

大功率调速型液力耦合器数值计算与实验*

何延东¹ 刘刚² 朱向哲¹

(1. 辽宁石油化工大学机械工程学院, 抚顺 113001; 2. 辽宁省农业机械化研究所, 沈阳 110161)

【摘要】 基于三维多相流动理论和计算流体动力学(CFD),采用滑动网格理论对大功率调速型液力耦合器内部气液两相瞬态流动进行数值计算,并基于流场数值解进行液力耦合器的特性预测。由数值计算结果分析耦合器效率降低的原因。对耦合器进行不同工况、不同充液率下的外特性实验,将理论计算与实验结果进行对比,原始特性的计算与实验结果误差在允许范围内,从而验证理论方法和计算的准确性。

关键词: 大功率调速型液力耦合器 计算流体动力学 两相流动 数值计算 实验

中图分类号: TH137.331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0037-05

Numerical Calculation and Experiment of High-power Variable Speed Hydrodynamic Coupling

He Yandong¹ Liu Gang² Zhu Xiangzhe¹

(1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China

2. Liaoning Provincial Institute of Agricultural Mechanization, Shenyang 110161, China)

Abstract

The transient unsteady two phase flow of high-power variable speed hydrodynamic coupling was numerical simulated based on the 3-D multi-phase flow theory and computational fluid dynamics (CFD) by using the sliding mesh method and the characteristics was predicted. The pressure and velocity distribution were analyzed to reveal the flow rule and characteristics of flow field. The reduced efficiency reasons were revealed. The theoretical calculation was compared with the external characteristic experiment under different filling rates. The maximum error was less than 15% between computational result of original characteristics and experiment results, and the correctness of theory method was verified.

Key words High-power variable speed hydrodynamic coupling, CFD, Two-phase flow, Numerical calculation, Experiment

引言

液力耦合器内部流动为非常复杂的粘性、三维、非定常气液两相流动,其存在的分离流动、漩涡运动等流动现象对自身性能及安全性都有较大影响,目前国内外对调速型液力耦合器内部瞬态两相流动的研究较少。本文借助 CFD 软件对大功率调速型液力耦合器部分充液时的流场进行数值计算,揭示其

流场的流动规律和特性,并进行不同工况不同充液率的外特性实验,与基于流场数值解计算的原始特性进行对比,以验证数值计算方法的正确性。

1 控制方程

液力耦合器内部为湍流流动,故应用连续方程、时均化雷诺方程和 $k-\varepsilon$ 湍流模型,则有

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \tag{1}$$

收稿日期: 2011-12-28 修回日期: 2012-03-06

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA05Z256)和辽宁省教育厅资助项目(L2010249)

作者简介: 何延东,讲师,博士,主要从事液力传动与自动变速研究,E-mail: heyandong@gmail.com

$$\rho \frac{dV}{dt} = \rho F - \nabla p + (\mu + \varepsilon_m) \nabla^2 V \tag{2}$$

其中 $\varepsilon_m = c_\mu k^2 / \varepsilon$
式中 ε_m ——涡粘性系数 ∇ ——哈密尔顿算子
 V ——流体质点速度矢量
 F ——单位质量力 p ——压力
 μ ——动力粘度 k ——湍流能量
 ε ——湍流能量耗散率 ρ ——密度
 c_μ ——系数,常取 0.09
 k 和 ε 的输运方程为

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\varepsilon_m}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \tag{3}$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\varepsilon_m}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中 $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}$

流体在耦合器内作气液三维粘性两相流动的连续方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m) = 0 \tag{5}$$

其中 $\mathbf{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_k}{\rho_m}$ $\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$

式中 $\mathbf{v}_m$ ——质量平均速度
 ρ_m ——混合密度 ρ_k ——第 k 相的密度
 α_k ——第 k 相的体积分数

两相流动的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得。可表示为

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ &- \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T)] + \\ &\rho_m \mathbf{g} + \mathbf{G} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k} \right) \end{aligned} \tag{6}$$

