

果园混肥器设计与数值模拟分析

宋月鹏^{1,2} 张帅^{1,2} 李天华^{1,2} 高东升³ 樊桂菊^{1,2} 王伟^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;

3. 山东农业大学园艺科学与工程学院, 泰安 271018)

摘要: 针对我国水资源短缺、水溶性肥料溶解度较低以及灌溉施肥中水肥混合的均匀性问题,设计了一种高效混肥器,并利用 ANSYS 仿真计算软件,对该混肥器的搅拌装置进行模态和应力应变仿真分析。同时,基于 Fluent 模块对混肥器搅拌过程的流场、速度场进行模拟计算分析。结果表明:计算分析得到搅拌器的安全系数为 11.95,最低阶模态主频率为 19.13 Hz,各阶频率远大于混肥器的激励源频率,表现出良好的振动特性,完全满足工业设计要求。由分析得到的不同搅拌速度的流场分布图可知,混肥器在大于临界搅拌速度的旋转搅拌过程中速度矢量分布较为复杂,混肥器内部产生较多的扰流和湍流,可有效提高混肥效果,同时发现,转速大于临界搅拌速度时,搅拌速度的增加对于混肥器内部流场分布的影响较小,最佳搅拌速度为 600 r/min,此时在得到良好的搅拌效果的同时降低了能耗。

关键词: 果园; 灌溉施肥; 混肥器; 模态分析; 流场分析

中图分类号: S224.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)S0-0181-08

Design and Numerical Simulation Analysis of Orchard Fertilizer Mixer

SONG Yuepeng^{1,2} ZHANG Shuai^{1,2} LI Tianhua^{1,2} GAO Dongsheng³ FAN Guiju^{1,2} WANG Wei^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China

3. College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In view of the shortage of water resources in China, the question of low solubility of water-soluble fertilizers, and the uniformity of water-fertilizer mixing in fertigation, an efficient dynamic fertilizer mixer was designed, and the mixing device of the fertilizer device was simulated by using ANSYS simulation software. The mode and stress strain simulation analysis of the mixer was carried out. At the same time, based on Fluent module, the flow field and velocity field of mixing process of the fertilizer mixer were simulated and analyzed. The results showed that the safety factor was 11.95, the lowest order modal main frequency was 19.13 Hz, and each frequency was much larger than the frequency of excitation source of mixed fertilizer. It showed good vibration characteristics and fully met the industrial design requirements. In addition, the distribution diagram of the flow field of different stirring speeds was analyzed. The velocity vector distribution of the mixer was more complex in the rotating stirring process under the rotating speed of the critical agitation speed. It was easy to produce more spoiler and turbulence in the mixer, and can effectively improve the effect of mixing. Meanwhile, the increase of stirringspeed had little effect on the flow field distribution inside the mixer. Finally, the best stirring speed was 600 r/min, which reduced the energy consumption while achieving good mixing effect.

Key words: orchard; fertigation; fertilizer mixer; modal analysis; flow field analysis

收稿日期: 2018-07-15 修回日期: 2018-08-25

基金项目: 山东省现代农业产业技术体系果品产业创新团队项目(SDAIT-06-12、SDAIT-06-1)、山东省重大科技创新工程项目(2018CXGC0209)、国家重点研发计划项目(2018YFD0700600)和山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF003)

作者简介: 宋月鹏(1971—),男,教授,博士,主要从事果园管理机械设计与制造研究,E-mail: uptonson@163.com

通信作者: 高东升(1967—),男,教授,博士,主要从事园艺设施及其高效栽培技术研究,E-mail: dsgao219@163.com

0 引言

我国农业生产中,果树生产占据着较大的地位。截止到2017年,我国水果种植面积为1 725万 hm^2 ,水果总产量为28 319万t,均居世界首位^[1-2]。随着果园种植面积的不断扩大,果园灌溉的用水量也随之增加。我国是一个水资源严重短缺的国家,农业用水占全国用水总量的60%以上,水资源的短缺严重制约了我国农业的可持续发展^[3-5]。水和肥混合效果直接影响到水肥的利用效率^[6-7]。肥料溶解的不够彻底,极易导致灌溉过程中出现管道堵塞的现象,且管道堵塞难以清理,更换管道费时、费力,还大大提高了灌溉的成本,因此提高肥料的溶解效率,使水肥混合的更加均匀非常必要。

搅拌是过程工业的基础单元操作,被广泛应用于化工、医药、道路、食品和废水处理等领域^[8-9]。搅拌设备按搅拌桨叶的形状结构可分为平叶、斜叶、螺旋叶面式搅拌器,桨式搅拌器,直叶圆盘涡轮式搅拌器,推进式搅拌器,直叶、斜叶开式涡轮式搅拌器,垂直螺杆式桨叶搅拌器。按照电机的安装形式可分为立式、偏心式、倾斜式、底部和旁式搅拌装置。目前,国内专门用于农业灌溉生产的水肥搅拌设备研究相对较少,灌溉混肥装置尚未得到系统化的研究,使得目前农业灌溉领域的肥料搅拌多采用人工搅拌或使用其他领域的搅拌装置,浪费人力物力,且效率较低。因此,设计一种用于农业生产的高效混肥器,可以大大促进我国农业灌溉的发展。

