

文章编号: 1000-8055(2006)06-1008-04

高位垂直进气径向出流旋转盘腔风阻效应的实验

吴 宏¹, 雷 斌¹, 蔡 毅², 罗 翔¹, 张 笙¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083;
2. 西安航空发动机(集团)有限公司, 西安 710021)

摘 要: 用实验的方法对高位垂直进气转静系旋转盘的风阻效应进行了研究, 研究表明: 转盘无量纲力矩系数随着旋转雷诺数的增加而减小; 转盘无量纲力矩系数随着流量系数的增加而增加; 且与冷却的具体结构有关; 在高旋转雷诺数时, 转盘无量纲力矩系数小于自由盘无量纲力矩系数; 当流量为 0 时, 无量纲力矩系数的数值全部小于自由盘之值。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 旋转盘; 流动; 摩擦阻力; 实验

中图分类号: V231. 1

文献标识码: A

Experimental investigation on frictional loss in shrouded rotating disk with high-positioned air inflow

WU Hong¹, LEI Bin¹, CAI Yi², LUO Xiang¹, ZHANG Sheng¹

(1. National Key Lab of Aero-engines, School of Jet Propulsion,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Xi'an Aero-engine(group) LTD, Xi'an 710021, China)

Abstract: The experimental results of the friction effect on shrouded rotating disk with high positioned air flow are presented. The result shows that the dimensionless moment coefficient (NMC) of the rotor decreases with the increase of rotational Reynolds number, but the extent decreases with the increase of rotational Reynolds number. The NMC of the rotor increases with the increase of dimensionless cooling flow rate and differs with different structure of the cooling system. When the rotational Reynolds number reaches a certain value or the dimensionless cooling flow rate is zero, the NMC of the rotor is less than that of the free disk.

Key words: aerospace propulsion system; rotating disk; flow; friction loss; experiments

涡轮盘是航空燃气涡轮发动机中的重要承力部件, 由于高温燃气与涡轮叶片外表面进行强烈

的复合换热, 必然有一部分热量沿叶片根部向涡轮盘传递, 使涡轮盘的温度提高, 温度梯度增大,

收稿日期: 2005 - 11 - 09; 修订日期: 2006 - 05 - 16

作者简介: 吴宏(1971 -), 男, 福建浦城人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院副教授, 主要从事航空发动机热端部件冷却以及强化换热方面的研究。

为确保安全可靠工作,必须进行冷却。冷气流经涡轮盘后,温度升高,冷气此时的温度又直接影响下一个部件的换热,所以要确定冷却气体的出口温度,以便为冷气进入下一个部件提供入口参数。冷气流过涡轮盘有两种因素使其温度升高:一是冷气与涡轮盘的直接换热,二是摩擦温升。在转盘转动的情况下,转盘外侧表面会受到风阻效应产生阻力,转盘受到风阻的影响,整个盘面的温度场会发生变化。知道涡轮盘表面与冷气的摩擦所受到的摩擦力矩 M 后,如果涡轮盘的旋转角速度为 ω ,则每单位时间涡轮盘对冷气的摩擦功为 $M\omega^{[1]}$,这必然引起冷气的温度升高,假定摩擦功全部被转盘附近的冷气吸收,则冷气的摩擦温升也可以有相应的公式计算出,所以要计算摩擦温升,关键是确定摩擦力矩 M 。本文把实际的发动机涡轮盘冷却系统简化为高位进气转静旋转盘模型。高位进气的好处^[2]是可以将从转盘边缘来的热量有效地加以阻隔,这样既可以使全盘平均温度降低,又可以使径向温差减小,对涡轮盘的冷却非常有利。