其中 $\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k$

式中 n ——相数 $\mathbf{G}$ ——体积力
 μ_m ——混合粘性

2 CFD 建模

根据已有的耦合器有机玻璃模型进行三维建模,泵轮和涡轮的结构完全相同,图 1 所示为 CFD 的计算模型和网格模型,泵轮和涡轮的网格单元数都是 102 560 个。

液力耦合器的内部流动是非稳态的,而且泵轮流道与涡轮流道之间存在强烈的相互作用,为统一计算,对泵轮流道与涡轮流道的交界面采用滑动网

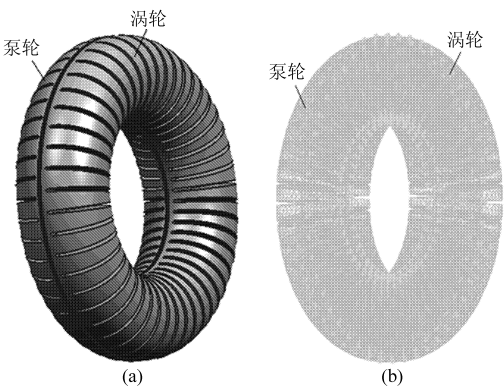


图 1 流道的计算模型和网格模型
Fig.1 Computational mesh models of hydrodynamic coupling
(a) CFD 计算模型 (b) 网格模型

格理论,将泵轮流道和涡轮流道统一计算。
滑动网格技术是一种非定常计算方法,它用到两个或多个网格区域,每个网格区域至少有一个边界的分界面,该分界面区域与另一网格区域相邻。相邻网格区域的分界面相互联系形成网格分界面 (grid-interface),简称交界面 (interface)。这两个单元区域相互之间沿网格分界面相对移动。计算过程中,单元区域沿着网格分界面相对滑动,而两个区域的网格不会发生变化。

当泵轮转动时,泵轮与涡轮网格区域相对交界面产生滑移,交界面上信息按照滑移理论进行传递。为更加清晰的显示其滑移状态,图 2 所示为截取其中部分计算流道的滑动网格理论图。

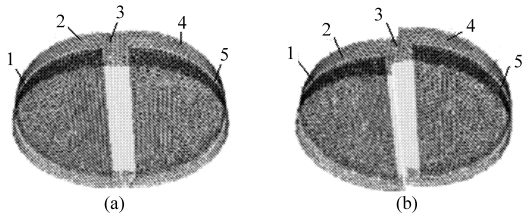


图 2 滑动网格理论示意图
Fig.2 Theory of sliding mesh
(a) 最初状态 (b) 滑移后状态
1、5. 叶片 2. 泵轮 3. 交界面 4. 涡轮

3 流场分析

3.1 整体流场压力分布

图 3 为整体流道的压力分布图。从图中可以看出,压力的整体分布比较均匀,且整体压力比较小。在离心力和哥氏力的共同作用下泵轮外环区域受到流体的挤压比较严重,所以在泵轮流道的外环上部压力比较大。在涡轮出口与泵轮进口处出现小范围的低压区,这是耦合器效率降低的主要原因。涡轮叶片压力面与吸力面之间的压差是液力耦合器能够输出转矩的必要条件。对比不同充液率 q_c 下压力