计算机技术的快速发展促进了计算机仿真分析软件的空前发展,已有不少学者利用Fluent对混合器的内部流场特性做了系统分析,并将模拟结果和

实验结果对比分析,验证了其数值模拟手段的可靠性^[10-12]。同时已有文献对混肥器的流场与速度场进行了数值模拟^[13-14],为实际生产设计提供了宝贵的理论技术支持。本文基于ANSYS仿真软件,对混肥器进行模态分析和流场动力学分析,通过分析获得应力、应变云图与流场的各项流动参数,验证该混肥器设计的合理性。

1 高效混肥器设计

1.1 搅拌装置类型选择

不同形式的搅拌装置能提供不同的流场及搅拌能量,进而达到不同搅拌目的。对于肥料的混合搅拌,肥料的溶解效率与混合的均匀性是考虑的重点,设计合理的搅拌装置尤为重要^[15]。立式搅拌装置应用最为广泛,对称分布,可通过电机直接驱动,具有安装、操作和检修方便等优点^[16]。偏心式搅拌装置加强了液层间的相对运动和湍动,但易产生振动,且仅适用于小型设备上。倾斜式搅拌装置使用维修方便,结构简单、轻便,但同样仅适用于小型设备。底部搅拌装置使用维修方便、寿命长,但桨叶下部与轴封处容易产生固体物料的黏积,难以清理。旁式搅拌装置在消耗同等功率的情况下,能得到最好的搅拌效果,但轴封困难,使用成本较高。通过比较分析,最终本混肥器采用立式搅拌。

不同桨叶搅拌产生不同流型,主要分为:平直叶桨式、涡轮式产生的径流型,螺旋叶面的推进式、螺杆式产生的轴流型,折叶桨面则居于两者之间,一般认为它更加接近于轴流型。同时,搅拌器的流型对搅拌效果和搅拌功率影响较大,而搅拌器的流型则由搅拌桨的桨叶形状所决定,其中不同搅拌桨所产生的流型图如图1所示^[17]。

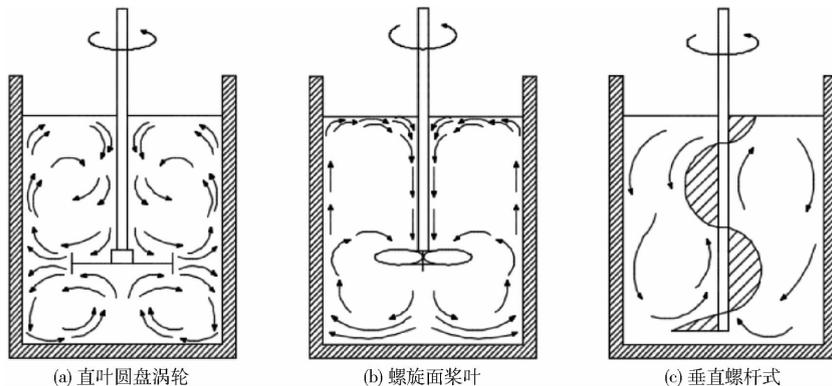


图1 不同搅拌桨的流型示意图

Fig. 1 Flow diagrams of different paddles

图1a为直叶圆盘涡轮产生的流型图,径向流动、轴向流动以及切向流动均有分布,但主要为径向流动,且速度愈高径向流动愈强烈。图1b为螺旋面

桨叶所产生的流型图,与直叶圆盘涡轮流型图类似,同样是3种流动均有分布,但却以轴向流动居多。图1c为垂直螺杆式产生的流型图,同样3种流动均

有分布,但主要以轴向流动居多,同时仅适用转速较慢的搅拌设备,扰流较小,湍流分布较少。

流速较大、湍流分布较多的流场,会产生激烈的涡流和很强的剪切力,这种强大的剪切力可以有效的促进气液、液液和固液的分散与溶解^[18]。且固体溶解过程要求搅拌器应具有较强的剪切能力和循环能力,因此涡轮式搅拌器最为适用,同时考虑到轴向流和径向流的共同作用对混合的促进作用最大,通过分析比较前文中的流型可知,上述3种桨形各有优点,但都存在主流型过于单一的问题,导致流场湍流效果较差。因此本文整合了折叶桨式搅拌器和直叶圆盘涡轮式搅拌器的优点,设计了直角折叶圆盘涡轮式搅拌器,可产生轴向流和径向流共同作用的流场。

