预旋系统稳态和非稳态计算对比研究*

梁 靓,刘高文,雷 昭,冯 青

(西北工业大学 动力与能源学院,陕西西安 710072)

摘 要:针对预旋系统由于旋转引起流场和温度场参数周期性瞬态变化的问题,分别采用滑移网格 的瞬态法和固定转子相位的稳态法进行数值求解,并在稳态计算中通过改变转子相位来近似模拟非稳态 问题的时空变化特性。通过稳态空间平均结果与非稳态时均结果的对比,以期为预旋系统非稳态问题的 低成本求解提供方法依据。结果表明:稳态计算结果与非稳态计算结果相比,周期性波动频率一致,接 受孔进口处,稳态计算的压力波动幅度小39%左右,温度波动幅度小15%左右;多个相位的稳态空间 平均结果与非稳态时均结果相比,压力高0.2%,温度低0.1%;采用多个计算周期数与单个周期的非稳 态计算结果差异微小。当采用喷嘴出口气流中心正对接受孔迎风面前缘的转子相位时,稳态计算结果与 非稳态计算时均结果最接近。

关键词:预旋系统;对比;非稳态;转子相位;时均 中图分类号: V231.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2019) 11-2546-08 DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 180641

A Comparative Study on Steady and Unsteady Calculations of a Pre-Swirl System

LIANG Liang, LIU Gao-wen, LEI Zhao, FENG Qing

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem of periodic transient changes of flow parameters and temperature caused by rotation in a pre-swirl system, the transient method with sliding mesh and the steady-state method with frozen rotor approach were used, respectively. The time-space characteristics of unsteady problems were approximated by changing rotor phase in the steady-state calculation. To find a low cost solving method for the unsteady-state problem in a pre-swirl system, the steady-state space-averaged results and the unsteady-state time-averaged results were compared extensively. The results show that the periodic fluctuation frequency of steady-state calculation is consistent with that of unsteady-state calculation. At the inlet of the receiving hole, the pressure fluctuation amplitude calculated by steady-state method is about 39% smaller than that calculated by unsteady-state time-averaged results, the steady-state space-average results of multiple rotor positions show that the pressure is 0.2% higher and the temperature is 0.1% lower. There is little difference between the unsteady calculation results with multiple calculation periods and those with single period. When the rotor is located at this position where the nozzle outlet air flow is opposite to the front edge of the receiving hole windward side,

^{*} 收稿日期: 2018-10-15; 修订日期: 2018-12-18。

基金项目:国家科技重大专项(2017-III-0011-0037)。

作者简介:梁 靓,硕士生,研究领域为发动机空气系统和旋转盘腔中的流动传热。E-mail: 1159116599@qq.com

通讯作者:刘高文,博士,教授,研究领域为旋流传热与发动机空气系统。E-mail: gwliu@nwpu.edu.en

引用格式:梁 靓,刘高文,雷 昭,等. 预旋系统稳态和非稳态计算对比研究[J]. 推进技术, 2019, 40(11):2546-2553.
 (LIANG Liang, LIU Gao-wen, LEI Zhao, et al. A Comparative Study on Steady and Unsteady Calculations of a Pre-Swirl System[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(11):2546-2553.)

the steady-state calculation results are the closest to the unsteady-state calculation results.

Key words: Pre-swirl system; Comparison; Unsteady-state; Rotor phase; Time-averaged

1 引 言

在航空发动机中,必须通过预旋供气系统将空 气从压气机出口输送到涡轮盘腔,在尽可能低的温 度下冷却涡轮转子叶片。预旋系统在将冷却空气输 送到转动的接收孔之前,通过静止的预旋喷嘴使其 在周向产生旋流分量。这降低了空气的相对总温 度,从而提高了冷气的品质。

基于理论和实验结果,El-Oun等^[1],Chew等^[2]和 Dittmann等^[3]已经为预旋系统开发了许多简单计算模型,但是目前预旋系统的设计越来越依赖于CFD建 模。这些分析通常引入近似值来将问题视为稳态(最 近的典型例子是Jarzombek等^[4])。Snowsill等^[5]通过比 较一个稳态和非稳态CFD解决方案,考虑了这种近似 的有效性。他们得出结论,稳态近似是足够的。

Ciampoli等^[6]对直接式预旋系统进行了非稳态数 值模拟。研究发现,非稳态数值模拟得出的计算结 果与稳态计算结果较为接近,都比实验结果稍微偏 高,同时认为数值计算结果偏高的原因可能是计算 过程中没有考虑传热的影响。较稳态计算,非稳态 数值模拟结果与实验结果符合得更好,并能像实验 一样更好地捕捉预旋系统的非稳态特性。