分布图可以发现,充液率对压力的影响比较大,充液率大时压力较高,充液率低时压力相对较低。

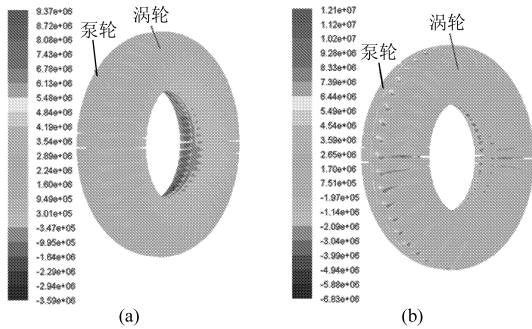


图 3 整体流场压力分布图

Fig. 3 Pressure of flow field

(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

3.2 整体流场速度分布

图 4 所示为液力偶合器在相同输入转速、不同充液率下的整体流场速度矢量图。泵轮速度沿径向呈比例增大,涡轮速度分布则比泵轮具有规律性,流动分布较为均匀,没有出现二次流、回流等不规则流动现象。另外涡轮内部流体产生的离心力较大,离心力的作用使得流体具有径向的加速度,这种由泵轮、涡轮的旋转产生的离心加速度使高速流体集中在流道主流区域的上部而使主循环的漩涡中心处于中部偏下的位置。虽然泵轮与涡轮之间大部分流体以及能量的传递是通过这个主循环的流动实现的,但在涡轮流道中心以及外环涡轮的出口处形成了局部低能区,这是造成液体传递过程中能量耗散的主要原因。

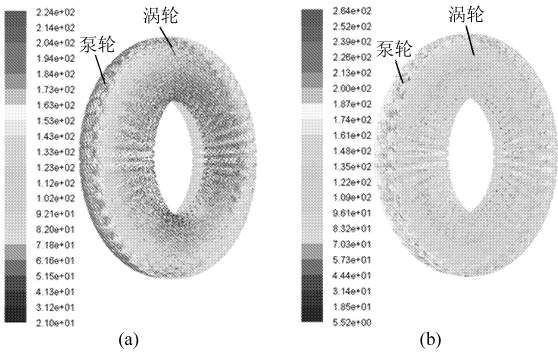


图 4 整体流场速度分布图

Fig. 4 Velocity of flow field

(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

3.3 液相体积分布

图 5 为液相体积分布图。涡轮中轴面形成环状流动,此液流环将随滑移率的增加而继续向轴线接近。对两图进行对比可以发现,充液率为 40% 时,流道的大部分空间被气相所占据,由于离心力的作用涡轮流道的外环处液相较多,气相较少。当充液率为 80% 时,液相充斥在整个流道中,仅在泵轮

和涡轮流道中部存在小部分的气体集中区域。不同充液率下,液力偶合器传递能量的能力不同,充液率越大传递能力越强。

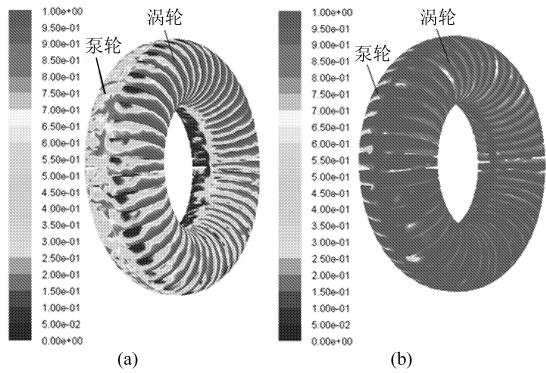


图 5 液相体积分布图

Fig. 5 Distribution of liquid volume

(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

3.4 叶片压力面流场分析

图 6 为泵轮与涡轮叶片压力面的压力分布图。从整体来看两种充液率下的压力分布相差较大。充液率对压力的影响较大,充液率较小时出现较大范围的低压区,这是由进入流道的低速低能流体所形成的,局部低压区的存在会引起较大的能量损失。泵轮叶片在离心力的作用下,高压区出现在外环的上部区域。