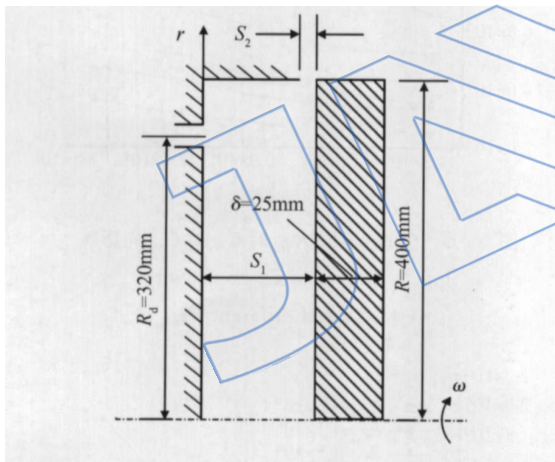


图1 高位进气转静旋转盘模型

Fig.1 Rotor-stator model of high positioned air flow

本文在图1的高位进气转静旋转盘简化模型基础上,运用实验的方法来确定转盘的摩擦力矩 M ,从而得到转盘的无量纲力矩系数,并分析影响其的因素。

1 实验装置

实验装置如图2所示,冷却空气进入静盘盘腔后,再经半径为 $R_d = 320$ mm 处的 144 个直径为 $\phi 5$ mm 的进气孔冲击旋转盘。

本实验采用 JW-2 微机扭矩仪来测量力矩。

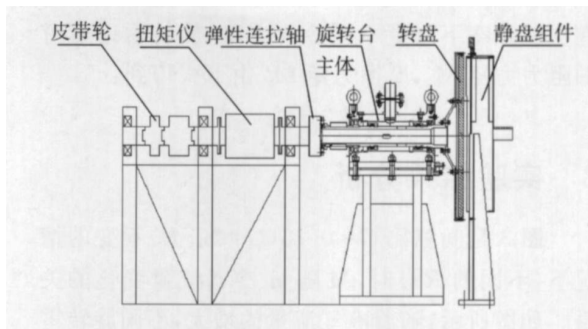


图2 实验装置图

Fig.2 Experimental rig

其基本原理是通过弹性轴、两组磁电信号发生器,把被测转矩、转速转换成具有相位差的两组交流电信号,这两组交流电信号的频率相同且与轴的转速成正比,而其相位差的变化又与被测转矩成正比。

驱动装置是一台 30 kW 的直流电机,转速由可控硅进行调节和控制。实验时,主轴的转速可在 $0 \sim 3000$ r/min 内连续变化,其转速由光电式数字转速表测定。

冷气流由热式气体质量流量计测量。

实验件是一个由不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 加工的厚 $\delta = 25$ mm 直径 $\phi = 800$ mm 的圆盘。

实验时,转静盘间隙 S_1 分别为 20 mm, 30 mm, 40 mm, 50 mm, 60 mm。出口间隙 $S_2 = 3$ mm,且固定不变。

2 实验步骤与数据分析方法

转盘无量纲力矩系数 C_m 定义公式:

$$C_m = 2M / \rho \omega^2 R^5 \quad (1)$$

式中: R 为转盘半径, ρ 为冷气的密度。为了得到真实的风阻,就必须去除由于轴承摩擦等因素引起的系统附加阻力力矩。

首先在转盘为自由盘的状态下测量其不同转速下的总阻力力矩 M_1 ,其中包括转盘两侧的风阻力矩和轴承的阻力矩。自由盘单面阻力力矩系数 C_m 由公式得到:

$$C_m = 0.491 (\lg Re\omega)^{-2.58/3} \quad (2)$$

式中: $Re\omega$ 为旋转雷诺数, $Re\omega = \omega R^2 / \nu$, ω 为转盘角速度, ν 为动力粘度。则自由盘的单面理论阻力力矩 M_2 由 C_m 定义公式得到:

$$M_2 = C_m 0.5 \rho \omega^2 R^5 \quad (3)$$

那么由于轴承摩擦等因素引起的系统附加阻力力矩 M_3 由下式得到:

$$M_3 = M_1 - M_2 \times 2 \quad (4)$$

在实验状态下测量不同冷气流量、旋转雷诺数时的阻力力矩 M_4 , 摩擦力矩 M_5 由下式得到:

$$M_5 = M_4 - M_3 - M_2 \quad (5)$$

3 实验结果分析

图 3 是间隙比 $G = 0.15$ ($G = S_1 / R$) 不变的情况下, 不同的 Re_ω 时, M 随 $\dot{m}$ 冷气流量变化的关系。如图所示: 随着冷气流量的增大, 不同旋转雷诺数所对应的摩擦力矩也随之增大, 但增加幅度不大。摩擦力矩正比于切应力 $\tau_{w,\phi}^{[1]}$ ($\tau_{w,\phi} = \mu (\partial v_\phi / \partial z)$, v_ϕ 为切向速度), 当流量增大, 其所对应的切向速度梯度在增大, 故切向应力也增大, 因此摩擦力矩在增大。

