

蒸汽吸入对两级跨音速风扇影响的数值研究

赵伟辰,陈杰,黄国平

(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘 要:采用数值计算方法研究了吸入不同状态蒸汽后跨音速风扇性能与内部主要流动特征的变化规律。结果表明:吸入气态与液态蒸汽后对风扇堵塞点流量系数、稳定工作范围与总压比有着相反的影响。液态蒸汽在风扇内部的蒸发过程降低了风扇消耗的压缩功,等熵压缩效率最高提升 1.21%,随蒸汽吸入量增大,性能变化更为明显。吸入液态蒸汽后风扇叶顶间隙泄漏涡与弦向的夹角增大至 15.3° ,激波后形成更大范围的低相对总压区。

关键词:航空母舰;舰载机;高压蒸汽弹射;跨音速风扇;蒸汽吸入;性能;流动特征

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0123-04

Investigation on Effect of Steam Ingestion on Two-stage Transonic Fan

ZHAO Weichen, CHEN Jie, HUANG Guoping

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The performance and flow feature of a two stage transonic fan after ingesting various forms and mass steam are simulated by the numerical method. The results show that the flow coefficient, stable working range and total pressure ratio vary after ingesting gas and liquid state steam. Droplets evaporate in fan stages, thus decreasing the consumption of compression work. The isentropic efficiency is up to 1.21% after ingesting liquid state steam. With more steam taken into fan stages, the performance variation is more obvious. The angle of blade chord and tip leakage vortex trajectory rises to 15.3° and the region behind the shock wave extends in liquid steam ingestion conditions.

Keywords: carrier; ship-board aircraft; high steam ejection; transonic fan; steam ingestion; performance; flow feature

0 引言

高压蒸汽弹射是目前航空母舰弹射舰载机的主要方式。在弹射过程中会有蒸汽泄漏到甲板上,在舰载机起飞等近地工作状态下会被发动机吸入,在弹射起飞过程中,对压缩系统性能与稳定性要求更高。为此过去 10 年间航空工业强国针对弹射起飞过程中航空发动机蒸汽吸入问题开展了研究。美国海军研究生院针对舰载机 F-35C 的压缩系统先后开展了实验与数值模拟研究,ZARRO S E^[1]、GANNON A J^[2]和 KOESSLER J J^[3]对一跨音速风扇在空气来流与蒸汽吸入情况下 90%、95%和 100%转速风扇的失速情况开展了实验研究,发现吸入蒸汽后风扇存在一种“pop-stall”的新失速状态,不同于纯净空气来流状态下的模型型失速信号。HEDGES C R^[4]、GANNON A J^[5]与 HURLEY A M^[6]利用商用 CFD 软件 CFX 对上述实验风扇模型进行单通吸入气态蒸汽后的数值模拟,与实验数据对比后,发现利用三维数值模拟手段能够对风扇性能进行合理计算,开展的非定常数值模拟研究对风扇失速形式的计算与实验偏差较大,因为实际实验过程中,蒸汽不可避免地存在液化过程,仅考虑气态蒸汽影响的数值模拟结果必然存在误差。美国空军阿诺德研究中心 ALAN Hale^[7]与 KLEPPER Jason^[8]利用一维的 Multiphase Code 与一维

Compressor Meanline Code 结合,研究吸入蒸汽对压缩系统性能的影响,研究中首次提出了蒸汽是液态液滴与气态蒸汽的混合物,与实验数据对比后认为其一维模型对设计点工况的性能预测误差在可接受范围内。徐浩洋^[9]等在已有二维稳定性模型基础上加入修正关联式,用于计算稳态条件下气态蒸汽吸入情况的失速边界。

目前国内外研究主要关注于压缩系统在吸入蒸汽后性能计算的一维模型,目的在于快速评估不同压缩系统吸入蒸汽后性能变化,但一维模型考虑的因素有限,尤其是对液态蒸汽这一因素的影响。同时,高温蒸汽吸入存在工质物理性质与温度畸变耦合的影响,因此美国海军研究生院高温蒸汽吸入的研究对其他型号和其他蒸汽泄漏状态下风扇性能变化评估的指导作用有限。