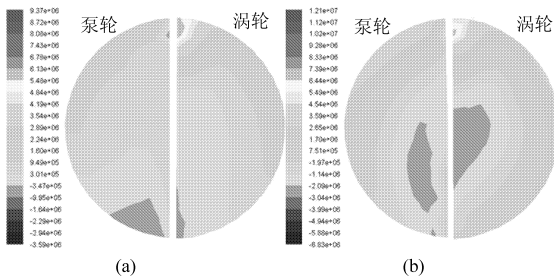


图 6 压力面压力分布图

Fig. 6 Pressure of pressure surface

(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

由涡轮压力面的压力分布可以看出交界面形成的三角区域产生高压区,这是由于从泵轮内吸收了能量的液流以一定的速度和压力冲击涡轮叶片而造成的,因此涡轮流道入口区域压力速度都比较大。进入涡轮流道的工作液沿着涡轮流道内壁面不断改变流动方向。工作液经过能量转换后,成为低速液流,由涡轮底部出口流出,进入泵轮叶片底部入口,从而完成一个循环。

图 7 为泵轮与涡轮压力面的速度矢量分布图。从图中可以看出液流在泵轮流道内的循环流动方向,即从下部进入流道,在叶片的作用下加速,上升至流道上部之后流出流道,以较高的速度进入涡轮流道。因此,上部速度比较高,下部速度比较低。同

时在下部与交界面夹角附近出现了小范围的低速区,低速区的存在容易使流动恶化,增大流道内的液流损失,使偶合器传动效率降低。总体来看,泵轮压力面和吸力面的速度分布比较平稳,没有不规则流动与二次流的出现。

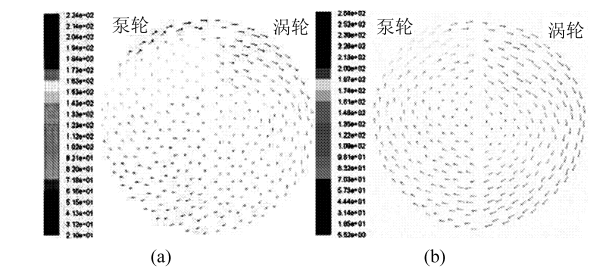


图7 压力面速度矢量分布图
Fig.7 Velocity of pressure surface
(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

由涡轮压力面的速度矢量图可以看到外环的上部速度最大,这是由于从泵轮流出的高能流体直接冲击压力面所造成的。涡轮叶片的上部为液流的入口区域,下部为液流的出口区域。充液率较大时压力面高速区较大,而充液率较小时压力面低速区较大。

3.5 交界面流场分析

图8为不同充液率下交界面的压力分布图。压力最大值出现在外环处。中部出现大范围的低压区,低压区是由于在泵轮进口和涡轮出口处液流的速度比较小所造成的。低压区和负压区的存在容易使流道内的流动产生恶化。充液率的增大会使压力有较大增加。

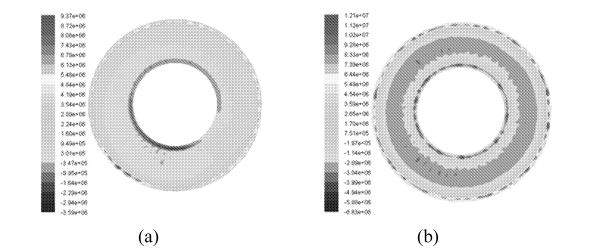


图8 交界面压力分布图
Fig.8 Pressure of interface
(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

图9为交界面速度分布图。交界面没有出现二次流和漩涡等现象,流动比较均匀,并且速度沿径向逐渐增大。高速区出现在泵轮出口与涡轮进口处,即交界面的外环,泵轮进口与涡轮出口即该面内环出现低速区。对比两图可见充液率对速度分布没有较大影响,但对速度大小有较大影响。

4 不同充液率下原始特性的计算

为了与实验结果进行对比,计算了不同工况、不

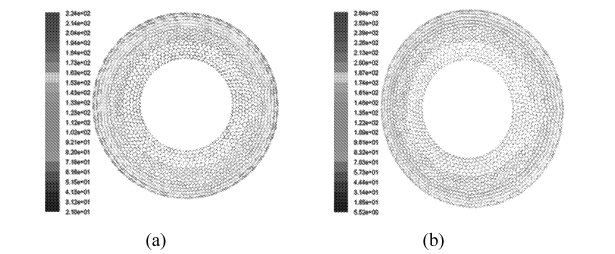


图9 交界面速度分布图
Fig.9 Velocity of interface
(a) $q_c = 40\%$ (b) $q_c = 80\%$

同充液率下的转矩,计算其原始特性为

$$\lambda_B = \frac{T_B}{\rho g n_B^2 D^5} \tag{7}$$

式中 T_B ——泵轮转矩, $N \cdot m$
 ρ ——工作液体密度, kg/m^3
 n_B ——泵轮转速, r/min
 D ——工作腔有效直径, m

