

涡轮流体介电常数对高压涡轮叶尖间隙测量影响计算分析

任瑞冬

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要:为了评价涡轮流体介电常数对电容式高压涡轮叶尖间隙测量精度的影响,通过理论分析获得航空发动机涡轮流体介质的成分,并计算各成分的体积分数。由于水蒸气的体积分数对涡轮流体介电常数影响较大,仿真计算了不同工况和不同水蒸气体积分数下涡轮流体介电常数的变化范围,在此基础上计算了涡轮流体介电常数对涡轮叶尖间隙测量误差的影响。计算结果表明:涡轮流体介电常数对涡轮叶尖间隙测量带来的误差最高为0.3%,在工程应用时可以忽略。

关键词: 叶尖间隙;涡轮流体;介电常数;间隙测量;航空发动机

中图分类号: V233

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.03.005

Calculation and Analysis of the Influence of the Turbine Fluid Dielectric Constant on the Tip Clearance Measurement of High Pressure Turbine

REN Rui-dong

(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to evaluate the influence of the turbine fluid dielectric constant on the precision of the capacitive tip clearance measurement of high pressure turbine, the composition of the turbine fluid medium of aeroengine was obtained by theoretical analysis, and the volume fraction of each component was calculated. Because the volume fraction of water vapor had a great influence on the turbine fluid dielectric constant, the variation range of turbine fluid dielectric constant under different working conditions and different volume fraction of water vapor was calculated by simulation. On this basis, the influence of turbine fluid dielectric constant on the error of the tip clearance measurement of turbine was calculated. The calculation results show that the maximum error caused by the turbine fluid dielectric constant is 0.3%, which can be neglected in engineering application.

Key words: tip clearance; turbine fluid; dielectric constant; clearance measurement; aeroengine

0 引言

航空发动机叶尖间隙是指发动机转子叶片叶尖与机匣内壁之间的径向间隙。涡轮的效率与叶尖间隙有着密切联系,叶尖间隙过大导致更多的气体泄漏,使燃气涡轮的效率降低;叶尖间隙过小,容易引起叶尖和涡轮机匣碰摩,使涡轮叶片折断,导致发动机失效。王大磊等^[1]研究了叶尖间隙对叶尖泄漏流的影响,表明间隙高度每增加1%相对叶高,间隙泄漏流量占

总流量的比例约增加2.1%;张剑等^[2]研究了涡轮叶尖间隙对发动机效率的影响,表明相对叶尖间隙增加1%,发动机效率降低约0.84%。为减少泄漏流提高发动机效率,叶尖间隙的主、被动控制技术已经广泛应用于发动机设计当中;杨家礼等^[3]研究了1种主动间隙控制方法,通过仿真分析获得了发动机不同工况下叶尖间隙计算值;贾丙辉等^[4]分析了机动飞行条件下叶尖间隙的变化规律。发动机工作时,涡轮叶尖间隙

收稿日期:2019-03-15 基金项目:国防科技重点工程项目资助

作者简介:任瑞冬(1981),女,硕士,高级工程师,主要从事航空发动机结构强度及故障诊断工作;E-mail:cfte506@126.com。

引用格式:任瑞冬.涡轮流体介电常数对高压涡轮叶尖间隙测量影响计算分析[J].航空发动机,2020,46(3):25-29. REN Ruidong. Calculation and analysis of the influence of the turbine fluid dielectric constant on the tip clearance measurement of high pressure turbine [J]. Aeroengine, 2020, 46(3): 25-29.

主要随发动机的工作状态发生变化,变化范围仅为几毫米。叶尖间隙的测量技术能够为发动机主、被动控制技术提供依据,并在发动机健康管理方面起到一定作用,因此如何提高航空发动机的叶尖间隙测量技术水平已经成为发动机相关专业人员研究的重要方向。Craig L 等^[5]研究了电容式叶尖间隙测量系统的应用,并指出由于调频式电容传感器不会受到燃气电离效应的影响,目前多采用电容式叶尖间隙测试技术进行涡轮的监控或发展闭环的主动叶尖间隙控制系统。

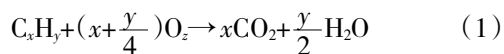
根据电容式高压涡轮叶尖间隙测量原理,在传感器与涡轮叶片正对面积和涡轮流体相对介电常数(下文统称介电常数)不变的情况下,叶尖间隙测量值与电容(叶尖平面与传感器平面构成电容器的 2 极板)呈反比例关系,通过测量电容可实现叶尖间隙的测量。但实际上涡轮内的流体为燃烧室排出的混合气体,成分复杂,既有各种带电颗粒又有极性气体水蒸气,混合气体的介电常数会随水蒸气的体积分数、气体温度和压强发生变化,可能会给叶尖间隙的测量结果带来误差。