本文针对跨音速风扇,在吸入气态蒸汽与液滴的两种情况下,采用全三维数值模拟手段研究风扇性能的变化趋势与内部流动结构的改变,为研究气体性质的影响提供参考。

1 数值模拟验证与计算方法

1.1 计算模型与网格校验

本文跨音速风扇采用 NASA Lewis 研究中心设计的二

基金项目:中央高校基本科研业务费南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金(kfj20170214)

第一作者简介:赵伟辰(1994—),男,河北唐山人,硕士,研究方向为内流与叶轮机械。

级风扇^[10],详细设计参数如表1所示。

表1 NASA 跨音速风扇设计参数

参数	值
设计总压比	2.80
设计等熵压缩效率/(%)	83.9
动叶片个数	第1级 28 第2级 60
静叶片个数	第1级 46 第2级 59
设计流量/(kg/s)	83.5
设计转速/(r/min)	10 720

本文采用商业 CFD 软件 ANSYS CFX 进行定常数值计算,控制方程基于可压缩的 RANS (reynolds-averaged navier-stokes) 方程,湍流模型采用 $k-\epsilon$ ($k-\epsilon$) 模型。风扇叶片通道的计算网格采用商用 CFX 的子模块 Turbo-Grid 划分,整体采用结构化网格。叶片周围采用 O 型网格包围,叶片前、后通道采用 H 型网格。叶片间隙区域沿叶片展向铺设 7 层网格,叶片表面、轮毂与机匣位置局部加密,近壁面第 1 层网格满足 $k-\epsilon$ 湍流模型要求,壁面第 1 层网格 y^+ 值为 70 量级,满足 $k-\epsilon$ 湍流模型要求。网格结构与细节如图 1 所示。

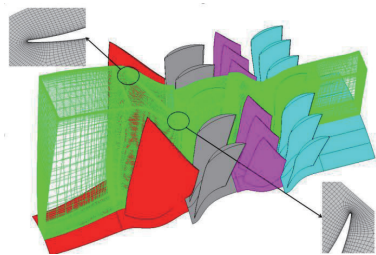
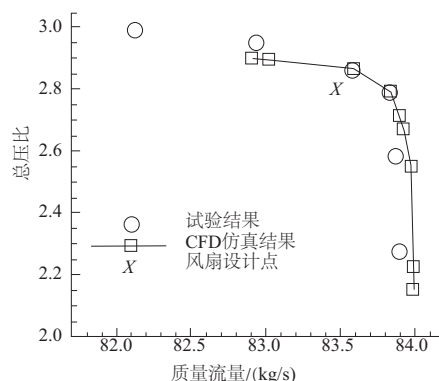


图1 计算域与网格示意图

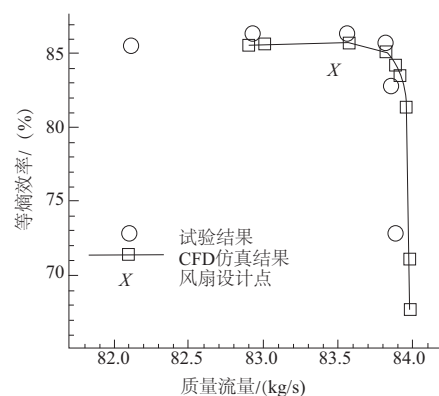
风扇进口给定总温、总压边界条件,风扇出口给定静压边界条件,机匣、轮毂与叶片均给定绝热无滑移壁面。根据实验环境设定进口边界条件,改变风扇出口静压来调节风扇物理流量,进一步将 CFD 计算得到的风扇特性(物理流量-总压比、物理流量-等熵压缩效率)曲线与实验数据^[11]进行对比。如图 2 所示,数值计算结果与实验结果存在一定偏差,但偏差均在 2% 以内。数值模拟计算的最高效率点与风扇理论设计点更接近,风扇对堵塞点(最大流量点)与最高效率点计算偏差小,对风扇近失速点的计算偏差较大,数值模拟计算的近失速点物理流量明显小于实验测量值。由于用 CFD 计算的压缩部件稳定工作范围一般小于实验测量范围,可以认为对风扇的模拟方法满足研究所需。