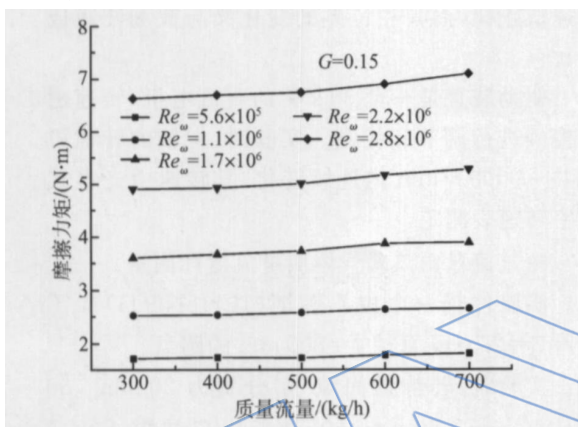


图 3 $G = 0.15$, 不同 Re_ω 时 $\dot{m}$ 对 M 的影响

Fig. 3 Effect of $\dot{m}$ on M with $G = 0.15$ and different Re_ω

图 4 是维持间隙比 $G = 0.15$, 不同流量系数 C_w ($C_w = \dot{m} / \mu R$, μ 为气体动力粘度) 时, M 随转速的变化关系。随着转速的增大, 不同流量系数所对应的摩擦力矩也随之增大。当转速增大时, 使 $\partial v_\phi / \partial z$ 增大, 所以转盘的摩擦力矩也增大。

图 5 是维持间隙比 $G = 0.15$ 不变的情况下, 不同的 Re_ω , 无量纲力矩系数 C_m 随 C_w 变化的关系。

如图所示: 随着冷气流量系数的增大, 不同旋转雷诺数所对应的无量纲力矩系数也随之增大; 在相同的流量系数时, 旋转雷诺数越大的无量纲力矩系数越小。因为在维持同一旋转雷诺数时, 当冷气流量系数增大时, 腔内气流的流动速度增大, 将引起转盘摩擦力矩增大, 所以无量纲力矩系数也增大。