1.2 折叶圆盘涡轮式搅拌器设计

根据前面的分析以及按照相关搅拌设备机械设计的要求,对直角折叶圆盘涡轮搅拌器进行了系统参数设计。根据相关设计要求及经验公式^[19]可知

$$d = (0.2 \sim 0.5) D \quad (1)$$

$$h = 0.02d \quad (2)$$

$$S = 0.66D \quad (3)$$

$$b = d/5 \quad (4)$$

式中 D ——混肥箱内径,mm

d ——圆盘直径,mm

h ——圆盘厚度,mm

S ——搅拌器潜液深度,mm

b ——刀齿总高,mm

通过以上公式计算,确定了本混肥箱的内径为1000 mm,圆盘直径为200 mm,刀齿总高为40 mm,圆盘厚度设为4 mm,搅拌器潜液深度为660 mm,同时为提高其肥料颗粒粉碎能力和提高搅拌效果,搅拌器圆盘设置有上下交替分布数量均为8的刀齿,因此最终圆盘齿数 z 为16,图2为搅拌器圆盘涡轮齿盘示意图。

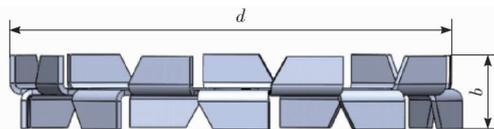


图2 搅拌器圆盘涡轮齿盘示意图

Fig.2 Stirrer disk turbine disk chart

为了进一步提高搅拌过程中轴向流的分布,同时最大限度地消除低黏度液体在高速旋转时所产生的液面下陷及圆柱回转区^[20],本文在混肥箱内壁设置了挡板,其中挡板宽度的计算公式为

$$W_b = (1/12 \sim 1/10) D \quad (5)$$

式中 W_b ——挡板宽度,mm

计算可得,挡板宽度为100 mm,厚度为10 mm,

同时根据混肥箱的内径尺寸最终确定了挡板的数量为4个,且按照圆周阵列的方式均匀排列,如图3所示。

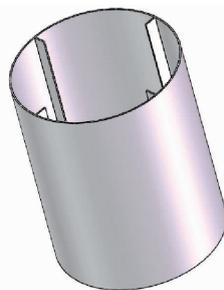


图3 挡板和箱体的组合图

Fig.3 Combination diagram of baffle and box

另外,还可通过安装与罐体同轴的导流筒来改善流动状态,增强轴向流动,以获得较大的循环流量,从而获得良好的搅拌效果。尽管导流筒有许多优点,但其安装及后期维护费时费力。因此本文根据锚式搅拌器可产生轴向流动和增加桨叶周围涡流的优点,通过在搅拌器圆盘表面上设置8根圆周阵列分布的搅拌杆来近似地实现导流筒的导流作用,在保证机构强度和机械设计合理性的基础上,提高其轴向流动,以及搅拌和颗粒粉碎能力,最终设计出如图4所示的搅拌器,搅拌器总高度为800 mm,搅拌杆高度为300 mm。搅拌器的材料选用目前化工设备常用的钛合金,强度大,耐腐蚀性好。

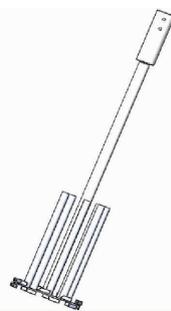


图4 搅拌器示意图

Fig.4 Blender schematic

1.3 混肥器模型建立与临界搅拌转速计算

在完成关键部件的选型和优化设计后,建立如图5所示的混肥器模型,该混肥器主要由混肥箱、机架、控制柜、电机、搅拌器和输液管道6部分组成。

由图5可见,电机设在混肥箱的顶部,通过轴封并穿过箱体盖与搅拌器相连,使得搅拌器在电机的带动下实现旋转搅拌,轴封选用目前搅拌设备上常用的机械轴封,电机为Y2-90L-4型立式三相异步电机。

在确定好混肥器的具体尺寸参数后,考虑到混肥器主要进行固-液相的搅拌,因此计算其临界搅拌

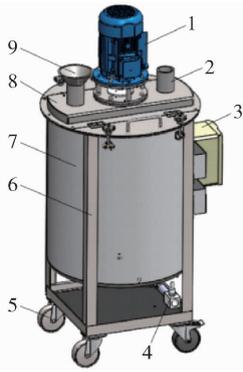


图5 混肥器示意图

Fig.5 Schematic of fertilizer mixer

1. 电机 2. 进水口 3. 控制柜 4. 输液管道 5. 轮子 6. 机架
7. 混肥箱 8. 箱体盖 9. 施肥口

速度是非常必要的。根据得到的临界搅拌速度来确定实际的搅拌速度,可优先避免因提供过大的搅拌强度而引起的能源消耗,临界搅拌速度 N_c 的计算公式^[21]为

$$N_c = KD^{-2/3} d_p^{1/3} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{-1/9} \left(\frac{V'_p}{V_p} \right)^{-7/10} \quad (6)$$

式中 K ——系数,与混肥器的形状、搅拌器的型式与尺寸有关,约为 187~263

d_p ——固体颗粒直径

$\Delta\rho$ ——固体颗粒与液体的密度差

ρ ——液体密度

μ ——液体粘度

V_p ——固体颗粒的真实体积

V'_p ——固体颗粒的视体积

式(6)中选取水肥混合后的液体密度为 $1\,150\text{ kg/m}^3$,粘度为 $0.001\,6\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[22-24]。常用水溶性肥料的颗粒直径为 2 mm ,颗粒密度为 $1\,335\text{ kg/m}^3$ ^[25]。同时考虑到肥料颗粒体积较小,真实体积与视体积差别较小,因此为简化计算,近似认为两者比值为 1,最终求得该混肥箱的临界搅拌速度 N_c 约为 488.76 r/min 。