1.2 蒸汽吸入计算方法

蒸汽存在气态与液态(液滴)两种形式,本文采用 Eulerian-Lagrangian 多相流模型,分别用 Eulerian 法求解空气与气态蒸汽的连续相控制方程,用 Lagrangian 法求解



(a) 物理流量-总压比特性



(b) 物理流量-等熵压缩效率特性

图2 风扇特性曲线

水滴颗粒的离散相控制方程,并通过质量、动量和能量源项将两相之间的相互影响进行双向耦合。本文采用基于 TAB 模型发展的 CAB 模型,用于模拟液滴与叶片、机匣和轮毂的碰撞后的破碎过程,并用 Antoine 蒸发方程计算液滴蒸发过程中的传热。该数值模拟方法在跨音速 Sanger 转子的研究中^[4]已得到验证。

本研究中空气与气态蒸汽均视为理想气体,且在气相混合工质中两者为均匀混合。在液态蒸汽吸入模拟条件下,液滴在风扇进口均匀分布且为等直径球形,设定液滴进入速度与气流速度相同,液滴直径取 $15 \mu\text{m}$,参考文献[12]中对蒸汽液滴尺寸的描述情况。

2 蒸汽吸入后风扇性能变化

风扇工作状态选取 100% 转速的设计状态,蒸汽吸入质量分数为 1% 与 2%。图 3 是空气工质和不同状态蒸汽吸入情况下的风扇特性曲线。横坐标是流量系数。流量系数的定义为风扇进口轴向速度与叶尖周向速度的比值,该无量纲参数不含气体物性参数,便于衡量不同气体工质条件下风扇性能。纵坐标分别是总压比与等熵压缩效率,等熵压缩效率 η 的计算表达式如式(1)-式(4)所示,其中 W_a 和 W_s 分别代表理想空气与理想气态蒸汽的等熵压缩功; x_s 与 x_a 分别代表混合工质中气态蒸汽与空气的质量分数; W_i 代表风扇实际压缩功,液滴的等熵压缩功小至忽略不计; h^* 、 T^* 与 p^* 分别表示总焓、总温与总压,下角标 1 和 2 分别代表风扇通道进、出口截面;空气与理想气态蒸

汽的定压比热容 c_{pa} 与 c_{ps} 分别为 $1.004 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 与 $1.859 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;比热容比 γ_a 与 γ_s 分别为 1.40 和 1.33 ; M_1 是两级动叶片轮缘功; m_{in} 是风扇进口混合工质质量流量:

$$\eta = \frac{x_a W_a + x_s W_s}{(x_a + x_s) W_1} \quad (1)$$

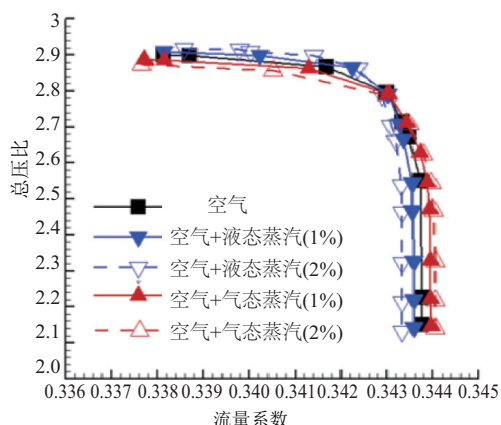
$$W_a = (h_2^* - h_1^*)_a = c_{pa} T_1^* \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\gamma_a - 1}{\gamma_a}} - 1 \right] \quad (2)$$

$$W_s = (h_2^* - h_1^*)_s = c_{ps} T_1^* \left[\left(\frac{p_2^*}{p_1^*} \right)^{\frac{\gamma_s - 1}{\gamma_s}} - 1 \right] \quad (3)$$