本文为了分析航空发动机涡轮转、静子间流体介质介电常数在真实工作环境下的变化,对涡轮流体的主要成分进行分析,计算了流体主要成分的体积分数,在此基础上分析了发动机不同进气水质量分数的情况下,涡轮流体介电常数随温度和压强的变化,并给出真实工况下涡轮流体介电常数的变化范围,为涡轮叶尖间隙测量精度的评估提供依据。

1 涡轮内流体成分及体积分数

1.1 涡轮内流体成分

在航空发动机工作时,燃油与氧气在燃烧室内发生剧烈复杂的多步燃烧化学反应,随后产生的高温、高压燃气进入高压涡轮带动转子高速旋转,燃烧过程的基本反应式为



燃油燃烧后的产物成分非常复杂:由于燃油中含有少量硫和氮,在燃烧产物中形成硫的氧化物;若氧气不足或燃油与空气混合不均匀,会有部分燃油不充分燃烧生成少量一氧化碳;即使燃烧很均匀,也有小部分二氧化碳因高温分解为一氧化碳和氧气;另外,在燃烧过程中将产生大量离子,离子与气相分子及其

聚合物连续反应,逐步形成各种碳氢化合物^[6]。因此航空发动机燃油燃烧后的产物主要包括二氧化碳、氮氧化物、水蒸气、碳氢化合物、一氧化碳、硫氧化物和由于不完全燃烧而产生的碳烟颗粒,但最主要的成分是二氧化碳和水蒸气^[7]。进入发动机的干燥空气主要成分:氮气为 78%,氧气为 21%,二氧化碳为 0.03%,稀有气体为 0.94%,其他及杂质为 0.03%,其中氧气参与燃烧几乎完全消耗,少量氮气在氧气富足的情况下产生氮氧化物,大部分氮气、二氧化碳及稀有气体不参与反应^[8],直接进入涡轮构成涡轮流体的一部分。

综上所述,若燃油与氧气均匀混合充分燃烧,涡轮流体的主要成分为氮气、二氧化碳和水蒸气。

1.2 各成分的体积分数

假设消耗燃油的质量为 a ,根据质量守恒定律和燃油燃烧的化学反应式(1)计算获得消耗氧气的量以及生成的二氧化碳、水蒸气的质量分别为

$$M_{O_2} = \frac{32(x+y/4)}{12x+y}a; M_{CO_2} = \frac{44x}{12x+y}a; M_{H_2O} = \frac{9y}{12x+y}a$$

根据氧气、二氧化碳及水的摩尔质量可得到 3 种物质的摩尔数,分别为

$$n_{O_2} = \frac{x+y/4}{12x+y}a; n_{CO_2} = \frac{x}{12x+y}a; n_{H_2O} = \frac{y}{24x+2y}a$$

由于空气中氮气与氧气的体积分数比为 78:21,可知进入发动机的氮气的量为

$$n_{N_2} = \frac{78 \times (x+y/4)}{21 \times (12x+y)}a$$

根据气体状态方程,得到二氧化碳、水蒸气、氮气的体积分别为

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}RT}{P} \quad (2)$$

$$V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}RT}{P} \quad (3)$$

$$V_{N_2} = \frac{n_{N_2}RT}{P} \quad (4)$$

式中: P 为涡轮流体压强; T 为温度; R 为气体常数。

各气体成分的体积除以总体积即为各气体成分的体积分数

$$\eta_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}} = \frac{n_{CO_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2}} \quad (5)$$

$$\eta_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}} = \frac{n_{H_2O}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2}} \quad (6)$$

$$\eta_{N_2} = \frac{V_{N_2}}{V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}} = \frac{n_{N_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2}} \quad (7)$$

2 介电常数的理论计算公式

若涡轮流体中包含 i 种不同的成分, 则总的介电常数可表示为^[9-10]

$$\varepsilon_r = 1 + \sum_i \frac{N_i}{\varepsilon_0} \left(a_{ei} + a_{vi} + \frac{\mu_i^2}{3kT} \right) \quad (8)$$