Benim 等^[7]通过三维计算对直接式预旋系统进行 了分析研究。计算中利用了不同的计算方法,并与 测量结果进行了比较。结果表明,采用固定转子法 处理定常和旋转区域之间的界面,通过准稳态分析, 可以对结果得到足够精确的预测。对于所研究的情 况,采用固定转子方法,无量纲压力和温度对静子和 转子的相对位置具有较弱的敏感性。

Joachim 等^[8]利用 CFD 计算软件对过预旋的低位 预旋系统的流动和传热进行计算并与实验结果进行 了对比,研究发现在转静子交界面采用固定转子法 得到的结果与瞬态分析法得到的结果吻合良好,与 耗时的瞬态分析法相比,固定转子法可以得到相当 好和快速的结果。

Anish等^[9]采用多参考系法对带有增压叶轮的预旋系统进行了数值模拟研究。他们还研究了在供气 孔进口处增加导流槽的预旋系统模型,研究结果表 明增加导流槽能有效降低供气进口处由涡引起的压 力衰减,并有效降低供气孔入口处气流的偏转角度, 使气流更容易进入供气孔。

国内鲜有对于预旋系统非稳态计算的研究,主 要采用稳态的计算方法对预旋系统流动温降特性进 行研究。北京航空航天大学罗翔等^[10]对直接式预旋 系统的流动与换热特性进行了数值模拟,研究发现 三维数值计算比二维数值计算更好的反应预旋系统 的流动,在三维计算中,Realizible $k-\varepsilon$ 湍流模型能更 好地反应换热实验结果。朱晓华等[11-12]采用稳态的 数值模拟的方法对带盖板的预旋进气转-静盘腔的 气动热力问题进行了研究。何振威等[13]对带盖板的 预旋系统的流动和温降进行了实验研究,并对整个 实验的测量误差进行了分析。WU等[14]对带盖板盘 的预旋系统在不同质量流量、转速和出口压力下的 一些重要性能参数进行了实验测量。LIU 等^[15]对等 熵条件下的预旋系统进行了理论分析,导出了理想 温降和功耗的计算公式。为了在实际的预旋系统中 应用,推导了实际温降与功耗的关系,并定义了温降 效率。其在三维稳态模拟中采用了标准 k-ε 湍流模 型和固定转子方法。

非稳态计算耗时耗资源,而稳态计算往往对于 资源和时间的占用都较少,如果能够通过非稳态计 算和稳态计算结果的深入对比,找到合适的稳态模 拟方法,使得稳态结果比较接近非稳态时均结果,则 将大幅度降低计算成本,这是本文的主要研究目标。

2 计算模型和计算方法

2.1 非稳态计算模型和计算方法

图1为本文的非稳态的计算模型,模型(a)和(b) 是喷嘴数目、接受孔数目和供气孔数目均为64的简化 模型,模型(a)采用1/64个周期,模型(b)采用3/64个 周期,以此来研究周期数的不同对计算结果的影响。

图中蓝色部分为静止部分,红色部分为转动部 分,蓝色和红色的交界面为转静交接面。交界面采 用滑移网格进行处理,转子部分在周期内进行滑移 运动。

在非稳态计算中,对 Interface 面进行设置时,将 其设置为周期重复(Period repeats)条件。湍流模型 使用标准 *k*-ε模型,近壁面使用标准壁面函数进行处 理。控制方程采用三维稳态湍流流动和能量方程, 方程离散采用二阶迎风格式,速度与压力耦合采用 SIMPLE算法,空气密度按理想气体计算,粘性系数使 用 Sutherland 公式计算,比热等物性参数考虑随温度 变化。在对非稳态模型进行计算时,首先使其在稳态条件下进行迭代计算一定的步数,相当于给非稳态计算赋予一个较为合适的初值,然后再将其调整为Transient状态进行计算和数据统计。

本文的数值计算边界条件设置为:进气腔入口 给定总温300K,总压0.15MPa;出口压力给定为大气 压;固体壁面为绝热无滑移壁面,转子壁面和转动域 给定转速3kr/min,6kr/min和10kr/min;周期面给定旋 转周期性边界条件;时间步长设置为1×10⁻⁵s,每个时 间步长内迭代计算20次。