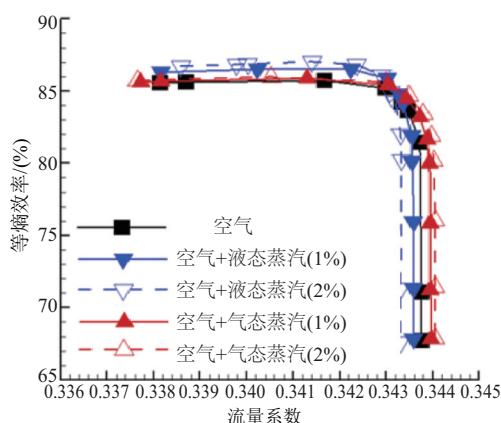
$$W_1 = \omega M_1 / m_{in} \quad (4)$$

由图3可见,吸入1%质量分数气态蒸汽后风扇堵塞点流量系数由 0.3437 升高至 0.3440 ,升高了 0.09% ,随吸入量增加流量系数升高至 0.3441 。而吸入液态液滴后风扇堵塞点流量系数减小,在1%与2%吸入量下分别降低了 0.09% 与 0.12% ,吸入不同状态蒸汽后风扇轴向通流能力变化幅度较小,在 0.1% 量级。

对于风扇定常近失速点的判断标准为风扇计算结果收敛的最值,即继续增大风扇出口静压导致CFD计算发散,可以观察到与空气工质相比,吸入1%与2%质量分数气态蒸汽后风扇近失速点向流量系数减小方向移动,而吸入液态蒸汽后近失速点流量系数增大。结合近失速点和堵塞点的变化,前者稳定工作范围增大,而后者减小。



(a) 流量系数-总压比特性



(b) 流量系数-等熵压缩效率特性

图3 气态蒸汽吸入条件风扇特性曲线

吸入1%质量分数气态蒸汽后风扇最大总压比降低 0.41% ,气态蒸汽吸入量增大至2%,风扇最大总压比降低 0.69% 。吸入1%质量分数液态蒸汽后风扇最大总压比升高 0.32% ,液态蒸汽吸入量增大至2%,风扇最大总压比升高 0.65% 。吸入气态蒸汽工况等熵压缩效率无明显变化,吸入液态蒸汽工况等熵压缩效率在1%与2%蒸汽吸入量下最大升高 0.83% 与 1.21% 。造成等熵压缩效率提高的原因是风扇压缩混合工质是一个温度升高的过程,液态蒸汽吸入后随混合工质温度升高存在液滴蒸发过程,风扇内部温升减缓,实际消耗的压缩功减小。图4展示了风扇在上述各工况点耗功的大小,可以观察到在相同流量系数工况,吸入1%和2%质量分数气态蒸汽后风扇消耗压缩功与纯净空气工质条件下基本相同。吸入液态蒸汽后,压缩功平均减少 1500 J 。

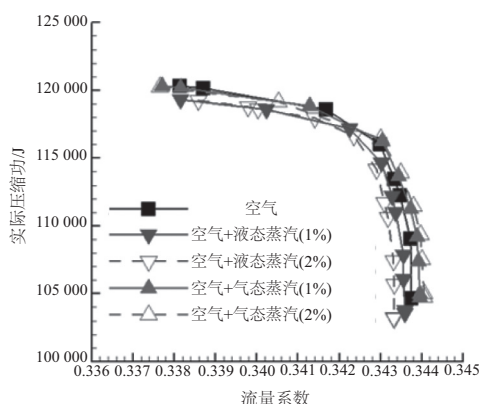


图4 吸入蒸汽后不同工况点风扇耗功

3 蒸汽吸入后风扇流动结构变化

由第2节计算结果观察到,随气态、液态蒸汽吸入风扇后,风扇特性变化趋势相反,且随两种状态蒸汽吸入量增大,与空气来流状态特性差异越大。因此本节对比流场结构中选择大吸入量,即2%质量分数的计算结果与空气工质工况进行对比。

