation result, a tank with double horizontal grille and vertical grille was made and a bench test was carried out. An empty box and an optimized box were contrasted in the test, and both boxes were tested at 10%, 30%, 50%, 70% and 90% liquid filling depth. The tests were conducted with 10 repetitions. The test result was in agreement with the simulation result, which confirmed that the optimized tank had a better inhibitory effect on liquid sloshing. Compared with the empty tank, after optimization of the grilles, the sway time of the waving liquid was reduced significantly. The optimized box can play a better effect of calming down the waving liquid. The result will be helpful for enhancing the stability of the UAV in case of emergency braking of hitting by the wind.

Keywords: unmanned aerial vehicle; optimization; design; tank; computational fluid dynamics; damping grille; liquid sloshing