式中: μ_i 为第 i 种气体的偶极矩; a_{ei} 为第 i 种气体的平均电子极化率; a_{vi} 为第 i 种气体的平均原子极化率; N_i 为第 i 种气体的质点数。

$$N_i = \frac{V_i}{V} A \quad (9)$$

式中: V_i 为第 i 种气体的体积; V 为气体的总体积; A 为单位体积内气体的总质点数, 当气体的压强和体积不变时, A 保持恒定。在已知每种气体成分介电常数的情况下, 式(8)可表示为

$$\varepsilon_r = 1 + \sum_i \frac{V_i}{V} (\varepsilon_{ri} - 1) \quad (10)$$

式中: ε_{ri} 为第 i 种气体的介电常数, 各成分气体的介电常数必须是同温同压下的值。

根据上述分析, 涡轮流体主要由水蒸气、二氧化碳和氮气组成, 只需要分别计算水蒸气、二氧化碳和氮气的介电常数, 并根据各成分的体积分数就可得到涡轮流体的介电常数。

2.1 水蒸气介电常数

水分子是 1 个典型的极性分子, 其正电中心和负电中心不相重合, 二者之间存在一定的距离, 偶极矩不等于零, 属于极性比较大的分子^[11-12]。水在不同温度压力下以固态、气态、液体 3 种不同状态而存在, 本文讨论的水蒸气是水的气态形式。

国际水和水蒸气性质协会提供了 IAPWS-IF97 公式^[13-14], 针对水的不同状态给出各种参数的计算公式。IAPWS 于 1997 年认可的水蒸气的介电常数方程为

$$\varepsilon_r = \frac{1 + A + 5B + (9 + 2A + 18B + A^2 + 10AB + 9B^2)^{0.5}}{4 - 4B} \quad (11)$$

由式(11)可以得到水蒸气的介电常数随温度和压强的变化曲线。其中

$$A = \frac{10^3 N_A \mu^2 p g}{M \varepsilon_0 k T} \quad (12)$$

$$B = \frac{10^3 N_A \alpha p}{3 M \varepsilon_0} \quad (13)$$

式中: k 、 N_A 、 α 、 ε_0 和 μ 均为常数; g 为 Harris-Alderg 因子; M 为水的摩尔质量; ρ 为水蒸气的密度。

水蒸气的密度并非 1 个常量, 与温度和压强有关。一般有 3 种较为常用的计算方法, 即查表法、状态方程法和公式拟合法。状态方程法中比较常用的有莫里尔状态方程和乌卡诺维奇状态方程, 莫里尔状态方程^[15]简单, 实现较为容易, 对于压强不高的过热蒸汽具有一定的准确度

$$\frac{1}{\rho} = 0.0004611 \frac{T}{P} - \frac{1.45}{(T/100)^{3.1}} - \frac{603100 P^2}{(T/100)^{13.5}} - 0.0022 \quad (14)$$

2.2 二氧化碳和氮气的介电常数

二氧化碳和氮气都是非极性气体, 分子极化率只包含电子位移极化。如果知道分子极化率就可根据克-莫方程估算介电常数^[9]

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{n_0 \alpha}{3 \varepsilon_0} \quad (15)$$

式中: ε_r 为气体的介电常数; n_0 为单位体积内的质点数; ε_0 为真空的介电常数; α 为电子极化率。

在实际应用中, n_0 使用不便, 常用 N_A 来代替, N_A 与 n_0 的关系为

$$n_0 = \frac{N_A \rho}{M} \quad (16)$$

式中: N_A 为阿弗加德罗常数; M 为物质的摩尔质量; ρ 为物质的密度, 与气体温度与压强有关, 根据气体状态方程可得

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (17)$$

非极性的多原子分子的分子极化率为

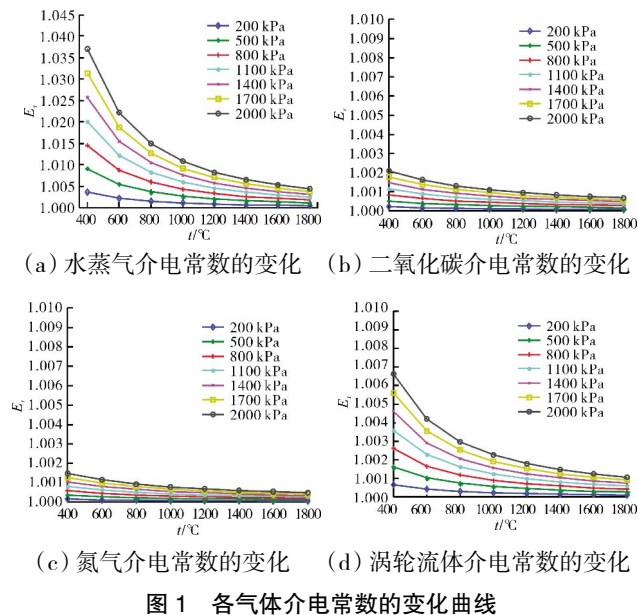
$$\alpha = 4\pi \varepsilon_0 \sum n_i r_i^2 \quad (18)$$