图5是3种工质条件下风扇在最高效率点工况叶片通道内50%叶高位置温度分布图,可以观察到在吸入该量级气态蒸汽后,由于气体比热容差异造成的叶片通道内温度场的分布差异较小。吸入液态蒸汽后,在第1级静叶通道内可以观察到温升减缓过程,第2级动叶通道与静叶通道内温升情况减弱更明显。吸入液态蒸汽后风扇出口平均温度与空气工质相比降低 10 K ,主要原因即第2节分析中所述液态液滴的蒸发作用引起温升减缓,由于第1级动叶内部温度较低,液滴由风扇进口至第1级动叶出口位置蒸发作用较弱。

风扇叶顶流动结构是影响风扇失速状态的重要因素,本研究采用定常数值模拟计算方法对失速点判断的准确性有限,但在吸入不同状态蒸汽后叶顶流动结构的变化趋势可以为风扇失速情况的研究提供参考。

图6是3种工质条件下风扇在近失速点工况下第1级动叶98%叶高位置相对总压分布图。图6中,叶片通道内总压间断位置为叶片吸力面激波位置。红色半透明曲

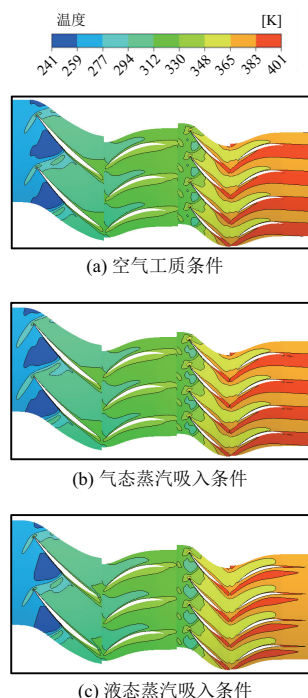
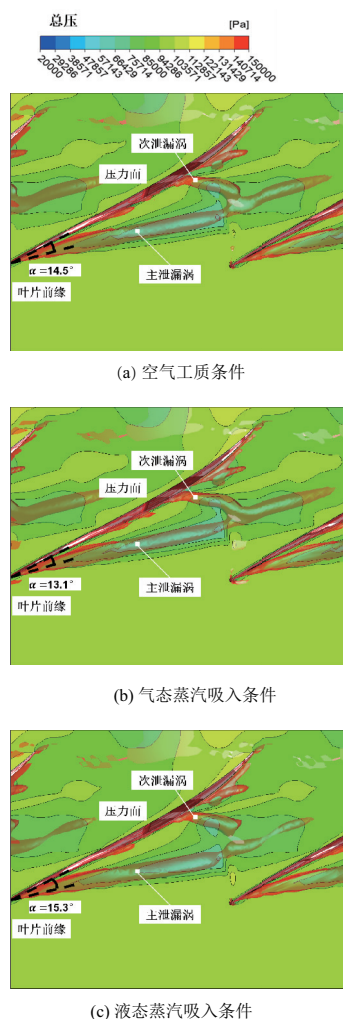