2 高效混肥器模拟仿真

基于 ANSYS 对搅拌器进行了受力和模态仿真分析,研究其受力、变形及振动等相关信息,同时利用 Fluent 软件模拟了混肥器的流场分布和流速分布。

2.1 相关模型的网格划分

网格划分是数值模拟技术的一个重要组成部分,采用合理的网格划分算法,对于精确的仿真分析具有重要意义^[26-27]。基于此,本文通过 ANSYS 的 mesh 模块对相关模型进行网格划分,网格单元均采

用四面体网格,设置其网格相关性系数为 100,疏密程度为精细,图 6、7 分别为搅拌器网格图和混肥器流场分析网格图。



图6 搅拌器网格图

Fig.6 Blender grid

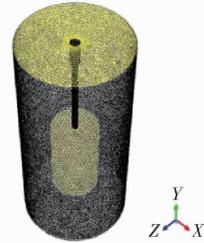


图7 混肥器流场分析网格图

Fig.7 Fertilizer flow field analysis grid

网格划分完成后,通过选择 ANSYS 中详细列表窗口中的 Statistic,并将 Mesh Metric 的属性改为 Skewness 查看网格质量,其中图 6 中的搅拌器网格单元数为 33 555,最大网格偏斜率为 0.44,图 7 中的混肥器网格单元数为 641 130,最大网格偏斜率 0.57,网格质量均较为理想。

2.2 边界条件施加和模型求解

根据搅拌器的实际工作情况,在搅拌器上部设置圆柱面约束,使其径向自由,限制其轴向和切向的自由度。同时应用 ANSYS 中的 modal 模块进行求解。

应用 ANSYS 中的 static structural 模块对搅拌器进行静力学仿真分析,同样式(6)在搅拌器上部设置圆柱面约束,仅使径向自由,由于式(6)已求得混肥器的临界搅拌速度为 488.76 r/min ,同时本混肥器所选用的调速电机,最大转速为 $1\,000\text{ r/min}$,因此给搅拌器施加 $1\,000\text{ r/min}$ 的最大转速,并分析其受力及变形情况。

应用 ANSYS 中的 Fluent 模块研究混肥器搅拌过程的流场及速度场分布,选择湍流模型进行分析,并通过 $k-\varepsilon$ 公式进行求解。同时根据前文的分析,确定仿真流体的密度为 $1\,150\text{ kg/m}^3$,粘度为 $0.001\,6\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在搅拌器及周围设置动域,同时施加不同的转速,并对得到的仿真计算结果进行比较分析。

3 仿真结果分析

3.1 搅拌机模态分析

模态是物体的固有特性,物体的结构与约束形式确定后,其模态也就随之确定^[28]。本文在完成相关模型建立和模型约束后,分析计算了搅拌机的前6阶模态,其振动频率如表1所示。

表1 搅拌机前6阶模态

Tab.1 Sixth-order mode of blender

阶次	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	19.13	19.18	26.58	27.78	27.80	36.20

由表1可知,最低阶频率为19.13 Hz,同时由前文可知,本文所选调速电机最高转速为1 000 r/min,因此其频率范围为0~16.67 Hz,而其他的外部激励频率对于混肥箱的影响较小,可忽略不计。在模态分析中,低阶模态对振动影响最大,阶数越高其影响越小^[29]。因此,从表1可以看出,外界最高激励频率远小于仿真所得的最低阶频率,由此可知,搅拌机具有较好的振动性能,不会引起设备共振,满足设计要求。

同时比较分析了前6阶模态仿真结果图,发现主要分为圆盘振动和搅拌杆振动两种振型,其中第1、2、6阶模态对应的主振型为圆盘在XOY平面的左右摆动,如图8所示。第3、4、5阶模态对应的主振型为搅拌杆以Z轴为中心轴线的向外摆动,如图9所示。



图8 第1、2、6阶模态图

Fig. 8 The first, second and sixth order modal diagram

3.2 搅拌机应力、变形量分析

搅拌机应力、变形量云图如图10、11所示。由图10可以看出,搅拌器的最大应力发生在靠近圆盘中心的位置,为46.253 MPa,已知圆盘材料钛合金的屈服强度为550 MPa^[30],其安全系数可达11.95,具有较高的安全性和可靠性。从图11可以看出,搅拌器的最大变形发生在搅拌杆的顶端部位,为1.262 6 mm,搅拌机主轴变形量极小,可忽略不计,相较于搅拌器的整体尺寸,该最大变形相对很小,搅拌机在最大搅