绘制原始特性曲线,如图10所示。

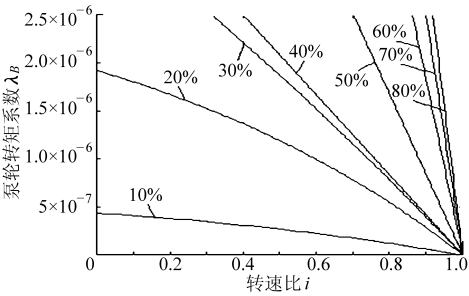


图10 不同充液率下原始特性曲线
Fig.10 Original characteristic curves

5 调速型液力偶合器实验

5.1 实验台组成与实验方法

实验是与大连液力机械有限公司联合完成的。该实验台为大连液力机械有限公司的液力传动实验台。

按 JB/T 4238.3—2005 液力偶合器性能实验方法,对液力偶合器进行性能实验。测试了大功率调速型液力偶合器在不同充液率下的外特性,根据实验数据计算原始特性。

实验采用定转速实验方法,即在测试中液力偶合器的输入转速不变,以液力传动油为工作介质,控制泵轮转速为 $-5 \sim 5 \text{ r/min}$ 。测试时涡轮空载启动,当涡轮转速稳定后开始加载,每次加载待仪器仪表指针稳定后记录测试值。测定液力偶合器的泵轮转速 n_B 、涡轮转速 n_T 、泵轮转矩 T_B 和涡轮转矩 T_T 。所有实验项目重复3次。

选用2台直流电力测功机作为主要设备,安装在一个基础平台上。2台测功机分别以电动机和发

电机状态运行。台架布置如图 11 所示。

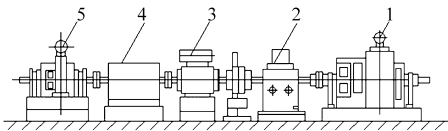


图 11 液力偶合器实验台布置简图

Fig. 11 Arrangement of hydrodynamic coupling experiment

1. 输入端测功机 2. 调速型液力偶合器 3. 输出端转矩测量仪
4. 齿轮箱 5. 输出端测功机

5.2 实验结果与分析

将采集到的实验数据进行处理与计算,得到液力偶合器各工况部分充液的原始特性实验曲线,如图 12 所示。

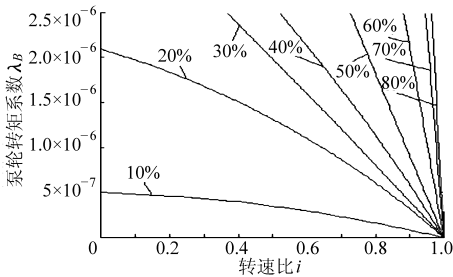


图 12 原始特性实验曲线

Fig. 12 Original characteristic experiment curves

将基于流场数值解的特性预测结果与实验测试结果进行对比,如图 13 所示。数值计算结果与实验数据相比有一定的误差,其原因一方面是数值计算模型与实验模型材料不同,另一方面是与泵轮连接成一个密封腔的外壳中存在部分工作液体,这部分

液体在偶合器工作过程中会发生剪切流动与摩擦阻力,对泵轮产生阻力矩,涡轮则相反,本文忽略了外壳中工作液体产生的影响,因此会对计算结果有一定的误差。此外,数值计算没有考虑温度的影响,故与实验结果有一定偏差。但总体而言,基于三维流场数值计算得到的结果与实验的最大误差小于 15%,这对于大功率调速型液力偶合器内复杂的两相流动来说是可以接受的,从而验证数值计算结果是可靠的。