2.2 稳态计算模型与计算方法

稳态计算模型与周期数为1的非稳态计算模型 一致,不同的是采用了7个不同的转子相位来进行计 算,以此来模拟转子的时空变化特性。为了方便观 察,图2给出4个典型相位下的截面的二维图,其沿 周向阵列了三个周期。

从图 2 中很明显可以看到各个不同相位之间的 差异,模型中静子部分保持固定,将转子部分沿周向 进行转动不同的角度来模拟转子的周向运动(图中 未展示②③⑦号位置)。同时上图还展示了喷嘴出 口气流冲击到转子上的相对位置,①号位置是喷嘴 出口气流正对两孔间壁面,④号位置正对接受孔迎 风面前缘。而当转子转动到⑤号位置时,喷嘴中心 气流正对孔中心,可以认为该位置为正对位置。⑥ 号位置为正对接受孔背风面前缘。

稳态计算采用固定转子相位的多重参考系模型 (MRF)来进行数值模拟,这种方法能够在保证计算 精度的同时大大节省计算时间,动静交界面采用 Interface 面进行处理,其余条件的设置与非稳态计算中 保持一致。当连续性方程的残差收敛到 10⁻⁵的量级 时认为稳态计算收敛。

几何模型的具体结构参数见表1。

2.3 与实验数据的对比

为了验证计算数据的可靠性,本文将数值计算





(b) Angle=1.875° (Opposite to

the front edge of the receiver

hole windward side)

(a) Angle=0° (Right between the two holes)





the center of the hole)

(d) Angle=4.95° (Opposite to the front edge of the receiver hole leeward side)

Fig. 2 Steady-state calculation models for different rotor phases

Table 1	Main	geometric	parameters	of	calculation	1 model
---------	------	-----------	------------	----	-------------	---------

Parameters	Value
Radius of pre-swirl nozzle centre- line/mm	170.7
Number of re-swirl nozzles	64
Nozzle angle/(°)	10.4
Total throat area of nozzle/mm ²	678.8
Number of receiver holes	64
Receiver hole area/mm ²	3919
Receiver hole diameter/mm	8.48
Number of supply holes	64
Supply hole diameter/mm	6.48
Radius of supply holes/mm	236
Width of pre-swirl cavity/mm	5.9
Cover-plate cavity width/mm	3.8

得到的结果与实验数据进行了对比(实验数据来自 WU等^[14]在ASME公开发表论文中的数据)。

图 3 是稳态计算和非稳态计算的质量流量与实验数据的对比情况。从图中可以看出,稳态计算结

果和非稳态计算结果与实验结果相差不大,且变化 趋势与实验结果符合良好,稳态计算的最大偏差为 4.1%,非稳态计算的最大偏差为2.4%。



Fig. 3 Comparison between calculated and experimental data

3 计算结果分析

3.1 不同相位下接受孔内的流场结构对比

在转子的实际运动过程中,喷嘴和接受孔的相 对周向位置时刻都在改变,有时从喷嘴喷射出的气 流通过接受孔进口直接进入接受孔,有时气流打到 接受孔之间的壁面上,最后再进入接受孔,这种流动 过程中几何结构的周期性变换使得气动参数发生周 期性的波动,变相位的研究方法即是对转子转动过 程中出现的几种不同位置进行研究。

图4所示为接受孔径向截面处的旋转比分布云 图和相对流动迹线图。从图中可以看出,在相同的 转子相位位置,各稳态计算结果与对应的非稳态计 算结果都比较吻合,这说明稳态变相位的计算得到 的流场计算结果与实际非稳态得到的结果是一致 的。接受孔进口气流的旋转比在各个不同的相位中 都比1大得多,气流流经接受孔后冲击接受孔迎风面 一侧壁面。

3.2 接受孔进口平均参数结果对比

接受孔进口截面是转子转动引起参数波动最显 著的部位,因此本文对接受孔进口截面的压力和温 度参数进行质量加权平均,并将稳态和非稳态的平 均结果随转子周向角度(相位)的变化曲线放在同 一图中对比。非稳态模型的周向角度根据旋转速 度和时间获得,稳态模型的周向角度与相位一一 对应。



calculation of receiving hole cross section flow under different phases (6kr/min)