拌速度条件下的变形较小,因此完全符合工业设计要求。

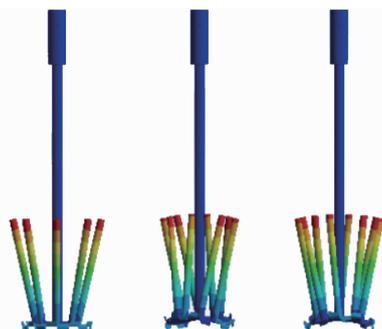


图9 第3、4、5阶模态图

Fig. 9 The third, fourth and fifth order modal diagram



图10 搅拌机应力云图

Fig. 10 Blender stress cloud

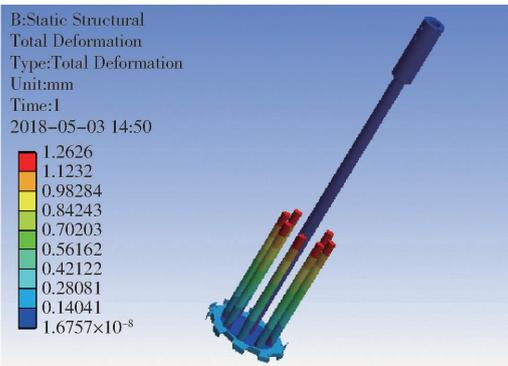


图11 搅拌机变形量云图

Fig. 11 Blender strain cloud

3.3 混肥器的流场仿真分析

速度矢量场分布是流场分布的间接体现,可以较为准确地表征流场的流动趋势和流动状态^[31]。本文通过对不同转速条件下混肥箱搅拌过程进行分析计算,得到了不同转速产生的速度矢量图。其中均取混肥器中心剖面的速度矢量图来进行分析。图12为500 r/min转速下的速度矢量图,从图中可以看出,其速度矢量分布与图1a中流型图十分相似,在混肥器上部产生了较明显的呈对称分布的环向流动,在混肥器下部同样分布有环形速度矢量,同时搅拌机圆盘下部区域速度矢量分布复杂,方向各异,因此使混肥箱底部的流场变得复杂,湍流分布较

多,这样可以有效地减少混肥过程中肥料在底部沉淀堆积,促进溶解。除此之外,从图 12 还可以看出,搅拌杆周围设置的动区速度要明显高于动区之外的速度,这样便会产生较大的速度梯度分布,因此该位置扰流较多,极易产生湍流现象,同时动区内速度矢量分布无序,方向各不相同,容易形成湍流涡街,产生复杂的剪切流和旋涡,从而可以进一步提高肥料颗粒与搅拌杆的碰撞频率,提高颗粒粉碎效率,对促进肥料溶解和水肥混合具有重要意义。

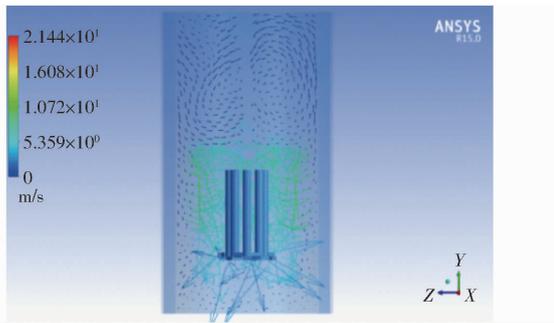


图 12 500 r/min 转速下的速度矢量图

Fig. 12 Velocity vector diagram at 500 r/min speed

图 13a ~ 13e 分别为 400、600、800、900、1 000 r/min 转速条件下的速度矢量分布图,从图中可以看出,各速度矢量图随着速度的增大其动区内的流场也随之变得更加复杂。除 400 r/min 转速外,其他分布与图 12 极为相似,混肥箱内的流场分布变化较小,仅在搅拌器附近变化相对明显。在 400 r/min 的转速下,其速度矢量图仅在搅拌器周围有较为明显的速度分布,其余部分速度分布极少,因此在低于临界搅拌速度时,混肥器内流场分布较差,进而导致肥料的混合溶解效果差,但在高于临界搅拌速度时,流场分布均较为理想,但搅拌速度对流场分布的影响极小,提高

搅拌速度对于混肥效果的提升并不大。

速度矢量图可以较为直观地反映出流场的流动变化趋势、流动状态和流向变化,但却无法直观地得到流场内的整体速度分布,结合上文分析可知,在转速高于临界搅拌速度时,转速的增大对搅拌器流场分布影响并不显著,只能从降低能耗的角度选择搅拌速度。因此,通过计算得到了不同转速条件下的速度云图,如图 14 所示。通过分析比较图 14 可以看出,400 r/min 转速下的速度云图其速度分布呈现出围绕搅拌器由内到外的梯度分布,且动区内速度梯度变化不大,存在速度梯度分布的区域多分布在动区外侧,距离搅拌器较远,因此搅拌器周围扰流分布相对较少。与 400 r/min 转速产生的速度云图不同,转速大于临界搅拌速度时,其产生的速度云图较为相似,均呈现为沿搅拌器自上而下速度递减的梯度分布,因此在搅拌器周围分布有较多的扰流,配合上搅拌杆可大大提高颗粒的粉碎和溶解能力。