式中: n_i 和 r_i 为分子中第 i 种原子的数目和原子半径。

3 仿真计算结果及分析

空气经过压气机进入燃烧室时已经是高温、高压气体, 结合某型涡扇发动机设计手册中燃烧室及涡轮温度、压强的设计值, 设置仿真条件: 温度范围为 400 ~ 1800 °C, 压强范围为 200 ~ 2000 kPa; 氧原子、碳原子、氮原子半径分别为 60、70 和 65 pm; 航空发动机燃料一般使用航空煤油, 化学式为 $C_{18}H_{38}$ 。根据第 2 章理论计算公式, 可获得不同压强和温度下各气体的介电常数。水蒸气介电常数随温度的变化曲线如图 1(a) 所示, 二氧化碳和氮气介电常数随温度的变化曲线分别如图 1(b)、(c) 所示。根据各气体的体积分数,

可计算得到涡轮流体介电常数在不同压强下随温度的变化曲线,如图 1(d)所示。



从图中可见,温度一定时,随着压强的增大,各气体的介电常数增大;压强一定时,随着温度的升高,各气体的介电常数减小。二氧化碳和氮气的介电常数随温度和压强的变化范围很小,水蒸气的介电常数变化范围相对较大。

以上仿真分析是基于进入航空发动机的空气为干燥气体的情况,但实际上,空气湿度会因地域和气象条件的不同而不同,这样的空气进入航空发动机使得涡轮流体介电常数不恒定。参考航空发动机适航规定第 33.78 条的发动机吸雨验证试验^[6],试验规定给定的吸入发动机雨水的量与空气流量的总质量之比至少为 4%,对不同水质量分数的空气进入发动机后涡轮流体介电常数进行仿真计算,得到的结果见表 1。其中,发动机的状态包括慢车、巡航、起飞等典型工作状态,在计算中涡轮流体介电常数时,将空气水质量分数换算为水蒸气体积分数。

表 1 空气不同水质量分数下涡轮流体介电常数计算结果

涡轮进口参数		水质量分数 /%				
总温 /°C	总压 /kPa	0	4	10	15	20
900	300	1.005	1.0006	1.0007	1.0008	1.0009
1410	2500	1.0017	1.0020	1.0026	1.0029	1.0033
1250	1580	1.0013	1.0016	1.0020	1.0023	1.0026
1260	1000	1.0008	1.0010	1.0012	1.0014	1.0016
1220	1550	1.0014	1.0016	1.0021	1.0024	1.0026

从表中可见,在发动机正常工作条件下,空气含水质量分数不同,涡轮流体介电常数的变化范围为 1~1.003。根据电容式叶尖间隙测量的原理公式及误差传递规律,因流体相对介电常数变化 $\Delta\epsilon$ 带来的叶尖间隙测量偏差为

$$\Delta d = \left| \frac{G\epsilon_0 S}{U} \right| \Delta\epsilon \quad (19)$$

式中: G 为放大倍数; S 为面积; ϵ_0 为真空介电常数; U 为测量电压。

由式(19)可知,流体相对介电常数变化将对叶尖间隙测量结果带来最高 0.3% 的相对误差,在工程应用中可忽略涡轮流体介电常数偏差对叶尖间隙测量误差的影响。

4 结论

本文对涡轮流体的主要构成成分进行了分析并计算了各成分的体积分数,计算了航空发动机不同工况、不同进气水质量分数下涡轮流体的介电常数,分析了介电常数对叶尖间隙测量结果的影响程度,得到以下结论:

(1)构成涡轮流体的主要成分为二氧化碳、氮气、水蒸气,二氧化碳、氮气的介电常数随温度、压强的变化范围很小,而水蒸气的介电常数随温度、压强的变化范围相对较大。

(2)在发动机正常工作条件下,不同进气水质量分数时,涡轮流体介电常数的变化范围为 1~1.003,并对叶尖间隙测量结果带来最高 0.3% 的相对误差,该误差的影响可以忽略。