图5所示为接受孔进口处的压力、温度以及流量 的对比图。从图中可以看出,稳态计算结果与非稳 态计算结果波动频率一致。压力方面,稳态计算结 果的振幅约为182.5Pa,不同相位的空间平均值为 109905Pa,非稳态计算结果的振幅为300Pa,时间平 均值为109640Pa,二者压力均值相差约265Pa,稳态 计算的压力比非稳态计算结果高 0.2% 左右,波动幅 度小39%左右;温度方面,稳态计算结果的振幅约为 0.11K,不同相位的空间平均值约为284.97K,非稳态 计算结果的振幅为0.13K,时间平均值约为285.25K, 稳态计算的温度低 0.1% 左右, 温度波动幅度小 15% 左右。温度的规律性较压力相对差一些,这是因为 温度的变化小于0.2K,波动性受到稳态计算残差的 影响比较大。流量方面,稳态计算结果的振幅约为 0.026g/s,不同相位空间平均值约为3.255g/s,非稳态 计算结果的振幅几乎没有,两种计算下流量的差值 约为0.028g/s,差异很小。

从图 5 还可以看出,在稳态计算的 7 个不同转子 相位中,④号位置(即喷嘴出口气流正对接受孔迎风 面前缘)的稳态结果最为接近非稳态的时均结果,此 位置的压力偏高 0.08%,温度偏低 0.04%。如果为了 大幅度较低计算成本,采用④号位置这一个相位的 稳态计算结果就可比较好地代表非稳态的时均 结果。

本文对其它转速和相位的稳态和非稳态计算结



Fig. 5 Comparison between steady state calculation and unsteady state calculation

果也进行了统计,并进行了两者偏差的对比,具体结 果如图6所示(偏差计算以非稳态计算结果的时均值 为基准)。

图 6 为在转速为 3kr/min, 6kr/min 和 10kr/min 下 不同相位的稳态计算结果和非稳态计算结果的时均 值的偏差(以非稳态计算结果的时均值为基准),包 括喷嘴出口、接受孔进口、接受孔出口和供气孔进口 等主要截面的平均压力和温度。从图中可以看出,





各主要截面的压力和温度偏差都非常小。在转速为 3kr/min下,压力最大偏差为0.59%,温度最大偏差为 0.14%;转速为6kr/min时,压力最大偏差为0.49%,温 度的最大偏差为0.16%;转速为10kr/min时,压力的 最大偏差为-0.9%,温度的最大偏差为-0.33%。

3.3 稳态和非稳态结果差异的讨论

为了解稳态空间平均计算结果与非稳态时均结 果之间的差异大小受何种因素控制,类比了电路中 的规律,电路中电流的大小主要受到电阻最大的元 件的控制,那么对于预旋系统中,很容易联想到其流 动特性主要受到阻力最大的元件的控制。本文在计 算模型的盖板腔中增加了隔板,其结构如图7所示, 起到了增加转子区域流动阻力的作用,在此基础上 再次对接受孔处的压力结果进行了对比。



Fig. 7 Calculation model with clapboard

图 8 所示为带隔板和不带隔板的计算模型的稳态变相位和相应的非稳态计算结果对比。增加了隔板的计算模型的转子部分具有更大的流动阻力。计算结果表明,当采用带隔板的计算模型进行计算时,



Fig.8 Comparison of the pressure of the receiver hole between the two models

稳态的计算结果与非稳态计算结果的时均值相差很小,各个不同的相位的计算结果之间也差异不大,这 是因为在本节加了隔板的计算模型中,预旋系统转 动部件的压力损失增加,损失大的转动部件成为影 响流动特性的主导因素,因此由于相位的变化造成 的波动变得不敏感。

3.4 不同转速下非稳态计算结果对比

为研究不同转速下,预旋系统的非稳态特性,采用固定压比为1.5,转速分别为3kr/min,6kr/min和10kr/min三个不同的工况进行数值模拟。

图9为不同转速下喷嘴出口处的压力和温度随时间变化的曲线。可以看出,转速越高,喷嘴出口压力和温度波动的振幅越小。这种现象很容易得到合理的解释,因为转速越高,相当于转子部分转动越连续,转动造成的气流参数波动也就越低,并且可以看到压力的波动频率与转速是正相关的,转速越大其波动频率越大。当转速增加到一定程度时,喷嘴出口压力和温度的振幅都很小。计算结果同时表明,随着转速的升高,喷嘴出口处的压力降