其中,500 r/min 转速下的速度云图如图 14b 所示,由图中可知,速度按自上而下递减分布,但相对高转速而言其速度梯度变化较小且速度梯度变化较少,因此,相比较高转速而言其流场内扰流分布较少,故肥料溶解能力要比高转速差。同时,由图 14c ~ 14f 可知,其速度云图极为相似,速度梯度分布基本一致。因此,以上不同转速条件下其搅拌器内流场分布极为相似,同时相比于图 14a、14b 其速度梯度变化较大,因此在搅拌器周围分布有较多的扰流,从而产生较多的湍流分布,使得搅拌器周围的流场分布相对复杂,进而起到促进肥料溶解的作用。综合前文中速度矢量图的比较可以得出,转速小于临界搅拌速度时,混肥器内流场分布较差,不利于肥料的

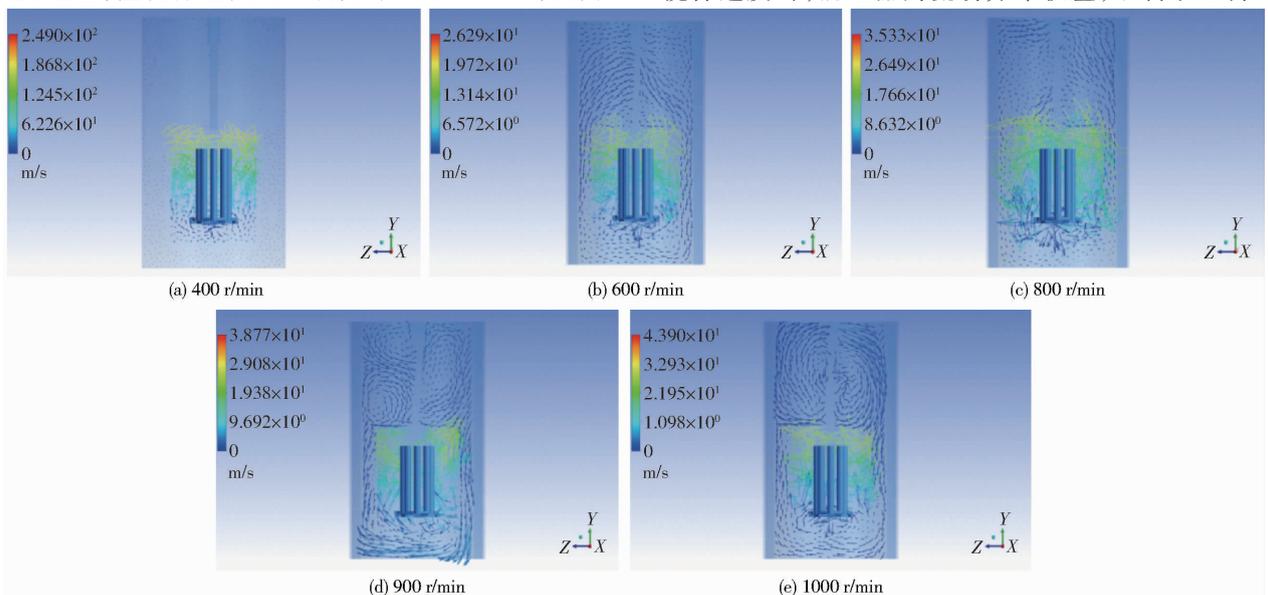


图 13 不同转速条件下的速度矢量图

Fig. 13 Velocity vector diagrams under different speed conditions

溶解,当转速大于临界搅拌速度时,可以产生较为理想的流场分布,但随着搅拌速度的增长,混肥器的流场分布并无明显的变化,结合不同转速下的速度矢

量图和速度云图的分布,转速为 600 r/min 时,其流场分布较好,湍流分布相对较多,同时选用相对较低的转速,降低了能耗,节约了灌溉成本。

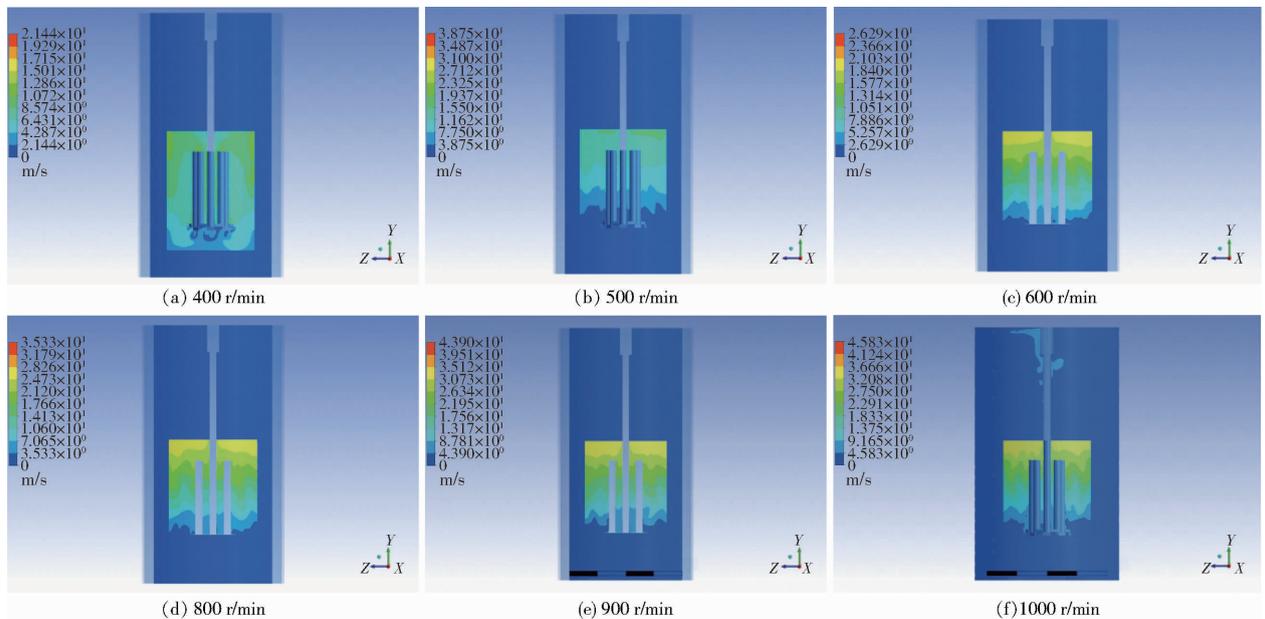


图 14 不同转速条件下的速度云图

Fig. 14 Velocity cloud images at different speeds

4 结论

- (1) 通过模态分析结果可知,搅拌器具有较好的振动性能,不会引起设备共振,满足设计要求。
- (2) 通过静力学仿真分析结果可知,搅拌器的安全系数为 11.95,且在外力作用下变形量较小,完全符合工业设计要求。
- (3) 通过流场仿真分析可知,混肥器在大于临

界搅拌转速的条件下,旋转搅拌过程中速度矢量分布较为复杂,混肥器内容易产生较多的扰流和湍流,对于促进肥料溶解和使水肥混合更加均匀具有重要意义。通过分析比较不同速度条件下的速度矢量图和速度云图,发现在转速大于临界搅拌速度时,搅拌速度的增大对于混肥器内部流场分布的影响较小;同时,通过分析比较得出,600 r/min 的搅拌速度即可得到较好的搅拌效果,同时还可减小能耗。

参 考 文 献

- 1 王海波,刘凤之.我国果园机械研发与应用概述[J].果树学报,2013,30(1):165-170.
WANG Haibo,LIU Fengzhi. Review on research,development and application of orchard machinery in China[J]. Journal of Fruit Science,2013,30(1):165-170. (in Chinese)
- 2 张可欣,张帅.果园四旋翼自主飞行器的巡航检测系统设计[J].中国农机化学报,2017,38(11):81-85.