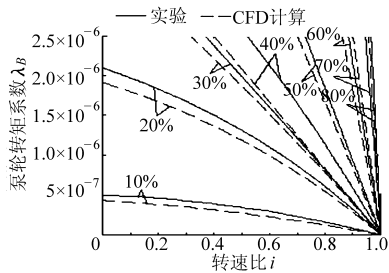


图 13 CFD 计算与实验对比

Fig. 13 Contrast curves of CFD calculation and experiment

6 结束语

对大功率调速型液力偶合器不同充液率下瞬态气液两相流动进行数值计算与外特性实验,数值计算反映了流道内部流动的基本特征,揭示出偶合器效率降低的原因,转矩计算结果与实验数据对比,误差在允许范围内,因此 CFD 计算可以应用于液力偶合器的设计。

参 考 文 献

1 才委,马文星,褚亚旭,等. 液力变矩器导轮流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(8):11~14.
Cai Wei, Ma Wenxing, Chu Yaxu, et al. Numerical simulation and experimental research on flow field in the stator of a torque converter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 11~14. (in Chinese)

2 Huitenga H, Mitra N K. Improving startup behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part I —fluid flow analysis and proposed improvement[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 683~688.

3 Huitenga H, Mitra N K. Improving startup behavior of fluid couplings through modification of runner geometry: part II —modification of runner geometry and its effects on the operation characteristics[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2000, 122(4): 689~693.

4 Charles N Mckinnon, Danamichele Brennen, Christopher E Brennen. Hydraulic analysis of a reversible fluid coupling[J]. ASAE Journal of Fluids Engineering, 2001, 123(2): 249~255.

5 万天虎,赵道利,梁武科,等. 基于 CAD/CFD 分析系统的流体机械翼型优化[J]. 流体机械, 2005, 33(11): 37~39.
Wan Tianhu, Zhao Daoli, Liang Wuke, et al. Aerofoil optimization of fluid machinery based on CAD/CFD system[J]. Fluid Machinery, 2005, 33(11): 37~39. (in Chinese)

6 冯进,丁凌云,张慢来. 离心式气液分离器流场的全三维数值模拟[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2006, 3(4): 112~115.
Feng Jin, Ding Lingyun, Zhang Manlai. Three dimensional numerical simulation on the flow field of centrifugal gas-liquid separator[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2006, 3(4): 112~115. (in Chinese)

7 余志毅,曹树良,王国玉. 叶片式混输泵内气液两相流的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 46~48.
Yu Zhiyi, Cao Shuliang, Wang Guoyu. CFD analysis of the air-water bubbly flow in a multiphase rotoynamic pump impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 46~48. (in Chinese)

螺旋叶片向上提升输送甘蔗。甘蔗扶起到最高点用时为 6.7 s。高速摄影对甘蔗的扶起过程与仿真结果一致。

5 结论

(1) 两段螺旋扶蔗机构适用于倒伏仰角小于 15°、侧向倒伏角范围为 45° ~ 165° 的甘蔗,能够适应

我国海滨地区严重倒伏甘蔗的收获需求。
(2) 通过甘蔗扶起运动学仿真和高速摄影,甘蔗能扶起到最高点,扶起时间为 4.68 ~ 8.21 s。拣拾段与输送段衔接处,对甘蔗扶起有一定的冲击。
(3) 对顺倒伏 60° 的甘蔗,扶起机构拣拾段安装角为 5°,输送安装角为 60°,速比 K 为 0.59,对甘蔗的扶起效果最好。

参 考 文 献

1 牟向伟,区颖刚,张杨. 拨指链式扶起机构试验[J]. 农业机械学报,2009,40(8):49 ~ 53.
Mou Xiangwei, Ou Yinggang, Zhang Yang. Experiment of the finger-chain type sugarcane-lifter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(8):49 ~ 53. (in Chinese)