图5 3种工质条件下50%叶高位置温度分布

图6 3种工质条件下98%叶高位置相对总压分布与 Q 准则等值面分布

面(因本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)是 Q 准则等值面(图中 $Q=3\times 10^8$),用于捕捉叶顶旋流结构。可以观察到在叶片前缘位置由于叶片压差造成的叶顶间隙泄漏涡结构,在0.64弦长位置存在次泄漏涡结构。主泄漏涡在经过叶片通道内激波后与形状和强度发生改变,并在下游与次泄漏涡交汇。定义主泄漏涡激波前轨迹与泄漏涡产生位置弦向夹角为 α ,在吸入气态蒸汽后 α 相比空气工质工况由 14.5° 减小至 13.1° ,吸入液态蒸汽后 α 增大至 15.3° 。激波前主泄漏涡强度比另外两种工质强(等值面范围大),经过激波后主泄漏涡范围减小,且在激波后形成一个更大面积的低相对总压区域。

4 结语

本文采用数值计算方法研究了吸入气态与液态蒸汽后跨音速风扇性能与内部主要流动特征的变化情况,通过研究发现:

1) 吸入气态蒸汽后堵塞点流量系数增大,稳定工作范围增大,总压比降低。吸入液态蒸汽后变化趋势相反,随两种状态蒸汽吸入量增大,上述变化更加明显。流量系数变化范围在0.1%量级。

2) 吸入1%量级气态蒸汽对风扇等熵压缩效率影响很小,液态蒸汽吸入后风扇效率最高提升1.21%,液态蒸汽在风扇内部的蒸发吸热过程中减缓了风扇通道内部温升,平均降低实际压缩功1500J。受温度梯度影响,蒸发过程主要发生在第2级叶片通道内。

3) 吸入气态蒸汽后风扇动叶叶顶间隙主泄漏涡更靠近叶片吸力面,与弦向的夹角减小,吸入液态蒸汽后该夹角增大至 15.3° ,且在激波前后主泄漏涡覆盖范围变化更大,激波后形成更大范围低相对总压区域。

参考文献:

- [1] ZARRO S. E. Steady-state and transient measurements within a compressor rotor during steam-induced stall at transonic operational speeds[D]. California: Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2006.
- [2] GANNON A. J, HOBSON G. V, PAYNE T. A, et al. The effect of steam ingestion on transonic rotor stall margin[C]. ASME Turbo Expo 2007; Power for Land, Sea, and Air, 2007; 389-398.
- [3] KOESSLER J. J. Experimental investigation of high-pressure steam induced stall of a transonic rotor[D]. California: Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2007.
- [4] HEDGES C. R. Computational fluid dynamic model of steam ingestion into a transonic compressor[D]. California: Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2009.
- [5] GANNON A. J, HOBSON G. V, HEDGES C. R, et al. Investigation and prediction of steam-induced stall-margin reduction in two transonic rotor fans[C]. ASME Turbo Expo 2012; Turbine Technical Conference and Exposition, 2012; 2513-2522.
- [6] HURLEY A. M. Experimental investigation of high-pressure steam-induced surge in a transonic compressor stage[D]. California: Master's Thesis, Naval Postgraduate School, 2008.

(下转第154页)

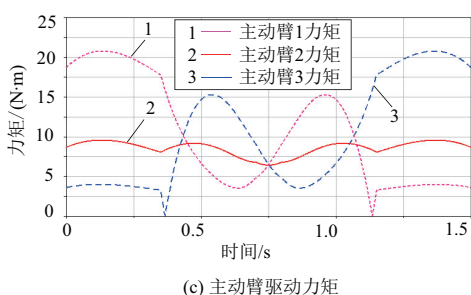
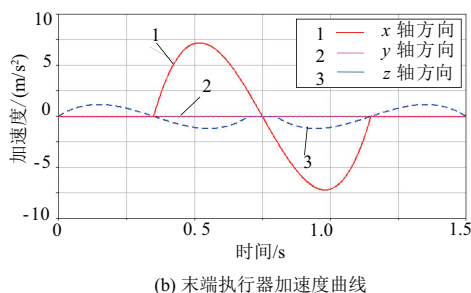
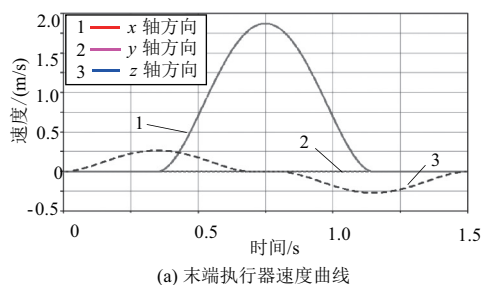