ZHANG Kexin,ZHANG Shuai. Design of cruise inspection system for four-rotor autonomous vehicle in orchard[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(11):81-85. (in Chinese)
- 3 李建平,高迎,王鹏飞.山地果园灌溉施肥轻简技术模式研究[J].农机化研究,2016,38(8):87-91.
LI Jianping,GAO Ying,WANG Pengfei. Research on the lightweight irrigation technology in the upland orchard[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(8):87-91. (in Chinese)
- 4 谭华.不同形状地块滴灌田间管网优化研究[D].兰州:兰州理工大学,2009.
- 5 杜晓东,程玉豆,陈光荣.果树水肥一体化研究进展[J].河北农业科学,2016,20(2):23-26.
DU Xiaodong,CHENG Yudou,CHEN Guangrong. Research progress about fertigation of fruit trees[J]. Journal of Hebei Agriculture Science,2016,20(2):23-26. (in Chinese)
- 6 李友丽,李银坤,郭文忠.有机栽培水肥一体化系统设计与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(增刊):273-279. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s042&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.042.
LI Youli,LI Yinkun,GUO Wenzhong. Design and test of integrated water and fertilizer system in organic cultivation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):273-279. (in Chinese)
- 7 WELTZIEN H C. Advances in biological control of fungal leaf pathogens through fermented organic substrates and microorganisms[M]. CASIDA J E. Pesticides and Alternatives; Innovative Chemical and Biological Approaches to Pest Control, Amsterdam; Elsevier Science Publishers,1990.
- 8 陈登丰.搅拌器和搅拌容器的发展[J].压力容器,2008,25(2):33-41,46.