2 董世平,王锋德,邱灶杨,等. 自走式棉秆捡拾收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):99 ~ 102.
Dong Shiping, Wang Fengde, Qiu Zaoyang, et al. Design and experiment of self-propelled cotton-stalk combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):99 ~ 102. (in Chinese)

3 李旭,舒彩霞,黄海东,等. 高粗茎秆作物收割技术的研究进展[J]. 农机化研究,2010,32(8):1 ~ 6.
Li Xu, Shu Caixia, Huang Haidong, et al. Harvest cutting technology of thick-tall stem crops at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2010,32(8):1 ~ 6. (in Chinese)

4 董振,蒙艳玫,李永敏. 不等螺距螺旋扶起机构的设计[J]. 农机化研究,2010,32(12):79 ~ 84.
Dong Zhen, Meng Yanmei, Li Yongmin. Design of non-equidistant pitch sugarcane propping device[J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2010,32(12):79 ~ 84. (in Chinese)

5 高建民,区颖刚. 甘蔗螺旋扶起机构的理论研究及虚拟样机仿真[J]. 农业工程学报,2004,20(3):1 ~ 5.
Gao Jianmin, Ou Yinggang. Theoretical study on spiral sugarcane-lifting mechanism of sugarcane harvester and virtual prototype simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004,20(3):1 ~ 5. (in Chinese)

6 蒙艳玫,刘正士,李尚平,等. 甘蔗收获机排刷式剥叶元件虚拟试验分析[J]. 农业机械学报,2003,34(3):34 ~ 46.
Meng Yanmei, Liu Zhengshi, Li Shangping, et al. Virtual experiment analysis of a brush shape of cleaning element for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(3):34 ~ 46. (in Chinese)

7 贺俊林,佟金,陈志,等. 指形拨禾轮分禾机构的虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报,2007,38(6):53 ~ 56.
He Junlin, Tong Jin, Chen Zhi, et al. Virtual design and kinematic simulation for feed-in mechanism with finger rotor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(6):53 ~ 56. (in Chinese)

8 解福祥,区颖刚,刘庆庭. 甘蔗收获机组合式扶起装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):94 ~ 98.
Xie Fuxiang, Ou Yinggang, Liu Qingting. Experiment of combined-lifter device for sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):94 ~ 98. (in Chinese)

9 戴飞,高爱民,孙伟. 纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(1):74 ~ 78.
Dai Fei, Gao Aimin, Sun Wei, et al. Design and experiment on longitudinal axial conical cylinder threshing unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):74 ~ 78. (in Chinese)

10 刘庆庭. 甘蔗切割机理[D]. 广州:华南农业大学,2004.
Liu Qingting. The cutting mechanism of sugarcane [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2004. (in Chinese)

(上接第 41 页)

8 何志霞,袁建平,李德桃,等. 柴油机喷嘴孔内气液两相湍流场三维数值模拟[J]. 内燃机工程,2005,26(6):18 ~ 21.
He Zhixia, Yuan Jianping, Li Detao, et al. Three-dimensional numerical simulation of two-phase turbulent flow in nozzle of diesel engines[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2005,26(6):18 ~ 21. (in Chinese)

9 何延东,刘刚. 调速型液力耦合器外特性实验研究[J]. 机床与液压,2011,39(7):48 ~ 49.
He Yandong, Liu Gang. External characteristics experiment of variable speed hydrodynamic coupling[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011,39(7):48 ~ 49. (in Chinese)

10 柴博森,马文星,刘春宝. 基于互相关算法的液力耦合器内部流场分析[J]. 农业机械学报,2011,42(12):38 ~ 42.
Chai Bosen, Ma Wenxing, Liu Chunbao. Analysis of internal flow field in hydrodynamic coupling based on cross-correlation algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):38 ~ 42. (in Chinese)