本文介绍的涡轮流体介电常数计算方法可对电容式传感器的工程应用提供借鉴。研究中忽略了涡轮流体中带离子对介电常数的贡献,在后续工作中需要进一步开展两相流介质的介电常数的计算。

参考文献:

- [1] 王大磊,朴英. 叶尖高度对某涡轮泄漏流影响的研究[J]. 推进技术, 2012, 33(4):566-571.
WANG Dalei, PIAO Ying. Influence of tip clearance size on tip clearance flow of a transonic turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(4):566-571. (in Chinese)
- [2] 张剑. 叶尖间隙对涡轮性能影响的计算与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012, 25(2):33-36.
ZHANG Jian. Calculation and test of influence of rotor tip clearance on turbine performance [J]. Gas Turbine Experiment and Research,

- 2012, 25(2): 33–36. (in Chinese)
- [3] 杨家礼, 涂孟黑, 张亿力, 等. 一种涡轮叶尖间隙控制技术[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2195–2200.
- YANG Jiali, TU Mengpi, ZHANG Yili, et al. A tip clearance control technology for turbine [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9): 2195–2200. (in Chinese)
- [4] 贾丙辉, 张小栋, 彭凯. 机动飞行下的涡轮叶尖间隙动态变化规律[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2758–2764.
- JIA Binghui, ZHANG Xiaodong, PENG Kai. Dynamic changes rule of aero-engine turbine tip clearance in maneuver flight [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2758–2764. (in Chinese)
- [5] Craig L, Paul I. The use of commercially available capacitance tip-clearance probes for tip-timing of aero-engine compressor blades[R]. AIAA-2002-3730.
- [6] 文振华. 基于静电感应的航空发动机气路监测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- WEN Zhenhua. Aero-engine gas path monitoring technology based on electrostatic induction [D]. NanJing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [7] 范玮, 严传俊. 燃烧学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008: 40–52.
- FAN Wei, YAN Chuanjun. Combustion[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008: 40–52. (in Chinese)
- [8] 金英爱. 不同进气组分发动机燃烧机理及排放特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- JIN Yingai. Combustion and emission characteristics of engines by variable intake-air composition [D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [9] 赵君超. 微波谐振腔测湿系统的研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2005: 36–37.
- ZHAO Junchao. Study on microwave resonant cavity wet system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2005: 36–37. (in Chinese)
- [10] 张淑娥, 赵君超, 李永倩, 等. 空气湿度微波谐振腔测量方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 27–32.
- ZHANG Shue, ZHAO Junchao, LI Yongqian, et al. Method for air humidity measurement based on microwave resonant cavity [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(2): 27–32. (in Chinese)
- [11] 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2000: 1–24.
- SUN Muzhen. Physical basis of dielectrics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2000: 1–24. (in Chinese)
- [12] 钱江波, 韩中合, 张美凤. 汽轮机内湿蒸汽两相流介电性质研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 100–106.
- QIAN Jiangbo, HAN Zhonghe, ZHANG Meifeng. Study on dielectric properties of wet steam in turbine [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(32): 100–106. (in Chinese)
- [13] 范伟, 李慧君, 王丽. 水和蒸汽热力性质 IAPWS-IF97 计算模型的边界条件及方程[J]. 汽轮机技术, 2011, 53(6): 408–411.
- FAN Wei, LI Huijun, WANG Li. The boundary conditions and the equation of thermodynamic properties of water and steam IAPWS-IF97 calculation model [J]. Steam Turbine Technology, 2011, 53(6): 408–411. (in Chinese)
- [14] 宁德亮. 新型电容传感器测量流动湿蒸汽湿度的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 21–29.
- NING Deliang. Study on the measurement of wet steam humidity by new type capacitance sensor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 21–29. (in Chinese)
- [15] 曹玉波, 杨莹, 高洪杰. 工业水蒸汽流量计量中的密度补偿[J]. 吉林化工学院学报, 2009, 26(1): 51–53.
- CAO Yubo, YANG Ying, GAO Hongjie. Density compensation in the measurement of industrial water vapor flow[J]. Journal of Jilin Institute of Chemical Technology, 2009, 26(1): 51–53. (in Chinese)
- [16] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定 (CCAR-33-R2)[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012: 34–36.
- Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations of aeroengine (CCAR-33-R2)[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2012: 34–36. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)