低,这是因为随着转速的增加,盖板腔中离心升压 增大,又因为计算条件中进出口压力保持不变,从 而使得喷嘴出口的压力随着转速的升高而减小。

3.5 模型周期数对非稳态计算结果的影响

采用 5.625°的单周期和 16.875°的三周期进行了 非稳态数值计算分析,非稳态计算结果见图 10。

从图 10 中可以看出,不同周期引起的计算结果数值上差异很小,振幅一致且稳定后波动频率完全相同。在计算结果的大小方面,采用 5.625°的单周期的接受孔入口压力的时均值计算结果比采用 16.875°的三周期的计算结果约大 100Pa,相对总温约大 0.3K,认为该差异可以忽略不计。



bers

4 结 论

通过对非稳态的计算结果和变相位的稳态计算 结果对比分析,得到结论如下:

(1)采用变相位的稳态计算模型可以较好地对 预旋系统的非稳态特性进行模拟,与非稳态计算相 比,稳态计算接受孔处压力波动幅度小39%左右,温 度波动幅度小15%左右,二者的波动频率一致,平均 值最大偏差小于0.6%,稳态空间平均结果与非稳态 时均结果相比,压力高0.2%,温度低0.1%。针对本文 所采用的几何模型,当转子处于喷嘴出口气流正对 接受孔迎风面前缘的位置时,该相位的稳态计算结 果与非稳态时均结果最接近。

(2)稳态计算结果与非稳态计算结果差异的大小主要取决于相位变化引起的流动阻力在系统中所占的比例,比例越小,二者差异越小。

(3)转子转速越高,非稳态计算得到的压力和温度的振幅越小。非稳态计算结果与所选取的周期数 无关,为了节省时间和资源,可以采用涵盖几何特征 的最小周期进行数值模拟分析。

致 谢:感谢课题组吴衡博士的实验数据支持。

参考文献:

- [1] El-Oun Z B, Owen J M. Pre-Swirl Blade Cooling Effectiveness in an Diabatic Rotor-Stator System [R].
 ASME 1988-GT-267.
- [2] Chew J W, Hills N J, Khalatov S, et al. Measurement and Analysis of Flow in a Pre-Swirled Cooling Air Delivery System[R]. ASME 2003-GT-38084.
- [3] Dittmann M, Dullenkopf K, Wittig S. Direct-Transfer Pre-Swirl System: a One Dimensional Modular Characterization of the Flow[R]. ASME 2003-GT-38312.
- [4] Jarzombek K, Benra F K, Dohmen H J, et al. CFD Analysis of Flow in High-Radius Pre-Swirl Systems[R]. ASME 2007-GT-27404.
- [5] Snowsill G D, Young C. The Application of CFD to Underpin the Design of Gas Turbine Pre-Swirl Systems[R]. ASME 2006-GT-90443.
- [6] Ciampoli F, Hills N J, Chew J W, et al. Unsteady Numerical Simulation of the Flow in a Direct Transfer Pre-Swirl System[R]. ASME 2008-GT-51198.
- Benim A C, Brillert D, Cagan M. Investigation into the Computational Analysis of Direct-Transfer Pre-Swirl Systems for Gas Turbine Cooling [R]. ASME 2004-GT-54151.
- [8] Joachim Karnahl, Jens von Wolfersdorf, Kok-Mun Tham, et al. CFD Simulations of Flow and Heat Transfer in a Pre-Swirl System: Influence of Rotating-Stationary Domain Interface[R]. ASME 2011-GT-45085.
- [9] Anish Kumar Gupta, Douglas Ramerth. Numerical Simulation of TOBI Flow-Analysis of the Cavity Between a

Seal-Plate and HPT Disk with Pumping Vanes [R]. ASME 2008-GT-50739.

- [10] 罗 翔,冯 野,徐国强,等.直接供气预旋转静系
 流动和换热数值模拟[J].航空动力学报,2012,27
 (10):2188-2193.
- [11] 朱晓华,刘高文,刘松龄,等.带盖板的预旋系统温
 降和压力损失数值研究[J].航空动力学报,2010,25
 (11):2498-2506.
- [12] 朱晓华.带盖板的预旋系统数值研究[D].西安:西北 工业大学,2010.
- [13] 何振威,冯 青,刘松龄,等.带盖板预旋进气系统的温降实验误差分析[J].科学技术与工程,2010,10
 (26):6439-6444.
- [14] WU Heng, LIU Gao-wen, WU Zhi-peng, et al. Measurement of Pressures and Temperatures in a Cover-Plate Pre-Swirl System[R]. ASME 2018-GT-75671.
- [15] LIU Gao-wen, WU Heng, FENG Qing, et al. Theoretical and Numerical Analysis on the Temperature Drop and Power Consumption of a Pre-Swirl System [R]. ASME 2016-GT-56742.

(编辑:李 南)