图6 动力学仿真结果

由图6的仿真曲线可知,机器人的末端执行器在运动过程中速度、加速度连续无突变,满足平稳运行的要求。主动臂驱动力矩连续无突变,且最大驱动力矩为 $21 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。根据仿真得到的主动臂最大驱动转矩,选用松下750 W 交流伺服电机,并配合使用减速比为 $1:10$ 的行星减速器,可以满足最大驱动力矩的需求。

4 结语

设计了一种面向牙刷高速拾放操作的 Delta 型并联机器人,可以用于牙刷自动化生产的上料操作。完成了机器人本体结构设计和末端执行器设计,可以实现对牙刷的方向和姿态调整,保证牙刷以正面朝上的姿态放入植毛机的送料装置中。通过 MATLAB 软件对机器人工作空间进行验证,结果表明机器人的结构参数可以满足工作空间要求。研究机器人轨迹规划技术,基于 3-4-5 次多项式运动规律对牙刷拾放轨迹进行规划,并利用 ADAMS 软件对机器人进行动力学仿真。结果表明,机器人末端速度、加速度曲线连续无突变,最大速度和最大加速度均满足设计要求。通过仿真得到主动臂驱动力矩曲线,曲线连续无突变,最大驱动力矩为 $21 \text{ N} \cdot \text{m}$,可以作为电机和减速器选型的依据。

参考文献:

- [1] 沈玮. 基于机器视觉的牙刷检测与定位技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [2] 倍加洁口腔护理用品宿迁有限公司. 牙刷刷丝植毛机全自动上料装置: 中国, CN201520918385.X [P]. 2016-04-06.
- [3] 闫青. 牙刷送料植毛一体机的创新设计与实现[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2018.
- [4] 曾政. 一种 Delta 型并联机器人设计与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [5] 刘松涛. 一类 2-、3-、4 自由度高速并联机械手设计理论与方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [6] YAN L, LIU D, JIAO Z. Novel design and kinematics modeling for delta robot with improved end effector[C]. IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IEEE, 2016.
- [7] ANGEL L, BERMUDEZ J C, MUNOZ O. Dynamic optimization and building of a parallel delta-type robot[C]. IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2014.
- [8] 梅江平, 臧家炜, 乔正宇, 等. 三自由度 Delta 并联机械手轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 9-17.

收稿日期: 2019-11-11

(上接第 126 页)

- [7] HALE A, Klepper J. A numerical investigation of the effects of steam ingestion on compression system performance[C]. ASME Turbo Expo 2004: Power for Land, Sea, and Air, 2004: 295-303.
- [8] HALE A, KLEPPER J, HURWITZ W. A. Numerical capability to analyze the effects of water ingestion on compression system performance and operability[C]. ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air, 2005: 113-125.
- [9] 徐浩洋, 胡骏, 屠宝锋. 蒸汽吸入对稳定性影响中修正关联方法的研究[J]. 推进技术, 2019(3): 532-541.

- [10] MESSENGER H. E, KENNEDY E. E. Two-stage fan: I. aerodynamic and mechanical design[R]. East Hartford: Pratt & Whitney Aircraft Division, 1972.
- [11] ROBERT S. R, WILLIAM A. B. Performance of a highly loaded two-stage axial-flow fan[R]. Cleveland, Ohio: Lewis Research Center, 1974.
- [12] WALSH P P, FLETCHER P. Gas turbine performance: the effects of water, liquid, steam and ice[M]. Oxford: Blackwell Science Ltd., 2008.

收稿日期: 2019-01-21