- CHEN Dengfeng. Development of agitators and pressure vessels with agitators[J]. Pressure Vessel Technology, 2008, 25(2): 33 - 41, 46. (in Chinese)
- 9 XIANG Pan, LI Ding, LUO Peicheng. LES and PIV investigation of turbulent characteristics in a vessel stirred by a novel long-short blades agitator[J]. Chemical Engineering Science, 2018(1): 343 - 355.
- 10 文媛媛. 基于 FLUENT 的混合器内部流场数值模拟[J]. 过滤与分离, 2010, 20(1): 26 - 29.
WEN Yuanyuan. Numerical simulation of inner flow in hot and cool water mixture based on FLUENT[J]. Journal of Filtration & Separation, 2010, 20(1): 26 - 29. (in Chinese)
- 11 刘永华, 沈明霞, 蒋小平. 水肥一体化灌溉施肥机吸肥器结构优化与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 76 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151112&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 11. 012.
- LIU Yonghua, SHEN Mingxia, JIANG Xiaoping. Structure optimization of suction device and performance test of integrated water and fertilizer fertigation machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 76 - 81. (in Chinese)
- 12 喻黎明, 徐洲, 杨具瑞. 基于 CFD - DEM 耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 303 - 308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180336&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2018. 03. 036.
- YU Liming, XU Zhou, YANG Jurui. Numerical simulation of water and sediment movement in screen filter based on coupled CFD DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 303 - 308. (in Chinese)
- 13 张育斌, 魏正英, 胡杨. 水肥混肥器设计及数值模拟[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 33 - 36.
ZHANG Yubin, WEI Zhengying, HU Yang. Design and numerical simulation of water-fertilizer mixer[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(3): 33 - 36. (in Chinese)
- 14 殷鹏飞, 邓玉, 戴文连. 水肥一体化中水肥混合效果数值模拟研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(5): 122 - 130.
YIN Pengfei, DENG Yu, DAI Wenlian. Numerical simulation of the mixing efficiency of water and fertilizer solution in fertigation [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(5): 122 - 130. (in Chinese)
- 15 党林贵, 郭淑雪, 王定标. 不同组合桨搅拌机搅拌特性的数值研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(3): 59 - 62.
DANG Lingui, GUO Shuxue, WANG Dingbiao. The dynamics of the problem modeling and numerical simulation of liquid sloshing in liquid storage container[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2013, 34(3): 59 - 62. (in Chinese)
- 16 陶振宇. 螺旋扭带强化传热及阻力特性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2015.
- 17 马海乐, 朱文学, 唐伟强. 食品机械与设备[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- 18 王勇. 静态混合器混合机理研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2006.
- 19 付家新. 化工原理课程设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- 20 吴玉国, 吴胜, 迟开红. 搅拌器的结构设计及有限元模拟[J]. 食品与机械, 2013, 29(2): 130 - 133.
WU Yuguo, WU Sheng, CHI Kaihong. Structure design and finite element simulation for screw food agitator [J]. Food & Machinery, 2013, 29(2): 130 - 133. (in Chinese)
- 21 王凯, 虞军. 化工设备设计全书——搅拌设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 22 杨小振, 张显, 马建祥. 滴灌施肥对大棚西瓜生长、产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 109 - 118.
YANG Xiaozhen, ZHANG Xian, MA Jianxiang. Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(7): 109 - 118. (in Chinese)
- 23 SEBILLO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils [J]. Proceedings of the National Academy of the Sciences of the United States of America, 2013, 110(45): 18185 - 18189.
- 24 韩余, 肖宏儒, 秦广明. 采茶机架底盘槽型连接钢板计算模态分析[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(1): 157 - 160.
HAN Yu, XIAO Hongru, QIN Guangming. Calculating modal analysis of connecting box iron between rack and chassis of tea plucker[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(1): 157 - 160. (in Chinese)
- 25 郭善明, 刘金萍. 大棚蔬菜常用肥料与科学施肥技术[J]. 农业与技术, 2017(32): 32.
- 26 叶旭东, 王小芳, 毕龙. 基于 FLUENT 的 SK 型静态混合器的数值模拟[J]. 现代制造工程, 2006(3): 74 - 75.
YE Xudong, WANG Xiaofang, BI Long. The numerical simulation of SK static mixer according to the CFD software FLUENT[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(3): 74 - 75. (in Chinese)
- 27 郭鹏程, 罗兴铸, 刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维湍流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 1 - 5.
GUO Pengcheng, LUO Xingqi, LIU Shengzhu. Numerical simulation of 3D turbulent fields through a centrifugal pump including impeller and volute casing[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8): 1 - 5. (in Chinese)
- 28 李发宗, 童水光, 王相兵. 基于模态分析的液压挖掘机工作装置动态优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 28 - 36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140405&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 04. 005.
- LI Fazong, TONG Shuguang, WANG Xiangbing. Dynamic optimization design for working device of hydraulic excavator based on modal analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 28 - 36. (in Chinese)
- 29 陈树人, 韩红阳, 陈刚. 喷杆喷雾机机架动态特性分析与减震设计[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 50 - 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130409&flag=1. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 04. 009.
- CHEN Shuren, HAN Hongyang, CHEN Gang. Dynamic characteristic analysis and vibration reduction design for sprayer frame[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 50 - 53. (in Chinese)
- 30 温秉权. 金属材料手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- 31 宗全利, 郑铁刚, 刘焕芳. 滴灌自清洗网式过滤器全流场数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 57 - 65.
ZONG Quanli, ZHENG Tiegang, LIU Huanfang. Numerical simulation and analysis on whole flow field for drip self-cleaning screen filter[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8): 57 - 65. (in Chinese)