图 6 是维持间隙比 $G = 0.075$ 不变的情况下, 不同的 Re_ω 时 C_m 随 C_w 变化的关系。从图 6

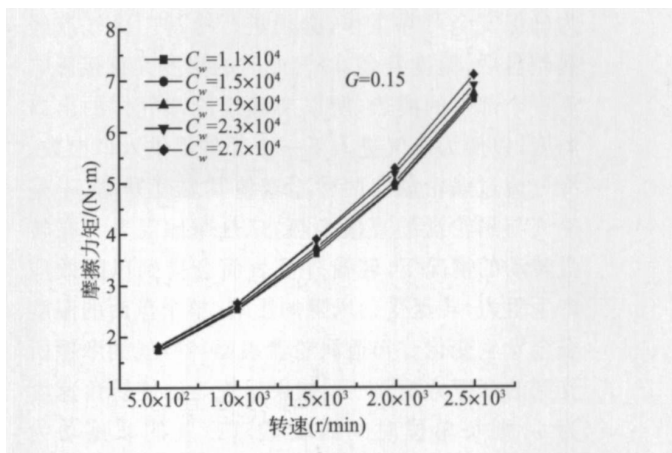


图 4 $G = 0.15$, 不同 C_w 时转速对 M 的影响

Fig. 4 Effect of rotating speed on M with $G = 0.15$ and different C_w

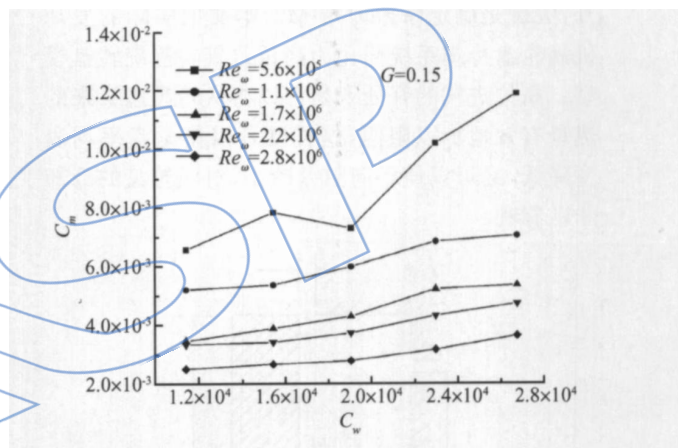


图 5 $G = 0.15$, 不同 Re_ω 时 C_w 对 C_m 的影响

Fig. 5 Effect of C_w on C_m with $G = 0.15$ and different Re_ω

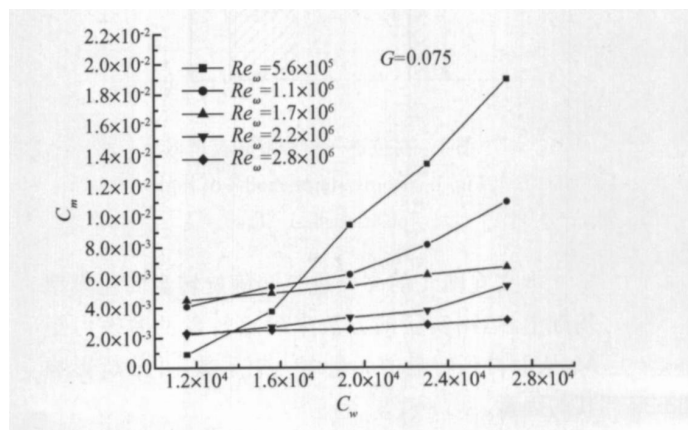


图 6 $G = 0.075$, 不同 Re_ω 时 C_w 对 C_m 的影响

Fig. 6 Effect of C_w on C_m with $G = 0.075$ and different Re_ω

可看出有类似图 5 的规律。

图 7 是维持旋转雷诺数 $Re_\omega = 1.7 \times 10^6$ 不

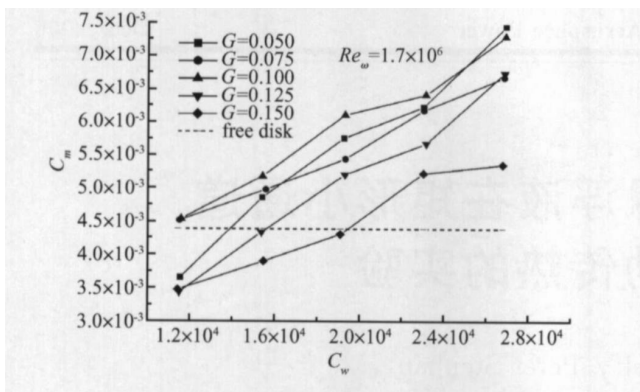
图 7 $Re_{\omega} = 1.7 \times 10^6$, 不同 G 时 C_w 对 C_m 的影响

Fig. 7 Effect of C_w on C_m with
 $Re_{\omega} = 1.7 \times 10^6$ and different G

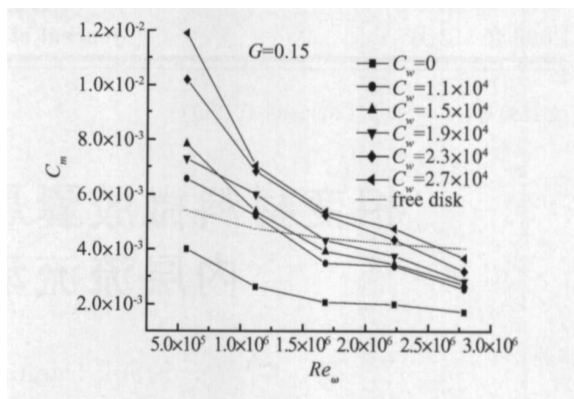
图 8 $G = 0.15$, 不同 C_w 时 Re_{ω} 对 C_m 的影响

Fig. 8 Effect of Re_{ω} on C_m with
 $G = 0.15$ and different C_w

变,不同的间隙比时, C_m 随 C_w 变化的关系。随着冷气流量系数的增大,不同间隙比所对应的无量纲力矩系数也随之增大。

图 8 是在维持间隙比 $G = 0.15$ 不变,不同的 C_w 时, C_m 随 Re_{ω} 的变化关系。如图所示:随着旋转雷诺数的增大,不同冷气流量系数所对应的无量纲力矩系数也随之减小。从图中可以看出,由 C_m 的定义式: $C_m = M / (0.5 \rho \omega^2 r_0^5)$ 知,虽然随着旋转雷诺数的增大摩擦力矩也增大,但是摩擦力矩增加的速度远小于旋转雷诺数的增加速度,故无量纲力矩系数将变小,随着旋转雷诺数的增大,当冷气流量为 0 时,所对应的无量纲力矩系数的数值全部小于自由盘的理论值。没有外部供气时,转静盘间的流动结构具有明显的 Bachelor^[5] 型流动的特点:在转盘附近流体沿径向向外流动,在静盘附近流体沿径向向内流动,在两个边界层之间是一个旋转核心。由于旋转核心,使转盘附近的切向速度差减小,导致摩擦力矩减小,所以无量纲力矩系数的数值全部小于自由盘的理论值。图中在相同旋转雷诺数时,无量纲力矩系数随着冷气流量系数的增大而增加,这是由于流量的增加使转盘受到的摩擦力矩在增加而引起的。

从图 7 可知:当流量系数 C_w 小于某一流量系数时, C_m 的数值小于自由盘理论值;从图 8 知:当旋转雷诺数大于某一旋转雷诺数时, C_m 将小于自由盘的理论值。在维持一定的间隙比范围内,当旋转雷诺数高或流量系数小时,会出现前面提到的 Bachelor 型流动,旋转核心的存在,使流体在相当大的程度上随转盘一起旋转,使转盘与流体的相对切向速度差减小,因而阻力矩也较小。所以当 C_w 小于某一流量系数和 Re_{ω} 大于某

一值时,都会出现 C_m 的数值小于自由盘理论的 C_m 。

4 结论

- (1) 转盘的无量纲力矩系数随着旋转雷诺数的增加而减小,减小的幅度随着旋转雷诺数的增加而减小。
- (2) 转盘的无量纲力矩系数随着流量系数的增加而增加。
- (3) 转盘的无量纲力矩系数还与冷却的具体结构有关,间隙比有关。
- (4) 在高的旋转雷诺数时,部分的无量纲力矩系数小于自由盘的无量纲力矩系数。当流量为 0 时,无量纲力矩系数的数值全部小于自由盘的无量纲力矩系数。

参考文献:

- [1] 曹玉章,陶智,徐国强,等.航空发动机传热学[M].北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [2] 徐国强,陶智,丁水汀,等.高位垂直进气旋转盘流动与换热的实验研究[J].航空动力学报,2000,15(2):164-168.
Xu Guo-qiang, Tao Zhi, Ding Shui-ting, et al. Experimental investigation on flow and heat transfer in rotating disk with high-positioned air flow[J]. Journal of Aerospace Power, 2000, 15(2): 164-168.
- [3] Dorfamn L A. Hydrodynamic resistance and the heat loss of rotating solids[M]. Oliver and Boyd Ltd, 1963.
- [4] 丁水汀.高位进气径向出流的旋转腔内冷气的流动与换热特性研究[D].北京:北京航空航天大学,1999.
- [5] Owen J M, Rogers R H. Flow and heat transfer in rotating disk system[M]. UK: Research Studies Press, 1989.